

FABIO FRACAS

IL MONDO SECONDO

LA FISICA QUANTISTICA

Segreti e meraviglie
della scienza
che sta cambiando
la nostra vita

Sperling & Kupfer

Indice

Il libro

L'autore

Frontespizio

Introduzione

Parte prima. Dove si scopre la natura del
mondo

1. Luce: onda o corpuscolo?

Ovvero, la Fisica Quantistica e la
nuova visione del mondo

Una lunga storia

Una prima visione della realtà

Una calorosa parentesi

Sempre a proposito di calore

Un caso fortuito

L'altra visione della realtà
Un'illuminazione quantistica
A volte bisogna arrendersi
Qualcosa è cambiato

2. Due è sempre meglio di uno
Ovvero, perché accontentarsi di
un'unica teoria?

Non tutto è così scontato
Siamo fatti così
Nel mezzo dell'opera
Livelli ed energie
Un passo alla volta
Un quadro completo
L'atomo quantistico
Modelli complementari
Una visione d'insieme

3. La novità di Copenaghen
Ovvero, un'interpretazione della
Meccanica Quantistica
L'altro punto di vista
Una breve precisazione

Verso la complessità

Cosa c'è sotto?

Occhi nuovi per diverse visioni

Gioie, delusioni e conflitti

Presupposti per una nuova
interpretazione

Chiudere il cerchio

Attenti al gatto!

Aggirare l'ostacolo

4. Bohr, Einstein e un po' Higgs

Ovvero, Fisica Quantistica,
Relatività e non solo, a
confronto

Einstein e Bohr: storia di un
rapporto complicato

Una dentro l'altra

Tutto è relativo

Un limite enorme

Un'idea speciale

Che tempo sarà?

Scontro fra titani

Il quinto incomodo

Parte seconda. Dove si raffigurano le
logiche della natura

5. Spazio, ultima frontiera

Ovvero, ancora su gravitoni e
onde gravitazionali

Ripensare lo spazio-tempo

Conferme necessarie

Eppur si muovono

Oltre l'apparenza

Un'idea che viene dal passato

Evoluzione continua

Onde gravitazionali e gravitoni

Ciò che riserva il futuro

6. Questione di dimensioni

Ovvero, scomporre per unificare

Porre le basi

Ma non per caso

Ripartenze necessarie

Una questione forte

Problemi da risolvere

Tutto in uno
Ampliare gli orizzonti
Mettere il punto
Da stringhe a brane
Un rapporto relativo
A completamento

7. Un'azione fuori luogo

Ovvero, così lontani eppure così
vicini

Un problema paradossale

Una nuova prospettiva

Azioni a distanza

Altre implicazioni

Oltre ogni ragionevole dubbio

Ciò che si conosce, ciò che si
riscopre e ciò che si
definisce

Alla ricerca dell'errore

Un altro punto di partenza

Una conclusione imprevedibile

Panorami concreti

Parte terza. Dove ci si interroga sulla realtà

8. Guarire con i quanti

Ovvero, tra quanti, molecole ed energie

Viaggio al centro di noi

Prime considerazioni

Dentro alle dinamiche

Una prima applicazione pratica

Una teoria alternativa

Come si concretizza un'idea

Nascita di una tecnologia

Risultati consolidati e ulteriori possibilità

9. Acqua, questa sconosciuta

Ovvero, misteri quantistici nei nostri bicchieri

Non tutto è così semplice

Alcune proprietà dell'acqua...

... e altre ancora

Gli aspetti quantistici

Questione di coerenza

Altre conseguenze dei domini di
coerenza

Un altro punto di vista

Andare oltre

Necessarie precauzioni

10. La Mente Quantica

Ovvero, può il pensiero
modificare la realtà?

Una visione più generale

Cambiare approccio

Dal pensiero alla creatività...

... e alla coscienza

Se cade un albero nella foresta

Convergenze e divergenze

Concetti e paradigmi

Visioni alternative

Note

Le voci degli altri

Ovvero, a tu per tu con i protagonisti

Ringraziamenti

Copyright

Il libro

Questo libro è un'avventura esclusiva e affascinante. Un viaggio, anche nel tempo, alla scoperta di qualcosa di nuovo e di straordinario: la Fisica Quantistica, nelle sue logiche, nelle sue potenzialità, nelle sue applicazioni e nei suoi possibili sviluppi. All'interno del volume vengono ricostruiti passo dopo passo i momenti fondamentali del pensiero quantistico, le questioni su

cui si sono interrogati i più grandi scienziati degli ultimi decenni, e i diversi contesti nei quali si sono evoluti i principali modelli della Meccanica Quantistica. Sullo sfondo delle ricerche più attuali – come per esempio quella sulle onde gravitazionali che ha portato al Nobel per la Fisica 2017 –, vengono indagati anche i rapporti esistenti fra Fisica Quantistica, Relatività Einsteiniana e Teoria delle Stringhe. Inoltre, fra i tanti temi trattati nelle sue pagine, trovano spazio persino le incredibili ricadute che gli studi sulla Fisica Quantistica stanno avendo negli ambiti della medicina e

delle ricerche sul cervello e sulla coscienza.

Esauriente, intrigante, autorevole, Il mondo secondo la Fisica Quantistica – caso unico ed eccezionale – è basato sul confronto diretto con gli scienziati che si occupano degli studi più avanzati e che sono i protagonisti delle ricerche più recenti. Al contempo, grazie alla competenza e alla capacità divulgativa dell'autore, queste pagine affascinano con esempi chiari e illuminanti legati alla vita di tutti i giorni, sorprendono per la completezza dei concetti, svelano il presente e il futuro di una visione rivoluzionaria del mondo.

L'autore



FABIO FRACAS – già

Docente Invitato per la
SISF/ISRE, Scuola

Superiore Internazionale

di Scienze della Formazione, e

Graduate Research Assistant presso

la Florida Atlantic University di Boca

Raton, USA – è docente di Fisica

applicata alla Radioterapia e alla

Radioprotezione presso il

Dipartimento di Medicina dell'Università di Padova. I suoi attuali interessi di ricerca sono rivolti all'interazione fra il cervello e le radiazioni elettromagnetiche e meccaniche. Giornalista e scrittore, è autore di diversi articoli e testi di saggistica.

Hanno contribuito:

Federico Carminati, Giorgio Colangelo, Marco Drago, Vittorio Elia, Enrico Facco, Giuliana Galli Carminati, Roberto Germano, Fabio Roberto Marchetti, Giulio Peruzzi, Augusto Sagnotti, Piergiorgio Spaggiari, Giuseppe Tormen, Gabriele Veneziano.

Fabio Fracas

IL MONDO
SECONDO LA
FISICA
QUANTISTICA

Sperling & Kupfer

«Lo studio, e in generale la ricerca della verità e della bellezza, sono un campo nel quale ci è lecito restare bambini per tutta la vita.»¹

ALBERT EINSTEIN

Introduzione

OGNI libro è un'avventura. Un viaggio, anche nel tempo, alla scoperta di un qualcosa di nuovo che ha il potere di affascinarci e di incuriosirci. Questo libro, in particolare, è un viaggio nella Fisica Quantistica, nelle sue logiche, nelle sue potenzialità, nelle sue applicazioni e nei suoi possibili – e auspicabili – sviluppi. E come un

viaggio è stato pensato e realizzato.

Fra le sue pagine è possibile scegliere diversi percorsi. Si possono leggere tutti i dieci capitoli che lo compongono uno di fila all'altro, e ricostruire passo dopo passo gli sviluppi storici e scientifici del pensiero quantistico. Oppure si possono affrontare le tre parti in cui è suddiviso in momenti diversi, non necessariamente nell'ordine. Chi desidera approfondire il contesto in cui si sono evoluti i principali modelli della teoria dei quanti può iniziare dalla Parte prima. Chi invece è più interessato ai rapporti

esistenti fra Meccanica Quantistica, Relatività Einsteiniana e Teoria delle Stringhe può scoprirli direttamente nella Parte seconda. Chi infine è appassionato alle ricadute che la Fisica Quantistica sta avendo negli ambiti della medicina e degli studi sul cervello e sulla coscienza può cominciare dalla Parte terza. E da lì, naturalmente, procedere come preferisce nella lettura.

Non solo. Ciascun capitolo è strutturato come un tragitto a sé stante. Un'escursione, completa e immersiva, in un tema specifico. Si può decidere di costruire il proprio

personale itinerario passando da un capitolo all'altro sulla base dell'interesse del momento o dei rimandi che, come un fil rouge, li collegano fra loro. Non esiste un unico approccio a questo testo, perché il viaggio della conoscenza ha nella parola «libertà» la propria spinta propulsiva.

Tutto ciò che è stato scritto in questo libro è basato sul confronto diretto che ho avuto con gli scienziati che si occupano degli studi proposti e che sono i protagonisti delle ricerche testimoniate. Ho scelto di presentare i vari materiali in forma

divulgativa senza sacrificare in alcun modo la correttezza delle informazioni. Un approccio che ha richiesto un impegno notevole nel tentativo, mi auguro riuscito, di rendere chiari e comprensibili anche i concetti più complessi. Per questo motivo, tutti i miei compagni di viaggio si sono prestati a rileggere, revisionare e integrare – anche più volte – le rispettive parti di competenza. Da questo punto di vista, è stato un lavoro corale che mi ha permesso di approfondire i principali temi della Meccanica Quantistica, nel tentativo di fare chiarezza fra i tanti interrogativi che

suscita attualmente questo affascinante argomento.

Ma c'è di più. Nel libro che state per leggere, sempre grazie alla collaborazione degli scienziati e dei ricercatori che mi hanno concesso la loro fiducia, sono riuscito a inserire le ricerche più recenti e i risultati più innovativi ottenuti nei diversi ambiti di studio. Alcuni dati, come quello relativo all'eventuale massa limite del gravitone, sono stati resi pubblici solo nel giugno di quest'anno; altri addirittura lo scorso agosto. Alcune evidenze sperimentali, come quelle proposte da Vittorio Elia, vengono divulgate

per la prima volta proprio all'interno di questo testo, e molti altri contributi, come quello di Giorgio Colangelo sull'entanglement, fanno riferimento a pubblicazioni scientifiche non ancora disponibili.

Anche per me è stato un viaggio. Un viaggio appassionante e coinvolgente che mi ha consentito di espandere un altro poco i confini delle mie conoscenze e di ritrovarmi ancora una volta meravigliato dall'intrinseca bellezza e dall'imperscrutabilità della natura. Una natura forse «assurda» – come amava ripetere Richard Phillips Feynman –, capace di sorprenderci

in ogni istante e di obbligarci ad ammettere che la strada verso la comprensione dell'universo si snoda infinitamente davanti a noi. E che l'unica possibilità che abbiamo per percorrerla consiste nel caricarci umilmente sulle spalle lo zaino dei nostri limiti e procedere passo dopo passo, con la speranza che qualcun altro, un giorno, seguendo le nostre tracce riesca ad arrivare leggermente più lontano.

PARTE PRIMA

Dove si scopre la natura del
mondo

Luce: onda o corpuscolo?

Ovvero, la Fisica Quantistica e la nuova visione del mondo

Cosa c'è dietro? Come spesso accade, la nascita di una nuova teoria coincide con il bisogno di superare i limiti di quelle che la precedono. Nel caso della Fisica Quantistica, il cercare di definire esattamente cosa sia la luce – quella stessa luce che tutti noi usiamo ogni giorno, anche per leggere un libro – ha portato i fisici della fine dell'Ottocento a scontrarsi con una realtà apparentemente assurda: la luce non ha un'unica e ben definita natura!

Perché è importante? Perché è un problema enorme anche al giorno d'oggi e costituisce la base per tutte le successive speculazioni sulla Fisica Quantistica. Inoltre nel 2015 ulteriori scoperte hanno condotto i ricercatori a confrontarsi nuovamente con la complessa e affascinante natura della luce.

COSA c'è di più conosciuto e familiare della luce? Tutti noi, fin da bambini, viviamo la luce come una componente «scontata» della nostra vita, e in effetti è così. La luce del Sole scandisce i diversi momenti delle nostre giornate, dal risveglio al riposo notturno, e quella

artificiale ci accompagna in tutte le nostre attività. Basta premere l'interruttore e l'angolo più buio della cantina rivela tutti i tesori che contiene; un semplice clic del pulsante dell'abat-jour trasforma la camera da letto in un luogo ideale per la lettura e una torcia elettrica tascabile, col suo fascio luminoso, ci consente di muoverci con sicurezza anche nell'oscurità più completa. Eppure, la luce – in sé – non è per nulla scontata e lo studio della sua natura fisica – cioè, di com'è fatta e di quali elementi la costituiscano – è alla base della più grande rivoluzione della fisica moderna: la

Teoria Quantistica.

Una lunga storia

L'interesse degli uomini per la luce nasce agli albori stessi della civiltà ed è indissolubilmente legato al calore del fuoco che, fin dai tempi antichi, veniva utilizzato per produrla. Al giorno d'oggi, non abbiamo più bisogno di accendere torce o bracieri per illuminare le stanze in cui viviamo, ma ciononostante tutti noi, a livello istintivo, sappiamo che qualsiasi corpo sufficientemente riscaldato produce allo stesso tempo calore e luce. Anche questo tipo di conoscenza ci appare scontata, eppure il meccanismo che regola la

produzione di calore e di luce – o meglio, l'irraggiamento del calore e della luce – è rimasto sconosciuto nei suoi intimi particolari fino ai primi anni del Novecento. Fino, cioè, all'intervento di due delle menti più limpide e coraggiose di sempre: quella di Max Planck e quella di Albert Einstein.

Prima di quella data e dei risolutivi contributi dei due geni tedeschi, sulla natura della luce esistevano due teorie principali, entrambe sviluppate quasi contemporaneamente tra la fine del XVII secolo e l'inizio del XVIII secolo. La prima, sostenuta dal

fisico olandese Christiaan Huygens, proponeva di trattare la luce in maniera analoga al suono, definendo così delle onde luminose che si muovevano nell'aria. La seconda, proposta dallo scienziato inglese Isaac Newton, considerava invece i raggi luminosi come costituiti da piccoli corpuscoli di materia che si muovevano in linea retta. Le due teorie, chiamate rispettivamente Teoria Ondulatoria e Teoria Corpuscolare, non erano solamente diverse ma proponevano, ciascuna, una precisa interpretazione della realtà. Soprattutto, a prima vista, erano

assolutamente inconciliabili fra loro.

Per chiarire meglio questi concetti possiamo ricorrere a un paio di semplici esempi. Immaginiamo di trascorrere una rilassante giornata in riva a un lago o comunque vicino a uno specchio d'acqua. Se non c'è vento e non ci sono correnti subacquee, la superficie apparirà perfettamente liscia e immobile. A questo punto, prendiamo un sasso e lanciamolo nell'acqua. Se osserviamo bene quello che accade, notiamo che a partire dal punto in cui il sasso tocca la superficie si originano una serie di onde concentriche. L'altezza

delle onde è maggiore vicino al punto d'impatto e diminuisce un po' alla volta, a mano a mano che queste si allontanano verso l'esterno. Il motivo per cui l'altezza delle onde, cioè l'ampiezza del fenomeno, diminuisce è legato alle interazioni e alle resistenze che si creano all'interno dell'acqua. Ciò che però a noi interessa realmente è vedere come le onde si muovono a partire dal punto iniziale: quello dove è caduto il sasso. Ecco, in questo caso possiamo parlare di movimento ondulatorio – quello delle onde – e di conseguenza di Teoria Ondulatoria.

Per visualizzare la Teoria Corpuscolare, invece, possiamo pensare a un rubinetto aperto dal quale scorre un getto continuo d'acqua. Se chiudiamo lentamente il rubinetto, il getto si fa sempre più debole fin quando, a un certo punto, cominciano a cadere delle singole gocce. Ciascuna goccia può essere considerata come uno dei corpuscoli che, nel loro insieme, costituiscono l'intero flusso d'acqua.

Le due teorie potevano essere utilizzate per comprendere alcuni dei comportamenti osservabili della luce, ma nessuna delle due riusciva a spiegarli contemporaneamente

tutti. Per questo motivo, fino agli inizi del XIX secolo, entrambe convissero, nell'attesa che venisse formulata una nuova teoria capace di fornire una migliore interpretazione della realtà.

Nel 1801, un nuovo esperimento fece pendere l'ago della bilancia decisamente in favore della Teoria Ondulatoria della luce. Quell'anno, il ventottenne fisico e scienziato inglese Thomas Young realizzò in laboratorio un'apparecchiatura piuttosto semplice. Prese una sorgente luminosa e la nascose dietro un pannello sul quale aveva praticato un minuscolo foro.

Davanti al pannello, a una certa distanza, pose uno schermo opaco sul quale aveva ricavato due piccole fenditure rettangolari parallele. Dietro allo schermo opaco, infine, sistemò un'ultima superficie bianca come bersaglio. L'idea era quella di far passare un singolo raggio luminoso attraverso le due fenditure per osservare il gioco di luci e di ombre che sarebbe stato proiettato sul bersaglio finale. Young si aspettava di vedere un'area interamente in ombra con due sole strisce di luce evidenziate in corrispondenza delle due fenditure. Ma non fu quello che

trovò.

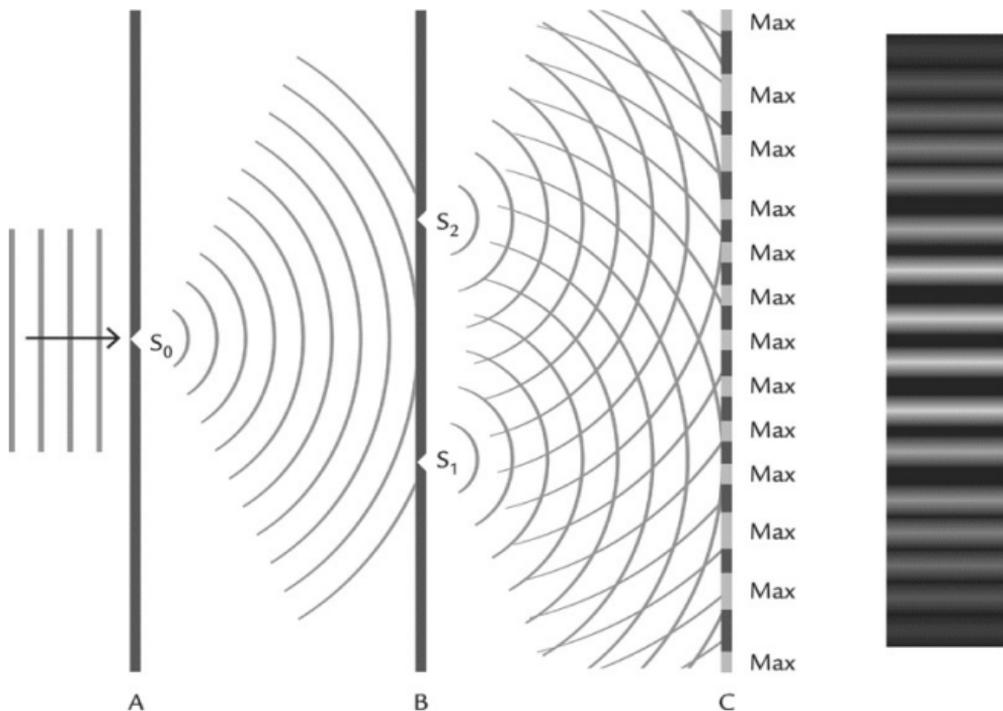


Figura 1. L'esperimento di Young.

Sul bersaglio, infatti, non apparivano due sole strisce luminose, bensì una serie di bande chiare e di bande scure, alternate

fra loro. Young, dopo un'iniziale momento di perplessità, riuscì a spiegare questo risultato ricorrendo a un particolare fenomeno fisico chiamato interferenza: la sovrapposizione, in un punto qualsiasi dello spazio, di due o più onde differenti. Quella che si vedeva sul bersaglio era proprio una figura di interferenza, e poiché c'era interferenza, ciò significava che la luce doveva essere composta da onde.

L'esperimento di Young, passato alla storia come Esperimento della doppia fenditura o Interferenza da doppia fenditura, lasciava poco

spazio a ulteriori dubbi sulla natura della luce, e si coniugava perfettamente con le nuove teorie sulla termodinamica e sulla correlazione tra l'elettricità e il magnetismo che si stavano iniziando a sviluppare proprio in quegli anni. Teorie che raggiunsero il proprio pieno sviluppo verso la metà del XIX secolo grazie ai lavori di scienziati del calibro di Lord William Thomson, I barone di Kelvin, di James Prescott Joule, di Rudolf Clausius, di Michael Faraday, di James Clerk Maxwell e di molti altri ancora.

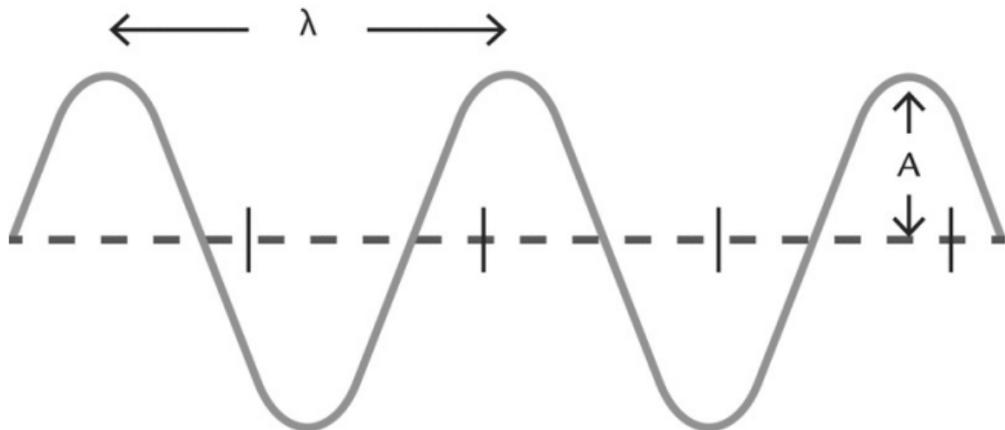


Figura 2. Rappresentazione semplificata di un'onda periodica.

Una prima visione della realtà

Quando si fa riferimento alla natura ondulatoria della luce si intende dire che un fascio luminoso può essere rappresentato come un'onda periodica che si muove – o meglio, che si propaga – mantenendosi sempre uguale a se stessa sia nello spazio sia nel tempo. Per capire cos'è concretamente un'onda periodica, indipendentemente da ciò che l'ha originata, è utile proporre un semplice disegno (vedi Figura 2).

Come si vede chiaramente,

un'onda periodica è un susseguirsi nello spazio e nel tempo di un'oscillazione che si muove fra un punto minimo, chiamato valle, e un punto massimo, chiamato cresta. Di conseguenza, ogni onda periodica può essere rappresentata graficamente tramite le due principali grandezze raffigurate nel grafico: λ , ovvero la lunghezza d'onda, e A , cioè l'ampiezza d'onda. Se riprendiamo l'esempio delle onde create dal sasso nello specchio d'acqua, λ misura la distanza che intercorre fra due creste consecutive concentriche, mentre A è la misura dell'intensità,

cioè dell'altezza, di ciascuna cresta. Esistono, però, altre due grandezze di cui bisogna assolutamente tenere conto: il periodo e la frequenza. Il periodo corrisponde al lasso di tempo necessario perché una cresta si trovi nell'esatta posizione di quella che la precedeva. In pratica, è l'intervallo di tempo della lunghezza d'onda. Per capire invece cos'è la frequenza, basta contare il numero di creste che l'onda produce in un secondo. Se il nostro sasso genera cinque onde ogni secondo, la frequenza dell'onda prodotta sarà pari a 5 Hz. Hz, abbreviazione del cognome del fisico tedesco Heinrich

Rudolf Hertz, è proprio l'unità di misura della frequenza. Com'è facile intuire, frequenza e lunghezza d'onda sono inversamente proporzionali fra loro: più alta è la frequenza, più corta è la lunghezza d'onda; più bassa è la frequenza, più lunga è la lunghezza d'onda.

Definire le grandezze fisiche associate alle onde è indispensabile per capire quali sono gli elementi che caratterizzano la propagazione della luce dal punto di vista della Teoria Ondulatoria, ma non è sufficiente. Rimane, infatti, un problema: cos'è che si muove come un'onda? Ovvero, dato che in base

all'esperimento di Young la luce ha una natura ondulatoria, di cosa sono costituite concretamente le onde luminose?

Per rispondere a questa domanda bisogna tornare col pensiero verso la fine del XIX secolo, cioè al periodo del massimo sviluppo di quella che adesso definiamo fisica classica. Oggi per noi è facile dare etichette e indicare un tipo di fisica come quantistica e un altro come relativistica, facendo riferimento alle rispettive, differenti, teorie. Allora, però, non era così. Esisteva un'unica fisica, mentre erano diversi gli ambiti di

applicazione: dall'acustica alla meccanica, dall'ottica alla gravità Newtoniana, dall'elettricità al magnetismo e così via. Eppure, come già accennato, nell'Ottocento cominciarono i primi innovativi studi capaci di mettere in relazione fra loro i diversi ambiti della fisica e in particolare, grazie soprattutto alle equazioni di Maxwell, definite nel 1864, l'elettricità con il magnetismo. E di conseguenza, come vedremo tra poco, con la luce.

Per comprendere come l'elettromagnetismo e la natura della luce siano intimamente

connesse fra loro, devo necessariamente introdurre un ulteriore, fondamentale, concetto: quello di spettro. Quando ero un giovane studente delle superiori, ricordo che rimasi molto colpito dalle implicazioni di questa definizione che, prima di quella particolare lezione di fisica, avevo semplicemente dato per scontata. Era un giorno qualsiasi dell'ultimo anno del Liceo Scientifico e io stavo per essere interrogato proprio sulle equazioni di Maxwell. Dato che avevo collezionato molte assenze per una fastidiosa malattia che mi aveva tenuto lontano dai banchi di

scuola per parecchie settimane, non ero certo di avere una preparazione adeguata, e così mi ero messo a ripassare velocemente i vari concetti prima che l'insegnante entrasse in classe e cominciasse la lezione.

Naturalmente, la prima domanda che mi venne fatta fu proprio sullo spettro: su cosa fosse e sul perché risultasse essere così importante. Io, che avevo appena riletto tutto l'argomento, cominciai subito a rispondere riempiendo la lavagna di formule e concentrandomi solo sui simboli che stavo tracciando. A un tratto, l'insegnante mi fermò,

guardò la lavagna e mi chiese nuovamente cosa fosse lo spettro.

Sul momento non capii perché mi stesse rifacendo la stessa domanda, ma osservando quello che avevo scritto mi resi conto che aveva ragione: non le stavo rispondendo. O meglio, la risposta era nelle formule ma avrei dovuto renderla evidente in modo semplice perché se ne potesse capire la reale importanza. Lo spettro, realizzai, è semplicemente lo spettro delle onde emesse, cioè irradiate, dall'energia del campo elettromagnetico. In parole ancora più semplici, ogni carica elettrica

variabile nel tempo genera un campo elettromagnetico che si propaga nello spazio sotto forma di onde elettromagnetiche. Quindi, lo spettro non è altro che la carta di identità della radiazione elettromagnetica. Una carta di identità dove al posto del nome e del cognome ci sono la lunghezza d'onda e l'ampiezza dell'onda periodica associata.

Ancora oggi, ripensando a quell'episodio, mi rendo conto che uno dei problemi principali legati alla comprensione della fisica – e di conseguenza, della visione del mondo che essa offre – deriva dal

fatto che spesso non si riesce a comunicare efficacemente la grande semplicità dei concetti che sono alla base anche delle formulazioni più complesse. È compito di chi la insegna e di chi si occupa della sua divulgazione – anche mio, quindi – cercare di superare questo scoglio, offrendo a studenti e lettori delle chiavi di interpretazione il più possibile semplici e dirette. A volte si può rischiare di cadere in qualche approssimazione, ma è un prezzo che vale la pena pagare se serve per rendere meno ostici principi completamente estranei all'approccio quotidiano alla realtà.

Nel 1864, Maxwell aveva fatto un lavoro analogo: grazie alle sue formule – che riprendevano, integrandoli e completandoli, i risultati precedentemente ottenuti da altri fisici – aveva fornito una nuova chiave per interpretare la natura della luce. Un risultato stupefacente, perché non solo riuniva fra loro gli studi sull'elettricità e sul magnetismo originando la nuova branca dell'elettromagnetismo classico, ma andava molto oltre. Grazie alla definizione dello spettro elettromagnetico, infatti, Maxwell aveva reso possibile spiegare cosa

fosse la luce in riferimento alla Teoria Ondulatoria, e perché all'emissione della luce fosse sempre legata anche quella del calore.

Ogni sorgente luminosa, infatti, emette una radiazione elettromagnetica composta da un ampio spettro di onde con differenti lunghezze d'onda. Alcune di queste ricadono all'interno delle lunghezze d'onda visibili, creando così la luce vera e propria: la sequenza di colori che va dal rosso al violetto e che comunemente chiamiamo spettro ottico o spettro visibile. Altre, invece, ricadono in una fascia di

lunghezze d'onda differenti –
un'altra banda di frequenze –
associate alla produzione di calore.

Semplice, diretto, pulito. Forse.

Una calorosa parentesi

L'interpretazione della luce come onda elettromagnetica che si propaga irradiando nello spettro del visibile soddisfa perfettamente i requisiti della Fisica Classica e quelli della Teoria Ondulatoria. Eppure, anche verso la fine dell'Ottocento, non tutti ne erano così fermamente convinti. E fra questi c'era anche Ludwig Boltzmann.

Boltzmann, che già nel 1899 era considerato uno dei massimi fisici teorici, era nato a Vienna nel 1844 e si era costruito una solida reputazione nell'ambito della termodinamica, la branca della

fisica che studia le trasformazioni del calore in energia lavoro e viceversa. Boltzmann era un deciso sostenitore della Teoria Corpuscolare e Atomistica. Inoltre era fermamente convinto «che le proprietà dei gas, come la pressione, fossero manifestazioni macroscopiche di fenomeni microscopici governati dalle leggi della meccanica e della probabilità». ¹

In realtà l'idea di ricorrere alla probabilità, quindi alla statistica, per descrivere le proprietà dei gas era stata, nel 1860, un'altra delle incredibili intuizioni di un Maxwell

all'epoca appena ventinovenne. Boltzmann, però, aveva saputo farne tesoro. Anzi, era stato in grado di vedere oltre sviluppando un'interpretazione statistica del Secondo Principio della termodinamica.

A questo punto, può sembrare strano che per parlare della natura della luce si debba menzionare il lavoro di Boltzmann sui gas. Bisogna però ricordare che la radiazione luminosa trasporta anche calore: basta mettere la mano su una lampadina accesa – non fatelo: è solo un esempio! – per rendersene immediatamente

conto.

Tornando al Secondo Principio della termodinamica, quello che stabilisce – nell'iniziale formulazione del fisico tedesco Rudolf Clausius – può apparire come un semplice esercizio di buon senso: il calore non fluisce spontaneamente da un corpo freddo a uno più caldo. In effetti, anche nella nostra esperienza di ogni giorno, quello che notiamo è che il calore passa sempre da un corpo più caldo a uno più freddo e non viceversa. Inoltre, bisogna tenere anche conto che in natura esistono due differenti tipi di

trasformazioni: le trasformazioni reversibili – che prevedono la possibilità di ritornare agli stati originali –, e le trasformazioni irreversibili.

Nel 1865, Clausius introdusse un'ulteriore, fondamentale definizione: quella di entropia. Con questo termine veniva indicato il rapporto esistente fra la quantità di calore in entrata o in uscita da un sistema e la temperatura alla quale si verificava lo scambio termico. Inserendo il concetto di entropia all'interno del Secondo Principio della termodinamica, è possibile affermare che una trasformazione

può avvenire solo se l'entropia del sistema aumenta. Una trasformazione, inoltre, risulta reversibile unicamente quando non si ha alcuna variazione di entropia fra il sistema iniziale e quello finale. Situazione che si può verificare esclusivamente nei sistemi ideali.

Facciamo qualche esempio: se d'inverno accendiamo il riscaldamento del nostro appartamento, quello che ci aspettiamo è che la temperatura delle stanze aumenti. E così, infatti, avviene. La differenza di calore fra i termosifoni e l'aria fredda fa sì che quest'ultima si riscaldi, e il processo

comporta un aumento generale dell'entropia. Il caso contrario, quello classico del frigorifero, prevede invece che gli elementi di un sistema vengano raffreddati così come le pietanze che desideriamo conservare. Se ci pensiamo bene, però, il frigorifero funziona solo se collegato alla rete elettrica. È l'elettricità, infatti, che compie il lavoro necessario a sottrarre calore ai cibi, permettendo al Secondo Principio della termodinamica di mantenere inalterata la propria validità.

Ora, tornando a Boltzmann e alla sua interpretazione statistica, la sua

teoria prevedeva che l'entropia fosse collegata al disordine e di conseguenza che l'entropia corrispondesse direttamente alla probabilità di trovare un sistema in uno specifico stato. Una differenza sottile che introduceva una possibilità nuova e sconvolgente, per il pensiero dell'epoca: quella che un sistema, in particolari circostanze, evolvesse verso uno stato con entropia minore. Come a dire, riprendendo gli esempi di prima, che accendendo il riscaldamento le stanze potessero raffreddarsi oppure che il frigorifero funzionasse senza essere attaccato

alla presa di corrente.

Entropia, visione corpuscolare e approccio statistico, uniti fra loro, portavano al paradosso che il Secondo Principio della termodinamica potesse essere violato. E questo i fisici dell'epoca, in particolare Max Planck, non potevano in alcun modo accettarlo. O meglio, non avrebbero voluto accettarlo.

Sempre a proposito di calore

La Fisica Quantistica riscuote una così forte attenzione, anche da parte di persone che mai si sarebbero interessate alla fisica classica, perché ha l'innegabile fascino di sconvolgere tutte le nostre conoscenze, tutto ciò che diamo per scontato. Lo stesso Niels Bohr, uno dei padri della Teoria Quantistica, pronunciò in più di un'occasione la seguente frase: «Se la Meccanica Quantistica non vi ha profondamente sconvolto, allora significa che non l'avete capita».

Essere sconvolti dalla Fisica Quantistica, oggi, può essere considerato «accettabile», ma all'alba del XX secolo, quando ancora non esisteva neanche l'idea di quanto, cosa poteva scioccare così profondamente un fisico classico? Per esempio, il dover ricorrere proprio alla Teoria Corpuscolare e alla previsione statistica di Boltzmann – mettendo, quindi, in discussione il Secondo Principio della termodinamica – per risolvere un problema connesso al comportamento della luce.

In realtà, il «problema» era sempre lo stesso: la relazione fra la

luce e il calore; o più precisamente la relazione esistente fra il colore della luce emessa da un corpo e la sua temperatura. Era già noto nella pratica di molti mestieri, e in particolare nella siderurgia, che tutti i corpi riscaldati alla stessa temperatura emettono una luce del medesimo colore. Nel 1859, però, la legge fisica che regolava questo processo era ancora sconosciuta.

Quell'anno, un altro fisico tedesco, Gustav Robert Kirchhoff, decise di indagare la correlazione tra temperatura e colore teorizzando un dispositivo in grado di assorbire tutto il calore a cui

veniva sottoposto e di emettere, successivamente, un unico fascio di luce colorata. Concretamente, questo dispositivo ideale poteva essere un semplice recipiente sferico cavo dotato di un minuscolo foro praticato in una parete. Per Kirchhoff era la chiave utile a ricavare una formula che potesse predire la quantità di energia irradiata dal corpo – o meglio, la distribuzione spettrale dell'energia associata a ciascuna lunghezza d'onda – per qualsiasi temperatura.

Per comprendere al meglio quanto appena scritto, è necessario fare una breve riflessione. Come

abbiamo avuto modo di vedere qualche pagina fa, sia il calore sia la luce sono delle radiazioni elettromagnetiche che si differenziano fra loro unicamente per il valore della lunghezza d'onda che le caratterizza. Pensare che il calore e la luce abbiano la stessa natura fisica può sembrare strano, ma nella realtà persino le onde radio, le microonde – sì, quelle che usiamo per cucinare –, i raggi X, i raggi cosmici e così via sono tutte radiazioni elettromagnetiche con differenti lunghezze d'onda.

Vi ricordate il concetto di spettro? Lo abbiamo definito –

qualche pagina fa – come l'insieme delle onde irradiate dall'energia del campo elettromagnetico. Bene, lo spettro elettromagnetico nella sua estensione comprende radiazioni che vanno da lunghezze d'onda superiori al chilometro a radiazioni con lunghezze d'onda inferiori a un miliardesimo di millimetro! Un intervallo enorme, al cui interno si trova anche la banda dello spettro visibile: quella che va, all'incirca, da 400 a 700 milionesimi di millimetro. Sotto i 380 nanometri – è un altro modo di dire milionesimo di millimetro – si ha l'ultravioletto; sopra i 720 nanometri si ha

l'infrarosso.

E il calore? Il calore può essere considerato come una radiazione termica: una radiazione elettromagnetica emessa da un corpo quando questo viene portato a una specifica temperatura. Avete presente le stufette a infrarossi che vengono installate nelle saune e negli appartamenti? In quel caso, il calore viene generato dalla emissione di una radiazione elettromagnetica nello spettro dell'infrarosso. Anche la nostra lampadina accesa – sempre quella che non bisogna toccare – genera calore nel momento in cui produce

una radiazione elettromagnetica nello spettro visibile e nelle lunghezze d'onda infrarosse, immediatamente vicine. Naturalmente, il forno a microonde è l'applicazione più evidente di questo concetto.

Per avere un'idea più chiara dello spettro elettromagnetico, ve ne propongo una rappresentazione grafica (vedi Figura 3).

Ora che sappiamo esattamente com'è fatto lo spettro elettromagnetico e quali bande di lunghezze d'onda lo compongono, possiamo tornare agli esperimenti mentali del trentaquattrenne

Gustav Kirchhoff.

Lo strumento pensato dall'intraprendente fisico teorico era sia un assorbitore sia un emettitore ideale di radiazione; per questo motivo Kirchhoff stesso gli diede il nome di corpo nero. Un assorbitore perfetto, infatti, non riflette alcun tipo di radiazione luminosa e appare completamente nero a un qualunque osservatore. L'emissione avveniva attraverso il forellino praticato sulla parete. Grazie a quel foro, la radiazione presente all'interno del corpo nero poteva fuoriuscire liberamente, mostrando un campione di tutte le lunghezze

d'onda presenti all'interno del contenitore.

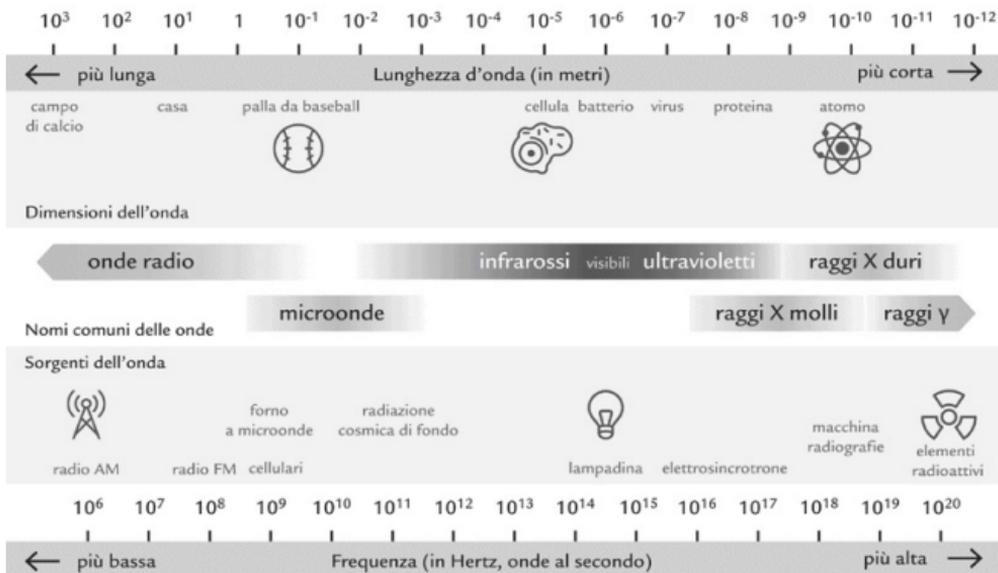


Figura 3. Spettro della radiazione elettromagnetica.

Pur non svolgendo alcun esperimento pratico, Kirchhoff riuscì a stabilire che la banda e l'intensità della radiazione elettromagnetica che si veniva a produrre all'interno

del corpo nero non dipendevano né dalla forma né dal materiale con cui era stato realizzato lo strumento, bensì unicamente dalla sua temperatura. Inoltre affermò che la legge che avrebbe stabilito la relazione fra la temperatura del corpo nero e la lunghezza d'onda della radiazione emessa attraverso il foro non avrebbe potuto contenere altri elementi. Un'intuizione geniale che sarebbe stata poi confermata nel volgere di pochi anni.

Un caso fortuito

Risolvere il problema del corpo nero non era solo un intrigante passatempo per i fisici teorici, ma costituiva anche una necessità dal punto di vista pratico. A fine Ottocento, infatti, sia le industrie nazionali sia la comunità scientifica internazionale stavano cercando di aumentare l'efficienza delle lampadine elettriche. Trovare la giusta relazione fra calore ed emissione luminosa era l'unica strada percorribile.

Nel 1881, a Parigi, si svolse il primo Congresso internazionale per la determinazione delle unità

elettriche.² L'incontro, realizzato all'interno dell'Esposizione Internazionale di Elettricità sancì, fra le altre risoluzioni, l'adozione del sistema di misurazione CGS, acronimo che sta per centimetri, grammi e secondi. Fu un momento fondamentale per la storia della fisica, non solo perché vi parteciparono duecentocinquanta delegati di ventotto differenti nazioni, ma perché, al termine delle giornate di studio, paradossalmente non venne raggiunto alcun accordo su quale dovesse essere la definizione del campione di luminosità. Non era una questione

di poco conto, dato che vi era collegata la possibilità di creare luce artificiale con procedure più efficienti dal punto di vista energetico e soprattutto più economiche.

Per superare lo stallo che si era venuto a creare, la Germania, grazie anche all'aiuto fattivo dell'industriale Werner von Siemens – l'inventore della dinamo elettrica – decise di investire pesantemente in questo tipo di ricerche, e nel 1887 fondò il PTR, Physikalisch-Technische Reichsanstalt: l'Istituto Imperiale di Fisica e Tecnologia. L'obiettivo dichiarato della nuova

struttura, fra gli altri, era definire un'unità internazionale di misura per la luminosità. Per riuscirci, però, sarebbe stato necessario stabilire con la massima precisione lo spettro di emissione di un corpo nero ideale. Solo in questo modo, infatti, si sarebbe potuto avere un parametro di riferimento oggettivo per valutare la resa luminosa delle lampadine.

Nel 1893, Wilhelm Wien, un giovane fisico che partecipava agli studi sul corpo nero che si svolgevano presso il PTR, riuscì a stabilire che se la temperatura di un corpo nero aumentava, la

lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica emessa diventava proporzionalmente inferiore. Questa fondamentale scoperta, che nel 1899 prese il nome di Legge di Spostamento,³ permise di stabilire che il prodotto fra la lunghezza d'onda corrispondente alla massima quantità di radiazione emessa (λ_{\max}) e la temperatura (T) del corpo nero in quel momento è pari a una costante (b):

$$\lambda_{\max} \cdot T = b$$

In base alla Legge di Wien, sarebbe bastato calcolare il valore di quella costante per poter riuscire a determinare uno qualsiasi dei due

parametri in gioco – la lunghezza d'onda o la temperatura del corpo nero – conoscendo solo l'altro.

Wien, che era un semplice assistente del più noto ricercatore Otto Lummer – nel 1911 sarebbe stato insignito del Nobel per la fisica proprio per questi suoi studi –, presentò il proprio lavoro sotto forma di comunicazione privata, chiedendo a Lummer e ai suoi collaboratori di realizzare nuove prove di laboratorio con strumenti sempre più precisi per verificarlo. Lo stesso Lummer, assieme al collega Ernst Pringsheim, presentò i risultati dei propri esperimenti il 3 febbraio

1899 a Berlino, durante una riunione della Società Tedesca di Fisica. In quell'occasione, fra il pubblico, c'era anche l'uomo che, senza volerlo, avrebbe dato il via alla rivoluzione quantistica: Max Planck.

L'altra visione della realtà

Osservandolo mentre si recava a tenere le lezioni ai propri studenti dell'Università di Berlino, nel 1899, Max Planck sarebbe potuto sembrare solo un anonimo insegnante di mezza età. Nato nel 1858 a Kiel, nella propaggine settentrionale della Germania, Planck indossava frequentemente un abito scuro con una camicia bianca inamidata e una cravatta nera a farfalla: una tenuta distinta che si abbinava perfettamente all'immagine di uomo conservatore e reazionario che si era costruito negli anni. Planck, infatti, aderiva

integralmente alla visione ottocentesca della fisica, in particolare all'ipotesi della natura ondulatoria della luce. Un'ipotesi che lui stesso, di lì a poco, avrebbe contribuito a distruggere.

Planck era affascinato dalla Legge di Wien e dai risultati che erano stati presentati da Lummer e Pringsheim, e lo era per due motivi ben precisi. Il primo consisteva nel fatto che lui stesso, a partire dal 1896, aveva tentato di dare un fondamento teorico inoppugnabile alla Legge di Wien, tant'è che alcuni fra i suoi colleghi l'avevano rinominata Legge di Planck-Wien. Il

secondo motivo, invece, era molto più profondo. Planck credeva che la determinazione teorica delle distribuzioni spettrali connesse alla radiazione di corpo nero permettesse di stabilire un nuovo principio assoluto della fisica. Ne era così convinto da affermare che «i limiti di validità della Legge di Wien, sempre ammesso che ce ne siano, coincidono con quelli del Secondo Principio della termodinamica». ⁴

Può sembrare una considerazione ovvia, ma non sempre le situazioni evolvono nel modo in cui noi ce lo aspettiamo.

Nella vita quotidiana, quando succede, siamo tenuti a prenderla con filosofia: sono cose che capitano. Nella vita professionale, invece, un'evoluzione inaspettata può creare molti disagi, o addirittura obbligarci a modificare radicalmente le nostre posizioni. Planck era un fisico classico convinto, un fermo sostenitore della Teoria Ondulatoria sulla natura della luce, che sia l'esperimento di Young sia la teoria elettromagnetica di Maxwell avevano confermato.

Per queste sue convinzioni era anche in netta contrapposizione con

l'approccio corpuscolare e con l'ipotesi probabilistica portata avanti da Boltzmann, e sosteneva l'assoluta validità del Secondo Principio della termodinamica. Ecco perché, quando nel 1899 Lummer e Pringsheim presentarono i risultati ottenuti in laboratorio, non considerò eccessivamente preoccupanti quelle piccole discrepanze che i due studiosi avevano ottenuto in alcune misurazioni nella banda spettrale dell'infrarosso.

Nell'ottobre di quello stesso anno però Lummer e Pringsheim ammisero che quelle che qualche

mese prima avevano definito come discrepanze erano invece vere e proprie «differenze di carattere sistematico fra la teoria e i risultati sperimentali». ⁵ In altre parole, la Legge di Spostamento andava rivista, ma soprattutto per Planck doveva essere trovata una valida alternativa.

L'anno successivo altri sperimentatori fecero misurazioni sempre più precise sulla radiazione di corpo nero, nel tentativo di smentire le evidenze di Lummer e Pringsheim. Fra questi c'era Heinrich Rubens, un giovane e brillante fisico che viveva e lavorava

a Berlino ed era intimo amico di Planck. Domenica 7 ottobre 1900 Rubens e sua moglie furono invitati a pranzo dalla famiglia Planck. Fu in quell'occasione, ancor prima della presentazione ufficiale dei dati, che Rubens diede a Planck la peggiore notizia possibile: la Legge di Spostamento, ossia la Legge di Wien – o ancora, la Legge di Planck-Wien –, non poteva essere applicata alle radiazioni di corpo nero nella regione dello spettro elettromagnetico degli infrarossi.

Planck ne fu profondamente colpito, e dopo essersi accomiato dagli amici si buttò a capofitto in

cerca di una soluzione teorica del problema. Quella che stava cercando era una nuova formula che consentisse di determinare lo spettro di energia della radiazione di corpo nero e che fosse valida sempre, per qualsiasi lunghezza d'onda. L'indomani mattina la formula era stata scritta, ma Planck non ne era per nulla soddisfatto. Se si fosse dimostrata corretta, infatti, avrebbe implicato che l'unica possibilità fisica per spiegare correttamente la radiazione di corpo nero sarebbe stato ammettere che l'energia venisse scambiata sotto forma di piccoli

pacchetti. Un approccio corpuscolare, quindi, ben distante da tutte le radicate convinzioni dello scienziato tedesco.

La formula era apparentemente molto semplice: l'energia (E) era proporzionale alla frequenza della radiazione (ν) moltiplicata per una costante (h) chiamata inizialmente Costante d'azione:⁶

$$E = h \cdot \nu$$

Questa nuova legge venne subito verificata da Rubens che ne confermò la validità in tutte le regioni dello spettro. Planck decise così di studiarne le necessarie implicazioni teoriche. Il suo scopo

non era solo quello di trasformare una legge nata da esigenze sperimentali in un caposaldo teorico, ma anche quello di scoprire una giustificazione fisica differente che abbandonasse la teoria atomica e che rientrasse nella sua visione continua della materia.

Come oggi ben sappiamo, non ce la fece; anzi, l'unica soluzione che riuscì a trovare per giustificare a livello teorico la propria formula fu quella di applicarvi le tecniche statistiche di Boltzmann. Una dimostrazione inconfutabile di un'apertura mentale senza precedenti. Personalmente, come

fisico, oltre alla genialità ho sempre riconosciuto a Max Planck una straordinaria libertà di pensiero. Più conosco lo studioso più ammiro l'uomo che per perseguire la «verità» non esita ad abbandonare le proprie convinzioni.

Planck riuscì a giustificare l'equazione per cui tutti oggi lo conosciamo supponendo che all'interno del corpo nero vi fossero degli oscillatori – che lui visualizzò come molle attaccate alle pareti interne del contenitore – in grado di assorbire e di conseguenza emettere solo pacchetti definiti di energia. Applicando le ipotesi

probabilistiche di Boltzmann, inoltre, Planck stabilì che il valore energetico di quei pacchetti – cioè delle radiazioni elettromagnetiche – doveva risultare proporzionale alla frequenza di oscillazione delle molle. Era una soluzione molto elegante e allo stesso tempo imprevedibile e imprevista. Una scoperta fondamentale che trasformava la natura stessa della realtà, introducendo il concetto di pacchetto finito di energia: quel quanto – così lo chiamò lo stesso Planck – che avrebbe originato una delle più grandi rivoluzioni della fisica e dello stesso pensiero

umano.

Max Planck rese pubblici i risultati del suo lavoro il 14 dicembre 1900 in una riunione della Società Tedesca di Fisica, presso la Facoltà di Fisica di Berlino, proponendoli nella forma di Ipotesi Quantistica. In cuor proprio, infatti, sperava che qualche altro ricercatore trovasse una soluzione differente al problema del corpo nero. L'anno successivo, però, le continue conferme della Legge di Planck segnarono la nascita della Teoria Quantistica. Una teoria che il suo stesso scopritore, per tutta la vita, sperò che venisse almeno in

parte confutata.

Un'illuminazione quantistica

La scoperta della quantizzazione dell'energia metteva in evidenza come tutte le radiazioni elettromagnetiche – quindi, anche la luce – avessero una natura corpuscolare. Eppure, questa nuova teoria non contraddiceva in alcun modo i risultati dell'esperimento di Young né negava la natura ondulatoria della radiazione luminosa. Inoltre, l'espressione «quanto energetico», se applicata alla luce, risultava fin troppo vaga, dato che Planck non aveva quantizzato il comportamento di ciascun singolo oscillatore teorico

ma aveva lavorato solo sulle probabilità connesse a gruppi di oscillatori fra loro omogenei. Teoria Ondulatoria e Teoria Corpuscolare, quindi, continuavano a convivere, e c'era ancora bisogno di definire esattamente quale fosse la natura della luce. È a questo punto che acquisisce un'importanza fondamentale la seconda figura di scienziato che vi ho preannunciato all'inizio di questo capitolo: quella di Albert Einstein.

La figura di Albert Einstein, il geniale fisico tedesco naturalizzato prima in Svizzera e poi negli Stati Uniti d'America, è ormai entrata di

prepotenza nell'immaginario collettivo. Quasi tutti abbiamo ben presente la celeberrima fotografia in cui fa la linguaccia, e non si contano i capi d'abbigliamento con stampata la formula dell'equivalenza fra l'energia (E) e la massa (m) di un corpo:

$$E = m \cdot c^2$$

Einstein avrà un ruolo fondamentale anche nei prossimi capitoli. In questo momento, quello che ci serve sapere è «solo» che è a lui che nel 1905 si deve la comprensione profonda della natura della luce. E non «solo», in effetti.

Grazie a Planck non c'erano più

dubbi sul fatto che la luce, oltre a una natura ondulatoria, presentasse una struttura quantizzata. Rimanevano però altri problemi da risolvere, per esempio il cosiddetto effetto fotoelettrico. Come già suggerisce la stessa definizione, l'effetto fotoelettrico si verifica quando un fascio di luce, nella banda dell'ultravioletto, colpisce la superficie di un metallo «costringendolo» a emettere elettroni, ovvero le particelle elementari responsabili della conduzione della corrente elettrica e del calore. Le osservazioni sperimentali mostravano che

questa emissione non dipendeva dall'intensità – cioè, dall'energia – del fascio che colpiva la lastra metallica bensì unicamente dalla sua lunghezza d'onda, e quindi dalla sua frequenza.

Il 17 marzo 1905 Albert Einstein, che aveva appena compiuto ventisei anni, lavorava ancora come semplice impiegato presso l'Ufficio Brevetti di Berna; eppure quella mattina scrisse una lettera destinata a cambiare la storia della fisica e dell'umanità. Nel testo, spedito alla redazione degli *Annalen der Physik*, Einstein proponeva un'elegante soluzione dell'effetto

fotoelettrico basata sulla Teoria Quantistica di Planck. Secondo Einstein, dato che gli elettroni sono legati al metallo da una forza di interazione reciproca di natura elettromagnetica, per riuscire a far espellere gli elettroni era necessario vincere questa forza fornendo loro – in un'unica somministrazione – una sufficiente quantità di energia. E poiché Planck aveva dimostrato che l'energia era proporzionale alla frequenza e non all'intensità della radiazione, la soluzione di Einstein era perfettamente allineata con i risultati sperimentali.

Dal punto di vista del fascio luminoso, però, il fatto che fornisse agli elettroni una quantità precisa di energia – variabile con la frequenza della radiazione elettromagnetica – significava che la luce stessa doveva essere costituita da un flusso di particelle: i quanti di luce. Quegli stessi quanti di luce che noi adesso, sfruttando il termine coniato dal fisico ottico Frithiof Wolfers ventuno anni dopo, chiamiamo semplicemente fotoni.⁷

È arrivato il momento di un'altra piccola riflessione che ci tornerà molto utile quando, nelle prossime parti di questo volume,

affronteremo i concetti quantistici relativi allo spazio e al tempo. Il 1905 viene da tutti gli studiosi ricordato come l'annus mirabilis di Einstein perché, dal 18 marzo al 27 settembre, sugli Annalen der Physik vennero pubblicati ben quattro suoi lavori: sull'effetto fotoelettrico, sul moto Browniano – i movimenti disordinati delle particelle in sospensione sui liquidi –, sull'inerzia dei corpi e naturalmente quello sulla Relatività Ristretta.

Forse non tutti sanno che Einstein ricevette il Nobel per la fisica nel 1921, non per i risultati ottenuti nel campo della Relatività

bensì – come già lo aveva ricevuto Max Planck nel 1918 – per gli studi sui quanti e quindi per la sua soluzione dell'effetto fotoelettrico.

A volte bisogna arrendersi

Grazie agli studi di Planck e di Einstein, la Teoria Quantistica aveva dato origine alla Fisica Quantistica, senza però che venisse mai messa in discussione anche la natura intrinsecamente ondulatoria della luce. In buona sostanza, e con buona pace di tutti i fisici classici, si dovette attribuire alla radiazione luminosa una doppia natura contemporanea: ondulatoria e particellare. E fu solo l'inizio.

Nel 1924, infatti, il fisico francese Louis-Victor de Broglie nella propria tesi di dottorato propose l'Ipotesi Ondulatoria, applicando anche agli

elettroni il dualismo onda-particella. Questa visione innovativa, subito appoggiata da Einstein, oltre a fargli ottenere il Nobel per la fisica nel 1929 permise il successivo sviluppo della Meccanica Ondulatoria, uno dei pilastri teorici della Meccanica Quantistica.⁸ Dalla formulazione dell'Ipotesi Ondulatoria di de Broglie in poi, la convivenza della natura corpuscolare e di quella ondulatoria all'interno della materia è diventato un fondamento stesso della Fisica Quantistica e ha spostato l'originaria domanda: «Qual è la natura della luce?» verso una nuova

rivoluzionaria formulazione: «È possibile vedere contemporaneamente entrambe le sue due nature?». E la risposta a quest'ultimo quesito, fino al 2015, è stata un lapidario: «No».

Sul perché di questo non occorrerebbe fare una lunga riflessione, ma dato che coinvolgerebbe alcuni aspetti della Fisica Quantistica che tratteremo approfonditamente nei prossimi capitoli, per adesso è sufficiente menzionare il Principio di Indeterminazione formulato da Werner Karl Heisenberg nel 1927. Secondo questo principio, non è

possibile misurare con precisione e simultaneamente due proprietà variabili di una stessa particella che risultino correlate fra loro. Può sembrare difficile da accettare, così a prima vista, dato che nella nostra esperienza quotidiana non abbiamo normalmente a che fare con particelle, e che tutte le caratteristiche del mondo che ci circonda – il mondo macroscopico – possono essere valutate con gli opportuni strumenti, eppure è un principio fondamentale della Meccanica Quantistica. Un principio che, finora, non è mai stato smentito.

La chiave per una sua corretta comprensione è nella parola «simultaneamente». Basta un semplice esempio per rendersene conto. Supponiamo di avere degli invitati a cena e di voler sapere esattamente qual è il volume della minestra che stiamo preparando per loro. Beh, basta calcolarlo tenendo conto della dimensione della pentola nella quale la stiamo cucinando e del livello del brodo contenuto al suo interno. Se però vogliamo calcolare quello stesso volume e simultaneamente sapere se è buona, allora abbiamo un problema. Prelevandone una piccola

quantità per assaggiarla noi possiamo capire se la quantità di sale è quella corretta o se bisogna aggiungere qualche aroma, ma al contempo variamo il suo volume totale. Naturalmente, nella realtà possiamo sempre calcolare la quantità di minestra contenuta nel cucchiaino, ma il fatto è che, in particolare nel microcosmo delle particelle, qualsiasi misurazione influenza sempre lo stato di ciò che viene misurato.

Tornando ai nostri quanti di luce, il Principio di Indeterminazione di Heisenberg afferma che non è possibile conoscere

simultaneamente la posizione e la quantità di moto. Dove quest'ultima espressione indica, semplicemente, il prodotto fra la massa (m) della particella e la sua velocità (v). Quindi, non possiamo sapere in quale punto dello spazio si trovi, con precisione, un fotone e quale sia esattamente, in quel momento, la sua velocità. Se poi consideriamo anche il Principio di Complementarietà⁹ che stabilisce che i due aspetti – ondulatorio e corpuscolare – della materia rimangono indistinti fra loro fino a un'effettiva osservazione, capiamo perché sia sempre stato impossibile

vedere contemporaneamente le due nature della luce. Almeno, come accennavo prima, fino al 2015.

Qualcosa è cambiato

Lo sviluppo della tecnologia e del pensiero umano, spesso, vanno di pari passo. Nel 2015, presso l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne in Svizzera, l'équipe di ricercatori coordinata dal fisico italiano Fabrizio Carbone è riuscita, finalmente, a catturare un'immagine della doppia natura, in contemporanea, della luce. E senza violare il Principio di Indeterminazione di Heisenberg! Per capire come sia stato possibile, possiamo fare riferimento alle stesse parole di Fabrizio Carbone. «Dal punto di vista teorico, ciò che

abbiamo fatto non è stato aggiungere un qualcosa di nuovo alla comprensione del fenomeno. Osservare due variabili non complementari e ottenere quantizzazione e interferenza non introduce alcuna nuova informazione sulla luce. Però, visivamente, procura una fotografia del suo comportamento che fino a oggi, semplicemente, non esisteva. In un certo senso si può dire che si sapeva che avrebbe dovuto essere così, ma non ce n'era la prova!

«I nostri studi partono dall'idea che per osservare il comportamento quantistico e quello classico-

ondulatorio potrebbe essere vantaggioso concepire un esperimento in cui la luce sia confinata in una regione precisa, per essere osservata tramite l'interazione che stabilisce con un'altra particella. Questo approccio evita il problema che la luce possa adattare il proprio comportamento all'apparato sperimentale, dato che non lo percorre. Ma c'è una complicazione extra: quella dell'interazione con l'altra particella. Nel nostro caso, l'elettrone. Inoltre, bisogna confinare la luce in una regione definita dello spazio per un tempo sufficiente alla sua

osservazione.»¹⁰

Per realizzare l'esperimento, all'interno del LUMES – Laboratory for Ultrafast Microscopy and Electron Scattering, laboratorio per la microscopia ultraveloce e lo scattering elettronico – del Politecnico, un impulso laser è stato diretto contro un nanofilo, un minuscolo tubo metallico di dimensioni nanometriche, spesso solo un milionesimo di millimetro. «Sulla superficie del nanofilo», spiega Fabrizio Carbone, «è stato quindi indotto un plasma-polaritone – SPP, Plasma Polaritone di Superficie –, che è una forma di

luce, tanto come il campo elettromagnetico irradiato da un'antenna.»

A causa della particolare conformazione fisica del nanotubo, questa interazione, però, ha prima causato la vibrazione delle particelle e in un secondo momento la creazione di due onde simmetriche dirette in direzione opposta lungo il filamento. Quando due onde simmetriche si propagano in direzioni opposte per poi tornare indietro e incontrarsi, si crea una nuova onda detta onda stazionaria, che non si muove più nello spazio ma oscilla solo nel tempo.

All'interno del nanotubo, quindi, si è venuta a creare un'onda stazionaria contro cui è stato diretto un ulteriore fascio di elettroni generato sfruttando l'effetto fotoelettrico.

Per capire il perché di quest'ultimo passaggio, facciamo ancora riferimento alle parole di Carbone: «Il campo elettromagnetico indotto dai fotoni intorno alla nanostruttura scambia quanti di energia con gli elettroni di un altro fascio – generati sempre con il laser –, accelerandoli o rallentandoli di una quantità multipla intera dell'energia dei singoli fotoni. Questo fenomeno

mostra direttamente la quantizzazione del campo elettromagnetico, e quindi la natura corpuscolare della luce».

Utilizzando un microscopio ultraveloce basato sulla tecnologia TEM – Transmission Electron Microscope, microscopio a trasmissione elettronica – in grado di lavorare su intervalli di tempo pari al milionesimo di miliardesimo di secondo – quello che, in fisica, chiamiamo femtosecondo –, l'équipe di Fabrizio Carbone è riuscita a fotografare l'esatta posizione spaziale in cui avvenivano le variazioni di velocità,

visualizzando così l'onda stazionaria (vedi Figura 4), di conseguenza testimoniando

contemporaneamente anche la natura ondulatoria della luce. Un risultato impensabile solo fino a pochi anni fa e reso possibile proprio grazie alla realizzazione di nuove tecnologie come il microscopio TEM.

Grazie alla disponibilità del Politecnico di Losanna e alla collaborazione di Fabrizio Carbone, possiamo finalmente osservare la doppia natura della luce in questa splendida immagine. Per leggerla correttamente sono necessarie

delle precisazioni. Lungo l'asse z , il passaggio fra i diversi toni di grigio che rappresentano lo spettro di frequenze dal rosso al viola è situata la probabilità di trovare un elettrone in un preciso punto dello spazio e con una certa velocità, proporzionale all'energia. Lo spazio è rappresentato dalla coordinata y , in verticale, mentre la velocità dalla coordinata x , in orizzontale. Il fenomeno di interferenza, che denota la natura ondulatoria del campo elettromagnetico, si può vedere nell'immagine – lungo la direzione y – come una modulazione spaziale periodica del

numero di elettroni che arrivano in una specifica posizione.

Mentre interagiscono col campo elettromagnetico, gli elettroni guadagnano o cedono pacchetti di energia di valore proporzionale al numero di fotoni che risultano coinvolti. Approfondiremo la relazione esistente fra gli elettroni e i fotoni nel Capitolo 2. Per il momento, senza scendere troppo nei dettagli, possiamo osservare la natura quantizzata dello scambio di energia lungo la coordinata x della figura sotto forma di modulazione periodica dell'energia degli elettroni. L'immagine, quindi, è il

risultato dell'interazione tra un elettrone e diversi fotoni ripetuta molte volte, e dev'essere intesa come una misura di insieme. Per questo motivo riesce a mostrare contemporaneamente la natura classica e quella quantistica della luce, senza violare il Principio di Complementarità.

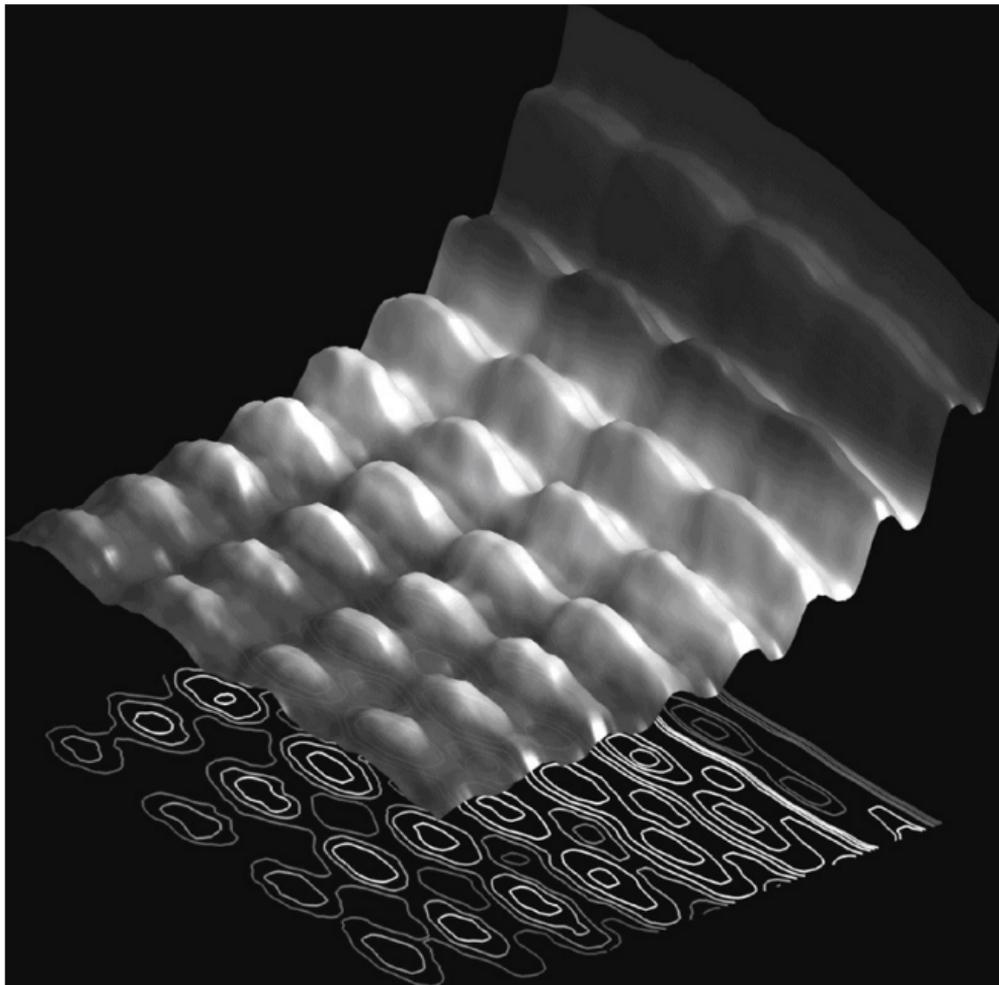


Figura 4. In questa immagine, le misurazioni sperimentali risultano proiettate nello spazio, lungo l'asse y , e

sull'energia, lungo l'asse x. Così facendo, è possibile evidenziare contemporaneamente la natura corpuscolare e quella ondulatoria della luce (© EPFL).

«È opportuno contestualizzare i risultati e riflettere sulle loro possibili conseguenze. Naturalmente anche la nostra misura», spiega Fabrizio Carbone, «è il risultato di un'accumulazione di molti eventi. In questo senso l'immagine acquisisce due comportamenti che possono anche essersi manifestati in istanti diversi durante il periodo dell'acquisizione.

Quindi, nessuna legge della Meccanica Quantistica è stravolta o violata. Due proprietà complementari di una particella elementare non si possono misurare simultaneamente, e questo resta vero. Tuttavia, se è vero che al di là di questa condizione la teoria non pone limiti di osservabilità, evidenziare un comportamento quantistico e uno classico nello stesso esperimento e nella stessa acquisizione si è dimostrato difficile.»

Tutto risolto dunque? A distanza di oltre duecentosedici anni dall'esperimento di Young e di

centododici anni dall'interpretazione di Einstein dell'effetto fotoelettrico possiamo finalmente affermare che sappiamo esattamente cos'è la luce? Non proprio. Ci sono ancora molte domande aperte, e alcune di esse sono collegate proprio alle modalità con cui è stato realizzato questo esperimento. Come ha dichiarato lo stesso Fabrizio Carbone: «Negli esperimenti abbiamo usato plasma-polaritoni di superficie per via della semplicità di confinarli su una nanostruttura. Naturalmente c'è una differenza tra questo campo elettromagnetico e un campo del vuoto. Al momento

nuovi esperimenti su sistemi fotonici più complessi del singolo nanofilo sono in corso per superare questo limite e per cercare di capire i limiti di osservabilità simultanea di quantizzazione e interferenza al variare dei parametri di incertezza della misura».

La strada – anzi, una delle possibili strade – è stata quindi aperta, ma il cammino della conoscenza e della comprensione è ancora lungo. La luce, inseparabile compagna della nostra vita, conserva ancora molti segreti da svelare!

Due è sempre meglio di uno

Ovvero, perché accontentarsi di
un'unica teoria?

Cosa c'è dietro? La doppia natura della materia ipotizzata da Louis de Broglie oltre ad aver cambiato radicalmente l'idea stessa di realtà, ha costretto fisici e scienziati del Novecento a inventarsi nuovi strumenti matematici e filosofici per potersi confrontare. E come spesso accade – soprattutto nella Fisica Quantistica – non esiste mai un'unica interpretazione che riesca a soddisfare tutto e tutti.

Perché è importante? Perché riuscire a fare chiarezza su cosa sia la materia, su quali siano i suoi costituenti – e le loro reciproche interazioni – e su come siano concretamente rappresentabili, è una necessità dell'uomo. Una necessità che stiamo ancora cercando di soddisfare grazie a ricerche sempre più approfondite e ad audaci teorie. Ricerche e teorie che, sempre più spesso, vanno al di là delle intuizioni che abbiamo saputo sviluppare nel corso dei secoli per rappresentare gli oggetti che appartengono alla nostra quotidianità.

OGGI, uno degli aspetti che lascia maggiormente sconcertati quando

ci si avvicina alle logiche della Fisica Quantistica è il carattere di incertezza insito al loro interno. In un mondo determinista e pragmatico come il nostro, lasciare spazio al dubbio e al non conosciuto – ma potrei utilizzare, con lo stesso significato, il termine «mistero» – sembra inaccettabile. Anche agli inizi del XX secolo il pensiero fisico classico non riusciva ad adattarsi alla nuova realtà proposta dall'Ipotesi Ondulatoria di Louis de Broglie, e molti fisici speravano sinceramente che, prima o poi, venisse contraddetta da qualche risultato sperimentale. Fra questi

scienziati, anche se può sembrare difficile da capire, c'erano gli stessi padri della teoria.

Max Planck, dopo aver dimostrato l'esistenza dei quanti di energia investigando sulla radiazione di corpo nero – così come abbiamo visto assieme qualche pagina fa, nel Capitolo 1 – aveva accettato a malincuore l'evidenza di una natura discreta dell'energia. Una natura non più continua come quella proposta dalla fisica classica dell'Ottocento, bensì composta da minuscoli elementi fondamentali: i quanti. Non a caso, ancora nel 1931,¹ Planck confidava

all'amico e collega Robert Williams Wood che considerava la scoperta del quanto come un vero e proprio «atto di disperazione». Per Planck, pensare che oltre all'energia anche la materia presentasse una natura quantistica richiedeva un grande sforzo di volontà.

Lo stesso Albert Einstein, il genio che aveva consentito la determinazione del quanto dell'energia elettromagnetica – la particella che adesso chiamiamo fotone – e che aveva apprezzato e supportato il lavoro di de Broglie, fu sempre molto critico nei confronti della Fisica Quantistica. Einstein,

infatti, non la considerò mai come un fondamento assoluto per tutta la riflessione sulla fisica ma come un utile strumento ancora da calibrare al meglio. «Questa teoria mi ricorda un po' il sistema di allucinazioni di un paranoico estremamente intelligente, formata com'è da elementi di pensiero incoerenti fra loro.» Un pensiero inequivocabile confidato per iscritto, nel 1952,² all'amico Daniel M. Lipkin, fisico e matematico.

Ma se queste erano le opinioni più autorevoli dell'epoca, possiamo capire immediatamente in quale clima di difficoltà e di

incomprensione siano nati e si siano sviluppati i primi tentativi di conferire una solida base teorica alla Fisica Quantistica. Soprattutto, possiamo capire perché ancora oggi questa teoria sia in grado di lasciare perplessi e allo stesso tempo di affascinare chi vi si avvicina per curiosità o per passione. Come per esempio fece il giovane Niels Bohr a partire dal 1911, anno dell'inizio del suo dottorato di ricerca presso la Cambridge University.

Non tutto è così scontato

Prima di conoscere meglio Bohr e il suo fondamentale apporto alla Fisica Quantistica è necessario affrontare un ulteriore, importante, tema: quello dell'atomo. Tutti noi sappiamo perfettamente cos'è un atomo: ce lo insegnano fin dai primi anni di scuola e possiamo trovarne rappresentazioni più o meno stilizzate ogni volta che, per esempio, visitiamo il reparto di radiologia di un ospedale. È una conoscenza così diffusa e così condivisa che nessuno sente il bisogno di metterla in discussione. Peccato che, in effetti, il classico

disegno del nucleo circondato dagli elettroni che vi orbitano attorno sia più che altro un artificio grafico. E peccato, soprattutto, che molto di ciò che crediamo di sapere sulla natura stessa dell'atomo sia – volendo proprio essere ottimisti – solo una buona approssimazione. Vediamo assieme il perché.

Atomo è una parola che deriva dal greco e significa, letteralmente, «indivisibile». Secondo la filosofia atomista di Leucippo e del suo più famoso allievo Democrito – vissuti fra il V e il IV secolo avanti Cristo –, l'atomo rappresentava l'elemento originario e fondamentale della

realtà fisica. Ma ancora nella seconda metà dell'Ottocento e soprattutto dopo l'unificazione dell'elettricità e del magnetismo grazie al lavoro di James Clerk Maxwell, molti scienziati non credevano nella sua esistenza. Come non ci credeva Max Planck che, nel 1882, affermava con grande convinzione che la Teoria Atomica sarebbe stata presto abbandonata «a favore dell'ipotesi della continuità della materia».³

Era stato per primo il chimico e fisico inglese John Dalton, nel 1808, a riprendere su basi scientifiche la Teoria Atomistica greca e a

condurre una serie di esperimenti in laboratorio che lo avevano spinto a definire l'atomo come «la più piccola parte di un elemento che ne mantiene inalterate le caratteristiche chimiche». ⁴ Dopo John Dalton, a parte i chimici, che consideravano il modello atomico sicuramente significativo, questa ipotesi non era stata recepita favorevolmente dalla comunità scientifica nel suo complesso se non come base euristica, ovvero come base di ricerca utile per sviluppare successive teorie. Fra i fisici, però, si era distinto Ludwig Boltzmann, che si era apertamente dichiarato

atomista e che, per questa sua posizione, aveva ricevuto molte critiche. Critiche, soprattutto quelle formulate dai fisici Ernst Mach e Lord William Thomson, che una leggenda metropolitana sostiene abbiano giocato un tragico ruolo nella drammatica scelta di Boltzmann di togliersi la vita, nel settembre 1906, a Duino, vicino a Trieste.

Per ironia del destino, un altro dei detrattori di Boltzmann era stato proprio Max Planck che, però, aveva saputo ricredersi completamente. Avendo utilizzato alcuni dei suggerimenti dello

scienziato viennese per risolvere il problema della radiazione di corpo nero, come abbiamo visto nel Capitolo 1, nel Novecento Planck aveva deciso di dedicargli una delle due costanti scoperte – k_B , la Costante di Boltzmann – e per ben due volte, nel 1905 e nel 1906, aveva candidato Boltzmann al premio Nobel.

Quindi, anche se può sembrare incredibile, fino alla fine del XIX secolo la comunità scientifica risultava ancora profondamente divisa fra chi credeva nell'esistenza degli atomi e chi, invece, propendeva per una continuità della

materia, in linea di principio infinitamente divisibile. Inoltre, anche se per differenti motivi, in nessuna di queste due visioni era comunque inserita l'ipotesi che potessero esistere ulteriori costituenti più piccoli, interni all'atomo stesso, e per questo motivo definibili come subatomici.

Siamo fatti così

Un ruolo determinante nello sviluppo della moderna Teoria Atomica lo ebbe il grande scienziato inglese Joseph John Thomson. Thomson, nel 1884 – e a soli ventotto anni d'età – divenne direttore del laboratorio Cavendish della Cambridge University, andando così a ricoprire il prestigioso incarico che in precedenza era stato solo di James Clerk Maxwell e di Lord John William Strutt, barone di Rayleigh. Nel 1897 Thomson, applicando gli studi di Maxwell alle – all'epoca – recenti scoperte di Wilhelm Röntgen

sui raggi X e di Henri Becquerel sulla radioattività spontanea,⁵ dedusse l'esistenza di particelle di dimensione inferiore all'atomo e di carica negativa, che chiamò inizialmente corpuscoli.

Più precisamente, come chiarisce Giulio Peruzzi, docente di Storia della Fisica presso l'Università di Padova: «Le scoperte dei raggi X, della radioattività e dell'elettrone derivarono tutte dagli studi sulle scariche elettriche dei gas rarefatti. La scoperta dei raggi X, inoltre, permise a Joseph John Thomson di avere maggiori informazioni sul potere ionizzante di certe specifiche

radiazioni e di capire perché i due grandi fisici tedeschi Heinrich Rudolf Hertz e Philipp von Lenard non avessero visto l'effetto deflettore di un campo elettrostatico applicato a un fascio di raggi catodici». ⁶

I corpuscoli – riprendendo la precedente definizione dell'unità di carica elettrica, ⁷ introdotta nel 1891 dal fisico irlandese George Johnstone Stoney – presero poi il nome di elettroni e andarono a costituire la prima tessera del modello teorico di atomo che Thomson stesso presentò al mondo nel 1904. Prima tessera non solo perché finalmente l'esistenza delle

particelle subatomiche era stata dimostrata al di là di ogni ragionevole dubbio, ma soprattutto perché l'elettrone era la sola particella subatomica esistente all'epoca. Né i protoni né, tanto meno, i neutroni, infatti, erano ancora stati scoperti.

Verso la fine degli anni Sessanta del Novecento io ero appena un bambino, ma il mondo sembrava essere arrivato all'apice della propria maturità. Nel 1969, precisamente il 2 marzo, il prototipo del primo aereo supersonico al mondo, il Concorde, solcava i cieli d'Europa, e pochi mesi dopo, il 20

luglio, l'uomo riusciva addirittura a mettere piede sulla Luna grazie alla missione Apollo 11. Quei fantastici risultati furono ottenuti da una ricerca, quella aerospaziale, nata ufficialmente solo nel 1903 con il primo volo dei fratelli Wright sul loro tremolante Flyer.

Come ha fatto l'uomo, in poco più di sessant'anni, a passare dalla schiavitù del suo muoversi ancorato al suolo terrestre al librarsi, prima, nel cielo e al solcare, poi, le profondità dello spazio? Le risposte sono tante e molto diverse fra loro, ma fra queste c'è stato sicuramente il contemporaneo progresso della

conoscenza scientifica. Un progresso talmente veloce e travolgente da rivoluzionare la visione stessa della realtà per ben due volte, definendo prima l'esistenza delle particelle subatomiche – e quindi dell'atomo – e poi, quella del quanto energetico. E tutto ciò, dal punto di vista cronologico, in soli tre anni: dal 1897 al 1900.

Così come i primi aeroplani che possiamo ammirare adesso grazie ai filmati storici ci appaiono precari e quasi «ingenui» nella loro realizzazione, analogamente ci possono sembrare fin troppo

semplicistici e romantici i primi tentativi di descrivere l'atomo sulla base di conoscenze parziali e ipotesi ancora tutte da dimostrare. Ma proprio per questo motivo, il lavoro di fisici come Joseph John Thomson, Ernest Rutherford e James Chadwick, visto con gli occhi di oggi, acquisisce ancora maggior valore!

Nel mezzo dell'opera

La prima rappresentazione teorica dell'atomo, fatta nel 1904 da Thomson, è passata alla storia con il caratteristico nome di Plum Pudding Model, in italiano «modello atomico a panettone». Il motivo è semplice: non essendo ancora state scoperte le altre particelle subatomiche e non essendo neanche stata ipotizzata l'esistenza di un nucleo centrale, l'unica certezza posseduta da Thomson all'epoca era che l'atomo, nel suo complesso, fosse neutro. Cioè, che non possedesse alcuna carica elettrica positiva o negativa. Quindi,

dato che gli elettroni erano sicuramente negativi, lui li immaginò immersi all'interno di una carica positiva diffusa, in linea con l'idea di James Clerk Maxwell di una reazione del dielettrico universale – cioè dello spazio vuoto – in presenza di cariche elettriche. Esattamente come canditi annegati nel soffice impasto di un panettone!

Era una rappresentazione di buon senso, sostanzialmente sbagliata ma capace di far scaturire una proficua riflessione. Una riflessione di cui si fece principale interprete Lord Ernest Rutherford, I barone Rutherford di Nelson.

Quando nel 1907 si trasferì dal Canada in Inghilterra per diventare docente alla Victoria University di Manchester, Rutherford era già stato candidato al Nobel – lo avrebbe vinto nel 1908 – per il suo fondamentale contributo alla comprensione dei fenomeni legati alla radioattività. Dopo soli quattro anni di ricerche, a neanche quarant'anni e con in tasca il massimo riconoscimento scientifico, Rutherford teorizzò, sulla base di clamorosi risultati sperimentali, l'esistenza del nucleo atomico, descrivendolo come una carica concentrata all'interno dell'atomo.

Carica di cui, però, non era possibile stabilire sperimentalmente se fosse negativa o positiva.⁸

Quest'ultimo aspetto venne determinato sfruttando ancora una volta il principio della neutralità dell'atomo. Poiché gli elettroni erano negativi, Rutherford stabilì che il nucleo centrale attorno al quale si muovevano – seguendo, nella sua teoria, delle orbite circolari –, dovesse essere positivo. Si trattava in un immenso passo in avanti rispetto al modello atomico a panettone, e soprattutto costituiva una nuova base di partenza per la ricerca di eventuali altre particelle

subatomiche con carica positiva. Quelle stesse particelle che successivamente sarebbero state scoperte proprio da Rutherford, nel 1919, e chiamate protoni. Il nuovo modello, definito come modello atomico nucleare a causa delle caratteristiche orbite circolari previste per gli elettroni, prese anche il nome di modello atomico planetario.

Sempre nel 1911, lo stesso anno in cui Lord Ernest Rutherford formulava il proprio modello atomico, un irriverente dottorando si presentò davanti a Joseph John Thomson dicendogli, senza mezzi

termini, che alcune delle equazioni che aveva pubblicato nel proprio studio sugli elettroni erano sbagliate.⁹ Quel giovane coraggioso e sfrontato era proprio Niels Bohr. Da quell'episodio, non proprio entusiasmante, iniziò il fondamentale contributo del fisico danese alla Teoria Atomica e poi alla Fisica Quantistica.

Livelli ed energie

«Bohr aveva appena scritto una tesi di laurea sulla conduzione degli elettroni nei metalli. Quindi, si può dire che fosse un esperto dell'argomento.» Stiamo ricordando proprio quell'episodio, assieme a Giulio Peruzzi. «All'epoca, inoltre, Bohr aveva già alcune ferme convinzioni relative al fatto che il comportamento degli elettroni, in una scala così piccola rispetto a quella atomica, dovesse essere significativamente diverso da quello ipotizzabile classicamente. Non appena ottenne una borsa di studio dalla Fondazione Carlsberg di

Copenaghen, il suo primo obiettivo fu quello di andare a Cambridge per potersi confrontare con la massima autorità nel campo degli elettroni. Cioè, proprio con quel Thomson che ne era stato lo scopritore.

«Con Thomson, però, Niels Bohr non riuscì mai a instaurare un rapporto costruttivo, probabilmente anche a causa del suo primo approccio. Quando si presentò davanti al grande scienziato, infatti, in uno stentato inglese – lingua che non riuscì mai a padroneggiare con sicurezza – gli disse all'incirca: guardi professore, ho letto attentamente il suo libro sugli

elettroni ma lei qui, qui e qui ha fatto degli errori.»

Possiamo facilmente immaginare la reazione di Thomson davanti a quel ragazzo sconosciuto che si esprimeva in inglese con difficoltà e che metteva in dubbio i risultati del suo lavoro. «Thomson», continua Giulio Peruzzi, «mise Bohr a lavorare su alcuni studi secondari che stava portando avanti, ma non ne sfruttò le grandi potenzialità. Anzi, in realtà, quello che Niels Bohr fece in quel periodo fu essenzialmente giocare a pallone e praticare sport. Il giovane dottorando, in quei mesi, non riuscì

a imparare nulla di più di quanto già non sapesse e così quando l'anno successivo, nel 1912, Bohr venne invitato da Ernest Rutherford a svolgere un lavoro di post dottorato alla Victoria University di Manchester, accettò subito.»

Arrivato a Manchester, dopo la parziale delusione avuta con Thomson, Niels Bohr si trovò in un ambiente completamente diverso. «I rapporti con Rutherford», spiega Giulio Peruzzi, «furono molto più fecondi perché Rutherford era una persona molto più aperta e disponibile.» Ciononostante, Bohr anche in questa occasione dimostrò

fin troppo chiaramente tutta la propria prorompente passione! «A un certo punto, Bohr si rivolse a Ernest Rutherford dicendogli che avrebbe voluto lavorare sulla stabilità del suo modello atomico. Quello dotato di nucleo centrale positivo. Rutherford gli rispose che si trattava di un problema fin troppo complesso e che neanche lui, che aveva presentato i risultati, era in grado di capirne esattamente il funzionamento.» Il fatto che ci fossero cariche elettriche accelerate che non emettevano energia e che rimanevano all'interno dell'atomo assieme al nucleo positivo era un

vero rompicapo, dal punto di vista di Rutherford.

«Bohr però non si arrese, e cominciò quella collaborazione che portò, sempre nel 1912, alla scrittura del celebre 'Rutherford Memorandum': la prima formulazione, valida solo per l'atomo di idrogeno e per gli idrogenoidi, del modello quantistico dell'atomo.» Nel modello atomico di Bohr, presentato nel 1913, a ogni elettrone rimaneva associata un'orbita circolare, come nell'ipotesi di Rutherford, ma veniva specificato che si trattava di un'orbita stazionaria che non prevedeva né

emissione né assorbimento di energia. Per gli elettroni, quindi, era possibile saltare da un'orbita all'altra solo cedendo o acquistando un pacchetto finito di energia. Un quanto di energia esattamente corrispondente a un fotone (vedi Figura 5).

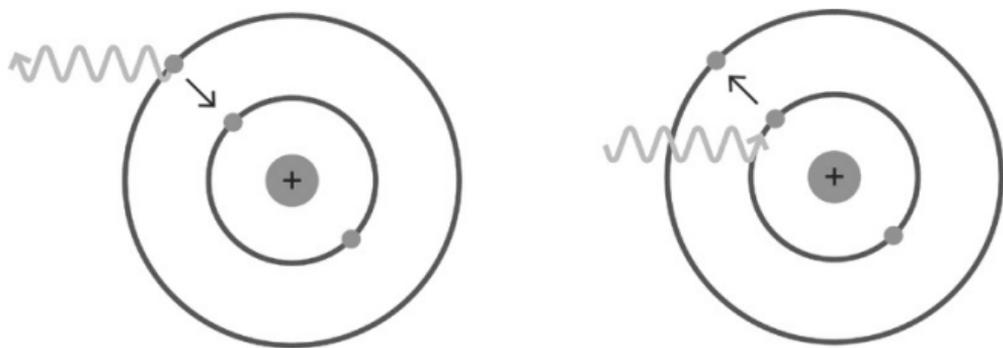


Figura 5. Rappresentazione del passaggio degli elettroni fra due orbite con energia differente e conseguente emissione e

assorbimento di fotoni.

Facciamo un semplice esempio per chiarire questo concetto. Disegniamo sulla sabbia un punto centrale – il nostro nucleo atomico – e scaviamo attorno a quel punto alcune piste concentriche. Adesso mettiamo una biglia all'interno di ciascuna pista per rappresentare gli elettroni e osserviamo quello che abbiamo realizzato. Visto dall'alto, sembrerebbe proprio un modello planetario con il Sole al centro e i pianeti che vi orbitano attorno. Nel modello atomico di Bohr, ogni

orbita – ognuno dei nostri solchi nella sabbia – corrisponde a un valore energetico diverso: più basso vicino al punto centrale e più alto mano a mano che ci si allontana verso l'esterno.

Gli elettroni – le nostre biglie – sono destinate a rimanere all'interno delle rispettive orbite in cui si trovano, ma possono anche passare dall'una all'altra assorbendo o cedendo energia sotto forma di quanti di luce, cioè di fotoni. Se un elettrone passa a un'orbita con valore energetico superiore assorbirà l'energia necessaria per compiere il salto.

Viceversa, se passerà a un'orbita con valore energetico inferiore cederà la corrispondente quantità di energia. Tornando al nostro esempio, l'assorbimento di energia dell'elettrone e il suo conseguente passaggio a un'orbita più elevata può essere simulato colpendo una delle biglie che si trovano all'interno dei solchi della sabbia con la punta delle dita e facendola saltare all'interno del solco immediatamente più esterno. L'esempio proposto vale solo per l'assorbimento di energia da parte degli elettroni. Il caso della cessione energetica da parte

dell'elettrone, infatti, non è altrettanto intuitivo.

La cessione di energia sotto forma di fotoni genera la creazione di quello che viene chiamato spettro di emissione:¹⁰ un insieme di righe colorate nell'intervallo visibile della radiazione elettromagnetica (vedi Figura 6). Ogni elemento ha il proprio caratteristico spettro di emissione e così, osservando lo spettro, è possibile risalire all'elemento che l'ha originato. Chiunque fosse riuscito a creare un modello teorico in grado di giustificare tutte le righe degli spettri di ciascun elemento

avrebbe scoperto l'esatta struttura dell'atomo. Una prospettiva decisamente allettante per Bohr e per tutti i suoi colleghi!

Utilizzare l'approccio quantistico per spiegare la stabilità del modello atomico di Rutherford fu un'intuizione geniale che permise a Bohr di scrivere una nuova pagina nella storia della fisica. Non solo, sancì anche l'inizio di un proficuo rapporto fra lui e Rutherford che durò ininterrottamente fino al 1937, anno della morte di quest'ultimo.

Un passo alla volta

Ci sono molti esempi di come la storia delle scoperte scientifiche viene scritta un po' alla volta e a più mani. Nel caso del modello atomico questo è particolarmente vero, dato che dopo la pubblicazione del lavoro di Bohr, nel 1913, dovettero passare ancora sei anni prima che lo stesso Rutherford riuscisse a identificare i protoni e ben diciannove anni prima dell'individuazione dei neutroni, nel 1932, da parte di Sir James Chadwick. Un lasso di tempo enorme durante il quale vennero sviluppati molteplici e differenti

approcci sia alla nascente Teoria Atomica sia alla già consolidata, anche se in modo disorganico, Teoria Quantistica.

Tornando alle orbite circolari ipotizzate da Bohr, per distinguerle l'una dall'altra bastava fare riferimento al livello energetico che le caratterizzava. Associando il numero 1 al livello più basso, il numero 2 al livello successivo, il numero 3 a quello ancora più energetico e così via, Bohr definì quello che prese il nome di numero quantico principale. Grazie al numero quantico principale – indicato con la lettera n – la teoria

di Bohr introduceva il concetto delle orbite quantizzate, riuscendo così a spiegare correttamente lo spettro di emissione dell'atomo di idrogeno e di tutti gli idrogenoidi: gli atomi con un solo elettrone. Per gli atomi più complessi, invece, rimanevano notevoli discrepanze fra le ipotesi teoriche e i risultati delle osservazioni sperimentali degli spettri di emissione. E questo significava che ancora molto lavoro andava fatto!

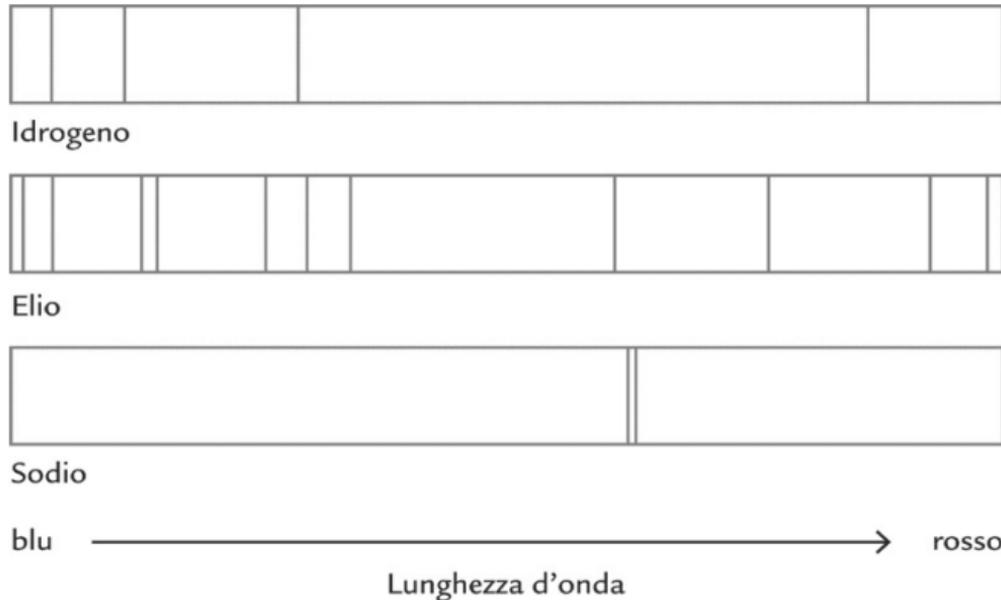


Figura 6. Dall'alto in basso, rappresentazione schematica degli spettri di emissione dell'idrogeno, dell'elio e del sodio.

Il passo successivo fu quello di sostituire le orbite circolari

ipotizzate da Bohr con delle orbite ellittiche e venne fatto dal fisico tedesco Arnold Sommerfeld nel 1915. Sommerfeld ammirava il lavoro di Bohr al punto di definirlo come «una conquista indiscutibilmente importante»,¹¹ e propose quello che passò poi alla storia col nome di modello atomico di Bohr-Sommerfeld. In questo nuovo modello, le orbite circolari furono sostituite da delle orbite ellittiche, analoghe a quelle tracciate dai pianeti attorno al Sole. Inoltre, venne definito un secondo numero quantico orbitale – indicato con la lettera l – che indicava

quanto queste fossero schiacciate rispetto alle orbite concentriche: una caratteristica che prende il nome di eccentricità. Il numero quantico orbitale, da un punto di vista fisico, risultava legato al momento angolare dell'elettrone.

Per chiarire il concetto di momento angolare uso l'esempio di una palla colpita da una stecca che si muove sul velluto di un biliardo. È uno scenario che tornerà molto utile anche per spiegare altri concetti e che riprenderò più avanti in questo libro. Se la palla ha una massa pari a m e si sposta con una velocità v , posso definire la sua quantità di

moto con una semplice formula. Detta p la quantità di moto, risulta:

$$p = m \cdot v$$

La quantità di moto, quindi, non è altro che una misura della capacità che ha la palla di spostarsi a una data velocità. La palla però si sta muovendo in linea retta, mentre gli elettroni che orbitano attorno al nucleo dell'atomo si spostano con un moto circolare uniforme. Nessun problema: sostituisco la velocità con la velocità angolare (ω) e al posto della massa metto il momento di inerzia (I), ovvero la misura della resistenza che offre la particella quando cerchiamo di farle

modificare la traiettoria su cui si sta muovendo. In questo modo, quello che ottengo è proprio il momento angolare (L) della particella, e quindi dei nostri elettroni:

$$L = I \cdot \omega$$

Nel nostro esempio la palla è vincolata al biliardo e la particella all'orbita atomica, ma se le considerassimo entrambe libere nello spazio tridimensionale, tutte le variabili che abbiamo definito diventerebbero dei vettori caratterizzati da un modulo, da una direzione e da un verso. Grazie a questa formula, si può stabilire una semplice relazione fra il numero

quantico orbitale e l'eccentricità dell'orbita: quanto più piccolo è l , tanto più schiacciata risulta essere l'orbita dell'elettrone. Inoltre, l può assumere solo valori interi che vanno da 0 fino a $n - 1$. Quindi, se $n = 1$ risulta che $l = 0$; se $n = 2$, allora l può assumere solo i valori $l = 0$ e $l = 1$; se $n = 3$, ancora, l può essere $l = 0$, $l = 1$ e $l = 2$; e così via.

A questo punto, sorge spontanea una domanda: introducendo il nuovo numero quantico orbitale, la teoria di Bohr-Sommerfeld era finalmente riuscita a fornire un modello teorico in grado di spiegare

gli spettri di emissione di tutti gli atomi? Purtroppo la risposta è: «No». Anzi, negli anni successivi, nel tentativo di perfezionare questo modello e di trovare la soluzione definitiva al problema, vennero introdotti altri due fondamentali numeri quantici:

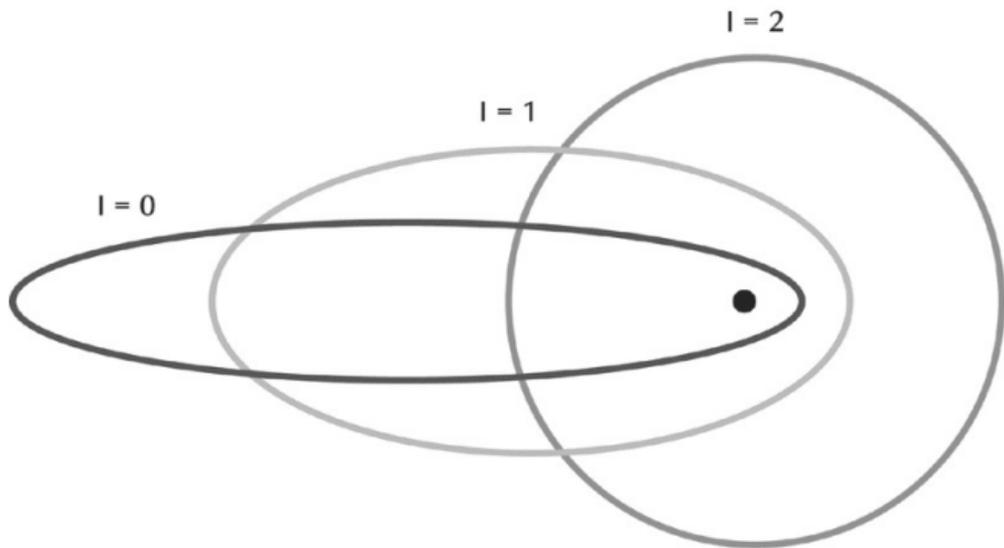


Figura 7. Eccentricità dell'orbita dell'elettrone, in relazione a tre diversi valori del numero quantico orbitale l .

- il numero quantico magnetico – identificato con m – che serviva per spiegare il cosiddetto effetto Zeeman: la comparsa di nuove righe negli spettri degli

atomi in presenza di un campo magnetico esterno;

- il numero quantico di spin – a cui venne attribuita la lettera s – che, da un punto di vista intuitivo, può essere visualizzato come la rotazione dell'elettrone intorno al proprio asse. Attenzione, però: dal punto di vista fisico questa rappresentazione è sbagliata. Considerando un punto posto sulla superficie dell'elettrone, infatti, risulterebbe muoversi con una velocità maggiore di quella della luce. Cosa impossibile!

Naturalmente, per gli elettroni tutti i numeri quantici atomici risultano correlati fra loro, e in particolare m può assumere ogni valore intero compreso fra $-l$ e $+l$. Se, per esempio, $l = 1$ allora $m = -1$, $m = 0$ e $m = +1$. Diverso è il discorso per il numero quantico di spin che, in base alla Teoria Quantistica e per il Principio di Esclusione di Pauli – su cui torneremo più avanti in questo stesso capitolo –, può assumere solo due valori: $-1/2$ e $+1/2$.

Nonostante gli sforzi di tutti gli scienziati coinvolti, però, la teoria delle orbite atomiche rimaneva

inadeguata, ed era necessario un ulteriore «salto» di pensiero prima di poter arrivare a un modello più completo e fedele della struttura atomica. Un salto che potremmo definire quantico non solo perché sarebbe arrivato proprio grazie ai modelli interpretativi forniti dalla Fisica Quantistica, ma anche perché avrebbe comportato un profondo cambiamento del modo in cui interpretiamo la realtà fisica quando si va a scale di grandezza e di energia molto piccole. Quella stessa realtà che – come ipotizzò de Broglie nel 1924 e come oramai abbiamo imparato ad accettare – è

sempre caratterizzata da una
duplice natura: corpuscolare e
ondulatoria.¹²

Un quadro completo

La definizione del numero quantico di spin avvenne nel 1925 e grazie al lavoro di due giovani fisici olandesi: George Eugene Uhlenbeck e Samuel Abraham Goudsmit. L'anno prima, però, lo spin era stato introdotto da uno dei più importanti e geniali fisici austriaci del Novecento: Wolfgang Ernst Pauli. Conosciuto anche per il carattere particolarmente critico e caustico, Pauli era stato allievo di Sommerfeld assieme allo stesso Werner Karl Heisenberg, che abbiamo già avuto modo di conoscere nel Capitolo 1 quando ho

citato il suo Principio di Indeterminazione. Pauli e Heisenberg non solo erano amici ma si rispettavano e stimavano profondamente. Pauli, in una lettera scritta a Bohr nel 1924 – Bohr, due anni prima, aveva ricevuto il Nobel per la fisica – descrisse Heisenberg come «un genio assai dotato che un giorno avrebbe fatto compiere grandi progressi alla scienza».¹³ E la sua previsione si concretizzò effettivamente pochi anni dopo.

Nella storia della Teoria Atomica, il 1924 rappresentò l'anno dell'ennesima svolta. Pauli, che era appena stato assunto come docente

presso l'Università di Amburgo, cercando una motivazione della presenza di alcune caratteristiche linee accoppiate negli spettri di emissione – sempre connesse all'effetto Zeeman, in questo caso d e t t o anomalo –, ipotizzò l'esistenza di un nuovo numero quantico legato a un moto rotatorio dell'elettrone attorno al proprio asse. Il numero quantico di spin portò Pauli all'enunciazione del suo famoso Principio di Esclusione: in uno stesso atomo non possono esistere contemporaneamente due elettroni caratterizzati dagli stessi quattro numeri quantici. Di

conseguenza, ogni orbita elettronica – descritta in modo univoco dai tre numeri quantici n , m e l – può contenere solo due elettroni aventi, fra loro, spin opposto.

Le applicazioni pratiche del Principio di Esclusione di Pauli sono innumerevoli: dalla chimica, dove consente di stabilire i livelli a cui si trovano gli elettroni degli atomi, all'astronomia. In questo ambito, per esempio, fornisce la spiegazione dell'esistenza delle nane bianche e delle stelle di neutroni! Non solo, interpretando fisicamente lo spin come momento

magnetico intrinseco dell'elettrone – così come fecero Uhlenbeck e Goudsmit – è possibile associare al valore $+1/2$ una sua rotazione antioraria e al valore $-1/2$ una sua rotazione oraria.

A questo punto, può sembrare che la Teoria Atomica fosse stata definitivamente formulata e che tutte le problematiche connesse alla struttura interna della materia fossero state finalmente chiarite. In realtà, proprio a partire dalla formulazione dell'ipotesi di de Broglie avvenuta quasi contemporaneamente al primo lavoro sullo spin di Pauli, era sorta

un'ulteriore necessità: far convergere fra loro i risultati ottenuti fino a quel momento con la doppia natura della materia. Una necessità che venne brillantemente risolta grazie al lavoro di scienziati come Satyendranath Bose, Paul Dirac, Albert Einstein, Enrico Fermi, Werner Karl Heisenberg, Erwin Schrödinger e molti altri ancora.

L'atomo quantistico

Abbiamo già messo in evidenza più volte come la sovrapposizione fra la natura particellare e quella ondulatoria della materia, a livello atomico e subatomico, costituisca il fulcro della Teoria Quantistica. Bisogna però aggiungere che questa dualità presume la validità del Principio di Complementarietà, che stabilisce che i due diversi stati non siano mai osservabili contemporaneamente. Il Principio di Complementarietà fu enunciato da Niels Bohr nel 1927; per via delle sue implicazioni, ne parlerò soprattutto nel prossimo capitolo.

Quello che adesso ci interessa è che, nella Fisica Quantistica, il concetto di dualismo si può osservare a vari livelli e permea persino i modelli teorici che sono stati realizzati per descriverla.

Anche la Teoria Atomica, proprio per questo motivo, dovette essere rivista sulla base dell'interpretazione quantistica. Nel 1926, grazie al lavoro del grande fisico austriaco Erwin Schrödinger,¹⁴ la rappresentazione deterministica delle orbite degli elettroni venne definitivamente sostituita dall'innovativa ipotesi quantistica degli orbitali. Passare da orbite a

orbitali può sembrare un gioco di parole, ma la sostanza fisica è completamente differente. Gli orbitali, infatti, non rappresentano più le traiettorie certe e prevedibili all'interno delle quali si muovono i due elettroni previsti dal Principio di Esclusione di Pauli. Al contrario: gli orbitali risultano definiti come funzioni d'onda – identificate col simbolo ψ – e descrivono il comportamento degli elettroni solo in senso probabilistico.

È un approccio completamente differente che merita una riflessione approfondita. La funzione d'onda, nella Meccanica Quantistica,

rappresenta lo stato di un sistema fisico. Nel caso dell'elettrone, moltiplicandola per se stessa e ottenendo ciò che in fisica si chiama modulo quadro di ψ , fornisce la sua densità di probabilità. In altre parole, definisce la regione dello spazio tridimensionale al cui interno è più probabile trovare l'elettrone.

Quando sentiamo parlare di forme degli orbitali, stiamo proprio facendo riferimento al modulo quadro di ψ e alla corrispondente regione spaziale. Pensare all'elettrone non più come particella subatomica legata a un'orbita energetica, bensì come funzione

d'onda associata a una densità di probabilità può sembrare sconvolgente ma è una diretta conseguenza del Principio di Indeterminazione di Heisenberg. Ed ecco perché la rappresentazione degli atomi a cui mi riferivo all'inizio di questo capitolo non è più valida dal punto di vista della Meccanica Quantistica!

Facciamo un'ulteriore considerazione. Ogni funzione d'onda si muove nello spazio e nel tempo così come fa una qualsiasi particella che si sposta fra due punti posti a una certa distanza fra loro. Quindi, possiamo osservare più da

vicino la definizione di ψ e scriverla
come:

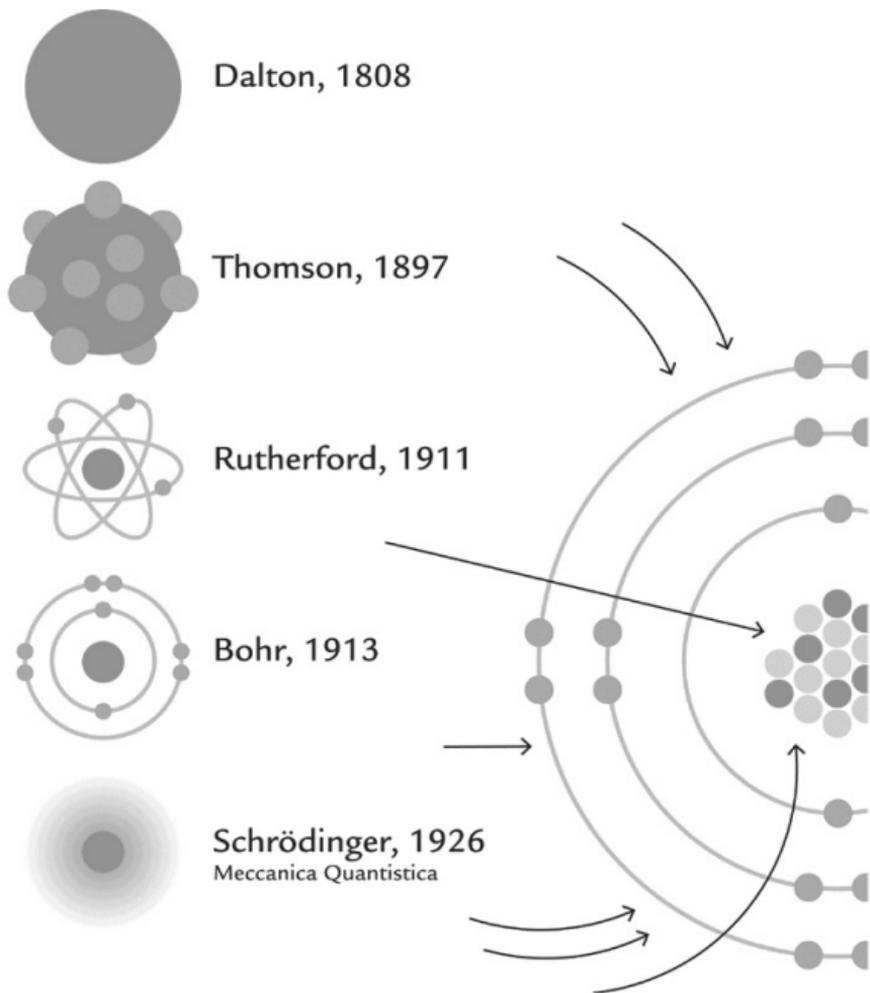


Figura 8. L'evoluzione del modello atomico.

$$\psi(q,t)$$

dove q rappresenta genericamente le coordinate spaziali e t il tempo. Se consideriamo la Teoria Ondulatoria della luce che abbiamo introdotto nel Capitolo 1, moltiplicando l'ampiezza dell'onda elettromagnetica per se stessa ne otteniamo l'intensità. Analogamente, considerando gli orbitali, moltiplicando la funzione d'onda per se stessa ne otteniamo la densità di probabilità. Questa analogia prende il nome di interpretazione di Born perché venne introdotta nel 1926 dal fisico e matematico tedesco Max Born

che, grazie a essa, vinse il Nobel per la fisica nel 1954.

C'è ancora un argomento da affrontare, in relazione alla Teoria Atomica e alla sua integrazione con la Fisica Quantistica: la formulazione dei due principali modelli teorici della Meccanica Quantistica. Prima, però, ritengo che possa essere molto utile fissare visivamente (vedi Figura 8) l'evoluzione della rappresentazione della struttura dell'atomo sulla base delle varie teorie che abbiamo imparato a conoscere in questo capitolo.

Modelli complementari

Gli anni che vanno dal 1900 al 1925 vengono comunemente chiamati, dagli storici della fisica, *The Old Quantum Theory*, la vecchia teoria dei quanti. Un nome che designa il periodo che va dall'individuazione dei quanti energetici di Planck ai primi tentativi di formulare una teoria compiuta della Meccanica Quantistica: quella branca della fisica che si occupa di descrivere il comportamento della materia e delle radiazioni, comprese le interazioni reciproche, su scala atomica e subatomica.

Ma cosa succede nel 1925, e

quali nuovi orizzonti si aprono nell'ambito della ricerca fisica? Lo chiedo ancora a Giulio Peruzzi e ne discuto con lui nel suo ufficio presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Padova. «Quello che succede, un po' improvvisamente, è che tutto questo materiale – venticinque anni possono essere tanti oppure pochi – trova finalmente una convergenza in una teoria compiuta della Meccanica Quantistica. Anzi, in due! La prima teoria che viene proposta è quella di Heisenberg, successivamente affinata assieme a Max Born e a Pascual Jordan. Una

teoria che, contemporaneamente e autonomamente, viene presentata anche dal fisico inglese Paul Adrien Maurice Dirac. Dirac era un tipo fin troppo schivo che scriveva solo formule di matematica e parlava pochissimo. Su di lui, Born disse: 'Noi avevamo scritto il nostro articolo¹⁵ ad agosto [...] e più o meno a ottobre mi arrivò lo stesso articolo¹⁶ scritto da un ragazzino che neanche conoscevo: Paul Dirac. Era un giovanotto e nessuno aveva mai sentito parlare di lui. Nel suo articolo c'era tutta la nostra formulazione ma espressa in maniera molto più compatta ed

elegante: una formulazione fatta bene, con le parentesi e i commutatori. Cioè, proprio una formulazione fatta bene!»

Heisenberg, grazie alla collaborazione con Born e Jordan e all'inatteso contributo di Dirac, aveva costruito il primo modello matematico della Meccanica Quantistica: la Meccanica delle Matrici. «Quindi, è vero che la Meccanica delle Matrici rappresenta il primo modello coerente della Meccanica Quantistica e ha come principale autore Heisenberg. È anche vero, però, che in quel periodo è ormai chiaro che quella

scelta dal grande fisico tedesco non è l'unica strada percorribile e ce n'è almeno un'altra. Per chiarezza, la prima è quella che continua a dire 'il nostro punto di riferimento è il corpuscolo'. E quindi, se io ho un corpuscolo, classicamente, per la sua descrizione dinamica devo averne la posizione, la velocità e le rispettive evoluzioni temporali. La seconda, invece, è quella che si basa sul modello delle onde e che culmina nel lavoro di Erwin Schrödinger del gennaio del 1926. Anche le radici di questa seconda strada – cioè, della Meccanica Ondulatoria – appartengono alla

vecchia teoria dei quanti dato che si basano, come scrisse lo stesso Schrödinger, prima di tutto sugli articoli pubblicati da Einstein a partire dal 1909 e in particolare su quello del 1917 sulla Teoria Quantistica delle Radiazioni.»¹⁷

Meccanica delle Matrici e Meccanica Ondulatoria, quindi, sono le due facce della stessa medaglia e concorrono alla comune definizione della Meccanica Quantistica. «Se vogliamo trovare una ragione di questa dualità, che si ripresenta anche a livello di modelli teorici, dobbiamo considerare i due percorsi possibili: quello corpuscolare e

quello ondulatorio. Il riferimento al corpuscolo, peraltro, viene portato avanti da uno scienziato come Heisenberg che, per tutta la vita, manterrà un approccio di tipo positivistico alla scienza: 'Siccome io sono quasi convinto che concetti tipo traiettoria o orbita non abbiano senso a livello del molto piccolo, dell'atomo – dato che ciò che riesco a misurare sono solo transizioni di stati energetici –, allora devo esprimere posizione, velocità, accelerazione e tutte quelle grandezze che mi danno la dinamica e la cinematica di un oggetto, in base unicamente alle

grandezze che io riesco a osservare'.

«Non a caso, sulla base di questa sua opzione positivista Heisenberg sviluppò anche il suo approccio della matrice S: cioè, definì tutte le ampiezze delle transizioni possibili degli elettroni, all'interno di un atomo, fra i vari livelli energetici. Werner Karl Heisenberg stava cercando di realizzare l'Elettrodinamica Quantistica in anni in cui ancora non si riusciva a trovare il modo di mettere insieme coerentemente Meccanica Quantistica e Relatività Ristretta. In altri termini, cercava di incorporare

in modo coerente il campo elettromagnetico con la Meccanica Quantistica.» Approfondirò il tema legato all'Elettrodinamica Quantistica, e al fondamentale contributo che vi portò Richard Phillips Feynman, nel Capitolo 8.

Ma cos'è esattamente una matrice S ? «L'idea di matrice S », riprende Giulio Peruzzi, «è quella di avere particelle in stati in che interagiscono ricavando gli stati out. Dato, però, che le interazioni non le so trattare in modo analitico, traduco il loro comportamento chiedendo caratteristiche generali alla matrice S . Una caratteristica,

per esempio, è l'unitarietà: le particelle in possono essere legate oppure libere, e 'la scatola nera delle loro interazioni' le trasforma negli stati out. Questo approccio è uno di quelli sondati per arrivare alla Teoria Dei Campi Quantizzati e in prima battuta all'Elettrodinamica Quantistica.» Un approccio, quello della matrice S , che verrà poi ripreso anche dal fisico italiano Gabriele Veneziano, nel 1968, e che influenzerà il successivo sviluppo della Teoria delle Stringhe, che affronteremo assieme nel Capitolo 6.

«L'approccio corpuscolare»,

continua Giulio Peruzzi, «porta Heisenberg a lavorare con delle matrici. Con dei 'quanto-neri', come li chiama lui, relativi alla posizione e alla velocità. Ci sono, però, dei problemi. Innanzitutto, quelle matrici sono infinito-dimensionali. In secondo luogo, non soddisfano il Principio di Commutatività: se prendo due matrici di Heisenberg e le moltiplico fra loro, quello che ottengo moltiplicando la prima matrice per la seconda è, in generale, diverso da quello che ottengo moltiplicando la seconda matrice per la prima. Tecnicamente, diciamo che la loro è

un'algebra non commutativa'. E ciò comporta che debbano essere trattate all'interno di un particolare spazio matematico chiamato spazio di Hilbert.

«Senza scendere troppo nei dettagli, la Meccanica delle Matrici di Heisenberg, pur se rivista e integrata da Born e Jordan, rimane molto complessa da utilizzare. Basta pensare che per applicarla al caso più semplice, quello dell'atomo di idrogeno, lo stesso Pauli ci mise oltre un mese e mezzo! Schrödinger, invece, sfruttando l'approccio ondulatorio riuscì ad arrivare alle medesime conclusioni

ma grazie a delle equazioni molto più semplici e comprensibili: le normali equazioni differenziali usate diffusamente dai fisici.»

Dal punto di vista predittivo, l'approccio di Heisenberg e quello di Schrödinger – quindi, la Meccanica delle Matrici e la Meccanica Ondulatoria – sono la stessa cosa. «Fu proprio Schrödinger il primo che disse: 'Guardate, sono due strutture fortemente diverse nei relativi punti di partenza e sono anche molto diverse dal punto di vista matematico. Però si può dimostrare che sono isomorfe: prevedono le stesse cose e quindi sono teorie

equivalenti'. Certo», continua Giulio Peruzzi, «bisogna ammettere che quando Schrödinger introduce le proprie equazioni, nel 1926, crea uno strumento che i fisici e la comunità scientifica possono maneggiare molto più facilmente delle matrici di Heisenberg.»

Una visione d'insieme

La Fisica Quantistica, con i suoi paradossi e le sue apparenti contraddizioni, può sembrare strana e incomprensibile. Forse è proprio in questa sua natura sfuggente ed enigmatica che vanno ricercate le motivazioni delle prese di posizione degli scienziati che ho riportato nelle prime pagine di questo capitolo. Di sicuro, dal tentativo di dotare la Fisica Quantistica di solide basi teoriche e di una completa struttura logica si sono originate tutte le ricerche che hanno portato, verso la fine degli anni Venti del Novecento, alla definizione della

Meccanica Quantistica. Ma anche in questo caso, il doppio approccio alla natura della materia ha avuto il suo peso, e così di teorie ne sono state formulate due: la Meccanica delle Matrici e la Meccanica Ondulatoria. Due differenti modelli ugualmente validi anche se completamente diversi fra loro sia come approccio sia come fondamenti matematici.

Il dubbio che ci si può porre, a questo punto, è su come riescano due diverse teorie a rappresentare contemporaneamente un'unica realtà. Dato che ho la possibilità di confrontarmi con Giulio Peruzzi, è a lui che mi rivolgo per chiedergli se

questa doppia visione costituisca o meno un paradosso culturale. «No. Non solo non è un paradosso culturale ma se si guarda quello che è avvenuto nella storia si possono capire meglio molte cose», risponde Giulio Peruzzi. «A questo proposito c'è una bellissima affermazione fatta da Richard Feynman nel suo discorso del 1965 in occasione dell'assegnazione del Nobel per la fisica. La riporto direttamente per metterne in evidenza i punti che ci interessano, ma si può trovare integralmente in rete nel sito del Premio Nobel.

«Feynman si chiede: 'Che vuol

dire che la natura è semplice?'. I filosofi, oggi, dicono che la realtà sottodetermina le teorie. Quindi, io posso costruire teorie consistenti per gli stessi fenomeni che sono equivalenti da un punto di vista predittivo ma che non sono equivalenti concettualmente. Perché i fenomeni vincolano, ma vincolano lasciando una certa libertà allo scienziato di formulare le proprie teorie. Allora, Feynman si domanda: 'Ma come mai si può formulare la stessa teoria – che spiega e prevede accadimenti e risultati sperimentali in un contesto specifico – in tanti modi differenti?

Forse, perché la natura è semplice. Il fatto che io abbia imparato che gli stessi fenomeni e le loro regolarità possano essere descritti e predetti da teorie molto diverse, è probabilmente la miglior dimostrazione possibile che la natura è semplice'. Questo è quello che dice Feynman ed è, dal mio punto di vista, un'idea suggestiva. Se io, come scienziato, avessi un solo modo per descrivere il comportamento di un certo ambito di fenomeni, mi troverei davanti a un lavoro molto complesso. Il fatto che io possa arrivarci anche da strade diverse, invece, apre nuove

possibilità e mi permette una maggiore libertà d'azione e di pensiero.»

In effetti, ciò che serve maggiormente per avvicinarsi al mondo della Fisica Quantistica e per comprenderne le innumerevoli e meravigliose implicazioni, è proprio la libertà di pensiero. Quella stessa predisposizione d'animo che condurrà Niels Bohr e tutti gli altri protagonisti della storia dei quanti, negli anni successivi al 1926, a interrogarsi sui significati più profondi della Teoria Quantistica e a formularne diverse interpretazioni.

La novità di Copenaghen

Ovvero, un'interpretazione della Meccanica Quantistica

Cosa c'è dietro? Uno dei passaggi più delicati e cruciali nella storia della fisica e della scienza, in generale. Gli esperimenti scientifici, fino all'inizio del Novecento, sono sempre stati considerati come strumenti perfetti per indagare la realtà e per arrivare a una sua descrizione. Eppure, come diventa inevitabile alla luce delle novità introdotte dalla Fisica Quantistica, adesso anche quel caposaldo va riconsiderato in una prospettiva più ampia e complessa. Ma su quali basi, con quali

strumenti e soprattutto, con quali possibili esiti?

Perché è importante? Perché la Fisica Quantistica ha fatto evolvere il modo stesso di definire il concetto di scienza e la percezione del mondo ha cominciato a travalicare i confini imposti dalla fisica classica. Perché a partire dall'inizio del Novecento, l'influenza esercitata dall'osservazione sperimentale, in linea di principio, non è più riducibile a piacere. E nascono anche posizioni estreme, come quella «idealistica» di Werner Heisenberg, dove la realtà risulta creata dall'osservatore.

L'EVOLUZIONE della Teoria Quantistica

non è solo un processo storico che inizia nei primi anni del XX secolo con la scoperta dei quanti energetici e continua, fra il 1925 e il 1926, con la definizione della Meccanica delle Matrici e della Meccanica Ondulatoria. È soprattutto un radicale progresso del pensiero scientifico che proprio negli anni successivi al 1926 comincia ad assumere, spesso autonomamente, anche contorni filosofici. Con questa affermazione non intendo sostenere la tesi che dal 1927 in poi, tutte le discipline scientifiche abbiano dovuto tenere in particolare conto la filosofia

perché è stata formalizzata la Fisica Quantistica e il suo innovativo modo di descrivere la materia. Ciò che sto mettendo in evidenza è che la filosofia e la fisica – che dialogano fra loro dal tempo degli antichi Greci e probabilmente ancora da prima – con l'avvento della Fisica Quantistica sono state obbligate a confrontarsi profondamente l'una con l'altra per cercare di definire, assieme, una nuova chiave di lettura della realtà.

Naturalmente, questa mia posizione non è condivisa da tutti i fisici, né lo è stata in passato. Steven Weinberg, vincitore del

Nobel per la fisica nel 1979 – assieme a Sheldon Lee Glashow e Abdus Salam – per il suo contributo alla teoria unificata dell'interazione debole ed elettromagnetica fra le particelle elementari, nel 1993 intitolò un intero capitolo di un suo libro¹ «Against the Philosophy», contro la filosofia. In quel testo, Weinberg rifletteva sulla «irragionevole inefficacia» della filosofia della scienza evidenziando come le sue misteriose discussioni risultassero utili e interessanti solo per pochi scienziati.

Anche il noto fisico e astronomo Lawrence Maxwell Krauss,

intervistato nel 2012 dalla rivista The Atlantic², ha espresso posizioni simili: «La filosofia è un settore che, purtroppo, mi ricorda una vecchia battuta di Woody Allen: 'Quelli che non sanno fare insegnano, e quelli che non sanno neanche insegnare insegnano ginnastica'. [...] E la parte peggiore della filosofia è la filosofia della scienza: per quanto ne so, le uniche persone che hanno letto le opere dei filosofi della scienza sono altri filosofi della scienza. Sulla fisica non ha nessun tipo di impatto e dubito che altri filosofi le leggano perché sono abbastanza tecniche. Quindi è

davvero difficile capire che cosa la giustifichi. Direi che questo stato di tensione si verifica perché i filosofi si sentono minacciati, e ne hanno tutte le ragioni, perché la scienza progredisce e la filosofia no». ³

Persino Stephen Hawking e Leonard Mlodinow la pensano alla stessa maniera: «Ma la filosofia è morta non avendo tenuto il passo degli sviluppi più recenti della scienza, e in particolare della fisica. Così sono stati gli scienziati a raccogliere la fiaccola nella nostra ricerca della conoscenza». ⁴ E giusto per aggiungere un ulteriore autorevole parere, quello

dell'astrofisico Neil deGrasse Tyson, ecco quello che ha dichiarato nel 2014: «Ciò che mi dà più da pensare è che i filosofi credono realmente di porsi domande profonde sulla natura. Ma lo scienziato gli chiede: 'Cosa stai facendo? Perché insisti a cercare il significato del significato?'»⁵

L'altro punto di vista

Eppure, come ho già accennato, fisica e filosofia sono sempre state in stretta relazione fra loro, anche perché da un punto di vista storico sono state la stessa cosa praticamente fino al XVII secolo e alle fondamentali scoperte di Sir Isaac Newton e Galileo Galilei: tutti e due, fisici, matematici, filosofi e molto altro ancora. Non è un caso che il metodo scientifico⁶ formalizzato da Galilei e la fisica Newtoniana abbiano comportato una separazione fra la fisica e la filosofia dato che entrambe proponevano, paradossalmente,

una nuova posizione filosofica, nella quale l'universo diventava una macchina perfetta governata esclusivamente dalle leggi della meccanica. Ed è proprio questa posizione, durata con successo per quasi trecento anni, che ha cominciato a mostrare i primi segni di cedimento con l'avvento della Fisica Quantistica, soprattutto a causa della definizione del Principio di Indeterminazione di Heisenberg.

Come ha scritto poco prima della sua scomparsa, nel 2014, il fisico Victor John Stenger: «Benché il concetto di universo-orologio [concetto Newtoniano] sia stato

invalidato dal Principio di Indeterminazione di Heisenberg, la Meccanica Quantistica resta diabolicamente difficile da interpretare filosoficamente. Anziché dire che la fisica 'capisce' l'universo, è più esatto dire che i modelli della fisica sono sufficienti a descrivere il mondo materiale come lo osserviamo con i nostri occhi e con gli strumenti [che abbiamo a disposizione]». ⁷

Non solo, continua Stenger: «Nella prima parte del XX secolo quasi tutti i più famosi fisici dell'epoca – Albert Einstein, Niels Bohr, Erwin Schrödinger, Werner

Heisenberg e Max Born, per citarne alcuni – rifletterono – sulle conseguenze filosofiche delle loro rivoluzionarie scoperte nel campo della Relatività e della Meccanica Quantistica. Dopo la Seconda guerra mondiale, però, la nuova generazione di protagonisti della fisica – Richard Feynman, Murray Gell-Mann, Steven Weinberg, Sheldon Glashow e altri – trovò improduttive queste riflessioni, e la maggior parte dei fisici [...] li seguì. Ma la generazione ancora successiva ha adottato dottrine filosofiche, o almeno ha parlato in termini filosofici, senza ammetterlo

a se stessa».

Facciamo un esempio per chiarire quest'ultimo concetto, riprendendo un altro articolo pubblicato su Scientific American, nel 2012, a firma del fisico teorico americano David Tong. Tong sostiene apertamente che le particelle che osserviamo negli esperimenti sono delle illusioni e che i fisici che dicono che sono elementi fondamentali sono in malafede: «I fisici insegnano di routine che i mattoni della natura sono particelle discrete come l'elettrone o i quark. È una bugia. Gli elementi costitutivi delle nostre teorie non sono

particelle ma campi: oggetti continui simili a fluidi sparsi in tutto lo spazio». Come conclude Stenger: «Questo punto di vista è esplicitamente filosofico, e accettarlo acriticamente è un cattivo modo di pensare filosoficamente».

Ci sono due passaggi fondamentali che è bene mettere in evidenza nel pensiero di Stenger. Il primo, su cui ci siamo appena soffermati, chiarisce che la Fisica Quantistica spinge chi vi si confronta ad adottare – magari anche inconsapevolmente – un approccio filosofico. Il secondo

riprende il concetto di «modello» di rappresentazione della fisica classica⁸ e lo applica alla Fisica Quantistica. Anche in quest'ultimo ambito, non esiste un'unica realtà o un'unica descrizione possibile del mondo materiale, ma una serie di differenti modelli che lo riproducono, coesistono fra loro e risultano sovrapponibili. Sono proprio questi due aspetti che dobbiamo tenere sempre presenti quando riflettiamo sulla Fisica Quantistica e sulle sue applicazioni – e implicazioni – nella nostra vita quotidiana.

Una breve precisazione

Ho sempre amato lo studio della fisica fin da giovanissimo perché, dal mio punto di vista, permette di comprendere – o di cercare di comprendere – l'essenza delle cose, di ciò che ci circonda. Così, quando è arrivato il momento di iscrivermi alle superiori, ho scelto un liceo sperimentale in fisica e ho cominciato il percorso che mi avrebbe poi portato all'università. Tutto regolare, quindi? Beh, non proprio: cinque anni dopo, infatti, ero ancora determinato a iscrivermi alla Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali –

all'epoca non c'erano i dipartimenti – , ma avevo contemporaneamente sviluppato una grande passione per la filosofia. Mi ero reso conto, infatti, che per la mia formazione personale e culturale sarebbe stato fondamentale sia il confronto con l'oggettività della materia sia quello con le idee – con le «elucubrazioni», come direbbero alcuni miei colleghi fisici – che tramite quell'oggettività ricercano una comprensione più profonda della realtà. In altre parole, con ciò che attualmente viene definito come metafisica.

A questo punto, diventa

assolutamente necessario un chiarimento su cosa significhi esattamente la parola «metafisica» e sul perché venga così spesso fraintesa, specialmente all'interno degli ambiti scientifici. Chiarimento che farò tramite le parole del neuroscienziato padovano Enrico Facco, con cui ho avuto modo di confrontarmi più volte sull'argomento. «Il termine 'metafisica', branca della filosofia volta alla comprensione della natura ultima della realtà, e quindi della verità, dell'essere in quanto tale oltre le sue determinazioni relative, risale ad Aristotele e

Platone. In Aristotele essa è la filosofia prima, la disciplina più elevata tra gli strumenti della conoscenza, mentre le altre scienze, in particolare la fisica – con il nome di ‘filosofia seconda’ –, sono a essa subordinate.»

Ciò premesso, continua Enrico Facco, «il termine metafisica non è stato coniato da Aristotele ma nasce nel I secolo a.C., quando nell’ordinamento del corpus aristotelico gli argomenti relativi alla filosofia prima furono posposti a quelli sulle leggi della natura – in greco: τὰ φυσικά, la fisica – con il nome di ‘metafisica’: τὰ μετὰ τὰ

φυσικῶ, τὰ μετὰ τὰ φυσικὰ, dopo la fisica. Il dopo, nel mero ordine di esposizione, è diventato un oltre connotato di valore, indicante nel termine 'metafisica' la disciplina suprema tra le scienze teoretiche. Del resto per Aristotele la filosofia prima era comunque rivolta alla determinazione dei principi primi all'origine dell'esistenza e quindi degli universali, conferendo alla metafisica il carattere di conoscenza assoluta».

Vista come ricerca di una conoscenza assoluta, la metafisica acquisisce una valenza che può essere accettata o meno, da chi vi

si confronta. Cionondimeno esiste. Stenger, nello stesso articolo in cui difende la filosofia afferma però anche: «Qualunque siano i rami della filosofia che meritano la stima di studiosi e pubblico, la metafisica non è tra questi. Il problema è semplice: la metafisica sostiene di essere in grado di cogliere la realtà – così da poterla descrivere a buon diritto – ma non c'è modo di sapere se lo fa». A ben vedere, quella di Stenger è a propria volta una presa di posizione, dato che, come abbiamo appena visto, la metafisica non pretende di cogliere la realtà bensì cerca di descriverne i principi

fondamentali.

E questa posizione è la stessa – con tutti i necessari distinguo⁹ – che hanno anche gli scienziati quando studiano i principi che governano i fenomeni naturali e forniscono i modelli teorici che li rappresentano. «La vera difficoltà sta nel fatto che la fisica è un tipo di metafisica; la fisica descrive 'la realtà'. Ma noi non sappiamo cosa sia 'la realtà', se non attraverso la descrizione fisica che ne diamo di essa», scrisse di proprio pugno Albert Einstein a Erwin Schrödinger in una lettera del 1935.

Ecco perché, come vedremo nel

corso di questo volume, alcune delle riflessioni esposte da Niels Bohr nei saggi scritti fra il 1929 e il 1962 sulle implicazioni della Fisica Quantistica nella biologia, nel problema della vita e persino nella stessa filosofia,¹⁰ hanno un implicito aspetto metafisico e a distanza di oltre cinquant'anni dalla loro pubblicazione riescono ancora a sorprendere e a far riflettere chi vi si avvicina. Un aspetto metafisico, in alcuni casi frainteso, che dal mio punto di vista permea profondamente l'evoluzione della Teoria Quantistica e che contamina indirettamente anche quella che,

come impareremo a conoscere tra poco, ne è la sua più diffusa interpretazione: l'Interpretazione di Copenaghen.

Verso la complessità

«Prima dell'avvento della Fisica Quantistica, non c'era alcun dubbio in proposito: nella teoria di Newton la realtà era rappresentata da punti materiali nello spazio e nel tempo; nella teoria di Maxwell, dal campo nello spazio e nel tempo. Nella Meccanica Quantistica la rappresentazione della realtà non è così facile. Alla domanda se una funzione ψ della Teoria Quantistica rappresenti una situazione reale effettiva, nel senso valido per un sistema di punti materiali o per un campo elettromagnetico, si esita a rispondere con un semplice 'sì' o

'no'. Perché?»¹¹ In questa riflessione di Albert Einstein del 1949 c'è il senso profondo della rivoluzione quantistica, e contemporaneamente la presa d'atto del cambiamento di approccio, anche filosofico, necessario per affrontarla.

Einstein, dopo la presentazione dei due modelli della Meccanica Quantistica, nel 1926, aveva scritto a Bohr alcune frasi destinate a diventare celebri: «La Meccanica Quantistica è degna di ogni rispetto, ma una voce interiore mi dice che non è ancora la soluzione giusta. È una teoria che ci dice

molte cose, ma non ci fa penetrare più a fondo il segreto del Grande Vecchio. In ogni caso, sono convinto che questi non gioca a dadi col mondo». ¹² Com'è possibile che lo stesso scienziato che aveva individuato il quanto dell'energia elettromagnetica, il fotone, con queste parole si dimostri così riluttante ad accettare la nuova realtà della fisica? I motivi sono più d'uno, e per comprenderli tutti è necessario riprendere la sequenza storica delle scoperte legate alla Fisica Quantistica da dove l'avevamo interrotta nel capitolo precedente.

Dopo l'enunciazione del modello della Meccanica Ondulatoria, nel marzo del 1926 Schrödinger pubblicò altri cinque articoli sempre su *gli Annalen der Physik*, riuscendone anche a dimostrare – con l'aiuto di altri scienziati – l'equivalenza matematica con il modello della Meccanica delle Matrici di Heisenberg. Fu Paul Dirac, però, che nel settembre 1926 elaborò la Teoria delle Trasformazioni. In base al lavoro del ventiquattrenne talento inglese, la Meccanica delle Matrici e la Meccanica Ondulatoria non erano altro – così come sono tuttora – che

casi particolari di una formulazione più generale della Meccanica Quantistica. Grazie al lavoro di Dirac, si riusciva ad affermare l'esistenza di due diverse forme della medesima teoria e contemporaneamente si ammetteva esplicitamente la possibilità che potessero esistere anche ulteriori modelli in grado di rappresentare la Meccanica Quantistica. Possibilità che poi, puntualmente, si concretizzò nel 1948 con la formulazione «Path Integral» – ovvero «Integrale sui Cammini» – proposta da Richard Feynman. ¹³

Non solo, nel luglio dello stesso anno Max Born spinse ancora più in avanti i limiti del modello quantistico. Così come Ludwig Boltzmann aveva applicato il modello statistico allo studio del comportamento dei gas – ottenendo la Distribuzione di Maxwell-Boltzmann – così Born ripensò la funzione d'onda associata alle particelle nei termini di una distribuzione di probabilità. Mentre per Schrödinger la funzione d'onda associata a un elettrone ne descriveva la densità di carica in condizioni ben precise, per Born consentiva solamente di calcolare la

probabilità di trovare l'elettrone in una specifica posizione dello spazio. In altre parole, la funzione d'onda perdeva il proprio aspetto concreto, tangibile, per diventare un immateriale strumento probabilistico. Questa posizione, come scrive il fisico e divulgatore Manjit Kumar, «è parte integrante dell'idea che la Meccanica Quantistica possa fornire solamente le probabilità relative di ottenere certi risultati dalla misurazione di un'osservabile e non possa predire quale specifico risultato si otterrà in una data occasione». ¹⁴

Forse oggi queste affermazioni

non ci colpiscono più di tanto, perché abbiamo avuto quasi un secolo di tempo per adattarci alle loro implicazioni. All'epoca, però, non solo risultavano sconvolgenti ma obbligavano i fisici e gli scienziati che ci si confrontavano a una riflessione anche filosofica sul loro significato fisico più profondo. E proprio questo aspetto era quello che lasciava più perplesso Albert Einstein. «Certo, questioni filosofiche ma relative all'interpretazione fisica e quindi fortemente ancorate alla struttura matematica della teoria.» Aggiunge Giulio Peruzzi, docente di Storia

della Fisica presso l'Università di Padova: «Si può dire che 'filosofica' o 'metafisica' sia la fiducia di Einstein nel Principio di Causalità. Principio che, peraltro, esiste in forma debole anche nella Meccanica Quantistica: l'equazione di Schrödinger per la funzione d'onda è un'equazione deterministica che rispetta il Principio di Causalità».

Sempre nel 1926, Einstein, al termine di una conferenza di Heisenberg sulla Meccanica delle Matrici, invitò il giovane collega tedesco nel proprio appartamento di Berlino per discutere, come ricordò lo stesso Heisenberg, «le

implicazioni filosofiche della mia teoria». E non fu un caso: per Einstein, alcune delle conseguenze della Meccanica Quantistica erano molto difficili da accettare, e desiderava avere un confronto più ampio con il teorizzatore di uno dei due modelli che la descrivevano. Evidentemente, però, le sue perplessità non vennero completamente fugate: Einstein, infatti, cominciò un po' alla volta a prendere le distanze dalla visione del mondo proposta dalla Fisica Quantistica, dedicandosi al contempo alla personale ricerca di una diversa teoria fondamentale.

Cosa c'è sotto?

Anche per gli scienziati che avevano portato un contributo determinante alla rivoluzione quantistica rimaneva, comunque, il problema dell'interpretazione fisica delle proprie teorie. Nell'ottobre del 1926 Erwin Schrödinger si mise in viaggio per Copenaghen allo scopo di incontrarsi con Niels Bohr e Werner Karl Heisenberg per trovare una soluzione condivisa al problema. Purtroppo, i tre scienziati non riuscirono nel loro intento, e così non venne raggiunto alcun tipo di accordo sull'interpretazione fisica né della Meccanica delle Matrici né

della Meccanica Ondulatoria. Bohr, assieme a Heisenberg, continuò le proprie ricerche in questa direzione fino al febbraio dell'anno successivo per poi decidere di prendersi un mese di riposo e andare a sciare a Gudbrandsdalen, in Norvegia.

La frustrazione di Bohr era evidente: non solo non riusciva a delineare un quadro di riferimento complessivo e coerente sulle implicazioni della Teoria Quantistica, ma c'erano anche ulteriori problemi da risolvere. Uno di questi, per esempio, era quello della camera a nebbia inventata da Charles Thomson Rees Wilson,

scienziato inglese e collaboratore di Joseph John Thomson. Nel 1911, durante la festa natalizia organizzata per i ricercatori dalla Cambridge University, Bohr e Rutherford erano venuti a conoscenza dei perfezionamenti che Wilson stava apportando alla strumentazione originale realizzata nel 1899. La camera a nebbia era un semplice recipiente di vetro contenente dell'aria satura con del vapore acqueo. Sparando nel recipiente delle particelle subatomiche cariche, il vapore si condensava in minuscole goccioline attorno alle particelle stesse,

permettendo così di evidenziarne le traiettorie.

Erano passati oltre quindici anni da quel giorno, eppure Bohr continuava a riflettere su quell'esperimento, perché nella sua visione della Fisica Quantistica non era possibile che esistessero delle traiettorie definite per le particelle subatomiche, né tanto meno che fossero così facilmente visibili. Anche Heisenberg stava cercando di risolvere quel problema, ma da un altro punto di vista. Durante il suo colloquio con Einstein, infatti, proprio la camera a nebbia era stata uno degli argomenti più

discussi. Ecco cosa ricorda lo stesso Heisenberg di quell'incontro.

«Einstein disse: 'Ma tornando alla sua relazione, ho il sospetto che [..] la sua teoria un giorno o l'altro la metterà nei guai. Ora mi spiego. Non ha mutato affatto il concetto di osservazione, ma si direbbe che il consueto linguaggio descrittivo delle scienze vada ancora benissimo. Ma se davvero fosse così dovrebbe dire: nella camera a nebbia possiamo osservare la traiettoria degli elettroni; ma al contempo lei sostiene che le orbite degli elettroni non esistono. Ciò è assurdo, perché non ha senso dire

che gli elettroni non orbitano intorno al nucleo dopo aver ristretto lo spazio attraverso il quale si muove l'elettrone.' Cercai di difendere la Meccanica Quantistica. 'Al momento non ho la minima idea di quale linguaggio occorra utilizzare per descrivere i processi atomici. È vero che disponiamo di un linguaggio matematico per determinare gli stati stazionari dall'atomo o le probabilità di transizione da uno stato all'altro; però non sappiamo in che modo questo linguaggio è collegato a quello della fisica classica. E naturalmente è indispensabile

conoscere questo collegamento se vogliamo applicare la teoria a livello sperimentale.»¹⁵

La ricerca del collegamento fra Fisica Quantistica e fisica classica, secondo le parole di Heisenberg, diventa quindi il fulcro per la comprensione della Meccanica Quantistica. «Quando si scende sul terreno sperimentale ricorriamo invariabilmente al linguaggio tradizionale. Quindi, non possiamo affermare che abbiamo veramente 'capito' la Meccanica Quantistica. Ipotizziamo che il modello matematico funzioni, ma ancora non abbiamo stabilito un

collegamento con il linguaggio tradizionale.» Non solo, dal punto di vista di Heisenberg doveva essere tenuto in considerazione anche un ulteriore aspetto: quello della comprensione delle leggi profonde della natura. Un aspetto fisico e al contempo filosofico che tira in ballo i concetti di semplicità e di bellezza. Concetti che solitamente non associamo alle logiche della fisica perché, come spiega Giulio Peruzzi, «i significati di 'semplice' e di 'bello', riferiti a una legge di natura – per esempio all'equazione di Dirac –, difficilmente possono coincidere con quelli del senso comune».

Ecco quanto afferma Heisenberg al riguardo: «Sono convinto [...] che la semplicità delle leggi naturali abbia un carattere oggettivo e che non sia solo il risultato dell'economia del pensiero. Se la natura ci porta a forme matematiche di grande semplicità e bellezza – e col termine 'forme' intendo indicare sistemi coerenti di ipotesi, di assiomi, eccetera – che ci erano sconosciute in precedenza, perché non ritenerle vere, nel senso che rivelano aspetti della natura realmente esistenti? Può darsi che queste forme derivino anche da una nostra relazione soggettiva con la

natura: che, cioè, riflettano elementi dell'economia del nostro pensiero. Ma solo il fatto che mai avremmo potuto elaborare queste forme con le nostre forze soltanto, ma che ci sono state rivelate dalla natura, indica che esse fanno parte della realtà e non solo del nostro pensiero sulla realtà. Si può obiettare che, parlando di semplicità e bellezza, faccio della verità una questione di estetica; e devo francamente ammettere che ammiro moltissimo la semplicità e la bellezza dei modelli matematici che la natura ci offre».

Occhi nuovi per diverse visioni

Lasciato da solo a lavorare nel piccolo ufficio dell'Università di Copenaghen, Heisenberg decise di affrontare nuovamente il problema delle traiettorie delle particelle subatomiche che venivano visualizzate nella camera a nebbia. Questa volta, però, era deciso a cambiare completamente il proprio punto di vista. «Avevamo sempre disinvoltamente sostenuto che la camera di Wilson ci mostrasse la traiettoria dell'elettrone. Forse però noi osservavamo qualcosa d'altro;

forse non vedevamo altro che una serie di punti discreti e mal definiti, attraverso i quali l'elettrone era passato. Anzi, se è per questo, la camera a nebbia mostra solo una serie di minuscole gocce d'acqua, sicuramente molto più grandi dell'elettrone.»

Come afferma il fisico Manjit Kumar: «Non c'era alcuna traiettoria continua, ininterrotta, credeva Heisenberg. Lui e Bohr si erano posti la domanda sbagliata. Quella a cui si doveva dare risposta era: 'la Meccanica Quantistica è in grado di rappresentare il fatto che un elettrone si trova

approssimativamente in un punto dato e che si sposta approssimativamente a una velocità data?»¹⁶ La risposta che Heisenberg riuscì a fornire nel suo famoso articolo del 1927 «Sul contenuto intuitivo della cinematica e della meccanica nella Teoria Quantistica»¹⁷ fu quello che è passato alla storia come Principio di Indeterminazione di Heisenberg!

Abbiamo già visto nel Capitolo 1 che il Principio di Indeterminazione di Heisenberg può essere espresso come l'incapacità di misurare con precisione e simultaneamente due proprietà variabili di una stessa

particella che risultino correlate fra loro. Nel caso specifico dell'elettrone, le due caratteristiche individuate da Heisenberg erano la posizione e la velocità; più precisamente, in termini fisici: la posizione e la quantità di moto. Era come se la natura, a livello quantistico, imponesse a chi volesse misurarla una specie di scelta: se vuoi sapere dove si trova esattamente la particella, non puoi pretendere di conoscere con uguale sicurezza la sua velocità. Un presupposto paradossale, dal punto di vista fisico, che violava il determinismo intrinseco alla fisica

classica. Un determinismo dove tutte le grandezze, con gli opportuni strumenti, risultano essere descrivibili numericamente entro specifici limiti di precisione: quelli legati all'errore dello stesso strumento utilizzato per misurarle.

Intaccare una simile certezza proponendo un'indeterminazione intrinseca nella natura atomica e subatomica della materia comportava, ancora una volta, lo sconvolgimento di tutto ciò che si era sempre dato per scontato, anche dal punto di vista filosofico. Non solo, mentre rifletteva sul nuovo principio che stava

elaborando, Heisenberg si rese anche conto che quella stessa indeterminazione avrebbe condizionato ogni esperimento pratico e ogni riflessione teorica successiva. Il suo Principio di Indeterminazione, in definitiva, era destinato a divenire uno dei principali teoremi dell'intera Teoria Quantistica!

Prima di svelare quali ripercussioni ebbe la scoperta di Heisenberg sia nei suoi rapporti con Bohr sia in quelli con l'intera comunità scientifica, mi soffermerò brevemente sulla formulazione del Principio di Indeterminazione. Il mio

obiettivo è quello di farvi comprendere in modo semplice e diretto i suoi meccanismi per evidenziarne le profonde – e per l'epoca, sconvolgenti – implicazioni. Ecco come può essere scritto utilizzando la notazione matematica:

$$\Delta p \cdot \Delta q \geq h / 2\pi$$

Non lasciamoci spaventare: il simbolo Δ indica semplicemente l'imprecisione, l'incertezza con cui sono conosciute le due variabili posizione (p) e quantità di moto (q). Quindi, la moltiplicazione fra l'indeterminatezza sulla posizione di una particella e quella sulla sua

quantità di moto deve risultare sempre maggiore della Costante di Planck (h) divisa per un valore fisso pari a 2π . La Costante di Planck – che abbiamo visto nel Capitolo 1 – ha un valore determinato, così come 2π . Quindi, possiamo riscrivere il loro quoziente in questo modo:

$$h / 2\pi = \hbar$$

dove \hbar prende il nome di Costante di Planck ridotta. Se, adesso, la sostituiamo nella formula originaria, otteniamo:

$$\Delta p \cdot \Delta q \geq \hbar$$

cioè, in definitiva, una formula immediatamente comprensibile

dove si afferma che l'imprecisione sulla posizione e quella sulla velocità di una particella, moltiplicate fra loro, devono essere sempre maggiori di un valore pari alla costante di Planck ridotta. Un valore piccolissimo e calcolabile, all'incirca, in $6,582 \cdot 10^{-16}$ eV · s. Cioè 6,582 diecimilionesimi di miliardesimi di elettronvolt al secondo.

Capisco che questo numero, scritto così, sembri solo uno scioglilingua per chi non utilizza quotidianamente questo linguaggio, ma per avere un'idea del suo valore basta fare una semplice

proporzione. Senza considerare l'unità di misura – che risulta collegata alla carica dell'elettrone e alla sua posizione all'interno del campo elettrico – $6,582 \cdot 10^{-16}$ corrisponde all'incirca alla differenza che c'è fra un millimetro e quattrocentoquaranta volte la distanza che separa la Terra dal Sole. In pratica, l'indeterminazione fra la posizione della particella e la sua velocità equivale proprio, come paragone intuitivo, a quel millimetro rapportato a una distanza pari a 440 Unità Astronomiche!

Gioie, delusioni e conflitti

Per mettere alla prova il nuovo principio, Werner Karl Heisenberg decise di sottoporlo a una serie di esperimenti mentali. Avendo a che fare con ordini di grandezza atomica e subatomica, uno dei principali problemi che tutti i ricercatori si trovavano costretti ad affrontare – così come succede anche tuttora –, era quello di realizzare gli esperimenti necessari per convalidare le proprie ipotesi. Gli esperimenti mentali consentono di superare i confini imposti dalle limitazioni tecnologiche, sostituendo gli strumenti materiali,

concreti, con quelli astratti del pensiero: una comodità non da poco!

Heisenberg, quindi, immaginò di «vedere» un elettrone attraverso un potente microscopio. Dato che i microscopi classici sfruttano la luce per creare l'immagine, e dato che le lunghezze d'onda appartenenti allo spettro visibile sono molto più grandi di quelle di un elettrone, il microscopio non avrebbe permesso di determinare esattamente la posizione della particella. Una soluzione poteva consistere nell'impiegare microscopi a raggi gamma come quelli utilizzati dal

fisico americano Arthur Holly Compton; lo stesso Compton che quattro anni prima, nel 1923, aveva studiato le collisioni tra i raggi X e gli elettroni, dimostrando senza più alcuna ombra di dubbio l'esistenza dei fotoni. ¹⁸

Sostituendo il microscopio classico con il microscopio a raggi gamma, però, si sarebbe colpito l'elettrone con un fotone gamma originando una collisione che avrebbe necessariamente modificato la velocità dell'elettrone e quindi la sua quantità di moto, che è proprio il prodotto della massa per la velocità. Anche in

questo caso, quindi, si sarebbe originata un'indeterminazione: non sulla posizione, come con il microscopio classico, bensì sulla quantità di moto. Neanche il tentativo di ridurre la forza dell'impatto avrebbe potuto diminuire l'indeterminatezza generale, dato che per riuscirci sarebbe stato necessario aumentare nuovamente la lunghezza d'onda del fotone incidente – quello che colpisce l'elettrone – e di conseguenza sarebbe aumentata l'imprecisione sulla posizione.

Grazie a questo esperimento

mentale, Heisenberg era riuscito a confermare l'imprecisione nella conoscenza simultanea delle misure di due grandezze correlate fra loro come la posizione e la quantità di moto. Un risultato che avrebbe poi applicato anche a un'altra coppia di variabili coniugate, quella formata dall'energia e dal tempo:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$$

C'era anche un altro aspetto che occorreva tenere in considerazione secondo Heisenberg e che riguardava la Meccanica delle Matrici. Il fisico tedesco aveva scoperto l'anno prima che le matrici che ne erano alla base non

commutavano, ma non sapeva il perché. Adesso, il Principio di Indeterminazione gli offriva una soluzione semplice e allo stesso tempo pratica: «È l'indeterminazione specificata [fra la posizione e la quantità di moto] a creare spazio per la validità delle relazioni». Come conseguenza di ciò, Heisenberg arrivò ad affermare che tutto ciò che accadeva in natura era solo quello che la Meccanica Quantistica diceva che poteva succedere.

Heisenberg era certo di aver trovato la strada giusta per arrivare a una formulazione complessiva

della Fisica Quantistica, ma gli erano rimasti alcuni dubbi da dissipare. Quindi, prima ancora che Bohr tornasse dal suo viaggio in Norvegia, decise di scrivere una lettera a Pauli per conoscere il parere critico dell'amico. La lettera fu spedita il 23 febbraio 1927 e la risposta che ne ricevette da Pauli lo tranquillizzò completamente: «Spunta il giorno sulla Teoria Quantistica». ¹⁹ Purtroppo, quella soddisfazione era destinata a durare solo per un breve periodo: quando Niels Bohr, rientrato a Copenaghen, lesse l'articolo del suo protetto, sollevò subito delle

obiezioni – anche metodologiche – che gettarono Heisenberg nello sconforto.

Innanzitutto, c'era un'impresione nell'esperimento mentale in relazione alle reali modalità di funzionamento del microscopio a raggi gamma. Tale impresione spostava l'origine dell'indeterminazione sulla quantità di moto dalla natura della collisione alla posizione in cui si trovava l'elettrone quando veniva colpito dal fotone. In secondo luogo, secondo Bohr, Heisenberg si era concentrato esclusivamente sull'aspetto particellare e

discontinuo dell'elettrone,
trascurandone completamente
l'interpretazione ondulatoria; e
questo, per il danese, era un vizio
di forma inaccettabile.

Fra Bohr e Heisenberg,
nonostante il primo agisse
esclusivamente nell'interesse del
più giovane collega tedesco, i
rapporti si fecero difficili.
Heisenberg prese molto male le
critiche: «Non sapevo cosa
rispondere di preciso alle
argomentazioni di Bohr, e così la
discussione si concluse con
l'impressione generale che lui
avesse di nuovo dimostrato che la

mia interpretazione era sbagliata». ²⁰ Senza apportare le modifiche richieste da Bohr, Heisenberg spedì comunque l'articolo alla rivista *Zeitschrift für Physik*. Fra le sue pagine, però, aggiunse: «L'interpretazione fisica della Meccanica Quantistica è ancora piena di discrepanze interne che si manifestano in controversie su continuità e discontinuità come su particella e onda».

Ma Bohr non era l'unico con cui Heisenberg, in quel periodo, si trovava in rotta di collisione. Anche la Meccanica Ondulatoria e il suo teorizzatore, Erwin Schrödinger,

vennero menzionati in una nota dell'articolo: «Schrödinger descrive la Meccanica Quantistica come una teoria formale di spaventosa, anzi ripugnante, astrattezza e mancanza di visualizzabilità. Di certo non si può sovrastimare il valore della padronanza matematica (ed entro quei limiti, fisica) delle leggi quantomeccaniche che la teoria di Schrödinger ha reso possibile. Tuttavia, per quanto riguarda le questioni di interpretazione fisica e di principio, la concezione corrente della Meccanica Ondulatoria, a mio parere, ci ha in realtà sviato proprio da quei percorsi che erano stati

indicati dagli articoli di Einstein e de Broglie da una parte, e da quelli di Bohr, nonché dalla Meccanica delle Matrici, dall'altra».

Presupposti per una nuova interpretazione

Mentre Heisenberg era completamente assorto dall'analisi del Principio di Indeterminazione e delle sue implicazioni, Bohr ragionava su come fosse possibile definire concettualmente la natura quantistica della realtà. Il paradosso della duplice natura della materia doveva essere superato senza che né l'aspetto particellare né quello ondulatorio risultassero in alcun modo penalizzati. La soluzione che Bohr ipotizzò già durante il proprio soggiorno a

Gudbrandsdalen e che poi sviluppò a Copenaghen nei mesi successivi del 1927, viene attualmente conosciuta con il nome di Principio di Complementarietà.

Abbiamo già incontrato questo principio sia nel Capitolo 1, quando lo abbiamo enunciato in relazione alla duplice natura della luce, sia nel Capitolo 2, mentre ragionavamo sulle implicazioni dell'atomo quantistico. L'importanza di questo principio non è solo nell'affermare che le proprietà corpuscolari e quelle ondulatorie delle radiazioni, degli elettroni e della materia sono complementari e

contemporaneamente si escludono a vicenda; ma anche nel costituire la base per una più completa e coerente interpretazione fisica della Meccanica Quantistica.

Anche oggi, questo aspetto mantiene inalterata la propria valenza e la propria suggestione. Per chi non ammette la possibilità di una visione dualistica della realtà – i cosiddetti monisti – accettare il fatto che sia le particelle sia le onde costituiscano descrizioni valide e complementari della natura è impossibile. Eppure, questa è solo una delle caratteristiche più evidenti del comportamento

quantistico. Come si rese conto Bohr continuando la propria riflessione, entrambe le descrizioni sono solo parzialmente vere. In nessun caso, infatti, un qualsiasi osservatore può farne esperienza nello stesso momento.

Avere due descrizioni parzialmente vere per una stessa realtà era il punto critico del pensiero di Bohr: come sarebbe riuscito a dimostrare la complementarità senza introdurre ulteriori riflessioni che avrebbero solamente complicato il problema? Inaspettatamente, la risposta gli venne fornita da Heisenberg e dal

suo Principio di Indeterminazione, anche se non nel modo in cui lo stesso Heisenberg si sarebbe aspettato. Ma per capirlo meglio dobbiamo fare un piccolo salto indietro, nel 1923, e tornare all'Ipotesi Ondulatoria di Louis de Broglie.

Finora ho preferito non darne l'espressione matematica per evitare di complicare inutilmente la comprensione dei principali concetti della Fisica Quantistica, ma adesso è arrivato il momento di conoscerla un po' meglio, anche perché, come tutte le formule realmente importanti, è anche molto semplice:

$$p = h / \lambda$$

Sono tutti termini che già conosciamo bene: p è la quantità di moto, h è la costante di Planck e λ è la lunghezza d'onda. In altre parole, la quantità di moto di una particella risulta essere proporzionale alla costante di Planck divisa per la sua lunghezza d'onda.

Quello che Bohr vide in questa espressione e in quella di Planck, che riporto di seguito per averla subito a disposizione,

$$E = h \cdot \nu$$

fu che in entrambi i casi a un termine associato all'aspetto

particellare della materia ne veniva sempre fatto corrispondere un secondo relativo, invece, al suo aspetto ondulatorio. Quantità di moto ed energia, infatti, sono caratteristiche proprie delle particelle; lunghezza d'onda e frequenza, invece, descrivono la struttura delle onde.

Nella discussione avuta con Heisenberg dopo essere rientrato a Copenaghen, Bohr aveva spiegato al collega tedesco che nella sua formulazione del Principio di Indeterminazione aveva tenuto conto esclusivamente della natura particellare dell'elettrone. Ora,

grazie al parallelo che lui stesso aveva individuato fra le componenti particellari e quelle ondulatorie dell'equazione di de Broglie e di quella di Planck, Bohr poteva affermare che il Principio di Indeterminazione poteva essere traslato senza difficoltà anche in ambito ondulatorio.

Era la soluzione perfetta! Una soluzione che poteva essere applicata a tutte le coppie di variabili coniugate fra loro e quindi anche all'altro Principio di Indeterminazione che Heisenberg aveva individuato fra l'energia e il tempo. Come scrive Manjit Kumar

i n Quantum: «Le relazioni di indeterminazione [di Heisenberg] implicavano che si dovesse fare una scelta tra quella che Bohr chiamava una descrizione 'causale',²¹ basata sui principi di conservazione dell'energia e della quantità di moto, e una descrizione 'spaziotemporale', in cui gli eventi sono seguiti nello spazio e nel tempo. Le due descrizioni [derivate dai due Principi di Indeterminazione] erano mutuamente esclusive ma complementari, in modo da render conto dei risultati di tutti i possibili esperimenti».

Chiudere il cerchio

Fra Bohr e Heisenberg c'era un'ulteriore profonda differenza di vedute in relazione a quale fosse il motivo scatenante per cui la natura a volte mostrava il proprio volto particellare mentre a volte si presentava come un'onda. Questo tipo di ragionamento, come ho messo in evidenza all'inizio del capitolo, comportava riflessioni che dalla fisica spaziavano in ambito filosofico e metafisico. Bohr, per esempio, sosteneva che non fosse possibile conoscere la reale natura di ciò che si stava osservando. Nel caso della luce, la domanda da

porsi non era cosa fosse la luce, ma se durante l'osservazione si sarebbe comportata da particella o da onda.

Il ruolo dell'osservatore diveniva, quindi, cruciale; così come la scelta dell'esperimento da realizzare e persino l'atto stesso della misurazione. Bohr riteneva che fosse la scelta dell'esperimento a condizionare il comportamento dell'oggetto osservato, mentre Heisenberg era convinto che durante la misurazione avvenisse una perturbazione che impediva di determinare con precisione le quantità osservabili correlate fra loro. Erano due visioni

profondamente diverse, eppure, verso metà giugno del 1927 e dopo aver incontrato Pauli proprio a Copenaghen, Heisenberg ammise finalmente che il suo mentore danese aveva avuto ragione quando aveva messo in discussione la formulazione del Principio di Indeterminazione.

Per questo motivo Werner Karl Heisenberg decise di pubblicare una nota in aggiunta al suo articolo «Sul contenuto intuitivo della cinematica e della meccanica nella Teoria Quantistica»: «Dopo la chiusura dell'articolo, ricerche più recenti di Bohr hanno condotto a un nuovo

punto di vista che permette un approfondimento e una precisazione essenziali dell'analisi delle correlazioni quantomeccaniche tentata in questo lavoro». In altre parole, Heisenberg concordava con Bohr sul fatto che l'indeterminazione fosse una conseguenza della doppia natura corpuscolare e ondulatoria dell'elettrone.

Al termine di quello stesso mese Heisenberg lasciò Copenaghen per trasferirsi a Lipsia, dove gli era stata offerta una cattedra. Bohr, rimasto da solo, si dedicò alla ricerca di una formulazione

pienamente soddisfacente del proprio Principio di Complementarietà. Formulazione che, non ancora completamente definita, illustrò al Congresso Internazionale di Fisica di Como che si tenne dall'11 al 20 settembre 1927 in occasione del centesimo anniversario della morte di Alessandro Volta.

Quando si presentò davanti a un pubblico composto, fra gli altri, da Max Born, Louis de Broglie, Arthur Compton, Werner Karl Heisenberg, Wolfgang Pauli, Max Planck, Arnold Sommerfeld e persino dall'anziano Hendrik Antoon Lorentz – che

sarebbe morto l'anno successivo –, Bohr era ancora indeciso sul titolo più indicato per la propria relazione. Inizialmente aveva optato per «Le basi filosofiche della Teoria Quantistica», salvo poi propendere per «Il postulato dei quanti e il recente sviluppo della teoria atomica».

In effetti, quello più corretto gli sarebbe stato assegnato proprio dalla prestigiosa platea che lo stava seguendo con attenzione e interesse. Negli anni successivi lo sforzo profuso da Bohr per fondere il Principio di Complementarietà con il Principio di Indeterminazione di

Heisenberg, definendo al contempo il ruolo dell'osservatore e della misurazione nella Teoria Quantistica e sfruttando l'interpretazione probabilistica di Born della funzione d'onda di Schrödinger, sarebbe passato alla storia con il nome di Interpretazione di Copenaghen.

Oramai il dado era tratto: Bohr era riuscito a formalizzare una prima interpretazione coerente dell'intero universo quantistico. Ma qual era la principale novità per il mondo della fisica introdotta dall'Interpretazione di Copenaghen? È sempre Giulio Peruzzi a

rispondere a questa mia domanda. «Nell'ambito dell'Interpretazione di Copenaghen – che in realtà raccoglie posizioni anche molto differenti tra i suoi originari fautori – per spiegare il collegamento esistente tra l'evoluzione dinamica dei sistemi fisici descritti dalla funzione d'onda e i risultati delle misure sperimentali, si ricorre al cosiddetto collasso della funzione d'onda. Questo implica un dualismo negli 'oggetti fisici': i micro-oggetti descritti dalla funzione d'onda e gli apparati sperimentali descritti dalla meccanica classica. Una soluzione pragmaticamente accettata dalla

maggior parte della comunità scientifica ma vaga: dove dev'essere posizionato, per esempio, il limite che distingue un oggetto microscopico da un oggetto macroscopico? D'altra parte, il risultato di una misura non è mai una sovrapposizione di stati, ma uno stato definito: come si fa a giustificare il passaggio da uno stato puro a una miscela statistica?

«Per fare un esempio concreto, anche se un po' approssimativo: se ho un'urna con un certo numero di biglie, in parte nere e in parte bianche, posso descrivere il sistema come una miscela statistica che mi

permette di prevedere la probabilità con cui verrà estratta una biglia nera o una biglia bianca. Lo stato puro, invece, descrive il sistema dando una certa probabilità di estrazione di una biglia nera o di una biglia bianca. In linea di principio, però, fornisce anche la probabilità di estrazione di una biglia grigia, cioè di una qualsiasi tonalità tra il nero e il bianco. Le tonalità grigie derivano dalle sovrapposizioni, possibili solo nella Fisica Quantistica, degli stati neri e degli stati bianchi. Quando facciamo l'estrazione, in realtà, troviamo solamente o biglie nere o biglie

bianche: quelle grigie sono scomparse! Perché? Com'è possibile che ciò avvenga?

«Oggi, sviluppando la teoria in modo più aderente ai fatti, si considera la dinamica degli stati fisici come se risultassero non isolati ma immersi in un bagno termico. Questo approccio determina un fenomeno – che prende il nome di decoerenza – che porta in breve tempo la funzione d'onda a evolversi in modo tale da far sì che la probabilità di avere un valore diverso da zero per gli stati in sovrapposizione – cioè, per le biglie grigie del nostro esempio –

tenda rapidamente a zero. Quindi, quelli che rimangono sono solo i termini relativi ai valori ben definiti degli stati e quindi quelli corrispondenti alle misure sperimentali. Questa interpretazione, comunque, non risolve tutti i problemi esistenti.

«Se vogliamo investigare un po' più a fondo sui concetti che ne stanno alla base, dal mio personale punto di vista la principale novità dell'Interpretazione di Copenaghen consiste proprio nella necessità che si è manifestata del bisogno di cercare un'interpretazione. Quando ci si allontana dagli oggetti alla

nostra scala di grandezza, si manifestano caratteri fisici molto lontani da quelli sui quali è costruita la nostra intuizione macroscopica, e di conseguenza nascono problemi di interpretazione.»

Attenti al gatto!

Due dei termini che sono stati riproposti da Giulio Peruzzi meritano un ulteriore approfondimento: «collasso della funzione d'onda» e «decoerenza». Sulle loro interpretazioni più o meno corrette, infatti, si originano i principali fraintendimenti nei quali si può cadere quando si affrontano i temi della Fisica Quantistica!

Il vero problema nasce dalla misurazione dei valori delle particelle atomiche e subatomiche. Sappiamo già che a ogni particella è associata una funzione d'onda, a causa della dualità onda-

corpuscolo, e che, quindi, quando una particella si muove liberamente senza essere osservata, è come se si «dissolvesse» in una sovrapposizione di onde di probabilità. In pratica, quella particella, nello stesso momento, è potenzialmente presente in più luoghi differenti di una stessa regione dello spazio. È quello che abbiamo già visto nel Capitolo 2, quando sono stati definiti gli orbitali degli elettroni. Se, però, facciamo una misurazione, ciò che otteniamo sperimentalmente è un unico risultato e non una serie di risultati possibili. Quindi, è come se la

funzione d'onda associata alla particella «collassasse» nel momento della misurazione, consentendoci di individuare la particella stessa. Ecco perché si chiama collasso della funzione d'onda.

Da un altro punto di vista, considerando l'interazione fra il sistema quantistico e l'ambiente esterno, possiamo anche dire che la funzione d'onda evolve nel tempo solo verso alcuni degli stati possibili: quelli più probabili e non sovrapposti. Cioè, verso gli stati che coincidono con i valori definiti dalle misurazioni. Per spiegare perché ciò

avvenga dobbiamo introdurre il concetto di decoerenza, concetto che diventerà fondamentale anche nei prossimi capitoli e in particolare nel Capitolo 10. Riprendendo le parole di Giulio Peruzzi, considerando la dinamica degli stati fisici come se questi risultassero non isolati, l'evoluzione della funzione d'onda avviene in maniera tale da far sì che la probabilità relativa al verificarsi degli stati che risultano sovrapposti tenda a zero. In questo modo, gli unici stati possibili, quelli dove avverranno le misurazioni, saranno proprio quelli non sovrapposti.

Tutto ciò però vale solo per i sistemi quantistici ai quali può essere applicato il Principio di Sovrapposizione degli Stati, formulato da Erwin Schrödinger nel 1926 e che può essere semplificato in questi termini: due o più stati quantistici possono essere sovrapposti fra loro, e il risultato ottenuto sarà ancora uno stato quantistico valido. Analogamente, ogni stato quantistico può essere rappresentato come la sovrapposizione di due e o più stati quantistici. Anche se può sembrare un'affermazione scontata, il Principio di Sovrapposizione degli

stati non si può applicare a sistemi macroscopici come quelli che costituiscono la nostra realtà. Di conseguenza, anche i concetti di collasso della funzione d'onda e di decoerenza perdono di significato una volta usciti dalla scala atomica o subatomica.

Proprio per evidenziare come l'approccio al mondo quantistico e quello al mondo macroscopico fossero profondamente differenti fra loro, Schrödinger presentò il famoso paradosso del gatto in una serie di tre articoli dal titolo «La situazione attuale della Meccanica Quantistica» pubblicati, nel 1935,

sulla rivista Die Naturwissenschaften.²² Ecco cosa scrisse esattamente: «Si possono anche costruire casi del tutto assurdi [confondendo il mondo atomico e subatomico con quello macroscopico]. Si rinchioda un gatto in una scatola d'acciaio insieme alla seguente macchina infernale (che occorre proteggere dalla possibilità d'essere afferrata direttamente dal gatto): in un contatore Geiger si trova una minuscola porzione di sostanza radioattiva, così poca che nel corso di un'ora forse uno dei suoi atomi si disintegrerà, ma anche, in modo

parimenti probabile, nessuno; se l'evento si verifica il contatore lo segnala e aziona il relais di un martelletto che rompe una fiala con del cianuro. Dopo avere lasciato indisturbato questo intero sistema per un'ora, si direbbe che il gatto è ancora vivo se nel frattempo nessun atomo si fosse disintegrato, mentre la prima disintegrazione atomica lo avrebbe avvelenato. La funzione ψ dell'intero sistema porta ad affermare che in essa il gatto vivo e il gatto morto non sono degli stati puri, ma miscelati con uguale peso».

Come si può leggere,

Schrödinger voleva semplicemente dimostrare che l'applicazione delle regole del mondo quantistico al mondo macroscopico può portare a dei paradossi insanabili con le normali logiche della vita quotidiana. Paradossi che non hanno ragione di esistere, in realtà, dato che solo il mondo atomico e quello subatomico sono soggetti alle leggi della Meccanica Quantistica.

Eppure – proprio paradossalmente – questo esempio ha conosciuto una fortuna ben maggiore di quella che il suo stesso ideatore avrebbe mai immaginato,

e viene ancora oggi utilizzato più per mettere in risalto gli aspetti folkloristici della Teoria Quantistica che per evidenziarne i corretti ambiti di applicazione!

Aggirare l'ostacolo

L'Interpretazione di Copenaghen rappresenta una pietra miliare nella storia della Fisica Quantistica sia per le sue implicazioni dirette sia, come ha evidenziato Giulio Peruzzi, perché testimonia «la necessità che si è manifestata del bisogno di cercare un'interpretazione». Dal 1927 in poi – così com'era avvenuto nel 1926 con i due modelli di rappresentazione della Meccanica Quantistica – si comincia a considerare la possibilità che esistano diverse interpretazioni di una stessa teoria. E in effetti, nel corso degli anni, all'Interpretazione

di Copenaghen si affiancheranno l'Interpretazione di Bohm (proposta nel 1952 dal fisico americano David Bohm), l'Interpretazione a Molti Mondi (proposta nel 1957 dal fisico e matematico Hugh Everett III) e molte altre ancora.

Ci sono, però, alcuni pilastri incrollabili su cui si fondano tutte le varie interpretazioni; fra questi, uno dei più solidi è il Principio di Indeterminazione di Heisenberg. Se si trovasse il modo di superarlo o di dimostrare che in specifiche circostanze non è più valido, bisognerebbe abbandonare tutta la teoria della Meccanica Quantistica.

Le relazioni di indeterminazione, infatti, sono una conseguenza diretta del formalismo sia matriciale, sia ondulatorio, sia infine di quello dell'Integrale sui Cammini.

Eppure, nel marzo 2017,²³ alcuni ricercatori dell'ICFO, l'Institut de Ciències Fotòniques di Barcellona, sono riusciti a trovare un modo, se non per violarlo, almeno per aggirarlo. Del gruppo di lavoro, guidato da Morgan W. Mitchell, fa parte anche l'italiano Giorgio Colangelo, ed è proprio al giovane ricercatore in Fotonica che ho chiesto di farmi raccontare

esattamente cosa stesse succedendo. «Il principio di indeterminazione di Heisenberg correla due quantità per descrivere completamente un sistema fisico. Questo vale per la posizione e la quantità di moto di un atomo, ma vale anche per l'ampiezza e la fase di un segnale. Se si riesce a conoscere precisamente una di queste due grandezze, l'altra diventa indeterminata. Quindi, è impossibile descrivere completamente il sistema studiato.

«Esistono, però, altri sistemi fisici, come per esempio lo spin di un atomo, che non vengono

descritti da due, bensì da tre quantità coniugate. Nell'esempio che ho appena fatto, le tre direzioni spaziali su cui può orientarsi lo spin. I tre valori appena descritti sono correlati da una legge di indeterminazione un po' più generale che prende il nome di relazione di indeterminazione di Robertson-Schrödinger. Anche in questo caso, comunque, risulta impossibile conoscere con precisione tutte le caratteristiche del sistema [cioè le tre orientazioni dello spin] ma è possibile riuscire a determinarne quasi precisamente due.»

Quindi – chiedo a Giorgio Colangelo – nell'articolo pubblicato su Nature, il vostro obiettivo era quello di arrivare a determinare due quantità coniugate su tre per eludere il Principio di Indeterminazione? «Sì. Riuscendo a individuare due delle orientazioni dello spin, grazie alla relazione di Robertson-Schrödinger, abbiamo indirizzato tutta l'incertezza residua nella terza. Quindi, l'indeterminazione è rimasta all'interno di una variabile che non condizionava il nostro esperimento e abbiamo potuto misurare la fase e l'ampiezza del segnale rivelato

dagli atomi con estrema precisione. E questo era lo scopo che ci eravamo prefissati.»

Questa tecnologia esisteva già precedentemente? E quali applicazioni pratiche potrebbe avere in futuro? «Per prima cosa, abbiamo dovuto sviluppare un modello teorico per vedere se quello che volevamo fare era davvero possibile. Quando abbiamo iniziato a lavorare, non tutte le tecnologie che abbiamo poi utilizzato per l'esperimento esistevano. Tra le altre cose, abbiamo dovuto progettare e sviluppare un particolare rivelatore

che fosse abbastanza veloce e contemporaneamente avesse anche un bassissimo rumore di fondo. Così facendo, abbiamo anche migliorato la metodologia con cui venivano preparati gli atomi. È stata una lunga battaglia contro il lato oscuro delle particelle, ma abbiamo vinto!

«Siamo stati i primi ad accorgerci che da questa conseguenza si poteva derivare un protocollo sperimentale semplice da utilizzare nella pratica, e abbiamo dimostrato, con il nostro lavoro, che se ne poteva ottenere un vantaggio metodologico significativo rispetto alle altre tecnologie disponibili. Un

vantaggio così evidente da consentire il miglioramento degli attuali strumenti di misura che si basano sugli spin atomici. La nuova tecnologia, infatti, potrà essere applicata in diversi ambiti: dagli orologi atomici alla risonanza magnetica nucleare e persino alla cristallografia nei diamanti.»

Prospettive davvero molto interessanti, che se da un lato evidenziano l'ingegno dell'intero gruppo di ricerca spagnolo e la loro capacità di andare oltre alle logiche consolidate, dall'altro tranquillizzano sulla validità di un principio, quello di Heisenberg, che

a distanza di oltre novant'anni dalla sua prima enunciazione mantiene inalterata la propria forza e la propria valenza!

Bohr, Einstein e un po' Higgs

Ovvero, Fisica Quantistica,
Relatività e non solo, a confronto

Cosa c'è dietro? Mentre la Teoria Quantistica cresce e si definisce grazie alla Meccanica Quantistica e all'Interpretazione di Copenaghen, la Teoria della Relatività di Einstein affronta i grandi temi dello spazio e del tempo. Temi che, sia direttamente sia indirettamente, finiscono per avere profonde ripercussioni anche sul mondo atomico e su quello subatomico. Albert Einstein e Niels Bohr, anche se da due differenti punti di vista, si trovano a

costruire assieme le fondamenta della fisica contemporanea.

Perché è importante? Perché non è possibile arrivare a una definizione completa e coerente della Fisica Quantistica senza introdurre le rivoluzionarie tesi di Albert Einstein sulla Relatività Ristretta. E perché è necessario portare un po' di chiarezza sulla figura di Albert Einstein e sul suo fondamentale ruolo non solo nella nascita della Fisica Quantistica, ma anche nel suo successivo sviluppo.

NEL 1929, due anni dopo la formulazione dell'Interpretazione di Copenaghen, Niels Bohr continuava

con queste parole la propria riflessione sulla natura della realtà e sulle logiche necessarie per comprenderla: «Il problema epistemologico in discussione [cioè, l'indagine critica intorno alla struttura logica e alla metodologia delle scienze¹] può essere caratterizzato, brevemente, nel modo seguente. La descrizione della nostra attività mentale richiede da una parte un contenuto oggettivamente dato, contrapposto a un soggetto percipiente, mentre, dall'altro canto, com'è già implicito in tale asserzione, una netta separazione fra oggetto e soggetto

non può essere sostenuta in quanto anche quest'ultimo appartiene al nostro contenuto mentale.

«Da ciò segue non solo il significato relativo di ogni concetto – meglio, di ogni parola –, che viene a dipendere dall'arbitrarietà del punto di vista, ma altresì che noi dobbiamo, in generale, essere preparati ad accettare il fatto che una spiegazione completa di una stessa questione possa richiedere diversi punti di vista che non ammettono una descrizione unitaria. Infatti, strettamente parlando, l'analisi consapevole di un qualunque concetto si trova in

relazione di esclusione con la sua applicazione immediata».²

Un pensiero logico lineare, nello sviluppo, e al contempo complesso, quello espresso da Niels Bohr. Un approccio alla realtà che trova nella molteplicità dei punti di vista con cui la si osserva il proprio punto di forza. A patto, però, che si sia sempre pronti ad accettare il controsenso, solo apparente, che quegli stessi punti di vista «non ammettono una descrizione unitaria». Ma se, nella riflessione di Bohr, per la Fisica Quantistica non può esistere una descrizione unitaria, com'è possibile per chi la

studia rapportarsi con le logiche derivanti dalla fisica classica? È sempre Niels Bohr che ce lo spiega, nello stesso saggio, qualche riga dopo.

«Ciò che caratterizza le cosiddette Scienze Esatte è, in generale, il tentativo di conseguire l'univocità evitando ogni riferimento al soggetto percipiente. Si può forse riscontrare tale sforzo nella sua forma più consapevole nel simbolismo matematico, che ci pone davanti agli occhi un ideale di oggettività al cui raggiungimento non si frappone quasi alcun limite, finché si rimane all'interno di un

campo in sé conchiuso di logica applicata. Nelle scienze naturali vere e proprie, non è però possibile parlare di campi di applicazione dei principi logici in sé rigorosamente conchiusi, in quanto si dev'essere sempre preparati alla comparsa di nuovi fatti, la cui sistemazione nel quadro delle esperienze precedenti può richiedere una revisione dei nostri concetti fondamentali.»

A questo punto, potrebbe sembrare che l'analisi di Bohr voglia evidenziare come solo la proposta quantistica abbia le giuste caratteristiche per tentare una descrizione coerente della natura

che ci circonda, ma non è così. Anzi, per Niels Bohr un analogo ruolo sembra destinata ad averlo proprio la Teoria della Relatività sviluppata da Albert Einstein. Lo stesso Einstein che nel 1927, al termine del V Congresso Solvay – mentre passeggiava per le vie di Bruxelles assieme a Sir William Lawrence Bragg, Louis de Broglie, Arthur Compton e anche a Bohr – continuava a interrogarsi sulla non completezza della teoria dei quanti e a proporre agli altri scienziati le proprie perplessità.

«Abbiamo recentemente assistito a una siffatta revisione col sorgere

della Teoria della Relatività», scrive infatti Bohr, «destinata a mettere in luce, attraverso un'approfondita analisi dell'osservazione, il carattere soggettivo di tutti i concetti della fisica moderna. Nonostante il grande sforzo che tale teoria richiede alle nostre capacità di astrazione, essa si accosta in notevolissima misura all'ideale classico di unità e connessione causale della descrizione della natura. Soprattutto ci si attiene ancora rigorosamente alla concezione della realtà oggettiva dei fenomeni osservati. Come Einstein ha sottolineato, l'ipotesi

che ogni osservazione dipenda, in ultima analisi, dalla coincidenza nello spazio e nel tempo dell'oggetto e del dispositivo di misurazione, e che ogni osservazione sia perciò definibile indipendentemente dal sistema di riferimento dell'osservatore, è infatti fondamentale per l'intera Teoria della Relatività.»

Einstein e Bohr: storia di un rapporto complicato

Niels Bohr quindi considera la Relatività di Einstein come un diverso punto di vista – una parte della descrizione non unitaria – necessario per raggiungere una spiegazione completa della realtà. Di più: riesce a inserirne gli elementi maggiormente caratterizzanti in una visione generale e a costruire, nel prosieguo del saggio, un chiaro parallelo con la Meccanica Quantistica. «L'adeguatezza della netta distinzione tra spazio e tempo

suggerita dai nostri sensi dipende infatti interamente dalla piccolezza delle velocità con cui abbiamo a che fare nella vita di tutti i giorni in confronto alla velocità della luce. Nella questione della connessione causale dei fenomeni atomici, il carattere reciproco dei risultati delle misurazioni non è più trascurabile in effetti di quanto lo sia la loro Relatività nella questione della simultaneità.»

Da queste parole, e dalle dichiarazioni rilasciate anche in altre occasioni sia da Bohr sia da Einstein, emergono due figure di scienziati molto lontane da quelle

che popolano generalmente il nostro immaginario. Il confronto fra i due – innegabile e a tratti deciso – si è svolto nel contesto di una comune ricerca continua e di una costruttiva influenza reciproca.

«Anche in questo caso, si è diffusa una visione che non corrisponde alla realtà oggettiva dei fatti. Una visione che ci mostra Niels Bohr come il paladino della Meccanica Quantistica e Albert Einstein come uno scienziato ancora legato alla fisica classica. La verità è che Bohr e Einstein hanno, semplicemente, dei punti di vista molto diversi su che cosa sia la

fisica.» Quest'ultima riflessione è di Giulio Peruzzi, docente di Storia della Fisica presso l'Università di Padova. Con lui riprendo il discorso del rapporto fra Bohr e Einstein per approfondirne gli aspetti meno noti. «Per esempio, per Bohr è assolutamente accettabile che si manifestino tutte quelle logiche dualistiche che poi sono il fondamento di quella che si chiama Interpretazione di Copenaghen. Il fatto che esistano oggetti 'alla nostra scala' [con cui ci possiamo rapportare direttamente] che ci consentono di effettuare le misurazioni mentre a una scala

atomica e subatomica le cose vanno differentemente non gli crea alcun problema. E così per Bohr è cruciale capire come mai la Meccanica delle Matrici e la Meccanica Ondulatoria, pur partendo da nozioni 'ontologicamente' diverse – il corpuscolo e l'onda –, abbiano lo stesso potere predittivo e siano 'matematicamente isomorfe'.» Per chiarire quest'ultimo concetto, ho scelto le parole del fisico e filosofo americano Douglas Hofstadter: «Si parla di isomorfismo quando due strutture complesse si possono applicare l'una sull'altra, cioè far

corrispondere l'una all'altra, in modo tale che per ogni parte di una delle strutture ci sia una parte corrispondente nell'altra struttura». ³

«Per Einstein», continua Giulio Peruzzi, «queste cose non sono altrettanto comprensibili. Einstein non si pone il problema del perché esistano due teorie: sa bene – come nel caso dell'elettrodinamica classica – che possono esistere diverse teorie equivalenti per ordinare lo stesso ambito di fenomeni. Per lui la questione fondamentale è la rinuncia, in linea di principio, a una spiegazione

causale: lo disturba l'idea di una probabilità ontica [cioè, che esiste in ciò che è e per come è] non ulteriormente analizzabile e preferirebbe una probabilità epistemica, che possa essere individuata e conosciuta. Per certi versi, la sua può sembrare una posizione più 'antica'. Una posizione legata, per esempio, al fatto che lui ha una fede incrollabile nel Principio di Causa-Effetto. Chiariamo questo punto con un esempio concreto. Nell'ambito della Fisica Quantistica l'equazione dinamica dello stato del sistema introdotta da Erwin Schrödinger [la Ψ che abbiamo già

incontrato nei precedenti capitoli] è un'equazione perfettamente deterministica. Cioè, data Ψ a un certo istante qualunque, che chiamiamo istante iniziale, siamo in grado di determinare Ψ negli istanti successivi. Questo, naturalmente, a patto di conoscere tutte le forze che stanno agendo sul sistema. Dov'è che entra in azione la stocasticità, il processo probabilistico? Quando faccio le misure, e quindi quando devo in qualche maniera correlare quelle che sono le informazioni contenute nella funzione d'onda con il risultato sperimentale.

«In questo punto però c'è un

problema: un salto cognitivo. Mentre per Bohr quello che dobbiamo fare è semplicemente accettare il fatto che questo salto esista, per Einstein ci dev'essere un'altra via, un'altra soluzione. Einstein non riesce ad accettare l'idea che una teoria fondamentale possa basarsi sul fatto che esistano oggetti – gli apparati di misura – fondamentali per le verifiche sperimentali che non obbediscono alla Meccanica Quantistica ma alla meccanica classica. Questi oggetti sono al di fuori della Meccanica Quantistica, eppure sono costituiti da componenti che obbediscono

alla Meccanica Quantistica.»

Quindi, chiedo ancora a Giulio Peruzzi, è questo il nucleo fondamentale del confronto fra Niels Bohr e Albert Einstein, e non la correttezza della visione quantistica in quanto tale? «Esattamente. È proprio questo il cuore del dibattito che inizia nel 1927 e prosegue fino al 1935, anche se, in effetti, si concluderà solo con la morte di Einstein, nel 1955. La Meccanica Quantistica – qualunque sia la sua formulazione: matriciale, ondulatoria o Path Integral – viene inizialmente criticata da Einstein che la ritiene

contraddittoria. Poi Einstein si convince che non sia contraddittoria – e quindi la considera coerente – ma ritiene che non sia comunque completa. Per Einstein, è necessaria una teoria più profonda; per lui, la Fisica Quantistica non è l'ultima teoria.

«E c'è un altro aspetto fondamentale da sottolineare: Einstein e Bohr, assieme, sono i due artefici della Meccanica Quantistica. Il lavoro di Schrödinger, per esempio, senza i precedenti articoli pubblicati da Einstein non sarebbe potuto esistere. Sempre Einstein, inoltre, è il primo a cogliere

l'importanza dei quanti della radiazione elettromagnetica ed è il primo a parlare di quelli che poi verranno chiamati fotoni.⁴ Non solo, Einstein crede nell'esistenza di quelli che saranno chiamati fotoni molto prima di Bohr che, invece, assieme a Hendrik Anthony Kramer e John Clarke Slater⁵ cercherà addirittura di dimostrare che i fotoni sono solo degli epifenomeni: non oggetti reali bensì enti 'virtuali', necessari dal punto di vista teorico.

«Paradossalmente, poi, negli anni fra il 1927 e il 1935, le posizioni fra i due scienziati si invertirono più volte, generando un

confronto utilissimo sotto tutti i punti di vista. Ciò che emergerà chiaramente dopo la pubblicazione dell'articolo di Einstein del 1935 scritto assieme a Boris Podolsky e a Nathan Rosen⁶ [torneremo su questo argomento, approfonditamente, nel Capitolo 7], è che a un certo punto Einstein sarà convinto che la Meccanica Quantistica funzioni effettivamente ma che, al di sotto, ci debba essere una teoria ancora più fondamentale che la giustifichi. Un po' come avviene per la meccanica statistica che costituisce la base della termodinamica. Per Bohr, al

contrario, no! Bohr è fermamente convinto che la Meccanica Quantistica sia il livello fondamentale! Per concludere, dal mio personale punto di vista ritengo che il dibattito tra i due sia stato veramente significativo, e sinceramente credo che entrambi si siano divertiti un sacco!»

Una dentro l'altra

Dopo aver definito, grazie anche all'intervento di Giulio Peruzzi, il ruolo di Albert Einstein nello sviluppo della Fisica Quantistica e il suo rapporto con Niels Bohr, è necessario tornare brevemente sulle principali definizioni della Teoria Particellare prima di poter affrontare il grande tema della Relatività e delle sue implicazioni nella visione del mondo. Infinitamente piccolo e infinitamente grande, infatti, sono due aspetti della realtà profondamente correlati fra loro e nei prossimi capitoli questa

connessione emergerà prepotentemente.

Nel Capitolo 2 ho accennato alla scoperta del neutrone, nel 1932, da parte di Sir James Chadwick, scoperta che gli valse il Nobel per la fisica nel 1935 e che, soprattutto, permise di definire la natura del nucleo atomico come un insieme composto da protoni e da neutroni. Grazie ai neutroni, molti comportamenti atomici divennero immediatamente comprensibili: il decadimento beta, per esempio, cioè il fatto che un neutrone decada spontaneamente in un protone emettendo contemporaneamente

un elettrone e un'altra particella chiamata antineutrino. Oppure gli isotopi, gli atomi di uno stesso elemento chimico che hanno differente massa atomica. Dato che la massa di un atomo dipende dal suo numero di massa A e dato ancora che questo è pari alla somma dei protoni e dei neutroni – cioè dei nucleoni – presenti nel nucleo, basta avere un differente numero di neutroni per avere diversi isotopi dello stesso elemento. E altro ancora.

Ma c'è un'ulteriore implicazione logica legata alla scoperta del neutrone che riguarda la natura

stessa della materia. Un'implicazione che comporta una profonda riflessione su quali siano, effettivamente, i suoi costituenti più piccoli. Come scrive il fisico e cosmologo svedese Max Erik Tegmark: «Se la materia ordinaria è formata da atomi e gli atomi sono formati da componenti più piccoli – neutroni, protoni ed elettroni – è possibile che anche questi a loro volta siano composti dai pezzi di un Lego ancora più piccolo?»⁷ Come oggi sappiamo, per i neutroni e per i protoni la risposta è: «Sì».

Scrive ancora Max Erik Tegmark: «La storia ci ha insegnato come

realizzare gli esperimenti per rispondere a questa domanda: far scontrare tra loro con la massima violenza possibile i costituenti elementari più piccoli che si conoscono e vedere se si spezzano. Gli elettroni continuano a non dare segno della presenza di costituenti più piccoli [gli elettroni appartengono alla famiglia di particelle chiamate leptoni] nonostante siano stati fatti scontrare in 'collisori' di particelle sempre più grandi come quello del CERN, alle porte di Ginevra, dove raggiungono una velocità pari al 99,999999999 per cento della

velocità della luce. Nelle collisioni dei protoni, invece, si è scoperto che sia loro sia i neutroni sono formati da particelle più piccole, note come quark up e quark down. Due up e un down formano un protone, due down e un up formano un neutrone».

Tutto qui? Non proprio: grazie agli esperimenti realizzati presso il protosincrociclotrone⁸ del CERN – il Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, Consiglio Europeo per la Ricerca Nucleare – e presso tutti gli altri acceleratori coinvolti nelle ricerche dagli scontri fra le particelle elementari, sono emerse

numerosissime altre particelle più piccole. «Tutte le nuove particelle», continua Max Erik Tegmark, «dai nomi esotici come pioni, kaoni, Sigma, Omega, muoni, tauoni, bosoni W e bosoni Z, sono instabili e decadono in particelle più comuni in una frazione di secondo; un paziente lavoro di investigazione ha rivelato che tutte, eccetto le ultime quattro, sono formate da quark, e non solo da up e down ma anche da quattro nuovi tipi, noti come strange, charm, bottom e top, instabili.»

Sui bosoni W e Z – più precisamente: W^+ , W^- e Z^0 – devo

approfondire la mia riflessione sia per motivi personali sia perché ci serviranno tra poco per introdurre un importante concetto generale.

Nel 1984 frequentavo l'ultimo anno del liceo scientifico. Purtroppo, verso l'inizio di novembre mi ammalai abbastanza gravemente e fui quindi costretto a passare un lungo periodo in ospedale mentre fuori il mondo continuava tranquillamente a girare. Tra le conseguenze più spiacevoli, ma necessarie, delle cure a cui venni sottoposto ci fu anche un forte abbassamento della vista e la susseguente necessità di rieducare

gli occhi a focalizzare le immagini che, dal mio punto di vista, avevano preso una costante parvenza di indeterminatezza.

In quelle condizioni, oltre che per altri fattori sempre legati alla malattia, mi era veramente difficile studiare e sinceramente, in qualche occasione fui tentato di accettare il fatto di dover perdere l'anno scolastico a causa di quello spiacevole imprevisto. Il mese prima, però, era stato assegnato il Nobel per la fisica a Carlo Rubbia e a Simon van der Meer, per il loro decisivo contributo al progetto che aveva condotto alla scoperta dei

bosoni W e Z. Era dal 1938 e dalla premiazione di Enrico Fermi per le sue scoperte sulle reazioni nucleari che il Nobel per la fisica non tornava in Italia e questo fatto – inspiegabilmente anche per me – mi motivò moltissimo. Se il lavoro di Rubbia era riuscito nell'impresa di far parlare nuovamente in italiano il Nobel, forse io – nel mio piccolo – sarei riuscito a recuperare la vista e persino quell'anno scolastico che mi sembrava irrimediabilmente compromesso.

A metà del mese di dicembre, quando le mie condizioni iniziarono lentamente a migliorare, colsi

l'occasione della cerimonia della premiazione di Rubbia e di van der Meer per farmi portare dai miei genitori tutti i giornali che parlavano dell'argomento e per utilizzarli come banco di prova per i miei occhi. I primi giorni cercai di mettere a fuoco i titoli più grossi, avvicinandoli e allontanandoli dalla mia visuale per ottenere immagini meno indistinte. Un po' alla volta passai ai sottotitoli e quando, finalmente, riuscii a intravedere anche i caratteri degli articoli capii che ce l'avrei potuta fare! In un certo senso, la scoperta dei bosoni W e Z mi aveva permesso di

ritrovare quella spinta e quella motivazione che pochi mesi dopo le mie dimissioni dall'ospedale mi avrebbero consentito anche di superare l'esame di maturità!

Ma la peculiarità di queste particelle è anche un'altra. Sono le responsabili della trasmissione di una delle interazioni fondamentali della natura: la forza nucleare debole, coinvolta nei fenomeni radioattivi e in quello stesso decadimento beta che ho introdotto qualche pagina fa. Una nuova categoria di particelle, mediatrici delle interazioni, che prendono il nome di bosoni intermedi e alla

quale appartiene anche il fotone, in quanto mediatore dell'interazione elettromagnetica. Non solo: in base alla Teoria Quantistica dei Campi, esiste un bosone per ogni interazione fondamentale. Oltre a quelli che abbiamo appena imparato a conoscere, quindi, ci sono il gluone, mediatore della forza nucleare forte che tiene uniti fra loro i quark, e i protoni e i neutroni all'interno del nucleo; il gravitone, per la forza gravitazionale; e il bosone di Higgs, scoperto ufficialmente solo lo scorso 6 marzo 2013, responsabile della propagazione del campo omonimo

e della massa di tutte le particelle esistenti.

Nel prosieguo di questo capitolo e nel prossimo Capitolo 5, i bosoni rivestiranno un ruolo da veri e propri protagonisti. Prima, per concludere questa veloce carrellata sulle particelle, dobbiamo ancora citare quelle stabili ma particolarmente sfuggenti: i neutrini elettronici, i neutrini muonici e infine i neutrini tauonici. «Sono particelle così 'timide'», scrive ancora Max Erik Tegmark, «da interagire a malapena con le altre particelle: se un neutrino si schianta al suolo, di solito attraversa tutta la

Terra per riemergere indisturbato dalla parte opposta e continuare il suo viaggio nello spazio. Infine, ognuna di queste particelle ha una gemella malvagia, la sua antiparticella: una delle sue caratteristiche è il fatto che se collide con la sua partner, le due possono annichilirsi in un'esplosione di energia pura.»

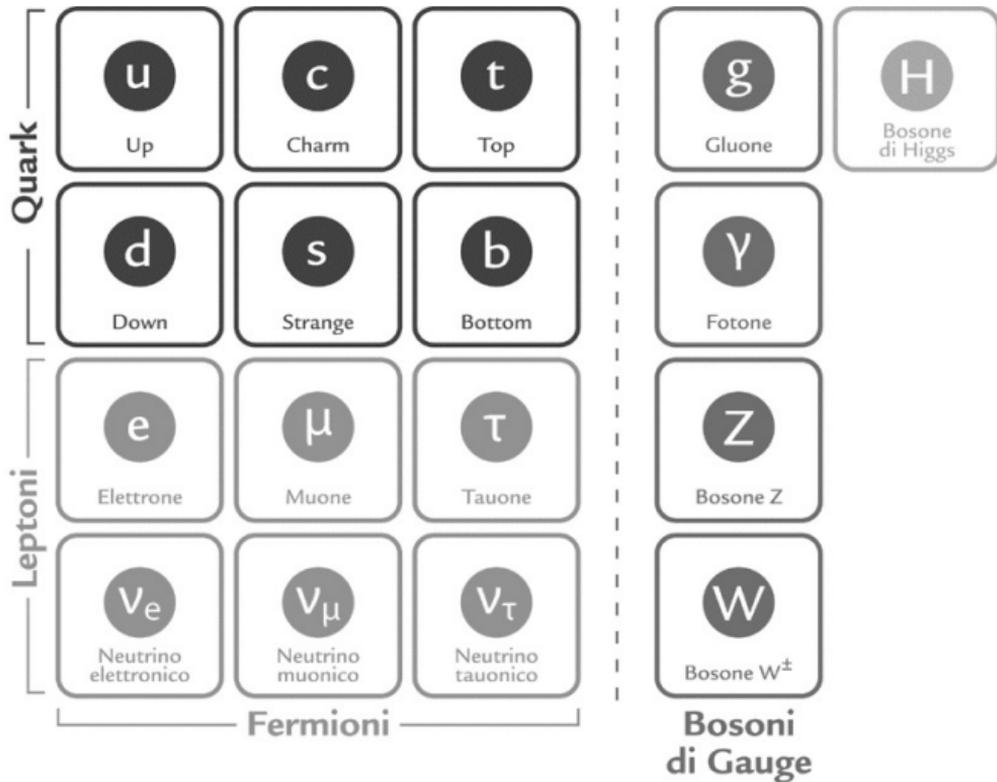


Figura 9. L'attuale modello della fisica delle particelle.

Tutto è relativo

Fra Meccanica Quantistica e Teoria della Relatività, come ha chiaramente messo in evidenza anche Niels Bohr, esistono molti punti di collegamento. Non ultimo, il fatto che forniscano – proprio secondo il pensiero di Bohr – «diversi punti di vista che non ammettono una descrizione unitaria». Ecco perché esistono dei temi che vengono trattati in maniera molto differente a seconda che si scelga di utilizzare l'approccio quantistico oppure quello relativistico. E fra questi, uno dei più dibattuti e interessanti è quello

relativo alla differenza fra i gravitoni e le onde gravitazionali.

Per la Fisica Quantistica, e quindi per la Teoria Quantistica dei Campi che abbiamo appena menzionato, il gravitone è la particella responsabile della trasmissione della forza gravitazionale. È, quindi, il bosone intermedio dell'interazione gravitazionale. Per la Relatività Generale, le onde gravitazionali sono increspature dello spazio-tempo – generate quando la forma di un corpo celeste cambia in modo accelerato lungo più direzioni – che si propagano alla velocità della luce.

Alle onde gravitazionali, e alla loro effettiva scoperta, avvenuta nel 2015, dedicherò l'intero Capitolo 5, discutendone con Marco Drago, il ricercatore italiano che per primo al mondo è riuscito a osservarle. Per il momento, preferisco concentrarmi sui principali aspetti della Teoria della Relatività con il duplice obiettivo sia di definirne i contenuti sia di evidenziarne gli elementi che maggiormente si avvicinano, o si discostano, da quelli corrispettivi definiti nella Meccanica Quantistica. E per riuscirci, devo necessariamente affrontare il tema di cosa sia la Teoria dei Campi

Quantistici.

Con questo nome – in inglese QFT, Quantum Field Theory – si fa riferimento a un'evoluzione della Meccanica Quantistica, sviluppata in ambito particellare, che applica la Teoria Quantistica al concetto fisico di campo, cioè l'insieme dei valori che una specifica grandezza può assumere in una regione dello spazio-tempo. Per esempio, il campo elettrico è quello che si viene a creare in presenza di una o più cariche elettriche, mentre quello gravitazionale in presenza di materia o di energia. Nella Teoria Quantistica dei Campi, le particelle

vengono rappresentate come un'eccitazione energetica di un punto del campo. In pratica, è come se il campo di forze che stiamo osservando fosse una superficie simile a quella di un lago apparentemente in quiete e le particelle che si propagano al suo interno apparissero come increspature dell'acqua in movimento su quella stessa superficie.

Il gravitone, così come tutti gli altri bosoni intermedi – che vengono chiamati anche bosoni di gauge⁹ – dal punto di vista della Teoria Quantistica dei Campi è

quindi un'«increspatura» del campo di forza gravitazionale; increspatura che si sposta fra gli elementi che vi si trovano immersi per trasferire dall'uno all'altro tutte le informazioni possibili. Naturalmente, dovendo sottostare alle logiche quantistiche, anche il gravitone, così come il fotone, è dotato di una doppia natura contemporanea, ondulatoria e corpuscolare. E come particella può trasportare solo una quantità limitata e definita di energia.

L'idea che esista una speciale particella che possa trasferire le informazioni relative al campo

gravitazionale a tutti i corpi che vi si trovano immersi è molto diversa dalla visione dell'interazione gravitazionale che emerge, invece, dalla Teoria della Relatività. Per approfondire questo fondamentale passaggio ho coinvolto nelle mie riflessioni Giuseppe Tormen, docente di Relatività Generale presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Padova. Giuseppe Tormen si occupa di ricerche nell'ambito della cosmologia teorica e numerica ed è particolarmente interessato alla formazione delle strutture cosmiche. A lui chiedo, per definire

un primo quadro generale, come si sviluppa la Teoria della Relatività e cosa rappresentano la Relatività Ristretta e la Relatività Generale.

«La Relatività», chiarisce subito Giuseppe Tormen, «è un modello della realtà formulato da Albert Einstein nei primi anni del XX secolo. In questa teoria, lo spazio e il tempo non sono grandezze separate e indipendenti, bensì due aspetti della stessa struttura: lo spazio-tempo. Una struttura che descrive in maniera più fedele la realtà, così come noi la conosciamo. Esiste un'analogia più vicina alla nostra intuizione. Storicamente i

fenomeni magnetici, per esempio il fatto che la magnetite potesse attrarre o respingere materiali ferrosi oppure che un ago magnetizzato si allineasse con il nord terrestre, furono studiati e interpretati in modo separato e indipendente da quelli elettrici. Come quelli, per esempio, legati alla capacità posseduta dall'ambra strofinata di attrarre altri materiali leggeri o di produrre scintille.

«Fu solo nei secoli successivi che gli scienziati si resero conto, un po' alla volta, che elettricità e magnetismo erano solo due diversi aspetti della stessa interazione

elettromagnetica. Questi studi culminarono nel 1864 nella sintesi fatta da James Clerk Maxwell, che ridusse la descrizione di tutti i fenomeni di questo tipo a quattro sole equazioni, le famose equazioni di Maxwell. Oggi sappiamo che fenomeni elettrici e fenomeni magnetici sono due facce della stessa medaglia, e che, per esempio, un campo elettrico variabile nel tempo – o una corrente elettrica – produce un campo magnetico; viceversa, un campo magnetico variabile nel tempo produce un campo elettrico.»

Quindi, così come elettricità e

magnetismo concorrono a formare l'elettromagnetismo, anche lo spazio e il tempo possono essere considerati come due diversi aspetti di un unico elemento? «È corretto», risponde Giuseppe Tormen. «Che spazio e tempo siano due manifestazioni di un unico spazio-tempo trova un'analogia anche nel fatto che, a seconda dell'osservatore, lo stesso campo elettromagnetico possa apparire solo come campo elettrico o solo come campo magnetico.» D'altronde – e questo è un dato poco diffuso al di fuori dell'ambiente scientifico – il concetto di spazio-

tempo venne inizialmente sviluppato dal matematico lituano Hermann Minkowski proprio per esprimere le equazioni di Maxwell sull'elettromagnetismo in quattro dimensioni.

«I concetti di spazio e di tempo che desidero esporvi», proclamò Minkowski il 21 settembre 1908 a Colonia, nel discorso tenuto in occasione dell'ottantesima Assemblea degli Scienziati e dei Medici Tedeschi, «traggono origine dal terreno della fisica sperimentale, e in ciò risiede la loro forza. Sono radicali. D'ora in avanti lo spazio singolarmente inteso, e il

tempo singolarmente inteso, sono destinati a svanire in nient'altro che ombre, e solo una connessione dei due potrà preservare una realtà indipendente.»¹⁰

Hermann Minkowski, che a Zurigo ebbe come allievo lo stesso Albert Einstein, nel 1907 aveva già definito quello che noi, adesso, conosciamo come spazio di Minkowski o anche come M^4 .

Per accennare brevemente questo argomento, lo spazio di Minkowski è lo spazio su cui Albert Einstein ha costruito le fondamenta della Teoria della Relatività Speciale ed è una combinazione

dello spazio tridimensionale euclideo con il tempo come quarta dimensione. A differenza di uno spazio euclideo quadrimensionale, però, le distanze vengono calcolate ponendo un segno negativo davanti alla componente temporale. Nella Figura 10 si può notare anche la presenza di due coni, quello del passato e quello del futuro, all'interno dei quali si muovono i diversi osservatori. Il piano dello spazio, infine, è in realtà tridimensionale – anche se non è possibile rappresentarlo graficamente nelle sue tre dimensioni –, e per questo motivo

viene chiamato iperpiano.

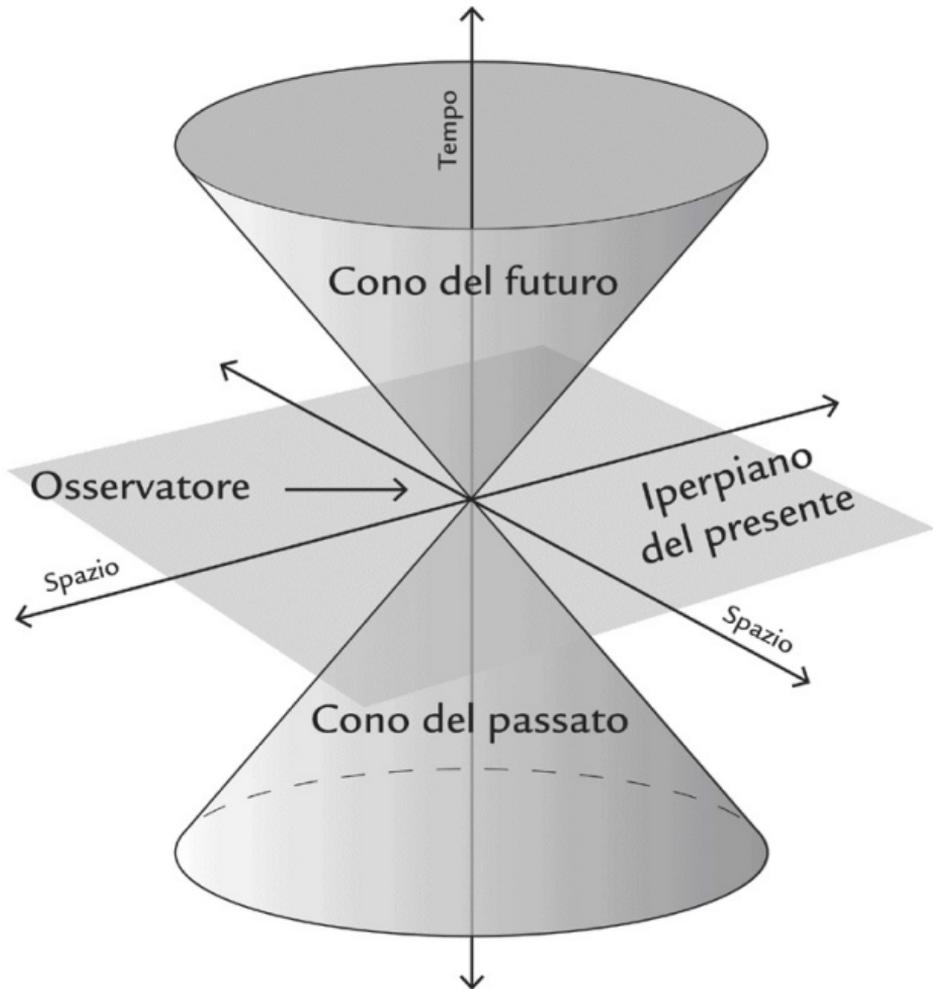


Figura 10. Una rappresentazione grafica dello spazio di Minkowski. Lungo l'asse verticale si trova l'evoluzione del tempo,

dal passato al futuro, mentre sull'asse orizzontale è appoggiato il piano dello spazio. L'osservatore è posto al centro dell'iperpiano del presente.

Un limite enorme

Ma il legame tra l'interazione elettromagnetica e quella gravitazionale va oltre il semplice parallelismo fra i concetti di elettricità e magnetismo e quelli di spazio e tempo. Coinvolge l'elemento cardine di tutta la teoria Einsteiniana: la velocità della luce. «Tra le altre cose», conferma Giuseppe Tormen, «le equazioni di Maxwell predicono che nel vuoto la luce – e più in generale tutte le onde elettromagnetiche – si propaghi alla velocità costante di 299.792.458 metri al secondo, cioè i famosi 300.000 chilometri al

secondo. Questa velocità viene indicata con il simbolo c , dal latino *celeritas*, ed è direttamente legata al valore della costante elettrica e di quella magnetica.»

Se indichiamo con il simbolo ϵ_0 la permittività elettrica nel vuoto e con il simbolo μ_0 la permeabilità magnetica nel vuoto, risulta che la velocità della luce è esprimibile come:

$$c^2 = 1 / (\epsilon_0^2 \cdot \mu_0^2)$$

Questi nomi e questi simboli possono apparire ostici a prima vista, ma sono grandezze con cui tutti noi quotidianamente abbiamo a che fare, anche se non ce ne

rendiamo esplicitamente conto. La permittività elettrica, cioè la costante dielettrica, infatti, è semplicemente il valore che misura la capacità che ha un qualsiasi materiale di contrastare l'intensità del campo elettrico nel quale si trova immerso. La permeabilità magnetica, invece, indica numericamente la capacità eventualmente posseduta da un materiale di magnetizzarsi in presenza di un campo magnetico esterno. Per mettere in evidenza che stiamo riferendoci a entrambe queste caratteristiche nel vuoto, abbiamo aggiunto il simbolo ϵ_0 in

pedice. Tutto qui!

Tornando alla riflessione generale, quello che a noi interessa della formula appena proposta è che risulta universale e indipendente dalla scelta del sistema di riferimento. Queste due caratteristiche da un lato risulteranno fondamentali per il successivo sviluppo della Teoria della Relatività, ma dall'altro costringeranno gli studiosi e gli scienziati dell'epoca a confrontarsi con una nutrita serie di implicazioni. «Essendo un'onda, per analogia con le altre onde conosciute», continua Giuseppe Tormen, «inizialmente si

postulò che anche la luce dovesse propagarsi in un mezzo, ancora non identificato, cui fu dato il nome di etere. Purtroppo, questa assunzione introduceva un grosso problema.

«Galileo Galilei, nel XVII secolo, con i suoi esperimenti aveva già dimostrato che non esiste un moto assoluto, ma solo un moto relativo al sistema di riferimento considerato. Quindi, tenendo conto di ciò, la velocità della luce poteva essere pari a c solo in quei sistemi di riferimento che si trovavano a riposo – cioè non si muovevano ulteriormente – rispetto all'etere nel quale erano immersi. Un qualsiasi

altro osservatore che si fosse trovato all'interno di un sistema di riferimento in moto con una velocità v rispetto a quella della sorgente luminosa, infatti, avrebbe dovuto misurare una differente velocità della luce. Più precisamente, una velocità $c' = c + v$ nel caso il sistema si fosse mosso nella stessa direzione del raggio luminoso; oppure una velocità $c' = c - v$ nel caso si fosse mosso in direzione contraria.

«Nel 1887 Albert Abraham Michelson ed Edward Williams Morley realizzarono un esperimento per cercare di risolvere questa

apparente inconsistenza tra il modello galileiano e quello di Maxwell. I due fisici statunitensi misurarono la velocità della luce in vari sistemi di riferimento che risultavano in moto fra di loro, e sperimentalmente trovarono che il valore della velocità della luce rimaneva sempre costante. Non solo: coincideva con quello predetto da Maxwell.»

Per realizzare l'esperimento, venne ideato uno speciale apparato – l'interferometro di Michelson – in grado di suddividere un unico fascio di luce in due parti e di fare viaggiare queste ultime

separatamente, fino a ricongiungersi su un apposito schermo. Osservando la figura di interferenza che si veniva a creare sul bersaglio sarebbe stato possibile scoprire le diverse velocità prese dai due fasci luminosi lungo le due differenti direzioni. Cosa che non avvenne.

«Dall'esperimento di Michelson-Morley», riprende il discorso Giuseppe Tormen, «risultò chiaramente che la velocità della luce era indipendente dal moto della sorgente – e dalla direzione di tale moto – rispetto a un presunto mezzo, detto etere luminifero. In

altre parole, venne dimostrato che la luce non ha alcun bisogno di un mezzo – che si tratti di etere o di altro – per propagarsi. Ora però rimaneva il problema di spiegare il perché di questo strano comportamento. Tra le varie spiegazioni avanzate, la più convincente fu quella di Albert Einstein che postulò che la velocità della luce fosse assoluta, cioè che valesse sempre c indipendentemente dal sistema di riferimento all'interno del quale veniva misurata. Questo postulato, verificato a livello sperimentale ma non dimostrato a livello teorico, è

alla base della Teoria della Relatività Ristretta – detta anche Relatività Speciale – e ha come conseguenze tutti gli effetti sui tempi e sulle lunghezze che l'hanno resa famosa. La velocità della luce, infine, è anche la massima velocità possibile per il trasferimento delle informazioni, e non può essere mai uguagliata o superata localmente.»

Un'idea speciale

Che la velocità della luce rappresenti un limite assoluto non è mai stato dimostrato teoricamente ma le sue implicazioni, ciononostante, sono concrete e tangibili. Alcune di queste implicazioni, poi, sono così lontane dalla nostra esperienza quotidiana da rasentare i paradossi introdotti dalla controintuitività delle logiche quantistiche. In particolare, nella Teoria della Relatività Ristretta vengono sovvertiti i concetti di tempo e di lunghezza. «Albert Einstein», aggiunge Giuseppe Tormen, «elaborò dapprima una

teoria Ristretta o Speciale, nel 1905, che descrive il comportamento di metri e di orologi in moto arbitrario rispetto a un osservatore in assenza di gravità, o più praticamente, in condizioni nelle quali la gravità è trascurabile.

«Il fatto che queste equazioni siano scritte in quattro dimensioni le rende covarianti: ovvero, sono le stesse in ogni sistema di riferimento – detto inerziale – che si muove con velocità costante lungo una direzione rettilinea. Comunque, considerando i sistemi di riferimento accelerati come una successione di sistemi di riferimento

inerziali, le stesse equazioni possono essere applicate in generale anche ai diversi tipi di moto. La grossa differenza tra Relatività Ristretta e Relatività Generale è che in assenza di gravità lo spazio-tempo risulta 'piatto': possiede cioè le stesse proprietà geometriche dello spazio che conosciamo. In particolare, la somma degli angoli interni di un triangolo è 180° e due rette parallele in un punto rimangono parallele ovunque e non si incontrano mai.

«Postulare una velocità della luce assoluta e indipendente dal sistema

di riferimento in cui viene misurata porta a conseguenze di incalcolabile valore filosofico oltre che intellettuale. Per Galileo Galilei e Isaac Newton le velocità sono solo relative, ma spazio e tempo sono enti assoluti. Quindi un metro è sempre lungo un metro e un secondo dura sempre un secondo, a prescindere dalla velocità relativa di chi effettua la misura. Se invece si impone la velocità della luce come assoluta ne consegue che le misure di tempo e di distanza – che in linea di principio dipendono dalla propagazione del segnale luminoso – vengono a dipendere

direttamente dalla velocità relativa posseduta dal sistema di riferimento rispetto a quella dell'oggetto che si vuole misurare.»

Per capire meglio questo passaggio consideriamo cosa avviene al concetto di simultaneità, riadattando un esempio classico (vedi Figura 11). Immaginiamo un vagone ferroviario in moto con una velocità costante v molto vicina a quella della luce c , e indichiamo i suoi due lati estremi con le lettere A e B. Poi, poniamo il punto O al centro esatto del vagone, in modo che sia equidistante da A e da B. Se un osservatore che si trova in O

spara contemporaneamente due raggi luminosi verso A e verso B, nel suo sistema di riferimento – quello composto dal vagone sul quale sta viaggiando – i raggi raggiungono A e B contemporaneamente. Esattamente come ci si aspetta che dovrebbe accadere.

Ora, però, immaginiamo un secondo osservatore O' che si trova fermo davanti al binario su cui il treno sta transitando. Dato che O' è posto all'esterno del sistema di riferimento a cui appartiene O , si verificherà una situazione molto curiosa. Anche se per O' i raggi

prodotti da O procedono comunque entrambi in direzione di A e di B alla velocità della luce – come indicato dalla Teoria della Relatività –, il postulato della simultaneità per lui verrà a cadere. Infatti, O' osserverà¹¹ che A si muove verso destra con velocità v , e quindi va incontro al raggio luminoso. Ugualmente, O' osserverà che B si allontana dal raggio luminoso sempre a velocità v . Di conseguenza, per O' – che è in moto rispetto alla sorgente O dei raggi – il raggio luminoso diretto verso A colpirà la coda del vagone prima che l'altro raggio colpisca B in

testa al vagone. In definitiva, per O' i due eventi «il raggio colpisce A» e «il raggio colpisce B» non sono più simultanei come lo erano per O .

Rapportarci alla realtà nella quale viviamo introducendo il concetto di sistema di riferimento diventa fondamentale quando ragioniamo in termini relativistici. Il paradosso sulla simultaneità appena discusso ci permette infatti di affrontare anche i temi – più complessi ma affascinanti – della contrazione relativistica sia della lunghezza sia del tempo. Mentre continuo il mio confronto con Giuseppe Tormen, gli chiedo di

illustrare entrambi questi aspetti della Teoria della Relatività. «La relativizzazione della simultaneità ha come conseguenza diretta la contrazione delle lunghezze.

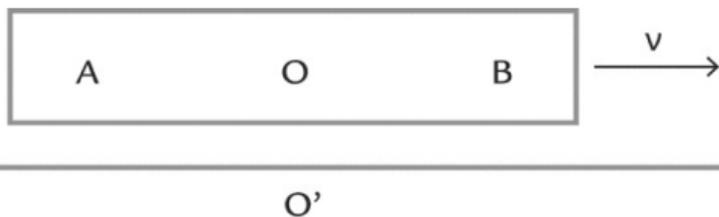


Figura 11. Il vagone che si muove con velocità v costituisce il sistema di riferimento dove si muove l'osservatore posto in O.

«Per capirne il perché, facciamo

un altro esempio.¹² Sostituiamo l'osservatore che si trovava nel punto O del precedente esempio con un'astronave ammiraglia ferma nello spazio. Nei punti A e B , inoltre, mettiamo due navette spaziali equidistanti da O . Immaginiamo che il segnale luminoso lanciato da O contenga l'istruzione di accendere i motori e di partire verso destra. Nel sistema di riferimento di O il segnale arriverà contemporaneamente alle due navette A e B , e quindi la formazione si muoverà verso destra mantenendo costante la distanza relativa.

«Per un osservatore esterno O' , che si trova su un'altra astronave in moto rispetto a O , lo stesso comando – come abbiamo appena dimostrato – raggiungerà prima A e solo in seguito B . Quindi O' osserverà che A inizia a muoversi verso destra accorciando la propria distanza da O , e solo in un secondo momento partirà anche B , portando la distanza relativa a una situazione stabile. Quindi la distanza tra A e B , – che indichiamo come L' – misurata da O' sarà minore di quella – che indichiamo con L – misurata da O . Questo esempio dimostra come, in generale,

qualsiasi lunghezza L risulti massima se viene misurata nel sistema di riferimento in cui quella stessa lunghezza è a riposo; e tanto più piccola quanto più veloce è il moto rispetto all'oggetto misurato.»

Che tempo sarà?

«Alla contrazione delle lunghezze è legata una dilatazione dei tempi che può essere enunciata in questi termini: il tempo misurato dal mio orologio – detto tempo proprio – scorre più velocemente del tempo misurato da qualsiasi altro orologio che si trovi in moto rispetto a me. Riprendendo l'esempio precedente, O ed O' sono entrambi d'accordo nell'affermare che la velocità relativa tra loro vale v . Se consideriamo il sistema di riferimento di O , l'intervallo di tempo necessario perché il terzetto di astronavi AOB transiti per uno

specifico punto sarà uguale al valore numerico della distanza L che dev'essere percorsa per arrivarci, diviso per la velocità v .»

Quella appena enunciata è la classica formula che utilizziamo per sapere quanto tempo ci impiegheremo a raggiungere la meta delle nostre vacanze oppure il nostro posto di lavoro. Si prende la distanza e la si divide per la velocità con cui stiamo viaggiando. Se dobbiamo raggiungere la spiaggia che si trova a cinquanta chilometri di distanza e ci stiamo muovendo a cinquanta chilometri all'ora – troppi limiti di velocità! –

sappiamo che ci arriveremo tra un'ora esatta. In termini matematici, questa formula si scrive così:

$$\Delta t = L / v$$

dove Δt rappresenta l'intervallo di tempo che durerà il nostro viaggio. «È corretto», riprende Giuseppe Tormen. «Questa formula vale per l'osservatore O e contemporaneamente è valida anche per l'osservatore O' . Per quest'ultimo, però, la distanza che le astronavi AOB dovranno percorrere, a causa della contrazione delle lunghezze, non sarà più L bensì L' , dove il valore

numerico di L' risulterà sempre inferiore a quello di L . Se sostituiamo L' a L nell'equazione che abbiamo appena visto, poiché la velocità relativa v rimane costante in entrambi i sistemi di riferimento, otteniamo un nuovo valore dell'intervallo di tempo:

$$\Delta t' = L' / v$$

«Quindi $\Delta t'$ sarà più piccolo di Δt . Ciò significa che per O' è trascorso un intervallo di tempo minore di quello trascorso per O . Per esempio, se O misura un intervallo di tempo pari a un secondo, O' misurerà un intervallo di tempo pari a meno di un secondo. Il tempo,

dunque, scorre più velocemente sull'orologio solidale con l'evento da misurare: in questo caso la distanza tra A e B. Per questo motivo, l'effetto prende il nome di dilatazione del tempo.»

Sono considerazioni di enorme importanza che implicano la relativizzazione di due concetti, quelli di spazio e di tempo, che nella nostra esperienza quotidiana rappresentano delle realtà assolute. Così come scendendo nell'infinitamente piccolo, grazie alla Meccanica Quantistica, si scopre una natura della materia assolutamente imprevedibile – se

non tramite gli strumenti probabilistici – anche salendo nell'infinitamente grande, grazie alla Teoria della Relatività, siamo obbligati a ridefinire completamente la nostra limitata visione del mondo. «Nel 1916», aggiunge Giuseppe Tormen, «Albert Einstein presentò la versione completa della sua teoria, la Relatività Generale, che descrive gli stessi fenomeni trattati dalla Relatività Ristretta ma questa volta anche in presenza di gravità arbitrariamente grande.

«Per poter includere la gravità nella sua descrizione, Einstein

dovette usare un modello di spazio-tempo 'curvo' e non più 'piatto'. La curvatura dello spazio-tempo è il modello che oggi meglio descrive la gravità in tutte le forme che noi conosciamo: da quella sulla Terra e sulle stelle – come il nostro Sole – fino alla gravità in sistemi esotici come le stelle di neutroni o i buchi neri. Le equazioni di Einstein descrivono, appunto, il legame esistente tra la presenza di materia – e quindi di energia – e la conseguente deformazione dello spazio-tempo. Il grande fisico teorico americano John Archibald Wheeler sintetizzò questa idea nella

semplice frase: 'Lo spazio-tempo dice alla materia come muoversi, e la materia dice allo spazio-tempo come curvarsi'.»

Scontro fra titani

In questo capitolo abbiamo compiuto un lungo viaggio alla scoperta delle logiche che regolano l'infinitamente grande, e abbiamo visto che sono profondamente diverse da quelle che avevamo imparato a conoscere studiando il mondo atomico e subatomico. Eppure, entrambe le visioni – come scrisse Niels Bohr nel 1929 – concorrono alla costruzione di un'unica rappresentazione della realtà fornendo ciascuna il proprio punto di vista. Un punto di vista che, caratteristica assolutamente inedita rispetto alla fisica classica,

sia nella Meccanica Quantistica sia nella Relatività dipende anche dall'osservatore e dal sistema di riferimento in cui quest'ultimo si trova.

Niels Bohr, però, nel suo saggio *Il quanto d'azione e la descrizione della natura* precisa che non è possibile, nella descrizione dei fenomeni atomici, mantenere un ordinamento spazio-temporale così come risulta invece fondamentale per la teoria Einsteiniana. «In particolare, ogni tentativo di introdurre un ordinamento spazio-temporale porta a una rottura nella catena causale in quanto a esso è

collegato un essenziale scambio di quantità di moto e di energia tra gli enti fisici e i regoli [per la lunghezza] e gli orologi [per il tempo] usati per l'osservazione; ed è proprio di questo scambio che non può essere tenuto conto se gli strumenti di misura devono servire al loro scopo.

«Viceversa, ogni conclusione sul comportamento dinamico dei singoli enti, dedotta in modo non ambiguo dalla rigorosa conservazione dell'energia e della quantità di moto, richiede una completa rinuncia a seguirne il corso nello spazio e nel tempo. In generale,

possiamo dire che la descrizione spazio-temporale e causale si presta all'ordinamento delle nostre esperienze usuali solo in ragione della piccolezza del quanto d'azione rispetto alle azioni da noi incontrate nei fenomeni ordinari.»

Una posizione molto chiara che viene ulteriormente esplicitata con queste parole: «La scoperta di Planck ci ha posti in una situazione analoga a quella in cui ci siamo venuti a trovare dopo la scoperta del fatto che la luce si propaga con una velocità grandissima ma finita. L'adeguamento della netta distinzione fra spazio e tempo

suggerita dai nostri sensi dipende infatti interamente dalla piccolezza delle velocità con cui abbiamo a che fare nella vita di tutti i giorni in confronto alla velocità della luce. Nella questione della connessione causale dei fenomeni atomici, il carattere reciproco dei risultati delle misurazioni non è più trascurabile, in effetti, di quanto lo sia la loro relatività nella questione della simultaneità».

Sembrirebbe, quindi, che tra la Fisica Quantistica e la Teoria della Relatività vi possa essere una qualche convergenza pur nella diversità evidente degli approcci. E

proprio alla riunificazione di queste due fondamentali teorie, e in particolare del Modello Standard – che descrive le forze come interazioni fra i bosoni quantistici – e della Relatività Generale, sono attualmente dedicati gli sforzi dei principali scienziati. Sforzi che, fino a oggi, hanno portato alla formulazione di alcune innovative teorie come la Teoria delle Stringhe – che affronteremo assieme nel Capitolo 6 – e la Loop Quantum Gravity, la Gravità Quantistica a Loop, che cerca di quantizzare la gravità ipotizzando che l'universo sia costituito da anelli energetici di

dimensioni infinitesimali.

A questo punto possiamo finalmente approfondire anche la descrizione della natura della forza di gravità proposta dalla Relatività Generale. Per farlo, mi rivolgo nuovamente al fisico e cosmologo Giuseppe Tormen. «Nella visione relativistica la gravità non è più una forza a distanza, che agisce istantaneamente lungo la linea che congiunge due corpi, ma è una proprietà geometrica intrinseca dello spazio-tempo. La Terra gira intorno al Sole perché il secondo, con la sua sola presenza, deforma il tempo e lo spazio intorno a sé. La

Terra semplicemente si muove in questo spazio-tempo deformato seguendone la forma e percorrendo quindi la traiettoria più dritta possibile.

«Quindi il moto della Terra è determinato dalla preesistente deformazione dello spazio-tempo. Oltre a ciò, a causa del moto del sistema Terra-Sole, che modifica ulteriormente lo spazio-tempo, vengono emesse continuamente onde gravitazionali il cui effetto però è estremamente piccolo, praticamente trascurabile rispetto ad altri effetti come, per esempio, quello della perdita di massa del

Sole che avviene sotto forma di vento solare. Se, in modo assolutamente ipotetico, il Sole venisse istantaneamente tolto dalla posizione che occupa nello spazio, sulla Terra ce ne accorgeremmo solo dopo cinquecento secondi all'incirca. Cioè, dopo l'intervallo di tempo necessario perché la conseguente onda gravitazionale, che deforma lo spazio-tempo, si propaghi fino a noi.»

Quindi, nella Teoria della Relatività Generale, le onde gravitazionali svolgono la stessa azione che nella visione della Meccanica Quantistica viene

realizzata dai gravitoni? «No. Preciserei la distinzione fra onde gravitazionali e gravitoni», prosegue Giuseppe Tormen, «in questi termini: le prime sono l'equivalente gravitazionale delle onde elettromagnetiche e si creano ogni volta che la forma di un corpo celeste cambia in modo accelerato lungo più direzioni. Fisicamente parlando, questo tipo di azione prende il nome di radiazione di quadrupolo. I gravitoni, invece, sono le ipotetiche particelle che trasmettono l'interazione gravitazionale in una descrizione quantistica della gravità.

«Nella Relatività Generale la gravità non è una forza ma una proprietà dello spazio-tempo. Quindi non va pensata come qualcosa che si 'trasmette' ma come una 'situazione'. Lo spazio-tempo viene deformato dalla presenza di materia ed energia, e questa deformazione provoca quella che noi chiamiamo attrazione gravitazionale. Un esempio – in realtà improprio – che aiuta a rendere questa idea è quello classico di una superficie elastica che viene curvata dalla presenza di un peso. In questo contesto le onde gravitazionali non sono il modo in

cui si trasmette la gravità bensì solamente una perturbazione che si propaga nello spazio e che modifica temporaneamente lo spazio-tempo, deformandolo.

«Un'altra analogia – anch'essa solo esemplificativa – è quella di un sasso fatto cadere nell'acqua di uno stagno: il sasso crea delle increspature circolari che si propagano sulla superficie dell'acqua, modificandone temporaneamente la forma. L'analogia più fedele, invece, è quella del campo elettromagnetico: le equazioni di Maxwell descrivono sia il campo elettrostatico di una

carica ferma nello spazio sia il campo, variabile nel tempo, corrispondente alla propagazione delle onde elettromagnetiche che trasportano energia. Allo stesso modo, le equazioni di Einstein descrivono sia il campo di gravità statico di una stella sia la propagazione di energia che corrisponde alla trasmissione delle onde gravitazionali. Aggiungerei, per concludere, che le onde gravitazionali sono state effettivamente osservate, nel 2015, probabilmente nel processo di fusione di due buchi neri, mentre i gravitoni, al momento, sono ipotesi

teoriche.»

Il quinto incomodo

Sulle onde gravitazionali e sulle ulteriori implicazioni della loro scoperta tornerò ancora nel prossimo capitolo, dove ne discuterò – come già accennato – sia con Giuseppe Tormen sia con il ricercatore del Max Planck Institute for Gravitational Physics di Hannover, Marco Drago. Adesso è arrivato il momento di aggiungere un nuovo tassello alla riflessione che ho portato avanti fino a questo momento. Una particella individuata nel 2012 – ma la cui esistenza è stata pubblicamente confermata nel 2013 – che viene

impropriamente indicata, dai non addetti ai lavori, con l'altisonante nome di «particella di Dio»: il bosone di Higgs!

Anche se Peter Higgs ha sempre dichiarato di non gradire il riferimento a Dio per evitare di offendere la sensibilità delle persone religiose, è indubbio che nell'opera di divulgazione precedente e conseguente alla sua effettiva scoperta sia stata più volte messa in evidenza la particolare natura di particella «creatrice» – nel senso che specificherò fra poco – che la caratterizza. Quella stessa natura che, pur essendo una

particella quantistica e quindi rientrando all'interno del Modello Standard, la rende fondamentale anche per la Teoria della Relatività Generale.

Ma di quale natura, di quale caratteristica unica si tratta? Quella di conferire massa a tutte le altre particelle. E dato che la massa (m), grazie alla velocità della luce (c), è la proprietà fisica che consente di determinare l'energia (E) nell'equazione di Einstein,

$$E = m \cdot c^2$$

se ne capisce immediatamente l'importanza! Soprattutto, si capisce il perché dell'inconsueta velocità

con cui, sempre nel 2013, a Peter Higgs, insieme al fisico belga François Englert, è stato assegnato il Nobel per la fisica con la seguente motivazione: «Per la scoperta teorica di un meccanismo che contribuisce alla nostra comprensione dell'origine della massa delle particelle subatomiche, e che è stato confermato recentemente attraverso la scoperta della particella fondamentale prevista, da parte degli esperimenti ATLAS e CMS al Large Hadron Collider del CERN».

Ma andiamo con ordine. Uno dei problemi fondamentali della fisica

delle particelle consiste, molto semplicemente, nel capire perché alcune particelle hanno massa mentre altre no. E fra queste particelle, perché alcuni mediatori come i bosoni W e Z sono dotati di massa mentre altri, come il fotone, ne sono privi. Il meccanismo indotto dalla presenza della massa è noto: più massa si ha più è facile interagire a breve distanza, quindi vengono mediate le forze locali che agiscono a corto raggio; meno massa si possiede più è possibile percorrere lunghe distanze e quindi trasportare le informazioni del campo a grande raggio. Rimaneva

da scoprire come venisse attivato.

Nel 1964 vari gruppi di ricercatori sparsi per il mondo cominciarono a ragionare su una teoria che permettesse di attribuire la massa alle diverse particelle e Peter Higgs, che all'epoca lavorava presso la Edinburgh University, propose il meccanismo che poi prese il suo nome: il meccanismo di Higgs. La sua «unica grande idea», così la definì lo stesso Higgs, gli venne mentre stava passeggiando nelle Highlands scozzesi e presupponeva l'esistenza di un nuovo bosone intermedio che interagisse con le diverse particelle rallentandone il

moto, quindi facendole sembrare più pesanti.

Come scrive efficacemente il fisico Joanne Baker, attuale editor scientifico della rivista Nature: «Higgs pensò a un campo di forza di fondo che rallentava le particelle mediatrici che lo attraversavano. Immaginate di far cadere una biglia in un bicchiere colmo di melassa: la sfera non riesce ad acquistare velocità [...]. Il campo, che oggi è noto come campo di Higgs, agisce come un liquido viscoso e rallenta i bosoni W e Z . Questi di conseguenza si comportano come se avessero una massa. L'effetto

del campo di Higgs sui fotoni è molto inferiore, ed è per questo che i bosoni W e Z risultano più pesanti». ¹³

Grazie alla scoperta del bosone di Higgs, è stata dimostrata anche l'esistenza del campo di Higgs confermando alla particella lo status di mediatrice dell'ipotetica forza di Higgs: la quinta forza agente sulla realtà così come la conosciamo. Come ha dichiarato in un'intervista del 2015 ¹⁴ il fisico teorico Matthew Strassler, dell'Harvard University: «Il modo con cui Higgs dà la massa alle particelle è di per sé una

caratteristica unica, differente da tutti gli altri campi noti. Quando si 'accende', il campo di Higgs modifica l'ambiente di tutte le particelle, cambiando la natura stessa dello spazio vuoto. Il modo con cui le particelle interagiscono con questo campo si basa sulle loro proprietà intrinseche». Come chiarisce lo stesso articolo, per generare una forza, un campo deve possedere tre requisiti:

- dev'essere in grado di «accendersi» e «spegnersi»;
- deve avere una direzione privilegiata;
- dev'essere in grado di attrarre

o di respingere.

Normalmente il campo di Higgs non possiede i primi due: è sempre «acceso» e non ha una direzione privilegiata. In presenza di un bosone di Higgs, però, il campo risulta distorto e quindi, teoricamente, può generare una forza.

«Crediamo che due particelle possano attrarsi attraverso il campo di Higgs», continua Matthew Strassler. «La stessa equazione che abbiamo utilizzato per predire l'esistenza della particella di Higgs, e come dovrebbe decadere nelle altre particelle, predice anche che

questa forza debba esistere. Inoltre, sappiamo che il campo di Higgs è essenziale nella formazione della materia stabile mentre, almeno per quanto ne sappiamo al momento, la forza di Higgs non lo è. La forza di Higgs potrebbe essere importante in altre situazioni. Potrebbe essere correlata alla quantità di materia oscura o all'asimmetria materia-antimateria. È ancora presto per dirlo.»

Capire quale possa essere il ruolo della forza di Higgs nelle dinamiche dell'universo è sicuramente una sfida affascinante. Una sfida i cui esiti, al momento,

non sono prevedibili. Eppure già la scoperta del bosone di Higgs ha permesso di aggiungere un ulteriore tassello sia al Modello Standard delle particelle sia alla stessa Teoria Quantistica. Un tassello fortemente cercato, e forse in grado di far avvicinare ulteriormente fra loro la visione quantistica e quella relativistica della realtà.

PARTE SECONDA

Dove si raffigurano le
logiche della natura

Spazio, ultima frontiera

Ovvero, ancora su gravitoni e onde gravitazionali

Cosa c'è dietro? Meccanica Quantistica e Relatività Generale offrono due diverse interpretazioni della natura dell'interazione gravitazionale. Da una parte si ipotizza l'azione di speciali particelle chiamate gravitoni; dall'altra Albert Einstein teorizzava, già nel 1916, l'esistenza delle onde gravitazionali. L'effettivo rilevamento di queste ultime, avvenuto nel settembre 2015, ha confermato le previsioni del grande scienziato e dato nuovo impulso agli studi in questo fondamentale campo.

Perché è importante? Perché la rilevazione delle onde gravitazionali conferma l'esistenza di perturbazioni ondulatorie dello spazio-tempo. Una conferma che, paradossalmente, non ha tolto vigore all'ipotesi quantistica dei gravitoni ma che, anzi, ha già prodotto nuove ricerche volte a determinare il valore limite dell'eventuale massa del bosone dell'interazione gravitazionale.

NEI primi quattro capitoli di questo libro ho scelto di delineare il quadro complessivo della Teoria Quantistica, soffermandomi sulle tematiche più significative che la caratterizzano. Assieme, abbiamo

rivissuto i principali eventi di una storia nata esattamente nel 1900 e che si è poi evoluta grazie alle intuizioni e alle scoperte di intere generazioni di scienziati. Abbiamo assistito allo sviluppo dei due primi modelli della Meccanica Quantistica, abbiamo conosciuto le sorprendenti logiche dell'Interpretazione di Copenaghen e abbiamo anche affrontato il primo confronto con la Teoria della Relatività di Albert Einstein.

Un percorso articolato e al contempo affascinante che ci ha portato fin qui, fino a padroneggiare gli strumenti teorici necessari per

compiere il prossimo passo: entrare nelle logiche stesse della natura, sia a livello atomico e subatomico sia – paradossalmente – a livello cosmologico. Con queste premesse, i temi che nel prosieguo del volume potrebbero essere approfonditi sono innumerevoli; persino troppi! Ecco perché ho scelto di affrontare solo alcuni fra quelli che negli ultimi anni hanno portato a scoperte innovative o hanno dischiuso nuovi scenari per la comprensione della realtà. Nei prossimi tre capitoli, quindi, scopriremo argomenti che, a volte, si situano al limite di quella che può essere considerata fantascienza e

che sono ricchi di implicazioni e di conseguenze che vanno ben oltre la nostra immediata comprensione.

Per cominciare ho deciso di dedicare questo nuovo capitolo agli sviluppi che si stanno concretizzando, sia per la Teoria della Relatività sia per la Fisica Quantistica, grazie a una delle più recenti e importanti scoperte della fisica contemporanea: la rilevazione delle onde gravitazionali. Una scoperta che lo scorso 3 ottobre 2017 ha portato il fisico tedesco, ma naturalizzato americano, Rainer Weiss e i suoi due colleghi statunitensi, Barry Clark Barish e

Kip Stephen Thorne a ottenere il prestigioso riconoscimento del Nobel per la fisica per i «loro contributi decisivi legati all'osservatorio LIGO e alla rilevazione delle onde gravitazionali».

Previste da Albert Einstein nel 1916, all'interno della Teoria della Relatività Generale, le onde gravitazionali sono state effettivamente rilevate alle ore 10:50 e 45 secondi del 14 settembre 2015 dai ricercatori del California Institute of Technology, il Caltech; del Massachusetts Institute of Technology, il famoso MIT; del

LIGO, il Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory; e del Virgo, un rivelatore che si trova nel comune di Cascina in provincia di Pisa. E il ricercatore italiano Marco Drago¹ – con cui fra poche pagine mi confronterò su questo affascinante argomento – nella sua qualifica di responsabile di una delle analisi in tempo reale dei dati ricevuti dai rivelatori LIGO-Virgo, è stato il primo uomo al mondo a osservarle!

Ripensare lo spazio-tempo

Se lo spazio-tempo risulta essere curvo, come evolve il rapporto fra l'uomo e l'universo rispetto a quello previsto dalla fisica classica? Può sembrare una domanda fin troppo vasta, ma le implicazioni che risultano da questo diverso assunto hanno enormi ripercussioni pratiche. Pongo questo quesito a Giuseppe Tormen, che si occupa proprio degli aspetti teorici e numerici della cosmologia. «La Teoria della Relatività dà praticamente le stesse predizioni della fisica Newtoniana finché si descrivono sistemi all'interno dei

quali la gravità risulta debole e le velocità sono molto minori di quelle della luce. Con la definizione di gravità debole stiamo indicando, semplicemente, masse piccole e distanze grandi. Le differenze fra le due teorie diventano importanti, invece, quando le masse sono grandi rispetto alle distanze coinvolte – per esempio nel caso di stelle collassate – e quando le velocità diventano paragonabili a quella della luce.

«Il principio guida più importante della Relatività è detto Principio di Equivalenza e postula che ogni accelerazione è indistinguibile da

un'attrazione gravitazionale. Per comprendere esattamente cosa implichi, immaginiamo di chiudere un astronauta all'interno di un razzo privo di oblò. Dato che l'astronauta non può guardare all'esterno per capire cosa sta succedendo, se sente una forza che lo trattiene sul pavimento non potrà mai sapere con certezza se quella forza dipende dal fatto che il razzo si trova fermo sulla superficie di un pianeta oppure se dipende dal moto accelerato del razzo nello spazio. Vale anche la situazione opposta. Se l'astronauta si trova a fluttuare senza peso nel razzo, non potrà mai

sapere con certezza se il razzo si sta muovendo di moto non accelerato – quindi, a velocità costante – lontano da qualsiasi corpo celeste oppure se il razzo sta cadendo a motori spenti, attirato verso un qualunque pianeta.»

Usando un giro di parole, possiamo dire che ogni accelerazione è fonte di gravità? «Certamente», continua Giuseppe Tormen. «Se vogliamo una conferma del Principio di Equivalenza, possiamo pensare alla ISS, la Stazione Spaziale Internazionale, che orbita attorno alla Terra. Al suo interno, gli

astronauti fluttuano senza peso anche se la gravità, dato che la stazione si trova a circa quattrocento chilometri di altezza, non è molto diversa da quella che agisce sulla superficie del nostro pianeta. Infatti, la distanza della stazione dal centro della Terra è solo il 6 per cento maggiore di quella di una persona sulla superficie terrestre; poiché la gravità aumenta come l'inverso del quadrato della distanza, un aumento del 6 per cento sulla distanza significa una riduzione della gravità pari a circa il 12 per cento. Ne consegue che la gravità a

bordo della stazione spaziale risulta di poco minore a quella terrestre.» Allora come mai gli astronauti fluttuano da una parte all'altra della stazione come se fossero in assenza di gravità? «L'assenza di peso è dovuta al fatto che la ISS 'cade' intorno alla Terra lungo un'orbita più o meno circolare. Come nel caso del razzo in caduta libera, quindi, gli astronauti avvertono la mancanza di peso come se si trovassero nello spazio profondo.»

Conferme necessarie

A questo punto, però, potremmo anche chiederci: «E se fossimo noi gli astronauti?» Dato che dal nostro punto di vista la visione che abbiamo del mondo è totalmente condizionata dall'appartenere al sistema di riferimento della Terra, non potremmo essere in una situazione analoga all'astronauta rinchiuso nel razzo che non ha la possibilità di guardare all'esterno e quindi di capire cosa stia succedendo? Come facciamo, in buona sostanza, a essere così certi che le predizioni della Teoria della Relatività siano corrette e che

valgano in tutto l'universo? «Dopo la formulazione della Relatività», mi risponde Giuseppe Tormen, «questo problema venne preso in considerazione anche nell'ambiente scientifico. Così, studiosi e ricercatori cercarono di misurare sperimentalmente gli effetti relativistici per capire se le predizioni della Relatività fossero o meno corrette. I tre test che vennero svolti sono oggi noti come Test Classici della Relatività.

Il primo² effetto è il cosiddetto redshift gravitazionale, ovvero lo 'spostamento verso il rosso' della luce – o di qualsiasi altra radiazione

elettromagnetica – dovuto alla gravità. Per spiegarlo dobbiamo considerare due principi: il Principio di Conservazione dell'Energia e l'equivalenza tra massa (m) ed energia (E):

$$E = m \cdot c^2$$

Facciamo un passo alla volta. Un sasso di massa m , lanciato verso l'alto con velocità iniziale v , possiede sia una data 'energia cinetica' (E_K), proporzionale al quadrato della sua velocità, sia una 'energia potenziale' (E_p) che è inversamente proporzionale alla sua distanza dal centro della Terra. In termini matematici, possiamo

scrivere:

$$E_K = 1/2 mv^2$$

$$E_P = G \cdot Mm/r$$

dove se (E_K) è positiva, allora (E_P) assume segno contrario. All'aumentare della sua distanza dal terreno, v diminuisce mentre r aumenta. In tal modo viene mantenuta invariata l'energia totale del sasso, data dalla somma dell'energia cinetica e dell'energia potenziale. Se invece il sasso viene lasciato cadere da una certa altezza, inizialmente possiede una certa energia potenziale e la sua energia cinetica è uguale a zero. Durante la caduta, la velocità

aumenta e la distanza del sasso dal terreno diminuisce, in modo tale da mantenere costante l'energia totale.

«Se la luce possiede energia, possiede anche una massa equivalente³ data dalla formula che abbiamo appena visto e quindi, come ogni altra particella, deve subire la gravità. L'energia potenziale del fotone è inversamente proporzionale alla sua distanza dal centro della Terra – come avviene per il sasso – ma la sua energia cinetica non può cambiare perché la velocità del fotone è sempre costante ed è

uguale a quella della luce c . L'unico altro modo possibile per modificare l'energia di un fotone consiste nel variare la sua frequenza di oscillazione. Sappiamo che per un'onda elettromagnetica l'energia è legata alla frequenza [come abbiamo visto precedentemente nel Capitolo 1] quindi il fotone, cadendo, cambierà la propria frequenza.

«In definitiva, tenendo conto dello spettro di frequenze nel visibile, se viene emesso da Terra e inviato nello spazio, il fotone perderà energia diventando più rosso e creando un effetto di

redshift gravitazionale. Viceversa, se il fotone viene emesso dallo spazio e cade su un pianeta o su una stella, guadagnerà energia diventando più blu e generando quello che viene chiamato un effetto di blueshift gravitazionale: uno spostamento verso il blu della luce.» Lo spostamento verso il rosso è osservabile anche nell'osservazione spettroscopica degli oggetti astronomici a ulteriore conferma diretta degli effetti relativistici.

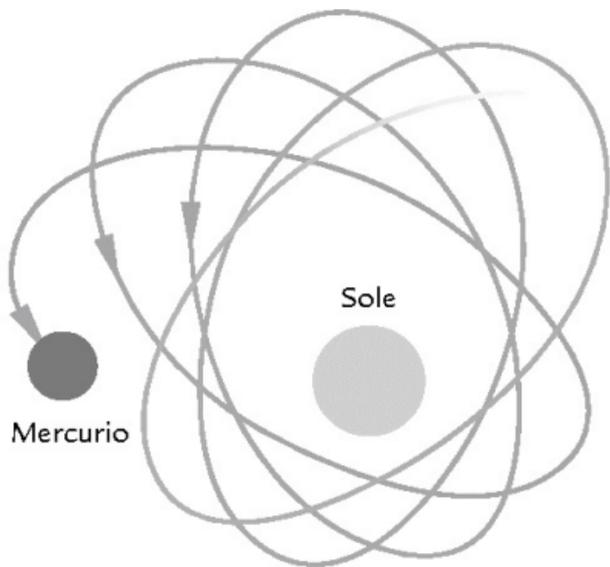


Figura 12. Rappresentazione dell'orbita «a rosetta» che descrive il moto del pianeta Mercurio attorno al Sole.

«Il secondo effetto», riprende il discorso Giuseppe Tormen, «è la precessione delle orbite dei pianeti. Nel modello puramente

Newtoniano, l'orbita di un solo pianeta intorno alla propria stella è un'ellisse o una circonferenza; ciò significa che la traiettoria descritta dal pianeta è chiusa su se stessa. Nel modello della Relatività Generale invece, la stella deforma lo spazio intorno a sé in modo tale che il pianeta compia una rivoluzione completa in meno di 360 gradi. Questo fa sì che la sua orbita non si chiuda più, e che il pianeta descriva invece un'orbita aperta, 'a rosetta' (vedi Figura 12). Questo effetto si può capire prendendo un foglio, disegnando su di esso un punto centrale che rappresenti una

stella, e tracciando un'ellisse di cui la stella è uno dei due fuochi. L'ellisse rappresenta l'orbita Newtoniana del pianeta, in uno spazio-tempo piatto.

«Possiamo cercare di riprodurre una curvatura dello spazio intorno alla stella praticando, con una forbice, un taglio dall'ellisse alla stella e sovrapponendo un poco i due lembi di carta, in modo da ottenere una specie di cono. Se prima del taglio una rivoluzione orbitale richiedeva 360 gradi, ora ne richiede di meno, perché parte della carta è sovrapposta. I due punti dell'ellisse in corrispondenza

del taglio ora non si congiungono più: l'orbita è divenuta aperta e se continuassimo a tracciarla otterremmo appunto una rosetta. Questo effetto risulta più evidente per orbite quasi circolari e vicine alla stella, e quindi nel nostro sistema solare è stato misurato su Mercurio,⁴ dove ha dato risultati in perfetto accordo con la Relatività.»

Rimane ancora da affrontare l'ultimo dei tre Test Classici della Relatività, così chiedo a Giuseppe Tormen di illustrarlo. «Il terzo effetto è la deflessione della luce a opera della gravità. Come abbiamo visto per il redshift gravitazionale,

se la luce risente della gravità come ogni altro corpo, allora un fotone in viaggio vicino a una stella deve risentire della gravità esercitata da quest'ultima e 'piegare' la propria traiettoria di un angolo tanto maggiore quanto più vicino è il passaggio. Una situazione ideale per misurare questo effetto dalla Terra è misurare la posizione apparente delle stelle vicino al Sole durante un'eclissi totale. Nel 1919, in due spedizioni indipendenti, gli scienziati effettuarono questa misura confermando, così, la predizione di Einstein.⁵

«Vorrei solo aggiungere che

accettando l'equivalenza $E = m \cdot c^2$ tra massa ed energia, anche la fisica Newtoniana prevedrebbe che un raggio luminoso risulti deflesso dalla gravità; come era stato calcolato da Henry Cavendish già nel 1798. La deflessione relativistica è però doppia rispetto a quella Newtoniana. L'eccesso è dovuto alla curvatura dello spazio, presente nella Relatività Generale ma assente nella Teoria Newtoniana.»

Eppur si muovono

Grazie ai tre test classici, come abbiamo appena visto, è stato possibile dimostrare sperimentalmente la correttezza delle previsioni Einsteiniane inserite nella Teoria della Relatività. Non di tutte, però. A causa delle limitazioni tecnologiche degli strumenti di rilevazione, la predizione relativa alle onde gravitazionali è rimasta a lungo solo un'ipotesi, e sono dovuti passare esattamente cento anni prima che l'evoluzione degli apparati scientifici consentisse di confermarla. Il 14 settembre 2015 anche questo obiettivo è stato

raggiunto e le onde gravitazionali sono state finalmente osservate dal ricercatore italiano Marco Drago, nel suo laboratorio presso il Max Planck Institute for Gravitational Physics di Hannover.

Ho avuto modo di conoscere il giovane scienziato di Bagnoli di Sopra, in provincia di Padova, in occasione di un recente convegno in cui ho presentato una personale riflessione sulla natura quantistica delle vibrazioni. Da quel momento fra noi è iniziato un proficuo dialogo, un confronto che mi ha permesso di approfondire questo fondamentale tema direttamente

con colui che ne è uno dei principali protagonisti. La prima domanda che ho deciso di rivolgere a Marco Drago prende spunto dalle considerazioni appena proposte: quali sono i meccanismi della Teoria della Relatività Generale che portano a predire l'esistenza delle onde gravitazionali?

«In fisica, quando si hanno delle equazioni che descrivono specifici comportamenti, per capire realmente cosa avvenga si cerca di applicarle alla nostra esperienza reale. Prendiamo per esempio il sistema composto dalla Terra e dal Sole: sappiamo che i due corpi si

attraggono reciprocamente con una certa forza – usiamo, per ora, il linguaggio Newtoniano – e applicando le tre leggi di Johannes von Kepler, che regolano il moto dei pianeti, deduciamo l'esistenza della forza di gravitazione universale, così come originariamente descritta da Isaac Newton. Newton, poi, dimostrò anche che vale il viceversa, cioè che dalla legge generale del moto e dalla forza di gravitazione universale era possibile ottenere a ritroso le tre leggi di Kepler.

«Ora passiamo alle leggi di Einstein, che descrivono il concetto

che un oggetto dotato di massa deforma lo spazio circostante come se quest'ultimo fosse un tappeto elastico. Queste equazioni sono più complicate da risolvere di quelle di Newton, tanto che se le risolviamo in un punto dello spazio-tempo dove c'è solo il vuoto possiamo trovare come soluzione proprio le onde gravitazionali. Così facendo, però, possiamo sapere solamente che le onde gravitazionali, una volta generate, si propagano nello spazio-tempo. Andando a studiare le caratteristiche matematiche di queste onde, invece, si trova che possono essere generate

unicamente da masse in moto.

«Un moto sufficientemente complicato, però, non un moto qualsiasi. Noi definiamo questi tipi di movimenti come di ordine almeno quadrupolare⁶: cioè, devono esserci almeno due masse che ruotano una attorno all'altra oppure dei movimenti che non siano perfettamente simmetrici. Facciamo alcuni esempi per chiarire questo punto. L'esplosione di una stella – la supernova – non può generare onde gravitazionali se è perfettamente sferica. Un buco nero rotante non genera onde gravitazionali perché è una sfera

perfetta. Un altro corpo, come la Terra o il Sole, invece le genera perché non sarà mai perfettamente sferico. Questo è quanto prevede la teoria.»

Quindi, non tutti i corpi – o meglio, non tutte le masse – presenti nel nostro universo generano onde gravitazionali. Per emetterle devono essere in moto e per di più devono possedere un moto che non sia perfettamente simmetrico. «Sì, però da un punto di vista pratico generare onde gravitazionali non è poi così complicato. Anzi, lo facciamo anche noi tutti i giorni. Il fatto è che

l'effetto prodotto da queste onde è di ordine infinitesimale! Quando passa, un'onda gravitazionale modifica le distanze dei corpi. Ma di quanto? Bisogna tenere conto che l'effetto dipende da due fattori: la grandezza delle masse e la distanza che ha percorso l'onda. L'onda gravitazionale del 14 settembre 2015 ha modificato la distanza tra la Terra e il Sole – che misura all'incirca centocinquanta milioni di chilometri – di una lunghezza pari al raggio di un atomo: meno di un miliardesimo di metro!

«Le due masse che hanno generato quest'onda erano circa

trenta volte quella del Sole, quindi abbastanza pesanti; però erano lontane. Cosa succede, invece, quando i corpi presi in esame sono più vicini fra loro? Facciamo un altro esempio considerando Giove e il suo satellite Io. È vero che si trovano a distanza ravvicinata, ma è anche vero che le loro masse sono molto piccole in relazione a quelle appena considerate. Di conseguenza, l'effetto delle onde gravitazionali risulta ulteriormente inferiore di circa diecimila volte. Cambiando prospettiva, se per strada incontriamo un amico che ci saluta vigorosamente con la mano,

anche in quel caso verrà prodotta un'onda gravitazionale rivolta nella nostra direzione, ma il suo effetto sarà così piccolo da risultare impercettibile.»

Se consideriamo l'effetto di un'onda gravitazionale come la capacità di introdurre una variazione di lunghezza (ΔL) in una lunghezza (L) che risulti già nota, possiamo quantificare approssimativamente la sua azione nei tre casi degli esempi appena visti. L'intensità dell'effetto dell'onda gravitazionale misurata nel 2015 è di circa 10^{-21} , ovvero un millesimo di miliardesimi di

miliardesimi. Quello relativo all'interazione fra Giove e Io è di circa 10^{-26} , ovvero 10 milionesimi di miliardesimi di miliardesimi. Infine, quello relativo dell'onda gravitazionale prodotta dal gesto della mano del nostro amico è pari a circa 10^{-52} , cioè uno zero seguito da una virgola, da altri cinquantuno zeri e poi da un 1!

Tutti questi valori non hanno unità di misura perché sono variazioni di lunghezza espresse sempre in funzione di lunghezze. Inoltre, vengono considerati rapportati a lunghezze di riferimento – quelle dei bracci dei

rivelatori – dell'ordine di chilometri, cioè 10^3 metri. Ciò significa che la variazione effettiva introdotta dall'onda gravitazionale misurata nel 2015 è pari a $10^{-21} \cdot 10^3$ metri; ovvero, 10^{-18} metri. Analogamente, per le altre variazioni si ottengono, rispettivamente, i valori di 10^{-23} metri e 10^{-49} metri.

Oltre l'apparenza

La Fisica Quantistica ci ha mostrato il comportamento della materia quando la osserviamo su scale di grandezza – e di energia – atomica e subatomica. Scale di grandezza che si esprimono numericamente tramite l'unità di misura che deve il proprio nome a quello del fisico svedese Anders Jonas Ångström: 1 Ångström – simbolo Å – vale 10^{-10} metri, cioè 10 miliardesimi di metro. Espresso in Ångström, il raggio di un atomo di idrogeno diventa pari a $0,53 \text{ Å}$, cioè $5,3 \cdot 10^{-11}$ metri. Grazie ai risultati ottenuti dagli studi nell'ambito della Fisica

Particellare, poi, abbiamo scoperto che all'interno di quegli stessi atomi esiste un intero universo di altre particelle: dagli elettroni, circa diecimila volte più piccoli degli atomi – cioè, grandi 10^{-15} metri –, ai quark, che sono ancora mille volte più minuscoli. Solamente 10^{-18} metri: un miliardesimo di miliardesimo di metro!

Adesso, abbiamo fatto un ulteriore salto nell'infinitamente piccolo e ci stiamo confrontando con valori che sono ancora inferiori, da mille volte a miliardi di volte. Numeri che facciamo fatica non solo a scrivere ma addirittura a

rappresentare e a comprendere nel loro reale significato. Numeri che prefigurano una realtà che dobbiamo necessariamente trovare un modo per descrivere al meglio. Ecco perché ho chiesto a Marco Drago di ridefinire assieme, esattamente, cosa sono le onde gravitazionali. «La definizione scientifica è: perturbazioni dello spazio-tempo che si propagano come delle onde alla velocità della luce. Per essere più chiari, immaginiamo che lo spazio-tempo sia composto da sole due dimensioni invece che dalle canoniche quattro. I corpi, vivendo

nello spazio-tempo, sono confinati a muoversi in queste due dimensioni, come se camminassero su un pavimento.

«Prima della Relatività si pensava che questo pavimento fosse rigido. Passeggiandoci sopra e senza essere soggetti a forze esterne – come qualcuno che ci spinge –, il nostro movimento avveniva solo in linea retta. Adesso complichiamo un po' questa immagine. La teoria gravitazionale di Newton afferma che gli altri corpi presenti sul pavimento ci attraggono deviando la nostra traiettoria, come se ci tirassero con

un filo immaginario. Einstein, invece, propone di pensare che lo spazio-tempo non sia rigido e che il nostro pavimento abbia la stessa consistenza di un tappeto elastico. Ogni oggetto nello spazio-tempo, in questa visione, deforma – per la sua massa, per la sua pesantezza – il tappeto elastico e così, quando ci camminiamo sopra, non ci muoviamo più in linea retta ma seguendo una curva che dipende da quanto questo tappeto risulta deformato.

«Questo concetto prende il nome di curvatura dello spazio-tempo. Se la curvatura è molto pronunciata –

ovvero, se il corpo è molto pesante –, quello che succede è che veniamo risucchiati verso il corpo stesso. Quindi, la Terra che gira attorno al Sole sta seguendo la curvatura, un po' come una nave che viene inghiottita da un vortice marino. A questo punto, per capire cosa siano effettivamente le onde gravitazionali, dobbiamo fare un passo in più: dobbiamo pensare agli oggetti che si muovono sul tappeto elastico. Faccio un esempio prendendo due palline – e non è un esempio casuale – che rotolano attorno a un punto comune. Il tappeto elastico viene

continuamente sottoposto a stress dal movimento delle due palline, e questa tensione si manifesta anche in punti distanti dai due corpi. Le onde prodotte dal tappeto elastico che si propagano lontano dai corpi in movimento sono le nostre onde gravitazionali.»

Le due palline introdotte nell'esempio sono la rappresentazione ideale dei due buchi neri che, durante il processo di fusione reciproca, hanno originato le onde gravitazionali rilevate lo scorso 14 settembre 2015 e la cui scoperta è stata annunciata pubblicamente nel

febbraio del 2016.⁷ Onde che, come abbiamo visto, hanno provocato effetti perturbativi di intensità talmente bassa da causare una variazione della distanza fra la Terra e il Sole inferiore al diametro di un singolo atomo!

Un'idea che viene dal passato

Mentre continuo la riflessione con Marco Drago, considero le difficoltà sperimentali legate alla rilevazione di onde gravitazionali di così bassa intensità, e capisco perché sia stato necessario aspettare ben cento anni prima di riuscire a sviluppare una tecnologia sufficientemente sensibile. A questo punto è arrivato il momento di affrontare anche questo aspetto, così chiedo a Marco Drago come sia avvenuta concretamente la scoperta delle onde gravitazionali.

«Dobbiamo partire dal concetto di rilevazione, ossia dagli effetti che il passaggio di un'onda gravitazionale ha sulla materia. Quando un'onda gravitazionale si propaga, perturba lo spazio attorno a sé modificando le distanze relative tra i corpi. Se per esempio prendiamo dei punti distribuiti sul bordo di una circonferenza appoggiata su di un piano e facciamo propagare l'onda ortogonalmente, perpendicolare al piano stesso, possiamo osservare che questi punti si avvicinano e si allontanano fra loro. Più nel dettaglio, possiamo trovare due

direzioni perpendicolari caratterizzate dal fatto che mentre lungo la prima le distanze si accorciano, lungo la seconda le distanze si allungano. La misura di questa variazione indica il passaggio dell'onda gravitazionale.

«Il primo prototipo di rivelatore, in realtà, non utilizzava propriamente questo concetto, ma era costituito da una barra risonante. L'onda gravitazionale doveva eccitare la barra – cioè doveva farla vibrare alla sua frequenza 'caratteristica' – e la misura di questa eccitazione, di questa risonanza, avrebbe dovuto

evidenziare il passaggio dell'onda. Il problema principale di questo tipo di rivelatori era la loro ridotta sensibilità, che non consentiva di ottenere risultati concreti. Per questo motivo, all'inizio degli anni Novanta del Novecento si è cominciato a pensare al prototipo di quello che viene chiamato interferometro, nome che indica che si sta sfruttando il principio di interferenza in ambito gravitazionale cercando di rilevare la sovrapposizione, in un preciso punto dello spazio, di due radiazioni luminose.»

La descrizione dell'interferometro

di Michelson e del suo funzionamento è stata proposta nel Capitolo 4. Chiedo a Marco Drago se è proprio questa, sviluppata nel 1887, la tecnologia che ci ha permesso di raggiungere un così importante traguardo. «Certamente», risponde. «Tutti gli interferometri che usiamo si basano proprio sulle logiche dell'esperimento di Michelson-Morley. Si spara un unico fascio laser lungo due direzioni perpendicolari. I due fasci vengono riflessi tramite degli specchi, e dopo aver percorso la stessa distanza vengono ricombinati esattamente

nel punto di origine. Se non vi è stata alcuna interazione con le onde gravitazionali vuol dire che la distanza percorsa dai due raggi è stata la stessa. In questo caso, quando si ricombinano, si verifica un'interferenza distruttiva che annulla entrambi i fasci e quindi non si vede alcuna luce.

«Se al contrario c'è stata interazione con le onde gravitazionali, per il motivo che ho spiegato poco fa le lunghezze percorse dai due fasci sono diventate diverse fra loro. Quando si ricongiungono, quindi, i due fasci luminosi producono una figura di

interferenza che può essere misurata con gli opportuni strumenti. Naturalmente questa spiegazione è solo una semplificazione teorica. Dal punto di vista pratico le cose sono molto più complesse: i fasci laser devono propagarsi nel vuoto per evitare troppe dispersioni, tutto l'apparato dev'essere montato su un sofisticato sistema di sospensione per evitare che piccoli movimenti sismici possano disallineare i fasci e molto altro ancora. C'è realmente tanto lavoro, da parte di moltissime persone, dietro al risultato che siamo riusciti a raggiungere!»

Tornando al problema della sensibilità degli interferometri, si potrebbe affermare che siamo riusciti a rilevare l'onda gravitazionale del 14 settembre 2015 solo perché era sufficientemente intensa? «Questo è il problema centrale di tutta la ricerca, ma preferirei esplicitarlo in un'altra forma: non sono le onde gravitazionali che devono essere più o meno intense, sono i nostri strumenti che dovrebbero essere così potenti da rilevarle. E al momento non lo sono abbastanza! Anche se l'abbiamo già discusso assieme, vale la pena di ripeterlo

per fissare il concetto. La variazione di lunghezza che ci si aspetta dal passaggio di un'onda gravitazionale è veramente minima. Quella del 14 settembre 2015 ha causato una variazione percentuale di 10^{-21} metri. Vuol dire che sui bracci dei rivelatori, lunghi qualche chilometro, la variazione totale è stata di soli 10^{-18} metri circa: lo stesso ordine di grandezza dei quark!»

Evoluzione continua

Prima di affrontare il tema dell'eventuale rapporto esistente fra le onde gravitazionali predette da Albert Einstein e il gravitone – il bosone intermedio ipotizzato nella Teoria Quantistica – conviene soffermarsi sullo stato attuale delle tecnologie impiegate negli interferometri e sui loro possibili sviluppi nell'immediato futuro. In ambito scientifico, chiedo a Marco Drago, si sente spesso parlare di rivelatori di prima generazione e del fatto che l'onda gravitazionale sia stata scoperta, invece, da rivelatori di seconda generazione. Cosa

significano queste due definizioni, e quale differenza concreta c'è fra le varie tipologie di apparati?

«L'onda gravitazionale del 14 settembre 2015 era energeticamente molto forte; tuttavia la sensibilità dei rivelatori di 'prima generazione' non era tale da poterla rilevare con la stessa significanza. Con la definizione di prima generazione intendiamo semplicemente i rivelatori che hanno elaborato i dati fino al 2010. È stato soprattutto il miglioramento tecnologico nel passaggio dalla prima alla seconda generazione che ci ha permesso di dimostrare

l'esattezza della predizione di Albert Einstein. La seconda generazione di interferometri, pur essendo quella che stiamo utilizzando in questo momento non è ancora arrivata al massimo della sensibilità prevista.

«Attualmente, infatti, è stato completato il primo test scientifico – indicato con la sigla O1 –, attivo dal settembre 2015 al gennaio 2016. In quei proficui quattro mesi sono state rilevate due onde gravitazionali, GW150914 e GW151226, e una terza candidata: LVT151012. Nel novembre del 2016 è iniziato il secondo test scientifico, O2, che si è appena concluso lo

scorso agosto 2017. In questo periodo di tempo è stata rilevata l'onda gravitazionale denominata GW170104 ma, in questo preciso momento, l'analisi dei dati non è stata ancora completata e l'elenco potrebbe allungarsi ancora. Fra circa un anno dovrebbe partire il terzo test scientifico, O3, e solo quando si sarà conclusa anche questa fase potremo fare un bilancio totale dei risultati ottenuti.



Figura 13. Un'immagine aerea del LIGO a Hanford, nello Stato di Washington. I due bracci dell'interferometro sono lunghi, ciascuno, quattro chilometri.

«Prima dell'inizio del test scientifico O1, sono state apportate

una serie di modifiche al rivelatore che ne hanno migliorato del 300 per cento la sensibilità nella banda più ricettiva.

Naturalmente, quest'ultimo dato viene considerato in relazione agli interferometri di prima generazione. L'attuale test O2 e il futuro test O3 rappresentano degli ulteriori passaggi intermedi che ci consentiranno di raggiungere una sensibilità maggiore di un ordine di grandezza rispetto a quella degli apparati utilizzati fino al 2010. Per avere un'idea concreta, mantenendo costante la quantità di energia impiegata dovremmo poter osservare un volume di universo

mille volte più grande di quello mostrato dagli interferometri di prima generazione. Se adesso riusciamo a rilevare onde gravitazionali di intensità pari a 10^{-21} , il nostro obiettivo è quello di arrivare fino a 10^{-22} . Ricordo nuovamente che rilevare un'intensità di 10^{-22} si traduce – considerando le dimensioni di qualche chilometro dei bracci dei rivelatori attuali – nel misurare differenze di lunghezza di circa 10^{-19} metri: una dimensione 10 volte più piccola di quella di un quark!»

Un obiettivo ambizioso e sicuramente entusiasmante che

vedrà l'instaurarsi di una collaborazione fattiva fra tutti gli interferometri attivi sia sul nostro pianeta sia persino nello spazio! «Esatto», continua Marco Drago. «I test O1 e O2 sono stati effettuati grazie ai due rivelatori LIGO installati negli Stati Uniti d'America: LIGO Hanford, nello Stato di Washington, e LIGO Livingston, in Louisiana. Attualmente, grazie all'adesione – lo scorso 1° agosto – anche del rivelatore italiano Virgo, si sta costituendo una rete mondiale della quale, in futuro, faranno parte anche LIGO-India e KAGRA, il Kamioka Gravitational

Wave Detector installato in Giappone. Il vantaggio di avere più rivelatori correlati fra loro consiste nel riuscire a eliminare i 'rumori spuri', cioè i possibili errori di rilevazione. Infatti la probabilità che questi rumori si verifichino contemporaneamente⁸ in più parti della Terra è molto piccola.

«E dato che stiamo pensando in grande, nel 2034 dovrebbe diventare operativo anche il LISA, Laser Interferometer Space Antenna. Si tratta di un progetto dell'Agenzia Spaziale Europea, inserito nel progetto ESA Horizon 2000, che porterà un rivelatore

nello spazio. LISA orbiterà attorno al Sole alla distanza di circa un'Unità Astronomica – la stessa distanza della Terra – e sarà costituito da tre satelliti artificiali posti ai vertici di un triangolo equilatero. In questo modo, i bracci dell'interferometro avranno, ciascuno, una lunghezza pari a cinque milioni di chilometri. I vantaggi che LISA porterà con sé sono molti. Innanzitutto, nello spazio risulta annullato il rumore ambientale terrestre, causato sia dagli eventi atmosferici e geologici sia dalle attività umane. Secondariamente, grazie ai suoi

due lunghi bracci, LISA avrà una sensibilità diversa da quella dei rivelatori terrestri, e potrà studiare anche onde gravitazionali a bassa frequenza.»

Onde gravitazionali e gravitoni

Ritorniamo ancora sul tema degli interferometri e sul futuro di questo ambito di ricerca, ma adesso è arrivato il momento di confrontarmi con Marco Drago sul significato più profondo – dal punto di vista fisico – della scoperta delle onde gravitazionali. Per questo motivo gli domando se, dal suo personale punto di vista, le onde gravitazionali possano o meno rappresentare il punto di mediazione fra la Teoria della Relatività e la Fisica Quantistica.

«È una questione controversa,» risponde Marco Drago. «Possiamo immaginarci la Relatività e la Fisica Quantistica come due persone dotate di due punti di vista diversi, nettamente contrapposti fra loro, sugli stessi argomenti. L'esistenza delle onde gravitazionali, in realtà, è come se desse ragione a entrambe. La Relatività infatti prevede l'esistenza delle onde gravitazionali, quindi per lei è un'ulteriore conferma della correttezza della propria teoria. Non solo, funziona anche nei cosiddetti limiti di campo gravitazionale forte: masse e densità dell'ordine dei

buchi neri, limiti dove, finora, non si era potuto testarla. Però, la Relatività rimane una teoria classica, non quantistica, quindi non possiamo indagare oltre.

«Spostiamo la nostra attenzione, adesso, sulla Fisica Quantistica. Uno dei punti cardine di questa seconda teoria è l'interazione tra le particelle e i mediatori delle interazioni. Questi ultimi, in particolare, sono anche delle onde: onde di vario genere, a seconda della diversa interazione presa in considerazione. Le onde elettromagnetiche, per esempio, trasferiscono l'interazione

elettromagnetica, e naturalmente le onde gravitazionali mediano l'interazione gravitazionale. Quindi, la provata esistenza delle onde gravitazionali, in un certo senso, ci indirizza anche verso l'approccio quantistico dove ogni forza fondamentale è mediata da specifici bosoni che si propagano come perturbazioni del campo. Al momento, rimane aperto il problema di come riuscire a combinare le due teorie: la macroscopica gravitazionale e la microscopica quantistica. Come possiamo fare in modo che i due punti di vista, finalmente,

convergono?»

Già, questa è proprio la domanda fondamentale che si sta ponendo la fisica moderna e che abbiamo precedentemente sollevato nel Capitolo 4. Una domanda alla quale, al momento, siamo stati in grado di trovare solo risposte parziali che si concretizzano in ulteriori differenti teorie. La stessa domanda, infine, che si era posta anche Albert Einstein e che lo aveva convinto del fatto che la Meccanica Quantistica fosse una teoria incompleta.

Date queste premesse, chiedo ancora a Marco Drago, è

ipotizzabile che grazie alla conferma delle onde gravitazionali venga dimostrata anche l'esistenza dei gravitoni? «Per rispondere a questo quesito dobbiamo rimanere esclusivamente nell'ambito della Meccanica Quantistica: la Relatività, infatti, non ci dice nulla sul gravitone. Al momento resta difficile dimostrare l'esistenza – oppure, al contrario, l'inesistenza – del gravitone tramite la rilevazione delle onde gravitazionali. Però qualcosa possiamo fare al riguardo: possiamo cercare di misurarne la massa. Quello che la Fisica Quantistica ci dice, infatti, è che se

il gravitone ha una massa allora la velocità delle onde gravitazionali dev'essere diversa da quella della luce.

«Prendiamo, per esempio, i due rivelatori LIGO. L'onda gravitazionale arriverà su entrambi da ogni possibile direzione nel cielo. Può arrivare prima su Livingston e poi su Hanford, o viceversa; oppure può arrivare su Livingston e su Hanford nello stesso identico istante, se la direzione di propagazione risulta esattamente perpendicolare alla retta che li congiunge. Ora, i due rivelatori sono lontani 10 millisecondi luce.

Questa unità di grandezza indica il tempo che la luce impiega a percorrere i 3.002 chilometri – in base alle misurazioni ufficiali fornite da LIGO – che li separano. Se immaginiamo che l'onda gravitazionale viaggi a una velocità v – che per il nostro ragionamento prendiamo diversa da c , trascurando quanto invece afferma la Teoria della Relatività – dato che v dev'essere necessariamente inferiore a c , dovremmo misurare una differenza temporale maggiore di 10 millisecondi luce per uno stesso segnale che risulti rilevato da entrambi gli interferometri. Se

ciò avvenisse, saremmo certi che la velocità dell'onda gravitazionale sarebbe inferiore a quella della luce e quindi che ci troveremmo in presenza di una massa.»

Questa differenza temporale maggiore del previsto, chiedo ancora a Marco Drago, è stata effettivamente misurata durante i rilevamenti delle tre onde gravitazionali finora confermate? «Per il momento no. Nel caso della prima onda gravitazionale GW150914, per esempio, la differenza temporale riscontrata è stata di 7 millisecondi luce. C'è però un'ulteriore considerazione da fare.

La teoria infatti prevede che se il gravitone avesse una massa, le diverse frequenze di propagazione dell'onda gravitazionale sarebbero caratterizzate da differenti velocità. Questo tipo di verifica è quella che stiamo portando avanti attualmente e che, tramite le rilevazioni effettuate finora, ci ha permesso di stimare⁹ un limite superiore per l'eventuale massa del gravitone pari a $7,7 \cdot 10^{-23}$ elettronvolt/ c^2 .»

Sofferamoci brevemente su quest'ultima cifra. Nella nostra esperienza quotidiana, siamo abituati a esprimere il peso in grammi o chilogrammi. Abbiamo

anche imparato, però, che il peso dipende dalla forza di gravità e che, in questo senso, è proporzionale alla massa dell'oggetto che stiamo valutando moltiplicata per l'accelerazione dell'oggetto stesso. Nella definizione di peso, quindi, c'è un riferimento diretto alla velocità che passa tramite l'accelerazione. Senza addentrarci ulteriormente nei vari aspetti matematici, possiamo utilizzare queste informazioni – e altre ancora su cui sorvolo – per trasformare l'unità di misura elettronvolt/ c^2 nella più familiare unità di misura che noi conosciamo come chilogrammo:

$$1 \text{ eV} / c^2 \approx 10^{-36} \text{ kg}$$

dove il simbolo \approx sta a significare «vale circa». Sostituendo l'unità di misura nel valore ottenuto sperimentalmente, abbiamo che la massa limite del gravitone individuata nella terza rilevazione delle onde gravitazionali diventa circa di $7,7 \cdot 10^{-59} \text{ kg}$. Dato che la massa di un elettrone è pari a circa $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, il gravitone risulterebbe avere una massa limite 10 miliardi di miliardi di miliardi di volte più piccola! Una stima, questa, che apre la strada alla determinazione dell'eventuale massa di questa particella, ma che

al contempo non permette ancora di sciogliere il dubbio sulla sua effettiva esistenza.

Ciò che riserva il futuro

Il confronto scientifico sull'esistenza dei gravitoni ipotizzati dalla Teoria Quantistica rimane aperto. Di certo c'è che gli studi al riguardo proseguiranno anche grazie alle prospettive dischiuse dalla conferma delle predizioni di Albert Einstein contenute nella Relatività Generale. Forse, in un prossimo futuro, saranno proprio le ricerche sulle onde gravitazionali che ci permetteranno di scrivere una nuova pagina della storia della fisica dove anche i gravitoni non saranno più solo delle ipotesi teoriche ma delle particelle

quantistiche osservabili.

E a proposito di sviluppi futuri, quello che adesso ho deciso di chiedere a Marco Drago è cos'altro dobbiamo aspettarci – sempre in relazione alle onde gravitazionali – dalla Teoria della Relatività Generale. «Ho una similitudine che rende bene l'idea: la Teoria della Relatività è come una poesia. Il poeta – Albert Einstein – ci ha scritto dentro tutto quello che voleva dire, tutto il proprio pensiero. Però la poesia è criptica e piena di metafore. Quando la leggo io, riesco a capirne solo alcune parti; poi arriva qualcuno dopo di

me che ne capisce altre; e così via. La poesia ha moltissimo da dirci ma noi riusciamo a scoprirlo solo a piccoli stralci.

«Allo stesso modo, la Relatività in sé ha già dentro tutto, ma quanto siamo riusciti a comprenderne? Per esempio, abbiamo affermato precedentemente che riusciamo a risolvere senza problemi le equazioni Newtoniane quando consideriamo l'interazione fra la Terra e il Sole, ma cosa succede quando ci aggiungiamo la Luna? Se lo facessimo dovremmo tenere conto di tutte le attrazioni

reciproche: Sole-Terra, Terra-Luna, Sole-Luna. Il sistema a tre corpi – così come viene definito – non è matematicamente risolvibile, non esiste una formula matematica che ci dica esattamente quello che accade. Quindi ci restano solo due possibilità: o supponiamo che l'attrazione Sole-Luna sia molto piccola rispetto a quella Terra-Luna e quindi la approssimiamo, oppure facciamo eseguire dei calcoli complicatissimi ai computer. Anche l'equazione delle onde gravitazionali non è una formula esatta bensì un'approssimazione: la cosiddetta approssimazione di

campo debole. Ciò non significa che sia sbagliata, anzi: le approssimazioni vengono sempre fatte consapevolmente!

«Le rilevazioni sperimentali dimostrano che entrambe queste scelte sono sensate, e inoltre che quando ci sono masse notevoli in gioco – come quelle dei due buchi neri che abbiamo già considerato – la teoria è corretta. Questo non vuol dire che abbiamo già capito tutto oppure che possiamo sempre escogitare un modo per risolvere i problemi via via più complessi che ci si presentano. Significa, al contrario, che continuano ad aprirsi

sempre nuove possibilità e che, purtroppo, è difficile riuscire a prevederle. Forse dovremmo tutti impegnarci per fantasticare un po' di più!»

Sempre a proposito di prospettive, chiedo ancora, quale può essere il futuro degli studi sulle onde gravitazionali e quali sarebbero le loro possibili applicazioni? «Per quanto riguarda gli studi, e quindi la conoscenza in sé», riprende Marco Drago, «l'Astronomia Gravitazionale può permetterci di scoprire un po' meglio il funzionamento dei processi astrofisici che generano le

onde gravitazionali. Ora possiamo fare ben poco, perché abbiamo troppi pochi dati, ma in futuro, grazie alle nuove rilevazioni, potremmo iniziare a ragionare anche in termini statistici.

«Facciamo un esempio pratico: grazie alle onde gravitazionali rilevate finora e che sappiamo essere state generate dai sistemi binari di buchi neri, abbiamo ottenuto moltissime informazioni su questi ultimi. In particolare, tenendo conto anche degli errori di calcolo, ne abbiamo determinato le masse, le distanze di luminosità e persino le velocità di rotazione. Il

Teorema dell'Essenzialità – il famoso No Hair Theorem, senza capelli, dimostrato anche grazie al lavoro di Stephen Hawking e di Roger Penrose – afferma che per descrivere completamente un buco nero sono necessari solamente tre parametri fisici: la massa, la carica e il momento angolare. Con i dati a nostra disposizione possiamo già ricavarne due, la massa e il momento angolare, e ci mancherebbe solo la carica per riuscire a fornirne una descrizione completa. Tutto ciò, ovviamente, a meno che nel frattempo non vengano scoperte nuove

caratteristiche che la teoria ancora non contempla.

«Facciamo un altro esempio con le stelle a neutroni. Le stelle a neutroni, così come i buchi neri, possono formarsi come processo finale della vita di una stella. Rispetto ai buchi neri, però, sono un po' meno compatte. Se consideriamo un sistema binario di stelle a neutroni oppure un sistema costituito da un buco nero e da una stella a neutroni, le caratteristiche delle onde gravitazionali che vengono prodotte dipendono dall'equazione di stato che descrive la composizione interna della stella

e il suo comportamento. Rilevando le prime possiamo ottenere preziose informazioni sulla seconda.

«Possiamo continuare il ragionamento considerando le stelle a neutroni rotanti isolate. Se non sono perfettamente sferiche – e quale oggetto, a parte i buchi neri, lo è? – anche questo tipo di stelle produce delle onde gravitazionali. Purtroppo l'ampiezza delle onde gravitazionali che si propagano nello spazio risulta proporzionale al grado di non-sfericità dell'oggetto che le produce. Dato che per questo tipo di stelle si prevede che sia abbastanza piccolo,

sarà molto difficile riuscire a rilevarne le onde gravitazionali. Nel caso ci riuscissimo, però, chissà cosa potremmo scoprire su questi particolari oggetti cosmici.

«Infine, come viene logico pensare, potremmo usare le onde gravitazionali per investigare il momento in cui il nostro universo ha avuto origine: il Big Bang. Si presume che il Big Bang abbia creato un fondo stocastico – cioè basato su leggi casuali e probabilistiche – di onde gravitazionali che si sta propagando per l'intero universo. Un qualcosa di molto simile, concettualmente, alla

radiazione cosmica di fondo individuata dai fisici statunitensi Arno Allan Penzias e Robert Woodrow Wilson nel 1964 e che permise a entrambi di vincere il Nobel per la fisica nel 1978. Anche in questo caso il problema è legato alle ampiezze delle onde gravitazionali del fondo stocastico, che ci aspettiamo essere più piccole degli attuali limiti di sensibilità dei nostri strumenti. Comunque, la ricerca in questo campo verrà sicuramente portata avanti.»

E per quanto riguarda le applicazioni pratiche? «Qui entriamo in un terreno minato»,

aggiunge Marco Drago, «dato che è difficile prevedere un utilizzo diretto delle onde gravitazionali nella vita quotidiana. Potremmo sicuramente generarle, ma poi sarebbero troppo deboli per essere rilevate. Nulla esclude, tuttavia, che fra qualche secolo non si possa riuscire a trovare un modo per sfruttarle, per esempio nelle applicazioni crittografiche, come già sta succedendo per il fenomeno dell'entanglement.¹⁰ Chi lo sa? Devo comunque far notare che per costruire gli interferometri che hanno permesso di raggiungere questo agognato traguardo, prima

si sono dovute sviluppare numerose nuove tecnologie e nuove infrastrutture. Tecnologie e infrastrutture il cui impiego non può essere limitato al solo campo della ricerca delle onde gravitazionali e che hanno già trovato ulteriori e differenti applicazioni. Per esempio la tecnologia PCI – Photothermal Common-Path Interferometry¹¹ – è un'evoluzione della spettroscopia fototermica che consente l'indagine dei materiali per vari tipi di applicazioni ottiche.

«Inoltre, ci sono almeno due brevetti nati per semplificare lo studio delle onde gravitazionali che

hanno trovato altre numerose applicazioni. Il primo, EUCLID US2010/0238456 A1, serve a stimare con elevata precisione la posizione dell'ottica di riferimento degli interferometri. Il secondo, US2007/0221326 A1, è un sistema di collegamento impiegato per sostenere gli specchi per la riflessione dei raggi laser e per ridurre il rumore sismico. Infine, per ciò che riguarda l'analisi dei dati, l'idea di Einstein@Home – ossia, l'idea di utilizzare i computer non in attività degli utenti connessi a un'apposita rete informatica per analizzare i dati dei rivelatori – ha

avuto una grande fortuna. Attualmente, infatti, viene utilizzata anche per gestire la mole di dati in arrivo dai telescopi Arecibo, Parkes Multibeam Pulsar Survey e Fermi. Grazie a questa condivisione dell'elaborazione dei dati è stato possibile scoprire varie nuove pulsar negli intervalli di frequenza delle onde radio e delle onde gamma.»

Il viaggio attraverso lo spazio e gli studi sulle onde gravitazionali ci ha condotto alla scoperta degli obiettivi delle nuove ricerche e contemporaneamente ci ha consentito di ampliare la nostra visione dell'universo.

Paradossalmente – come però aveva già ben compreso Niels Bohr – l'introduzione di un differente punto di vista classico, quello della Relatività Einsteiniana, ha avuto la conseguenza di fornirci nuove informazioni anche sulla Meccanica Quantistica. Grazie ai risultati ottenuti dai ricercatori, infatti, pochi mesi fa è stato definito il limite superiore della massa del gravitone: la particella mediatrice dell'interazione gravitazionale ipotizzata dalla Teoria Quantistica dei Campi.

Non abbiamo ancora concluso questa parte, però! Tornando alla

fisica delle particelle e agli studi sugli atomi, sui nuclei e sui loro costituenti, il nostro percorso sta per snodarsi attraverso qualcosa di ancora più piccolo e pervasivo: l'essenza stessa della realtà. Un traguardo che diventa il punto di partenza per una teoria – non l'unica, è bene chiarirlo – che si pone l'ambizioso proposito di riunire sotto una comune formulazione sia la Teoria della Relatività sia la Fisica Quantistica: la Teoria delle Stringhe.

Questione di dimensioni

Ovvero, scomporre per unificare

Cosa c'è dietro? Uno spazio-tempo popolato da «stringhe» e «brane» potrebbe essere la soluzione perfetta per costruire una teoria – tutta italiana, nella sua origine – destinata a unificare Relatività e Meccanica Quantistica. Ma cosa sono le stringhe? E le brane? E quante dimensioni sono necessarie per rappresentarle? Eh sì, perché di Teorie delle Stringhe ce ne sono più di una e anche sul numero di dimensioni esistono diverse ipotesi e differenti interpretazioni!

Perché è importante? Perché, forse, non ci sarebbe nulla di più affascinante dello scoprire che l'universo potrebbe contenere ulteriori dimensioni, da 10 a 26, ripiegate su loro stesse. Dimensioni inaccessibili ai nostri sensi. Un approccio assolutamente innovativo alla materia che ci compone, e che costituisce tutto ciò che si trova in natura. Un approccio che potrebbe portare a una Teoria del Tutto dalle innumerevoli applicazioni.

Può una teoria fisica avere sostenitori e avversari come se si trattasse di un evento sportivo o di una corrente politica? E può, quella stessa teoria, suscitare reazioni al

limite dell'emotività quando le persone che se ne occupano – in un senso o nell'altro – sono illustri ricercatori e scienziati di fama mondiale? Nel caso della Teoria delle Stringhe pare proprio di sì, e il motivo è che la teoria è complessa e ambiziosa al punto tale da dar luogo a un'enorme varietà di scenari per l'universo. In questo particolare momento storico, poi, la riflessione generale sulla Teoria delle Stringhe – e sulla sua proposta di riunificare le visioni della Meccanica Quantistica e della Relatività Generale in un'unica «Teoria del Tutto» – sta assumendo

sempre maggiore rilevanza, non solo all'interno delle università ma anche in ambito sociale e culturale. E anche una non sempre favorevole attenzione da parte di alcuni esponenti dell'ambiente scientifico.

Fra i più fieri detrattori della Teoria delle Stringhe vi sono nomi di tutto rispetto. L'americano Sheldon Lee Glashow, vincitore del Nobel per la fisica nel 1979, assieme a Abdus Salam e a Steven Weinberg, per il contributo alla teoria unificata dell'interazione debole ed elettromagnetica tra le particelle elementari, ha definito la Teoria delle Stringhe «una nuova

versione della teologia medievale», e ha tentato, senza successo, di non farla entrare nel proprio dipartimento ad Harvard.¹ Anche il fisico Robert Laughlin, vincitore del Nobel nel 1998 assieme a Daniel Tsui e a Horst Ludwig Störmer, per la scoperta di una nuova forma di fluido quantistico, ha rilasciato dichiarazioni molto chiare al riguardo: «Lontana dall'essere una magnifica speranza tecnologica per un più grande futuro, la Teoria delle Stringhe è la tragica conseguenza di una linea di pensiero obsoleta».²

Persino Richard Phillips Feynman – che ritroveremo più avanti, nel

Capitolo 8 – nel 1986 si era espresso pubblicamente contro la nuova teoria in un'intervista riportata dallo storico della scienza James Gleick. «Non mi piace che non calcolino niente. Non mi piace che non verifichino le proprie idee. Non mi piace che si inventino una spiegazione raffazzonata per ogni cosa che non concorda con un esperimento, così da poter dire: 'Beh, la teoria potrebbe ancora essere vera'.»³ E si potrebbe continuare con il fisico Roger Penrose, con Lee Smolin e Carlo Rovelli – fra i principali contributori della Loop Quantum Gravity – e con

Peter Woit, autore del saggio dedicato al «fallimento della Teoria delle Stringhe»⁴ provocatoriamente intitolato Neanche sbagliata.

Naturalmente non ho intenzione di entrare in questo tipo di polemiche che coinvolgono aspetti sociologici della comunità scientifica. Il mio obiettivo consiste semplicemente nel comprendere esattamente quali sono i presupposti su cui si basa la Teoria delle Stringhe e quali sono le sue possibili convergenze con la Meccanica Quantistica. Così come ho già fatto nei due precedenti capitoli, dedicati al confronto con la

Teoria della Relatività Einsteiniana, ritengo che solo affrontando con libertà di pensiero e senza alcun tipo di preconcetti questi fondamentali temi si possa aggiungere un ulteriore punto di vista al nostro costante tentativo di comprendere la realtà. Infatti come scriveva Niels Bohr nel 1929 – e come ho già riportato all'inizio del Capitolo 4 – «dobbiamo, in generale, essere preparati ad accettare il fatto che una spiegazione completa di una stessa questione possa richiedere diversi punti di vista che non ammettono una descrizione unitaria».⁵

Porre le basi

Uno degli insegnamenti universitari che svolgo presso il Dipartimento di Medicina dell'Università di Padova è quello di Principi Fisici della Radioterapia e della Radioprotezione. Il corso, dedicato ai tecnici di Radiologia Medica, ha un programma molto ricco e affronta numerosi argomenti: dai decadimenti radioattivi alla struttura della materia. Un vasto insieme di temi che mi obbliga – con mia grande soddisfazione – a mantenermi costantemente aggiornato sulle principali ricerche realizzate sia nell'ambito della

Fisica Nucleare sia in quello della fisica delle particelle.

Per approfondire, da un lato, le tematiche connesse alla mia azione come formatore e docente, e dall'altro, l'analisi che sto portando avanti in questo volume sulle logiche della Fisica Quantistica, ho deciso di affrontare la riflessione sulla Teoria delle Stringhe confrontandomi con due fra gli scienziati italiani più autorevoli in questo campo: Gabriele Veneziano e Augusto Sagnotti. Proprio a Gabriele Veneziano, padre della Teoria delle Stringhe, si devono – fra le altre scoperte – l'introduzione

dell'Amplezza di Veneziano, e la nascita del Modello a Risonanze Duali: il Modello di Veneziano. Ed è Augusto Sagnotti, docente di Fisica Teorica presso la Scuola Normale Superiore di Pisa, che ha introdotto la costruzione di orientifold relativa alle superstringhe e ha dimostrato, per primo, la presenza di divergenze ultraviolette nella quantizzazione della Relatività Generale.

Mi rendo perfettamente conto che molti se non tutti i termini che ho appena introdotto risultano sostanzialmente sconosciuti a chi non si occupa di questi argomenti.

Ed è proprio in relazione alla sua elevata specificità che la Teoria delle Stringhe richiede una particolare attenzione sia nell'analisi dei contenuti sia nella forma con cui questi ultimi vengono espressi. Ho deciso, di conseguenza, di non dare nulla per scontato e di approfondire nel prosieguo della trattazione ciascun singolo termine e ciascuna singola definizione con l'obiettivo – forse ambizioso – di fare chiarezza. E, per quanto possibile, di sciogliere tutti i principali dubbi che la circondano!

Ma non per caso

«Quello che cercavo di descrivere con la mia formula era la fisica del mondo nucleare. Oggi sappiamo che all'interno dei nuclei, dei protoni e dei neutroni, vi sono particelle più elementari, i quark. E si sa pure che i quark sono legati fra di loro da forze così intense che non possiamo separarli gli uni dagli altri. Quando si cerca in tutti i modi di farlo con una collisione ad alta energia si forma invece una corda elastica – una 'stringa', appunto – che li tiene uniti. Ecco perché, studiando la fisica nucleare, sono atterrato nel 1968, senza saperlo,

ma non per caso, sulla teoria delle stringhe.»

Questa dichiarazione di Gabriele Veneziano – riportata come tratta da un'intervista rilasciata a Massimo Piattelli Palmarini⁶ – mi fu segnalata da un collega americano della FAU, la Florida Atlantic University, verso la fine di ottobre del 2014. In quel periodo lavoravo in America, presso quell'università, come Graduate Research Assistant svolgendo ricerche interdisciplinari assieme al filosofo pragmatista Richard Shusterman, direttore del Center for Body, Mind and Culture del Dorothy F. Schmidt College of

Arts and Letters. Gli studi che stavo portando avanti, e che tuttora conduco, coinvolgono infatti aspetti sia fisici e quanto-meccanici, sia neurologici e corporei. Per la mia formazione, avevo già studiato il lavoro di Gabriele Veneziano e i principali sviluppi della Teoria delle Stringhe, e poiché da alcuni anni avevo iniziato un proficuo confronto con Emilio Del Giudice, uno dei primi sostenitori della teoria, avevo avuto occasione di discuterne più volte assieme a lui. Quindi, quello era un tema particolarmente sensibile per me, e che interessava molto anche il mio collega.

Ciò che però aveva attirato la sua attenzione – e che lo aveva successivamente spinto a segnalarmi la dichiarazione – era il piccolo inciso finale, solo apparentemente insignificante: «ma non per caso». Quattro parole che lasciavano intravedere una lunga serie di implicazioni e che lui, non essendo di madrelingua italiana, non sapeva bene come interpretare. Ecco perché, adesso che ne ho la possibilità, la prima domanda che pongo a Gabriele Veneziano riguarda proprio la nascita della sua teoria e le circostanze in cui avvenne.

«In effetti», risponde il fisico fiorentino, «la Teoria delle Stringhe non è nata come tale ma sotto un'altra, differente, veste. Alla fine degli anni Sessanta del Novecento si stava cercando disperatamente di formulare una teoria soddisfacente dell'interazione forte – una delle quattro interazioni fondamentali, quella che agisce a livello del nucleo atomico – e delle particelle che la subiscono: i cosiddetti adroni. Con il termine «adroni» vengono indicate due diverse famiglie di particelle: i barioni – come, per esempio, i protoni e i neutroni – e i mesoni. I membri di

quest'ultima famiglia sono altamente instabili e decadono in elettroni, neutrini o fotoni. Dopo il decadimento, le particelle come gli elettroni e i neutrini rientrano nella nuova famiglia dei leptoni. Il fotone, come abbiamo visto nei precedenti capitoli, rientra nel gruppo dei bosoni intermedi.

«Dato che l'interazione forte agisce 'a corto raggio' internamente al nucleo atomico», continua Gabriele Veneziano, «per spiegarne il comportamento si era ipotizzato che non esistessero adroni con massa nulla. Il coinvolgimento di particelle a massa nulla, infatti,

avrebbe permesso all'interazione di essere propagata anche a grande distanza [analogamente a quanto avviene, nel caso dell'interazione elettromagnetica, con i fotoni]. Inoltre, considerando proprio gli adroni, era evidente l'estrema ricchezza e varietà di tali particelle, anche se nella maggior parte dei casi risultavano instabili. Nuovi adroni venivano scoperti ogni mese, e all'epoca sembrava che non ci fosse alcun limite superiore alla loro massa e al loro spin.

«Nel 1968, proprio cercando una formulazione che potesse descrivere matematicamente le

collisioni fra gli adroni, elaborai il cosiddetto Dual Resonance Model, il Modello a Risonanze Duali: il progenitore della Teoria delle Stringhe. Senza entrare troppo nel dettaglio, il Modello a Risonanze Duali descriveva le collisioni fra due adroni come se fra loro avvenisse lo scambio di una 'torre' infinita di altri adroni. Uno scambio completamente democratico e simmetrico ed è propriamente a questa simmetria che si riferisce l'aggettivo «duale». Il nuovo modello che avevo introdotto rispondeva in modo soddisfacente a molti requisiti teoricamente

necessari, ma aveva anche qualche vistoso difetto. In particolare – circostanza impossibile a causa delle considerazioni che abbiamo introdotto poco fa – contemplava l'esistenza di adroni a massa nulla.»

Inizialmente, quindi, i suoi studi sull'interazione forte avevano portato alla formulazione del Modello a Risonanze Duali per la descrizione delle collisioni fra due adroni. Quando e come si arrivò, invece, alla Teoria delle Stringhe? «Fu nei primi anni Settanta del Novecento», riprende Gabriele Veneziano, «che si capì che la coerenza interna del modello che

avevo elaborato era dovuta al fatto che quest'ultimo stesse descrivendo la collisione di 'oggetti unidimensionali estesi'. Cioè, di quelle corde vibranti che – con un'infelice traduzione dall'inglese strings, 'corda' – presero poi il nome di 'stringhe'.»

Ripensando all'inciso citato inizialmente, quel «ma non per caso» può essere riferito anche alla comprensione della vera natura degli elementi che conferiscono la coerenza interna al Modello a Risonanze Duali, quindi all'individuazione di quegli oggetti unidimensionali estesi che

chiamiamo stringhe. «Sì, e c'è di più: il perfezionamento di un'altra teoria alternativa nota come QCD, Quantum Chromodynamics o Cromodinamica Quantistica. Lo sviluppo iniziale della QCD risaliva a circa vent'anni prima, ma grazie alle scoperte che avevamo fatto, adesso riusciva a descrivere gli adroni come insiemi di quark e di gluoni [i bosoni intermedi dell'interazione forte] tenuti insieme proprio dalle stringhe.

«Questa teoria, che prevede che siano le stringhe che impediscono ai quark e ai gluoni di esistere in condizioni di isolamento, è riuscita

a superare innumerevoli test ed è quella attualmente più accreditata. La sua correttezza inoltre spiega perché, cercando di trovare un modello in grado di rappresentare le interazioni forti, si sia giunti a definire una Teoria delle Stringhe. Non proprio quella che deriva dalla Cromodinamica Quantistica, in effetti, ma d'altro canto ancora non la conosciamo in dettaglio. Per concludere, aggiungo che verso la metà degli anni Settanta del Novecento il Modello a Risonanze Duali e la vecchia Teoria delle Stringhe furono abbandonate, solo per risorgere nel 1984 a un livello

molto più microscopico, come una nuova teoria della Gravità Quantistica⁷ e di tutte le altre interazioni fondamentali. Ma questa è un'altra storia!»

Un'altra storia che, in questo volume, dobbiamo accontentarci di accennare solamente: la Teoria delle Stringhe, infatti, offre ancora infiniti elementi di discussione. Cosa sono esattamente le stringhe? Cosa rappresentano le brane? Perché esistono differenti versioni della stessa teoria? Queste sono solo alcune delle domande alle quali ho intenzione di dare un'esauriente risposta grazie al confronto con il

fisico teorico Augusto Sagnotti.

Ripartenze necessarie

Augusto Sagnotti ha dedicato alla Teoria delle Stringhe molte ricerche e diversi articoli;⁸ inoltre nel 2003 ha scritto l'omonima voce dell'Enciclopedia della Scienza pubblicata dall'Istituto Enciclopedico Treccani. Grazie ad Augusto Sagnotti ho intenzione di riprendere i vari concetti alla base della Teoria delle Stringhe per consolidarli anche in relazione alle logiche quantistiche che abbiamo imparato a conoscere nei primi capitoli di questo libro. Per questo motivo, la mia prima domanda riguarda proprio che cos'è, da un punto di

vista teorico e anche pratico, la Teoria delle Stringhe.

«È una risposta difficile da dare perché la teoria è nata per caso, come ha appena spiegato lo stesso Gabriele Veneziano che ne è stato il primo artefice. Soprattutto, non è nata per il motivo per cui la riteniamo interessante oggi!» risponde Augusto Sagnotti. «È già stato detto, ma vale la pena soffermarsi un attimo sul senso di frustrazione che, verso la fine degli anni Sessanta del Novecento, si era diffuso nella Fisica delle Alte Energie. Un senso di frustrazione dovuto al fatto che le tecniche di

analisi dei processi d'urto
microscopici negli acceleratori di
particelle – tecniche sviluppate
avendo come modello di riferimento
l'Elettrodinamica Quantistica –
apparivano impotenti di fronte alle
interazioni forti che tengono
insieme i nuclei.»

Anche se è un tema che
affronteremo nel Capitolo 8, per
comprendere appieno
l'affermazione che è appena stata
fatta dobbiamo approfondire i
concetti che sono alla base della
QED, la Quantum Electrodynamics.
«L'Elettrodinamica Quantistica»,
continua Augusto Sagnotti, «è la

teoria che descrive le interazioni di elettroni, positroni e quanti di luce: i fotoni. Oltre al fotone, che è un bosone, si tratta delle due particelle più semplici – più leggere, se vogliamo – che sono cariche elettricamente: l'elettrone e la sua antiparticella. Di solito i positroni non si vedono in natura perché, per qualche ragione, c'è uno sbilanciamento tra materia e antimateria. Vengono creati però dai raggi cosmici che colpiscono la Terra e da noi, artificialmente, negli acceleratori di particelle. Elettroni e positroni hanno cariche opposte, uguale massa e numero quantico di

spin pari a $1/2$. La teoria che descrive le loro interazioni elettromagnetiche è proprio l'Elettrodinamica Quantistica.

«Attualmente, la QED è un pezzetto del Modello Standard [la teoria che descrive le interazioni fondamentali, a parte quella gravitazionale, e tutte le particelle elementari collegate], ed è ottenuta unendo la teoria di James Clerk Maxwell sull'elettromagnetismo, la teoria di Paul Dirac applicata all'elettrone e la Meccanica Quantistica. Questa combinazione è un esempio di Teoria Quantistica dei Campi. In

una teoria relativistica, le energie in gioco sono sufficienti per creare e per distruggere le particelle e quindi, vengono descritte infinite particelle. Nella QED, invece, c'è una profonda economia di principi: tutte queste particelle, se sono elettroni, sono in qualche modo uguali tra loro. Cioè, hanno la stessa massa e la stessa carica anche se possono avere diversi stati di moto. A dispetto di questa apparente semplicità, lo studio dell'Elettrodinamica Quantistica, iniziato negli anni Trenta del Novecento, si è rivelato molto difficile e per venirne a capo sono

stati necessari circa altri vent'anni.»

Quali furono i principali problemi che sorsero durante la formulazione della QED, e come vennero risolti? domando ancora ad Augusto Sagnotti. «C'erano una serie di quantità, essenzialmente delle probabilità, che avrebbero dovuto assumere valori compresi tra lo zero e l'uno mentre, invece, risultavano essere infinite. Per questo motivo i fisici inventarono una tecnica chiamata rinormalizzazione, che consente – anche attualmente – di ottenere predizioni importanti a patto di dedurre dagli esperimenti i valori di

alcuni parametri. Parametri come la massa e la carica delle particelle, per intenderci. Tra l'altro, proprio grazie alla rinormalizzazione si può predire, sorprendentemente, che quelle stesse quantità non sono delle costanti ma hanno una dipendenza 'lenta' dell'energia.»

A questo punto, prima di proseguire è necessario introdurre un importante parametro: la costante di struttura fine rappresentata dal simbolo α . Da un punto di vista matematico, la formula della costante di struttura fine si può scrivere come:

$$\alpha = e^2 / 4\pi\epsilon_0 \hbar c$$

dove, a parte (e) che rappresenta il valore assoluto della carica dell'elettrone, tutti gli altri simboli sono quelli che già conosciamo e che ho introdotto nei precedenti capitoli. Nello specifico: ϵ_0 è la costante dielettrica del vuoto, \hbar è la costante di Planck ridotta, e c è la velocità della luce. Quindi, α è proporzionale alla carica degli elettroni, che in valore assoluto è la stessa dei positroni, e numericamente ha un valore molto piccolo: un centotrentasettesimo.

Perché è così importante che il valore della costante di struttura fine sia dell'ordine di un centesimo,

nel caso degli elettroni e dei positroni? «Perché», risponde Augusto Sagnotti, «ne deriva che si tratta di particelle 'quasi libere', e quindi una loro interazione con i fotoni può essere considerata poco probabile. Ciò comporta che diventi possibile calcolare efficientemente le sezioni d'urto negli scontri fra le particelle all'interno degli acceleratori, avendo la certezza di commettere solo errori trascurabili. Ecco da cosa deriva il grande successo dell'Elettrodinamica Quantistica! Un successo che, però, quando si cominciarono a studiare le interazioni forti non fu possibile

replicare!»

Una questione forte

L'Elettrodinamica Quantistica consente di descrivere efficacemente gli urti degli elettroni e dei positroni perché la costante di struttura fine ha un valore pari a 1 su 137 e quindi risulta trascurabile. Considerando invece le particelle nucleari e le interazioni forti che abbiamo introdotto grazie a Gabriele Veneziano, le tecniche sviluppate sulla base della QED non permettono di ottenere risultati validi perché l'analogo della costante di struttura fine che le caratterizza è di ordine 1, e quindi le particelle corrispondenti non sono

«quasi libere».

«A partire dagli anni Sessanta del Novecento», prosegue Augusto Sagnotti, «gli scienziati cercarono di teorizzare da un punto di vista matematico gli urti che osservavano negli acceleratori. E per farlo, ricorsero a quella che viene chiamata matrice S: la matrice di scattering o con la corrispondente definizione italiana, la matrice di diffusione. Quei fisici, a un certo punto, si dissero: non riusciremo mai a dedurre la matrice S da delle equazioni, come per la Teoria dell'Elettrodinamica Quantistica; costruiamola a priori!

«Questa idea però non poté essere messa in pratica dato che il numero di possibilità esistenti era troppo elevato. Si decise allora di applicare delle restrizioni che consentissero di limitarle e in particolare venne utilizzata quella che prende il nome di dualità planare, in senso moderno. Di cosa si tratta? Qui entra in gioco proprio Gabriele Veneziano. Veneziano, nel 1968, si accorse che esisteva una funzione matematica, inventata dallo scienziato svizzero Leonhard Euler circa duecento anni fa – la funzione beta di Eulero –, che possedeva una serie di proprietà

spettacolari. Proprietà spettacolari che, tradotte nel linguaggio fisico contemporaneo, permettono di descrivere gli spin e le masse di infiniti tipi di particelle che vengono scambiate in un processo d'urto.

«Nella corrispondenza identificata da Gabriele Veneziano, le variabili s e t [che sono due variabili astratte] dell'equazione beta di Eulero permettono di caratterizzare gli angoli di impatto e le energie delle particelle coinvolte nell'urto. La peculiarità della funzione è la sua simmetria in relazione allo scambio delle due variabili; simmetria che si riflette,

appunto, nella definizione di dualità planare. Queste masse e questi spin inoltre soddisfano una particolare condizione di regolarità che permette di associarne la diffusione a delle traiettorie di Regge rettilinee. Il che riflette la distribuzione delle prime risonanze adroniche note in natura. Le traiettorie di Regge vennero scoperte negli anni Sessanta del Novecento dal fisico torinese Tullio Emilio Regge.»

Quindi per tentare una definizione della matrice di diffusione relativa alle particelle soggette all'interazione forte,

Gabriele Veneziano introdusse un modello – il Modello di Veneziano, basato sulla formula beta di Eulero – che consentiva di rappresentarla efficacemente; e questa rappresentazione era consistente anche con le evidenze sperimentali delle traiettorie di Regge. «Questo processo permise di arrivare a determinare una formula per la matrice S , ma rimaneva da fare tutto il processo inverso: chiedersi quali fossero le logiche fisiche che ne costituivano il fondamento.»

Una domanda la cui risposta avrebbe successivamente condotto a ipotizzare l'esistenza delle

stringhe. «L'Elettrodinamica Quantistica», riprende Augusto Sagnotti, «avrebbe prodotto formule simili ma più semplici, derivate direttamente delle equazioni di Maxwell e da quelle di Dirac. Quindi la domanda è lecita e naturale: da dove deriva questa formula? Qual è la realtà fisica che rappresenta? Che poi, era una riformulazione del problema che aveva spinto gli scienziati a cercare di costruire la matrice S . Allargando la riflessione, questi sono proprio i dilemmi ancora al centro dell'attuale ricerca! Effettivamente, il processo inverso ha condotto

rapidamente alle stringhe, le cui vibrazioni producono naturalmente traiettorie di Regge, ma ci sono valide ragioni per ritenere che questa non sia ancora la fine della storia.»

Problemi da risolvere

Gabriele Veneziano ci ha raccontato, poche pagine fa, che le stringhe vennero individuate per spiegare alcune apparenti incongruenze mostrate dal Modello a Risonanze Duali che lui stesso aveva elaborato. «L'analogia evidenziata con le usuali corde vibranti», continua Augusto Sagnotti, «in realtà è solo parziale. Nei primi anni Settanta del Novecento si capì che la Teoria delle Stringhe descriveva inevitabilmente anche particelle di massa nulla che, come i fotoni, sono in grado di trasmettere forze a

lungo raggio. Si trattava di un problema spinoso per la relazione con le interazioni forti, che sono certamente a corto raggio e svaniscono a distanze di circa 10^{-15} metri.

«Tralasciando questa difficoltà, i modelli duali sembravano potersi applicare in modo naturale agli adroni, che sono soggetti alle interazioni forti e presentano una sorprendente regolarità nella distribuzione delle loro masse e dei loro spin. Inoltre, gli adroni si dispongono su traiettorie di Regge quasi rettilinee che si prestano, in modo naturale, a essere descritte

anche nei termini di 'eccitazioni di stringhe'. Tutto ciò, però, aveva una conseguenza inattesa: la formula di Veneziano e le sue generalizzazioni predicevano un rapidissimo decremento, con l'energia, delle sezioni d'urto. In altri termini, la teoria sembrava indicare la scomparsa delle interazioni adroniche a energie di poco superiori all'energia di riposo del protone, cioè poco meno di mille milioni di elettronvolt.

«Questo risultato era però del tutto inconsistente con i dati che i grandi acceleratori avevano prodotto a partire dal decennio

prima. Gli urti con elettroni evidenziavano infatti la presenza di oggetti puntiformi all'interno del protone, mentre le corrispondenti sezioni d'urto non risultavano rapidamente decrescenti con l'energia. I componenti puntiformi vennero presto identificati con i quark, la cui esistenza era stata proposta – con due ricerche indipendenti svolte negli anni Sessanta del Novecento – dai due fisici statunitensi Murray Gell-Mann e George Zweig.» Nel 1969, per lo studio matematico di alcune regolarità degli adroni, a Murray Gell-Mann venne assegnato il Nobel

per la fisica.

E in relazione al numero di dimensioni predette dalla Teoria delle Stringhe? domando ad Augusto Sagnotti. «La formula di Veneziano richiede, per la propria consistenza matematica, uno spazio-tempo a 26 dimensioni: le 4 che ben conosciamo più altre 22. Quindi inizialmente si diffuse un'attitudine molto critica verso questo tipo di ricerca. La matematica era bellissima, intrigante, e sembrava rivelare una struttura profonda, mentre la fisica appariva piuttosto 'ballerina'. Ecco il motivo per cui la Teoria delle

Stringhe, così com'era stata scritta inizialmente, fu ben presto abbandonata.

«Sempre in quegli anni, però, una complicazione dell'equazione di Maxwell, nota come Cromodinamica Quantistica, riuscì a dar conto in modo mirabile delle interazioni tra i quark, almeno nel limite delle alte energie. Nella QCD, i campi elettrici e magnetici descritti da Maxwell vengono sostituiti da delle matrici che consentono di predire che le interazioni tra i quark, a piccolissime distanze, risultino più flebili. Quindi, grazie alla Cromodinamica Quantistica si riesce

a spiegare il fatto che i quark sembrano liberi all'interno del protone, e ciononostante non si riesca in alcun modo a separarli. Da un punto di vista fisico, questa particolare proprietà viene definita libertà asintotica.

«Se dovessimo scrivere un breve elenco delle principali 'bizzarrie' predette dalla Teoria delle Stringhe, potremmo includervi le 26 dimensioni dello spazio-tempo, il fatto che le interazioni ad altissima energia risultino molto flebili e naturalmente l'esistenza di particelle di massa nulla. Ma è proprio la riflessione su quest'ultimo

punto che ha portato a un'evoluzione della Teoria delle Stringhe dalle enormi implicazioni. Le particelle di massa nulla, infatti, sono in grado di trasmettere vari tipi di forze a lungo raggio. Studiandole, alcune di queste forze risultavano simili alle forze elettromagnetiche e alle forze forti e deboli del Modello Standard, mentre un'altra risultava molto simile alla gravità. E queste differenze fra le forze erano direttamente dipendenti dalla forma assunta dalla stringa.»

Tutto in uno

L'idea che le quattro forze fondamentali – la forza forte, la forza debole, la forza elettromagnetica e la forza gravitazionale – possano essere descritte tramite un unico principio fisico è di per sé affascinante. E naturalmente, se questo principio risiede in una specifica teoria è logico che quest'ultima dichiari di possedere le caratteristiche per potersi definire una Teoria del Tutto. Riuscire a riunire Fisica Quantistica e Relatività tramite una comune formulazione è l'obiettivo dichiarato di molte fra le principali

ricerche scientifiche, e le prospettive aperte dalle ultime dichiarazioni di Augusto Sagnotti vanno chiaramente in quella direzione.

La Teoria delle Stringhe postula che le corde vibranti siano degli oggetti unidimensionali estesi, e grazie al contributo della Cromodinamica Quantistica adesso sappiamo che l'azione di oggetti di questo tipo consente di tenere assieme quark e gluoni all'interno delle particelle della famiglia degli adroni. Ora, però, dobbiamo confrontarci con un'altra caratteristica delle stringhe: quella

di essere chiuse o aperte. Per approfondire questo argomento e per capire come possa essere messo in relazione con le forze fondamentali, continuo la mia riflessione assieme ad Augusto Sagnotti, docente di Fisica Teorica presso la Scuola Normale Superiore di Pisa.

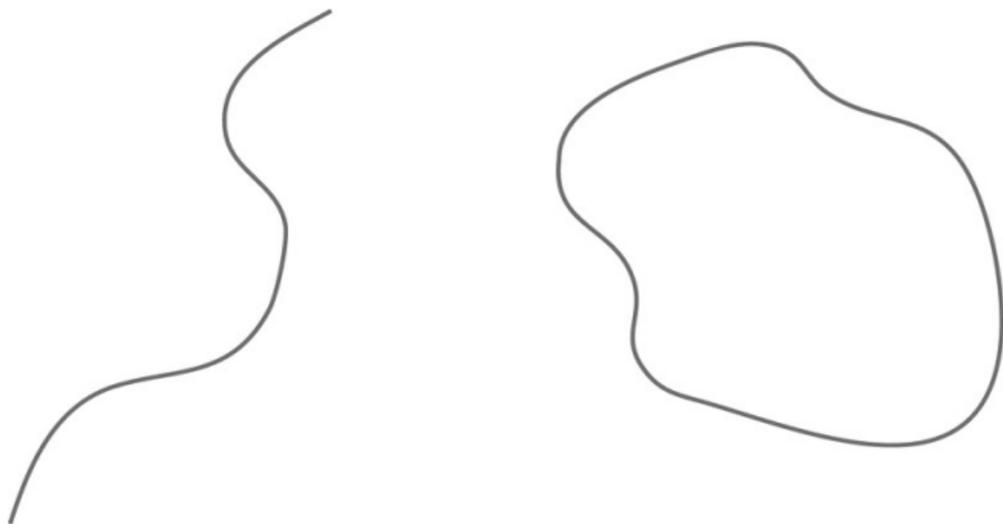


Figura 14. Rappresentazione di una stringa aperta, sulla sinistra, e di una stringa chiusa, sulla destra.

«Possiamo dire, nel caso più semplice, che una stringa aperta descrive in qualche modo l'elettromagnetismo, mentre una stringa chiusa – ed esiste sempre una probabilità che una stringa aperta si chiuda – descrive la gravità. Le stringhe aperte e le stringhe chiuse costituiscono i due oggetti fondamentali della teoria.

«In realtà, esistono anche stringhe chiuse più complicate,

scoperte verso la metà degli anni Ottanta del Novecento, che descrivono entrambi i tipi di forze. Ciò che è realmente importante, però, è che le stringhe aperte implicano l'esistenza di stringhe chiuse e che le stringhe chiuse descrivono la gravità.

«Per portare avanti questi studi, si è pensato di alzare drasticamente la scala di energia inizialmente contenuta nella formula di Veneziano. In pratica, dall'energia di riposo del protone, che abbiamo visto essere di circa 1.000 milioni di elettronvolt – che si può scrivere come 10^3 MeV, ovvero 10^3 mega

elettronvolt – si è passati alla scala di Planck: 10^{19} giga elettronvolt, corrispondenti a 10^{22} MeV. Un salto di quasi 20 ordini di grandezza che fa sì che le forze gravitazionali che ne emergono risultino descritte, a bassa energia, proprio dalla legge di Newton. Per avere un riscontro pratico sul reale valore di queste energie, possiamo considerare che al giorno d'oggi gli acceleratori di particelle esplorano energie dell'ordine di 10^4 GeV: 10^7 MeV. Stiamo parlando di energie praticamente irraggiungibili se non, in modo indiretto, guardando l'universo primordiale!

«Alzando la scala di energia ai livelli energetici che attualmente riusciamo a esplorare, le generalizzazioni della formula di Veneziano fornite dalle varie incarnazioni della Teoria delle Stringhe non differiscono in modo significativo dall'Elettrodinamica Quantistica o dal Modello Standard. Contemporaneamente però succede una cosa molto bella, perché la gravità è una teoria molto singolare. La gravità resiste ai meccanismi di rinormalizzazione che sono alla base del Modello Standard, perché le interazioni gravitazionali crescono rapidamente

al crescere dell'energia. Quindi diventano estremamente intense a energie molto alte, dell'ordine dell'energia di Planck. Questo meccanismo, che è alla base del conflitto fra la Relatività Einsteiniana e la Meccanica Quantistica, viene compensato – possiamo dire così – sostituendo alle particelle, degli oggetti estesi come le stringhe.»

Ampliare gli orizzonti

Nella nostra ricerca del significato fisico profondo della Teoria delle Stringhe e delle sue correlazioni con la Fisica Quantistica, siamo arrivati a includere anche la Relatività. Tramite le parole di Augusto Sagnotti è emerso che la Teoria delle Stringhe descrive anche le interazioni gravitazionali. E lo fa in modo tale che a basse energie si ritrova la teoria di Einstein, mentre ad altissime energie viene risolto il conflitto esistente fra quest'ultima e la Meccanica Quantistica. In altri termini le stringhe riescono a descrivere in modo naturale la

gravità e le altre interazioni, dal punto di vista fondamentale.

Ma ci sono ancora altri temi da affrontare e in particolare quello della «supersimmetria», una parola che evoca scenari fantascientifici e che invece ha delle implicazioni molto pratiche. Implicazioni che, già verso la fine degli anni Settanta del Novecento, permisero di sviluppare un'ulteriore evoluzione della Teoria delle Stringhe. Cos'è esattamente la supersimmetria? chiedo ancora ad Augusto Sagnotti. «La supersimmetria è una particolare simmetria che mescola tra loro i due tipi di particelle che esistono in

natura: i bosoni come i fotoni e i fermioni [le particelle che obbediscono al Principio di Esclusione di Pauli] come gli elettroni. Sembra quasi un assurdo dato che, per esempio, i fermioni non possono aggregarsi fra loro mentre i bosoni lo fanno naturalmente – al punto che la luce ci appare come un fluido continuo –, eppure e così.

«In alcune teorie esistono delle operazioni di simmetria che, in qualche modo, mescolano questi oggetti e stabiliscono delle relazioni – delle equivalenze – fra le interazioni che si instaurano con i

vari tipi di particelle. In pratica, potremmo dire che collegano tra loro le intensità di certi tipi di interazione. I bosoni restano bosoni, i fermioni restano fermioni, ma le loro interazioni vengono in qualche modo collegate tra loro sia come caratteristiche sia come intensità. Quando questo tipo di situazione si verifica, le teorie devono necessariamente descrivere numeri uguali di bosoni e di fermioni. E se c'è di mezzo la gravità, quest'ultima si arricchisce e diventa supergravità.

«Verso la fine degli anni Settanta del Novecento alcuni fisici si resero

conto che una nuova Teoria delle Stringhe – un'evoluzione più sofisticata del modello iniziale – se ben formulata, possedeva la supersimmetria al proprio interno. Descriveva, cioè, la gravità e le altre interazioni in modo supersimmetrico risultando più stabile e più controllabile in uno spazio-tempo a 10 dimensioni. In realtà, non c'era solo una sola teoria ma ce n'erano più di una: le cosiddette superstringhe. Fu grazie al fisico inglese Michael Green e al suo collega americano John Schwarz che ne venne individuata un'altra, in particolare, che si

collegava in modo più naturale alle teorie a bassa energia del Modello Standard. Poco dopo, vennero scoperte altre due teorie simili, portando così a cinque il numero totale delle superstringhe.⁹ Queste scoperte, a metà degli anni Ottanta del Novecento, risvegliarono un grande interesse sulla Teoria delle Stringhe.»

Quindi potremmo dire, usando altri termini, che la Teoria delle Stringhe può essere considerata come un'opzione per estendere il Modello Standard includendo al suo interno la gravità. E dato che i principi utilizzati sono consistenti

con la definizione stessa di stringa – come elemento base – in questa nuova formulazione non sorgerebbero tutte le difficoltà teoriche che, invece, si presentano con la Meccanica Quantistica. «Certamente», concorda Augusto Sagnotti, «però c'è un prezzo molto alto da pagare. Tutta questa costruzione, infatti, richiede che l'universo contenga ulteriori dimensioni piccolissime, invisibili. E purtroppo, la teoria non riesce a predire le caratteristiche di queste ulteriori dimensioni mentre proprio le loro caratteristiche predicono i fenomeni di bassa energia. Come,

per esempio, il valore della costante di struttura fine che caratterizza le interazioni tra elettroni, positroni e fotoni.

«Faccio un esempio, sacrificando un po' la precisione, per mettere in evidenza il fulcro di quest'ultima riflessione. La teoria fondamentale vorrebbe spiegare perché la carica elettrica dà luogo a quella costante di struttura fine che abbiamo visto essere dell'ordine di un centotrentasettesimo. Perché non vale un duecentesimo, oppure un millesimo? Oggi abbiamo ragione di credere – in seguito agli ulteriori sviluppi della ricerca – che la Teoria

delle Stringhe abbia origine da un principio assolutamente unico e che al contempo il nostro universo sia una particolarissima realizzazione di questo principio.

«In altri termini, questo principio unico non appare direttamente legato al mondo che noi osserviamo. È un principio unico un po' strano, perché vive un po' a 10 dimensioni e un po' a 11. Non capiamo neanche bene, in effetti, in quale tipo di mondo questo principio viva. Per andare da 11 – o 10 dimensioni che siano – alle 4 che noi conosciamo, servono dimensioni interne molto piccole e invisibili, la

cui forma appare imprevedibile. Dimensioni che, però, predicono correttamente la natura delle particelle che noi osserviamo nel nostro mondo a bassa energia. Quindi è una situazione paradossale. Esiste un principio unico che concettualmente non capiamo bene – perché non abbiamo una comprensione della teoria che raggiunga livelli di finezza simili a quelli ottenuti nel campo degli studi sulla Relatività o sull'elettromagnetismo – e inoltre non riusciamo a dare una spiegazione razionale dell'emergenza del nostro universo

da questa teoria. La teoria è unica, ma il mondo in cui viviamo appare una sua realizzazione scelta in modo arbitrario: un accidente piuttosto che una necessità!»

Mettere il punto

Come abbiamo più volte visto anche nei capitoli precedenti, in alcune situazioni il confine fra fisica e filosofia si fa molto sottile e sfumato. Non si può non pensare a tutte le possibili implicazioni, relative al rapporto esistente con la realtà che ci circonda, derivanti da quanto Augusto Sagnotti ha appena messo in evidenza. Eppure, prima di proseguire l'indagine in questa direzione, ritengo che sia fondamentale chiarire qual è il punto cardine su cui si basano tutte le diverse Teorie delle Stringhe, e inoltre se esista o meno un suo

collegamento anche con la Meccanica Quantistica.

«Il fulcro di tutte le varie Teorie delle Stringhe», risponde Augusto Sagnotti, «è costituito dall'esistenza di particolari oggetti che – come vedremo fra poco – rimpiazzano la particella elementare come elemento costitutivo del nostro universo. È persino buffo che, dopo duemila anni, siamo ritornati alle stesse ipotesi su cui lavoravano già i filosofi Greci: la fisica del Novecento, con tutte le sottigliezze della Meccanica Quantistica, ha finito per riesumare il concetto di particella elementare. La particella

elementare è l'analogo quantistico di quella che noi immaginavamo nella forma di una pallina molto piccola di materia: l'atomo di Leucippo e Democrito.

«Per chiarire il concetto, la particella elementare quantistica è un oggetto con pochissimi attributi intrinseci – la massa, la carica e lo spin – e altri attributi dinamici, come l'energia e la quantità di moto. Ora, però, la Teoria delle Stringhe afferma qualcosa di diverso. In pratica, dice: no, le particelle non sono gli oggetti fondamentali; le particelle sono semplicemente dei 'modi di

vibrazione delle stringhe'. Quindi la particella nel suo essere un'entità fondamentale, viene sostituita da una corda vibrante, da una stringa. Soffermiamoci un attimo sulla definizione di modi di vibrazione e facciamo l'esempio di una corda libera di oscillare ma con le due estremità fissate in due punti differenti. Dato che la corda può vibrare liberamente, esiste un numero infinito di 'toni' che la stessa corda può rappresentare.

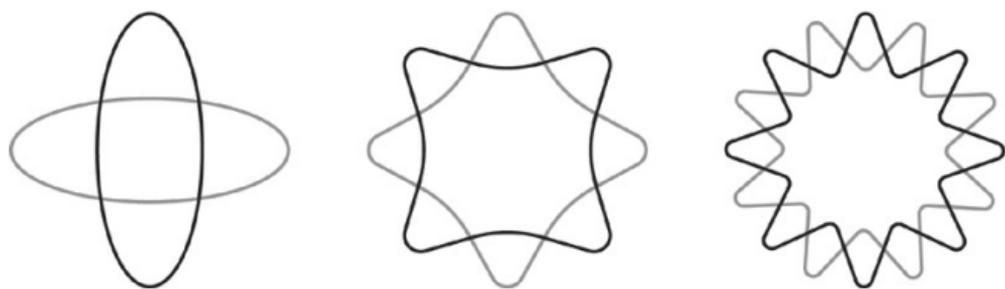
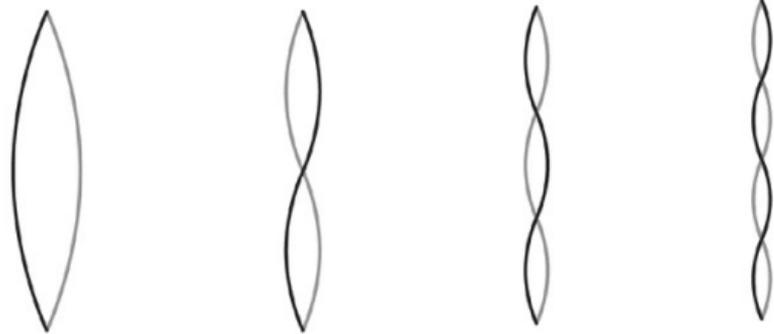


Figura 15. Rappresentazione dei modi di vibrazione di una stringa aperta, nella parte superiore, e di una stringa chiusa, nella parte inferiore.

«La Teoria delle Stringhe associa

ai toni più bassi tutte le particelle che noi osserviamo sperimentalmente. Ai toni più alti invece vengono a corrispondere infinite altre particelle la cui unica funzione, apparentemente, è quella di garantire un 'limite soffice' per la gravità¹⁰ ad altissime energie. C'è anche di più. Continuando lo studio ci si è resi conto che dovevano esistere anche altri oggetti nella Teoria delle Stringhe: dei conglomerati di energia analoghi ai solitoni presenti nella Teoria Quantistica dei Campi. Dei solitoni sappiamo che sono caratterizzati dal possedere massa, spin, carica,

energia e quantità di moto; ciononostante appaiono molto diversi dalle particelle ordinarie che, tecnicamente, sono quanti dei campi. Nella Teoria delle Stringhe l'analogo dei solitoni – in linea generale – sono le membrane multidimensionali.»

Questo passaggio è particolarmente importante. Com'è possibile, domando ad Augusto Sagnotti, che i solitoni, pur possedendo le stesse caratteristiche delle particelle, non siano delle particelle? «Rientra in quel principio unico di cui ho parlato poco fa. È un accidente dovuto al fatto che nella

teoria, tipicamente, ci sono dei parametri piccoli – come, per esempio, la stessa costante di struttura fine – che fanno sì che quelle che noi chiamiamo particelle elementari si comportino in un certo modo mentre i solitoni si comportano in un modo completamente diverso. In un mondo ideale, però, nel quale le costanti di accoppiamento¹¹ fossero più grandi, con alcune specifiche ipotesi di riferimento, i ruoli dei solitoni e delle particelle verrebbero scambiati fra loro. Per esempio, se la costante di struttura fine fosse enorme, i solitoni si

comporterebbero come le particelle elementari, mentre le particelle elementari si comporterebbero come solitoni.

«È proprio questo tipo di ragionamento che, in un ambito più vasto e complicato, ci ha fatto capire che tutte le cinque Teorie delle Stringhe con supersimmetria in 10 dimensioni sono equivalenti. Infatti agendo sulla definizione dei parametri di riferimento – che in questi modelli siamo in grado di alterare a piacere –, una certa teoria ha certe particelle e certi solitoni mentre un'altra teoria ha altri solitoni e altre particelle. Ma se

osserviamo quello che succede con più attenzione ci rendiamo conto che le particelle di una teoria sono in corrispondenza con i solitoni dell'altra, e viceversa.»

Da stringhe a brane

Sostituire alle particelle elementari della Teoria Quantistica i modi di vibrazione delle stringhe costituisce la base per un ulteriore ragionamento sulla natura della realtà. Le stringhe, infatti, sono definite come oggetti unidimensionali estesi e quindi, quando si introducono ulteriori dimensioni, c'è bisogno di differenti oggetti che generalizzino lo stesso concetto. Le brane, contrazione del termine «membrane» – in riferimento alle membrane multidimensionali appena definite –, sono proprio quegli oggetti fisici.

«Quando eravamo studenti», riprende Augusto Sagnotti, «ci chiedevamo perché una teoria contenente delle stringhe non dovesse contenere anche membrane di tipo più generale. All'epoca la risposta era – un po' confusamente – che le stringhe hanno un comportamento speciale, semplice.

«Oggi invece sappiamo che queste membrane, questi oggetti multidimensionali esistono, e sono i solitoni di cui parlavo prima. E proprio come i solitoni, le membrane appaiono più complicate. Quindi, quando entrano

in gioco le stringhe, compaiono le membrane. Non solo: l'insieme di stringhe e membrane, di tutti i tipi, è tale che tutte le manifestazioni diverse della Teoria delle Stringhe si mappano l'una nell'altra. Le membrane di una manifestazione della Teoria diventano – in qualche modo – le stringhe di un'altra teoria.»

È arrivato il momento di chiedere ad Augusto Sagnotti in che cosa differiscano fra loro le diverse Teorie delle Stringhe. «In generale si può dire che tutte le diverse manifestazioni della Teoria delle Stringhe – che possono anche

essere formulate in modo approssimato – si differenziano l'una dall'altra per il tipo di stringhe, di membrane e di altri oggetti estesi che contengono. Più nello specifico, anche dalle dimensioni dello spazio-tempo nel quale le stringhe stesse evolvono. Nella versione originale di Gabriele Veneziano, la stringa viene definita stringa bosonica e lo spazio esteso è a 26 dimensioni. Nelle cinque Teorie Supersimmetriche, a cui accennavo precedentemente, la stringa è una superstringa e lo spazio esteso è a 10 dimensioni.

«Esiste, poi, un'ulteriore teoria la

M-teoria, che non è una Teoria delle Stringhe ma è profondamente legata a esse e vive in 11 dimensioni. La M-teoria è una sorta di 'madre di tutte le teorie' perché è un concetto molto astratto che cattura – in qualche modo – tutte le manifestazioni della teoria a 10 o 11 dimensioni. Contemporaneamente, lo ribadisco, non è una Teoria delle Stringhe! Naturalmente, tutto ciò è molto strano, perché se noi avessimo veramente colto i principi base che stanno al di sotto di tutto, non potrebbero esistere manifestazioni che non li condividano. Quindi è

logico pensare che il vero principio primo, in realtà, ci stia sfuggendo: ne vediamo diverse manifestazioni ma non abbiamo una comprensione completa della loro vera origine. E questo è un po' il problema.»

Torniamo un attimo sulla definizione di brane. Per chiarire questo concetto, semplificando al massimo, possiamo dire che così come alla base della Meccanica Quantistica c'è la dualità onda-corpuscolo, alla base della Teoria delle Stringhe ci sono le corde e i modi di vibrazione? E che l'evoluzione delle stringhe sono le membrane e gli altri oggetti estesi?

«Diciamo che», riprende il discorso Augusto Sagnotti, «l'evoluzione delle corde è simile a quella delle particelle. Grazie agli urti fra le stringhe si producono altre stringhe e si producono anche solitoni che, in questo caso, sono gli oggetti estesi fra cui troviamo anche le membrane. Questi oggetti estesi hanno la stessa dignità delle corde ma normalmente sono pesantissimi: sono come delle lastre o dei solidi rigidi, che non si muovono.

«Questa rappresentazione, però, è solo un artificio: deriva dalla nostra incapacità di gestire teorie al

cui interno l'analogo della costante di struttura fine risulta non molto piccolo, cioè non è trascurabile. In effetti, dovremmo riuscire a immaginare una realtà più ricca, con stringhe che si muovono, membrane che oscillano, e così via. Oggetti che stanno lì, tutti assieme, e che interagiscono tra loro. È l'analogo delle particelle e dei solitoni che si scontrano e si muovono in accordo con le leggi della Meccanica Quantistica. Per quello che capiamo oggi, questo è quello che c'è dietro alla teoria. Ma ci piacerebbe evidenziare un principio più semplice dietro questa

complessità. Il problema è che questi oggetti sono in qualche modo manifestazioni di questo principio, ma qual è la loro origine? Com'è possibile che queste manifestazioni siano così diverse le une dalle altre? Abbiamo ragione di ritenerle manifestazioni di qualcosa di più fondamentale, ma questo qualcosa non lo vediamo con chiarezza.»

Continuando il raffronto con la Fisica Quantistica e cercando di individuare altri punti in comune con la Teoria delle Stringhe, si può ipotizzare, come pura speculazione teorica, che il quanto, la funzione

d'onda e persino la corda siano tutte manifestazioni di un qualcosa d'altro ancora più piccolo, più elementare? «Dietro a questi modelli», precisa Augusto Sagnotti, «abbiamo ragione di credere che ci siano altre entità che nessuno, finora, è riuscito a mettere a fuoco. In questo momento, la speculazione teorica rimane tale: non ha basi solide perché non abbiamo ancora capito i principi. Alla fine qualcuno metterà a fuoco il problema e quindi, logicamente, almeno l'aspetto concettuale della teoria dovrebbe diventare più controllabile.

«Per fare un esempio, la teoria di Einstein rimane complicatissima anche se ne comprendiamo perfettamente le basi geometriche. Ci sono equazioni che riusciamo a risolvere matematicamente solo in situazioni molto simmetriche e particolari; ciononostante sappiamo sempre esattamente quello che stiamo cercando di fare. La Teoria delle Stringhe è molto più complessa. Un esempio? Come si colloca il concetto di spazio-tempo all'interno della Teoria delle Stringhe? Purtroppo allo stato attuale degli studi la risposta non è ancora certa. Ciò che riusciamo a

fare, per esempio, è assumere che lo spazio-tempo sia piatto e far propagare al suo interno le stringhe. Una situazione paradossale, se vogliamo, perché se le stringhe descrivono la gravità dovrebbero determinare, in generale, lo spazio-tempo. Tecnicamente, studiando a fondo la loro propagazione, abbiamo indicazioni in questo senso, ma solo nel limite delle basse energie. Limite dove la teoria diventa controllabile nei suoi aspetti legati alla Relatività Generale o alla supergravità. A livello di teoria completa, quindi, la domanda

rimane tuttora aperta.»»

Un rapporto relativo

Altro tema molto attuale, in questo preciso momento storico, è quello del rapporto esistente fra chi si occupa della Teoria delle Stringhe e chi studia, invece, la Loop Quantum Gravity, teoria che abbiamo brevemente accennato anche nel Capitolo 4. Ad Augusto Sagnotti chiedo un parere personale su questo argomento. «Partiamo dal dato di fatto che oggi, a distanza di quasi quarant'anni dalle prime evidenze di Gabriele Veneziano, le stringhe riusciamo a studiarle soltanto perturbativamente intorno a uno spazio prefissato. Questo è

uno dei motivi dell'incomunicabilità che persiste con i colleghi che si occupano di Loop Quantum Gravity e che hanno una formazione professionale centrata sulla Relatività Generale.

«Per loro è possibile definire una quantizzazione della Relatività Generale basandosi su concetti – sui quali sono fortemente ancorati – di gravità classica. Chi si occupa di Teoria delle Stringhe, invece, ha una formazione basata solitamente sulla QFT, la Teoria Quantistica dei Campi. Per noi, la quantizzazione della gravità procede naturalmente in analogia con l'Elettrodinamica

Quantistica e avviene sostituendo i gravitoni, i quanti della gravità, a elettroni, fotoni e positroni. Il nostro fine, molto ambizioso, è quello di giungere a una descrizione unitaria di tutte le interazioni fondamentali.

«I fisici che seguono l'approccio della Loop Quantum Gravity cercano di partire dalla Relatività Generale e di scrivere l'equazione completa per la sua quantizzazione, ma così facendo incontrano delle serie difficoltà con i gravitoni. Nella Teoria delle Stringhe, invece, i gravitoni hanno un ruolo evidente, mentre il pieno significato dello

spazio-tempo – così come abbiamo visto poco fa – resta elusivo. I due tentativi, in buona sostanza, restano disgiunti. Tentare di congiungerli richiederebbe una sorta di ponte sullo stretto di Messina, e il paragone non è casuale! Magari su una sponda se ne costruisce un pezzetto e così pure sull'altra sponda; il problema è che quando si dovrebbero congiungere i due tronconi rimarrebbe comunque da fare una nuotata lunga e irta di pericoli!

«In un certo senso, la Teoria Quantistica dei Campi è un concetto che affonda le proprie radici

nell'Ottocento: è una vecchia idea riemersa insieme alla Meccanica Quantistica. La Teoria delle Stringhe è un'ulteriore, maestosa, complicazione di tutto ciò! Una serie di cose funzionano magicamente e c'è una matematica bellissima che regge tutto e che porta, a volte, a fare dei passi in avanti inattesi. Però, se ci si chiede realmente quale sia il principio fondamentale, le risposte che abbiamo attualmente a disposizione restano insoddisfacenti. Questa, a mio avviso, è una delle ragioni del distacco ideologico che possiamo osservare tra la Teoria delle

Stringhe e la Loop Quantum Gravity. Alcuni risponderebbero in modo più arrogante, pensando di avere la soluzione a portata di mano. Io non lo credo. È essenziale, sia nella ricerca scientifica sia più in generale nella vita, rispettare le persone che hanno punti di vista diversi. L'unico problema è che nessuno di noi, oggi, ha una visione completa e del tutto soddisfacente.»

Uno dei punti cruciali della Teoria delle Stringhe è relativo all'individuazione delle sue evidenze sperimentali. Quali sono quelle che possono essere utilizzate per

sostenerla? «Non ci sono evidenze sperimentali», mi risponde Augusto Sagnotti, «perché le evidenze sperimentali sono sulla Relatività Generale. E queste continuano a emergere, come dimostra la recente scoperta delle onde gravitazionali. Se vogliamo, c'è un minimo di evidenza sperimentale sul fatto che le fluttuazioni quantistiche dei campi, in presenza della gravità, hanno degli effetti fisici. Chiarisco subito questo concetto con una premessa: si pensa che gli inizi dell'universo siano stati caratterizzati da una breve fase accelerata, detta

inflazione. Ebbene, la Teoria Quantistica dei Campi postula che questa fase abbia lasciato un segno, un marchio, sul CMB, il Cosmic Microwave Background, cioè sul fondo cosmico a microonde che permea l'universo. Questo marchio è stato effettivamente rivelato da recenti esperimenti effettuati grazie ai satelliti, dove si è visto che c'è una leggera inclinazione verso il rosso dello spettro di potenza delle fluttuazioni – cioè, delle irregolarità del CMB – che favorisce le lunghezze d'onda più ampie. Esattamente come previsto dalla teoria. Queste irregolarità, fra

l'altro, vengono ritenute essere i semi attorno ai quali si sono formate, nel corso dell'evoluzione cosmologica, le galassie.

«In un certo senso, il problema della Teoria delle Stringhe, la non unicità delle sue manifestazioni, è già presente nella Relatività Generale. Chi ci dice se l'universo è chiuso, aperto o piatto? Chi ci dice se in futuro continuerà a espandersi o entrerà in una fase di compressione? Ce lo può confermare o smentire solo l'osservazione sperimentale, perché le diverse opzioni sono tutte ugualmente ammissibili, e la scelta

di quella effettivamente concretizzatasi nell'universo è dipesa – utilizzando una similitudine – da quanto forte è stato il 'botto' iniziale.

«Quindi, ci sono delle domande alle quali la Teoria delle Stringhe non consente di dare una risposta perché la Relatività Generale di Einstein non consente di dare loro una risposta. La Teoria delle Stringhe è una specie di enorme grattacielo costruito sulla teoria di Einstein e soffre delle limitazioni imposte – per quanto ne capiamo a tutt'oggi – dalle sue fondamenta. Come ho già detto, ma vale la pena

ripeterlo nuovamente, tutte le manifestazioni della Teoria delle Stringhe si riducono, nell'ipotesi di bassi livelli di energia, alla teoria di Einstein, all'elettromagnetismo, e ad alcune altre cose. Il problema è che, a parte la gravità che è sempre presente, non possiamo predire in modo univoco la natura delle altre interazioni e il tipo di particelle coinvolte. E non possiamo predire in modo univoco quanto valgono le varie cariche o le costanti di accoppiamento.

«Ci sono, poi, altri problemi ancora più gravi. Tra questi, c'è il fatto che in assenza della

supersimmetria – che in natura non è stata ancora osservata – compaiono instabilità del vuoto. Però la supersimmetria implica che a fianco dell'elettrone dovrebbe esistere una particella con la sua stessa massa ma con spin pari a zero, e non è così! È vero che la scoperta del bosone di Higgs ha dimostrato che esistono particelle con spin zero, ma la massa del bosone di Higgs è molto più grande di quella dell'elettrone. Sono tutte domande ancora senza risposta: è una cosa straordinaria aver identificato un principio che sembra essere unico, ma c'è ancora molta

strada da fare prima di riuscire a comprenderne la dimensione più profonda.»

A completamente

Grazie alla disponibilità di Gabriele Veneziano e di Augusto Sagnotti, ho avuto l'opportunità di affacciarmi sui meccanismi più affascinanti e «misteriosi» della Teoria delle Stringhe. Ognuno dei tanti temi che sono stati affrontati in queste pagine avrebbe potuto essere ulteriormente sviluppato e approfondito, ma ho preferito privilegiare una visione d'insieme della teoria piuttosto che definirne troppo puntualmente ogni singolo aspetto. Il mio obiettivo, infatti, rimane quello di arrivare a chiarire se la Teoria delle Stringhe, nelle

sue varie manifestazioni, possa effettivamente rivestire il ruolo di una Teoria del Tutto destinata a integrare, comprendere e racchiudere al proprio interno ogni altra forma di rappresentazione della realtà. Ecco perché la mia ultima domanda per Augusto Sagnotti è dedicata proprio al rapporto fra la Teoria delle Stringhe e la teoria di Higgs, e più in generale al rapporto con tutte le altre teorie che abbiamo imparato a conoscere nei primi capitoli di questo volume.

«La Teoria delle Stringhe»,
interviene Augusto Sagnotti,

«contiene al proprio interno il meccanismo di Higgs e molte sue generalizzazioni più complicate. Il fatto è che esistono tante conseguenze della Teoria delle Stringhe che riflettono la natura delle dimensioni interne invisibili. Usando queste dimensioni interne, è possibile generare diversi tipi di campi di materia, rompere la supersimmetria, combinare fra loro vari scenari teorici, e tutto questo in molti modi diversi! Rimane, però, il grande problema dell'instabilità del vuoto, che ho già evidenziato.

«Apparentemente, siamo in grado di scegliere una qualsiasi tra

queste varie opzioni, ma poi il vuoto della Teoria delle Stringhe diviene instabile, va fuori controllo. L'unica cosa che è possibile fare veramente con la Teoria delle Stringhe è prendere una configurazione di vuoto assegnata e studiare le piccole oscillazioni che avvengono rispetto a quella configurazione. Se il vuoto di partenza è stabile, le oscillazioni hanno un senso ben definito ma se il vuoto è instabile, si deforma, le oscillazioni diventano subito qualcosa di concettualmente differente. Tutti i tipi di fenomeni – incluse delle potenti

generalizzazioni del meccanismo di Higgs – emergono dalle dimensioni interne dello spazio esteso della Teoria delle Stringhe. Il problema è che se il vuoto della teoria viene modificato in maniera forte, perdiamo rapidamente il controllo degli elementi di quella teoria.

«In relazione alla definizione di Teoria del Tutto, abbiamo ragioni concrete per crederla tale, ma non capiamo perché una teoria che vive naturalmente in 10 – o 11, o 26 – dimensioni, nel momento in cui è stata applicata al nostro universo abbia dato luogo solo alle quattro dimensioni macroscopiche che

vediamo. In altre parole, attraverso la stessa Teoria delle Stringhe, non capiamo assolutamente perché soltanto quattro dimensioni macroscopiche siano risultate preferibili nell'evoluzione del nostro universo.

«Quindi, c'è il sentore che la Teoria delle Stringhe sia una teoria molto profonda, che contiene un'infinità di informazioni con manifestazioni diverse e variegate, ma con un principio unico alla base. Purtroppo, questo principio appare elusivo e non riusciamo a comprenderlo concettualmente. Se a un fisico esperto di Relatività

Generale venisse chiesto qual è il principio base della teoria Einsteiniana, potrebbe spiegarvelo su una lavagna. Se la stessa domanda fosse posta a un esperto della Teoria delle Stringhe, finirebbe solo per fare un lungo elenco di esempi.»

Comunque, per concludere questo capitolo con le parole stesse di Augusto Sagnotti, «il fatto che la Teoria delle Stringhe appaia elusiva a livello dei propri fondamenti la rende un argomento di frontiera. E, di conseguenza, più interessante e affascinante. Dobbiamo solo capirla meglio, e sono certo che col tempo

ci riusciremo.»»

Un'azione fuori luogo

Ovvero, così lontani eppure così vicini

Cosa c'è dietro? Albert Einstein aveva espresso un'opinione molto chiara: l'entanglement non può esistere. Peccato che, in realtà, l'intricazione quantistica – cioè la possibilità che due sistemi connessi, due particelle oppure due o più atomi, interagiscano istantaneamente fra loro anche se si trovano a distanza di anni luce – non tenga sufficientemente conto del pensiero del grande scienziato. E soprattutto, che sia stata definitivamente dimostrata, anche sperimentalmente, già

dagli anni Ottanta del Novecento!

Perché è importante? Perché dal punto di vista della comprensione della realtà che ci circonda, si tratta di un fenomeno che cambia radicalmente sia il nostro punto di vista sia le possibilità che abbiamo di interagire con la materia. E fra le sue più futuristiche applicazioni c'è persino il teletrasporto... di informazioni!

«RICONOSCO appieno l'importantissimo progresso che la teoria statistica dei quanti ha fatto compiere alla fisica teorica. Nel campo dei problemi meccanici [...] questa teoria costituisce ancora oggi un sistema capace, pur nel suo

carattere ristretto, di descrivere correttamente le relazioni empiriche fra specifici fenomeni in modo corrispondente alle previsioni teoriche. Essa è, finora, la sola che unisca in modo logicamente soddisfacente il duplice carattere corpuscolare e ondulatorio della materia; e le relazioni in essa contenute sono, entro i limiti naturali fissati dal Principio di Indeterminazione, complete. Le relazioni formali contenute in questa teoria – cioè, il suo intero formalismo matematico – probabilmente dovranno essere integrate, sotto forma di deduzioni

logiche, in ogni valida teoria del futuro.»¹

In questa dichiarazione – inserita all'interno del volume curato in suo onore, nel 1949, dal biografo americano Paul Arthur Schilpp – Einstein precisa le ragioni che lo hanno portato ad allontanarsi dalla visione dell'Interpretazione di Copenaghen della Meccanica Quantistica. Cioè, dall'interpretazione proposta da Niels Bohr nel 1927 e che ho trattato precedentemente nel Capitolo 3. In particolare, pur riconoscendo che si tratta dell'unica teoria «che unisca in modo

logicamente soddisfacente il duplice carattere corpuscolare e ondulatorio della materia» e che le «relazioni formali contenute in questa teoria [...] probabilmente dovranno essere integrate, sotto forma di deduzioni logiche, in ogni valida teoria del futuro», Einstein precisa di attribuire alla Fisica Quantistica un «carattere ristretto».

In realtà, la sua critica si spinge molto oltre dato che, come abbiamo già visto più volte in questo stesso volume, Albert Einstein riteneva che la Fisica Quantistica fosse sostanzialmente una teoria incompleta: «Ciò che non

mi soddisfa in questa teoria, in linea di principio, è il suo atteggiamento verso quello che mi sembra essere lo scopo programmatico della fisica stessa: la descrizione completa di ogni situazione reale che si suppone possa esistere indipendentemente da qualsiasi atto di osservazione o di verifica». E proprio per mettere in evidenza questa criticità e anche per trovarvi un possibile rimedio – tramite lo sviluppo di una Grande Teoria Unificata –, Einstein dedicò molti studi e molti articoli alla ricerca di una dimostrazione dell'incompiutezza della Meccanica

Quantistica.

«C'è un altro punto che è terribilmente insoddisfacente nella Meccanica Quantistica, ed è la necessità di supporre spazio e tempo a priori. In questo senso la Meccanica Quantistica è una teoria ancora Newtoniana. Con la Relatività Generale, invece, Einstein ha introdotto una teoria indipendente dal 'background', dove è la stessa materia che crea lo spazio e il tempo.» A parlare, è Federico Carminati, Senior Programming Physicist presso il CERN, il Consiglio Europeo per la Ricerca Nucleare di Ginevra.

Federico Carminati e Giuliana Galli Carminati sono, anche nella vita, una coppia di ricercatori e di studiosi con cui ho avuto modo di confrontarmi recentemente proprio su questi temi. «Secondo me, Einstein ha ragione a puntualizzare questi due aspetti. E ha ragione anche nello sperare che possano, in futuro, derivare da una teoria concettualmente – epistemologicamente – più solida. Il suo tentativo di 'ricominciare da capo' e di cercare questa teoria, però, ha avuto il torto di 'spendere' una delle menti più brillanti della storia della fisica su un problema –

inaspettatamente? – difficile anche per lui, sottraendola allo sviluppo attivo e incredibilmente proficuo della Teoria Quantistica.»

Un problema paradossale

Nel 1935, Albert Einstein assieme al fisico russo – poi naturalizzato americano – Boris Podolsky e al proprio assistente venticinquenne Nathan Rosen,² pubblicò sulla prestigiosa rivista *Physical Review* un articolo polemicamente intitolato: «Può la descrizione della realtà fisica della Meccanica Quantistica considerarsi completa?»³ L'obiettivo di Einstein e degli altri due autori era quello di dimostrare che la funzione d'onda associata alla particella non forniva una rappresentazione completa della realtà fisica. Più in generale,

che la Meccanica Quantistica possedeva degli aspetti paradossali che ne mettevano in evidenza l'incompiutezza.

L'esperimento ideale presentato nella pubblicazione – diventato universalmente noto col nome di paradosso EPR – partiva dal presupposto che per ogni sistema fisico possono essere considerate valide tre ipotesi generali: il Principio di Realtà, la Completezza della Meccanica Quantistica e il Principio di Azione Locale. L'ultima ipotesi, anche se non viene menzionata apertamente nell'articolo, può essere considerata

come implicita.

Per capire cosa rappresentino le prime due ipotesi e come debbano essere concretamente applicate, riporto quanto scritto al riguardo da Amir Dan Aczel, matematico e docente di Storia delle Scienze presso la Boston University, scomparso nel 2015: «Secondo Einstein, Podolsky e Rosen, ogni attributo di un sistema fisico che può essere predetto con precisione senza disturbare il sistema è un elemento della realtà fisica. Inoltre, argomentano [i tre autori], una descrizione completa del sistema fisico sotto esame deve incorporare

tutti gli elementi della realtà fisica che sono associati al sistema». ⁴ Per spiegare la terza, invece, preferisco fare riferimento alle stesse parole di Albert Einstein: «La seguente idea caratterizza l'indipendenza relativa di oggetti molto lontani nello spazio (A e B): un'influenza esterna su A non ha un'influenza diretta su B; ciò è noto come il Principio di Azione Locale, che è usato regolarmente solo nella teoria di campo. Se questo assioma venisse a essere completamente abolito, l'idea dell'esistenza di sistemi quasi-chiusi, e perciò la postulazione delle leggi che possono essere verificate

empiricamente nel senso accettato – diverrebbe impossibile». ⁵

Date queste premesse, Einstein si era accorto che la Meccanica Quantistica comprendeva la possibilità che si verificasse una particolare situazione che, da un punto di vista teorico, considerava assolutamente impossibile. «Cosa ne diresti della situazione seguente?» aveva chiesto Albert Einstein al fisico Léon Rosenfeld, che collaborava con Niels Bohr, in occasione del Congresso Solvay del 1933. «Supponiamo che due particelle siano poste in moto l'una verso l'altra con la stessa quantità

di moto, molto grande, e supponiamo che interagiscano per un periodo di tempo molto breve quando passano per posizioni note. Consideriamo ora un osservatore che si occupi di una delle due particelle in una zona molto distante dal punto in cui hanno interagito e che ne misuri la quantità di moto; allora, in conseguenza delle condizioni dell'esperimento, questo osservatore sarà ovviamente in grado di dedurre anche la quantità di moto dell'altra particella. Se, viceversa, egli scegliesse di misurare la posizione della prima

particella, sarebbe comunque in grado di dire dove si trova esattamente l'altra. Questa è una conseguenza perfettamente corretta e diretta dei Principi della Meccanica Quantistica; ma non è piuttosto paradossale? Come può lo stato finale della seconda particella venire influenzato da una misurazione effettuata sulla prima, dopo che ogni interazione fisica fra le due è cessata?»⁶

Ecco qual era la «situazione impossibile» su cui Einstein stava riflettendo assieme a Léon Rosenfeld mentre, a Bruxelles, ascoltava l'intervento di Niels Bohr

sulla teoria dei quanti. Ed ecco quale diventò, due anni dopo, il fulcro del paradosso EPR, l'esperimento mentale in cui venivano sfruttate le apparenti contraddizioni della Fisica Quantistica per cercare di evidenziarne i limiti e le mancanze.

Una nuova prospettiva

L'impossibilità che possa verificarsi un'azione a distanza fra due particelle che in un precedente momento hanno interagito fra loro è una conseguenza diretta delle tre ipotesi: del Principio di Azione Locale, del Principio di Realtà e della Completezza della Meccanica Quantistica. Affermare che questa azione, invece, si manifesti e sia sperimentalmente osservabile, comporta il verificarsi di un paradosso insanabile; almeno secondo Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen. Eppure, come vedremo tra qualche pagina,

l'azione a distanza fra due particelle – e non solo due, e non solo particelle – che hanno avuto la possibilità di interagire reciprocamente esiste e ha anche un nome. Si chiama entanglement, letteralmente «intricazione», «aggrovigliamento», «garbuglio».

C'è un'ulteriore considerazione da fare e che mi propone Giuliana Galli Carminati. «Penso che, a rischio di rendere tutto leggermente più complicato, sia necessario introdurre il concetto di raggio di interazione. Se consideriamo una forza con un raggio di interazione limitato, allora il discorso tiene. Con

interazioni a raggio infinito – come quella elettromagnetica e quella gravitazionale, per esempio – le particelle possono continuare a interagire fra loro a qualunque distanza si trovino. Anche con queste ultime interazioni, però, il paradosso EPR sussiste – se mi è consentita l'espressione, 'peggiora' –, dato che la misura di una particella determina il risultato dell'altra anche se non c'è alcun modo di trasferire l'informazione.» Su questo punto, e sulle problematiche connesse al limite della velocità della luce torneremo tra qualche pagina. «Dal punto di

vista filosofico», aggiunge Giuliana Galli Carminati, «si può dire semplicemente che l'intricazione è una causa formalis, dell'essenza stessa, e il principio di azione locale una causa efficiens: cioè, che genera un'azione. Il perché la fisica escluda tutta la causistica formale a vantaggio della sola causistica efficiens è un problema in sé.»

Ma torniamo al 1935 e all'articolo di Einstein, Podolsky e Rosen. Il ragionamento che loro proposero in quelle poche pagine si basa sull'osservazione fatta da Einstein a Rosenfeld due anni prima e coinvolge proprio la descrizione

degli stati nei quali si verifica una condizione di entanglement fra due particelle. Inoltre, considera come valido il Principio di Indeterminazione di Heisenberg, cioè impone la correlazione quantistica che vieta di misurare la posizione di una particella e contemporaneamente la sua quantità di moto, con la stessa, arbitraria, precisione.

«Così, misurando o A o B», si legge nell'articolo, «siamo in grado di predire con certezza, e senza in alcun modo perturbare il secondo sistema, o il valore della posizione (P) o il valore della quantità di

moto (Q). Secondo il nostro criterio di realtà, nel primo caso dobbiamo considerare la grandezza P come un elemento della realtà; nel secondo caso, un elemento della realtà è la grandezza Q. Ma come abbiamo visto, entrambe le funzioni d'onda [associate alle due particelle distinte] appartengono alla stessa realtà. Abbiamo prima dimostrato che o (1) la descrizione quantistica della realtà fornita dalla funzione d'onda è incompleta, o (2) quando i corrispondenti operatori non commutano, due grandezze fisiche non possono avere realtà simultanea. [...] Siamo perciò

obbligati a concludere che la descrizione quantomeccanica della realtà fisica fornita dalle funzioni d'onda è incompleta.»

Questa conclusione, che all'epoca produsse numerose conseguenze – sulle quali torneremo a breve –, sembra mettere in dubbio la validità stessa dell'Interpretazione di Copenaghen della Fisica Quantistica. Ma è realmente così? Ci sono ulteriori considerazioni che è necessario fare sulle implicazioni del paradosso EPR? Considerazioni che vanno al di là della Meccanica Quantistica e che coinvolgono le stesse teorie proposte da Albert

Einstein e la Teoria della Relatività Speciale in particolare? Per approfondire questi aspetti, mi sono confrontato nuovamente con Giorgio Colangelo, che oltre a essere un fisico quantistico lavora come ricercatore e divulgatore scientifico presso l'ICFO – Institut de Ciències Fotòniques, Istituto per le Scienze Fotoniche – di Barcellona. Giorgio Colangelo, che fa parte del gruppo di ricerca di Morgan W. Mitchell, solo in questo 2017 ha co-firmato numerosi articoli sull'entanglement⁷ ed è quindi fra le persone più indicate per valutare tutti gli aspetti connessi a questo

fenomeno.

«Albert Einstein, ragionando sulle possibili implicazioni della Fisica Quantistica aveva definito l'entanglement una 'sinistra azione a distanza'. Secondo la Teoria della Relatività Speciale, infatti, nessun segnale poteva viaggiare più velocemente della luce. Tuttavia, Einstein aveva fatto notare che in particolari situazioni potevano verificarsi dei paradossi che, dal suo punto di vista, rendevano evidente come la Meccanica Quantistica non fosse una teoria completa.

«Uno dei principali paradossi era il seguente. Secondo il principio di

Heisenberg, uno dei pilastri della Fisica Quantistica, non si possono conoscere simultaneamente e con la stessa precisione arbitraria due variabili di un sistema coniugate fra loro: per esempio la posizione e la quantità di moto di una stessa particella. D'altra parte, esistono dei processi in natura – come alcuni processi legati al decadimento delle particelle subatomiche – grazie ai quali è possibile produrre due particelle identiche ma dotate di velocità opposta, quindi, che si muovono in modo speculare fra loro.

«In questa coppia di particelle è

possibile pensare, idealmente, di misurare le due variabili coniugate separatamente. Per esempio, la posizione, con estrema precisione, nella prima particella e la velocità, sempre con estrema precisione, nella seconda. Dato che le due particelle hanno posizioni e velocità opposte, la conoscenza della posizione, così come quella della velocità, della prima implica la conoscenza della posizione o della velocità nell'altra. E questo, date le considerazioni iniziali, con la stessa precisione. Ora, dato che nel caso specifico, sia la posizione sia la velocità sono state misurate

accuratamente, potremmo conoscere simultaneamente entrambe le variabili coniugate di ciascuna particella, in aperta ma solo apparente contraddizione con quanto afferma il Principio di Indeterminazione di Heisenberg.»

Ed è esattamente questo il punto messo in evidenza dal paradosso EPR: una contraddizione che coinvolge direttamente anche la validità della formulazione di Heisenberg e che a prima vista parrebbe insanabile.

Azioni a distanza

«In realtà», continua Giorgio Colangelo, «esisteva una possibilità che avrebbe consentito al Principio di Indeterminazione di Heisenberg di mantenere la propria validità. Da un punto di vista pratico, consisteva nel fatto che misurando ciò che stava avvenendo sulla prima particella, contemporaneamente si attuasse un cambiamento nelle variabili congiunte della seconda particella. Da un punto di vista teorico, usando la terminologia introdotta da Albert Einstein, si sarebbe dovuta instaurare quella che lui stesso definì come una

'azione a distanza'.

«Questa soluzione, però, comportava un'ulteriore, enorme, complicazione. Se la misurazione sulla prima particella fosse avvenuta quando fra le due particelle si fosse frapposta una distanza molto grande – con le due particelle lontanissime fra loro – per instaurare istantaneamente una variazione nella seconda particella l'azione a distanza avrebbe dovuto far valere il proprio effetto a una velocità maggiore di quella della luce. Cosa impossibile in base alla Teoria della Relatività Ristretta. Questo fondamentale punto, però,

non risulta espresso esplicitamente all'interno dell'articolo 'Può la descrizione della realtà fisica della Meccanica Quantistica considerarsi completa?'. Come dimostrerà la storia, Einstein, Podolsky e Rosen si stavano sbagliando, eppure la loro analisi permise l'inizio del dibattito scientifico su uno dei fenomeni più affascinanti della Fisica Quantistica! Grazie alla riflessione sorta a seguito della pubblicazione del paradosso EPR, due particelle entangled – cioè, che si trovano in uno stato di entanglement – cominciarono a essere considerate non più come due diverse entità a

sé stanti, ma come due parti dello stesso sistema: intrinsecamente collegate, pur se lontanissime tra di loro.»

«In effetti, è proprio così», concorda anche Federico Carminati. «Se due particelle risultano correlate non sono 'due particelle' bensì 'un singolo sistema'. Se si misura la quantità di moto di una particella, si determina anche la quantità di moto dell'altra. Così facendo, però, si altera la posizione della prima particella e di conseguenza anche la posizione della seconda particella. In ogni caso, il sistema viene disturbato.

Quindi, quando si misura la posizione della seconda particella, la rilevazione viene effettuata in un sistema già alterato. Non cambia nulla il fatto che siano una o due particelle: se non sono separabili è un sistema unico e il principio di Heisenberg mantiene inalterata la propria validità!»

L'aspetto relativo al superamento della velocità della luce è probabilmente quello che spinse maggiormente Einstein a considerare la Meccanica Quantistica come una teoria incompleta. Il fatto che non fosse risaltato in maniera più evidente

nella forma finale dell'articolo costituì per il grande scienziato un continuo rammarico. L'anno successivo alla pubblicazione, nel 1936, in una lettera scritta a Erwin Schrödinger, Einstein ammise che «per ragioni linguistiche, l'articolo venne scritto da Podolsky dopo prolungate discussioni. Ma quello che volevo veramente far notare non è emerso così bene nel testo; al contrario, il punto principale è sommerso, come lo è sempre stato, da cumuli di erudizione.»

Su quest'ultimo punto, Giuliana Galli Carminati riflette con me e Federico Carminati.

«L'argomentazione del paradosso EPR è malfatta e oscura, così come ammette lo stesso Einstein. Una teoria completa può prevedere tutti gli aspetti della realtà con infinita precisione, nei limiti del modello, e di tutto ciò che dev'essere tenuto in considerazione. Siccome la Meccanica Quantistica non può prevedere due variabili coniugate, si presentano due diverse possibilità. O la Meccanica Quantistica non è una descrizione completa oppure le due variabili coniugate non appartengono alla stessa realtà. Cioè, se una è reale l'altra non lo è, e viceversa. Qui con

il termine 'reale' penso che si voglia dire 'predicibile dalla teoria'.

«Ora passiamo a due particelle entangled. Misurando la posizione dell'una si ottiene 'esattamente' la posizione dell'altra particella senza disturbarla. Misurando la quantità di moto della prima particella si può prevedere la quantità della seconda, senza disturbarla. Quindi, in questo caso, posizione e quantità di moto appartengono alla stessa realtà e potrebbero essere misurate, indirettamente, senza perturbare il sistema. Per le considerazioni fatte poco fa, dato che le due variabili appartengono

alla stessa realtà, allora la Meccanica Quantistica non è una descrizione completa della realtà. Il problema è che questa argomentazione è falsa, dato che due particelle intricate, come abbiamo già visto, non sono due particelle ma un sistema quantistico 'non separabile'. Per di più manca il punto chiaro e limpido dell'azione a distanza, cosa di cui Einstein giustamente si rammarica.»

Altre implicazioni

Come ho accennato in precedenza, le conseguenze della pubblicazione del paradosso EPR furono molte e coinvolsero, da differenti punti di vista, tutti i principali scienziati dell'epoca. Wolfgang Pauli, con il suo carattere caustico e poco incline alle mediazioni, era particolarmente seccato. Amir Dan Aczel lo definisce addirittura «furioso». Pauli scrisse subito una lettera all'amico Werner Heisenberg nella quale esprimeva tutto il proprio risentimento: «Einstein si è di nuovo sfogato pubblicamente contro la Meccanica Quantistica, in

particolare sul numero del 15 maggio di Physical Review (insieme con Podolsky e Rosen – non certo in buona compagnia). Com'è noto, ogni volta che lui fa una cosa del genere succede una catastrofe».

«Pauli», osserva Aczel nel suo *Volume Entanglement*, «era infastidito dal fatto che l'articolo fosse stato pubblicato da una rivista americana, ed era preoccupato che l'opinione pubblica degli Stati Uniti d'America potesse schierarsi contro la Meccanica Quantistica. Sugerì quindi a Heisenberg, il cui Principio di Indeterminazione era l'obiettivo dell'attacco sferrato da Einstein,

Podolsky e Rosen, di formulare una pronta replica.» Werner Heisenberg, però, non seguì il consiglio dell'amico. Come riportato ancora da Aczel, Heisenberg affrontò direttamente Einstein e gli rivolse queste parole: «Hai pubblicamente preso il dogma della Meccanica Quantistica per la gola.»

Niels Bohr – secondo quanto raccontato dal fisico e storico della scienza, Abraham Pais⁸ – ci rimase particolarmente male e decise di abbandonare tutti i progetti che stava portando avanti in quel periodo per preparare una risposta il più esauriente possibile ai dubbi

innescati dal paradosso EPR. In quei giorni, immediatamente successivi al 15 maggio 1935, Léon Rosenfeld si trovava in visita a Copenaghen e venne direttamente coinvolto nel confronto con Bohr. «Che cosa possono voler dire? Tu lo capisci?» chiese Bohr a Rosenfeld prima di cominciare a scrivere il contro-articolo con cui, tre mesi dopo, confutò a propria volta il lavoro di Einstein, Podolsky e Rosen.

Lungo ben sette facciate – quasi il doppio rispetto al testo del paradosso EPR –, il pezzo venne pubblicato ancora una volta su *Physical Review* e, soprattutto, con

l'identico titolo: «Può la descrizione della realtà fisica della Meccanica Quantistica considerarsi completa?»⁹ Al suo interno, dopo aver dichiarato: «Nella 'libertà di scelta' offerta da Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen, siamo semplicemente in presenza di una discriminazione tra differenti procedure sperimentali, il che permette l'uso non ambiguo di concetti classici complementari», Niels Bohr fece la seguente affermazione: «La linea del ragionamento [portato avanti nel paradosso EPR], comunque, non mi sembra adeguata alle situazioni

reali con cui abbiamo a che fare in Fisica Atomica».

Un modo chiaro e diretto per ribadire da un lato la validità della Meccanica Quantistica per i sistemi e le energie di livello atomico e subatomico, e dall'altro che «il paradosso EPR non costituisce una minaccia concreta per l'applicazione della teoria dei quanti ai problemi fisici reali». ¹⁰ Una posizione che venne apertamente condivisa da molti scienziati dell'epoca, ma che Einstein non accettò mai perché, in effetti, non entrava nel cuore del problema: lasciava insoluto il profondo conflitto che era emerso

tra la Fisica Quantistica e la Teoria della Relatività Ristretta.

Oltre ogni ragionevole dubbio

Nel 1935 l'esistenza dell'entanglement era considerata da Albert Einstein, e naturalmente da Boris Podolsky e da Nathan Rosen, come una conseguenza paradossale dell'applicazione della Meccanica Quantistica alla realtà fisica. A quella posizione Niels Bohr replicò riportando l'attenzione degli studiosi sulle situazioni reali osservabili in laboratorio. Come scrisse proprio nell'articolo di replica al paradosso EPR: «Infatti, è un'ovvia conseguenza delle

argomentazioni appena trattate che in ogni dispositivo sperimentale e in ogni procedura di misurazione noi abbiamo solo una libertà di scelta [di questo luogo] all'interno di una regione dove la descrizione quantomeccanica del processo interessato è effettivamente equivalente con la descrizione classica».

Sembra naturale, quindi, che solo l'osservazione fisica dei fenomeni di entanglement abbia potuto mettere definitivamente la parola «fine» a questa lunga disputa. Ma com'è stato possibile verificare sperimentalmente l'esistenza

dell'entanglement? Questa è la domanda che pongo a Giorgio Colangelo, prima di approfondire ulteriormente il discorso e di introdurre i fondamentali contributi di David Bohm e di John Stewart Bell. «Le due particelle entangled ipotizzate da Albert Einstein nel suo articolo sul paradosso EPR sono state prodotte in laboratorio, verificandone così l'esistenza, a partire dagli anni Ottanta del secolo scorso da vari ricercatori. Il primo scienziato che ci riuscì, con il famoso esperimento sulla correlazione quantistica, fu il fisico francese Alain Aspect. Era il 1982 e

Aspect, che poi vinse il Premio Wolf per la fisica nel 2010, lavorava presso i laboratori di Orsay, a Parigi. Da allora, la presenza di entanglement è stata verificata in sistemi di diverso tipo come per esempio fotoni, atomi, molecole e perfino piccoli diamanti.»

E come vengono realizzati concretamente gli esperimenti sulla correlazione quantistica? «Gli esperimenti che consentono di verificarla», continua Giorgio Colangelo, «sono complessi dal punto di vista tecnico ma semplici dal punto di vista concettuale. Per prima cosa dev'essere prodotta la

coppia di particelle. Per la produzione dei fotoni entangled, per esempio, uno dei metodi più comuni consiste nell'utilizzare l'emissione spontanea di due fotoni da parte di un cristallo. Per quanto riguarda la verifica, invece, è necessario procedere in questo modo: due fotoni entangled vengono separati spazialmente, poi si esegue una serie di misure identiche sull'uno e sull'altro, e infine si studiano le correlazioni emerse.

«Per chiarire quest'ultimo concetto si può dire che misurare le correlazioni tra due fotoni è un po'

come tirare due monete. Utilizzando gli strumenti della fisica classica, con il solo lancio di una moneta non abbiamo alcuno strumento che ci permetta di predire il risultato del lancio della seconda. Possiamo solo prevedere che, nel 50 per cento dei casi, otterremo lo stesso risultato. Nella Meccanica Quantistica in presenza di entanglement, invece, questa correlazione va oltre i limiti che ci aspetteremmo classicamente. Quindi, possiamo affermare con sicurezza cosa otterremo dal secondo lancio ancora prima che la moneta cada a

terra!»

Questo tipo di verifica è analoga, dal punto di vista concettuale, alle previsioni – che abbiamo discusso nel Capitolo 3 con Giulio Peruzzi, docente di Storia della Fisica presso l'Università di Padova – relative al collasso della funzione d'onda e al fenomeno della decoerenza. In quel caso, un sistema costituito da un'urna contenente un certo numero di biglie, in parte nere e in parte bianche, poteva essere considerato come una miscela statistica che consente di prevedere la probabilità con cui verrà estratta una biglia nera o una biglia bianca.

Nel caso attuale, invece, possiamo considerare il nostro sistema come composto dalla stessa urna al cui interno, però, si trovano solo due biglie identiche di cui non conosciamo il colore. Quando ne estrarrò una per verificarne il colore, automaticamente verrà determinato anche il colore di quella rimasta all'interno.

«L'eventuale presenza di entanglement», continua Giorgio Colangelo, «può essere verificata anche con una seconda modalità e con un approccio diametralmente opposto a quello delle misure sulle singole particelle. Questo secondo

approccio consiste nella misurazione di quantità macroscopiche – come quelle derivanti per esempio dallo studio di un'intera nube di atomi – per determinare se tra le sue singole componenti, gli atomi, si è instaurato uno stato di entanglement. La particolarità di questa diversa modalità consiste nel fatto che la presenza di entanglement consente di ottenere misure con una precisione senza precedenti. Una precisione che non è possibile ottenere ragionando da un punto di vista classico. I fisici teorici che si occupano di

Metrologia Quantistica lavorano proprio con questo secondo approccio: cercano di dedurre dalle misure del tutto le proprietà delle parti che lo costituiscono.»

Ciò che si conosce, ciò che si riscopre e ciò che si definisce

Come ha affermato Giorgio Colangelo all'inizio di questo capitolo, Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen si sbagliavano: oggi l'entanglement è una realtà accettata – per certi versi familiare – e dalle sconcertanti applicazioni pratiche. Applicazioni che scopriremo assieme tra qualche pagina. Da un punto di vista teorico, però, l'acceso dibattito che si era innescato nel 1935 fra Albert Einstein e Niels Bohr non aveva

condotto a un vero superamento del paradosso EPR. Anzi, quasi quindici anni dopo, nel 1948 e nel 1949, Einstein continuava ancora a ragionare sull'argomento e a produrre scritti che dovevano, a suo avviso, rendere sempre più evidente il fatto che la Meccanica Quantistica fosse una teoria non completa.

Eppure, se ripensiamo a quanto abbiamo discusso nel Capitolo 1, già nell'esperimento di Thomas Young del 1801 si può avere una prima prova dell'esistenza dell'entanglement. La figura di interferenza che si ottiene facendo

passare il raggio luminoso attraverso le due fenditure, infatti, si crea anche quando il fascio è molto debole, cioè da un punto di vista quantistico anche quando sullo schermo arriva un singolo fotone alla volta. «La spiegazione del fenomeno», chiarisce Aczel nel suo libro, «è che il singolo fotone non sceglie affatto una delle due fenditure da attraversare. Passa invece attraverso entrambe, e quindi interferisce con se stesso, come fanno due onde per sovrapposizione. Quando il sistema quantistico contiene più di una particella, il Principio di

Sovrapposizione dà origine al fenomeno dell'entanglement. In questo caso, non abbiamo un'unica particella che interferisce con se stessa ma un sistema che interferisce con se stesso: un sistema entangled.»

Nel convegno sulla coerenza quantistica che si svolse nel 1989 presso la University of South Carolina, nella città americana di Columbia, i ricercatori Michael A. Horne, Abner Shimony e Anton Zeilinger proposero¹¹ l'ipotesi che Erwin Schrödinger avesse già intuito in una serie di articoli scritti nel 1926 come lo stato di un sistema di

particelle potesse essere entangled. «Abbiamo ripetutamente posto l'accento», scrive proprio Schrödinger, «sul fatto che la funzione Ψ non può e non potrà essere interpretata direttamente nei termini dello spazio tridimensionale – per quanto il problema a un elettrone, su questo punto, tenda a portarci fuori strada – perché è in generale una funzione nello spazio delle configurazioni, non nello spazio reale.»¹²

Prima di proseguire nel ragionamento, chiariamo cosa significhi la definizione di spazio delle configurazioni. Con questa

espressione, viene indicato un sistema avente un numero di «coordinate generalizzate» almeno pari ai gradi di libertà del sistema stesso. A prima vista, può sembrare un qualcosa di astratto o di incomprensibile, ma basta un semplice esempio per dargli immediatamente una connotazione pratica. Se il mio sistema è composto da un numero n di particelle che si muovono in uno spazio a D dimensioni, allora lo spazio delle configurazioni avrà $2n \cdot D$ gradi di libertà, quindi almeno lo stesso numero di coordinate generalizzate.

Affermare che la funzione d'onda appartiene allo spazio delle configurazioni e non allo spazio tridimensionale implica direttamente che abbia caratteristiche proprie dell'entanglement. Infatti, fu proprio Erwin Schrödinger, nel 1935, a battezzare¹³ il fenomeno con questo nome in un articolo di risposta al paradosso EPR: «Quando due sistemi, dei quali conosciamo gli stati sulla base della rispettiva rappresentazione, subiscono una interazione fisica temporanea dovuta a forze note che agiscono tra di loro, e quando, dopo un certo

periodo di mutua interazione, i sistemi si separano nuovamente, non possiamo più descriverli come prima dell'interazione, cioè dotando ognuno di loro di una propria rappresentazione. Non chiamerei questo [fenomeno, l'entanglement] un tratto ma il tratto distintivo della Meccanica Quantistica». ¹⁴

Alla ricerca dell'errore

Nel 1952, a quasi diciassette anni di distanza dalla pubblicazione del primo articolo «Può la descrizione della realtà fisica della Meccanica Quantistica considerarsi completa?», il trentacinquenne fisico teorico David Bohm, che lavorava a Princeton, decise di cambiare il punto di vista proposto dal paradosso EPR. Bohm, che possedeva un forte approccio filosofico, stava cercando di rendere le dinamiche intrinseche all'articolo di Einstein, Podolsky e Rosen più evidenti e soprattutto semplici da comprendere e da analizzare. Per

questo motivo, invece di osservare come si comportavano le due variabili coniugate della velocità e della quantità di moto, decise di riformulare l'esperimento mentale proposto nel 1935 considerando sempre due particelle coinvolte ma valutandone un unico parametro: lo spin.

Lo spin – che abbiamo già introdotto nel Capitolo 3 – è il quarto numero quantico che permette di identificare univocamente gli elettroni di un atomo. Dal Principio di Esclusione di Pauli deriva che una particella con spin $1/2$ può avere solo due valori

di spin. Valori pari, rispettivamente, a $-1/2$ e a $+1/2$. Se scegliamo un sistema di riferimento – cioè un sistema di coordinate cartesiane, anche detti assi cartesiani – e osserviamo quella particella che si muove al suo interno lungo una direzione privilegiata dello spazio, quando andiamo a misurare la proiezione del suo spin lungo quella stessa direzione potremo ottenere solo due possibili risultati. Nel primo, troveremo lo spin come se fosse idealmente rivolto verso l'alto. Nel secondo, al contrario, come se fosse idealmente rivolto verso il basso. Queste due configurazioni

prendono rispettivamente il nome di spin up, spin su o spin alto, e di spin down, spin giù o spin basso.

Se due particelle vengono preparate come un sistema con spin totale uguale a 0, risultano entangled e si viene a creare un particolare stato fisico chiamato singoletto. Dato che lo spin può avere solo i valori $-1/2$ e $+1/2$, per ottenere un valore totale pari a 0 gli spin delle due particelle devono essere rivolti in direzione opposta tra loro. Gli spin posseduti dalle due particelle in entanglement, quindi, sono intrinsecamente correlati: se quello della prima è up, quello della

seconda particella dovrà necessariamente essere down. Ma c'è di più: lo spin è una proprietà quantistica e quindi può essere considerato «definito» solo dopo essere stato misurato. Usando una terminologia un po' più precisa, possiamo dire che per sapere se lo spin è up o down, dobbiamo «attualizzarlo» tramite una misurazione.

Quando il singoletto è composto da due particelle vicine fra loro, l'esistenza di un'influenza reciproca è intuitivamente comprensibile. Questa influenza fa sì che, se misuriamo lo spin della prima

particella e lo troviamo in up, quello della seconda particella risulterà contemporaneamente attualizzato in down, e viceversa. Ma quando le due particelle, pur formando un singoletto, sono poste a distanza enorme l'una dall'altra, cosa succede alla loro influenza reciproca? Bene, questo era proprio l'aspetto del problema su cui David Bohm voleva ragionare quando propose il proprio esperimento mentale!

Il 7 giugno 2017 ero fra i partecipanti a un'interessante conferenza tenuta proprio da Federico Carminati e da Giuliana

Galli Carminati. L'incontro, organizzato dall'Università di Padova all'interno di una serie di incontri dal contenuto interdisciplinare, affrontava anche il tema dell'esperimento mentale di Bohm negli stessi termini della sua formulazione originale. Ho deciso, quindi, di chiedere a Federico Carminati di riproporre in questo volume le considerazioni che aveva espresso in quell'occasione.

«Prendiamo Bob e Alice, che sono due fisici e fanno un esperimento», spiega Federico Carminati. «Bob e Alice si mettono a qualche anno luce di distanza

l'uno dall'altro e hanno lo stesso rilevatore. Poi prendiamo un atomo, lo mettiamo al centro in modo che sia equidistante dai due fisici, e aspettiamo che si disintegri emettendo due elettroni. Questi due elettroni viaggeranno in direzione opposta fino a raggiungere i rilevatori di Bob e di Alice.

«Per come è costruito il nostro esperimento – a causa dei principi fisici di conservazione – l'atomo può emettere solo o un elettrone con spin up e l'altro elettrone con spin down oppure, viceversa, un elettrone con spin down e l'altro

con spin up. Grazie al Principio di Sovrapposizione della Meccanica Quantistica, però, quando vengono emessi i due elettroni, entrambi hanno contemporaneamente sia spin up sia spin down. Quindi, Bob e Alice ricevono nello stesso momento uno dei due elettroni risultanti dalla disintegrazione dell'atomo con entrambi gli stati di spin sovrapposti fra loro. Ma cosa succede se Bob misura lo spin dell'elettrone che ha ricevuto? Se supponiamo che dalla misurazione risulti che l'elettrone ha lo spin nello stato up, allora Alice dovrà aver ricevuto per forza l'elettrone con lo

spin nello stato down. E questo è proprio il risultato che otterrà Alice quando controllerà il proprio rilevatore! Naturalmente, tutto quello che ho appena detto varrà anche, al contrario, nel caso in cui lo stato dello spin dell'elettrone misurato da Bob fosse risultato down.

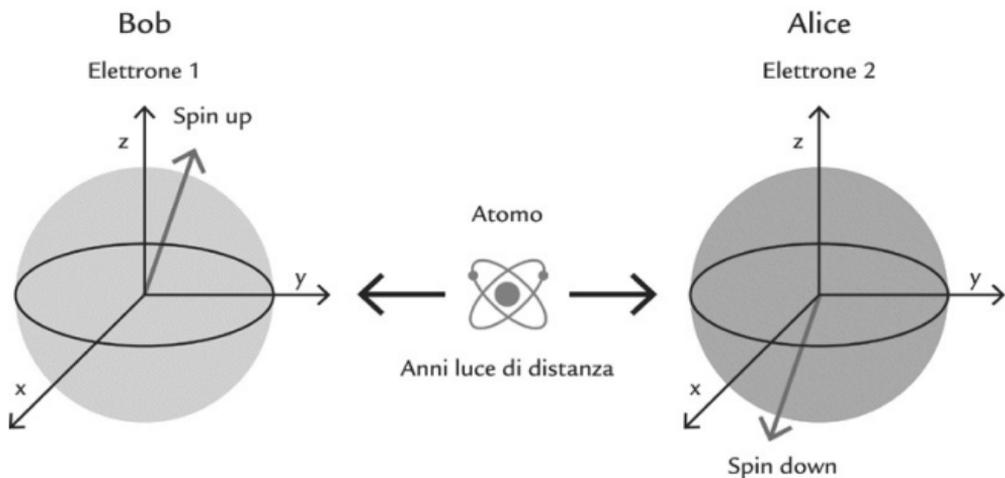


Figura 16. L'Esperimento mentale di David Bohm.

«C'è di più. Il risultato di Alice sarà lo stesso anche nel caso in cui Alice decidesse di non verificare lo spin dell'elettrone che è arrivato sul proprio rilevatore. La cosa sorprendente, in questo caso, è che non ci può essere nessuna comunicazione fra Bob e Alice perché sappiamo che la velocità massima raggiungibile è quella della luce, mentre quando eseguono le rispettive misurazioni – che avvengono in contemporanea –

i due fisici si trovano a qualche anno luce di distanza fra loro. È come se ci fosse un'intricazione fra le due particelle che fa sì che quando una viene scoperta in uno stato l'altra, immediatamente, si mostri nello stato complementare. Questa intricazione quantistica, questo entanglement, è indipendente dal tempo, dalla distanza, dallo spazio... e così via!»

La domanda che nasce spontanea, a questo punto, è come sia possibile che ciò avvenga. Com'è possibile che esista una correlazione così forte fra due particelle che vada al di là di tutte

le logiche e che costituisca, proprio in quanto verificabile sperimentalmente, un paradosso apparentemente insanabile? «La soluzione sta in una definizione», chiarisce Federico Carminati, «quella di non-locale. Si dice che questo tipo di effetto è non-locale. Contraddice, è vero, la nostra intuizione, ma la teoria rimane coerente: non entra, quindi, in contraddizione con se stessa.»

Un altro punto di partenza

Affermare che l'entanglement sia un effetto non-locale comporta di fatto il decadere del Principio di Località: uno dei tre principi che abbiamo visto costituire il fondamento del ragionamento di Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen. Cadendo il Principio di Località, dovrebbe cadere di conseguenza anche lo stesso paradosso EPR... Ma è davvero tutto qui? In realtà, la riflessione è molto più articolata e dobbiamo ancora analizzare il contributo che vi apporterà John Stewart Bell nel 1964. Prima, infatti, è necessario ritornare al

lavoro di David Bohm e alla sua personale interpretazione della Fisica Quantistica.

Sempre nel 1952, infatti, David Bohm pubblicò due fondamentali articoli¹⁵ dedicati a quest'ultimo argomento. Nel titolo dei due scritti, mandati in lettura alla Physical Review l'anno prima, Bohm citava esplicitamente l'espressione «variabili nascoste» per indicare come – posizione condivisa anche da altri studiosi – dal suo punto di vista fosse necessario tenere in considerazione qualche altra variabile, evidentemente sconosciuta, per riuscire ad arrivare

a una formulazione coerente della Meccanica Quantistica. Il problema principale da risolvere, come abbiamo appena visto, era quello della non-località di alcune relazioni esistenti fra le particelle. Relazioni che producevano, come nel caso dell'entanglement, il superamento del Principio di Causalità, o comunque almeno quello del limite della velocità della luce.

Come base per il proprio ragionamento, Bohm riprese l'ipotesi originariamente introdotta da Louis de Broglie delle onde pilota, ipotesi che vede associata a ogni particella un'onda che ne

indirizza il movimento. Le onde pilota vengono descritte fisicamente dalla funzione d'onda Ψ della Meccanica Quantistica – quindi evolvono in accordo con l'equazione di Schrödinger – con l'aggiunta di un fattore di correzione dovuto all'influenza che esse esercitano sul moto delle particelle. Nell'Interpretazione di Bohm, le particelle hanno sempre posizioni ben definite e vengono guidate dalle rispettive onde pilota tramite quello che lui stesso chiama un «potenziale quantistico». L'azione del potenziale quantistico sulla particella, infine, avviene

analogamente alle interazioni fra i campi e le particelle nella fisica classica.

Ecco cosa scrive al riguardo lo stesso Bohm, nel 1952: «Poiché la forza che agisce su di una particella ora dipende da una funzione del valore assoluto della funzione d'onda Ψ , valutata nell'attuale posizione della particella, siamo effettivamente portati a considerare la forma d'onda di un elettrone individuale come una rappresentazione matematica di un campo oggettivamente reale. Questo campo esercita una forza su di una particella in un modo

analogo, ma non identico, al modo in cui un campo elettromagnetico esercita una forza su di una carica». Il campo a cui si riferisce è il potenziale quantistico.

L'Interpretazione di Bohm aggiunge un carattere deterministico all'intera Teoria Quantistica, perché le onde pilota evolvono nel tempo e quindi non c'è più bisogno di ricorrere al collasso della funzione d'onda per spiegare i risultati degli esperimenti. Facciamo un esempio pratico prendendo nuovamente in considerazione l'esperimento di Thomas Young. Applicando quanto appena detto, i

fotoni passano solo attraverso l'una o l'altra delle due fenditure non sulla base di un comportamento probabilistico bensì guidati in maniera deterministica dalle rispettive onde pilota. Queste ultime, poi, passano attraverso entrambe le fenditure – data la loro natura ondulatoria – generando così la figura di interferenza.

C'è da aggiungere che l'Interpretazione di Bohm non venne particolarmente apprezzata dai suoi contemporanei che, invece, sostenevano l'Interpretazione di Copenaghen. Julius Robert Oppenheimer – noto più per la sua

partecipazione al Progetto Manhattan¹⁶ che per il fondamentale contributo che seppe dare alla Fisica Quantistica – disse lapidariamente: «Noi non dobbiamo confutare Bohm, noi dobbiamo ignorarlo». Anche Léon Rosenfeld, si esprese in termini simili: «Veramente ingegnosa, ma sostanzialmente sbagliata». Wolfgang Pauli, infine, con il suo consueto approccio sentenziò: «Semplicemente folle... oltre ogni possibile tentativo di aiuto».

Al di là di queste opinioni negative e dei pareri positivi che, invece, riuscì a raccogliere – e che

tuttora gli vengono tributati –, il lavoro di Bohm gettò le basi sia per le ricerche congiunte dello stesso Bohm e del fisico israeliano Yakir Aharonov,¹⁷ del Technion di Haifa, sia per lo sviluppo delle intuizioni di John Stewart Bell. Le prime portarono, nel 1957, alla dimostrazione teorica che l'entanglement era un fenomeno reale e che non scompariva all'aumentare della distanza esistente fra le particelle entangled. Le seconde, nel 1964, condussero alla formulazione di un teorema – il Teorema di Bell – che consentì, pochi anni dopo, di progettare degli

esperimenti
finalmente
l'esistenza.

che
a

riuscirono
dimostrarne

Una conclusione imprevedibile

Mentre David Bohm e Yakir Aharonov proseguivano i propri studi, nel 1964 il trentaseienne irlandese John Stewart Bell si interrogava sulle implicazioni dell'Interpretazione di Bohm della Meccanica Quantistica, e in particolare proprio sul problema dell'entanglement. Bell, che era nato a Belfast nel 1928, era convinto che il paradosso EPR costituisse qualcosa di ben diverso dalla semplice dimostrazione di un errore di Einstein: una vera e

propria chiave per la comprensione dell'universo. L'obiettivo che Bell si stava ponendo era quello di trovare una sintesi fra la Meccanica Quantistica e la Relatività Generale.

«Per me, quindi, questo è il vero problema della teoria dei quanti: il conflitto apparentemente insolubile tra qualsiasi sua formulazione precisa e i fondamenti della Relatività. Può darsi che una vera sintesi tra la teoria dei quanti e la Relatività richieda non solo sviluppi tecnici, ma anche un radicale rinnovamento a livello concettuale.» Così scriveva Bell mentre si trovava in congedo dal

proprio lavoro al CERN e contemporaneamente preparava l'articolo dal titolo «Sul Paradosso di Einstein Podolsky Rosen»,¹⁸ che sarebbe uscito nel 1964.

«Si è consolidata l'idea che il paradosso di Einstein, Podolsky e Rosen costituisca un'argomentazione per dimostrare che la Meccanica Quantistica non è una teoria completa e che dovrebbe essere integrata con delle variabili aggiuntive», scrive ancora John Stewart Bell nella sua introduzione all'articolo. «Queste variabili aggiuntive servirebbero per ripristinare il Principio di Causalità e

il Principio di Località. Nella presente nota, questa idea verrà formulata matematicamente e verrà dimostrato che è incompatibile con le previsioni statistiche della Meccanica Quantistica. È il requisito della località – più precisamente, che il risultato di una misura eseguita sul sistema non risulti influenzato dalle operazioni eseguite su un ulteriore e distante sistema con cui il primo ha interagito nel passato – a creare la principale difficoltà. Sono stati fatti tentativi per dimostrare che anche senza tale separabilità e senza il requisito della località, non

è possibile fornire un'interpretazione a 'variabili nascoste' della Meccanica Quantistica. [...] Inoltre, un'interpretazione a 'variabili nascoste' della Teoria Quantistica elementare è stata esplicitamente costruita [da Bohm]. Questa particolare interpretazione ha un'evidente struttura non-locale. Caratteristica, in accordo con i risultati che intendo dimostrare [in questo articolo], di qualsiasi teoria che riproduca esattamente le previsioni della Meccanica Quantistica.»

Quindi, Bell era riuscito a entrare

nelle logiche più profonde del paradosso EPR e vi aveva scoperto che i principi della Completezza della Meccanica Quantistica, da un lato, e quelli del Principio di Realtà e del Principio di Azione Locale, dall'altro, non potevano essere entrambi corretti. Come sintetizza Amir Dan Aczel: «Se la teoria dei quanti era corretta, allora non lo era la località; se invece si cercava di salvaguardare la località, allora ci doveva essere qualcosa di sbagliato nella descrizione data dalla Meccanica Quantistica del mondo del molto piccolo. Bell buttò giù questa conclusione nella forma di

un teorema matematico molto profondo, che conteneva alcune disuguaglianze.

«Suggerì che se le sue disuguaglianze fossero state violate dai risultati dei controlli sperimentali, tale violazione avrebbe fornito evidenze a favore della Meccanica Quantistica e contro le assunzioni di senso comune sul realismo locale avanzate a suo tempo da Einstein. Se le disuguaglianze, viceversa, fossero state rispettate, allora i controlli avrebbero fornito una prova che la teoria dei quanti era sbagliata e che la località – come la

intendeva Einstein – era il giusto punto di vista. Più precisamente, è possibile violare sia le disuguaglianze di Bell sia le predizioni della teoria dei quanti; ma risulta impossibile rispettare sia le disuguaglianze di Bell sia le predizioni della Meccanica Quantistica per certi stati quantistici».

Ecco quel «qualcosa in più» – rispetto alle sole considerazioni sulla non-località – di cui avevo preannunciato l'esistenza qualche pagina fa. Grazie al Teorema di Bell, e alle disuguaglianze di Bell che lo esplicitano, era finalmente

possibile dimostrare che nessuna teoria a «variabili nascoste» e nessun postulato di località avrebbero mai avuto alcun ruolo all'interno della Meccanica Quantistica. Una base teorica solida e concreta che avrebbe poi permesso ad Alain Aspect e agli altri ricercatori, di ottenere la prima evidenza sperimentale dell'entanglement nel 1982.¹⁹

Panorami concreti

Dal 1982 a oggi sono stati fatti enormi passi avanti nella comprensione dell'entanglement e nello studio delle sue possibili applicazioni. Affronto questo argomento con Giorgio Colangelo, che vi si sta dedicando con passione nella sua carriera da ricercatore. «Personalmente credo che l'entanglement sia un fenomeno molto affascinante che va al di là della nostra immaginazione. Non ha forse un aspetto anche 'mistico' il fatto che due particelle entangled, dopo essere state create, possano rimanere collegate – meglio,

intricate – fra loro, in linea di principio, a una qualsiasi distanza?»

Concordo pienamente. Tra l'altro, ci sono anche numerose applicazioni pratiche di questo fenomeno. «L'entanglement, per esempio, è una caratteristica essenziale che consente di ottenere misure di alta precisione. Una precisione che va al di là di quella definita dai limiti classici. Ecco perché la Metrologia Quantistica, fra le altre cose, sta cercando di utilizzare il fenomeno dell'entanglement per migliorare gli attuali strumenti di misura. Proprio grazie all'entanglement, inoltre, è

possibile realizzare computer quantistici o perfezionare gli orologi atomici che sincronizzano i GPS di tutto il mondo e che definiscono, in maniera precisa e affidabile, gli standard del tempo.

«Un'ulteriore applicazione dell'entanglement», continua Giorgio Colangelo, «riguarda la Criptografia Quantistica. In parole semplici, l'idea consiste nell'utilizzare i fotoni entangled per trasportare le informazioni, come già avviene attualmente per i normali fotoni che consentono di accedere a Internet attraverso le fibre ottiche. Il vantaggio di farlo

con fotoni entangled è che sono al sicuro da possibili attacchi di malintenzionati e di pirati informatici. Grazie alla Criptografia Quantistica, per esempio, posso inviare la chiave per decifrare un messaggio criptato usando due canali di fotoni entangled. Se un cracker – termine con cui si indicano i pirati informatici – cercasse di intercettare uno dei due canali, istantaneamente si verificherebbe una ripercussione nell'altro canale che modificherebbe la chiave rendendola inutilizzabile. In questo modo, l'attacco verrebbe immediatamente vanificato e il

malintenzionato non avrebbe alcuna possibilità di riuscire a decifrare il messaggio.»²⁰

Il grande entusiasmo suscitato da queste possibilità viene addirittura superato dalle incredibili prospettive legate a un'ulteriore, sconvolgente, frontiera che l'entanglement ha già consentito di abbattere: il teletrasporto delle particelle. In realtà esiste un'enorme differenza fra il teletrasporto così come viene inteso nell'immaginario collettivo e il fenomeno fisico realizzato in laboratorio. Per chiarire al meglio questi concetti, chiedo a Giorgio

Colangelo qual è lo stato attuale delle tecnologie per il teletrasporto e se pensa che in futuro sarà possibile applicarle anche a molecole o a strutture biologiche.

«Prima di rispondere, devo fare una precisazione: con la parola 'teletrasporto' gli scienziati non si riferiscono a quel teletrasporto che ci viene in mente quando pensiamo ai classici della fantascienza e in particolare a Star Trek. Per noi fisici, teletrasportare una particella vuol dire riuscire ad avere una copia esatta di quella stessa particella in qualche altro luogo. Per essere ancora più chiari, non significa

avere un trasporto fisico della particella, come si crede nella cultura popolare, bensì solamente della sua informazione.

«Nel caso di particelle entangled, il teletrasporto è quasi una conseguenza diretta: le due particelle sono identiche – sono state prodotte così – e ognuna risponde istantaneamente alle sollecitazioni che le derivano dall'altra pur essendo materialmente in un posto diverso. In questo senso, posso sicuramente affermare che la prima particella corrisponde a una copia identica della seconda che, però, si trova da

qualche altra parte. Naturalmente questa riflessione vale anche per la seconda particella che corrisponde alla copia identica, in una differente posizione, della prima. Il teletrasporto di atomi è già una realtà da alcuni anni, e si riesce a teletrasportare l'informazione tra intere nubi di atomi a distanza di oltre 100 metri.»

Nel 2012, per la prima volta, un gruppo di ricercatori coordinato da Jian-Wei Pan dell'Hefei National Laboratory for Physical Sciences at the Microscale, della University of Science and Technology of China e dell'Università di Heidelberg, è

infatti riuscito a realizzare il teletrasporto quantistico di un gruppo di 100 milioni di atomi di rubidio della dimensione di circa due millimetri.²¹ Un risultato inimmaginabile solo qualche anno prima e che ha aperto la strada alla ricerca di nuove tecnologie per la memorizzazione dei dati all'interno dei computer quantistici.

«Nei prossimi anni», riprende Giorgio Colangelo, «vedremo realizzare teletrasporti di strutture sempre più grandi a distanze sempre maggiori. Comunque, i limiti di questa tecnologia rimangono dato che con le attuali

competenze tecniche è impossibile estendere questo concetto a strutture di grandezza arbitraria. Riuscire a teletrasportare l'informazione presuppone l'esistenza dell'entanglement, e realizzare un entanglement diventa sempre più difficile a mano a mano che aumenta la dimensione del sistema su cui si desidera realizzarlo. Concretamente, andrebbero sviluppate delle nuove tecnologie per produrre un entanglement su sistemi grandi e soprattutto delle nuove modalità per manipolarlo efficacemente. Le tecniche che esistono in questo

momento vengono implementate sempre più frequentemente su sistemi a scala maggiore, ma non possono essere adoperate su sistemi di complessità elevata.» E con la definizione di sistemi di elevata complessità, naturalmente, si fa riferimento anche ai sistemi biologici.

C'è ancora un'ultima domanda che desidero rivolgere a Giorgio Colangelo, e riguarda gli obiettivi che si sta ponendo attualmente la ricerca sull'entanglement. «L'entanglement viene già applicato con successo nei vari campi nei quali sono necessarie sensibilità

degli strumenti di misura non ottenibili classicamente. Oltre alle applicazioni che ho già descritto poco fa, credo che la tendenza delle attuali ricerche nel campo dell'entanglement sia quella di osservarlo su scala sempre più grande. Inizialmente, l'entanglement è stato osservato per coppie di particelle, poi per gruppi di elementi sempre più numerosi.

«Per fare un esempio concreto, qualche anno fa, con dei colleghi, abbiamo dimostrato l'esistenza di entanglement su mezzo milione di atomi.²² Recentemente, invece, è

stato pubblicato uno studio dove si osserva l'entanglement su diversi milioni di atomi. Come si può intuire, stiamo spostandoci sempre di più verso il mondo macroscopico: il mondo con cui siamo abituati a confrontarci quotidianamente e che, per abitudine, crediamo che sia regolato solo dalle leggi della fisica classica. Credo che esplorare questo regime intermedio – già macroscopico ma dov'è ancora possibile osservare fenomeni quantistici – possa riservare grandi sorprese, sia dal punto di vista scientifico sia da quello filosofico.»

PARTE TERZA

Dove ci si interroga sulla
realtà

Guarire con i quanti

Ovvero, tra quanti, molecole ed energie

Cosa c'è dietro? La Meccanica Quantistica rappresenta un fondamentale tassello nella comprensione dei fenomeni naturali e in particolare di quelli legati alla chimica e alle proprietà delle sostanze. Un tassello soltanto, però, nel complesso mosaico dello studio di tutte le grandezze fisiche e delle loro interazioni reciproche. E quando si comincia a ragionare nuovamente sulla luce, sugli elettroni e sui campi elettromagnetici nasce il bisogno di una nuova teoria: la QED, Quantum

Electro-Dynamics – l'Elettrodinamica
Quantistica.

Perché è importante? Perché l'Elettrodinamica Quantistica è una teoria in grado di descrivere con precisione la maggior parte dei fenomeni fisici. Anzi, può descriverli tutti alla perfezione tranne due: la forza di gravità e la radioattività. Inoltre, negli ultimi anni, i principi della QED hanno trovato applicazioni pratiche anche nel campo della medicina aprendo innovativi scenari e consentendo lo sviluppo di nuove metodologie di cura.

GIUNTI alla terza parte del libro è arrivato il momento di affrontare alcuni temi scottanti e di attualità:

quelli legati alle applicazioni della Fisica Quantistica nei campi della medicina e delle neuroscienze. Gli argomenti da trattare in entrambi gli ambiti sarebbero numerosi; per le finalità di questo volume, però, ritengo che convenga concentrare la nostra attenzione sulle tematiche più generali, in particolare, sulla QED – l'Elettrodinamica Quantistica – e sulla cosiddetta Mente Quantica. Ci saranno, comunque, anche delle digressioni legate ai temi dell'acqua e dei suoi strani e peculiari comportamenti. Proprio all'acqua, infatti, sarà interamente dedicato il Capitolo 9.

Poiché alcune delle teorie che verranno presentate nelle prossime pagine sono attualmente in fase di studio, in questo momento potrebbero non essere completamente condivise da tutti i fisici e dalle altre figure professionali che se ne occupano. Muovendomi quindi su un terreno potenzialmente minato, cercherò di far parlare il più possibile gli stessi protagonisti delle ricerche che verranno di volta in volta presentate; posizione, questa, che mi consentirà di illustrare i diversi punti di vista in modo imparziale e di fornire a tutti voi che mi state

leggendo un quadro il più possibile completo ed esauriente sui vari, affascinanti, temi trattati.

D'altronde, la Fisica Quantistica ha sempre suscitato sentimenti e prese di posizione anche molto differenti fra loro, tra gli stessi scienziati che se ne sono occupati e che se ne occupano tuttora. Prese di posizione, come quella di Richard Phillips Feynman, talmente forti e dirompenti da costituire, di fatto, il fondamento per una nuova riflessione sulla realtà. «Io descriverò il comportamento della Natura ma se a voi questo comportamento non piace, il vostro

processo di comprensione ne risulterà intralciato. I fisici hanno imparato a convivere con questo problema: hanno, cioè, capito che il punto essenziale non è se una teoria piaccia o non piaccia, ma se fornisca previsioni in accordo con gli esperimenti. La ricchezza filosofica, la facilità, la ragionevolezza di una teoria sono tutte cose che non interessano. Dal punto di vista del buon senso l'Elettrodinamica Quantistica descrive una natura assurda. Tuttavia è in perfetto accordo con i dati sperimentali. Mi auguro quindi che riuscirete ad accettare la Natura per quello che

è: assurda.»¹

Queste parole sono state scritte proprio da Feynman – uno dei tre padri dell'Elettrodinamica Quantistica, insieme a Julian Schwinger e Sin-Itiro Tomogana² – come introduzione a uno dei volumi divulgativi più interessanti mai pubblicati nell'ambito della Teoria Quantistica: QED – La strana teoria della luce e della materia. Parole che a distanza di oltre trent'anni dalla prima pubblicazione di quel testo, colpiscono ancora nel segno. Ma cos'è esattamente l'Elettrodinamica Quantistica? Perché questa teoria – e in

generale, tutta la Teoria Quantistica – fornisce una rappresentazione «assurda» della Natura, così come ci tiene a precisare Feynman? È un'affermazione che dovrebbe essere inquadrata solo sulla base delle riflessioni generali già emerse all'interno dei capitoli iniziali di questo volume o c'è qualche altro aspetto, qualche altro elemento, che dovrebbe essere considerato?

Partiamo dalla definizione generale: la QED è una teoria fondamentale della Fisica Quantistica che descrive come avvengono le interazioni fra le

particelle cariche e il campo elettromagnetico. Tutto qui, almeno apparentemente. In realtà, nei termini «interazioni» e «campo elettromagnetico» si annidano vari livelli di significato, e soprattutto logiche che esulano da ciò che la maggior parte di noi è abituata a riconoscere. Il principale problema – o meglio, la principale particolarità – delle interazioni considerate dal punto di vista quantistico ci viene spiegato dallo stesso Feynman prendendo come spunto per il proprio ragionamento l'esperimento della riflessione dei fotoni sul vetro, riflessione che si

verifica, in media, il 4 per cento delle volte.

«Abbiamo un bel lambiccarci il cervello per inventare una teoria ragionevole che spieghi come fa un fotone a 'decidere' se attraversare il vetro o rimbalzare su di esso: è impossibile prevedere cosa farà il singolo fotone. Alcuni filosofi hanno sostenuto che se le stesse circostanze non producono sempre lo stesso effetto, le previsioni risultano impossibili e la scienza stessa viene a crollare. Qui ci troviamo proprio di fronte a un caso del genere: la situazione è sempre la stessa (fotoni identici che

incidono tutti nella stessa direzione sullo stesso pezzo di vetro), ma i risultati sono variabili. [...] Bisogna concluderne che la fisica, scienza profondamente esatta, è ridotta a calcolare la sola probabilità di un evento, invece di prevedere che cosa accade in ciascun caso singolo? Ebbene, sì. È un ripiegamento, ma le cose stanno proprio così: la Natura ci permette di calcolare soltanto delle probabilità. Con tutto ciò la scienza è ancora in piedi.»³

È un'affermazione che non lascia adito a dubbi: le interazioni in ambito quantistico evidenziano,

come lo ha definito Feynman, un comportamento assurdo della natura. Un comportamento che può essere studiato e analizzato solo in termini probabilistici e che va ad aggiungersi alle altre considerazioni già fatte sui fenomeni che coinvolgono la materia, la radiazione e le interazioni reciproche, quando ci troviamo a lavorare in una scala atomica o subatomica.

Anche in relazione a ciò che implica la definizione di campo elettromagnetico occorre approfondire la nostra riflessione. Riprendendo la parte finale della

citazione di Albert Einstein che ho proposto nel Capitolo 3, scopriamo che: «Nella Meccanica Quantistica, la rappresentazione della realtà non è così facile. Alla domanda se una funzione ψ della Teoria Quantistica rappresenti una situazione reale effettiva, nel senso valido per un sistema di punti materiali o per un campo elettromagnetico, si esita a rispondere con un semplice 'sì' o 'no'. Perché?»⁴

Un dubbio legittimo, legato alla stessa struttura quantistica della materia, che implica un radicale ripensamento di tutto ciò che viene considerato come reale.

Viaggio al centro di noi

Ma c'è ancora un ulteriore aspetto che deve essere considerato quando spostiamo la nostra attenzione dall'ambito della fisica a quello della medicina. Particelle cariche e campi elettromagnetici, infatti, non sono solo termini scientifici che fanno riferimento alle teorie e alle logiche che abbiamo imparato a conoscere in questo volume: sono parte di noi, del nostro stesso corpo. Da quest'ultimo punto di vista, l'Elettrodinamica Quantistica può essere considerata uno strumento indispensabile per investigare e

trattare anche i fenomeni chimici e biologici.

Scriva ancora Feynman: «La Teoria Quantistica ha permesso di spiegare un'infinità di particolari, ad esempio perché un atomo di ossigeno si combina con due di idrogeno per formare l'acqua e così via. La Meccanica Quantistica ha dunque fornito la teoria che sottostà alla chimica sicché si può dire che la chimica teorica fondamentale è in realtà un aspetto della fisica».⁵ Mettere nella giusta relazione fra loro Fisica Quantistica, chimica e biologia, diventa quindi il mezzo necessario per ogni

successiva considerazione. Un mezzo fondamentale per riuscire a muoversi con sicurezza nell'ambito della medicina e dei suoi futuri sviluppi.

Per affrontare questo appassionante aspetto della Fisica Quantistica ho deciso di confrontarmi con alcuni fra i principali scienziati che vi si stanno dedicando: Piergiorgio Spaggiari, autore insieme a Caterina Tribbia, del volume *Medicina Quantistica*,⁶ e Roberto Germano, fisico della materia. È proprio a Piergiorgio Spaggiari – che oltre ad aver conseguito due lauree, una in Fisica

e una in Medicina e Chirurgia, è stato Assistente del Presidente del CNR, il Consiglio Nazionale delle Ricerche, e ricercatore presso l'Istituto di Tecnologie Biomediche Avanzate, sempre del CNR – che pongo la mia prima domanda: che relazione c'è tra la QED e la biologia?

«È opinione diffusa che la dinamica biologica sia interamente dominata da meccanismi chimici, da eventi molecolari che si susseguono in modo ordinato nel tempo e nello spazio.» Risponde Piergiorgio Spaggiari. «Sono stati messi in evidenza codici di riconoscimento

tra le molecole – il primo è stato quello fra le basi del DNA e gli amminoacidi – che mostrano come nella materia vivente le molecole non interagiscono a caso bensì secondo 'pattern', ovvero schemi ben definiti. Ci si chiede, allora, quale possa essere il meccanismo fisico che agisce a lunga distanza tra le molecole: il meccanismo che permette loro di arrivare a colpo sicuro, senza mai sbagliare, nell'esatto momento e nell'esatto luogo dove verrà poi realizzata l'interazione chimica. La risposta più corretta a questa domanda appare essere il campo elettromagnetico. È

proprio il campo elettromagnetico, infatti, che è capace sia di interagire con le molecole sia di operare a grande distanza.»

Si può, quindi, desumere che esista una connessione diretta fra elettromagnetismo e interazione chimica, e che di conseguenza l'Elettrodinamica Quantistica può avere un ruolo nello studio e persino nella trattazione delle patologie? «L'esistenza dei codici di riconoscimento tra le molecole», riprende Piergiorgio Spaggiari, «implica l'esistenza di un livello elettromagnetico della materia vivente. Livello elettromagnetico

che dialoga con il livello chimico, assicurando così che il traffico delle molecole sia ben ordinato. La patologia, che in prima istanza appare come una anomalia della struttura molecolare del corpo, rimanda in seconda istanza a un disturbo nella rete elettromagnetica di controllo del traffico molecolare. Diventa quindi possibile assumere due attitudini terapeutiche differenti:

- intervenire direttamente sul livello chimico dell'organismo, fornendo le sostanze chimiche necessarie per rimuovere l'anomalia manifestata nella

struttura molecolare;

- intervenire sul livello elettromagnetico rimuovendo il disturbo che sconvolge il traffico molecolare.

«In questo secondo caso, sulla base delle considerazioni che abbiamo appena fatto, possiamo riuscire a definire lo stesso concetto di Medicina Quantistica.»

Un nuovo approccio alla medicina, mediato dalla Fisica Quantistica e in particolare dalla QED, può consentire il trattamento delle patologie su una base elettromagnetica, amplificando gli eventuali trattamenti farmacologici

e fisioterapici già somministrati ai pazienti. È un'idea innovativa che, secondo Piergiorgio Spaggiari, va nella stessa direzione dell'evoluzione della scienza. «La conoscenza ha fatto un enorme progresso con la nascita della scienza moderna, ovvero con il passaggio da una visione descrittiva a una visione 'dinamica' della natura. Si è passati dal descrivere un dato fenomeno al definire le leggi che conducono alla formazione del fenomeno stesso.

«Prendiamo per esempio un gatto. La biologia moderna studia e determina la sua composizione: gli

organi, le cellule, le molecole, il DNA, le proteine, gli atomi e così via. Tutti questi elementi – e noi sappiamo perfettamente quanti e quali sono – ‘compongono’ un gatto ma non ‘rappresentano’ il gatto. Come possiamo ricostruire il nostro gatto rimettendo al posto giusto tutti i singoli elementi che lo costituiscono? Non è di sicuro un’operazione automatica ed è necessario conoscere la legge di composizione che governa questo processo. Questo è il compito che si prefigge l’attuale fase di sviluppo della scienza moderna.»

Parlare di scienza moderna

prescindendo dagli sviluppi della Fisica Quantistica non è più possibile, specialmente quando si ragiona su scala atomica e subatomica. Eppure, l'idea di utilizzare i campi elettromagnetici in medicina non è poi così nuova come potrebbe sembrare in un primo momento. «In effetti, all'inizio del Novecento – quando l'approccio elettromagnetico cominciò a essere diffuso grazie anche all'opera di Guglielmo Marconi, di Nikola Tesla e di molti altri scienziati – la possibilità che la materia vivente fosse un insieme di oscillatori elettromagnetici

'accoppiati' era un'ipotesi molto in voga. Negli anni Trenta dello scorso secolo il numero di biologi elettromagnetici – cioè di coloro che cercavano di spiegare la biologia tramite l'oscillazione elettromagnetica – era almeno uguale al numero dei biologi molecolari. Sempre in quel periodo, ai congressi di biologia elettromagnetica il numero dei partecipanti era praticamente lo stesso di quello dei partecipanti ai congressi di biologia molecolare, scienza che allora era appena agli inizi.»

Ma da dove si originano questi

campi elettromagnetici, chiedo ancora a Piergiorgio Spaggiari, e com'è possibile crearli nel nostro corpo? «È proprio dall'incapacità di spiegare come i campi elettromagnetici si possano produrre all'interno dell'organismo che la biologia elettromagnetica venne affossata, determinando così il successo della biologia molecolare. Per produrre un campo elettromagnetico, infatti, abbiamo bisogno di un'alimentazione elettrica che, ovviamente, non è presente nel nostro corpo. C'è però un ulteriore elemento da tenere in considerazione. Il grande biologo

americano Gerald Edelman,⁷ scomparso nel 2014, ha più volte affermato che la biologia molecolare non è in grado di svelare il mistero di come fanno le molecole a incontrarsi velocemente fra loro e senza commettere errori. Questa posizione ha permesso di riaprire la discussione sulla biologia elettromagnetica consentendo di individuare, negli ultimi decenni, una possibile soluzione grazie all'utilizzo dei campi magnetici ultradeboli e della ionorisonanza. Un discorso a parte, poi, lo merita la Teoria della Coerenza Elettromagnetica.» Ma su

quest'ultimo argomento torneremo
nel Capitolo 9.

Prime considerazioni

Il mio personale interesse nella Medicina Quantistica e in particolare nell'applicazione dei campi magnetici ultradeboli – definizione che spiegherò fra poco –, può essere fatto risalire a due distinti momenti della mia vita. Il primo è più lontano negli anni, quando nel 2001 mi furono affidati gli insegnamenti di Informatica e Fisica Nucleare presso quella che allora si chiamava Facoltà di Medicina e Chirurgia e che adesso, più semplicemente, è il Dipartimento di Medicina dell'Università di Padova. Non era la

mia prima esperienza come professore universitario, dato che avevo iniziato a tenere corsi sulla Metodologia della Ricerca Positiva e del Lavoro Scientifico fin dal 1996, come Docente Invitato presso la Scuola Internazionale di Scienze dell'Educazione aggregata all'omonima Facoltà dell'Università Pontificia Salesiana di Roma. Era la prima volta, però, che insegnavo a medici, infermieri e a tecnici di radiologia medica. Inoltre era anche la prima volta che mi trovavo così a stretto contatto con le malattie e con le persone che ne erano affette: le aule nelle quali insegno,

infatti, si trovano all'interno del reparto di Radiologia e per arrivarci è necessario attraversare parte dell'ospedale.

Il secondo momento fu nel 2008, e coincise con l'esperienza personale di vedere mio padre colpito da una sindrome degenerativa inquadrabile nella famiglia dei parkinsonismi. Confesso che fu questa seconda circostanza che mi spinse a cercare con maggiore determinazione tutte le nuove applicazioni, relative all'ambito medico, delle logiche e delle tecnologie con cui io stesso mi stavo confrontando. E fu proprio

studiando i risultati delle ricerche più all'avanguardia – e in alcuni casi, futuribili – che ebbi il piacere di conoscere Emilio Del Giudice, uno dei fisici italiani più attivi nello studio della Elettrodinamica Quantistica e della coerenza elettromagnetica della natura. Sulla figura di Emilio Del Giudice, e su quella dell'altro grande fisico italiano Giuliano Preparata, torneremo tra poche pagine, perché il loro fu un ruolo fondamentale nello sviluppo di una delle prime macchine terapeutiche basate sulla Fisica Quantistica applicata alla medicina: la QUEC PHISIS QPS1.

Prima, però, è necessario chiarire cosa siano i campi magnetici ultradeboli e quale ruolo giochino nella Medicina Quantistica. Chiedo dunque a Piergiorgio Spaggiari di spiegarli. «A partire dai primi anni Ottanta del Novecento, in molti laboratori scientifici si è iniziato a osservare come i campi magnetici variabili di bassissima intensità e frequenza – sempre in presenza del campo magnetico terrestre – determinassero variazioni nel flusso degli ioni sia attraverso le membrane cellulari sia nei liquidi organici che le circondano.» Gli ioni – conviene ricordarlo – sono atomi

che hanno ceduto oppure acquistato uno o più elettroni, divenendo in questo modo elettricamente carichi. Altra informazione che è necessario tenere sempre presente è che il campo magnetico e il campo elettrico costituiscono, assieme, il campo elettromagnetico, così come descritto matematicamente dalle equazioni di Maxwell, presentate pubblicamente per la prima volta nel 1864.

«Nel 1979, mentre compiva degli studi sulle ossa e sulla calcificazione,⁸ il biofisico americano Abraham R. Liboff,

dell'Oakland University, osservò che gli ioni calcio (Ca^{++}) che si trovavano nelle vicinanze delle membrane di colture cellulari tenute a temperatura ambiente e immerse nel campo magnetico terrestre,⁹ in specifiche situazioni mostravano uno strano comportamento. Quando venivano irradiati con dei deboli campi pulsati con una frequenza pari a 35,8 Hertz e paralleli alla direzione del campo magnetico statico, gli ioni calcio riuscivano a superare le barriere di potenziale elettrico delle membrane cellulari e a penetrare al loro interno.»

Questo comportamento, apparentemente incomprensibile, si può spiegare introducendo due nuovi concetti fisici: la frequenza di ciclotrone e la Legge di Langevin. Vediamoli assieme entrambi. Come suggerisce il nome, la frequenza di ciclotrone (F_c) di uno ione corrisponde al numero di rotazioni al secondo che lo stesso ione compie sul proprio asse quando viene sottoposto alla forza di Lorentz in presenza di un campo magnetico statico. La forza di Lorentz, che prende il nome dal fisico olandese Hendrik Lorentz, è la forza che viene esercitata su un oggetto

elettricamente carico – in questo caso, lo ione – per effetto dell'azione di un campo elettromagnetico.

Indicati con (q) e (m) , rispettivamente, la carica e la massa dello ione, e con (B) il campo magnetico, la formula della frequenza di ciclotrone è la seguente:

$$F_c = 1 / 2\pi \cdot q / m \cdot B$$

La Legge di Langevin, invece, si riferisce alla «susceptività diamagnetica» del mezzo, cioè a quell'effetto molto debole, di natura quantistica, che fa sì che alcuni materiali – come l'oro, l'argento, il

DNA, l'acqua, e molte fra le sostanze organiche – abbiano una magnetizzazione di verso opposto rispetto a quella del campo magnetico. In pratica, quegli stessi materiali risultano debolmente respinti dal campo magnetico in cui vengono immessi. Per fare un esempio, possiamo pensare a quei fermacarte da tavolo dove una sfera magnetica o un qualsiasi altro oggetto, rimane sospesa nell'aria sopra una apposita base. È il principio della levitazione magnetica utilizzato anche, in altra forma, come tecnologia per alcuni treni ad alta velocità.

Riprendendo il discorso con Piergiorgio Spaggiari, «se al campo magnetico statico sovrapponiamo un campo alternato parallelo con frequenza F_c , per la legge di Langevin lo ione è costretto ad abbandonare la propria orbita per assumere una traiettoria lineare di fuga. Verifichiamolo proprio con lo ione calcio. Dato che la sua carica vale +2 e la sua massa è pari a 40, se poniamo che il campo magnetico B valga $0,45 \mu\text{T}$, otteniamo $F_c = 35,8 \text{ Hz}$, cioè proprio la frequenza che consente allo ione calcio di entrare all'interno della membrana cellulare. Quindi, in definitiva, se

uno ione calcio immerso nell'acqua extracellulare di una cultura venisse investito da un campo magnetico avente una frequenza di oscillazione pari a 35.8 Hz, assumerebbe un moto verso la membrana cellulare e dopo averne superato la barriera di potenziale, diventerebbe uno ione intracellulare».

Dentro alle dinamiche

Ci sono alcune precisazioni ulteriori da fare. «È stata utilizzata l'espressione 'assumerebbe un moto'», aggiunge Piergiorgio Spaggiari, «poiché in un ambiente a temperatura T , gli ioni sono sottoposti anche ad altre forze che contrastano i moti indotti dai campi magnetici. Alla temperatura corporea dell'uomo – cioè a 37° centigradi, pari a circa 310° Kelvin – l'acqua circostante lo ione non rimane ferma ma le sue molecole vibrano disordinatamente con un'energia E di intensità pari a:

$$E = k_B \cdot T$$

d o v e k_B è la Costante di Boltzmann», che abbiamo già incontrato nel Capitolo 1, «e T è la temperatura espressa in gradi Kelvin. Questi moti – conosciuti con il nome di moti Browniani e studiati da Albert Einstein, nel 1905 – fanno agitare le molecole d'acqua con una forza media che varia da circa 10 Newton a circa 14 Newton.» Per avere un riferimento chiaro di cosa significhi quest'ultima affermazione, ricordiamo che 10 Newton sono poco più della forza di gravità che agisce su una massa pari a un chilogrammo nelle vicinanze della superficie terrestre. Facciamo un

paio di esempi. Provate a sollevare un peso di un chilogrammo e avrete applicato una forza pari a circa 9,81 Newton; sollevate un peso da un chilogrammo e mezzo e avrete applicato una forza pari a circa 14,72 Newton. Come accade anche in molti altri casi, definizioni che a prima vista possono sembrare ostiche si riferiscono a situazioni che, invece, conosciamo molto bene e delle quali possiamo avere persino esperienza diretta!

«Anche la forza del moto ciclotronico che tende ad agitare gli ioni è misurabile, e nel caso dell'intensità del campo magnetico

statico impiegato da Liboff è circa un miliardo di volte meno intensa di quella dovuta ai moti Browniani.» Ma com'è possibile, da un punto di vista fisico, che si verifichi il fenomeno osservato da Abraham R. Liboff? Oltre all'azione della frequenza di ciclotrone e della Legge di Langevin, deve attivarsi anche un "meccanismo" che rende la membrana cellulare permeabile agli ioni calcio. Qual è la situazione attuale degli studi in questo campo? È ancora Piergiorgio Spaggiari a rispondere a queste nuove domande.

«Per spiegare il fenomeno

osservato da Liboff, si giunse a ipotizzare che nei canali ionici che attraversano la membrana cellulare si creasse il vuoto. In questo caso, in assenza dei moti Browniani della materia, nulla avrebbe ostacolato la libera rotazione degli ioni sollecitati dalle forze del campo elettromagnetico. Nel 1998, però, un gruppo di ricercatori russi guidato dal fisico Mikhail Zhadin riuscì a osservare il verificarsi del fenomeno anche al di fuori delle membrane cellulari, in un sistema sperimentale molto semplice e controllabile.

«Ecco, in sintesi, l'esperimento

realizzato da Zhadin.¹⁰ All'interno di una celletta costituita in una lega di mu-metal¹¹ venne indotta con degli elettrodi una differenza di potenziale pari a circa 80 millivolt, mV: un valore molto simile a quello di polarizzazione delle membrane cellulari. Nella struttura, venne poi inserita una provetta contenente una soluzione acquosa di acido glutammico – uno degli amminoacidi più presenti nel corpo umano – sottoposta all'azione di due campi magnetici diversi. Il primo, un campo statico con intensità pari a 40 μT ; il secondo, un campo parallelo pulsato di

frequenza variabile e con intensità anch'essa variabile fra i 10 nT e gli 80 nT. Il simbolo nT corrisponde al nanoTesla, una grandezza pari a un millesimo del microTesla. Quindi, l'intensità del campo pulsato era pari a un millesimo circa dell'intensità del campo statico.¹²

«Variando l'intensità del campo pulsato, quello che Zhadin e i suoi collaboratori osservarono fu che non appena veniva raggiunto il valore tipico della frequenza di ciclotrone, un amperometro collegato al sistema registrava un aumento della corrente ionica pari a circa il 30 per cento. Un

comportamento inspiegabile, sia perché avveniva in un sistema 'semplice' – cioè, senza che fossero presenti tutte le complicazioni che invece ci sono nel mondo biologico – sia per il fatto che, inaspettatamente, la variazione del flusso ionico cessava non appena l'intensità del campo pulsato superava la soglia di 80 nT.»

Una prima applicazione pratica

Roberto Germano, che ha al proprio attivo numerose pubblicazioni su queste tematiche, riprende questo stesso punto rispondendo alla domanda su cosa rappresenti la QED dal punto di vista delle applicazioni in ambito medico. «Abraham R. Liboff fu uno dei primi a osservare sperimentalmente che gli ioni calcio adiacenti alle membrane di colture cellulari poste a temperatura ambiente e immerse nel campo magnetico terrestre, se vengono irradiati con deboli campi

alternati a una frequenza di 35,8 Hz e paralleli alla direzione del campo statico, entrano in risonanza e sormontano le barriere costituite dalle membrane cellulari. Infatti», come abbiamo visto qualche pagina fa, «35,8 Hz è proprio la frequenza di ciclotrone di uno ione calcio immerso in un campo magnetico d'intensità pari a quella del campo magnetico terrestre.

«Se uno ione calcio immerso nell'acqua extra cellulare viene investito da un'onda elettromagnetica che abbia una frequenza oscillatoria pari a 35,8 Hz assume un moto in direzione della

membrana e, superandone la barriera, diventa uno ione intracellulare. La membrana cellulare, che separa l'acqua interna da quella esterna alla cellula, stabilisce tra le due zone una differenza di potenziale media di 80 mV, proprio come nell'esperimento di Zhadin, che ha mostrato sperimentalmente, per la prima volta, il verificarsi degli 'effetti di soglia' non classici che permettono la ionorisonanza ciclotronica anche a campi di bassa intensità. Effetti che possono essere contestualizzati soltanto grazie alla QED e che, altrimenti, rimarrebbero

inspiegabili.»

Eccoci arrivati a un punto fondamentale: tutte le volte che sentiamo parlare di ionorisonanza o meglio, di ionorisonanza ciclotronica si sta facendo riferimento a questo particolare tipo di comportamento – e alle tecnologie necessarie per attivarlo – che consente agli ioni presenti nell'acqua extracellulare di entrare all'interno della membrana stessa. Un superamento del potenziale di polarizzazione delle membrane che prende il nome di effetto di soglia, e che può essere spiegato proprio grazie all'Elettrodinamica Quantistica.

C'è di più. Come chiarisce Piergiorgio Spaggiari, «la scoperta che debolissimi campi magnetici, di adeguata frequenza e intensità, possano produrre un aumento del flusso degli ioni attraverso le membrane cellulari, fu di estremo interesse, oltre che per la fisica, per la biologia e soprattutto per la medicina. Sulla base delle prime scoperte di Liboff degli inizi degli anni Ottanta del Novecento e ancor prima delle evidenze sperimentali di Zhadin, nel 1987, l'ente americano FDA, Food and Drug Administration, approvò il trattamento medico di ionorisonanza ciclotronica nei casi

di mancata saldatura ossea e per aiutare la fusione spinale.»

Una teoria alternativa

Da un punto di vista strettamente clinico, l'accettazione della ionorisonanza ciclotronica da parte della Food and Drug Administration sancì la possibilità di utilizzare le evidenze degli studi di Liboff in ambito medico. Grazie poi agli esperimenti di Zhadin si riuscirono a perfezionare le tecniche per la sua applicazione. Rimanevano da giustificare gli strani comportamenti degli ioni già messi in evidenza qualche pagina fa, e soprattutto il motivo per cui la variazione del flusso ionico scomparisse non appena l'intensità del campo

pulsato superava la soglia di 80 nT. In altre parole, quello che ancora mancava era una spiegazione teorica che riuscisse a comprendere i risultati sperimentali in un quadro più generale. Ed è esattamente a questo punto che, nella storia della Medicina Quantistica, compaiono per la prima volta i nomi di Emilio Del Giudice e di Giuliano Preparata.

I due fisici italiani sul finire degli anni Ottanta del Novecento, avevano cominciato a studiare i comportamenti elettromagnetici dell'acqua. Le prime indagini, iniziate nel 1987 dallo stesso Preparata, si erano focalizzate

inizialmente sia sulla materia condensata sia sulla fisica nucleare, inquadrata dal punto di vista della Teoria Quantistica dei Campi. Già l'anno successivo, però, Giuliano Preparata ed Emilio Del Giudice, che nel frattempo avevano avviato una collaborazione, avevano proposto una serie di nuove teorie sulle soluzioni coerenti della Elettrodinamica Quantistica in presenza di sistemi acquosi.¹³

Prima di proseguire, devo soffermarmi brevemente sul termine «coerenti» perché il significato generalmente attribuito a questa parola non coincide

esattamente con la definizione che se ne dà in fisica. Dal punto di vista scientifico, un sistema coerente è caratterizzato da una forte coesione fra le parti che lo compongono; quindi, è fortemente unito. Quando Preparata e Del Giudice proposero la Teoria dei Domini di Coerenza dell'acqua, intendevano mettere in evidenza come le molecole di H_2O che la compongono – che naturalmente sono disposte in modo disordinato – in presenza di un campo elettromagnetico attivo tendessero invece a orientarsi fra loro. Questo comportamento, che approfondiremo nel prossimo

capitolo, poteva essere correlato all'effetto osservato da Abraham R. Liboff e quindi poteva essere utilizzato come base per la costruzione di quella teoria generale che ancora non era stata formulata.

Premetto che la Teoria dei Domini di Coerenza dell'acqua non viene universalmente condivisa in ambito scientifico; questo, anche – e forse, soprattutto – a causa delle sue implicazioni nel fenomeno della cosiddetta «memoria dell'acqua», ovvero la possibilità che l'acqua, in forma liquida, possa mantenere un'impronta elettromagnetica delle

sostanze con cui è precedentemente entrata in contatto. Nel prossimo capitolo tornerò anche sulla memoria dell'acqua e sugli accesi dibattiti sorti successivamente in merito a quegli studi e alla figura dall'immunologo francese Jacques Benveniste, che presentò il fenomeno sulla rivista Nature nel 1988.¹⁴ In questo momento, infatti, dobbiamo concentrare la nostra attenzione sulle ricerche di Giuliano Preparata ed Emilio Del Giudice perché, qualche anno dopo, sarebbero diventate convergenti con altri studi simili portati avanti

dal ricercatore biofisico padovano
Getullio Talpo. Il confronto fra i tre
scienziati avrebbe, infine, condotto
alla realizzazione della QUEC
PHISIS QPS1.

Come si concretizza un'idea

Ho chiesto di raccontarmi come nacque la collaborazione fra Getullio Talpo, Emilio Del Giudice e Giuliano Preparata alla persona che, più di ogni altra, ha avuto contatti diretti con i vari protagonisti: Fabio Roberto Marchetti. «Conoscevo personalmente Getullio Talpo ed ero suo amico da tanti anni: avevamo studiato fisica all'Università di Padova assieme e poi ci eravamo separati. Lui era rimasto a lavorare all'Istituto di Fisica mentre io avevo deciso di dedicarmi alla medicina iperbarica.» Fabio Roberto Marchetti, non a

caso, è seduto alla scrivania del Centro di Medicina Iperbarica OTI Services di Mestre, di cui è Direttore Generale. «Getullio Talpo era interessato agli effetti dei campi magnetici ultradeboli in medicina ed era venuto a conoscenza dei risultati delle ricerche di Emilio Del Giudice e di Giuliano Preparata. Così, nel 1999, appena andato in pensione, li aveva contattati ottenendo di incontrarli presso la sede milanese dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare.»

In quello stesso anno, Preparata e Del Giudice avevano completato dieci anni di studi anche su un altro

argomento molto controverso: la Fusione Fredda.¹⁵ Annunciata nel 1989 dai chimici Martin Fleischmann e Stanley Pons, la Fusione Fredda divide ancora oggi la comunità dei ricercatori in due gruppi con posizioni notevolmente distinte fra loro. Il primo gruppo è composto da chi la considera una supposizione non dimostrabile scientificamente, il secondo dagli scienziati che cercano di provarne sperimentalmente la validità. Emilio Del Giudice e Giuliano Preparata, fin dal 1995, erano arrivati a concludere che quel particolare fenomeno potesse essere spiegato facendo ricorso alla

loro Teoria dei Domini di Coerenza dell'acqua.

Sempre nel luglio del 1999, Carlo Rubbia, Nobel per la fisica nel 1984,¹⁶ era diventato Presidente dell'ENEA – il comitato nazionale per la ricerca e lo sviluppo dell'Energia Nucleare e delle Energie Alternative – e aveva affidato proprio ai due ricercatori italiani la possibilità di realizzare una sperimentazione in grado di verificare la fondatezza delle loro supposizioni. Pur avendo vissuto fino a quel momento una generale ostilità da parte della comunità scientifica, Emilio Del Giudice e

Giuliano Preparata si trovarono nelle condizioni ideali per investigare i principi alla base delle interazioni magnetiche nelle soluzioni acquose. Così, quando Getullio Talpo si presentò a Milano, fu proprio nell'ambito delle applicazioni delle onde ELF – Extremely Low Frequency, onde a bassissima frequenza dei campi magnetici ultradeboli – alla Fusione Fredda che iniziò la loro collaborazione.¹⁷

A proposito del loro primo incontro, il giornalista veneto Renzo Mazzaro ha scritto: «Getullio arriva con le carte del suo progetto.

Preparata guarda e riguarda. Oltre a essere un mostro sacro della Fisica Quantistica, ha la fama di un caratteraccio. E non si smentisce. Dopo l'incontro, congedato Talpo, chiede a Del Giudice: 'Emilio, pensi che Getullio capisca realmente quello che dice?' Emilio, che è naturalmente benevolo verso il prossimo, ribatte: 'Se non lo capisse non vedo perché lo direbbe'. Giuliano conclude: 'Allora vuol dire che ragiona come noi'». ¹⁸

L'obiettivo di Getullio Talpo, però, era paradossalmente più ambizioso dello scoprire i meccanismi di funzionamento

teorico della Fusione Fredda. Talpo, infatti, stava cercando di trasformare gli studi sugli effetti dei campi magnetici ultradeboli in un'apparecchiatura basata sui principi della QED che potesse erogare terapie mediche efficaci. Terapie la cui valenza fosse riconosciuta dalle istituzioni pubbliche. «Quando Pasteur scoprì che alcune patologie erano dovute alla presenza di bacilli», dichiarò Talpo durante un convegno, «semplificò enormemente il quadro delle patologie. Se voi andate a vedere la mortalità nel mondo ai primi del Novecento, vedete che

circa il 90 per cento era dovuto a malattie di origine batterica. Se guardate il quadro di oggi, non si muore più per malattie batteriche ma, ahimè, tutte le altre malattie, le cosiddette degenerative, non hanno trovato una soddisfacente soluzione. [...] Abbiamo due possibilità: primo, aspettare. Secondo: interrogarci se non ci sia qualcosa di profondo che noi non capiamo nel comportamento del corpo umano. Noi pensiamo che sia così: c'è un invitato di pietra che siede alla nostra tavola e regola il nostro organismo ma noi non lo vediamo. Questa è la nostra ipotesi

e anche la nostra prassi: che il
convitato di pietra, la forza
dinamica che muove gli incontri
cellulari, sia il campo
elettromagnetico.»¹⁹



Figura 17. Un incontro del gruppo allargato nel gennaio 2004, a Padova. Da sinistra: Abraham Liboff, Getullio Talpo, il consulente farmaceutico Marco Prosdocimi ed Emilio Del Giudice.

Giuliano

Preparata

mori

nell'aprile del 2000, ma le ricerche del gruppo, a cui si aggiunse definitivamente anche Martin Fleischmann, continuarono avendo Emilio Del Giudice come punto di riferimento. Nel 2001 si concretizzò finalmente l'occasione per sviluppare la macchina desiderata da Getullio Talpo. La Seqex, una giovane azienda di Trento, decise di migliorare un'apparecchiatura elettromagnetica medica che desiderava brevettare e si rivolse all'Università di Padova per trovare un valido aiuto. Talpo venne subito coinvolto nel progetto e vi si dedicò con passione fino al 2003. Poi però

ne uscì e assieme a Fabio Roberto Marchetti e a Emilio Del Giudice decise di sfruttare quell'esperienza per fondare una nuova società, la Prometeo, con lo scopo di progettare e di realizzare tecnologie e apparecchiature elettromedicali basate sulle implicazioni dell'Elettrodinamica Quantistica.

È ancora Fabio Roberto Marchetti che ricorda quei momenti: «Getullio Talpo, in gioventù, aveva vissuto il dramma di vedere la sorella morire di tumore. Dopo quella triste esperienza, aveva deciso di dedicarsi allo studio della fisica nella medicina, in particolare alle

possibilità terapeutiche offerte dalla QED tramite erogazione di onde ELF. Le sue idee coincidevano con quelle di Emilio Del Giudice e Giuliano Preparata, ed era anche riuscito a realizzare il prototipo di una macchina innovativa che aveva fatto testare all'Istituto di Fisica Nucleare di Legnaro. Quando fondammo la nostra società, assieme anche ad Andrea Trevisan, pensai subito che al momento giusto avremmo potuto prendere la macchina e attivarla nel centro di Medicina Iperbarica. Lì c'era lo spazio necessario per installarla, e soprattutto c'era la possibilità di

effettuare, in un ambiente adeguato, le eventuali somministrazioni sui pazienti».

Nascita di una tecnologia

Dopo aver avviato a Padova le attività della Prometeo, Getullio Talpo ed Emilio Del Giudice «realizzarono due distinte tecnologie: la QUEC PHISIS – Coherent Quantum Electrodynamics, Elettrodinamica Quantistica Coerente – per le applicazioni sull'uomo, e la QUEC PHITON, per quelle sulle piante», riprende il discorso Piergiorgio Spaggiari. «E già nel 2006, solo tre anni dopo la nascita della Prometeo, venne brevettata, prodotta e certificata la prima QUEC PHISIS QPS1: la risposta più

all'avanguardia nell'applicazione delle ricerche sulla Elettrodinamica Quantistica. Gli elementi cardine per la sua azione, infatti, sono i principi della ionorisonanza ciclotronica e i fenomeni coerenti nella materia vivente.»



Figura 18. Getulio Talpo, presenta la QUEC PHISIS QPS1 nel 2006.

Ma esattamente, quali sono le logiche biologiche ed elettrochimiche su cui si basa la tecnologia QUEC PHISIS? Lo chiedo

a Roberto Germano che oltre a essere un fisico della materia, dirige Promete, una spin-off dell'Istituto Nazionale per la Fisica della Materia – INFN, Consiglio Nazionale delle Ricerche – che opera nel campo dell'innovazione e del trasferimento tecnologico. «Le cellule in un corpo umano sono circa 10 miliardi, quindi il risultato oggettivo di una stimolazione elettromagnetica – del tipo di quella vista con l'esperimento di Mikhail Zhadin – ha effetti macroscopici. Effetti misurabili anche utilizzando strumenti non particolarmente raffinati.

«Possiamo schematizzare il funzionamento elettrochimico del corpo umano rappresentandolo come un contenitore composto da una massa d'acqua nella quale sono disciolte varie sostanze. Ci sono degli ioni – ioni calcio (Ca^{++}), ioni sodio (Na^+), ioni potassio (K^+), ioni cloro (Cl^-), e molti altri – e anche strutture organiche di piccole dimensioni: enzimi, ormoni, proteine polari, amminoacidi in soluzione, e così via. Si tratta quasi sempre di elettroliti deboli. Nello stesso contenitore, poi, ci sono le cellule che hanno una diversa concentrazione di carica tra la

doppia membrana lipidica che separa l'ambiente intracellulare da quello extracellulare. Grazie a dei meccanismi non ancora completamente spiegati dalla biologia, la cellula fa transitare un certo numero di elementi carichi elettricamente, non soltanto per gestire il proprio metabolismo ma anche per mantenere l'opportuna polarità di membrana e infine per 'comunicare' con il contesto in cui è inserita. È quella che viene definita come 'omeostasi'.

«La metodica che correla il comportamento elettrico di un organismo vivente attraversato da

una corrente alternata di bassa intensità ad alcuni dei suoi parametri fisiologici prende il nome di 'impedenziometria'. perché il corpo viene considerato alla stregua di un circuito elettrico 'in parallelo', nel quale i portatori di carica sono gli ioni e ci sono elementi non solo resistivi – cioè, che si oppongono al passaggio della corrente – ma anche capacitivi. Elementi che funzionano, quindi, come dei condensatori in grado di accumulare le cariche elettriche. La conduttività è correlata alle diverse concentrazioni degli ioni e dei radicali liberi: i componenti

elettricamente non neutri presenti, in soluzione, nei liquidi organici. Ma non solo: la conduttività è correlata anche alla dissociazione ionica operata dall'acqua sulle specie molecolari, alla mobilità ionica e infine, alla temperatura.

«Ogni cellula è come un piccolo condensatore: l'isolante, detto 'dielettrico', è la membrana lipidica, mentre la parte conduttiva sono i liquidi intracellulare ed extracellulare. Il valore medio della differenza di potenziale elettrico varia da circa 70 mV a circa 90 mV.» Ed è per questo motivo che, negli esperimenti che abbiamo visto

nelle pagine precedenti, il valore di riferimento della differenza di potenziale cellulare era stabilito sugli 80 mV. «In un organismo vivente», riprende Roberto Germano, «utilizzando uno strumento detto 'impedenzometro' si può misurare la resistenza elettrica e la variazione di fase di una debolissima corrente alternata che lo stia attraversando.»

Nonostante il nome, l'impedenzometro è uno strumento molto diffuso e che chiunque sia andato almeno una volta dal dietologo ha sicuramente provato... sulla propria pelle! Grazie al suo

utilizzo, infatti, è possibile ottenere utili informazioni sul rapporto fra la massa grassa e la massa muscolare e sul consumo calorico minimo richiesto dall'organismo. «Nel caso della QUEC PHISIS», continua Roberto Germano, «grazie all'impedenziometro possiamo conoscere la quantità totale di liquidi presenti nel corpo e la loro distribuzione all'interno o all'esterno delle cellule.»

Nella realizzazione della QUEC PHISIS QPS1 si è tenuto conto di tutti questi aspetti. Come illustra Piergiorgio Spaggiari: «L'acqua, nell'organismo umano, non è un

mezzo omogeneo ma una mescolanza di una frazione 'coerente' – così come definita dalla Teoria dei Domini di Coerenza dell'acqua²⁰ – e di una 'non coerente'. Il rapporto fra queste due frazioni è regolato dall'equilibrio dinamico tra l'attrazione elettromagnetica e il disordine imposto alle molecole dalle collisioni. A seconda del livello di coerenza dell'acqua di un particolare distretto biologico – una delle zone del corpo – tutti i processi chimici, elettrochimici e metabolici cambiano la loro dinamica, con conseguenti

ripercussioni sull'intero organismo. Quando il livello di coerenza cala, vi è un rallentamento dei processi metabolici e la conseguente possibilità che si sviluppino delle patologie. La QUEC PHISIS QPS1 invia segnali elettromagnetici precisi e specifici, in modo tale da interagire con i distretti metabolici interessati all'alterazione. Analizzando di volta in volta le specifiche sintomatologie, quindi, è possibile risalire al macrosistema in sofferenza e una volta individuato, indirizzare correttamente la QUEC PHISIS QPS1 per ripristinare la coerenza del distretto».

Risultati consolidati e ulteriori possibilità

Avendo conosciuto personalmente Emilio Del Giudice, ho avuto più volte la possibilità di confrontarmi con lui su questi temi, e in particolare sulle teorie alla base del funzionamento della QUEC PHISIS QPS1. Del Giudice, scomparso nel gennaio del 2014, era un uomo di un'intelligenza lucida e trasgressiva, capace di perseguire con determinazione le proprie idee e allo stesso tempo di accettare serenamente le possibili critiche. Ricordo che una sera del 2010,

prima di trovarci a cena con Fabio Roberto Marchetti, gli chiesi come mai ci fossero tanti punti di vista contrastanti sulle teorie che aveva sviluppato assieme a Giuliano Preparata. Quello che stavo cercando di capire, come fisico e come figlio, era l'effettiva efficacia del trattamento con la macchina sui pazienti affetti da sindromi degenerative come, per l'appunto, i parkinsonismi.

Del Giudice mi rispose così: «Vedi Fabio, queste ricerche sono complicate sotto molti punti di vista. Primo, coinvolgono tanti aspetti differenti, soprattutto quello

biologico, del quale conosciamo ancora troppo poco. Secondo, le loro possibili implicazioni sono spesso al di là delle logiche che ci hanno insegnato all'università. Terzo, quando si studia la Fisica Quantistica applicata alla medicina si sta lavorando con qualcosa che ha differenti chiavi di interpretazione applicata a qualcosa d'altro che nessuno, che sia onesto, può dire di conoscere alla perfezione!

«Le nostre ricerche sono suffragate da vari studi e ci sono premi Nobel come Brian D. Josephson²¹ e Luc Montagnier,²²

con cui sto collaborando adesso, che le sostengono. Comunque, già nel 1999,²³ con Giuliano Preparata, Getullio Talpo e altri scienziati, abbiamo tenuto un convegno all'Università di Roma la Sapienza, dove abbiamo discusso del ruolo della Elettrodinamica Quantistica nella medicina. Ora, una delle critiche che ci vengono fatte è quella che i nostri esperimenti a volte non si riescono a riprodurre. Bene, ti dirò quello che ripeto da anni: nessun esperimento è riproducibile se uno lo fa con sufficiente incompetenza!

«Venendo alla macchina e alla

sua efficacia, oltre a tutto quello che potrei dirti per spiegarti la qualità del lavoro che abbiamo fatto e la cura che ci abbiamo messo, c'è un unico fatto importante: funziona come dovrebbe. E funziona tanto bene che abbiamo ottenuto le certificazioni necessarie per farla riconoscere come trattamento medico da parte delle istituzioni pubbliche. Puoi tranquillamente fartela prescrivere dal tuo medico di famiglia, e ha un sacco di applicazioni convalidate: dal trattamento delle patologie osteo-mio articolari ai trattamenti pre-operatori, post-operatori e

nell'ambito della medicina sportiva. Più in generale, può essere utilizzata per tutte le patologie del metabolismo».

Oggi, a distanza di oltre sette anni da quella sera, gli studi sulla macchina e sulle sue applicazioni continuano con l'obiettivo di ampliarne i campi di intervento e di individuare la metodologia di utilizzo migliore per ottenere risultati a lungo termine. Il lavoro iniziato da Giuliano Preparata, Emilio Del Giudice e Getullio Talpo, scomparso nel 2006, viene attualmente portato avanti da diverse figure, come quella di

Andrea Trevisan, al fianco di Fabio Roberto Marchetti, di Roberto Germano, di Piergiorgio Spaggiari e di altri ricercatori in Italia e nel mondo. Sono ricerche complesse e che, in alcuni casi, sfiorano i confini di ciò che siamo abituati a dare per scontato: proprio per questo motivo è fondamentale che vi sia un confronto vivo, continuo e produttivo, con il mondo scientifico, in generale, e con quello medico, in particolare.

Le possibilità offerte da un approccio quantistico al campo biologico sono innumerevoli, ma è necessario l'impegno di tutte le

professionalità che vi risultano coinvolte per riuscire a far progredire la conoscenza senza cadere da un lato nei facili entusiasmi e dall'altro nelle preclusioni aprioristiche. Mantenersi nel solco di una doppia – se non tripla o quadrupla – comprensione della realtà e della natura, è un compito molto difficile e rischioso. Un compito, però, che è necessario assumersi, date le evidenti ripercussioni che hanno gli uni con gli altri, i vari ambiti delle scienze moderne.

Citando ancora una volta Richard Phillips Feynman: «Con la parola

'Scienza' di solito si intendono tre cose diverse, o un misto delle tre. 'Scienza' a volte significa un metodo speciale di scoprire delle cose; a volte significa l'insieme delle cose che si originano dalle cose scoperte ma può anche significare tutte le cose nuove che si possono fare usando la conoscenza acquisita, o il fare effettivamente queste cose. [...] Gli scienziati si occupano di tutto ciò che si può studiare con un approccio sperimentale, e costruiscono, fabbricano, elaborano, quella cosa chiamata 'Scienza'. Però molto rimane escluso, fenomeni per i quali l'approccio sperimentale non

funziona, e non è escluso che siano importanti. In un certo senso sono i più importanti». ²⁴

Acqua, questa sconosciuta

Ovvero, misteri quantistici nei nostri bicchieri

Cosa c'è dietro? L'acqua è un principio fondamentale per la vita, così come noi la conosciamo. E contemporaneamente, è un elemento speciale: ricco di caratteristiche uniche e di apparenti contraddizioni. Attorno all'acqua, al suo ruolo biologico e alle sue proprietà chimiche e fisiche è sorto negli anni un importante dibattito. Una discussione, anche accesa, che ha individuato nelle logiche della Fisica Quantistica una possibile chiave per la comprensione di quelli che a prima vista

appaiono come inspiegabili comportamenti.

Perché è importante? Perché la comprensione dei meccanismi più profondi dell'acqua è una necessità fondamentale per arrivare a comprendere la nostra stessa natura. Non solo, per alcuni fisici e per altri studiosi, l'acqua potrebbe rappresentare il mezzo ideale per la trasmissione dei campi elettromagnetici all'interno della materia vivente, venendo così a rivestire un ruolo chiave nella attuazione di tutti i processi biochimici del nostro corpo.

QUANDO, parlando, si vuol far riferimento a qualcosa di poco valore, una delle espressioni più

diffuse è «acqua fresca». Anche nella medicina, riferendosi a cure inutili o inadatte, si usa frequentemente lo stesso modo di dire. Eppure non potrebbe esserci nulla di più sbagliato: l'acqua fresca, infatti, non solo è la fonte di sostentamento più preziosa per la nostra vita – possiamo resistere, mediamente, un intero mese senza mangiare; ma solo una settimana senza bere –, ma è anche l'elemento più presente e diffuso all'interno del nostro corpo.

Piergiorgio Spaggiari, fisico e medico, è anche autore insieme a Caterina Tribbia del volume Le

meraviglie dell'acqua. Il mistero biofisico che ci dona la vita. È quindi la persona più indicata per discutere di questi argomenti e per farci scoprire, finalmente, quali sono le reali percentuali relative alla quantità di acqua presente nel nostro corpo.

«Non c'è un'unica risposta», precisa Piergiorgio Spaggiari, «ma ci sono percentuali variabili che dipendono principalmente dal sesso e dall'età. Se negli organismi viventi, in generale, si passa da circa il 50 per cento al 90 per cento del peso corporeo, in alcuni invertebrati marini l'acqua arriva a

rappresentare il 95 per cento del peso totale. In un uomo adulto in salute, il peso dell'acqua, del sangue, della linfa e del liquido interstiziale oscilla fra il 60 per cento e il 70 per cento del peso corporeo. In una donna, a causa della maggiore percentuale di tessuto adiposo relativamente 'anidro' – che trattiene meno acqua rispetto ai tessuti magri – si arriva al 50 per cento. Nei bambini appena nati e negli anziani, infine, si passa dall'80 per cento dei primi al 60 per cento dei secondi.»

Percentuali già molto elevate che, però, possono diventare

ancora maggiori se si vanno a verificare i singoli organi del corpo. «La concentrazione più elevata d'acqua», aggiunge Piergiorgio Spaggiari, «si trova nel corpo vitreo dell'occhio: ben il 98 per cento. Nel sangue, arriviamo all'83 per cento, nel cervello è circa del 75 per cento. Persino i muscoli ne contengono una percentuale elevata, leggermente inferiore al settantasei per cento. La quantità minore di acqua si trova, come accennavo poco fa, nel tessuto adiposo che, comunque, ne ospita fra il 10 per cento e il 20 per cento. E dobbiamo anche ricordare che all'interno

dell'acqua si trovano sodio, potassio, calcio, magnesio, cloro, acidi organici, proteine e molti altri elementi e sali minerali.»

A questo punto, è necessario introdurre un altro fondamentale concetto: quello delle particolari proprietà dell'acqua.

Non tutto è così semplice

Da un punto di vista chimico l'acqua è una molecola composta da tre atomi: un atomo di ossigeno e due di idrogeno. La sua formula, (H_2O), la conosciamo bene, ma adesso è arrivato il momento di scoprire anche cosa rappresenti dal punto di vista atomico. Per costituire la molecola, i due atomi di idrogeno mettono in comune con quello di ossigeno un elettrone ciascuno. Il legame chimico che si forma in questo modo prende il nome di legame covalente e garantisce la stabilità della molecola. Gli elettroni condivisi tendono a stabilirsi in

prossimità dell'ossigeno conferendogli una lieve carica negativa (δ^-) e costringendo così i due idrogeni, per mantenere la neutralità della molecola, ad assumere una corrispondente carica positiva (δ^+).

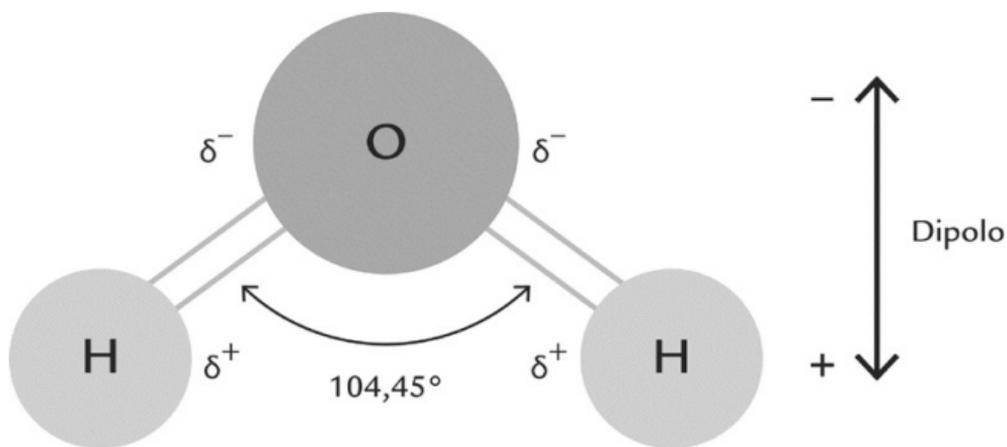


Figura 19. Rappresentazione della molecola di acqua.

In pratica, sull'atomo di ossigeno è possibile trovare una carica negativa $\delta^- = - 0,82$ mentre su ciascuno dei due atomi di idrogeno, una carica positiva $\delta^+ = + 0,41$. A causa delle interazioni elettromagnetiche, due cariche positive – come avviene nelle calamite – tendono a respingersi, e quindi l'angolo formato dai due atomi di idrogeno rispetto a quello di ossigeno, invece di essere pari a 90° come dovrebbe, risulta essere di $104,45^\circ$. Possono sembrare sottigliezze, ma invece sono aspetti fondamentali, perché il risultato finale di tutto ciò è che la molecola

d'acqua non solo è asimmetrica ma ha le stesse caratteristiche di un dipolo elettrico. Ecco perché la molecola d'acqua viene definita anche come «molecola polare».

«A causa di questa proprietà», riprende Piergiorgio Spaggiari, «possono venirsi a formare dei legami di natura elettrostatica tra l'ossigeno di una molecola d'acqua e l'idrogeno di una differente molecola d'acqua che si trovi nelle vicinanze. È quello che prende il nome di legame a idrogeno: l'attrazione fra le differenti cariche elettriche degli atomi di ossigeno e di idrogeno che compongono le

molecole d'acqua. Ogni molecola d'acqua, inoltre, può instaurare quattro legami a idrogeno con le molecole vicine comportandosi come donatore di cariche verso due di esse e contemporaneamente accettore di cariche – cioè, ricevitore – da altre due. In questo modo si possono creare veri e propri 'grappoli' di molecole d'acqua.

«E c'è di più. Le conseguenze di questi legami a idrogeno fra molecole diverse sono duplici: da un lato i legami esistenti si vengono ad allentare e dall'altro si instaura quella che viene definita una

'formazione dinamica'. In pratica, si può arrivare anche al distacco dell'idrogeno dall'ossigeno a cui era inizialmente legato e alla successiva creazione di un nuovo legame covalente in un'altra molecola. Una situazione in continua evoluzione in cui i legami si formano e si distruggono senza sosta con il conseguente scambio di atomi di idrogeno fra le molecole d'acqua.»

È proprio questa dinamicità dell'acqua che la rende un ottimo solvente per tutte le sostanze in cui prevale la parte «idrofila», capace cioè di creare legami con l'acqua e

di trattenerla. Facciamo un esempio concreto: cosa succede quando mettiamo il sale dentro una pentola d'acqua? Il normale sale da cucina – il cloruro di sodio, con formula NaCl – è una sostanza ionica, composta da ioni sodio e da ioni cloro. Quando viene a contatto con l'acqua, gli ioni cloro, che hanno una carica negativa δ^- e sono posizionati sulla superficie esterna dei cristalli salini, richiamano le cariche positive δ^+ degli atomi di idrogeno dell'acqua e vengono portati in soluzione. Analogo processo, ma con le cariche invertite, avviene anche con gli ioni

sodio che vengono «solvatati» – questo è il termine scientifico – dagli atomi di ossigeno. Uno strato dopo l'altro, i cristalli di cloruro di sodio vengono disciolti nell'acqua fino a quando non viene raggiunto il punto di saturazione: il limite in cui il solvente non è più in grado di accogliere altri ioni sodio o ioni cloro.

Alcune proprietà dell'acqua...

Oltre alla capacità di sciogliere i sali minerali, le proteine e gli altri elementi idrofili, l'acqua ha numerosissime caratteristiche uniche. Ho deciso di elencarne le principali assieme a Piergiorgio Spaggiari per avere un quadro d'insieme utile ad affrontare gli argomenti che incontreremo nel prosieguo di questo stesso capitolo. Partiamo dallo strano comportamento della sua densità. Questa definizione, in fisica, assume il significato di rapporto fra

la massa (m) e il volume (v) di una sostanza. Indicando la densità con il simbolo (ρ), si ottiene:

$$\rho = m / v$$

La densità varia al modificarsi della temperatura della sostanza a causa delle logiche ripercussioni che si verificano sul suo volume. Di solito quello che avviene è che, quando la temperatura aumenta, aumenta anche il volume e quindi diminuisce la densità. Per la stessa ragione, diminuendo la temperatura si riduce il volume e quindi aumenta la densità. Per l'acqua, invece, le cose vanno diversamente.

«Quando la temperatura

aumenta da 0° centigradi a 4° centigradi», interviene Piergiorgio Spaggiari, «invece di dilatarsi come ogni liquido, l'acqua si contrae fino ad arrivare alla massima densità. Solo sopra i 4° centigradi l'acqua comincia a dilatarsi. Contrariamente a quanto avviene per la maggior parte delle altre sostanze, per le quali la forma solida è più densa di quella liquida, il ghiaccio risulta meno denso dell'acqua. Inoltre l'acqua quando solidifica invece di contrarsi si espande. Ecco perché il ghiaccio galleggia e sporge sulla superficie dell'acqua per circa un nono del proprio volume.»

L'acqua, oltre a essere l'unica sostanza presente in natura, contemporaneamente, in tutti e tre i suoi stati di aggregazione – liquido, solido e gassoso –, mostra anche un'altra interessante particolarità. «L'acqua bolle a 100° centigradi, nella nostra esperienza quotidiana, ma la sua molecola è talmente piccola e il suo peso molecolare è così basso che dovrebbe trasformarsi in vapore già a -75° centigradi. Ciò dipende dai forti legami a idrogeno presenti fra le sue molecole. Per instaurare i processi di evaporazione e di ebollizione, infatti, viene richiesta

una grande quantità di energia e quindi, una temperatura sorprendentemente alta rispetto alle dimensioni effettive della molecola. Il punto di ebollizione, poi, è legato alla pressione atmosferica, ovvero l'azione della forza esercitata dalla massa d'aria sulla superficie considerata. In alta montagna, dove la pressione atmosferica è minore, l'acqua bolle anche a temperature inferiori ai 100° centigradi.

«Un'altra anomalia si osserva nella temperatura di congelamento che, secondo i principi della chimica, invece che a 0° centigradi

dovrebbe trovarsi a -120° centigradi.» Una differenza teorica enorme ma che è stata riscontrata, seppure in misura minore, anche sperimentalmente, nel 2011, dagli studi di Emily B. Moore e Valeria Molinero della University of Utah.¹

«Integrando in un nuovo modello dati sperimentali e simulazioni al computer, Emily B. Moore e Valeria Molinero sono riuscite a stabilire la temperatura che l'acqua allo stato liquido può toccare prima di raggiungere la velocità teorica di cristallizzazione massima e sia quindi costretta a congelare: -48° centigradi.»² Una temperatura che

risulta ulteriormente inferiore rispetto a quella di -40° centigradi a cui l'acqua è stata effettivamente trovata, in forma liquida, all'interno delle nubi!

Per concludere la nostra necessaria premessa, rimangono da affrontare tre – fra gli altri – degli ulteriori comportamenti dell'acqua che la rendono speciale: il pH, la sua natura anfotera e la tensione superficiale. Partiamo dal pH, cioè da quell'indice che, in chimica, serve per determinare se una soluzione è acida o basica. Il pH è una misura diretta della concentrazione degli ioni di

idrogeno all'interno di una soluzione, e varia in maniera inversamente proporzionale a quest'ultima. Più basso è il pH – cioè più alta è la concentrazione di ioni idrogeno – maggiore è l'acidità. Viceversa, più la soluzione è basica, minore è la concentrazione di ioni idrogeno. La scala del pH è compresa fra i valori 0 e 14. «Tutte le soluzioni con pH da 0 a 7 sono acide», precisa Piergiorgio Spaggiari, «mentre quelle con pH da 7 a 14 sono alcaline. Il valore 7 rappresenta la neutralità e corrisponde, in teoria, al pH dell'acqua pura. In teoria, perché

date le caratteristiche di ottimo solvente possedute dall'acqua, l'acqua pura è difficile da produrre.³

«Bisogna tenere presente che la temperatura influenza il valore del pH corrispondente alla neutralità. Infatti, aumentando la temperatura aumenta il grado di 'dissociazione ionica' dell'acqua, quindi aumenta la concentrazione degli ioni idrogeno e conseguentemente, diminuisce il pH. L'effetto contrario si ottiene diminuendo la temperatura.» L'acqua, dunque, è neutra; eppure, è in grado di comportarsi sia come un acido sia come una base. Questa

caratteristica chimica, descritta con il termine «anfotero», consente all'acqua di comportarsi come una base – cioè di ricevere uno ione idrogeno – in presenza di un acido più forte come, per esempio, l'acido cloridrico. Se posta invece in presenza di una sostanza fortemente basica, come per esempio la varechina, l'acqua tende a cedere uno ione idrogeno comportandosi, in questo modo, da acido.

... e altre ancora

E in relazione alla tensione superficiale? Cosa si intende effettivamente con questa espressione e perché è così importante nel caso dell'acqua? Pongo le mie domande a Piergiorgio Spaggiari mentre rifletto sull'importanza che lo studio dell'acqua riveste per la comprensione delle dinamiche biologiche più profonde. «Cito quanto ho scritto nel mio libro *Le meraviglie dell'acqua*», risponde. «I liquidi, non avendo forma propria, per azione della forza di gravità si dispongono con la superficie libera

orizzontale; in corrispondenza della superficie di separazione, per esempio acqua/aria, il liquido si comporta come se fosse racchiuso da una membrana elastica che gli permette di variare la sua forma mantenendo minima la superficie.

«Facciamo un esempio classico. Immergendo dell'olio in un liquido con cui non possa mescolarsi, l'olio tende a raccogliersi in gocce sferiche persistenti. Se le gocce non sono troppo grandi, questo fenomeno si verifica anche contro l'azione della forza di gravità ed è possibile osservare come le gocce piccole tendano a riunirsi in gocce

più grandi. Questi fenomeni sono causati da una forza, la tensione superficiale, che spinge i liquidi ad assumere, a parità di volume, la minor superficie possibile. Quella sferica, appunto. La tensione superficiale dipende dalle forze di coesione molecolare.

«Mentre le molecole all'interno del liquido sono sottoposte a forze che agiscono in ogni direzione, annullandosi così mediamente fra di loro, per le molecole in superficie la situazione è molto diversa. In superficie, infatti, le interazioni fra le molecole avvengono solo con quelle che si trovano negli strati

inferiori e quindi le forze che agiscono non sono più mediamente nulle bensì attive e dirette verso l'interno del liquido. Le molecole superficiali sono pertanto attratte verso l'interno creando così uno strato che tende a contrarsi, racchiudendo il liquido stesso e impedendo alle altre molecole, quelle ancora più interne, di disperdersi.

«Per capirci, possiamo considerare la superficie esterna di un liquido come una membrana elastica in tensione. Una membrana che ha lo spessore del raggio di azione entro cui si manifesta

l'effetto delle forze intermolecolari. Anche la tensione superficiale è in relazione alla temperatura: maggiore è la temperatura, minore è la tensione superficiale.» Tutto ciò vale, in generale, per ogni liquido. Ma l'acqua è speciale anche da questo punto di vista. «Effettivamente», riprende Piergiorgio Spaggiari, «a causa del prevalere delle forze di coesione dovute ai legami idrogeno, la tensione superficiale dell'acqua è dieci volte superiore a quella teorica. A parte il mercurio, che è sì liquido ma è un metallo di transizione pesante, l'acqua ha la

tensione superficiale maggiore fra tutti i liquidi conosciuti. Ed è proprio a questa sua caratteristica che si deve un'altra importantissima proprietà dell'acqua: la 'capillarità': grazie a tale proprietà il liquido aderisce alla superficie di un materiale solido e tende a risalire su di essa nonostante l'azione contraria esercitata dalla forza di gravità.

«Questo effetto è molto evidente nei tubicini sottili – i capillari, appunto – all'interno dei quali l'acqua tende a risalire verso l'alto fino a raggiungere un'altezza inversamente proporzionale al

raggio del capillare stesso. Quell'altezza rappresenta proprio la condizione di equilibrio che si stabilisce fra la forza di gravità e la tensione superficiale. Tornando all'aspetto biologico dell'acqua, la capillarità è fondamentale per la vita: grazie a questa proprietà, infatti, il sangue e i liquidi organici possono circolare nei capillari dell'organismo umano e distribuirsi in tutte le cellule del corpo.»

Gli aspetti quantistici

Abbiamo visto come l'acqua sia un elemento complesso e affascinante, unico sotto molti aspetti e misterioso per molti altri. Eppure rimane ancora da chiarire se sia possibile mettere l'acqua o qualche suo comportamento in relazione diretta con la Fisica Quantistica. La risposta non è scontata e le opinioni degli scienziati, al riguardo, sono molte e differenti fra loro. Gli aspetti da valutare, infatti, sono numerosi e data la vastità delle possibili implicazioni è necessaria una particolare attenzione nel trattarli. Per approfondire questo

appassionante tema, oltre a quella di Piergiorgio Spaggiari ho chiesto la collaborazione anche di Vittorio Elia, già docente di Elettrochimica presso il Dipartimento di Chimica dell'Università di Napoli e autore di numerose pubblicazioni sulle proprietà chimico-fisiche dell'acqua e delle soluzioni acquose.

Prima di confrontarmi con Vittorio Elia, però, è arrivato il momento di affrontare in maniera approfondita la Teoria dei Domini di Coerenza dell'acqua che ho preannunciato nel Capitolo 8. Una teoria sviluppata dai fisici italiani Giuliano Preparata ed Emilio Del

Giudice a partire dal 1988 e che li ha portati a dedurre, grazie ai calcoli di laboratorio, che l'acqua possiede anche caratteristiche quantistiche. Per capire esattamente quali, basta riportare quanto dichiarato nel sommario dell'articolo «La dinamica dell'acqua all'origine dei processi di metamorfosi degli organismi viventi». Articolo pubblicato da Emilio Del Giudice, Paola Rosa Spinetti e Alberto Tedeschi, nel settembre del 2010.

«L'acqua liquida è stata riconosciuta da tempo come la matrice di molti processi, compresa

la vita e anche la dinamica delle rocce. L'interazione tra biomolecole avviene in modo differente dai sistemi non-acquosi e quest'ultimi sono incapaci di produrre la vita. Questa abilità di produrre processi vitali implica una specifica struttura dell'acqua liquida. In accordo con la moderna Teoria dei Campi Quantistici – Quantum Field Theory – un Principio di Complementarietà (nel senso in cui viene inteso da Niels Bohr) connette il numero N dei quanti (compreso il campo della materia dove i quanti sono proprio gli atomi/molecole) e la fase Φ . Questo significa che, quando ci si

focalizza sulla struttura atomica della materia, si perde la visione delle sue proprietà relative alla coerenza e viceversa, quando si esamina la dinamica di fase del sistema la struttura atomica del sistema stesso diviene indefinita. L'elio liquido e superfluido è stato il primo esempio di questa specifica dinamica. Nel presente lavoro mostriamo come la considerazione della dinamica di fase dell'acqua liquida permetta di comprendere il suo ruolo specifico nell'origine dell'auto-organizzazione degli organismi viventi e degli ecosistemi.»⁴

Trattandosi di un articolo scientifico, il linguaggio a prima vista può apparire un po' criptico ma se analizziamo con attenzione quanto c'è scritto diventa subito chiaro che, per Emilio Del Giudice e per gli altri autori dell'articolo, l'acqua è essa stessa quantistica; al pari, anche se in maniera diversa, della luce.

Approfondiamo brevemente questo concetto. Come sappiamo dai precedenti capitoli e in particolare dal Capitolo 3, in Fisica Quantistica vale il Principio di Complementarietà enunciato da Bohr: lo stato particellare e quello

ondulatorio della luce e della materia – con l'aggiunta dell'Ipotesi Ondulatoria di Louis de Broglie – non possono mai essere osservati contemporaneamente. Secondo Emilio Del Giudice l'acqua evidenzia anch'essa un Principio di Complementarietà, ma in questo caso fra il numero dei quanti – intesi come atomi e molecole – e la dinamica di fase dell'acqua liquida, cioè di quelle proprietà relative alla coerenza dell'acqua che sono state definite in accordo con la Teoria Quantistica dei Campi.⁵ In quest'ottica, l'acqua ha evidenti comportamenti quantistici a livello

atomico e le sue proprietà ne sono la diretta conseguenza.

Questione di coerenza

La tesi di Emilio Del Giudice è condivisa da altri fisici e scienziati – come Luc Montagnier, Nobel per la medicina nel 2008 – ma, com'è naturale, ha fatto sollevare numerose obiezioni e messo in evidenza posizioni assolutamente contrarie. Indipendentemente da questo aspetto, però, è facilmente verificabile come l'acqua, a causa della propria carica elettrica dipolare, risenta dei campi elettromagnetici in cui viene a trovarsi e come reagisca a essi concretizzando delle strutture molecolari organizzate. Strutture

che sono alla base della stessa formulazione della Teoria dei Domini di Coerenza dell'acqua e che ho chiesto a Piergiorgio Spaggiari di illustrare.

«Verso il 1950, Albert Szent-Györgyi – già vincitore, nel 1937, del Nobel per la medicina 'per le sue scoperte sui processi di combustione biologica, con particolare riferimento alla vitamina C e alla catalisi dell'acido fumarico' – espresse l'ipotesi che l'acqua organizzata, racchiusa dalle superfici biologiche, fosse capace di indurre una lunga eccitazione elettronica nelle differenti specie

molecolari presenti in soluzione. Questa eccitazione avrebbe prodotto la loro attivazione e conseguentemente la loro mutua e selettiva attrazione. È proprio questa l'ipotesi che è alla base della Teoria dei Domini di Coerenza dell'acqua, che è stata prima confermata e poi dimostrata, grazie anche agli studi di scienziati e di fisici come Emilio Del Giudice, Giuliano Preparata, Getullio Talpo e Martin Fleischmann.

«Quando l'acqua si trova in uno stato naturale di equilibrio, i suoi dipoli elettrici sono in un regime di incoerenza: sono, cioè, disposti in

modo disordinato con legami di tipo elettrostatico. Quando però l'acqua risulta immersa in un campo elettromagnetico superiore al valore critico corrispondente all'equilibrio naturale, i dipoli si orientano fra loro passando, di conseguenza, a quello che viene definito come un regime di coerenza. In quest'ultima condizione, i dipoli dell'acqua oscillano tutti in fase.

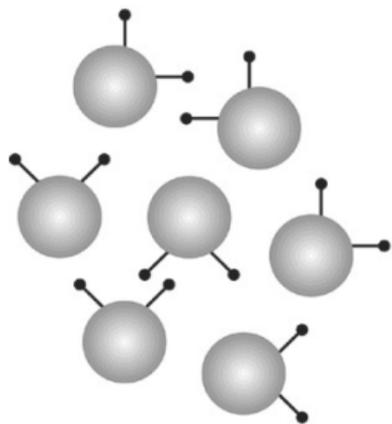
«Un'altra delle caratteristiche fondamentali dell'acqua è la sua capacità di formare macromolecole – cioè, insiemi più grandi di molecole – dette cluster. I cluster si

realizzano sempre grazie ai legami a idrogeno che abbiamo visto precedentemente e sono costituiti da centinaia di molecole. Alla temperatura ambiente e a quella del corpo umano, all'interno di un singolo cluster possono essere contenute mediamente dalle 400 alle 500 molecole. Quando sono in regime di coerenza, i cluster molecolari costituiscono degli 'insiemi coerenti' – anche detti domini di coerenza – che posseggono interessanti proprietà: importanti per la comprensione degli effetti dei deboli campi magnetici pulsanti sulle cellule e

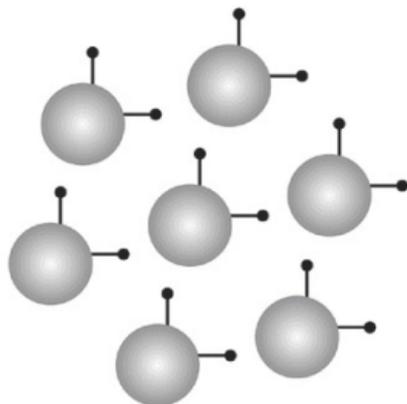
quindi, sugli organismi viventi.»

Ecco il punto di collegamento fra la Teoria dei Domini di Coerenza dell'acqua e la Medicina Quantistica, così come l'abbiamo definita nel Capitolo 8. «Esattamente», continua Piergiorgio Spaggiari. «Se esaminiamo queste proprietà, notiamo che le molecole d'acqua presenti all'interno di un dominio di coerenza oscillano, tutte insieme, tra due configurazioni diverse della loro 'nuvola elettronica', cioè dall'insieme degli elettroni posseduti dalla molecola. Queste due configurazioni vengono

alternate fra loro seguendo il ritmo indotto da un campo elettromagnetico coerente di frequenza ben definita e costante nel tempo. La 'taglia' – la dimensione – del dominio di coerenza è uguale alla lunghezza d'onda – quindi, all'inverso della frequenza – di questo campo elettromagnetico coerente. Nel caso dell'acqua, in particolare, corrisponde a un decimillesimo di millimetro.»



Regime di incoerenza



Regime di coerenza

Figura 20. Sulla sinistra, le molecole d'acqua sono orientate disordinatamente. Sulla destra, le stesse molecole d'acqua appaiono in regime di coerenza.

Per avere un'idea concreta di cosa rappresenti questo valore, possiamo fare riferimento ai globuli

rossi che, mediamente, hanno un diametro pari a 8 millesimi di millimetro; ovvero, a 8 micrometri. All'interno di un solo globulo rosso, quindi, possono essere disposti 80 domini di coerenza dell'acqua. «I domini di coerenza in situazione di equilibrio dinamico», prosegue Piergiorgio Spaggiari, «si avvicinano l'uno all'altro fino a saldarsi fra loro. C'è però anche un'azione contraria originata dalla temperatura e quindi proporzionale al numero di collisioni che avvengono fra le molecole d'acqua e quelle dell'ambiente circostante. A causa degli urti, una parte delle molecole d'acqua perde

quel ritmo comune andando così ad alimentare una frazione di 'non coerenza' che, come un gas denso, circola negli interstizi esistenti tra i domini di coerenza.

«Alla normale temperatura corporea, circa il 40 per cento dell'acqua presente nell'organismo umano si organizza in insiemi coerenti della dimensione di circa 250 Ångström – un Ångström equivale a 10 miliardesimi di metro ed è l'unità di misura degli atomi – costituiti, approssimativamente, da 1.200.000 molecole. Il rimanente 60 per cento dell'acqua non è dominato dal campo magnetico

coerente e rappresenta, appunto, la frazione non coerente, che si comporta come un sistema fisico che segue le leggi dei gas.»

Quindi, quando Giuliano Preparata, e successivamente Emilio Del Giudice e Getullio Talpo, utilizzano l'acronimo QUEC – Coherent Quantum Electrodynamics, o Elettrodinamica Quantistica Coerente – fanno riferimento a questo tipo di logiche elettromagnetiche evidenziate dall'acqua organizzata in domini di coerenza? Non solo. Nel volume QED. Coherence in Matter scritto da Giuliano Preparata e pubblicato nel

1995, lo scienziato italiano applica la Teoria Quantistica dei Campi sia alla materia sia alle radiazioni, e specifica le applicazioni della QED Coerente – oltre che nell'acqua – nei due isotopi di elio – ^3He e ^4He –, nel ferromagnetismo e persino nelle applicazioni nucleari della Cromodinamica Quantistica. Quest'ultima è la teoria che descrive le interazioni che avvengono all'interno del nucleo atomico, che abbiamo già incontrato nel Capitolo 7. Emilio Del Giudice e Getulio Talpo, inoltre, applicano la QED specificatamente alla materia vivente.⁶

A questo punto, dopo aver definito l'ambito della Teoria dei Domini Coerenti dell'acqua e il suo rapporto con l'Elettrodinamica Quantistica Coerente, rimangono ancora da approfondire i meccanismi relativi al comportamento dell'acqua coerente quando vi sono sostanze disciolte al suo interno. Questa è proprio la domanda che pongo a Piergiorgio Spaggiari. «Le molecole di un soluto non possono penetrare all'interno dei domini di coerenza del solvente, se non a spese di notevoli energie, quindi rimangono collocate all'interno della frazione non

coerente dell'acqua. Questo comportamento però non vale per gli ioni che si trovano nelle immediate vicinanze del dominio di coerenza.

«Sui bordi al limite dei domini di coerenza dell'acqua i campi elettrici esterni eventualmente presenti vengono completamente schermati dai forti campi elettromagnetici che agiscono all'interno. Al contrario, i campi magnetici esterni non risultano schermati. Quindi gli ioni che si trovano nelle vicinanze dei domini di coerenza risultano esenti sia dalle collisioni sia dall'influenza dei campi elettrici esterni, e

risentono soltanto dell'azione dei campi magnetici eventualmente applicati.»

È proprio osservando l'instaurarsi di questo meccanismo, allora, che possiamo riconsiderare il flusso ionico descritto nel Capitolo 8 e immaginarlo come conseguenza diretta dell'esistenza dei domini di coerenza dell'acqua.

Altre conseguenze dei domini di coerenza

Per approfondire la riflessione sulla Teoria dei Domini di Coerenza dell'acqua e sulle sue possibili implicazioni, ho deciso di coinvolgere nella discussione anche Roberto Germano, fisico della materia. La prima domanda che rivolgo allo studioso è sulle conseguenze che comporta l'applicazione della teoria di Giuliano Preparata ed Emilio Del Giudice negli attuali studi sull'acqua. «Le conseguenze della Teoria dei Domini di Coerenza

dell'acqua – più in generale, della QED Coerente – sono qualcosa di straordinario. Si dimostra, fra le altre cose, che esiste una soglia di densità della materia oltre la quale avviene una transizione di fase superradiante. Il sistema cioè si riorganizza e raggiunge una nuova configurazione stabile nella quale il campo di materia e il campo elettromagnetico oscillano coerentemente fra loro con la stessa frequenza.

«C'è un grosso guadagno energetico, che è proporzionale alla densità degli atomi coinvolti. Quindi, la densità aumenta

enormemente fino al raggiungimento dell'equilibrio sia con l'azione delle forze repulsive derivanti dal principio di Pauli sia con le forze, anch'esse repulsive, che si instaurano fra gli elettroni. Questo meccanismo fornisce una spiegazione quantistica per la transizione di fase da vapore a liquido e avviene in maniera spontanea emettendo addirittura energia. Un'energia che noi conosciamo con il nome di calore latente di liquefazione.»

Ma non solo, Roberto Germano – che ha dedicato un intero volume all'argomento⁷ – mette in evidenza

che dai calcoli della Teoria dei Domini di Coerenza dell'acqua scaturisce anche molto altro. «Innanzitutto», precisa Roberto Germano, «l'acqua liquida, per qualsiasi temperatura diversa dallo 'zero assoluto', consiste in una struttura costituita da due fasi. Bisogna dire che già Wilhelm Conrad Röntgen, lo scopritore dei raggi X, nel 1892 aveva proposto l'ipotesi che l'acqua avesse una struttura bifasica. Röntgen prospettò questo modello empirico per spiegare la dipendenza dalla temperatura della solubilità nelle soluzioni acquose, ma la sua idea

venne considerata inadeguata. All'epoca, infatti, era impossibile comprendere come potessero esistere due tipi diversi di raggruppamenti di molecole uguali, pur nelle stesse condizioni termodinamiche. In questo caso, invece, tale struttura scaturisce proprio dai calcoli di Elettrodinamica Quantistica.

«La prima fase, quella 'incoerente', è costituita dalle molecole d'acqua che si trovano nello stato fondamentale. Tali molecole sono disposte densamente negli interstizi attorno ai 'domini di coerenza'. La seconda

fase, quella 'coerente' – che è stabilmente presente nel mezzo di quella incoerente – è costituita proprio dai 'domini di coerenza'. Tali domini hanno un raggio di 250 Ångström e i loro centri distano fra loro 750 Ångström. In pratica, sono 'isole molecolari' che a una data temperatura sono sopravvissute all'attacco delle fluttuazioni termiche che tendono a imporre loro il disordine; la densità di queste molecole è simile a quella del ghiaccio.

«È importante comprendere», continua Roberto Germano, «che, grazie ai calcoli dell'Elettrodinamica

Quantistica Coerente, per la prima volta, si possono prevedere teoricamente una serie di parametri sperimentalmente misurabili dell'acqua. Ecco alcuni esempi con la relativa spiegazione.

« Il calore specifico dell'acqua liquida: si osserva che è connesso alla frazione di fase coerente che 'evapora' dalla superficie dei domini di coerenza diventando, così, incoerente.

«L'anomalia della densità dell'acqua liquida: essa ha un massimo a 4° centigradi e a 0° centigradi è più densa dell'acqua solida, cioè del ghiaccio. Questo

effetto scaturisce dalla sovrapposizione delle due differenti dipendenze dalla temperatura, delle densità delle due fasi.

« I calore latente di evaporazione: anche questa quantità, come abbiamo visto poco fa, è connessa alla frazione di fase coerente che 'evapora' dalla superficie dei domini di coerenza divenendo incoerente.»

Sono affermazioni molto forti, che impongono una profonda riflessione sulla possibile natura quantistica dell'acqua. «In effetti», continua Roberto Germano, «dai calcoli di Elettrodinamica

Quantistica possiamo far derivare anche la temperatura di ebollizione e persino il 'volume critico', ovvero, il più grande volume molare al di sopra del quale non possono avere luogo spontaneamente processi di QED coerente. Un'ultima riflessione va fatta sui legami idrogeno che si instaurano fra diverse molecole d'acqua e che possiamo indicare anche come ponti idrogeno. Da questo punto di vista, non sono loro la causa delle interazioni fra le molecole, dato che le protuberanze delle nuvole elettroniche molecolari non esistono nelle molecole isolate. Al contrario, i ponti idrogeno

risultano essere gli effetti della dinamica coerente nell'acqua liquida. Dinamica coerente che rimescola le nuvole elettroniche producendo, così, le protuberanze.»

Un altro punto di vista

Come ho già precisato, non tutti i fisici e gli scienziati concordano sulle interpretazioni di Emilio Del Giudice e di Giuliano Preparata relative ai risultati delle loro ricerche. Inoltre, per altri studiosi, già il concetto stesso di acqua quantistica – così come proposto da Emilio Del Giudice – appare difficile da accettare e da condividere. Dato che l'obiettivo di questo capitolo consiste nel tentare di rispondere alla domanda se la Fisica Quantistica possa o meno spiegare i peculiari comportamenti dell'acqua, ho deciso di coinvolgere nella

discussione Vittorio Elia, coautore di oltre centocinquanta pubblicazioni sulla termodinamica delle soluzioni e sulle proprietà chimiche e fisiche dell'acqua.

Vittorio Elia è anche attivo in una serie di ricerche su un tema attualmente molto controverso e dibattuto, negli ambienti scientifici e non solo: quello della cosiddetta memoria dell'acqua. Per evitare ogni possibile fraintendimento, ho deciso di affrontare subito questo particolare argomento e ho chiesto delucidazioni a Vittorio Elia su cosa si debba intendere, effettivamente, con la definizione di memoria

dell'acqua. «È un termine giornalistico, utilizzato per la prima volta sul quotidiano francese Le Monde, poco dopo la pubblicazione sulla rivista scientifica internazionale Nature, nel 1988, del famoso articolo⁸ di Jacques Benveniste in cui si evidenziava, attraverso prove biologiche, come diluizioni acquose di sostanze che non contenevano più alcuna molecola del soluto originario inducessero in misura statisticamente significativa degli effetti biologici del tutto tipici di quelle sostanze inizialmente disciolte.

«La colorita espressione di memoria dell'acqua era dunque la sintesi giornalistica – non utilizzata da Benveniste – estrema e fantasiosa di una fenomenologia che rimane tuttora sostanzialmente non spiegata, ma che trova in recenti pubblicazioni scientifiche alcune possibili vie da seguire per validare sperimentalmente la realtà di un'intera classe di nuovi fenomeni chimico-fisici riguardanti l'acqua liquida. A quanto pare, infatti, è davvero possibile ottenere delle informazioni chimico-fisiche che dipendono dalla 'storia' recente o remota di un campione di acqua,

un po' come avviene nel caso – sicuramente meglio noto – dei materiali magnetici.

«Che la cosiddetta memoria dell'acqua, invocata dopo la pubblicazione del lavoro del gruppo che faceva capo a Benveniste, sia connessa con la capacità di tale solvente, sistema complesso a molte variabili, di essere influenzata da perturbazioni anche di piccola entità – quali azioni meccaniche o sollecitazioni di natura elettromagnetica – in maniera da allontanarsi dalle iniziali condizioni di equilibrio, appare via via sempre più indiscutibile. L'espressione

'memoria dell'acqua', in questa accezione, finisce con l'essere comprensibile e accettabile, rientrando in uno dei paradigmi assolutamente accreditati dalla comunità scientifica, quale quello della termodinamica dei processi irreversibili, dovuto al Nobel per la chimica, del 1977, Ilya Prigogine.

«Il nostro gruppo di lavoro, negli ultimi venti anni, ha affrontato la questione, studiando sul piano chimico-fisico alcune proprietà delle soluzioni acquose estremamente diluite ponendosi la seguente domanda: la 'nuova acqua' può davvero essere 'diversa' da quella di

partenza? Rispondere a questa domanda è stata la nostra sfida e posso anticipare che la risposta – inattesa sì, ma fortemente sorretta dagli esperimenti – risulta essere affermativa. Siamo incoraggiati dal fatto che a queste stesse conclusioni sono giunti anche altri gruppi di ricerca, con lavori di differente impostazione e metodologia. Per esempio, quelli di Philippe Belon, di Luciana Betti di Louis Rey e di molti altri – senza dimenticare gli ormai storici e pionieristici lavori sperimentali del fondatore della chimica-fisica italiana Giorgio Piccardi –,

concernenti le reazioni chimiche fluttuanti. Quindi si può probabilmente affermare che è ormai stata raggiunta la massa critica di dati sperimentali necessari a poter parlare di una vera e propria nuova classe di fenomeni chimico-fisici tutta da sperimentare e da interpretare nei prossimi anni.»

Quindi, dal punto di vista di Vittorio Elia bisogna fare riferimento esclusivamente alle proprietà chimiche e fisiche dell'acqua. Proprietà che devono essere verificabili in laboratorio e che lo stesso scienziato sta attualmente

studiando assieme alla propria équipe di ricerca. Ciò premesso, allora, è possibile trovare una correlazione fra la Fisica Quantistica e le caratteristiche dell'acqua oppure sono due realtà disgiunte l'una dall'altra? «Per l'attuale grado di conoscenza che io personalmente ho delle due realtà posso dire che non vi trovo alcuna correlazione. Anche in relazione al fenomeno della cosiddetta memoria dell'acqua, ritengo che possa essere legato a una variazione della struttura sovramolecolare dell'acqua stessa. La struttura sovramolecolare parrebbe

contenere una serie di informazioni che non sono state ancora decodificate, ma che Luc Montagnier per esempio ha già cominciato a studiare.

«Per quello che troviamo noi sperimentalmente, in generale, non c'è alcuna necessità di ricorrere né all'Elettrodinamica Quantistica Coerente né alla Meccanica Quantistica. Nelle nostre ricerche, quando perturbiamo l'acqua tramite la metodologia che abbiamo sviluppato nel nostro laboratorio, riusciamo a farla aggregare in un solido. La mia opinione è che in questo solido possano essere

conservate delle chiavi interpretative da parte dei sistemi biologici o dei sistemi chimico-fisici. Non abbiamo alcuna ipotesi teorica che possa spiegare come si vengano a formare questi aggregati di molecole d'acqua – ma sperimentalmente si formano – eppure penso che le teorie classiche, che ben conosciamo, possano essere sufficienti.

«Potrebbe, però, esserci un aggancio con la Meccanica Quantistica dal punto di vista del concetto di legame chimico. L'attuale formulazione di legame chimico basata sulla soluzione delle

equazioni di Erwin Schrödinger, infatti, non è in grado di spiegare la formazione dell'acqua solida, a pressione e temperatura ambiente.»

Andare oltre

Una gran parte dei miei studi di fisica si è svolta presso quello che una volta veniva indicato come il Dipartimento di Chimica Fisica, dell'Università di Padova. Era il periodo a cavallo fra la fine degli anni Ottanta e l'inizio degli anni Novanta del Novecento e io, come altri studenti, ero affascinato dai comportamenti delle molecole e dalla possibilità di poterli studiare sfruttando quelle che, allora, erano le più avanzate tecniche di spettroscopia EPR ed ENDOR: Electron Paramagnetic Resonance, Risonanza Paramagnetica

Elektronika e Elektron Nuklear
Double Resonance, Doppia
Risonanza Elektronika-Nukleare.
Lavorando sui composti di
inclusione dell'urea – per le ricerche
correlate alla mia tesi – avevo
quotidianamente occasione di
confrontarmi con gli altri laureandi
o con i ricercatori che
frequentavano il laboratorio, e
molto spesso si finiva per parlare
dell'acqua e delle sue strane
caratteristiche.

Durante quelle chiacchierate, per
molti versi affascinanti, si discuteva
di tutte le prerogative peculiari
dell'acqua. Fra queste però non era

considerata la possibilità che potesse essere solida anche a pressione e a temperatura ambiente. E fino al 2011 per la verità nessuno aveva neanche mai ipotizzato che l'acqua in natura esistesse in due differenti stati liquidi. Nell'agosto di quell'anno, Yang Zhang e Sow-Hsin Chen, due ricercatori del MIT annunciarono di aver trovato una possibile soluzione alla domanda sul perché l'acqua, congelando, aumenti di volume anziché contrarsi. La loro teoria – poi verificata sperimentalmente e pubblicata l'anno successivo⁹ – presupponeva l'esistenza di due

diversi stati liquidi dell'acqua, differenti fra loro per la disposizione spaziale delle molecole e quindi per la densità della materia.

Una teoria molto difficile da provare, dato che il passaggio di stato liquido-liquido avviene a temperature bassissime e a pressioni altissime: condizioni che non consentono all'acqua di mantenersi fluida. Per riuscirci, i due ricercatori hanno confinato l'acqua all'interno di nanotubi di silicio, impedendone così il congelamento. Successivamente hanno modificato le condizioni di pressione e di temperatura del

sistema, misurando la densità dell'acqua in diversi momenti tramite un fascio di neutroni. In questo modo, Yang Zhang e Sow-Hsin Chen hanno potuto provare l'esistenza di una differenza di densità tra i due diversi stati liquidi.

Tornando alle ricerche di Vittorio Elia, se l'acqua esiste in natura con due stati liquidi differenti, forse è anche possibile che possa solidificare a temperatura e a pressione ambiente. Chiedo a Vittorio Elia di spiegarmi più approfonditamente questo concetto, per me completamente nuovo. «Con la precisazione 'a

pressione e temperatura ambiente' è chiaro che non mi sto riferendo al ghiaccio bensì a una fenomenologia assolutamente nuova che consente di spiegare, in buona parte, la nostra ormai numerosa produzione di dati chimico-fisici sulle cosiddette 'acque perturbate'. Quello che va detto più chiaramente è che 'perturbare un'acqua' è una definizione che vuole specificare che non si fanno cose violentissime sul sistema, né si aggiungono o si sottraggono, componenti chimici. Semplicemente, si sottopone l'acqua a delle specifiche procedure che prevedono che la quantità di

energia scambiata sia molto piccola.

«Questo processo di perturbazione è talmente funzionante che allo stato attuale dei fatti noi conosciamo ben sei tipi diversi di acqua solida, a pressione e a temperatura ambiente, ottenuti con procedimenti nei quali l'acqua viene messa a contatto con polimeri idrofili sia sintetici, come il nafion, sia naturali, come la cellulosa e molti dei suoi derivati. Quindi parliamo di un'acqua solida che non è spiegabile con l'attuale teoria del legame chimico, dato che, una volta che l'ossigeno ha realizzato due

legami con i due atomi di idrogeno, non può legarsi a null'altro. Il fatto che noi otteniamo un solido stabile a pressione e a temperatura ambiente da questi sistemi potrebbe significare – ma ci sono anche tutta una serie di altri indizi e prove – che l'acqua sia polimerizzata. Non è più una molecola singola che si muove nella massa liquida ma quanto meno sono aggregati di molecole d'acqua.»

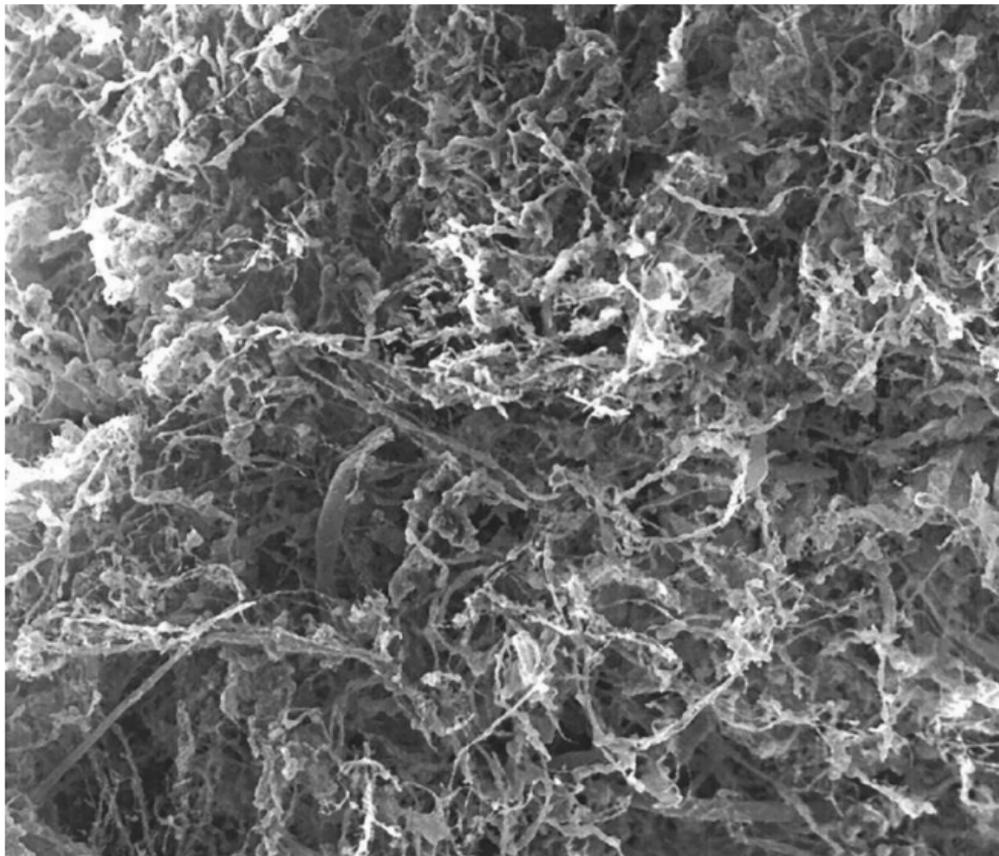


Figura 21. Immagine al SEM, Microscopio a Scansione Elettronica, del materiale solido risultante dalla liofilizzazione dell'acqua perturbata.

A questo punto ho bisogno di qualche chiarimento ulteriore e così chiedo a Vittorio Elia di specificare il suo concetto di acqua solida. «La scoperta recente più importante del nostro gruppo di ricerca è che le modifiche locali nell'organizzazione dell'acqua allo stato liquido possono essere raggiunte attraverso molti tipi di stimoli fisici a bassa energia. Inoltre, queste alterazioni possono anche diventare 'fisse', grazie alla spontanea organizzazione sovramolecolare, e formare strutture dissipative 'permanenti' nell'acqua liquida; strutture che, ovviamente, si evolvono nel tempo

con il flusso di energia e con il contesto ambientale. In maniera ancora più sorprendente, queste strutture sono così persistenti da sopravvivere anche all'essiccazione o alla liofilizzazione.

«Infatti, dopo la rimozione dell'acqua 'normale', a pressione atmosferica e temperatura ambiente avviene la condensazione, in quantità facilmente misurabili, di strutture solide con ciascun nucleo di dimensioni di centinaia di nanometri. Da soli 200 millilitri di acqua pura, l'equivalente di un bicchiere, si ottengono alcuni

milligrammi di strutture solide che appaiono evidentemente frattali. A questo proposito faccio anche notare che, pochi anni fa, i fondamenti teorici basati sulla QED Coerente per le proprietà organizzative dell'acqua liquida sono stati armonizzati con la termodinamica dei processi irreversibili,¹⁰ grazie al lavoro congiunto di Emilio Del Giudice ed Enzo Tiezzi.»¹¹

Necessarie precauzioni

Nella storia della fisica sono numerosi i casi di scoperte successivamente rivelatesi incorrette. Purtroppo, il ricordo del caso relativo alla 'poliacqua', inizialmente osservata dal chimico russo Nikolai Fedyakin e successivamente studiata dal famoso fisico Boris Deryagin, è ancora vivido,¹² e quindi è necessaria un'estrema cautela quando si affrontano argomenti così rivoluzionari. Ecco perché chiedo a Vittorio Elia se i risultati ottenuti si possano eventualmente attribuire a un qualche fenomeno di

inquinamento dell'acqua o alla presenza di impurità. «Prima di rispondere a questa domanda vorrei precisare i due metodi principali che utilizziamo per realizzare le perturbazioni fisiche, a bassa energia, dell'acqua. Il primo consiste nel contatto prolungato fra l'acqua e una superficie fortemente idrofilica come, per esempio, il nafion: un polimero sintetico con proprietà ioniche. Il secondo, invece, nella filtrazione iterativa dell'acqua attraverso filtri di vetro 'sinterizzato'; ovvero compattato e densificato, tramite trattamento termico.

«Tutte le numerose indagini chimico-fisiche effettuate sull'acqua perturbata evidenziano un aumento della 'conducibilità elettrica': la capacità di trasportare corrente elettrica. E abbiamo anche trovato che esiste una relazione lineare tra il logaritmo della conducibilità elettrica e il pH. Con entrambe le modalità di perturbazione abbiamo osservato aumenti di conducibilità pari a più di cento volte rispetto all'acqua non perturbata, conducibilità che tra l'altro varia con l'età del campione. Un'altra scoperta interessante consiste nel fatto che la variazione del pH è

stata anche molto grande. Perturbando l'acqua con il nafion, il pH è passato da un valore di circa sei a un valore di circa tre. Questo indica un aumento della concentrazione di ioni idrogeno pari a circa mille volte: un risultato che esclude che tali effetti possano essere originati da impurezze chimiche.»

Allora, com'è possibile giustificare i dati sperimentali che sono stati illustrati, in particolare l'aumento della conducibilità elettrica e la variazione del pH? «Ipotizzando proprio la presenza di aggregati sovramolecolari di

molecole d'acqua. Queste diverse tipologie di acqua fisicamente perturbata sono state studiate effettuando una serie di misure strutturali: analisi FT-IR, o spettroscopia nell'infrarosso; dispersione della luce; spettroscopia UltraVioletto-Visibile; microscopia a fluorescenza; AFM, microscopia a Forza Atomica. Nei precedenti lavori avevamo già esaminato in profondità la determinazione di altri parametri chimico-fisici come la conducibilità elettrica, il calore di mescolamento con acidi o con soluzioni basiche e il pH.

«Vorrei anche aggiungere che questa idea che si abbia a che fare con dei polimeri è legata al fatto che l'acqua perturbata esibisce una serie di proprietà chimico-fisiche – come la chiralità, il dicroismo circolare e lo spettro di fluorescenza – che sono tipiche delle soluzioni di macromolecole biologiche.» Prima di lasciare nuovamente la parola a Vittorio Elia, ritengo che siano necessari alcuni chiarimenti su alcuni termini che abbiamo appena incontrato e che non vengono utilizzati spesso al di fuori dell'ambito scientifico.

La chiralità è una proprietà che

hanno alcune molecole di non essere sovrapponibili alla propria immagine speculare. Facciamo un esempio per capire questo concetto e consideriamo una normale vite. Se prendo la vite e la osservo da vicino, noto che il suo filetto ruota attorno all'asse centrale in direzione oraria. Questo fa sì che se voglio avvitarla con un cacciavite, devo ruotare quest'ultimo in senso orario. Se invece voglio svitarla devo ruotare il cacciavite in senso antiorario. Tutte le molecole chirali acquisiscono quindi quello che viene definito come «potere rotatorio», che si caratterizza dal verso nel

quale ruotano. L'acqua, come abbiamo visto precedentemente, è simmetrica, quindi se vengono evidenziati comportamenti chirali, devono necessariamente essere riferiti ad agglomerati di molecole.

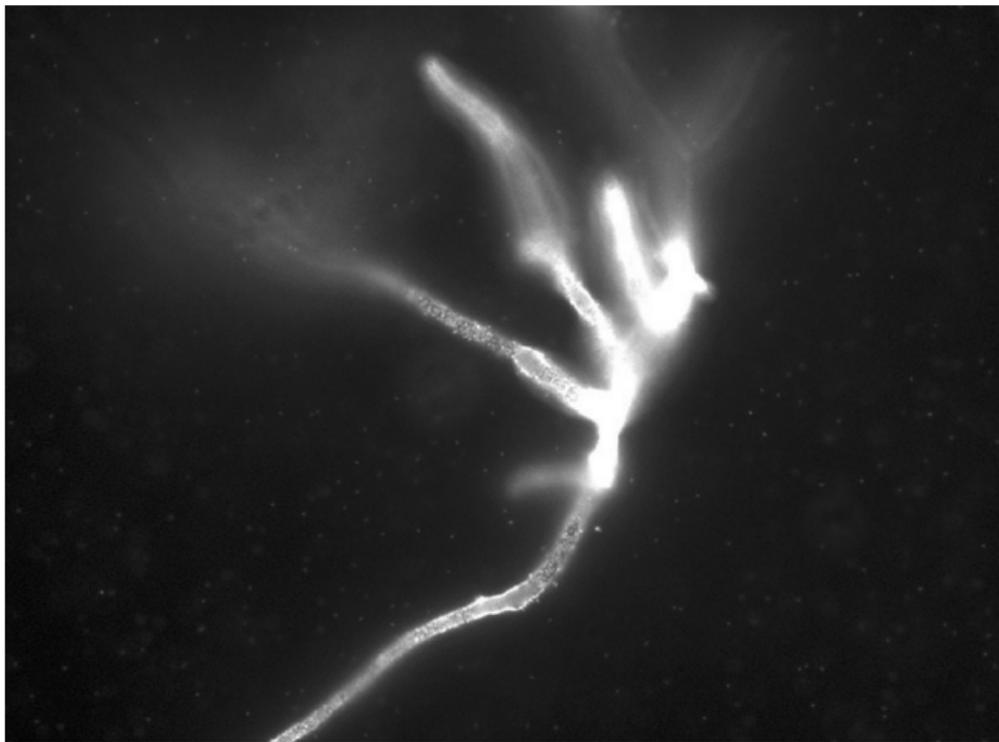


Figura 22. Immagine al Microscopio a Fluorescenza di un campione di acqua perturbata. Sono osservabili delle strutture di forma irregolare – delle dimensioni del millesimo di millimetro – al cui interno le microsferette fluorescenti appaiono essere

raggruppate.

Il dicroismo circolare deriva dalla chiralità ed è un fenomeno fisico legato all'assorbimento della luce polarizzata circolarmente. Avendo due componenti, quella destra e quella sinistra, una sostanza chirale mostra due diversi livelli di assorbimento che possono essere evidenziati tramite le opportune indagini spettroscopiche. In biologia, la spettroscopia di dicroismo circolare viene utilizzata soprattutto per lo studio delle proteine.

Infine, lo spettro di fluorescenza si verifica in presenza di una radiazione elettromagnetica – introdotta nel Capitolo 1 – che viene emessa in maniera spontanea da un sistema come conseguenza dell'assorbimento di una differente radiazione elettromagnetica più intensa che ha creato un'eccitazione degli elettroni.

«In particolare», continua Vittorio Elia, «l'acqua perturbata, osservata con un microscopio a fluorescenza, mostra strutture di grandi dimensioni su cui le sferette fluorescenti appaiono raggruppate, immerse nel fluido che le circonda.

Queste sono le novità che ci stanno deliziando negli ultimi due anni e che solo oggi, per la prima volta, espongo pubblicamente all'interno di un testo divulgativo. Il fatto è che più continuano i nostri studi, più vengono fuori tutta una serie di prove a favore di questa idea balzana che l'acqua possa polimerizzare. Gran parte della nostra sperimentazione non può essere spiegata se non attraverso un processo di polimerizzazione. Tra l'altro, pur non avendo una teoria che possa sostenere il fenomeno, siamo anche riusciti a determinare il peso molecolare di

questo eventuale polimero fatto d'acqua.

«Riassumendo il tutto, le due prove più significative a sostegno dell'ipotesi della polimerizzazione dell'acqua sono l'osservazione di spettri di dicroismo circolare e l'emissione di spettri di fluorescenza. I due fenomeni di cui parliamo – che non sono noti al grande pubblico ma soprattutto ai biologi e ai chimici-fisici biologici – sono tipici di macromolecole biologiche. Quindi, sono tipici di soluzioni che contengono dei polimeri.

«È una vera e propria

rivoluzione. Io ormai sono relativamente convinto. Vado ancora a caccia dell'errore clamoroso che eventualmente potrei aver commesso, ma per il momento non l'ho trovato. Il punto cruciale è che personalmente non sono in grado, per la mia formazione culturale, di dare contributi all'idea che l'acqua possa polimerizzare e che questo, comunque, è un risultato sperimentale che stravolge la teoria del legame chimico.»

C'è ancora un'ultima domanda che desidero porre a Vittorio Elia e riguarda proprio il legame chimico.

Perché, nell'ottica delle ricerche che sta portando avanti sull'acqua, la teoria del legame chimico andrebbe riformulata? «Il motivo è il seguente. Quando osserviamo la molecola d'acqua, notiamo che gli atomi che la costituiscono non possono più realizzare altri legami chimici. Per la teoria degli orbitali ¹³ l'acqua non ha altre possibilità. Quindi, se la sottoponiamo a un'analisi con la spettroscopia a fluorescenza non otteniamo alcun risultato.

«Quando, invece, osserviamo l'acqua perturbata con la spettroscopia a fluorescenza, sia in

forma liquida sia in forma solida, quello che si evidenzia è proprio uno spettro di fluorescenza. Questo significa, in parole semplici, che l'elettrone che era stato eccitato è tornato allo stato fondamentale emettendo un fotone. Ma questo è impossibile, dato che l'acqua ha solo gli orbitali che sono stati utilizzati per formare il legame fra l'idrogeno e l'ossigeno. Non ce ne sono altri disponibili per gli elettroni e l'unica azione che si potrebbe realizzare, al massimo, sarebbe una ionizzazione. Com'è possibile osservare l'emissione di un fotone se non ci sono orbitali da cui

decade l'elettrone? L'unica spiegazione possibile è che questi orbitali si siano creati, e quindi, quando è stata perturbata, l'acqua deve aver modificato la propria struttura elettronica. Ecco perché dovrebbe essere rivista tutta la teoria del legame chimico: per includere anche questo tipo di comportamenti che sono stati osservati sperimentalmente.»

Un riscontro importante alle proprietà chirali dell'acqua è stato dato proprio lo scorso maggio da un gruppo di ricerca congiunto fra il Dipartimento di Chimica e di Chimica Biologica della Cornell

University di Itacha e il Dipartimento di Chimica e Biochimica dell'Università di Notre Dame dell'omonima cittadina dell'Indiana. In uno studio pubblicato sull'autorevole rivista online dell'American Chemical Society sono state portate le evidenze di un comportamento chirale dell'acqua di idratazione del DNA.¹⁴ Utilizzando indagini di spettroscopia non lineare è stata determinata la presenza di una superstruttura di acqua chirale presente in tutta l'area circostante al DNA, a condizioni e temperatura ambiente.

Un risultato che sembra mostrare scenari ancora tutti da esplorare. Scenari che, a propria volta, sollevano nuovi interrogativi su un elemento che tutti diamo per scontato – l'acqua – e che, invece, continua a riservare infinite sorprese!

La Mente Quantica

Ovvero, può il pensiero modificare
la realtà?

Cosa c'è dietro? The Key, The Secret e tutti gli altri best seller che hanno nel titolo o come riferimento, la cosiddetta «Mente Quantica» basano realmente il proprio fondamento sulla Fisica Quantistica? Potrebbe esistere effettivamente una «coscienza quantistica» o è un'idea che si è sviluppata attorno a un concetto sostanzialmente corretto poi portato però alle sue estreme implicazioni? Cosa c'è di plausibile dietro una visione così alternativa e radicale, del pensiero?

Perché è importante? Perché è uno degli aspetti più seducenti della Fisica Quantistica e da esso sono nate molte interpretazioni che mischiano fra loro teorie scientifiche con ipotesi suggestive e mai verificate. Fare un po' di chiarezza significa mettere a confronto fra loro due punti di vista sostanzialmente differenti: da un lato la nostra personale percezione del mondo che ci circonda, dall'altro il modo in cui la realtà stessa ci viene rappresentata dalla Teoria Quantistica.

SCRIVERE quest'ultimo capitolo rappresenta per me una sfida e contemporaneamente una necessità. Negli ultimi anni la Fisica

Quantistica ha saputo ritagliarsi un ruolo di primaria importanza nell'immaginario collettivo, con tutti i naturali pro e i contro che, necessariamente, questo tipo di investitura comporta. Mai prima d'ora, infatti, una teoria scientifica era riuscita ad attirare su di sé così tanto interesse da parte del grande pubblico. E mai prima d'ora, inoltre, quella stessa teoria era stata utilizzata anche dai non addetti ai lavori per giustificare questa o quella supposizione o per avallare questa o quella congettura.

Il motivo, molto semplicemente, risiede nel fascino che deriva alla

Fisica Quantistica
dall'indeterminazione intrinseca che
la contraddistingue.
Un'indeterminazione che, nelle
parole che lo stesso Werner
Heisenberg scrisse nel 1927,
implica la fine della validità del
rapporto causa-effetto: «Dato che
tutti gli esperimenti sono soggetti
alla Meccanica Quantistica e di
conseguenza al Principio di
Indeterminazione, ne consegue che
la Meccanica Quantistica sancisce il
venir meno della causalità». ¹
Un'affermazione che si può definire
«sconvolgente» perché mina le basi
stesse di tutto ciò che appartiene

alla nostra esperienza quotidiana e alla storia del pensiero occidentale.

Chiariamo subito quest'ultimo concetto, partendo dalla fisica classica e in particolare dal metodo scientifico, così come definito dal celebre scienziato e filosofo italiano Galileo Galilei nella prima metà del XVII secolo. In base all'osservazione sperimentale degli eventi, con i presupposti che sono stati appena dichiarati, è sempre possibile stabilire un Principio di Causalità, cioè una sequenza di azioni concatenate fra loro in cui una data causa produce uno specifico effetto. Non solo: per il

Principio di Riproducibilità, se tutte le condizioni nelle quali si è verificata la causa rimangono identiche, ciò che si otterrà sarà sempre il medesimo effetto.

Facciamo un esempio concreto. Se sto giocando a biliardo e colpisco una delle palle con la stecca, quello che mi aspetto è che quella palla si muova verso l'obiettivo che ho scelto con la velocità che le ho impresso. Se rifaccio lo stesso tiro senza modificare né la forza che ho impiegato né l'angolazione della stecca, né qualsiasi altra variabile, la palla si muoverà ancora in avanti esattamente come dopo il primo

colpo. Quando la causalità viene meno, così come dichiarato da Heisenberg, vuol dire che la palla può muoversi in avanti anche senza essere stata colpita, prima, dalla stecca, oppure che sferrando due colpi identici, la palla può «decidere» di spostarsi lungo due differenti traiettorie e con due diverse velocità!

L'affermazione di Heisenberg, quindi, ha la capacità di sovvertire tutto ciò che noi siamo abituati a conoscere e assieme, di trasportarci in un nuovo mondo dove i vincoli della fisica classica hanno una validità limitata. Un mondo

inaspettato e affascinante, che però non è così libero come sembra. Anch'esso, infatti, è soggetto a delle precise regole e a delle specifiche leggi: quelle della Fisica Quantistica. E questo è il primo punto che bisogna tenere sempre in considerazione!

Ma se le leggi della Fisica Quantistica sono così diverse da quelle che abbiamo imparato a scuola o che semplicemente conosciamo attraverso la nostra esperienza, vuol dire che tutto ciò che sappiamo non è più valido? Vuol dire che è possibile qualsiasi altra interpretazione della realtà

perché tanto c'è alla base il Principio di Indeterminazione? No, in effetti, non è così. La fisica classica e la Fisica Quantistica sono due differenti strumenti che ci servono per creare delle rappresentazioni del mondo adatte a specifici ambiti di studio. In particolare, mentre la fisica classica si occupa della realtà così come noi riusciamo a percepirla attraverso i nostri sensi, la Fisica Quantistica descrive il comportamento della materia quando la osserviamo su scale di grandezza e di energia atomica e subatomica. E questo è l'altro punto che bisogna tenere

sempre in considerazione!

Nessuna paura, quindi. Ogni volta che giocheremo a biliardo, la palla andrà esattamente dove avremo deciso di mandarla, nella piena osservanza del Principio di Causa-Effetto e di tutte le leggi della fisica classica coinvolte. Analogamente, spostandoci a livello atomico e subatomico, riprenderà completamente la propria valenza il Principio di Indeterminazione di Heisenberg e ancora una volta non riusciremo a determinare, contemporaneamente, la velocità e la quantità di moto² delle nostre particelle.

Una visione più generale

Dato che le leggi della Fisica Quantistica hanno valore solo su scala atomica e subatomica, perché alcuni autori tentano comunque di applicarle anche in altri ambiti? Beh, anche se può sembrare strano, questo tipo di approccio ha avuto origine da quegli stessi scienziati che più si sono dedicati allo sviluppo della Teoria Quantistica e in particolare da Niels Bohr. Proprio Bohr, infatti, nel periodo immediatamente successivo al Congresso Solvay del 1927 iniziò la pubblicazione di una serie di saggi dedicati alle possibili implicazioni

della Teoria Quantistica nei diversi campi della conoscenza. Il primo, del 1929, si intitolava Il quanto d'azione e la descrizione della natura e a esso, fra gli altri, si aggiunsero Luce e vita, del 1932, Filosofia naturale e culture umane, del 1938, Atomi e conoscenza, del 1955 e Fisica Quantistica e problema della vita, del 1962.

Per capirne la ragione, basta fare riferimento alle parole che il grande fisico danese scrisse proprio nell'ultimo testo citato: «Sottolineando la difficoltà di mantenere in vita gli organismi in condizioni che mirino a una loro

descrizione completa di tipo atomistico, io suggerivo perciò che l'esistenza stessa della vita potrebbe venire assunta in biologia come un fatto elementare, nello stesso senso in cui il quanto d'azione va considerato in Fisica Atomica un elemento fondamentale irriducibile ai concetti di fisica classica». ³

Già questa frase, dove compaiono vicini fra loro concetti come vita e quanto d'azione, può lasciare sorpresi, ma Bohr in effetti si spinse molto oltre. Nello stesso saggio, infatti, scrisse ancora: «Prima di concludere, vorrei

richiamare brevemente l'attenzione sulla conoscenza biologica che si può ricavare dall'esperienza psichica. Non occorre che io sottolinei che il termine 'coscienza' si presenta nella descrizione di comportamenti così complicati da rendere necessario, per la loro comunicazione, un riferimento alla consapevolezza di se stesso posseduta dall'organismo individuale. Inoltre, parole come 'pensiero' e 'sentimento' fanno riferimento a esperienze mutuamente escludentesi e sono perciò state usate fin dalle origini del linguaggio in modo tipicamente

complementare. Naturalmente nella descrizione fisica oggettiva nessun riferimento vien fatto al soggetto che osserva, mentre parlando dell'esperienza cosciente diciamo 'io penso' e 'io sento'. L'analogia con l'esigenza in fisica quantistica di tener conto di tutti gli aspetti essenziali del dispositivo sperimentale è tuttavia riflessa nei diversi verbi associati al pronome». ⁴

Voler utilizzare la metodologia quantistica per ragionare sui grandi temi della vita può sembrare una forzatura, ma Bohr era convinto della correttezza di questo tipo di

approccio. Anzi, riteneva che le esperienze vissute ci modificassero fisicamente e permanentemente. Esiste un corrispettivo riconosciuto e valido in ambito psicopedagogico di questo pensiero che è stato formulato da Jean Piaget, il celebre fondatore dell'Epistemologia Genetica. Piaget afferma che lo sviluppo cognitivo del bambino deriva dall'interazione con la realtà che lo circonda.⁵ Grazie a questa interazione si verifica una trasformazione a livello cerebrale: il bambino acquisisce nuove informazioni utili alla conoscenza pratica. L'accesso alle nuove

informazioni innesca un disequilibrio all'interno di quelli che Piaget definisce schemi mentali – cioè, modelli organizzativi comportamentali che riflettono uno specifico modus di interazione fra il singolo individuo e l'ambiente – già esistenti. Ciò comporta l'attivarsi di un meccanismo che porta alla ricerca di un nuovo equilibrio – un'omeostasi – che, assimilando le nuove conoscenze, accomoda il precedente schema mentale trasformando tangibilmente la stessa struttura cognitiva.

«Il fatto che ogni cosa giunta alla nostra coscienza possa essere

ricordata fa ritenere che una traccia permanente venga lasciata nell'organismo.» Questo è il pensiero espresso da Bohr nel 1962. «Naturalmente qui interessano soltanto esperienze nuove, importanti per l'azione o la meditazione. [...] Tuttavia nel ricevere impressioni sensoriali, a cui reagiamo subito o più tardi, alcune modificazioni irreversibili hanno luogo nel sistema nervoso. Senza entrare in una più o meno ingenua descrizione della localizzazione e dell'integrazione delle attività del cervello, rileverò solo che è interessante l'idea di confrontare

quest'adattamento con processi irreversibili che ripristinano la stabilità della nuova situazione.»⁶

È un Bohr che si può definire «metafisico» quello che traspare dai testi di queste sue pubblicazioni. Stranamente vicino, almeno in apparenza, alla sensibilità di coloro che ritengono che la Meccanica Quantistica possa essere applicata anche nei campi del puro pensiero e della pura conoscenza. Ma è realmente così? Bohr, oltre che un grande scienziato, era un uomo che sapeva vedere al di là delle apparenze e delle convenzioni. Eppure, alcune sue posizioni non

erano condivise dai suoi contemporanei e anche oggi, non riscuotono unanimi consensi. Per capire meglio ciò che Bohr intendeva e paradossalmente le aspettative che alcune interpretazioni non ortodosse della Fisica Quantistica sembrano innescare, è necessario studiare un altro tipo di universo: quello del pensiero, dei bisogni e della stessa coscienza umana.

Cambiare approccio

Il terreno all'interno del quale mi sto per muovere è complesso e con un'espressione un po' forte, «traditore». Nella mia esperienza di ricercatore e di studioso, ho imparato a dare la giusta importanza a ciò che si può effettivamente dimostrare e a lasciare contemporaneamente aperta la porta al dubbio. Chiunque lavori con consapevolezza in un qualche ambito della fisica sa bene che molto di ciò che attualmente sappiamo si basa su ipotesi e ragionamenti che potrebbero essere messi in discussione in qualsiasi

momento. Nei capitoli precedenti, infatti, abbiamo già incontrato varie teorie, come quella sulla radiazione di corpo nero o quella atomica, che hanno subito radicali evoluzioni in lassi di tempo anche molto ristretti: anni o addirittura mesi. Pensare di conoscere tutto o di avere accesso a una verità immutabile, nell'ambito della Fisica Quantistica, non solo è impossibile ma è anche profondamente riduttivo. Come Shakespeare fa dire ad Amleto nell'omonima tragedia: «Vi son più cose in cielo e in terra, Orazio, assai più cose di quante ne sogna la tua filosofia».⁷

Chi meglio di un neuroscienziato, allora, può aiutarci a orientarci correttamente in questo mondo al limite fra la realtà fisica e la sua percezione e rielaborazione mentale? Solo un neuroscienziato che sia anche specialista in Neurologia e abbia realizzato una serie di ricerche e di pubblicazioni, sulle modificazioni della coscienza – compreso il coma e la morte cerebrale – e su quella stessa meditazione a cui si riferiva Niels Bohr nel 1962: Enrico Facco. Ed è proprio con lui che ho deciso di fare il punto sulle possibili convergenze fra la Fisica Quantistica e gli attuali

studi sul pensiero, sulla coscienza e sulla percezione. Una convergenza che, secondo alcuni scienziati come, per esempio, il matematico inglese Sir Roger Penrose porterebbero alla definizione di una Mente Quantica concretamente osservabile all'interno del nostro cervello. Ma sulla teoria di Penrose e su questo specifico aspetto torneremo più avanti: prima, infatti, è necessario partire dalle definizioni, in particolare, proprio da quella di pensiero.

«Il concetto di pensiero è molto ampio e come tale, non è esente da tutte quelle ambiguità e incertezze

che caratterizzano ciò che fa riferimento al mondo della psiche. Il pensiero può essere considerato come un'attività mentale che si articola in un'ampia gamma di forme diverse, rivolte sia al mondo esterno sia a quello interno. E può, come ogni altro fenomeno biologico avere manifestazioni anomale e alterazioni patologiche. Appartengono alla sfera del pensiero diverse attività connesse con l'esercizio della ragione, dell'intuizione, della fantasia e dell'immaginazione. Va poi sottolineato che quest'ultima, pregiudizialmente svalutata nel

Novecento dalla prospettiva razionalistica dominante, è una facoltà cognitivamente valida e importante. Albert Einstein e Nikola Tesla, pur con personalità molto diverse, avevano in comune una grande capacità immaginativa. Capacità che era alla base delle loro intuizioni e delle loro invenzioni.

«Il pensiero intuitivo consente di produrre conclusioni corrette apparentemente senza necessitare dei passaggi intermedi del ragionare logico, e per questo motivo è stato a volte definito come 'pensiero prelogico'. Tuttavia,

questa sembra una definizione insufficiente se non ingenua, perché non tiene conto del pensiero inconscio, sostanzialmente ignorato o trascurato fino agli anni recenti. Il pensiero inconscio è infatti coinvolto attivamente nell'apprendimento, nelle decisioni, nella formazione e nel cambiamento delle attitudini, nella soluzione di problemi complessi e nella creatività.

«Oltre alla cognizione cosciente esiste un apprendimento implicito, che utilizza vie nervose e circuiti distinti.⁸ Questo apprendimento rimane inconscio e riguarda

prevalentemente i comportamenti appresi che non richiedono di essere verbalizzati. Le decisioni semplici sembrano essere prese più facilmente con il pensiero cosciente, mentre quelle più complesse, importanti o interessanti per il soggetto sono più efficacemente affrontate con il pensiero inconscio.⁹ La performance creativa può essere, inoltre, attivata durante il sonno e il sogno; e i suoi risultati possono presentarsi alla coscienza al risveglio, come suggeriscono alcuni celebri casi storici. Fra questi, vale la pena di ricordare René Descartes, che riferì di aver avuto in

sogno la rivelazione del suo Discorso sul Metodo, e il farmacologo tedesco Otto Loewi che, nel 1920, ebbe in tre sogni consecutivi la visione su come riuscire a dimostrare la trasmissione chimica degli impulsi dal nervo vago al cuore. Tre sogni che gli permisero di vincere il Nobel per la medicina nel 1936.

«La saggezza e la sapienza, concetti di cui si è in gran parte – e disgraziatamente, dal mio punto di vista – perso il significato nel mondo moderno, sono parte del mondo del pensiero e ne rappresentano la parte più

elevata.» Prosegue Enrico Facco: «Dal punto di vista neuropsicologico, la saggezza può essere definita come quella facoltà che rende possibile afferrare molto rapidamente o istantaneamente la soluzione di un problema complesso e anticipare eventi dai quali la gente si fa per lo più prendere alla sprovvista.¹⁰ È quindi lecito ritenere che saggezza e intuizione abbiano la loro base nel pensiero inconscio e non siano affatto prelogiche, ma solo elaborate senza necessità della consapevolezza dei passaggi logici adottati. Alla loro origine c'è la creazione di modelli sviluppati nel

corso della vita sulla base dell'esperienza – mediante lo studio e la risoluzione di problemi difficili –, i quali consentono una elaborazione rapida e preconsua delle informazioni».

Dal pensiero alla creatività...

Se la definizione di pensiero introduce elementi che si appoggiano su concetti prevalentemente psicologici e neuropsicologici, i meccanismi che lo innescano hanno comunque origine all'interno del nostro cervello da processi fisici, chimici e biologici. Da questo punto di vista, quindi, potrebbero essere messi in relazione con le logiche della Teoria Quantistica. Questa possibilità, però, solleva un'altra serie di domande fondamentali. Per

esempio, come si potrebbero integrare, in un'ipotesi di cervello quantistico, sia la creatività sia la coscienza?

«La creatività», riprende Enrico Facco, «è una facoltà umana fondamentale e ancora non ben compresa. Si esplica in tutte le attività e in ogni campo della conoscenza: nell'artigianato, nel bricolage, nella cucina, nelle arti, nella musica, nella scienza, nelle invenzioni e così via. In ambito scientifico la scoperta è definibile come un incontro tra un fenomeno e una mente pronta a comprenderlo. Ma questa

disponibilità della mente è un cocktail misterioso di conoscenza, intuizione, creatività e Zeitgeist, lo spirito del tempo. Quest'ultimo rappresenta la base culturale che consente la scoperta ed è, contemporaneamente, anche il potente filtro che ostacola e tenta di impedire la creazione di nuove conoscenze che rivoluzionano quelle precedenti.

«La creatività non si identifica con la sola intuizione dell'opera, con la sua idea o con la sua visione, ma ha profonde radici anche nella motivazione e ha bisogno di specifiche abilità cognitive e

psicomotorie per la sua realizzazione. Lo strumento creatore richiede di vedere oltre i limiti delle convenzioni, delle abitudini e dello spirito del tempo. Limiti più angusti di quanto si tenda comunemente a credere e che, nelle scienze, sono ben rappresentati sia dall'onnipresente figura dei detrattori sia dallo sviluppo non lineare delle stesse conoscenze.

«Come affermava Paul Klee: 'L'arte rende visibile l'invisibile'; ma questo è anche il fondamentale compito della scienza! Dunque conoscenza, scienza e arte sono

competenza dei visionari – nel senso migliore e più elevato del termine – e ciò ha contribuito a radicare l'idea popolare che genio e pazzia abbiano elementi comuni. Il genio, come il pazzo, si situa infatti ai confini della concezione condivisa di normalità, e di conseguenza può avere idee e comportamenti originali: diversi, se non strani, o apparentemente devianti. Se però è un genio, ciò che produrrà sarà capito nella maggior parte dei casi solo dalle generazioni successive. Come affermava Max Planck: 'Una nuova verità scientifica non trionfa perché i suoi oppositori si

convincono e vedono la luce, quanto piuttosto perché alla fine muoiono, e al loro posto si forma una nuova generazione a cui i nuovi concetti diventano familiari'. ¹¹

«Il pensiero filosofico antico aveva già ben compreso questo problema del genio, del saggio e del sapiente. L'I Ching, il libro cinese delle mutazioni, definisce molto bene cosa significhi il loro essere visionari: 'Il saggio è colui che vede l'invisibile, ovvero il saggio è colui che vede quello che è invisibile allo stolto'. Platone, nel Fedro, stabilisce in modo definitivo e ancora oggi validissimo, la follia:

‘E che ci sono due forme di mania, una che nasce da malattie umane, l’altra che nasce da un mutamento divino delle consuete abitudini’.¹² E per consuete abitudini possono intendersi anche gli assiomi e le teorie accettate in un qualsiasi momento storico. Da quest’ultimo punto di vista, l’artista, l’inventore e lo scienziato fanno collassare nella realtà ciò che non esiste o che esiste, fino a quel momento, solo nel mondo iperuranio delle idee.»

Ecco un evidente punto di contatto con la Teoria Quantistica: l’idea di un’indeterminatezza che si concretizza solo quando si verifica

un collasso, cioè quando una possibile realtà si manifesta escludendo così il verificarsi di una qualsiasi altra realtà alternativa. «Esattamente», spiega Enrico Facco. «Se mi è consentito usare la terminologia della Fisica Quantistica, l'iperuranio è il mondo indefinito matrice di tutti i possibili ancora ignoti, i quali coesistono in una sorta di stato sovrapposto. Il collasso è l'evento che porta alla esistenza di singole idee: solo alcune tra tutte quelle possibili. Nel caso delle invenzioni, queste si 'solidificano' e diventano una realtà concreta. Tuttavia, rimangono

inesorabilmente una copia imperfetta delle idee iperuraniche. Per esempio, il motore a scoppio reale, con il suo basso rendimento, rispetto alla macchina ideale teorizzata, nel 1824, dal fisico francese Nicolas Léonard Sadi Carnot. La mente umana dunque, partecipando al mondo delle idee, contribuisce alla creazione oltre che alla conoscenza. Questo misterioso mondo ha strette connessioni con l'inconscio e quindi con la memoria, intesa come capacità di recuperare le informazioni presenti nelle sue sconosciute profondità.»

Una riflessione, questa, che

riporta alla mente l'analogo approccio di Niels Bohr – descritto nel brano riportato all'inizio di questo capitolo – che considerava il ricordo derivante dalla coscienza come l'evidenza di una modifica permanente del nostro organismo.

... e alla coscienza

Se è vero che è possibile stabilire una forma di relazione logica fra la creazione del pensiero e il concetto quantistico di collasso, possiamo spingere questa ricerca ancora oltre? Possiamo tentare di arrivare a una definizione della coscienza che possa sottintendere ulteriori analogie con la Teoria Quantistica proprio – e magari, non solo – dal punto di vista neurologico? Continuiamo a discuterne assieme a Enrico Facco.

«Tradizionalmente siamo legati alla formula cartesiana 'Cogito ergo sum', 'Penso dunque sono', che

ancora condiziona pesantemente la nostra visione dell'uomo. In realtà, si tratta di un errore ingenuo – o forse anche intenzionale – e va assolutamente riconosciuto come tale.¹³ La coscienza, infatti, è un prodotto evolutivo e quindi si colloca alla superficie e non alle fondamenta della psiche. Da questo punto di vista sarebbe più corretto affermare 'Sum ergo cogito', o semmai 'Sum ergo sentio, ergo cogito': rispettivamente 'Sono dunque penso' e 'Sono dunque percepisco, dunque penso'.

«Il pensiero appartiene certamente alla coscienza ma come

abbiamo già discusso, non si limita alla sola sfera cosciente. La coscienza, analogamente, ha alla sua base diversi processi inconsci e preconsoci. Il concetto di coscienza è non meno ampio e ambiguo di quello di pensiero e diverse sue accezioni non sono di natura biologica o medica ma di natura psicologica, filosofica, etica, morale, letteraria e religiosa. Inoltre, vi sono inclusi sia elementi qualitativi, come l'umore, l'emozione, l'intelletto, il comportamento e il linguaggio, sia parametri quantitativi come lo stato di veglia e le sue variazioni – dall'eccitazione

alla sonnolenza, dal sonno fino al coma –, le cui modificazioni sono oggetto di interesse clinico. Una grande mole di attività mentali e di disturbi neurologici e psichiatrici, poi, modificano anche grossolanamente la coscienza senza essere essi stessi parte della coscienza. Per fare un esempio: l'afasia – cioè la perdita della parola – è un disturbo molto frequente nei disordini vascolari cerebrali ma non è in sé una turba della coscienza. Ciononostante, modifica pesantemente la relazione con il mondo esterno e la coscienza stessa, soprattutto quando risulta

compromesso il versante sensoriale della parola.

«Si ritiene generalmente, che la ragione d'essere della coscienza consista in un accesso cognitivo – cioè, relativo alla conoscenza – alle informazioni e all'abilità di elaborarle e di combinarle con quelle presenti nella memoria a breve termine.¹⁴ Tuttavia la sola cognizione non sembra sufficiente a spiegare la fenomenologia della coscienza nel suo insieme. La complessità dell'elaborazione cerebrale che porta alle manifestazioni di coscienza, infatti, comprende una notevole quantità di

informazioni: integrazioni di stimoli multisensoriali, elaborazioni cognitive e mnesiche – ovvero, concernenti la memoria – ed elaborazioni di processi attentivi e selettivi di tipo inconscio che arrivano fino a un vero e proprio 'ragionare inconscio'. Questo rende discutibile la rigida divisione tra elaborazione cosciente e inconscia, probabile conseguenza dei dogmi culturali ereditati dai secoli passati.¹⁵ La coscienza, consente di rendersi conto di se stessi e dell'ambiente, quindi ontologicamente – cioè dal punto di vista dell'essere, delle strutture

oggettive –, è quella facoltà che permette l'apparire del mondo.»

Un'affermazione particolarmente importante, quest'ultima, che diventa, in alcuni dei testi che propongono il concetto di *Mente Quantica*, il fulcro di una particolare interpretazione della realtà che la vede esistere solo in funzione della presenza e dell'interazione di un osservatore. Il riferimento al *Paradosso di Erwin Schrödinger*¹⁶ è evidente, ma più in generale, quella che risulta chiamata in causa, dal punto di vista fisico, è la teoria speculativa di John von Neumann. Nel 1932, il grande matematico

ungherese poi naturalizzato americano propose una teoria di stampo metafisico che considerava la coscienza come elemento critico in grado di provocare il collasso della funzione d'onda quantistica, cioè di determinare l'evoluzione dello stato di un sistema. Quindi, secondo von Neumann, la nostra mente giocherebbe un ruolo fondamentale nella determinazione della catena degli eventi. Questa rivoluzionaria visione venne proposta all'interno del trattato *The Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, pubblicato dalla Princeton University Press,

generando un controverso dibattito fra i fisici e originando numerose interpretazioni simili, come quella recente del matematico americano Henry Pierce Stapp.¹⁷

Abbiamo già visto più volte in varie parti di questo testo che provocare il collasso di una funzione d'onda, nella Teoria Quantistica, significa trasformare una probabilità in una «realtà». La luce, per esempio, è sia particella sia radiazione elettromagnetica fino a quando non decidiamo di studiarla trovandola in uno specifico dei suoi due stati. Cosa può implicare, allora, il fatto che questo collasso

sia causato dalla coscienza umana?
La realtà può essere realmente
modificata nel senso inteso dalle
più estreme interpretazioni legate
alla Mente Quantica? Lo chiedo
nuovamente a Enrico Facco.

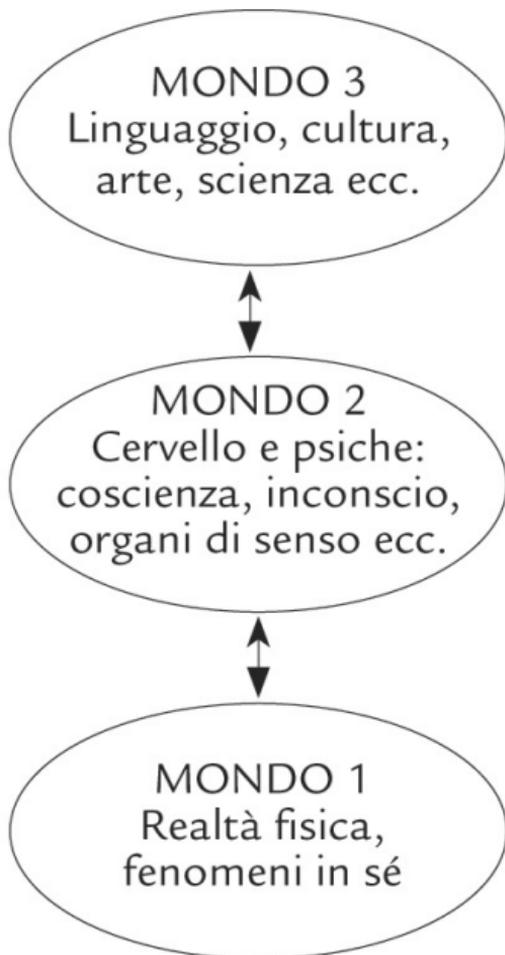


Figura 23. Relazione tra realtà, psiche-cervello e mondo dei prodotti della mente.

«La relazione tra la realtà, la mente e i suoi prodotti è stata definita dal filosofo Karl Popper e dal neurofisiologo Sir John Carew Eccles, che era anche un filosofo, come una relazione continua tra tre mondi.

«Questa non è solo una relazione statica unidirezionale dal Mondo 1 al Mondo 3, come verrebbe spontaneo pensare in base al 'realismo ingenuo' – ossia, all'idea che esista un osservatore neutro, passivo e alla convinzione che la realtà sia costituita da quello che si percepisce, così come lo si percepisce –, ma è una relazione

dinamica bidirezionale. Gli organi di senso infatti condizionano ciò che viene percepito e che può entrare a far parte del Mondo 3, mentre la Weltanschauung, la visione del mondo, e lo Zeitgeist, lo spirito del tempo, agiscono come filtri culturali che definiscono ciò che è plausibile, comprensibile e degno di interesse. In questo senso, quindi, condizionano ciò che viene percepito e ritenuto degno di entrare a far parte del Mondo 3.

«Il realismo ingenuo dipende dal fatto che il funzionamento degli organi di senso e dei processi di codificazione cerebrale degli stimoli,

nel Mondo 2, è inconscio. Si crea, così, l'illusoria convinzione di poter vedere la realtà in sé. La realtà come la conosciamo, invece, è composta da immagini mentali ed è quindi una co-creazione prodotta dalla relazione tra i Mondi 2 e 3 e il Mondo 1, dove quest'ultimo non possiede le qualità percettive con cui solitamente lo identifichiamo. Inoltre, la nostra conoscenza del Mondo 1, anche nella migliore delle ipotesi, rimane sempre parziale. C'è infine una relazione di corrispondenza variabile tra il Mondo 3 e il Mondo 1 – cioè, fra le modalità con cui la realtà può

essere espressa e la realtà così com'è – ma ciò non significa che siano la stessa cosa. Di conseguenza, i due mondi non devono essere confusi l'uno con l'altro.»

Se cade un albero nella foresta

Per comprendere meglio la relazione fra ciò che riconosciamo del mondo e la realtà oggettiva che lo costituisce, farò ricorso a un aneddoto. Circa un anno fa, al termine di un incontro pubblico dedicato alle interpretazioni della Meccanica Quantistica, mi venne chiesto di rispondere al celebre quesito dell'albero. Il problema è il seguente: se un albero cade in una foresta dove non c'è nessuno, fa rumore? Sostanzialmente, mi veniva chiesto di valutare quale

ruolo rivestisse per l'evento l'assenza di un osservatore.

Esistono varie speculazioni su questo tema, e basta una semplice ricerca su Internet per rendersi conto delle notevoli differenze che caratterizzano i vari approcci. Dal mio personale punto di vista, però, la questione deve essere affrontata in modo analitico e definendo con precisione tutte le variabili in gioco. In particolare, cosa si intende per «rumore». Con questo termine, infatti, in Fisica Acustica si fa riferimento a un fenomeno oscillatorio – la classica onda acustica, analoga a quella

meccanica che abbiamo incontrato nel Capitolo 1 – in grado di trasportare energia attraverso un mezzo. Quindi, da questo punto di vista, l'albero quando cade fa rumore. Sempre. Se invece, con quello stesso termine intendiamo un suono disturbante che colpisce il timpano di un ascoltatore, dato che nella foresta non c'è nessuno, nessuno sarà in grado di sentirlo. Ciò che rimane sempre vero in entrambe le analisi è il fattore scatenante: il crollo dell'albero. Ed è questo l'aspetto oggettivo di realtà che costituisce il pretesto per tutte le possibili interpretazioni del

fenomeno. Che ci sia la presenza di un osservatore o meno.

Trasportando questa modalità di indagine al rapporto fra coscienza e realtà, possiamo capire meglio il ruolo dell'osservatore e al contempo renderci conto che, comunque, gli aspetti di realtà oggettiva vanno al di là delle possibili interpretazioni che se ne danno. «L'Io ha la tendenza e la necessità di creare immagini stabili e intellegibili del mondo per potersi orientare e gestire la realtà. E lo fa inconsapevolmente anche quando non ha informazioni e strumenti di indagine sufficienti per ottenere una

fornire criteri di comportamento condivisi. Ciononostante, non è così corrispondente alla realtà come può sembrare che appaia a seconda dei diversi momenti storici. Questa è l'origine comune del dogmatismo in tutte le discipline, dalla religione alla scienza alle regole sociali. La storia della scienza, come afferma il filosofo Emanuele Severino,¹⁸ è la storia della volontà di potenza dell'uomo. Dallo sciamanesimo – il termine 'sciamano' significa 'uomo di conoscenza' e quindi, di potere – passando per Roger Bacon e arrivando, naturalmente, fino a oggi.»

«Riprendendo la riflessione sull'albero», continua Enrico Facco, «la relazione tra Mondo 1 e Mondo 3 chiarisce come la mente sia in grado di riflettere la realtà, ma quello che conosciamo rimane necessariamente un prodotto della coscienza e quindi, del mondo della soggettività. È l'eterna immagine che ci viene dalle filosofie orientali, della mente come specchio. C'è una correlazione più o meno stretta tra la realtà dei fenomeni in sé e i prodotti della mente, che sono come le immagini riflesse dallo specchio. Bisogna però avere sempre presente che quelle

immagini non corrispondono alla realtà ed è un grave errore confonderne la natura sotto l'influenza del realismo ingenuo. Dunque, del mondo abbiamo solo le immagini, mentre i fenomeni in sé sono kantianamente irraggiungibili. Della realtà, di conseguenza, possiamo ricavare solo modelli che la interpretano più o meno fedelmente. La realtà è necessariamente una creazione congiunta del mondo fisico e della coscienza, che lo percepisce secondo i processi di codificazione delle informazioni di cui è dotata.

«Secondo il filosofo tedesco

Thomas Metzinger,¹⁹ il cervello è un 'sistema rappresentazionale': un motore ontologico in grado di creare modelli della realtà fenomenica a partire da ciò che ritiene vero. La prospettiva di prima persona consente di concepire se stessi come parte di un mondo oggettivo indipendente e di agire al suo interno. Dall'interazione sociale si formano, successivamente, le prospettive di seconda e di terza persona, e quindi sia le conoscenze condivise sia quelli che si ritengono essere i dati oggettivi.»

Convergenze e divergenze

È arrivato il momento di riconsiderare la nostra domanda iniziale sulla base di quanto è finora emerso. Come abbiamo scoperto, possiamo considerare la creatività, il pensiero creatore, come un'attività della nostra mente che agisce in maniera analoga all'azione di un osservatore in una dimensione quantistica. Entrambe provocano il collasso delle possibilità preesistenti e la concretizzazione di una specifica realtà. Non solo, spostando la nostra attenzione sul tema della coscienza abbiamo appurato che si tratta di quella

facoltà che consente, dal punto di vista delle strutture oggettive, la costruzione – o ricostruzione – del mondo.

Continuando il confronto con Enrico Facco e grazie alle riflessioni fatte sull'albero che cade, è stata messa in evidenza l'esistenza di un possibile fattore scatenante – di una possibile realtà preesistente – indipendente dalla presenza di un osservatore. Un passo fondamentale che, unito allo sviluppo dei concetti di conoscenza e coscienza, ha evidenziato un ulteriore parallelismo con la Teoria Quantistica, e in particolare con il

paradosso di Erwin Schrödinger. Concentrando successivamente la nostra attenzione sul rapporto tra coscienza e realtà abbiamo, poi, introdotto il concetto di Io. E da qui, infine, siamo risaliti alla definizione di cervello come organo coinvolto nella creazione di una realtà fenomenologica basata su ciò che il cervello stesso ritiene essere vero.

Queste considerazioni delineano un parallelismo, una correlazione logica, fra due ambiti apparentemente lontani: le scienze che si occupano degli studi sulla mente e sulle sue funzioni, da un lato, e la Fisica Quantistica vista

attraverso l'ottica dell'Interpretazione di Copenaghen, dall'altro. Una correlazione che riconosce una struttura comune in alcuni processi mentali e quantistici, ma che non chiarisce l'eventuale esistenza di una Mente Quantica né definisce le caratteristiche oggettive che la connoterebbero. Ci sono quindi almeno due ulteriori aspetti che vale la pena di indagare prima di provare a trarre una qualche – non definitiva e comunque, parziale – conclusione.

Esiste una relazione fra il bisogno dell'uomo di creare una realtà in cui credere e le possibilità

interpretative sulla realtà stessa offerte dalla Teoria Quantistica?

Esiste un'organizzazione fisica atomica o subatomica, del nostro cervello che risponda alle definizioni teoriche che caratterizzano le strutture quantistiche?

E proprio su questi due aspetti continuerò a interrogarmi nel prosieguo di questo capitolo, anche grazie all'aiuto, alla disponibilità e alla collaborazione di Enrico Facco.

Concetti e paradigmi

«La fisica del XX secolo», chiarisce Enrico Facco, «ha introdotto una radicale rivoluzione dei concetti fondamentali che definiscono la realtà, ossia: lo spazio, il tempo e la materia. Quest'ultima, grazie all'equazione di Einstein, risulta ora essere in una relazione dinamica di reciproca trasformazione con l'energia. Quindi, non è più da considerarsi come la manifestazione primaria della realtà fisica ma può essere vista come una concretizzazione dell'energia stessa. Con buona pace della maggioranza dei pensatori materialisti, ancora

condizionati dall'obsoleta
concezione classica di stampo
ottocentesco.

«Non solo: oltre alla ridefinizione
delle entità fisiche è stato
introdotto un nuovo paradigma
caratterizzato da due inediti
elementi:

- l'imprescindibile ruolo della
soggettività nella scienza –
ruolo negato dal realismo
ingenuo in gran parte persistito
fino a oggi e che io considero
un'eresia moderna;²⁰
- il superamento della logica
aristotelica, soprattutto del
Principio di Non Contraddizione,

e del dualismo radicale post-cartesiano – adottato, inconsapevolmente, anche da coloro che si proclamano monisti.»²¹

Ci sono due definizioni che bisogna chiarire, relativamente al secondo elemento. Il Principio di Non Contraddizione appartiene alla logica classica ed è stato introdotto da Aristotele, nel IV secolo a.C., con queste parole: «È impossibile che il medesimo attributo, nel medesimo tempo, appartenga e non appartenga al medesimo oggetto e sotto il medesimo riguardo».²² Quindi, ciò che afferma la Teoria

Quantistica quando attribuisce alla materia una doppia natura particellare e ondulatoria, viola apertamente il Principio di Non Contraddizione. La definizione di monismo, invece, si contrappone a quella di dualismo. Con questo termine, generalmente, si fa riferimento alla dottrina che tende a ridurre la pluralità – dei concetti, delle definizioni, delle logiche e così via – a un unico principio o un'unica sostanza.

«Non è sorprendente che i paradigmi non dualisti, come quello dei presocratici, del taoismo e del buddhismo, siano più compatibili

con la Fisica Quantistica di quanto non lo sia il nostro paradigma classico», riprende Enrico Facco. «Il taoismo, per esempio, già tremila anni fa sosteneva il principio di reciproca trasformazione fra energia e materia. Tuttavia il monismo del mondo extra-cartesiano – da Plotino a Spinoza, fino all’Idealismo Tedesco – comprendeva anima e corpo, spirito e materia. Un aspetto precluso al monismo materialista moderno, che ha fondato la propria visione su presupposti criteri autonomi di esistenza della materia, come classicamente intesa, rifiutando a priori il resto

senza dimostrarne l'inesistenza o l'irrilevanza.»

Quindi, in riferimento alla relazione fra il bisogno dell'uomo di creare una realtà in cui credere e le possibilità interpretative sulla realtà stessa offerte dalla Teoria Quantistica, bisogna tornare a riflettere sul concetto di coscienza. «Per quanto riguarda la coscienza, diverse ipotesi propongono una sua natura quantistica. Fra esse, la più conosciuta è quella di Sir Roger Penrose e Stuart Hameroff: la teoria Orchestrated Objective Reduction – ovvero, Riduzione Obiettiva Orchestrata – o più

semplicemente, Teoria Orch-Or. Secondo i due famosi scienziati il fondamento della coscienza risiederebbe nella dinamica della conformazione delle proteine dei microtubuli dei neuroni. A quel livello fisico sarebbero possibili fenomeni di conduttività e di trasmissione dei segnali, con processi sia di tipo classico sia di tipo quantistico sufficientemente resistenti alla decoerenza quantistica²³ da permettere fenomeni quantistici macroscopici.»

E così siamo arrivati a ragionare anche sulla seconda delle domande che ci eravamo posti qualche

pagina fa: esiste una organizzazione fisica atomica o subatomica, del nostro cervello che risponda alle definizioni teoriche che caratterizzano le strutture quantistiche? Come stiamo per scoprire, secondo alcuni studiosi la risposta potrebbe essere: «Sì».

La Teoria Orch-Or nasce – originariamente come Teoria Or – nel 1989 e nella forma di un'intuizione non suffragata da evidenze sperimentali. Nel volume *La mente nuova dell'imperatore*,²⁴ Sir Roger Penrose proponeva l'ipotesi che il funzionamento del cervello non fosse guidato da

algoritmi logici o formali, appartenenti alla fisica classica, bensì da processi quantistici legati al collasso della funzione d'onda. Contemporaneamente, Penrose proponeva anche la nuova definizione di «riduzione obiettiva» per indicare come il momento del collasso dipendesse da fattori concreti legati al rapporto fra la massa e l'energia degli oggetti coinvolti nel processo. In riferimento alla coscienza, la riduzione obiettiva di Penrose proponeva che la determinazione degli stati che subivano il collasso avvenisse in maniera casuale e

fosse influenzata anche dalla geometria dello spazio-tempo.

All'iniziale formulazione della teoria – considerata fantasiosa da molti ricercatori – diede un determinante contributo il medico anestesista americano Stuart Hameroff, che propose a Penrose, come probabili siti neurologici attivi nell'elaborazione quantistica, le strutture microtubolari presenti nei neuroni. I microtubuli, infatti, sono una delle componenti strutturali del citoscheletro neuronale, e sono i principali componenti dell'apparato di trasporto neuronale a lunga distanza. Questa loro caratteristica,

in base agli studi di Hameroff, li rendeva i candidati ideali per la concretizzazione dell'intuizione di Penrose. Dagli studi congiunti dei due scienziati, nel 1994, venne realizzata la pubblicazione *Ombre della mente* – attualmente fuori catalogo – contenente l'attuale definizione della Teoria Orch-Or. In essa, il termine «orchestrato» fa riferimento al fatto che i microtubuli esercitano fra loro un'influenza reciproca e come in un'orchestra ben diretta, risultino contemporaneamente influenzati dalle attività classiche legate alle sinapsi neuronali.

Visioni alternative

Tutto risolto, quindi? La Teoria Orch-Or fornisce la conferma definitiva dell'esistenza di processi quantistici alla base della formazione della coscienza, così come alcune interpretazioni della Mente Quantica sostengono? In effetti, non è proprio così.

In primo luogo, la teoria di Penrose e Hameroff è stata confutata dal fisico e cosmologo svedese Max Erik Tegmark, classe 1967, che ha calcolato il lasso di tempo delle dinamiche rilevanti sia per le normali scariche neuronali sia per il trasporto dei segnali nei

microtubuli, scoprendolo più lento del tempo di decoerenza di almeno 10 miliardi di volte.²⁵ Una differenza enorme che riporterebbe i processi relativi alla coscienza dalla scala quantistica alla scala classica. Ecco quanto ha scritto al riguardo lo stesso Tegmark. «Facendo i conti per il modello proposto da Penrose in cui il calcolo quantistico era effettuato dai microtubuli [...] trovai che cadevano sotto i colpi della decoerenza dopo circa 10^{-13} secondi (100 quadrilionesimi di secondo). Per essere equiparati a un calcolo quantistico, i miei pensieri

dovrebbero concludersi prima dell'insorgere della decoerenza. In altre parole, dovrei essere in grado di pensare così velocemente da avere diecimila miliardi di pensieri al secondo. Forse Roger Penrose pensa così rapidamente, ma io di sicuro non ne sono capace...»²⁶

In secondo luogo, attualmente esiste un unico studio²⁷ che testimonia la presenza di attività di tipo quantistico all'interno dei microtubuli ma non è ritenuto sufficiente a suffragare l'ipotesi di una completa Teoria della Coscienza Quantistica così come la Teoria Orch-Or viene presentata.

Questo studio, realizzato nel 2013 dall'équipe del ricercatore Anirban Bandyopadhyay dell'Istituto Nazionale di Scienza dei Materiali di Tsukuba, in Giappone, ha comunque aperto un interessante confronto sull'ipotesi di Penrose e Hameroff suggerendo, inoltre, che il comportamento elettromagnetico mostrato dai microtubuli potrebbe renderli simili, da un punto di vista funzionale, a dei chip di memoria neurale. Commentando i risultati ottenuti da Bandyopadhyay, Penrose e Hameroff hanno scritto: «L'origine della consapevolezza riflette il nostro posto nell'universo,

la natura della nostra esistenza. Forse la coscienza evolve da calcoli complessi nei neuroni del cervello, come afferma la maggior parte degli scienziati? O la coscienza, in un certo senso, è lì da sempre, come sostengono gli approcci spirituali? Questa riflessione apre un potenziale vaso di Pandora, ma la nostra teoria concilia entrambi questi punti di vista, suggerendo che la coscienza derivi da vibrazioni quantiche nei microtubuli, polimeri proteici all'interno dei neuroni cerebrali, che governano le funzioni neuronale e sinaptica, e collegano i processi cerebrali ai processi di

auto-organizzazione nella struttura quantica fine 'proto-cosciente' della realtà». ²⁸

Riprendendo la premessa che avevo fatto all'inizio del capitolo, la sfida in cui mi sono cimentato si è dimostrata ricca di colpi di scena, ipotesi innovative e possibili implicazioni nei principali campi del sapere. Detto ciò, prima di poter arrivare a una certezza condivisibile, quindi prima di poter rispondere con sicurezza alle varie domande che ci siamo posti – sulla Mente Quantica e sul funzionamento del cervello da un punto di vista quantistico – è

evidente che bisognerà attendere nuove ricerche e nuovi risultati.

Di questo avviso è anche Enrico Facco: «La ricerca è in corso e ogni anno appaiono nuovi lavori sugli aspetti quantistici implicati nei processi biologici. E da vari punti di vista. C'è da considerare, infatti, un ulteriore e non meno rilevante approccio alla coscienza. Un approccio che riguarda non tanto la possibilità che nel cervello si verificano fisicamente fenomeni di tipo quantistico – e di conseguenza, se questi possano essere correlati alla fisiologia della coscienza – ma se la cognizione sia meglio

interpretabile secondo i canoni della teoria della probabilità della fisica classica o piuttosto, secondo modelli probabilistici derivati dalla Teoria Quantistica.²⁹ Diversi studi recenti hanno dimostrato che esiste una discrepanza tra i risultati offerti dai metodi classici e quelli ottenibili con metodologie quantistiche. E spesso, la maggiore corrispondenza alla realtà si ha proprio con queste ultime. Ecco perché attualmente l'approccio quantistico viene applicato con successo a un'ampia gamma di fenomeni cognitivi: dalla percezione alla memoria, dall'inconscio all'analisi delle

decisioni e persino ai giochi logici. ³⁰

«Per quanto riguarda gli aspetti strettamente fisici», continua Enrico Facco, «oltre agli studi di Anirban Bandyopadhyay sulla memoria dei microtubuli, è doveroso segnalare che recentemente anche i risultati di Max Erik Tegmark sono stati criticati. L'errore contestato a Tegmark è quello di aver scelto per i propri calcoli un modello di semplice diffusione degli ioni attraverso una membrana permeabile, invece di considerare la reale struttura biologica dei canali ionici cellulari, compresa la loro selettività e la loro elevata

efficienza. C'è anche da aggiungere, però, che un recente studio³¹ di Vahid Salari su un modello di diffusione più vicino a quello dei canali ionici cellulari ha stimato tempi di decoerenza dell'ordine di 10^{-12} secondi. Tempi molto simili a quelli indicati da Tegmark e che, secondo Salari, pur se non direttamente compatibili con i periodi della fisiologia del neurone, sono tuttavia sufficientemente lunghi da poter lasciare una traccia con funzione d'onda altamente delocalizzata sull'intera struttura del canale ionico.

«In tal modo, anche se il

microtubulo in sé non rappresentasse la sede della coscienza, i processi quantistici che avverrebbero al suo interno potrebbero modificare le condizioni di base da cui il processo della coscienza si sviluppa, condizionando la sua genesi e i suoi contenuti. Infine c'è da considerare il fatto che i microtubuli, come recentemente dimostrato, risultano direttamente implicati nella memoria e nell'apprendimento e che vengono precocemente alterati nella demenza di Alzheimer. Questi due aspetti, pur non rappresentando una prova diretta a sostegno della

teoria di Stuart Hameroff e di Sir Roger Penrose, costituiscono sicuramente un indizio suggestivo per un eventuale ruolo dei microtubuli nella coscienza. Un ruolo che, se confermato, aprirebbe interessanti prospettive di studio nella ricerca di nuove terapie dei disturbi cognitivi. Nel complesso, tutte queste ipotesi, se dimostrate, potrebbero rivoluzionare le nostre conoscenze sulla vita e sulla coscienza.»

E con quest'ultima considerazione, per il momento, conviene concludere la nostra riflessione.

Note

Citazione iniziale

1. DI CHIO, VITO, *Bisogno di maestri. Una proposta formativa*, Armando Editore, Roma 2010, p. 191. Dedicata sul diario di Adriana Enriques, figlia del matematico Federigo Enriques, scritta a Bologna nel 1921.

1. Luce: onda o corpuscolo?

1. KUMAR, MANJIT, Quantum. Da Einstein a Bohr, la teoria dei quanti, una nuova idea della realtà, Mondadori, Milano 2010, p. 31.
2. Ivi, p. 14. Nella Gazzetta Ufficiale del Regno d'Italia dell'anno 1881, così come in altri testi, viene indicato come Congresso Internazionale di Elettricità.
3. La definizione di Legge di Spostamento venne data dai fisici Otto Lummer ed Ernst Pringsheim.
4. JUNGnickel, Christa, McCormack, Russell, Intellectual Mastery of Nature, Chicago University Press, Chicago 1990, vol. 2, p. 257.
5. Mehra, Jagdish, Rechenberg, Helmut, The

Historical Development of Quantum Theory, Springer, Francoforte 1982, parte 1, p. 41.

6. La Costante d'azione, detta anche quanto d'azione, è quella che attualmente chiamiamo col nome di Costante di Planck.
7. Il termine «fotone» venne utilizzato per la prima volta a Parigi da Frithiof Wolfers nel saggio «Une action probable de la matière sur les quanta de radiation», pubblicato nel 1926 all'interno dei Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences (Atti delle sessioni settimanali dell'Accademia delle Scienze), nel numero di luglio/dicembre.
8. Per chiarire la scelta di quest'ultima

espressione, Fisica Quantistica, Meccanica Quantistica e persino teoria dei quanti possono essere utilizzati – e generalmente lo sono – come sinonimi l'uno dell'altro. Quando, come in questo caso, desidero mettere in evidenza l'aspetto legato al movimento dei quanti, in analogia alla definizione di meccanica classica, preferisco usare l'espressione «Meccanica Quantistica».

9. Il Principio di Complementarietà fu enunciato pubblicamente da Niels Bohr durante il Congresso Internazionale di Fisica che si tenne nel 1927 a Como, in occasione del centenario della morte dello scienziato italiano Alessandro Volta.

10. CARBONE, FABRIZIO, «Immagine di una doppia natura», in *Le Scienze*, 2 giugno 2015.

2. Due è sempre meglio di uno

1. Lettera di Max Planck a Robert Williams Wood, 7 ottobre 1931.
2. Lettera di Albert Einstein a Daniel M. Lipkin, 5 luglio 1952. Disponibile per la consultazione in formato elettronico all'interno degli Einstein Archives Online, alla pagina web <http://alberteinstein.info>.
3. HEILBRON, JOHN L., I dilemmi di Max Planck, Bollati Boringhieri, Torino 1988, p.21.
4. DALTON, JOHN, A New System of Chemical Philosophy, R. Bickerstaff, Londra 1808.
5. Alcuni elementi presenti in natura emettono naturalmente una radiazione. In pratica, «perdono» spontaneamente particelle subatomiche o quanti

energetici.

6. Joseph John Thomson stava studiando la natura dei raggi catodici – quelli comunemente impiegati per formare l'immagine sullo schermo dei vecchi apparecchi televisivi – quando si accorse che dovevano essere composti da singole particelle con carica negativa e dimensione inferiore a quella atomica. La scoperta dell'elettrone valse a Thomson il Nobel nel 1906, anche se la motivazione ufficiale fu la seguente: «In riconoscimento dei grandi meriti delle sue indagini teoriche e sperimentali, sulla conduzione di energia elettrica dei gas».

7. JOHNSTONE STONEY, GEORGE, «Of the 'Electron' or Atom of Electricity», in

Philosophical Magazine Series 5, vol. XXXVIII, ottobre 1894, pp. 418-420.

8. RUTHERFORD, ERNEST, The Scattering of Alpha and Beta Particles by Matter and the Structure of the Atom, Taylor & Francis, Londra 1911, p. 688.
9. PAIS, ABRAHAM, Il danese tranquillo. Niels Bohr: un fisico e il suo tempo (1885-1962), Bollati Boringhieri, Torino 1993, p. 123.
10. Lo spettro di emissione di un elemento è costituito dall'insieme delle frequenze della radiazione elettromagnetica che vengono irradiate dagli elettroni dei suoi atomi quando compiono una transizione da uno stato più energetico a uno meno energetico.

11. Lettera di Sommerfeld a Bohr, 4 ottobre 1913, in HOYER, ULRICH (a cura di), Niels Bohr Collected Works. Work on Atomic Physics (1912-1917), vol. II, Elsevier Science Ltd, Amsterdam 1981, p. 603.
12. La realtà – a oggi – è fatta di «corpuscoli», come scrive Richard P. Feynman nel suo libro QED, del 1985 (tradotto in Italia da Adelphi nel 1989). Il fatto che questi corpuscoli abbiano comportamenti corpuscolari o ondulatori, dipende da come costruiamo le nostre misure.
13. Lettera di Wolfgang Pauli a Bohr, 26 marzo 1924, in RECHENBERG, HELMUT, MEHRER, JAGDISH, The Historical Development of Quantum Theory, vol.

II, Springer-Verlag, New York 1982, p. 133.

14. SCHRÖDINGER, ERWIN, «Quantisierung als Eigenwertproblem», in *Annalen der Physik*, vol. LXXIX, 1926, pp. 361-376. Nell'articolo, dal titolo traducibile con «Quantizzazione come problema del valore caratteristico», era presentata l'equazione che prende il suo nome e che descrive l'evoluzione nel tempo dello stato di un qualsiasi sistema, come per esempio di un elettrone. Applicando l'equazione di Schrödinger alla teoria atomica si ottiene il modello atomico di Schrödinger, che venne formalizzato fra il 1926 e il 1927.

15. BORN, MAX, HEISENBERG, WERNER, JORDAN,

PASCUAL, «Zur Quantenmechanik II», in Zeitschrift für Physik, vol. XXXV, fasc. 8-9, 1926, pp. 557-615. Questa pubblicazione è conosciuta anche come l'«articolo dei tre uomini», «Drei männer arbeit».

16. DIRAC, PAUL ADRIEN MAURICE, «On the Theory of Quantum Mechanics», in Proceedings of the Royal Society, vol. CXII, fasc. 762, 1926, pp. 661-677.

17. EINSTEIN, ALBERT, «Zur Quantentheorie der Strahlung», in Physik Zeitungen, vol. XVIII, 1917, pp. 121-128.

3. La novità di Copenaghen

1. WEINBERG, STEVEN, *Dreams of a Final Theory*, Pantheon Books, New York 1993.
2. ANDERSEN, ROSS, «Has Physics Made Philosophy and Religion Obsolete?», in *The Atlantic*, 23 aprile 2012.
3. STENGER, VICTOR JOHN, LINDSAY, JAMES A., BOGHOSSIAN, PETER, «Anche i fisici sono filosofi: il ruolo della filosofia nella fisica moderna», in *Le Scienze*, 16 maggio 2015.
4. HAWKING, STEPHEN, MLODINOW, LEONARD, *Il grande disegno*, Mondadori, Milano 2012.
5. Intervista rilasciata a Nerdist Industries, sotto forma di podcast, nel maggio

2014.

6. Sulla definizione di metodo scientifico torneremo più volte, in particolare in questo capitolo e nel Capitolo 10. Per il momento ci serve solamente sapere che è alla base del concetto di riproducibilità degli esperimenti della fisica classica.
7. STENGER, LINDSAY, BOGHOSSIAN, «Anche i fisici sono filosofi: il ruolo della filosofia nella fisica moderna», cit.
8. Come chiarisce Giulio Peruzzi, «che più 'modelli' – o teorie – possano rappresentare gli stessi fenomeni è un dato di fatto anche nell'ambito della fisica classica. Per esempio, nella branca dell'elettrodinamica esiste l'elettrodinamica 'a campi' che concorre con l'elettrodinamica dell'azione a

distanza».

9. Bisogna evitare accuratamente di confondere i due piani: i principi fondamentali della metafisica non possono essere confrontati con le leggi dei fenomeni naturali per molteplici ragioni.
10. BOHR, NIELS, I quanti e la vita. Unità della natura. Unità della conoscenza, Bollati Boringhieri, Torino 2012.
11. ISAACSON, WALTER, Einstein. La sua vita, il suo universo, Mondadori, Milano 2010.
12. LINDLEY, DAVID, Incertezza. Einstein, Heisenberg, Bohr e il principio di indeterminazione, Einaudi, Torino 2008, p. 143.
13. Su Feynman e sul suo fondamentale

contributo all'Elettrodinamica Quantistica (QED, Quantum Electrodynamics) torneremo nel Capitolo 8.

14. KUMAR, MANJIT, Quantum. Da Einstein a Bohr, la teoria dei quanti, una nuova idea della realtà, Mondadori, Milano 2010, p. 366.

15. HEISENBERG, WERNER, Fisica e oltre. Incontri con i protagonisti 1920-1965, Bollati Boringhieri, Torino 2013, pp. 87-88. Tutti i pensieri e le frasi di Heisenberg presentati in questo capitolo sono tratti dal presente volume.

16. KUMAR, Quantum, cit., p. 229.

17. HEISENBERG, WERNER, «Über den Anschaulichen Inhalt der Quantentheoretischen Kinematik und

Mechanik», in Zeitschrift für Physik, vol. XLIII, fasc. 4, 1927, pp. 172-178.

18. L'effetto Compton, studiato da Arthur Holly Compton nel 1922, è uno degli esperimenti fondamentali a sostegno della natura quantistica della radiazione elettromagnetica. Oltre a dimostrare l'esistenza dei fotoni, permise allo scienziato statunitense di vincere il Nobel per la fisica nel 1927 in ex equo con lo stesso Charles Thomson Rees Wilson, che aveva realizzato la prima camera a nebbia.
19. MEHRA, JAGDISH, RECHENBERG, HELMUT, The Hystorical Development of Quantum Theory, Vol. VI, Parte 1, Springer-Verlag, New York 2000, p. 93.
20. Dichiarazione rilasciata da Heisenberg

il 25 febbraio 1963 durante un'intervista per l'Archive for the History of Quantum Physics, e citata in KUMAR, Quantum, cit., p. 237.

21. Il termine «causale» indica il Principio di Causalità, cioè la concezione classica che a ogni azione corrisponde una reazione. Ulteriori implicazioni di questo principio verranno discusse nei prossimi capitoli, in particolare nel Capitolo 10.
22. SCHRÖDINGER, ERWIN, «Die Gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik», in Die Naturwissenschaften, vol. XXIII, 1935, pp. 807-812, 823-828, 844-849.
23. COLANGELO, GIORGIO, CIURANA, FERRAN MARTIN, BIANCHET, LORENA C., SEWELL, ROBERT J., MITCHELL, MORGAN W., «Simultaneous

Tracking of Spin Angle and Amplitude Beyond Classical Limits», in *Nature*, 543, marzo 2017, pp. 525-528.

4. Bohr, Einstein e un po' Higgs

1. La definizione di «Epistemologia» è tratta dal Dizionario Enciclopedico Treccani, Istituto della Enciclopedia Italiana Treccani, 1970.
2. Tutti i brani riportati nel seguito sono tratti da: BOHR, NIELS, «Il quanto d'azione e la descrizione della natura» (1929), in BOHR, NIELS, I quanti e la vita. Unità della natura. Unità della conoscenza, Bollati Boringhieri, Torino 2012, pp. 6-8.
3. HOFSTADTER, DOUGLAS, Gödel, Escher, Bach: Un'Eterna Ghirlanda Brillante. Adelphi, Milano 1984, p. 54.
4. Albert Einstein, nel 1905, definisce i fotoni come «quanti di energia». Nel 1916, con gli articoli sul laser, li

ridefinisce come « quanti di energia aghiformi »: cioè, dotati anche di quantità di moto. Quindi, pur avendo massa nulla, hanno tutti i caratteri necessari per essere corpuscoli: energia e quantità di moto.

5. BOHR, NIELS, KRAMER, HENDRIK ANTHONY, SLATER, JOHN CLARKE, «The Quantum Theory of Radiation», in Philosophical Magazine and Journal of Science, vol. XLVII, serie 6, n. 281, 1924, pp. 785-802.
6. EINSTEIN, ALBERT, PODOLSKY, BORIS, ROSEN, NATHAN, «Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?», in Physical Review, vol. XLVII, 1935, pp. 777-780.

7. TEGMARK, MAX, *L'universo matematico*, Bollati Boringhieri, Torino 2016, p. 186.
8. «Protosincrociclotrone» è una parola apparentemente complessa che significa semplicemente «acceleratore circolare sincronizzato di protoni».
9. Il termine «gauge» fa riferimento alle teorie di gauge utilizzate per descrivere le interazioni fondamentali che vengono esercitate tramite lo scambio di bosoni intermedi. Ritroveremo questa definizione più volte nei prossimi capitoli, in particolare nel Capitolo 6.
10. La trascrizione della conferenza tenuta da Herman Minkowski venne pubblicata nel 1908. MINKOWSKI, HERMANN, «Raum und Zeit», in *Jahresbericht der*

Deutschen Mathematiker-Vereinigung,
vol. XVIII, 1908, pp. 75-88.

11. In Relatività la misura di un evento è un'operazione non banale che richiede la sincronizzazione di orologi – a riposo tra loro ma posti in punti diversi – secondo uno schema ben definito. Il termine «osservare», usato spesso nel testo, non vuol significare il guardare, con gli occhi o con una macchina fotografica, ma va inteso più astrattamente come il «misurare» un evento grazie, appunto, a una serie di orologi sincronizzati.
12. L'esempio è liberamente ispirato da EPSTEIN, LEWIS CARROLL, Relativity Visualized, Inside Press, Chicago 1994.
13. BAKER, JOANNE, 50 grandi idee. Universo,

Edizioni Dedalo, Bari 2011, p. 106. È interessante notare che l'autrice dà per scontata, in questo passaggio, l'esistenza del bosone di Higgs che, però, verrà rivelato per la prima volta solo due anni dopo la pubblicazione originale del testo.

14. CHARLEY, SARAH, «Where the Higgs Belongs», in Symmetry: Dimensions of Particle Physics, 15 settembre 2015, edizione online reperibile alla pagina Web

<http://www.symmetrymagazine.org/article/where-the-higgs-belongs>.

5. Spazio, ultima frontiera

1. KLIMENKO, SERGEY, VEDOVATO, GABRIELE, DRAGO, MARCO, SALEMI, FRANCESCO, «Method for Detection and Reconstruction of Gravitational Wave Transients with Networks of Advanced Detectors», in Physical Review D, vol. XCIII, fasc. 4., 2016, DOI: 10.1103/PhysRevD.93.042004.
2. Cronologicamente, l'effetto redshift gravitazionale è stato l'ultimo dei tre test classici della Relatività a essere misurato. POUND, ROBERT VIVIAN, REBKA, GLEN ANDERSON JR., «Apparent Weight of Photons», in Physical Review Letters, vol. IV, n. 7, 1960, pp. 337-341.
3. Non si intende affermare che il fotone

possieda una massa bensì considerare la massa «equivalente» che si otterrebbe convertendo l'energia del fotone grazie alla relazione di Einstein.

4. PARK, RYAN S., FOLKNER, WILLIAM M., KONOPLIV, ALEXANDER S., WILLIAMS, JAMES G., SMITH, DAVID E., ZUBER, MARIA T., «Precession of Mercury's Perihelion from Ranging to the MESSENGER Spacecraft», in The Astronomical Journal, vol. CLIII, n. 3, 21 febbraio 2017. Questo articolo rappresenta la misurazione più recente e al contempo più precisa.
5. DYSON, SIR FRANK W., EDDINGTON, ARTHUR S., DAVIDSON, CHARLES, «A Determination of the Deflection of Light by the Sun's

Gravitational Field, From Observations Made at the Solar Eclipse of May 29, 1919» in Philosophical Transactions of the Royal Society, vol. CCXX, 1920, pp. 291-333.

6. Più in generale, il moto uniforme di un corpo che si muove in linea retta viene definito di «ordine monopolare». Una sfera perfetta che ruota su se stessa rappresenta, invece, un moto di «ordine dipolare». Per comprendere questa seconda affermazione, bisogna pensare che un guscio sferico carico che ruota – essendo una carica accelerata – crea un campo magnetico parallelo all'asse di rotazione: questo campo magnetico è un dipolo magnetico.
7. ABBOTT, B.P. et al., «Observation of

Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger», in Physical Review Letter, 12 febbraio 2016, DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102.

8. Qui, il termine «contemporaneamente» indica la frazione infinitesimale d'istante che impiega la luce a spostarsi fra i vari rivelatori attivi.
9. ABBOTT, B.P. et al., «GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2», in Physical Review Letter, vol. CXVIII, 1 giugno 2017, fasc. 22, DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.221101.
10. Al fenomeno dell'entanglement è dedicato il Capitolo 7.
11. ALEXANDROVSKI, ALEXEI, FEJER, MARTIN,

MARKOSYAN, ASHOT, ROUTE, ROGER,
«Photothermal Common Path
Interferometry (PCI): New
Development», in Proceedings of SPIE,
vol. (V)MMCXCIII, 2009,
DOI:10.1117/12.814813.

6. Questione di dimensioni

1. HOLT, JIM, «Unstrung», in *The New Yorker*, 2 ottobre 2006.
2. MCKIE, ROBIN, «String theory: Is it Science's Ultimate Dead End?», in *The Observer*, 8 ottobre 2006.
3. BAKER, JOANNE, 50 grandi idee. Universo, Edizioni Dedalo, Bari 2011, p. 111. La stessa frase di Richard Phillips Feynman viene riportata con minime variazioni in diversi testi.
4. WOIT, PETER, Neanche sbagliata. Il fallimento della teoria delle stringhe e la corsa all'unificazione delle leggi della fisica, Codice Edizioni, Torino 2007.
5. BOHR, NIELS, «Il quanto d'azione e la descrizione della natura» (1929), in

BOHR, NIELS, I quanti e la vita. Unità della natura. Unità della conoscenza, Bollati Boringhieri, Torino 2012, pp. 6-8.

6. Questo brano è reperibile all'interno della pagina Internet www.cinquantamila.it, redatta dallo storico e giornalista Giorgio Dell'Arti, dedicata alla biografia di Gabriele Veneziano.
7. La Gravità Quantistica, nella Teoria delle Stringhe, fornisce una descrizione della gravità coerente con i principi della Meccanica Quantistica e lo fa cercando l'unificazione delle forze fondamentali in una Teoria del Tutto.
8. SAGNOTTI, AUGUSTO, «Forze fondamentali e unificazione», in Ragioni della Scienza

e ragioni della carità, Libreria Editrice Vaticana, Roma 2016. FERRARA, SERGIO, SAGNOTTI, AUGUSTO, «The Many Lives of Supergravity», in CERN Courier, vol. LVII, n. 1, 2017, pp. 1-4.

9. In totale, due delle cinque teorie delle superstringhe si collegano in modo più diretto al Modello Standard.
10. Con la definizione di «limite sofficce» si fa riferimento al fatto che queste infinite particelle riflettono la natura estesa delle stringhe.
11. In fisica, vengono definite come «costanti di accoppiamento» le grandezze costanti proprie di ciascuna delle quattro interazioni fondamentali della natura.

7. Un'azione fuori luogo

1. SCHLIPP, PAUL ARTHUR, Albert Einstein: Philosopher-Scientist, Tudor, New York 1951. Questo brano e la successiva citazione sono stati liberamente tradotti in italiano dall'edizione originale. Ne esiste una traduzione italiana attualmente fuori catalogo: Albert Einstein, scienziato e filosofo. Autobiografia di Einstein e saggi di vari autori, pubblicata da Einaudi nel 1958.
2. Nathan Rosen diede il proprio nome anche al ponte di Einstein-Rosen, il cunicolo spazio-temporale che consentirebbe di creare una scorciatoia fra due punti qualsiasi dell'universo e che è anche conosciuto con il nome di

wormhole.

3. EINSTEIN, ALBERT, PODOLSKY, BORIS, ROSEN, NATHAN, «Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?», in *Physical Review*, vol. XLVII, 1935, pp. 777-780.
4. ACZEL, AMIR DAN, *Entanglement. Il più grande mistero della fisica*, Raffaello Cortina Editore, Milano 2004, p. 108.
5. EINSTEIN, ALBERT, «Quantenmechanik und Wirklichkeit», in *Dialectica*, vol. II, n. 3/4, 1948, pp. 320-324.
6. WHEELER, JOHN ARCHIBALD, WOJCIECH, HUBERT ZUREK, *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton 2016, p. 137.
7. COLANGELO, GIORGIO, CIURANA, FERRAN MARTIN,

BIANCHET, LORENA C. , SEWELL, ROBERT J., MITCHELL, MORGAN W., «Simultaneous Tracking of Spin Angle and Amplitude Beyond Classical Limits», in Nature, vol. DXLIII, marzo 2017, pp. 525-528.

COLANGELO, GIORGIO, CIURANA, FERRAN MARTIN, PUENTES, GRACIANA, MITCHELL, MORGAN W., SEWELL, ROBERT J., «Entanglement-Enhanced Phase Estimation Without Prior Phase Information», in Physics Review Letters, vol. CXVIII, 9 giugno 2017, 233603.

CIURANA, FERRAN MARTIN, COLANGELO, GIORGIO, SLODICKA, L. SEWELL, ROBERT J. , MITCHELL, MORGAN W., «Entanglement-Enhanced Radio-Frequency Field Detection and Waveform Sensing», attualmente in

stampa.

8. PAIS, ABRAHAM, *Il danese tranquillo. Niels Bohr: un fisico e il suo tempo (1886-1962)*, Bollati Boringhieri, Torino 1993, pp. 431-432.
9. BOHR, NIELS, «Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?», in *Physical Review*, vol. XLVIII, 1935, pp. 696-702.
10. ACZEL, *Entanglement*, cit., p. 110.
11. «Quantum Coherence. 14-16 December 1989», atti del convegno tenuto presso la University of South Carolina, Columbia, USA, World Scientific, Singapore 1990.
12. SCHRÖDINGER, ERWIN, *Collected Papers on Wave Mechanics*, Blackie & Son, Londra

1928.

13. Amir Dan Aczel riporta, senza esplicitarne le fonti, la seguente citazione di Erwin Schrödinger: «Se due corpi distinti, ognuno dei quali noto completamente, vengono posti in condizione di influenzarsi vicendevolmente e poi separati nuovamente, allora si produce con regolarità quello che io ho appena battezzato entanglement della nostra conoscenza dei due corpi».
14. SCHRÖDINGER, ERWIN, «Discussion of Probability Relations between Separated Systems», in Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, vol. XXXI, 1935, pp 555-563.
15. BO H M , DAVID, «A Suggested

Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables. I», in *Physical Review*, vol. LXXXV, n. 2, 1952, pp. 166-179. BOHM, DAVID, «A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables. II», in *Physical Review*, vol. LXXXV, n. 2, 1952, pp. 180-193.

16. Il progetto Manhattan portò alla costruzione della prima bomba atomica americana. Oltre a Julius Robert Oppenheimer parteciparono al progetto numerosi scienziati dell'epoca, compresi alcuni Nobel per la fisica: Aage Niels Bohr, figlio di Niels Bohr, Arthur Holly Compton, Richard Phillips Feynman, Emilio Gino Segrè e Eugene Paul Wigner.

17. Nel 1959 i due studiosi scoprirono un ulteriore effetto quantistico dotato della caratteristica di non-località: l'effetto Aharonov-Bohm. Meno famoso dell'entanglement ma ugualmente affascinante, prevede che un elettrone che si trovi nelle vicinanze di un campo elettromagnetico contenuto all'interno di un elemento cilindrico – quindi nullo al di fuori di esso – ne risulti comunque influenzato. Questo effetto è stato confermato sperimentalmente nel 1960.

18. BELL, JOHN STEWART, «On the Einstein Podolsky Rose Paradox», in *Physics*, vol. I, n. 3, 1964, pp. 195-200.

19. Per poter realizzare in laboratorio gli esperimenti di verifica sulle

disuguaglianze di Bell, il teorema di Bell venne perfezionato da John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony e Richard Holt, nel 1969, grazie all'introduzione della disuguaglianza CHSH. CLAUSER, JOHN et al., «Proposed Experiment to test Local Hidden-Variable Theories», in *Physical Review Letters*, vol. XXIII, n. 15, 1969, pp. 880-884.

20. Anche nel caso in cui il malintenzionato riuscisse a decifrare il messaggio, la sua azione non passerebbe inosservata. La crittografia quantistica, in questo senso, potrebbe non proteggere direttamente il messaggio ma eviterebbe che l'azione del pirata informatico avvenisse senza lasciare tracce. E ciò consentirebbe di prendere immediate contromisure.

21. BAO, XIAO-HUI, XUC, XIAO-FAN, LI, CHE-MING, YU A N, ZHEN-SHENG, LU , CHAO-YA N G, PAN, JIAN-WEI, «Quantum Teleportation Between Remote Atomic-Ensemble Quantum Memories», in Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol. CIX, n. 50, 2012, pp. 20.347-20.351.

22. BEHBOOD, NAEIMEH, CIURANA, FERRAN MARTIN, COLANGELO, GIORGIO, NAPOLITANO, MARIO, TÓTH, GÉZA, SEWELL, ROBERT J. , MITCHELL, MORGAN W., «Generation of Macroscopic Singlet States in a Cold Atomic Ensemble» in Physical Review Letters, vol. CXIII, fasc. 9, 2014, pp. 093601/1-093601/5.

8. Guarire con i quanti

1. FEYNMAN, RICHARD PHILLIPS, QED. La strana teoria della luce e della materia, Adelphi, Milano 1989, p. 25.
2. I tre scienziati vinsero assieme il Nobel per la fisica nel 1965 con la seguente motivazione: «Per il loro lavoro fondamentale nell'Elettrodinamica Quantistica, con profonde conseguenze per la fisica delle particelle elementari».
3. FEYNMAN, QED. La strana teoria della luce e della materia, cit., p. 35.
4. ISAACSON, WALTER, Einstein. La sua vita, il suo universo, Mondadori, Milano 2010.
5. FEYNMAN, QED. La strana teoria della luce e della materia, cit., p. 20.
6. SPAGGIARI, PIERGIORGIO, TRIBBIA, CATERINA,

Medicina quantistica. La medicina attraverso la fisica dei quanti, Tecniche Nuove, Milano 2016.

7. Nobel per la medicina, nel 1972, per aver decifrato la struttura delle immunoglobuline.
8. Informazioni tratte dal documentario Intervista a Liboff: le origini della risonanza in biologia, di Nadia Baldo, 2013.
9. Il valore identificato per l'intensità del campo magnetico terrestre, in questa riflessione, è pari a $0,45 \mu\text{T}$. Questa unità, che si legge «microTesla», corrisponde a un milionesimo di Tesla, cioè a un Volt al secondo, applicato su una superficie pari a un metro quadro. In realtà l'intensità del campo magnetico

terrestre varia dai poli, dove è pari a circa $0,75 \mu\text{T}$, all'equatore magnetico, in cui raggiunge circa $0,35 \mu\text{T}$. Inoltre, il campo magnetico terrestre è molto irregolare: esistono zone anomale in cui si superano i $3 \mu\text{T}$ e altre in cui si arriva a soli $0,25 \mu\text{T}$.

10. ZHADIN, MIKHAIL N. , NOVIKOV, VADIM VICTOROVICH, BARNES, FRANK S. , PERGOLA, NICHOLAS F., «Combined Action of Static and Alternating Magnetic Fields on Ionic Current in Aqueous Glutamic Acid Solution», in BioElectroMagnetics, vol. XIX, 1998, pp. 41-45.

11. Il «mu-metal» è una speciale lega metallica con un'alta attitudine a magnetizzarsi in presenza di un campo

magnetico, cioè con un'alta «permeabilità magnetica». Nell'esperimento di Zhadin le caratteristiche di questa lega sono state utilizzate per realizzare una cella completamente schermata dai campi magnetici esterni.

12. La descrizione fornita si riferisce esclusivamente alla seconda serie di esperimenti effettuati da Mikhail N. Zhadin e descritti nell'articolo citato (vedi nota 9).

13. DE L GIUDICE, EMILIO, PREPARATA, GIULIANO, VITIELLO, GIUSEPPE, «Water as a Free Electric Dipole Laser», in *Physical Review Letters*, vol. XLI, 1988, pp. 1085-88.

14. DAVENAS, ELIZABETH, BEAUVAIS, F., AMARA, J., OBERBAUM, M., ROBINZON, B., MIADONNA, A. TEDESCHI, ALBERTO, POMERANZ, B., FORTNER, P. BELON, P., SAINTE-LAUDY, J., POITEVIN, B., BENVENISTE, JACQUES, «Human Basophil Degranulation Triggered by Very Dilute Antiserum Against IgE», in Nature, vol. CCCXXXIII, fasc. 6178, 1988, pp. 816-818.

15. Con la definizione di fusione fredda è stato genericamente indicato un tipo di fusione nucleare a bassa energia – annunciato alla stampa nel 1989 da Martin Fleischmann e da Stanley Pons – che si realizzerebbe tramite reazioni chimiche con l'utilizzo di un catalizzatore.

16. Carlo Rubbia ha vinto il Nobel assieme al fisico olandese Simon van der Meer con la seguente motivazione: «Per il loro contributo decisivo al grande progetto, che ha portato alla scoperta delle particelle W e Z, bosoni intermedi per l'interazione debole».

17. DE L GIUDICE, EMILIO, FLEISCHMANN, MARTIN, PREPARATA, GIULIANO, TALPO, GETULLIO, «On the 'Unreasonable' Effects of ELF Field upon a System of Ions», in Bioelectromagnetics, vol. XXIII, 2002, pp. 522-530. Lo studio è stato pubblicato due anni dopo la morte di Giuliano Preparata.

18. MAZZARO, RENZO, Viviamo tutti sulla cresta dell'onda. I campi

elettromagnetici ultradeboli nuova frontiera della medicina e della cura delle malattie, Aliberti, Roma 2010. P. 53.

19. Brano riportato senza datazione in MAZZARO, Viviamo tutti sulla cresta dell'onda, cit., pp. 53-54.

20. La teoria dei domini di coerenza dell'acqua verrà approfondita nel Capitolo 9.

21. Brian D. Josephson ha vinto il Nobel per la fisica, condividendolo con Leo Esaki e Ivar Giaever, a soli trentatré anni, nel 1973. Questa la motivazione: «Per le sue previsioni teoriche delle proprietà di una supercorrente attraverso una barriera a tunnel, in particolare quei fenomeni che sono generalmente noti

come effetto Josephson».

22. Luc Montagnier è noto in tutto il mondo per la scoperta, assieme a Françoise Barré-Sinoussi e a Robert Gallo, del virus dell'HIV, nel 1983. Per questo motivo, gli è stato conferito il Nobel nel 2008. L'anno successivo, la collaborazione fra Emilio Del Giudice e Luc Montagnier avrebbe portato alla pubblicazione di MONTAGNIER, LUC, AISSA, J. , DE L GIUDICE, EMILIO, LAVALLEE, C. , TEDESCHI, ALBERTO, VITIELLO, GIUSEPPE, «DNA Waves and Water», in Journal of Physics, vol. CCCVI, n. 1, 2011.

23. Convegno «The Role of QED (Quantum Electro Dynamics) in Medicine», con Giuliano Preparata, Getullio Talpo, Emilio

Del Giudice, Baldassarre Messina e altri,
14 dicembre 1999, presso l'Università di
Roma la Sapienza.

24. «L'incertezza della scienza», testo
della conferenza tenuta da Richard
Feynman presso la University of
Washington nell'aprile del 1963. I brani
tratti dalla trascrizione sono riportati in
FEYNMAN, RICHARD PHILLIPS, *Il senso delle
cose*, Adelphi, Milano 1999, pp. 11-13.

9. Acqua, questa sconosciuta

1. MOORE, EMILY B. , MOLINERO, VALERIA, «Structural Transformation in Supercooled Water Controls the Crystallization Rate of Ice», in Nature, vol. CDLXXIX, 2011, pp 506-509.
2. Brano tratto dall'articolo «Lo strano punto di congelamento dell'acqua», in Le Scienze, 24 novembre 2011.
3. Il pH del sangue umano, affinché possano essere svolte le principali funzioni metaboliche, deve essere sempre mantenuto fra i valori di 7,35 e 7,45. L'«equilibrio acido-base» è l'insieme dei processi fisiologici attuati dall'organismo per mantenerlo all'interno di quell'intervallo.

4. DE L GIUDICE, EMILIO, SPINETTI, PAOLA ROSA, TEDESCHI, ALBERTO, «La dinamica dell'acqua all'origine dei processi di metamorfosi degli organismi viventi», in Water, 3 settembre 2010.
5. Teoria che abbiamo introdotto nel Capitolo 4 e che descrive le particelle elementari, e le loro interazioni, sulla base del carattere ondulatorio della materia, definendole come elementi quantizzati dei campi. Gli stessi campi della fisica classica rivisti, però, in base alla formulazione della Relatività di Einstein.
6. DE L GIUDICE, EMILIO, DE NINNO, ANTONELLA, FLEISHMANN, MARTIN, MENGOLI, GIULIANO, MILANI, MARZIALE, TALPO, GETULLIO, VITIELLO,

GIUSEPPE, «Coherent Quantum Electrodynamics in Living Matter», in Journal of Electromagnetic Biology and Medicine, vol. XXIV, fasc. 3, 2005, pp. 199-210.

7. GERMANO, ROBERTO, Aqua. L'acqua elettromagnetica e le sue mirabolanti avventure, Bibliopolis, Napoli 2006.
8. DAVENAS, ELIZABETH, BEAUVAIS, F., AMARA, J., OBERBAUM, M., ROBINZON, B., MIADONNA, A. TEDESCHI, ALBERTO, POMERANZ, B., FORTNER, P. BELON, P., SAINTE-LAUDY, J., POITEVIN, B., BENVENISTE, JACQUES, «Human Basophil Degranulation Triggered by Very Dilute Antiserum Against IgE», in Nature, vol. CCCXXXIII, fasc. 6178, 1988, pp. 816-818.

9. BERTRAND, CHRISTOPHER E. , ZHANG, YANG, CHEN, SOW-HSIN, «Deeply-Cooled Water under Strong Confinement: Neutron Scattering Investigations and the Liquid-Liquid Critical Point Hypothesis», in Physical Chemistry Chemical Physics, vol. XV, 2013, pp. 721-745.
10. BRIZHIK, LARISSA, DE L GIUDICE, EMILIO, JØRGENSEN, SVEN E. , MARCHETTINI, NADIA, TIEZZI, ENZO, «The Role of Electromagnetic Potentials in the Evolutionary Dynamics of Ecosystems», in Ecological Modelling, vol. CCXX, fasc. 15, 2009, pp. 1865-1869.
11. Docente di Chimica Fisica presso la Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali dell'Università di Siena, e

direttore del Dipartimento di Chimica della stessa università, ha ricevuto numerosi riconoscimenti per il lavoro di ricerca svolto. Fra i più prestigiosi, l'Eminent Scientist Award dal Wessex Institute of Technology, nel 2003, e la medaglia Blaise Pascal dell'European Academy of Sciences for Physics and Chemistry, nel 2004.

12. OSSICINI, STEFANO, L'universo è fatto di storie non solo di atomi. Breve storia delle truffe scientifiche, Neri Pozza, Milano 2012, pp. 89-100.
13. Teoria che è stata presentata nel Capitolo 2.
14. McDERMOTT, M. LUKE, VANSELOUS, HEATHER, CORCELLI, STEVEN A. , PETERSEN, POUL B.,

«DNA's Chiral Spine of Hydration», in
American Chemical Society, vol. III, n. 7,
24 maggio 2017, pp. 708-714.

10. La Mente Quantica

1. HEISENBERG, WERNER, «Über den Anschaulichen Inhalt der Quantentheoretischen Kinematik und Mechanik», in Zeitschrift für Physik, vol. XLIII, fasc. 3-4, 1927, pp. 172-198.
2. Come abbiamo visto nel Capitolo 2 e nel Capitolo 3.
3. BOHR, NIELS, «Fisica quantistica e problema della vita», in Idem, I quanti e la vita. Unità della natura. Unità della conoscenza di Niels Bohr; Bollati Boringhieri, Torino 2012, p. 129.
4. Ibidem, p. 131.
5. PIAGET, JEAN, La nascita dell'intelligenza nel bambino, La nuova Italia, Firenze 1973. Piaget, Jean, Inhelder, Bärbel, La

psicologia del bambino, Einaudi, Torino 1970.

6. Ibidem, p. 132.

7. SHAKESPEARE, WILLIAM, Amleto, Mondadori, Milano 2010, p. 75.

8. SCHACTER, DANIEL, «Implicit Knowledge: New Perspectives on Unconscious Processes», in Proceedings of the National Academy of Sciences USA, vol. LXXXIX, 1992, pp. 11113-11117.
AUGUSTO, LUIGI S M., «Unconscious Knowledge: A Survey», in Advances in Cognitive Psychology, vol. VI, 2010, pp. 116-141.

9. DIJKSTERHUIS, AP, NORDGREN, LORAN F., «A Theory of Unconscious Thought», in Perspectives on Psychological Science,

vol. I, fasc. 2, 2006, pp. 95-109. STRICK, MADELIJN, DIJKSTERHUIS, AP, VAN BAAREN, RICK, «Unconscious-Thought Effects Take Place Off-Line, Not On-Line», in Psychological Science, vol. XXI, fasc. 4, 2010, pp. 484-488. ZHONG, CHEN-BO, DIJKSTERHUIS, AP, GALINSKY, ADAM, «The Merits of Unconscious Thought in Creativity», in Psychological Science, vol. XIX, fasc. 9, 2008, pp. 912-918.

10. GOLDBERG, ELKHONON, Il paradosso della saggezza, Ponte alle Grazie, Firenze 2005.

11. KUHN, THOMAS S., La struttura delle rivoluzioni scientifiche, Einaudi, Torino 2009.

12. PLATONE, Fedro, Newton Compton,

Roma 2013, rif. 265b.

13. FACCO, ENRICO, *Meditazione e ipnosi tra neuroscienze, filosofia e pregiudizio*, Edizioni Altravista, Broni 2014. Facco, Enrico, Lucangeli, Daniela, Tressoldi, Patrizio, «On the Science of Consciousness: Epistemological Reflections and Clinical Implications», in *Explore*, vol. XIII, n. 3, 2017. Damasio, Antonio, *L'errore di Cartesio*, Adelphi, Milano 1995.
14. BAARS, BERNARD J., «Global Workspace Theory of Consciousness: Toward a Cognitive Neuroscience of Human Experience», in *Progress in Brain Research*, vol. CL, 2005, pp. 45-53.
15. LAMME, VICTOR A. F., «How Neuroscience

Will Change Our View on Consciousness», in Cognitive Neuroscience, vol. I, fasc. 3, 2010, pp. 204-220.

16. Come abbiamo visto nel Capitolo 3.

17. STAPP, HENRY PIERCE, Mindful Universe. Quantum Mechanics and the Participating Observer, Springer, New York-Berlino 2011.

18. SEVERINO, EMANUELE, Legge e Caso, Adelphi, Milano 1980.

19. METZINGER, THOMAS, GALLESE, VITTORIO, «The Emergence of a Shared Action Ontology: Building Blocks for a Theory», in Consciousness and Cognition, vol. XII, fasc. 4, 2003, pp. 549-571.

20. FACCO, ENRICO, Meditazione e ipnosi tra

neuroscienze, filosofia e pregiudizio, cit.

21. FACCIO, ENRICO, LUCANGELI, DANIELA, TRESSOLDI, PATRIZIO, «On the Science of Consciousness: Epistemological Reflections and Clinical Implications», cit.
22. ARISTOTELE, *Metafisica*, Rusconi, Milano 1994, p. 499.
23. Con l'espressione «decoerenza quantistica», come abbiamo visto nel Capitolo 3, si fa riferimento al collasso della funzione d'onda causato dalla interazione, di tipo non reversibile, fra il sistema quantistico e l'ambiente. L'interpretazione di questa interazione, chiamata anche «desincronizzazione delle funzioni d'onda», appartiene

esclusivamente all'ambito della Meccanica Quantistica.

24. PENROSE, ROGER, La mente nuova dell'imperatore. La mente, i computer e le leggi della fisica, Biblioteca Universale Rizzoli, Milano 2000.
25. TEGMARK, MAX ERIK, «The Importance of Quantum Decoherence in Brain Processes», in Physical Review, vol. LXI, fasc. 4, pt B, 2000, pp. 4194-4206.
26. TEGMARK, MAX, L'universo matematico, Bollati Boringhieri, Torino 2016, p. 235.
27. SAHU, SATYAJIT, GHOSH, SUBRATA, HIRATA, KAZUTO, FUJITA, DAISUKE, BANDYOPADHYAY, ANIRBAN, «Multi-Level Memory-Switching Properties of a Single Brain Microtubule», in Applied Physics Letters,

vol. CII, fasc. 12, 2013.

28. HAMEROFF, STUART, PENROSE, ROGER, «Consciousness in the Universe: A Review of the Orch OR Theory», in *Physics of Life Reviews*, vol. XI, fasc. 1, 2014, pp. 39-78.
29. BRUZA, PETER D., WANG, ZHENG, BUSEMEYER, JEROME, «Quantum Cognition: A New Theoretical Approach to Psychology», in *Trends in Cognitive Sciences*, vol. XIX, fasc. 7, 2015, pp. 383-393.
30. ATMANSPACHER, HARALD, FILK, THOMAS, «The Necker-Zeno Model for Bistable Perception», in *Topics in Cognitive Science*, vol. V, fasc. 4, 2013, pp. 800-817. POTHOS, EMMANUEL M. , BUSEMEYER, JEROME R., «Can Quantum Probability

Provide a New Direction for Cognitive Modeling?», in Behavioral and Brain Sciences Journal, vol. XXXVI, fasc. 3, 2013, pp. 255-274. KHRENNIKOV, ANDREI Y., «Non-Archimedean Analysis: Quantum Paradoxes, Dynamical Systems and Biological Models», Springer, New York-Berlino 2015.

31. SALARI, VAHID, MORADI, NARGES, FAZILEH, FARHAD, SHAHBAZI, FARHAD, «Quantum Decoherence Time Scales for Ionic Superposition States in Ion Channels», in Physical Review E, 2015, E 91 032704; e successivamente in SALARI, VAHID, NAEIJ, HAMIDREZA, SHAFIEE, AFSHIN, «Quantum Interference and Selectivity through Biological Ion Channels» in

Scientific Reports Online, 30 gennaio
2017.

Le voci degli altri
Ovvero, a tu per tu con i
protagonisti

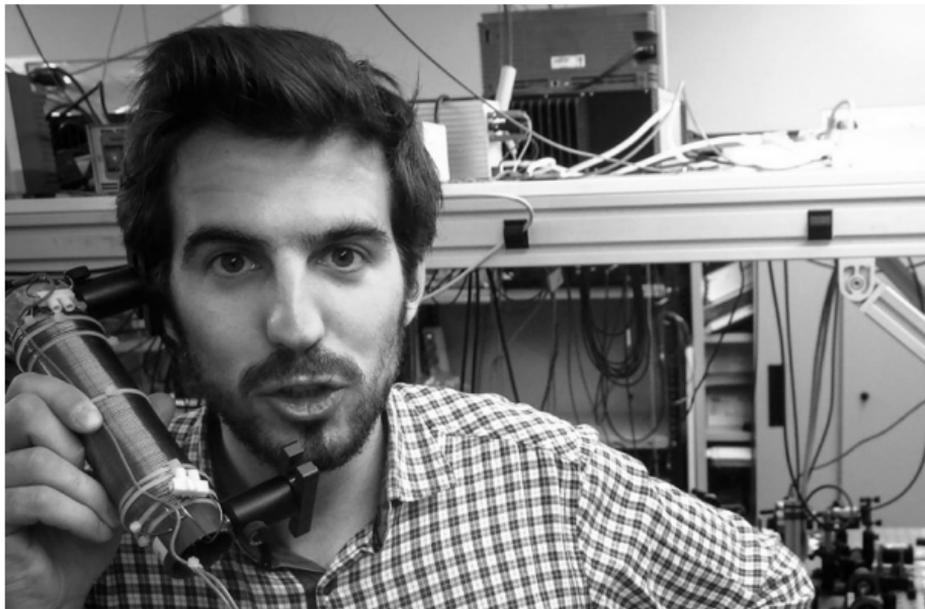


Federico Carminati lavora come fisico e informatico al CERN ed è responsabile del progetto GEANTV per lo sviluppo di un software altamente ottimizzato per la simulazione dei rivelatori di particelle. Dopo la laurea in Fisica, conseguita presso l'Università di Pavia nel 1981, ha lavorato a Los Alamos e al Caltech (il California

Institute of Technology) come fisico delle particelle. Tornato in Italia, è stato responsabile della libreria software del CERN e del programma di simulazione GEANT. Dal 1994 al 1998 ha lavorato con il Premio Nobel Carlo Rubbia alla progettazione di un nuovo concetto di centrale nucleare accoppiata a un acceleratore di particelle. Dal 1998 al 2012 è stato coordinatore della sezione di calcolo dell'esperimento ALICE presso il Large Hadron Collider, LHC, del CERN. Nel 2013 ha conseguito il PhD in Fisica presso l'Università di Nantes con una tesi sull'infrastruttura informatica dell'esperimento ALICE. Attualmente è in formazione come psicoanalista presso l'Istituto Internazionale di Psicoanalisi

Baudouin di Ginevra.

Nel capitolo 7



Giorgio Colangelo è un fisico quantistico, oggi ricercatore e divulgatore scientifico presso l'ICFO (l'Istituto per le Scienze Fotoniche) di Barcellona, dove ha contribuito a sviluppi significativi della Metrologia Quantistica e della fisica relazionata al Principio di Indeterminazione di Heisenberg. In altre ricerche Colangelo

ha contribuito all'osservazione sperimentale di Entanglement per numeri macroscopici di particelle, all'uso di interazioni non lineari in interferometria atomica, alla dimostrazione di meccanismi di feedback – cioè di retroazione – per il raffreddamento di sistemi di spin e alla rivelazione di segnali RF, in radiofrequenza.

Nel campo della divulgazione scientifica, Colangelo ha contribuito a far conoscere al grande pubblico le vicende storiche della fisica italiana, oltre ai fenomeni fondamentali della Fisica Quantistica. Per Hoepli, assieme a Massimo Temporelli, ha pubblicato nel 2013 il volume *La banda di Via Panisperna. Fermi Majorana e i fisici che hanno cambiato la storia.*

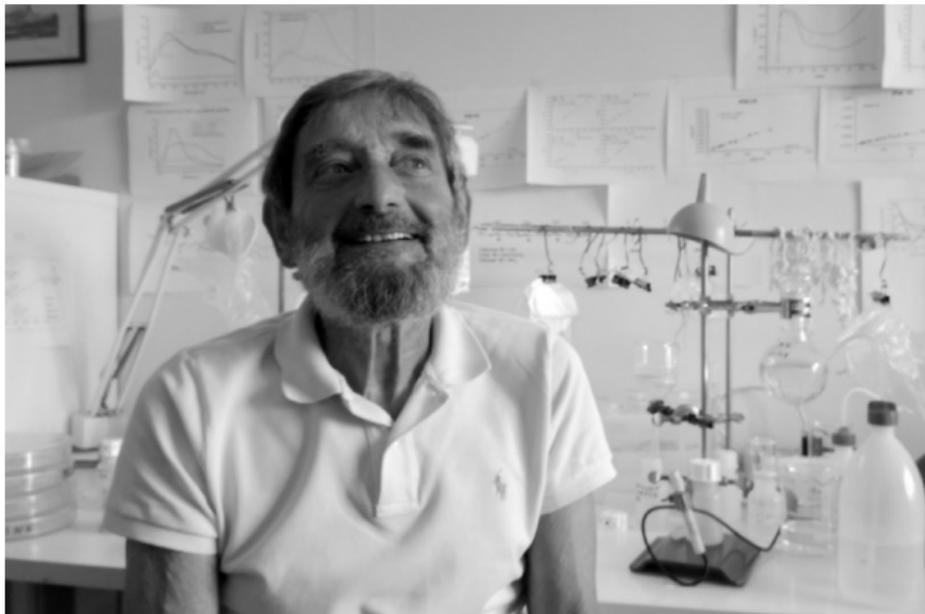
Nei capitoli 3 e 7



Marco Drago ha conseguito il PhD in Fisica all'Università di Padova, nel 2010, con una tesi sulle onde gravitazionali. Dopo il post dottorato presso l'Università di Trento ha lavorato per il Max Planck Institute di Hannover. Come responsabile di una delle analisi in tempo reale dei dati ricevuti dai rivelatori LIGO-Virgo, è stato il primo uomo al mondo a osservare un'onda

gravitazionale. È stato invitato a parlare della scoperta a conferenze internazionali, numerose scuole padovane, seminari pubblici per la cittadinanza e alcuni festival: il Festival della Scienza di Genova, i Wired Next Fest di Milano e Firenze e i Dialoghi di Trani. Nel 2016 ha ricevuto il Premio Niccolò Copernico per la Fisica, di Ferrara, il Premio SIGRAV della Società Italiana di Relatività Generale e Fisica della Gravitazione e il Premio Alumni of the Year dell'Università di Padova. Nel 2017 è stato insignito del titolo di Padovano Eccellente. Nel tempo libero suona il pianoforte e scrive racconti. Recentemente, ha pubblicato i primi due volumi della serie fantasy La storia del Drago.

Nel capitolo 5



Vittorio Elia è docente di Chimica dal 1973 e di Elettrochimica dal 1985 presso il Dipartimento di Chimica dell'Università Federico II di Napoli. È coautore di oltre centocinquanta pubblicazioni su riviste scientifiche internazionali nell'ambito della termodinamica delle soluzioni acquose di molecole modello di interesse biologico.

Negli ultimi venti'anni ha intrapreso lo studio termodinamico e spettroscopico di soluzioni acquose estremamente diluite ottenute attraverso un procedimento iterativo. Grazie ai propri studi e agli esperimenti realizzati in laboratorio, Vittorio Elia ha fornito un contributo scientifico rigoroso alla conoscenza delle proprietà chimico-fisiche di queste diluizioni pubblicando circa quaranta lavori sull'argomento. L'uso della procedura iterativa ha aperto scenari insospettabili sulla capacità dell'acqua di modificare la sua struttura sovramolecolare. Sono in corso esperimenti che mettono in evidenza la straordinaria capacità dell'acqua di essere estremamente sensibile alla presenza di polimeri idrofili sia naturali sia

sintetici.

Nel capitolo 9

un corso triennale di formazione in Psicoterapia. Dopo aver conseguito la specializzazione in Anestesiologia e Rianimazione, per oltre vent'anni si è prevalentemente occupato degli stati di coma, della diagnosi di morte cerebrale, di terapia del dolore e di neurofisiologia. Attualmente l'attività di Enrico Facco è prevalentemente rivolta alla trattazione del dolore cronico e dell'ansia, ai disturbi psicosomatici, alla coscienza e alle espressioni non ordinarie della mente: ipnosi, meditazione, esperienze di premorte, esperienze di uscita dal corpo ed esperienze mistiche. Il suo interesse è duplice e coinvolge sia gli aspetti epistemologici dello studio della coscienza – e dell'approccio al paziente – sia

l'impiego terapeutico dell'ipnosi e delle
tecniche non farmacologiche.

Nei capitoli 2 e 9



Giuliana Galli Carminati ha conseguito una prima laurea in Medicina, presso l'Università di Pavia, nel 1979; poi una specializzazione in Analisi di Laboratorio a Pavia, una specializzazione in Psichiatria e Psicoterapia a Ginevra, un PhD in Medicina all'Università di Ginevra e un secondo dottorato in Modellizzazione e

Strumentazione in Medicina e Biologia presso l'Università di Grenoble, in Francia. Nel 1998 ha aggiunto al percorso medico anche quello in Fisica, laureandosi a Roma presso l'Università di Tor Vergata. Nel 2008 ha conseguito il titolo di Privat Docent presso l'Università di Ginevra, e dal 2014 è professore associato di Salute Mentale per l'Università Nazionale di Seoul, Ospedale Bundang, in Corea. Fra le varie attività, nel 2005 ha fondato ASTRAG, l'Associazione per il Lavoro Gruppale Terapeutico Sociale, e Simposietto, un think tank sui rapporti tra materia e spirito. La sua ricerca si concentra in particolare sulla disabilità intellettuale e sull'applicazione di modelli derivati dalla teoria dell'informazione quantica alla modellizzazione della psiche

umana.

Nel capitolo 7



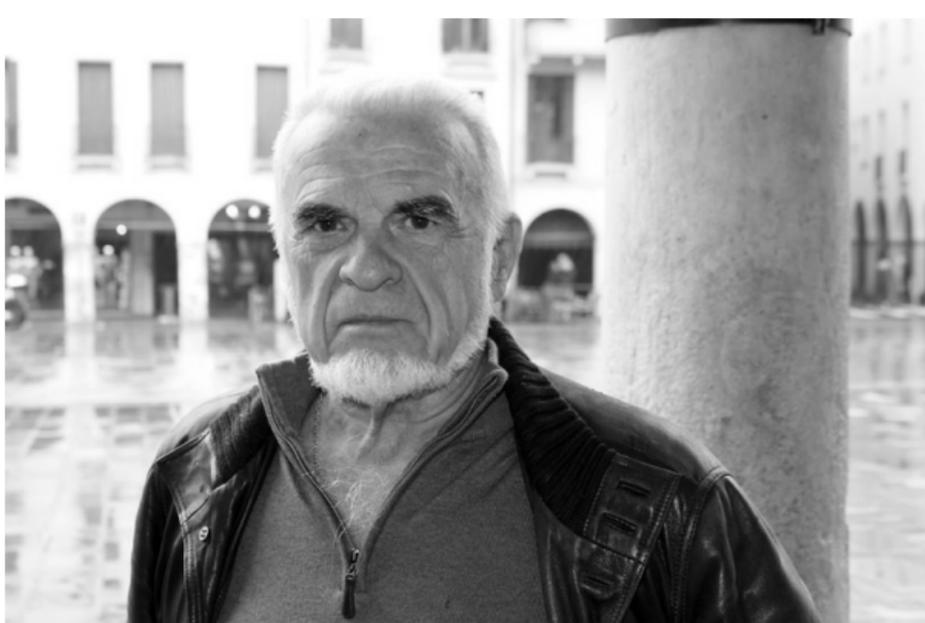
Roberto Germano è un fisico della materia, e nel 1997 ha fondato Promete, spin-off del CNR, di cui è CEO. È autore di diversi articoli di fisica sperimentale pubblicati su riviste scientifiche internazionali e di alcuni brevetti per «invenzione industriale». Vincitore nel 2004 del Premio Roberto Marrama per la ricerca

di giovani talenti imprenditoriali, è Esperto per il Trasferimento Tecnologico, Albo del Ministero dello Sviluppo Economico.

Germano è autore dei libri Fusione fredda. Moderna storia d'inquisizione e d'alchimia (seconda edizione, 2003) e Aqua. L'acqua elettromagnetica e le sue mirabolanti avventure, del 2006, entrambi pubblicati da Bibliopolis. È coautore di Trasferimento tecnologico e del Manuale tascabile del Trasferimento tecnologico, entrambi pubblicati da Il Denaro nel 2010. È membro del comitato scientifico IC-MAST, la Conferenza Internazionale sui Materiali e sulle Applicazioni per Sensori e Trasduttori, presidente della sessione LECS, sistemi coerenti a debole energia, e membro del comitato scientifico del gruppo di ricerca

Aquaphotomics, creato da Roumiana
Tsenkova della Kobe University, in
Giappone.

Nei capitoli 8 e 9

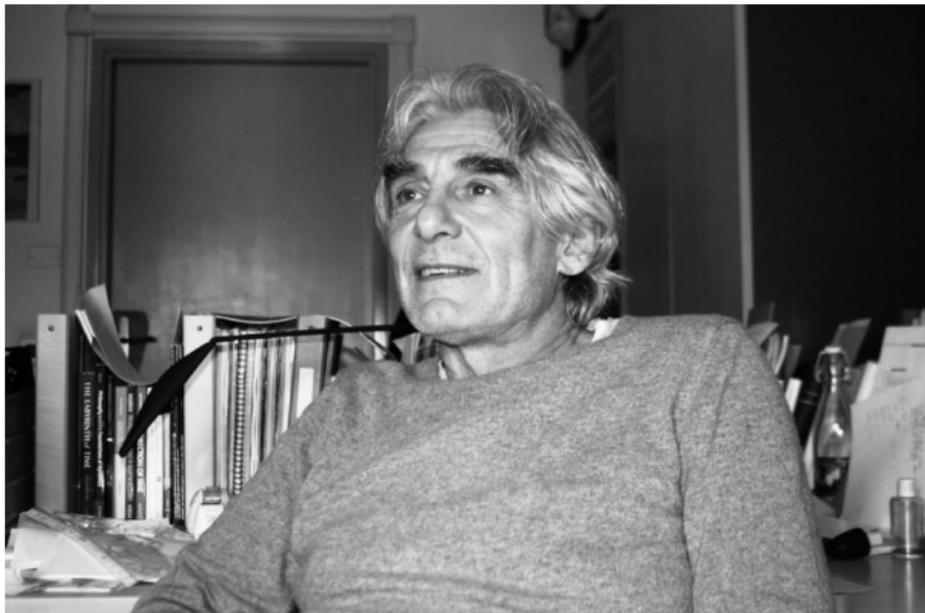


Fabio Roberto Marchetti ha studiato Fisica presso la Facoltà di Fisica dell'Università di Padova, all'inizio degli anni Sessanta del secolo scorso. In quel periodo ha conosciuto Getullio Talpo, con cui ha iniziato un rapporto di amicizia e collaborazione, soprattutto nell'ambito della Fisica Subacquea. All'interno di

questo campo, Fabio Roberto Marchetti si è interessato in particolare alle applicazioni relative alla medicina e alla trattazione degli incidenti in acqua. Divenuto istruttore alla scuola di Genova, ha seguito gli insegnamenti di Damiano Zannini, docente di Medicina Subacquea e Iperbarica presso la locale università. Nel 1982 è stato cofondatore del Centro di Medicina Iperbarica ATiP di Padova, e nel 1993 del Centro di Medicina Iperbarica OTI Services di Mestre. Assieme a Getullio Talpo, Emilio Del Giudice e Andrea Trevisan, nel 2003 ha fondato la società Prometeo per l'applicazione degli studi relativi alla Fisica Quantistica nella medicina. Il primo prototipo della QUEC PHISIS QPS1 è attualmente posizionato nel Centro di

Medicina Iperbarica di Mestre.

Nel capitolo 8



Giulio Peruzzi si è laureato in Fisica a Firenze nel 1986 e ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Fisica a Genova nel 1990. Attualmente è professore associato di Storia della Fisica all'Università di Padova, dove insegna Storia della Fisica e storia dell'Astronomia presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia, e

Storia della Scienza e della Tecnica al
Dipartimento di Ingegneria
dell'Informazione. I suoi argomenti di
ricerca riguardano, in particolare, la storia
della fisica tra XVII e XX secolo, i
fondamenti della Meccanica Quantistica e
la filosofia della fisica. È direttore del
Master di comunicazione delle scienze
dell'Ateneo patavino. Oltre alle attività
didattica e di ricerca, Peruzzi si è
impegnato nella diffusione della cultura
scientifica sia collaborando a riviste e a
trasmissioni radio e televisive, sia
attraverso la progettazione e la
realizzazione di eventi espositivi
temporanei e permanenti. Dal 2007 fa
parte della Giuria Scientifica del Premio
letterario Galileo per la Divulgazione

Scientifica istituito dal Comune di Padova.

Nei capitoli 2, 3 e 4



Augusto Sagnotti è docente di Fisica Teorica presso la Scuola Normale Superiore di Pisa dal 2005. Ha conseguito il Ph.D. in Fisica Teorica nel 1983 presso il California Institute of Technology. Ha ricevuto il Premio Carosio dell'Università di Roma La Sapienza, nel 1979; una Miller Fellowship dall'Università della California a Berkeley,

nel 1984; il Premio SIGRAV dalla Società Italiana di Relatività Generale e Fisica della Gravitazione, nel 1994; e il Premio Margherita Hack dal Ministero dei Beni Culturali e dall'INAF – l'Istituto Nazionale di Astrofisica – nel 2014. Inoltre, nel 1999, è stato Andrejewsky Lecturer presso l'Università Humboldt di Berlino. Sagnotti si è occupato di quantizzazione del campo gravitazionale, di Teoria delle Stringhe – ha introdotto la «costruzione di orientifold», che collega teorie con stringhe aperte ad altre con solo stringhe chiuse e unifica le stringhe di tipo I e IIB in 10 dimensioni –, di rottura della supersimmetria, di campi di gauge di spin elevato e di alcune questioni di Cosmologia legate al Fondo Cosmico a Microonde (CMB).

Nel capitolo 6



Piergiorgio Spaggiari si è laureato in Fisica e in Medicina e Chirurgia. È stato ricercatore presso l'Istituto di Tecnologie Avanzate del CNR, il Consiglio Nazionale delle Ricerche, e ha rivestito il ruolo di assistente del presidente per dieci anni. Successivamente, ha ricoperto il ruolo di Direttore Generale delle principali Aziende

Ospedaliere della Lombardia e contemporaneamente, ha continuato gli studi sulle applicazioni della Fisica in campo medico, ottenendo riconoscimenti internazionali, come la laurea honoris causa dell'Università di Odessa e la qualifica di Professore Onorario al ShangaHai First People's Hospital. Attualmente è Professore Straordinario di Medicina dello Sport all'Università San Raffaele di Roma. Spaggiari è relatore di fama internazionale e autore di numerose pubblicazioni scientifiche. I suoi due grandi interessi, la fisica e la medicina – e la loro integrazione e sinergia – lo spingono a studiare e a sviluppare teorie avanzate sul ruolo dell'acqua nel corpo umano; acqua che nasconde segreti ancora da svelare,

dai quali dipenderanno gli sviluppi futuri
della Medicina Quantistica.

Nei capitoli 8 e 9



Giuseppe Tormen (2 gennaio 1962 – 10 giugno 2018) è scomparso poco dopo la prima pubblicazione di questo libro. Era laureato in Fisica e aveva un dottorato in Astronomia. Dal 1992 al 1998 ha lavorato negli Stati Uniti (Arizona State University e MIT, Massachusetts Institute of Technology); nel Regno Unito (Cambridge

e Durham University); in Francia (Institut d'Astrophysique de Paris); e in Germania (Max Planck Institute for Astrophysics). Presso l'Università di Padova ha insegnato Cosmologia, Formazione delle Strutture Cosmiche e Metodi Matematici per l'Astronomia, è stato Professore Associato presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia e docente di Relatività Generale per il corso di laurea in Astronomia e di Fisica per Ingegneria. Il suo campo di ricerca era la cosmologia numerica e teorica, con particolare interesse per la formazione delle strutture cosmiche e per la struttura, e l'evoluzione dinamica, degli aloni di materia oscura. È stato relatore o correlatore di oltre cinquanta tesi di laurea e di dottorato in

Astronomia, Fisica e Informatica. Da sempre appassionato divulgatore, si è occupato anche di didattica della Fisica e dell'Astronomia.

Nei capitoli 4 e 5



Gabriele Veneziano ha conseguito il PhD in Fisica presso l'Istituto Weizmann di Rehovot, in Israele, nel 1967. Nel 1972, dopo un post-dottorato al MIT, è ritornato all'Istituto Weizmann come Professore Ordinario. Dal 1977 è Senior Staff Member del CERN di Ginevra e ha insegnato Fisica delle particelle elementari, Gravitazione e

Cosmologia presso il Collège de France per dieci anni. A Gabriele Veneziano, nel 1968, si deve l'introduzione dell'Amplitudine di Veneziano e la nascita del Modello a Risonanze Duali – Modello di Veneziano –, da cui traggono origine le Teorie delle Stringhe, una delle attuali frontiere della ricerca di una teoria unificata delle interazioni fondamentali. Molti i riconoscimenti internazionali, tra cui ricordiamo: nel 2004, il Premio Dannie Heinemann dell'American Physical Society; nel 2005, il Premio Enrico Fermi della Società Italiana di Fisica; nel 2006, la Medaglia Einstein, e nel 2014, la Medaglia Dirac del Centro Internazionale di Fisica Teorica di Trieste. I suoi principali contributi riguardano le teorie di campo,

quelle di stringa e i modelli cosmologici.

Nel capitolo 6

Ringraziamenti

SCRIVERE questo libro è stata un'esperienza unica ed entusiasmante per tanti e differenti motivi.

Il primo e principale, naturalmente, è che in questo lungo viaggio ho avuto il piacere e l'onore di essere accompagnato da molti colleghi e studiosi che hanno deciso di condividere con me – quindi con

voi che mi state leggendo – le loro ricerche e i loro risultati. Anche quelli più recenti e, in alcuni casi, inediti.

Li voglio ringraziare uno a uno perché tramite le loro voci, i loro consigli e le loro riletture, questo testo è cresciuto sia nel tempo sia nei contenuti, fino ad assumere la sua forma definitiva. Grazie a Giulio Peruzzi, che con la sua approfondita conoscenza sia dei fatti storici sia delle loro implicazioni fisiche mi ha spronato a comprendere l'aspetto umano delle principali vicende legate alla nascita della Teoria Quantistica. Grazie a Giuseppe

Tormen, che mi ha guidato fra gli abissi del cosmo e del tempo, permettendomi di approfondire la visione relativistica dell'universo e di confrontarla con quella quantistica. Grazie a Marco Drago, primo uomo al mondo ad aver osservato un'onda gravitazionale, che mi ha fatto partecipe sia dei risultati già ottenuti dalla ricerca sia delle future prospettive di questa epocale scoperta. Grazie a Gabriele Veneziano, padre della Teoria delle Stringhe, che mi ha testimoniato la nascita imprevista, ma non casuale, e i primi sviluppi del proprio lavoro. Grazie ad Augusto Sagnotti, che ha

avuto la disponibilità e la pazienza di discutere con me tutti i principali aspetti della Teoria delle Stringhe e di renderli il più possibile comprensibili. Grazie a Federico Carminati e a Giuliana Galli Carminati, che mi hanno consentito di affrontare e superare, da più punti di vista, il principale paradosso della Meccanica Quantistica. Grazie a Giorgio Colangelo, che si è prestato a raccontarmi la sua esperienza con il Principio di Indeterminazione di Heisenberg e tutte le implicazioni delle più recenti ricerche sull'entanglement. Grazie a Fabio

Roberto Marchetti, che mi ha condotto, attraverso le esperienze di Getullio Talpo, di Giuliano Preparata e di Emilio Del Giudice, alla comprensione delle teorie che hanno consentito la realizzazione della QUEC PHISIS QPS1. Grazie a Roberto Germano, che mi ha messo a disposizione i risultati dei suoi studi sull'Elettrodinamica Quantistica e tutte le loro più recenti implicazioni. Grazie a Piergiorgio Spaggiari che mi ha condotto alla scoperta delle applicazioni mediche della Fisica Quantistica. Grazie a Vittorio Elia, che mi ha fatto partecipe di oltre

vent'anni di sperimentazioni e che ha voluto condividere con me gli inediti esiti appena ottenuti nel suo laboratorio. Grazie a Enrico Facco, con cui è nata una profonda sintonia, che mi ha permesso di sondare gli aspetti legati alla filosofia, al cervello e alla coscienza, degli attuali sviluppi del pensiero quantistico.

Ma qualsiasi viaggio si compone di tanti momenti, di innumerevoli incontri e di profonde vicinanze. Per il supporto costante al mio lavoro, per la loro determinazione e per la fiducia che hanno dimostrato nelle mie idee e in questo innovativo

progetto di divulgazione scientifica, voglio ringraziare la mia agente Juliane Roderer ed Elisabetta Albieri, Non Fiction Editor in Chief di Sperling&Kupfer. Un sentito grazie va anche a tutte le meravigliose persone di Sperling&Kupfer con cui ho avuto il piacere di collaborare o che, semplicemente, ho potuto conoscere anche solo via e-mail. In particolare, a Cinzia Carlino e al suo entusiastico e partecipato supporto alla rubrica «Brevi riflessioni di fisica quantistica» – che tengo settimanalmente all'interno del blog della casa editrice –, alla vulcanica Margherita Crepax e a tutti i

membri dell'ufficio stampa, e a Enrico Casadei, che ha curato la redazione finale dei testi. A Enrico Casadei riservo un pensiero speciale per la disponibilità e la pazienza che ha saputo dimostrare nei confronti delle tante necessità di un volume così particolare.

Ci sono poi molti altri ringraziamenti che desidero fare. Un grazie, sentito, ai miei allievi per l'interesse che mi hanno sempre saputo dimostrare in questi oltre vent'anni di carriera universitaria. È a loro, alla loro fattiva partecipazione e al loro genuino entusiasmo che offro questa mia

nuova fatica, con la speranza che possa trasformarsi in un piccolo seme capace di far germogliare una riflessione più ricca e profonda. Un grazie di cuore anche ai miei amici e colleghi, soprattutto agli spiriti liberi del gruppo interdisciplinare di studi: Daniela Lucangeli, Patrizio Tressoldi, Enrico Facco, Giuseppe Tormen ed Ernesto Burgio. Molto di quello che ho scritto nasce dal confronto e dalle riflessioni portate avanti assieme e contemporaneamente sono certo che costituirà la base per nuovi confronti e per ulteriori riflessioni.

Un enorme grazie, per la fiducia

che hanno riposto in me e nelle mie ricerche, va a tutti gli amici e i colleghi americani della Florida Atlantic University, dove ho avuto il privilegio di diventare Graduate Research Assistant nel 2014. In particolare a Michael J. Horswell, attuale Dean del Dorothy F. Schmidt College of Arts and Letters della FAU, che mi ha sempre sostenuto nelle mie attività, a Richard Shusterman, con cui ho potuto lavorare e studiare durante la mia permanenza in America, e a Stephen Charbonneau, con cui ho passato molte ore a discutere di innumerevoli temi. Grazie inoltre a

Ilaria Serra, che ha fortemente creduto in me e nelle mie capacità e mi ha fatto conoscere il lato positivo, umano e costruttivo dell'università americana.

Rimane un ulteriore e fondamentale ringraziamento da fare. Questo libro, così come tutto quello che sono riuscito a costruire negli anni, lo devo principalmente alla mia famiglia. Ai miei genitori, che mi hanno sempre sostenuto nella mia passione per lo studio, e a mia moglie Silvia e ai miei figli Francesco e Pietro. È a loro, che mi spronano ogni giorno a dare il meglio di quanto è nelle mie

possibilità, che dedico non solo queste pagine ma tutto ciò che c'è dietro e tutto ciò che da questo lavoro scaturirà in futuro. Perché qualsiasi viaggio non si conclude mai e ogni sosta dura solamente il tempo necessario per potersi rimettere in cammino più determinati, fiduciosi e consapevoli di prima.

P.S. Vorrei dire «grazie» ancora a molte persone, che in modi diversi mi sono vicine nel mio lavoro e nelle mie passioni. Lo faccio coralmemente in queste ultime righe perché il mio pensiero possa

arrivare, forte e sentito, a ciascuna di loro.

Questo ebook contiene materiale protetto da copyright e non può essere copiato, riprodotto, trasferito, distribuito, noleggiato, licenziato o trasmesso in pubblico, o utilizzato in alcun altro modo ad eccezione di quanto è stato specificamente autorizzato dall'editore, ai termini e alle condizioni alle quali è stato acquistato o da quanto esplicitamente previsto dalla legge applicabile. Qualsiasi distribuzione o fruizione non autorizzata di questo testo così come l'alterazione delle informazioni elettroniche sul regime dei diritti costituisce una violazione dei diritti dell'editore e dell'autore e sarà sanzionata civilmente e penalmente secondo quanto previsto dalla Legge 633/1941 e successive modifiche.

Questo ebook non potrà in alcun modo essere oggetto di scambio, commercio, prestito, rivendita, acquisto rateale o altrimenti diffuso senza il preventivo consenso scritto dell'editore. In caso di consenso, tale ebook non potrà avere alcuna forma diversa da quella in cui l'opera è stata pubblicata e le condizioni incluse alla presente dovranno essere imposte anche al fruitore successivo.

www.sperling.it

www.facebook.com/sperling.kupfer

Il mondo secondo la fisica quantistica
di Fabio Fracas

Proprietà letteraria riservata

© 2017 Sperling & Kupfer Editori S.p.A.

Realizzazione editoriale a cura di Enrico
Casadei.

Ebook ISBN 9788820097288

COPERTINA || ILLUSTRAZIONE ©
SHUTTERSTOCK | ART DIRECTOR:
FRANCESCO MARANGON | GRAPHIC
DESIGNER: SABRINA VENETO

«L'AUTORE» || FOTO © RICCARDO
GALLINI GRPHOTO