

SUPPLEMENTO RIVISTA 'ATOPON' - 11/ 2011



QUADERNO MYTHOS  
PSICOANTROPOLOGIA SIMBOLICA

FABIO MARZOCCA

INCONTRO TRA JUNG E PAULI

L'ESPERIENZA PSICOLOGICA DELLA  
SINCRONICITÀ  
VERSO L'ENTANGLEMENT QUANTISTICO



EDIZIONI MYTHOS

In occasione del seminario:

**OMAGGIO A JUNG**  
Il giornata

5 Novembre 2011 – Bracciano di Roma



EDIZIONI MYTHOS

# ÁTOPON

RIVISTA DI PSICOANTROPOLOGIA SIMBOLICA

ISSN 1126-8530

Dir. Maria Pia Rosati, past Dir. Annamaria Iacuele

Redazione: Giuseppe Lampis, M. Pia Rosati, Claudio Rugafiori  
Marina Plasmati, Lorenzo Scaramella

Ad memoriam: Gilbert Durand, Julien Ries

Centro Studi 'MYTHOS' Associazione scientifico-culturale  
Via Guareschi 153- Roma 00143  
Via Principe di Napoli 112- Bracciano

---

*Incontro tra Jung e Pauli  
L'esperienza psicologica della sincronicità verso l'entanglement  
quantistico*

Fabio Marzocca

Mythos Edizioni  
Novembre 2011

© «átopon»

www.atopon.it [atoponrivista@atopon.it](mailto:atoponrivista@atopon.it)

## INDICE

### 1. LE CORRISPONDENZE SIGNIFICATIVE NEL DIALOGO

<b>FRA JUNG E PAULI.....</b>	<b>9</b>
Chi era Wolfgang Pauli?.....	9
Il materiale pubblicato.....	12
Aspetti generali del dialogo Jung-Pauli .....	12
Cenni sulla sincronicità .....	16
Materia e psiche: due aspetti di una stessa realtà .....	19

### 2. ATOMI E CONOSCENZA..... 21

Introduzione.....	21
Cenni storici – l'alba di un nuovo mondo .....	22
Esperimento delle due fenditure e introduzione all'entanglement .....	28
Definizione di entanglement nella meccanica quantistica .....	31
Il paradosso Einstein-Podolsky-Rosen .....	31
Il fantasma di un antico legame .....	33

### CONCLUSIONE..... 35

## 1 - LE CORRISPONDENZE SIGNIFICATIVE NEL DIALOGO TRA JUNG E PAULI

### Chi era Wolfgang Pauli?

Wolfgang Pauli (1900-1958) è stato uno dei maggiori fisici teorici del secolo scorso, dotato di una profonda intuizione e di una straordinaria e penetrante capacità di pensiero. In età molto giovane già dimostrò le sue brillanti caratteristiche quando a poco più di vent'anni consegnò un manoscritto sulla teoria della relatività che fu pubblicato *dall'Enzyklopedie der mathematischen Wissenschaften*, generando in Albert Einstein il seguente commento:

*Chiunque studiasse questo lavoro, non potrebbe credere che lo stesso sia stato scritto da un uomo di soli ventuno anni. Non so cosa ammirare di più: la comprensione psicologica dell'evoluzione delle idee, l'accuratezza delle deduzioni matematiche, la profonda intuizione, la capacità di presentazione del lavoro con sistematica lucidità, la completezza fattuale o l'infallibilità critica<sup>1</sup>.*

Einstein dimostrò sempre una profonda stima per Pauli, nonostante le successive divergenze filosofiche, tanto che in occasione della consegna del premio Nobel a Wolfgang Pauli nel 1945, l'anziano Einstein lo definì suo figlio spirituale.

Insieme a Bohr, Heisenberg e Dirac, Pauli fu uno delle principali menti della meccanica quantistica e divenne rapidamente noto per l'originalità dei suoi fondamentali contributi alla teoria quantistica dei campi, assumendo subito il ruolo di coscienza vivente della fisica teorica. Il suo noto *Principio di esclusione* è stato alla base delle teorie che portarono successivamente alla sperimentazione del fenomeno dell'*entanglement quantistico*.

Ma l'unilateralità razionale del giovane Pauli ricevette un duro colpo durante i suoi primi anni, una crisi che più tardi Pauli stesso avrebbe descritto come “una grande nevrosi”. Insieme ad alcuni drammatici colpi del destino (1927 - il suicidio della madre, 1930 - il divorzio dalla prima moglie) fu essenzialmente la sua



Wolfgang Pauli

modalità razionale a portarlo verso dei seri conflitti interiori, che la sua mente non riusciva a spiegare.

Seguendo i consigli del padre, si rivolse a Carl Gustav Jung per un aiuto. Lo psicanalista svizzero

riconobbe fin dalla prima intervista l'eccellente formazione scientifica e la capacità intellettuale di Pauli. Racconta Jung:

*Notai subito che era pieno di materiale arcaico, e dissi a me stesso: "Ora sto per effettuare un interessante esperimento per rendere quel materiale assolutamente puro, senza alcuna influenza da me stesso" . Così inviai Pauli alla dottoressa Erna Rosenbaum che aveva appena iniziato la sua carriera e quindi non aveva ancora conoscenza profonde al riguardo di materiale archetipico<sup>2</sup>.*

Durante un periodo di 3 anni, oltre 1500 sogni di Pauli furono registrati e catalogati, riflettendo una straordinaria serie di immagini, di cui almeno 400 furono da lui stesso impiegate per il suo materiale durante le letture di Eranos nel 1935<sup>3</sup>.

Pauli concluse la sua analisi nel 1934 e si sposò nuovamente nello stesso anno. Nonostante ciò, Jung trovò i suoi sogni così interessanti che chiese allo scienziato di continuare a registrare e analizzare il suo materiale onirico e di rimanere ancora in contatto con lui. Quando iniziò la seconda guerra mondiale, Pauli non era ancora cittadino svizzero tuttavia ottenne un permesso per accedere all'Istituto per gli Studi Avanzati di Princeton. Per cinque anni fu in contatto con Einstein, Kurt Godel e Bertrand Russel, e nel 1945 ottenne il Premio Nobel per la fisica, grazie all'elaborazione della teoria del principio di esclusione. L'anno successivo tornò a Zurigo, dove rimase fino alla morte, nel 1958.

## **Il materiale pubblicato**

Pauli pubblicò solo pochi articoli relativi a problemi di natura filosofica e questo stato delle cose generò una fuorviante impressione sugli estesi interessi filosofici, psicologici e storici dello scienziato. Egli era interessato a tutti i fenomeni che sfuggono alla ragione nonché all'esplorazione profonda del significato dell'impresa scientifica in generale. Pauli si avvicinò e condivise molto seriamente il pensiero di Jung. Superò immediatamente l'atteggiamento prevalente dell'epoca che portava brevemente a definire “*senza alcun senso*” quelle teorie ma cercò con decisione di comprenderle. Nonostante la sua posizione critica, Pauli non fu mai certamente una di quelle “*menti dal ragionamento meschino che non riescono a sopportare alcun paradosso*”<sup>4</sup>

Pauli fu uno scrittore compulsivo, apparentemente incapace di pensare senza una penna tra le mani. Non cercò mai di pubblicare le sue idee al più presto possibile, ma preferiva comunicare i suoi pensieri attraverso lunghe lettere agli amici e colleghi scienziati. Lo stile spesso colloquiale e speculativo delle sue lettere si pone in stridente contrasto con le sue caute e rifinite pubblicazioni. Una parte considerevole degli scritti inediti di Pauli è stata resa nota soltanto negli ultimi anni e consiste essenzialmente nella sua rigogliosa corrispondenza personale – diverse migliaia di lettere – e pochi manoscritti.

## **Aspetti generali del dialogo Jung-Pauli**

Gli studiosi di Jung hanno maggiore familiarità con l'inconscio di Wolfgang Pauli piuttosto che con la sua vita

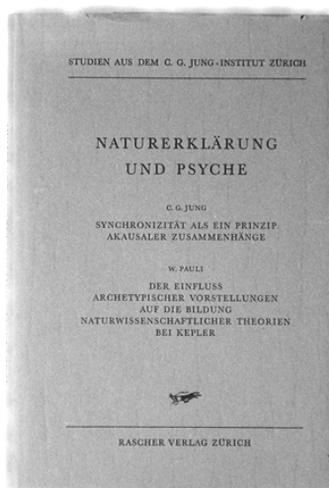
scientifico. Nella pubblicazione di Jung *“Psicologia e Alchimia”*, gli psicologi hanno potuto conoscere i sogni del premio Nobel, descritto dallo psicoanalista svizzero come *“una persona dotata di elevata intelligenza”*<sup>5</sup>. Nel contempo, gli scienziati che hanno proseguito la ricerca sulla natura e la composizione della materia universale avviata da Pauli, conoscono ben poco circa il lavoro di esplorazione del proprio inconscio condotto dal fisico quantistico, il suo fascino per l'interfaccia della materia con la psiche e la sua collaborazione con Jung nel sondare le connessioni che sembrano essere acausali.

La raccolta della corrispondenza epistolare tra Jung e Pauli offre dettagliate informazioni su un reciproco scambio di esperienze che è stato così prezioso sia per la psicologia analitica che per la fisica quantistica, due domini di indagine che in un primo momento possono sembrare non avere alcun punto di contatto. E quanto effettivo scambio tra le reciproche discipline dei due scienziati abbia veramente avuto luogo, si può evidenziare da due separate posizioni attribuite dalle pubblicazioni a Jung e Pauli:

*“Poiché il mondo fenomenico rappresenta un ammasso di processi di dimensione atomica, è di estrema importanza sapere - per esempio - se i fotoni ci consentono di raggiungere una conoscenza definita della realtà sottostante ai processi energetici meditativi... La luce e la materia si comportano da un lato come particelle e da un altro come onde. Questo ha reso necessario rinunciare a una descrizione causale della natura nel sistema spazio-temporale ordinario, sostituendola con invisibili campi di probabilità in spazi multidimensionali”*<sup>6</sup> - C.G.Jung

*“Divisione e riduzione della simmetria, questo è il nucleo della bestia! La divisione è un antico attributo del Diavolo...Se soltanto i due rivali divini – Cristo e il Diavolo – sapessero che sono diventati così simmetrici!”*<sup>7</sup> - W. Pauli, in una lettera scritta a Heinsenbergr.

La psicologia dell'inconscio e la moderna fisica quantistica hanno introdotto – indipendentemente l'una dall'altra - nuovi concetti con notevoli e particolarmente coincidenti modalità. Le relazioni corrispondenti tra le due discipline hanno formato il nucleo del dialogo Jung-Pauli. A differenza dei suoi colleghi scienziati, Pauli cercò di interpretare la rivoluzione scientifica – introdotta dalla teoria della relatività e dei quanti – non soltanto da una prospettiva filosofica, ma anche e soprattutto da una visione psicologica del fenomeno. Dall'altro lato – a differenza dei colleghi psicologi – Jung ha ricercato con determinazione una base oggettiva che la moderna fisica avrebbe potuto fornire al suo modello di psiche. Nel 1953, Pauli scrisse a Jung: *“Così come la fisica si impegna per essere completa, la vostra psicologia analitica brama per una casa!”*<sup>8</sup>.



Da un punto di vista generale, l'argomento chiave del dialogo Pauli-Jung è stato il problema delle relazioni tra fisica e psicologia. Dalla prospettiva delle moderne scienze

naturali, si potrebbe essere portati a parlare di relazioni tra psiche e materia, nettamente separati dalla posizione Cartesiana, tuttavia – nonostante questo comune denominatore – gli approcci di Pauli e Jung sono stati diversi sia in motivazioni che in metodo. Gli articoli che hanno pubblicato insieme nel volume “*L'interpretazione della Natura e della Psiche*” (*Naturerklärung und Psyche* – Jung e Pauli 1952) illustrano sia il loro accordo che le loro differenze, paradigmaticamente. Il contributo di Jung all'opera congiunta ha per titolo “*Sincronicità: un principio di corrispondenza acausale*”. Per anni Jung aveva esitato a pubblicare le sue idee sulla sincronicità e fu proprio Pauli a incoraggiarlo a scrivere questo trattato<sup>9</sup> e la versione finale fu il risultato di molte revisioni ispirate dai numerosi commenti del fisico austriaco.

L'interesse di Pauli nella sincronicità non fu puramente teorico: egli fu infatti letteralmente perseguitato da questo fenomeno per tutta la sua vita. Pauli visse infatti in uno stato di permanente tensione nei confronti del mondo tecnico e aveva un rapporto piuttosto goffo e imbarazzante con la strumentazione di laboratorio<sup>10</sup>. Si narra che la sua sola presenza nei pressi di un laboratorio fosse sufficiente a provocare la rottura degli equipaggiamenti di sperimentazione con le più misteriose e inesplicabili modalità. Il senso dell'umorismo di cui era dotato lo scienziato lo portò a definire queste situazioni come una conseguenza del cosiddetto *effetto-Pauli* e l'autenticità di questi fenomeni è descritta in numerosi articoli pubblicati in tempi diversi dai suoi colleghi scienziati. Uno di loro, Otto Stern, vietò formalmente a Pauli di entrare nel suo laboratorio durante l'effettuazione di prove sperimentali. Pauli non considerò con leggerezza il fenomeno descritto e lo catalogò come una possibile manifestazione di sincronicità di un profondo conflitto tra le sue parti

razionale e irrazionale.

Il contributo di Pauli al volume pubblicato insieme a Jung è rappresentato dallo studio *“L'influenza degli archetipi sulle teorie scientifiche di Keplero”*. Lo scopo di questo trattato fu di esplorare il ruolo dell'inconscio nello sviluppo della scienza, dimostrando come le immagini interiori iniziano e guidano il processo di formazione di una teoria scientifica. Pauli determinò che l'immagine archetipale più rilevante che accompagnò Keplero durante tutta la sua ricerca fu il simbolo religioso della Trinità, che operò come una motivazione centrale e talvolta anche come una spiegazione a un certo numero di idee. Ad esempio, Pauli ascrisse la visione eliocentrica del sistema planetario e la tridimensionalità dello spazio determinate dall'astronomo tedesco a una visione trinitaria del mondo.

### **Cenni sulla sincronicità**

La definizione di sincronicità, così come elaborata da Jung in accordo con i commenti e le posizioni di Pauli, è la seguente:

*“Due o più eventi apparentemente accidentali, tuttavia non necessariamente simultanei, sono detti sincronici se sono soddisfatte le seguenti condizioni:*

- 1. qualunque presunzione di un nesso causale tra gli eventi è assurda o inconcepibile;*
- 2. gli eventi sono in corrispondenza tra di loro attraverso un significato comune, spesso espresso simbolicamente;*
- 3. ogni coppia di eventi sincronici contiene una*

*componente prodotta internamente e percepita esternamente.”*

In particolare, proprio l'ultimo di questi criteri mette in luce il fatto che il fenomeno di sincronicità è un fenomeno psico-fisico e che pertanto non è trattabile da nessuna scienza

che si occupi di sola psiche o di sola materia. Il primo criterio indica un principio centrale della scienza tradizionale che deve essere rivalutato se intendiamo studiare il fenomeno sincronico: il principio di causalità nel senso stretto di una relazione causa-effetto. Il secondo criterio suggerisce il concetto di significato come un punto di vista costruttivo in questa direzione. Dato che i fenomeni sincronici non sono necessariamente “sincronizzati” nel senso di simultaneità, il termine sincronicità potrebbe essere talvolta fuorviante. Per questa ragione Pauli preferì parlare di “*corrispondenze significative*” (*Sinnkorrespondenzen*) sotto l'influenza di un archetipico ordine acausale.

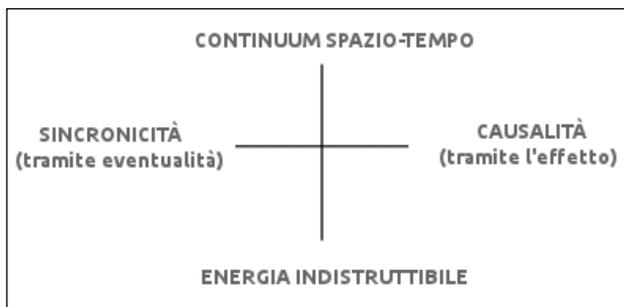
Ecco cosa scriveva Pauli a Jung nel 1949:

*"La parola synchron mi sembrava ... illogica in un certo senso, a meno che non vogliate vedere un rapporto col termine chronos che sia sostanzialmente diverso dal concetto di tempo ordinario... Non è evidente, a priori, capire come mai avvenimenti che 'esprimono la presenza di una stessa immagine e/o uno stesso significato' dovrebbero essere simultanei: il concetto di tempo mi è più difficoltoso che il concetto di senso."*

Pauli considerò la sincronicità junghiana e l'antica

idea di finalismo teleologico (nel senso generale di un processo naturale orientato verso un fine superiore) come particolari istanze di tale ordine acausale che non può essere configurato intenzionalmente. In accordo a ciò, il concetto di caso (riferito a eventi apparentemente casuali) potrebbe anche essere interpretato in termini di corrispondenze significative.

Il principio di sincronicità presume che l'energia indistruttibile abbia una relazione duale con il continuum spazio-tempo: da un lato, vi è la connessione costante attraverso l'effetto (causalità) e dall'altro vi è una connessione incostante attraverso la contingenza, l'equivalenza o il senso, la sincronicità. Eventi sincronici sono incostanti, sporadici e arbitrari perché sono dipendenti da una situazione archetipica attivata nell'osservatore.



*Diagramma ermeneutico di Jung-Pauli*

È evidente che la sincronicità, così come intesa da Jung, non poteva definirsi scientifica nel senso comune dei fisici del tempo in quanto essa ha senso solo nell'istante in cui un individuo ne vive l'esperienza e quindi non è riproducibile come tale, è uno di quei fenomeni che aleggiano oltre i limiti imposti dalla scienza. Nel volume pubblicato insieme a Pauli, Jung presenta un'analogia di sincronicità attraverso l'antica esperienza dell'I-Ching

cinese. Ebbene, come ha potuto un fenomeno così poco scientifico interessare e stimolare la mente di uno scienziato come Pauli? Questa è la sincronicità: quando è presente, è presente, si può discuterne a lungo e speculare sulla sua struttura, tuttavia le modalità di approccio e di studio sono esattamente le stesse della moderna fisica quantistica. E questo Pauli lo aveva intuito fin da subito: un ponte tra la materia e la psiche.

Il fenomeno della sincronicità abbatteva un principio fisico fondamentale fino a quel momento: *il principio della località*. Tale principio afferma che i processi fisici non possono avere effetto immediato su elementi fisici di realtà in un altro luogo separato da quello in cui avvengono. In pratica, non possono avvenire “istantaneamente” in luoghi remotamente separati. E la sincronicità rappresenta invece un fenomeno reale, non-locale. Secondo Jung e Pauli, il fenomeno della sincronicità riavvicinava fisica e psicologia evidenziando una connessione profonda fra i vari eventi del mondo, non legata a un'azione diretta causale-meccanica.

### **Materia e psiche: due aspetti di una stessa realtà**

Pauli e Jung furono d'accordo sul fatto che materia e psiche dovessero essere intese come aspetti complementari della stessa realtà, governata da comuni principi di ordinamento: gli archetipi<sup>11</sup>. Ciò implica che gli archetipi siano elementi di un dominio al di là della materia e della psiche: la loro influenza giunge contemporaneamente in entrambi i domini.

Nel 1948 Pauli distribuì privatamente ai suoi amici e colleghi un singolare trattato dal titolo: “*Moderni esempi di fisica di base*”, nel quale criticava il fatto che la fisica, per definizione, escludesse ogni cosa avesse a che fare con

giudizi, sentimenti ed emozioni. Alludendo all'affermazione di Einstein circa una presunta incompletezza della meccanica quantistica, Pauli concludeva: *“Tuttavia, ciò non indica l'incompletezza della teoria quantistica in fisica, quanto piuttosto l'incompletezza della fisica nella totalità della vita”<sup>12</sup>*.

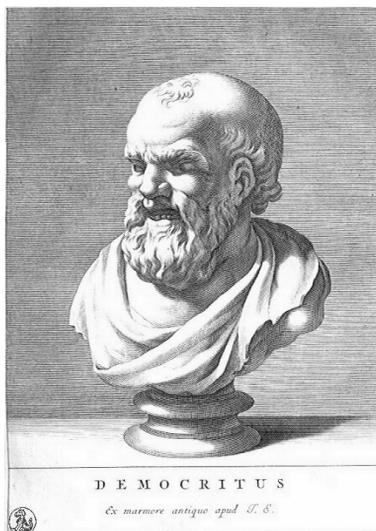
Pauli insistette a lungo sul fatto che in futuro gli scienziati non avrebbero più potuto ignorare la relazione tra la conoscenza del mondo materiale esteriore e il mondo interiore della psiche. Occorreva riconoscere che l'approccio scientifico razionale rappresentava solo una via per vedere e interpretare il mondo; un altro approccio – complementare al precedente – implicava che le successive ricerche sulla realtà non potessero più essere condotte separando materia e psiche, ma che entrambe le parti dovessero entrare in un percorso di ricerca comune. In una prospettiva che include la dignità dell'essere umano e il rispetto per la natura, gli aspetti etici e religiosi non potevano più essere lasciati da parte come dettagli di secondo piano.

Nel 1958 Werner Heisenberg, dopo lunghi anni di studio verso una teoria che unificasse le ricerche nel campo della meccanica quantistica con quelle della relatività di Einstein – una conclusione alla quale non era possibile giungere con le conoscenze del tempo – annunciò alla radio e alla stampa che lui e Pauli avevano finalmente trovato la *teoria dei campi unificati*, e che mancavano solo i dettagli tecnici. Questa dichiarazione pubblica fece infuriare Pauli, che rispose alla comunità scientifica attraverso una lettera che smentiva la notizia e che concludeva con un disegno ironico: sopra a un semplice quadrato tracciato con una matita nera, Pauli scrisse: *“Questo è per mostrare al mondo che posso dipingere come Tiziano: mancano solo i dettagli tecnici”*.

## 2 – ATOMI E CONOSCENZA

### Introduzione

Il vocabolo *atomo* fu usato da Democrito circa 2500 anni fa per indicare le particelle elementari di cui egli concepiva costituito l'universo. Oggi chiamare atomo il costituente primo della materia sembra quasi un controsenso; l'atomo moderno infatti è ben diverso dall'indivisibile atomo greco e le reazioni nucleari costituiscono l'aspetto più noto della divisione del suo nucleo. Il numero di particelle elementari fino ad ora scoperte (protoni, elettroni, neutroni, positroni, neutrini, ecc.) è così numeroso da eguagliare quasi il numero degli elementi chimici fondamentali.



Non fu però solo pura coincidenza se gli antichi Greci con la speculazione raggiunsero una concezione della materia che tanti secoli dopo doveva dimostrarsi fondamentalmente esatta. Ciononostante fino alla fine del

diciannovesimo secolo l'ipotesi atomica era ancora ritenuta, da diversi scienziati, una teoria non provata dall'esperienza.

L'alto grado di perfezione raggiunto nelle teorie classiche della fisica, però, condusse alla determinazione che esse non fossero da sole sufficienti a causa delle contraddizioni che sorgevano nelle interpretazioni di alcuni dati sperimentali. Si rese, così, presto evidente la necessità di introduzione di nuove leggi che potessero spiegare dati sperimentali non altrimenti giustificabili con la fisica classica<sup>13</sup>.

### **Cenni storici - L'alba di un mondo nuovo**

#### *Max Planck*

Se si vuole assegnare una data d'inizio allo sviluppo della fisica moderna, non è certo possibile sceglierne una diversa dal 1900, anno in cui Max Planck formulò per la prima volta il concetto del quanto elementare d'azione. La costante di Planck insieme alla carica dell'elettrone e alla velocità della luce è una delle costanti fondamentali con le quali si definisce la struttura di una particella.

$$h = 6.62606896(33) \times 10^{-34} \text{ J/s}$$

La costante di Planck è responsabile della quantizzazione delle grandezze dinamiche che caratterizzano a livello microscopico, le particelle elementari che compongono materia e luce: elettroni, protoni, neutroni e fotoni. La quantizzazione consiste nel fatto che, a livello microscopico, energia, impulso e momento angolare, invece di assumere una serie continua di valori, si manifestano in quantità multiple di quantità fisse. È la quantità minima di una grandezza fisica che può esistere in modo indipendente,

in particolare una quantità discreta di radiazione elettromagnetica. La teoria di Planck, successivamente rielaborata da Einstein nel 1905 e più tardi da Niels Bohr, ebbe l'effetto dell'innescare di una reazione di grande fermento scientifico in tutto il mondo della fisica.

### *Niels Bohr*

Nel 1913 il fisico danese Niels Bohr propone il primo modello quantistico per l'atomo di idrogeno. Gli elettroni orbitano attorno al nucleo, ma tra tutte le orbite possibili si ritengono permesse solo quelle corrispondenti a certi valori di energia, proporzionali al numero quantico, che dipende dalla distanza dell'elettrone dal nucleo. Inoltre, Bohr scoprì che l'atomo irraggia energia solamente quando, per un qualche motivo, un elettrone effettua una transizione da uno stato stazionario a un altro. La frequenza della radiazione è legata all'energia del livello di partenza e di quello di arrivo ed è proporzionale alla costante di Planck. Solo più tardi si scoprì che non è esatto ridurre il modello atomico a un microscopico sistema solare: gli elettroni in effetti disegnano, attorno al nucleo, una “*nuvola di probabilità*”. Fu di Bohr l'enunciazione del fondamentale principio di corrispondenza, secondo cui i risultati della meccanica quantistica coincidono con quelli della meccanica classica per i sistemi macroscopici (vedi commenti di Pauli, più avanti). L'ambiguità tra la fisica classica e la fisica quantistica si risolve pertanto con questo principio. Altro principio fondamentale enunciato da Bohr fu quello della complementarità, che descrive quella particolare caratteristica per cui il duplice aspetto, corpuscolare e ondulatorio, dei fenomeni che avvengono a livello atomico e subatomico non può mai essere osservato contemporaneamente durante lo stesso esperimento.

*Louis De Broglie – Albert Einstein*

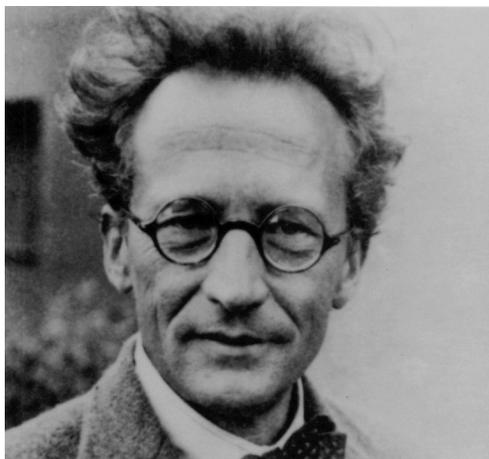
Nonostante tutti i suoi indubbi successi, il modello atomico di Bohr cominciò tuttavia a mostrare i suoi limiti a partire, all'incirca, dal 1923: da quell'anno molti laboratori iniziarono a pubblicare evidenze sperimentali, relative all'interazione luce-materia, che mostravano come il modello di un sistema solare in miniatura fosse, per la gran parte degli atomi, improprio e inadeguato. In definitiva, a parte il più semplice sistema atomico, quello cioè dell'idrogeno, divenne sempre più manifesta l'incapacità del modello di Bohr di descrivere accuratamente l'universo microscopico. Si iniziarono a intravedere i limiti, in particolare, del suo tentativo di visualizzazione intuitiva della struttura atomica.

Nel 1925 un fatto nuovo interviene a modificare ancor più profondamente la frenetica scena della meccanica quantistica. Il fisico francese Louis De Broglie, di origine piemontese, mostra che il movimento di una particella materiale libera può venire opportunamente simulato mediante quello di un'onda o un gruppo di onde e che il legame tra le variabili d'onda e quelle di particella dipende dalla costante di Planck. Albert Einstein, studiando il comportamento statistico di un gas di atomi, trova che questo si discosta da quello classico e segue una legge che è quella a cui obbedisce la radiazione elettromagnetica. Vengono cioè a delinearsi quegli aspetti ondulatori della materia la cui conferma sperimentale arriverà nel 1927.

*Erwin Schrödinger*

Ma ancora prima di questa conferma, Erwin Schrödinger mise ordine alla teoria e ne tracciò definitivamente i contorni con la sua equazione, effettuando nel mondo

atomico e subatomico un'operazione del tutto analoga a quella svolta, nel mondo macroscopico, dalle equazioni di Newton. L'equazione di Schrödinger regola, in modo deterministico, l'evoluzione temporale di una grandezza, la funzione d'onda, la cui interpretazione è tutt'oggi argomento di animate discussioni nell'ambito della comunità dei fisici. A parere di Schrödinger tale funzione avrebbe rappresentato una sorta di diffusione dell'elettrone attorno al nucleo atomico. Non si tratta di un'onda che si propaga nello spazio a 3 dimensioni delle osservazioni fisiche, ma in uno spazio che si chiama delle configurazioni e di cui possiamo dare solo una rappresentazione matematica.



*Erwin Schrödinger*

L'interpretazione più corretta del nuovo formalismo risultò essere quella secondo cui il valore che la funzione assume in un punto, è legato alla probabilità di trovare in quel punto la particella rappresentata dalla funzione d'onda. Il determinismo classico, quindi, che consentiva di descrivere il comportamento di ogni sistema individuale, si riduceva al determinismo dell'evoluzione di una probabilità.

### *Werner Heisenberg*

Contemporaneamente ai lavori di Schrödinger, il fisico tedesco Werner Heisenberg pubblicò un lavoro di difficilissima comprensione per l'epoca, che giungeva alle stesse conclusioni di Shroedinger passando però attraverso

un complesso sistema di oggetti matematici noti come matrici. La teoria di Heisenberg, a differenza di quella di Schrödinger, non offriva però alcun appiglio alla visualizzazione dei fenomeni atomici. Essa costituiva, piuttosto, una descrizione formale dei fatti quantistici basata su una struttura matematica assai astratta e priva di qualunque riferimento all'intuizione fisica. La sua teoria delle matrici però, per quanto difficile dal punto di vista tecnico e assai poco intuitiva, permise di venire a capo di molti problemi che la teoria ibrida di Bohr aveva lasciato irrisolti.



*Werner Heisenberg*

Heisenberg non poteva tollerare la teoria di Schrödinger proprio in ragione del ricorso fatto da quest'ultimo alla visualizzazione e all'intuizione. Schrödinger, d'altra parte, riteneva che la teoria di Heisenberg fosse letteralmente brutta: l'algebra trascendentale (o delle matrici) turbava il suo innato senso estetico. Heisenberg, per parte sua, scrisse a Wolfgang Pauli, nel giugno del 1926, che considerava vere e proprie «cretinate» le idee di Schrödinger in merito alla visualizzazione. Nella stessa lettera egli non nascose la sua irritazione nei confronti del collega allorché osservò: «*Quanto più penso agli aspetti fisici della teoria di Schrödinger, tanto più repellenti li trovo*». Erano in perenne dissenso, pur essendo entrambi inconsapevolmente autori dello stesso capitolo fondamentale della storia della fisica.

Heisenberg, sempre più irritato dal successo dell'equazione di Schrödinger, pubblicò nel 1927 un articolo che aveva lo scopo di esplorare i concetti di posizione, velocità, energia.

La sua nuova interpretazione intuitiva era basata

sull'idea che in fisica atomica le incertezze nelle misure di posizione e quantità di moto non potessero essere ridotte contemporaneamente a zero a causa dell'inevitabile interazione tra l'oggetto da misurare e gli strumenti necessari a osservarlo. Quanto più è nota la posizione di una particella, tanto meno sarà nota la sua quantità di moto. Quanto più esattamente si misura la quantità di moto, d'altra parte, tanto più incerta è la conoscenza della posizione della particella in esame. Si tratta del celeberrimo *principio di indeterminazione*, che ha svolto una funzione importantissima nell'interpretazione della realtà microscopica.

### *Wolfgang Pauli*

Nel 1945 Wolfgang Pauli si aggiudicò il Premio Nobel per l'elaborazione del *principio di esclusione*: fermioni (elettroni, protoni o neutroni) identici non possono occupare simultaneamente lo stesso stato quantico. Il principio di esclusione di Pauli gioca un ruolo essenziale in un grande numero di fenomeni fisici. Uno dei più importanti, e quello per cui venne originariamente formulato, riguarda la struttura della nube elettronica degli atomi. Un atomo elettricamente neutro contiene un numero di elettroni pari a quello dei protoni del nucleo. Siccome gli elettroni sono fermioni, il principio di esclusione proibisce loro di occupare lo stesso stato quantico<sup>14</sup>. Ciò introduce il concetto dello *spin*, inteso come unico elemento di differenziazione di due elettroni sullo stesso orbitale energetico. Lo stesso principio, inoltre, prevede un legame molto stretto tra due elettroni di uno stesso orbitale atomico con spin opposti; separandoli infatti l'uno dall'altro, si scoprirà che invertendo lo spin di uno degli elettroni, l'altra particella reagirà istantaneamente invertendo anche il proprio spin, qualunque sia la distanza di separazione. Le

due particelle sono in relazione tra loro attraverso un antico legame e la separazione spaziale introdotta, in effetti non esiste e scompare letteralmente. Il concetto stesso di distanza diviene illusorio. Ma Pauli introdusse anche ulteriori innovazioni nell'ambito del pensiero scientifico della prima metà del novecento. In particolare, riferendosi al principio di corrispondenza enunciato da Bohr, Pauli evidenziò la relazione simbolica tra microcosmo e macrocosmo sostenendo che le radici storiche del principio enunciato da Bohr dovessero essere ricercate nella teoria antica della *correspondentia*, cioè di un'armonia del mondo in cui tutte le parti risuonano per partecipare all'immagine cosmica. Con riferimento invece al principio di complementarità (vedi Bohr), Pauli aveva evidenziato come ora l'osservazione avesse assunto un carattere di *un atto unico e irrazionale, con risultato imprevedibile*<sup>15</sup>. L'elemento di corrispondenza fra lo stato energetico (onda) e quello materiale (particella) è completamente descritto dalla funzione d'onda di Schroedinger. Per Pauli, la funzione d'onda rappresenta un simbolo: un simbolo di corrispondenza reale fra il microcosmo e il macrocosmo a cui noi apparteniamo<sup>16</sup>.

Questo seppur veloce e sintetico *excursus* storico sulla nascita della fisica quantistica, mette in evidenza come la prima metà del '900 abbia rappresentato per la comunità scientifica un'alba verso un mondo nuovo della fisica: un mondo in cui i concetti principali del determinismo newtoniano avevano lasciato il posto a idee e terminologie del tutto inaspettate fino a soli pochi decenni prima. Ora la fisica parlava di: probabilità, indeterminazione, esclusione, indecisione. In particolare, il principio di indeterminazione

di Heisenberg proiettava all'interno della stessa fisica il concetto di *inconoscibile*, terminologia ben diversa da quella di sconosciuto (che è sempre presente nella scienza). Tutta la storia della scienza narra di un passaggio dallo sconosciuto al conosciuto, dall'ignoranza alla conoscenza. Tuttavia esiste una differenza fondamentale tra le espressioni “non conosciamo” e “non possiamo sapere”. La teoria di Heisenberg ci pone di fronte a un universo inconoscibile con precisione.

I fenomeni microfisici non sono più descrivibili con una connessione causale meccanica, ma soltanto probabilisticamente: non vi è più certezza né predicibilità assoluta dei fenomeni stessi. Per ogni evento si può determinare solo una probabilità che una misura ci potrà dare un certo risultato.

### **Esperimento delle due fenditure e introduzione all'entanglement**

Nel 1800 con un famoso esperimento, il fisico britannico Thomas Young aveva dimostrato che la luce era composta di onde per via delle interferenze che un fascio di luce produce quando passa attraverso una parete con due fenditure. Successivamente, nel 1905, Albert Einstein dimostrò altrettanto bene la natura particellare della luce, concludendo che la luce possedeva in effetti entrambe le qualità: quella di onda e quella di particella. È dotata quindi di doppia vita, quella energetica (rappresentazione ondulatoria) e quella materiale (rappresentazione particellare), che però non possono essere mai rivelate simultaneamente. Il principio di indeterminazione infatti postula l'impossibilità di determinare allo stesso tempo la componente energetica e la componente materiale di un

dato evento quantistico.

Con l'inizio dell'era della fisica dei quanti, l'esperimento di Young fu ripreso in esame, portando a conclusioni ancora più sorprendenti.

Si scoprirà perciò che il comportamento del fotone è sconcertante: esso passa attraverso entrambe le fenditure simultaneamente, e poi crea le frange di interferenza interferendo con se stesso. In sostanza, i fisici devono necessariamente riconoscere che è come se il fotone “sapesse” i punti e i tempi esatti in cui esso si deve sdoppiare per poter dar luogo alle frange di interferenza. Il fatto che una stessa particella possa trovarsi simultaneamente in due luoghi diversi, frantuma il principio di causalità, per sostituirlo con uno di sincronicità.

Nel mondo quantistico, questo fenomeno prende il nome di *entanglement* (intreccio). Nel caso specifico dell'esperimento, sono gli sdoppiamenti di un singolo fotone a essere intrecciati sia nello spazio che nel tempo e il fotone raggiunge posizioni ben precise dietro le fenditure in quanto viene informato in maniera “non-locale” (cioè indipendente dallo spazio e dal tempo) da un potenziale quantico che lo guida.

Mettendo una lastra fotografica dietro alla due fessure, l'esperimento ci mostra che il fotone agisce come un'onda quando lanciato verso le fenditure, interferendo con se stesso, e impressionando la lastra con frange di interferenza. Sostituendo le due fenditure con una sola, oppure mettendo un rivelatore dietro una delle fessure per cercare di capire attraverso quale fenditura passa, il fotone si comporta invece da particella materiale. In altre parole: la figura di interferenza appare solo quando il cammino della particella è sconosciuto. In entrambi i casi abbiamo fatto collassare la funzione d'onda di un determinato stato quantistico, e cioè a seconda del tipo di esperimento usato

abbiamo concretizzato la natura di onda o di particella. Ma se non effettuiamo misure di alcun genere, il fotone esiste come sovrapposizione di onda e di particella: è entrambe le cose simultaneamente.

Negli anni '70 e '80 si è dimostrato che l'esperimento può applicarsi anche a elettroni o neutroni. Le particelle di materia possono cioè in alcuni casi comportarsi come onde, così come le particelle di energia possono comportarsi come materia.

### **Definizione di entanglement nella meccanica quantistica**

Due particelle si dicono in uno stato di entanglement quando le proprietà di una di esse sono completamente correlate con le proprietà dell'altra. (es: due elettroni sullo stesso orbitale sono descritti da un'unica funzione d'onda. Hanno ciascuno spin opposto, secondo il principio di esclusione). Due particelle *entangled* non rappresentano più due enti separati, ma un'unica manifestazione di una sola entità.

La fisica dei quanti ci spiega che l'entanglement si verifica realmente in natura e si conosce come questo avviene, ma non ne conosciamo il perché.

### **Il paradosso Einstein-Podolsky-Rosen Gedankenexperiment**

Sebbene possa apparire che tutti gli scienziati appena citati fossero impegnati all'unisono verso l'obiettivo di chiarire i concetti descrittivi della realtà particellare, esistevano invece grandi dissensi tra di loro. Abbiamo già

visto come Heisenberg fosse in deciso contrasto con l'approccio descrittivo di Schroedinger.

Le nozioni di realtà che si erano costruite in qualche secolo di scienza galileiana si erano talmente consolidate a livello della psiche e a livello di un comune consenso collettivo, che era difficile non lasciarsi condizionare dal senso comune. E sicuramente il meccanismo dell'entanglement rappresentava la massima sfida al senso comune<sup>17</sup>. La formulazione delle leggi della meccanica quantistica era così strana (*weird* come le chiamavano gli anglosassoni) da sembrare addirittura anti-intuitiva.

In particolare, lo stesso Einstein cominciò a dubitare che la meccanica quantistica (alla cui scoperta e studio aveva contribuito lui stesso) non fosse una teoria completa, dovevano per forza esistere delle variabili nascoste con cui si potesse descrivere la realtà in maniera causale e non sincronica (non-locale). Fu proprio su questo punto che Einstein lanciò una vera e propria sfida a Niels Bohr (il principale propugnatore della meccanica quantistica) secondo un metodo definito “esperimento mentale” (*Gedankenexperiment*).

Insieme ai suoi collaboratori Podolsky e Rosen, Einstein espose il problema nel seguente modo (successivamente denominato Paradosso EPR):

Se davvero in fisica quantistica hanno luogo eventi sincronici (cioè non-locali) allora le soluzioni possono essere solo due:

- a. *qualcosa non funziona nella meccanica quantistica e occorre trovare delle variabili nascoste che impediscono di trattare il problema con modalità deterministiche;*
- b. *la teoria della relatività con il suo limite costituito dal valore finito della velocità della*

*luce viene fortemente messa in dubbio.*

Con una formulazione più semplice e diretta, possiamo dire che se noi prendiamo due particelle che abbiano interagito tra di loro almeno una volta e poi le separiamo anche a grandissime distanze, nel momento in cui effettuiamo una misura su una di esse, noi determiniamo il collasso della funzione d'onda che ne descrive lo stato quantistico rendendo manifesta una delle sue proprietà (es: lo spin). Ma allo stesso momento l'operazione della misura sulla prima particella influenzerà istantaneamente l'altra particella, a qualunque distanza essa si trovi dalla prima.

Ciò significa che se le due particelle sono entangled, non abbiamo più due funzioni d'onda che ne descrivono i rispettivi stati, ma una sola funzione d'onda che collassa in simultanea per entrambe le particelle nel momento in cui ne misuriamo una (Tav. I).

L'entanglement quantistico costituisce una difficoltà per la teoria quantistica dal punto di vista epistemologico, in quanto è incompatibile con il principio apparentemente ovvio e realistico della località, per la quale il passaggio di informazione tra diversi elementi di un sistema può avvenire soltanto tramite interazioni causali successive, che agiscano spazialmente dall'inizio alla fine.

Questo ingenera un meccanismo di apparente propagazione istantanea dei segnali, oltre la velocità della luce, ma questa conclusione è errata: infatti non esiste alcuna “propagazione” in quanto non esiste un meccanismo di causa-effetto, non c'è nulla che fisicamente “viaggia” da una particella all'altra. Non si tratta di segnali, ma della struttura più intima dell'Universo, dove tutto esiste intimamente legato, aldilà dello spazio e del tempo.

Solo nel 1982 il fisico francese Alain Aspect e il suo staff dimostrarono che l'uso del “senso comune” portava a

un errore nella descrizione e che la non-località è una regola fondamentale nel mondo della meccanica quantistica, dimostrando sperimentalmente l'effetto entanglement attraverso la polarizzazione di un fotone su una coppia entangled.

### **Il fantasma di un antico legame**

Molti moderni scienziati, tra i quali il fisico teorico Brian Greene della Columbia University ritengono che l'universo sia un tutto intrinsecamente entangled e coerente con se stesso. Se l'universo era – circa 15 miliardi di anni fa – concentrato in un punto di densità asintoticamente infinita, ci sono valide ragioni per ritenere che in quel periodo tutte le particelle componenti l'universo fossero tra loro entangled, vista la notevole e strettissima interazione cui erano sottoposte. Se è così, un fantasma di questo antico legame è stato mantenuto anche ai giorni nostri, a livelli che ancora non conosciamo: una sorta di entanglement universale al livello più fondamentale delle particelle.

Ci sarebbe allora da ritenere che in qualche modo tutte le particelle dell'universo mantengano una specie di memoria di ogni altra particella in esso contenuta e che la separazione che divide le cose nel nostro universo quotidiano – seppur reale da un punto di vista newtoniano e relativistico - sia solo un'illusione se vista da punti di vista di altre realtà<sup>18</sup>.

Da un'intervista a Brian Greene:

“...un grande interrogativo è rappresentato da: come è iniziato l'universo? E noi non possiamo rispondere a questa domanda. Alcune persone pensano che il Big Bang sia una

risposta, ma non è così. Il Big Bang è una teoria di come l'universo si è evoluto da una frazione di secondo dopo qualunque cosa l'abbia creato”.

Che dire dello stato della materia al momento del Big Bang, quando tutte le galassie erano impacchettate in un oggetto infinitamente più piccolo di un atomo? Fino a un istante prima, l'universo era addirittura un insieme di stati possibili, un multiverso in sovrapposizione quantistica di universi multipli, fino a che qualcosa – un misterioso osservatore esterno – avrebbe determinato il collasso della funzione d'onda inducendo – tramite un processo simile a una sofisticata misura – una scelta conscia tra le infinite possibilità: l'universo in cui tuttora ci troviamo a vivere<sup>19</sup>.

È rimasto qualcosa dell'entanglement iniziale? Per il momento, anche ammesso che l'universo possieda a qualche livello uno stato di entanglement permanente, possiamo solo limitarci alle particelle elementari.

## CONCLUSIONE

Per evidenti esigenze di sintesi sono stati soltanto appena citati gli elementi fondamentali della rivoluzione della fisica avvenuta negli ultimi 100 anni eppure ciò è stato probabilmente sufficiente per cogliere il profondo significato della trasformazione dei processi di ricerca cui sono stati sottoposti i maggiori scienziati del periodo.

In ogni caso, da questa rivoluzione si è reso evidente come l'universo sia strutturato da due componenti fondamentali: una di causa-effetto e una di sincronicità, strettamente interfacciate l'una con l'altra che governano

tutta la realtà. Fino a ieri (fine 1800) abbiamo considerato valida solo la causalità che rimane un elemento essenziale per la descrizione della realtà, ma incompleto e limitativo. L'uomo non è solo composto di materia visibile e macroscopica, e le leggi fisiche di sincronicità stanno emergendo con grande intensità all'interno di tutte le più moderne ricerche scientifiche.

È significativo concludere con un passo tratto da *Psiche e Natura* di W. Pauli (Adelphi 2006):

*“Come ho già ricordato in altra sede, la complementarità in fisica presenta una profonda analogia con i concetti di «coscienza» e «inconscio» in psicologia, in quanto ogni «osservazione» di contenuti inconsci comporta una ripercussione essenzialmente indeterminabile della coscienza su questi stessi contenuti...*

*...Il punto di vista definitivo deve far intravedere, tramite l'inconscio dell'uomo moderno, una linea di sviluppo verso una futura descrizione della natura che comprenda unitariamente physis e psiche. Per raggiungere una tale descrizione unitaria della natura, sembra necessario in primo luogo risalire al retroterra archetipico dei concetti scientifici”.*

## NOTE

- 
- <sup>1</sup> Harald Atmanspacher e Hans Primas – *Journal of Consciousness Studies* – n.2 – 1996
- <sup>2</sup> C.G. Jung – *The Tavistock Lectures*
- <sup>3</sup> C.G. Jung – *Psicologia e Alchimia* – Bollati Boringhieri
- <sup>4</sup> C.G. Jung – *Collected Works 12* – Princeton University Press
- <sup>5</sup> v. nota 3
- <sup>6</sup> C.G. Jung – *Riflessioni teoriche sull'essenza della psiche* – *Opere Vol. VIII* – Bollati Boringhieri
- <sup>7</sup> W. Heisenberg – *Fisica e Oltre* - Boringhieri
- <sup>8</sup> W. Pauli – *Lettera a Jung del 27 maggio 1953* – in: Meier 1992
- <sup>9</sup> C.G. Jung – *Lettera a Pauli del 29 giugno 1949* – in: Meier 1992
- <sup>10</sup> Harald Atmanspacher – *The Hidden side of Wolfgang Pauli* – *Journal of Consciousness Studies* Vol.2 1996
- <sup>11</sup> C.G. Jung – *Lettera a Pauli del 4 maggio 1953* – in: Meier 1992
- <sup>12</sup> W. Pauli – *Psiche e Natura* – Adelphi 2006
- <sup>13</sup> F. Giannini, P. Maltese, C.M. Ottavi – *Appunti di Meccanica Quantistica* – Istituto di Elettronica dell'Università di Roma - 1978
- <sup>14</sup> Paolo Silvestroni, *Fondamenti di chimica*, 10a ed., CEA, 1996
- <sup>15</sup> W. Pauli – *Fisica e conoscenza* - Boringhieri 1964
- <sup>16</sup> Enrico Antonio Giannetto – *Pauli e Jung: l'emergere di una natura quantistica* -Atti del XX Congresso Nazionale di Storia della Fisica e dell'Astronomia, Napoli 2000
- <sup>17</sup> Massimo Teodorani – *Entanglement* -Macro Edizioni 2007
- <sup>18</sup> M. Teodorani – *op. cit.*
- <sup>19</sup> M. Teodorani – *op. cit.*