

# “BIOLOGIA E FISICA QUANTISTICA: UNA RIFLESSIONE PER INIZIARE A COMPRENDERE”

Incontro con il professor Elio Fabri con un gruppo di insegnanti, ex insegnanti, cultori desiderosi di provare a comprendere i nessi tra biologia e fisica dei quanti.

Jim Al-Khalili e Johnjoe McFadden  
**LA FISICA DELLA VITA**  
LA NUOVA SCIENZA DELLA BIOLOGIA QUANTISTICA

«Con grande accuratezza e chiarezza, scopriamo che il nostro mondo è governato, persino saturato, dalla stranezza dei quanti»  
Philip Pullman



Bullati Boringhieri

**Lunedì 18 aprile 2016**

**ore 15.15**

Museo di Storia Naturale  
via Roma 79, Calci (Pisa)

## INFORMAZIONI

MUSEO DI STORIA NATURALE  
TEL. 050 2212970 - 3496396739  
WWW.MSN.UNIPI.IT



## Programma

ore 15,15

Saluti del direttore del Museo  
Roberto Barbuti

ore 15,30

Intervento del professor Elio Fabri:  
"Che cos'è la biologia quantistica?"

ore 16,30

"Idee ingenuie sulla biologia quantistica  
di un biologo del secolo scorso",  
Fabio Fantini

ore 16,45

Pausa caffè

ore 17,00

Domande, osservazioni e possibili risposte



*“Per decenni la riflessione epistemologica sulla fisica quantistica è stata appannaggio di una cerchia molto ristretta di studiosi. Il lungo sonno dell’epistemologia quantistica mostra ora segni di risveglio grazie a una robusta, encomiabile ma non si sa quanto efficace ripresa di attività divulgativa.”*

NATURALMENTE *Scienza* ringrazia il Museo di Scienze Naturali di Pisa per l'ospitalità e il direttore Roberto Barbuti per il sostegno e l'incoraggiamento costante.

Un ringraziamento particolarmente affettuoso e riconoscente al prof. Elio Fabri senza il quale non ci sarebbe stata questa occasione di riflessione.

Lucia Torricelli ha collaborato fino alla fine all'organizzazione, ma le è stato possibile intervenire; in seguito ha inviato la seguente citazione.

*L'Universo e Einstein. Prefazione di Albert Einstein*, di Lincoln Barnett, prima edizione, luglio 2015

Dalla prefazione di Albert Einstein (Princeton, 10 settembre 1948):

*Chiunque abbia cercato di presentare un soggetto scientifico piuttosto astratto a scopo di divulgazione conosce le grandi difficoltà di un tale tentativo. I casi sono due: o si riesce ad essere comprensibili, nascondendo la parte essenziale del problema e offrendo al lettore solo aspetti superficiali o vaghe allusioni-cioè lo si inganna suscitando in lui l'illusione di aver capito-, oppure si presenta tecnicamente il problema, così che il lettore, sprovvisto di conoscenze adeguate, incapace di seguire l'esposizione, perde coraggio e rinuncia a proseguire.*

*Se dall'odierna letteratura popolare scientifica si escludono queste due categorie, rimane davvero ben poco. Ma questo poco trova un compenso nel suo eccezionale valore. E' estremamente importante che al pubblico sia offerta l'opportunità di conoscere, con consapevolezza e intelligenza, gli sforzi e i risultati della ricerca scientifica. Non è sufficiente che ogni risultato venga discusso, elaborato, applicato da pochi specialisti in un dato ambito. Limitare l'insieme delle conoscenze a un piccolo gruppo uccide lo spirito filosofico di un popolo e conduce alla povertà di spirito.*

Abbiamo inoltrato al prof. Fabri, ecco il suo pensiero in proposito.

“Quanto alla citazione di Einstein, nessuna obiezione (Einstein ci sta sempre bene :-). Però vorrei che fosse riportata la data in cui E. ha detto o scritto quella frase. Di sicuro più di 60 anni fa, visto che è morto nel 1955, ma probabilmente un po' prima. La cosa mi pare importante perché si può concordare più o meno a seconda del contesto.

La parte finale, detta oggi (da chiunque, Einstein o un altro) non la sottoscriverei. Nei 60 o 70 anni almeno che sono passati, la fisica (e la scienza in generale) sono cambiate assai profondamente, in un modo che E. non avrebbe neppure saputo immaginare. Quindi ciò che era vero e condivisibile allora non lo è per forza ai giorni nostri.

Quanto all'incontro sulla divulgazione, va benissimo.  
Il difficile sarà congegnarlo in modo da avere relatori e pubblico in misura adeguata...”

... ci contiamo professore, noi faremo del nostro meglio, a presto!

---

La locandina che appare in copertina è stata disegnata da Silvia Battaglini

Le foto scattate nell'occasione da Stefano Piazzini, si trovano all'indirizzo:  
<https://www.flickr.com/photos/naturalmentescienza/albums/72157673181705502>

# Biologia e meccanica quantistica: due universi si incontrano?

Calci 18 aprile 2016

**Vincenzo Terreni** redazione NATURALMENTE*Scienza*.it

Gli organizzatori desiderano dedicare questo incontro ad Enrico Pappalettere che ci ha lasciato lo scorso anno e che sarebbe stato certamente in prima fila per la progettazione e la realizzazione.

Quando nacque l'idea di proporre una giornata di riflessione per scoprire i possibili nessi tra Biologia e Meccanica quantistica, facemmo in fretta a preparare una bozza di programma, ma ci rendemmo conto che quella ipotesi di incontro non era praticabile. Alle immediate ed effimere manifestazioni di entusiasmo per l'iniziativa fece seguito un sistematico susseguirsi di cortesi rifiuti all'invito di intervenire con le proprie riflessioni e le proprie conoscenze. La strada che ci era sembrata percorribile, quella di raccogliere in un confronto la pluralità di conoscenze ed opinioni che contavamo di sollecitare, non conduceva ad alcuna mèta. Troppo pochi gli specialisti disposti a mettersi in gioco, sia pure in un contesto assai poco formale, tranne il prof. Elio Fabri, il più antico e autorevole amico di NATURALMENTE.

Ci rendemmo conto quindi della necessità di rivedere il progetto originale di un confronto a più voci, forse viziato da qualche sopravvalutazione del grado di penetrazione del dibattito sulla biologia quantistica nel contesto italiano, in favore di un approccio più utile e concreto: la lezione di un maestro che ci guidasse nella complessità di bizzarri aspetti della Fisica, argomenti da noi assai poco conosciuti.

Siamo costantemente circondati da un mare di tecnologia di cui conosciamo forse il modo di uso, ma riguardo alla quale siamo completamente digiuni dei principi scientifici che l'hanno resa possibile. Un esempio: ci sottoponiamo ad analisi cliniche complesse come la PET e il massimo di riflessione cui siamo disposti è l'acronimo: come dire che una fugace consultazione di Wikipedia è più che sufficiente per metterci la coscienza in pace. Ma difficilmente ci azzardiamo ad approfondire la biologia che sta dietro alle moderne tecniche di indagine, figuriamoci la fisica che le consente.

Il ristretto gruppo degli organizzatori si è messo alla ricerca un aiuto per tentare di comprendere meglio la possibile strada che sembra già battuta in altri Paesi, mentre nel nostro rimane confinata in ambienti ultraspecialistici. Non si tratta di sola curiosità di docenti in servizio e non è di cittadini che cercano di rimanere attenti ai cambiamenti della società e alle conquiste della Scienza. È vero che ci sono ancora ottime pubblicazioni, ma in questo caso ci sono oggettive difficoltà di comprensione che forse si possono riassumere con la constatazione che dopo tanto leggere e consultare si sono capite molte cose, ma nessuna che ci ha aiutato a comprendere l'essenza del problema: esiste una Biologia quantistica?

È chiaro che se rimane irrisolto questo non siamo in grado di comprendere neppure quali possano essere i possibili sviluppi che, da alcuni considerano praticamente illimitati. Non c'è niente di peggio per un docente attivo o meno di non riuscire a saper da dove cominciare per spiegare qualcosa agli studenti. Del resto non si può neppure fare affidamento sulla grande divulgazione non specialistica dei notiziari e, talora, neppure nelle trasmissioni un po' più mirate. Ancora la grande stampa affida ad interviste al telefono ad un esperto del settore la presentazione di una nuova scoperta senza che l'intervistatore si senta in dovere di nascondere di non posseder un minimo di conoscenza in materia: come è possibile che riesca a comprendere qualcosa chi ascolta?

Ecco perché ci siamo rivolti al prof. Fabri che per decenni non si è stancato di aiutarci a capire per permetterci di aiutare studenti e lettori di NATURALMENTE, a fare altrettanto.

Quello della comunicazione della Scienza è un aspetto essenziale per la completezza della formazione culturale dei cittadini tanto da spingerci al lavoro nella rivista NATURALMENTE prima e nel sito NATURALMENTE *Scienza* attualmente. Dispiace che in questa occasione non sia potuta essere presente Lucia Torricelli, da molti anni collaboratrice della rivista e del sito che si è impegnata per la diffusione di argomenti ardui con una metodologia originale in grado di coinvolgere gli studenti che vengono messi direttamente a contatto con scienziati per avere una visione completa di una scienza altrimenti avvicinata solo attraverso alcuni libri.

Un caldo ringraziamento al Museo e al Direttore Barbuti per l'accoglienza e al prof. Fabri già ordinario di Astronomia all'Università di Pisa, che ci parlerà di "Meccanica quantistica e Biologia: suggestione o una nuova Scienza?"

**Roberto Barbuti** direttore del Museo di Storia Naturale di Calci

Buongiorno a tutti e grazie per essere venuti.

Prenderò pochissimo tempo. Io sono professore universitario, prima ho fatto il ricercatore e sono sempre vissuto all'Università in cui i due compiti importanti erano la didattica e la ricerca. Poi da un po' di anni si è aggiunto un altro obiettivo che è quello che viene definito la terza missione: il trasferimento tecnologico e l'educazione scientifica. Fortunatamente, grazie a questo terzo obiettivo io sono arrivato al museo di Storia naturale ed quello che il Museo ha cominciato a fare: ormai siamo arrivati ad un ritmo di circa sei conferenze al mese il Museo quindi ha fatto proprio questo obiettivo dell'Università ed è il luogo dove si può fare educazione scientifica, che tra l'altro è uno dei compiti specifici oltre a fare ricerca naturalmente e aiutare a fare didattica, però è un luogo in cui questa attività si fa particolarmente bene perché c'è un consiglio composto da docenti universitari che provengono da tutti i dipartimenti e quindi il museo è il luogo in cui si può fare divulgazione, divulgazione interdisciplinare ed è effettivamente una aggregazione che si è adattata bene a questo nuovo compito della Università. Adesso ho visto che nei programmi dei candidati elettori (c'è il rinnovo a maggio) è presente questa idea di creare un coordinamento della divulgazione scientifica in ambito universitario. Quindi noi probabilmente, come museo, saremo uno dei poli che si inquadra perfettamente in questo obiettivo che è anche quello di favorire la divulgazione scientifica. Auguro buon lavoro a tutti voi e rimarrò ad ascoltare perché questo tema mi interessa particolarmente

# Che cos'è la biologia quantistica?

**Elio Fabri** già ordinario di Cosmologia all'Università di Pisa

—oOo—

Un paio di mesi fa ricevetti da Terreni la richiesta di parlare sul tema della Biologia quantistica (di cui non avevo mai sentito parlare). Feci presente che di biologia ne so ben poco, e la risposta secca fu: "non è vero". E così non potevo rifiutare...

Il mio intervento pertanto inizia con una premessa cautelativa. Tutto ciò che so sull'argomento deriva dal lavoro che ho fatto in questo breve lasso di tempo.

## **Premessa cautelativa**

Come dicevo, questo è un argomento di cui so poco o niente.

(In generale so poco o niente di biologia e di chimica, un po' più di fisica e in particolare di meccanica quantistica).

L'invito a parlare qui mi ha obbligato a studiare un po', il che a quest'età non è male perché mantenere in attività il cervello è forse la cosa più importante.

Ma non dovete aspettarvi niente di organico, forse neppure di sufficientemente chiaro: solo alcuni spunti, cose che ho *un pochino* capito, problemi a non finire...

Si tratta di un campo di ricerca parecchio vasto e riuscire a entrarci dentro, capire i problemi, capire le proposte ecc. per una persona in buone condizioni di esercizio intellettuale (cosa che io non sono più) come minimo avrebbe richiesto un anno di lavoro.

Questo è normale: nella mia carriera scientifica ho cambiato più di una volta campo di attività e quindi so bene cosa significa passare da un campo ad uno nuovo in cui è necessario iniziare a leggere un certo numero di lavori, comprendere quali sono i problemi rilevanti, capire che cosa è stato fatto...

Potrò solo fornire alcuni spunti, raccontare alcune cose che ho capito un pochino e mettere in evidenza alcuni problemi, che in molti casi sono solo problemi miei, ma in molti altri — per quanto ho potuto capire — sono anche problemi aperti per quelli che ci lavorano seriamente.

## **Seconda premessa, storica**

La Meccanica quantistica ha ormai compiuto i 90 anni. I primi passi sono stati fatti nel terzo decennio del secolo scorso ('24, '25, '26): sono passati giusto 90 anni dal primo articolo di Schrödinger, che è del '26.

Ormai da diversi decenni nessuno può fare il fisico senza conoscere la m.q.: fra le teorie di base della fisica moderna, è sicuramente quella di maggiore importanza ... eppure (vedremo poi perché ho scritto questo "eppure").

Nei pochi anni seguiti alla sua fondazione, diciamo fine anni '20 e primi anni '30, la m.q. è stata applicata in modo esplosivo (non è un'esagerazione): dando spiegazione a una quantità di fatti e fenomeni in certi casi noti da molto tempo, che ora è inutile elencare. La m.q. ha dato una svolta assolutamente fondamentale alla fisica del secolo scorso.

Per il nostro tema è importante ricordare che la m.q. ha fornito la spiegazione decisiva della struttura degli atomi e poi del legame chimico, che fino allora era rimasto un mistero.

Questo ha significato dare alla chimica una base teorica solida:

- perché i vari atomi hanno le proprietà che hanno
- che cosa significano i gruppi e i periodi di Mendeleev (che erano il risultato di un lavoro di decenni; però condotto solo su base empirica, sulla base delle proprietà osservate in laboratorio)
- perché si formano certe molecole
- che cosa c'è dietro al concetto empirico di "valenza"...

Tutti questi aspetti si sono chiariti grazie all'applicazione della m.q. alla chimica. Al punto che alcuni fisici, esagerando, hanno sostenuto (e sostengono) che una volta capita l'equazione di Schrödinger in materia di chimica non c'è altro da dire. Io non la penso così, ma non c'è assolutamente il tempo di approfondire una questione che pure sarebbe di grande interesse epistemologico. Resta comunque indiscutibile che l'applicazione della m.q. alla chimica è stata un passo immenso, come capacità di spiegazioni, predizione, interpretazione di fenomeni ecc.

### **In linea di principio...**

Il tutto è stato ridotto (in linea di principio) al comportamento quantistico degli elettroni e all'interazione *elettrostatica* fra i costituenti *carichi* degli atomi: nuclei positivi ed elettroni negativi (tralasciamo per semplicità l'effetto dei momenti magnetici degli elettroni; per non parlare di quelli dei nuclei, che hanno importanza solo in casi speciali).

*In linea di principio*, perché appena si lasciano i casi più semplici la soluzione *esatta* dell'eq. di Schrödinger è *impossibile*, e bisogna ricorrere ad *approssimazioni*. In realtà una soluzione esatta è possibile solo per l'atomo d'Idrogeno; da lì in poi bisogna approssimare.

Ma c'è di peggio: quasi sempre le approssimazioni si basano su *schematizzazioni*. Esempio canonico sono gli *orbitali*: sappiamo che i chimici sono molto attaccati a questo concetto. Ma quelle schematizzazioni — a partire appunto dagli orbitali — rischiano poi di essere prese per realtà di base. Questo sicuramente succede nell'insegnamento, anche universitario (altro aspetto che ora non posso toccare).

### **L'approssimazione di Born - Oppenheimer**

Un'approssimazione fondamentale sta alla base di quasi tutta la chimica quantistica: quella di Born Oppenheimer (B – O, 1927: la m.q. era appena nata). Si tratta di due fisici famosi: Max Born, premio Nobel nel 1954 per il contributo dato alla fondazione della m.q.; Robert Oppenheimer, il maggior fisico teorico americano della prima metà del '900.

Non sarà male spiegare un po' meglio in che cosa consiste quest'approssimazione, ragionando sull'esempio più semplice possibile: la molecola H<sub>2</sub>. Prima abbiamo detto che una soluzione esatta è possibile solo per l'atomo d'Idrogeno; ora passiamo a un sistema appena un po' più complicato, che pure può essere studiato solo per mezzo di approssimazioni.

L'approssimazione di B–O si fonda sul fatto che i nuclei (anche un semplice protone) hanno masse molto maggiori dell'elettrone: 1800 volte per il protone. Questo giustifica che si possa, per cominciare, studiare il moto degli elettroni (eq. di Schrödinger) tenendo fissi i protoni, considerandoli solo come centri di forza: mettiamo i protoni in una posizione fissa, a una data distanza tra loro; aggiungiamo i due elettroni, che risentiranno dell'attrazione dei protoni e della reciproca repulsione (forze elettrostatiche) e cerchiamo di risolvere l'eq. di Schrödinger per gli elettroni.

Per es. fissiamo la distanza  $R$  fra i protoni a 60 pm (0.06 nm).

Il pm (picometro) è un'unità di misura che non è in uso da molto tempo; in campo atomico e molecolare a lungo si sono usati gli angstrom (Å), che poi sono diventati fuori legge: il Sistema Internazionale preferisce, per qualunque grandezza, multipli e sottomultipli secondo potenze di 1000. Quindi metro, millimetro, micrometro (micron), nanometro. Ma un nanometro è ancora troppo grande rispetto alle dimensioni di atomi e piccole molecole; è così che entrano in ballo i picometri:  $10^{-12}$  metri,  $0.01 \text{ \AA}$ .

Il dato 60 pm è ragionevole come distanza tra i protoni in una molecola d'Idrogeno.

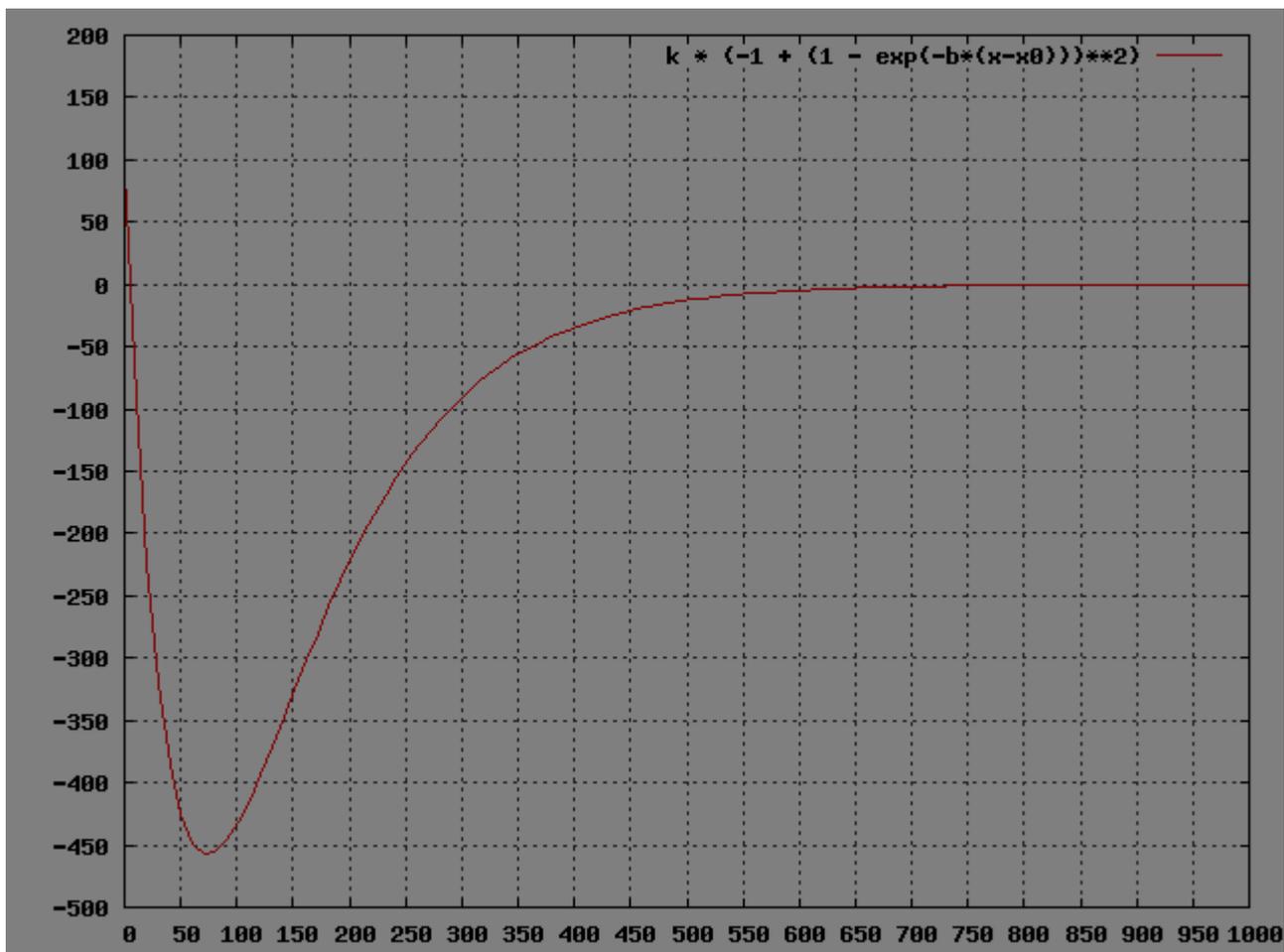
Fissata la distanza tra i protoni, risolviamo l'eq. di Schr. per i due elettroni (non importa ora vedere come e con quale grado di approssimazione) e determiniamo l'energia  $U$  dello *stato fondamentale di questo sistema*.

Prendiamo poi un altro valore di  $R$ , per es. 70 pm, troviamo il nuovo valore di  $U$ , eccetera.

Non è male ricordare che nei primi tempi della m.q. era piuttosto laborioso risolvere problemi come questo: si disponeva al massimo di una calcolatrice meccanica, a mano o elettromeccanica. Oggigiorno (ormai da diversi decenni) naturalmente si ricorre ai computer.

Avremo così una tabella, possiamo disegnare un grafico, magari costruire una formula che rappresenti i valori trovati  $U(R)$ .

La figura qui sotto rappresenta il risultato. In ascissa c'è  $R$  in pm, in ordinata  $U$  in kJ/mol.



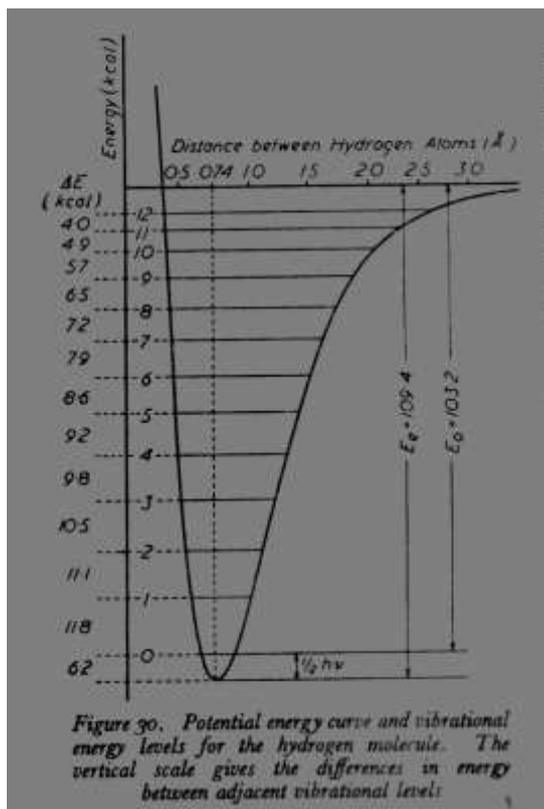
Dalla figura si vede che la distanza di equilibrio tra i due protoni (il punto di minimo di  $U(R)$ ) è circa 75 pm, e che l'energia di legame è circa 450 kJ/mol (cortesia mia verso chimici e biologi, che sono abituati a questa unità di misura, o peggio ancora alle kcal/mol; come fisico, ve la darei molto più volentieri in elettronvolt, eV: ricordo che 1 eV è circa 100 kJ/mol).

Abbiamo quindi trovato, per la molecola d'Idrogeno, la distanza tra i due protoni e l'energia (negativa). Il fatto che sia negativa significa che il sistema è legato e che per separare i due atomi d'Idrogeno è necessario cedere energia alla molecola: circa 450 kJ/mol.

Però l'esperienza mostra che il valore dell'energia di dissociazione di  $H_2$  è alquanto minore: 432 kJ/mol. I calcoli non sono sbagliati e l'energia misurata è proprio quella. Come mai?

Risposta: perché nel calcolo manca un altro passo: non possiamo dimenticare del tutto la m.q. per i protoni!

Se ne tiene conto usando  $U(R)$  come energia potenziale efficace protone-protone, e calcolando i livelli di energia in questo potenziale.



La figura accanto rappresenta il risultato. In ascissa c'è  $R$  in pm, in ordinata  $U$  in kcal/mol (purtroppo!).

A destra si leggono due energie: la prima è la profondità della buca, che sarebbe l'energia di dissociazione classica:

$$109.4 \text{ kcal/mol} = 458 \text{ kJ/mol.}$$

La seconda, un po' minore, è l'energia di dissociazione quantistica. Da dove viene la differenza?

Si tratta di un effetto che si può spiegare, almeno qualitativamente, usando il principio d'indeterminazione (PI).

Supponiamo che fosse possibile uno stato in cui i protoni sono fermi nella posizione di equilibrio (al minimo dell'energia potenziale). Allora i protoni avrebbero una posizione determinata (quella di equilibrio) ed essendo fermi avrebbero anche velocità determinata (nulla). Anche la quantità di moto sarebbe ben determinata, e questo è appunto vietato dal PI.

Nella colonna di sinistra sono indicate le distanze fra i vari livelli possibili per la vibrazione dei protoni, e si vede che il più basso sta 6.2 kcal/mol = 26 kJ/mol sopra il minimo: questo è appunto l'effetto del PI.

Quindi la vera energia di legame è  $458 - 26 = 432$  kcal/mol, e ci siamo.

Quando un chimico pensa a una molecola, automaticamente la vede secondo B-O: una "nuvola" di elettroni, variamente configurata, attorno ai nuclei. Nella molecola  $H_2$  è tutto abbastanza facile: è la più semplice molecola, con soli due protoni e due elettroni. Le prossime molecole che vedremo sono composte da molti atomi, con molti più elettroni, e la difficoltà di calcolo è molto maggiore.

Resta però il metodo generale: i nuclei vengono visti come particelle classiche (minuscole palline) i cui moti (vibrazioni, rotazioni) avvengono in un campo di forze dovuto all'energia calcolata per gli elettroni.

Poi, quando occorre, si tiene conto che i livelli energetici di vibrazione e rotazione sono *quantizzati*.

Riassumendo: la m.q. entra in modo determinante ogni volta che si studia una qualsiasi molecola, ma i veri effetti quantistici riguardano solo gli elettroni. Per i nuclei al più si considera il carattere discreto dei livelli energetici.

Anticipando: quando ora si parla di “biologia quantistica” si pensa a situazioni (vere o ipotetiche) in cui profondi effetti quantistici riguardano anche i nuclei.

(In realtà non solo: ci sono anche effetti quantistici più complicati relativi agli elettroni.)

### **Parole chiave**

Ecco un elenco di parole chiave, che *dovremmo* esaminare.

Sarebbe molto bello se io potessi spiegare che cosa significano, quando compaiono, che cosa hanno a che fare con la biologia quantistica. Leviamocelo subito dalla testa...

Primo, per fare una cosa del genere ci vorrebbe un bel po' di tempo; secondo, c'è una difficoltà più seria: per poter affrontare questi concetti ci vorrebbe un corso intero d'introduzione alla fisica teorica. Forse con un annetto potremmo farcela...

Tuttavia sono parole che dovrevo citare, perché le sentirete nominare anche da me; se poi si gira per internet le si trovano dappertutto, a volte usate bene, altre volte male; in modo corretto ma anche scorretto.

- sovrapposizione
- coerenza/decoerenza
- tunneling
- spin (singoletto / tripletto)
- interazione iperfina
- effetto Zeeman.

### **Da un articolo di rassegna [1]:**

“Can quantum mechanics play a role in biology?

In many ways it is clear that it already does.

Every chemical process relies on quantum mechanics.

However, in many ways quantum mechanics is still a concept alien to biology, especially on a scale that can have a physiological impact.”

*La meccanica quantistica può avere un ruolo in biologia?*

*È chiaro che già ce l'ha, da molti punti di vista: ogni processo chimico si basa sulla m.q.*

*Tuttavia in larga misura la m.q. è ancora un concetto estraneo alla biologia, specialmente alla scala che può avere importanza fisiologica.*

(Per informazione: questo articolo porta una bibliografia di 105 voci. Se avessi voluto documentarmi seriamente sul nostro argomento sarei dovuto andare a guardare quegli articoli, leggere almeno i riassunti e leggere per esteso i più importanti. Impossibile, ovviamente...)

## **Torniamo alla storia**

Mentre la m.q. rivoluzionava il modo di pensare dei fisici anche su un sacco di cose di cui non vi ho detto, nel frattempo la biologia seguiva una strada largamente indipendente, di cui faccio meglio a non parlare data la mia ignoranza.

In particolare procedeva l'interpretazione a livello molecolare di molti fenomeni e processi biologici, sulla base della chimica organica.

Le scoperte in campo biologico non sono state da meno rispetto alla m.q. Inutile ricordare quanto sia stato importante il passo compiuto nel 1953 (struttura del DNA) che ha portato a decifrare il meccanismo della trasmissione ereditaria.

## **Alcuni argomenti**

Ora accennerò alcuni argomenti (problemi) di cui ho letto qualcosa, in parte nel libro *La Fisica della vita* ([2] nella bibliografia), in parte in articoli.

Una parentesi: a me quel libro non è piaciuto per niente, tant'è vero che non sono riuscito a finirlo. Non sopporto quel liguaggio "divulgativo", basato su false analogie, su semplificazioni che non di rado diventano veri e propri strafalcioni (che ho potuto cogliere nei casi in cui ho competenza sulla materia).

Quando si parla di fisica mi sento di criticare con cognizione di causa, ma la divulgazione nel libro non riguarda solo gli aspetti fisici, e non metto la mano sul fuoco su quanto c'è scritto in materia di genetica, biologia ecc.

Questo è un problema serio. È un fatto che libri di quel tipo sono l'unica fonte d'informazioni possibile per chiunque abbia desiderio d'imparare, di capire qualcosa su problemi nuovi come appunto la biologia quantistica di cui stiamo parlando.

Purtroppo sono fonti assolutamente inaffidabili (secondo me) che danno informazioni grossolane e in realtà travisano la sostanza scientifica dei concetti di cui parlano. Risultato: quando il lettore è convinto di aver capito qualcosa, ha capito cose sbagliate. Questo mio giudizio non vi riuscirà nuovo, dato che l'ho espresso in diverse occasioni nella "Candela". Pur avendo continuato a rifletterci, non ho trovato motivi per modificare questo giudizio; anzi più passa il tempo e più la mia convinzione si rafforza.

Entrando finalmente in argomento, passerò ora a dare alcuni esempi di ciò che ho letto e capito: in alcuni casi abbastanza, in altri quasi per niente...

## **Trasporto coerente di energia nella fotosintesi**

Ecco un caso in cui ho capito poco o niente, prima di tutto perché non so abbastanza della struttura dei sistemi fotosintetici.

Credo di aver capito che si tenti di spiegare l'alta efficienza del trasporto di energia — dalle "antenne" ai centri di reazione: da un luogo in cui la luce viene assorbita a un'altra parte della cellula, dove avviene la sintesi degli zuccheri. Ci si chiede come riesca l'energia assorbita dalla radiazione a non essere dispersa durante il trasferimento, sì da consentire un'alta efficienza di tutto il processo. Si ritiene che a ciò si arrivi grazie a meccanismi quantistici, ossia grazie al mantenimento, durante il processo, di una "coerenza" quantistica.

Ci sono però pareri discordi, calcoli con approcci diversi che danno risultati diversi; mancano dati sperimentali, soprattutto *in vivo*. Questa è una difficoltà sempre presente in ambito biologico e nel nostro caso ancora più importante: si possono costruire modelli teorici anche complessi e poi sperimentare percorsi parziali, ma non riprodurre l'intero processo. Il processo reale, *in vivo*, è terribilmente più complicato e ci sono un sacco di effetti che possono alterare le cose.

Su tutto questo, l'unica cosa di cui so abbastanza è proprio la coerenza quantistica.

Potrei allora tentare di spiegarla? Non credo: non ci sarebbe il tempo, e non sarebbe l'unico ostacolo: i concetti che si sono dietro richiederebbero un corso di fisica teorica; e senza quei concetti la coerenza non si capisce.

Invece i divulgatori pretendono di farvi capire il tutto con qualche paginetta, e vi imbroglia. Lo dico chiaramente e lo ripeto: vi imbroglia. Oppure dovremmo pensare che siano così ignoranti da credere davvero a quello che scrivono? Debbo escluderlo, perché si tratta di persone titolate, di docenti universitari che debbo ritenere sappiano perfettamente come stanno le cose. Se si comportano così lo fanno quindi per far contento il lettore; perché pensano che in fondo danno un'idea ... la magica frasetta "dare un'idea".

### **La magnetoricezione aviaria**

Il problema in sé non ha niente di quantistico: appartiene a quel ramo della biologia che si chiama etologia.

Si tratta di un problema ben noto: come fanno gli uccelli (o anche certi insetti) a orientarsi nelle migrazioni? Le osservazioni mostrano che gli uccelli non solo fanno migliaia di chilometri per tornare al luogo della riproduzione, ma tornano anche proprio al loro nido dell'anno precedente.

Nel tempo sono state fatte varie ipotesi, che forse non si escludono a vicenda:

- si orientano con le stelle
- si lasciano guidare dagli odori
- percepiscono il campo magnetico terrestre e da questo si fanno guidare.

Come ho detto, le varie ipotesi non si escludono; ma qui parlerò solo della terza, che pone una domanda preliminare: che cosa può significare orientarsi con il campo magnetico?

Non mi pare che la questione sia stata chiarita; il problema sembra quello di trovare un qualche sistema chimico capace di essere influenzato dal campo magnetico terrestre, che è parecchio debole. In laboratorio si possono fare esperimenti, magari mettendo dei campi magnetici mille volte superiori a quello terrestre. In tali condizioni si sono visti degli effetti, ma bisogna che gli stessi effetti si presentino anche con campi deboli come quello terrestre. A quanto ho potuto capire, in queste condizioni succede di tutto.

Una proposta di quasi 40 anni fa è un meccanismo fondato sulle *coppie di radicali*. Nonostante parecchio lavoro (teorico, *in vitro*, *in vivo*) la soluzione pare ancora lontana. Proverò comunque a dire quel pochissimo che ho capito (ma non garantisco...).

### **Coppie di radicali**

Credo che per "coppia di radicali" (*radical pair*) s'intendano due molecole legate o vicine, che hanno entrambe un elettrone "spaiato" (quindi sono radicali).

Bisogna assumere che i due radicali vengano generati in uno stato in cui gli elettroni hanno stati di spin *correlati* (singoletto S oppure tripletto T). Che inoltre la coppia di radicali non sia stabile, ma si converta in un prodotto finale, con un tasso di reazione *diverso nei due stati* (S o T).

Spiego meglio. Lo stato di spin (S oppure T) non è fisso nel tempo: può prodursi una *interconversione*: a causa di un *campo esterno*, o anche per l'interazione col campo magnetico di uno *spin nucleare*. La questione del tempo è critica: certe cose devono accadere prima di altre, altrimenti il processo non funziona. Quindi non basta dire che c'è questo e c'è quello, ma bisogna dimostrare che certi fenomeni avvengono nei tempi giusti per far avanzare il processo.

La sensibilità del pettirosso (*Erithacus rubecula*) a campi magnetici è stata ampiamente studiata.

Un candidato per il meccanismo della coppia di radicali è una proteina presente nella retina: il *criptocromo*, in qualche modo (che non so perché non l'ho capito) coinvolto nella sensibilità alla luce.

Non ci sono dati diretti sul criptocromo nella retina del pettirosso, ma la proteina è presente anche nella *Arabidopsis thaliana*, dove è stata studiata in dettaglio. Questa pianticella è importante nella ricerca biologica perché si presta molto bene a fare esperimenti in campo genetico, riproduttivo, biochimico; il suo pregio per la biologia deriva forse dal fatto che è piccola, si riproduce rapidamente, è resistente a vari trattamenti. Insomma per fortuna il criptocromo, che nel pettirosso è difficile studiare, è più semplice da studiare nella pianta.

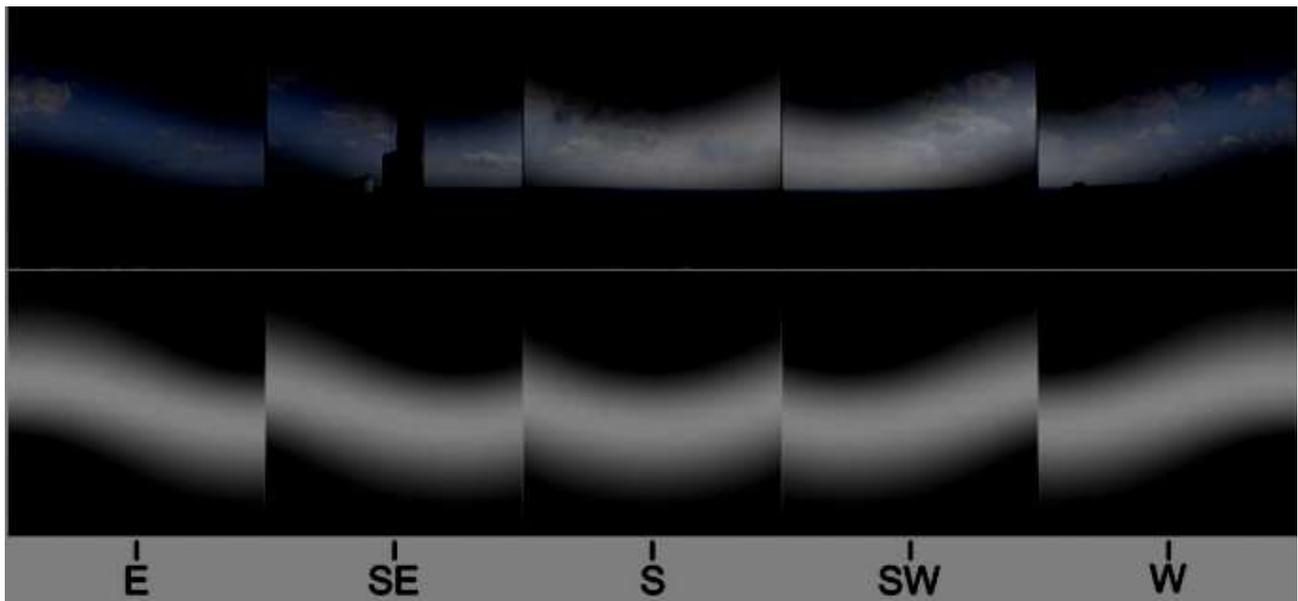


Simulazioni al computer, basate sui dati raccolti, darebbero indicazioni che un campo magnetico

come quello terrestre possa produrre nel campo visivo dell'uccello una zona più chiara. Delle due figure qui sotto, quella inferiore mostra ciò che dovrebbe vedere un uccello se avesse davanti un cielo vuoto; la superiore riproduce un panorama (mi pare che sia Francoforte, in Germania) con quello che l'uccello dovrebbe vedere a seconda di dove gira gli occhi. Come vedete, c'è una striscia chiara orientata diversamente, a seconda della direzione dello sguardo rispetto al campo magnetico.

Se davvero possiede questo meccanismo il pettirosso riesce a riconoscere il sud, che è la figura centrale, in cui la striscia è più bassa sull'orizzonte ed è simmetrica. Invece a est e a ovest la striscia risulta obliqua; quindi l'uccello potrebbe riconoscere i punti cardinali.

Purtroppo anche in questo caso i risultati sono controversi e non accettati da tutti i ricercatori, anche per la scarsità di dati e per la facile influenza di fattori disturbanti nelle prove *in vivo*.



## Singoletto / tripletto

Diciamo ora qualcosa su queste, che sono le parole chiave del discorso che abbiamo fatto.

Di solito le cose vengono descritte così:

- Gli elettroni hanno uno *spin* — cosa difficile da immaginare anche questa. Di solito si pensa a un elettrone come una specie di trottola che gira su se stessa. Non sta tanto bene, un fisico teorico non la vede così ... ma mettiamola pure in questo modo per capirci.
- Lo stato di tripletto viene visto coi due spin allineati paralleli  $\uparrow\uparrow$  cioè i due elettroni ruotano nello stesso senso, i momenti angolari sono paralleli e concordi.
- Nel singoletto invece i due spin sono allineati ma antiparalleli  $\uparrow\downarrow$ .

Questo discorso lo trovate praticamente dappertutto: parallelo = tripletto, antiparallelo = singoletto.

Sarebbe bello se fosse giusto, ma *non è vero*, perché il tripletto consiste di *tre* stati (altrimenti perché si chiamerebbe tripletto?). Quindi bisognerebbe costruire *tre* stati con spin paralleli, in cui le componenti del momento angolare secondo un dato asse valgano +1, 0 -1. Ma purtroppo ciò non è possibile. Lo spin di un elettrone o è in su o è in giù, quindi possiamo mettere tutti e due gli elettroni in su o metterli tutti e due in giù. In questo modo otteniamo i due stati con momento angolare +1 o -1, ma non si riesce a ottenere 0.

In realtà bisogna considerare *due* diversi stati  $\uparrow\downarrow$  e  $\downarrow\uparrow$  e fare *due* diverse *sovrapposizioni* (altra parola magica) di questi due stati:  $\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow$  e  $\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow$ .

La prima è il tripletto, la seconda il singoletto, entrambe con componente 0 lungo il dato asse.

Perché è così? Temo non sia possibile spiegarlo in breve tempo. Questo discorso è raro sentirlo fare e ancora più raro riuscire a capirlo, ma sotto ci sta il fatto che in m.q. è possibile una sovrapposizione degli stati: cosa che in meccanica classica non esiste.

Aggiungo che un'interazione esterna può cambiare una sovrapposizione nell'altra. A causa di un campo magnetico esterno può succedere che la configurazione di sinistra si trasformi in quella di destra (in termini di gergo cambia la *fase* della sovrapposizione) e in questo consiste la citata "interconversione".

Mi rendo perfettamente conto che quello che ho detto non è una spiegazione ... al più vi ho fatto vedere che sotto al discorso del singoletto e del tripletto c'è qualcosa di più complicato, di un po' meno ovvio delle freccette come vengono disegnate di solito. Purtroppo non posso fare di più...

## Tautomeria e mutazioni

Veniamo ora al punto centrale, quello intorno al quale ho lavorato di più.

Ma prima una digressione: voglio ricordarvi la storia della puntata n. 85 della "Candela".

Se tra voi c'è qualcuno che seguiva la "Candela" su NATURALMENTE, si stupirà di sentirmi parlare del n. 85, perché l'ultima puntata uscita è la 84. Del resto nel mio sito tutte le puntate sono numerate, e potete verificare che l'ultima pubblicata, fino alla fine delle pubblicazioni della rivista, è proprio la 84.

Appunto...

Che voglio dire con "appunto"? Quando NATURALMENTE ha cessato le pubblicazioni io avevo in cantiere altre puntate: quelle che chiamo "i fili sospesi". Una di queste era il seguito della serie di risposte a Stefania Consigliere, in particolare sulla m.q. La puntata 85 doveva essere dedicata al cosiddetto "indeterminismo" della m.q.

Avevo cominciato a lavorarci circa due anni fa. Nella serie di esempi che avevo scelto c'erano anche le mutazioni spontanee: mi ero posto per mio conto il problema se potessero essere esempi d'indeterminismo quantistico. Pensando a questo, mi ero imbattuto nelle mutazioni tautomeriche e lì ero rimasto dubbioso: non riuscivo a capire se si tratta di un effetto quantistico o no.

Nella bozza che stavo preparando c'è scritto:

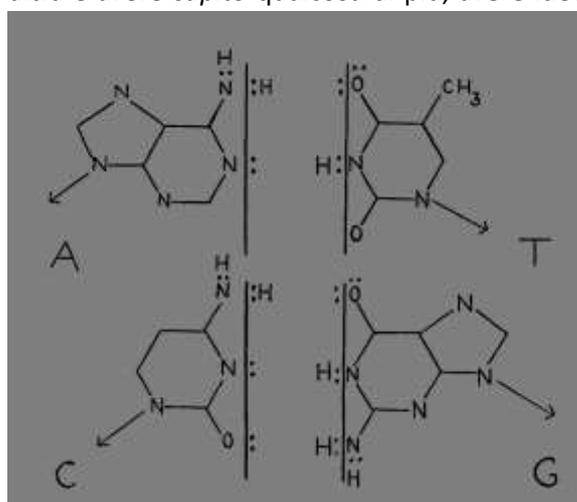
*“in particolare non ho chiaro il meccanismo delle transizioni tautomeriche, che almeno da parte di qualche ricercatore sarebbero attribuite a effetti genuinamente quantistici”.*

Allora non avevo la minima idea di quanto l'argomento fosse caldo, della marea di articoli che erano già stati pubblicati o che sarebbero stati pubblicati in seguito. Avevo scoperto il problema per mio conto mentre stavo scrivendo questa puntata, ed ero rimasto incerto su che cosa dire: era o no un effetto quantistico? Non avrei voluto prendere una cantonata ... e quindi non sapevo come andare avanti.

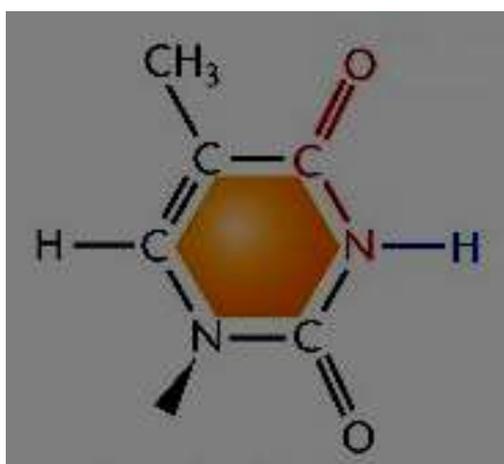
Ora ne so qualcosa di più, ma un conto è dire questo, un'altra è avere *capito* qualcosa di più, avere idee chiare... Comunque ora proverò a raccontare quello che mi riesce.

### La prima idea

La prima idea risale a più di 50 anni fa ed è dovuta a Löwdin (1963), un chimico teorico svedese. La figura qui accanto (di Löwdin) mostra le basi nel DNA, accoppiate come di solito: A-T, C-G, mediante legami a idrogeno N:H. Nella figura l'H sta tra due barre verticali; vicino all'H ci sono due puntini che stanno per gli elettroni condivisi che formano il legame covalente. Le barre verticali servono a ricordare che l'H sta lì perchè risente pure dell'interazione con l'atomo vicino dell'altra molecola. È importante notare che la coppia A-T ha *due* legami, mentre la coppia C-G ne ha *tre*.

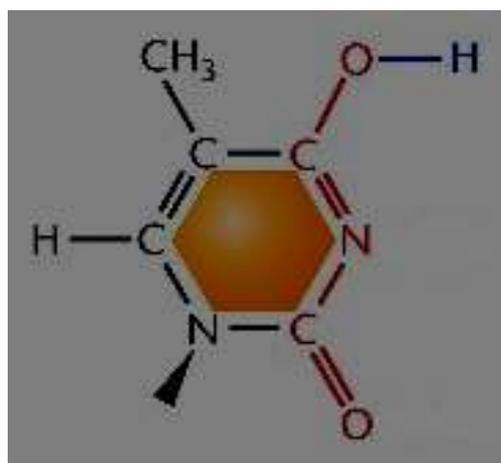


Sofferamoci ora sulla timina (T), che è nella forma chetonica (gruppo C=O): la si vede meglio nella figura a sinistra (che purtroppo è ribaltata perché l'ho presa da un altro articolo).

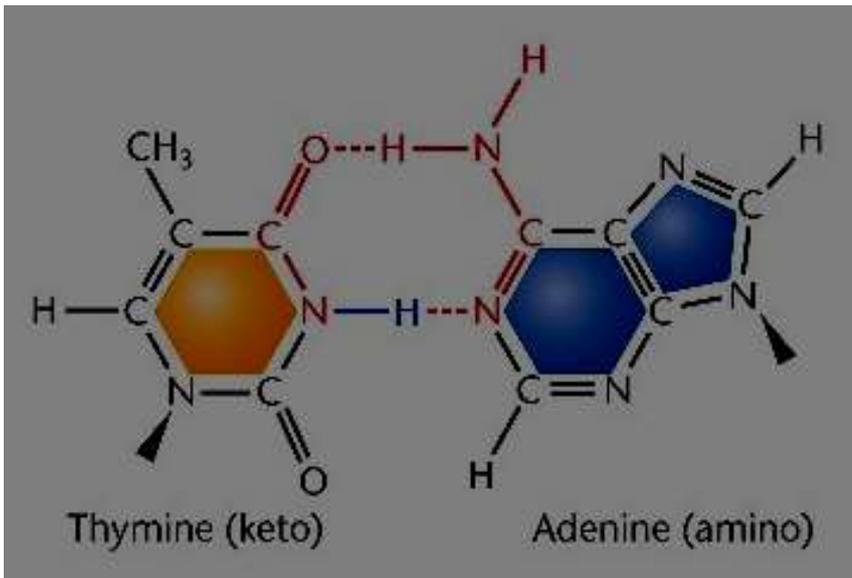


La forma chetonica T può legarsi ad A con due legami a idrogeno (v. figura a pag. seguente).

Accanto alla forma chetonica esiste anche la forma *enolica*, mostrata nella figura qui a destra (gruppo C-OH).



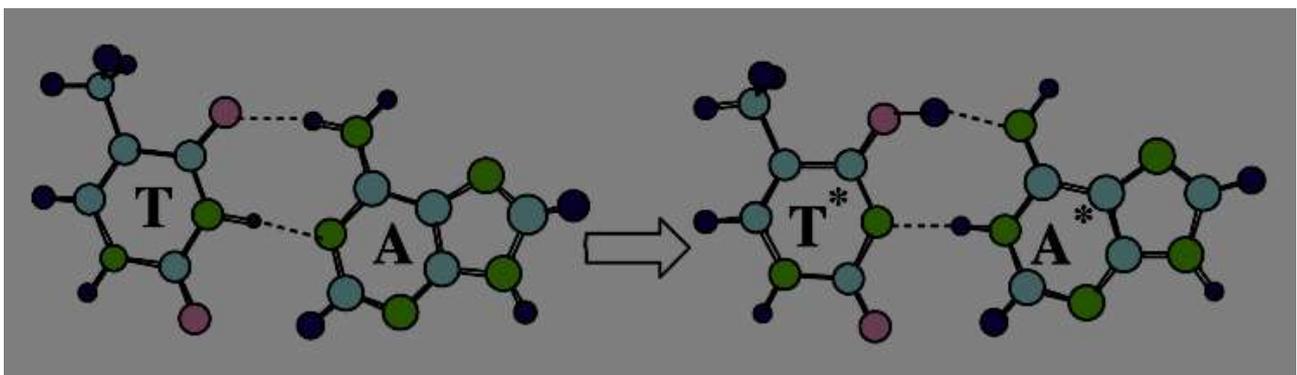
Può succedere che avvenga una *transizione tautomerica*: dalla configurazione normale — quella di sinistra, in cui c'è il doppio legame con l'H che appartiene alla Timina attaccato all'azoto e l'H dell'adenina legato a un altro azoto, quello del gruppo amminico — si può passare a una configurazione in cui i due H si scambiano di ruolo: la timina prende l'H di sopra e cede l'H di sotto trasformandosi in una timina enolica T\*. Simultaneamente l'adenina diventa una A\*.



La trasformazione è schematizzata nella figura qui sotto: la freccia indica appunto la transizione da A-T ad A\*-T\*.

La trasformazione è schematizzata nella figura qui sotto: la freccia indica appunto la transizione da A-T ad A\*-T\*.

Sembra che non sia successo niente di grave, però se a questo punto inizia la replicazione, e le due eliche si separano, abbiamo una T\* che non si può legare a un'adenina normale, ma solo a una G, con *tre* legami a idrogeno (e una A\* che si legherà a una C).



Il legame T\*-G è mostrato nella figura qui accanto.

Abbiamo quindi una *mutazione*: una A è stata sostituita da una G.

Questa mutazione si conserverà nella cellula col destino di tutte le mutazioni: se si tratta di una mutazione nociva, produrrà la morte della cellula, un tumore, una malformazione ... tutti gli effetti possibili. Però questa è una cosa che succede dopo e non riguarda il processo chimico che dà origine alla mutazione come ho descritto.



## Questioni critiche

Abbiamo visto, nei limiti in cui sono riuscito a capirlo, che cos'è una transizione tautomerica del DNA. Sorgono però alcune domande. Questa transizione tautomerica come si produce? da che cosa dipende? A quanto ne so ci sono aspetti di quest'idea che sono ancora in discussione, a più di 50 anni dalla sua prima formulazione.

Si supponeva che la transizione dovesse avvenire attraverso uno stato intermedio a energia più alta (energia di attivazione).

La figura in basso mostra quest'idea in un grafico comune nello studio delle reazioni chimiche. Nel grafico è riportata l'energia dell'H a seconda della sua posizione.

Ho disegnato quella che un fisico chiamerebbe una *doppia buca di potenziale asimmetrica* (le unità sugli assi non hanno alcun significato).

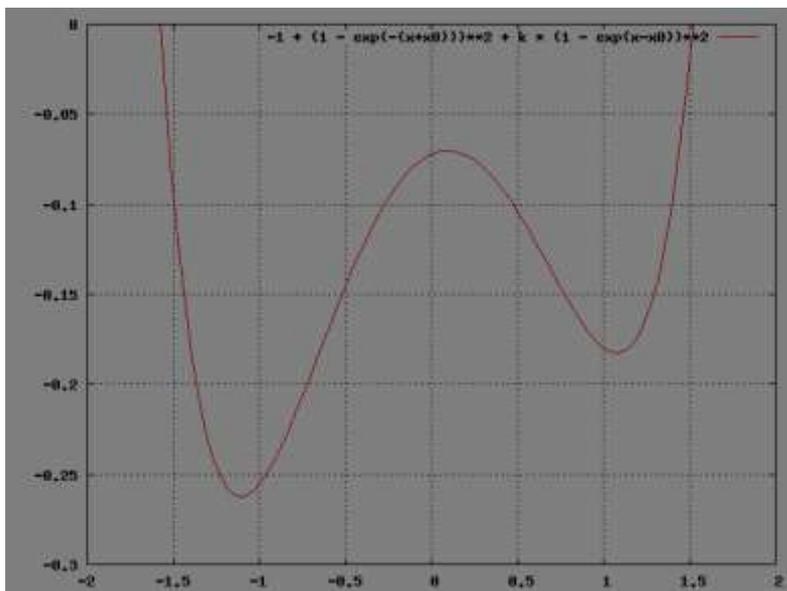
Potrebbe rappresentare l'energia potenziale di un protone nel legame a idrogeno, se è vero che il legame ad H consiste in una doppia buca.

A sinistra si vede un minimo (unità arbitrarie) che rappresenta la posizione di equilibrio dell'H legato alla timina; più a destra c'è un altro minimo, più alto, corrispondente alla posizione dell'H legato all'adenina.

Nel linguaggio termodinamico lo si può leggere come grafico dell'energia libera (tra energia interna  $U$  ed energia libera  $G$  può non esserci differenza, se si tratta di una reazione senza variazione di volume e di entropia).

Il minimo di sinistra, più basso, corrisponde a uno stato stabile; l'altro minimo più alto è relativamente instabile (le reazioni vanno sempre nel senso di diminuire l'energia libera).

Nell'ambito della meccanica classica ci sono due posizioni di equilibrio stabile, però in senso termodinamico quella di sinistra è la posizione di equilibrio.



Il passaggio da destra a sinistra e anche da sinistra a destra richiede il superamento di una *barriera di potenziale*, che può avvenire solo se viene fornita energia dall'esterno; nel linguaggio della chimica fisica si chiama *energia di attivazione*.

Di regola l'EA viene fornita dall'agitazione termica, e questo spiega perché la velocità di reazione aumenta all'aumentare della temperatura (non bisogna dimenticare che una temperatura più alta, se la reazione avviene con diminuzione d'entropia, può comportare uno "svantaggio entropico" che può anche alterare l'equilibrio; ma questo l'abbiamo escluso per ipotesi).

Se la temperatura è bassa e quindi l'agitazione termica è scarsa, l'EA non si può ottenere dagli urti tra le molecole; allora la reazione è molto lenta, fino ad apparire *congelata*. Per esempio mescolando idrogeno e ossigeno a temperatura ambiente non succede niente, sebbene termodinamicamente la formazione dell'acqua sia un processo favorito. Il fatto è che manca l'EA. Con una fiamma o una scintilla che scalda almeno una piccola parte dell'ambiente di reazione, si comincia ad avere l'EA necessaria. Dato che la reazione è *esotermica*, una volta innescata si mantiene da sé, anzi diventa esplosiva.

## L'effetto tunnel

In assenza di EA idrogeno e ossigeno possono stare nello stesso recipiente senza che accada niente; lo stesso accade nel caso che stiamo esaminando. Però questo è un discorso nei limiti della meccanica classica; se teniamo conto della meccanica quantistica interviene un'altra possibilità: un'altra delle parole chiave, l'*effetto tunnel*. Infatti nell'articolo del '63 lo stesso Löwdin propone quest'idea, che il meccanismo della transizione tautomerica sia dovuto all'effetto tunnel.

Se però qualcuno si aspetta che mi metta a spiegare l'effetto tunnel rimarrà nuovamente deluso: non solo non ne avrei il tempo, ma dovrei affrontare un discorso con tutti i presupposti necessari, in pratica un corso di meccanica quantistica. Invece, al solito, i nostri libri, a cominciare da quello di cui vi ho parlato all'inizio, tranquillamente non arretrano di fronte al problema: fanno figurine di palline che attraversano la galleria, cominciano a dire che il protone è un po' onda e un po' corpuscolo (che non si sa che cosa voglia dire ma va bene lo stesso); che anche se come corpuscolo non potrebbe, come onda può non si sa perché, ecc. ecc. Così è fatta la divulgazione.

Il peggio è che anche i testi di fisica per la scuola secondaria non si comportano meglio: quando si mettono a "spiegare" la meccanica quantistica producono pagine che posso solo definire indescrivibili.

E questo è niente: da quando al Liceo scientifico è stata messa la prova scritta di fisica all'esame di Stato, gli insegnanti non possono scegliere se parlare di "fisica moderna". Devono parlarne, perché all'esame ci saranno i problemi. Di conseguenza i libri saranno zeppi di questa roba, e gli insegnanti non potranno ignorarla, come spesso facevano.

Per quanto mi riguarda, non ho aspettato quest'emergenza per pormi il problema. Diversi anni fa (almeno venti) mi dedicai al tentativo di costruire una presentazione decente e al tempo stesso accessibile della meccanica quantistica per la scuola secondaria

Nel caso che qualcuno fosse punto dalla curiosità di vedere che cosa scrissi [4] potrà controllare che di effetto tunnel si parla piuttosto velocemente solo a pag. 18 della terza parte (e per di più si tratta di un lavoro rimasto incompiuto). Ci sono quindi 17 pagine precedenti in cui si parla d'altro: c'è un lungo lavoro preparatorio, prima di riuscire a dare un'idea seria di che cosa sia l'effetto tunnel.

Ma c'è anche una ragione più immediata per non dedicare troppo spazio a quest'idea: la possibilità che le transizioni tautomeriche non siano dovute all'effetto tunnel è stata proposta ed esplorata da diversi anni. I risultati non sono concordanti: coloro che su queste cose hanno fatto dei conti trovano risultati diversi tra loro.

Per esempio nel caso della transizione  $AT \rightarrow A^*T^*$  ci sono calcoli secondo i quali non ci sarebbe affatto una doppia buca. Se questo fosse vero, lo stato con i tautomeri  $A^*T^*$  sarebbe semplicemente instabile nel senso più banale del termine: non ci sarebbe nessun minimo dell'energia libera. Invece nel caso CG la doppia buca sembrerebbe esistere.

Sia chiaro: si tratta di calcoli di chimica quantistica che non sono in grado di valutare. Però ho scorso l'articolo e ho letto le conclusioni. Ovviamente non posso proporre un quadro delle conoscenze attuali, delle spiegazioni alternative ecc. Vi ricordo la premessa cautelativa che avevo fatto all'inizio: la biologia non la so, idem la chimica organica e tanto meno nella versione quantistica.

## Conclusione

La conclusione non può che essere interlocutoria. Secondo l'opinione che mi sono fatto, l'idea che la m.q. entri nei processi fondamentali dei fenomeni biologici, per quanto interessante, non può essere ritenuta provata, ma neppure esclusa. Al momento attuale ci sono argomenti a favore, argomenti contro; i ricercatori sono divisi: ci sono risultati teorici e sperimentali contrastanti o che vengono interpretati in modo diverso. Quindi la situazione è sicuramente in evoluzione, in ebollizione direi quasi.

Però credo opportuno smorzare entusiasmi troppo facili. Evitiamo discorsi come “è il tempo di creare una nuova scienza che si chiamerà Biologia quantistica!” Può darsi che succeda, non voglio escluderlo, ma al momento attuale non c’è niente di certo.

Certo sapete che specialmente in ambito USA esiste, da parte di non pochi ricercatori, quando pensano di aver trovato qualcosa, la tendenza a diffondere la notizia con interviste ai giornali, siti internet, libri divulgativi. Un esempio sono proprio i nostri autori: loro sono convinti che le cose stiano come dicono, che i fatti esistano e le spiegazioni teoriche pure. È un parere rispettabile, ma da qui a parlare di una rivoluzione nella biologia, secondo me ce ne corre.

A me sembra opportuno smorzare entusiasmi troppo facili: lasciamo che i ricercatori facciano il loro mestiere, e stiamo a vedere.

Poi c’è un’altra domanda: nel prossimo futuro chi insegna biologia dov’è accostarsi alla m.q. più e meglio di come sia stato finora? Perché se la m.q. fosse importante per comprendere come funzionano i fenomeni fondamentali della vita, allora una sua conoscenza sarebbe necessaria per spiegare qualcosa di serio.

Sarei tentato di rispondere di sì, ma mi frena quello che vedo in giro: quanto poco, dopo 90 anni, la m.q. sia stata capita al di fuori del ristretto ambito professionale di chi la usa per il proprio lavoro. Non so se lo ricordate, ma all’inizio ho scritto:

“tra le teorie di base della fisica moderna, è sicuramente quella di maggiore importanza ... eppure”

Dopo 90 anni siamo ancora così: tra quelli che sanno usare la m.q. non ci sono dubbi: la teoria funziona e ha un potere esplicativo e predittivo enorme per la fisica, nessuno si sogna di discuterlo. Però appena lasciamo quel terreno specialistico, di gente che abbia capito qualcosa di m.q. ce n’è davvero poca. I libri divulgativi sono un disastro, ma anche — permettetemi qualche battuta polemica — l’insegnamento che se ne fa inevitabilmente nei corsi di chimica, lo trovo completamente insoddisfacente; certamente inadeguato per capire le cose di cui abbiamo parlato.

Ora sarà chiaro che cosa intendevo con quell’“eppure”.

Comunque il discorso sarebbe assai lungo; se volete possiamo ritornarci sopra in sede di discussione.

Qui di seguito ho messo un po’ di bibliografia.

## **Bibliografia**

- [1] N. Lambert et al., *Nature Physics* **9** (2013), 10.
- [2] J. Al-Khalili, J. McFadden: *La fisica della vita* (Bollati Boringhieri 2015).
- [3] <http://www.sagredo.eu/temp/candel85-bozza.pdf>
- [4] <http://www.sagredo.eu/fq/fq21p3.pdf>
- [5] <http://www.sagredo.eu/candela/candel20.pdf>
- [6] <http://www.sagredo.eu/candela/candel59.pdf>
- [7] <http://www.sagredo.eu/candela/candel79.pdf>
- [8] <http://www.sagredo.eu/candela/candel81.pdf>

Il problema della divulgazione l’ho trattato nelle puntate 50, 52, 69 della “Candela”.

## IDEE INGENUE SULLA BIOLOGIA QUANTISTICA DI UN BIOLOGO DEL SECOLO SCORSO

**Fabio Fantini**

Una delle frasi che ricorrono con maggiore frequenza nei benevoli tentativi di introdurre il non specialista alla meccanica quantistica è che l'universo è più strano non solo di quanto immaginiamo, ma anche di quanto possiamo immaginare. Sembra che a scriverla per primo sia stato JBS Haldane, nel 1927. Probabilmente fu qualcosa di diverso da una fortuita intuizione, perché ci sono tutte le ragioni per credere che Haldane, un biologo piuttosto versato per la matematica e per la fisica, avesse conoscenze non superficiali delle nuove idee che in quegli anni si stavano affermando con la meccanica quantistica.

Già negli anni Venti del secolo scorso il dibattito sulla fisica quantistica affrontava temi sorprendentemente simili a quelli ancora oggi in discussione. Arthur Eddington, uno dei maggiori astronomi della prima metà del Novecento, e Percy Bridgman, premio Nobel per la fisica nel 1946, polemizzarono con asprezza sulle interpretazioni idealiste che Eddington dava della fisica quantistica. Il ripresentarsi delle stesse tematiche a ottanta anni di distanza è un segnale della difficoltà che il nostro cervello ha di metabolizzare i principi della fisica quantistica nei termini dell'esperienza comune e di fare progredire i termini di un dibattito che mette in discussione i principi stessi dell'osservazione del mondo fisico.

Per decenni la riflessione epistemologica sulla fisica quantistica è stata appannaggio di una cerchia molto ristretta di studiosi. Il lungo sonno dell'epistemologia quantistica mostra ora segni di risveglio grazie a una robusta, encomiabile ma non so quanto efficace ripresa di attività divulgativa. Secondo una nota battuta, non appena un fisico quantistico prova ad alzare la testa dal foglio sul quale sta eseguendo calcoli e a porre domande sul senso di ciò che sta facendo, si sente subito intimare di stare zitto e di continuare con i calcoli. La battuta è profondamente rivelatrice, oltre che dello stato d'animo di molti fisici, di un fatto incontrovertibile: i calcoli effettuati secondo i principi della fisica quantistica funzionano. Anche se non ne comprendiamo a fondo il significato né le implicazioni, la fisica quantistica sa farci prevedere il funzionamento del mondo fisico.

I biologi del secolo scorso hanno avuto un rapporto molto distaccato con la fisica quantistica, forti di un'affermazione di Mario Ageno, secondo il quale le dimensioni minime dei sistemi viventi erano stabilite dal limite al di sotto del quale l'indeterminazione quantistica avrebbe reso inefficaci le strategie deterministiche che permettono alle cellule di potere contare sulla sicurezza delle relazioni causa-effetto dominanti il mondo macroscopico. Al di sotto di questo livello minimo possono avvenire tutte le bizzarrie che è lecito immaginare e anche di più. Nel mondo macroscopico dei sistemi viventi le soluzioni adattative modellate dalla selezione naturale possono invece contare sulla prevedibile certezza della stessa logica sulla quale i meccanismi neurali del cervello di ogni specie che ne possieda uno sono stati forgiati dall'evoluzione.

Se le dimensioni minime dei sistemi viventi garantiscono relazioni causa-effetto prevedibili, i componenti delle cellule sono, attraverso una serie discendente di livelli gerarchici, sempre più vicini al pericoloso confine degli effetti quantistici. Effetti quantistici sono stati evidenziati in modo convincente nelle reazioni enzimatiche, nella fotosintesi, nella fosforilazione dell'ATP.

I biologi evolutivi hanno nel frattempo cominciato a riflettere su problemi di difficile soluzione per quanto riguarda la trasmissione dei caratteri ereditari e la selezione delle varianti dotate di maggiore successo adattativo. Alcuni dati, provvisori ma ricorrenti, fanno emergere una impreveduta relazione tra valore adattativo di una variazione fenotipica indotta dall'ambiente e sua fissazione nel genoma dell'individuo. È intuibile come la riflessione su questi dati abbia scatenato una ridda di malinformate speculazioni di stampo vitalista, ma il problema rimane. Sembra difficile, oggi come oggi, individuare una spiegazione coerente con il modello che ha guidato gli straordinari progressi della biologia molecolare negli ultimi settanta anni.

Un numero crescente di biologi inizia a sospettare che il modello evolutivo della Sintesi Moderna non spieghi in modo soddisfacente fenomeni come le mutazioni adattative o la fissazione nel genoma di variazioni che nascono come adattamenti fenotipici indotti dall'ambiente. Si tratta di fenomeni che sembrano forzare lo schema dell'evoluzione per riproduzione differenziale di individui casualmente dotati di determinate caratteristiche, per prospettare una canalizzazione preferenziale verso soluzioni adattative a scapito di altre meno adattative o sfavorevoli.

Al momento non si conosce alcun meccanismo biologico capace di fornire un substrato materiale convincente ai fenomeni evolutivi che appaiono orientati in modo non casuale verso la comparsa di fenotipi maggiormente adattativi. La scoperta della rilevanza di alcuni fenomeni quantistici per processi fondamentali del metabolismo cellulare ha spinto l'interesse di alcuni biologi verso le implicazioni che la fisica quantistica potrebbe avere anche nel campo dei fenomeni evolutivi.

Una riflessione speculativa sulle mutazioni adattative nei batteri è stata proposta nell'ambito quantistico. È noto che una causa di mutazione consiste nell'isomeria tautomerica che interessa le basi azotate. Il passaggio da una forma tautomerica all'altra dipende dallo spostamento di un protone, una particella la cui posizione rimane indeterminata fino al momento in cui un'osservazione, come potrebbe essere l'interazione con un enzima, non ne provoca il collasso in una posizione osservabile. La forma tautomerica della base azotata sarà chetonica oppure enolica in dipendenza di questa posizione, con probabilità diversa perché la funzione di probabilità del protone non è distribuita in modo omogeneo intorno alle due posizioni possibili.

Si supponga che le due diverse forme tautomeriche siano responsabili della sintesi di due varianti dello stesso enzima, una delle quali capace di promuovere un processo metabolico adattativo e l'altra no. Lo svolgimento del processo metabolico adattativo determinerebbe la stabilità della forma tautomerica che ne è responsabile. Se, invece, la forma tautomerica è incapace di avviare un processo metabolico efficace, la cellula rimane in condizioni di stress e la posizione quantistica del protone ritornerebbe indeterminata fino al successivo processo di osservazione, che innesca una routine come quella appena descritta e dalla quale la cellula esce solo quando la forma tautomerica stabilizzata conduce alla effettuazione del processo metabolico adattativo.

Questo modello ha il vantaggio di spiegare perché solo alcuni individui vanno incontro alla mutazione adattativa e perché il loro numero tende ad aumentare nel tempo. È anche vero che questa spiegazione apre almeno altrettanti problemi di quelli che risolve, ma almeno sembra prospettare una via di indagine, una possibile strada su cui orientare gli sforzi di ricerca.

Per mitigare lo sconcerto che la fisica quantistica genera nella maggior parte delle persone che cercano di carpirne i rudimenti, si ricorre spesso ad argomentazioni razionalizzanti, tra le quali occupa una posizione preminente quella che fa riferimento ai limiti di percezione e di elaborazione dei dati, limiti insiti nella nostra biologia. Non senza ragione, si ricorda che i nostri sensi percepiscono una finestra limitata delle sollecitazioni fisiche e chimiche cui siamo sottoposti e che questa finestra non è casuale, ma centrata sugli stimoli che hanno maggiore rilevanza per la sopravvivenza. Anche il nostro cervello, come gli organi di senso e la capacità di percepire certi stimoli, è un prodotto dell'evoluzione ed è adattato a trattare oggetti e fenomeni rilevanti per la sopravvivenza di individui macroscopici che interagiscono con altri individui e con oggetti altrettanto macroscopici. Le regole di comportamento del mondo macroscopico, che la selezione naturale ha distillato e raffinato attraverso un numero incalcolabile di generazioni, costituiscono un patrimonio che condividiamo con tutti i sistemi viventi, sia pure in diversa misura.

Lo schema innato in cui inseriamo i dati sensoriali deve a volte essere corretto e forzato in conseguenza di esperienze intersoggettive, capaci di superare i limiti della percezione e dell'intuizione personale. Il successo della conoscenza scientifica ha portato spesso a modificare le immagini ingenuie del mondo fisico fondate sul

senso comune. A ciascuno di noi deve essere costata una certa fatica, ora dimenticata, passare dalla percezione di una Terra piatta a quella di un pianeta sferico oppure cambiare l'idea di un Universo geocentrico in quella di un sistema solare eliocentrico e poi in quella di uno spazio curvo in espansione senza alcun centro.

Queste sono però quisquillie rispetto al cambiamento di percezione del mondo richiesto dalla fisica quantistica. A scala molto piccola le regole di comportamento del mondo non sono quelle che l'evoluzione di individui macroscopici ha memorizzato nel cablaggio delle connessioni neurali.

Se gli schemi di interpretazione del mondo su cui possiamo contare, cioè gli apriori kantiani, cessano di essere validi quando penetriamo nel dettaglio più fine dei fenomeni, rimane costante l'efficacia (irragionevole, diceva Wigner) della matematica. La validità del più elevato livello di astrazione che ricaviamo dalla conoscenza del mondo permane anche a scale dove le coordinate spaziotemporali che guidano il nostro pensiero sembrano perdere efficacia.

Le rappresentazioni del mondo elaborate dal cervello umano non possono non essere consistenti con il funzionamento del mondo fisico stesso. Gli schemi logici su cui articoliamo il pensiero sono il frutto di un modellamento delle connessioni neurali operato dalla selezione delle varianti genetiche e dalla capacità di adattare plasticamente le stesse connessioni grazie all'apprendimento. Lo sviluppo anatomico del cervello e la possibilità di impiegare tempo nella meditazione astratta hanno consentito alla nostra specie la produzione di modelli interpretativi molto generali, capaci di riassumere le proprietà di classi sempre più vaste di fenomeni e di oggetti.

La matematica impone a questi modelli il rigore di una logica e di una coerenza interna le cui basi affondano nel modo in cui il mondo macroscopico funziona. La corrispondenza tra i modelli matematici elaborati in un dato contesto e il funzionamento del mondo reale, anche in contesti profondamente diversi da quelli in cui i modelli furono elaborati, è in ultima analisi il risultato dei processi evolutivi. La cosa simpaticamente sorprendente è che questo distillato della conoscenza del mondo che è la matematica funziona anche alle scale dell'infinitamente piccolo, dove i principi di comportamento appaiono essere così differenti dal mondo che ci è familiare. A dovere essere rivisti sono concetti come quelli di spazio e di tempo, non la logica matematica, che sembra capace di attraversare tutte le scale di grandezza del mondo fisico.

Discussione

## Biologia quantistica?

Discussione finale

### **Fabio Fantini**

Piccoli gruppi di persone hanno iniziato fuori e ora possiamo iniziare qui la discussione per manifestare dubbi e riflessioni più o meno tecnici che siano.

### **Francesca Civile**, filosofa, fino all'ultimo redattrice della rivista NATURALMENTE

A me rimane abbastanza complicata, ma mi sembra importantissimo, capire come si fa a trovare le misure giuste per la divulgazione? È vero, è impressionante che dopo 90 anni di Fisica quantistica e i 110 di Relatività e le scoperte strane di pochi giorni or sono tutto questo sembri ancora una stranezza. Sono tutte cose che si presentano come controintuitive. Il Sole lo vediamo ogni giorno che sorge e tramonta, ma in effetti non sorge e non tramonta, in questo caso c'è voluto tanto per interiorizzare però adesso che sono passati 500 anni io riesco a immaginarmelo nell'altro modo anche se lo vedo così: è una immagine mentale che riesco a fare, mentre la spuma delle onde e delle particelle di Rovelli "Le cose non sono come sembrano" non me la riesco ad immaginare. Anche se mi presentano disegni e si prova a farla passare in pillole, rimane una grossa difficoltà. È vero che la parte quantistica della fisica abbia degli ostacoli di tipo intuitivo che magari tra una generazione o due si potranno superare. Ma pensavo che subito al di là delle scoperte di Einstein questa cosa è stata recepita dai letterati, a modo loro (Pirandello: tutto è relativo "Così è se vi pare"). Ma recentemente ho letto un romanzo di questo francese, Forest, che ha avuto una disgrazia terribile, una figlia di quattro anni morta di tumore, e lui ha scritto due o tre libri che non sono esattamente romanzi, ma quasi, girando intorno a questo pensiero. L'ultimo romanzo uscito si chiama "Il gatto di Schrodinger" che viene gestito esattamente come Pirandello gestiva la Relatività quella volta cioè: "è morto o non è morto?" Il problema suo è sempre il problema esistenziale del romanziere. Poi cerca anche di raccontare quel che ha capito del gatto e di Schrodinger. Però questa non credo che sia divulgazione buona. Si tratta di un'altra cosa, cioè prendere parole idee etc e non sembra che siano esattamente nel posto giusto, mentre le riflessioni che ci ha presentato Fantini mi sembra che siano al posto giusto. Se riusciamo a farci venir fuori qualche idea più chiara su come si fa a divulgare senza proporre frottole o semplificazioni eccessive credo che sarebbe cosa utile.

### **Fabio Fantini**

Mi permetto di aggiungere, anche in seguito ad una precedente discussione proprio con Francesca sul problema della divulgazione, che non esiste la divulgazione perfetta. Come per molte cose che facciamo, ci dovrebbe essere in qualche modo un rapporto dialettico nella divulgazione tra l'aspetto diciamo "popolare" ed uno più attento all'ortodossia scientifica. Non cedo che né l'una né l'altra sia la soluzione, ma che entrambi questi aspetti siano necessari nella divulgazione perché l'una senza l'altra rischia di arrivare solo ad una parte ridotta dell'obiettivo che si propone.

**Anna Maria Rossi** genetista fondatrice con altri della Nuova Limonaia

Penso che ci stiamo ponendo la domanda su come debba essere la divulgazione proprio nel posto giusto. Questo seminario è stato organizzato da NATURALMENTE che, come dimostra la sua storia, per più di 25 anni è stata sempre rivolta a questo obiettivo, quindi mi sembra che abbia anche tracciato un solco su come si può fare una buona divulgazione. Sono d'accordo nell'affermare che non c'è un solo modo di farla e bisogna anche stare attenti a non essere "talebani" sostenendo che da una parte sta la scienza e la divulgazione è un'altra cosa. Inoltre voglio rammentare quel che diceva Roberto Barbuti sulla terza missione dell'Università che, sebbene sia stata riconosciuta abbastanza tardivamente, include la divulgazione, anche se l'attenzione è stata posta più sul trasferimento tecnologico che sul trasferimento della conoscenza scientifica al pubblico generale.

Pur tuttavia, molti di noi sono convinti che i segreti della scienza debbano lasciare le stanze dell'accademia e dei centri di ricerca e andare per le strade, tra la gente. Questo lo posso dire anche in senso letterale perché io stessa ho fatto spesso i "caffè della scienza" stando seduta al caffè a chiacchierare con le persone curiose e avidi di conoscenze scientifiche. Faccio parte del piccolo gruppo di ricercatori che ha fondato "La nuova Limonaia" proprio con l'obiettivo di portare avanti un'attività di divulgazione scientifica e non solo, intendendo che un simile atteggiamento dovrebbe abbracciare tutti i campi del sapere. Al nostro interno tutti sono convinti di dover portare avanti questa missione, ma ci sono dei distinguo, delle riflessioni sui modi e in ogni caso è difficile impegnarsi in questo campo. Quello che deve essere chiaro è l'obiettivo e l'obiettivo principale è accendere una luce: quella della coscienza critica, perché quella luce, purtroppo, è spenta sia nei giovani che negli adulti, anzi direi che nel corso della vita sempre di più.

Allora mi ricorderò sempre di una studentessa che aveva sempre seguito le mie lezioni ponendo spesso domande, che alla fine del corso mi ha detto: "Ma, lei ha distrutto molte mie certezze". E io ho pensato: "Bene, era quello che volevo" perché le certezze addormentano il senso critico, se si accendono dei dubbi vuol dire che qualche rotellina comincia a girare, perché la scienza non è fatta di certezze, ma di sassolini, che si mettono in fila uno dietro l'altro e a volte accade che siano posti in una sequenza sbagliata e, quando ci si accorge che le cose non tornano, si ricomincia daccapo. Credo che questo sia il punto cruciale, l'obiettivo della divulgazione: istillare il dubbio e far capire che ci si deve porre delle domande perché dall'altra parte, dalla parte dei mezzi di comunicazione di massa, c'è un bombardamento di certezze, di informazioni sbagliate, spesso con obiettivi precisi, in genere di tipo commerciale. E, senza il germe del dubbio, si rimane passivi e si subisce il bombardamento senza reagire. Se invece rimane accesa la luce della coscienza critica allora possiamo resistere almeno un po' ai messaggi che ci arrivano dai media. Voglio dire che ci stiamo ponendo questa domanda nel posto giusto, abbiamo la storia di NATURALMENTE che per più di 25 anni è stata sempre rivolta a questo obiettivo quindi mi sembra che abbia anche tracciato un solco su come si può fare e sono d'accordo nell'affermare che non c'è un solo modo e bisogna anche stare attenti a non essere "talebani" sostenendo che questa è la scienza e l'altra è un'altra cosa. Inoltre voglio rammentare quel che diceva Roberto Barbuti: "la terza missione dell'Università –scoperta più tardi perché viene prima quella del trasferimento tecnologico che non quella del trasferimento della conoscenza scientifica" è questo che si pone l'Università, mentre molti di noi sono stati convinti che i segreti della scienza dovessero lasciare le stanze e andare per le strade. Questo lo posso dire in senso letterale perché io stessa ho fatto spesso i "caffè della scienza" stando seduta al caffè a chiacchierare con le persone di conoscenze scientifiche. Faccio parte del piccolo gruppo che ha fondato "La nuova limonaia" proprio con l'obiettivo di portare avanti queste attività di divulgazione scientifica e anche al nostro interno dove tutti sono convinti e portano avanti questa missione ci sono dei distinguo delle riflessioni e quindi è molto difficile impegnare in questo campo. Quello che deve essere chiaro è l'obiettivo e l'obiettivo principale è accendere una luce: quella della coscienza critica, perché quella luce, purtroppo, è spenta sia dei giovani che, nel corso della vita sempre di più. Allora mi ricorderò sempre di una studentessa che aveva sempre seguito le mie lezioni ponendo spesso domande, che mi ha detto: "ma, lei ha distrutto molte mie certezze". Devo dire: "bene" significa che qualche rotellina comincia a

girare perché la scienza non è fatta di certezze, ma di sassolini, uno dietro l'altro che si mettono in fila e a volte accade che siano posti in una fila sbagliata e si ricomincia daccapo. Credo che questo sia il punto cruciale dell'obiettivo della divulgazione: istillare il dubbio e far capire che ci si deve anche fare delle domande perché dall'altra parte c'è un bombardamento di certezze, di informazioni sbagliate, perché con obiettivi precisi che sono spesso di tipo commerciale ai quali molti di noi soccombono rimanendo passivi. Se invece rimane accesa la lucina della coscienza critica allora soccombiamo un po' meno ai messaggi che ci arrivano dai media.

### **Roberto Barbuti**

Bisogna dire che certe cose si divulgano meglio di altre: per alcune teorie scientifiche è piuttosto semplice, per altre, per capire, si è costretti a fare un corso di meccanica quantistica. Un esempio. Io sono un informatico, nell'ultima parte della mia vita mi sono occupato di modelli computazionali per la biologia. Recentemente ho studiato un modello computazionale per la dinamica delle popolazioni di rane italiane. Una popolazione complicatissima perché è un insieme di ibridi e di una specie parentale. C'è da stupirsi che la popolazione sia stabile perché il loro sistema di riproduzione è stranissimo. Con il modello computazionale è possibile far vedere come, in certe condizioni, le popolazioni possano essere stabili. Questa è una cosa semplicissima da divulgare. Posso fare un seminario di un'ora sulla riproduzione della *Pelophylax esculentus*, la rana italiana, e tutti capiscono tutti perché è un argomento facile da divulgare. Se, da informatico, devo divulgare la teoria della calcolabilità, allora diviene tutto più difficile perché per capire ci vogliono delle conoscenze di base che non si possono dare in mezz'ora. Quindi la facilità di divulgazione dipende molto dall'ambito che si vuole divulgare.

### **Riccardo Mansani, chimico, redazione MATHESIS Sassari**

Molte delle cose che volevo dire sono state dette negli interventi precedenti. Mi sembra innegabile che l'obiettivo sia quello di mirare a un'attitudine critica che è quello che il mondo dell'informazione, oggi, web compreso, ci propone scarsamente. La rete, in particolare, mi sembra che si connota come una grossa collezione di certezze elargite con pochissima attitudine critica. Quello che vorrei aggiungere è una piccola nota di ottimismo rispetto a quello che diceva il prof. Fabri che io stimo moltissimo ma con il quale non riesco a condividere l'opinione secondo la quale, dopo 90 anni di meccanica quantistica, non sia rimasto niente, anche a livello di cultura generale: mi sembra che sia una posizione un po' troppo pessimistica. Tra l'altro se ripercorriamo la storia della meccanica quantistica vediamo che essa progredisce per "approssimazioni successive". Che la prima teoria di Bohr sia un passo avanti verso la conoscenza della verità supposto che esista (io faccio un atto di fede e credo che esista, ma che non si raggiunga se non in maniera asintotica) mi sembra innegabile. Già pensare che una particella non sia solo una particella, come siamo abituati a pensare secondo le immagini della realtà che ci danno i nostri sensi, ma che, astruendo da essi sia qualche cos'altro che io approssimo parlando di "onda-particella", sia un passo avanti nella rappresentazione della realtà. Io non conosco molto bene il mondo della scuola, ma penso (e anche qui devo fare un atto di fede) che i ragazzi del liceo sappiano, della realtà fisica, un po' di più di quello che sapevo io alla loro età, che le teorie scientifiche, anche filtrate dai media e dalla divulgazione, qualcosa abbiano lasciato. Nella divulgazione poi penso che si debba distinguere tra buona e cattiva divulgazione. Il prof. Fabri ci ha fatto oggi una bella lezione divulgativa, ma di buona divulgazione, mostrandoci, se non altro, che è possibile capire quali sono i problemi di una disciplina. Capire i problemi significa averne risolto qualcuno a monte e questo mi sembra un buon passo avanti nella conoscenza.

## Elio Fabri

Qualche risposta e commento ai precedenti interventi.

Innanzitutto, non concordo con Mansani: non credo che i ragazzi di oggi ne sappiano di più di quelli di 20 o 30 anni fa sulla realtà fisica. Secondo me hanno più idee, ma molto più confuse.

Certo che la meccanica quantistica ha prodotto qualcosa nella conoscenza comune, ma secondo me in senso negativo: quello che è stato diffuso, che è rimasto e che ancora oggi riappare in ambienti cosiddetti colti, è solo l'idea della soggettività, dell'impossibilità di prevedere, della rinuncia della scienza alla certezza ecc. ecc.

Non mi voglio dilungare, ho citato l'elenco delle puntate della "Candela" in cui ho parlato di queste cose e ora posso limitarmi a illustrare alcuni aspetti di ciò che ho scritto.

Quando lessi quell'articolo di Stefania Consigliere, pensai: "ecco qua la solita umanista (antropologa nel caso specifico) che ha letto un po' di divulgazione e pretende di dire che cosa è secondo lei la Fisica del '900, la cosiddetta crisi della Fisica. Infilandoci dentro una quantità di strafalcioni, di cose palesemente sbagliate che ha letto in qualche libro oppure che ha frainteso. Ma fa poca differenza.

A proposito di senso critico (che dovrebbe essere un tratto distintivo di una cultura umanistica) qui non ce n'è la minima traccia. E notate che non stiamo parlando di una persona qualunque, ma di una docente universitaria. Quel senso critico che dovrebbe far dire: "sarà veramente così, avrò capito bene?" Ecco questo è ciò che mi fece arrabbiare.

Non vorrei farvi perdere tempo stupidamente, ma mi sembra istruttivo un episodio di una trentina di anni fa. Ero stato invitato, come fisico, al Liceo Scientifico "Dini" di Pisa, dove volevano organizzare un ciclo d'incontri per gli insegnanti sul tema del '900 (allora era di moda questa visione "sincronica": guardare un problema, un periodo storico, nelle sue varie facce).

Nella riunione preparatoria con alcuni insegnanti del Liceo, si cominciò a parlare di come trattare la fisica del '900. In un intervento mi capitò di dire (poco diplomaticamente, lo ammetto): "però per parlare della fisica del '900 bisognerebbe prima sapere quella dell'800..." Saltò su piuttosto risentita un'insegnante di lettere: "professore, quello che è importante noi lo sappiamo!" Ovvero (implicazione logica): quello che noi non sappiamo non è importante.

Questi sono gli atteggiamenti che bisogna combattere, di sicuro a proposito di meccanica quantistica, ma anche molto più in generale. Ecco perché sono portato a essere pessimista: a volte ci si trova a non avere possibilità di comunicazione.

Passo al secondo argomento (e qui ho paura di fare la figura del talebano...).

La domanda che vorrei porre, provocatoriamente, è: "siamo sicuri che sia possibile fare divulgazione scientifica?" O meglio: in quali campi una divulgazione è possibile, e in quali non lo è?

Se vogliamo parlare della meccanica, dell'ottica antica (fino ai primi dell'800) e di un altro po' di cose, per es. di parte della termodinamica, la divulgazione credo sia possibile: si possono fare esperimenti, si può ragionare anche sulle idee sbagliate che tanti hanno in mente, quindi contribuire all'acquisizione del famoso senso critico: "hai visto? davvo per scontata una cosa e invece la realtà è un'altra".

Questo perché sto parlando di cose che cadono sotto i sensi, in modo diretto.

A dire il vero, anche se non mi è mai capitato di leggerne o di sentirlo dire, un problema esiste anche con qualcosa che viene ben prima della meccanica quantistica e che fa parte integrante della fisica dell'800: mi riferisco all'elettromagnetismo.

Si tratta di un qualcosa che *non cade sotto i sensi*: nessuno ha mai visto un campo magnetico! E pensate un momento alle idee che circolano sul magnetismo, per non parlare delle onde elettromagnetiche...

Senza dubbio della divulgazione si può fare: sono famose le conferenze divulgative di Faraday, corredate da esperimenti di grande effetto. In proposito ci sono ben noti aneddoti, di cui non parlo per brevità.

Però eravamo agli inizi dell'elettromagnetismo, alla primissima scoperta dei fenomeni principali. Poi il campo è cresciuto, è nata una teoria matematica. E va sottolineato che l'elettromagnetismo non si regge senza la teoria matematica: non ci possiamo accontentare di vedere un po' di fenomeni, perché restano staccati, episodici, non riusciamo a collegarli e a comprenderli.

Quindi, secondo me, già lì andiamo incontro a delle difficoltà. Eppure, al tempo stesso, c'è gente che pratica con sicurezza le tecniche elettromagnetiche (per es. l'elettronica); che riesce a far vedere cose belle, divertenti e interessanti, anche senza avere conoscenze teoriche solide. Non ci si può non chiedere come ci riescano, ma non possiamo occuparcene ora.

Ho detto questo per mostrarvi che il problema della divulgazione esiste già per la fisica dell'800; ma per quella del '900 assume una dimensione macroscopica.

Il mio punto di vista, che ho anche scritto in qualche puntata della "Candela", è che senza la matematica non si fa niente, si fanno solo chiacchiere. Si potrebbe osservare che questo l'aveva già detto Galileo; però lui non poteva intenderlo come intendiamo adesso, dopo 400 anni.

Per es. in ambito quantistico si fanno solo chiacchiere perché non possiamo cavarcela col solito discorso che "non sono solo particelle, ma anche onde": la situazione è più complessa (ne avete visto un esempio a proposito di singoletti e tripletti). Stiamo parlando di oggetti di cui possiamo farci un'immagine accettabile solo se ne diamo una rappresentazione matematica.

Sia chiaro: sono d'accordo che la matematica è un prodotto del cervello umano, dell'evoluzione dell'*Homo sapiens*. Si è costruita inizialmente come mezzo di adattamento all'ambiente, alle condizioni che i nostri progenitori incontravano molte migliaia di anni fa. Quindi nei concetti di base originari il pensiero matematico si adatta alle percezioni, alle esperienze che s'incontrano nella vita primitiva.

Però la matematica ha una particolarità che non viene spesso sottolineata; probabilmente perché sono pochi quelli che capiscono abbastanza la matematica da poter vedere ciò che sto per dire, e al tempo stesso coltivano l'interesse per questo fenomeno, di come la matematica ha avuto origine (di sfuggita: mi sembra un problema che ha molti punti di contatto con l'evoluzione del linguaggio ... ma qui mi fermo).

Il cervello umano con la costruzione della matematica ha compiuto un'operazione straordinaria: è riuscito a trascendere le stesse motivazioni che hanno portato a quel passo: ha costruito qualcosa che va ben oltre la spinta che l'ha fatta nascere.

Una particolarità della matematica, che ha grande importanza per il nostro discorso, è che con essa si acquisisce la capacità non solo di capire, ma addirittura di *pensare* cose a cui il senso comune e l'intuizione ordinaria non possono arrivare.

Qui non voglio essere frainteso: non sto pensando alla possibilità di accedere a un mondo iperurano; non sto sostenendo una visione platonista. Sto dicendo che la matematica strutturalmente è fatta in modo che ci permette di pensare cose altrimenti impensabili. Dico questo contro la visione comune, estremamente rozza e riduttiva, secondo cui la matematica consisterebbe nel fare dei calcoli, magari astrusi, complicati...

Per questo fenomeno anni fa ho coniato un'espressione: mi piace dire che per un fisico la matematica è uno *strumento di pensiero*. Senza la matematica non potremmo neppure pensare — non dico capire, ma piuttosto *concepire* — certe idee, certi concetti.

Al tempo stesso, non di rado la matematica viene creata *ad hoc*. L'interazione tra la matematica e la fisica è sempre stata estremamente complessa: a volte è nato prima il problema fisico e poi si è costruita la matematica per riuscire a risolverlo (l'esempio principale è Newton, ma la stessa cosa è capitata più volte, anche nei secoli successivi). Altre volte i matematici sono andati per la loro strada, hanno inventato delle cose (il termine più preciso è "strutture") che non si vedeva a che cosa mai potessero servire, non pareva avessero alcun corrispettivo nel mondo reale. E questo è un gioco che i matematici giocano continuamente, e di cui sono molto gelosi: guai a dire a un matematico che la matematica debba essere "utile" a qualcosa!

L'esempio più tipico sono le varietà *riemanniane*, che prendono il nome da Bernhard Riemann, il quale le concepì a metà dell'800. Inutile provare a spiegare ora di che si tratta, ma era appunto un esempio canonico di un'invenzione matematica, nata dalla generalizzazione d'idee precedenti (la teoria delle superfici di Gauss) senza nessuna pretesa né intenzione di poter avere un'applicazione fisica.

Poi un bel giorno, poco più di 100 anni fa, ad Einstein, che era impegnato a costruire la teoria relativistica della gravitazione (quella che oggi conosciamo come "Relatività generale") fu suggerito da Grossmann che forse era quello lo strumento matematico che gli serviva. Quindi in questo caso lo strumento matematico c'era già e trovò il suo impiego naturale.

Einstein lo dice in una lettera a *Sommerfeld*:

*... l'animo mi si è riempito di un grande rispetto per la matematica, la parte più sottile della quale avevo finora considerato, nella mia dabbenagine, un puro lusso. In confronto a questo problema, l'originaria teoria della relatività è un gioco da bambini.*

Come dicevo, il rapporto della fisica con la matematica è sempre stato complesso, ma è altrettanto fondamentale. Quindi il tentativo che viene fatto con la meccanica quantistica (o con qualunque altra parte della fisica) di riportarla al livello del senso comune, non funziona e non può funzionare. Il tentativo di vedere gli oggetti quantistici ora come onde, ora come particelle, per avvicinarli a un'intuizione più familiare, è destinato a fallire. Questa è la mia ferma opinione, e se posso capire di essere considerato "talebano", per quanto ciò mi dispiaccia, non basta a farmi ravvedere...

Vedo bene dagli altri interventi che la mia posizione non viene compresa. Lo capisco, ci sono più ragioni per questo. Ma tra le ragioni (che ora non posso neppure provare a descrivere) non sono disposto a mettere quella che la mia opinione possa essere in qualche misura sbagliata.

Non è possibile una divulgazione fatta in questo modo: bisogna passare per la costruzione degli strumenti matematici indispensabili. Dopo tutto non sono strumenti astrusi, però bisogna averli; e – certo - non è un lavoro che si possa fare in un libro di divulgazione. Forse lo potrebbe fare la scuola ... con molti “forse”, viste le possibilità pratiche che ci sono: il poco tempo a disposizione, e non solo quello.

Ma una cosa va tenuta ferma: ci vuole dello studio, ci vuole del lavoro, occorre sforzarsi, per acquisire la capacità di entrare in quel mondo di concetti e quindi riuscire a costruirsi le adatte immagini mentali; immagini che però sono *astratte*, costruite appunto su oggetti matematici.

Invece che cosa si fa? Un esempio che non riguarda la meccanica quantistica: avrete visto tutti il disegno del lenzuolo con la palla sopra, che dovrebbe far capire il concetto di spazio-tempo incurvato da una massa...

Oppure (cosa veramente vergognosa): quando è stato trovato il bosone di Higgs è apparsa — non in un posto qualsiasi, ma nel sito dell’INFN — una figura che mostrava una piscina con dei nuotatori. Il testo che accompagnava la figura cercava (pretendeva) di spiegare attraverso questa strampalata metafora in che modo il bosone di Higgs dava massa ai diversi campi. I nuotatori sarebbero state le particelle, l’acqua della piscina sarebbe stato il campo di Higgs che frenava i nuotatori ... e questa sarebbe stata la spiegazione!

Ma è una spiegazione questa? è divulgazione questa? Sono semplicemente imbrogli che rifiuto nella maniera più decisa: una pura mistificazione. Come ho detto prima: delle due l’una, o chi le fa non sa di che cosa parla (ma sto parlando del sito dell’INFN, che avrà i suoi addetti stampa) oppure coscientemente trae in inganno chi guarda, e neppure capisco a che scopo.

Quanto agli addetti stampa, ricorderete di certo la famosa storia del tunnel dal CERN al Gran Sasso per il quale fece una figuraccia la povera Gelmini, colpevole al più di aver scelto male il suo addetto... In quel caso si trattava di pura e semplice ignoranza, in altri (come il bosone di Higgs) è più difficile capire.

Ma sempre di cose vergognose si tratta, a mio giudizio.

Le mie idee sono ferme: un simile atteggiamento va rifiutato, non si può lasciar correre.

Secondo me ci sono nella scienza moderna concetti che è possibile accostare solo attraverso lo strumento matematico adatto, che va costruito con l’educazione e non con una lettura sbrigativa.

Ricordo bene quanto mi scandalizzai quando lessi, ormai un bel po’ di anni fa, il libro di Hawking che in Italia è uscito col titolo “Dal big bang ai buchi neri” (il titolo originario era “A short History of Time” – “Breve storia del tempo”). Nella prefazione Hawking scrive (cito a memoria): “L’editore mi ha detto che ogni formula che metto dimezza le vendite; ma state tranquilli, in questo libro ci sarà una formula sola:  $E = mc^2$ ”

Questo è un modo di fare divulgazione che io rifiuto nel modo più deciso! Che Hawking accetti di scrivere un libro dove argomenti profondissimi vengono raccontati come favolette (tra parentesi, accompagnati da figure che il lettore comune *non può* capire) dimostra solo, nell’ipotesi migliore, che lui si concentra solo sui suoi problemi di ricerca, e non si è mai posto il problema cognitivo di cui ho discusso in questa seconda parte della mia replica. Se questo significa che sono un “talebano”, ebbene sì, lo confesso: sono un talebano.

Per concludere, vorrei aggiungere qualcosa al fine di evitare un altro possibile equivoco.

La mia insistenza sulla matematica non deve essere presa come indicativa di una visione secondo cui la fisica è *essenzialmente matematica*. Niente potrebbe essere più lontano dal mio pensiero!

La fisica è fisica, ha una sua specificità e autonomia: concettuale, epistemologica, fattuale... Un punto che non si deve trascurare è che per arrivare a capire qualcosa del bosone di Higgs bisogna anche aver capito abbastanza di un bel po' di altre parti della fisica. (So che questa frase non basta per farmi capire: prendetela solo come una dichiarazione di principi, a futura memoria...)

Resta il fatto che non si può parlare, *pensare*, di fisica senza matematica. Questo è un fatto di cui sono profondamente convinto. Sono anche convinto che tutta questa problematica abbisognerebbe di ben altri approfondimenti, e che a monte occorrerebbe risolvere quelle difficoltà di comunicazione che — se non siamo ipocriti — dobbiamo ammettere che esistono anche fra di noi.

Vasto programma...

### **Fabio Fantini**

Replico in qualche misura professor Fabri, di cui comunque ho apprezzato molto l'intervento. Capire la matematica che è sotto gran parte della fisica e anche di altre discipline, per esempio l'informatica, non è una cosa che si possa acquisire rapidamente a qualsiasi età e su larga scala. Allora o rinunciamo alla possibilità di fare una divulgazione che vada ben oltre una cerchia ristretta oppure cerchiamo di rappresentare in modo più intuitivo concetti che sono resi con precisione solo attraverso un rigoroso formalismo matematico.

Io ho terminato lo studio formale della matematica all'università dopo due anni e ho qualche difficoltà per esempio a capire che cosa ci fa un numero immaginario nell'equazione di Schrödinger, visualizzo a mala pena la rappresentazione sul piano dei numeri complessi, più grazie all'insieme di Mandelbrot che ad altre applicazioni. Credo di non essere del tutto digiuno di educazione scientifica, ma so bene anche per la mia esperienza divergente con un compagno di studi (io ho studiato biologia, lui matematica), che se uno non comincia ad adattare i propri circuiti neurali a quel tipo di ragionamento in un'età ancora giovanile, difficilmente potrà farlo in una età avanzata. L'acqua delle piscina come analogo del campo di Higgs probabilmente fa inorridire lo specialista o chi ha una conoscenza disciplinare sufficientemente precisa, ma può aver avvicinato a comprendere non il senso, ma l'importanza della scoperta. (Non credo che si possa capire che cosa sia un campo Higgs grazie a questa analogia, che può però averne fatto comprendere la pervasività nei confronti della massa delle particelle. In ogni caso credo che la domanda da farsi sia se quell'esempio, anche fuori centro e errato, ha comunque prodotto interesse e avvicinamento in una cerchia di persone più ampia di quelle che possono vantare una conoscenza specialistica.

### **Riccardo Mansani**

Una velocissima replica. Anch'io ho visto quella vignetta dell'ISFN che vorrebbe dare un'idea del campo di Higgs e non ne ho ricavato niente, nessuna indicazione. Però, anche qui per distinguere quello che può essere una buona divulgazione da una cattiva divulgazione, io non la metterei sullo stesso piano dell'esempio del tappeto elastico con la pallina al centro che vuol simulare la gravità come effetto della deformazione dello spazio, questa, a me, sembra una buona metafora, io da quella, facendo un piccolo sforzo di astrazione, credo di essere riuscito a intuire almeno qualcosa di cos'è l'incurvatura dello spazio. È una buona metafora in quanto ci indica in che direzione deve andare l'astrazione. Questo per dire che si possono fare esempi corretti ed esempi sbagliati e distinguere tra una buona e una cattiva divulgazione.

## **Fabio Fantini**

Non ci sono altre richieste di intervento. Il professor Fabri ha espresso con chiarezza il suo pensiero che sicuramente ci vede un po' meno talebani su quel fronte, comunque non è tanto una esigenza, quanto una preoccupazione che io ho anche per aggiustare la mia comprensione del mondo: sapere che ho dei limiti, che non posso recuperare alla mia età e con la mia storia personale, ma non voglio rinunciare del tutto ad avere qualche idea, ad avere una visione del mondo che la fisica quantistica mi può dare. Non pretendo di avere una visione precisa né di disquisire sul gatto di Schrödinger o sul dualismo onda/corpuscolo, mi accontento di origliare e di cercare di farmene una rappresentazione. In fondo anche a questo può servire una divulgazione che sia fatta da persone che sono consapevoli di ciò che narrano e mi sembra importante, la consapevolezza disciplinare di chi si prende il compito di divulgare; poi il livello a cui si decide di farlo in alcuni casi mirerà a un obiettivo alto, in altri un obiettivo basso: a me stanno bene tutte e due le cose.

## **Anna Maria Rossi**

Uno dei punti fondamentali è quanto chi fa divulgazione conosce la materia di cui parla o scrive. Tutti abbiamo visto Piero Angela e i suoi programmi che hanno sicuramente fatto la storia della televisione, facendo anche una discreta opera di divulgazione, sebbene non del tutto corretta. Da biologa ho colto che in molti casi venivano commessi errori o operate semplificazioni eccessive sugli argomenti di biologia e posso immaginare che ce ne fossero altrettanti quando si parlava di fisica o di chimica, che magari mi sono sfuggiti per la mia incompetenza. D'altra parte il tuttologo non esiste, e questo è un punto importante, l'obiettivo del buon divulgatore deve essere condividere conoscenze che si padroneggiano bene e non semplificare in modo indebito.

La divulgazione alla Piero Angela è anche uno spettacolo e, quindi, necessariamente segue le logiche dello spettacolo, ma lo scienziato non può fare della scienza uno spettacolo. Per noi la scienza è un modo di pensare e di guardare la realtà, per questo, secondo me, abbiamo l'obbligo morale di diffondere le conoscenze ma possiamo farlo al meglio solo se ci concentriamo sulla divulgazione di ciò che conosciamo meglio, nel nostro campo.

Credo che il seminario che ha fatto il professor Fabri da questo punto di vista sia magistrale perché praticamente non ha parlato della biologia quantistica, però ci ha dato degli strumenti per saperne di più e per avvicinarsi a questa materia con cautela e senso critico. Ci ha detto: "Io queste cose di biologia non le conosco sufficientemente per esprimere un parere e non ve le racconto, ma sono raccontate in questi testi che potete consultare". Ci ha dato un quadro, a mio parere chiaro, sottolineando a quali tranelli dobbiamo stare attenti quando leggiamo di queste cose. Questo è stato il succo del suo seminario e credo che sia stato un esempio di buona divulgazione, proprio per questo atteggiamento rigoroso.

Ci ha dato un quadro, a mio parere chiaro, a quali tranelli dobbiamo stare attenti quando leggiamo di queste cose. Questo è stato succo del suo seminario e credo che sia stato un esempio di buona divulgazione proprio per questo atteggiamento rigoroso.

Il compito che devono assumere gli scienziati è divulgare ciò che conoscono meglio nel proprio campo perché la divulgazione alla scienza. La divulgazione alla Piero Angela è anche uno spettacolo con le sue logiche, la scienza non è uno spettacolo, ma un modo di pensare e di guardare la realtà

## **Fabio Fantini**

Possiamo concludere qui con una postilla finale: esco da questa esperienza con una impressione molto favorevole. Mi piacerebbe che questo esempio venisse esteso ad altre iniziative che, come NATURALMENTE

scienza, potremmo prendere nei prossimi mesi. È rimasta in sospeso una discussione sulla Sintesi Estesa per esempio, mi piacerebbe che noi che siamo qui e magari qualcun altro che oggi non è potuto essere presente ci impegnassimo a organizzare altri incontri, magari in una sede prestigiosa e piacevole come quella che ci ospita oggi. Nella discussione non abbiamo raggiunto una uniformità nei dettagli, ma c'è un interesse che ci accomuna, anche se abbiamo tattiche, forse strategie diverse: fare una divulgazione che abbia come obiettivo il coinvolgimento di un numero maggiore di persone nella consapevolezza dei processi di conoscenza scientifica. Il nostro obiettivo comune è quello di continuare su questa strada.

Grazie a tutti.

---

