

## Lo strano caso del paperotto giallo



### 5 - Atomi e piume gialle

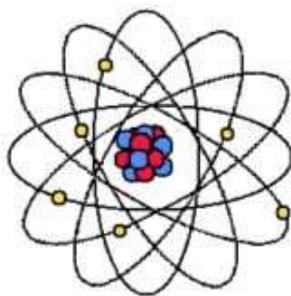
Com'è fatto, allora, un atomo?

Partiamo dall'idea che, da ogni punto di vista, quel che osserviamo di un atomo ci fa pensare che sia una pallina più o meno rigida, dal diametro abbastanza ben definito: come dicevamo, circa 106 pm per l'idrogeno, 150 pm per il carbonio, 250 pm per il ferro.

Magari, quando è impegnato a formare legami in una molecola, possiamo immaginarcelo come una pallina più o meno deformata. In effetti, le dimensioni di un atomo legato sono un po' diverse rispetto a quelle di un atomo libero.

Ma, se la materia può essere toccata, se con le nostre dita - fatte di acqua e composti di carbonio - non riusciamo a schiacciare una biglia fatta di ferro, l'idea delle palline rigide ci sembra sensata.

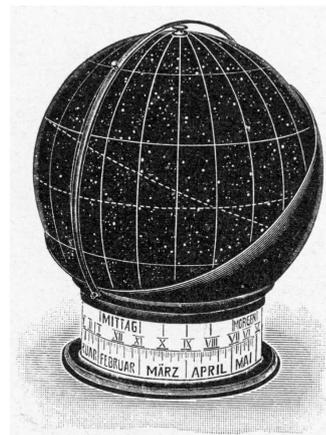
E adesso passiamo alle raffigurazioni di un atomo visto molto da vicino. Nelle illustrazioni che possiamo trovare ovunque, di solito vediamo qualcosa di questo tipo:



### Palle celesti

L'immagine è rassicurante. Infatti è un'immagine alla quale siamo, magari inconsciamente, abituati ormai da secoli. L'aspetto è quello di una *sfera armillare*, cioè di quei modelli, tipicamente costruiti in rame o bronzo, con cui gli astronomi raffiguravano il cosmo.

Poco importa, per la nostra discussione, che sia un modello geocentrico (con la terra in mezzo ed i pianeti ed il sole intorno), od eliocentrico (con il sole in mezzo), come quelli prodotti dal sedicesimo secolo fino ad oggi: l'aspetto era quello.



Guardando una sfera armillare (senza piedistallo!), ci rendiamo conto che per prima cosa questo oggetto è – appunto – sferico. Se ne avessimo molti e li versassimo in uno scatolone come palloni da basket nel cesto di una palestra, non ci sarebbe molta differenza rispetto ai palloni: la cosa importante infatti è che in una sfera armillare le orbite dei pianeti sono *oggetti materiali*. Sono solide strisce di metallo, in cui il pallino che rappresenta il pianeta è incastonato, saldato<sup>1</sup>.

Questa è una delle osservazioni da cui dobbiamo partire. Fino ai tempi di Newton, ed in parte anche oltre, gli astronomi avevano dei seri problemi a capire *come mai* i pianeti girassero intorno alla terra – o al sole, non cambia molto – anziché allontanarsi, oppure cadere verso il centro. Sia che le orbite fossero circolari, sia che fossero ellittiche come aveva compreso Keplero, o qualunque altra forma avessero, il fatto che restassero sempre rigide e costanti portava realmente a credere alle *sfere celesti*, intese non come figure geometriche ma come oggetti fisici.<sup>2</sup>

Immaginiamole come sfere concentriche invisibili, di cristallo o di qualche altro materiale trasparente, libere di ruotare, ognuna con incastonato dentro il suo pianetino; oppure nastri altrettanto invisibili simili alle liste di ottone delle figure precedenti. Questi oggetti, girando intorno al sole (o alla terra, a seconda dei gusti), trasportavano con sé il proprio corpo celeste. Anche perché, se togliamo queste orbite materiali, cosa mai faceva star lì i pianeti? Una spiegazione plausibile è che ogni pianeta o stella fosse dotato di una robusta schiera di angeli che lo mantenevano sospeso nel "suo" cielo e si incaricavano di spingerlo eternamente lungo la sua orbita: non sto scherzando, idee simili erano ancora in circolazione ai tempi di Newton.

Prima di metterci a ridere dicendo che queste teorie sono assurde, pensiamoci un attimo: i nostri insegnanti ci hanno parlato di leggi di Keplero e di Newton, di forza di gravità eccetera, cosa di cui evidentemente i nostri compagni di classe di 350 anni fa non sentivano parlare, mentre per loro era normale sentir parlare delle idee precedenti. Le studiavano e prendevano dei bei voti.<sup>3</sup> Quando noi abbiamo sentito le nostre moderne spiegazioni, ci abbiamo creduto, ci siamo studiati per bene la lezioncina e abbiamo preso un voto, direi, perlomeno tra l'8 ed il 9. Ma... siamo sicuri di saper spiegare *cosa sia* la forza di gravità e *come e perché* si manifestino i suoi effetti, meglio di quanto sapremmo descrivere la propulsione alare di un angelico stormo?

## La pizza all'idrogeno

Torniamo al nostro atomino fatto di braccialetti della figura iniziale.

Se le orbite in cui stanno infilzati gli elettroni sono in numero sufficiente, tutte omogeneamente distribuite, costruite in qualche materiale solido ed elastico, dicevamo che l'oggetto potrebbe comportarsi, visto da fuori, come una sfera. Più o meno come un gomitolino, se vogliamo. A me verrebbe in mente di curvare dei raggi da ruota di bicicletta, oppure saldare degli anelli di acciaio armonico; qualche giovane amica che ha al polso alcuni bracciali etnici di filo metallico, nel tempo che ci ho messo per dire queste cose probabilmente è già passata alla realizzazione.

Ma in questa rappresentazione ci sono diverse cose che non tornano.

Prima di tutto, per ottenere il nostro gomitolino sferico, capace di rotolare, rimbalzare ed appoggiarsi sugli altri gomitolini, avremmo bisogno di *molti* braccialetti metallici, omogeneamente distribuiti e ben fissati fra di loro. Se ne abbiamo solo tre o quattro, la sfera risulta piuttosto precaria. Ma l'atomo più abbondante nell'universo, quello meglio studiato e anche più facile da studiare, è l'atomo di *idrogeno*.

---

<sup>1</sup> *Armilla* vuol dire braccialetto, e qualcosa di simile si può montare intrecciando una serie di leggeri braccialetti rigidi.

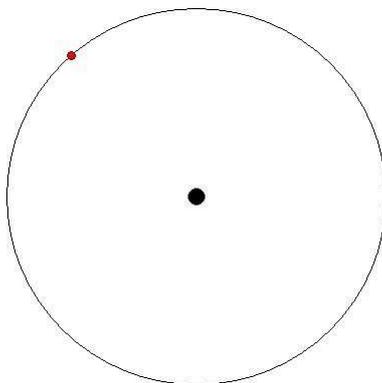
Una discreta collezione di sfere armillari si vede nello studio di Remus Lupin nel terzo film di Harry Potter.

<sup>2</sup> Chi ha studiato disegno tecnico dovrebbe sapere come sono fatte quelle curve chiamate epicicli. Potrebbe essere interessante andare a ricercare cosa c'entrassero gli epicicli con il moto dei pianeti nel sistema tolemaico.

<sup>3</sup> Tra romanzacci fantasy - new age, e stregoni che ci predicono disgrazie in televisione, viene il dubbio che siamo molto più creduloni noi di loro...

E l'atomo di idrogeno, mi sembra di ricordare, di elettroni da montare sui braccialetti ne ha solo UNO.

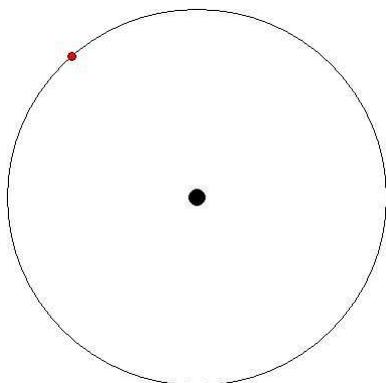
Per cui dovrebbe essere fatto così:



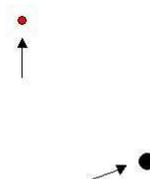
Qualunque sia il materiale con cui lo costruiamo, questo non è, e non sarà mai, una sfera. Potrà somigliare ad un CD, ad una ruota da bicicletta o ad una pizza, ma in ogni caso sarà sempre e soltanto un *disco piatto*.

Una ruota senza raggi... una ruota vuota, in effetti. Ma il cerchione c'è davvero?

Naturalmente il disegno precedente è uno scherzo. Sappiamo benissimo – ce lo raccontano da una vita – che l'atomo di idrogeno è fatto solo di un elettrone che gira intorno ad un solo protone, e senza il cerchione. La nostra stecca metallica che rappresenta l'orbita non c'è: il cerchio rappresenta solo una traiettoria! Per essere più credibile, il nostro atomo dovrebbe essere fatto...



...non così



...ma così:

e a questo punto il nostro modello del gomito è definitivamente estinto. Una pallina più grossa ed una più piccola; con la seconda che gira intorno alla prima percorrendo traiettorie circolari... Eppure sappiamo che tutto questo, visto da fuori, si comporta come quella famosa pallina rigida del diametro di circa 106 pm.

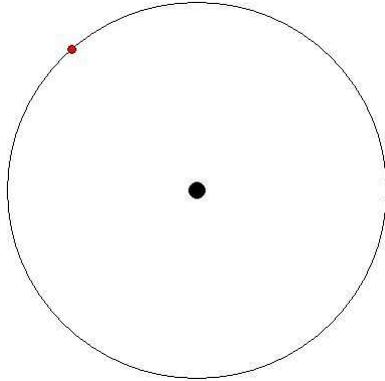
Però, fermi tutti. Il disegno di sopra non è nemmeno in scala. Non abbiamo ancora deciso che dimensioni abbia l'elettrone rispetto al protone (anche se istintivamente ce lo siamo immaginato *più piccolo*), però sappiamo che le dimensioni del nucleo, rispetto a quelle esterne della famosa sferetta - atomo di idrogeno, sono *enormemente* più piccole.

Avevamo detto che il nucleo è *circa settantamila volte più piccolo*, mi pare?

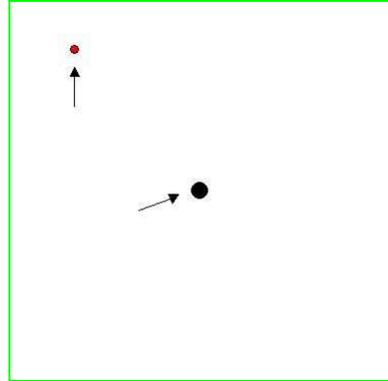
Vediamo di rappresentarci le cose in scala. Un settantamillesimo è più o meno il rapporto che c'è tra le dimensioni di un moscerino (1.4 mm) e quelle di un campo da calcio (100 m). L'elettrone, a

questo punto sarebbe un afide quasi invisibile... che volerebbe fittamente intorno al moscerino, ma lasciando questo al centrocampo di San Siro mentre lui non si avvicina mai a meno della distanza del terzo anello?...!...?

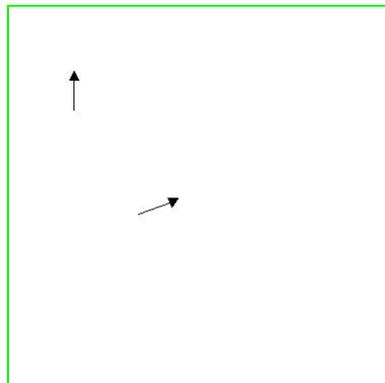
Riprendiamo ancora la figura di sopra:



non è così



nemmeno così:



...e allora è così?

verdino per riconoscere le proporzioni dell'immagine)

(stavolta ci ho messo intorno il bordo

Se sulla pagina il diametro dell'orbita è di 5 cm, il diametro del protone è di  $0.7 \mu\text{m}$ , meno di un millesimo di millimetro!

Ma come è possibile che l'atomo ci sembri una sferetta rigida, se è un oggetto in cui praticamente tutta la massa se ne sta concentrata in quel pallino invisibile, mentre la superficie è coperta solo da quell'altro pallino più piccolo ancora, e leggerissimo?

### Atomi a misura d'uomo (e di papero)

Allora, eccoci **qua** con il nostro esempio più famoso.

Facciamo un esempio su scala umana, così riusciamo a riportare le proporzioni a oggetti che siamo in grado di controllare. Supponiamo che il protone abbia il diametro pari alla mia altezza, 176 cm.

L'elettrone quanto sarà grande? Probabilmente piuttosto più piccolo.

Non abbiamo ancora capito di che materia siano fatti questi oggetti più piccoli dell'atomo; se avessero la stessa densità, o massa volumica, cioè se fossero costituiti entrambi dello stesso tipo di materia<sup>4</sup>, il rapporto tra i loro diametri si potrebbe calcolare facilmente con un minimo di

<sup>4</sup> e, attenzione, questo è un ragionamento **totalmente sbagliato!** In realtà la "materia" di cui è costituito il protone è totalmente differente da quella dell'elettrone, ma questi sono ragionamenti che si possono capire solo con una buona dose di meccanica quantistica e di teoria delle particelle subatomiche. Nel capitolo 7 c'è qualche dato ulteriore.

geometria: il volume della sfera è direttamente proporzionale alla massa, il diametro varia con la radice cubica del volume, e quindi della massa. Quindi, se il rapporto tra le due masse è di 1:1836, il rapporto tra i due diametri è 1:12.25 (dato che  $12.25^3 = 1836$ ).

Facendo la stessa proporzione, 176 centimetri diviso 12.25 fa 14.4 cm... più o meno le dimensioni del mio paperotto giallo.



E adesso vediamo di capire a che distanza deve volare. Molto lontano, vero? come dicevamo, il raggio della sfera esterna (dell'atomo) è circa 70 000 volte il raggio del nucleo. Il nucleo-Sergio è 1.76 m di diametro, quindi il raggio della sfera esterna (la quota alla quale deve volare l'elettrone-papero) è circa 62 km... *sessantadue chilometri!*

Dobbiamo fare qualche altra approssimazione per cercare di capire cosa significhino questi numeri.

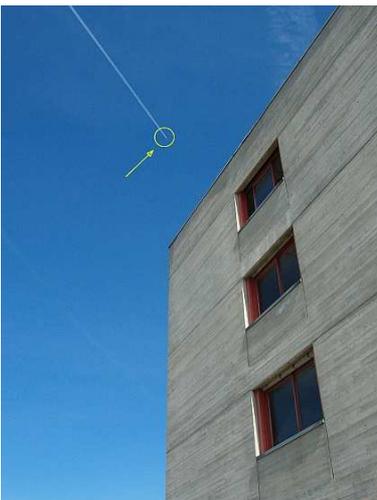
Il volatile nella foto qui a fianco è un aereo di linea intercontinentale, del genere di quelli che vediamo incrociare continuamente sopra la nostra testa, noi che viviamo all'incrocio fra gli aeroporti della Lombardia.

La lunghezza dalla punta del becco al suo sottocoda è di circa 64 m.

La quota a cui vola è intorno a 10.7 km.



Come dire: *è un po' più grande* rispetto al nostro paperotto. Oltre *400 volte* più lungo, se vogliamo essere precisi. Ma il nostro paperotto vola *sei volte più lontano*, secondo il calcolo precedente.



Quando l'aereo ci vola sopra le teste, quello che vediamo è un'immagine di questo tipo:

Ci vorrebbe un occhio piuttosto buono e una discreta attenzione per accorgerci della presenza dell'aereo, il cui colore si confonde con quello del cielo, se non fosse per la vistosa scia che l'aereo si lascia dietro. Facendo un minimo di calcoli, possiamo accorgerci che, quando una scia è ben definita e persistente, perché l'aria è calma, può essere larga da due a dieci volte la larghezza dell'aereo, e la lunghezza può essere di molti chilometri. Per questo la vediamo facilmente.

Ma la scia *non è* l'aereo: non è quasi nulla, se non una finissima sospensione di goccioline d'acqua e di cristalli di ghiaccio che brilla alla luce del sole. Non possiamo farci *toc toc* come sull'aereo, per sentire se è solida.<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Gli idrocarburi bruciati nei motori producono anidride carbonica e acqua. Ogni 100 g di combustibile si ottengono circa 140 g di acqua. La temperatura alla quota di crociera dei jet è al di sotto di  $-40^{\circ}\text{C}$ : in quelle condizioni, il vapore d'acqua dello scarico condensa quasi subito e in buona parte si trasforma direttamente in ghiaccio.

## Non è necessario arrivare fino ad Heisenberg...

Il paradosso del paperotto giallo, l'esempio che ci fa capire che evidentemente un atomo non può essere realmente formato da una pallina che gira intorno a un'altra, e nemmeno da 10 o 20 o 50 palline, sta proprio qui.

Se il nostro atomo è una pallina rigida (non importa che sia liscia e lucida come una sferetta d'acciaio, può anche essere soffice e morbida come le piume del papero) questo significa che, quando un altro atomo lo avvicina, *da qualsiasi parte*, le loro superfici devono modo toccarsi, respingersi, rimbalzare: esattamente come le superfici esterne delle biglie, dei gomitoli, dei paperi.

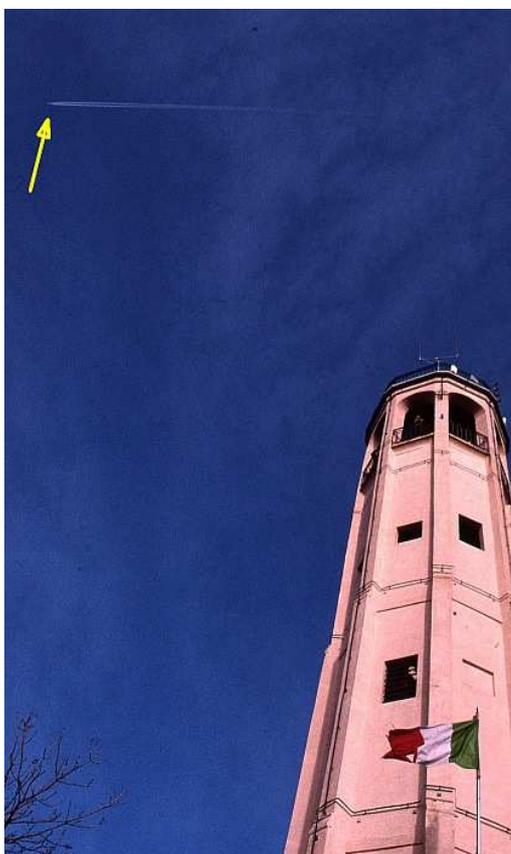
Ma perché questo possa avvenire, in base al nostro modello fatto di palline in movimento, la "superficie" dell'atomo non può che essere data dalla presenza, *in quel punto e in quel momento*, dell'elettrone. E se, toccando l'atomo *in qualsiasi punto, in qualsiasi momento* ci sembra di toccare la superficie, questo vuol dire che *l'elettrone è contemporaneamente in ogni punto?*

Ripeto perché forse non è chiaro: non basterebbe pensare che l'elettrone si muova velocissimo verso l'eventuale intruso, enormemente più veloce della più veloce racchetta da ping pong. Per poter farsi vedere *ovunque in ogni momento* dovrebbe viaggiare a una velocità realmente *infinita*. In effetti, secondo il modello di Bohr, l'elettrone, si dovrebbe muovere molto velocemente: a una velocità non molto lontana da quella della luce. Ma è comunque una velocità finita, limitata: non è ancora nulla rispetto al poter essere *dovunque* e in *ogni* momento.

Riproviamo a vedere il nostro ragionamento con queste due foto: in quella di sinistra, si vede la "copertura" del cielo data da un aereo lungo oltre 60 m, alla distanza di una decina di chilometri (ovviamente, dimentichiamoci della scia). Fatichiamo a vederlo.

In quella di destra, si vede la "copertura" del cielo data da un paperotto 400 volte più corto e che vola sei volte più lontano. Il cielo è *ovunque e simultaneamente* giallo.

Toccandolo in ogni punto, sentiremmo *sempre e contemporaneamente* lo stesso quack.



Un ultimo passaggio per far sembrare ancora più demenziale il ragionamento? Il nostro paperotto, spiaccicato a pelle d'orso, copre poco più di 1 dm<sup>2</sup>. La superficie di quella sfera, di quella cupola gialla che ci avvolge uniformemente alla distanza di oltre 60 km sopra e sotto i nostri piedi, è di 50000 km<sup>2</sup>: quanto Piemonte e Lombardia messe insieme. Per ricoprire di paperi quella superficie, ce ne vorrebbero *cinquemila miliardi*, ma ce n'è uno solo e ci riesce da solo!

Eppure l'atomo è fatto proprio così. Per comprendere che il modello della sfera cava di Rutherford e Moseley è evidentemente paradossale, per accorgersi del fatto che il nostro modo di vedere le cose non può andar bene per descrivere gli oggetti atomici, se ci pensiamo bene non era necessaria nessuna delle incongruenze del modello di Bohr in tutte le sue varianti; non era necessario cercare di capire il significato fisico dei calcoli di Schrödinger o di Heisenberg.

### **Ragioniamoci su un momento**

I calcoli che abbiamo fatto, sia pure nella loro grossolanità<sup>6</sup>, costituiscono a tutti gli effetti un modello matematico dell'atomo come risulta dai calcoli di Rutherford e dei suoi collaboratori. Ognuno di noi potrebbe costruirsi, senza grossi problemi, gli apparecchi relativamente semplici di quei nostri antenati di un secolo fa (la sola difficoltà è procurarsi un po' di radioisotopi, che oggi sono materiali controllati).

Usando un po' di geometria per ragionare sui risultati, arriveremmo alle loro stesse conclusioni: la materia è costituita sostanzialmente *dal nulla circondato di niente*, salvo per quei microscopici e invisibili frammenti: eppure, questa materia si rivela ai nostri occhi dura, piena, impenetrabile.

La validità di tutti i modelli quantomeccanici, introdotti per uscire dai guai della scienza di fine '800, si misura con la loro capacità di spiegarci queste situazioni paradossali: di cui possiamo accorgerci, però, quasi senza matematica.

Se ci sembra assurdo o inspiegabile il principio di indeterminazione di Heisenberg, ci sembra forse meno assurdo quello che chiamo il paradosso del paperotto giallo?

Gli aspetti realmente sconvolgenti delle riflessioni scientifiche del XX secolo ci sembrano molto più tollerabili e comprensibili se ci rendiamo conto che derivano dalla necessità di capire, con il rigore della matematica, cose che sono apparentemente altrettanto illogiche ma molto più vistose... per chi le voglia vedere.

Come avevamo detto nel primo capitolo, per comprendere le cose è opportuno guardarle per come sono, cercando *poi* di costruire dei modelli che possono aiutarci a capire le caratteristiche di quella realtà. Non ha nessun senso, non ci porta nessun vantaggio pretendere di comprendere gli aspetti teorici di un modello letto su un libro, se non cerchiamo continuamente di vestire con quel modello la realtà, e a controllare se gli si adatta oppure no.

Confondere i modelli matematici con la realtà che essi descrivono, ci impedisce di vedere la realtà nei suoi aspetti apparentemente più incredibili e, quack!, divertenti.

Dopodiché, continuiamo pure a imparare a memoria la filastrocca unoessedùe-dueessedùe senza saper distinguere il concetto di "orbitale" da quello di "zucchina": capiremo della chimica meno di quanto ne capisce un paperotto giallo.



### **Ma allora, perché gli atomi si comportano come palline?**

Ah, già. Come in tutte le favole, non basta dire che il re è nudo o che l'uva è acerba. Bisogna anche metterci qualcosa di costruttivo.

---

<sup>6</sup> Naturalmente posso aver fatto qualche errore di calcolo. Se ne vedi uno, gentilmente, segnalamelo subito: anche perché - se sei un mio studente - potresti averne qualche utilità...

Il succo di tutto il ragionamento è che evidentemente pensare ai nuclei e agli elettroni come a palline rigide, di dimensioni e traiettorie ben definite, ovverossia a oggetti che somiglino ai pianeti che girano intorno al Sole o a Valentino Rossi che corre su una pista, semplicemente *non ha senso*.

Quando ho raccontato per la prima volta la storia del paperotto giallo il discorso serviva sostanzialmente a mettere in guardia i miei giovani amici dal credere "di aver capito" solo perché si erano sciropati una buona dose di chiacchiere da uno qualsiasi di quei terrificanti Libri Di Testo che circolano nelle nostre scuole. Ma poi la spiegazione non può fermarsi. Che modelli possiamo utilizzare, per descrivere il fatto che gli atomi esistono e sono solidi anche se sono fatti di nulla?

In effetti, per capire come possano gli atomi toccarsi e rimbalzare pur non avendo una superficie esterna materiale, c'è un esempio assolutamente banale.

Anche se mi rendo conto che per certi aspetti è fuorviante e non può essere preso alla lettera.

Basta avere giocato qualche volta con delle calamite.

Se prendiamo delle barrette magnetiche, meglio ancora se di quelle potentissime che vengono vendute anche come costosi giochi di costruzioni<sup>7</sup>, ci accorgiamo di quel fatto arcinoto per cui, avvicinando i due poli opposti di due barrette, queste si attirano con forza, mentre avvicinando il nord al nord, o il sud al sud, sentiamo una forza invisibile che ci impedisce di congiungerle.

L'esempio, in senso rigoroso, presenta dei difetti<sup>8</sup>, e invoco la clemenza di qualche mio bravo collega di fisica che mi sta già guardando male: però possiamo raffigurarci che l'elettrone, trovandosi in uno stato di equilibrio intorno al nucleo, generi un campo di forza che va a scontrarsi con il campo di forza dell'elettrone sull'atomo vicino. Sono questi campi di forza che vengono a contatto e si respingono, più o meno come vediamo nelle calamite, e non i minuscoli oggetti che con il loro movimento li generano.

Un esperimento fatto tante volte è quello di mettere un foglio di carta sopra un magnete, versando su questo della fine limatura di ferro.

Il professore di scienze delle medie, di solito, commenta dicendo che la polvere di ferro va a disporsi lungo le linee di forza del campo magnetico, e tanto più queste linee di forza sono intense e fitte, tanto più la limatura di ferro vi si addensa.

Ovvio, naturalmente, che anche le "linee di forza" non sono oggetti materiali, ma solo rappresentazioni dell'intensità di attrazioni e repulsioni, anche se per esempio vanno benissimo per calcolare il funzionamento di una dinamo o di un motore elettrico.

Però... quelle linee, quei frammenti di limatura di ferro, non assomigliano molto alle libresche rappresentazioni degli orbitali, individuati come una serie di puntini più o meno fitti?

Beh, sì: infatti quel modo di rappresentare l'intensità di campi elettromagnetici, come figure ombreggiate, deriva sicuramente anche dall'esempio della calamita sotto la carta.

Ne sbuca fuori un comune modo di "spiegare" il concetto di orbitale (che *non* si può spiegare senza un pacco di matematica!). Vergogna, qualche volta l'ho usato anch'io. Ma ero giovane...

Il principio di Heisenberg (sempre quello del capitolo precedente) ci impedisce di conoscere accuratamente nello stesso istante *sia* la posizione *sia* la velocità dell'elettrone; ma nulla ci vieta di immaginare di fotografarlo, accontentandoci della posizione senza preoccuparci della traiettoria.

Questa *fin*ta spiegazione dice qualcosa di simile: supponiamo di fotografare un enorme numero di

---

<sup>7</sup> Qui mi verrebbe da parlare del neodimio, del samario, della chimica dei supermagneti, ma ovviamente non lo faccio.

<sup>8</sup> Funzionerebbe molto meglio l'esempio di palline cariche elettrostaticamente, ma è un effetto meno vistoso e più scomodo da manipolare

volte l'elettrone, senza muovere la macchina fotografica. Se sovrapponiamo tutte le immagini, le zone in cui l'elettrone passa più tempo conteranno dei puntini molto fitti, e viceversa. Così abbiamo reso il concetto di probabilità. Ma se così fosse, vorrebbe dire che l'elettrone si trova in ogni momento in *un solo* singolo punto, quello fissato su ogni foto, e allora, ri-quack!, come fa il cielo ad essere *tutto* giallo simultaneamente?

Il fatto è che l'elettrone *non* si comporta come una pallina che possiamo fotografare. E' lì e basta, ed i suoi effetti si manifestano contemporaneamente, più o meno intensi, in tutti i punti fra loro geometricamente equivalenti (per esempio la solita sfera).

...

...Quindi non possiamo descriverlo come una pallina? OK, è quello che sto ripetendo.

...Quindi ci viene in soccorso la descrizione di un'onda, più o meno intensa qua o là? OK, questo è il *modello* di calcolo che usiamo, a patto di non credere che una rappresentazione grafica dell'intensità dell'onda (l'orbitale) sia realmente un oggetto.

E nemmeno *"la zona dove l'elettrone passa la maggior parte del suo tempo"*.

Definizione che va bene per distinguere aule, palestre, bar e corridoi della scuola, in base alla fauna studentesca che li popola durante un'ora di lezione (o di non-lezione).

Ma che con l'elettrone, a meno di considerarlo veramente giallo e piumato, non c'entra nulla.

#### **Piccola dedica n.5.**

Questo capitolo è dedicato ai tanti insegnanti, con o senza laurea, miei maestri e/o colleghi, che nel dubbio tra fare un esempio noioso o uno spiritoso hanno sempre saputo quale scegliere.

Anche perchè, dato che *la natura è affascinante*, è impossibile che non si possa dire in modo più divertente le cose che possiamo dire in modo noioso, e spesso l'esempio risulta anche più corretto.

Certo, questa impostazione richiede preparazione, fantasia, voglia di comunicare, allegria. Tipiche doti di un prof, in fondo.

Fra tutti, un ricordo va al mio insegnante di matematica del Setificio, Giuseppe Morasca, che aveva un vero talento per gli esempi che fanno storcere il naso ai precisini-noiosini-perfettini, ma sanno invogliare allo studio chi sia curioso di scoprire cose nuove.

