

La teoria atomica

Dagli antichi greci alla meccanica ondulatoria

DALL'ANTICA GRECIA ALL'ATOMO DI DALTON

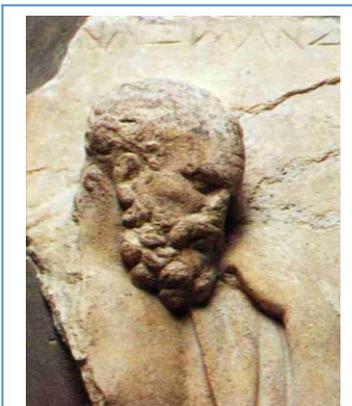
Sulla natura e origine della natura cominciarono a interessarsi i primi filosofi dell'antica Grecia. La fisica, in greco *physis* (φύσις), natura, è la realtà che diviene, la realtà in movimento che è solo *una parte del Tutto*. La radice di *physis* proviene dall'indoeuropeo *bhu*, legato a *bha*, luce: dunque, *physis* significherebbe originariamente *l'essere-luce*. Ne deriverebbe che per i primi filosofi la *physis* è *il Tutto*, è l'essere che si mostra illuminato, dunque visibile e dunque comprensibile. A differenza delle precedenti cosmogonie che pretendevano anch'esse di spiegare tutta la realtà, ora si pretende di spiegare tale realtà senza gli impacci, i fraintendimenti e i veli del mito, che nella realtà, nella *physis*, coinvolgevano le presenze determinanti degli dei e degli esseri sovranaturali. Eliminata, nella ricerca dell'*interpretazione razionale del Tutto*, ogni sovrastruttura mitica, resta la *physis*, la natura. Il termine di natura coincide infatti con quello stesso di cosmo: la *physis* è il *kosmos* (κόσμος), la cui radice è *kens*, che si rintraccia successivamente nel latino *consere* (annunciare con autorità). L'annuncio autorevole è la determinazione non smentibile, incontrovertibile, che non può essere messa in discussione: è la verità.

Così Aristotele, nella *Metafisica*, afferma che «la maggior parte dei primi filosofi ritennero che i soli principi di tutte le cose fossero di specie materiale, perché ciò da cui tutte le cose hanno l'essere, da cui derivano e in cui si risolvono». Questo fu da loro chiamato *elemento*, principio delle cose e perciò ritennero che *nulla si produca e nulla si distrugga*, perché una siffatta sostanza si conserva sempre. Talete di Milèto (625/640 - c.547a.C.), il fondatore di tale forma di filosofia, dice che è l'*acqua* il principio delle cose e per questo sosteneva che anche la terra sta sull'acqua: forse prese quest'ipotesi osservando che l'alimento di ogni cosa è umido, lo stesso calore deriva dall'umidità e di essa vive e ciò da cui le cose derivano è appunto il loro principio. È dunque da qui che egli trasse la sua ipotesi e dal fatto che i *semi* di tutte le cose hanno una natura umida». Talete potrebbe anche aver ricavato la sua dottrina da osservazioni meteorologiche, osservando i mutamenti di forma assunti dall'acqua passando allo stato solido e gassoso, le ricadute in forma di pioggia dell'evaporazione delle acque, le improvvise formazioni di nuvole e venti nel mare. Per questo arriva alla conclusione che *l'Acqua è sostanza elementare generatrice di tutto*.

Per Emanuele Severino «l'acqua di cui parla Talete non è *l'acqua sensibile* in cui ci si bagna e che si beve: l'acqua sensibile – intesa cioè nel significato ordinario della parola – è infatti soltanto *una delle molte e diverse cose dell'universo*, e in quanto è soltanto una tra le molte non può essere ciò che vi è di identico in ognuna di esse, e quindi non può nemmeno essere il principio unitario *arché* (ἀρχή), da cui tutte derivano. L'acqua si presenta in tal modo come una metafora che non riesce a sopportare il peso di ciò che essa intende esprimere».

L'uso di spiegazioni naturalistiche anziché mitico-religiose distingue radicalmente la cosmologia di Anassimandro (610a.C.–564a.C.) e si inserisce nel grande movimento di de-mitificazione della conoscenza dei filosofi pre-socratici. Anassimandro è il primo a concepire un modello meccanico del mondo. Sostiene che la Terra galleggia immobile nello spazio, senza cadere e senza essere appoggiata a nulla. Questo concetto è stato indicato da molti come la prima grande rivoluzione cosmologica, e una delle sorgenti del pensiero scientifico e per Karl Popper questa idea è «una delle più coraggiose,

più rivoluzionarie, più portentose idee nella storia del pensiero umano”. Il modello di Anassimandro permette, infatti, ai corpi celesti di passare sotto la Terra, e apre la via alla grande astronomia greca dei secoli successivi. Per Anassimandro «principio (*archè*) ed elemento degli esseri è l'*infinito* (*ápeiron*, ἄπειρον, senza perimetro). E asserisce che «il principio non è né l'acqua né un altro dei cosiddetti elementi, ma *un'altra natura infinita*, dalla quale provengono tutti i cieli e i mondi che in essi esistono». È chiaro che avendo osservato il reciproco mutamento dei quattro elementi [*acqua, aria, terra, fuoco*], ritenne giusto di non porne nessuno come principio, ma *qualcos'altro*. Secondo lui «la nascita delle cose non avviene per alterazione del principio elementare, ma avviene per il distacco da quello dei contrari a causa dell'eterno movimento: *Separazione dei contrari*». Ma soprattutto, è che «siano infiniti tanto il numero e le grandezze matematiche quanto tutto quello che c'è oltre i cieli; ma siccome quel che c'è oltre i cieli è infinito, sembra che vi debba essere un corpo infinito e dei mondi infiniti». Un'interpretazione molto diversa dell'*ápeiron* è difesa da Autori che danno una lettura più naturalistica della concezione del mondo di Anassimandro; farebbero derivare *ápeiron*, dal semitico *apar*, (polvere, terra), accadico *epe-ru* equivalente del biblico *'afar*, e quindi sarebbe stato utilizzato da Anassimandro nel significato di *terra* e non di *infinito*, cioè, ricondurrebbe la filosofia presocratica essenzialmente ad una *fisica corpuscolare*, che accomunerebbe Anassimandro, a Talete e Democrito. La relazione fra l'*ápeiron* di Anassimandro e gli atomi di Leucippo e Democrito è corroborata dall'attributo che comunemente accompagna gli atomi nei frammenti degli atomisti: *ápeira*, plurale di *ápeiron*, usualmente tradotto con *innumerevoli*.



Anassagora (496-428 a.C.)

Anassagora (496–428 a.C.), formulò nuove ipotesi sulla materia, e giunse alla conclusione che esistono, sparse in tutto l'universo, sostanze semplici, in continuo movimento; particelle piccolissime che si raggruppano e si separano dando origine alle cose ed agli esseri. Il movimento continuo è impresso alle particelle da una sostanza leggera e sottile, diffusa in tutto l'universo. Anassagora sostiene che: *Tutte le cose sono insieme* e *Tutte le cose sono in ogni cosa* quindi *Tutto è in tutto*. Tutte le trasformazioni, tutti i processi naturali sono governati e finalizzati da questa intelligenza *cosmica* (*nous*, νοῦς) che determina l'armonia e la bellezza della natura. Tuttavia questo divenire cosmico presuppone una fase *precosmica* in cui i *semi originari* (caratterizzati dall'essere di numero infinito, identici tra loro ed infinitamente divisibili), non ancora mossi e disciplinati dall'*intelletto*, formano un miscuglio, ossia un *kaos* (χάος) originario: in esso i semi si trovano in una condizione di confusione e di indistinzione, che non annulla però la loro intrinseca diversità qualitativa. Circa la misteriosa natura di questa mente divina sono state prospettate almeno due interpretazioni: una *naturalistica* e una *spiritualistica*. Secondo la prima ipotesi il *nous*, pur non coincidendo con i *semi*, costituisce comunque una sorta di essenza materiale, anche se si tratta di una materia pura, semplice ed incorruttibile, di una specie di livello profondo e nascosto della materia, quindi in qualche modo diverso dalla materia degli enti naturali.

Anassagora formulò inoltre ipotesi anche sul moto dei corpi celesti e sulla cosmologia in generale elaborando una sua teoria della *pluralità dei mondi*: i *semi*, unendosi e separandosi, formano sistemi planetari simili al nostro, quindi esistono altri corpi celesti analoghi al Sole, alla Luna e alla Terra. Per le sue affermazioni fu considerato empio e fu allontanato da Atene.

Anassimène (586a.C.–528a.C.) individua nell'*aria* il principio di tutte le cose. Fra le tesi a sostegno di questa idea c'è il riconoscimento dell'importanza rivestita dall'aria per la vita degli esseri viventi. Con Anassimene, però,

sembra compiersi una sorta di passo indietro nella ricerca dell'*archè*. Se infatti il suo maestro l'aveva individuata in una sostanza infinita e astratta (l'*apeiron*), Anassimene la individua in una materia fisica concreta. A dire il vero a tale materia Anassimene attribuisce le caratteristiche dell'*apeiron* di Anassimandro: l'infinità e il movimento incessante. Resta il fatto che Anassimene, come era già successo con Talete che aveva individuato l'*archè* nell'acqua, attua su un piano fisico e concreto la ricerca del principio originario, che con Anassimandro aveva invece assunto una dimensione astratta e indeterminata.

La vera novità della filosofia di Anassimene sta nella spiegazione precisa del meccanismo materiale che consente all'aria di essere principio tutte le cose. Per il filosofo di Mileto questo avviene secondo un processo di rarefazione e condensazione: *Tutto ha origine dalla compressione e rarefazione dell'aria.*

Quindi l'aria, raffreddandosi, si condensa, diventa vento, poi nuvola e, condensandosi ancora, acqua, terra e infine pietra. Rarefacendosi, invece, l'aria si dirada e diventa fuoco. La condensazione produce quindi il freddo, la rarefazione il caldo; nascono così i due contrari fondamentali da cui originano tutte le cose. A questa idea, Anassimene era giunto osservando il fatto che la temperatura dell'aria che esce dalla bocca è diversa a seconda dell'apertura di quest'ultima: a bocca socchiusa l'aria esce fredda, a bocca larga esce calda. In questo modo aveva dimostrato come la temperatura fosse determinata dal grado di condensazione e di rarefazione. Tutte le trasformazioni del mondo vengono perciò spiegate come trasformazioni dell'aria, in quanto tutte le cose che formano l'universo sono aria in un diverso grado di densità.

L'universo viene concepito come un gigantesco organismo vivente che respira l'aria in cui è immerso, e il respiro stesso è la sua vita e la sua anima e la Terra è un astro disposto al centro del cosmo. Più tardi Diogene di Apollonia difenderà la teoria di Anassimene, dando all'aria le caratteristiche del *nous* di Anassagora. L'aria diviene perciò un soffio vitale (*πνεύμα pneuma*), principio vivificatore da cui originano tutte le cose.

Con Eraclito (535a.C.–475a.C.), *la legge segreta del mondo risiede nel rapporto di interdipendenza di due concetti opposti* (caldo-freddo, pace-guerra, amore-odio ecc.) che, in quanto tali, lottano fra di loro ma, nello stesso tempo, non possono fare a meno l'uno dell'altro, poiché vivono solo l'uno in virtù dell'altro: ciascuno dei due infatti può essere definito solo per opposizione, e niente esisterebbe se allo stesso tempo non esistesse anche il suo opposto. Così, ad esempio, una salita può essere pensata come una discesa da chi vi si trova in cima (*dottrina dell'unità dei contrari: Tutte le cose sono uno*).

Tra i contrari si crea una sorta di lotta. In questa dualità, questa guerra fra i contrari (*polemos*)¹ in superficie, ma armonia in profondità, Eraclito vide quello che lui definiva il *logos* (λόγος) indiviso, ossia la legge universale della Natura.

Ed è proprio la dottrina dei contrari che fa di Eraclito il fondatore di una *logica degli opposti*, antitetica a quella aristotelica e fondata sulla legge del divenire della realtà. In essa, infatti, tesi e antitesi (essere e non-essere) sono una sintesi contraddittoria e permanente nella realtà che solo così può divenire, attraverso i suoi due coesenziali aspetti (*nello stesso fiume scendiamo e non scendiamo; siamo e non siamo*).

La dottrina delle quattro essenze fondamentali della Terra, *acqua, terra, aria, fuoco*, fornisce gli elementi tra i quali i primi filosofi greci scelsero l'*archè*. Aristotele affermò che l'*archè* secondo Eraclito fosse il *fuoco*. In al-

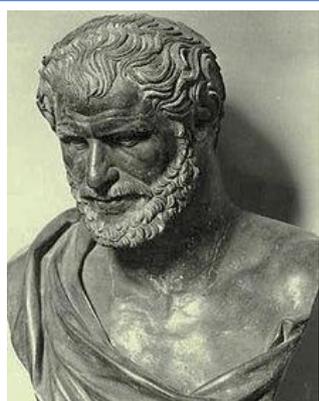
¹ Polemos (Πόλεμος), nella mitologia greca, era il demone della guerra (probabilmente della guerra civile), padre di Alalà, personificazione del grido di battaglia. Faceva parte del gruppo di entità guerresche che infestavano i campi di battaglia.

cuni frammenti, effettivamente, sembra che Eraclito sostenga questa tesi: il fuoco, condensandosi, diventa aria, quindi acqua e poi terra; dopodiché, esso può rarefarsi per tornare ad essere acqua, aria, e in seguito fuoco. Quindi tutto ha origine e fine nel fuoco. In realtà, è probabile che il riferimento al fuoco vada inteso in senso più metaforico: in questo elemento fisico sembra infatti mostrarsi la teoria ontologica di Eraclito. Il fuoco è sempre vivo, in continuo movimento; è in ogni momento diverso dal momento precedente, ma allo stesso tempo sempre uguale a sé stesso. Analogamente l'*arché* è il primo ed unico principio, la nascita e la morte, l'inizio e la fine: come il fuoco, che nella giusta misura ora si accende e ora si spegne, in quanto è il divenire la realtà fondamentale, assieme al *logos*. Eraclito crede anche nella *ciclicità del cosmo*, concepita come insieme di fasi alterne di *distruzione-produzione*, al punto che alcuni autori attribuiscono a lui il concetto di *ekpyrosis* (ἐκπύρωσις) da *ek*, fuori e *pyros*, fuoco, cioè generato dal fuoco, una sorta di grande conflagrazione universale.

Il nome di Democrito (460–370a.C.) è rimasto legato alla sua celebre *Teoria atomista* considerata, anche a distanza di secoli, una delle visioni più “scientifiche” dell'antichità: l'atomismo democriteo infatti fu ripreso non solo da altri pensatori greci, come Epicuro, ma anche da filosofi e poeti romani nonché da filosofi del tardo medioevo, dell'età rinascimentale e del mondo moderno. Democrito può essere considerato il “padre della fisica”, così come Empedocle lo era stato per la chimica. Geymonat afferma che “l'atomismo di Democrito [...] ebbe una funzione determinante, nel XVI e XVII secolo, per la formazione della scienza moderna”.

Alla base dell'ontologia di Democrito c'erano i due concetti di *atomo* e di *vuoto*. Democrito per certi aspetti sostituì l'opposizione logica eleatica tra essere e non essere con l'opposizione fisica tra atomo e vuoto: l'atomo costituiva l'essere, il vuoto rimandava in un certo senso al non essere. Per Democrito *un atomo costituiva l'elemento originario e fondamentale dell'universo*, nonché il fondamento metafisico della realtà fisica; ciò significava che gli atomi non venivano percepiti a livello sensibile (*realtà fisica*) ma solo su un piano intelligibile, ossia attraverso un procedimento intellettuale che scomponeva e superava il mondo fisico-corporeo. C'è da precisare che l'atomo democriteo non costituiva in sé un'intelligibilità pura, come sarà l'idea di Platone, in quanto esso possedeva un'essenziale consistenza materiale: tuttavia era pur sempre una realtà intelligibile poiché sfuggiva ai sensi e si coglieva solo mediante l'intelletto. La realtà degli atomi costituiva per Democrito l'*arché*, quindi l'essere immutabile ed eterno. Gli atomi erano concepiti come particelle originarie indivisibili: essi cioè erano quantità o grandezze primitive e semplici (ovvero non composte), omogenee e compatte, la cui caratteristica principale è l'indivisibilità.

Gli atomi dunque, in quanto principio primo di ogni realtà, erano eterni ed immutabili: essi non erano stati generati né potevano essere distrutti, ma esistevano da sempre e sempre sarebbero esistiti. Gli *atomi*, però, in quanto particelle quantitative (quindi del tutto diversi dai *semi* qualitativi di Anassagora), costituivano il pieno, che rimandava necessariamente alla realtà di un *vuoto* in cui potersi collocare, in cui poter esistere. Il vuoto infinito costituiva quindi anch'esso una realtà originaria analoga a quella degli atomi, poiché rendeva possibile la loro esistenza: infatti gli atomi non sarebbero stati nemmeno pensabili senza uno spazio vuoto infinito entro cui potersi muovere incessantemente. In questo illimitato vuoto spaziale non esistevano più punti di riferimento, tanto è vero che il filosofo greco, quasi anticipando il moderno concetto di infinito fisico, così affermò: «non esiste basso né alto, né centro né ultimo, né estremo». Di fronte alla realtà di *qualcosa* (l'*atomo*), Democrito avrebbe ammesso l'esistenza di un *non qualcosa*, il *vuoto* appun-



Democrito (460–370a.C.)

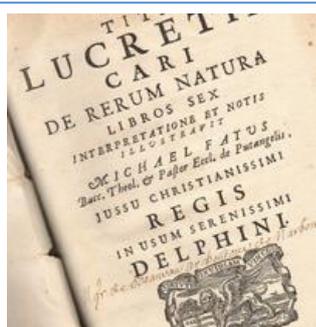
to, il nulla inteso come spazio. Quindi il vuoto di Democrito non stava ad indicare l'esistenza del non essere ma più semplicemente la mancanza di materia, coincidente appunto con lo spazio. Pieno e vuoto costituivano pertanto i due principi originari a cui ricondurre l'esistenza di tutte le cose: l'uno rimandava all'altro, lo implicava necessariamente, poiché la realtà era il risultato della loro sintesi.

Come si è già accennato, gli atomi possedevano il movimento come loro caratteristica intrinseca: essi infatti si muovevano eternamente e spontaneamente nel vuoto, incontrandosi e scontrandosi. Il divenire del cosmo e della natura e la molteplicità degli enti *òntos* (ὄντως) erano dovuti proprio a questo incessante movimento da cui tutto si formava per poi disgregarsi. Il movimento quindi costituiva una proprietà intrinseca e spontanea degli atomi e, come tale, non era generato da una causa esterna ad essi: spontaneamente, per loro natura, essi si muovevano.

In questo eterno e naturale movimento degli atomi di Democrito alcuni studiosi hanno visto una sorta di primitiva intuizione del *Principio di inerzia*. È stato notato che «il principio di inerzia, fondamento della dinamica galileiana, dice pressappoco la stessa cosa: afferma infatti che il moto rettilineo uniforme non richiede la presenza di alcuna causa che lo provochi; solo dove si ha accelerazione deve esserci una causa che lo produce». In Democrito, come osservò Aristotele, era assente il concetto di una causa del movimento; non era chiaro «il perché del movimento, né di quale specie esso sia né la causa per cui il movimento avviene in un modo o in un altro». Come abbiamo già detto, gli atomi democritei, essendo definiti come quantità infinitesime, erano del tutto privi di determinazioni qualitative: sono fatti tutti della medesima materia, ma differiscono per quanto riguarda gli aspetti quantitativi, vale a dire forma, ordine e posizione.

Tre secoli dopo i concetti di atomo e vuoto sono ripresi e ampliati da Tito Lucrezio Caro (94a.C.–55a.C.) nel *De rerum naturae*. Lucrezio riprende i temi principali della dottrina epicurea, che sono: l'*aggregazione atomistica* e la *parenklisis* (che egli ribattezza *clinamen*); egli avanza anche un nuovo *criterio evolutivistico*: «le specie prodotte sono mutate nel corso del tempo, perché quelle malformate si sono estinte, mentre quelle dotate degli organi necessari alla conservazione della vita sono riuscite a riprodursi». Le cose non possono svanire nel nulla, come non possono nascere dal nulla. Il poeta crede quindi nella conservazione perenne della materia nell'universo, dicendo che le cose sono costituite da aggregazioni che possono separarsi nei costituenti elementari che poi si aggregano di nuovo per dar luogo a forme diverse della natura. Cambia la manifestazione, in un perenne rinnovarsi del mondo, ma la materia è eterna. Lucrezio mette in evidenza come alcuni fenomeni si manifestano senza che il nostro senso visivo percepisca la presenza di materia, dando l'impressione errata che si siano prodotti dal nulla. Egli espone alcuni esempi come il vento che, pur essendo invisibile, produce effetti tangibili a volte anche disastrosi, oppure gli odori, il caldo, il freddo o le voci che producono sensazioni rivelabili dai nostri sensi e che quindi devono essere costituiti da elementi materiali.

Secondo il poeta latino, nell'universo esistono solo *materia* e *vuoto*: la materia è tutto ciò che è rivelabile per mezzo dei sensi, mentre all'esistenza del vuoto si giunge con il ragionamento. Come conseguenza di questo principio è quindi assurdo ricorrere all'esistenza di nature diverse da queste, come *acqua*, *fuoco* *aria* e *terra*. Lucrezio introduce l'idea delle *partes minimae*, come esigenza di porre un termine alla suddivisione dei corpi e quindi per impedirne la distruzione completa. Questi enti primordiali sono gli atomi. La materia è costituita da atomi, e le differenti aggregazioni di questi danno ori-



Frontespizio del *De rerum naturae* di Tito Lucrezio Caro

gine ai differenti tipi di sostanze. Per Lucrezio gli atomi sono indivisibili ed eterni, caratteristiche che egli ritiene strettamente connesse tra loro.

È interessante notare che Lucrezio accenna alla possibilità che gli atomi siano a loro volta composti di parti più piccole, ma afferma anche che queste parti sono inscindibili e formano nel loro insieme l'entità atomo, in modo differente da come gli atomi formano le cose, che possono mutare. Lucrezio rigetta anche le teorie, propugnate da Eraclito, Talete e Anassimene, basate sui principi unici del fuoco, dell'acqua, dell'aria e della terra come sostanze primordiali di tutte delle cose. Egli critica anche Empedocle, che ipotizza l'esistenza di quattro elementi primordiali (*acqua, fuoco, aria, terra*). Lucrezio condanna in particolare la possibilità che questi elementi si trasformino l'uno nell'altro. Inoltre confuta anche la *teoria atomistica di Anassagora*, che ha una concezione diversa da Epicuro sugli atomi, cioè che i corpi, anche se divisi all'infinito, restano identici a sé stessi. La base della confutazione è essenzialmente costituita dalla sua concezione dell'atomo come particella indistruttibile.

L'idea di Lucrezio sull'universo era basata su due punti fondamentali: l'*infinità dello spazio* e l'*infinità della materia*. La sua convinzione deriva dalla considerazione che se lo spazio non fosse infinito, dopo tanti secoli, la vita sarebbe scomparsa, e che l'infinità della materia deriva dalla necessità che il numero degli atomi primordiali, che sono eterni, non sia limitato.

Lucrezio, seguendo Epicuro, concepisce il movimento degli atomi come uno stato naturale necessario a spiegare la formazione dei corpi. Lucrezio attribuisce il moto al peso degli atomi, ma deve postulare l'esistenza del *clinamen* per spiegare gli urti degli atomi e quindi la loro aggregazione. Gli atomi cadono a causa del loro peso, ma, in un certo istante non determinato, né determinabile, l'atomo si sposta lievemente dalla verticale percorrendo una leggera curva detta *clinamen*. L'introduzione del *clinamen*, logicamente un po' zoppicante, deriva dal fatto che gli atomi, cadendo perpendicolarmente sotto l'azione del proprio peso non si sarebbero mai incontrati. Questo principio di "libera scelta" degli atomi ha un significato fisico ma anche filosofico: il libero arbitrio è facoltà di ogni ente naturale.

La prima vera e propria *Teoria atomica*, fondata sulle *leggi fondamentali della chimica* si deve al chimico e fisico inglese John Dalton (1766–1844), il quale credè il suo modello atomico, basandosi su dei punti fissi; in particolare, i primi tre punti implicano che in una reazione chimica gli atomi rimangono invariati in numero e in massa e ciò è in accordo con la *legge di conservazione della massa di Lavoisier*, mentre il punto quattro è in accordo con la *legge delle proporzioni definite di Proust*. Il modello atomico di Dalton si fonda sui seguenti postulati:

1. Tutta la materia è fatta da particelle microscopiche indistruttibili e indivisibili chiamate atomi.
2. Tutti gli atomi di uno stesso elemento sono identici e hanno uguale massa.
3. Gli atomi di un elemento non possono essere convertiti in atomi di altri elementi.
4. Gli atomi di un elemento si combinano, per formare un composto, solamente con numeri interi di atomi di altri elementi. Gli atomi non possono essere né creati né distrutti, ma si trasferiscono interi da un composto ad un altro.

Dalton successivamente enunciò la terza *legge delle proporzioni multiple*: "Quando un elemento si combina con la stessa massa di un altro elemento, per formare composti diversi, le masse del primo elemento stanno tra loro in rapporti semplici, esprimibili mediante numeri interi e piccoli".



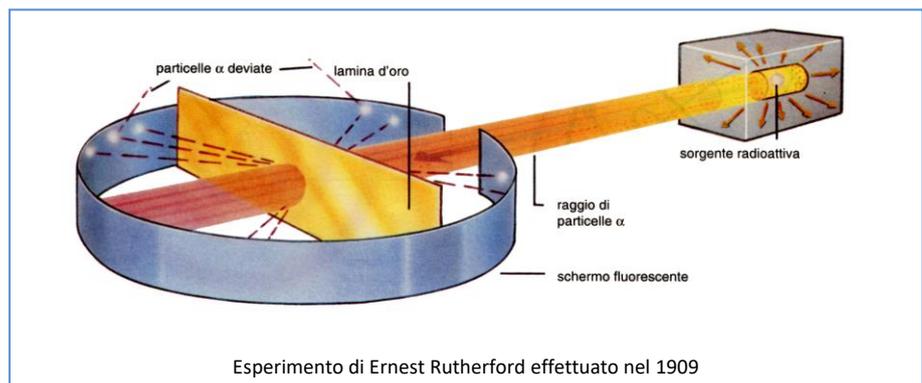
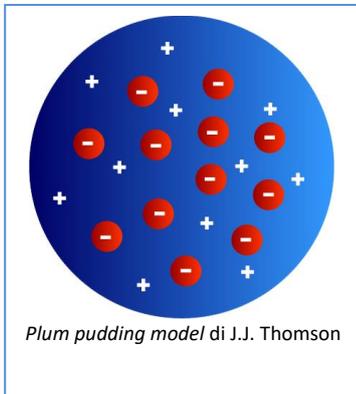
John Dalton (1766–1844)



Per Dalton l'atomo era formato da una microscopica sfera completamente piena e indivisibile ma, come in seguito dimostrarono le *esperienze di Thomson e Rutherford*, si scoprì che esso poteva essere scomposto (dividendo così il *nucleo* dagli *elettroni*) e che era quasi interamente vuoto (essendo la massa concentrata quasi del tutto nel nucleo). Oggi sappiamo che non solo gli atomi sono ulteriormente divisibili, ma anche che gli atomi di uno stesso elemento non sono tutti uguali tra loro e che addirittura alcuni possono trasformarsi in atomi di elementi diversi (sono gli atomi degli elementi radioattivi). Altri errori dello scienziato inglese furono il ritenere che i composti si producessero quantitativamente nel modo più semplice possibile (punto 4) e che gli elementi puri fossero composti da singoli atomi. Malgrado questo la teoria di Dalton interpreta in maniera corretta e immediata le leggi delle combinazioni chimiche.

I PRIMI MODELLI ATOMICI

Dobbiamo, tuttavia, aspettare i primi anni del '900 per avere il primo modello di atomo, grazie alla scoperta degli elettroni da parte di Joseph J. Thomson nel 1897. Fu lo stesso Thomson nel 1904 a proporre il cosiddetto *modello a panettone (plum pudding model)*. In questo modello, l'atomo è costituito da una distribuzione di carica positiva diffusa all'interno della quale sono inserite le cariche negative. Nel complesso l'atomo è elettricamente neutro. Secondo questo modello l'atomo risulta ancora sostanzialmente pieno. Thomson affermava che gli elettroni erano liberi di ruotare all'interno della carica positiva che occupava come una nube tutto il volume dell'atomo. Queste orbite erano stabilizzate nel modello dal fatto che quando un elettrone si allontanava dal centro della nuvola di carica positiva sentiva una maggiore attrazione verso il centro a causa della presenza di una maggiore carica positiva all'interno della sua orbita (una conseguenza della *Legge di Gauss*). Inoltre gli elettroni potevano ruotare in anelli che erano ulteriormente stabilizzati dalle interazioni tra gli elettroni, e gli *spettri di emissione* delle varie sostanze erano riconducibili alle differenze di energia delle diverse orbite degli anelli. Thomson tentò, con scarso successo, di calcolare attraverso il suo modello alcune delle linee spettrali principali conosciute per alcuni elementi. Sul modello di Thomson, nello stesso anno, il giapponese Hantaro Nagaoka propose il suo *modello saturniano* spiegando la stabilità atomica per analogia con la stabilità degli anelli di Saturno e fece, in particolare, due previsioni: l'esistenza di un nucleo molto massiccio (in analogia alla proporzione tra la massa di Saturno e quella dell'anello) e che gli elettroni ruotassero attorno al nucleo legati dalla *forza elettrostatica* (così come le particelle dell'anello ruotano attorno al pianeta legate dalla *forza gravitazionale*). Il modello di Thomson, assieme al modello di Nagaoka, furono precursori del successivo *Modello atomico di Rutherford*, analogo al sistema solare.



Per provare la validità del modello atomico di Thomson, fu effettuato un esperimento da Hans Wilhelm Geiger e Ernest Marsden nel 1909, sotto la direzione di Ernest Rutherford al *Laboratorio di fisica dell'Università di Manchester*.

Nell'esperimento Rutherford fece lanciare un fascio di *particelle alfa* da una sorgente radioattiva contro una sottilissima lamina d'oro, nel cui spessore vi erano poche migliaia di atomi (1400 ca.). Uno schermo fluorescente venne posizionato tutt'intorno alla lamina d'oro, in modo da evidenziare l'arrivo di ogni particella alfa. In questo modo fu possibile ricostruire la traiettoria percorsa dalle particelle dopo l'impatto con la lamina.

Secondo il modello di Thomson, allora maggioritario, le particelle alfa non avrebbero dovuto attraversare il foglio d'oro, al massimo, potevano essere deflesse di pochi gradi. Considerando la possibilità di *diffusione multipla*, misurando la deflessione delle particelle, si potevano ricavare informazioni sulla distribuzione di carica elettrica all'interno dell'atomo. Tuttavia venne osservato che la maggior parte delle particelle alfa attraversarono la lamina d'oro, alcune vennero deflesse e poche (1 su 8000) vennero riflesse con angoli maggiori di 90°. Questo fu un evento completamente imprevisto, come risulta dalle parole di Rutherford: «Fu l'evento più incredibile mai succeduto in vita mia. Era quasi incredibile quanto lo sarebbe stato sparare un proiettile da 15 pollici a un foglio di carta velina e vederlo tornare indietro e colpirti. Pensandoci, ho capito che questa diffusione all'indietro doveva essere il risultato di una sola collisione e quando feci il calcolo vidi che era impossibile ottenere qualcosa di quell'ordine di grandezza a meno di considerare un sistema nel quale la maggior parte della massa dell'atomo fosse concentrata in un nucleo molto piccolo. Fu allora che ebbi l'idea di un atomo con un piccolissimo centro massiccio e carico».

Rutherford interpretò i risultati sperimentali in un lavoro del 1911 intitolato *The Scattering of α and β particles by matter and the Structure of the Atom*. Nell'articolo Rutherford rigettò definitivamente il *modello a panettone* di Thomson, dato che secondo quel modello né le particelle con carica negativa (ossia gli elettroni), né la distribuzione di carica positiva che doveva contenerli sarebbero stati in grado di produrre deflessioni così marcate. Di conseguenza propose il suo modello di struttura atomica per spiegare i risultati del precedente esperimento di Geiger e Marsden, che indicavano la presenza di una concentrazione di carica positiva nel centro dell'atomo². Questa concentrazione è il *nucleo atomico*, anche se Rutherford non lo indicò mai con questo termine nel suo lavoro circondato da una nuvola di elettroni rotanti che orbitano intorno ad esso. Da considerazioni energetiche Rutherford ricavò che il raggio della carica centrale degli atomi d'oro (che costituivano il bersaglio delle radiazioni α) doveva essere più piccolo di $3,4 \times 10^{-14} m$, mentre il raggio atomico per l'oro era conosciuto essere dell'ordine di $10^{-10} m$. Rutherford concluse che la carica doveva essere quindi concentrata in un volume molto piccolo rispetto alle dimensioni atomiche. Egli non attribuì alcuna struttura alle orbite degli elettroni tuttavia menzionò il modello atomico di Hantarō Nagaoka, nel quale gli elettroni erano disposti in anelli.

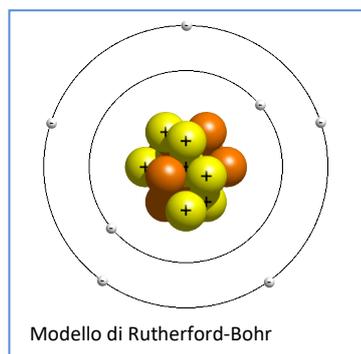
Rutherford usò per i suoi calcoli le leggi della *meccanica classica*, dato che a quell'epoca non era disponibile la *teoria quantistica*. Quest'esperimento, e la successiva incompatibilità del modello atomico di Rutherford con la teoria classica dell'elettromagnetismo, portarono alla formulazione da parte di Bohr di un nuovo modello atomico che costituì la base delle prime *teorie quantistiche*.

² Si ricorda che le *particelle alfa* sono formate da due protoni e due neutroni tenuti insieme dall'*interazione forte*. Si tratta, quindi, di nuclei ^4He con carica positiva. Per questo motivo, quando passano vicino al nucleo (positivo), vengono deflesse e, quando lo colpiscono, rimbalzano indietro.

Nell'interpretare questo esperimento, Rutherford stabilì che l'atomo fosse composto da un centro massivo (il nucleo) circondato da cariche negative. Il modello di atomo proposto da Rutherford soffriva, però, di una instabilità elettromagnetica e di una instabilità meccanica: poiché l'elettrone, nel suo moto intorno al nucleo positivo, è sottoposto a un'accelerazione, esso irraggia *energia elettromagnetica* della stessa frequenza del suo moto di rivoluzione, finendo così per perdere energia e quindi cadere sul nucleo con un moto a spirale. Nel caso di atomi più pesanti, attorno ai quali ruotino più elettroni, questi ultimi sarebbero stati soggetti a una repulsione elettrostatica che avrebbe reso inoltre meccanicamente instabili le loro orbite, cosicché, a prescindere dall'irraggiamento, una qualsiasi perturbazione esterna sarebbe stata sufficiente ad alterare pesantemente la distribuzione di elettroni negli atomi. Fu Niels Bohr a risolvere le difficoltà del modello di Rutherford, spiegando anche lo spettro dell'atomo di idrogeno.

LA MECCANICA QUANTISTICA

La meccanica classica si dimostrò presto incapace di descrivere il comportamento della materia e della radiazione elettromagnetica a livello microscopico, a scale di lunghezza inferiori o dell'ordine di quelle dell'atomo o ad energie nella scala delle interazioni interatomiche. L'incoerenza e l'impossibilità delle leggi classiche di rappresentare la realtà sperimentale, in particolare della luce e dell'elettrone, furono dunque le motivazioni principali che portarono allo sviluppo della *meccanica quantistica* nella prima metà del XX secolo. Essa nacque unendo ed elaborando un insieme di teorie fisiche formulate a cavallo del XIX e del XX secolo, di carattere spesso empirico. Il nome *Teoria dei quanti*, introdotto da Max Planck agli inizi del Novecento, si basa sul fatto che alcune quantità o grandezze di certi sistemi fisici a livello microscopico, come l'energia o il momento angolare, possono variare soltanto di valori discreti, detti *quanti*, e non continui.



Gli atomi furono riconosciuti da John Dalton nel 1803 come i costituenti fondamentali delle molecole e di tutta la materia. Nel 1869 la tavola periodica degli elementi di Dmitrij I. Mendeleev permise di raggruppare gli atomi secondo le loro proprietà chimiche e questo permise di scoprire leggi di carattere periodico, come la regola dell'ottetto, la cui origine era ignota.

Gli studi di Avogadro, Dumas e Gauden dimostrarono che gli atomi si compongono fra loro a formare le molecole, strutturandosi e combinandosi secondo leggi di carattere geometrico. Tutte queste nuove scoperte non chiarivano i motivi per cui gli elementi e le molecole si formassero secondo queste leggi regolari e periodiche. La base della struttura interna dell'atomo fu invece posta con le scoperte dell'elettrone nel 1897 da parte di J.J. Thomson, e

Group	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Period 1	H=1							
2	Li=7	Be=9.4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27.3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35.5	
4	K=39	Ca=40	?=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59 Ni=59
5	Cu=63	Zn=65	?=68	?=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=85	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	?=100	Ru=104, Rh=104 Pd=106
7	Ag=108	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140				
9								
10			?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184		Os=195, Ir=197 Pt=198
11	Au=199	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208			
12				Th=231		U=240		

Tavola periodica degli elementi di D.I. Mendeleev del 1869

del nucleo da parte di Rutherford. In base al modello di Rutherford, in un atomo un nucleo centrale a carica positiva agisce sugli elettroni negativi in modo analogo a quello con cui il Sole agisce sui pianeti del sistema solare. Tuttavia le emissioni radioattive previste dalla teoria elettromagnetica di Maxwell per cariche in moto accelerato avrebbero avuto una grande intensità portando l'atomo a collassare in pochi istanti, contrariamente alla stabilità di tutta la materia osservata.

La *radiazione elettromagnetica* era stata prevista teoricamente da James Clerk Maxwell nel 1850 e rilevata sperimentalmente da Heinrich Hertz nel 1886. Tuttavia Wien scoprì che, secondo la teoria classica dell'epoca, un *corpo nero* in grado di assorbire tutta la radiazione incidente, dovrebbe emettere onde elettromagnetiche con intensità infinita a corta lunghezza d'onda.

Questo devastante paradosso, anche se non fu ritenuto immediatamente di grande importanza, fu chiamato nel 1911 *catastrofe ultravioletta*.

Nel 1887 Heinrich Hertz scoprì che le scariche elettriche fra due corpi conduttori carichi sono molto più intense se esposti a radiazione ultravioletta. Il fenomeno, dovuto all'interazione fra la radiazione elettromagnetica e la materia, fu chiamato *effetto fotoelettrico*, e si scoprì che inspiegabilmente scompariva del tutto per frequenze della radiazione incidente più basse di un valore di soglia, indipendentemente dall'intensità totale di questa. Inoltre, se si verificava l'effetto fotoelettrico, l'energia degli elettroni emessi dalle piastre conduttrici risultava direttamente proporzionale alla frequenza della radiazione elettromagnetica.

Tali evidenze sperimentali non si potevano spiegare con la classica teoria ondulatoria di Maxwell. Si deve ad Albert Einstein una spiegazione teorica di queste proprietà della luce; egli, in un articolo, pubblicato nel 1905 (ricordato come *anno mirabilis*), spiegò l'*effetto fotoelettrico* in base alla composizione della radiazione elettromagnetica di quanti discreti di energia, secondo il concetto di quanto che era stato ipotizzato da Max Planck. Questo studio gli sarebbe valso il Premio Nobel per la fisica nel 1921. La *meccanica quantistica*, sviluppandosi con il suo contributo e quello di numerosi fisici nell'arco di oltre mezzo secolo, fu in grado di fornire una spiegazione soddisfacente a tutte queste contraddizioni e regole empiriche.

Max Planck comprese nel 1900 che se i possibili valori dell'energia delle onde elettromagnetiche fossero stati discreti, allora il problema del corpo nero avrebbe potuto essere risolto in accordo con i risultati degli esperimenti. Il fisico tedesco introdusse una costante h , chiamata poi in suo onore *costante di Planck* e con le dimensioni fisiche di energia per tempo $[h] = [E][t]$, che lega il valore dell'energia E dell'onda elettromagnetica con la sua frequenza f attraverso la formula:

$$E = hf$$

apparsa esplicitamente per la prima volta nel 1905 nell'articolo pubblicato da Albert Einstein. Questa formula fu utilizzata per spiegare l'*effetto fotoelettrico* da Einstein stesso, che mostrò come i campi elettromagnetici siano costituiti da particelle o quanti elementari, chiamati nel 1926 *fotoni*. Quando un fotone è assorbito da un elettrone, questo acquista tutta la sua energia e se questa è abbastanza grande può anche sfuggire all'attrazione dell'atomo a cui è legato. Se l'energia del fotone dipende linearmente dalla sua frequenza e vale hf , a frequenze troppo basse l'energia è insufficiente affinché questo processo sia possibile. L'effetto fotoelettrico quindi sparisce del tutto, indipendentemente dal numero di fotoni incidenti (che determinano solo



Un corpo nero, *oggetto ideale* in grado di assorbire tutta la radiazione incidente, può essere idealizzato come una cavità nera con un piccolo foro. Secondo la previsione classica, questo corpo avrebbe dovuto emettere una intensità infinita di radiazione elettromagnetica ad alta frequenza.

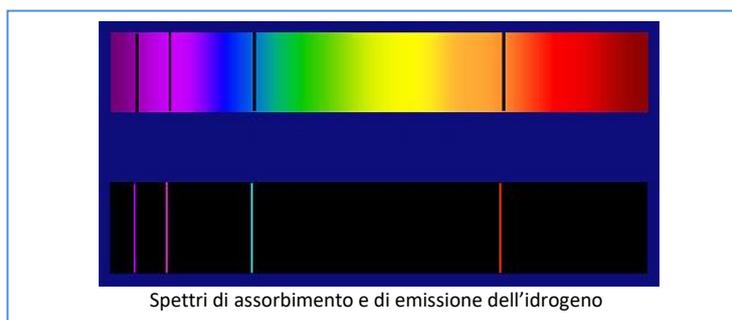
l'ampiezza dell'onda classica). L'interazione fra radiazione e materia è quindi spiegata in termini di processi puntuali che coinvolgono *particelle elementari*, concetto fondamentale delle moderne *teorie di campo*.

IL MODELLO ATOMICO DI BOHR

All'inizio del XX secolo lo studio dell'atomo aveva raggiunto un buon grado di conoscenza. Erano noti, infatti, moltissimi *spettri di emissione di luce* proveniente dagli atomi: ovvero delle linee discrete e ben distinte poste a differenti frequenze.

Una delle prime osservazioni interessanti avvenne nel 1884 quando Johann Balmer, insegnante svizzero, osservò che alcune righe dello spettro di emissione dell'idrogeno (v. *figura*) potevano essere calcolate utilizzando la formula:

$$\lambda = (364,6 \text{ nm}) \frac{n^2}{n^2 - 4}$$



Balmer suppose che tale formula fosse, in realtà, un caso particolare di una legge più generale, che venne trovata da Johannes Rydberg e Walter Ritz e nota come *legge di Rydberg-Ritz*:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

con n_1, n_2 numeri interi maggiori di 0 tali che $n_1 < n_2$ ed R *costante di Rydberg*.

Con questa legge fu possibile completare lo spettro osservato da Balmer e si riescono ad ottenere anche le *serie di Lyman* ($n_2 = 1$) e *Paschen* ($n_2 = 3$).

Furono fatti numerosi tentativi per spiegare teoricamente tali osservazioni sperimentali, riuscì meglio di altri Thomson, ma il suo modello aveva una pecca: poiché si basava solo sulla presenza delle forze elettriche e non era in grado di spiegare come mai il sistema fosse all'equilibrio. Infatti Thomson non riuscì mai a determinare una frequenza tra quelle osservate con le formule applicate.

Il modello di atomo proposto da Rutherford, seppur geniale, soffriva, però, di una instabilità elettromagnetica e di una instabilità meccanica.

Nel 1913 il fisico danese Niels Bohr (1885–1962) risolse il problema proponendo un modello empirico per tentare di riunire le evidenze attorno alla stabilità dell'atomo di idrogeno e al suo spettro di emissione, come *l'equazione di Rydberg*. Max Planck, Albert Einstein, Peter Debye e Arnold Sommerfeld contribuirono allo sviluppo e alla generalizzazione dell'insieme delle regole formali proposte da Bohr, indicato con l'espressione *vecchia teoria dei quanti* (*old quantum theory*). In questo modello il moto dell'elettrone

nell'atomo di idrogeno è consentito solo lungo un insieme discreto di orbite chiuse stazionarie stabili di tipo ellittico o circolare. La radiazione elettromagnetica è emessa o assorbita solo quando un elettrone passa da un'orbita più piccola a una più grande. In questo modo Bohr fu in grado di calcolare i livelli energetici dell'atomo di idrogeno, dimostrando che in questo sistema un elettrone non può assumere qualsiasi valore di energia: l'elettrone può avere solo alcuni precisi e discreti valori di energia E_n determinati solo dal numero intero n :

$$E_n = -\frac{13,36 \text{ eV}}{n^2}$$

in buono accordo con gli esperimenti e con una energia minima diversa da zero

$$E_{min} = -13,36 \text{ eV} \xrightarrow{\text{raggiunta quando}} n = 1.$$

Restava tuttavia da chiarire come mai l'elettrone potesse percorrere solo alcune specifiche traiettorie chiuse.

Il modello atomico di Bohr, è la più famosa applicazione della quantizzazione dell'energia, che, insieme all'*equazione di Schrödinger* e alle spiegazioni teoriche sulla radiazione di corpo nero, sull'effetto fotoelettrico e sullo *scattering Compton* sono la base della meccanica quantistica.

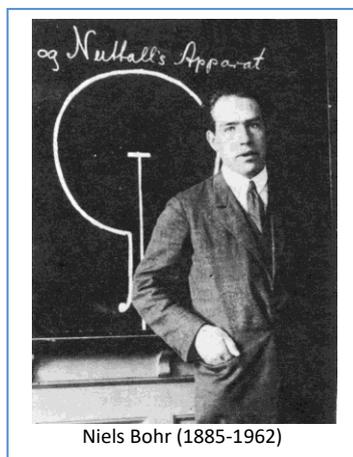
Il modello, proposto per l'atomo di idrogeno, ottenne degli eccellenti risultati, coincidenti, entro il margine degli errori, con lo spettro sperimentale.

Bohr, che a quel tempo lavorava con Rutherford, propose un modello che, applicando all'atomo di Rutherford la quantizzazione dell'energia introdotta da Planck, riusciva a giustificare lo spettro dell'idrogeno. La soluzione di Bohr è basata su tre postulati:

1. Il valore del modulo del *momento angolare* dell'elettrone che ruota intorno al nucleo deve essere un multiplo intero della costante di Planck ridotta, e di conseguenza l'energia di un elettrone dipende solo dal valore del *Numero quantico principale*.
2. L'atomo irraggia energia solamente quando, per un qualche motivo, un elettrone effettua una transizione da uno stato stazionario ad un altro. La frequenza ν della radiazione è legata all'energia del livello di partenza e di quello di arrivo dalla relazione:

$$\nu = \frac{|E_f - E_i|}{h}$$

dove h è la *costante di Planck*, mentre E_f ed E_i sono le energie connesse alle orbite finale ed iniziale (è presente il modulo in quanto la frequenza ha significato fisico se e soltanto se è un numero positivo, invece il $\Delta E = (E_f - E_i)$ può essere negativa, e indica se viene emessa una radiazione o viene assorbita energia sotto forma di quanti, con frequenza derivata dalla suddetta formula. Secondo la *teoria classica*, invece, la frequenza della radiazione emessa avrebbe dovuto essere uguale a quella del moto periodico della particella carica. L'energia che l'atomo scambia con il campo elettromagnetico soddisfa dunque sia il *Principio della conservazione dell'energia*, sia la relazione tra l'energia e la frequenza introdotta da Planck. Notiamo, però, che nel suo lavoro Bohr non chiama in causa i *quanti di luce di Einstein*, dei quali sarà un deciso oppositore fino al 1924.



3. Nel modello semplice di Bohr, il numero atomico è Z , la carica dell'elettrone è e , l'energia potenziale U a distanza r è:

$$U = \frac{kZe^2}{r}$$

dove k è la costante di Coulomb. L'energia totale di un elettrone nell'ipotesi semplificativa che si muova su un'orbita circolare con velocità v è quindi:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + U = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{kZe^2}{r}$$

Per ottenere il valore della velocità, e quindi quello dell'energia cinetica, basta eguagliare la relazione $F = ma$, dove per l'accelerazione si utilizza l'espressione per quella centripeta ($a = v^2/r$), con l'attrazione coulombiana:

$$\frac{kZe^2}{r} = m \frac{v^2}{r}$$

quindi l'energia cinetica risulta essere pari alla metà del valore assoluto dell'energia potenziale. L'energia totale risulta quindi essere pari a:

$$E = \frac{1}{2} \frac{kZe^2}{r}$$

Sostituendo questa nella legge matematica del secondo postulato di Bohr, si ottiene un'espressione per le frequenze in funzione delle distanze finale ed iniziale dei livelli interessati dalla transizione:

$$\nu = \frac{1}{2} \frac{kZe^2}{r} \left(\frac{1}{r_f} - \frac{1}{r_i} \right)$$

Questa equazione deve essere consistente con la formula di Rydberg-Ritz, sapendo che $\nu = c/\lambda$, (c velocità della luce).

I raggi delle orbite stabili, quindi, dovevano essere proporzionali ai quadrati di numeri interi. Una simile legge di proporzionalità poteva essere ottenuta ipotizzando che il *momento angolare* dell'elettrone in un'orbita stabile fosse pari a:

$$mvr = \frac{nh}{2\pi} = nh$$

Questo è il terzo postulato di Bohr, che, in pratica, quantizza il momento della quantità di moto della particella, nella quale n , indicato come *Numero quantico principale*, può assumere soltanto i valori interi: 1, 2, 3, 4, ...

A questo punto è abbastanza semplice determinare il raggio dell'orbita, combinando quest'ultima con la relazione tra energia cinetica e potenziale:

$$r = n^2 \frac{h^2}{mkZe^2} = n^2 \frac{a_0}{Z}$$

se poniamo

$$a_0 = \frac{h^2}{(2\pi)^2 m k e^2}$$

calcoliamo il raggio di Bohr del livello fondamentale dell'atomo di idrogeno. Inoltre, Bohr riuscì a calcolare anche il valore della *R costante di Rydberg*:

$$R = \frac{2m\pi^2 k^2 e^4}{ch^3}$$

che, utilizzando i valori allora noti per le costanti, è in accordo con il valore ottenuto dalla spettroscopia.

Infine si possono scrivere tutti i valori possibili dell'energia di un elettrone in un atomo, scritti in funzione dell'energia fondamentale dell'atomo di idrogeno:

$$E_n = -Z^2 \frac{E_0}{n^2} \quad \text{con} \quad E_0 = \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2}$$

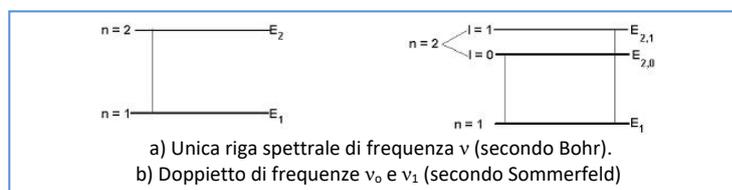
che risulta di circa 13,6 eV. Questo vuol dire che, per estrarre un elettrone nello stato fondamentale dell'idrogeno, bisogna fornire al sistema un'energia pari a 13,6 eV. Tenendo conto del fatto che la massa del nucleo non è infinita (nel caso dell'idrogeno è circa duemila volte la massa dell'elettrone) e che quindi il nucleo stesso ruota intorno al centro di massa dell'atomo, si introduce una lieve dipendenza della *costante di Rydberg* dalla massa del nucleo, migliorando così l'accordo con i dati sperimentali.

Bohr stesso sapeva bene, fin dall'inizio, che il suo modello era solo un tentativo provvisorio di interpretare la struttura elettronica degli atomi. Infatti la sua teoria, valida per l'atomo H, mostrò grosse lacune quando si cercò di applicarla al comportamento spettroscopico di atomi più complessi dell'atomo H, contenenti cioè più di un elettrone; negli spettri di questi atomi si rilevarono infatti sdoppiamenti di righe singole in più righe vicinissime fra loro (*multipletti*), non interpretabili in base al modello atomico di Bohr.

Una interpretazione dell'esistenza dei *multipletti* fu proposta da A. Sommerfeld (1915); egli ipotizzò che nell'atomo l'elettrone percorresse orbite ellittiche, anziché circolari, di cui il nucleo occupa uno dei fuochi, e quantizzò questo nuovo sistema analogamente a quanto aveva fatto Bohr per il suo sistema con orbite circolari. La sostituzione delle orbite circolari (definite da un solo parametro: il raggio) con orbite ellittiche (definite da due parametri) ebbe come conseguenza che, nella nuova quantizzazione delle orbite elettroniche ellittiche fu necessario introdurre un secondo numero quantico, indicato con *l*, che andò ad aggiungersi al primo numero quantico (*n*) di Bohr.

I numeri quantici *n* ed *l* (essenzialmente *n*) concorrono a determinare i valori quantizzati delle energie, mentre è il solo numero quantico *l* che determina la quantizzazione dell'eccentricità (e quindi la forma) dell'ellisse che l'elettrone può percorrere nei suoi stati stazionari (l'insieme di ellisse con stessi valori *n*, *l*, ruotanti in ogni direzione dello spazio, genera una corona sferica, così come l'insieme delle orbite circolari di Bohr, relative ad un dato valore di *n*, genera una sfera). Sommerfeld mostrò che i numeri quantici *n* (*numero quantico principale*) ed *l* (*numero quantico angolare*) possono assumere solo certi valori, fra loro dipendenti: per ogni valore di *n*, il valore di *l* (anch'esso, come *n*, in unità $h/2\pi$) può assumere soltanto i valori interi compresi fra 0 ed (*n* - 1): quindi $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ e $l = 0, 1, 2, 3, (n - 1)$. Ciò significa che per un elettrone per cui è $n = 1$, il numero quantico *l* può assumere solo il valore 0, e l'elettrone si troverà sull'unica orbita possibile

$n = 1, l = 0$; se $n = 2, l$ può assumere i valori 0 ed 1; a questi valori dei numeri quantici corrispondono due orbite possibili per l'elettrone ($n = 2, l = 0$; $n = 2, l = 1$) differenti per la forma ed anche per i valori dell'energia ($E_{2,0}$; $E_{2,1}$). Pertanto al salto dell'elettrone dall'orbita $n = 2$ all'orbita $n = 1$, secondo Bohr corrisponde un'unica riga di frequenza ν ($h\nu: E_2 - E_1$), mentre secondo Sommerfeld corrispondono due righe di frequenza ν_0 e ν_1 , corrispondenti ai salti energetici $E_{2,1} \rightarrow E_1$ e $E_{2,0} \rightarrow E_1$.



Ma il contributo di Sommerfeld al perfezionamento della teoria di Bohr, si mostrò ancora insufficiente per l'interpretazione di certi altri sdoppiamenti di righe che si riscontrarono negli spettri degli atomi sottoposti, durante l'eccitazione, ad un campo magnetico.

Si ipotizzò allora che come una corrente elettrica (cioè un flusso di elettroni) percorrendo una spira genera un campo magnetico, così l'elettrone di un atomo percorrendo un'orbita attorno al nucleo genera anche esso un campo magnetico.

Si tenne conto di questo campo magnetico in una più completa trattazione dell'atomo, e apparve necessario, per caratterizzare l'elettrone, introdurre un nuovo numero quantico, cui fu dato il nome di *numero quantico magnetico* (m), che per un'orbita di numero quantico angolare l può assumere tutti i valori compresi fra $-l$ e $+l$, incluso lo zero.

Apparecchiature sperimentali sempre più sofisticate consentirono di svelare ulteriori sdoppiamenti di righe, e lo studio teorico del fenomeno portò a ritenere che l'elettrone durante il suo moto attorno al nucleo ruotasse anche su se stesso, in senso orario o antiorario, generando così un secondo campo magnetico nell'atomo; per tener conto di questo fu introdotto un *quarto numero quantico*, chiamato *numero quantico magnetico di spin* (o semplicemente *spin*), indicato con m_s , che può assumere soltanto i valori $\pm 1/2$, sempre in unità $h/2\pi$, a seconda del senso di rotazione.

Si noti che mentre in assenza di campo magnetico esterno sono i soli valori di n e di l che, come si è detto, determinano i valori delle energie degli elettroni dell'atomo, in presenza di tale campo anche il valore del numero quantico magnetico influenza, modestamente, i valori delle predette energie (sdoppiamenti di righe in campo magnetico).

Stabilito che ogni elettrone di un atomo è caratterizzato da 4 numeri quantici, si enuncia il *Principio di esclusione di Pauli*: in un atomo o in una molecola costituita da più atomi non possono coesistere due o più elettroni che abbiano i 4 numeri quantici uguali.

TEORIA ONDULATORIA

L'analogia tra ottica geometrica e la dinamica di una particella permise a De Broglie di ipotizzare che alle particelle microscopiche si potesse associare anche un'onda: questo portò al *dualismo onda-particella* e successivamente al *principio di complementarità* enunciato da Bohr, secondo il quale si predilige l'aspetto ondulatorio o corpuscolare della materia, a seconda del tipo di strumento utilizzato per l'osservazione. Utilizzando queste analogie tra ottica geometrica e dinamica particellare e il successo della dimostrazione di Ein-

stein sull'effetto fotoelettrico e la legge di Planck, de Broglie ebbe l'idea di associare alla radiazione un aspetto particellare sotto forma di quanti di energia $E = h \nu$ ognuno di impulso p di modulo:

$$p = h \nu / c = h / \lambda \xrightarrow{\text{per cui}} \lambda = h / p$$

dove è detta anche *lunghezza d'onda di De Broglie*. Questa analogia riflette il dualismo onda-particella, e può essere formulata come *principio di complementarità*.

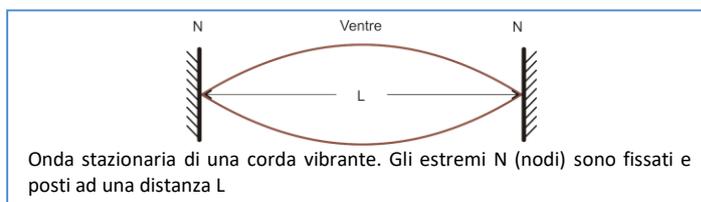
Su tale base de Broglie riuscì a ricavare la quantizzazione del *momento angolare nel modello atomico di Bohr*, fino a quel momento introdotta ad hoc, e a dimostrare che le orbite atomiche erano effettivamente ellittiche-circolari, in linea con le previsioni di Bohr-Sommerfeld per l'atomo di idrogeno. A conferma della sua brillante idea, dal 1926 si susseguirono diversi esperimenti che confermarono l'ipotesi del *dualismo onda-particella*. Il più importante fu l'esperimento di Davisson e Germer del 1927, nel quale i due scienziati americani osservarono la *diffrazione degli elettroni* attraverso una serie di fenditure, da cui si ebbe la conferma che gli elettroni, pur essendo particelle, hanno la facoltà di comportarsi come onde.

Sulla scia di tali risultati Schrödinger andò alla ricerca di un'equazione che descrivesse il propagarsi dell'*onda di materia* di De Broglie. Rifacendosi alla fisica classica, dove il comportamento di un'onda e le sue caratteristiche sono espresse da una *funzione continua*, lo scienziato austriaco ottenne un'equazione differenziale le cui soluzioni, le *funzioni d'onda*, restituivano quei numeri quantici cruciali per la risoluzione della struttura atomica di un elemento. *L'equazione di Schrödinger* è inoltre in grado di descrivere l'evoluzione di una particella libera, rappresentando l'analogo in meccanica classica della seconda legge di Newton ($F = ma$), utilizzata per ricavare una predizione sulla traiettoria che un dato sistema seguirà, date certe condizioni iniziali; va sottolineato tuttavia che in ambito quantistico il concetto classico di *traiettoria* viene a perdere il proprio significato. Sebbene tale *meccanica ondulatoria* possa sembrare un'interpretazione diversa dalla *meccanica matriciale* di Heisenberg, Born e Jordan, come dimostrato dallo stesso Schrödinger i due procedimenti matematici sono equivalenti.

Per comprendere il percorso di Schrödinger occorre partire da una corda vibrante. Se si agita una corda vincolata ad un estremo con un moto armonico, la perturbazione che ne risulta è detta *onda armonica* e si sposta assumendo la forma di una funzione sinusoidale. Quando un tale treno di onde che si propaga raggiunge l'estremità a cui è vincolata la corda, la propagazione viene riflessa e ritorna indietro con la medesima frequenza ed ampiezza. L'onda che rimbalza si sovrappone all'onda che arriva, e l'interferenza di due onde unidimensionali sinusoidali con medesima ampiezza e frequenza che si propagano in verso opposto conduce alla formazione di un'*onda stazionaria* sulla corda.



Dualismo onda particella: Particelle ed onde che oltrepassano una fessura hanno un comportamento ben diverso. Nell'immagine a sinistra: in alto l'effettivo comportamento di due fasci luminosi che interferiscono tra loro; in basso quello che ci saremmo aspettati considerando la luce fatta solo di particelle.



Onda stazionaria di una corda vibrante. Gli estremi N (nodi) sono fissati e posti ad una distanza L

L'equazione di una corda vibrante è un'equazione differenziale lineare, e la linearità implica che l'ampiezza di due onde che interagiscono è semplicemente la somma delle due.

Sia S una corda elastica collocata, in posizione di riposo lungo il segmento $(0,0) - (\ell, 0)$, con gli estremi fissati a tali punti: lo spostamento verticale $u(x, t)$ che i punti della corda subiscono in conseguenza di una forza esterna $F(x, t)$ soddisfa il seguente problema, detto *problema della corda vibrante*. Se v è la velocità di propagazione dell'onda, l'*equazione fondamentale della corda vibrante* si può scrivere:

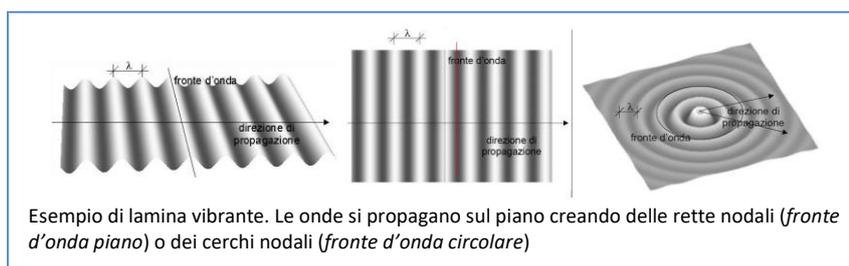
$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = F(x, t)$$

Questo implica anche che il comportamento di un'onda può essere analizzato separando l'onda in componenti. La *trasformata di Fourier* separa un'onda in componenti sinusoidali, e risulta estremamente utile per analizzare l'equazione delle onde. Si ricorda che i nodi sono dei punti (lungo la corda) nei quali lo spostamento è nullo. La sopraddetta equazione si può anche scrivere:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

Ma bisogna che siano rispettate le seguenti condizioni: per ogni valore del tempo, $y = 0$ sia per $x = 0$ sia per $x = \ell$.

Dalla corda vibrante si passa ora alla lamina vibrante considerando che una lamina che vibra comprime gli strati d'aria circostanti con il suo movimento. Uno strato d'aria compresso comprime, a sua volta, quello successivo e questo ne comprime un altro ancora e così via, dando origine ad una perturbazione che si propaga nello spazio. I nodi così si trasformano in *rette nodali*. Ora se gettiamo un sasso in uno stagno si formano dei cerchi concentrici la lamina produce *cerchi nodali*, le onde risultano ancora stazionarie ed un punto subisce eternamente le stesse vicende.



Per analogia con il caso della corda vibrante, l'*equazione differenziale generale* della lamina è:

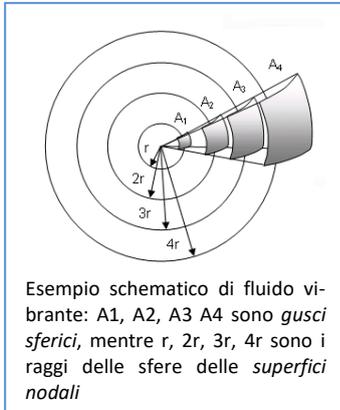
$$\nabla^2 z = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2}$$

Si incontrano dunque nella risoluzione matematica dell'equazione, due parametri arbitrari i quali fissano il numero dei cerchi nodali e il numero delle rette nodali. Questi parametri si chiamano *autovalori*.

³ Ricordando che $\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$ si scrive semplicemente $\nabla^2 z$ ed è chiamato *operatore di Laplace* della z .

Questa trattazione è ricordata perché presenta molte analogie col modello dell'atomo d'idrogeno, interpretato con la meccanica ondulatoria. Se, oltretutto, estendiamo il concetto di lamina vibrante ad un fluido vibrante, si presentano delle *superfici nodali* come sfere concentriche, piani meridiani e coni. L'equazione adesso si può scrivere:

$$\nabla^2\psi = \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2}$$



Dove ψ si può pensare sia la compressione (o rarefazione) del fluido. Anche qui compaiono gli *autovalori*.

Nell'atomo d'idrogeno incontreremo proprio l'applicazione di questo esempio che qui abbiamo riportato perché nella meccanica ondulatoria si trovano appunto equazioni differenziali delle quali si cercano gli *autovalori* che, per l'atomo, sono i valori discontinui dell'energia, quelli che Bohr chiamava gli *stati quantizzati*.

L'idea madre da cui partì Schrödinger è l'analogia tra le leggi dell'ottica geometrica e quelle classiche della meccanica del punto materiale. Si pensi a un gruppo d'onde luminose limitate ad una ristretta regione dello spazio, assimilabile per semplicità ad un punto; il gruppo può pensarsi emesso da un proiettore con diaframma che per un tempo brevissimo, per esempio 10^{-9} secondi, lasci partire la sua luce. Se l'indice di rifrazione del mezzo in cui si muove il cilindretto della luce emessa è variabile da punto a punto, il gruppo non si propagerà con moto uniforme e rettilineo, ma seguirà una traiettoria curvilinea determinata dal *principio di Fermat* (1650): «il percorso seguito da un raggio di luce per andare da un punto ad un altro attraverso un qualsiasi insieme di mezzi è tale da rendere il suo cammino ottico uguale, in prima approssimazione, agli altri cammini immediatamente adiacenti a quello effettivo». La condizione richiesta è:

$$\frac{\delta t}{\delta x} = 0$$

Similmente, si sa dalla meccanica che la traiettoria di un punto materiale, in un campo di forza di potenziale V è determinata dal *principio della minima azione*, enunciato da Maupertuis verso il 1740, che si esprime con la condizione:

$$\delta \int_A^B mv ds = 0 \xrightarrow{\text{o anche}} \delta \int_A^B \sqrt{2m(E - V)} ds = 0$$

(E è l'energia totale).

Inoltre, come la velocità v del mobile in ciascun punto della traiettoria è determinata in funzione di V dal *teorema della forza viva*, così la velocità del gruppo d'onde è regolata in ciascun punto dalla relazione che lega l'indice di rifrazione alla velocità; e si può sostituire, come vedremo, al campo di forze di potenziale V una distribuzione dell'indice di rifrazione, tale che il moto del gruppo d'onde si identifichi col moto del punto materiale.

L'analogia messa in evidenza si riferisce piuttosto all'ottica geometrica che alla reale ottica-fisica.

Poiché, il concetto fondamentale in meccanica, è quello della traiettoria della particella materiale, e corrisponde al concetto di raggio nell'analogia ottica, ma quest'ultimo è completamente definito soltanto nella pura ed astratta ottica geometrica, mentre perde quasi del tutto significato nella ottica reale,

non appena le dimensioni del fascio luminoso o degli ostacoli materiali che esso incontra nel suo cammino diventano comparabili con la lunghezza d'onda. I fenomeni di diffrazione ce lo dicono perfettamente. A chi conoscesse soltanto l'ottica geometrica resterebbe affatto, incomprensibile quello sparpagliarsi, che in realtà avviene, della luce che ha passato un piccolo foro. Inoltre, può osservarsi che le nozioni che sono fondamentali nell'ottica fisica, cioè lunghezza d'onda e frequenza, equazione della propagazione dell'onda, non entrano affatto nell'ottica geometrica.

Partendo dunque dalla diffrazione, si è tentati a investigare se la non applicabilità della ordinaria meccanica ai problemi di micromeccanica sia esattamente della stessa specie della non applicabilità dell'ottica geometrica ai fenomeni di diffrazione o di interferenza, e possa quindi essere superata in modo simile.

Se dunque Hamilton stabilì che il *Principio della minima azione* regge sia il moto di una massa in un campo potenziale come il moto di un piccolo pacchetto di luce che corra in un mezzo con indice variabile da punto a punto opportunamente, De Broglie spinse l'analogia alla sua logica conclusione dicendo che *se la luce e la materia sono rifratte nello stesso modo, esse dovrebbero anche essere diffratte nello stesso modo*.

Ecco come Schrödinger tradusse in pratica la concezione di De Broglie.

Ritorniamo a quello che si diceva prima, e cioè che è possibile costruire un mezzo dispersivo idoneo a rappresentarci per mezzo di un gruppo d'onde ψ le caratteristiche cinematiche e dinamiche del moto di una massa m in un campo conservativo di forze qualsiasi il cui potenziale è V . Il mezzo dispersivo è definito dal suo indice di rifrazione per ogni punto perché si sa che il suo inverso esprime la velocità della propagazione ($n = c/v$) e precisamente la velocità di fase. E d'altra parte l'energia totale E ha per valore $h\nu$, quella del fotone.

Le oscillazioni di ψ si propagano nello spazio ubbidendo all'equazione differenziale:

$$\nabla^2\psi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = -\frac{4\pi^2\nu^2}{v^2} \psi$$

perché per qualunque funzione sinusoidale $\psi = A \sin 2\pi\nu t$ risulta:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = -A \sin 2\pi\nu t (2\pi\nu)^2 = -\psi(2\pi\nu)^2$$

Ebbene, se l'indice di rifrazione n è collegato al potenziale: $V = f(x, y, z)$ dalla relazione:

$$\frac{1}{u} = \frac{n}{c} = \frac{\sqrt{2m(E-V)}}{E}$$

si riconosce immediatamente che con questa legge di dispersione la velocità v con la quale si propaga un gruppo d'onde risulta:

<i>velocità di gruppo</i>	$v = \frac{\sqrt{2(E-V)}}{\sqrt{m}} \quad (1)$
---------------------------	--

e questa espressione è proprio identica a quella che fornisce la velocità di un punto materiale di energia E nel campo di potenziale V .

Difatti dalla $1/2 mv^2 = E - V$ si ottiene il valore di v che viene fornito dalla (1). E similmente si verificherebbe che non solo la velocità, ma anche la traiettoria del gruppo d'onde coincide con quella del punto.

Qui appare dunque il legame tra il propagarsi di quelle onde ψ , e il moto del punto dal quale, matematicamente, sono originate; essi si muovono con la velocità di fase u e invece il punto a loro associato corre con la velocità di gruppo. Ma quando le dimensioni dell'orbita o le curvature sono piccole assai, il *pacchetto* di onde viene diffratto, sparpagliato in ogni direzione, lontano dalla zona dell'orbita.

Da qui risulta con lo spingere avanti l'analogia tra ottica e meccanica che i problemi micro-meccanici possono essere studiati in dettaglio soltanto facendo uso di un'equazione di propagazione d'onda; non si dimentichi però che queste onde non trasportano energia, e quindi la funzione ψ è a considerarsi come una funzione matematica ausiliaria la quale, in sé, non ha alcun significato fisico, ma il suo quadrato è una probabilità, quindi ψ , funziona come il vettore luminoso dell'ottica.

Passiamo senz'altro ad esporre l'*equazione di Schrödinger* la quale lega per un punto materiale che si muove in un campo potenziale V questo potenziale variabile alla funzione ψ , definita dal tempo t e dalle coordinate x, y, z .

Chiamiamo con ψ , una grandezza che è funzione delle coordinate del sistema e del tempo; nel caso del problema d'una particella, questa ψ , sarà funzione di x, y, z e di t , nel caso di due particelle la ψ , conterrà tutte le coordinate generalizzate. Per ora non diciamo nemmeno quale sia il significato fisico della ψ ; sia essa rappresentante un fenomeno di carattere ondulatorio, regolato dalla equazione generale:

$$\nabla^2\psi = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = 0$$

Dove u è la velocità di propagazione della fase ed è espressa dalla $u = \lambda v$. Sostituendo:

$$\nabla^2\psi = \frac{1}{\lambda^2 v^2} \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

Si rammenti che per qualunque grandezza sinusoidale ψ sussiste la relazione:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = -4\pi^2 v^2 \psi$$

La (2) allora, ricordando che il numero d'onda v è il numero di oscillazioni di un'onda nell'unità di lunghezza ed è uguale al reciproco della lunghezza d'onda, diventa:

$$\nabla^2\psi + 4\pi^2\psi \frac{1}{\lambda^2} = 0 \quad (3)$$

Supponiamo ora che, nel caso si tratti di problemi dinamici relativi a una sola particella, la grandezza ψ (di carattere ondulatorio) sia così legata al punto-massa in movimento che la lunghezza d'onda di ψ e l'impulso mv del punto-massa soddisfino alla relazione $\lambda = h/mv$.

La (3) ci dà allora:

$$\nabla^2\psi + 4\pi^2\psi \frac{m^2v^2}{h^2} = 0$$

e siccome $mv^2/2 = E - V$ (energia totale E – energia potenziale V), si ricava finalmente:

$$\nabla^2\psi + \frac{m}{h^2}8\pi^2(E - V)\psi = 0 \quad (4)$$

Questa è l'*Equazione di Schrödinger* che contiene l'energia totale della particella, la sua massa e che descrive ciò che succede per la ψ nello spazio e nel tempo mentre la massa m si muove.

L'equazione (4), analogamente a quel che accadeva per la corda vibrante, comporta di necessità dei valori *discreti* per il parametro E ; essi si chiamano *autovalori*; e questa è la conseguenza di esigere che l'equazione stessa ammetta una soluzione tale che la ψ sia *finita, continua, e ad un solo valore*.

Per esempio, se si tratta di un punto di massa m , di carica e e gravitante attorno ad una massa immobile dotata di carica e (siamo nel caso dell'idrogeno) la funzione potenziale è $V = -e^2/r$; viene allora anche al lettore profano questa speranza, che i valori speciali della energia E che permettono alla ψ , di mantenersi finita, e ad un sol valore in tutto lo spazio, siano quelli discontinui che Bohr aveva trovato nella sua teoria per arrivare a spiegare le righe spettrali. Come vedremo, tali valori speciali, sono precisamente quelli.

L'equazione (4) prescinde dalla variazione della massa con la velocità e quindi è soggetta alla restrizione di non applicarsi ai moti troppo veloci, quelli che si avvicinano alla velocità della luce. Si ricorda che nella meccanica relativistica, si tiene conto della variazione della massa per velocità vicine a quella della luce ($E = mc^2$).

Nei problemi di meccanica atomica, gli *autovalori* della equazione di Schrödinger danno i valori possibili dell'energia, ossia rappresentano i valori dell'energia degli *stati stabili* o *stati quantizzati* del sistema.

Quanto alla ψ , che è funzione della posizione e del tempo, facciamo la seguente osservazione, anticipando ciò che diremo poi: nell'ottica per studiare il movimento dei fotoni si deve partire dall'equazione delle onde

$$\nabla\psi = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2}$$

essa domina non soltanto l'ottica geometrica, ma anche l'ottica fisica, in tale equazione ψ rappresenta la probabilità di distribuzione dei fotoni, cioè quella grandezza scalare il cui quadrato dà l'intensità luminosa.

Ebbene, nell'equazione di Schrödinger la ψ , rappresenta appunto la legge di distribuzione della probabilità del corpuscolo; alle onde ψ , non deve quindi attribuirsi alcuna immediata realtà fisica. È soltanto nelle condizioni limiti in cui l'ottica fisica cade in quella geometrica che questa soluzione probabilistica dei vari problemi della meccanica atomica ricade in quella deterministica dei problemi consueti della meccanica macroscopica.

L'onda associata al movimento della luce o del corpuscolo materiale non costituisce l'essenza della luce o della materia; è invece l'espressione matematica che stabilisce, che controlla quel movimento permettendo a noi di fare le previsioni del fenomeno.

L'ATOMO DELL'IDROGENO NELLA MECCANICA ONDULATORIA

L'idrogeno presenta un solo elettrone in moto intorno al nucleo che può essere considerato fisso all'origine delle coordinate cui corrispondono molte funzioni d'onda e molte energie corrispondenti.

Lo stato ad energia minore è detto *stato fondamentale*. Secondo la teoria di Bohr l'elettrone si muove attorno al nucleo su di un cerchio il cui raggio è denominato raggio della prima orbita, o più semplicemente raggio di Bohr e si indica con a_0 . Questo raggio è legato alla massa m e alla carica e dell'elettrone dalla formula:

$$a_0 = h^2 / 4\pi^2 m e^2 = 5.29 \cdot 10^{-9} \text{ cm} \xrightarrow{\text{da cui}} 1/h^2 = 1/4\pi^2 m e^2 a_0$$

Analogamente, l'energia permessa vale

$$E = -2\pi^2 m e^4 / h^2 = -2\pi^2 m e^4 / 4\pi^2 m e^2 a_0 = -e^2 / 2a_0 = -13,6 \text{ eV}$$

Il segno meno indica che tale energia va fornita, ovvero indica il lavoro da fare per separare protone ed elettrone portandoli a distanza infinita con il moto che si svolge esclusivamente in un piano.

Secondo la teoria della meccanica ondulatoria questo elettrone è invece rappresentato da una adeguata funzione d'onda. Si trova che

$$\psi = \sqrt{\frac{e^{-r/a_0}}{\pi a_0^3}} \implies \psi^2 = \frac{e^{-r/a_0}}{\pi a_0^3}$$

si noterà che il moto si svolge in uno spazio a tre dimensioni e che ψ^2 ha simmetria sferica rispetto all'origine.

L'idrogeno, tuttavia, non ha solo l'orbitale atomico corrispondente allo stato fondamentale che è quello più importante dal momento che un atomo è normalmente nello stato a minor energia. Vi sono infatti molte altre energie permesse cui corrispondono molte corrispondenti funzioni d'onda.

In figura sono rappresentati alcuni degli *orbitali atomici* utilizzati più frequentemente, compreso quello precedentemente considerato, ora indicato con il nome spettroscopico $1s$. Gli orbitali atomici di tipo s hanno simmetria sferica, quindi la densità della nuvola di carica è funzione solo di r . Tutti gli altri sono asimmetrici: ad esempio vi sono tre orbitali atomici di tipo p (p_x, p_y, p_z) ed escludendo quella parte della nuvola elettronica che è molto vicina all'origine, e non interviene nella formazione della molecola, in una delle regioni ψ è positiva e nell'altra è negativa.

Vi sono poi cinque orbitali di tipo d . Per qualche aspetto, ma non per tutti, un'orbitale d è come la sovrapposizione di due orbitali p , in quanto presenta quattro regioni simili di segno alternato separate da due piani nodali.

In presenza di orbitali atomici completamente equivalenti, ma indipendenti, è ovvio che essi corrispondono alla stessa energia permessa. In tal caso si dice che il livello energetico è *degenere* e il numero di orbitali atomici equivalenti dà il grado di *degenerazione*. Nel caso degli orbitali s non ci sono orbitali degeneri (una sola orientazione nello spazio) per quelli p ci sono tre orbitali degeneri (p_x, p_y, p_z), per quelli d cinque e per quelli f sette.

Poiché molto di quanto è stato detto si applica anche ad altri atomi è conveniente riassumere la trattazione sotto forma di una serie di proprietà:

1. L'elettrone è caratterizzato da una funzione d'onda ψ e della corrispondente energia E , soluzioni accettabili dell'equazione d'onda. La funzione

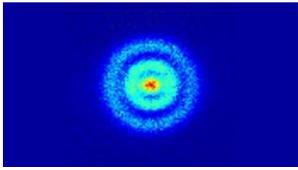
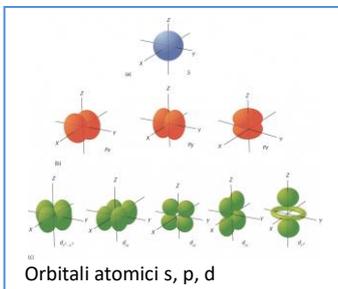


Immagine dell'orbita di un elettrone in un atomo di idrogeno



Orbitali atomici s, p, d

d'onda può essere definita un orbitale atomico, e ψ^2 indica la probabilità di trovare l'elettrone in ogni regione.

2. Gli orbitali atomici sono caratterizzati da numeri quantici tra i quali l (numero quantico secondario) determina il tipo s, p, d, f dell'orbitale e definisce la forma geometrica e la degenerazione.
3. Sono permesse transizioni tra livelli energetici differenti, in conseguenza di assorbimento o di emissione di luce. La relazione tra il cambiamento di energia $E_1 - E_2$ e la frequenza della luce ν costituisce la nota legge di Plank: $E_1 - E_2 = h\nu$
4. Non tutte le transizioni sono consentite e le regole di selezione limitano i salti permessi. Queste regole di selezione affermano che mentre n (numero quantico primario) può cambiare arbitrariamente, il momento magnetico non cambia affatto e il numero quantico secondario varia di ± 1 . Ad esempio dall'orbitale di tipo s l'elettrone può saltare solo nell'orbitale p ; mentre un elettrone nell'orbitale p può saltare nell'orbitale d (+1) o ricadere nell'orbitale s (-1).

Come già si è detto, nell'atomo d'idrogeno la funzione potenziale (trattandosi di due cariche $+e, -e$ eguali uniche) è $V = -e^2/r$ (Si noti che r è la distanza dal nucleo del punto dello spazio che si considera e non la distanza dell'elettrone dal nucleo, che non è facilmente determinabile), per cui la equazione fondamentale diventa:

$$\nabla^2\psi + \frac{m}{\hbar^2} 8\pi^2 \left(E - \frac{e^2}{r} \right) \psi = 0$$

La ricerca delle soluzioni regolari ψ , di questa equazione conduce, come nei problemi classici citati agli *autovalori*. Si trova che questi danno i valori possibili per l'energia E dell'atomo, valori corrispondenti agli stati quantici di Bohr, che sono:

$$E = -\frac{2\pi^2 m e^4}{h^2 n^2} \quad \text{con } n = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (1)$$

Nella teoria di Bohr-Sommerfeld, compariva il numero quantico azimutale e quello radiale, la cui somma era il numero di quanti totali. Ora al numero quantico azimutale di Bohr corrisponde il nostro $l + 1$, a quello radiale il valore $n - (l + 1)$.

Questo risultato è veramente soddisfacente; i consecutivi valori dell'energia negli stati stazionari dell'atomo d'idrogeno sono soltanto quelli forniti dalla (1); ma l'espressione (1) non è che la formula trovata da Bohr per render conto dello spettro dell'idrogeno!

La teoria di Schrödinger non poteva che condurre allo stesso risultato: qualunque altro sarebbe stato in contraddizione coi fatti.

Così la discontinuità degli stati stazionari che fino al 1924 costituiva uno dei più insoddisfacenti postulati della teoria dei quanti, sbocca del tutto naturale dalla teoria ondulatoria e in guisa affatto simile a quella con cui si formano le diverse frequenze proprie di una corda o di un mezzo elastico vibrante.

Insomma, di orbite non si parla più, ma i numeri quantici ricompaiono con lo stesso loro compito rispetto all'energia.

Nello stato caratterizzato da $n = 1$ e $l = 0$, il quale corrisponde alla prima orbita di Bohr, tutto il fenomeno vibratorio presentato dalla grandezza ausiliaria ψ ha simmetria sferica, non vi sono nodi.

Per $n = 2$ e $l = 0$ si ha ancora simmetria sferica, e trattasi del più basso stato di eccitazione quantica.

Nella teoria di Bohr, parlando di orbite, si diceva che l'orbita nel problema dell'idrogeno non poteva ridursi a un segmento. altrimenti l'elettrone avrebbe attraversato il nucleo.

La teoria di Schrödinger conduce al risultato che l'atomo d'idrogeno nel suo stato naturale non eccitato gode di simmetria sferica; per contro, secondo il modello di vecchio stile l'atomo H dovrebbe presentare un piano particolare di struttura, quello dell'orbita dell'elettrone, e quindi simmetria piana.

Ciò non si è mostrato vero nell'esperienza; si può infatti secondo il metodo di Stern e Gerlach dirigere gli atomi in un campo magnetico non omogeneo dove quei piani si disporrebbero paralleli l'uno all'altro. Se si fa allora passare attraverso la massa gassosa di atomi così disposti un raggio luminoso, ci si potrebbe aspettare – a causa della diversa struttura in direzione del campo e in quella perpendicolare – che il gas si comportasse otticamente come un cristallo, ossia come doppio-rifrangente. Tale fatto non ha luogo e quindi la simmetria sferica del campo atomico, quale viene asserita dalla meccanica ondulatoria, è assicurata.

L'EFFETTO STARK NELLA MECCANICA ONDULATORIA

Parlando dell'effetto Stark nella teoria data da Sommerfeld e da Epstein abbiamo visto che quando l'atomo di idrogeno si trova in presenza di un potente campo elettrico F , lo spettro dell'atomo è ben più ricco di quello che l'atomo fornisce allo stato normale; ciò per il fatto che, mentre nello stato naturale dell'atomo le diverse orbite elettroniche, che corrispondono allo stesso numero totale n di quanti hanno la stessa energia E , quando agisce il campo elettrico F ogni orbita si deforma e prende un supplemento di energia dato dalla formula di Epstein:

$$\Delta E = \frac{3Fh^2n}{8\pi^2me} (k_1 - k_2)$$

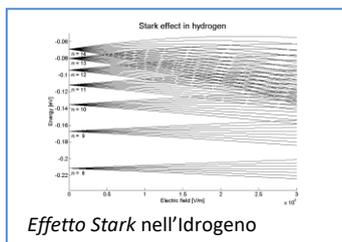
Così, quando l'atomo è in un campo elettrico le orbite con diverse eccentricità, cioè con quanti azimutali k differenti e quanti totali identici, sono dotate di energie diverse e diventano capaci di dar luogo a righe spettrali. Si rammenti a tale riguardo che le orbite differenti nelle quali si separa un'orbita di Bohr caratterizzata da n quanti totali sono proprio in numero di n perché il quanto azimutale k_1 può essere 1, 2, 3... n . Per esempio, lo stato stazionario corrispondente al quanto totale $n = 7$ è suddiviso per effetto del campo in 7 stati diversi.

Nella meccanica ondulatoria, per trovare le funzioni d'onda dell'elettrone sottoposto al campo F , basta pensare che l'energia potenziale dell'elettrone è $-e^2/r + eFz$, essendo z lo spostamento dal piano dell'orbita naturale in direzione del campo.

Introducendo tale valore nell'equazione di Schrödinger al posto di V si ottiene:

$$\nabla^2\psi + \frac{8\pi^2m}{h^2} \left(E + \frac{e^2}{r} - eFz \right) = 0$$

Per la risoluzione di questa equazione si adoperano (perché comode) le coordinate paraboliche e si ottengono, alla fine, coi soliti procedimenti la frequenza delle onde concatenate, i paraboloidi nodali, i doppi coni e le sfere nodali, e per le energie risultano proprio i valori $E + \Delta E$ già forniti dal calcolo di Epstein.



Così il problema di Stark, visto alla luce della meccanica ondulatoria, conduce alle stesse conclusioni trovate da Epstein con la teoria classica dei quanti, ossia l'introduzione del campo F crea una molteplicità di esistenza di sistemi vibranti, questi corrispondendo, uno per uno, alle diverse orbite separate di cui si è fatto sopra cenno.

E non solamente i livelli e quindi le frequenze, ma anche le intensità e le polarizzazioni delle radiazioni emesse nell'effetto Stark vengono calcolate in perfetto accordo con l'esperienza.

CRONOLOGIA DELLA MECCANICA QUANTISTICA

1900: Max Planck introduce l'idea che l'emissione e l'assorbimento di energia elettromagnetica siano quantizzate, riuscendo così a giustificare teoricamente la legge empirica che descrive la dipendenza dell'energia della radiazione emessa da un corpo nero dalla frequenza.

1905: Einstein spiega l'effetto fotoelettrico sulla base dell'ipotesi che l'energia del campo elettromagnetico sia trasportata da quanti di luce (che nel 1926 saranno chiamati *fotoni*).

1913: Bohr interpreta le linee spettrali dell'atomo di idrogeno, ricorrendo alla quantizzazione del moto orbitale dell'elettrone.

1915: Sommerfeld generalizza i precedenti metodi di quantizzazione, introducendo le cosiddette regole di Bohr-Sommerfeld.

1924: Louis de Broglie elabora una teoria delle onde materiali, secondo la quale ai corpuscoli materiali possono essere associate proprietà ondulatorie. È il primo passo verso la meccanica quantistica vera e propria.

1925: Heisenberg formula la meccanica delle matrici.

1926: Schrödinger elabora la meccanica ondulatoria, che egli stesso dimostra equivalente, dal punto di vista matematico, alla meccanica delle matrici.

1927: Heisenberg formula il principio di indeterminazione; pochi mesi più tardi prende forma la cosiddetta *Interpretazione di Copenaghen*.

1927: Dirac applica alla meccanica quantistica la relatività ristretta; fa un uso diffuso della teoria degli operatori (nella quale introduce la famosa *notazione bra-ket*).

1932: John von Neumann assicura rigorose basi matematiche alla formulazione della teoria degli operatori.

1940: Feynman, Dyson, Schwinger e Tomonaga formulano l'*Elettrodinamica quantistica* (QED, Quantum electrodynamics), che servirà come modello per le successive teorie di campo.

1956: Everett propone l'interpretazione dei 'molti mondi'.

1960: comincia la lunga storia della *Cromodinamica quantistica* (QCD, Quantum chromodynamics).

1975: Politzer, David Gross and Frank Wilczek formulano la QCD nella forma attualmente accettata.

1980: Higgs, Goldstone, Glashow, Weinberg e Salam mostrano, indipendentemente tra loro ma prendendo spunto da un lavoro di Schwinger, che la forza debole e la QED possono essere unificate nella teoria elettrodebole.

1982: un gruppo di ricercatori dell'Istituto Ottico di Orsay, diretto da Alain Aspect, conclude con successo una lunga serie di esperimenti che mostrano una violazione della disuguaglianza di Bell, confermando dunque le previsioni teoriche della meccanica quantistica.