

ESISTONO VERAMENTE GLI ATOMI?

La pubblicazione del *New System of Chemical Philosophy* (1808) di **John Dalton** segna di fatto la nascita della **chimica moderna**, i cui sviluppi, nel corso dell'Ottocento portarono una schiera sempre maggiore di scienziati a postulare la composizione dei corpi in termini di piccolissime particelle elementari.

Le stesse leggi di **Dalton** dei rapporti definiti e delle proporzioni multiple, verificate sperimentalmente, si spiegano facilmente se si accetta l'ipotesi dell'esistenza degli atomi.

Legge delle proporzioni multiple: quando due elementi formano più composti, le diverse masse di uno che si combinano con la medesima massa dell'altro sono in un rapporto di piccoli numeri interi.

1g Fe + 0,574g S = 1,574g FeS	Rapporto Atomico
 +  = 	1 Fe / 1 S
1g Fe + 1,148g S = 2,148g FeS ₂	1,148g / 0,574g = 2/1
 +  = 	1 Fe / 2 S
 +  = 	2 Fe / 1 S
 +  = 	2 Fe / 3 S

Legge dei rapporti definiti: quando due elementi si combinano, entrano nel composto in ben definiti rapporti di peso.

















Ad esempio: il solfuro ferroso (FeS) si ottiene combinando ferro (Fe) e zolfo (S) secondo un ben definito rapporto delle quantità. Si possono avere cioè solo situazioni del tipo:

$$2g \text{ Fe} + 1,148g \text{ S} = 3,148g \text{ FeS} \quad 2/1,148 = 1,742$$

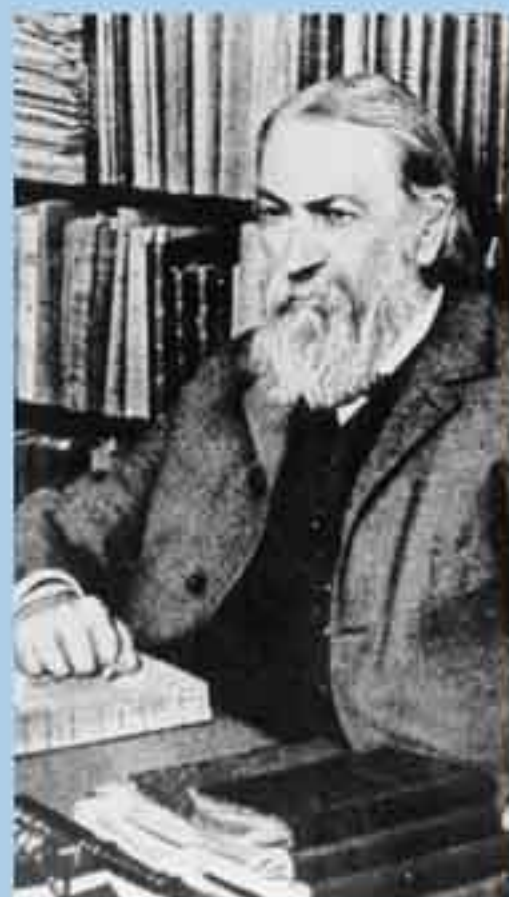
$$1g \text{ Fe} + 0,574g \text{ S} = 1,574g \text{ FeS} \quad 1/0,574 = 1,742$$

Quindi, partendo da piccole quantità di ferro e zolfo e moltiplicandole per un qualsiasi numero intero si possono ottenere tutte le possibili quantità di composto. Ma qual è il valore più piccolo che si può prendere? Si potrebbe ipotizzare l'esistenza di particelle, gli atomi appunto, che si legano per formare la molecola FeS. Così il rapporto 1,742 deriva necessariamente dal fatto che per ottenere FeS dobbiamo unire numeri uguali di atomi di ferro e di zolfo.

Tuttavia ancora nell'Ottocento le concezioni relative alla struttura fondamentale della materia non erano molto più evolute rispetto a quelle dei filosofi greci. In particolare non si era mai riusciti a fornire le **prove** dell'esistenza degli atomi, tanto è vero che scienziati positivisti come **Ernst Mach** consideravano gli atomi come una **pura ipotesi matematica**, senza riscontro con la realtà.

ELEMENTS			
	Hydrogen 1		Strontian 46
	Azote 5		Barytes 68
	Carbon 5		Iron 50
	Oxygen 7		Zinc 56
	Phosphorus 9		Copper 56
	Sulphur 13		Lead 90
	Magnesia 20		Silver 190
	Lime 24		Gold 190
	Soda 28		Platina 190
	Potash 42		Mercury 167

I simboli di Dalton per gli elementi chimici; in seguito si è scoperto che alcuni di essi sono composti e non elementi



Secondo Mach: "Sappiamo che fenomeni chimici, elettrici, ottici sono spiegati dagli atomi. [...] Gli atomi non possono essere recepiti dai sensi, poiché, come tutte le sostanze, sono enti mentali. [...] La teoria atomica ha nella fisica una funzione analoga a quella di certe rappresentazioni ausiliarie: è un modello matematico per la riproduzione dei fatti. [...] Ma gli scienziati, per i quali sono valide le regole metodologiche newtoniane, considerano teorie di questo genere come espedienti provvisori, e cercano di sostituirle con altre più vicine alla natura".

UN NUMERO MOLTO SPECIALE

Ma se l'ipotesi degli atomi è così perfettamente inserita nelle varie teorie, perché non ritenere addirittura che gli atomi esistano realmente?

Perché fermarsi a "registrare" la natura così come essa si presenta e non invece spingersi oltre, fino al punto di ammettere che tutte le leggi fisico-chimiche

derivino dalla struttura atomica della materia?

Amedeo Avogadro era di questo parere ed infatti la sua famosa legge (1811) è la prima, in ordine di tempo, che si basa sull'ipotesi esplicita della realtà molecolare.

Il ritardo con il quale tale legge venne accettata dai chimici fu un indice evidente

della diffusa resistenza all'idea della realtà molecolare.

La determinazione del **numero di Avogadro** era infatti di fondamentale importanza per il successo della teoria atomica tanto è vero che essa fu riconosciuta una volta per tutte grazie allo straordinario accordo tra i valori di questo

numero ottenuti con metodi differenti.

Einstein stesso ne propose tre in meno di due mesi, tra marzo e maggio 1905, tutti diversi fra loro.



Studiando la diffrazione della luce nell'aria, nel 1899, **Lord Rayleigh** aveva proposto una formula per calcolare il rapporto tra l'intensità della luce solare diretta e di quella diffusa nel cielo a causa del pulviscolo: il rapporto dipende dal numero di particelle presenti in atmosfera e quindi nella formula compare N . Il controllo sperimentale non era facile: richiedeva scienziati alpinisti, in grado di compiere osservazioni a grande altezza, con cielo molto limpido. I primi calcoli furono eseguiti da **Lord Kelvin** in base ai dati raccolti da **Quintino Sella** sulla vetta del Monte Rosa: egli stimò un valore compreso tra 3 e $15 \cdot 10^{23}$.



Amedeo Avogadro (1776-1856)

>> LA LEGGE DI AVOGADRO >>

Volumi eguali di gas diversi, a parità di pressione e temperatura, contengono lo stesso numero di molecole.

Numero di Avogadro $N = 6,023 \cdot 10^{23}$ è il numero di atomi contenuti in 1 g di idrogeno.

N costituisce il legame tra la macrofisica e la microfisica permettendo di calcolare le masse degli atomi in unità di massa e non solo in termini relativi.

Mole = quantità di materia contenente un numero di oggetti uguale N .

Grammolecola = massa in grammi di una mole di oggetti.

La massa di 1 mole di H contiene N atomi di H e pesa 1 g. La massa di 1 mole di H_2 contiene $2N$ atomi di H e pesa 2 g. La massa di 1 mole di O_2 contiene N molecole di O_2 e pesa 32 g: questo perché una molecola di ossigeno pesa 32 volte un atomo di H.

DAL POLLINE AGLI ATOMI

Su un punto tutti gli scienziati concordavano: gli atomi, ammesso che esistessero, dovevano essere **troppo piccoli** per essere visibili. Nemmeno lo sviluppo dei microscopi sembrava infatti portare un valido aiuto (immagini dirette degli atomi si otterranno solo negli anni '50, con il microscopio ionico a emissione di campo). Tuttavia l'esistenza degli atomi poteva essere provata anche ricorrendo a misure indirette.

In un articolo del 1828, il botanico scozzese **Robert Brown** riferiva di avere osservato il moto caotico di varie specie di particelle abbastanza piccole da restare in sospensione nell'acqua.

Egli aveva esaminato il comportamento di frammenti di particelle di polline, del "pulviscolo o fuliggine che si deposita su tutti i corpi in così gran quantità, specie a Londra", e di particelle di roccia polverizzata, incluso un frammento della Sfinge, e di altri materiali.

Che cos'aveva di così strano questo moto da attirare l'attenzione dello scienziato? Le particelle esaminate al microscopio da Brown, anziché cadere regolarmente come un qualunque oggetto immerso in un liquido meno denso, erano animate da un movimento vivace e completamente disordinato: volteggiavano, andavano e venivano, salivano, scendevano, risalivano ancora, senza tendere in alcun modo verso la quiete.

È il **moto browniano**, così chiamato in ricordo dello scopritore. Esso sembra dar conferma dell'ipotesi molecolare: ogni granello, urtato senza sosta dalle molecole vicine, ne riceve degli impulsi che non si equilibrano e che lo sballottano irregolarmente.



Osservando dalla spiaggia col cannocchiale un battello in lontananza, ci accorgiamo facilmente che esso sembra fermo ma in realtà oscilla. Il movimento è provocato dalle onde che lo urtano in continuazione; noi non riusciamo a vedere le onde ma solo il loro effetto: ciò è però sufficiente a farci concludere che il mare è agitato.



Robert Brown
(1773-1858)

"In base alla teoria cinetico-molecolare del calore, corpi di dimensione microscopicamente visibile in sospensione in liquidi debbono compiere, in conseguenza del moto di agitazione termica delle molecole, movimenti di ampiezza tale che li si può agevolmente osservare al microscopio. È possibile che i movimenti (...) siano identici al cosiddetto 'moto molecolare browniano'.

Se il moto (...) può essere di fatto osservato insieme alle leggi cui ci si aspetta che obbedisca, la termodinamica classica non può più essere considerata valida già per regioni distinguibili con un microscopio, e un'esatta determinazione delle reali dimensioni degli atomi diventa possibile. Viceversa, se la previsione di questo moto si dimostrasse errata, ciò fornirebbe un solido argomento contro la concezione cinetico-molecolare del calore".
(dall'introduzione di Einstein al primo articolo sul moto browniano)



Il moto browniano è:

- perfettamente disordinato: ogni particella si muove in modo casuale, e nel suo insieme il sistema è descrivibile utilizzando le consuete leggi della probabilità
- spontaneo e incessante: non s'arresta mai; all'interno di una cassetta chiusa (in modo da evitare l'evaporazione) lo si può osservare nel corso di giorni, mesi, anni.

Qui è riprodotta la vista al microscopio di particelle sospese in un liquido, che si addensano verso il basso per gravità; nel riquadro è schematizzato il percorso a zig-zag di una particella.

LA PRIMA INTUIZIONE



Se dell'acqua pura è in contatto con una soluzione acquosa di granuli uguali si produrrà una diffusione dei granuli nell'acqua, tanto più rapida quanto più attivo sarà il loro movimento. Ma come studiare questa diffusione?

“Guardando nell'acqua, anche con i più potenti microscopi, non riusciamo a distinguere né le molecole, né il loro moto così come viene rappresentato dalla teoria cinetica della materia. Dobbiamo inferire che se la teoria considerante l'acqua come un aggregato di particelle, è corretta, le dimensioni delle particelle stesse debbono essere inferiori ai limiti di visibilità dei migliori microscopi. Continuiamo ciò malgrado ad appoggiarci alla teoria cinetica e ad ammettere che essa ci offra una raffigurazione coerente della realtà. Le particelle browniane, visibili al microscopio vengono bombardate da quelle molto più piccole di cui si compone l'acqua. Il movimento browniano si verifica

sempreché le particelle bombardate siano abbastanza piccole. Il movimento si produce perché il bombardamento non è uniforme su tutti i lati e non può venir compensato per motivo del suo carattere irregolare e casuale. Il moto osservabile è dunque il risultato di un moto invisibile. Il comportamento delle particelle immerse rispecchia, fino a un certo punto, quello delle molecole d'acqua e ne costituisce, per così dire, un ingrandimento tale, da renderlo visibile al microscopio”.

L'innovazione fondamentale di Einstein – come osserva **Max Born** – consiste nell'elevare la teoria cinetica della materia da semplice ipotesi a **utile a oggetto**

d'osservazione; indicando un caso, il moto browniano, in cui i movimenti delle molecole e il loro carattere statistico potevano essere visibili. Fino a quel momento infatti la teoria cinetica veniva valutata in base agli effetti macroscopici, determinabili dagli esperimenti; con Einstein invece gli stessi moti molecolari **sono visibili**. La sua scelta di ricorrere alle particelle in sospensione porta a un radicale capovolgimento di prospettiva nello studio della teoria cinetica della materia. Nessuno si era accorto prima di lui che il fenomeno di diffusione delle particelle in sospensione poteva fornire una fondamentale pietra di paragone per la teoria molecolare del calore.



Einstein venne a conoscenza della controversia sulla teoria molecolare del calore quando era ancora studente e fu molto colpito dalla lettura della Gastheorie in cui **Boltzmann** (a sinistra), in polemica con **Ostwald** (a destra) e **Helm**, sosteneva di essere il solo a credere nella teoria cinetica. Einstein era fermamente convinto della validità di tale teoria, ma criticava Boltzmann per lo scarso interesse che questi riservava al confronto con l'osservazione.



SEMPLICITÀ E CHIAREZZA

Prima di Einstein ci si era sforzati di definire una "velocità media d'agitazione" seguendo il più esattamente possibile la traiettoria di un granello. Le valutazioni ottenute però erano grossolanamente erranee: le variazioni della traiettoria sono infatti così numerose e rapide che è impossibile seguirle; il tragitto registrato è infinitamente più semplice di quello reale e la velocità media di un granello varia enormemente.

7. Zur Theorie der Brownschen Bewegung; von A. Einstein.

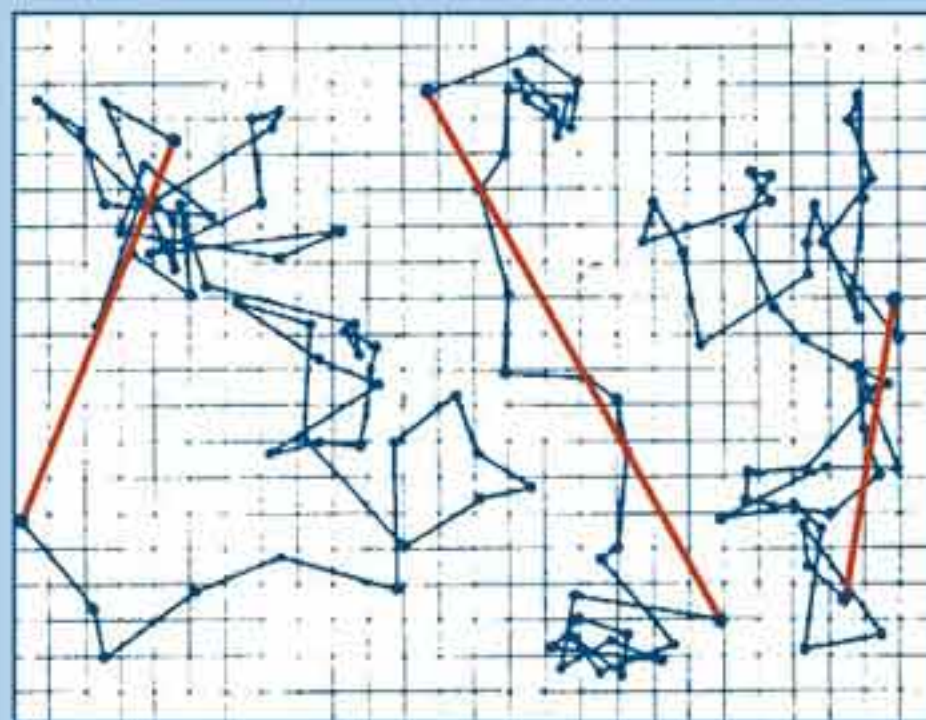
Kurz nach dem Erscheinen meiner Arbeit über die durch die Molekulartheorie der Wärme geforderte Bewegung von in Flüssigkeiten suspendierten Teilchen¹⁾ teilte mir Hr. Siedentopf (Jena) mit, daß er und andere Physiker — zuerst wohl Hr. Prof. Gouy (Lyon) — durch direkte Beobachtung zu der Überzeugung gelangt seien, daß die sogenannte Brownsche Bewegung durch die ungeordnete Wärmebewegung der Flüssigkeitsmoleküle verursacht sei.²⁾ Nicht nur die qualitativen Eigenschaften der Brownschen Bewegung, sondern auch die Größenordnung der von den Teilchen zurückgelegten Wege entspricht durchaus den Resultaten der Theorie. Ich will hier nicht eine Vergleichung des mir zur Verfügung stehenden dürftigen Erfahrungsmaterials mit den Resultaten der Theorie anstellen, sondern diese Vergleichung denjenigen überlassen, welche das Thema experimentell behandeln.

Die nachfolgende Arbeit soll meine oben genannte Arbeit in einigen Punkten ergänzen. Wir leiten hier nicht nur die fortschreitende, sondern auch die Rotationsbewegung suspendierter Teilchen ab für den einfachsten Spezialfall, daß die Teilchen Kugelgestalt besitzen. Wir zeigen ferner bis zu wie kurzen Beobachtungszeiten das in jener Abhandlung gegebene Resultat gilt.

Für die Herleitung wollen wir uns hier einer allgemeineren Methode bedienen, teils um zu zeigen, wie die Brownsche Bewegung mit den Grundlagen der molekularen Theorie der Wärme zusammenhängt, teils um die Formeln für die fortschreitende und für die rotierende Bewegung durch eine einheitliche Untersuchung entwickeln zu können. Es sei nämlich α ein beobachtbarer Parameter eines im Temperatur-

1) A. Einstein, Ann. d. Phys. 17, p. 549, 1905.

2) M. Gouy, Journ. de Phys. (3) 7, p. 561, 1888.



Einstein **cambia approccio** e sceglie come grandezza caratteristica dell'agitazione il segmento che unisce il punto di partenza al punto di arrivo, e che è, in media, tanto più grande quanto più l'agitazione è viva.

Tale segmento misura lo spostamento X del granello nel tempo considerato. Partendo sempre dall'ipotesi che il moto browniano sia perfettamente irregolare, Einstein scopre che X raddoppia quando il tempo di osservazione diventa quadruplo, triplica quando tale tempo diventa nonuplo, e così via. Vale quindi una formula del tipo:

$$X^2/t = \text{costante}$$

Ecco che così si ottiene un metodo per **quantificare** l'attività del moto browniano, mediante il coefficiente di diffusione D contenuto nella costante. Utilizzando altre ben note leggi fisiche, Einstein ottiene infine la **legge** che esprime lo spostamento quadratico X^2 nel tempo t in funzione di quantità misurabili (temperatura, raggio della particella, viscosità del liquido) e del numero di Avogadro.

Einstein commenterà nel 1917:

"Dal momento che si è compresa l'essenza del moto browniano, improvvisamente sono svaniti tutti i dubbi sulla correttezza dell'interpretazione di Boltzmann delle leggi della termodinamica".

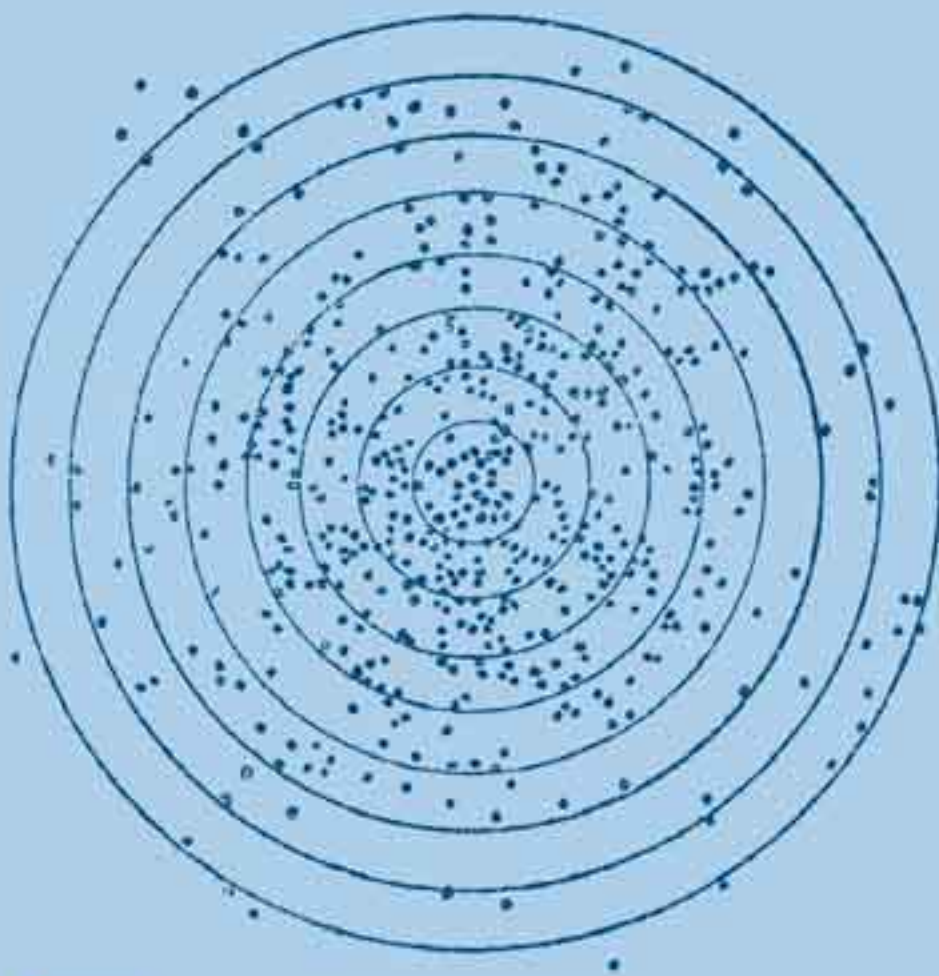
Frontespizio dell'articolo sul moto browniano: "Per la sua semplicità e chiarezza - secondo Max Born - questo articolo è diventato un'opera classica della nostra scienza"

PERRIN "VEDE" GLI ATOMI

Nel frattempo, vengono messe a punto tecniche di nuova concezione per l'indagine sperimentale del moto browniano: come l'ultramicroscopio, col quale **Theodore Svedberg** esegue accurate misure per verificare l'interpretazione einsteiniana. I risultati però sono insoddisfacenti e Einstein stesso, in articolo scritto probabilmente per correggere i malintesi di fondo contenuti nei lavori di **Svedberg**, esprime la convinzione che la velocità delle particelle ultramicroscopiche non possa essere direttamente osservata: uno scetticismo peraltro giustificato dalla mancanza di un accordo quantitativo tra tutti i lavori sperimentali disponibili. Tale situazione durerà fino al 1908, anno in cui **Jean Baptiste Perrin** pubblica i risultati di una serie di esperimenti con i quali era riuscito a confermare quasi tutte le predizioni di Einstein con una **precisione** fino ad allora mai raggiunta. Ecco i due passaggi principali del lavoro di **Perrin**.

Verifica della perfetta irregolarità del moto browniano

Considerando la traiettoria già nota del granello e riportando ogni segmento al punto iniziale si ottiene una distribuzione circolare e di intensità decrescente allontanandosi dal centro. L'immagine è simile a quella di un tiro al bersaglio e dimostra che nessuna direzione è privilegiata, così come richiesto dalle leggi della probabilità.



Verifica della legge di diffusione

Perrin considera dei granelli di gommagutta messi in sospensione nella glicerina. Inserisce poi nel liquido una parete perfettamente assorbente, che cattura tutti i granelli che per la casualità del moto browniano vengono a contatto. La variazione del numero di granelli incollati rispetto al tempo determina il coefficiente di diffusione.

L'anno seguente Einstein scrive a **Perrin**:

"Ritenevo fosse impossibile studiare il moto browniano in maniera così precisa; è davvero una fortuna che Lei abbia deciso di occuparsene".

Il dibattito sulla realtà degli atomi giungeva quindi a una **prima conclusione**. Restava aperto il grande interrogativo su quale fosse la reale natura degli atomi e se essi fossero veramente "indivisibili" o se celassero una struttura interna ancor più misteriosa.



Il fisico francese
Jean Baptiste Perrin
(1879 - 1942),
coetaneo di Einstein

LA NATURA DELLA LUCE: ONDA O CORPUSCOLO?

Cosa sia la luce e quale sia la sua vera natura è una domanda che ha sempre incuriosito ed appassionato l'uomo e alla quale, fin dall'antichità, filosofi e sapienti hanno tentato di dare una risposta.

Nel XVII secolo, il tentativo di applicare a questo interrogativo il nascente metodo scientifico sperimentale portò alla nascita di due principali scuole di pensiero rappresentate da **Christiaan Huygens**, secondo il quale la luce era un **fenomeno ondulatorio** come il suono, e da **Isaac Newton**, che invece la riteneva composta da un **fascio di particelle**.

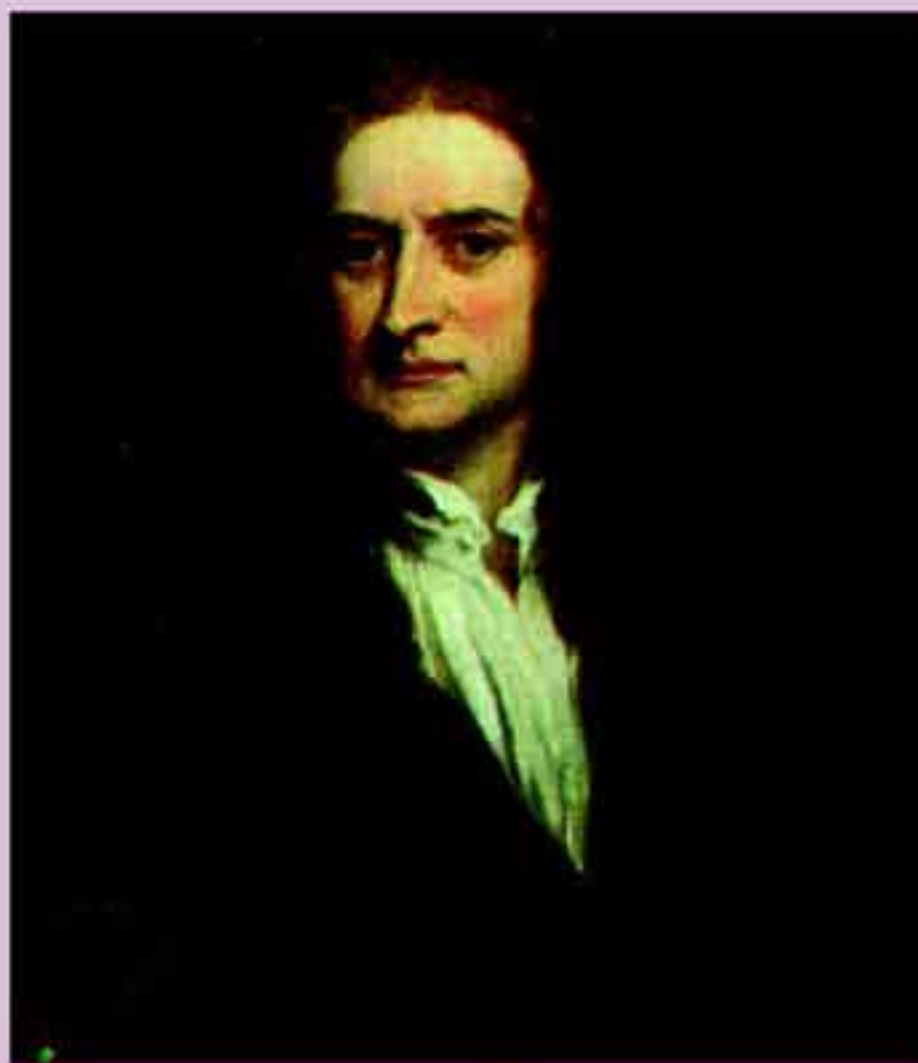
“Se oltre ciò, il passaggio della luce richiede tempo, il che non tarderemo a vedere, ne conseguirà che questo movimento impresso alla materia interposta sarà progressivo e pertanto si propagherà, come fa il suono, per superfici sferiche e per onde; le chiamo onde per la loro somiglianza con quelle che vediamo formarsi nell'acqua allorché vi si getta un sasso [...]”.
(Christiaan Huygens, “Trattato sulla Luce”, 1690)

Alla fine del Seicento, nessuna delle due teorie era in grado di spiegare completamente tutti i fenomeni ottici conosciuti; nonostante questo, la maggior fama ed il prestigio scientifico di **Newton** fecero prevalere all'interno della comunità scientifica, per circa un secolo, il suo punto di vista.

“Possiamo immaginarla [la luce] come una moltitudine di corpuscoli incredibilmente piccoli e veloci, di diverse dimensioni che si sprigionano da corpi luminosi a grande distanza l'uno dall'altro, ma tuttavia senza un sensibile intervallo di tempo, e vengono continuamente proiettati in avanti da un principio di movimento che all'inizio li accelera”.
(Relazione di Newton alla Royal Society, 1675)



Il fisico olandese Christian Huygens (1596-1648)



Sir Isaac Newton (1642-1727)

LA LUCE E I FENOMENI DI INTERFERENZA

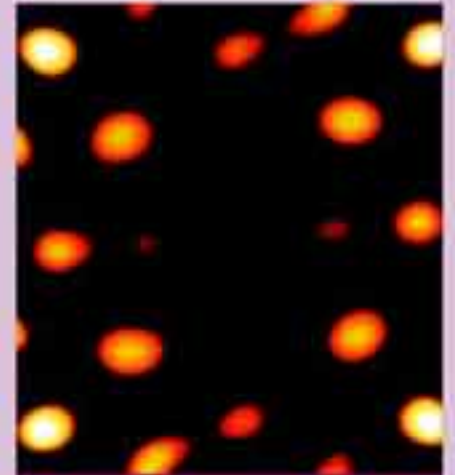


Ritratto di Thomas Young (1773-1829)

Nel 1801 **Thomas Young**, nel tentativo di risolvere la disputa relativa alla natura della luce, cercò di riprodurre nell'ambito dell'ottica un fenomeno

tipicamente ondulatorio come **l'interferenza**. Era infatti già noto come due onde meccaniche, prodotte ad esempio da due sassi gettati in un lago, potessero interagire rafforzandosi (interferenza costruttiva) o smorzandosi a vicenda (interferenza distruttiva). **Young**, attraverso un apparato sperimentale che oggi prende il suo nome, riuscì a sovrapporre su di uno schermo la luce prodotta da due sorgenti fra loro coerenti e dotate delle medesime caratteristiche.

In tal modo riuscì effettivamente a produrre una serie di frange d'interferenza in cui luce ed ombra si alternavano. L'esperimento di **Young** sembrava avere una valenza indiscutibile: se la luce fosse composta da un fascio di particelle, non sarebbe possibile ottenere una regione d'ombra dalla sovrapposizione di due raggi luminosi. Siamo dunque costretti ad ammettere che la luce ha una natura **ondulatoria**, ma **che tipo di onda è?**



Un altro fenomeno ottico tipicamente ondulatorio è la diffrazione (qui ottenuta con un reticolo di diffrazione cubico)



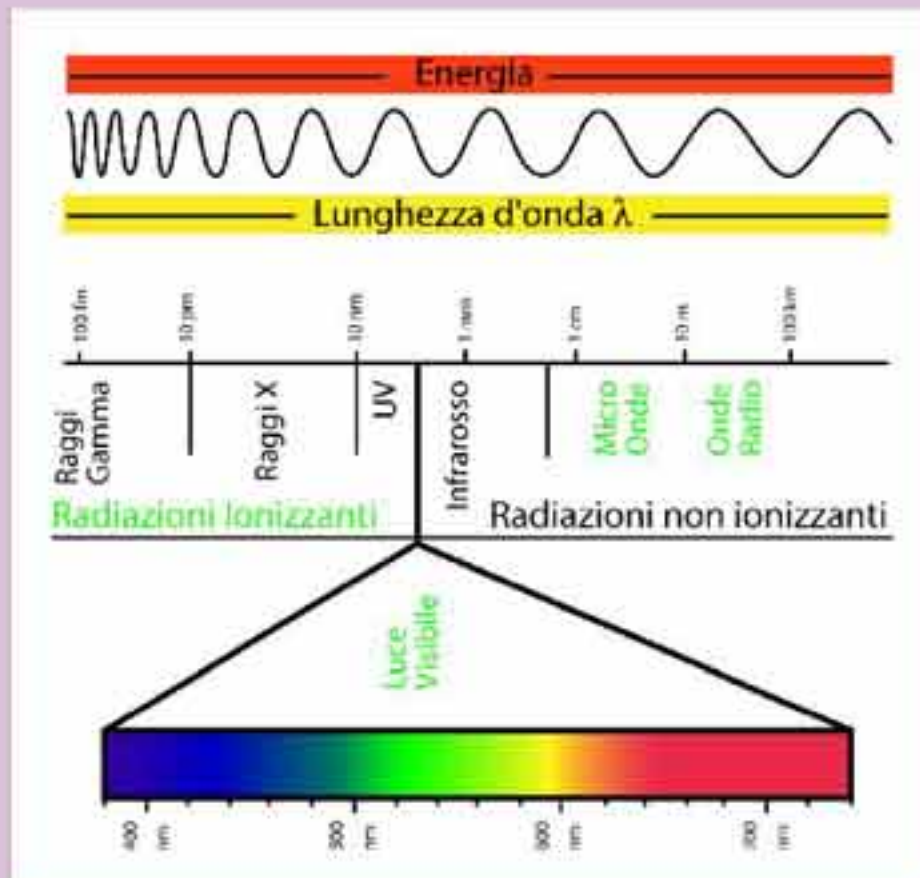
Interferenza fra onde meccaniche all'interno di un ondoscopio.

MAXWELL E L'AFFERMAZIONE DELL'ELETTROMAGNETISMO

La metà del XIX secolo ha visto la nascita di una concezione capace di riunire in un'unica teoria tutte le conoscenze sull'elettricità e sul magnetismo. Si deve a **James C. Maxwell** l'intuizione che i fenomeni elettrici e quelli magnetici non sono che due aspetti di uno stesso ente fisico: il **campo elettromagnetico**. In particolare, in base alle equazioni che portano il suo nome, **Maxwell** predisse che il campo elettromagnetico e l'energia in esso contenuta si propagano nello spazio attraverso onde trasversali che si muovono con velocità finita: **le onde elettromagnetiche**.

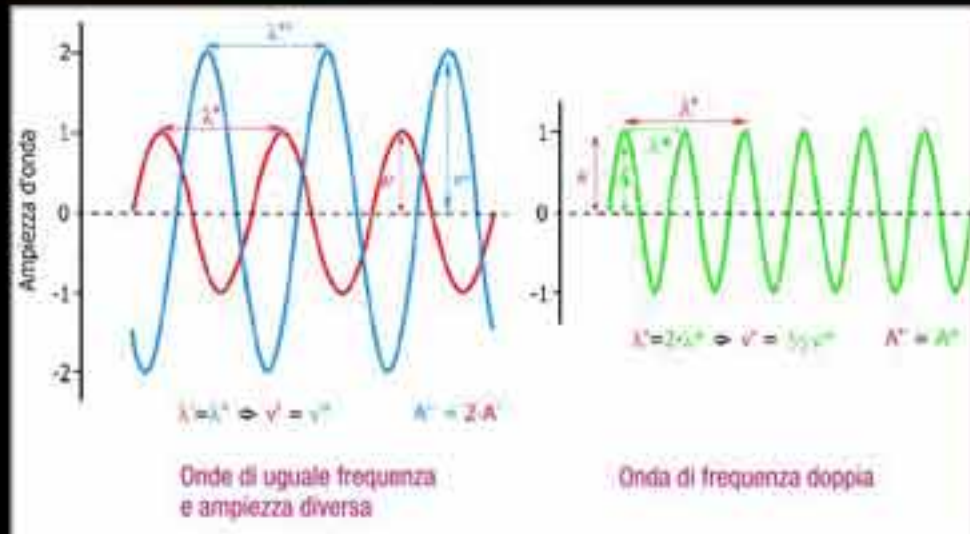


Il fisico scozzese **James Clerk Maxwell** (1831 - 1879)



Spettro elettromagnetico: classificazione della radiazione elettromagnetica in funzione della lunghezza d'onda

Basandosi sul fatto che la velocità delle onde elettromagnetiche, da lui calcolata, era uguale a quella misurata per la luce, **Maxwell** propose che la luce altro non fosse che **un'onda elettromagnetica**. Grazie alle conferme sperimentali di **Heinrich Hertz**, la teoria di **Maxwell** divenne un pilastro imprescindibile della concezione scientifica del mondo. Rimaneva aperta, però, una domanda fondamentale: **attraverso quale mezzo si propagano le onde elettromagnetiche?** Il contributo di Einstein risulterà fondamentale per rispondere a questa domanda.



>> LE CARATTERISTICHE DI UN ONDA ELETTROMAGNETICA >>

- λ è la **lunghezza d'onda**, la distanza fra due picchi o due valli successive
- **A** è l'**ampiezza d'onda**, il valore massimo raggiunto dall'onda
- **T** è il **periodo**, il tempo necessario per un'oscillazione completa
- ν è la **frequenza**, il numero di oscillazioni per unità di tempo
- **I** è l'**intensità**, rappresenta l'energia trasportata dall'onda per unità di tempo: I dipende solo da A e non da ν .