

Un decennio straordinario: 1895 - 1905

Dalla concezione continua a quella discreta della Natura

Giuseppe Giuliani

Precedentemente, Dipartimento di Fisica, Pavia

Sezione AIF di Pavia, 4 ottobre 2023

Il decennio straordinario dell'Ottocento I

- Nell'Ottocento, un decennio straordinario è stato quello che va dal 1820 (Ørsted - scoperta dell'elettromagnetismo) al 1831 (lismoFaraday - scoperta dell'induzione elettromagnetica).
- Come è noto, la scoperta di Ørsted è consistita nell'osservazione della deviazione di un ago magnetizzato da parte di una corrente elettrica continua [Giuliani su Ørsted].
- L'esperimento di Ørsted poteva essere facilmente riprodotto: richiedeva solo una pila, un filo metallico e una bussola, a disposizione in ogni laboratorio.
- Particolarmente reattivi furono gli scienziati francesi: tra questi, Jean-Baptiste Biot (1774-1862), Felix Savart (1791-1841) e André Marie Ampère (1775-1836).
- Ampère mostrò che due fili paralleli percorsi da corrente si attraggono o si respingono a vicenda secondo la direzione (parallela o antiparallela) delle correnti.
- Ampère sviluppò una teoria newtoniana della interazione tra fili percorsi da correnti, basata sull'assunzione che le forze fossero di tipo centrale, cioè dirette lungo la congiungente i due tratti elementari di filo considerati.

Il decennio straordinario dell'Ottocento. II

- La teoria di Ampère contrastava quella di Biot e Savart, oggi in uso, correttamente basata sull'assunzione che la forza esercitata su di un elemento di filo percorso da corrente è *perpendicolare* all'elemento stesso.
- Tuttavia la forma integrale delle due teorie – l'unica verificabile sperimentalmente – fornivano lo stesso risultato.
- In questi casi, la scelta tra le due teorie deve essere di natura epistemologica.
- Comunque, ai nostri giorni, la teoria di Ampère ha un valore puramente storico.
- Un destino molto diverso è stato riservato all'ipotesi ampèriana delle correnti molecolari ipotizzate per spiegare le proprietà dei magneti. Nonostante la sua originaria caratteristica qualitativa, l'ipotesi di Ampère è stata inclusa quantitativamente nell'elettromagnetismo che oggi si insegna.
- La scoperta dell'induzione elettromagnetica da parte di Faraday, può essere considerata come la chiusura del decennio straordinario aperto da Ørsted e, al contempo, come l'apertura di una nuova fase che ha condotto alla sintesi maxwelliana centrata sul concetto di campo.

Il decennio straordinario tra i due secoli: 1895 - 1905

Cronologia.

- 1895. Scoperta dei raggi X (Wilhelm Röntgen).
- 1896. Scoperta della radioattività naturale (Henri Becquerel).
- 1897. Scoperta dell'elettrone (Joseph John Thomson)
- 1898. Scoperta del radio. (Marie Sklodowska Curie e Pierre Curie).
- 1900. Scoperta dei raggi γ . (Paul Ulrich Villard).
- 1900. Planck “ricava” la formula che descrive la radiazione di corpo nero.
- 1905. Ipotesi euristica dei quanti di luce. (Albert Einstein).

Dal Continuo al discreto - Prodromi I

- Verso la metà degli anni cinquanta dell'Ottocento, in due città europee separate da qualche centinaio di chilometri, un soffiatore di vetro e un 'meccanico', stavano mettendo a punto dei manufatti che avrebbero svolto un ruolo fondamentale nello sviluppo della fisica dei decenni successivi.
- Heinrich Geissler a Bonn, era riuscito a costruire delle ampole di vetro in cui si potevano saldare elettrodi metallici; le ampole potevano poi essere parzialmente evacuate utilizzando una 'pompa a mercurio' basata sullo sfruttamento del 'vuoto torricelliano'.
- Heinrich Rühmkorff, a Parigi, aveva costruito un apparecchio basato sul principio dell'induzione elettromagnetica – il 'rocchetto di Rühmkorff' – che era in grado di produrre ai capi della bobina secondaria una ddp, di breve durata, di alcune migliaia di volt.
- L'uso congiunto di questi due manufatti è stato essenziale per lo sviluppo dello studio sperimentale della scarica nei gas rarefatti. La prima applicazione dei tubi di Geissler permise a Plücker di individuare i 'raggi catodici' nel 1858.

Dal Continuo al discreto - Prodromi II

- I decenni successivi videro l'accumulazione di una grande quantità di risultati concernenti i raggi catodici. Tuttavia, la loro attendibilità appare oggi sovente problematica a causa della complessità dei fenomeni coinvolti e della mancata consapevolezza di tale complessità.
- Esemplare, a questo riguardo, appare il risultato ottenuto nel 1892 da Hertz, secondo cui i raggi catodici non sono deviati da un campo elettrico.
- Più tardi J.J. Thomson espresse l'opinione secondo cui tale risultato negativo fosse verosimilmente da attribuirsi ad una troppo elevata pressione del gas residuo con conseguenti fenomeni di carica spaziale dovuti agli ioni del gas.
- La complessità dei fenomeni e l'ambiguità dei risultati sperimentali aveva quindi permesso la sopravvivenza, sin verso la fine del secolo, di due ipotesi interpretative: i raggi catodici come composti da particelle cariche e i raggi catodici come perturbazioni elettromagnetiche (dell'etere).
- La risoluzione della controversia sui raggi catodici fu però preceduta dalla scoperta dei raggi X e della radioattività naturale.

Il decennio straordinario - La scoperta dei Raggi X

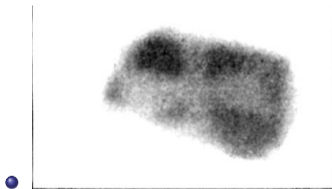
- La scoperta dei raggi X (dicembre 1895) fu caratterizzata da un elemento di casualità. Röntgen si proponeva di studiare i raggi catodici utilizzando una disposizione sperimentale messa a punto da Phillip Lenard.
- Tuttavia, Röntgen racchiuse il suo tubo di Geissler in un scatola di cartone nero, mentre Lenard aveva usato una schermatura di piombo.
- Röntgen si accorse che la lastra 'dipinta' con platinocianuro di bario (usata da Lenard come rivelatore dei raggi catodici) diventava luminescente anche se posta al di fuori della portata del flusso dei raggi catodici: così prese avvio la scoperta dei raggi X.
- L'elemento di casualità è innegabile. Va tuttavia osservato che, in quel contesto, era molto probabile che un simile caso si verificasse.
- Per quante volte ancora i fisici avrebbero potuto aggirarsi intorno a tubi di Geissler– che emettono raggi X– senza notare la luminescenza sospetta della lastra dipinta di platinocianuro di bario?

La scoperta della radioattività I

- La scoperta della radioattività naturale è un esempio di scoperta generata dall'intreccio di una ipotesi plausibile (anche se a posteriori sbagliata) con un elemento di casualità.
- Sulla base della prima memoria di Röntgen sembrava si dovesse (correttamente) localizzare la sorgente dei raggi X nella zona del tubo di Geissler posta di fronte al catodo che diventava luminescente.
- Henri Becquerel pensò che la sorgente dei raggi X fosse la zona del tubo luminescente *in quanto luminescente*, cioè che materiali luminescenti o fosforescenti potessero emettere raggi X.
- Da qui l'idea di verificare se i raggi X possono essere emessi da materiali fosforescenti.
- Dopo diverse prove negative, Becquerel provò con il bisolfato uranico di potassio che diviene fosforescente se esposto abbastanza a lungo alla luce solare.
- Come rivelatore, Becquerel usava una lastra fotografica opportunamente schermata dalla luce con carta nera: la prima verifica mostrò che il sale di uranio impiegato emetteva radiazioni che impressionavano la lastra fotografica passando attraverso la carta opaca alla luce.

La scoperta della radioattività II

- Becquerel prese atto e si dispose a ripetere l'esperimento con qualche variante inessenziale: la variante essenziale fu invece dovuta al caso.
- Il 26 e 27 febbraio 1896 il cielo sopra Parigi era nuvoloso e tale rimase anche per i giorni successivi: 'l'apparato' predisposto da Becquerel fu pertanto rinchiuso in un armadio e lì rimase sino al primo marzo, quando Becquerel decise di sviluppare ugualmente la lastra, nonostante non fosse stata esposta alla luce solare e, quindi, il sale di uranio non era divenuto fosforescente.
- La lastra (naturalmente) era rimasta impressionata e su di essa appariva – bianca – l'immagine della sottile croce di rame che Becquerel aveva interposto tra il sale e la lastra.



- Come per i raggi X, il caso ha giocato un ruolo decisivo solo nel ridurre i tempi della scoperta.

La natura dei raggi catodici

- Nel 1897 tre ricercatori – Walter Kaufmann, Joseph Thomson e Emil Wiechert – misurarono, indipendentemente l'uno dall'altro, il rapporto m/e dei raggi catodici, trovando che tale rapporto è molto minore di quello noto dello ione idrogeno.
- Thomson, nel 1899, eseguì la prima misura della carica dei “corpuscoli” che – secondo l'interpretazione da lui proposta – costituiscono i raggi catodici e vengono emessi anche nell'effetto fotoelettrico e da filamenti metallici incandescenti. Thomson trovò che la loro carica è la stessa di quella comunemente attribuita allo ione idrogeno nei fenomeni elettrolitici.
- Se si tiene conto della concomitante interpretazione dell'effetto Zeeman proposta da Lorentz (1897) – in termini di oscillazioni di particelle dotate di massa e di carica il cui rapporto risulta dello stesso ordine di grandezza di quello misurato per i raggi catodici – appare ineludibile la conclusione secondo cui questo complesso e laborioso processo ha condotto alla *individuazione* più che alla scoperta dell'elettrone.

La radiazione di corpo nero I

- La storia della radiazione di corpo nero inizia intorno al 1860 quando Kirchhoff definisce che cosa si intende per corpo nero e formula alcune leggi generali sulle sue proprietà.
- La sollecitazione allo studio della connessione tra emissione ed assorbimento di radiazioni da parte di un corpo venne a Kirchhoff dall'indagine sulle righe nere osservate da Joseph von Fraunhofer nello spettro solare (1814).
- Kirchhoff avanzò l'ipotesi secondo cui un corpo è in grado di assorbire le radiazioni che emette dando così un'interpretazione delle righe nere osservate da Fraunhofer e permettendo di trarre alcune conclusioni sulla composizione della fotosfera solare.
- Kirchhoff dimostrò poi che “ad una determinata temperatura e per una determinata lunghezza d'onda, il rapporto tra il potere emissivo e quello d'assorbimento è lo stesso per tutti i corpi.”
- Indicato con e il potere emissivo e con a quello d'assorbimento possiamo esprimere la legge di Kirchhoff scrivendo che:

$$\frac{e(\lambda, T)}{a(\lambda, T)} = f(\lambda, T)$$

$f(\lambda, T)$ è quindi una *funzione universale*, perché non dipende dalla natura del corpo preso in considerazione.

La radiazione di corpo nero II

- Kirchoff definì *corpo nero perfetto*, o più brevemente, *corpo nero* quello che assorbe tutta la radiazione incidente, qualunque sia la sua lunghezza d'onda. Essendo quindi uguale ad uno il potere d'assorbimento del corpo nero, **il suo potere emissivo coincide con la funzione universale definita dall'equazione precedente.**
- Kirchoff mostrò poi, con considerazioni termodinamiche, che, all'equilibrio, la radiazione contenuta in una cavità le cui pareti siano impermeabili alla radiazione è della stessa “qualità ed intensità” di quella emessa da un corpo nero alla stessa temperatura.
- Questa conclusione contiene implicitamente l'idea che per realizzare in laboratorio un corpo nero si debba usare una cavità isoterma con un piccolo foro: il fascio di radiazione uscente è un campione della radiazione della cavità.
- Tuttavia, l'idea che cavità isoterme potessero essere usate per lo studio della radiazione di corpo nero fu espressa esplicitamente solo nel 1884 da Christiansen e la prima cavità costruita ed utilizzata a questo scopo fu quella di Lummer e Wien (1895).

Un lungo periodo

- Gli sviluppi successivi ai risultati teorici di Kirchoff – sin verso il 1895 – furono caratterizzati da una sostanziale separatezza tra teoria ed esperimento.
- Il versante teorico si arricchiva di acquisizioni fondamentali mediante l'uso congiunto della termodinamica e dell'elettromagnetismo, culminando nella formulazione della 'legge di Wien' (1893) secondo cui l'intensità della radiazione emessa da un corpo nero è data da una funzione del tipo:

$$I(\nu) = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right)$$

dove ν è la frequenza della radiazione e $f(\nu/T)$ una funzione da determinare.

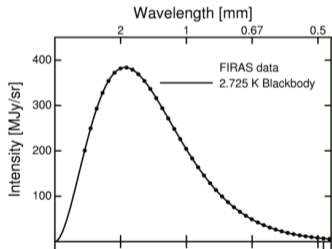
- Dalla formula precedente si ricava che $\lambda_{max} = b/T$, dove $b = (hc/k_B)/4.956 = 2.897 \times 10^{-3} \text{mK}$
costante di Wien - NIST
- Il versante sperimentale era invece in gravi difficoltà, soprattutto per la mancata individuazione di una sorgente di radiazione che avesse le caratteristiche del corpo nero.
- Non è quindi casuale il fatto che le ricerche sulla radiazione di corpo nero ricevessero nuovo impulso verso la fine del secolo, grazie all'uso di un corpo cavo isoterma quale sorgente di radiazione di corpo nero e di un nuovo tipo di rivelatore (bolometro, Samuel Langley, 1881).

- Verso la fine del secolo sembrava dunque che la vicenda della radiazione di corpo nero si stesse avviando verso una conclusione positiva.
- Max Planck, nei primi mesi del 1900, era convinto di avere posto la parola fine alla vicenda, perché persuaso di avere ottenuto una *deduzione rigorosa* della proposta di Wien (1896) – apparentemente in buon accordo con i dati allora disponibili, ma teoricamente traballante – secondo cui la funzione $f(\nu/T)$ che compare nella *legge di Wien* è un esponenziale decrescente.
- Tuttavia, le misure effettuate poco dopo presso l'Istituto Imperiale di Fisica e Tecnica di Berlino da Lummer, Pringsheim, Rubens e Kurlbaum, mostrarono che i dati sperimentali relativi a grandi lunghezze d'onda si discostavano nettamente dall'andamento previsto dalla legge di distribuzione proposta da Wien e dedotta in modo ritenuto rigoroso da Planck.
- Planck si impegnò allora per trovare una soluzione definitiva.

La formula di Planck

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$$

Questa formula descrive correttamente i dati sperimentali, come dimostrato dalle misure effettuate con il satellite COBE (1990 circa) sulla radiazione cosmica di fondo che, come è noto, è una radiazione di corpo nero corrispondente alla temperatura di 2.725 K.



Misura effettuata con FIRAS (Far Infrared Absolute Spectrophotometer). Missione COBE (COsmic Background Explorer).

Le critiche di Einstein

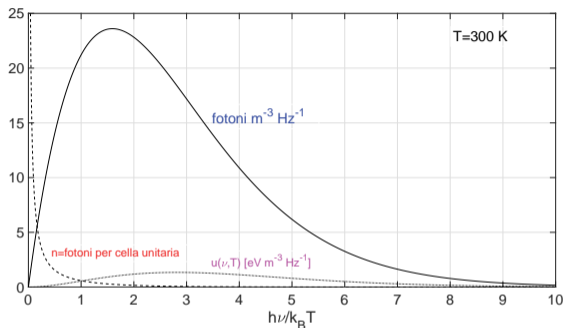
- Nel 1906, Einstein osserva che il termine

$$\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$$

che compare nella formula di Planck è stato ricavato supponendo che lo scambio di energia tra i “risonatori” – che nel modello di cavità isoterma di Planck sono costituiti da cariche elettriche in moto armonico – e la radiazione elettromagnetica contenuta nella cavità avvenga in modo continuo.

- L’uso di questo termine è allora incompatibile con la successiva quantizzazione dell’energia $\varepsilon = h\nu$ che può essere scambiata tra risonatori e radiazione.
- Tuttavia, siccome la formula di Planck appare in accordo con i dati sperimentali, Einstein propone di continuare ad usarla in attesa di una sua deduzione rigorosa.
- Questa arriverà solo nel 1924 da parte di Satyendra Nath Bose. La deduzione di Bose si basa sulla statistica dei quanti di luce – dotati di energia $h\nu$ e di quantità di moto $h\nu/c$ – contenuti nella cavità isoterma: la radiazione elettromagnetica maxwelliana non entra in gioco.

Radiazione di corpo nero: un altro punto di vista



Spettro della radiazione di corpo nero.

- Quando n è piccolo la formula di Planck è approssimata da quella di Wien (descrizione corpuscolare).
- Quando n è grande, la formula di Planck è approssimata da quella di Rayleigh - Jeans (descrizione ondulatoria).

Radiazione di corpo nero in natura

- Lo spettro della radiazione di corpo nero è il prodotto dell'equilibrio termico tra la radiazione e la materia. Storicamente, questo equilibrio è stato studiato – teoricamente e sperimentalmente – con un corpo cavo isoterma (cavità isoterma).
- In Natura esistono radiazioni di corpo nero prodotte in regioni spaziali in cui radiazione e materia sono in equilibrio termodinamico. Queste regioni spaziali sono limitate, ma prive di pareti come quella di un corpo cavo.
- La radiazione cosmica di fondo (Cosmic Microwave Background Radiation - CMBR) è il prodotto dell'ultima fase dell'interazione tra radiazione e materia (elettroni e protoni) avvenuta durante la storia dell'Universo.
- Questa fase fu seguita dalla ricombinazione di elettroni e protoni. La radiazione esistente durante la transizione tra le due fasi ha iniziato a propagarsi liberamente nell'Universo in espansione.
- La CMBR è sostanzialmente isotropa. Le sue piccole ma importanti anisotropie ci raccontano molte caratteristiche dell'Universo in quella fase.
- Un osservatore che vede la CMBR sfericamente isotropa (ignorando le piccole anisotropie) può essere indicato come in quiete “assoluta”. Questo osservatore può parlare di una corona sferica in cui è avvenuta l'ultima interazione tra radiazione e materia. Può, inoltre, parlare di una superficie sferica di “ultima diffusione” (surface of last scattering). Oltre quella superficie l'Universo è opaco nel senso che non può dirci nulla su come era.

Le stelle come corpi neri

La radiazione proveniente dalle stelle è il prodotto dell'interazione tra radiazione e materia in una zona (fotosfera) in cui radiazione e materia sono in equilibrio termico.

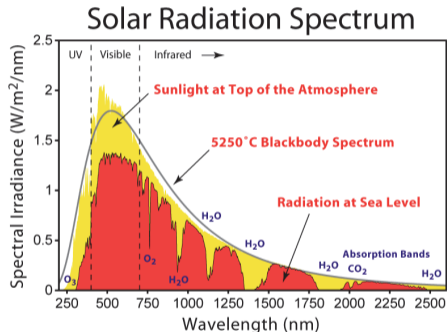


Figura tratta da: [University of Oregon](#). Anche in questo caso, la sorgente della radiazione di corpo nero risiede in una regione limitata dello spazio, ma priva di pareti come quella di un corpo cavo.

Onde EM e quanti di luce

- Il riemergere della descrizione corpuscolare della luce ha dato origine al cosiddetto dualismo onda-corpuscolo, la cui formulazione popolare consiste nell'affermare che, per esempio, **la luce si comporta talora come una particella e tal'altra come un'onda**. Si veda: **Elettromagnetismo, relatività, quanti - Capitolo IV**.
- Questa frase è un'affermazione su come la luce si comporta nel Mondo. Affermazioni di questo tipo sono affermazioni ontologiche, cioè di esistenza di qualcosa nel Mondo.
- Le affermazioni ontologiche sono solo plausibili e debbono, comunque, essere compatibili con l'insieme delle conoscenze acquisite.
- Se, invece, parliamo di due diverse **descrizioni** del fenomeno che chiamiamo luce, allora, il problema è quello di trovare un raccordo tra le due descrizioni.

Esperimento a fotone singolo. Apparato

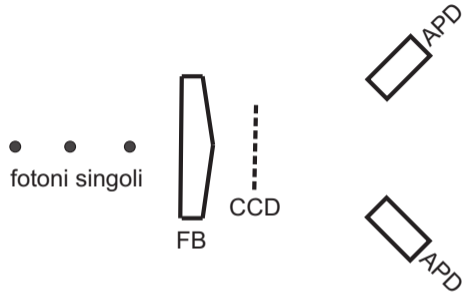


Figura: Esperimento di interferenza con un fotone alla volta (quasi). FB= biprisma di Fresnel; CCD=fotocamera a CCD 'enhanced'; APD= fotodiodi. I fotodiodi servono per verificare che il singolo fotone arrivi solo ad uno dei due (togliendo, naturalmente, la fotocamera). Jacques V, Wu E, Toury T, Treussart F, Aspect A, Grangier P and Roch JF 2005 Single - photon wavefront-splitting interference *Eur. Phys. J. D* **35** 561

Esperimento a fotone singolo. Esperimento

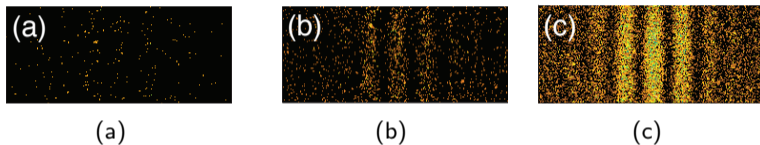


Figura: Interferenza: (a) 272 fotoni; (b) 2240 fotoni; (c) 19773 fotoni. Jacques et. al. 2005.

Onde EM e fotoni: interferenza a fotone singolo

una foto ogni secondo; 8 fotoni al secondo; film: 30 fotogrammi al secondo

Onde EM e fotoni: fotografie a bassa intensità luminosa

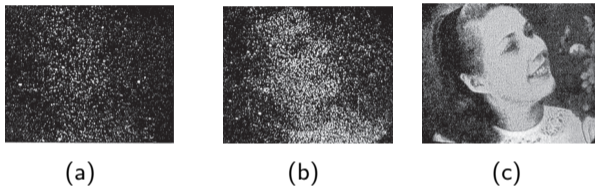
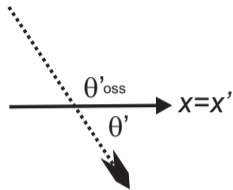


Figura: Foto con poca luce: (a) 1×10^3 fotoni; (b) 1.2×10^4 fotoni; (c) 2.8×10^7 fotoni. Rose A 1953
Quantum and Noise Limitations of the Visual Process *Josa* **43** 715.

Onde \Leftrightarrow corpuscoli

- Il raccordo tra descrizione ondulatoria e corpuscolare della luce è assicurato dalla formula **magica** $E = h\nu$ **interpretata alla Einstein**.
- In talune situazioni sperimentali, quando il numero di fotoni coinvolti in un esperimento è statisticamente significativo – non importa se usati uno alla volta o tutti insieme – le predizioni della descrizione ondulatoria sono corroborate dall'esperimento.
- Esempi: interferenza, fotografia, **dispersione della luce attraverso un prisma o mediante un reticolo di diffrazione con un fotone alla volta**.
- Tuttavia, quando l'interazione tra radiazione e materia avviene con scambio di energia a livello microscopico, è necessario usare la descrizione corpuscolare.
- Esempi: effetto fotoelettrico, assorbimento o emissione da parte di atomi, effetto Compton.

Quesito



- Planck a Mosengeil (1907). Un osservatore K' si muove con velocità v rispetto a K lungo la direzione comune $x \equiv x'$. K e K' si trovano in una cavità isoterma e K è in quiete rispetto alle pareti della cavità.
- Quale temperatura misura K' ?
- Risposta:

$$\nu' = \nu \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 - B \cos \theta'_{oss}}; \quad T' = T \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 - B \cos \theta'_{oss}}$$

dove: T è la temperatura misurata da K ; θ'_{oss} è l'angolo formato dalla direzione di osservazione di K' con l'asse $x' \equiv x$.

- Il risultato ottenuto da Mosengeil si applica alla radiazione cosmica di fondo.

Moto “assoluto”. I

- L'esistenza della radiazione cosmica di fondo permette di definire in “*quiete assoluta*” l'osservatore che vede la radiazione di fondo isotropa (prescindendo dalle anisotropie intrinseche). Denotiamo con O tale osservatore. Un osservatore O' (il satellite) in moto inerziale rispetto ad O , lungo il comune asse $x \equiv x'$ con velocità v vede la radiazione di fondo anisotropa per effetto Doppler. Si ha:

$$\nu' = \nu \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 + B \cos \theta'}; \quad B = \frac{v}{c}$$

dove θ' è l'angolo formato dalla direzione di propagazione della radiazione con l'asse $x' \equiv x$

- Questa equazione, scritta in funzione dell'angolo di osservazione $\theta'_{\text{oss}} = \pi - \theta'$, assume la forma:

$$\nu' = \nu \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 - B \cos \theta'_{\text{oss}}}$$

Moto 'assoluto'. II

Cambiando la direzione di osservazione, O' deve individuare quella per cui la frequenza misurata in una direzione e in quella opposta sia la stessa (ed uguale a $\nu\sqrt{1-B^2}$). Queste due direzioni sono perpendicolari alla sua direzione di moto rispetto all'osservatore in quiete ed alla direzione opposta. Individuate queste due direzioni, O' deve cercare la massima intensità ad una frequenza prescelta in entrambe le direzioni. Siano ν'_+ e ν'_- queste due frequenze. La più grande ν'_+ corrisponde alla sua direzione di moto; l'altra alla direzione opposta. Valgono allora le due relazioni:

$$\nu'_+ = \nu_0 \sqrt{\frac{1+B}{1-B}}$$

$$\nu'_- = \nu_0 \sqrt{\frac{1-B}{1+B}}$$

$$\nu'_+ \times \nu'_- = \nu_0^2$$

$$\frac{\nu'_+}{\nu'_-} = \frac{1+B}{1-B} \Rightarrow B = \frac{\nu'_+ - \nu'_-}{\nu'_+ + \nu'_-}$$

- Velocità della Terra: $V \approx 360 \text{ km s}^{-1}$

Se la storia. . .

- Come abbiamo visto, lo sviluppo storico ha condotto alla quantizzazione dell'energia attraverso la quantizzazione della radiazione.
- “Sfortunatamente, il primo problema trattato nello sviluppo della teoria dei quanti è stato quello della quantizzazione dell'energia delle oscillazioni armoniche elettromagnetiche” [Max Jammer].
- Una rivisitazione critica della teoria cinetica dei gas, congiuntamente ad una analisi approfondita della dipendenza dalla temperatura dei calori specifici delle molecole e dei solidi cristallini, avrebbe potuto condurre alla quantizzazione dell'energia degli atomi, delle molecole e dei solidi prima della quantizzazione della radiazione.
- Ma, come ben sappiamo, con i SE non si può rifare la Storia.
- Potremmo, tuttavia, scegliere questa strada dal punto di vista didattico, come suggerisce un articolo di [Nevill Mott del 1964](#).

La teoria cinetica dei gas I

- “Quando gli atomi si urtano in un gas, non trasferiscono alcuna parte della loro energia cinetica ai moti dei loro costituenti interni, qualunque cosa essi siano (oggi diremmo elettroni e nuclei). Supponiamo che un gas freddo sia in contatto con un corpo caldo. Gli atomi lenti del gas freddo, dopo una collisione con gli atomi veloci o con gli atomi oscillanti del corpo caldo, rimbalzano più veloci di come erano prima della collisione. Ma, siccome il loro calore molare è [sempre] $(3/2)R$, ne deduciamo che l'unica cosa accaduta è un aumento della loro energia cinetica: se c'è qualcosa che si muove dentro l'atomo, essa non ha acquisito alcuna energia cinetica . . . l'atomo, nelle collisioni a temperature normali, si comporta come una sfera elastica. [Mott, p. 403]”
- “Alla luce delle nostre conoscenze, è naturale supporre che:
(a) per dare energia al moto dei costituenti dell'atomo, è necessario trasferire *almeno* un'energia minima uguale a ΔE (energia di eccitazione);
(b) ΔE è molto più grande dell'energia cinetica media $(3/2)k_B T$ di un atomo del gas ($\Delta E \approx 5$ eV; $k_B T \approx (1/40)$ eV a temperatura ambiente.” [Mott, pp. 403-404.]

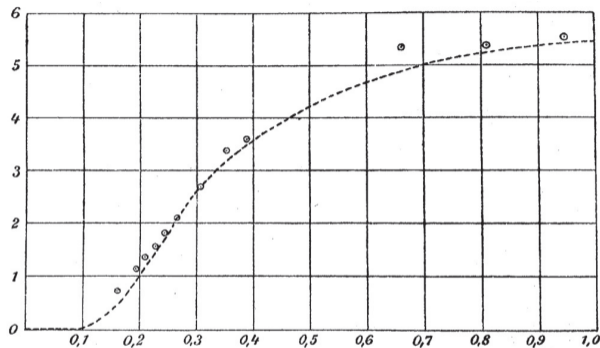
La teoria cinetica dei gas II

- “Queste considerazioni costituiscono un tentativo di presentare con un linguaggio elementare la legge dell’equipartizione dell’energia, secondo la quale bisogna associare ad ogni termine quadratico che compare nell’espressione dell’energia una energia pari a $(1/2)k_B T$ per ogni atomo del gas”. [Mott, p. 404.]
- Si prosegue poi con la trattazione classica delle capacità termiche molari dei gas monoatomici e delle molecole biatomiche lineari. In quest’ultimo caso, si tiene conto dell’energia cinetica di traslazione, di rotazione e di vibrazione.
- La capacità termica molare di una molecola biatomica lineare risulta essere pari a $(7/2)R$, se si tiene conto di tutti i contributi (traslazione, rotazione e vibrazione).
- Per la molecola diatomica dell’idrogeno la capacità termica molare a temperatura ambiente è circa $(5/2)R$; a temperature maggiori, la capacità termica aumenta ma non raggiunge mai il valore teorico $(7/2)R$: la molecola si dissocia prima di poter raggiungere questo valore. A circa 60 K, la capacità termica della molecola è pari a $(3/2)R$.
- Per i solidi cristallini monoatomici, supponendo che ciascun atomo possa oscillare con moto armonico intorno alla sua posizione di equilibrio in tre direzioni tra di loro perpendicolari, si ottiene che la capacità termica molare è uguale a $3R$. Il valore numerico previsto da questa formula era stato trovato da Pierre-Louis Dulong e Alexis-Thérèse Petit nel 1819. Tuttavia, è necessario osservare che il concetto di mole era assente in quel periodo: Dulong e Petit avevano interpretato questo valore come la capacità termica di un singolo atomo **Giuliani, Atomi e fisici nell'Ottocento**.

La capacità termica molare dei solidi cristallini

- Secondo la regola dell'equipartizione dell'energia, la capacità termica molare dei solidi cristallini monoatomici è uguale a $3R$ ed è indipendente dalla temperatura.
- Tuttavia, nel 1875, Heinrich Friedrich Weber pubblica i dati sperimentali dei calori specifici dei solidi cristallini di boro, silicio, grafite e diamante per un intervallo di temperatura compreso tra -100°C e 1000°C .
- Nel caso del diamante, il calore specifico varia di un fattore 15 in questo intervallo di temperatura.

La capacità termica dei solidi cristallini II



I punti sono i dati sperimentali di Weber (1875) per il diamante. La linea tratteggiata è la curva teorica prevista dal modello di Einstein per i calori specifici dei solidi (1907) espressa in unità di cal/mole/K in funzione di $(h\nu)/(k_B T)$.

Che cosa suggeriscono i dati sperimentali?

- A temperature ordinarie, le energie dei componenti degli atomi non sono modificate dall'aumento della temperatura del gas.
- Per quanto riguarda le molecole diatomiche – come quella dell'idrogeno – la diminuzione della loro capacità termica molare al diminuire della temperatura suggerisce che, a basse temperature, alcuni gradi di libertà sono “congelati”, cioè non sono attivi.
- Lo stesso discorso vale per i solidi cristallini monoatomici.
- L'ipotesi che le energie delle particelle materiali possano assumere solo valori **discreti** permette di descrivere, almeno qualitativamente, questi fenomeni.

Il modello di Einstein I

- Si suppone che gli atomi di un cristallo monoatomico possano oscillare di moto armonico lungo tre direzioni tra loro perpendicolari con una medesima frequenza ν .
- Tuttavia, si suppone che l'energia media associata a ciascuna oscillazione sia data da:

$$\frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$$

che è l'energia media di ogni oscillatore nel modello di cavità isoterma di Planck.

- Ne segue che l'energia media di $3N_A$ atomi oscillanti è:

$$E = 3N_A \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$$

- Il calore molare a volume costante è allora dato dalla derivata parziale dell'energia media rispetto alla temperatura:

$$C_V = -\frac{3N_A h\nu}{k_B T^2} \left[-\frac{e^{h\nu/k_B T} h\nu}{(e^{h\nu/k_B T} - 1)^2} \right]$$

Il modello di Einstein II

- Ponendo $\Theta_E = h\nu/k_B$ (Θ_E temperatura di Einstein), la formula dei calori specifici assume la forma:

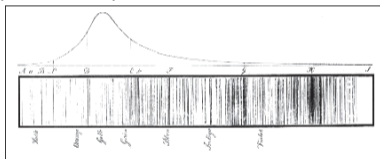
$$c_V = 3R \left(\frac{\Theta_E}{T} \right)^2 \frac{e^{(\Theta_E/T)}}{(e^{\Theta_E/T} - 1)^2}$$

- Per $T \gg \Theta_E$ si ha $c_V \approx 3R$.
- Per $T \rightarrow 0$, la capacità termica molare tende esponenzialmente a zero, come richiesto dal terzo principio della termodinamica.
- Tuttavia, secondo il più raffinato modello di Debye, a basse temperature risulta $c_V \propto T^3$, in buon accordo con i dati sperimentali.

Atomi: gli indizi

Affinché tu non cominci a diffidare delle mie parole – siccome i principi primi delle cose non possono essere scorti con gli occhi – ascolta quali altri corpi è necessario riconoscere come esistenti anche se non sono visibili.
[Lucrezio, De Rerum Natura, libro I]

- Nel 1802, William Hyde Wollaston (1766-1828) osserva alcune righe nere che interrompono la continuità dello spettro della luce solare osservato da Newton.
- Nel 1814, Joseph von Fraunhofer (1787-1826) osserva diverse centinaia di righe nere nello spettro solare.



Disegno di Fraunhofer delle righe osservate.

- La spiegazione delle righe, poi dette di Fraunhofer, è attribuita a Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887): gli atomi assorbono le radiazioni che sono in grado di emettere (1859-1860). Tuttavia, anche Ångström e Foucault avevano avanzato la stessa ipotesi.
- Negli anni sessanta, Kirchhoff verifica che le linee di emissione del sodio coincidono con le corrispondenti righe nere osservate nello spettro solare e insieme a Robert Bunsen (1811-1889) individua due nuovi elementi: rubidio e cesio.

Il commento di Maxwell

- “Siamo così condotti a concludere che in parti dell’Universo assai distanti tra loro esistono diversi tipi di molecole e che le molecole dello stesso tipo hanno lo stesso **periodo di vibrazione**, oppure che questo periodo è talmente simile che i nostri spettroscopi non riescono a trovare alcuna differenza” (Voce *Atomo*, IX ed. Enciclopedia Britannica, 1878).
- È evidente che quelli che abbiamo chiamato “indizi” sulla struttura discreta dei valori dell’energia, appaiono tali solo alla luce delle nostre conoscenze.
- Il concetto di atomo o di molecola – che implica una natura discreta della materia – era utilizzato dai fisici solo nella teoria cinetica dei gas, peraltro idealizzati come un insieme di masse puntiformi o, nella descrizione dei fenomeni elettrolitici, studiati in dettaglio da Faraday.
- Faraday, scriveva, peraltro: “Se adottiamo la teoria atomica o la sua fraseologia, allora agli atomi di corpi che sono equivalenti nella loro azione chimica è associata la stessa quantità di elettricità. **Debbo tuttavia confessare di essere sospettoso del termine atomo; perché se è molto facile parlare di atomi, è molto difficile formarsi un’idea chiara della loro natura, specialmente quando si considerano corpi composti.**” *Experimental Researches in Electricity*, vol. I, §869.]

Riprendendo la proposta di Mott

- Mott, suggerisce di introdurre la quantizzazione dell'energia attraverso la quantizzazione di un'oscillazione armonica di una particella materiale o di un campo elettromagnetico:

$$E = \left(\frac{1}{2} + n \right) h\nu$$

- A parte il fattore $(1/2)$, questa procedura era stata usata da Planck (1900) e da Debye (1912) per pervenire alla formula della radiazione di corpo nero: Planck, usando i risonatori (particelle cariche oscillanti), Debye quantizzando i modi normali di vibrazione del campo elettromagnetico in una scatola a forma di parallelepipedo.
- Tuttavia, entrambe queste procedure mescolano continuità e quantizzazione e, pertanto, non sfuggono all'obiezione di Einstein del 1906.

Allora?

- A mio parere, quest'ultimo suggerimento di Mott non è accettabile, perché mantiene l'ambiguità della convivenza tra continuo e discreto.
- Come alternativa, Mott scrive: “[alternativamente] si potrebbe dire che la luce si comporta talvolta come un'onda, tal altra come una particella. Il primo approccio è più in sintonia con la moderna teoria dei campi; il secondo sviluppa un'analogia (che deve essere richiamata più avanti) tra elettroni e fotoni [Mott, pp. 406-407]”
- La mia preferenza va a questa seconda via, declinata però come abbiamo fatto in precedenza, ed evitando l'uso dei concetti impliciti nel cosiddetto dualismo onda-corpuscolo.
- In conclusione, si potrebbe, a mio parere, usare ampiamente le considerazioni sugli indizi della discretezza della Natura, affiorati qua e là nell'Ottocento, ma puntare poi sulla svolta cruciale operata da Einstein con l'ipotesi dei quanti di luce.

Conclusioni

- Nel corso dell'Ottocento era dominante la concezione continua della materia e della radiazione. All'interno di essa, affioravano qua e là, “isole concettuali di discretezza” che, tuttavia, non mettevano in discussione la visione dominante.
- Il passaggio dal continuo al discreto, avvenne durante il “decennio straordinario” sull'onda delle nuove scoperte sperimentali e fu favorito da due fondamentali innovazioni teoriche: la formula di Planck della radiazione di corpo nero e l'ipotesi “euristica” dei quanti di luce.
- Mentre la formula di Planck era il risultato di una commistione tra continuo e discreto, l'ipotesi della natura discreta della radiazione era “rivoluzionaria”.
- Non a caso, dovettero trascorrere almeno due decenni affinché potesse entrare a far parte della descrizione fisica del Mondo.