

ANALISI CRITICA D'UN ARTICOLO DA PREMIO NOBEL ALBERT EINSTEIN E IL QUANTO DI LUCE

(Pasquale Tomasello¹)

Introduzione

L'articolo di A. Einstein² concernente il cosiddetto *Lichtquant*, quanto di luce, e l'effetto fotoelettrico viene considerato da molti autori di *textbook*³, scienziati anche di grido, storici della fisica moderna⁴, come una pietra miliare nella fondazione della vecchia *Quantum Theory*. Questo giudizio, confermato e sanzionato anche dal *Nobel Committee*, che nella sua motivazione cita espressamente il contributo einsteiniano alla spiegazione dell'effetto fotoelettrico qual scoperta della sua legge⁵, pur contenendo del vero ha però vistosamente tutti i tratti del tipico conformismo accademico e suona come un tam-tam di riconoscimento e affiliazione per i tanti adepti del vasto mondo della fisica. *Res mirabilis*, dunque, d'un *annus mirabilis*. La maggioranza dei fisici v'aderisce per diverse ragioni; soprattutto però per comodità intellettuale e quieto vivere, pur senza aver mai dato un'occhiata attenta al lavoro originale ed in specie alla letteratura d'allora ivi coinvolta.

Com'è noto e s'addice alla massima icona della fisica, Einstein è generalmente molto venerato, ma non infrequentemente anche criticato, talvolta con astio e malevolenza. Ciò non è insolito e strano pei grandi personaggi, ché, come scriveva Thomas Mann, è inevitabile che la fama si trasformi in mala fama, quanto meno in parte noi aggiungiamo. Tra gli innumerevoli *fan* del grande scienziato, tuttavia, solo pochi hanno mai letto le memorie famose di Einstein, e men che meno quelle degli altri

¹ Università di Catania. L'autore ringrazia il Prof. U. Bartocci per la revisione del manoscritto e qualche suggerimento.

² Albert Einstein, "Ueber einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt" (Su un punto di vista euristico concernente la generazione e la trasformazione della luce), *Annalen der Physik*, IV Folge, Band XVII, 1905, pp. 132-148.

³ Per tutti qui si citano due testi, molto noti in Italia: **a)** P. Caldirola. R. Cirelli e M. Prosperi: *Introduzione alla Fisica Teorica*, UTET, 1982; **b)** R.B. Leighton, *Principles of Modern Physics*, McGraw-Hill Book Company Inc., N.Y, Toronto, London, 1959.

⁴ **a)** A. Pais, *Subtle is the Lord... The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, 1982. In Italiano per i tipi della Bollati Boringhieri, Torino, 1986, e L'Espresso Editoriale, 2006, con il titolo: *Einstein Sottile è il Signore ... La scienza e la vita di Albert Einstein*; **b)** Albert Einstein, *Teoria dei quanti di luce*, a cura e con un saggio di Armin Hermann, Newton Compton Editori; **c)** E. Bellone (a cura di), *Albert Einstein Opere Scelte*, Bollati Boringhieri, 1988, Introduzione, pp. 18-21

⁵ Vedi www.nobel.org.com o anche la ref. 4c, p. 753: "per i suoi contributi alla fisica teorica e specialmente per la scoperta della legge dell'effetto fotoelettrico".

grandi scienziati del suo tempo con cui in un modo o nell'altro egli ebbe a che fare. Nel caso del quanto di luce adoperato da Einstein in quel famoso articolo che noi vogliamo qui da vicino criticamente analizzare, per quanto ci riesca *sine ira atque studio*, i suoi tanto interessati seguaci non hanno in particolare mai letto le memorie originali di Planck sul corpo nero, se non al più quella celebre del 14 dicembre 1900, e si limitano a ripetere quanto scritto in proposito sui libri di testo, spesso acriticamente ed erroneamente, contando sul fatto che quelle memorie sono poco accessibili e circolate.

Durante la sua vita Einstein ebbe, fin dall'inizio della sua strabiliante carriera, tanti potenti ed influenti amici all'interno e all'esterno della scienza, ma anche più d'un irriducibile nemico, anch'esso al tempo alquanto potente ed influente, benché infine tragicamente sconfitto. Da questi ultimi Einstein venne accusato fra l'altro, com'è noto, di condotta professionale poco acconcia e dignitosa e, verosimilmente esagerando, persino di plagiare risultati altrui con un suo tipico metodo. Le polemiche al riguardo non si sono mai spente e, benché poco visibili, ancora oggi si riverberano specialmente nei confronti della teoria della relatività, producendo una letteratura a margine sterminata. Anche nel caso dell'articolo del 1905 sul quanto di luce sembra esserci qualcosa che rende non del tutto infondate simili accuse.

Sulla base di quanto detto sopra, ad Einstein viene dato credito di essere il *padre* del quanto di luce - *il quanto di luce di Einstein*, con genitivo possessivo - nell'accezione oggi comunemente intesa, essendo documenti notarili per tale diritto genitoriale il famoso articolo del 1905 e un altro immediatamente seguente del 1906⁶, relativamente meno famoso, trascurando gli oscuri indizi presenti nelle precedenti memorie, come si rileva in ref. 4a e 4c. Un suo figlio dunque, che benché tardi sarebbe stato successivamente battezzato, raggiunta la maggiore età, col nome di *fotone*, padrino Gilbert N. Lewis⁷. Un premio Nobel dei nostri tempi, un chimico poeta e letterato⁸, fra altri, per esempio, su di esso, in occasione della grande *kermesse* mondiale del centenario, ha sentito la necessità di mischiare arditamente racconto e scienza (*Storied Theory*), e frammezzo ispirate cantonate e sottili falsificazioni elogiarne *in toto* il carattere geniale e rivoluzionario, che doveva così fatalmente segnare in maniera irreversibile il mondo della conoscenza fisica e non solo. La misura dell'esaltazione delle prodezze del giovane Einstein raggiunge poi paurosi eccessi di falsità e contorcimento dei fatti che, non fosse per i chiari fini agiografici, superano ogni limite di decenza e di gusto nella santa e cieca celebrazione che ne è stata fatta dal Pais (cfr. ref. 4a).

⁶ Albert Einstein, "Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption", *Annalen der Physik*, IV Folge, Band XX, 1906, pp. 199-206.

⁷ Il neologismo fu ufficialmente adottato nel 1927, durante il V Congresso Solvay.

⁸ R. Hoffmann (Premio Nobel per la Chimica, 1981), *American Scientist*, vol. 93, July-August, 2005, p. 308-310.

Noi non siamo affatto d'accordo con simile punto di vista che ci appare esagerato e ridicolo, corrivo e poco ragionato, e consideriamo questo lavoro di Einstein, fatto salvo il felice innesto del quanto di luce nella difficile problematica dell'effetto fotoelettrico e la sua interpretazione con la nota elementare equazione, un semplice, modesto lavoro di un giovane aiutante studioso che cerca di farsi strada nell'aspro mondo accademico usando liberamente di risultati e fatti scientifici che altri ricercatori di maggiore esperienza e tenore avevano già ottenuto. Nel merito, l'articolo che qui si esaminerà in minuti dettagli anche tecnici, non contiene affatto alcunché di nuovo di quanto già, benché forse non esplicitamente, non fosse già stato acquisito documentalmente sul problema della quantizzazione della radiazione e sull'effetto fotoelettrico. Invero, tale lavoro di Einstein fu per quasi vent'anni più ignorato che controverso dalla comunità scientifica di riferimento, e *solo* dopo il 1922-1923 o forse ancora più tardi cominciò ad essere mitizzato e posto a fondamento della teoria dei quanti.

1.

L'articolo einsteiniano qui in esame vuole trattare, come apertamente riferito nel titolo, il problema della generazione e trasformazione della luce da un punto di vista euristico. Questo problema era già presente nelle preoccupazioni e negli studi di diversi ricercatori sperimentali e teorici del tempo, e dominava fortemente nel cosiddetto problema del corpo nero (c.n.), risolto in maniera brillante e problematica da Max Planck pochi anni prima (cfr. ref. 11a) con la sua ipotesi della discretezza energetica dei possibili stati della generica radiazione di frequenza ν . Il punto di vista euristico che Einstein vuole adottare, com'egli subito dichiara alla fine dell'introduzione, è proprio l'ipotesi planckiana degli elementi discreti di energia radiante, senza però esplicitarlo: "*colla ipotesi che l'energia della luce sia distribuita discontinuamente nello spazio*", scrive egli. Per mezzo di questa ipotesi, o punto di vista, Einstein si vuole provare euristicamente a rendere più facilmente comprensibili e descrivibili diversi fenomeni poco chiari quali "*le osservazioni sulla radiazione nera, la fotoluminescenza, la produzione di raggi catodici*". Continua scrivendo: "*Secondo l'ipotesi qui concepita e presentata, nella propagazione d'un raggio di luce emesso da un corpo puntiforme la energia non si distribuisce continuamente su spazi divenenti sempre più grandi, ma la stessa piuttosto consisterebbe di un finito numero di quanti di luce localizzati in punti dello spazio, che si muovono e, senza frazionarsi, vengono assorbiti e prodotti solo come interi*". Chiude l'introduzione asserendo che nel seguito vuole comunicare i ragionamenti fatti che lo hanno condotto a tale veduta, anziché passare subito alle applicazioni della stessa, già nota e pubblicata, trascurando intenzionalmente come suo stile di informare se mai altri avessero fatto o scritto qualcosa a riguardo.

A motivazione e quadro di riferimento delle sue riflessioni l'autore espone nell'esordio e prosiegua dell'introduzione una qual certa differenza formale, "*tiefergreifender*", profonda e radicale, tra gli schemi teorici della teoria maxwelliana

dei processi e.m. e quelli dell'allora in fasce meccanica statistica, e cioè teoria atomistica ed elettrica della materia. Ossia prepara la scena ed i caratteri del racconto in cui egli ha rielaborato la propria conoscenza della situazione al di là dello stato dell'arte nel campo in cui si cimenta. Una cosa comune, questa, la prima: un usato espediente della tecnica di scrivere *paper* scientifici. Una cosa mal tollerata la seconda, oggi almeno. Grandezze continue vs. grandezze discrete, energie distribuite continuamente ed illimitatamente nello spazio di propagazione ed energie discrete dei singoli atomi ed elettroni che costituiscono un corpo materiale, il cui stato meccanico può essere fissato con un numero finito di gradi di libertà, mentre per lo stato di radiazione d'un certo spazio s'abbisognerebbe di infiniti gradi di libertà. Per cui quando le due teorie vengono necessariamente ad intervenire simultaneamente nei fenomeni fisici allora nascono difficoltà considerevoli, bla, bla, bla. Siffatta osservazione, così tanto filologicamente ammirata⁹, credo invece essere alquanto vaga ed indeterminata pur contenendo qualcosa di vero. La meccanica statistica cui l'autore allude è certamente quella dei sistemi indipendenti, e dire che lo stato d'energia di un corpo materiale sia esprimibile solo come somma su variabili discrete delle singole energie meccaniche delle particelle, quando egli stesso parla di elettroni come costituenti il corpo, è certamente una semplificazione anche in relazione ai gas. Come casi limite, la meccanica statistica di allora e la teoria maxwelliana dei fenomeni e.m. hanno senza dubbio differenti e stridenti assunti e postulati, che allora venivano pian piano faticosamente focalizzati. Ma è difficile pensare che simile riflessione fosse sfuggita a Lorentz o a Planck o ad altri ancora.

L'articolo si compone di altre nove sezioni, di cui le prime sei dedicate all'esposizione delle riflessioni e dei ragionamenti dell'autore per suffragare l'ipotesi annunciata nell'introduzione, cioè il quanto di luce, che l'ignaro lettore può ben credere essere sua originale. Le tre sezioni finali del lavoro sono dedicate all'euristica di detta ipotesi discutendo tre casi sperimentali: 7. La regola di Stokes; 8. La produzione di raggi catodici; 9. La ionizzazione di gas per luce **u.v.**

2.

La prima sezione dell'articolo in esame s'intitola: *Su d'una difficoltà concernente la teoria della "Radiazione nera"*. La teoria del c.n. al momento in cui scrive Einstein ha veramente una sola ed unica difficoltà: l'ipotesi dei quanti d'energia **hν** *extra moenia*

⁹ Il signor Bellone, in ref. 3c, p. 19, trova: "*una simile descrizione della luce antitetica alla descrizione della radiazione data da Planck nel 1900: e tale incompatibilità era destinata a durare*". Non cita però lo stesso quali passi dei lavori di Planck del 1900 siano così antitetici a tale veduta di Einstein. Si può rimandare il signor Bellone alla memoria di Planck del gennaio 1901 o a quella del dicembre 1900? Invitandolo pure a non liquidare il problema del c.n. e la soluzione di Planck come fatto in quella sua sciatta e falsa rappresentazione datane a pag. 17 e successiva, dove presenta la relazione, celeberrima dice lui, **E= hν**, come qualcosa di astruso e nebuloso, calato dalla luna, decontestualizzandola in maniera sospetta, per far meglio risaltare la sua interessata adorazione dell'icona Einstein.

avanzata da Planck 4 anni prima, che Einstein ha fatto propria, e che aveva tagliato il nodo gordiano dell'accordo della **sua** teoria elettromagnetica e termodinamica del c.n. con i precisi dati sperimentali. Non ne ha altre: è una teoria completa e, ipotesi di quantizzazione a parte, perfetta, formalmente autoconsistente, l'unica vera teoria del fenomeno universale per cui era stata negli anni elaborata. Non c'erano altre teorie degne di competere con quella di Planck, e l'articolo di Lord Rayleigh dei primi mesi del 1900 è solo un modesto tentativo analo-fenomenologico ignorato da Planck.

La teoria della radiazione nera di cui vuol parlare Einstein è invece una tutta sua; non quella di Planck, né il tentativo sommario di Rayleigh. Si pone, come dice lui stesso, nel punto di vista della teoria maxwelliana e della teoria degli elettroni, nel senso che ci sono gli elettroni, non la teoria di Lorentz, e si considera un sistema termodinamico elettromagnetico a modello cinetico-molecolare della cavità radiante: molecole ed elettroni; questi ultimi liberi e vincolati a certi punti fissi che lui chiama "risonatori", un termine già usato anni prima da Planck. L'insieme viene pensato all'equilibrio termodinamico e quindi, supposto un numero sufficiente di "risonatori", il sistema conterrà anche la cosiddetta "radiazione nera".

Einstein dapprima trascura la radiazione e si concentra su molecole e risonatori indipendenti che interagiscono per mezzo di forze conservative, nel caso solo per urti. La teoria cinetica dei gas, afferma Einstein, procura la condizione di equilibrio per il sistema di molecole e risonatori: il valore medio dell'energia del risonatore deve essere il doppio di quello per l'energia cinetica media delle molecole (teorema del viriale), e scrive:

$$E^{(risonatore)}_{media} = 2 \frac{1}{2} KT = (R/N)T$$

Una semplice applicazione della teoria cinetica, o no? Se c'è una fluttuazione di qualunque natura su questo valore medio dell'energia del risonatore, allora gli urti degli stessi risonatori con molecole ed elettroni liberi condurrebbero ad un aumento o a una diminuzione dell'energia del gas, ristabilendo così l'equilibrio e quindi il detto valore medio del risonatore, che solo è compatibile con la situazione stazionaria d'equilibrio.

Non sfuggiranno all'attento lettore la vaghezza ed imprecisione del modello di c.n. adoperato da Einstein ed i vizi del suo ragionamento. Gli elettroni, quelli liberi, non sono affatto elettroni ma solo atomi neutri, non irradiano energia né l'assorbono; ché se fossero veramente elettroni non interagirebbero certamente solo per urti con gli altri elettroni vincolati, cioè con i risonatori, e avrebbero una certa loro energia potenziale e di campo che da Einstein non viene messa in conto. Non si capisce che funzione abbiano. Al tempo c'era già una teoria matematica sofisticata dell'elettrone, ma qui non viene né accennata né adoperata.

L'autore passa poi ad esporre un'analogia considerazione rispetto alla radiazione presente nella cavità ed i risonatori con cui essa interagisce, non gli elettroni liberi. Per la prima volta fa riferimento agli studi di Planck e riporta una sua formula derivata rigorosamente dai primi principi elettromagnetici, riguardo l'energia media del risonatore in condizioni di equilibrio termodinamico della *radiazione nera*:

$$\bar{E}_\nu = \frac{L^3}{8 \pi \nu^2} \rho_\nu.$$

con L velocità della luce, ν frequenza del risonatore e ρ_ν densità radiativa per unità di frequenza. All'equilibrio, per Planck, essa è pure l'energia media dell'onda monocromatica della stessa frequenza, risonatori e radiazione sono identici. Einstein però dice che questo valore medio deve coincidere con quello desunto da considerazioni cinetico molecolari e cioè:

$$\frac{R}{N} T = \bar{E} = \bar{E}_\nu = \frac{L^3}{8 \pi \nu^2} \rho_\nu,$$

$$\rho_\nu = \frac{R}{N} \frac{8 \pi \nu^2}{L^3} T.$$

Così conclude la sua teoria elementare del c.n., messa assieme velocemente con un banale elemento di teoria cinetica e un'importante formula presa da Planck. Ne rileva però subito una severa difficoltà; forte discrepanza con i dati sperimentali e problemi di divergenze:

Questa trovata relazione, qual condizione dell'equilibrio dinamico, non solo rinuncia all'accordo con l'esperienza, piuttosto essa significa che nel nostro quadro di comprensione non si può più parlare d'una certa distribuzione d'energia tra Etere e Materia. Quanto più ampio e grande infatti si scelga il dominio delle frequenze di oscillazione, tanto più grande diviene l'energia radiante dello spazio, e al limite si ottiene:

$$\int_0^\infty \rho_\nu d\nu = \frac{R}{N} \frac{8 \pi}{L^3} T \int_0^\infty \nu^2 d\nu = \infty.$$

Tale teoria elementare ed ibrida, nella vana esegesi di Pais (cfr. ref. 4a), assistita da tarde rimembranze dello stesso Einstein, diventa uno sbalorditivo ma fortunato errore di Planck, dall'immensa portata storica. Come aveva potuto mancare Planck questo importante risultato della teoria classica, si chiede Pais? Attenuando poi la parentesi rovesciata, suggerisce, a spiegare la brutta *gaffe*, la diffidente ritrosia di Planck per i metodi cinetico-molecolari.

Allora, ricapitoliamo il contenuto di questa prima sezione dell'articolo: l'autore vuole ignorare fin dove può che il problema del c.n. è stato già risolto da Planck, il quale

mai una volta, se non alla fine nella famosa comunicazione del 14 dicembre, aveva aderito o usato metodi statistico-molecolari, e quindi possibilmente ignorava, prima del 1900, la precedente poco sensata formula, un grave peccato secondo alcuni. Ma verosimilmente non dopo, e la formula di Einstein è una brutta approssimazione sia di quella di Planck sia di quella di Lord Rayleigh (1900). Einstein ha elaborato una teoria veloce del c.n. d'un paio di pagine, grosso modo come aveva fatto avventurosamente Lord Rayleigh cinque anni prima¹⁰, per trovare un risultato inferiore a quello del famoso fisico inglese e ancora meno sostenibile. Risultato che almeno il Lord inglese, combinando empiricamente teoria del suono e la necessaria prescrizione della legge generale di Wien, cosa ignorata da Einstein, aveva così presentato:

"Il suggerimento è che la (4) anziché la (2), $\lambda^{-5}d\lambda$, possa essere la giusta forma quando λT è grande. Introducendo allora il fattore esponenziale la formula completa sarebbe $c_1 T \lambda^{-4} e^{-c_2 / \lambda T} d\lambda$ ".

Se ci chiediamo qual sia il valore scientifico o logico di questa sezione difficilmente si può fare altro che alzare le mani. Concludendo, quindi, Einstein si inventa per il c.n. un abbozzo di teoria e siccome è proprio un abbozzo ha più d'una difficoltà che non è però della teoria del c.n. di Planck. E' verosimile anche, tenendo presente il suo stile di studio e investigazione scientifica di quegli anni, che egli abbia derivato quell'abbozzo di teoria come sottoprodotto dal suo studio dei lavori di Planck per il c.n., dalla relativa formula esatta e completa, e l'abbia poi razionalizzata e presentata con considerazioni elementari di teoria cinetica sollevando alquanto polvere, che non era poi così salubre. Planck era alquanto scettico verso queste cose e, guardando il risultato inventato da Einstein, non senza ragione.

3.

La sezione successiva del lavoro, la nr. 2, tratta della "*determinazione dei quanti elementari di Planck*". Il lettore così per la prima volta viene messo a conoscenza che già ci sono, benché dormienti, i quanti elementari di radiazione, quindi di luce, e che la loro determinazione è stata data dal signor Planck. Ma ciò non risalta nella citazione; sono quanti elementari di qualcosa d'oscuro, indeterminato e nebuloso, appunto di radiazione nera! E' probabilmente vero che dopo il 1900, risolto nel suo punto cardine il problema del c.n., le conseguenze degli articoli decisivi di Planck a livello dei fondamenti della fisica siano state trascurabili e trascurate. Planck stesso in quegli anni diresse poi la sua attenzione verso altri settori della fisica, meccanica statistica, relatività, teoria dell'elettrone etc. Ed Einstein si sarà conformato a ciò, ignorando fin dove gli conveniva ed il suo intuito gli suggeriva, il lungo e minuzioso lavoro di Planck. Parimenti è verosimile che l'articolo di Einstein sia stato il primo che riprendeva la storia della discretezza dell'energia, dei quanti d'energia, ipotizzata

¹⁰ Lord Rayleigh, *Philosophical Magazine*, 1900, XLIX, pp. 539-540.

e usata da Planck. Ma la vuole riprendere a modo suo e rilanciarla sotto una veste, *Bild*, per così dire nuova, ed in ogni caso sua come frutto dei suoi *Gedankengaenge*, in cui l'autore vuole partire da zero o quasi, e con quella sua formula abborracciata cerca di mettere in evidenza la grave frattura esistente fra impianto classico ed esperimenti correnti. Ma deve trovare qualcosa che la giustifichi o meglio ancora che la renda, l'idea di Planck, più immediata ed intuitiva, e non astratta e calata a forza bruta in quell'ammirato costruito della fisica cosiddetta classica. Poi euristicamente provarsi a vedere cosa mai può sortire l'applicazione del quanto d'energia in altri campi della fisica allora in effervescenza. Questa è l'idea essenziale dell'articolo: vedere come in altri ambiti che il c.n., l'ipotesi di Planck, per lui sbiadita e sfuocata, può essere rivitalizzata sotto un nuovo *brand*, il suo, e funzionare.

Inizia allora dicendo che questo fatto, la determinazione dei quanti elementari data da Planck, sarebbe in certa misura indipendente dalla teoria "della radiazione nera" da lui presentata. E' una frase vaga e ambigua, e non si capisce bene che cosa voglia lasciar capire. Certo, l'ipotesi dei quanti di radiazione elaborata con elementi di calcolo delle probabilità e teoria termodinamica ed elettromagnetica nel lavoro di Planck è un *intruder*, è incompatibile con i fondamenti primi della completa teoria da quegli sviluppata. Ma questo l'aveva chiaramente e ripetutamente in diversi lavori scritto lo stesso Planck¹¹. E allora cosa vuol intendere Einstein con questa frase? Possibilmente vuol dire: io posso arrivare alla stessa ipotesi dei quanti elementari non di radiazione oscura, bensì di luce, per altra via. Una via forse migliore, più immediata, intuitiva, *anschaulischer* avrebbe potuto scrivere, che quella del rispettato professore berlinese. Comunque Einstein presenta tosto la formula di Planck:

$$\rho_\nu = \frac{\alpha \nu^3}{e^{\frac{\beta \nu}{T}} - 1}, \quad \begin{aligned} \alpha &= 6,10 \cdot 10^{-56}, \\ \beta &= 4,866 \cdot 10^{-11}. \end{aligned}$$

e ne ricava immediatamente il limite per grandi valori di T/ν , cioè grandi densità radiative e grandi lunghezze d'onda:

$$\rho_\nu = \frac{\alpha}{\beta} \nu^2 T.$$

facendo notare che quest'ultima, guarda caso, coincide in essenza con quella da lui prima trovata.

¹¹ M. Planck: **a)** *Annalen der Physik*, IV Folge, Band 4, S. 553-563, gennaio 1901; **b)** *Verhandlungen d. Deutsch. Physikal. Gesellsch.*, Berlin, 19 ottobre e 14 dicembre 1900, Transazioni, Band 2, p. 202 e p. 237, 1900; **c)** *Annalen d. Physik*, IV Folge, Band 1, p. 719, 1900; **d)** *Annalen der Physik*, IV Folge, Band 1, p. 69, 1900.

Tale presentazione, nel fascinoso e belletteristico racconto di R. Hoffmann (cfr. ref. 8), diventa: "*He set out to derive the Planck radiation law without any assumption about how light is generated.*" E poi, più avanti: "*Einstein has just rederived Planck's radiation law without resonator*". Possiamo umilmente chiedere al signor Hoffmann, poesia e *Contes* a parte, che cosa mai ha in testa per la legge della radiazione di Planck?

Eguagliando le espressioni, Einstein ricava il valore della costante di Avogadro in termini delle costanti α e β determinate da Planck, che tale costante contengono di già. Cosa ben curiosa; e ancor di più lo è la meraviglia dell'autore di trovare con soddisfazione che questo valore di N è lo stesso che quello determinato da Planck stesso cinque anni prima. Una bizzarra maniera di ragionare, si potrebbe dire¹². Però, confortato forse dalla circostanza che la sua formula è contenuta qual parte di quella completa e valida per ogni ν , si sente di poter ora concludere - mentre prima aveva detto che la formula era in discrepanza grave con i risultati sperimentali, e che rinunciava ad ogni tentativo di capire la distribuzione dell'energia tra Etere e Materia - che sì, in fondo non è poi una così stupida formula. La si può usare con un certo successo quanto più grandi sono la temperatura e la lunghezza d'onda della radiazione, mentre in altre condizioni essa fallisce completamente. Una cosa già, nel 1900, nota soprattutto agli sperimentatori che citano al riguardo benché riluttanti il lavoro di Lord Rayleigh.

4.

La sezione seguente, la nr. 3, tratta dell'entropia della radiazione, e l'autore vi esordisce affermando che la considerazione che segue è già stata data in un celebre lavoro di Wien¹³, e che viene ripresentata per motivi di completezza. In effetti il lavoro di Wien, comunque non citato, contiene molto più di quanto qui vuol dire Einstein. Questi definisce così una densità di entropia di radiazione funzione della densità radiativa e afferma che all'equilibrio della radiazione nera la variazione di entropia ovviamente deve essere nulla. Elabora matematicamente detto assunto per mezzo d'una variazione condizionata da un moltiplicatore di Lagrange, per trovare che:

¹² Il Pais, in ref. 4a, p. 400 (ed. italiana), al riguardo è pronto a far carte false. Scrive infatti, rivolgendosi solo al lettore sprovvisto, che N fu determinato da Einstein confrontando l'equazione con i dati sperimentali alle grandi lunghezze d'onda, ottenendo $6,17 \times 10^{23}$, che è affatto falso. Inoltre, caro signor Pais, Einstein nel suo lavoro non dice affatto: "se si usa la mia formula anziché la legge di Planck, si è in grado di giustificare ciò che si fa sulla base di primi principi accertati". Signor Pais! Il suo gioco è sporco e scoperto: lei presenta con disonestà sminuendola e avvilenandola una grande teoria quale cosa vaga e avventurosa non fondata su principi primi accertati, mentre quella del suo santino, che è invece veramente tale, quale una teoria rigorosa. Due misere paginette in un paio di giorni, di fronte ad un arduo e appassionato lavoro di più di cinque anni! Suvvia!

¹³ *Wiedmann Annalen*, 52, 1894, pp.132-165.

$$dS = \int_{\nu=0}^{\nu=\infty} \frac{\partial \varphi}{\partial \varrho} d\varrho d\nu,$$

e poi:

$$dS = \frac{\partial \varphi}{\partial \varrho} dE.$$

infine:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \varrho} = \frac{1}{T}.$$

Formula che lui chiama, incomprensibilmente, la legge della radiazione; ch , nota la φ , si pu  trovare la legge su ϱ e viceversa. Stucchevole! La formula collegante queste due variabili non   altro che il secondo principio della termodinamica che egli aveva scritto immediatamente prima, $dS = (1/T)dE$, applicato al fenomeno termodinamico del c.n.. Infatti, dividendo primo e secondo membro di quest'ultima espressione per l'elemento di volume $d\nu$, si ottiene immediatamente la formula finale data da Einstein con quel giro di valzer. Quindi ci parrebbe che questa sezione non dica assolutamente nulla.

5.

Nella sezione successiva, e siamo alla nr. 4, l'autore tratta della legge limite della radiazione monocromatica per piccole densit  radiative, basse temperature del c.n. e grandi frequenze; cio  l'ampio dominio di validit  della legge di Wien gi  proposta da costui dieci anni prima su basi semiempiriche¹⁴, indi ricavata rigorosamente da Planck (1897) all'interno della sua teoria e.m. e termodinamica, e detta quindi per alcuni anni legge di Wien-Planck. Una prudente riflessione pu  far anticipare che poco di importante sarebbe stato lasciato da dire su di essa dopo che era stata studiata e provata per diversi lunghi anni. In ogni caso, nel 1905 era riconosciuta come una buona legge contenuta nella pi  completa ed esatta formula di Planck, la quale aveva, almeno per alcuni centrali aspetti, chiuso il complicato problema del c.n.. Ancora oggi essa per molti scopi viene convenientemente utilizzata. Si pu  cos  anticipare con fiducia che questa quarta sezione del lavoro di Einstein non contenga alcunch  di nuovo ed importante. L'autore infatti, partendo dalla formula di Wien e con semplici passaggi matematici adoperanti l'espressione da lui trovata per la densit  di entropia, arriva facilmente alla seguente formula per la variazione entropica d'una radiazione monocromatica racchiusa in un certo volume per una trasformazione isoterma, cio  ad energia costante:

$$S - S_0 = \frac{E}{\beta\nu} \lg \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right).$$

¹⁴ *Wiedmann Annalen*, 58, 1896, p. 662.

Questa "dimostrazione" "is direct. It's not Hemingway, but for scientific prose, really exciting ... Pretty incredible", scrive ammirato il professor R. Hoffmann (cfr. ref. 8).

Una formula che, all'interno della legge di Wien, mostra esplicitamente che tipo di dipendenza abbia l'entropia della radiazione monocromatica dal volume. Essa è già contenuta in diverse formule del lavoro di Planck, il quale però non aveva mai focalizzato esplicitamente tale dipendenza, perché non gli interessava, né vi vedeva alcunché di utile o euristico, essendo in ogni caso una formula approssimata finché estratta come conseguenza di una legge approssimata. Questa formula si può anche ricavare facilmente in altre maniere, facendo qualche ipotesi *ad hoc* sull'espressione dell'energia media d'una particella, all'interno della teoria cinetica dei gas. Comunque, vista la centralità di detta formula nelle successive argomentazioni e deduzioni dell'autore - che saranno sempre, come d'ora innanzi egli ripeterà ad ogni passo, confinate all'interno della validità della formula di Wien - ci si può chiedere perché Einstein non sia partito dalla più completa ed esatta formula di Planck per estrarne fuori la corrispondente espressione, che sarebbe allora valsa in modo generale e non limitatamente al dominio di Wien. Che forse questa dipendenza dell'entropia della radiazione dal volume non sia più valida in generale? Che sia difficile trovarla partendo dalla formula generale, o del tutto diversa al punto da non permettere di sviluppare le considerazioni decisive dei paragrafi seguenti? Nulla di tutto questo. Non si sa perché l'autore non sia partito dalla formula completa e vedere cosa veniva fuori. Comunque ciò che viene fuori, con semplice manipolazione dell'espressione generale di Planck per la densità d'entropia, è, a parte un'inessenziale costante di proporzionalità, la stessa dipendenza dal volume per la variazione entropica d'un processo isoterma reversibile d'una radiazione monocromatica all'equilibrio in regime di Wien. E quindi questa formula è, nella sua dipendenza dal volume, di validità generale e non affatto confinata al dominio di Wien.

La sezione si conclude con l'anticipazione che siffatta dipendenza dal volume dell'entropia della radiazione monocromatica è la stessa che quella esibita da un gas perfetto o da una soluzione diluita. Ora forse si incomincia a schiarire il fantasma che ha agitato la fervida mente del giovane Einstein e tanto impressionato schiere di suoi ammiratori. La radiazione di piccola lunghezza e bassa temperatura può, per alcuni aspetti e problemi, essere immaginata qual costituita da grumi infinitesimali ma finiti di energia radiante racchiusa entro volumi puntiformi, così come l'energia cinetica delle molecole d'un gas ideale è racchiusa nel loro punto massa. E per questa trovata egli ha, scavando e rovistando nelle formule di Planck, rinvenuto qualche pezza d'appoggio. Ma detta trovata altro non è che l'ipotesi di Planck degli elementi discreti d'energia $h\nu$, che *ogni* radiazione monocromatica può assumere o cedere in un certo numero intero n al di là di ogni modello che ci si può fare della radiazione stessa, e di validità affatto generale e non confinata al dominio di Wien. Anzi, fu giusto per sanare la "sua" legge di Wien dalle discrepanze con gli ultimi esperimenti di Lummer-Pringsheim e Kurlbaum-Rubens dell'estate del 1900, che Planck fu costretto

ad introdurre fortunatamente questa ipotesi *extra moenia*, affatto estranea ai fondamenti elettromagnetici e termodinamici della sua rigorosa teoria. Qui invece noi ci troviamo di fronte ad un curioso modo di ragionare, forse tipico dell'Einstein di quegli anni; per trovare una giustificazione ad una "sua" trovata, ad un'idea già avanzata in vero prima da altri ed in più generali contesti; egli si particolarizza su d'un aspetto limitato della faccenda in istudio, rimasta le formule già note e studiate e vestendole a nuovo le propone come fossero qualcosa di nuovo e di suo. Lo stesso modo di ragionare e procedere è chiaramente rintracciabile e minutamente documentabile nel suo forse maggiormente famoso coevo lavoro sulla teoria della relatività ristretta a proposito delle trasformazioni di Lorentz.

6.

Nella sezione nr. 5, Einstein affronta, con considerazioni teoriche-molecolari, la dipendenza dal volume dell'entropia dei gas e delle soluzioni diluite. Incomincia facendo una specie di oscura critica alla maniera in cui nel calcolare l'entropia di sistemi si adoperi il concetto o la parola "probabilità". Una critica vaga e poco precisa nel merito e nel metodo, che lo porta a promettere che c'è una maniera, che annuncia farà vedere in un futuro lavoro peraltro mai apparso, per definire la *probabilità statistica* per i sistemi termici, a rimuovere una difficoltà logica che lui vede intralciare ancora lo sviluppo del metodo o Principio di Boltzmann per calcolarla.

Indi attacca a presentare delle formule colleganti l'entropia di sistemi quali funzioni indeterminate della probabilità. Che tosto trova essere la funzione logaritmica e poi sul principio delle probabilità indipendenti per sistemi indipendenti, l'additività dell'entropia:

$$\begin{aligned}\varphi_1(W_1) &= C \log(W_1) + \text{cost.} \\ \varphi_2(W_2) &= C \log(W_2) + \text{cost.} \\ \varphi(W) &= C \log(W) + \text{cost.}\end{aligned}$$

identificando la costante universale C con il rapporto R/N della teoria cinetica.

E così per la variazione entropica d'una trasformazione generica può scrivere:

$$S - S_0 = (R/N) \ln(W)$$

Questa formula, come le precedenti, è esattamente la stessa che quella introdotta da Planck nei suoi due articoli del dicembre 1900 e del gennaio 1901 (cfr. ref. 11a e 11c).

Come si dice noto, benché in una forma diversa, essa in essenza era stata introdotta e usata da Boltzmann: nello scriverla e usarla Planck ne dà pieno riconoscimento. Le differenze tra quella di Planck e di Boltzmann pare consisterebbero unicamente nel

modo di calcolare la W , forse in una diversa scrittura dell'equazione e nel fatto che Boltzmann non badò mai molto alla rilevanza della sua costante k , qui R/N , che nella teoria di Planck è al contrario enorme.

Einstein invece presenta queste formule, già note e pubblicate, come frutto di una sua particolare riflessione che avrebbe sanato la difficoltà del programma di Boltzmann. Adesso Einstein si accinge con esse a trovare l'espressione della variazione entropica per un gas perfetto, che per una isoterma passa reversibilmente da un certo volume ad un altro, usando proprio la formula che contiene la probabilità, anziché l'espressione nota del dQ_{rev} . nell'espressione $dS = dQ_{\text{rev}}/T$ per una trasformazione isoterma. Con ragionevolezza e certo immediato intuito, propone che la W del processo, o meglio la probabilità dello stato finale in termini delle variabili termodinamiche pertinenti, sia:

$$W = (v / v_0)^n$$

con n il numero di molecole contenute nel volume finale v o iniziale v_0 .

Quindi:

$$S - S_0 = R (n/N) \log(v/v_0)$$

che è la *nota* formula del ΔS per una isoterma. Mi pare curiosamente notevole che l'autore trovi importante esplicitare, benché in una nota a pie' pagina, che mediante quest'ultima formula si possano ritrovare le leggi di Boyle e Gay-Lussac, e pure l'equazione di stato, senza che "*si sia avuto bisogno di fare alcuna ipotesi secondo cui si muoverebbero le molecole*":

$$\begin{aligned} -d(E-TS) &= pdv = TdS = R (n/N) dv / v : \\ p v &= R (n /N) T \end{aligned}$$

7.

Nella sezione seguente, ossia la nr. 6, Einstein si propone di interpretare l'espressione per la dipendenza dell'entropia della radiazione monocromatica calcolata in precedenza nel limite della legge di Wien, che riscrive subito come:

$$s - s_0 = \frac{E}{\beta v} \lg \left(\frac{v}{v_0} \right).$$

ed ancora riscrive nella forma:

$$s - s_0 = \frac{R}{N} \lg \left[\left(\frac{v}{v_0} \right)^{\frac{N}{R}} \frac{E}{\beta v} \right]$$

Confrontando quest'ultima espressione con quella generale della variazione entropica in termini della probabilità, trova infine che:

$$W = (\nu / \nu_0)^{NE/R\beta\nu}$$

"la probabilità affinché in un qualunque istante scelto a caso la intera energia di radiazione sia racchiusa nel volume parziale ν del volume ν_0 ".

E così continua:

"Da qui noi concludiamo ancora inoltre: Radiazione monocromatica di trascurabile densità quindi all'interno del dominio di validità della formula radiativa di Wien) si comporta in relazione alla teoria del calore, come se essa consistesse di quanti d'energia indipendenti l'uno dall'altro del valore di $R\beta\nu/N$ ".

Sarebbe questo "*The miraculous argument*" in cui certa letteratura anglosassone¹⁵ vede la nascita della teoria corpuscolare della luce. Si noti pure che Einstein non scrive mai $h\nu$, vuole ignorare la costante di Planck e la formula per l'elemento di energia radiante ϵ fissata da Planck. Ciò avrà conseguenze molto importanti sul *claim* di Einstein e dei suoi adoratori per farne il *padre* del quanto di luce e del suo uso nella legge dell'effetto fotoelettrico. La sorgente di quella, non si sa quanto proficua, diatriba che doveva infestare la fisica teorica delle due decadi successive ed anche oltre il 1925, quando Pascual Jordan sciolse il dilemma cornuto in cui si erano incasinati anche i migliori fisici teorici. Infatti qualche anno dopo, il 1909, nel calcolare la fluttuazione statistica dell'energia media del quanto di luce, Einstein trova, usando ora la formula di Planck completa, che essa è composta di due addendi: uno che si riferisce al regime di Wien, definito *corpuscolare*, l'altro al regime, diciamo per brevità, di Rayleigh, definito *ondulatorio*. Da qui il pestifero *conundrum* del dualismo onda-corpuscolo della luce iniziato proprio da Einstein.

Infine, trova il valore dell'energia media dei quanti d'energia d'irradiazione in regime di Wien, che è ovviamente il doppio dell'energia cinetica media della molecola monoatomica d'un gas perfetto alla stessa temperatura della radiazione:

¹⁵ A. Duncan and M. Janssen, *Pascual Jordan's Resolution of the conundrum of the wave-particle duality of light*, HQ1, MPI for History of Science, Berlin 2-6 July 2007; M. J. Klein, "Einstein and the Wave-particle Duality", *The Natural Philosopher*, 3, 1964, pp. 1-49; Ryno-Renn, Norton, Uffink, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, vol. 37, 2006, 1 (Centenary of Einstein's Annus Mirabilis).

$$\frac{\int_0^{\infty} \alpha \nu^3 e^{-\frac{\beta \nu}{T}} d\nu}{\int_0^{\infty} \frac{N}{R \beta \nu} \alpha \nu^3 e^{-\frac{\beta \nu}{T}} d\nu} = 3 \frac{R}{N} T.$$

Una ridondanza, visto che all'equilibrio tale valore deve essere lo stesso che quello dell'energia media del risonatore da lui già data nel primo paragrafo, benché riferita ad un solo grado di libertà traslazionale. Conclude ora che:

"se radiazione monocromatica (di sufficientemente piccola densità) riguardo alla dipendenza dell'entropia dal volume si comporta come un mezzo discontinuo consistente di quanti di energia del valore $R\beta\nu/N$, allora ci sta davanti da studiare se anche le leggi della produzione e trasformazione della luce siano così fatte, come se la luce fosse costituita da quanti d'energia di simile natura".

Con questa sezione si conclude il travaglio concettuale e rielaborativo delle idee di Einstein riguardo all'ipotesi che la luce sia costituita, come indicherebbe qualche indizio formale e concettuale da lui scorto, da elementi discreti d'energia. Nelle successive tre sezioni si proverà ad interpretare fatti sperimentali noti concernenti la produzione e trasformazione della luce per mezzo del concetto da lui avanzato, benché questi fenomeni siano chiaramente e certamente per niente affatto fenomeni reversibili di equilibrio.

8.

Ma chiediamoci: dopo queste prime sei sezioni e diverse pagine di considerazioni, una dozzina di formule matematiche, un ragionare alquanto singolare, indiretto e condito con semplici prestidigitazioni matematiche su formule già note, un esperto nel campo del c.n., mettiamo Wien o Planck, o sperimentatori quali Kurlbaum o Lummer, avrebbero d'un ϵ aumentato la loro conoscenza, la comprensione su problemi che angustiavano da anni? C'è mai in esse alcuna cosa, un concetto, una formula, ipotesi o procedura veramente nuova, innovativa, che risolve qualche punto, che apre nuovi scorci e punti di vista del problema? Nella migliore disposizione si può dire che l'autore ha trovato qualche argomento e formula, tra le formule di Planck e quelle della teoria cinetica, che rendono in qualche modo più intuitivo il quanto d'energia, epperò limitatamente al regime di Wien. La risposta ci parrebbe dunque essere decisa e semplice: no. No, in queste sei sezioni non c'è nulla che mai avrebbe potuto interessare un Planck o un Wien o altri che si occupavano del problema della radiazione. Einstein in queste pagine ha solo rimestato parzialmente la letteratura scientifica già nota e l'ha usata, anche poco professionalmente ed elegantemente bisogna ammettere, con un suo tipico modo di ragionare che più che affrontare i

problemi sembra invece aggirarli, accerchiarli e confonderli, per poi ripresentare cose già note come se uscissero da un modo di procedere originale e suo.

Al riguardo tanti avvocati del grande scienziato¹⁶, non per ignoranza, forse per corrivo spirito di corpo, affermano con saputa dottrina che l'ipotesi del quanto di luce qui avanzata andrebbe oltre quella del quanto planckiano, addirittura che sia ad essa antitetica (cfr. la nota 7), in quanto riguarderebbe la radiazione stessa e non gli oscillatori, che mimano la materia in equilibrio radiativo e termodinamico con quella, e per cui Planck aveva ideato e applicato la sua ipotesi, la radiazione libera e non quella vincolata del c.n. all'equilibrio; e quindi con essa Einstein avrebbe compiuto un salto qualitativo cruciale rispetto a Planck nell'avviare e fondare, "*even on stronger foundation*", scrive uno stimato fisico americano (cfr. ref. 2b), la teoria dei quanti.

Ora le cose invece non stanno affatto così, e solo coloro che non hanno letto attentamente i lavori originali di Planck, né il lavoro qui in esame, possono fare con leggerezza tali affermazioni. *In primis*, all'equilibrio risonatori e radiazione sono a tutti gli effetti concettuali e formali identici, anche Einstein assume ciò. Gli oscillatori planckiani, i risonatori, sono solo degli espedienti teorici per poter raggiungere l'equilibrio: una volta raggiunto questo stato essi sono inessenziali. E' la radiazione che scambia nelle sue componenti i quanti di luce. Un indizio di ciò è la densità degli stati monocromatici della radiazione per unità di frequenza, che da Planck viene calcolata sulla scorta della teoria elettromagnetica di Maxwell, cioè di equazioni di campo indipendentemente dalla loro sorgente materiale. D'altra parte, data un'onda elettromagnetica monocromatica in propagazione, ogni punto dello spazio da essa investito può ben pensarsi come un oscillatore o risonatore hertziano della stessa frequenza dell'onda. L'affermazione che Planck avesse allora quantizzato solo l'energia dei risonatori e non quella della radiazione in equilibrio con questi, è erronea e denuncia anche una scorretta comprensione del fenomeno. In ogni caso, studiando i lavori di Planck senza secondi fini, ci si convincerà facilmente della improprietà e scorrettezza di una simile asserzione.

Vero, Einstein nell'introduzione afferma che l'energia d'un raggio di luce in propagazione emesso da un corpo puntiforme, anziché distribuirsi continuamente ed illimitatamente in tutto lo spazio attraversato, si concentrerebbe in un numero finito di elementi, i quanti luce, localizzati in punti dello spazio che si muovono, e senza frazionarsi vengono emessi ed assorbiti solo come interi. Ma questo già c'è negli ultimi e definitivi lavori di Planck (cfr. ref. 11a e 11b): perché è chiaro che la radiazione della cavità radiante si propaga da un punto ad un altro della stessa, e viene assorbita o emessa per preesistenti unità intere e discrete del valore $h\nu$, colà presenti nel volume della cavità, da un modo ad un altro della stessa specie. Quando

¹⁶ Oltre alle referenze di cui alla nota 2, si veda per esempio: R. M. Nugayev, *Annales de la Fondation L. de Broglie*, vol. 25, nr. 3, pp. 337-361, 2000.

viene poi da essa estratta per delle misurazioni, e si propaga liberamente fino allo strumento di misura, essa è sempre ed identicamente ancora uguale a quella presente nella cavità. Quindi la storia della quantizzazione della radiazione libera appare solo una banalità concettuale, una logicamente necessaria conseguenza della posizione.

"Ora dipende da come trovare la probabilità W affinché gli N risonatori possiedano nel complesso l'energia d'oscillazione U_N . Qui però è necessario ora concepire U_N non quale una continua, illimitatamente divisibile grandezza, bensì una discreta e composta da un numero intero di parti identiche e finite

$$U_N = P\epsilon = UN \quad [\text{cfr. la formula nr. 4 della ref. 11a}]$$

con P in generale un numero intero grandissimo, lasciando il valore ϵ ancora da determinare".

Così scrive Planck; con U energia *media* del singolo risonatore, U_N energia totale degli N risonatori di frequenza ν . E' proprio necessario sottolineare che la sopra citata equazione significa anche $\rho = U N/V = P \epsilon /V$, e convincersi quindi che l'elemento di energia ϵ deve essere grosso modo puntiforme, giacché P è enorme e ρ finito? Inoltre, che Planck, non Einstein, *proverà*, non ipotizzerà, con brillanti considerazioni termodinamiche, queste sì profonde e di grande momento, che *deve* risultare $\epsilon = h\nu$, e che quindi l'intensità della radiazione di tale risonatore, di tale onda e.m. monocromatica, deve essere proporzionale a $P\epsilon$ e non al quadrato del campo E ?

E' proprio necessario riportare la tabellina di Planck (cfr. ref. 11a e 11b):

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>N</i>
<i>7</i>	<i>38</i>	<i>11</i>	<i>0</i>	<i>9</i>	<i>2</i>	<i>20</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>P</i>

$N = 10$, numero di risonatori o radiazione di data frequenza nel tempo, $P = 100$ unità di ϵ , U_N energia totale della radiazione, per dire che ciò significa che un risonatore, oppure, equivalentemente in ogni rispetto, la radiazione di eguale frequenza, passa dallo stato di energia 7ϵ a quello di 38ϵ , assorbendo 31ϵ , e che questi elementi di energia prima di essere assorbiti stanno nella cavità o sono stati emessi da un altro risonatore di eguale modo come interi e tali viaggiano fin all'altro risonatore? E che se l'energia totale dei dieci modi di frequenza ν è quantizzata dentro la cavità, perché mai non dovrebbe essere più tale quando l'abbandona? E come avrebbe mai potuto Planck essere fiducioso di determinare il valore della sua costante h , con valori di misure ottenute per la radiazione cosiddetta libera - quella che ha abbandonato la cavità, che deve essere la stessa identica in ogni suo aspetto a come era prima, così cruciale nella relazione $P h \nu$ - se dopo non fosse stata quantizzata e quindi non fosse più valsa questa posizione? Non è già contenuto tutto, completamente e perfettamente nell'ipotesi di Planck e nei suoi lavori del dicembre 1900 e gennaio 1901 (Par. 1 della

ref. 11a), quanto Einstein nella sua introduzione espone presentandola quale ipotesi da lui *concepita* e colà presentata? Cosa c'è di nuovo ed originale, vestitino a parte, in questa "sua" ipotesi che non sia contenuto nei menzionati lavori di Planck?

9.

La successiva sezione nr. 7 del lavoro, dedicata alla legge di Stokes concernente il fenomeno della *fotoluminescenza* - cioè assorbimento di luce visibile o ultravioletta da parte di speciali corpi ed emissione di luce a maggiore lunghezza d'onda, quindi trasformazione di luce - è quella in cui l'articolo comincia a riscattarsi dalla mediocrità precedentemente denunciata. Assumendo che la luce eccitatrice sia composta da quanti di frequenza $h\nu$, l'autore vi ipotizza che ogni quanto $h\nu_1$ interamente assorbito sia responsabile di per sé della generazione del quanto di luce prodotto $h\nu_2$, e che nel processo potrebbero pure essere emessi altri quanti di luce di frequenze ν_3, ν_4, \dots , o anche essere generata energia sotto forma di calore. Ciò è indifferente. Se la sostanza assorbitrice di per sé non è una sorgente continua di energia, allora, per il principio di conservazione, deve risultare ovviamente:

$$h\nu_2 \leq h\nu_1 \text{ e quindi } \nu_2 \leq \nu_1$$

che è la nota regola di Stokes.

Osserva Einstein che ci dovrebbe essere proporzionalità tra le intensità dei fasci di luce generatrice e prodotta, in condizioni di debole illuminamento, cioè nel regime di Wien, ché i processi in questione sono elementari e indipendenti gli uni dagli altri. Passa poi a discutere i casi di deviazioni dalla legge di Stokes riconducibili secondo lui alla violazione dei limiti di validità della legge di Wien, oppure quando la luce in questione non ha le caratteristiche energetiche che dovrebbero essere proprie della radiazione nera, alludendo alla possibilità d'una radiazione "non Wien", anche di debolissima intensità, ma non del tipo energetico della radiazione nera. Una considerazione alquanto ... oscura.

Se ci chiediamo che ne ha fatto Einstein della sua ipotesi del quanto di luce, in questo caso della regola di Stokes, ci si può lasciare andare a dire che ha riprodotto la *nota* legge con la particolare interpretazione dei quanti di luce di luce. Null'altro. Non aggiunge alcunché alla nostra comprensione della legge di Stokes, al più la razionalizza, la interpreta con il quanto in modo conforme all'esperienza.

10.

E passiamo ora alla parte probabilmente più importante e valida dell'applicazione del quanto di luce al presente contesto: la produzione di raggi catodici, cioè di elettroni, per illuminamento con radiazione violetta o u.v. di materiali, in genere e più facilmente metallici. Si tratta dell'argomento discusso nella sezione nr. 8 del lavoro di

Einstein, che il signor Hoffmann (cfr. ref. 8) dipinge letterariamente quale *dénouement*, dopo il *climax* cui abbiamo assistito: "*the paper cruises along another plateau, then swoops into a breathtaking shift of scene*". Veramente un *conte d'Hoffmann*! Einstein premette che l'interpretazione dei risultati sperimentali di Lenard allora noti (vedi anche quanto se ne dirà nel seguito) era assai difficile con la teoria ondulatoria della luce, distribuzione continua di energia sugli spazi da essa investiti. E qui egli propone la sua propria spiegazione.

I quanti di luce incidente $h\nu$ penetrano nel metallo e grosso modo nella superficie cedono la loro energia, almeno in parte, agli elettroni sotto forma di energia cinetica. Nel caso più semplice tutta l'energia del quanto viene trasformata in energia cinetica dell'elettrone. Se questo elettrone eccitato cinematicamente raggiunge la superficie, avrà compiuto un certo lavoro, e se esce fuori dal metallo avrà dovuto fare un lavoro P caratteristico della sostanza cui appartiene. Gli elettroni che ancora hanno energia cinetica e si trovano sulla superficie lasceranno il corpo con un'energia cinetica uguale a $h\nu - P$ ¹⁷. Il potenziale positivo, Π , a cui si potrebbe caricare il corpo emittente per impedire la perdita di elettroni, dovrebbe essere tale che, scrive Einstein, valga la seguente equazione:

$$\Pi \varepsilon = h\nu - P$$

oppure, moltiplicando per la costante di Avogadro:

$$\Pi E = N h \nu - P'$$

in termini di carica d'un grammo-equivalente d'uno ione monovalente. Einstein prosegue poi facendo certi calcoli elementari per ricavare alcuni numeri sul potenziale Π che egli trova consistenti in ordine di grandezza con dati di Lenard. E osserva una delle cose più rilevanti dell'intero lavoro: che ci dovrebbe essere linearità, come dice la sua equazione, tra il potenziale Π e la frequenza, cioè tra l'energia cinetica (massima) del fotoelettrone e la frequenza della luce incidente. Rappresentate su di un diagramma cartesiano, dice l'autore, l'inclinazione della retta dovrebbe essere indipendente dalla natura della sostanza fotoemittente. Se le cose avvengono come esposto, allora la qualità della radiazione catodica prodotta, cioè lo spettro dei fotoelettroni, e cioè ancora la loro massima energia cinetica, sarà indipendente dall'intensità della luce incidente, mentre quest'ultima determinerà il numero totale di elettroni che abbandonano il corpo.

Poi, Einstein passa a discutere brevemente i limiti di validità delle argomentazioni da lui esposte, riconducibili a quelli prima discussi a proposito della legge di Stokes, ma solo se:

¹⁷ Qui abbiamo per semplicità scritto $h\nu$ in luogo di $(R/N)\beta\nu$, $\beta = h/k$, come nello scritto di Einstein.

"l'energia, almeno d'una parte dei quanti di energia, della luce eccitante venga sempre e completamente ceduta ad un singolo elettrone. Non facendo questa semplice e comprensibile ipotesi, allora si ottiene invece della anzi data equazione la seguente $h\nu + P' \leq R\beta v$."

L'autore chiude la sezione in parola discutendo brevemente il fenomeno inverso a quello prima esaminato, cioè la luminescenza catodica, produzione di luce ad alta frequenza per irraggiamento elettronico di anodi, e presentando di seguito una formula uguale a quella precedente, ma con il segno di maggiorazione opposto, cioè maggiore o eguale a $R\beta v$.

Infine, l'articolo si conclude con un paragrafo (la sezione nr. 9) sulla ionizzazione dei gas, dove si sviluppano analoghe considerazioni qualitative e quantitative, che noi però trascureremo, nonostante la spettroscopia di fotoelettroni degli ultimi 40 anni nei gas si possa far datare *in nuce* a partire da quest'ultima sezione del lavoro.

11.

Parte della sezione nr. 8 dell'articolo di Einstein è senz'altro, come detto, la più importante dell'intero lavoro, ed è infatti quella che viene chiamata direttamente in causa nella motivazione dell'assegnazione del Premio Nobel. Bisogna quindi ben valutarla.

A differenza di quanto fatto in precedenza per la legge di Stokes, in essa Einstein propone una semplice formula incardinata sul quanto di luce che lega alcune quantità osservabili e misurabili del fenomeno che già erano sotto scrutinio severo da parte degli sperimentatori e su cui si sapevano molte cose e non poche, come vuol far credere il signor Pais. Come accennato, Einstein opera pure un *check* qualitativo della ragionevolezza della sua formula interpretativa, per affermare poi con sicurezza che essa non sembra essere in contrasto con le misurazioni sperimentali di Lenard. Spiegare queste osservazioni sul fenomeno dell'effetto fotoelettrico trattando la luce con la teoria ondulatoria di Maxwell a quanto pare era assai difficile, forse impossibile. La produzione di fotoelettroni per eccitamento ottico o u.v. di superfici metalliche ha caratteristiche discrepanti con la normale comprensione della luce quale fenomeno ondulatorio. L'ormai più che decennale lavoro d'investigazione sperimentale in quegli anni culminava allora con almeno due lunghi articoli (1902 e 1903)¹⁸ di un maestro dell'esperimento su tubi di scarica ad alto vuoto: Philipp von Lenard, che Einstein, caso strano, menziona nell'articolo ripetutamente e con una certa adulatoria enfasi. Einstein è possibilmente al corrente degli studi e risultati di Lenard non solo attraverso la letteratura che stavolta cita, ma forse in maniera più

¹⁸ a) P. Lenard; Annalen der Physik, IV Folge, Band 8, 1902, pp. 149-198; b) *ibidem*, Band 12, 1903, pp. 449-490, 1903.

diretta e ravvicinata. Infatti sua moglie Mileva proprio in quegli anni, 1902-1903, trascorre sei mesi nel laboratorio di Lenard, ad Heidelberg in quel periodo, e ne segue le lezioni. Cosa ben curiosa a quel tempo e per quel reazionario d'un Lenard! E' quindi ben possibile che Einstein, per mezzo di Mileva, conoscesse assai bene che cosa avesse studiato Lenard.

Vogliamo ora richiamare brevemente quali erano le caratteristiche principali dell'effetto fotoelettrico che confliggevano con la teoria maxwelliana della luce, e le riprendiamo da un *textbook* americano assai diffuso negli anni '60-'70 in numerose università e specialmente in Italia (cfr. ref. 2b). In esso vengono riportati pure, giusto parlando del contributo di Einstein ai fondamenti della fisica quantistica, i maggiori contributori a questo particolare fenomeno nella storia della fisica.

a) La corrente fotoelettronica è proporzionale all'intensità della luce eccitatrice (J. Elster, H.F. Geitel, 1891);

b) Le particelle emesse sono elettroni (J.J. Thomson, P. Lenard, 1899);

c) Le energie cinetiche degli elettroni emessi sono indipendenti dall'intensità della luce eccitatrice, mentre il numero di elettroni emessi è proporzionale all'intensità della luce (P. Lenard, 1902):

d) L'energia cinetica massima dei fotoelettroni è tanto più grande quanto più alta è la frequenza della luce eccitatrice, e nessun fotoelettrone viene emesso per luce al di sotto di una frequenza di soglia eccitatrice caratteristica per ogni sostanza (P. Lenard, 1903).

Questi erano dunque i fatti sperimentali già assodati e a conoscenza di tutti attraverso la letteratura, invito il lettore a meditarli. Non c'è dubbio ora che l'intraprendenza del giovane Einstein sia qui decisiva, nella misura in cui egli getta nella spinosa questione dell'effetto fotoelettrico l'idea del quanto di luce, e propone una felice sua interpretazione del fenomeno basata sui quanti e sulla indipendenza delle loro azioni nel metallo irradiato eccitandone gli elettroni. Ma i fatti sperimentali importanti erano già lì belli e pronti, la sua interpretazione non li prevede *ex nihilo*, bensì li razionalizza e li inquadra in maniera organica ed unitaria. Che in effetti non è poco.

Con un modellino elementare di assorbimento d'energia per quanti e corrispondente emissione degli elettroni, Einstein riesce a compendiare qualitativamente e quantitativamente le principali caratteristiche note del fenomeno in un'unica e semplice equazione, che altro non è che il principio di conservazione dell'energia applicato all'interazione luce-metallo.

E' una "teoria" ciò che Einstein propone per il fenomeno in esame? Sì, senza dubbio, se pur in qualche special senso: è una teoria che coordina organicamente una serie di

osservazioni sperimentali discrepanti con la normale e generalmente accettata teoria ondulatoria della luce fissandone anche la loro relazione matematica. Tuttavia essa, per come venne allora presentata, non prevede alcun nuovo aspetto del fenomeno e può essere considerata un semplice portato del concetto di quanto d'energia luminosa e del principio di conservazione. La prevista, rigorosa linearità tra energia cinetica massima dei fotoelettroni e frequenza, già anticipata da Lenard, verrà accertata negli anni seguenti da Robert A. Millikan, che non credeva affatto all'ipotesi dei quanti di luce, e poi ancora da altri. L'inclinazione della retta rappresentante le dominanti grandezze dell'equazione, dichiarata indipendente dalla sostanza fotoemittente, permetteva anche di determinare per altre vie (R. Millikan, 1916-17), diverse e indipendenti che quelle teoriche e bolometriche adoperate da Planck diversi anni avanti (1900, o anche prima), la costante h quale costante universale di natura. E quindi non c'è dubbio che l'ardimento e la spregiudicatezza del giovane Einstein qui, alla luce dei successivi sviluppi della fisica, facciano pienamente centro, ancorando il quanto di luce e la costante universale di Planck ai fenomeni più profondi ed elementari dell'interazione radiazione-materia.

Nella rappresentazione agiografica di Pais (cfr. ref. 4a) le cose però starebbero altrimenti:

"Questa equazione faceva predizioni del tutto nuove e assai impegnative: primo, E doveva variare linearmente con ν ; secondo, la pendenza della curva (E, ν) doveva essere una costante universale, indipendente dalla natura del materiale irraggiato; terzo, il valore di tale pendenza doveva coincidere con la costante di Planck determinata dalla legge di radiazione".

Possiamo rinviare il signor Pais per i punti primo e secondo ai lavori di Lenard, se non crede al suo connazionale Leighton (cfr. ref. 2b)? Per il terzo punto, poi, la pretesa è veramente ridicola, ancorché giustificata dalla maniera in cui Einstein scrive le sue equazioni. Infatti, come notato già prima, Einstein disconosce la costante h introdotta esplicitamente da Planck nella sua equazione, ma scrive sempre e ovunque $R\beta/N, \beta = h/k$, e ciò intitola Pais a parlare d'una costante universale, come dapprima cosa diversa da h , per poi affermare che quella costante universale introdotta da Einstein nella sua equazione dell'effetto fotoelettrico deve essere la stessa che quella di Planck. "*Pretty incredible!*", aveva scritto il suo maggiore gregario Hoffmann nel proprio fascinoso *conte* (cfr. ref. 8)!

Tuttavia l'articolo e la sua idea portante, nonostante il *Weihrauch* del turibolo di Pais, cioè il quanto di luce preso a prestito da Planck, non troveranno negli anni seguenti molta positiva accoglienza. L'ipotesi di Planck, sostenuta col coraggio e l'energia dei suoi vent'anni, ed insistita con un'altra pubblicazione appena un anno dopo, appariva ai più incomprensibile, inaccettabile, persino ributtante. Lo stesso Planck se ne ritrasse spaventato e - temendo forse un *ostrakon* simile a quel malcapitato pitagorico ateniese che nel IV secolo a.C. divulgò l'esistenza dell'irrazionale - cercò a lungo

come giustificarla ed estrarla all'interno delle ipotesi continuiste di Maxwell. Ne parlerà sempre con ritrosia, pudore, come quasi di un peccato commesso e l'accetterà così come si possono accettare un temporale indesiderato o un figlio sciancato. Così è ben possibile che in quegli anni di violente oscillazioni, perplessità e controversie sui fondamenti della fisica, vista l'aggressività pubblicitaria e la sua attitudine cinicamente machiana, Einstein, che è al tempo stesso machiano e boltzmanniano, atomista e continuista, sia apparso lui come l'alfiere o ben anche il padre del quanto di luce. Come accadeva un po' per la relatività. Ha abbracciato, cercando di cambiarli un po' con rimestamenti vari, talora ben riusciti e traumatici, le idee e i risultati di due rispettati fisici, Lorentz e Planck, e se ne fa il brillante divulgatore. I due lo prenderanno tosto a simpatia, e gli largiranno benignamente la loro protezione e il loro aiuto, promovendolo presto nell'esclusiva e allora sparuta cerchia dei pochi fisici teorici del tempo che vogliono acquistare più voce e influenza nel mondo d'una scienza fisica in crescita tumultuosa.

La cosa curiosa è che verosimilmente Einstein credette davvero, quanto meno per un certo tempo, che fosse stato lui a postulare il quanto di luce, e non Planck, e quindi giudicare poi il suo parzialmente modesto lavoro qui esaminato il più rivoluzionario tra i propri contributi alla fisica, se in un articolo dell'anno seguente (cfr. ref. 5), che ancora tornava sull'argomento del quanto, scrive:

"Mi pareva allora - cioè un anno prima - che la teoria di Planck costituisse per certi versi un riscontro del mio lavoro (Sic!). Tuttavia nuove considerazioni esposte qui di seguito nel par. 1 mi hanno rivelato che il fondamento di quella teoria - quella di Planck - differisce da quello che risulta dalla teoria di Maxwell precisamente in quanto essa implicitamente fa uso(Sic!!) dell'ipotesi dei quanti di luce menzionata poc'anzi".

E ancora, nello stesso scritto:

"Ritengo che le riflessioni precedenti non siano affatto in contrasto con la teoria di Planck; anzi esse mi sembrano indicare che nella sua teoria Planck ha introdotto nella fisica un nuovo elemento ipotetico: l'ipotesi dei quanti di luce".

Se queste righe hanno un senso, esso o è brutto o banalmente stupido. Il primo è poco commendevole e ci si sorvola, il secondo sarebbe che al momento di scrivere l'articolo dell'anno prima, Einstein non abbia letto o capito per intero il lavoro di Planck, e che ciò sarebbe avvenuto solamente un anno dopo.

Conclusione

In sé e per sé l'articolo qui esaminato, non fosse per la parte sull'effetto fotoelettrico, dovrebbe essere giudicato così così: un lavoro nient'affatto originale, e certo non tale da assurgere a fama e prestigio internazionali, al punto da essere premiato con il

massimo lauro scientifico. Il quanto di luce non è stato ipotizzato da Einstein in detto lavoro, ma da Planck cinque anni prima. Planck è il legittimo padre di un figlio, $h\nu$, nato perfetto, completo di ogni cosa per camminare, svilupparsi e crescere così come è poi cresciuto. Ammettiamo anche per le tante cure e attenzioni di Einstein. Il quale però, analogamente al suo grande mentore, non ne volle mai comprendere la fondamentale unicità e irriducibilità, per come v'è innestata la costante universale h , il quanto d'azione, senz'altro l'elemento più importante di tutta la faccenda, e che Einstein sperò sempre di riuscire a ricondurre alla velocità della luce c .

Einstein stesso in qualche occasione si disse imbarazzato per la singolare piega assunta dalla storia. Nei due anni successivi alla assegnazione del Nobel, il medesimo tema, l'effetto fotoelettrico, sarà ancora, fra l'altro, l'argomento della motivazione per altri due premi Nobel, conferiti a R.A. Millikan e M. Siegbahn. E si vocifera che il *Nobel Committee* sia stato in serio imbarazzo nell'escogitare una motivazione esplicita per l'assegnazione del riconoscimento ad Einstein, che certamente non poteva essere il quanto di energia o di luce, in quanto esso era stato la base della motivazione per Planck tre anni prima. La completa menzione della motivazione per Einstein recita infatti genericamente prima dei suoi servigi e studi nel campo della fisica teorica, specificando infine a margine la scoperta dell'equazione dell'effetto fotoelettrico.

Gli è che solo dopo il 1919, a guerra finita, dopo la relatività generale e la chiassosa spedizione di Eddington, quando divenne "*il Copernico del XX secolo*", "*il Newton ebreo*", su tutte le ruote e piazze dei giornali etc., e la crescente prominenza politica internazionalista della figura di Einstein - in quei mesi commissario speciale assieme alla Curie della Società delle Nazioni - si cominciò ad imporre per una ragione o per un'altra l'assegnazione del Nobel, che è sempre venata di ragioni extra-scientifiche, diciamo pure mondane e politiche: glielo si doveva, imperiosamente, ripetiamo, per un motivo o per un altro. L'anno precedente, 1920, per chiare ragioni politiche, la ringalluzzita arroganza francese aveva imposto agli Svedesi il nome d'uno sconosciuto sperimentatore di leghe e metalli, certo Charles-Edouard Guillaume. Un nome che nessuno studente di fisica d'allora e dei decenni successivi avrebbe mai più sentito nominare o letto in qualche libro o rivista di fisica, facendo così imbestialire le mortificate e umiliate congreghe dei fisici tedeschi, e quindi anche Einstein che l'aspettava ormai da qualche anno ... ma non certo per l'effetto fotoelettrico! Incominciando poi a prevalere fra gli Alleati certo spirito di riappacificazione verso gli sconfitti *Unni*, e dominando ancora la scienza tedesca massicciamente nel panorama intellettuale europeo di quegli anni e del decennio successivo, qual miglior auspice segno di un nuovo avvenire di pace e concordia, Versailles a parte, che dare il prestigioso e ricco massimo alloro della fisica, specialmente in quei tempi di miseria, ad Albert Einstein? Che pur essendo *Unno* per nascita, educazione e lingua, non si sentiva affatto tale, bensì apolide o cosmopolita della *meilleure crème*, e che certamente lo meritava per parecchie ragioni. Bene; Einstein è diventato l'icona della Fisica, e i suoi meriti in essa sono stati tanti e importanti sotto ogni rispetto. Resta

però il fatto, che qui si è cercato di provare, che il quanto di luce non fu farina del suo sacco. Planck, come dice anche la motivazione del *Nobel Committee* del 1918, ne è il legittimo autentico padre.