

Fotone o quanto di luce? Investigazione sulla radiazione elettromagnetica dagli inizi del XX secolo

Valentina Bologna¹, Viviana Poli², Fulvio Parmigiani³ and Francesco Longo⁴

¹Università degli Studi di Trieste, Centro di Formazione Insegnanti e Dipartimento di Fisica, Trieste, valentina.bologna@units.it.

²Università degli Studi di Trieste, Dipartimento di Fisica, Trieste, viviana.poli@studenti.units.it.

³Università degli Studi di Trieste, Dipartimento di Fisica & Elettra - Sincrotrone Trieste S.C.p.A., Trieste, fparmigiani@units.it.

⁴Università degli Studi di Trieste, Dipartimento di Fisica & INFN - Sezione di Trieste, Trieste, francesco.longo@ts.infn.it.

Abstract: Nell'insegnamento della Fisica, termini e concetti vengono talvolta utilizzati senza evidenziare il processo storico ed epistemologico che li ha introdotti e che ha portato alla loro scelta per nominare, identificare e spiegare un particolare fenomeno. Analogamente a quanto accade nella pratica didattica, questo è successo anche quando i fisici cercavano di costruire la conoscenza sulla radiazione elettromagnetica. Per supportare gli studenti nell'apprendimento di questo fenomeno, abbiamo cercato di adottare un approccio storico-culturale che delinea il processo epistemologico vissuto dai fisici all'inizio del XX secolo. Dalla Storia della Fisica emergono aspetti linguistici ed etimologici fondanti un insegnamento culturalmente e storicamente integrato. Essi contribuiscono, inoltre, a costruire quel contesto culturale necessario a favorire la comprensione delle sfide e delle innovazioni dell'elettrodinamica quantistica.

Keywords: Storia della Fisica, Didattica della Fisica, Ottica, Epistemologia.

1. Breve introduzione e metodo di indagine

Utilizzare un approccio che integri in maniera opportuna il contesto storico e culturale nell'ambito della didattica si rivela fondamentale per presentare agli studenti una teoria fisica in modo organico, permettendo loro di comprenderla e di collocarla adeguatamente nel contesto educativo. In questo lavoro di ricerca, è stato svolto un processo di indagine su tre livelli, al fine di analizzare e sistematizzare il processo storico che ha condotto all'introduzione dei termini e dei concetti relativi al fotone ed evidenziare quelle che potrebbero essere delle possibili implicazioni dal punto di vista didattico.

Il livello di indagine storica ha lo scopo di comprendere e sistematizzare il cambiamento di paradigma relativo al concetto di fotone agli inizi del XX secolo, inteso come cambiamento delle assunzioni basilari all'interno di una teoria fisica dominante. Esaminando l'origine e la prima ricezione del vocabolo "fotone", nel secondo livello di indagine è stato utilizzato un approccio etimologico alla storia della scienza, ovvero allo studio dell'origine e della diffusione dei termini impiegati per riferirsi a un determinato concetto. Nel terzo livello, rappresentato da un'indagine didattica, è stata approfondita l'influenza a livello educativo dei processi storici ed epistemologici.

Alla base del metodo di analisi utilizzato vi è la distinzione, proposta da Klaus Hentschel, tra "termine" e "concetto": quest'ultimo indica "una nozione chiaramente delineata", mentre il termine rappresenta una "denotazione concreta e linguisticamente fissata", arbitrariamente scelta per riferirsi a un pensiero definito (Hentschel, 2018). Nel seguito si farà dunque riferimento a "concetto" nel livello di indagine storica e al "termine" nel livello etimologico.

2. Approfondimento dei diversi livelli di indagine

2.1. Livello di indagine storica

Agli inizi del XX secolo, i fisici sono stati impegnati in un processo di "disambiguazione ontologica"¹, ovvero nella comprensione del concetto associato al termine "fotone", attività che risulta essere propria anche di molti studenti nell'atto di comprendere la fisica. Spesso nelle scienze sono presenti delle "metafore concettuali"², che fungono da utili abbreviazioni³ e i cui limiti sono chiari a chi le utilizza (Lamb, 1995). Servendosi in modo continuo di tali espressioni si rischia, però, di assumere il significato di queste metafore come significato letterale. È dunque fondamentale delineare chiaramente il concetto a cui il termine "fotone" (talvolta anche abbreviato con l'espressione "quanto di luce") fa riferimento, così da permettere agli studenti di acquisire il corretto modello mentale.

Di seguito verranno innanzitutto brevemente presentati i modelli fenomenologici riguardanti la natura della luce a partire dal XVII secolo, per esporre poi la concezione diffusa agli inizi del XX secolo. Si cercherà quindi di comprendere come e perché sia stata introdotta l'ipotesi del "quanto di luce" e di illustrare le ragioni che portarono a trattare tale ipotesi come plausibile, fino a diventare una vera e propria conoscenza consolidata.

Nell'affrontare il livello di indagine storica, il punto di partenza è stato quello di analizzare i modelli fenomenologici diffusi verso la fine del XVII secolo riguardo la natura della luce. Nell'opera *Opticks*, Newton sostenne di aver dimostrato la natura corpuscolare della luce per mezzo del celebre *Experimentum Crucis*, arrivando a considerare la luce come costituita da veri e propri corpuscoli colorati che si combinavano apparendo bianchi (Newton, 1952). Rispetto a questa teoria prevalse però una descrizione ondulatoria della natura della luce, secondo quanto sostenuto da Huygens.

Nel XIX secolo erano stati fatti molti passi avanti riguardo alla comprensione dell'elettromagnetismo. Il contributo di Maxwell, avente lo scopo di introdurre un unico quadro teorico per descrivere l'elettricità e il magnetismo, portò all'unificazione concettuale della luce e delle altre forme di radiazione elettromagnetica. La teoria ondulatoria della radiazione elettromagnetica rappresentò dunque il paradigma dominante fino agli inizi del XX secolo. Tuttavia, alcuni fenomeni non potevano essere completamente spiegati da questa teoria, sostenendo la necessità di una successiva revisione della comprensione del tempo.

Nel XX secolo venne affrontato il problema della radiazione del corpo nero. Le difficoltà teoriche erano legate al fatto che le leggi della fisica classica non riuscivano a spiegare in modo soddisfacente lo "spettro di corpo nero", ovvero l'intensità della radiazione emessa da questo sistema. Fu Planck ad avere un'intuizione rivoluzionaria per risolvere questo problema: egli propose la quantizzazione dell'energia degli oscillatori armonici (Branchetti, Cattabriga & Levrini, 2019). In altre parole, egli cercò di risolvere un "problema classico" proponendo un modello nel quale suggerì che l'energia della radiazione emessa dagli oscillatori all'interno del corpo nero non potesse essere continua, come previsto dalla fisica classica, ma dovesse trovarsi in quantità discrete, la cui entità poteva essere quantificata mediante una costante fondamentale ad oggi nota come "costante di Planck".

Einstein compì, invece, un passaggio molto diverso dal punto di vista concettuale: egli quantizzò l'energia del campo elettromagnetico. Dunque, pur riconoscendo la discretizzazione dei livelli energetici della carica legata, Einstein postulò che anche l'energia del campo elettromagnetico fosse quantizzata e, in questa maniera, semplificò enormemente il calcolo matematico relativo all'effetto fotoelettrico.

¹ Espressione utilizzata in (Brookes & Etkina, 2009, p. 7) e tradotta dall'inglese.

² Espressione utilizzata in (Brookes & Etkina, 2009, p. 3) e tradotta dall'inglese.

³ È stato scelto il vocabolo "abbreviazioni" come richiamo all'espressione "*short and convenient*" utilizzata da Lamb per riferirsi al termine "fotone" (Lamb, 1995, p. 77).

Sostanzialmente, ciò che fece Planck fu quantizzare l'energia di un moto oscillatorio ed Einstein utilizzò gli stessi argomenti termodinamici di cui si servì Planck, ma li applicò al campo elettromagnetico, anziché alla carica legata. Non disponendo nel 1905 degli strumenti derivanti dalla seconda quantizzazione della meccanica quantistica di Dirac, l'operazione compiuta da Einstein parve al tempo piuttosto ardita e suscitò un ampio dibattito tra i fisici. Con il senno di poi è facile comprendere che il modello proposto da Einstein era corretto, dal momento che è possibile applicare lo stesso formalismo alla radiazione elettromagnetica e al moto di una carica legata, essendo entrambi sistemi oscillatori (Roychoudhuri, Kracklauer & Creath, 2008).

Il contributo di Compton fu di notevole importanza nel convincere molti fisici dell'effettiva esistenza del “quanto di luce” proposto da Einstein. Per studiare l'influenza che l'effetto Compton e la sua interpretazione del 1923 ebbero sull'accettazione della “*Light Quantum Hypothesis*” (LQH) è utile fare riferimento al metodo proposto da Brush, il quale fa un'analisi dell'impatto che tale teoria ebbe nelle pubblicazioni di quel periodo. In Figura 1, si può osservare come si sia verificato un netto aumento di pubblicazioni di libri di testo e articoli a favore della LQH a partire dall'anno in cui venne spiegato l'effetto Compton e ancor più dopo il 1927, anno in cui il fisico statunitense ricevette il Premio Nobel (Brush, 2007).

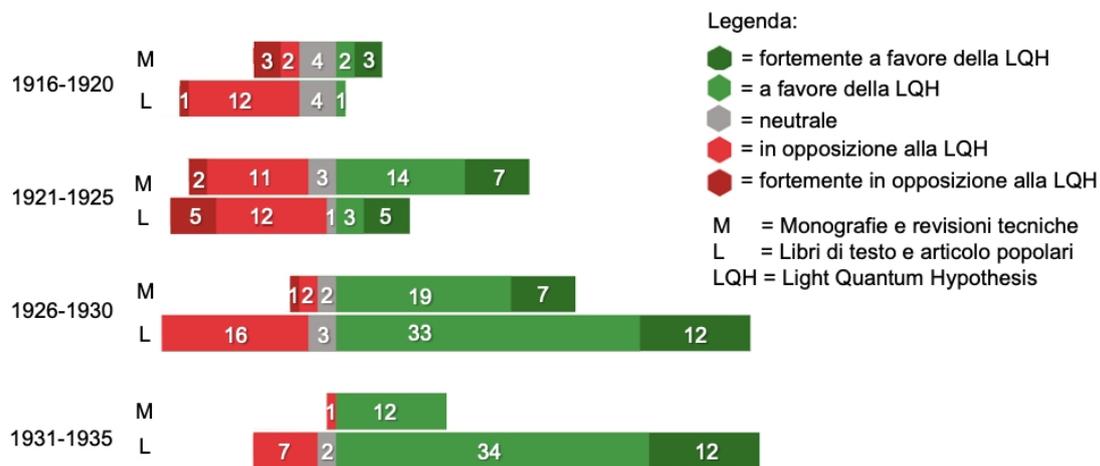


Fig. 1: Grafico realizzato a partire dai dati della tabella tratta da (Brush 2007, pp. 240-241). Accettazione della natura quantizzata della luce.

2.2. Livello di indagine etimologica

Indagando sull'origine del termine “fotone”, è possibile scoprire che il primo ad utilizzare tale vocabolo fu il fisico e psicologo Troland in un articolo del 1916, come unità di misura dell'intensità dello stimolo luminoso sulla retina (Troland, 1917). Successivamente, il fisico Joly iniziò a interessarsi riguardo alla percezione del colore e tentò di elaborare quella che egli definì “teoria quantistica della visione”, nella quale il “fotone” rappresentava “l'unità di stimolo luminoso” liberato dalla corteccia cerebrale (Joly, 1921). Ad ogni modo, entrambe queste teorie non ebbero molto rilievo e vennero ben presto dimenticate.

Nel 1926, il termine “fotone” entrò nel linguaggio della fisica grazie a Lewis, il cui principale obiettivo di ricerca era quello di superare le limitazioni e le ambiguità delle teorie esistenti nell'ambito della fisica atomica dell'epoca. L'ipotesi di Lewis era che nei processi di emissione e assorbimento ci fossero come mediatori dei veri e propri corpuscoli di energia che viaggiavano da un atomo all'altro con velocità c e che egli chiamò fotoni (Lewis, 1926, p. 238). È doveroso sottolineare che il fotone di Lewis differiva in modo significativo dal concetto di “quanto di luce” di Einstein: Lewis postulò che i fotoni fossero indistruttibili, cioè che non potessero essere né generati né distrutti, ma potevano solo essere

“lanciati avanti e indietro” tra emettitore e assorbitore senza subire alterazioni. Questo è però in contrasto con l’interpretazione moderna del fotone come particella mediatrice di massa zero delle interazioni elettromagnetiche. Dunque, sebbene egli sia stato uno dei pionieri nell’utilizzo di questo vocabolo nel contesto della fisica, non si può affermare che Lewis sia il padre del moderno concetto di “fotone”.

Anche se il concetto associato al fotone di Lewis venne ben presto dimenticato, il termine da lui proposto si diffuse rapidamente. In Tabella 1, ripresa dallo studio di Kragh (2014), si può osservare la comparsa del termine “fotone” rispetto all’espressione “quanto di luce” nei titoli di articoli scientifici in lingua inglese. È possibile constatare che nel periodo 1926-1935 le due forme erano utilizzate con frequenza quasi uguale; dopo il 1945 prese invece il sopravvento l’utilizzo del termine “fotone”, la cui diffusione ebbe una crescita molto rapida nei successivi decenni .

	1926-1935	1936-1945	1946-1955
<i>Light quantum (quanta)</i>	20	0	5
<i>Photon(s)</i>	19	29	243

Tabella 1: Versione tradotta della corrispondente tabella tratta da Kragh (2014, p. 276). Diffusione del termine “fotone” nei titoli degli articoli scientifici in lingua inglese.

Un’ulteriore testimonianza della rapida diffusione del termine “fotone” è data dal fatto che esso fu scelto nel titolo “*Électrons et Photons*” del quinto Congresso di Solvay del 1927. In quell’occasione, molti fisici utilizzarono tale vocabolo, ma solo Compton richiamò l’attenzione sulla sua origine, affermando:

Nel riferirmi a questa unità di radiazione userò il nome *fotone*, suggerito di recente da G.N. Lewis... Rispetto ai termini *quanto di radiazione* o *quanto di luce*, questo nome ha il vantaggio della brevità e di evitare qualsiasi dipendenza implicita dalla meccanica quantistica... o dalla teoria quantistica della struttura atomica. (Compton, 1928, p. 57; citazione tradotta)

Compton è anche probabilmente responsabile di aver reso popolare il vocabolo, dopo averlo utilizzato nel suo discorso al conferimento del Premio Nobel nel 1927.

2.3. Livello di indagine didattica

Per analizzare l’influenza a livello educativo dell’indagine storica ed epistemologica, il primo interrogativo che possiamo porci è: anche nella prassi didattica il termine “fotone” è diventato dominante rispetto a una chiara definizione del concetto? Per rispondere a questa domanda, sottolineiamo innanzitutto l’importanza del ruolo dell’insegnante, che è quello di guidare lo studente verso una più profonda conoscenza concettuale e verso una corretta costruzione di un modello mentale, ovvero della rappresentazione di un oggetto o di un processo a livello cognitivo. La figura dell’insegnante può dunque essere paragonata a quella di un mediatore linguistico, più che di un semplice traduttore: se quest’ultimo si limita, infatti, a riprodurre un termine da una lingua ad un’altra, come un mediatore linguistico l’insegnante deve invece fare attenzione a scegliere il termine più opportuno per veicolare un determinato concetto in maniera efficace ed immediata.

A partire da questa esigenza didattica, l’insegnante partirà da un proprio *Cultural Content Knowledge* iniziale, ovvero da una conoscenza di un dato contenuto rielaborata da un punto di vista culturale (Galili, 2012a; 2012b), e dovrà interrogarsi sulla correttezza o meno del modello mentale che egli stesso possiede per spiegare questo concetto. Attraverso un percorso simile a quello fin qui descritto, l’insegnante potrà essere accompagnato nella conoscenza del cambiamento storico di paradigma avvenuto agli inizi del XX secolo e, allo stesso tempo, arriverà ad un personale cambiamento di paradigma. In questo modo, egli potrà costruire un corretto modello mentale ed un più ricco ed evoluto *Cultural Content Knowledge* e ciò

andrà a riflettersi positivamente sulla didattica (Fig. 2).



Fig. 2: Schema raffigurante l'evoluzione del cambiamento di paradigma operato dall'insegnante a partire da un'esigenza didattica.

3. Conclusioni e possibili implicazioni per lavori futuri

Con questa indagine si è cercato di discutere come “fotone” e “quanto di luce” non siano espressioni completamente appropriate ad esprimere in maniera chiara, immediata e intuitiva il concetto a cui fanno riferimento e potrebbero dunque non supportare adeguatamente una corretta costruzione concettuale in un contesto didattico. Ad ogni modo, tenendo presente che nel programma didattico delle scuole secondarie di secondo grado i fondamenti della meccanica quantistica vengono affrontati in maniera molto rapida e approssimata, in tale circostanza risulta conveniente adottare questi vocaboli per non creare ulteriori inutili difficoltà da parte degli studenti nella comprensione degli argomenti presentati. A questo livello, sarebbe interessante e istruttivo proporre un percorso storico-culturale, per mettere in evidenza la ricchezza del processo che è stato alla base della scelta di tali termini. Se si vuole però introdurre gli studenti alle moderne applicazioni della meccanica quantistica, allora sarebbe necessario utilizzare vocaboli più opportuni e maggiormente evocativi: si propone, ad esempio, l'espressione “quanto di energia elettromagnetica”, che racchiude in sé informazioni utili a inserirsi nella prospettiva dell'ottica quantistica.

Sarebbe opportuno, inoltre, condurre uno studio della trattazione effettuata dai libri di testo delle scuole secondarie di secondo grado riguardo alla presentazione dei fondamenti della meccanica quantistica. Andrebbe indagato, in particolare, se nella presentazione del processo storico venga messa in evidenza la pregnanza del processo di costruzione e differenziazione concettuale derivante dal cambiamento di paradigma.

Un'altra possibile implicazione per dei lavori futuri è, infine, una ricerca di carattere storico-didattico di formalizzazione del cambiamento di paradigma avvenuto nella seconda metà del XX secolo. Data la rapidità e l'importanza degli sviluppi tecnologici derivanti dalle applicazioni dell'ottica quantistica, è necessario effettuare un'accurata analisi della comprensione e della conoscenza, soprattutto da un punto di vista didattico, dei contenuti concettuali alla base della teoria quantistica.

Bibliografia

- Branchetti, L., Cattabriga, A. & Levrini, O. (2019). “Interplay between mathematics and physics to catch the nature of a scientific breakthrough: the case of the blackbody”, *Physical review, Physics education research*, 15(2), p. 020130-1.
- Brookes, D.T. & Etkina, E. (2009). “ ‘Force’, ontology, and language”, *Physical Review Special Topics, Physical Education Research*, 5(1), p. 010110-1.
- Bruce, W.S. (2020). *Our changing views of photons – a tutorial memoir*. Oxford: Oxford University Press.
- Brush, S.G. (2007). “How ideas became knowledge: the light-quantum hypothesis 1905–1935”, *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 37(2), pp. 205-246.
- Compton, A.H. (1928). “Discordances entre l’expérience et la théorie électromagnétique du rayonnement”, in *Électrons et Photons, Rapports et Discussions du Cinquième Conseil de Physique tenu a Bruxelles du 24 au 29 Octobre 1927*. Gauthier-Villars, Parigi: Institut International de Physique Solvay, pp. 55-85.
- Galili, I. (2012a). “Cultural Content Knowledge – The Case of Physics Education”, *International Journal of Innovation in Science and Mathematics Education*, 20(2), pp. 1-13.
- Galili, I. (2012b). “Promotion of Cultural Content Knowledge Through the Use of the History and Philosophy of Science.”, *Science & Education*, 21, pp. 1283-1316.
- Hentschel, K. (2018). *Photons: the History and Mental Models of Light Quanta*. Springer Cham.
- Joly, J. (1921). “A quantum theory of colour vision”, *Proceedings of the Royal Society B*, 92, pp. 219-232.
- Kragh, H.S. (2014). “The names of physics: plasma, fission, photon”, *The European Physical Journal H*, 39(3), pp. 263–281.
- Lamb, Jr. W.E. (1995). “Anti-Photon”, *Applied Physics B*, 60, pp. 77-84.
- Lewis, G.N. (1926). “Light waves and light corpuscles”, *Nature*, 117, pp. 236-238.
- Newton, I. (1952). *Opticks or A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflections & Colours of Light*. New York: Dover.
- Troland, L.T. (1917). “On the measurement of visual stimulation intensities”, *Journal of Experimental Psychology*, 2, pp. 1-33.
- Roychoudhuri, C., Kracklauer, A.F. & Creath, K. (2008). *The nature of light: what is a photon?* University of Rochester, Rochester, New York: CRC Press, Taylor & Francis.