

Modello Strutturale del Fotone: Proposta e Implicazioni

Autore: Francesco Ferrara

1. Abstract

In questo lavoro viene proposto un modello strutturale del fotone, basato su due cariche uguali in valore assoluto ed opposte in segno, il cui valore è pari alla carica dell'elettrone (circa $1,6 \times 10^{-19}C$), prive di massa, che ruotano, procedendo in versi opposti, lungo una circonferenza, il cui raggio varia in funzione della lunghezza d'onda del fotone stesso, alla velocità della luce. Il modello permette di derivare in modo naturale alcune delle principali proprietà del fotone – tra cui l'energia, la quantità di moto e lo spin – a partire da una geometria semplice e da considerazioni elettromagnetiche fondate sul potenziale vettore.

Una delle principali verifiche di coerenza interna riguarda la compatibilità del modello con la relazione di de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Inoltre lo spin del fotone, pari ad $\hbar$, emerge in modo estremamente semplice dal modello. Viene discusso come la massa nulla complessiva del fotone, derivi dalla somma algebrica di due masse elettromagnetiche opposte, fornendo una possibile spiegazione strutturale per l'assenza di massa a riposo e per la presenza di energia e impulso, in accordo con la relatività ristretta.

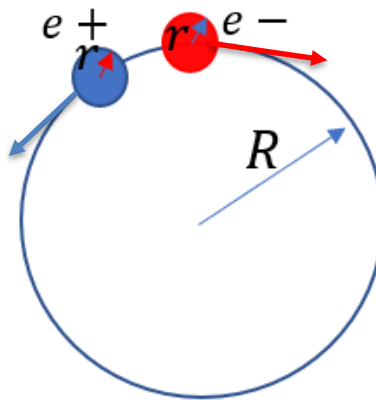
2. Riferimenti bibliografici

Celani, F.; Di Tommaso, A. O.; Vassallo, G. (2017).

The Electron and Occam's Razor. *Journal of Condensed Matter Nuclear Science*, 25(1), 76–99.

3. Presentazione del modello

Il modello del fotone da me proposto ha le seguenti caratteristiche:



1. È formato da due sferette, prive di massa, che posseggono due cariche elettriche uguali in modulo alla carica dell'elettrone ma di segno opposto, che ruotano lungo una circonferenza, di raggio R , alla velocità della luce procedendo in versi opposti.
2. Il raggio della circonferenza, dipende dalla lunghezza d'onda del fotone.
3. Le due sferette hanno massa nulla, tuttavia, posseggono una massa di natura elettromagnetica, che si evincerà dopo aver delineato i fondamenti teorici su cui questa trattazione si basa.
3. Il modello descrive il comportamento del fotone, ad energie medio-alte: **non è idoneo a rappresentare un fotone legato ad un'onda elettromagnetica a bassa frequenza** e può ritenersi valido in un campo di frequenze compreso tra circa **1000 Å e 6328 Å**, ovvero dalla regione dell'ultravioletto estremo fino alla luce rossa visibile. Oltre questi limiti, l'energia o la dispersione del fotone renderebbero inefficace l'approssimazione geometrico-rotazionale proposta.
5. La massa nulla del fotone emerge dal modello stesso, come vedremo dopo aver trattato i fondamenti teorici.
6. Lo spin del fotone emerge anch'esso dal modello ed è pari a $\hbar$
7. Il momento magnetico sarà oggetto di una trattazione più approfondita.

4. Fondamenti teorici: Dimostrazione della massa nulla

I fondamenti teorici su cui il mio lavoro si basa sono stati formulati da un gruppo di ricercatori italiani. Di seguito sono riportati i riferimenti bibliografici esatti:

**Celani, F.; Di Tommaso, A. O.; Vassallo, G. (2017).
The Electron and Occam's Razor. Journal of Condensed Matter Nuclear Science, 25(1), 76–99.**

Prima di addentrarci nella descrizione del nostro modello è opportuno richiamare il concetto di potenziale vettore.

Supponiamo che una certa distribuzione di correnti, variabili nel tempo, generi un campo elettromagnetico. Sia $\vec{B}$ il campo magnetico generato. Diremo che il campo $\vec{A}$ è il potenziale vettore del campo $\vec{B}$, se vale la relazione $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$.

Supponendo che nello spazio siano presenti delle cariche statiche e delle cariche in moto, quindi delle correnti, è possibile esprimere il campo elettrico generato in tale contesto, mediante la seguente relazione:

$$\vec{E} = -\nabla\phi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

Nel caso in cui non siano presenti cariche statiche, il termine “ $-\nabla\phi$ ” è nullo e la precedente espressione del campo diventa:

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

Le tre componenti del campo elettrico si ottengono derivando, rispetto al tempo, il potenziale vettore.

4.1 Il prodotto eA

Il prodotto della carica “ e ”, che in moto genera una corrente, per il potenziale vettore $\vec{A}$, generato dalla carica stessa, ha le dimensioni di una quantità di moto. Si ha infatti:

$$[eA] = [eEt] = [Ft] = [p]$$

Benché le sferette del modello siano prive di massa, è possibile associare una massa, di natura puramente elettromagnetica, il prodotto eA , **che ha le dimensioni di una quantità di moto**, poiché le sferette, per ipotesi, si muovono ad una velocità che in modulo è pari a

quella della luce, si può riscrivere come il prodotto di una massa, la massa elettromagnetica della sferetta, per la velocità della luce.

L'equazione fondamentale del modello è pertanto:

$$e \vec{A} = m \vec{c}$$

Indicando con e_1 ed e_2 , le due cariche elettriche delle due sferette, con $\vec{A}_1$ ed $\vec{A}_2$ i potenziali vettori, associati alle due cariche e con m_1 ed m_2 le masse elettromagnetiche, si ha:

$$e_1 \vec{A}_1 = m_1 \vec{c}_1$$

$$e_2 \vec{A}_2 = m_2 \vec{c}_2$$

Sommando membro a membro le due equazioni appena scritte otteniamo:

$$e_1 \vec{A}_1 + e_2 \vec{A}_2 = m_1 \vec{c}_1 + m_2 \vec{c}_2$$

Nel nostro caso si ha:

$$e_1 = e ; e_2 = -e ; A_1 = A ; A_2 = -A$$

Le due cariche ruotano in verso opposto generando due correnti elettriche identiche, **È possibile affermare che i due potenziali vettore, generati da due correnti identiche siano identici.**

Segue:

$$(e - e) \vec{A} = (m_1 + m_2) \vec{c}$$

segue:

$$m_1 + m_2 = 0$$

segue:

$$m_1 = -m_2$$

Le due masse elettromagnetiche hanno segno opposto, pertanto la massa del fotone è nulla

5. Equazioni di Planck ed Einstein applicate al modello

Un fotone, in accordo con i principi della meccanica quantistica, formulati agli inizi del 1900 da Max Planck, trasporta un'energia pari al prodotto della frequenza della radiazione a cui è associato, per la costante di Planck, secondo la relazione:

$$E = h\nu = \hbar \omega$$

Nel nostro caso, il modello è composto da due sferette che ruotano, in versi opposti, lungo la stessa circonferenza, alla velocità della luce.

È verosimile ipotizzare che, per ragioni di simmetria, metà dell'energia sia trasportata da una sferetta e metà dall'altra.

L'energia trasportata da ciascuna sferetta sarà pertanto:

$$E = \frac{\hbar \omega}{2}$$

La geometria del modello permette anche l'applicazione dell'equazione di Einstein, secondo cui massa ed energia sono due aspetti della stessa entità fisica.

È possibile scrivere:

$$E = mc^2$$

Uguagliando le due espressioni dell'energia, quella secondo Planck e quella secondo Einstein è possibile scrivere:

$$\frac{\hbar \omega}{2} = mc^2$$

Risolvendo rispetto ad m è possibile ottenere:

$$m = \frac{\hbar \omega}{2c^2}$$

Le due masse elettromagnetiche delle due sferette, uguali ed opposte saranno pertanto:

$$m_1 = \frac{\hbar \omega}{2c^2}$$

ed

$$m_2 = -\frac{\hbar \omega}{2c^2}$$

Tenendo, altresì, conto anche delle relazioni, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ e $T = \frac{2\pi R}{c}$ si ottiene un'altra relazione che lega la massa elettromagnetica delle sferette al raggio da esse descritto.

$$m = \frac{\hbar}{2Rc}$$

Si ha ancora:

$$\frac{\hbar\omega}{2c^2} = \frac{\hbar}{2Rc}$$

Tenendo conto della relazione $c = \lambda\nu$ e risolvendo rispetto a R otteniamo:

$$R = \frac{c}{\omega} = \frac{c}{2\pi\nu} = \frac{\lambda}{2\pi}$$

Il raggio del modello è una funzione della lunghezza d'onda λ associata all'onda elettromagnetica che trasporta il fotone. In definitiva è possibile scrivere:

$$R(\lambda) = \frac{\lambda}{2\pi}$$

Riconsiderando l'espressione della massa elettromagnetica di ciascuna sferetta, in funzione della pulsazione e tenendo conto delle relazioni $c = \lambda\nu$ ed $\omega = 2\pi\nu$ è possibile ottenere la seguente relazione:

$$m(\lambda) = \frac{\pi\hbar}{\lambda c}$$

Considerando il prodotto della massa per il raggio del modello si ha:

$$m(\lambda)R(\lambda) = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\pi\hbar}{\lambda c} = \frac{\hbar}{2c}$$

5.1 Limite inferiore del raggio orbitale e implicazioni sullo spot di luce

Nel modello proposto, il prodotto tra la massa elettromagnetica di ciascuna sferetta e il raggio orbitale risulta essere costante:

$$m(\lambda)R(\lambda) = \frac{\hbar}{2c}$$

Ne deriva che, nel tentativo di ridurre il raggio orbitale R (ad esempio focalizzando la luce in uno spot sempre più ristretto), la massa elettromagnetica di ciascuna sferetta tende a crescere senza limite, pur rimanendo nulla la massa complessiva del fotone.

Tale comportamento suggerisce l'esistenza di un **limite strutturale alla focalizzazione della luce**, coerente con le osservazioni sperimentali. Si tratta di un'interpretazione interna al modello che può fornire una lettura alternativa del limite di diffrazione classico, ora giustificato come conseguenza della geometria quantizzata del fotone.

6. Coerenza del modello con l'ipotesi di De Broglie

Consideriamo un fotone con lunghezza d'onda ipotizzata pari a:

$\lambda = 100 \text{ nm}$ e proponiamoci come obiettivo di calcolare l'impulso p , procedendo prima con le equazioni del modello e poi con le relazioni della fisica classica

1. Dal modello:

Il raggio dell'anello risulta: $R = \frac{\lambda}{2\pi}$

$$2. \quad R = \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{100 \times 10^{-9}}{2\pi} = 15,9 \times 10^{-9} \text{ m}$$

3. Considerando la relazione di De Broglie che lega la lunghezza d'onda di una particella alla quantità di moto che si esprime come $\lambda = \frac{h}{p}$ è possibile calcolare la quantità di moto del fotone unendo insieme la relazione $R = \frac{\lambda}{2\pi}$ e la relazione di De Broglie $\lambda = \frac{h}{p}$, si ha:

$$R = \frac{h}{2\pi p} = \frac{h}{p} \rightarrow p = \frac{h}{R}$$

4. Calcoliamo l'impulso p , sfruttando l'equazione ottenuta dal modello:

$$p = \frac{h}{R} = \frac{1.054 \times 10^{-34}}{15,9 \times 10^{-9}} \cong 6.62 \times 10^{-27} \frac{\text{kgm}}{\text{s}}$$

5. Dalla fisica classica:

Applicando la relazione energia/impulso:

$$6. \quad E = \frac{hc}{\lambda} \rightarrow \frac{E}{c} = p = \frac{h}{\lambda} = \frac{\hbar 2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi \cdot 1.054 \times 10^{-34}}{10^{-7}} \cong 6.62 \times 10^{-27} \frac{\text{kgm}}{\text{s}}$$

Conclusione: il valore di p ottenuto tramite il modello geometrico coincide con quello previsto dalla teoria quantistica classica. Ciò conferma la coerenza interna del modello rispetto alle leggi note della fisica. Il modello è perfettamente compatibile con le relazioni fondamentali della fisica dei quanti e della relatività, confermandone la coerenza interna

7. Considerazioni relativistiche

Come ottenuto nel precedente paragrafo il raggio dell'anello di corrente del nostro modello è legato alla lunghezza d'onda della radiazione dalla relazione:

$$R = \frac{\lambda}{2\pi}$$

Questa espressione mostra che il raggio dell'anello che costituisce il fotone è direttamente proporzionale alla sua lunghezza d'onda. Ne consegue una considerazione importante: **la struttura descritta è quella che il fotone possiede mentre si muove alla velocità della luce. Non può essere interpretata come una struttura a riposo.**

Infatti, se si ipotizzasse che questa fosse la configurazione a riposo del fotone, allora, per effetto della contrazione delle lunghezze nella direzione del moto, al raggiungimento della velocità c il raggio dovrebbe tendere a zero:

$$R_{rel} = R_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Se il raggio del nostro modello fosse quello a riposo, al tendere della velocità v , alla velocità della luce, il raggio relativistico tenderebbe a zero.

Tuttavia, ciò condurrebbe a un'assurdità: la perdita della dipendenza del raggio dalla frequenza (ovvero dalla lunghezza d'onda), eliminando così la caratteristica distintiva che consente di distinguere un fotone da un altro.

Concludiamo dunque che **la configurazione descritta** è intrinsecamente relativistica. Essa **rappresenta già la struttura definitiva del fotone, associata al suo stato naturale di moto a velocità c .** Questa ipotesi rafforza la coerenza del modello proposto.

8. Calcolo del momento magnetico e principio di complementarità massa-momento

Appendice filosofico-fisica: Il principio di complementarità massa-momento magnetico

Nel modello proposto, il fotone è rappresentato da due cariche opposte in moto circolare su due anelli. Questo moto genera sia una massa elettromagnetica, attraverso il potenziale vettore $\mathbf{A}$, sia un momento magnetico totale μ .

Tuttavia, emerge un risultato sorprendente: le due proprietà che il fotone manifesta nella descrizione classica — **massa nulla** e **momento magnetico nullo** — risultano **mutuamente incompatibili** all'interno dello stesso assetto geometrico.

Chiariamo meglio questo concetto. Abbiamo assunto che le due sferette che formano il modello, ruotino in verso opposto. In tale situazione le equazioni che stanno alla base del modello ci suggeriscono che la massa del fotone è effettivamente nulla, poiché le masse elettromagnetiche delle due sferette sono uguali ma di segno opposto. Tuttavia, il calcolo del momento magnetico dà luogo ad un valore diverso da zero: le correnti generate dalle due sferette si sommano! La scienza ufficiale afferma però che il momento magnetico di un fotone sia zero. **È importante notare che l'asserzione secondo cui il momento magnetico del fotone è nullo non deriva da una misura diretta, ma da considerazioni teoriche fondate sul fatto che esso è privo di carica e di massa a riposo.**

Nel modello qui proposto, il fotone è descritto da due cariche in moto circolare; ciò implica naturalmente la possibilità di un momento magnetico interno, **la cui esistenza non è in contrasto con alcun dato sperimentale.**

Poiché il fotone è un oggetto quantistico, potremmo ipotizzare che esso possenga i due possibili stati: sferette co-rotanti e sferette contro-rotanti, simultaneamente.

Caso 1 – Sferette controrotanti

- Condizione: $e_1 A_1 + e_2 A_2 = 0 \Rightarrow$ **massa totale nulla**
- Richiede: cariche opposte che ruotano in **versi opposti** $\Rightarrow$ correnti **concordi**
- Effetto collaterale: le correnti si sommano $\Rightarrow$ **momento magnetico diverso da zero**

Caso 2 – Sferette co-rotanti

- Condizione: $\mu_1 + \mu_2 = 0 \Rightarrow$ **momento magnetico nullo**
- Richiede: cariche opposte che ruotano nello **stesso verso** $\Rightarrow$ correnti **discordi**
- Effetto collaterale: $A_1 \neq A_2 \Rightarrow$ **massa elettromagnetica diversa da zero**

✚ Conclusione: principio di complementarità

In questo modello a doppio anello, **non è possibile annullare simultaneamente** la massa e il momento magnetico. Ogni configurazione elimina una proprietà a scapito dell'altra.

🪴 La metafora del sughero

“La bruciabilità e la galleggiabilità del sughero non sono simultaneamente osservabili. Se galleggia, è bagnato e non brucia. Se brucia, è cenere e non galleggia.”

Allo stesso modo: “Se il fotone ha massa nulla, ovvero si trova nello stato in cui non può avere momento magnetico nullo. Se ha momento magnetico nullo, non può avere massa nulla.”

$\hbar$ Proposta provocatoria

Potremmo formulare un **principio di indeterminazione strutturale**:

$$\Delta m \gamma \cdot \Delta \mu \gamma \gtrsim \kappa$$

dove κ è un vincolo intrinseco legato alla simmetria interna della struttura.

 Epilogo: il compromesso della luce

Il fotone reale, secondo le osservazioni:

- Viaggia alla velocità della luce c
- Non ha massa misurabile (*entro i limiti sperimentali*)
- Non mostra momento magnetico statico

Eppure trasporta **energia, impulso e spin**.

Forse, come nelle cose più profonde, la realtà osservabile è l'ombra coerente di una **complessità nascosta**.

Come diceva Saint-Exupéry: “L'essenziale è invisibile agli occhi.”

9. Ipotesi sul raggio delle due sferette.

Affinché il modello sia completo occorre fare delle ipotesi sul raggio delle sferette che compongono il modello.

Ipotizzo che il rapporto fra il raggio della circonferenza descritta dalle due sferette ed il raggio delle sferette stesse, sia pari circa alla costante di struttura fine, circa 137. Ipotizzo che il rapporto fra il raggio R dell'anello di corrente ed il raggio di ciascuna delle sferette, sia proprio 137.

Si ha:

$$r = \frac{\lambda}{2 \pi 137}$$

Ipotizzando un fotone associato ad una lunghezza d'onda di 100 nm, i raggi R , del modello e r delle due sferette sarebbero i seguenti:

$$R = \frac{\lambda}{2 \pi} = \frac{100 \times 10^{-9} m}{2 \pi} \cong 1.591549431 \times 10^{-8} m$$

$$r = \frac{\lambda}{2 \pi 137} \cong \frac{R}{137} \cong \frac{1.591549431 \times 10^{-8} \text{m}}{137} \cong 1.161714913 \times 10^{-10} \text{m}$$

10. Il volume del fotone ed il paradosso dell'estensione

Nel modello geometrico proposto, il fotone è rappresentato come un toroide, costituito da due sferette prive di massa, con cariche elettriche uguali ed opposte che ruotano lungo una circonferenza. Tale descrizione consente di assegnare al fotone una struttura spaziale ben definita, con raggio orbitale R e raggio della sezione toroidale r.

Il volume di un toroide con sezione circolare è dato da:

$$V_{\gamma} = 2 (\pi)^2 R r^2$$

Inserendo i valori: $R = 1.5915 \times 10^{-8} \text{m}$, ed $r = 1.1617 \times 10^{-10} \text{m}$ Si ottiene:

$$V_{\gamma} \approx 4.24 \times 10^{-27} \text{m}^3$$

A titolo di confronto, il volume di un atomo di idrogeno (assunto sferico con raggio di Bohr $r_H = 5.3 \times 10^{-11} \text{m}$) è: $V_H \cong 6.2 \times 10^{-31} \text{m}^3$

Da cui segue:

$$\frac{V_{\gamma}}{V_H} \approx \frac{4.24 \times 10^{-27}}{6.2 \times 10^{-31}} \approx 6838$$

Il volume del fotone risulta quindi oltre **6.800 volte maggiore** di quello di un atomo di idrogeno.

Il paradosso apparente

Questo risultato appare controintuitivo: il fotone, considerato per decenni una particella "puntiforme" o "senza dimensioni", avrebbe nel presente modello una **estensione spaziale superiore a quella di un intero atomo**. Tuttavia, ciò non è in contraddizione con la fisica nota: il fotone non ha massa a riposo e non subisce le stesse restrizioni spaziali delle particelle materiali.

L'energia del fotone è legata esclusivamente alla sua frequenza: $E = h\nu$ e non alla sua densità o volume. Ciò consente, nel modello proposto, una struttura ampia con energia quantizzata, senza violare alcun principio sperimentale o teorico.

La possibilità che il fotone abbia una forma estesa, ma una massa complessiva nulla (derivante da due masse elettromagnetiche opposte), offre una nuova chiave interpretativa per fenomeni come:

- la diffrazione e l'interferenza
- la polarizzazione
- l'interazione fotone-atomo

Il fotone si comporta non come un punto materiale, ma come una **entità geometrica dinamica**, distribuita nello spazio, coerentemente con il suo ruolo di mediatore delle forze elettromagnetiche.

In questo contesto, il "paradosso dell'estensione" non è una contraddizione, ma un **cambio di paradigma**: la luce non è piccola perché è veloce, è estesa perché è *relativisticamente priva di massa*.