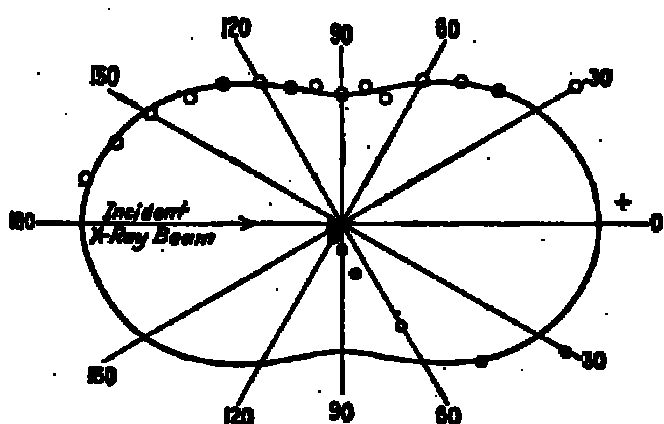


Compton apre il suo articolo con uno sguardo alla teoria classica di Thomson

*J. J. Thompson' classical theory of the scattering of X-rays, trough supported by the early experiments of Barkla and others, has been found incapable of explaining many of more recent experiments.*

Un esempio paradigmatico di quanto descritto da Compton in questo paragrafo è riassunto dal seguente grafico



La distribuzione angolare della radiazione X scatterata dal carbonio. La linea continua è la previsione della teoria classica. I pallini pieni sono le misure di Compton con raggi  $\gamma$  mentre i pallini vuoti sono le misure di Barkla e Ayres per raggi X moderatamente morbidi.

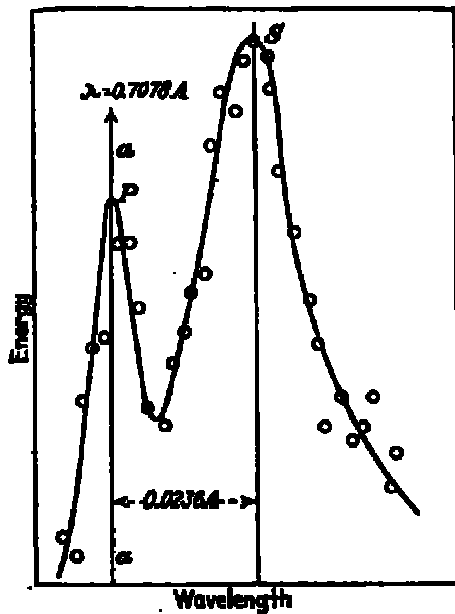
Compton cita una sua precedente ipotesi di lavoro che propose per spiegare il fenomeno:

*Several years ago the writer suggested that this reduced scattering of the very short wave-length X-ray might be result of interference between the rays scattered by different parts of electron, if the electrons's diameter is comparable with the wave-length of the radiation.*

E nel rigettare questa vecchia ipotesi di lavoro ne fa quasi dell'ironia:

*But recent experiments have shown that the size of the electron which must be assumed increases with wave-length of the X-rays employed, and **the conception of an electron whose size varies [...]** is difficult to defend.*

Fatta questa introduzione Compton procede alla spiegazione del fenomeno introducendo l'ipotesi quantistica come l'unica in grado di produrre un modello soddisfacente:



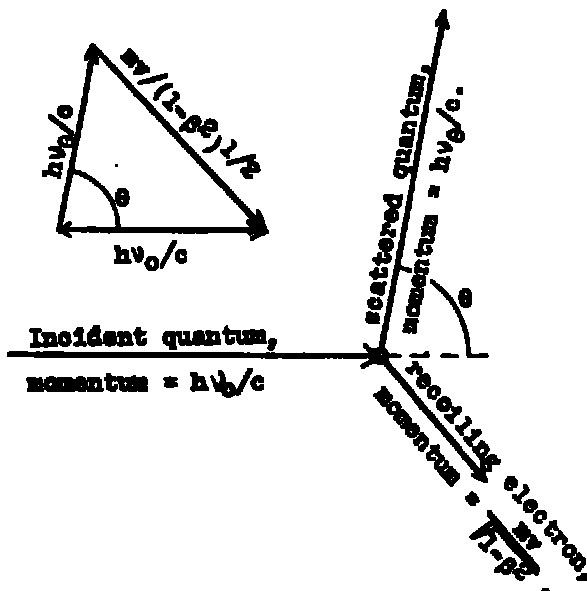
*Nor does any modification of the theory such as the hypothesis of a large electron suggest a way out of the difficulty. The failure makes it appear improbable that a satisfactory explanation of the scattering of X-rays can be reached on the basis of the classical electrodynamics.*

▶ Lo spettro dello scattering di raggi X osservato a 90 gradi rispetto al fascio incidente

### THE QUANTUM HYPOTHESIS OF SCATTERING

- 1) *From the point of view of the quantum theory, we may suppose that any particular quantum of X-rays is not scattered by all the electrons in the radiator, but spends all of its energy upon some particular electron.*
- 2) *As a consequence, the scattering electron will recoil with a momentum equal to change in momentum of X-ray. [...] The effect of the momentum of the X-ray quantum is to set the scattering electron in motion at angle of less than 90° with primary beam.*
- 3) *The energy in scattered ray will be equal to that in the incident ray minus the kinetic energy of the recoil electron.*

I punti principali sono rispettivamente: introduzione del quanto di luce, la conservazione del momento cinetico e la conservazione dell'energia.



*It is interesting notice that according to classical theory, if an X-ray were scattered by an electron moving at a velocity  $\beta c$  frequency of the ray scattered at an angle  $\theta$  is given by Doppler principle.*

Le conseguenze di queste ipotesi non le fa attendere e le inserisce immediatamente dopo la loro introduzione.

Dalla 1) e dalla 3) deduce:


*Since the scattered ray must be a complete quantum, the frequency will be reduced in the same ratio as energy*

Dalla 2) e dall'effetto doppler relativistico:

*But it's well know that the energy radiated by a moving body is greater in the direction of its motion.*

Ancora dalla 2) la previsione dell'esistenza di elettroni espulsi per rinculo che saranno trovati nello stesso anno da C. T. R. Wilson. Un filone d'indagine molto fruttuoso.

( vedere in fondo pag. 19 e inizio pag. 16 di "Dalla scoperta dei raggi X all'effetto Compton" )



L'articolo di Compton risulta diviso in quattro sezioni concettuali: l'introduzione, il calcolo, il confronto sperimentale e le considerazioni.

Una volta fatto il punto sulla teoria classica, aver introdotto la sua ipotesi di lavoro e qualitativamente indicato le implicazione Compton si cimenta in tre calcoli:

- 1) *The change in wave-length due to scattering.*
- 2) *Energy distribution from a moving, isotropic radiator.*
- 3) *The intensity of scattering from recoiling electrons.*

Nella 1) calcola la variazione di frequenza, a causa della parziale cessione di energia nell'urto elastico contro un elettrone, e fa notare che questa variazione in funzione dell'angolo ha la stessa identica forma di quella del principio Doppler. Da cui può ricavare la velocità dell'elettrone di rinculo a cui dedica una parte nel confronto con i risultati sperimentali.

Nella 2) si occupa di calcolare l'effetto Doppler subito dai quanti di radiazione sotto l'ipotesi che la radiazione sia, appunto composta da fotoni (anche se non usa mai questo termine). Inoltre fa notare che la distribuzione dell'energia trovata ha una legge formalmente identica a quella di un corpo nero in movimento rispetto all'osservatore.

– È curioso notare che, a circa 20 anni dalla pubblicazione dei due articoli di Einstein sulla relatività speciale e sull'effetto fotoelettrico, il primo sia stato recepito tanto da essere utilizzato senza preamboli mentre il concetto di fotone sia un oggetto il cui uso necessiti ancora di molte cautele e di cui si sente il bisogno di una giustificazione. –

Nella 3) sezione calcola l'intensità della radiazione scatterata come rapporto fra quella ricevuta da un'osservatore posto in avanti nella direzione del fascio incidente e quella osservata ad un angolo  $\theta$  generico.

Per fare questo ha bisogno di due ipotesi di cui la prima è contemplata nell'elettrodinamica classica:

*To an observer moving with the scatter electron, the intensity of the scattering at an angle  $\theta'$ , according to the usual electrodynamics, should be proportional to  $(1 + \cos^2\theta')$ , if the primary beam is unpolarized.*

Mentre per la seconda ipotesi la questione è più delicata come lui stesso fa notare. Infatti, pur avendo mostrato che per un corpo nero l'intensità è funzione della sola frequenza, non è affatto scontato che per un generico emettitore sia altrettanto vero. Tanto è vero che non riesce a trovare una relazione diretta fra intensità e frequenza per quest'ultimo e si accontenta della di assumerla per buona:

*[...] the change in intensity is in certain special cases a function only of the change in frequency. I have not, however, succeeded in showing rigidly that if two methods of scattering result in the same relative wave-lengths at different angles, they will also result in the same relative intensity at different angles. Nevertheless, we shall assume that this proposition is true, and shall proceed to calculate [...]*

Più avanti nel calcolo farà un'ulteriore semplificazione senza argomentarne il motivo ma semplicemente proponendola ( *probabilmente si riferisce al fatto che il bersaglio dei raggi X è fermo e quindi il punto d'origine di tutti i quanti componenti la radiazione scatterata è lo stesso* ).

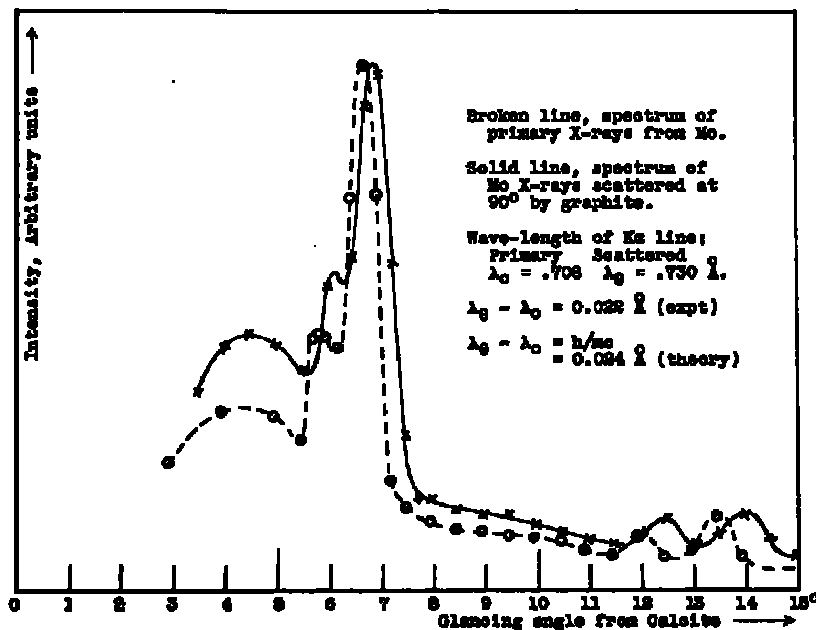
La parte dedicata al confronto sperimentale è composta da tre sezioni in cui confronta diversi aspetti previsti e quelli osservati del fenomeno:

1. *Wave-length of scattered rays*
2. *Velocity of recoil of the scattering electrons*
3. *Absorption of X-rays due to scattering*
4. *The relative intensity of the X-rays scattered in different directions with the primary beam*


Nella prima fa notare come la teoria preveda uno shift costante nella frequenza della radiazione secondaria indipendentemente da quella incidente e mostra come le osservazioni sperimentali confermino questi risultati pubblicando un grafo di una sua esperienza ancora inedita.

*[...] the experiments support the theory in showing a wave-length increase which seems independent of incident wave-length, and which also is of the proper order of magnitude.*

$$\lambda_s - \lambda_0 = 0.022 \text{ \AA} \quad (\text{experiment}) \quad \lambda_s - \lambda_0 = 0.0484 \sin^2 45^\circ \text{ \AA} \quad (\text{theory})$$



*Spectrum of molybdenum X-rays scattered by graphite, compared with the spectrum of the primary X-rays, showing an increase in wave-length on scattering.*



Per quanto riguarda gli elettroni di rinculo si limita a far notare che ancora non vi sono esperimenti che li abbiano individuati come tali e mostra quale potrebbe essere una favorevole linea di studio per verificarne direttamente la presenza:

*I have pointed out elsewhere, however, that there is good reason for believing that most of the secondary  $\beta$ -rays excited in light elements by the action of  $\gamma$ -rays are such recoil electrons.*


Nella terza sessione propone il confronto fra il coefficiente di assorbimento specifico (per massa) calcolato con la teoria classica di Thomson, costante a tutte le lunghezze d'onda, quello derivato dall'assunzione dell'ipotesi quantistica e infine i valori misurati.


Rileva che tale previsione è molto ben verificata per piccole lunghezze d'onda:

*For wave-lengths less than  $0.5 \text{ \AA}$ , where the test is more significant, the agreement is perhaps within the experimental error. Experiments by Owen, Crowther and Barkla and Ayers show that at about  $0.5 \text{ \AA}$  the "excess scattering" begins to be appreciable, increasing rapidly in importance at the longer wave-lengths.*

Infine conclude mostrando, usando il principio di corrispondenza, che la sua teoria quantistica tende per un'opportuno limite a coincidere con quella classica là dove questa è in accordo con gli esperimenti:

*It is well known that for soft X-rays [...] the total scattering is in accord with Thomson's formula. This is in agreement with present theory, according to which the true scattering coefficient approaches Thomson's value when frequency becomes small.*





Nella quarta ed ultima sezione affronta alcuni risultati sperimentali che non sono in buon accordo con la teoria proposta.

*Our equations predicts a concentration of the energy in the forward direction. A large number of experiments on the scattering of X-rays have shown that, [...], the ionization due to the scattered beam is symmetrical on the emergence and incidences sides of scattering plate.*

Il fatto interessante è che propone un'interpretazione di questi risultati, che nominalmente ritiene attendibili, in una forma che avrebbe già potuto essere prevista perché ve era indizio nelle misure sperimentali

*It will remember, however, that our theory, and experiment also, indicates a difference in the wave-length of the X-rays scattered in different directions.*

e perché la formula di assorbimento nei gas (e ionizzazione) dei raggi X era già nota:

*The part of the absorption which results in ionization is however proportional to  $\lambda^3$*

Evidentemente poiché ci si aspettava delle misure simmetriche e tali misure lo erano in buona parte (fatta eccezione per i piccoli angoli) non si è indagato sul fatto che tale simmetria dipendesse, piuttosto che dal fenomeno, da un errore sistematico di misura:

*That is, to a first approximation, the ionization should be the same as that on the classical theory, though the energy in scattered beam is less.*

Ovviamente però non tutto poteva corrispondere per via di un errore sistematico (per piccole  $\lambda$  come nei raggi  $\gamma$ ).