

RADIASI BENDA HITAM, EFEK FOTOLISTRIK, DAN EFEK COMPTON



OLEH:

KOMANG SUARDIKA (0913021034)

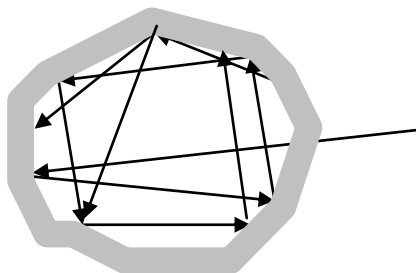


**JURUSAN PENDIDIKAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS PENDIDIKAN GANESHA
SINGARAJA
2012**

RADIASI BENDA HITAM

Salah satu penyebab lahirnya fisika kuantum adalah ditemukannya beberapa gejala pada radiasi benda hitam. Gejala radiasi benda hitam sangat berkaitan dengan radiasi termal. Radiasi termal adalah radiasi yang dipancarkan oleh suatu benda akibat temperaturnya. Setiap benda selalu memancarkan radiasi termal ke lingkungannya dan bersamaan itu juga menyerap radiasi termal dari lingkungannya. Laju pemancaran dan penyerapan tersebut tak harus sama. Jika mula-mula temperatur benda lebih tinggi daripada temperatur lingkungannya, laju pemancaran benda itu melebihi laju penyerapannya sehingga benda tersebut menjadi dingin. Jika sudah dicapai kesetimbangan termal dengan lingkungannya, laju pemancarannya selalu sama dengan laju penyerapannya. Radiasi termal pada umumnya terbentang dalam bentuk spektrum, yaitu terdiri atas sederetan gelombang dengan berbagai frekuensi, atau panjang gelombang. Spektrum tersebut dapat berupa spektrum kontinu atau spektrum garis. Spektrum yang dihasilkan oleh radiasi termal benda padat dan cair berupa spektrum kontinu, sedangkan yang dihasilkan oleh gas berupa spektrum garis. Selain itu, spektrum termal juga bergantung pada temperatur dan penyusun benda tetapi spektrum yang dihasilkan oleh benda hitam hanya bergantung pada temperatur artinya pada temperatur sama, semua benda hitam memancarkan radiasi termal dengan spektrum yang sama.

Benda hitam adalah benda yang dapat menyerap seluruh radiasi yang mengenainya. Ciri dari benda hitam yaitu terdapat lubang kecil di dinding benda berongga. Radiasi yang masuk ke rongga melalui lubang tidak dapat keluar lagi dengan segera karena ketika memasuki rongga, ia dipantulkan berkali-kali oleh dinding rongga sebelum akhirnya menemukan lubang dan lepas keluar.



Gambar 1

Lubang kecil di permukaan benda panas berongga menyerap semua radiasi yang mengenainya. Lubang berperilaku sebagai benda hitam.

Berdasarkan gambar di atas, dapat dinyatakan bahwa semakin kecil ukuran lubang semakin kecil pula peluang radiasi dapat keluar. Jika lubang dibuat sedemikian kecil sehingga seluruh radiasi yang masuk tidak dapat keluar lagi maka lubang tadi dikatakan menyerap seluruh radiasi yang mengenainya. Dengan demikian lubang tersebut berperilaku sebagai benda hitam. Jika radiasi ke luar melewatinya, asalnya dari dalam rongga itu sendiri, bukan dari pantulan. Untuk menghasilkan radiasi, dinding rongga dipanasi sehingga memancarkan radiasi ke dalam rongga. Radiasi ini selanjutnya lepas ke luar rongga melewati lubang. Karena lubang telah berperilaku sebagai benda hitam, maka radiasi yang melewatinya dapat digunakan sebagai sampel radiasi yang ideal. Rayleigh-Jeans mencoba menjelaskan peristiwa tersebut dengan teori fisika klasik namun mengalami kegagalan. Menurut Rayleigh-Jeans energi rata-rata tiap ragam gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh benda hitam adalah kontinu dan bergantung pada temperatur. Energi rata-rata tiap ragam tersebut dihitung berdasarkan statistika Boltzmann yang menyatakan bahwa sejumlah besar entitas fisis sejenis yang terbedakan dan berada pada kesetimbangan termal pada temperatur T, fraksi entitas fisis yang memiliki energi ε sebanding dengan faktor Boltzmann $\exp(-\varepsilon/k_B T)$. Berdasarkan statistika Boltzmann, energi rata-rata tiap ragam sebesar

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon P(\varepsilon) d\varepsilon}{\int_0^{\infty} P(\varepsilon) d\varepsilon} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon e^{-\varepsilon/k_B T} d\varepsilon}{\int_0^{\infty} e^{-\varepsilon/k_B T} d\varepsilon} \dots\dots\dots(1)$$

Dengan $P(\varepsilon)$ menyatakan fungsi distribusi Boltzmann $\frac{1}{k_B T} e^{-\varepsilon/k_B T}$

Integrasi persamaan (1) yaitu sebagai berikut.

Karena $\frac{d}{dT} e^{-\varepsilon/k_B T} = -\frac{\varepsilon}{k_B T^2} e^{-\varepsilon/k_B T}$ maka $\varepsilon e^{-\varepsilon/k_B T} = -k_B T^2 \frac{d}{dT} e^{-\varepsilon/k_B T}$ sehingga persamaan (1)

dapat ditulis sebagai berikut.

$$\langle \varepsilon \rangle = k_B T^2 \frac{\frac{d}{dT} \int_0^{\infty} e^{-\varepsilon/k_B T} d\varepsilon}{\int_0^{\infty} e^{-\varepsilon/k_B T} d\varepsilon} \dots\dots\dots(2)$$

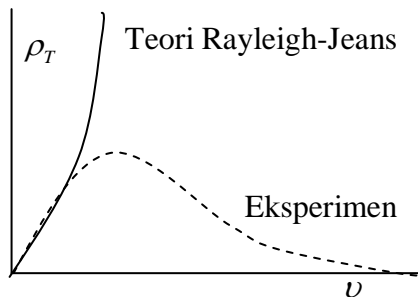
Selanjutnya, karena $\int_0^{\infty} e^{-\varepsilon/k_B T} d\varepsilon = k_B T$ maka persamaan (2) menjadi

$$\langle \varepsilon \rangle = k_B T^2 \frac{d(k_B T)}{d(k_B T)} = \frac{k_B^2 T^2}{k_B T} = k_B T \dots\dots\dots(3)$$

Proses perhitungan tersebut tidak sesuai dengan data eksperimen, khususnya pada frekuensi tinggi. Jika fungsi distribusi rapat energi spektral dilambangi $\rho_T(\nu)$ maka $\rho_T(\nu)d\nu$ menyatakan energi termal per satuan volume rongga yang bertemperatur T dan disumbangkan oleh komponen spektrum yang berfrekuensi dari $\nu + \nu+d\nu$. Jika nilai $\langle \varepsilon \rangle = k_B T$ disubstitusikan kepersamaan rapat energi spektrum $\rho_T(\nu)d\nu = \frac{N(\nu)}{V} \langle \varepsilon \rangle d\nu$,

dengan $N(\nu)d\nu = \frac{8\pi V}{c^3} \nu^2 d\nu$, maka $\rho_T(\nu)d\nu = \frac{8\pi k_B T}{c^3} \nu^2 d\nu \dots\dots\dots(4)$

Hasil tersebut tidak sesuai dengan data eksperimen. Data eksperimen menunjukkan bahwa untuk frekuensi sangat tinggi, $\rho_T(\nu)$ bernilai nol, sedangkan menurut teori Rayleigh dan Jeans, $\rho_T(\nu)$ bernilai tak berhingga.



Gambar 2
Kesesuaian teori Rayleigh-Jeans dengan data eksperimen hanya pada frekuensi rendah

Kegagalan Reyleigh-Jeans mengantarkan Planck untuk merumuskan teori yang benar. Planck mengajukan hipotesis bahwa energi tiap ragam tidaklah berupa sebarang nilai dari nol sampai tak berhingga, melainkan harus merupakan salah satu dari sederetan nilai diskrit yang terpisah secara seragam dengan interval $\Delta\varepsilon$. Jadi energi tiap ragam haruslah salah satu dari $0, \Delta\varepsilon, 2\Delta\varepsilon, 3\Delta\varepsilon, \dots, n\Delta\varepsilon$ dengan $n= 1,2,3, \dots$. Untuk menghasilkan energi rata-rata yang bergantung pada frekuensi maka $\Delta\varepsilon$ harus berbanding lurus terhadap ν . Kesebandingan ini dapat diubah menjadi kesamaan dengan mengajukan suatu besaran yang berdimensikan energi kali waktu sebagai faktor kesebandingannya. Jika tetapan kesebandingan itu di beri simbol h maka energi tiap ragam haruslah salah satu dari nilai

$$\varepsilon_n = nh\nu \quad n=0,1,2,3 \dots\dots\dots(5)$$

Karena energi tiap ragam tidak bersifat kontinu, maka perhitungan energi rata-rata dilakukan dengan penjumlahan biasa yaitu sebagai berikut.

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\sum_n \varepsilon_n e^{-\varepsilon_n/k_B T}}{\sum_n e^{-\varepsilon_n/k_B T}} = \frac{\sum_n nh\nu e^{-nh\nu/k_B T}}{\sum_n e^{-nh\nu/k_B T}} = k_B T \frac{\sum_n n\alpha e^{-n\alpha}}{\sum_n e^{-n\alpha}} \dots\dots\dots(6)$$

Dengan $\alpha \equiv h\nu/k_B T$. Karena $\frac{d}{d\alpha} e^{-n\alpha} = -ne^{-n\alpha}$, maka $n\alpha e^{-n\alpha} = -\alpha \frac{d}{d\alpha} e^{-n\alpha}$, maka

persamaan (6) menjadi: $\langle \varepsilon \rangle = k_B T^2 (-\alpha) \frac{\frac{d}{d\alpha} \sum_n e^{-n\alpha}}{\sum_n e^{-n\alpha}} = \dots\dots\dots(7)$

Dari hubungan $\sum_n e^{-n\alpha} = 1 + e^{-\alpha} + e^{-2\alpha} + e^{-3\alpha} + \dots$ dan $\frac{1}{1-e^{-\alpha}} = 1 + e^{-\alpha} + e^{-2\alpha} + \dots$,

diperoleh hubungan

$$\sum_n e^{-n\alpha} = \frac{1}{1-e^{-\alpha}} \dots\dots\dots(8)$$

$$\frac{d}{d\alpha} \sum_n e^{-n\alpha} = \frac{d}{d\alpha} \left(\frac{1}{1-e^{-\alpha}} \right) = -\frac{e^{-\alpha}}{(1-e^{-\alpha})^2} \dots\dots\dots(9)$$

Substitusi persamaan (8) dan (9) ke persamaan (7) sehingga diperoleh

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\alpha k_B T}{e^{\alpha} - 1} \dots\dots\dots(10)$$

Karena $\alpha = h\nu/k_B T$, maka $\langle \varepsilon \rangle = \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1} \dots\dots\dots(11)$

Dari perhitungan di atas dapat diamati nilai limit $\langle \varepsilon \rangle$ pada $\nu \rightarrow \infty$ dan pada $\nu \rightarrow 0$ dengan menggunakan kaidah L'Hospital sebagai berikut.

$$\lim_{\nu \rightarrow 0} \langle \varepsilon \rangle = \lim_{\nu \rightarrow 0} \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1} = \lim_{\nu \rightarrow 0} \frac{h}{\left(\frac{h}{k_B T} \right) e^{h\nu/k_B T}} = k_B T, \text{ dan}$$

$$\lim_{\nu \rightarrow \infty} \langle \varepsilon \rangle = \lim_{\nu \rightarrow \infty} \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1} = \lim_{\nu \rightarrow \infty} \frac{h}{\left(\frac{h}{k_B T} \right) e^{h\nu/k_B T}} = \frac{k_B T}{\infty} = 0$$

Berdasarkan perhitungan tersebut, maka rumusan nilai energi rata-rata tiap ragam gelombang tadi memenuhi harapan Planck, yaitu pada frekuensi rendah bernilai $k_B T$ dan pada frekuensi tinggi bernilai nol. Selanjutnya substitusi persamaan (10) ke dalam

$\rho_T(\nu)d\nu = \frac{N(\nu)}{V} \langle \epsilon \rangle d\nu$ diperoleh rapat energi persatuan volume rongga pada temperatur T yang dihasilkan oleh ragam gelombang yang berfrekuensi antara $\nu + d\nu$ sebagai berikut.

$$\rho_T(\nu)d\nu = \frac{8\pi}{c^3} \nu^2 \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1} d\nu \dots\dots\dots(12)$$

Persamaan (12) menunjukkan bahwa pada temperatur T tertentu, rapat energi radiasi menuju nol jika frekuensinya menuju tak hingga. Ini sesuai dengan data eksperimen. Kesesuaian dengan seluruh data eksperimen dilakukan dengan memilih nilai h yang besarnya $h = 6,634 \times 10^{-34}$ yang sering disebut tetapan Planck.

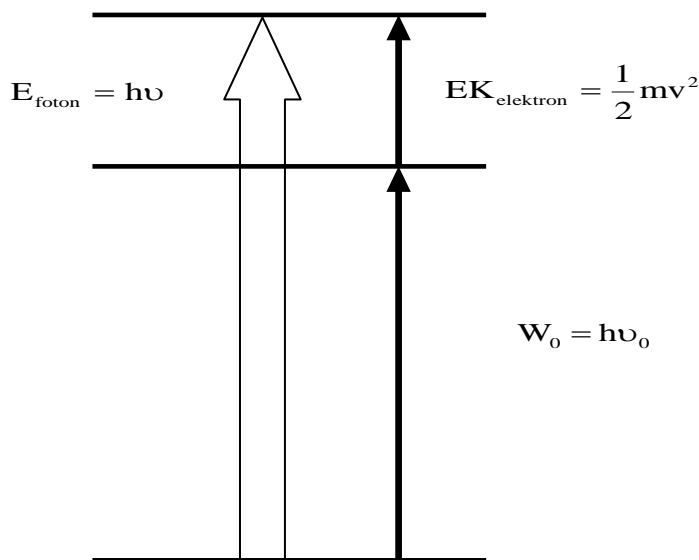
Jika dinyatakan dalam λ melalui hubungan $c = \lambda\nu$, maka diperoleh

$$\rho_T(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi ch}{\lambda^5} \nu^2 \frac{d\lambda}{e^{hc/(\lambda k_B T)} - 1}$$

EFEK FOTOLISTRIK

Efek fotolistrik adalah keluarnya elektron-elektron dari permukaan logam ketika logam tersebut dikenai seberkas cahaya. Elektron yang keluar disebut *elektron foto*. Efek fotolistrik ditemukan pertama kali oleh *Hertz*. Efek ini tidak dapat dijelaskan jika cahaya dipandang sebagai gelombang. Efek ini berhasil dijelaskan dengan baik oleh *Einstein* pada tahun 1905 dengan memandang cahaya sebagai *paket-paket energi* yang disebut dengan *foton*, seperti yang dikemukakan oleh teori Planck. Jika berkas cahaya yang mengenai permukaan logam memiliki frekuensi ν maka energi tiap foton cahaya adalah $h\nu$. Elektron-elektron di dekat permukaan logam terikat dalam struktur atom. Besar energi ikatan ini bergantung pada jenis logam, dan disebut sebagai *energi ambang* atau *fungsi kerja logam* (diberi notasi W_0). Sebagai contoh, energi ambang logam seng adalah 4,31 eV dan logam aluminium adalah 4,08 eV. Jika energi $h\nu$ dari foton cahaya datang *lebih kecil* daripada energi ambang logam ($h\nu < W_0$) maka elektron-elektron tidak akan keluar dari permukaan logam, berapapun intensitas cahaya yang diberikan. Tetapi dengan mengganti dengan cahaya yang frekuensinya lebih tinggi atau mengganti dengan logam yang energi ambangnya lebih kecil, sedemikian sehingga energi foton *lebih besar* daripada energi ambang ($h\nu > W_0$) akan menyebabkan elektron-elektron keluar dari permukaan logam walaupun intensitas cahaya kecil. Jika $h\nu > W_0$ barulah *intensitas cahaya akan menentukan*

jumlah elektron yang keluar dari permukaan logam. Makin besar intensitas cahaya makin banyak foton yang bertumbukan dengan elektron-elektron dekat permukaan. Sebagai hasilnya makin banyak elektron yang keluar dari permukaan logam. Satu foton hanya dapat mengeluarkan satu elektron. Untuk elektron yang sangat dekat dengan permukaan logam maka begitu elektron itu bebas dari ikatannya, elektron bebas ini segera keluar dengan keadaan seperti ini memiliki *energi kinetik maksimum*. Besar energi kinetik maksimum (diberi lambang E_{km}) sama dengan selisih antara energi foton $h\nu$ dengan energi ambang W_0 , seperti ditunjukkan pada diagram energi dalam efek fotolistrik berikut.



Berdasarkan gambar di atas, maka persamaan-persamaan yang berlaku pada efek fotolistrik adalah sebagai berikut.

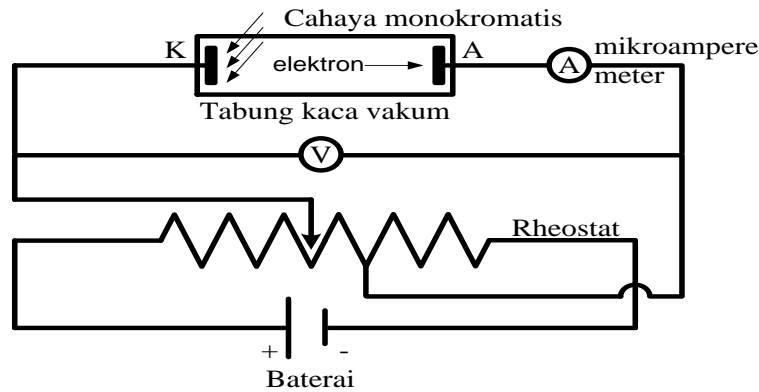
$$E_{km} = h\nu - W_0$$

$$\frac{1}{2}mv_m^2 = h\nu - h\nu_0$$

$$\frac{1}{2}mv_m^2 = h\frac{c}{\lambda} - h\frac{c}{\lambda_0}$$

Dengan m = massa elektron (kg), v_m = kelajuan maksimum elektron keluar dari permukaan (m/s), ν = frekuensi foton cahaya (Hz), λ = panjang gelombang foton (m), ν_0 = frekuensi ambang logam, λ_0 = panjang gelombang ambang logam.

Untuk mengukur efek fotolistrik secara kuantitatif digunakan alat yang disebut *sel fotolistrik*, yaitu merupakan sebuah tabung hampa udara, seperti ditunjukkan pada gambar berikut.

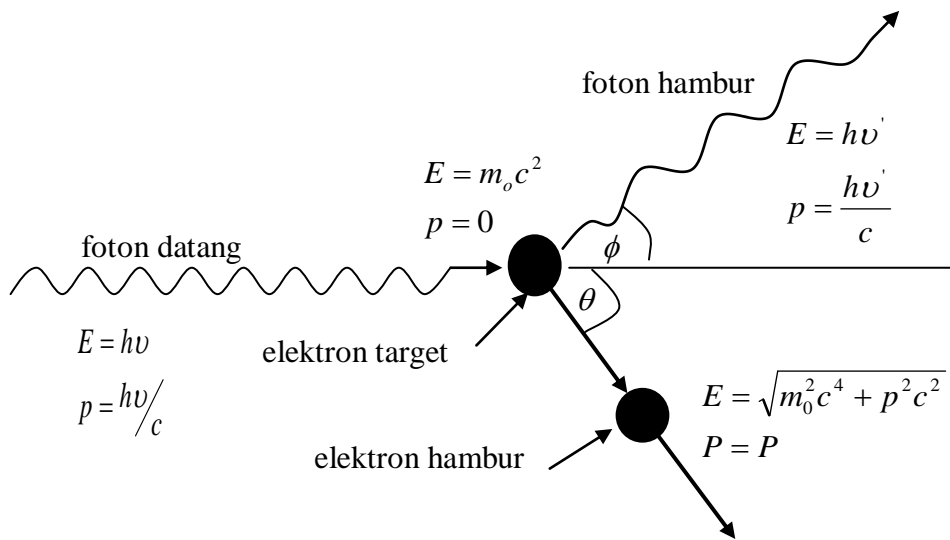


Gambar rangkaian eksperimen untuk mengukur energi kinetik maksimum elektron foto.

Di dalam tabung dipasang katode dari lempeng logam yang akan diselidiki efek fotolistriknnya dan anode berupa batang kawat. Dalam hubungan biasa, katode dihubungkan ke kutub negatif dan anode ke kutub positif baterai. Dalam hubungan seperti ini, elektron-elektron yang keluar dari katode dengan mudah diserap oleh anode. Elektron-elektron yang keluar dari katode bermuatan negatif sedangkan anode kawat bermuatan positif sehingga elektron bebas ditarik oleh anode. Untuk mengukur energi kinetik maksimum E_{K_m} elektron foto, dihubungkan ke kutub-kutub baterai dibalik dari biasanya, yaitu katode dihubungkan ke kutub positif dan anode ke kutub negatif. Hubungan seperti ini menyebabkan elektron foto yang telah keluar dari permukaan katode didorong kembali ke katode, elektron bermuatan negatif dan anode juga bermuatan negatif sehingga elektron foto ditolak oleh anode karena keduanya bermuatan sejenis. Hanya elektron foto dengan energi kinetik tertentu yang dapat mencapai anode. Dengan mengatur tegangan negatif antara anode dan katode dengan menggeser-geser kontak Rheostat dapat diusahakan elektron foto dengan energi kinetik paling besarpun hanya bisa mencapai tempat yang dekat sekali dengan anode dan berhenti di sana. Dalam keadaan ini tegangan antara anode dan katode disebut *tegangan penghenti* (diberi lambang V_0). Keadaan ini dapat dideteksi dari arus pada mikroamperemeter A turun tepat menunjukkan nol. Dengan demikian energi kinetik maksimum elektron foto adalah sama dengan energi potensial listrik yaitu sebesar $E_{K_m} = eV_0$. Dengan $e =$ muatan 1 elektron $= 1,6 \times 10^{-19}$ C dan V_0 (dalam volt) disebut *potensial henti* (stopping potential).

EFEK COMPTON

Pada tahun 1923 A.H. Compton melakukan eksperimen dengan mengamati hamburan sinar-x oleh suatu bahan grafit, ketika ia menembakkan sinar-x monokromatik pada grafit tersebut, dan ditemukan bahwa sinar-x yang terhambur mempunyai panjang gelombang lebih besar dari sinar-x aslinya. Compton menyimpulkan bahwa efek ini dapat dipahami sebagai benturan antar foton-foton dengan elektron-elektron, dengan foton berperilaku sebagai partikel.



Gambar di atas menunjukkan foto sinar-X menumbuk elektron yang mula-mula dalam keadaan diam terhadap sistem koordinat laboratorium dan kemudian mengalami hamburan dari arahnya semula sedangkan elektronnya menerima impuls dan mulai bergerak. Itulah eksperimen yang dilakukan oleh Compton dengan mendalilkan bahwa sinar x yang masuk bukanlah sebuah gelombang tetapi merupakan kumpulan foton yang berenergi $E = h\nu$ dan bahwa foton-foton ini mengalami tumbukan yang menyerupai tumbukan bola bilyard dengan elektron-elektron bebas di dalam blok penghambur tersebut. Dalam tumbukan ini foton dapat dipandang sebagai partikel yang kehilangan sejumlah energi yang besarnya sama dengan energi kinetik K yang diterima oleh elektron, walaupun sebenarnya kita mengamati dua foton yang berbeda. Jika foton yang semula mempunyai frekuensi ν , maka foton hambur mempunyai frekuensi yang lebih rendah yakni ν' , sehingga:

Kehilangan energi foton = Energi yang diterima elektron

$$h\nu - h\nu' = K \tag{a}$$

momentum partikel tak bermassa berkaitan dengan energi menurut rumus

$$E = pc \quad (b)$$

Sehingga momentumnya adalah

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} \quad (c)$$

Di mana energi fotonnya adalah $h\nu$.

Momentum tidak seperti energi, tetapi merupakan kuantitas vektor yang mempunyai arah dan besaran. Dalam tumbukan, momentum harus kekal dalam masing-masing sumbu dari kedua sumbu yang saling tegak lurus. (Bila lebih dari dua benda yang bertumbukan, tentu saja momentum harus kekal pada masing-masing sumbu dari ketiga sumbu yang saling tegak lurus). Arah yang dipilih di sini ialah arah foton semula dan satu lagi tegak lurus pada bidang yang mengandung elektron dan foton hambur.

Momentum foton semula ialah $\frac{h\nu}{c}$, momentum foton hambur ialah $\frac{h\nu'}{c}$, dan

momentum elektron awal, momentum elektron akhir secara berturut-turut adalah 0 dan p .

Dalam arah foton semula,

Momentum awal = momentum akhir

$$\frac{h\nu}{c} + 0 = \frac{h\nu'}{c} \cos \phi + p \cos \theta \quad (d)$$

Dan tegak lurus pada arah ini.

Momentum awal = momentum akhir

$$0 = \frac{h\nu'}{c} \sin \phi - p \sin \theta \quad (e)$$

Sudut ϕ menyatakan sudut antara arah mula-mula dan arah foton hambur, dan θ adalah sudut antara arah foton mula dan arah elektron yang tertumbuk.

Untuk mencari perubahan panjang gelombang sebagai fungsi sudut hambur, dapat dilakukan dengan mengalikan persamaan (d) dan (e) dengan c dan menuliskannya kembali sebagai berikut:

$$pc \cos \theta = h\nu - h\nu' \cos \phi$$

$$pc \sin \theta = h\nu' \sin \phi$$

Dengan mengkuadratkan masing-masing persamaan ini dan menambahkannya, sudut θ dapat dieliminasi, sehingga persamaannya menjadi

$$p^2 c^2 = (h\nu)^2 - 2(h\nu)(h\nu') \cos \phi + (h\nu')^2 \quad (f)$$

Kemudian samakan kedua rumus untuk energi total partikel

$$E = K + m_0 c^2$$

$$E = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}$$

Sehingga persamaan di atas menjadi:

$$(K + m_0 c^2)^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2$$

$$p^2 c^2 = K^2 + 2m_0 c^2 K$$

Karena $K = h\nu - h\nu'$

$$\text{maka } p^2 c^2 = (h\nu)^2 - 2(h\nu)(h\nu') + (h\nu')^2 + 2m_0 c^2 (h\nu - h\nu') \quad (\text{g})$$

Substitusikan harga untuk $p^2 c^2$ ini dalam persamaan (f), akhirnya diperoleh

$$2m_0 c^2 (h\nu - h\nu') = 2(h\nu)(h\nu')(1 - \cos \phi) \quad (\text{h})$$

Hubungan ini akan lebih sederhana jika dinyatakan dalam panjang gelombang sebagai pengganti frekuensi. Persamaan (h) dibagi dengan $2h^2 c^2$,

$$\frac{m_0 c}{h} \left(\frac{\nu}{c} - \frac{\nu'}{c} \right) = \frac{\nu \nu'}{c^2} (1 - \cos \phi), \text{ Karena } \frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda} \text{ dan } \frac{\nu'}{c} = \frac{1}{\lambda'}, \text{ maka:}$$

$$\frac{m_0 c}{h} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'} \right) = \frac{1 - \cos \phi}{\lambda \lambda'}$$

Jadi efek Compton dirumuskan sebagai berikut:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \phi) \quad (\text{i})$$

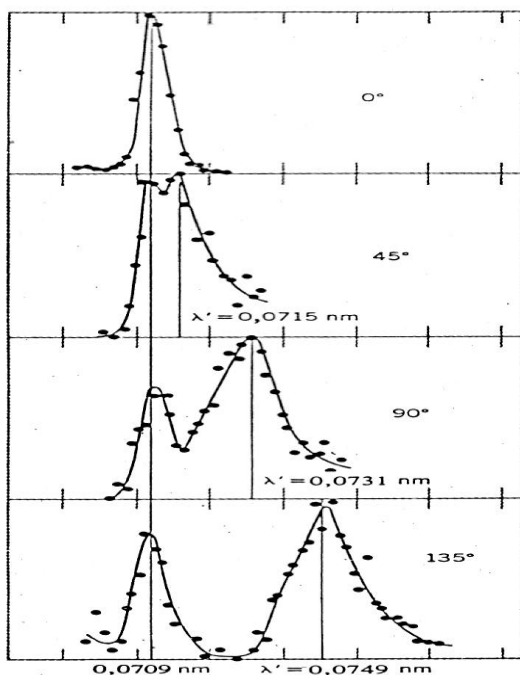
Gejala ini menunjukkan bukti kuat yang mendukung teori kuantum radiasi, di mana memberikan perubahan panjang gelombang yang diharapkan terjadi untuk foton yang terhambur dengan sudut ϕ oleh partikel yang bermassa diam m_0 , dan perbedaan ini tidak bergantung dari panjang gelombang foton datang λ . Panjang gelombang Compton dirumuskan $\lambda_c = \frac{h}{m_0 c}$

$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} \quad (\text{j})$$

λ_c disebut panjang gelombang Compton dari partikel terhambur. Untuk elektron besarnya adalah $\lambda_c = 2,426 \times 10^{-12} \text{ m}$, dengan $2,426 \text{ pm}$ ($1 \text{ pm} = 1 \text{ picometer} = 10^{-12} \text{ m}$). Dalam λ_c persamaan (j) menjadi $\lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \phi)$ (k)

Dari persamaan ini dapat dilihat bahwa perubahan panjang gelombang terbesar yang dapat terjadi ialah pada $\phi = 180^\circ$, ketika itu perubahan panjang gelombang menjadi dua kali panjang gelombang Compton λ_c . Karena panjang gelombang Compton untuk elektron ialah $\lambda_c = 2,426 \text{ pm}$, dan lebih kecil lagi untuk partikel yang lain karena massanya

lebih besar, maka perubahan panjang gelombang maksimum dalam efek Compton adalah 4,852 pm. Perubahan sebesar itu atau lebih kecil lagi hanya bisa teramati untuk sinar-X karena pergeseran panjang gelombang cahaya tampak kurang dari 0,01 persen dari panjang gelombang awal sedangkan untuk sinar-X dengan $\lambda = 0,1 \text{ nm}$, besaran itu menjadi beberapa persen. Pergeseran panjang gelombang ini hanya bergantung pada sudut hamburan ϕ , dan tak bergantung dari energi foton yang datang. Compton membuktikan hubungan teoritisnya ini secara eksperimen melalui hamburan sinar-X ($\lambda = 0,7 \text{ \AA}$) dari bahan grafit. Energi sinar-X ($1,8 \times 10^4 \text{ eV}$) adalah beberapa orde lebih besar dari pada energi ikat elektron-elektron karbon terluar, sehingga dengan memperlakukan elektron-elektron ini sebagai partikel bebas merupakan suatu hampiran yang baik. Berikut adalah hasil eksperimennya yang menunjukkan pergeseran panjang gelombang sebagai berikut:



Dari hasil eksperimen dapat diketahui bahwa hasil eksperimen Compton menunjukkan pergeseran panjang gelombang yang diramalkan seperti pada persamaan berikut

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \phi),$$

dari persamaan ini dianggap bahwa partikel hambur dapat

bergerak bebas, karena banyak elektron dalam materi terikat lemah pada atom induknya. Namun ada elektron lainnya yang terikat kuat dan jika elektron ini ditumbuk oleh sebuah foton seluruh atom bergerak, bukan hanya elektron tunggalnya. Dalam kejadian seperti ini besarnya m_0 yang digunakan pada persamaan di atas ialah massa seluruh atom yang besarnya beberapa puluh ribu kali besar dari massa elektron, sehingga hasil pergeseran Comptonnya sedemikian kecil sehingga tidak terdeteksi.

DAFTAR PUSTAKA

Beiser, A.1992.*Konsep Fisika Modern*. Edisi ke-4, cetakan ke-2. Jakarta: Erlangga.

Halliday, Resnick. 1999. *Fisika Jilid 2*. Edisi ke-3. Jakarta: Erlangga

Kusminarto.1992.*Poko-Pokok Fisika Modern*. Yogyakarta: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Gadjah Mada.

Sutopo. 2003. *Pengantar Fisika Kunatum*. Malang: Universitas Negeri Malang.

http://id.wikipedia.org/wiki/Benda_hitam

<http://www.indonesiaindonesia.com/f/2542-benda-hitam>

<http://doni-electric.blogspot.com/2008/01/efek-foto-listrik.html>