

# MODUL 1

## GEJALA KUANTUM

### PENDAHULUAN

Modul ini merupakan modul pertama dari mata kuliah Fisika Kuantum yang menjelaskan tentang gejala kuantum termasuk konsep radiasi benda hitam, efek fotolistrik, efek Compton, hipotesis de Broglie, difraksi elektron, teori atom Bohr. Dengan mempelajari modul ini Anda tidak hanya memperluas pemahaman kita tentang alam semesta, tetapi juga membuka pintu untuk inovasi teknologi yang dapat mengubah berbagai aspek kehidupan kita. Meskipun konsepnya mungkin terasa abstrak dan kompleks, dampaknya pada dunia nyata sangat signifikan dan terus berkembang. Gejala kuantum merujuk pada fenomena yang terjadi pada skala atom dan subatom yang tidak dapat dijelaskan oleh fisika klasik. Fenomena-fenomena ini menjadi dasar dari mekanika kuantum, sebuah teori fundamental dalam fisika modern.

Radiasi benda hitam adalah radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh benda hitam sempurna - sebuah objek teoritis yang menyerap semua radiasi elektromagnetik yang jatuh padanya, tanpa memantulkan apa pun. Meskipun benda hitam sempurna tidak ada dalam kenyataan, konsep ini sangat penting dalam fisika dan memiliki banyak aplikasi praktis.

Pada kegiatan belajar ini akan kita pelajari bagaimana konsep gejala kuantum seperti radiasi benda hitam, efek foto listrik, efek Compton, hipotesis de Broglie, difraksi elektron, teori atom Bohr. Dalam modul ini, akan disajikan dua kegiatan belajar, yaitu:

1. Kegiatan Belajar 1 : Radiasi Benda Hitam, Efek Fotolistrik, efek Compton
2. Kegiatan Belajar 2 : Hipotesis de Broglie, Difraksi Elektron, Teori Atom Bohr

Setelah mempelajari modul ini Anda diharapkan memiliki kompetensi Mampu menelaah dan mengaplikasikan konsep gejala kuantum termasuk radiasi benda hitam, efek fotolistrik, menganalisis efek Compton, hipotesis de Broglie, difraksi elektron serta teori atom Bohr secara mandiri. Secara lebih khusus lagi, Anda diharapkan dapat:

1. Menelaah dan mengaplikasikan konsep gejala kuantum tentang radiasi benda hitam
2. Menelaah dan mengaplikasikan konsep gejala kuantum tentang efek fotolistrik
3. Menganalisis konsep efek Compton.

4. Menganalisis hipotesis de Broglie
5. Menganalisis konsep difraksi elektron
6. Menganalisis teori atom Bohr

Agar Anda memperoleh hasil yang maksimal dalam mempelajari modul ini, ikuti petunjuk pembelajaran berikut ini.

1. Sebelum membaca materi in yang mau dipelajari, bacalah bagian Pendahuluan modul ini, sampai Anda memahami betul apa, untuk apa, dan bagaimana mempelajari modul ini.
2. Bacalah bagian demi bagian, temukan kata-kata kunci dan kata-kata yang Anda anggap baru.
3. Carilah dan baca pengertian kata-kata tersebut dalam daftar kata-kata sulit dalam modul ini atau dalam kamus yang ada.
4. Tangkaplah pengertian demi pengertian dari isi modul ini melalui pemahaman sendiri, tukar pikiran dengan sesama mahasiswa, dan dosen Anda.
5. Mantapkan pemahanan Anda melalui diskusi dengan sesama teman mahasiswa.

## Kegiatan Belajar 1

### Gejala Kuantum

Pernahkan anda mendengar Pemeriksaan Sinar-X atau yang lebih umum dikenal dengan Rontgen dan airport scanner/mesin x-ray? Rontgen dan airport scanner merupakan Salah satu peralatan yang berkaitan dengan kuantisasi radiasi elektromagnetik, seperti halnya efek fotolistrik.



Gb. 1.1 Pemanfaatan efek fotolistrik

Pemeriksaan Sinar-X atau Rontgen banyak digunakan di Rumah sakit untuk mengambil Pencitraan X-ray gambar bagian dalam tubuh. Gambar yang dihasilkan berupa gambar nuansa hitam dan putih. Gambar hitam putih ini dihasilkan karena jaringan-jaringan tubuh menyerap jumlah radiasi yang berbeda. Misalnya, kalsium dalam tubuh menyerap sinar-X paling banyak, sehingga tulang tampak putih. Sementara lemak dan jaringan lunak lainnya menyerap lebih sedikit, sehingga terlihat abu-abu.

Adapun airport scanner/mesin x-ray merupakan alat yang fungsinya mendeteksi secara visual semua barang bawaan penumpang pesawat udara yang dapat membahayakan keselamatan penumpang lainnya. Security system atau x-ray security scanner dapat mendeteksi barang bawaan tanpa harus mengeluarkan isinya

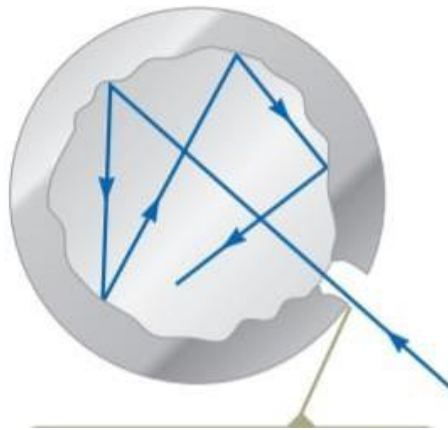
Penerapan lainnya dari fisika kuantum antara lain yaitu pengisian suara (dubbing film), fotosel, mikroskop elektron dan lain-lain. Pengisian suara (dubbing) film direkam dalam bentuk sinyal optik disepanjang pinggiran keping film. Pada saat film diputar, sinyal ini dibaca kembali melalui proses efek fotolistrik (cahaya menyinari jalur suara dan kemudian ke fotosel), fotosel membangkitkan arus listrik yang sebanding dengan intensitas cahaya yang datang padanya. Sinyal listrik ini diperkuat sehingga dihasilkan film bersuara.

#### A. Radiasi Benda Hitam

Panas (kalor) dari matahari sampai ke bumi melalui gelombang elektromagnetik. Perpindahan ini disebut radiasi, yang dapat berlangsung dalam ruang hampa. Radiasi yang dipancarkan oleh sebuah benda sebagai akibat suhunya disebut radiasi panas (thermal radiation).

Setiap benda secara kontinu memancarkan radiasi panas dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Bahkan sebuah kubus es pun memancarkan radiasi panas, sebagian kecil dari radiasi panas ini ada dalam daerah cahaya tampak. Walaupun demikian kubus es ini tak dapat dilihat dalam ruang gelap. Serupa dengan kubus es, badan manusia pun memancarkan radiasi panas dalam daerah cahaya tampak, tetapi intensitasnya tidak cukup kuat untuk dapat dilihat dalam ruang gelap.

Setiap benda memancarkan radiasi panas, tetapi umumnya benda terlihat oleh kita karena benda itu memantulkan cahaya yang datang padanya, bukan karena ia memancarkan radiasi panas. Benda baru terlihat karena meradiasikan panas jika suhunya melebihi 1000 K. Pada suhu ini benda mulai berpijar merah seperti kumparan pemanas sebuah kompor listrik. Pada suhu di atas 2000 K benda berpijar kuning atau keputih-putihan, seperti besi berpijar putih atau pijar putih dari filamen lampu pijar. Begitu suhu benda terus ditingkatkan, intensitas relatif dari spectrum cahaya yang dipancarkannya berubah. Ini menyebabkan pergeseran dalam warna- warna spektrum yang diamati, yang dapat digunakan untuk menaksir suhu suatu benda.



Gb. 1.2 Model penyerapan radiasi pada benda hitam

Secara umum bentuk terinci dari spectrum radiasi panas yang dipancarkan oleh suatu benda panas bergantung pada komposisi benda itu. Meskipun demikian hasil eksperimen menunjukkan bahwa ada satu kelas benda panas yang memancarkan spectra panas dengan kalor yang universal. Radiasi benda hitam adalah fenomena fisika di mana suatu benda ideal yang menyerap semua radiasi elektromagnetik yang jatuh ke permukaannya (tanpa memantulkan atau menembus) memancarkan radiasi dalam spektrum tertentu yang hanya bergantung pada suhu benda tersebut. Benda seperti itu disebut "benda hitam" (black body). Benda hitam adalah suatu benda yang permukaannya

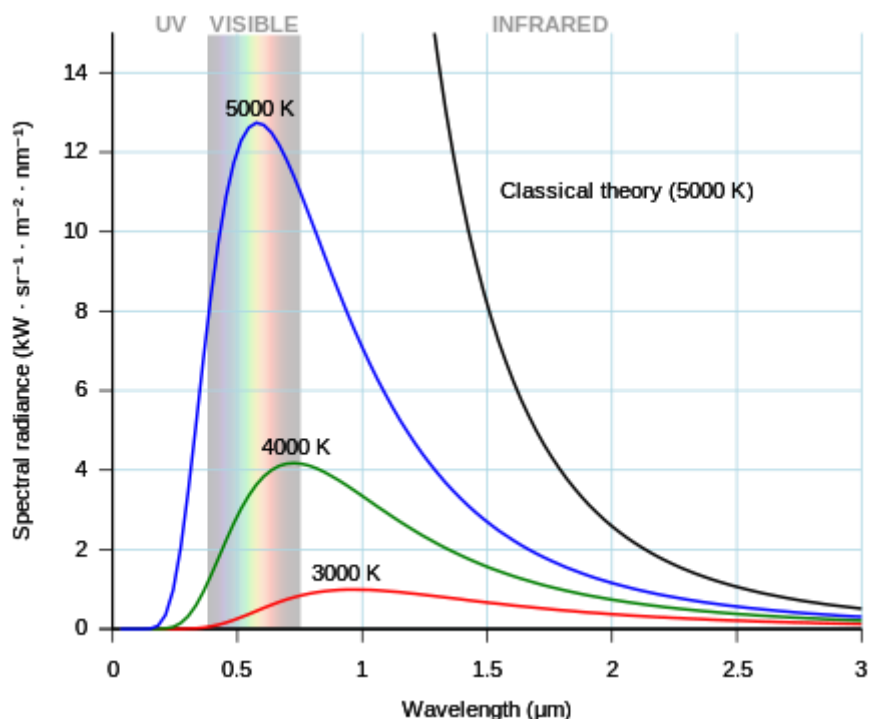
sedemikian sehingga menyerap semua radiasi yang datang padanya (tidak ada radiasi yang dipantulkan keluar dari benda hitam). Dari pengamatan diperoleh bahwa semua benda hitam pada suhu yang sama memancarkan radiasi dengan spektrum yang sama.

Tidak ada benda yang hitam sempurna. Kita hanya dapat membuat benda yang mendekati benda hitam. Ketika radiasi dari cahaya matahari memasuki lubang kotak, radiasi dipantulkan berulang-ulang (beberapa kali) oleh dinding kotak dan setelah pemantulan ini hamoir dapat dikatakan tidak ada lagi radiasi yang tersisa (semua radiasi telah diserap di dalam kotak) dengan kata lain, lubang telah berfungsi menyerap semua radiasi yang datang padanya. Akibatnya benda tampak hitam.

Terkait dengan radiasi benda hitam, terdapat beberapa teori dan hukum seperti teori Plack, Hukum Stefan-Boltzmann dan Hukum Pergeseran Wien.

### 1. Teori Planck

Hukum Planck menjelaskan rapat spektrum radiasi elektromagnetik yang dilepas benda hitam dalam kesetimbangan termal pada temperatur T. Hukum ini mengambil namanya dari Max Planck yang mengusulkannya tahun 1900. Hukum ini adalah pionit bagi fisika modern dan mekanika kuantum.



Gb. 1.3 Hukum Planck (kurva berwarna) secara akurat menjelaskan radiasi benda hitam dan menyelesaikan teori klasik (kurva hitam)

Radiansi spektrum suatu benda,  $B_\nu$ , menjelaskan seberapa banyak energi yang dilepas sebagai radiasi pada beberapa frekuensi. Radiansi diukur dalam daya yang dilepas per satuan luas benda, per satuan solid angle dimana radiasi diukur, per satuan frekuensi. Planck menunjukkan bahwa radiansi spektral benda pada temperatur absolut  $T$  dirumuskan dengan  $k_B$  adalah konstanta Boltzmann,  $h$  adalah konstanta Planck, dan  $c$  adalah laju cahaya pada medium, apakah material atau hampa udara. Radiasi spektral juga dapat diukur per satuan panjang gelombang. Pada kasus ini, dirumuskan dengan:

$$B_\nu(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

Dimana:

$h$  adalah konstanta Planck;

$c$  adalah kecepatan cahaya dalam ruang hampa;

$k$  adalah konstanta Boltzmann;

$\nu$  adalah frekuensi radiasi elektromagnetik;

$T$  adalah temperatur absolut benda.

Hukum ini juga dapat dinyatakan dalam istilah lainnya, seperti jumlah foton yang dilepas pada panjang gelombang tertentu, atau rapat energi dalam volume radiasi. Satuan SI dari  $B_\nu$  adalah  $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1}$ , sedangkan satuan  $B_\lambda$  adalah  $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ . Pada batasan frekuensi rendah (panjang gelombang tinggi), Hukum Planck cenderung ke Hukum Rayleigh–Jeans, sedangkan pada batasan frekuensi tinggi (panjang gelombang pendek), lebih cenderung ke perkiraan Wien.

Max Planck mengembangkan hukum ini tahun 1900 dengan konstanta yang ditentukan empiris, nantinya menunjukkan bahwa, dinyatakan sebagai distribusi energi stabil untuk radiasi dalam kesetimbangan termodinamika. Sebagai distribusi energi, hukum ini merupakan salah satu kelompok distribusi kesetimbangan termal yang diantaranya termasuk distribusi Bose–Einstein, distribusi Fermi–Dirac dan distribusi Maxwell–Boltzmann.

## 2. Hukum Stefan-Boltzmann

Hukum Stefan–Boltzmann menyatakan bahwa daya yang dilepas per satuan luas dari permukaan benda hitam adalah berbanding lurus dengan pangkat empat suhu absolutnya:

$$j^* = \sigma T^4$$

dengan  $j^*$  adalah total daya yang diradiasikan per satuan luas,  $T$  adalah temperatur absolut dan  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  adalah konstanta Stefan-Boltzmann. Hal ini didapat dengan mengintegrasikan  $I(\nu, T)$  terhadap frekuensi dan solid angle:

$$j^* = \int_0^\infty d\nu \int d\Omega \cos \theta \cdot I(\nu, T)$$

Faktor  $\cos \theta$  muncul karena kita menganggap radiasi pada arah normal ke permukaan.:

$$\int d\Omega \cos \theta = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} d\theta \sin \theta \cos \theta = \pi.$$

$I(\nu, T)$  independen terhadap sudut dan melewati integral solid angle. Masukkan rumus  $I(\nu, T)$  menghasilkan

$$j^* = \frac{2\pi(kT)^4}{c^2 h^3} \int_0^\infty dx \frac{x^3}{e^x - 1},$$

dengan  $x \equiv h\nu/kT$  tanpa satuan. Integral terhadap  $x$  memiliki nilai  $\pi^4/15$ , sehingga menghasilkan

$$j^* = \sigma T^4, \quad \sigma \equiv \frac{2\pi^5}{15} \frac{k^4}{c^2 h^3}$$

### 3. Hukum Pergeseran Wien

Hukum perpindahan Wien menjelaskan bagaimana spektrum radiasi benda-hitam pada suhu berapapun berkorelasi dengan spektrum pada suhu lainnya. Jika diketahui bentuk spektrum pada suatu suhu, maka bentuk spektrum pada suhu lainnya dapat dihitung. Intensitas spektrum dapat dinyatakan sebagai fungsi panjang gelombang atau fungsi frekuensi.

Akibat dari hukum perpindahan Wien adalah panjang gelombang saat intensitas per satuan panjang gelombang dari radiasi yang dihasilkan benda hitam ketika maksimum,  $\lambda_{\max}$ , hanya sebagai fungsi temperatur:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

dengan konstanta  $b$ , dikenal dengan konstanta perpindahan Wien, sama dengan  $2,8977729(17) \times 10^{-3} \text{ K m}$ .

Hukum Planck diatas juga dinyatakan sebagai fungsi frekuensi. Intensitas maksimum adalah

$$\nu_{\max} = T \times 58.8 \text{ GHz/K}$$

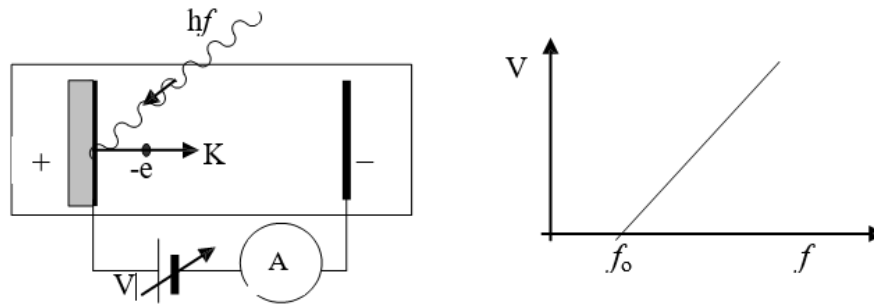
## B. Efek Fotolistrik

Fenomena pertama yang dijelaskan dengan teori kuantum model yaitu Radiasi Benda Hitam. Pada akhir abad ke-19 diambil data pada radiasi termal, percobaan menunjukkan bahwa cahaya menumbuk pada permukaan suatu logam tertentu menyebabkan elektron dipancarkan dari permukaan tersebut. Fenomena ini dikenal dengan Efek Fotolistrik dan elektron yang dipancarkan disebut fotoelektron. Pada 1887 Hertz mengamati peningkatan discharge dari elektroda logam ketika disinari dengan cahaya ultraviolet. Pengamatan itu diteruskan oleh Hallwachs; dia mengamati emisi elektron ketika dia menyinari permukaan-permukaan logam seperti seng, rubidium, potassium dan sodium. Proses lepasnya elektron-elektron dari permukaan logam yang disinari disebut emisi fotoelektron atau efek foto-listrik. Dalam pengamatan itu ternyata: (i) untuk suatu jenis logam ada frekuensi cahaya minimal yang dapat melepaskan elektron, dan (ii) semakin tinggi intensitas cahaya yang mengenai permukaan logam, semakin banyak elektron yang dilepaskan. Fakta eksperimen dari efek foto-listrik ini tak dapat dijelaskan dengan teori-teori klasik seperti teori listrik-magnetnya Maxwell. Pada 1905, Einstein mengemukakan bahwa proses tersebut dapat diungkapkan sebagai masalah tumbukan partikel. Menurut beliau, suatu berkas cahaya monokromatik dapat dipandang sebagai kumpulan partikel-partikel yang disebut foton yang masing-masing memiliki energi  $hf$  di mana  $f$  adalah frekuensi cahaya. Jika suatu foton menumbuk permukaan logam, energi foton itu dialihkan ke elektron dan ketika elektron diemisikan dari permukaan logam energi kinetiknya ( $K = \frac{1}{2}mv^2$ ):

$$K = hf - W$$

dengan  $W$  adalah kerja yang diperlukan untuk melepaskan elektron;  $W$  ini bergantung pada jenis logam. Millikan pada 1916 melakukan eksperimen seperti dalam Gb.1.3. Energi kinetik  $K$  diukur dengan memberikan potensial stop  $V$  (sehingga  $K = eV$ ) ditunjukkan oleh penunjukan amperemeter sama dengan 0. Jika  $V = 0$ , maka  $W = h\nu_0$ . Sedangkan konstanta Planck  $h$  adalah kemiringan kurva  $V-f$ .





Gb. 1.3 Eksperimen efek fotolistrik (a), dan potensial stop sebagai fungsi frekuensi cahaya

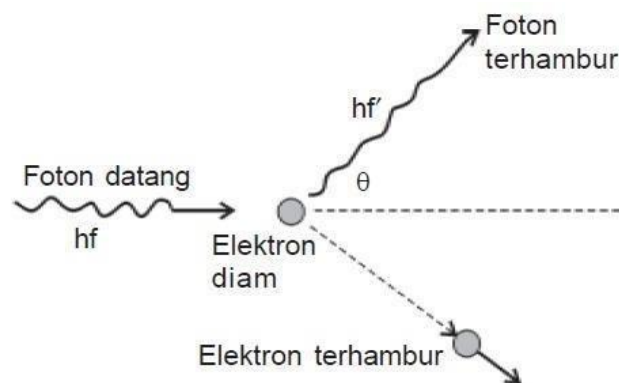
### C. Efek Compton

Pada tahun 1905 para ilmuwan menemukan pemikiran bahwa cahaya terdiri dari foton-foton dengan besar energi tertentu, namun pemikiran tersebut belum dapat membuktikan bahwa foton-foton tersebut juga membawa momentum. Dalam teori klasik, gambaran tentang gelombang adalah jika seberkas gelombang dengan frekuensi  $f_1$  bertumbukan dengan suatu bahan, maka elektron dalam bahan tersebut akan mengalami osilasi dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi gelombang yang menumbuknya. Akibat dari osilasi elektron tersebut, maka akan timbul radiasi yang memiliki frekuensi yang sama dengan frekuensi osilasi elektron yang tentunya juga sama dengan frekuensi gelombang datang yang menumbuk bahan.

Namun dari eksperimen yang dilakukan oleh Compton diperoleh hasil yang tidak sesuai dengan teori klasik. Arthur Holly Compton menemukanya bahwa hamburan Compton merupakan hamburan foton oleh partikel bermuatan, biasanya elektron. Ini menghasilkan penurunan energi (peningkatan panjang gelombang) dari foton (yang mungkin merupakan sinar-X atau foton sinar gamma), yang disebut efek Compton. Bagian dari energi foton ditransfer ke elektron recoiling. Hamburan Compton Invers terjadi ketika partikel bermuatan mentransfer sebagian energinya ke foton.

Pada tahun 1923, Compton menjelaskan hasil eksperimennya dengan berasumsi bahwa berkas sinar (dalam hal ini sinar-X) yang digunakan untuk menembak bahan merupakan arus foton. Energi foton tersebut sebesar  $E = hf$ . Foton ini bertumbukan lenting dengan elektron yang ada pada target. Jika elektron mengambil sebagian energi yang dimiliki oleh foton, maka foton yang terhambur akan memiliki energi yang lebih kecil dibandingkan dengan energi foton yang datang. Hal ini menyebabkan foton yang terhambur akan memiliki frekuensi yang lebih kecil atau panjang gelombang yang lebih besar daripada foton yang datang. Hamburan Compton merupakan contoh hamburan inelastis cahaya oleh partikel bermuatan gratis, di mana panjang gelombang cahaya yang

dihamburkan berbeda dari radiasi insiden. Hamburan inelastis merupakan proses hamburan mendasar di mana energi kinetik dari partikel kejadian tidak dikonservasi (berbeda dengan hamburan elastis ). Dalam proses hamburan inelastik, sebagian energi dari partikel peristiwa hilang atau meningkat. Meskipun istilah ini secara historis terkait dengan konsep tabrakan inelastik dalam dinamika , kedua konsep ini cukup berbeda; tabrakan inelastik dalam dinamika mengacu pada proses di mana energi kinetik makroskopis total tidak dilestarikan. Secara umum, hamburan karena tumbukan tidak elastis akan menjadi tidak elastis, tetapi, karena tumbukan elastis sering mentransfer energi kinetik antar partikel, hamburan karena tumbukan elastis juga bisa dalam bentuk elastis.



Gb. 1.4 Skema percobaan tumbukan foton dengan elektron oleh Compton. Foton yang terhambur memiliki panjang gelombang lebih panjang  $\lambda'$  dan momentum  $p'$ . Electron terpelempar dengan momentum  $p_e$ . Arah foton yang terhambur membentuk sudut  $\theta$  dengan arah foton datang

Gambar tersebut memperlihatkan sebuah tumbukan foton dan sebuah elektron, di mana elektron tersebut mula-mula dianggap diam dan dapat dianggap bebas, yakni tidak terikat kepada atom-atom penghambur. Ternyata, sinar X tersebut dihamburkan dengan sudut  $\theta$  terhadap arah datangnya. Panjang gelombang sinar X yang terhambur menjadi lebih besar daripada panjang gelombang semula. Analisis teori gelombang mengharuskan panjang gelombang sinar X tidak berubah, sementara pada kenyataannya memberikan hasil yang berbeda.

Foton-foton dalam sinar X bertumbukan dengan elektron bebas dan foton tersebut terhambur. Ketika tumbukan terjadi, foton kehilangan sebagian energinya karena diserap oleh elektron. Oleh karena itu, panjang gelombang foton yang terhambur menjadi besar karena energinya menjadi kecil. Karena terjadi tumbukan antara foton dan elektron mengharuskan foton memiliki momentum sehingga berlaku Hukum Kekekalan

Momentum, besarnya momentum tersebut dapat dihitung dengan cara menurunkan momentum foton dari teori relativitas khusus Einstein yaitu :

Einstein menyatakan kesetaraan energi-massa dengan  $E = m \cdot c^2$ . Dalam efek fotolistrik kita melihat bahwa cahaya yang dijatuhkan pada keping logam diperlukan sebagai paket – paket energiyang disebut foton dengan energi tiap foton sebesar  $E = hf$ .

$$E = m \cdot c^2$$

$$E = mc \cdot c = p \cdot c$$

Mengingat energi foton Planck  $E = hf$  maka momentum relativistic foton dapat ditentukan:

$$P = mc = hfc$$

Nilai  $\lambda = c/f$  atau  $h\lambda = hc/f$  sehingga persamaan diatas dapat ditulis sebagai berikut :

$$P = h\lambda \text{ atau } \lambda = hp.$$

P = momentum sebuah foton (Ns)

c = laju cahaya (m/s)

h = tetapan Planck (6,63 X 10<sup>-34</sup> Js)

$\lambda$  = panjang gelombang foton (m)

f = frekuensi cahaya (Hz)

Dengan menggunakan persamaan tersebut untuk momentum foton, Compton menerapkan Hukum Kekekalan Momentum dan Energi pada tumbukan antara foton dan elektron. Hasilnya adalah pergeseran panjang gelombang fotonsinar X yang memenuhi persamaan:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = h/m_0 c ( 1 - \cos \theta )$$

Dengan :

$\Delta\lambda$  = pergeseran panjang gelombang foton (m)

$\lambda$  = panjang gelombang foton datang (m)

$\lambda'$  = panjang gelombang foton hambur (m)  $m_0$ = massa diam elektron

h = konstanta Plank (6,63 x 10<sup>-34</sup> Js)

$\theta$ = sudut hamburan(o)

#### **D. Aplikasi Hamburan Compton**

Salah satu aplikasi dari hamburan compton adalah “Aplikasi Metode Hamburan Compton Energi Ganda Untuk Pengukuran Densitas Fluida Dan Uji Tak Merusak Pipa”. Pengujian tak merusak (Non Destructive Testing, NDT) adalah suatu bentuk pengujian

yang tidak merusak benda uji, komponen, produk atau konstruksi. Tujuan NDT adalah untuk mengetahui keadaan komponen mengandung cacat atau tidak. Selama 50 tahun terakhir ini, telah dikembangkan berbagai cara NDT untuk mendukung kegiatan inspeksi visual. penelitian simulasi aplikasi teknik hamburan Compton energi ganda pada uji tak merusak pipa untuk pengukuran densitas elektron fluida di dalam pipa dan menentukan letak serta ukuran kerusakan internal pada dinding pipa. Teknik yang dikembangkan ini menggunakan sebuah sumber radioaktif foton terkolimasi, yaitu Iridium-192 yang memancarkan sinar gamma dengan energi 317 keV dan 468 keV serta sebuah detektor titik. Untuk meminimalkan ukuran volume hambur, dipilih sudut hambur 90°. Kajian ini merupakan penelitian simulasi dengan menggunakan perangkat lunak MCNP versi 4B. Penentuan densitas elektron dilakukan untuk dua sampel fluida, yaitu air ringan (H<sub>2</sub>O) dan air berat (D<sub>2</sub>O). Data masukan disusun dan kemudian digunakan oleh perangkat lunak MCNP untuk menghasilkan respon detektor secara simulasi. Hasil ini kemudian diolah secara manual untuk menghitung densitas elektron pada setiap bahan, hasil kajian menunjukkan bahwa metode ini memberikan kesalahan maksimum 2,2 % untuk pengukuran densitas elektron fluida dalam pipa. Hasil simulasi juga memperlihatkan bahwa metode ini dapat dipakai untuk evaluasi secara visual suatu obyek dengan cara menghitung tebal dinding pipa. Pada kasus tertentu, lokasi dan ukuran kerusakan pipa kemungkinan tidak dapat ditentukan dengan tepat. Berdasarkan uraian di atas dapat diambil beberapa kesimpulan, metode hamburan Compton energi ganda dapat digunakan untuk menentukan densitas elektron fluida di dalam pipa. Pada dua kasus penelitian ini diperoleh persentase kesalahan di bawah 2% (2,1876%), kerusakan akibat korosi yang terjadi di permukaan dalam pipa menyebabkan nilai densitas elektron di setiap titik uji pada obyek terdeteksi sangat bervariasi, metode hamburan Compton energi ganda dapat digunakan untuk menentukan lokasi dan ukuran kerusakan internal yang terdapat di dalam suatu obyek dengan tepat, dengan cara menghitung perubahan tebal bahan pada masing-masing posisi obyek, pada kasus, yaitu obyek yang memiliki beberapa cacat yang terletak pada lokasi dengan perbedaan sudut 90°, maka lokasi dan ukuran cacat yang terdapat di dalam obyek tersebut ada kemungkinan tidak dapat ditentukan dengan tepat.

Aplikasi lainnya adalah “Perkembangan Penggunaan Teknik Hamburan Compton Sinar Gamma pada Aplikasi Sistem Uji Tak Merusak”. Sinar gamma merupakan sinar radioaktif yang memiliki energi tinggi dengan panjang gelombang yang pendek dalam spektrum elektromagnetik. Sinar gamma diproduksi oleh transisi energi

karena percepatan elektron. Dalam beberapa tahun terakhir sinar gamma banyak dimanfaatkan pada aplikasi uji tak-merusak untuk melakukan pengujian terhadap suatu bahan di bawah permukaan yang sulit untuk dideteksi secara visual tanpa menyebabkan kerusakan pada bahan yang diuji. Energi sinar gamma yang tinggi mengakibatkan foton yang dihasilkan mampu melakukan penetrasi hingga kelapisan bahan yang diteliti. Berbagai penelitian menggunakan sinar gamma telah banyak dilakukan seperti pengamatan perbedaan intensitas hamburan balik foton gamma berenergi 1,12 MeV dari target elemen yang berbeda seperti Zn, Al, Sn, Fe dan C serta campurannya, menentukan ketebalan bahan menggunakan hamburan sinar gamma  $^{137}\text{Cs}$ , penggunaan sinar gamma dengan energi 662 keV dan 511 keV pada pengukuran koefisien atenuasi massa beton, pengukuran massa jenis fluida dalam pipa polietilen menggunakan  $^{137}\text{Cs}$ , pemeriksaan ketahanan kawat baja pada jembatan menggunakan  $^{192}\text{Ir}$ , dan penerapan teknik hamburan gamma dengan sumber gamma  $^{137}\text{Cs}$  5 mCi (185 MBq) untuk uji material. Salah satu gejala fisis yang terjadi ketika foton sinar gamma berinteraksi dengan suatu material ialah hamburan Compton. Pada fenomena hamburan Compton, foton mengalami defleksi dari arah pergerakannya semula dengan sudut hamburan tertentu setelah berinteraksi dengan elektron di dalam material. Teknik hamburan Compton merupakan salah satu teknik yang digunakan pada aplikasi uji tak-merusak. Beberapa sistem uji tak-merusak menggunakan teknik hamburan Compton sinar gamma diterapkan pada uji ketahanan bahan, pendeteksi rongga, retakan, dan kebocoran pipa minyak maupun gas. Teknik hamburan Compton dapat juga diaplikasikan untuk mengukur densitas bahan. Paper ini mendeskripsikan perkembangan penggunaan metode hamburan Compton pada berbagai aplikasi khususnya uji tak-merusak selama lima tahun terakhir untuk menemukan kelebihan dan prospek penelitian menggunakan teknik hamburan Compton di masa depan. Pada umumnya penggunaan teknik hamburan Compton dipilih sebagai alternatif keterbatasan penggunaan metode transmisi pada pengukuran dimana akses dari dua sisi tidak mungkin dilakukan. Pengukuran atau pengujian terhadap suatu bahan menggunakan teknik hamburan Compton memiliki berbagai keuntungan yaitu bahan yang diukur dapat diakses dari sisi yang sama sehingga hal ini dapat menjadi alternatif proses pengukuran dengan kondisi dimana akses dari kedua sisi tidak dapat dilakukan. Penggunaan sinar gamma efektif dalam pengukuran bahan yang tebal karena mampu melakukan penetrasi yang dalam terhadap objek yang diteliti. Penelitian lanjutan dapat dilakukan pada berbagai aplikasi. Salah satu diantaranya adalah penerapan teknik

hamburan Compton pada pengukuran ketahanan jalan raya aspal menggunakan sumber sinar gamma.

## **RANGKUMAN**

Gejala kuantum adalah fenomena-fenomena yang terjadi pada skala atom dan subatom, di mana hukum-hukum fisika klasik tidak lagi berlaku dan digantikan oleh prinsip-prinsip mekanika kuantum. Pemahaman tentang gejala kuantum sangat penting dalam fisika modern karena memberikan wawasan mendalam tentang struktur alam semesta pada tingkat yang paling dasar.

Radiasi benda hitam adalah radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh benda hitam sempurna (benda yang menyerap semua radiasi yang jatuh padanya) dalam kesetimbangan termal. Fenomena ini tidak dapat dijelaskan oleh fisika klasik, yang dikenal sebagai "bencana ultraviolet". Max Planck memecahkan masalah ini pada tahun 1900 dengan mengusulkan bahwa energi dipancarkan dalam paket diskrit yang disebut kuantum, yang menjadi awal mula fisika kuantum.

Seperti yang telah kita bahas sebelumnya, efek fotolistrik adalah fenomena di mana elektron dilepaskan dari permukaan logam ketika cahaya dengan frekuensi yang cukup tinggi mengenai permukaan tersebut. Albert Einstein menjelaskan fenomena ini pada tahun 1905 dengan mengusulkan bahwa cahaya terdiri dari paket-paket energi diskrit yang disebut foton.

Efek Compton, yang ditemukan oleh Arthur Compton pada tahun 1923, adalah fenomena di mana foton sinar-X berinteraksi dengan elektron dalam suatu materi, menyebabkan peningkatan panjang gelombang foton (penurunan energi) dan perubahan arah gerak elektron. Efek ini memberikan bukti lebih lanjut tentang sifat partikel cahaya dan mendukung teori foton Einstein.

## LATIHAN

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

1. Sebuah stasiun Radio beroperasi pada frekuensi 103,7 MHz dengan keluaran daya sebesar 200kW. Tentukan laju emisi kuanta dari stasiun radio tersebut!
2. Hasil percobaan tentang efek fotolistrik menggunakan kalsium sebagai emitor, didapatkan data sebagai berikut:

$\lambda$ (Å)	$f$ ( $\times 10^{15}$ Hz)	$V_0$ (volt)
2536	1,18	1,95
3132	0,958	0,98
3650	0,822	0,50
4047	0,741	0,14

$V_0$  =potensial henti

Tentukanlah konstanta Planck dari data-data tersebut.

3. Sinar X dengan panjang gelombangnya 2500 Å mengalami hamburan Compton dan berkas hamburannya teramati pada sudut  $60^\circ$  relatif terhadap arah berkas datang. Tentukan energi foton sinar hamburannya!
4. Suatu benda hitam pada suhu  $27^\circ\text{C}$  memancarkan energi R J/s. Benda hitam tersebut dipanasi hingga suhu  $327^\circ\text{C}$ . Berapakah enenrgi yang dipancarkan benda tersebut?

## DAFTAR PUSTAKA

Griffiths, David J., 1995. Introduction to Quantum Mechanics. USA : Prentice Hall

Purwanto, A. (2016). Fisika Kuantum Edisi 2 Revisi. Yogyakarta: Penerbit Gava Media.

Siregar, R. E. (2010). Teori dan Aplikasi Fisika Kuantum. Bandung: Widya Padjadjaran.