

# **MODUL III**

## **FISIKA MODERN**

### **CAHAYA PARTIKEL GELOMBANG**

**Tujuan instruksional umum :**

- Agar mahasiswa dapat memahami tentang cahaya sebagai gelombang dan partikel.

**Tujuan instruksional khusus :**

- Dapat menjelaskan yang dimaksud dengan pegambaran gelombang dan foton
- Dapat menjelaskan teori gelombang cahaya
- Dapat menjelaskan teori kuantum cahaya

**Buku rujukan :**

Fisika modern            Halliday-Resnick

Johanes Surya         Olimpiade Fisika

### 3.1 Partikel Gelombang

Pandangan cahaya sebagai sederetan paket energi yang biasanya disebut (foton) berlawanan langsung dengan teori gelombang cahaya. Keduanya cara-cara untuk menerangkan banyak sekali efek optis-khususnya difraksi dan interferensi-sebagai teori fisis yang sudah mapan. Usul Planck bahwa benda memancarkan cahaya dalam bentuk kuantum yang terpisah pada tahun 1900 tidak bertentangan dengan penalaran melalui ruang dalam bentuk foton, menimbulkan rasa terpercayanya pada rekan-rekannya, termasuk Planck; hal itu tidak sepenuhnya diterima sampai saat pekerjaan Compton yang dilakukan 18 tahun kemudian.

Menurut teori gelombang, gelombang cahaya menyebar dari suatu sumber seperti riak menyebar dari permukaan air jika kita menjatuhkan batu ke permukaan air. Energi yang dibawa cahaya menurut analogi ini terdistribusi secara kontinu keseluruhan pola gelombang. Sebaliknya menurut teori kuantum cahaya menyebar dari sumbernya sederetan konsentrasi energi yang terlokalisasi, masing-masing cukup kecil sehingga dapat diserap oleh sebuah elektron, yang mengherankan dari teori kuantum yang memperlakukan sepenuhnya sebagai gejala partikel secara eksplisit berkaitan dengan frekuensi cahaya  $f$ , merupakan konsep gelombang.

Teori manakah yang harus kita percaya? Banyak sekali hipotesis fisis yang harus diubah atau dibuang jika hipotesis itu bertentangan dengan eksperimen, tetapi kita belum pernah diharuskan membangun dua teori yang sangat berbeda untuk menerangkan suatu gejala fisis. Di sini situasinya sangat berbeda dari kasus relativistik dengan mekanika Newton yang ternyata kedua hal merupakan aproksimasi dari hal pertama. Tidak terdapat cara untuk menurunkan teori kuantum cahaya dari teori gelombang cahaya atau sebaliknya, walaupun ada kaitan antara keduanya.

Agar lebih mengerti kaitannya mari kita tinjau gelombang elektromagnetik berfrekuensi  $f$  yang jatuh pada sebuah layar. Intensitas  $I$  dari gelombang itu merupakan laju energi transport per satuan luas penampang, bergantung dari besar  $E$  dan  $B$  dari medan listrik dan magnetik. Karena  $E$  dan  $B$  berhubungan melalui persamaan  $E=cB$ . Maka kita bisa memilih salah satu  $E$  atau  $B$  untuk menggambarkan intensitas gelombang biasanya  $E$  dipilih intensitas  $I$  dari gelombang pada layar diberikan oleh

Gambar 3.1(a) Teori gelombang cahaya menjelaskan difraksi dan interferensi yang tidak dapat dijelaskan teori kuantum.(b)Teori kuantum menjelaskan efek fotolistrik yang tidak dapat dijelaskan teori gelombang

### **Gambaran gelombang**

$$I = \epsilon_0 c \overline{E^2}$$

dengan  $\overline{E^2}$  menyatakan rata-rata kuadrat besaran sesaat dari gelombang medan listrik dengan satu siklus.

Dinyatakan dalam model foton dari gelombang elektromagnetik yang sama energi transport oleh N foton tiap detik satuan luas. Karena tiap foton berenergi hf intensitas pada layar adalah

### **Gambaran foton**

$$I = Nhf$$

kedua gambaran itu harus memberikan harga I yang sama sehingga laju kedatangan foton menjadi

$$N = \frac{\epsilon_0 c}{hf} \overline{E^2}$$

Jika N cukup besar orang melihat layar akan mendapatkan distribusi cahaya yang kontinu, polanya bersesuaian dengan distribusi  $\overline{E^2}$  dan ia tidak mempunyai alasan untuk menyangsikan teori gelombang cahaya tersebut. Jika N sangat kecil demikian kecilnya hingga satu foton saja pada setiap saat yang sampai pada layar-pengamat akan mendapatkan sederetan dengan random yang menunjukkan bahwa cahaya merupakan gejala kuantum.

Jika pengamat itu mengikuti pola dengan yang terjadi cukup lama, ia akan mendapatkan pola yang berbentuk sama dengan yang sebelumnya.sehingga ia terpaksa

mengambil kesimpulan bahwa kemungkinan menemukan foton pada tempat tertentu bergantung dari harga  $\overline{E^2}$  di tempat itu.

Penalaran seperti itu berlaku juga untuk eksperimen difraksi celah ganda dengan memakai berkas cahaya yang sedemikian lemah, sehingga hanya satu foton tiap saat yang terdapat dalam peralatan itu. Bagaimanakah pola difraksi timbul bila foton hanya bisa melewati hanya satu celah atau celah lainnya? Bagaimanakah foton dapat berinterferensi dengan dirinya sendirinya sendiri? kelihatannya terdapat pertentangan antara gagasan gelombang menyebar dan gagasan foton yang terlokalisasi dalam daerah yang sangat kecil.

Kita dapat meniadakan pertentangan ini dengan menganggap bahwa foton mempunyai gelombang yang berpautan dengannya. Intensitas gelombang ini pada titik tertentu pada layar setelah melalui kedua celah tadi menentukan kemungkinan foton itu tiba di titik itu. Pada tiap kejadian yang khusus cahaya dapat memperlihatkan sifat gelombang atau sifat partikel, tidak pernah terjadi keduanya terlihat sekaligus. Bila cahaya melalui celah-celah, cahaya berlaku sebagai gelombang ketika tiba pada layar cahaya berlaku sebagai partikel.

Jelaslah cahaya mempunyai sifat dual Teori gelombang cahaya dan teori kuantum saling berkomplemen. Masing-masing teori hanya merupakan sebagian saja sifat sebenarnya dari cahaya bukanlah suatu dapat dibayangkan berdasarkan pengalaman sehari-hari.

### 3.2 Foton berenergi tinggi

Efek fotolistrik merupakan bukti yang meyakinkan bahwa foton cahaya dapat mentransfer energi pada elektron. Apakah proses sebaliknya bisa terjadi? Dapatkah seluruh energi kinetik atau sebagian energi kinetik elektron yang bergerak diubah menjadi foton? Kenyataannya efek fotolistrik bukan saja terjadi tetapi telah ditemukan sebelum pekerjaan teoritis Planck dan Einstein.

Belum lama setelah penemuan itu orang mulai menduga bahwa sinar-x merupakan gelombang sinar elektromagnetik. Bukanakah teori elektromagnetik meramalkan bahwa muatan listrik yang dipercepat akan meradiasi gelombang elektromagnetik, dan elektron yang bergerak cepat yang tiba-tiba dihentikan jelas mengalami suatu percepatan. Radiasi yang ditimbulkan dalam keadaan serupa itu diberi nama bahasa Jerman *bresstrahlung* (radiasi pengereman).

Pada tahun 1912 suatu metode dicari untuk mengukur panjang gelombang sinar-x. eksperimen difraksi dapat dipandang ideal, tetapi kita ingat dari optika fisis bahwa jarak antara dua garis yang berdekatan pada kisi difraksi harus berorde besar sama dengan panjang gelombang cahaya supaya didapat hasil yang memuaskan dan kisi yang berjarak sangat kecil seperti yang diperlukan untuk sinar-x tidak dapat dibuat. Namun dalam tahun 1912 Max von Laue menyadari bahwa panjang gelombang yang diduga berlaku untuk sinar-x berorde besar hampir sama dengan jarak antara atom-atom dalam kristal yaitu sekitar beberapa nanometer. Dengan alasan itu ia mengusulkan bahwa kristal dapat dipakai untuk mendifraksi sinar-x dengan kisi kristal berlaku sebagai kisi tiga dimensi. Tahun berikutnya eksperimen yang memadai untuk hal tersebut telah dilakukan dan sifat gelombang sinar-x secara sukses ditunjukkan. Dalam eksperimen itu panjang gelombang 0,013 hingga 0,048 nm hingga telah ditemukan,  $10^{-4}$  kali panjang cahaya tampak sehingga mempunyai kuantum  $10^4$  kali lebih energik.

Radiasi elektromagnetik dalam selang panjang gelombang aproksimasi 0,01 hingga 10 nm pada waktu ini digolongkan sebagai sinar-x. Batasan selang tersebut tidak tajam; pada batas panjang gelombang kecil bertumpang tindih dengan sinar gamma dan batas panjang gelombang bertumpang tindih dengan cahaya ultraungu.

Gambar 3.2 merupakan diagram tabung sinar-x sebuah katode yang dipanasi oleh filamen berdekatan yang dilalui arus listrik menyediakan elektron terus-menerus dengan emisi termionik. Perbedaan potensial yang tinggi  $V$  dipertahankan antara katode dengan target logam mempercepat elektron ke arah target tersebut. permukaan target membentuk sudut relative terhadap berkas elektron dan sinar-x yang keluar dari target melewati bagian pinggir tabung. Tabung tersebut dihampakan supaya elektron dapat sampai ke target tanpa halangan.

Gambar 3.2 Sebuah tabung sinar-x. pemercepat voltase  $V$ , pemercepat dan pemerlambang gelombang sinar-x.

Teori elektromagnetik klasik meramalkan timbulnya bremsstrahlung ketika elektron dipercepat, sehingga dapat menjelaskan sinar-x yang terpencar ketika cepat terhenti pada target dalam tabung sinar-x . Namun penyesuaian antara teori klasik dan data eksperimental tidak memuaskan pada segi-segi penting tertentu gambar 3.3.dan 3.4 menunjukkan spektrum sinar-x yang timbul ketika target tungsten dan molybdenum ditembaki elektron berbagai potensial pemercepat. Kurvanya menunjukkan dua unsur penting yang tidak bisa diterangkan dengan teori elektromagnetik.

1. Dalam kasus molybdenum, puncak intensitas yang tajam pada gelombang tertentu menunjukkan timbulnya sinar-x yang besar pada panjang gelombang tertentu. Puncak-puncak ini timbul pada berbagai panjang gelombang tertentu untuk masing-masing bahan target dan asalnya ialah penetapan kembali struktur elektron atom target setelah diganggu oleh tembakan elektron. Gejala ini kan dibahas lebih lanjut suatu hal penting diperhatikan pada bagian ini adalah adanya produksi sinar-x untuk panjang gelombang khusus yang merupakan efek yang bukan klasik sebagai tambahan pada produksi spectrum sinar-x kontinu.

Gambar 3.3 Spektrum sinar-x tungsten pada berbagai potensial pemercepat.

2. Sinar-x yang timbul pada suatu potensial pemercepat tertentu  $V$  dalam panjang gelombangnya bermacam-macam, tetapi tidak terdapat panjang gelombang yang lebih kecil dari suatu harga tertentu  $\lambda_{\min}$  pada suatu. Bertambahnya  $V$  akan menyebabnya mengecilnya  $\lambda_{\min}$  untuk suatu harga  $V$  ,  $\lambda_{\min}$  target molybdenum dan tungsten harganya sama. Duane dan Hunt menemukan

secara eksperimen bahwa  $\lambda_{\min}$  berbanding terbalik dengan  $V$  hubungan yang tepat dinyatakan oleh:

**Produksi sinar-x**

$$\lambda_{\min} = \frac{1,24 \times 10^{-4} V.m}{V}$$

Gambar 3.4 Spektrum sinar-x tungste dan molybdenumpada potensial pemercepat 35 kV.

Pengamatan yang kedua dapat dipahami melalui teori kuantum radiasi. sebagian besar elektron yang jatuh pada target kehilangan energi kinetiknya sedikit demi sedikit melalui berbagai tumbukkan, energinya berubah menjadi panas (alasan ini yang menyebabkan dipakainya target logam dalam tabung sinar-x yang mempunyai titik lele yang tinggi seperti tungsten dan dipakai cara yang efisien untuk mendinginkan target). Namun sebagian kecil elektron kehilangan sebagian besar energinya atau seluruh energinya dalam suatu tumbukkan tunggal dengan atom target, energi inilah yang berubah menjadi sinar-x.

Jadi produksi sinar-x kecuali puncak yang disebut pada modul sebelumnya merupakan efek fotolistrik balik. Dibandingkan dengan energi foton yang ditransformasikan menjadi energi kinetik elektron, maka energi kinetik elektron ini ditransformasikan menjadi energi foton. Panjang gelombang pendek berarti frekuensi tinggi, frekuensi tinggi berarti berenergi foton tinggi hf.

Karena fungsi kerja beberapa elektrovolt, sedang potensial pemercepat dalam tabung sinar-x biasanya puluhan atau ratusan ribu volt, kita dapat menggambarkan fungsi kerja dan menafsirkan batas panjang gelombang terkecil dan persamaan sebelumnya yang bersesuaian dengan energi kinetik  $K=eV$  dari

elektron yang datang seluruhnya diberikan pada foton tunggal berenergi  $h\nu_{maks}$  jadi

$$Ve = hf_{maks} = \frac{hc}{\lambda_{min}}$$

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{Ve} = \frac{1,24 \times 10^{-6} Vm}{V}$$

Persamaan tersebut disebut Duane-Hunt dari persamaan dan tentu saja sama dengan persamaan kecuali semuanya berbeda. Jelaslah bahwa kita dapat memandang produksi sinar -x sebagai kebalikan dari efek fotolistrik.

**Soal:**

Cari panjang gelombang terkecil dari radiasi mesin sinar-x yang potensial pemercepat 50.000 V.

Pemecahan:

$$\lambda_{min} = \frac{1,24 \times 10^{-6} V.m}{5 \times 10^4 V} = 2,5 \times 10^{-11} m = 0,025 \text{ nm}$$

$$f_{maks} = \frac{c}{\lambda_{min}} = \frac{3 \times 10^8 m/s}{2,5 \times 10^{-11} m} = 1,2 \times 10^{19} \text{ Hz}$$