

# 1

## Dualisme Gelombang Partikel

### Standar Kompetensi

Menganalisis keterkaitan antara berbagai besaran fisis pada gejala kuantum dan menerapkan batas-batas berlakunya relativitas Einstein dalam paradigma fisika modern.

### Kompetensi Dasar

- Menganalisis secara kualitatif gejala kuantum yang mencakup hakikat dan sifat-sifat radiasi benda hitam serta penerapannya.

### Indikator

- Menganalisis dan menginterpretasikan data empiris tentang radiasi benda hitam
- Memformulasikan hipotesis Plank
- Memformulasikan hukum pergeseran Wien dan hukum Stefan Boltzman berdasarkan hipotesis Plank
- Mengaplikasikan sifat-sifat radiasi benda hitam untuk mengukur suhu Matahari dan bintang

### Pendalaman Materi

#### A. RADIASI BENDA HITAM

Teori fisika klasik menganggap bahwa cahaya sebagai gelombang dan tidak dapat menerangkan spectrum radiasi benda hitam. Max Plank menyatakan bahwa cahaya dapat dianggap partikel yang terdiri dari paket-paket energi yang disebut kuantum atau foton. Teori ini terbukti dengan adanya fenomena efek foto listrik dan efek Chompton. Sifat dualisme gelombang-partikel ini diperkuat teori yang dikemukakan de Broglie bahwa partikel yang bergerak dapat memiliki sifat gelombang dengan panjang gelombang tertentu.

Joseph Stefan dan Ludwig Boltzman melakukan pengukuran laju energi kalor radiasi yang dipancarkan oleh permukaan suatu benda. Hukum Stefan-Boltzman menyatakan : *Energi yang pancarkan oleh permukaan benda dalam bentuk radiasi kalor per satuan waktu sebanding dengan luas permukaan dan sebanding dengan pangkat empat suhu mutlak permukaan.*

$$P = \frac{Q}{t} = e\sigma AT^4$$

P = daya radiasi (Watt)

Q = energi kalor (J)

t = Waktu (s)

$\sigma$  = konstanta Stefan-Bolzman  
( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )

e = emisivitas benda

A = luas permukaan benda ( $\text{m}^2$ )

T = Suhu Mutlak permukaan benda (K)

Emisivitas suatu benda menyatakan kemampuan benda untuk menyerap dan memancarkan radiasi kalor dibandingkan dengan benda hitam sempurna. Benda hitam sempurna memiliki kemampuan menyerap semua energi kalor yang datang dan memancarkannya dengan sempurna. Untuk benda hitam sempurna nilai  $e = 1$ .

#### B. HUKUM PERGESERAN WIEN

Wilhelm Wien (ilmuwan fisika Jerman) menemukan hubungan empiris antara panjang gelombang yang dipancarkan untuk intensitas maksimum dengan suhu mutlak sebuah benda. Hukum pergeseran Wien dinyatakan dengan :

$$\lambda_m \cdot T = C$$

$\lambda_m$  = panjang gelombang maksimum (m)

T = suhu mutlak (K)

C = tetapan Wien ( $2,898 \times 10^{-3} \text{ mK}$ )

Teori klasik yang dikemukakan Wien hanya mampu menjelaskan radiasi benda hitam untuk panjang gelombang pendek. Teori klasik lain yang dikemukakan Rayleigh-Jeans hanya mampu menjelaskan radiasi benda hitam untuk panjang gelombang yang panjang. Untuk menjelaskan kedua teori di atas, Max Plank mengajukan dua buah asumsi berikut :

- Energi radiasi yang dipancarkan getaran molekul bersifat diskret, yang besarnya :

$$E = n \cdot h \cdot f = \frac{n \cdot h \cdot c}{\lambda}$$

E = energi radiasi (J)

n = bilangan kuantum

h = tetapan Plank ( $6,6 \times 10^{-34} \text{ Js}$ )

f = frekuensi getaran molekul (Hz)

- Molekul menyerap dan memancarkan energi radiasi dalam paket diskret (kuantum atau foton).

### Uji Kompetensi

- Dua lampu pijar A dan B bersuhu  $27^\circ\text{C}$  dan  $127^\circ\text{C}$  berbentuk bulat dengan jari-jari lampu A = jari-jari lampu B. Tentukan perbandingan daya radiasi lampu A terhadap lampu B !

- Sebuah lubang kecil pada dinding tanur menyerupai benda hitam. Jika luas lubang  $1 \text{ cm}^2$  dan suhunya  $1772^\circ\text{C}$ , berapa energi kalor yang diradiasikan ke luar lubang setiap detik ?
- Tubuh seseorang bersuhu  $38^\circ\text{C}$ . Tentukan panjang gelombang spectrum radiasi maksimum !
- Berapakah besarnya frekuensi dan panjang gelombang dari sebuah foton yang memiliki energi  $4,42 \times 10^{-19} \text{ J}$  ?
- Lampu Natrium  $40 \text{ W}$  memancarkan cahaya kuning dengan panjang gelombang  $5800 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ). Tentukan jumlah foton yang dipancarkan lampu tersebut !
- Intensitas maksimum dari spectrum sinar matahari terjadi pada  $475 \text{ nm}$ . Berapa suhu permukaan matahari ?
- Berapa energi dari sebuah foton cahaya kuning yang panjang gelombangnya  $6 \times 10^{-7} \text{ m}$  ? (*kecepatan cahaya*  $= 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )
- Berapa panjang gelombang foton yang membawa energi dua kali energi foton yang panjang gelombangnya  $5 \times 10^{-7} \text{ m}$  ?

### C. EFEK FOTO LISTRIK

Efek foto listrik merupakan gejala keluarnya electron-elektron (electron foto) dari permukaan logam ketika logam tersebut dikenai seberkas cahaya. Logam yang memiliki energi ambang sebesar  $W_0$  jika disinari dengan cahaya yang energinya  $E$ , maka efek foto listrik akan terjadi jika  $E$  lebih besar dari  $W_0$ . Besarnya energi kinetic maksimum electron yang keluar dari logam sebesar :

$$EK_m = E - W_0$$

- $EK_m$  = energi kinetic maksimum electron (J)  
 $E = h.f$  = energi cahaya (J)  
 $W_0 = h.f_0$  = energi ambang logam (J)  
 = fungsi kerja logam (J)  
 $f$  = frekuensi cahaya (Hz)  
 $f_0$  = frekuensi ambang logam (Hz)

Beberapa sifat penting pada efek fotolistrik yang gagal diterangkan oleh teori gelombang cahaya, dapat diterangkan oleh Einstein. Menurut Einstein :

- Efek foto listrik tidak dapat terjadi jika frekuensi cahaya lebih kecil dari frekuensi ambang logam
- Energi kinetic maksimum tidak tergantung pada intensitas cahaya, tetapi tergantung pada frekuensi cahaya dan fungsi kerja logam.
- Elektron keluar dari logam hamper bersamaan dengan datangnya cahaya

Efek foto listrik juga dapat diamati dengan menggunakan tabung kaca hampa udara yang berisi pelat logam katode (K) dan Anode (A). Tegangan antara K dan A yang menghasilkan energi kinetic maksimum disebut dengan tegangan henti ( $V_0$ ). Hubungan antara  $EK_m$  dengan  $V_0$  adalah :

$$EK_m = e.V_0$$

- $e$  = muatan electron ( $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ )  
 $V_0$  = potensial henti (volt)

### D. EFEK CHOMPTON

Arthur Holy Chompton (ilmuwan fisika Amerika) mempelajari tumbukan antara foton dan electron. Sinar X ditumbukkan ke sebuah electron bebas diam, sehingga electron akan bergerak dengan kecepatan  $v$  dan foton sinar X akan terhambur dengan sudut  $\theta$ . Panjang gelombang foton setelah terhambur lebih besar dari pada sebelum terhambur.

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m.c}(1 - \cos\theta)$$

- $\Delta\lambda$  = beda panjang gelombang (m)  
 $\lambda_1$  = panjang gelombang foton sebelum hambur  
 $\lambda_2$  = panjang gelombang foton setelah hambur  
 $h$  = tetapan Plank ( $6,6 \times 10^{-34} \text{ Js}$ )  
 $m$  = massa elektron ( $9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ )  
 $c$  = kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )  
 $\frac{h}{m.c}$  = panjang gelombang Chompton

### E. TEORI DE BROGLIE

Louis de Broglie (ilmuwan fisika Perancis) menyatakan bahwa *partikel yang bergerak kemungkinan memiliki sifat gelombang dengan panjang gelombang tertentu*. Dari pernyataan tersebut, partikel yang bergerak dengan kecepatan  $c$  memiliki momentum  $p = m.v$ , energinya  $E = m.v^2$ , sedangkan sebagai gelombang akan memiliki panjang gelombang  $\lambda$  dan energi sebesar  $E = h.f = h.v/\lambda$ . Dari persamaan tersebut, maka hubungan panjang gelombang dengan momentum partikel adalah :

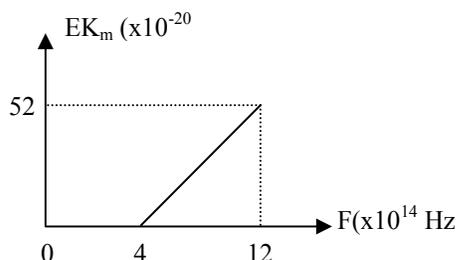
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m.v}$$

- $\lambda$  = panjang gelombang (m)  
 $h$  = tetapan Plank (Js)  
 $m$  = massa partikel (kg)  
 $c$  = kecepatan partikel (m/s)

### Uji Kompetensi

- Logam Cesium memiliki fungsi kerja  $1,8 \text{ eV}$ . ( $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ). Tentukan :
  - panjang gelombang maksimum cahaya yang dapat dijatuhkan pada permukaan logam tanpa mengeluarkan electron
  - Energi kinetic electron maksimum yang keluar dari logam, jika logam disinari dengan cahaya yang panjang gelombangnya  $4500 \text{ \AA}$
  - Potensial henti yang menahan keluarnya electron
- Cahaya dengan panjang gelombang  $600 \text{ \AA}$  menyinari permukaan logam yang fungsi kerjanya  $0,3 \times 10^{-19} \text{ J}$ . Tentukan :
  - energi kinetic maksimum electron foto
  - kecepatan electron keluar dari logam
  - potensial henti
- Sebuah electron bergerak dengan energi kinetic  $4 \times 10^{-18} \text{ J}$ . Hitunglah :
  - beda potensial yang mempercepat electron
  - momentum electron
  - panjang gelombang de Broglie elektron

4. Diketahui grafik hubungan antara energi kinetic maksimum electron dengan frekuensi penyinaran dalam efek foto listrik :



Tentukan :

- tetapan Plank
  - frekuensi ambang
  - fungsi kerja logam
- Elektron dapat terlepas bila disinari dengan cahaya yang panjang gelombangnya  $4400 \text{ \AA}$ . Tentukan besarnya fungsi kerja logam !
  - Dalam suatu sel fotolistrik diperlukan beda potensial  $0,7 \text{ V}$  antara katode dan anode untuk menghentikan arus foto listrik ketika katode disinari oleh cahaya yang panjang gelombangnya  $6 \times 10^{-7} \text{ m}$ . Berapa energi ambang logam ?
  - Fungsi kerja logam Na adalah  $2,1 \text{ eV}$ . Berapa kelajuan maksimum electron foto yang dipancarkan oleh cahaya dengan panjang gelombang  $5600 \text{ \AA}$  ?
  - Diketahui hasil percobaan efek foto listrik berikut :

Dari data tersebut, tentukan :

- tetapan Plank
  - fungsi kerja logam
- Seberkas sinar X dengan panjang gelombang  $6,0 \times 10^{-14} \text{ m}$  menumbuk sebuah proton bermassa  $1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$  yang diam. Sinar X terhambur dengan sudut  $120^\circ$  terhadap arah semula. Tentukan panjang gelombang sinar X yang terhambur !
  - Hitung pergeseran panjang gelombang untuk sebuah foton cahaya yang menumbuk sebuah electron bebas dan dipantulkan balik!

### Evaluasi

- Kuantitas energi yang terkandung dalam sinar UV yang panjang gelombangnya  $3300 \text{ \AA}$  adalah  $\dots \times 10^{-19} \text{ J}$ 
  - 2
  - 3
  - 3,3
  - 6
  - 6,6
- Seseorang mendeteksi 5 buah foton pada panjang gelombang  $5500 \text{ \AA}$  dalam waktu  $90 \text{ ms}$ . Daya yang diterima mata adalah  $\dots \text{ W}$ 
  - $2 \times 10^{-22}$
  - $2 \times 10^{-20}$
  - $2 \times 10^{-19}$
  - $2 \times 10^{-17}$
  - $2 \times 10^{-15}$
- Permukaan bumi menerima radiasi matahari rata-rata  $1,2 \text{ kW/m}^2$  saat terik. Jika panjang

gelombang rata-rata radiasi  $6620 \text{ \AA}$ , maka banyak foton per detik dalam berkas sinar matahari seluas  $1 \text{ cm}^2$  secara tegak lurus adalah ...buah

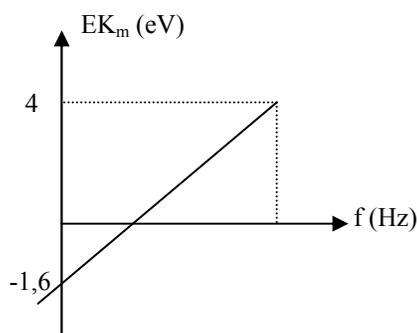
- $5 \times 10^{17}$
  - $4 \times 10^{17}$
  - $3 \times 10^{17}$
  - $2 \times 10^{17}$
  - $1 \times 10^{17}$
- Panjang gelombang cahaya yang dipancarkan oleh lampu monokromatis  $100 \text{ W}$  adalah  $5,5 \times 10^{-7} \text{ m}$ . Cacah foton per sekon yang dipancarkan adalah  $\dots \times 10^{20}$  buah
    - 280
    - 200
    - 2,6
    - 2,8
    - 2,0
  - Logam Kalium fungsi kerjanya  $2,21 \text{ eV}$  disinari cahaya UV dengan panjang gelombang  $2500 \text{ \AA}$ . Energi kinetic electron yang dipancarkan adalah  $\dots \text{ eV}$ 
    - 3,6
    - 2,76
    - 0,276
    - 0,3
    - 0,4
  - Sebuah logam tepat akan melepaskan electron jika dikenai sinar dengan panjang gelombang  $\lambda$ . Jika panjang gelombang sinar

No	Frekuensi cahaya	Potensial henti
1	$0,75 \times 10^{15} \text{ Hz}$	1,22
2	$0,50 \times 10^{15} \text{ Hz}$	0,19

aka energi kinetic maksimum foto electron =

E. Jika panjang gelombang sinar  $\frac{1}{3} \lambda$ , maka energi kinetic maksimumnya menjadi ...

- $\frac{1}{3} E$
  - $\frac{2}{3} E$
  - $\frac{4}{3} E$
  - $2E$
  - $3E$
- Frekuensi ambang Natrium  $4,4 \times 10^{14} \text{ Hz}$ . Besarnya potensial henti bagi natrium saat disinari dengan cahaya yang frekuensinya  $6 \times 10^{14} \text{ Hz}$  adalah  $\dots \text{ V}$ 
    - 0,34
    - 0,40
    - 0,44
    - 0,66
    - 0,99
  - Perhatikan grafik berikut :



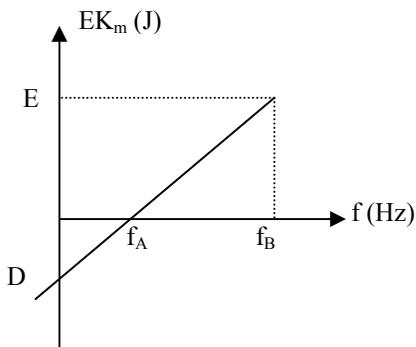
Dari data tersebut :

- 1) energi foto electron yang terpancar besarnya 0 – 4,4 eV
- 2) energi minimal untuk melepas electron 1,6 V
- 3) panjang gelombang cahaya maksimum yang digunakan  $8 \times 10^{-7}$  m
- 4) Jika intensitas cahaya diperbesar, bentuk grafik tidak berubah

Pernyataan yang benar adalah ...

- a. 1,2,3
- b. 1,3
- c. 2,4
- d. 4
- e. semua benar

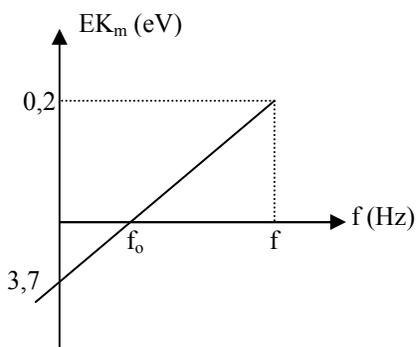
9. Perhatikan grafik berikut :



Jika tetapan Planck adalah  $h$ , besarnya fungsi kerja logam adalah ...

- a.  $0,25 hf_A$
- b.  $0,5hf_A$
- c.  $hf_A$
- d.  $0,5hf_B$
- e.  $hf_B$

10. Perhatikan grafik berikut :



Dari grafik tersebut, besarnya frekuensi foton  $f$  adalah  $\dots \times 10^{14}$  Hz

- a. 48
- b. 21
- c. 14
- d. 9,5
- e. 8,9

11. Dari keadaan diam electron dipercepat berturut-turut dengan beda potensial 100 V dan 400 V. Perbandingan panjang gelombang de Broglie adalah ...

- a. 1:4
- b. 1:2
- c. 3:4
- d. 2:1
- e. 4:1

12. Hasil percobaan fotolistrik yang tidak dapat dijelaskan dengan fisika klasik adalah ...

- 1) electron keluar dari katode yang disinari cahaya
- 2) tidak keluarnya electron dari katode yang terbuat dari logam tertentu bila disinari cahaya merah
- 3) makin tinggi intensitas cahaya, makin banyak electron yang keluar dari katode
- 4) electron segera keluar dari katode jika disinari cahaya meskipun intensitasnya kecil

Pernyataan yang benar adalah ...

- a. 1,2,3
- b. 1,3
- c. 2,4
- d. 4
- e. semua benar

13. Elektron bergerak dengan kelajuan  $2,2 \times 10^7$  m/s, akan memiliki panjang gelombang sebesar  $\dots \times 10^{-11}$  m

- a. 2,6
- b. 3,0
- c. 3,3
- d. 3,6
- e. 4,0

14. Pada efek Chompton, foton yang menumbuk electron mengalami perubahan panjang gelombang sebesar  $\frac{h}{2mc}$ . Besarnya sudut

hamburan yang dialami foton adalah  $\dots^\circ$

- a. 30
- b. 60
- c. 90
- d. 120
- e. 180

15. Percobaan yang dilakukan Chompton menunjukkan bahwa :

- 1) gelombang elektromagnetik mempunyai momentum
- 2) energi gelombang elektromagnetik terkuantisasi
- 3) efek yang terjadi pada percobaan memenuhi hukum kekekalan momentum
- 4) panjang gelombang sinar yang dimaburkan menjadi lebih kecil

Pernyataan yang benar adalah ...

- a. 1,2,3
- b. 1,3
- c. 2,4
- d. 4
- e. 1,2,3,4