

MATA KULIAH : FISIKA DASAR II  
KODE MK : EL-122  
Dosen : Dr. Budi Mulyanti, MSi

#### **Pertemuan ke-14**

#### **CAKUPAN MATERI**

1. TEORI RELATIVITAS KHUSUS
2. EFEK FOTOLISTRIK
3. GELOMBANG DE BROGLIE
4. ATOM HIDROGEN
5. DIAGRAM TINGKATAN ENERGI

#### **SUMBER-SUMBER:**

1. Frederick Bueche & David L. Wallach, Technical Physics, 1994, New York, John Wiley & Sons, Inc
2. Tipler, Fisika Untuk sains dan Teknik (terjemah oleh Bambang Soegijono), Jakarta, Penerbit Erlangga, 1991
3. Gancoli Douglas C, Fisika 2 (terjemah), 2001, Penerbit Erlangga, Edisi 5.
4. Sears & Zemansky, Fisika Untuk Universitas 3 (Optika & Fisika Modern), 1991, Jakarta-New York, Yayasan Dana Buku Indonesia
5. Frederick J. Bueche, Seri Buku Schaum Fisika, 1989, Jakarta, Penerbit Erlangga
6. Halliday & Resnick, Fisika 2, 1990, Jakarta, Penerbit Erlangga
7. Sutrisno, Seri Fisika Dasar (Fisika Modern), 1989, Bandung, Penerbit ITB

## **FISIKA MODERN DAN FISIKA ATOM**

### **6.1. TEORI RELATIVITAS KHUSUS**

Pandangan paham Newton tentang alam memberi suatu keterangan nalar dasar yang sangat membantu kita memahami sejumlah besar gejala-gejala alam. Pandangan tentang alam

ini, yang sebenarnya berasal dari Galileo, mengatakan bahwa ruang dan waktu adalah mutlak. Juga dikemukakan setiap percobaan yang dilakukan dalam kerangka acuan (pengamatan) kita baru bermakna fisika apabila dikaitkan terhadap kerangka acuan mutlak.

Einstein (1905) berhasil mementuk landasan bagi konsep-konsep baru tentang ruang dan waktu, yang dikenal dengan teori relativitas khusus. Teori ini didasarkan pada 2 postulat berikut:

1. Asas Relativitas, hukum-hukum Fisika tetap sama pernyataannya dalam suatu sistem kerangka acuan inersial (bergerak dengan kecepatan tetap)
2. Laju cahaya memiliki nilai tetap  $c$  yang sama dalam semua sistem inersial.

Postulat pertama menegaskan bahwa tidak ada satupun percobaan yang dapat dilakukan untuk mengukur kecepatan terhadap ruang mutlak, yang dapat diukur adalah **laju relatif** dari 2 sistem inersial. Postulat kedua menegaskan bahwa bahwa laju cahaya adalah sama bagi semua pengamat, sekalipun mereka dalam keadaan gerak relatif (sangat berlawanan dengan Fisika klasik!)

### Akibat Postulat Einstein

1. Pemuluran waktu (*time dilation*)

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

Seorang pengamat O' yang bergerak dengan laju  $u$  terhadap pengamat O akan mengukur waktu yang lebih lama dari pada pengamat O yang diam. Semua jam akan berjalan lambat menurut seorang pengamat yang bergerak relatif, termasuk jam biologis, pertumbuhan usia karena efek pemuluran waktu.

2. Penyusutan panjang (*length contraction*)

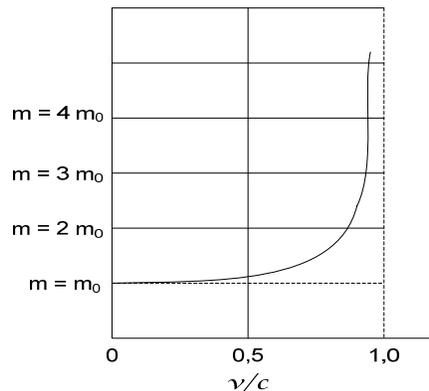
$$L' = L \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}$$

Penyusutan panjang terjadi hanya sepanjang arah gerak, semua komponen panjang lainnya (tegak lurus arah gerak) tidak terpengaruh

3. Massa relativistik

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

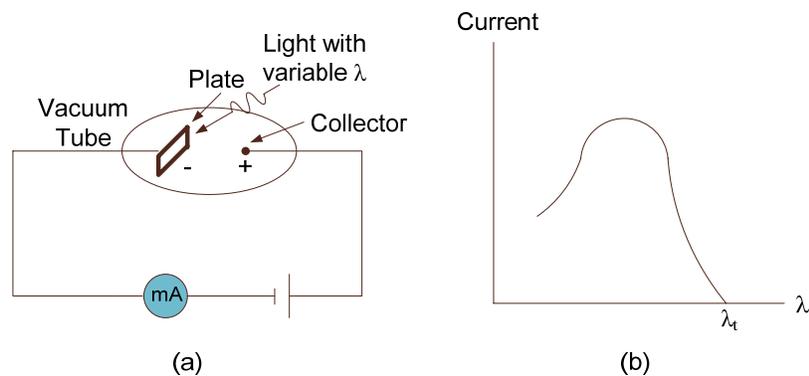
6. Energi relativistik total  $E = mc^2$



Gambar 6.1. grafik massa terhadap kecepatan

### 6.2 EFEK FOTOLISTRIK

Pada tahun yang sama ketika ia mengemukakan teori relativitas, Einstein mengemukakan hasil penemuannya. Ia menemukan bahwa berkas cahaya kadang berlaku sebagai berkas partikel, yaitu dengan menerangkan efek fotolistrik. Efek ini sendiri ditemukan oleh **Heinrich Hertz (1888)**.

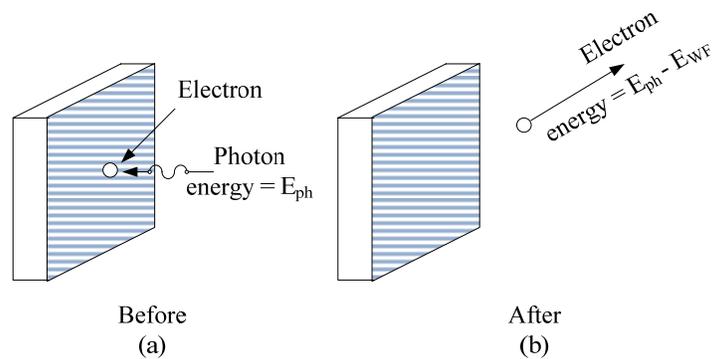


Gambar 6.2. Efek Fotolistrik

Dengan melihat gambar 6.2. nampak bahwa sebuah piringan logam berlaku sebagai katoda dan kawat berlaku sebagai Anoda berada di dalam tabung *vacuum* , dimana tidak ada arus yang mengalir dalam tabung. Ketika cahaya menerangi piringan logam, ditemukan ada arus yang mengalir. Arus tersebut hanya mengalir jika  $\lambda$  cahaya  $< \lambda_t$  ambang. Misalkan cahaya warna biru dapat menyebabkan arus, sedangkan cahaya warna merah tidak.  $\lambda_t$  bergantung bahan katoda. Banyak yang telah mencoba menerangkan efek fotolistrik, tapi kurang berhasil. Nampak bahwa berkas cahaya memberikan energi kepada elektron dalam piringan logam dan menyebabkan elektron keluar dari logam.

Berkas cahaya yang lemah pun asalkan mempunyai  $\lambda < \lambda_t$  dapat melontarkan elektron. Sebaliknya sekuat apapun berkas cahaya selama  $\lambda > \lambda_t$  tidak dapat melontarkan elektron, kecuali jika katoda dipanaskan. Tapi ini bukan peristiwa fotolistrik lagi tapi emisi termionik.

Einstein menjelaskan peristiwa fotolistrik dengan asumsi bahwa cahaya terkuantisasi dan menumbuk elektron valensi dalam katoda. Jadi cahaya berisi paket-paket cahaya kecil dengan laju  $c$ . Paket-paket ini disebut foton atau kuantum cahaya. Jadi karena cahaya berisi paket-paket atau foton, ketika foton menumbuk permukaan logam, foton memberikan semua energinya kepada elektron. Jika elektron telah punya cukup energi, elektron akan keluar dari permukaan logam dan menjadi bebas.



Gambar 6.3. Elektron yang terlepas dari logam pada efek fotolistrik

Energi yang diperlukan untuk melontarkan elektron dari suatu materi disebut energi fungsi kerja. Dituliskan sebagai  $E_{WF}$ . Sehingga elektron yang teremisikan mempunyai energi:

$$\frac{1}{2}mv^2 = E_f - E_{WF}$$

Kecepatannya tidak dalam daerah relativitas. Energi foton  $E_f$  harus  $\geq E_{WF}$  agar dapat membebaskan elektron.

$$\text{Energi foton: } E_f = \frac{hc}{\lambda} = hf$$

$$\text{Dimana : } h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ JS}$$

$$h = \textit{konstanta Planck}$$

Einstein mengasumsikan bagian radiasi EM dapat direpresentasikan baik sebagai paket-paket (kuantum) energi ataupun sebagai gelombang, bergantung apa yang kita tinjau. Efek fotolistrik memberikan inspirasi kepada Einstein untuk menyimpulkan sesuatu tentang cahaya dan semua radiasi EM.

Berkas radiasi EM dengan panjang gelombang  $\lambda$  dan frekuensi  $f$  berisi sekumpulan foton. Masing-masing foton merupakan paket kecil energi yang menjalar dengan kecepatan  $c$  seperti juga berkas cahaya. Energi tiap foton adalah  $\frac{hc}{\lambda}$  atau  $hf$ .

Nampak bahwa energi foton bertambah jika  $\lambda$  berkurang. Foton-foton cahaya biru mempunyai energi lebih besar dari pada foton-foton cahaya merah. Foton-foton sinar X mempunyai energi yang sangat tinggi karena  $\lambda$  sinar X sangatlah pendek.

Cahaya yang direpresentasikan sebagai foton dapat dianggap sebagai partikel tak bermassa dengan energi  $hf$  dan hanya bergerak dengan kecepatan  $c$ . sekarang kita tahu bahwa konsep Einstein adalah benar. Radiasi EM mempunyai dua sisi mata uang. Jika ia bergerak dalam ruang, ia berperilaku sebagai gelombang, yaitu dapat berinterferensi, difraksi dan sebagainya. Tetapi ia juga berperilaku sebagai seberkas pulsa-pulsa energi foton, jika ia berinteraksi sebagai partikel dengan materi. Energi masing-masing foton ditentukan oleh  $\lambda$  atau  $f$  berkas radiasi.

### 6.3. GELOMBANG DE BROGLIE

Sebagaimana radiasi EM yang dapat direpresentasikan sebagai partikel tak bermassa(foton) dengan energi dan momentum, materi dapat juga direpresentasikan sebagai gelombang yang menjalar dengan kecepatan materi tersebut.

Penemuan Einstein bahwa gelombang cahaya kadang berperilaku sebagai partikel (foton) mengilhami **Louis de Broglie** (1923) bahwa partikel juga mempunyai sifat gelombang. Menurut de Broglie (1923) semua benda padat dapat berperilaku gelombang, artinya mempunyai panjang gelombang  $\lambda$ .

Dari analogi, energi foton  $= \frac{hc}{\lambda}$  atau  $\lambda_f = \frac{hc}{E_f} = \frac{hc}{m_f c^2} = \frac{h}{m_f c}$

Sehingga  $\lambda_{part} = \frac{h}{mv}$

Dimana :  $m_f c = \text{momentum foton}$

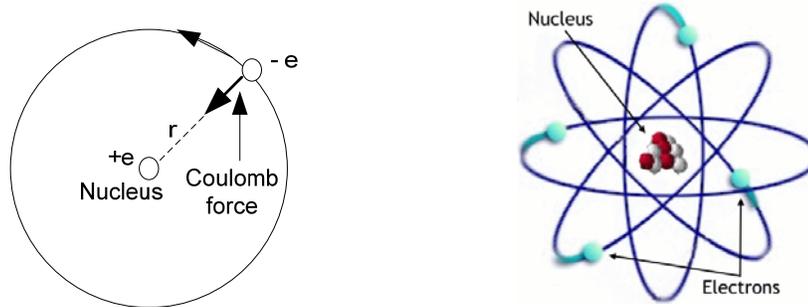
$mv = \text{momentum partikel}$

Ternyata dari eksperimen terbukti bahwa partikel, misalnya elektron juga berperilaku sebagai gelombang, yaitu mengalami interferensi dan difraksi. Contoh lain misalkan bola yang bergerak dengan laju beberapa meter per detik mempunyai  $\cong 1 \times 10^{-33} m$ .  $\lambda$  ini terlalu kecil untuk menghasilkan efek interferensi dan difraksi.

Untuk elektron yang telah dipercepat melalui sumber 100 V, elektron akan bergerak dengan laju  $6 \times 10^6 \text{ m/s}$ . dari persamaan de Broglie maka  $\lambda_e = 0,12 \text{ nm}$ . untuk dapat mengamati interferensi elektron, kita harus menggunakan film dengan tebal 0,1 nm atau celah yang berjarak 0,1 nm. Ini dapat dilakukan dengan menggunakan X-tal.

## 6.4 ATOM HIDROGEN

Atom terdiri dari inti yang bermuatan positif dan dikelilingi oleh orbit elektron-elektron yang bermuatan negatif. Penemuan de Broglie mengenai sifat gelombang elektron membantu untuk memahami struktur atom seperti pada gambar 5.4. Inti atom berisi muatan positif yang sama besarnya dengan jumlah muatan negatif elektron-elektron. Elektron dalam orbitnya ditopang oleh gaya tarik listrik antara inti positif dan elektron.



Gambar 6.4. Atom Hidrogen

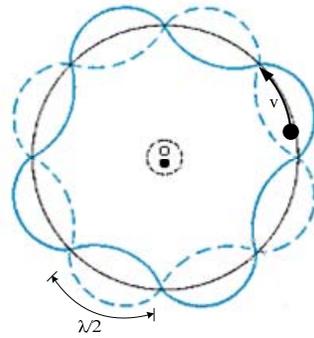
Gaya tarik listrik tersebut menyebabkan diperlukannya percepatan sentripetal untuk mempertahankan elektron-elektron tetap pada orbitnya.

Pada tahun 1913 **Neils Bohr** mengemukakan teori untuk atom H. satu elektron H disebabkan oleh gaya *Coulomb* untuk elektron dengan massa  $m$  dan muatan  $e$  pada orbit dalam radius  $r$  dengan laju  $v$ .

$$\begin{aligned} \text{gaya sentripetal} &= \text{gaya Coulomb} \\ \frac{mv^2}{r} &= k \frac{e^2}{r^2} \end{aligned}$$

Dimana:  $k = 9 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$ ,  $k = \text{konstanta Hk. Coulomb}$

Pada setiap orbit: gelombang elektron de Broglie membentuk gelombang tegak sepanjang lintasannya (lihat gambar 6.5.).



Gambar 6.5. Gelombang tegak

Agar sesuai dengan eksperimen, Bohr mengasumsikan bahwa elektron hanya mengelilingi inti pada orbit tertentu. Bohr tidak memberikan alasannya. Nampak pada gambar elektron mengelilingi inti dengan orbit yang memiliki satu keliling dengan  $\lambda$  tertentu. Nampak pada gambar gelombang elektron de Broglie ada  $4\lambda$  dalam 1 orbit. Jika elektron terus mengorbit, gelombang de Broglie akan saling menguatkan, atau gelombang beresonansi jika panjang orbit sebesar  $\lambda$ ,  $2\lambda$  atau  $3\lambda$ .

Dengan kata lain gelombang elektron akan beresonansi hanya jika lingkaran orbit adalah  $n\lambda$ , dengan  $n$  bilangan bulat positif sehingga dikatakan elektron akan mengelilingi inti dengan orbit tertentu yang disebut orbit stabil.

Jika orbit diasumsikan berupa lingkaran maka radius sebanding dengan  $n^2$ , dimana  $n$  jumlah gelombang yang melintasi 1 lingkaran. Hal tersebut dapat diterangkan sebagai berikut:

Untuk orbit stabil:

$$\begin{aligned} \text{lingkaran orbit} &= n \cdot (\lambda_e) \\ 2\pi r_n &= n \frac{h}{mv} \quad ; n = 1, 2, 3 \dots \dots \dots \end{aligned}$$

Dari rumus sebelumnya:

$$\frac{mv^2}{r} = k \frac{e^2}{r^2}$$

maka kita peroleh:

$$V_n = \frac{2\pi k e^2}{nh}$$

dan

$$r_n = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 k e^2 m}$$

Untuk  $n = 1$  diperoleh:  $r_1 = 5,3 \times 10^{-11} \text{ m}$   
 $v_1 = 2 \times 10^6 \text{ m/s}$

Harga tersebut sangat masuk akal mengingat diameter atom H adalah kira-kira  $10^{-10} \text{ m}$ .

$$\text{Untuk selanjutnya: } r_n = (5,3 \times 10^{-11} \text{ m}) \times n^2$$

Orbit dengan  $n$  yang sangat besar hampir  $\infty$ , elektron dapat dikatakan bebas dari atom. Energi elektron pada suatu orbit adalah negatif dari energi elektron yang hilang (yang dipancarkan) ketika elektron menjadi terikat dari keadaan bebasnya.

Elektron mempunyai 2 macam energi:

- Energi kinetik, karena selalu bergerak
- Energi potensial listrik

Umumnya  $EP_L$  ini berharga nol jika elektron di  $\infty$ , karena inti menarik elektron, elektron akan kehilangan energi potensialnya jika bergerak mendekati inti. Disini  $EP$  elektron menjadi negatif. Jika kedua energi dijumlahkan pada orbit ke- $n$  diperoleh:

$$\begin{aligned} E_n &= \frac{-2\pi^2 k^2 e^4 m}{n^2 h^2} \\ &= -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV} \end{aligned}$$

Harga tersebut negatif karena kita memilih energi potensial di  $\infty$  sebagai nol.

## 6.5 DIAGRAM TINGKATAN ENERGI

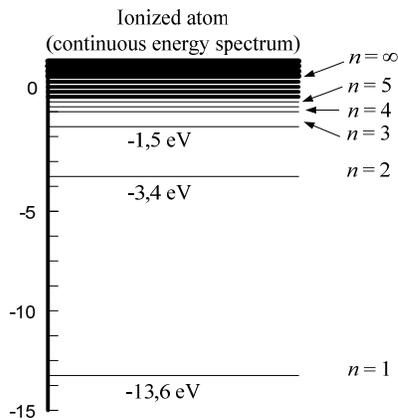
Tingkatan energi atom H ditunjukkan oleh diagram berikut ini:

Untuk	$n = 1$	$\rightarrow$	$E_1 = -13,6 \text{ eV}$
	$n = 2$	$\rightarrow$	$E_2 = -3,4 \text{ eV}$
	$n = 3$	$\rightarrow$	$E_3 = -1,5 \text{ eV}$
	⋮		
	$n \rightarrow \infty$	$\rightarrow$	$E_\infty = 0$

Semua tingkatan untuk  $n = 8$  ke  $n = \infty$  nampak sangat berimpit sehingga dikatakan spektrum energi kontinu. Ada 3 hal penting dari diagram di atas:

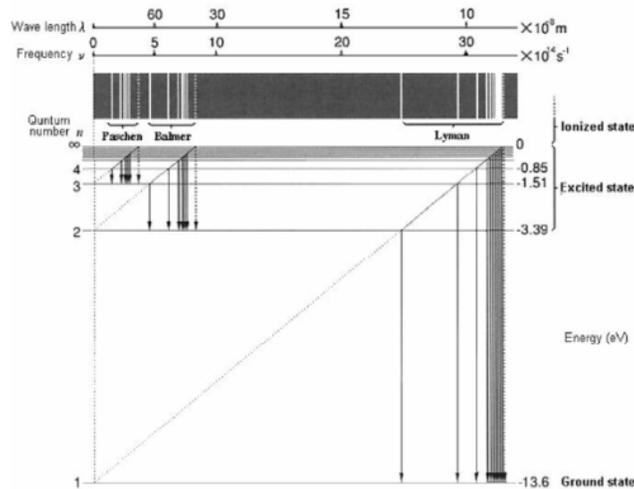
1. Energi adalah terkuantisasi,  $E_1, E_2, E_3$ , dst.
2. Pada  $n = 1$ , dikatakan keadaan dasar (*ground state*) ini berhubungan dengan energi terendah yang dimiliki atom.

3. Energi-Energi di atas  $E = 0$  berhubungan dengan atom terionisasi. Jika elektron jauh  $\infty$  dari inti atom, energi atom  $E_x = 0$ . Namun jika elektron tidak hanya bebas namun juga bergerak maka  $E > 0$ . Sesudah ionisasi, energi kinetik elektron dapat berharga berapapun. Disini energi energi tidak terkuantisasi ( $E > 0$ ). Dari diagram nampak bahwa di atas level  $E = 0$ , bercampur menjadi energi kontinu sehingga disebut daerah kontinu.



Gambar 6.6. Diagram Tingkat Energi

Spektrum emisi hidrogen dapat dijelaskan dengan diagram tingkat energi seperti nampak pada gambar 5.7.



Gambar 5.7. Diagram tingkatan energi hidrogen

Dalam gas yang tereksitasi tinggi, ada banyak atom dalam masing-masing keadaan. Pada saat atom jatuh ke keadaan yang lebih rendah, atom akan memancarkan foton. Panjang

gelombang foton yang dipancarkan bermacam-macam tergantung beda energi antara dua tingkat keadaan. Perbedaan energi yang besar mengakibatkan  $\lambda$  yang dipancarkan kecil.

Perhatikan transisi pada **deret Lyman**, ini merepresentasikan atom yang jatuh ke keadaan dasar ( $n = 1$ ) dari keadaan-keadaan yang lebih tinggi. Kita tahu untuk atom hidrogen  $E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}$ . Sehingga energi yang hilang ketika atom jatuh dari keadaan  $ke - n$  ke  $n = 1$  adalah:

$$E_n - E_1 = 13,6 \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ eV} \quad n = 2,3, \dots$$

Energi tersebut dipancarkan sebagai foton. Panjang gelombang yang dipancarkan foton pada deret Lyman menjadi:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{13,6}{hc} \text{ eV} \left( 1,60 \times 10^{-19} \frac{J}{eV} \right) \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$\frac{1}{\lambda} = 1,0974 \times 10^{-7} \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) m^{-1} \quad , n = 2,3, \dots \dots$$

Dengan cara yang sama kita dapat menunjukkan transisi ke  $n = 2$  yaitu spektrum garis **deret Balmer**. Demikian juga untuk **deret Paschen** ( $n = 3$ ). Dengan demikian diagram tingkat energi memberikan cara yang mudah untuk menginterpretasikan spektrum emisi atom

Soal-soal:

1. a. Sebutkan 2 buah postulat Einstein!  
b. Sebutkan 4 hal sebagai akibat postulat Einstein tersebut!
2. Berapa kecepatan partikel yang memiliki massa,  $m = 1,050m_o$
3. Panjang gelombang ambang untuk Na dalam efek photolistrik adalah 546 nm,
  - (a) Berapa energi minimal dalam joule yang diperlukan agar elektron pada logam Na dapat keluar dari logam?
  - (b) Jika cahaya dengan panjang gelombang 480 nm menumbuk logam Na, berapa besar energi elektron yang keluar dari atom Na?  
hidrogen.
4. Berapa kecepatan partikel yang memiliki massa,  $m = 1,010m_o$  (solusi  $v = 4,2 \times 10^7 \text{ m/s}$ )

5. Menurut Einstein berapakah energi yang dapat dihasilkan oleh benda dengan massa 1 kg? Bandingkan dengan energi hasil pembakaran 1 kg (setara dengan 1,5 liter) bensin, yaitu  $E = 4,8 \times 10^7 J$ . (solusi  $1,89 \times 10^9$  kali energi hasil pembakaran)
6. Di dalam akselerator nuklir, proton dapat dipercepat melalui beda potensial  $\Delta V = 10^9 V$
- (a) Berapa rasio  $m/m_0$ ? Petunjuk : mula-mula cari energinya melalui  $\Delta E = q\Delta V$ , kemudian gunakan rumus  $\Delta E = \Delta mc^2$  dimana  $\Delta m = m - m_0$ , sehingga solusi  $m/m_0 = 2,065$
- (b) Berapa c kah kecepatan proton tersebut? Solusi  $\frac{v}{c} = 0,875$
7. Sebuah stasiun radio dapat meradiasikan daya sebesar 5000 W pada frekuensi  $1,2 \times 10^6 Hz$  (a) berapa energi foton dalam joule yang diradiasikan? (b) berapa energi foton dalam eV yang diradiasikan? Petunjuk :  $E = h\nu$
8. Panjang gelombang ambang untuk Na dalam efek photolistrik adalah 546 nm,
- (c) Berapa energi minimal dalam joule yang diperlukan agar elektron pada logam Na dapat keluar dari logam?  $E = h\frac{c}{\lambda}$
- (d) Berapa energi minimal dalam eV yang diperlukan? Solusi : 2,27 eV
9. Jika cahaya dengan panjang gelombang 480 nm menumbuk logam Na, berapa besar energi elektron yang keluar dari atom Na? solusi:  $E = 4,96 \times 10^{-20} J$