

Sifat Gelombang-Partikel

Prof. Dr. B. Suprpto Brotosiswojo



PENDAHULUAN

Pada Modul Pertama ini Anda diajak untuk mengetahui hal-hal yang mendasar tentang fisika kuantum.

Pada Kegiatan Belajar 1, dijelaskan mengenai gelombang yang menjalar dan memindahkan energi tanpa harus meningkatkan media-mediana, lalu mengenai sifat-sifat partikel yang mengikuti hukum-hukum Snellius.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa elektron merupakan partikel pembawa muatan listrik terkecil yang memiliki massa diam dan juga menunjukkan sifat-sifat gelombang. Sedangkan partikel neutron adalah salah satu unsur inti atom yang tidak bermuatan, di mana sekarang sudah digunakan untuk melihat struktur kisi-kisi benda padat. terakhir de Broglie mengusulkan suatu pemahaman baru bahwa objek alam yang merupakan massa juga memiliki sifat gelombang.

Pada Kegiatan Belajar 2, dijelaskan sifat-sifat atom. Diterangkan pula bila pada sinar putih yang dilewatkan pada gas hidrogen menunjukkan deret absorpsi yang menunjukkan sebuah keteraturan tertentu.

Niels Bohr menjelaskan bahwa elektron adalah gelombang dimana lintasan melingkar yang stabil hanyalah lingkaran yang panjang kelilingnya merupakan kelipatan dari panjang gelombang elektron sesuai dengan saran de Broglie.

Setelah mempelajari modul ini, secara umum Anda dapat menjelaskan sifat gelombang-partikel. Secara khusus, Anda diharapkan dapat:

1. menjelaskan pengertian gelombang;
2. menjelaskan pengertian cahaya;
3. menjelaskan gejala difraksi cahaya;
4. menjelaskan cahaya sebagai gelombang elektromagnet;
5. menjelaskan percobaan fotolistrik;
6. menjelaskan pengertian partikel;

7. menjelaskan sifat gelombang;
8. menjelaskan tentang atom;
9. menjelaskan spektrum panjang gelombang;
10. menjelaskan deret-deret spektrum;
11. menjelaskan lintasan elektron;
12. menghitung persoalan energi foton.

KEGIATAN BELAJAR 1

Foton dan Elektron

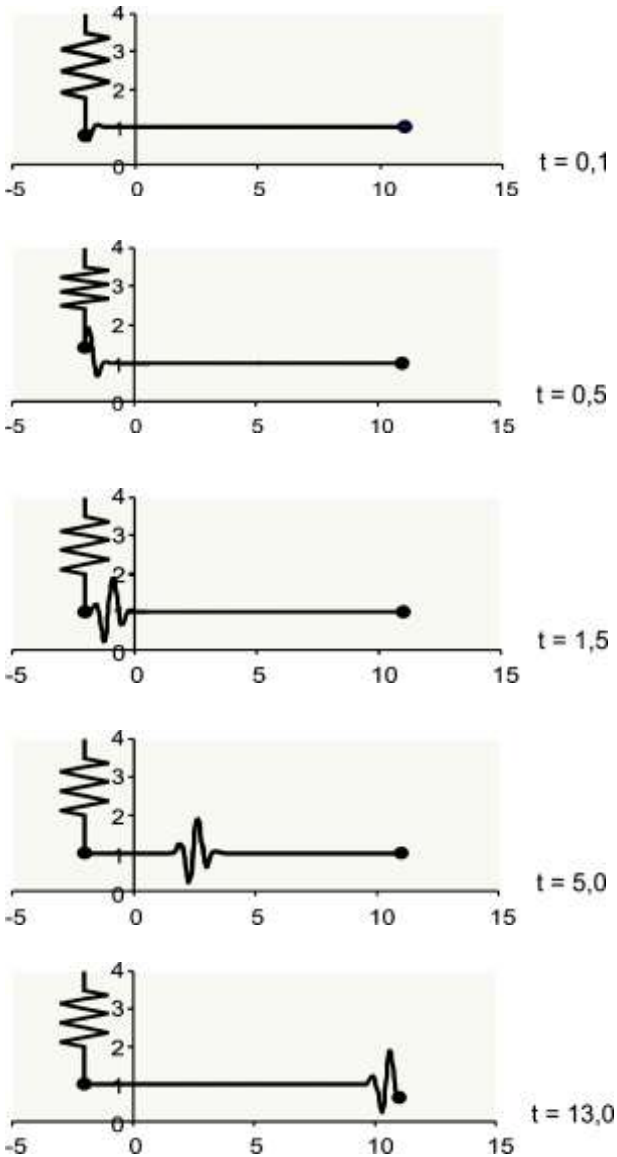
Untuk mengingatkan apa yang ingin kita pelajari dalam Fisika Kuantum ini, ada baiknya kita menengok kembali hasil eksperimen yang tidak dapat dijelaskan dengan pengetahuan kita tentang Fisika Klasik. Pertanyaannya berkisar pada “Apakah sesungguhnya elemen yang membentuk cahaya itu?”. Kita tidak begitu saja dapat menjawabnya, karena wujudnya tidak serupa benda-benda lain seperti meja, kursi, daun, pasir, dan sebagainya. Jadi kita hanya dapat *memperkirakan* wujudnya berdasarkan sejumlah peragai yang ditampilkannya.

Ketika kita mengamati pantulan cahaya pada cermin datar yang mengikuti aturan Snellius, peragainya mirip dengan kumpulan “partikel” (seperti butir-butir pasir) yang ditembakkan ke permukaan benda datar. Berdasarkan modal anggapan semacam itu nyatanya kita dapat melakukan rekayasa membuat teleskop yang membuat benda yang letaknya jauh tampak lebih dekat. Kita juga dapat membuat mikroskop yang memungkinkan kita mengamati benda-benda dengan ukuran kecil tampak lebih besar dan dapat diselidiki rinciannya.

Anggapan tersebut menjadi meragukan ketika kita mengamati gejala difraksi cahaya yang melalui dua celah sempit yang sejajar. Gejala semacam itu dapat dipahami jika kita menafsirkan cahaya itu sebagai gelombang. Anggapan ini pun mampu menerangkan gejala pantulan serta pembiasan cahaya saat melewati media transparan lain seperti kaca atau air. Demikian pula halnya dengan peragai cahaya yang dilewatkan pada sebuah kisi-kisi dengan celah-celah teratur yang banyak jumlahnya itu.

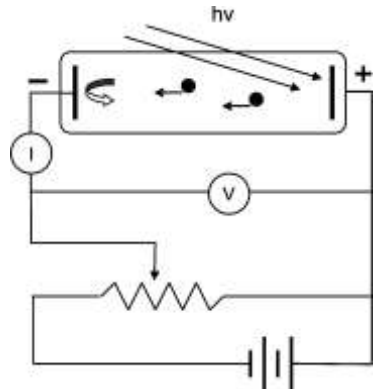
Anggapan bahwa cahaya itu gelombang lebih dikuatkan lagi setelah dibuat perbandingan antara kecepatan isyarat-isyarat cahaya dengan cepat rambat gelombang elektromagnetik seperti kita pelajari pada gejala kelistrikan dan kemagnetan. Tak perlu disangsikan lagi bahwa cahaya itu gelombang elektromagnetik, seperti halnya dengan gelombang radio, maupun sinar-X. Maka upaya mendalami liku-liku gelombang elektromagnetik yang memerlukan “bahasa” matematika yang cukup “berat” pun berlanjut, hampir semua kesimpulan yang diturunkan dari garapan matematika tentang

gelombang elektromagnetik ini tampaknya memang sesuai dengan apa yang kita amati.



Gambar 1.1.

Untuk mengenali lebih lanjut tentang peragai gelombang, kita ambil contoh yang sederhana yang mudah dilukis. Kalau kita menggetarkan ujung kiri seutas tali dalam waktu singkat maka gerakan tersebut akan dirambatkan oleh tali tadi sehingga lukisannya dalam waktu yang berturut-turut seperti tampak pada Gambar 1.1. Berarti tali tadi memindahkan energi yang tadinya ada di sebelah kiri, berpindah ke sebelah kanan dari mekanika kita tahu bahwa energi yang diberikan ketika kita menggetarkan ujung kiri tali sebanding dengan kuadrat amplitudo getarannya. Begitulah kira-kira yang tentunya terjadi pada getaran yang menimbulkan gelombang elektromagnetik, atau cahaya. Kalau proses getarannya berjalan terus menerus maka energi yang tiba di sebelah kanan juga berlangsung terus menerus, itu kita sebut **intensitas**, yang dalam ruang berarti banyaknya energi per satuan luas penampang penerimanya, per satuan waktu.



Gambar 1.2.

Pada percobaan fotolistrik, jika pada sebuah permukaan logam dijatuhkan sinar cahaya, energi cahaya yang tiba di situ digunakan sebagian untuk melepaskan elektron dari permukaan logam. Misalkan E_0 merupakan energi yang digunakan untuk melepaskan satu elektron dari permukaan logam elektroda yang ada di kanan (+), E_k energi kinetik elektron yang lepas dari logam maka untuk jumlah energi yang diambil oleh elektron tersebut dari cahaya yang tiba adalah

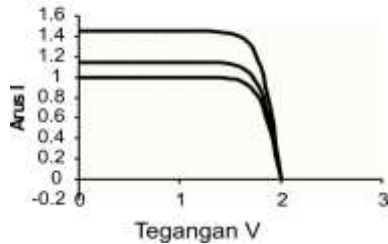
$$E = E_0 + E_k \dots\dots\dots (1.1)$$

Pada eksperimen fotolistrik yang pertama kali dilakukan oleh Heinrich Hertz th.1887 itu dipasang *potensial listrik penghambat gerak kinetik elektron* yang timbul akibat penyinaran tadi. Itu dapat diamati dari pembacaan arus I pada Ampermeter. Jika kita menaikkan nilai tegangan penghambat V , suatu saat $I = 0$, berarti elektron tidak sampai pada elektroda yang ada di kiri (-), jadi $E_k = eV$. Makin tinggi nilai E_k makin tinggi

besarannya tegangan penghambatnya V yang harus digunakan untuk menghambat elektron agar tidak mengenai kutub elektrodanya.

Semula diperkirakan bahwa jika intensitas cahayanya dinaikkan ada harapan bahwa E_k juga akan naik, artinya kita harus memasang V yang lebih tinggi untuk menghambat elektron. Tetapi hasil pengukuran tidak menunjukkan sifat seperti itu. Intensitas cahaya yang tinggi memang menaikkan besarnya arus I , tetapi untuk membuat $I = 0$ tegangan V yang harus dipasang untuk itu **nilainya tetap saja**, sebut saja V_0 , selama cahaya (monokromatik) yang dipakai mempunyai frekuensi yang sama. Seperti tampak pada Gambar 1.3, untuk skala ini $V_0 = 2$.

Grafik I-V untuk beberapa intensitas cahaya monokromatis

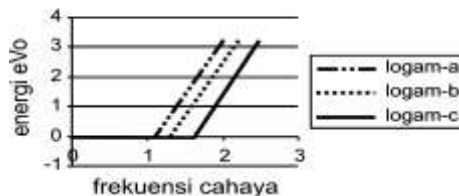


Gambar 1.3.

Nilai V_0 untuk menghambat gerak elektron yang ditimbulkan oleh penyinaran ternyata tidak bergantung pada intensitas cahaya yang dikenakan pada permukaan logam tadi, melainkan bergantung pada **frekuensi ν** dari cahaya yang digunakan. Makin tinggi frekuensi cahaya yang digunakan, makin besar nilai tegangan penghambat yang harus kita pasang. Hubungan antara tegangan penghambat V_0 dengan besarnya frekuensi cahaya ternyata linier sifatnya. Tentunya fakta itu dapat kita tafsirkan bahwa energi kinetik elektron $E_k = h\nu$, dengan besaran h yang nilainya konstan.

Ketika bahan elektrodanya diganti dengan logam lain, ternyata juga bahwa fakta tersebut di atas tetap berlaku. Gambar 1-4 melukiskan

Energi penghambat elektron Untuk logam elektroda yang berbeda



Gambar 1.4.

hubungan antara eV_0 dengan frekuensi cahaya ν untuk logam elektroda yang berbeda. Tampak bahwa nilai h yang sama berlaku untuk logam-logam yang berbeda. Kalau dihitung dari hasil pengukuran eksperimen, nilai $h = 6.256 \times 10^{-34}$ Joule-detik.

Tentu saja ini bertentangan dengan anggapan kita bahwa cahaya itu berupa gelombang, meskipun fakta-fakta lainnya cukup banyak yang dapat dijelaskan dengan anggapan bahwa cahaya itu gelombang elektromagnetik.

Albert Einstein merupakan orang pertama yang memberi tafsiran yang agak “aneh”. Katanya, memang tak perlu disangkal bahwa cahaya itu gelombang elektromagnetik, tetapi munculnya selalu **berbentuk paket** dalam satuan energi yang besarnya sama dengan $h\nu$, di mana ν adalah frekuensi gelombang tadi dan besaran h bernilai $h = 6.256 \times 10^{-34}$ Joule-detik. Memang, Max Planck beberapa tahun sebelumnya pernah menyarankan bahwa teori tentang distribusi pancaran cahaya dari “benda hitam”, akan sesuai dengan hasil pengamatan eksperimen kalau diasumsikan bahwa cahaya itu muncul dalam bentuk paket-paket energi sesuai dengan frekuensinya ν yang besarnya $h\nu$. Nilai h yang digunakan untuk mencocokkan dengan data eksperimen memang sama dengan yang diperoleh dari efek fotolistrik ini kalau kita menerima tafsiran Einstein. Artinya, tafsiran Einstein itu mendukung usulan Planck. Karena dukungan fakta eksperimen sudah cukup banyak yang menopang anggapan Einstein maka akhirnya disepakati paket gelombang cahaya itu dinamakan **foton**. Bahkan Albert Einstein kemudian menerima Hadiah Nobel sebagai penghargaan akan gagasannya yang membuka cakrawala berpikir baru dalam ilmu fisika. Persoalan yang selanjutnya dihadapi oleh ilmu fisika adalah, bagaimana caranya kita memperlakukan perangnya cahaya, kalau tafsirannya semacam itu.

Elektron adalah objek alam lainnya yang ingin kita bahas. Kalau cahaya sebagai berkas kumpulan foton kehadirannya dapat dilihat dengan mata maka objek yang namanya elektron itu juga tidak dapat dikenali secara langsung oleh pancaindra kita. Kita mengenalinya lewat deteksi kita tentang adanya aliran listrik, atau kadang-kadang juga lewat jejak yang ditinggalkannya seperti pada layar pesawat televisi. Sifat khasnya adalah bahwa elektron itu “membawa” muatan listrik. Tentang muatan listrik sendiri kita juga tidak tahu seperti apa “rupa”nya. Dari pelajaran fisika sebelumnya, tentunya Anda juga diberi informasi bahwa muatan listrik itu mirip cahaya tadi, ada **paket-terkecilnya**. Elektron sebagai objek benda yang ukurannya kecil diperkirakan membawa hanya **satu paket-muatan**, yang besarnya $e = 1.602 \times 10^{-19}$ Coulomb. Nilai tersebut dapat diperoleh dari hasil percobaan Millikan. Dari sejumlah eksperimen, Anda juga sudah diperkenalkan bahwa elektron itu objek yang **punya massa**, jadi mirip dengan benda-benda yang lazim kita kenal seperti meja, kursi, bola, ..dan sebagainya. Bahkan juga

sudah ada pengukuran untuk mengetahui berapa besar massanya itu, yaitu (kalau tidak bergerak) $m = 9.1 \times 10^{-31}$ kg. Kalau lihat kenyataannya saat ini ada alat yang namanya **Mikroskop Elektron**. Kata mikroskop menunjukkan bahwa alat itu digunakan untuk membantu kita mengamati benda yang ukurannya kecil. Kalau kita menggunakan alat pelacak sinar cahaya, “rincian” objek yang dapat kita bedakan maka kemampuan resolusinya hanya terbatas pada ukuran sekitar 800 nanometer. Mikroskop elektron dibuat agar kita dapat mempelajari “rincian” objek dengan resolusi yang lebih kecil lagi. Jadi kalau upaya tersebut nyatanya dapat diwujudkan maka kita boleh menyimpulkan bahwa elektron pun memiliki perangai seperti gelombang. Bahkan komponen inti atom yang disebut neutron, yang berkas-berkasnya dapat diperoleh dari sebuah reaktor-nuklir, sekarang juga telah dimanfaatkan sebagai alat pelacak sama halnya dengan cahaya maupun elektron. Jadi objek yang punya massa seperti elektron atau neutron tampaknya juga memiliki sifat seperti gelombang. Ada usul dari de Broglie bahwa setiap objek itu memiliki baik sifat “partikel” maupun “gelombang”. Pada usul tersebut aturan kuantitatifnya begini. “Partikel” yang momentumnya p itu “gelombang” dengan panjang-gelombangnya

$$\lambda = \frac{h}{p} \dots\dots\dots (1.2)$$

dengan h tetapan Planck yang nilainya = 6.256×10^{-34} Joule-detik.

Fisika kuantum muncul dalam kaitan upaya kita untuk dapat memahami dan memperlakukan objek yang hasil pengamatan kita menunjukkan baik sifat “partikel” maupun sifat “gelombang” secara bersama-sama.



LATIHAN

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

- 1) Gelombang transversal dapat diungkapkan dalam bentuk fungsi matematika seperti misalnya fungsi sinus atau fungsi cosinus. Bila ada fungsi $y(s, t) = 15.\sin(3s + 7t)$, dengan pengertian: s adalah jarak linier

dari titik $s = 0$, arah s positif adalah arah ke kanan, sedangkan arah ke kiri adalah arah s negatif (satuan meter); variabel t menunjuk besaran waktu (satuan detik). Jika fungsi semacam itu melukiskan gelombang transversal berapakah nilai “panjang-gelombang”nya, ke mana arah geraknya (ke kiri atau ke kanan), berapa kecepatannya (dalam satuan meter per detik).

- 2) Bila gelombang seperti pada soal-1 bertemu dengan gelombang yang arahnya berlawanan $z(s,t) = 15 \cdot \cos(3s - 7t)$, apa yang terjadi?
- 3) Jelaskan menurut pendapat Anda bahwa gejala difraksi dapat diterangkan dengan menganggap bahwa cahaya itu gelombang dan tidak dapat diterangkan dengan menganggap bahwa cahaya itu kumpulan partikel-partikel!

Petunjuk Jawaban Latihan

- 1) Sebuah fungsi seperti $\sin(x)$ bersifat periodik dengan periode 2π , artinya $\sin(x + 2\pi) = \sin(x)$. Pada ungkapan fungsi $y(s,t)$ bentuk gelombang itu kita amati setiap saat t . Karena itu kalau mau melihat lukisan gelombangnya kita harus menetapkan dulu nilai t , misalnya $t = 1$. Saat itu $y(s,t) = 15 \cdot \sin(3s + 7)$. Panjang gelombang adalah lukisan untuk satu periode, jadi kita cari nilai s lain katakanlah s_2 sehingga $(3s_2 + 7 + 2\pi) = 3s_1 + 7$. Berarti panjang gelombangnya $(s_2 - s_1) = \frac{2\pi}{3}$ meter. Bagaimana dengan arah penjarannya ke kiri (arah s negatif) atau ke kanan (arah s positif)? Untuk itu kita perhatikan misalnya di mana puncak gelombang itu pada $t = 1$. Saat itu puncak gelombang terjadi ketika nilai sinusnya maksimum, berarti $3s + 7 = \frac{\pi}{2}$ atau $s = \frac{\left[\frac{\pi}{2} - 7 \right]}{3}$. Lalu apa yang terjadi pada saat berikutnya misalnya pada $t = 1.1$? Puncak gelombang akan berubah lokasi di s

$$\text{(baru) sehingga } [3s \text{ (baru)} + 7.7] = \frac{\pi}{2}, \text{ atau } s \text{ (baru)} = \frac{\left[\frac{\pi}{2} - 7.7\right]}{3}.$$

Karena s (baru) lebih kecil daripada s maka gelombangnya menjalar ke kiri (arah s negatif). Kecepatan menjalarnya kita dapat sebagai perubahan letak puncak $[s \text{ (baru)} - s]$ meter dibagi dengan selang waktu

$$t, \text{ yaitu } 0.1 \text{ detik. Nilainya} = \frac{\left[\frac{-0.7}{3}\right]}{0.1} = -\frac{7 \text{ meter}}{3 \text{ detik}} \text{ (tanda minus}$$

menunjuk arah kecepatan).

- 2) Dari pengalaman soal nomor 1, gelombang yang dilukiskan oleh $z(s,t)$ bergerak berlawanan arah dengan gelombang yang dilukiskan oleh $y(s,t)$. Di pelajaran fisika dasar kita tahu bahwa paduan dua gelombang yang sama dengan arah yang berlawanan akan menghasilkan gelombang tegak (*standing wave*) yang tidak menjalar ke kiri atau ke kanan, bahkan hasil paduannya menunjukkan adanya titik-titik simpul (simpangannya selalu berharga nol) yang lokasinya tetap. Sayangnya, pada soal ini $y(s,t)$ bentuknya fungsi sinus, sedangkan $z(s,t)$ bentuknya fungsi cosinus, jadi kita belum yakin apakah yang terjadi pada paduannya berbentuk gelombang tegak. Untuk mengetahui apa hasilnya, kita buat perbandingan hitungan. Mengapa kalau keduanya fungsi sinus hasilnya berupa gelombang tegak. Kita kenal aturan

$$\sin(a) + \sin(b) = 2 \cdot \sin\left[\frac{(a+b)}{2}\right] \cdot \cos\left[\frac{(a-b)}{2}\right]$$

berarti

$$\sin(3s+7t) + \sin(3s-7t) = 2 \cdot \sin(3s) \cdot \cos(3s+7t)$$

Faktor kedua ruas kanan memang mengandung variabel t jadi berubah dengan waktu t , tetapi faktor yang mendahuluinya $2\sin(3s)$ tidak mengandung t , bahkan pada tempat-tempat s tertentu, misalnya $3s = 0$, $3s = \pi$, $3s = 2\pi \dots$ dan seterusnya nilainya $= 0$. Jadi amplitudonya di tempat-tempat itu selalu berharga nol. Di situlah letak simpul-simpul hasil paduan dua gelombang tadi.

Nah, sekarang kalau yang kita garap adalah paduan antara fungsi sinus dan fungsi cosinus, rumusnya menjadi

$$\sin(a)+\cos(b) = 2.\cos\left[\frac{(a+b)}{2}\right].\sin\left[\frac{(a-b)}{2}\right]$$

$$\sin(3s+7t) + \cos(3s-7t) = 2.\cos(3s).\sin(3s-7t)$$

Tetap saja kita temui faktor kedua ruas kanan merupakan fungsi dari waktu t , tetapi didahului oleh faktor $2.\cos(3s)$ yang tidak mengandung t .

Juga faktor ini nilainya = 0 pada lokasi $3s = \frac{\pi}{2}$, $3s = \frac{3\pi}{2}$,dst. Jadi

hasil paduannya tetap berupa gelombang tegak yang tidak menjalar ke mana-mana, hanya letak simpul-simpul bergeser sebesar $\frac{\pi}{6}$.

- 3) Seandainya cahaya itu kumpulan partikel maka partikel-partikel tersebut akan berjalan lurus. Yang mengenai celah akan terus, sedangkan yang tidak mengenai celah akan dipantulkan kembali. Akibatnya intensitas terkuat yang dicatat pada layar akan terletak pada dua tempat, yaitu yang sejajar letaknya dengan celah-celah tersebut. Apakah gejala tersebut dapat diterangkan dengan anggapan cahaya itu gelombang penjelasannya diterangkan oleh Huygens, Anda harus menggunakan lukisan penjalaran gelombang dalam dimensi-2, banyak simulasi di internet yang dengan jelas menjelaskan proses itu. Sebagai salah satu prinsip dasar dari dukungannya adalah sifat interferensi gelombang, dengan demikian dimungkin-kannya intensitas terkuat yang muncul pada layar justru terletak pada pertengahan dari dua garis yang sejajar dengan kedua celah.



RANGKUMAN

Gelombang, yang wujudnya kita amati pada air laut, atau dawai, dalam fisika kita abstraksikan dalam bentuk yang lebih teratur dengan ungkapan seperti fungsi sinus atau cosinus. Pada media seperti air laut atau dawai gelombang transversal itu menjalar dan memindahkan energi tanpa harus memindahkan media medianya.

Cahaya dari perwujudan sifatnya dalam pemantulan dan pembiasan, dapat ditafsirkan (model Newton) sebagai rentetan “partikel” yang

memantul kalau mengenai permukaan, serta membias kalau pindah dari media yang satu ke media yang lain mengikuti hukum Snelius.

Model Newton tidak dapat menerangkan gejala difraksi bila cahaya tersebut melintasi sebuah atau dua buah celah yang sempit. Model lain (Huygens) menafsirkan cahaya sebagai gelombang. Model ini dapat menerangkan baik gejala difraksi maupun juga gejala pemantulan dan pembiasan (aturan Snelius).

Pengukuran kecepatan rambat cahaya menghasilkan nilai pada orde 300.000 km/detik. Nilai itu sama dengan kecepatan gelombang elektromagnetik yang diturunkan lewat hasil pengukuran konstanta listrik dan konstanta magnet, sehingga diperkirakan cahaya itu gelombang elektromagnet.

Hasil pengukuran pada percobaan fotolistrik menunjukkan bahwa tidak mendukung paham cahaya sebagai gelombang elektromagnet seperti yang kita peroleh dari aturan kelistrikan dan kemagnetan yang “biasa” itu. Menurut Einstein, walaupun cahaya itu gelombang, energinya harus berpaket sebanding dengan frekuensinya. Satuan perbandingan tadi nilainya $h = 6.256 \times 10^{-34}$ Joule-detik, yang dikenal sebagai tetapan Planck.

Hasil pengamatan lain juga menunjukkan bahwa elektron, yang kita yakini merupakan “partikel” pembawa muatan listrik terkecil, yang memiliki massa (diam) sebesar $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg ternyata juga menunjukkan sifat-sifat gelombang. Sekarang ada mikroskop elektron yang dapat digunakan seperti alat mikroskop biasa tetapi pelacaknya bukan berkas cahaya melainkan berkas elektron. Resolusi yang dapat dimunculkan oleh mikroskop elektron dapat dibuat melebihi resolusi mikroskop cahaya (biasa) yang terbatas hanya sampai panjang gelombang 400 nanometer.

Partikel neutron yang merupakan salah satu unsur inti atom yang tidak bermuatan dan mempunyai massa sekitar 1000 kali massa elektron juga menunjukkan sifat-sifat gelombang, sehingga sekarang juga sudah digunakan untuk “melihat” struktur kisi-kisi benda padat.

Diusulkan oleh de Broglie sebuah pemahaman baru bahwa objek alam yang punya massa itu juga memiliki sifat gelombang. Ada hubungan antara momentum partikel dengan panjang gelombangnya dalam bentuk panjang gelombangnya λ sama dengan tetapan Planck h dibagi momentum partikel p .

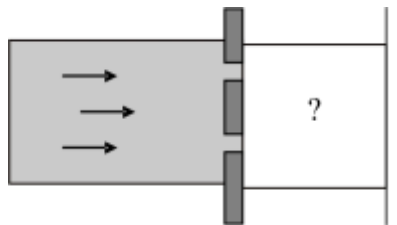
Diharapkan ada cara yang dapat digunakan sebagai resep yang tangguh untuk memahami objek-objek alam dalam skala subatomik ini, maupun memanfaatkan sifat-sifatnya yang terasa “aneh” ini untuk menaikkan kesejahteraan hidup manusia. Resep itu akan dinamakan *mekanika kuantum*.



TES FORMATIF 1

Tes ini dimaksudkan untuk menguji pemahaman Anda sendiri tentang hasil kegiatan belajar yang sudah Anda jalani. Ada empat alternatif jawaban yang tersedia yang menyertainya, untuk sekadar memancing jawaban Anda. Informasi tentang jawaban yang tepat akan diberikan pada akhir modul. *Evaluasinya akan Anda lakukan sendiri.* Oleh karena itu dalam empat alternatif jawaban yang disajikan tidak selamanya hanya ada satu yang “benar”; juga bisa terjadi tidak satupun di antara empat alternatif jawaban yang disajikan itu “benar”. Meskipun demikian cobalah, sebelum sampai pada akhir modul Anda mencari jawaban yang menurut Anda “benar” untuk dicatat dahulu. Catatan Anda itu nantinya dibandingkan dengan informasi pada akhir modul ini.

- 1) Dalil-dalil optika geometri mengenai cermin dan lensa jika diterapkan secara konsisten dapat digunakan untuk membuat alat seperti teleskop yang membuat obyek yang jauh tampak lebih dekat, atau untuk membuat kacamata sehingga memungkinkan mereka yang penglihatannya kabur dapat dibantu sehingga menjadi lebih jelas
 - A. itu sesuai dengan anggapan bahwa cahaya itu partikel-partikel
 - B. itu sesuai dengan anggapan bahwa cahaya itu gelombang
 - C. itu bertentangan dengan anggapan bahwa cahaya itu partikel
 - D. itu bertentangan dengan anggapan bahwa cahaya itu gelombang



- 2) Jika berkas cahaya dari arah kiri dilewatkan pada dua celah yang sempit, seperti terlihat pada gambar di bawah ini maka terjadi gejala yang dinamakan **difraksi**. Maksudnya, yang tampak pada layar di sebelah kanan adalah

- A. intensitas cahaya yang merata sepanjang layar (dari bawah hingga atas)
 - B. intensitas cahaya yang terfokus di tengah
 - C. intensitas cahaya yang terfokus di dua lokasi perpanjangan dari lokasi celah
 - D. intensitas cahaya yang berselang seling antara kuat dan lemah
- 3) Hasil percobaan fotolistrik dikatakan tidak mendukung konsep cahaya sebagai semata-mata gelombang. Temuan yang mana dalam eksperimen itu yang membuat kita tidak yakin bahwa cahaya itu semata-mata gelombang adalah
- A. grafiknya berbeda untuk bahan logam a, b, dan c
 - B. grafik intensitas cahaya I terhadap potensial V menuju kepada satu titik
 - C. grafik energi penghambat eV_0 terhadap frekuensi cahaya bentuknya linier
 - D. grafik energi penghambat eV_0 baru berubah dari nol ke nilai positif pada intensitas I tertentu
- 4) Sekarang ada mikroskop elektron yang dapat mengungkap rincian obyek yang ukurannya lebih kecil dari 400 nanometer (batas ukuran terkecil yang sanggup dibedakan oleh mikroskop biasa). Pada dasarnya apa yang dilakukan agar mikroskop elektron tersebut sanggup mengungkap rincian obyek yang ukuran lebih kecil dari 400 nanometer itu?
- A. alat pelacaknya bukan lagi berkas cahaya melainkan berkas elektron
 - B. pelacak yang bentuknya gelombang hanya dapat digunakan untuk membedakan dua obyek yang jaraknya lebih besar daripada gelombang tersebut
 - C. pelacak yang bentuknya gelombang hanya dapat digunakan untuk membedakan dua obyek yang jaraknya lebih kecil daripada gelombang tersebut
 - D. elektron yang terdapat pada berkas harus diusahakan agar memiliki momentum lebih besar dari 1.7×10^{-34} kg.m./detik

- 5) Dari mana kita memperoleh tetapan Planck yang nilainya $h = 6.626 \times 10^{-34}$ Joule-detik?
- dari percobaan fotolistrik
 - dari data spektrum radiasi benda hitam
 - dari gejala difraksi
 - dari prinsip ke tidak-pastian Heisenberg
- 6) Kalau kita menggunakan teorinya de Broglie bahwa benda bermassa yang sedang bergerak itu memiliki sifat gelombang, berapakah panjang gelombang sebuah truk dengan massa 3000 kg yang sedang melaju dengan kecepatan 30 km/detik?
- 9×10^{-34} nanometer
 - 1.2×10^{-29} nanometer
 - 6.6×10^{-2} nanometer
 - 3.6×10^{-24} nanometer
- 7) Sebelum Anda belajar modul Fisika Kuantum tentunya Anda juga sudah pernah belajar modul fisika lainnya, atau dari sumber-sumber lainnya seperti buku atau internet. Coba cari apakah ada yang namanya Efek Compton. Bacalah dengan cermat untuk menjawab pertanyaan berikut, mana di antara 4 pernyataan di bawah ini yang menurut Anda benar.
- Efek Compton melukiskan proses tumbukan dua buah partikel seperti tumbukan dua benda
 - Efek Compton melukiskan proses tumbukan antara sebuah partikel dengan cahaya
 - Pada efek Compton berlaku hukum kekekalan momentum dan hukum kekekalan energi
 - Dari efek Compton ini kita dapat menyimpulkan bahwa cahaya itu juga memiliki perangai partikel.

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 1 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 1.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali

80 - 89% = baik

70 - 79% = cukup

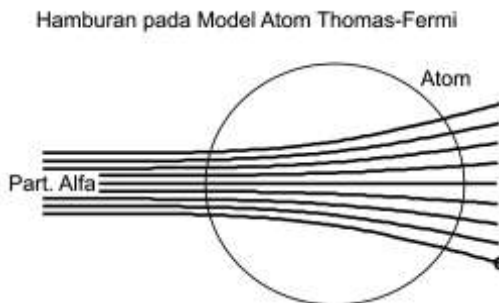
< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan Kegiatan Belajar 2. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 1, terutama bagian yang belum dikuasai.

Kegiatan Belajar 2

Atom

Karena yang namanya atom itu objek yang tidak dapat dilihat dengan mata kita maka cara mengetahuinya seperti apa wujudnya maka dibuat model dalam abstraksi kita. Atom terdiri atas elektron yang kecil ukurannya dan bermuatan negatif sebesar satuan muatan terkecil. Lalu bagian yang positif bentuknya seperti apa ? Yang selama ini dikenal dalam sejarah adalah modelnya Thomas dan Fermi dan modelnya Rutherford. Thomas-Fermi membayangkan muatan listrik positif itu menyebar secara merata dalam bola seukuran atomnya.



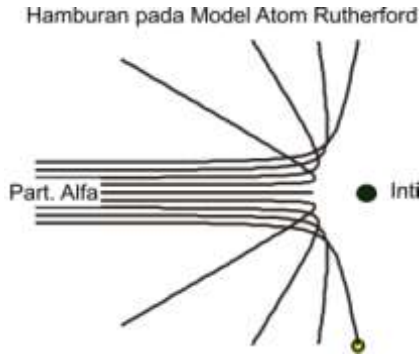
Gambar 1.5.

Hamburan pada Model Atom Thomas-Fermi

Untuk menguji apakah model itu melukiskan situasi yang sesungguhnya, dapat dihitung apa yang terjadi seandainya dilakukan eksperimen dengan menembakkan kumpulan partikel alfa (produk pancaran bahan radioaktif, dengan muatan positif). Berkas partikel alfa tadi tentunya akan ditolak oleh muatan positif yang ada pada inti atom. Diterapkan aturan tolak-menolak muatan sesuai dengan hukum Coulomb. Seperti kita ketahui bersama dari pengetahuan kita tentang listrik, ketika partikel alfa tadi masih ada di luar atom, ia akan “melihat” muatan positif dalam jumlah lengkap yang ada pada atom tadi letaknya ada di pusat bola. Tetapi saat partikel alfa tadi memasuki wilayah atom, katakanlah pada jarak R yang lebih kecil daripada jari-jari atom maka yang “terlihat” oleh partikel alfa itu hanya sebagian dari muatan

positif atom, yaitu hanya yang terdapat dalam “bola” berjari-jari R. Makin dekat dengan pusat bola atom makin kecil jumlah muatan yang “terlihat” oleh partikel alfa itu. Kalau digambarkan lintasan-lintasan partikel alfa tadi lukisannya seperti yang tampak pada gambar di atas.

Rutherford membuat model yang lain, yaitu bahwa muatan positif yang ada pada atom itu terkumpul dalam “bola” yang ukurannya sangat kecil dibandingkan dengan ukuran atomnya. Akibatnya, praktis partikel alfa tadi selalu “melihat” muatan yang terkumpul pada pusat atom itu nilainya penuh. Kalau dihitung, lukisan sebaran atau lebih sering disebut hamburan berkas partikel alfa itu akan berbentuk seperti gambar di bawah ini.



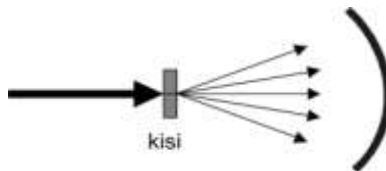
Gambar 1.6.
Hamburan pada Model
Atom Rutherford

Eksperimen menunjukkan bahwa sebaran partikel yang dihamburkan itu bentuknya mirip dengan model yang dicanangkan oleh Rutherford.

Sejak itu model yang digunakan untuk melukiskan atom itu adalah modelnya Rutherford. Berarti sebagian besar ruangan dalam atom yang diperkirakan jari-jarinya pada orde nanometer itu tidak ada materinya, hanya elektron-elektron yang berputar-putar mengelilingi inti atom.

SPEKTRUM ATOM

Tentunya Anda kenal alat yang namanya **spektrometer**, yang intinya terdiri atas “pemecah” sinar putih menjadi warna yang berbeda-beda. Wujud “pemecah warna” tersebut bisa berupa prisma, atau kisi-kisi (*grating*). Skemanya kira-kira seperti tampak pada Gambar 1.7. Ada cahaya misalnya warna putih yang “kaya” dengan pelbagai macam warna datang dari

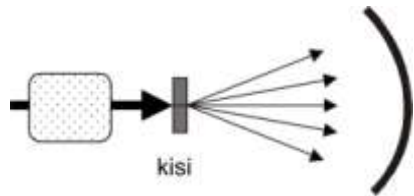


Gambar 1.7a.

arah kiri, mengenai kisi maka warna yang ke luar dari kisi akan menyebar dalam arah-arah yang berbeda sesuai dengan nilai panjang gelombang atau frekuensinya.

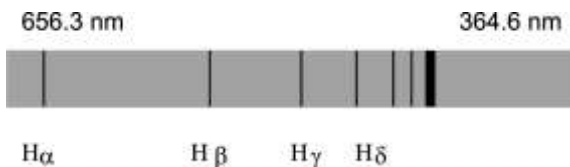
Jika sebuah tabung berisi sejenis gas tertentu diletakkan sebelum sinar putih tadi mengenai kisi maka ada sejumlah warna yang “hilang” dari jajaran warna yang seharusnya ada. Jenis-jenis warna yang “hilang” tadi bergantung pada jenis gas yang diisikan pada tabung tadi. Hal itu dapat ditafsirkan sebagai berikut. Foton dengan warna yang hilang tadi diserap oleh atom dari gas yang dilaluinya, sedangkan foton-foton dengan warna/frekuensi lainnya tidak diserap oleh atom-atom yang ada dalam tabung tadi. Kalau tabungnya berisi gas jenis atom yang lain maka yang diserap adalah warna-warna yang berbeda pula. Ada hubungan antara jenis atom dalam gas dengan warna-warna yang diserap. Spektroskopi semacam ini menjadi alat yang

ampuh untuk melakukan identifikasi jenis atom yang ada dalam gas. Untuk mengetahui apakah di permukaan bulan itu ada oksigen atau tidak, kita tidak perlu pergi ke bulan; cukup mengamati garis-garis absorpsi yang diambil dari berkas sinar matahari yang melalui permukaan bulan.



Gambar 1.7b.

Hasil pengamatan yang menarik adalah untuk atom yang paling sederhana, yaitu atom Hidrogen, warna-warna yang “hilang” tadi tidak hanya satu tetapi berbentuk deretan. Sesuai dengan sejarah penemuannya, ada yang disebut deret Balmer, deret Lyman, ..dan seterusnya. Deret Balmer misalnya meliputi rentang panjang gelombang antara 364.6 nanometer (ultraviolet) hingga 656.3 nanometer (merah).



Gambar 1.8.

Tentu saja data semacam ini akan dikotak-katik oleh para fisikawan apakah ada bentuk keteraturannya. Ditemukan misalnya bahwa panjang gelombang λ dalam deret Balmer itu dapat ditulis dengan rumus

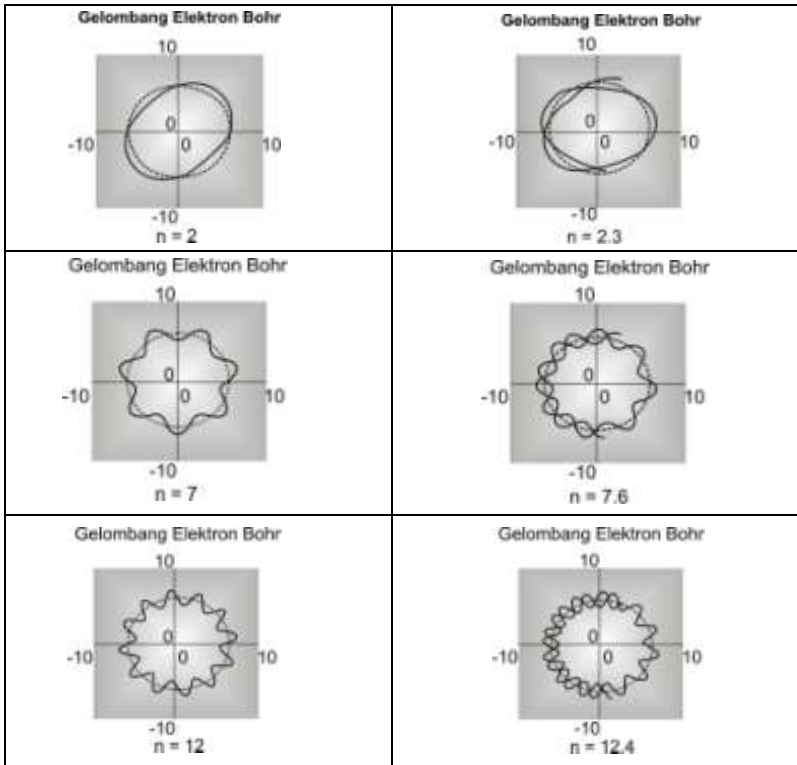
$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5, \quad \dots [1-3]$$

dengan $R = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ dan dikenal kemudian dengan nama **tetapan Rydberg**.

Nah, kalau atom Hidrogen itu menyerap foton hanya dengan nilai panjang gelombang tertentu, lalu apa yang “sebenarnya” terjadi pada sebuah elektron yang mengelilingi inti atom Hidrogen itu?

Secara klasik, kalau ada sebuah objek dengan muatan negatif (elektron) dengan kecepatan tertentu melintasi objek dengan muatan positif (proton), gaya tariknya mengikuti aturan yang sama dengan gaya tarik gerak bulan mengelilingi bumi. Ada bedanya sedikit, sebab menurut aturan listrik dan magnet gerak muatan yang dipercepat akan memancarkan radiasi sehingga secara berturut-turut kehilangan sebagian dari energinya. Kalau melihat fakta hasil pengamatan seperti di ungkap di atas, tampaknya aturan gerak elektron dalam atom Hidrogen itu tidak lagi mengikuti aturan yang kita pelajari dalam fisika selama ini. Lalu aturan barunya seperti apa?

Niels Bohr melihatnya dari kacamata anggapan bahwa elektron itu juga memiliki sifat gelombang. Kalau kita buat model yang sederhana, misalnya bahwa lintasan elektron itu berbentuk lingkaran. Jika panjang keliling lintasan yang dilaluinya merupakan kelipatan dari panjang gelombangnya elektron maka gambar yang kita lihat akan berupa lukisan yang stabil. Sebaliknya jika panjang keliling lingkaran yang dilalui elektron itu bukan kelipatan panjang gelombang elektronnya maka lukisan itu akan berganti-ganti. Kalau proses tersebut berjalan dengan sangat cepat maka kita kehilangan informasi tentang lukisan gelombang dari elektron. Usulnya, elektron hanya mengelilingi proton dalam lingkaran yang merupakan kelipatan dari panjang elektron.



Gambar 1.9.

Gambar 1.9 melukiskan gelombang sepanjang kira-kira satu setengah dari “lintasan klasik” elektron, jika panjang gelombang (kuantum) elektron $\frac{1}{n}$ dari “lintasan klasik” yang berbentuk lingkaran itu.

Tampak perbedaannya antara lukisan untuk n bilangan bulat 2, 7, dan 12, dengan lukisan di sebelahnya jika n = 2.3 atau n = 7.6 atau n = 12.4.

Coba kita lihat konsekuensi dari pemikiran Bohr ini. Anda sudah belajar mekanika benda yang bergerak melingkar beraturan. Jika jari-jari lintasannya r dan kecepatannya v maka hal itu terjadi akibat percepatan yang arahnya sentral yang besarnya $\left(\frac{mv^2}{r}\right)$. Untuk atom Hidrogen tentunya percepatan

yang berarah sentral tadi adalah akibat gaya tarik antara elektron dan proton pada jarak r . Gaya tersebut besarnya $\left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)\left(\frac{e^2}{r^2}\right)$, dengan e muatan elektron.

Jadi kita dapatkan persamaan

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \quad [1-4]$$

Dari sini kita memperoleh kecepatan elektron mengelilingi lintasan r besarnya

$$v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 mr}} \quad [1-5]$$

Menurut aturan hubungan antara “partikel” dengan “gelombang”, persamaan [1-2] maka gelombang elektron itu panjangnya

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{e} \sqrt{\frac{4\pi\epsilon_0 r}{m}} \quad [1-6]$$

Jika lingkaran lintasan elektron harus merupakan kelipatan n dari λ maka hanya jari-jari r_n yang memenuhi hubungan

$$2\pi r_n = n\lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad [1-7]$$

saja yang boleh dilintasi oleh elektron.

$$\text{Berarti} \quad 2\pi r_n = \frac{nh}{e} \sqrt{\frac{4\pi\epsilon_0 r_n}{m}}$$

atau

$$r_n = \left(\frac{h^2 e_0}{\pi m e^2}\right) n^2 \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad [1-8]$$

Jari-jari terkecilnya ($n = 1$) dikenal dengan nama jari-jari Bohr, yang nilainya

$$a_0 \equiv r_1 = 5.292 \times 10^{-11} \text{ m}$$

Dari ungkapan persamaan [1-8], jari-jari lintasan berikutnya menjadi 4 kali, 9 kali, 16 kali, 25 kali,dan seterusnya dari jari-jari Bohr.

Energi total elektron dalam atom Hidrogen itu dapat kita peroleh dari jumlah energi kinetik sebesar $\left(\frac{mv^2}{2}\right)$ dan energi potensial sebesar

$\left(-\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}\right)$. Dengan menggunakan persamaan [1-2-2] kita dapatkan energi

$$\text{totalnya } E = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

Kalau nilai jari-jari lintasan yang diperbolehkan, persamaan [1-8] kita substitusikan maka diperoleh energi atom Hidrogen yang diperbolehkan

$$\text{terbatas pada } E_n = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \left(\frac{1}{n^2}\right) \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad [1-9]$$

Melihat struktur ungkapan energi seperti itu, barangkali dapat ditafsirkan bahwa deret Balmer terjadi waktu cahaya yang diserap memiliki frekuensi ν sehingga energinya $h\nu$ dapat memindahkan elektron dari lintasan dengan $n = 2$, ke lintasan dengan $n = 3, n = 4, n = 5, \dots$ dan seterusnya. Kalau dibandingkan dengan persamaan [1-3] (ingat E_n negatif)

$$\frac{1}{\lambda} = \left(\frac{h\nu}{hc}\right) = \frac{E_n - E_2}{hc} = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad \dots(1.10)$$

di mana c adalah kecepatan jalar cahaya maka besarnya tetapan Rydberg adalah

$$\begin{aligned} R &= \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} \\ &= \frac{(9.109 \times 10^{-31} \text{ kg})(1.602 \times 10^{-19} \text{ C})^4}{8(8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m})(2.998 \times 10^8 \text{ m/s})(6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s})^4} \\ &= 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1} \end{aligned}$$

memang nilainya sesuai dengan hasil spektroskopi.

Jadi, tafsiran semacam itu memang masuk akal. Data-data spektroskopi untuk nilai-nilai panjang gelombang yang diserap lainnya semuanya secara kuantitatif mendukung anggapan semacam ini.

Jadi ada konvergensi antara anggapan Einstein dan Planck tentang cahaya yang meskipun bersifat gelombang tetapi harus berpaket-paket energinya sebanding dengan frekuensinya, dengan tafsiran Bohr yang mengaitkan paket energi foton tadi dengan lintasan-lintasan elektron pada atom Hidrogen yang diperbolehkan.



LATIHAN

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

- 1) Dalam buku-buku fisika disebutkan bahwa massa sebuah elektron itu 9.1×10^{-31} kg. Nilai tersebut diperoleh dari bentuk lintasan geraknya dalam medan magnet. Jelaskan!
- 2) Karena wujud konkretnya tidak bisa dilihat maka dibuatlah model dari struktur sebuah atom. Dua di antaranya yang dianggap “masuk akal” adalah modelnya Thomas-Fermi dan modelnya Rutherford. Pada modelnya Thomas-Fermi muatan positif sebesar muatan elektron itu dibagikan secara merata pada seluruh “bola” sesuai dengan besarnya atom itu, sedangkan modelnya Rutherford muatan positif itu dipusatkan seluruhnya pada titik-pusat “bola” atom. Jika R adalah jari-jari “bola” atom, dan e adalah muatan elektron (tentunya juga sama dengan muatan positif pada atom itu) maka jelaskan hal-hal di bawah ini!
 - a) dalam model Rutherford untuk atom Hidrogen (yang paling sederhana) misalnya, ketika elektron berada pada jarak r dari titik-pusat “bola” atom elektron itu ditarik ke pusat dengan gaya sebesar

$$F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r^2}$$

b) untuk hal seperti pada pernyataan (a) dalam model Thomas-Fermi elektron itu akan ditarik ke pusat dengan gaya $F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r^2}$ untuk

$$r > R \text{ dan } F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{r}{R} \quad \text{untuk } r < R$$

- 3) Satelit komunikasi kita yang namanya Palapa harus diluncurkan secara hati-hati, mengapa?

Petunjuk Jawaban Latihan

- 1) Elektron hanya salah satu komponen dalam atom, sedangkan bilangan Avogadro hanya berkaitan dengan jumlah atomnya, dengan demikian kita dapat memperoleh informasi tentang massa elektron sebab lengkungan lintasan yang akan dibuatnya jika berada dalam medan magnet akan bergantung pada nilai perbandingan antara muatan elektron dengan massa elektron. Jika muatan elektron diketahui dari hasil percobaan Millikan maka massa elektron dapat diperkirakan besarnya. Benda bermuatan yang berada dalam medan listrik, jika bebas dari gaya-gaya lainnya akan bergerak dipercepat beraturan. Percepatannya terkait dengan massanya.
- 2) Pada model Rutherford karena muatan positif terkonsentrasi di pusat atom maka gaya yang bekerja pada elektron tepat seperti gaya tarik Coulomb dua muatan yang berjarak r . Pada model Thomas-Fermi, ketika $r > R$ kasus seperti model Rutherford terjadi. Segera $r < R$ maka kita dapat menerapkan aturan Gauss. Medan listrik pada permukaan bola berjari-jari r , $E(r)$ tentunya sama dan arahnya tegak lurus permukaan bola seperti itu. Medan tersebut hanya ‘melihat’ muatan yang terdapat di dalam bola tersebut yang besarnya $q = \left(\frac{r^3}{R^3} \right) \cdot e$.

Maka, $E(r) \times 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon_0}$. Pada model Thomas-Fermi ini semakin dekat

elektron ke pusat atom gaya tariknya proton justru semakin kecil. Sedangkan pada model Rutherford makin dekat elektron ke inti, semakin besar gaya tariknya proton. Jadi pernyataan dengan menggunakan persamaan gerak klasik model Rutherford memberi peluang lebih banyak bagi elektron untuk mendekati pusat atom. Hati-hati jangan terkecoh dengan gambar yang terdapat pada hamburan Rutherford yang ada pada materi pelajaran. Yang dilukiskan di sana bukan lintasan elektron, melainkan lintasan partikel-alfa yang bermuatan positif.

- 3) Lintasan satelit komunikasi Palapa pemilihannya didasarkan pada kenyataan bahwa bumi kita yang dikitarinya itu juga berputar terhadap porosnya (kutub utara-selatan). Selama 24 jam bumi itu berputar 360° , jadi cukup cepat putarannya. Supaya kalau kita memasang antena parabola yang harus diarahkan pada lokasi satelit tersebut tidak perlu berubah-ubah arah maka gerak Palapa mengelilingi bumi harus serasi dengan perputaran bumi kita. Itulah yang menyebabkan pilihan lintasannya harus tepat benar. Lintasan satelit Palapa harus dipilih agar tidak terpengaruh oleh bulan yang juga mengelilingi bumi kita



RANGKUMAN

Selama ini eksperimen-eksperimen menunjukkan bahwa objek alam yang namanya atom itu terdiri atas kumpulan elektron yang masing-masing membawa satu satuan muatan listrik negatif yang bergerak mengelilingi sebuah inti bermuatan positif yang lokasinya terkumpul di pusat atom tadi. Diperkirakan ukuran jari-jari inti itu hanya sekitar $\frac{1}{1000}$ jari-jari atomnya sendiri.

Kalau ada sinar putih yang dilakukan pada tabung berisi gas tertentu maka spektrum yang dimunculkan ternyata mengandung garis-garis hitam pada sejumlah panjang gelombang tertentu. Ditafsirkan bahwa itu akibat foton-foton pada panjang gelombang tersebut diserap oleh atom-atom yang ada pada gas yang dilalui oleh sinar putih tadi.

Pengamatan yang cermat pada sinar putih yang dilewatkan pada gas hidrogen menunjukkan deretan garis absorpsi yang menunjukkan sebuah

keteraturan tertentu. Deret yang merentang antara warna ultraviolet hingga warna merah, yang dikenal dengan nama deret Balmer menunjukkan bentuk keteraturan yang dapat dituliskan sebagai

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ dengan } n = 3, 4, 5, \dots \text{ dan seterusnya.}, \text{ di mana } \lambda$$

adalah panjang gelombang garis absorpsi, dan R sebuah tetapan yang kemudian dikenal sebagai tetapan Rydberg.

Jika demikian halnya maka lintasan gerak elektron mengelilingi inti atom Hidrogen, hanya terjadi pada jalur-jalur dengan energi yang diskret nilainya. Niels Bohr menggunakan anggapan bahwa elektron itu juga gelombang menunjukkan bahwa lintasan melingkar yang stabil hanyalah lingkaran yang panjang kelilingnya merupakan kelipatan dari panjang gelombang elektron sesuai dengan saran de Broglie.

Aturannya Niels Bohr tadi akan menghasilkan energi-energi diskret yang bentuknya $E_n = -(E_1/n^2)$, dengan $n = 1, 2, 3, \dots$ dan seterusnya. Jika atom Hidrogen hanya menyerap cahaya pada energi $\hbar\omega = \text{selisih energi antara dua nilai } n \text{ yang berbeda}$ maka deret Balmer dapat ditafsirkan sebagai serapan foton dengan energi yang dapat ditulis sebagai

$$\hbar\omega_n = E_1 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n} \right) \text{ dengan } n = 3, 4, 5, \dots \text{ dan seterusnya.}$$

Secara kuantitatif juga ternyata nilai E_1 yang dihitung dengan caranya Niels Bohr akan menghasilkan tetapan Rydberg yang tetap sama dengan yang diperoleh dari hasil pengamatan deret Balmer.



TES FORMATIF 2

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

Tes ini dimaksudkan untuk menguji pemahaman Anda sendiri tentang hasil kegiatan belajar yang sudah Anda jalani. Ada empat alternatif jawaban yang tersedia yang menyertainya, untuk sekadar memancing jawaban Anda. Informasi tentang jawaban yang tepat akan diberikan pada akhir modul. *Evaluasinya akan Anda lakukan sendiri.* Oleh karena itu dalam empat alternatif jawaban yang disajikan tidak selamanya hanya ada satu yang “benar”; juga bisa terjadi tidak satu pun di antara empat alternatif jawaban yang disajikan itu “benar”. Meskipun demikian cobalah, sebelum sampai pada akhir modul Anda mencari jawaban yang menurut Anda “benar” untuk

dicatat dahulu. Catatan Anda itu nantinya dibandingkan dengan informasi pada akhir modul ini.

- 1) Meskipun kita tidak pernah melihat wujudnya seperti apa, tetapi kita yakin bahwa benda-benda seperti kayu, besi, air, gas elpiji, yang ada di alam ini terdiri atas unsur-unsur yang ukurannya sangat kecil yang dikenal dengan nama atom. Mana di antara ungkapan berikut ini menopang keyakinan kita akan adanya unsur-unsur yang namanya atom?
 - A. kayu dapat dipotong-potong menjadi ukuran yang semakin kecil, suatu saat akan sampai pada ukuran paling kecil
 - B. air mengikuti bentuk benda yang ditempatinya, apakah itu sebuah cawan yang lebar atau sebuah pipa yang panjang, atau sebuah cangkir; jadi pasti ada elemen air yang kecil yang mudah berganti tempat untuk menyesuaikan bentuk air itu sesuai dengan tempatnya
 - C. buku pelajaran kimia mengajarkan kita bahwa bahan-bahan alam ini terdiri atas atom-atom
 - D. gas elpiji dapat dipakai untuk membuat api pada kompor pemanas untuk memasak, jadi meskipun tidak tampak wujudnya maka gas tadi mengandung bahan-bahan yang memungkinkan kompor pemanas itu menyala

- 2) Perkiraan ukuran sebuah atom dapat dilakukan dengan
 - A. menggunakan mikrometer
 - B. mengukur berat jenis bahan
 - C. mengukur suhu mendidihnya air
 - D. menggunakan bilangan Avogadro

- 3) Kita meyakini adanya obyek alam yang namanya elektron dari
 - A. pengamatan adanya arus listrik
 - B. percobaan Millikan
 - C. timbulnya bintik-bintik berwarna yang terdapat pada layar pesawat televisi
 - D. pengamatan tetes air dengan mikroskop

- 4) Dalam spektroskopi dikenal istilah spektroskopi pancaran (emisi) dan spektroskopi serapan (absorpsi)
 - A. spektroskopi pancaran terjadi jika sejumlah bahan dinaikkan suhunya, sehingga memancarkan cahaya, dan cahaya itu dianalisis spektrumnya dengan alat spektrometer

- B. spektroskopi serapan terjadi jika pada bahan (biasanya dalam wujud gas) disinari dengan sinar putih, dan cahaya yang telah melewati bahan itu dianalisis spektrumnya dengan alat spektrometer
 - C. spektroskopi pancaran dan spektroskopi serapan memberi informasi yang sama tentang jenis atom atau molekul yang terdapat pada bahan yang sama
 - D. spektroskopi pancaran dan spektroskopi serapan memberi informasi yang tidak sama tentang jenis atom atau molekul yang terdapat pada bahan yang sama
- 5) Gaya tarik gravitasi yang membuat bumi bergerak mengelilingi matahari menurut aturan yang sudah teruji secara tangguh besarnya berbanding terbalik dengan jarak antara bumi dan matahari. Gaya tarik dua muatan listrik yang berlawanan tanda menurut aturan Coulomb besarnya juga berbanding terbalik dengan jarak antara kedua muatan. Karena itu
- A. bentuk lintasan elektron mengelilingi proton dalam atom Hidrogen sama dengan bentuk lintasan bumi mengelilingi matahari, hanya ukuran besarnya berbeda
 - B. bentuk lintasan elektron mengelilingi proton dalam atom Hidrogen tidak sama dengan bentuk lintasan bumi mengelilingi matahari, karena bumi dan matahari tidak bermuatan listrik
 - C. bentuk lintasan elektron mengelilingi proton dalam atom Hidrogen tidak sama dengan bentuk lintasan bumi mengelilingi matahari, karena perbandingan massa antara elektron dengan proton tidak sama dengan perbandingan massa bumi dengan matahari
 - D. bentuk lintasan elektron mengelilingi proton dalam atom Hidrogen tidak sama dengan bentuk lintasan bumi mengelilingi matahari, karena bentuk itu bergantung pada kecepatan awalnya
- 6) Pada model yang digunakan oleh Niels Bohr untuk atom Hidrogen
- A. hanya elektron yang memiliki sifat gelombang, protonnya tidak memiliki sifat gelombang
 - B. baik elektron maupun proton sama-sama memiliki sifat gelombang
 - C. panjang gelombang elektron lebih besar daripada panjang gelombang proton
 - D. panjang gelombang elektron lebih kecil daripada panjang gelombang proton
- 7) Model yang digunakan oleh Niels Bohr untuk atom Hidrogen dikatakan berhasil karena
- A. lintasan elektron yang stabil menghasilkan ukuran yang nilainya sama dengan hasil pengukuran jari-jari atom Hidrogen

- B. tidak memperbolehkan adanya lintasan elektron dengan jari-jari sebarang
- C. menghasilkan hitungan bahwa energi elektron yang lintasannya stabil selalu berbanding terbalik dengan bilangan bulat positif
- D. dapat menerangkan adanya garis-garis absorpsi yang letaknya seperti hasil pengamatan Balmer

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 2 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 2.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali
80 - 89% = baik
70 - 79% = cukup
< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan modul selanjutnya. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 2, terutama bagian yang belum dikuasai.

Kunci Jawaban Tes Formatif

Tes Formatif 1

- 1) Jawaban (A) tentunya benar, sudah cukup banyak model simulasi dengan gerak partikel yang menunjukkan sifat-sifat seperti dirumuskan oleh aturan Snellius. Jawaban (B) juga benar, itu dapat ditunjukkan dengan modelnya Huygens. Setiap kali gelombang cahaya itu maju titik di depannya menjadi pusat gelombang berikutnya. Yang tampak sebagai berkas yang bergerak lurus maju adalah permukaan kumpulan gelombang (*wave-front*) dari pusat-pusat pancaran tadi. Ada beberapa simulasi yang dapat diperoleh di internet yang melukiskan proses gagasannya Huygens ini. Jawaban (C) dan (D) tentunya tidak benar kalau (A) benar dan (B) benar juga.
- 2) Tentunya Anda masih ingat dari pengamatan di laboratorium atau dari informasi yang terdapat pada buku fisika dasar mengenai difraksi, bahwa yang muncul pada layar setelah cahaya melewati dua celah tadi adalah deretan gelap dan terang. Lokasi tempat intensitas yang paling kuat itu letaknya sejajar dengan lokasi pertengahan antara dua celah. Jadi yang benar adalah campuran antara alternatif (B) dan (D).
- 3) Kalau Anda simak dari uraian materi pelajaran, jelas bahwa yang dirasa aneh adalah mengapa intensitas penyinaran tidak berpengaruh pada nilai energi potensial penghambat, yang berpengaruh justru frekuensi cahaya yang digunakan, dan hubungan antara frekuensi cahaya dengan energi potensial penghambat sifatnya linier. Jadi pernyataan (C) benar. Pernyataan (A), (B) dan (D) tidak mendukung keraguan kita akan sifat gelombang cahaya.
- 4) Dari sifat gelombang kita tahu bahwa pernyataan (B) benar dan pernyataan (C) salah. Pernyataan (A) tentunya juga benar karena nama alat itu mikroskop elektron. Tetapi jika (B) benar maka 'gelombang elektron' sebagai pelacaknya harus lebih kecil dari ukuran obyek yang harus kita amati, untuk itu momentum elektronnya harus cukup besar.

Hubungan antara panjang gelombang dengan momentum $\lambda = \frac{h}{p}$ dapat

kita gunakan untuk mencari berapa nilai p agar panjang gelombang itu sekurang-kurangnya lebih kecil dari 400 nanometer. Nilai kira-kira adalah lebih besar dari $\left(\frac{6.626}{4}\right) \times 10^{-27} \frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{detik}}$ atau sekitar

$1.65 \times 10^{-27} \frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{detik}}$. Jadi pernyataan (D) benar.

- 5) Tetapan Planck yang menjadi salah satu pilar yang membedakan aturan kuantum dengan aturan klasik tentunya diperoleh dari beberapa hasil eksperimen yang saling mendukung. Pernyataan (B) benar, bahkan sumber pertama nilai tetapan itu yang dicetuskan oleh Planck. Pernyataan (A) juga benar. Pernyataan (C) salah; sedangkan pernyataan (D) bukan sumber utamanya.
- 6) Sebuah truk yang massanya 3000 kg yang sedang melaju dengan kecepatan 60 km/jam berarti punya momentum sebesar $p = 3000 \times \frac{60\,000 \text{ kg}\cdot\text{m}}{3600 \text{ detik}} = 5 \times \frac{10^4 \text{ kg}\cdot\text{m}}{\text{detik}}$. Maka, panjang gelombang de Broglie untuk obyek semacam itu adalah $\lambda = \frac{h}{p} = \left(\frac{6.626}{5}\right) \times 10^{-38} \text{ m}$ atau λ sekitar 1.2×10^{-29} nanometer. Jadi, yang mendekati hasil hitungan kita adalah pernyataan (B).
- 7) Tentu Anda sudah menemukan dalam catatan Anda atau dalam buku fisika bahwa efek Compton adalah tumbukan antara cahaya (sinar X) dengan obyek partikel (elektron). Hasilnya menunjukkan bahwa kita benar-benar dapat memandang cahaya itu sebagai paket-paket energi (foton) yang perangnya seperti partikel. Pernyataan (B) benar, tentunya juga pernyataan (C) yang berlaku umum, dan yang terpenting adalah pernyataan (D) yang benar.

Tes Formatif 2

- 1) Pernyataan (A) bisa saja memicu anggapan kita tentang atom, tetapi tidak menjamin akan adanya obyek terkecil yang susah dipecah lagi. Pernyataan (B) bisa lebih meyakinkan bahwa bahan itu terdiri atas obyek yang kecil-kecil tetapi tetap belum menjamin tidak dapat diperkecil lagi ukurannya. Pernyataan (C) lebih meyakinkan karena mestinya yang sudah diajarkan begitu lama di sekolah-sekolah seluruh dunia itu bukan sesuatu yang salah. Pernyataan (D) isinya benar tetapi tidak jelas kaitannya dengan yang kita persoalkan.

- 2) Karena wujud atomnya sendiri tidak kelihatan maka pernyataan (A) pasti salah, bagaimana kita bisa mengukur dengan mikrometer kalau obyek yang kita ukur tidak kelihatan. Berat jenis bahan adalah perbandingan antara berat bahan dan volumenya, tidak akan menerangkan tentang ukuran unsurnya yang terkecil. Jadi pernyataan (B) belum menjawab pertanyaannya. Pernyataan (C) juga susah dicari kaitannya dengan ukuran atom. Pernyataan (D) bisa memberi petunjuk tentang ukuran atom, asalkan bahannya berisi atom-atom yang rapat letaknya. Kalau tahu ukuran bahan dan tahu banyaknya atom yang ada di situ mestinya kita dapat membuat perkiraan ukurannya.

- 3) Adanya muatan listrik yang dapat mengalir merupakan indikator bahwa pembawa muatan itu mudah bergerak. Jadi pernyataan (A) boleh dijadikan salah satu pendukung. Percobaan Millikan menyimpulkan bahwa ada nilai muatan yang terkecil sehingga muatan yang kita ukur selalu merupakan kelipatan dari muatan terkecil itu. Karena bisa diamati adanya aliran muatan tentunya ada pembawa muatan yang terkecil itu. Jadi (B) mendukung adanya elektron meskipun secara tidak langsung. Sekarang tentunya adanya elektron tidak lagi disangsikan bahkan sudah banyak dimanfaatkan, di antaranya pada layar televisi (yang masih menggunakan tabung) seperti pernyataan (C). Pernyataan (D) jelas salah.

- 4) Tentunya pernyataan (A) dan (B) benar, karena begitulah definisi spektroskopi pancaran dan serapan. Karena perbedaan antara keduanya hanya menyangkut atomnya memancar atau menyerap foton tentu garis-garis pancaran dan garis-garis serapan akan terletak pada lokasi spektrum yang sama untuk jenis atom yang sama. Jadi pernyataan (C) benar sedangkan pernyataan (D) salah.
- 5) Ada perbedaan mendasar antara gerak benda bermuatan listrik dengan benda yang tidak bermuatan listrik. Aturan listrik magnet menunjukkan bahwa benda bermuatan listrik jika geraknya mengalami percepatan maka akan memancarkan energi. Karena itu elektron yang mengelilingi proton dalam bentuk lengkungan/lingkaran makin lama makin kecil energinya. Karena itu pernyataan (A) tidak benar. Pernyataan (B) benar, hanya informasinya kurang lengkap karena tidak menyebutkan lebih jauh sumber penyebabnya. Pernyataan (C) masuk akal dalam arti bentuknya tidak tepat sama, bahkan yang lebih menentukan sebenarnya lokasi serta kecepatan awalnya. Pernyataan (D) benar tetapi kurang lengkap, sebab bukan hanya kecepatan awalnya, melainkan juga lokasi awal serta perbedaan sifat karena muatan listrik.
- 6) Lukisan model atom Hidrogen menurut Niels Bohr itu mengandaikan kita sedang berada pada pusat atom. Jadi tidak menghiraukan sifat protonnya sendiri. Tentu pernyataan (A) tidak benar. Pernyataan (B) yang benar. Panjang gelombang menurut aturan de Broglie ditentukan oleh momentum benda, bukan hanya massanya. Jadi pernyataan (C) dan (D) tidak bermakna, karena asumsinya tidak lengkap.
- 7) Model Bohr untuk atom Hidrogen menghasilkan lebih dari satu lintasan yang stabil. Maka pernyataan (A) tidak jelas lintasan mana yang dimaksudkannya. Pernyataan (B) memang benar. Pernyataan (C) tidak tepat, seharusnya berbanding terbalik dengan *kuadrat* bilangan bulat positif. Pernyataan (D) benar, dan menjadi salah satu dasar mengapa Bohr dipandang sebagai salah seorang pembuka jalan bagi mekanika kuantum, meskipun modelnya sangat sederhana.

Daftar Pustaka

Arthur Beiser. (1995). *Concepts in Modern Physics*, fifth edition. New York: McGraw-Hill, Inc.

Sigmund Brandt and Hans Dieter Dahmen. (1985). *The Picture Book of Quantum Mechanics*. New York: John Wiley & Sons.

D. Stauffer and H.E. Stanley. (1990). *From Newton to Mandelbrot. A Primer in Theoretical Physics*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.

Walter Greiner. (1994). *Quantum Mechanics, an Introduction*. Springer-Verlag.

Jim Bagott. (1997). *The Meaning of Quantum Theory*. Oxford University Press.

Pada zaman sekarang bahan-bahan untuk membantu pemahaman materi pelajaran juga dapat diperoleh lewat internet. Selain yang bentuknya tulisan seperti modul ini, juga banyak yang bentuknya visual (dapat disaksikan gambarnya), bahkan ada yang sifatnya interaktif, di mana kita boleh mengubah-ubah parameternya. Caranya: panggil pencari materi (*search engine*) seperti Google atau Yahoo, lalu ketikkan topik yang ingin Anda ketahui. Kemudian secara otomatis akan mencarikan bahan-bahan yang berkaitan dengan topik tersebut. Silakan pilih mana yang Anda anggap paling sesuai.