

<b>KODE B1.5</b>	<b>FISIKA MODERN</b> Oleh <b>YUSMAN WIYATMO</b>	<b>JUMLAH JP</b> <b>6</b>
----------------------	---	------------------------------

**A. Standar Kompetensi**

Menganalisis gejala-gejala fisis diskrit pada tingkat atom dan inti atom melalui telaah klasik dan kuantum.

**B. Indikator Esensial**

1. Menjelaskan jumlah foton yang dipancarkan oleh suatu pemancar berdasarkan karakteristik daya dan frekuensi pemancar.
2. Menjelaskan postulat dalam teori atom Bohr yang dapat dipergunakan untuk mengatasi kelemahan teori atom Rutherford.
3. Menentukan jumlah inti yang telah meluruh berdasarkan grafik jumlah partikel sebagai fungsi waktu dari suatu zat radioaktif.
4. Menentukan jenis sinar radioaktif yang keluar dari sumber berdasarkan bentuk lintasannya dalam medan magnet.
5. Menjelaskan sifat-sifat fotoelektron pada peristiwa efek foto listrik.

**C. Materi Pelatihan**

**1. Hipotesis Planck**

Benda hitam yang temperaturnya  $T$  akan memancarkan energi dengan panjang gelombang antara  $\lambda$  dan  $\lambda+d\lambda$  dengan intensitas spesifik  $B_\lambda(T)$  yang memenuhi persamaan:

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \dots\dots\dots(1)$$

Intensitas spesifik sebagai fungsi frekuensi memenuhi persamaan:

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

dengan  $h$  adalah tetapan Planck,  $k$  tetapan Boltzman, dan  $c$  kecepatan cahaya.

Panjang gelombang maksimum dapat ditentukan menghitung deferensial pertama fungsi intensitas spesifik terhadap panjang gelombang sama dengan nol.

$$\frac{dB_\lambda(T)}{d\lambda} = 0 \quad \text{syarat maksimum} \dots\dots\dots(3)$$

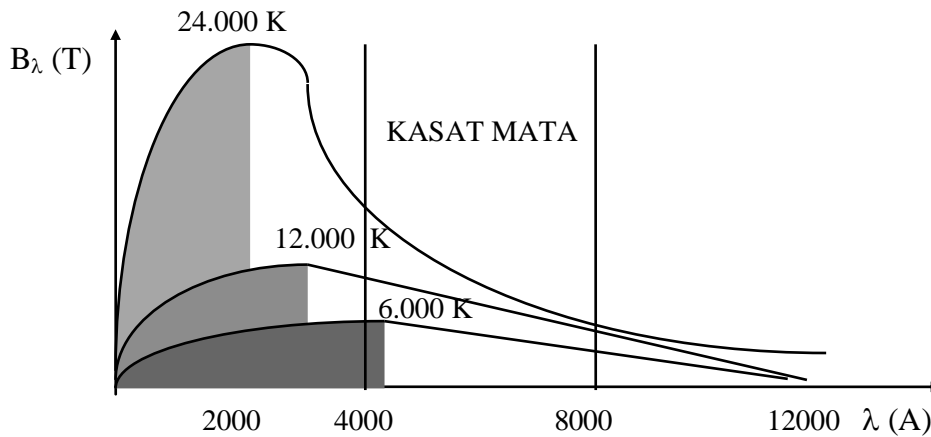
Hasil perhitungan diperoleh bahwa:

$$\lambda_{\max} = \frac{0,2898}{T} \dots\dots\dots (4)$$

dengan  $\lambda_{\max}$  dinyatakan dalam cm dan  $T$  dalam derajat Kelvin (K).

## 2. Hukum Wien

Makin tinggi temperatur benda hitam maka akan semakin pendek panjang gelombang tempat pancaran maksimum itu terjadi. Grafik hubungan antara intensitas spesifik terhadap panjang gelombang dapat dilihat pada Gambar 1 sebagai berikut:



Gambar 1. Intensitas Spesifik Benda Hitam Sebagai Fungsi Panjang Gelombang

Energi total yang dipancarkan benda hitam adalah:

$$B(T) = \int_0^{\infty} B_{\lambda}(T) d\lambda \dots\dots\dots (5)$$

$$B(T) = \frac{\sigma}{\pi} T^4$$

Persamaan (5) di atas dikenal sebagai *persamaan Stefan-Boltzman*. Besar tetapan Stefan-Boltzman adalah:

$$\sigma = \frac{2k^4 \pi^5}{15h^3 c^2} = 5,67 \cdot 10^{-5} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ s}^{-1}$$

Jumlah energi yang dipancarkan tiap  $\text{cm}^2$  permukaan benda hitam per detik ke semua arah dikenal sebagai *fluks energi* benda hitam.

$$F = \pi B(T)$$

$$F = \pi \frac{\sigma}{\pi} T^4 \dots\dots\dots (6)$$

$$F = \sigma T^4$$

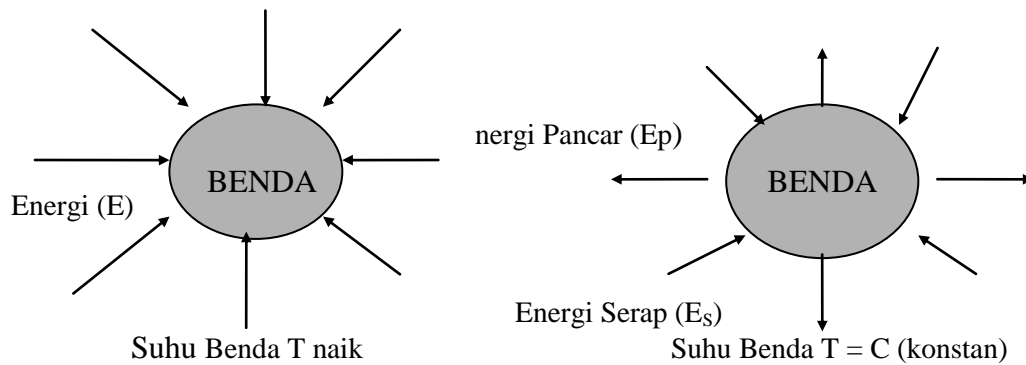
Energi yang dipancarkan seluruh permukaan benda hitam ke semua arah persatuan waktu dikenal sebagai *luminositas*. Untuk benda hitam yang berbebtuk bola dengan jari-jari R dan memiliki temperatur efektif T maka luminisitasnya adalah:

$$L = 4\pi R^2 F$$

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \dots\dots\dots (7)$$

Sebagai contoh luminositas matahari adalah  $3,9 \cdot 10^{23}$  kilo watt, nilai tersebut setara dengan energi yang dibangkitkan oleh semua pembangkit energi buatan manusia selama 3 juta tahun.

### 3. Teori Pancaran Benda Hitam



Gambar 2.a. Benda menyerap energi. b. Keadaan Seteimbang Termal

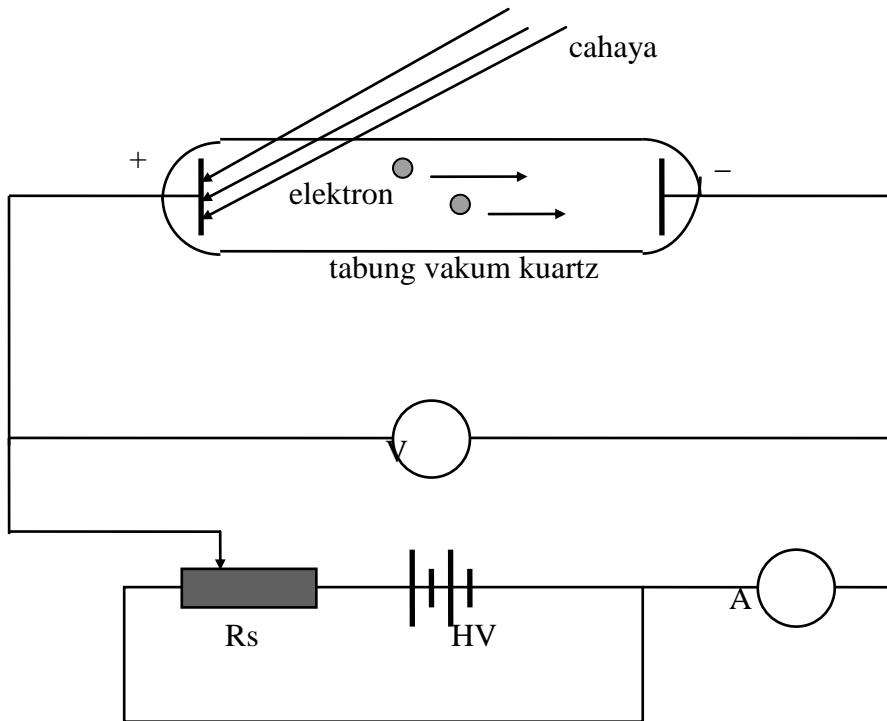
Energi yang diserap benda E akan menyebabkan suhu benda T akan mengalami kenaikan. Jika ini berlangsung terus menerus maka akan dicapai keadaan setimbang termal dengan suhu benda  $T = C = \text{konstan}$ . Pada keadaan ini jumlah energi yang diserap ( $E_s$ ) sama dengan jumlah energi yang dipancarkan benda hitam ( $E_p$ ).

### 4, Efek Fotolistrik

Dalam eksperimennya Hertz menemukan bahwa lagu pada celah transmiter terjadi bila cahaya ultraungu diarahkan pada salah satu bola logamnya. Ia tidak melanjutkan percobaan tersebut, akan tetapi ahli fisika yang lain melanjutkan percobaan tersebut. Mereka menemukan bahwa penyebab terjadinya lagu adalah terpancarnya elektron pada frekuensi yang cukup tinggi. Gejala ini dikenal sebagai efek foto listrik. Gejala ini merupakan salah satu ironi sejarah bahwa cahaya merupakan gelombang elektromagnetik.

Gambar 3 merupakan ilustrasi alat yang dipergunakan untuk membangkitkan gejala fotolistrik. Tabung yang divakumkan berisi dua elektrode yang yang dihubungkan dengan

rangkaian eksternal. Keping logam yang permukaannya mengalami iradiasi, digunakan sebagai anode. Sebagian dari fotoelektron yang muncul dari permukaan yang mengalami radiasi memiliki energi yang cukup untuk mencapai katode, walaupun muatannya negatif, dan elektron tersebut membentuk arus yang dapat diukur dalam amperemeter. Ketika potensial perintang  $V$  diperbesar, elektron yang mencapai katode lebih sedikit dan arusnya menurun. Akhirnya ketika  $V$  sama dengan atau melebihi suatu harga  $V_0$  yang besarnya dalam orde beberapa volt, maka tidak ada elektron yang mencapai katode dan arusnya terhenti.



Gambar 3. Percobaan Efek fotolistrik

Gejala efek fotolistrik dapat diterangkan sebagai berikut: gelombang cahaya membawa energi, dan sebagian energi yang diserap logam dapat terkonsentrasi pada elektron tertentu dan muncul sebagai energi kinetik. Salah satu sifat yang menimbulkan pertanyaan pengamat adalah distribusi elektron yang dipancarkan (fotoelektron), ternyata tak bergantung pada intensitas cahaya. Berkas cahaya yang kuat menghasilkan fotoelektron lebih besar dari pada berkas cahaya yang lemah untuk frekuensi yang sama, akan tetapi energi elektron rata-ratanya sama saja. Dalam batas ketelitian eksperimen ( $10^{-9}$  s), tak terdapat kelambatan waktu antara datangnya cahaya pada permukaan logam dan terpancarnya elektron.

Secara kuantum energi kuantum cahaya pada efek fotolistrik dipergunakan sebagai energi untuk membebaskan elektron dari permukaan logam dan sisanya dipergunakan sebagai energi kinetik elektron, yang secara matematis dirumuskan:

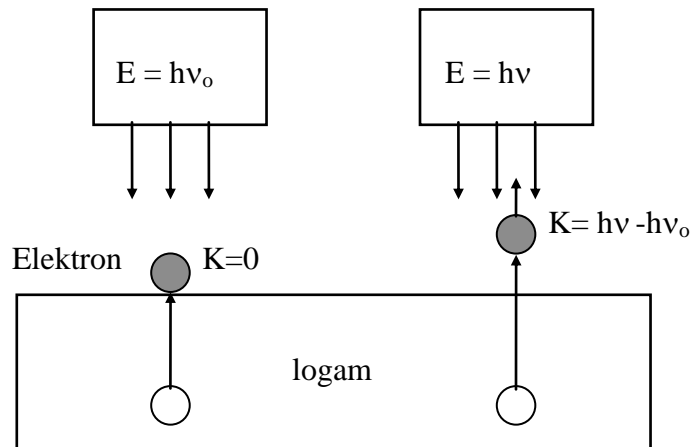
$$h\nu = K_{\max} + h\nu_0 \dots\dots\dots (8)$$

dengan :  $h\nu$  : energi kuantum cahaya

$K_{mak}$  : energi kinetik maksimum elektron  
 $h\nu_0$  : fungsi kerja, energi minimum yang diperlukan untuk melepaskan sebuah elektron yang disinari.

Fungsi kerja untuk masing-masing permukaan logam memiliki nilai khas. Hal ini berarti bahwa fungsi kerja merupakan besaran yang khas. Untuk melepaskan elektron dari permukaan logam biasanya memerlukan separuh energi yang diperlukan untuk melepaskan elektron bebas dari atom yang bersangkutan. Sebagai contoh energi ionisasi cesium adalah 3,9 eV dengan fungsi kerjanya 1,7 hingga 3,3 eV. Gejala efek fotolistrik terjadi dalam daerah tampak dan ultraungu.

Selanjutnya kaitan antara fungsi kerja (energi ambang), tenaga kuantum cahaya, dan tenaga kinetik elektron dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4.. Ilustrasi tentang efek fotolistrik

Tabel fungsi kerja untuk beberapa logam dapat dilihat pada Tabel 1. Satuan fungsi kerja biasanya dinyatakan dalam elektron volt (eV) yang besarnya setara dengan:

$$1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J} \dots\dots\dots(9)$$

Tabel 1. Fungsi kerja fotolistrik beberapa logam

LOGAM	LAMBANG	FUNGSI KERJA (EV)
Cesium	Cs	1,9
Kalium	K	2,2
Natrium	Na	2,3
Lithium	Li	2,5
Kalsium	Ca	3,2
Tembaga	Cu	4,5
Perak	Ag	4,7
Platina	Pt	5,6

**Contoh 1:**

Cahaya ultraungu dengan panjang gelombang 350 nm dan intensitas  $1 \text{ W/m}^2$  jatuh pada permukaan potassium.

- Carilah energi kinetik maksimum fotoelektron ?
- Jika 0,5 persen foton yang datang dapat menimbulkan fotoelektron, berapa banyak fotoelektron per detik dipancarkan oleh permukaan kalium yang luasnya  $1 \text{ cm}^2$  ?

Jawab:

- Energi kuantum foton adalah:

$$E = \frac{12,4 \times 10^{-6} \text{ eV} \cdot \text{m}}{(350 \text{ nm})(10^{-9} \text{ m / nm})} = 3,5 \text{ eV}$$

Fungsi kerja potassium adalah 2,2 eV.

Maka energi kinetik maksimum elektron adalah:

$$K_{\max} = h\nu - h\nu_0 = 3,5 \text{ eV} - 2,2 \text{ eV} = 1,3 \text{ eV}$$

- Energi foton:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = 5,68 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Jadi banyaknya foton yang tiba pada permukaan per detik adalah:

$$\begin{aligned} n &= \frac{E / t}{E} = \frac{(P / A)(A)}{hc / \lambda} = \{(1 \text{ W} / \text{m}^2)(10^{-4} \text{ m}^2)\} / (5,68 \cdot 10^{-19} \text{ J}) \\ &= 1,76 \cdot 10^{14} \text{ foton / sekon} \end{aligned}$$

**5. Emisi Termionik**

Kesahihan penafsiran Einstein mengenai fotolistrik diperkuat dengan telaah tentang emisi termionik. Telah lama diketahui bahwa dengan adanya panas akan dapat meningkatkan konduktivitas udara yang ada disekelilingnya. Menjelang abad ke-19 ditemukan emisi elektron dari benda panas. Emisi termionik memungkinkan bekerjanya piranti seperti tabung televisi yang didalamnya terdapat filamen logam atau katoda berlapisan khusus yang pada temperatur tinggi mampu menyajikan arus elektron yang rapat.

Jelaslah bahwa elektron yang terpancar memperoleh energi dari agitasi termal zarah pada logam, dan dapat diharapkan bahwa elektron harus mendapat energi minimum tertentu supaya dapat lepas. Energi minimum ini dapat ditentukan untuk berbagai permukaan dan selalu berdekatan ngan fungsi kerja fotolistrik untuk permukaan yang sama. Dalam emisi fotolistrik, foton cahaya menyediakan energi yang diperlukan oleh elektron untuk lepas, sedang dalam emisi termionik kalorlah yang menyediakannya. Dalam kedua kasus itu proses fisis yang bersangkutan dengan timbulnya elektron dari permukaan logam adalah sama.

## 6. Model Atom Bohr

Hal-hal yang mendasari model atom Bohr tentang atom hidrogen dapat dikemukakan sebagai berikut:

1. Konsep foton yang menggambarkan gelombang elektromagnetik sebagai berkas gumpalan-gumpalan energi yang berperilaku sebagai zarah memberikan suatu wawasan baru dalam telaah tentang struktur atom. Telaah tentang struktur atom dalam tataran mikroskopis dalam proses tingkat atom dan subatom tidak dapat dipisahkan dari konsep foton.
2. Hasil eksperimen tentang spektrum atom hidrogen pada saat itu dan sampai tahun 1913 tidak dapat diterangkan secara teoritik. Peralatan untuk mengukur spektrum cahaya sudah cukup berkembang pada akhir abad ke-19. Pengamatan tentang spektrum yang dipancarkan oleh gas-gas yang panas menunjukkan spektrum garis yang memiliki karakteristik tersendiri. Banyak upaya telah dilakukan untuk mencari rumus empirik tentang keteraturan ini. Rumus empirik tentang keteraturan garis-garis spektrum itu tentunya merupakan alat verifikasi terbaik untuk menguji kebenaran tentang teori-teori mengenai struktur gas.

Pada tahun 1885, JJ Balmer seorang guru sekolah menengah di Swiss berhasil menemukan suatu rumus empirik sederhana yang dengan ketepatan tinggi dapat menyatakan frekuensi garis-garis spektrum hidrogen dalam daerah tampak, sbb:

Tabel 2. Spektrum Deret Balmer

Garis Spektrum Hidrogen	Panjang Gelombang (Angstrom)	Frekuensi ( $10^{14}$ Hz)
H <sub>α</sub>	6562,8	4,569
H <sub>β</sub>	4861,3	6,168
H <sub>γ</sub>	4340,5	6,908
H <sub>δ</sub>	4101,7	7,310
H <sub>ε</sub>	3645,6	8,224

Rumus Balmer untuk panjang gelombang tersebut adalah:

$$\lambda(\text{Angstrom}) = \frac{3645,6n^2}{n^2 - 4} \dots\dots\dots (10)$$

Setiap panjang gelombang yang lain diperoleh dengan mensubstitusikan bilangan bulat  $n > 2$ , seperti  $n=3, 4, 5, \dots$

Dalam frekuensi rumus di atas menjadi:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = c \left[ \frac{n^2 - 4}{n^2} \right] \left[ \frac{1}{3645,6} \right] = \frac{4c}{3645,6} \left[ \frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right] \dots\dots\dots (11)$$

Pada persamaan (11) panjang gelombang dinyatakan dalam angstrom, oleh karena itu kecepatan cahaya  $c$  juga harus dinyatakan dalam angstrom/sekon sehingga diperoleh:

$$\nu_n = 3,289 \cdot 10^{15} \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right) \dots\dots\dots (12)$$

dengan  $n$  bilangan bulat yang lebih besar dari 2.

3. Dalam tahun 1908 Paschen menemukan bahwa ada suatu deret lain dalam spektrum hidrogen yang terletak dalam daerah infra merah. Deret tersebut memenuhi hubungan matematik:

$$\nu_n = 3,289 \cdot 10^{15} \left( \frac{1}{9} - \frac{1}{n^2} \right) \dots\dots\dots (13)$$

dengan n suatu bilangan bulat yang lebih besar dari 3.

Deret Balmer dan Paschen dapat dikembalikan pada suatu bentuk matematika sbb:

$$\nu_{n,m} = 3,289 \cdot 10^{15} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \dots\dots\dots (14)$$

Dalam ungkapan tersebut deret Balmer muncul apabila diambil  $m = 2$  dan  $n > 2$ ; deret Paschen muncul bila  $m=3$  dan  $n>3$ .

4. Ternyata Rydberg pada tahun 1890 menemukan cara lain yang lebih mudah menangani rumus panjang gelombang deret Balmer dengan mendefinisikan suatu besaran baru yang disebut resiprok panjang gelombang.

$$\kappa \equiv \frac{1}{\lambda}$$

Dengan batasan ini maka dapat diperoleh:

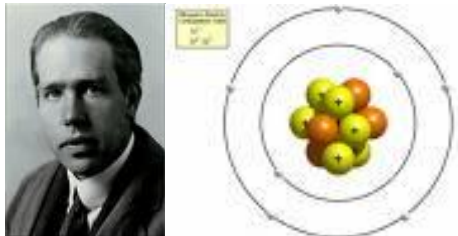
$$\kappa_{n,m} = 1,097 \cdot 10^7 \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \dots\dots\dots (15)$$

Besaran yang berada di depan tanda kurung disebut tetapan Rydberg  $R_H$ .

Dengan demikian persamaan resiprok panjang gelombang dapat dituliskan dalam persamaan (16).

$$\kappa_{n,m} = R_H \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \dots\dots\dots (17)$$

Dalam Fisika Atom, model atom Bohr melukiskan bahwa atom terdiri dari inti atom yang bermuatan positif yang dikelilingi oleh elektron orbit seperti susunan planet-matahari. Gaya elektrostatis lebih dominan menyebabkan gaya tarik-menarik antara elektron-elektron dengan inti dibandingkan dengan gaya gravitasi. Hasil eksperimen tentang spektrum atom hidrogen menunjukkan bahwa spektrum atom tsb berupa spektrum garis yang dikenal sebagai deret Balmer. Berdasarkan hal ini dapat dikemukakan berbagai kemungkinan antara lain: model atom Rutherford salah; teori elektrodinamika klasik salah; dan model atom Rutherford dan teori elektrodinamika klasik terbatas berlakunya.



Gambar 5. Niels Bohr dan Model Atomnya Untuk Nitrogen

Pada tahun 1913, Niels Bohr menyusun model atom hidrogen berdasarkan teori atom Rutherford dan teori kuantum Planck. Dalam atom Rutherford dijelaskan bahwa prinsip



fisika klasik tidak sesuai dengan kemantapan atom hidrogen yang teramati. Model atom Rutherford dengan model atom yang mirip dengan tatasurya mengalami beberapa kesulitan, kesulitan yang paling serius adalah adanya kehilangan energi dari radiasi synchrotron. Partikel bermuatan yang mengalami percepatan akan memancarkan radiasi elektromagnetik. Elektron dalam atom diharuskan berputar mengelilingi inti untuk mempertahankan diri supaya tidak tertarik ke dalam inti atom, tetapi elektron juga harus memancarkan radiasi elektromagnetik terus-menerus. Elektron ini makin lama akan mendekati inti atom dengan lintasan berbentuk spiral dan akhirnya jatuh ke inti. Hasil pengamatan yang dilakukan Bohr ternyata energi yang dipancarkan tidak berubah, sehingga Bohr menyusun teori dengan mengajukan empat postulat yang fundamental. Kesulitan yang lain adalah teori Rutherford tidak dapat menjelaskan mengapa atom memiliki umur yang panjang (kestabilan atom). Model atom Rutherford juga gagal dalam menjelaskan spektrum atom diskret. Eksperimen-eksperimen yang dilakukan pada akhir abad ke-19 dengan lucutan listrik pada gas yang ditempatkan pada tabung gelas bertekanan rendah menunjukkan bahwa atom-atom gas akan memancarkan foton dengan frekuensi tertentu.

Berikut ini disajikan pemikiran-pemikiran Bohr yang melandasi model atom Bohr:

1. Orbit-orbit elektron berada dalam orbit-orbit dengan energi diskret yang terkuantisasi.
2. Hukum-hukum mekanika klasik tidak dapat diterapkan ketika terjadi loncatan elektron dari orbit yang diijinkan ke orbit lain.
3. Ketika elektron melompat dari orbit yang satu ke orbit lain maka beda energi antara kedua orbit tersebut akan dibawa (atau disuplai) oleh sebuah foton.
4. Orbit-orbit elektron yang diijinkan tergantung pada kuantisasi momentum sudut orbital

$$L = n\hbar = n \frac{h}{2\pi}.$$

Model atom Bohr kadang-kadang dikenal sebagai model atom semiklasik karena menggabungkan antara fisika klasik dan kuantum.

## **Postulat Bohr**

### ***Postulat 1***

Atom hidrogen terdiri dari sebuah elektron yang bergerak dalam suatu lintasan edar berupa lingkaran mengelilingi inti atom; gerak elektron tersebut dipengaruhi oleh gaya tarik coulomb sesuai dengan kaidah mekanika klasik. Postulat 1 memberikan susunan atom hidrogen dan gaya yang bekerja antara inti atom dengan elektron.

### ***Postulat 2***

Lintasan edar elektron dalam atom hidrogen yang mantap, hanyalah yang mempunyai harga momentum sudut  $L$  yang merupakan kelipatan bilangan bulat dari tetapan Planck dibagi  $2\pi$ .  $L = n\hbar = n \frac{h}{2\pi}$ . Postulat 2 memberikan kuantisasi sistem atom, yang dikuantisasikan adalah momentum sudut  $L$ . Kuantisasi ini juga mengkuantisasikan lintasan edar elektron dalam atom.

### ***Postulat 3***

Dalam lintasan edar yang mantap, elektron yang mengelilingi inti atom tidak memancarkan energi elektromagnetik, dalam hal ini energi total atom  $E$  tidak berubah.

Postulat 3 menyatakan bahwa elektron dalam orbit stasioner tidak memancarkan energi elektromagnetik.

**Postulat 4**

Energi elektromagnetik dipancarkan oleh sistem atom apabila suatu elektron yang melntasi orbit mantap dengan energi  $E_i$  secara tak sinambung berpindah ke suatu orbit mantap lainnya berenergi  $E_f$ , pancaran energi elektromagnetiknya memiliki frekuensi yang besarnya sama dengan:  $\nu = \frac{E_i - E_f}{h}$ . Postulat 4 menyatakan bahwa dalam transisi dari suatu orbit stabil ke orbit stabil lainnya, elektron memancarkan energi elektromagnetik (foton) dengan frekuensi yang sesuai dengan beda energi atom pada dua keadaan stabil tsb.

**Kuantisasi Momentum Sudut L**

Lintasan berupa lingkaran tertentu ini memiliki momentum sudut yang besarnya merupakan kelipatan bilangan ulat dari panjang gelombang de-Broglie.



Gambar 6. de-Broglie dan Gelombang de-Broglie Elektron

$$n\lambda = 2\pi r_n \quad \text{dengan } n = \text{bilangan kuantum utama} = 1, 2, 3, \dots \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\Leftrightarrow n \frac{h}{mv} = 2\pi r_n$$

$$\Leftrightarrow mvr_n = n \frac{h}{2\pi} \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$\Leftrightarrow L = mvr_n = n\hbar$$

dengan  $m = \text{massa elektron} = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$

$v = \text{kecepatan orbit elektron}$

$r_n = \text{jari-jari orbit elektron}$

$h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

Pada lintasan tertentu elektron bergerak mengelilingi inti tanpa memancarkan energi. Lintasan ini dikenal sebagai lintasan/orbit stasioner. Besar jari-jari orbit stasioner dapat ditentukan sebagai berikut:

**Panjang gelombang elektron orbital:**

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

$$\lambda = \frac{h}{m \left( \frac{e}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 mr}} \right)}$$

$$\lambda = \frac{h}{me} \sqrt{4\pi\epsilon_0 mr}$$

$$\Leftrightarrow \lambda = \frac{h}{e} \sqrt{\frac{4\pi\epsilon_0 r}{m}} \dots\dots\dots (20)$$

**Syarat kemandapan orbit elektron:**

Orbit elektron akan mantap jika keliling orbit elektron sama dengan kelipatan bilangan bulat panjang gelombang de-Broglie elektron.

$$n\lambda = 2\pi r_n \quad \text{dengan } n = 1, 2, 3, \dots$$

Substitusi  $\Leftrightarrow \lambda = \frac{h}{e} \sqrt{\frac{4\pi\epsilon_0 r}{m}}$  ke persamaan (20) diperoleh:

$$n \frac{h}{e} \sqrt{\frac{4\pi\epsilon_0 r_n}{m}} = 2\pi r_n$$

$$\Leftrightarrow \sqrt{r_n} = \frac{1}{2\pi} \frac{nh}{e} \sqrt{\frac{4\pi\epsilon_0}{m}}$$

$$\Leftrightarrow r_n = \frac{1}{4\pi^2} \frac{n^2 h^2}{e^2} \frac{4\pi\epsilon_0}{m}$$

$$\Leftrightarrow r_n = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} \quad \text{jari-jari orbit dalam atom Bohr} \dots\dots\dots (21)$$

Untuk orbit pertama  $n = 1$  diperoleh jari-jari orbit pertama  $r_1 = a_0 = 5,292 \cdot 10^{-11} m$  yang dikenal sebagai *jari-jari Bohr*. Dengan demikian dari persamaan (21) jari-jari orbit elektron secara sederhana dapat diungkapkan dalam persamaan (22):

$$r_n = n^2 a_0 \dots\dots\dots (22)$$

Berdasarkan persamaan (22) dapat diungkap bahwa hanya pada jari-jari orbit tertentu elektron dapat mengelilingi inti atom tanpa memancarkan radiasi dalam bentuk gelombang elektromagnetik.

Tiap-tiap lintasan elektron mempunyai tingkat energi sendiri-sendiri. Bila elektron meloncat dari suatu lintasan yang tingkat energinya  $E_i$  ke tingkat energi yang lebih rendah  $E_f$  maka akan dipancarkan foton dengan energi  $h\nu$ .

$$\Delta E = E_i - E_f = h\nu \quad \dots\dots\dots (23)$$

dengan  $\nu$  menyatakan frekuensi foton yang terpancar.

Sebaliknya jika elektron meloncat dari tingkat energi lebih rendah ke tingkat energi lebih tinggi maka energi diserap oleh atom. Dengan demikian menurut model atom Bohr, elektron tidak terus-menerus memancarkan energi, tetapi hanya memancarkan atau menyerap energi apabila elektron meloncat dari suatu lintasan ke lintasan yang lain. Tingkat-tingkat energi untuk atom hidrogen pada lintasan  $n$  memenuhi:

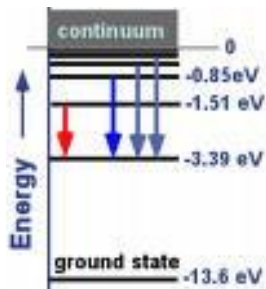
$$E_n = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} \quad \dots\dots\dots (24)$$

Dengan mensubstitusi  $\Leftrightarrow r_n = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2}$  kedalam persamaan (24) di atas diperoleh:

$$E_n = -\frac{m e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2} \left( \frac{1}{n^2} \right) \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}, n = 1, 2, 3, \dots$$

Gambar tingkat-tingkat energi atom hidrogen ditunjukkan pada Gambar 7 sebagai berikut.



Gambar 7 Tingkat-Tingkat Energi Atom Hidrogen

Tingkat energi ini semuanya negatif, hal ini menyatakan bahwa elektron tidak memiliki energi yang cukup untuk melepaskan diri dari inti atom. Tingkat energi yang terendah  $E_1$  dikenal sebagai keadaan dasar (*ground state*) atom, dan tingkat energi yang lebih tinggi  $E_2, E_3, E_4, \dots$  disebut keadaan eksitasi (*excited state*). Ketika bilangan kuantum  $n$  bertambah energi  $E$  ersesuaian dengan nol dalam limit  $n=\infty, E_\infty=0$  dan elektron tidak terikat lagi pada inti atom untuk membentuk atom.

Energi yang diperlukan untuk membebaskan elektron dari atom dalam keadaan dasarnya disebut energi ionisasi. Energi ionisasi atom hidrogen adalah:

$$E_{ionisasi} = -E_1$$

$$atom.H \Rightarrow E_{ionisasi} = 13,6eV \quad \dots\dots\dots (27)$$

## Deret Spektral

Jika bilangan kuantum keadaan awal  $n_i$  (energi lebih tinggi) dan bilangan kuantum keadaan akhir  $n_f$  (energi lebih rendah) maka pada saat terjadi eksitasi elektron dalam atom berlaku:

$$E_{foton} = E_{awal} - E_{akhir}$$

$$h\nu = E_i - E_f$$

Frekuensi foton yang terpancar:

$$\nu = \frac{1}{h}(E_i - E_f)$$

$$\nu = \frac{1}{h}\left(\frac{E_1}{n_i^2} - \frac{E_1}{n_f^2}\right)$$

$$\nu = \frac{-E_1}{h}\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

Karena  $c = \nu\lambda$  maka frekuensi foton yang terpancar menjadi:

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{-E_1}{h}\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

spektrum hidrogen ..... (28)

$$\frac{1}{\lambda} = -\frac{E_1}{ch}\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

Tabel 3. Deret Spektral

Deret	$n_f$	Formulasi	$n$
Lyman	1	$\frac{1}{\lambda} = -\frac{E_1}{ch}\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right)$	$n = 2, 3, 4, \dots$
Balmer	2	$\frac{1}{\lambda} = -\frac{E_1}{ch}\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$	$n = 3, 4, 5, \dots$
Paschen	3	$\frac{1}{\lambda} = -\frac{E_1}{ch}\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right)$	$n = 4, 5, 6, \dots$
Bracket	4	$\frac{1}{\lambda} = -\frac{E_1}{ch}\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right)$	$n = 5, 6, 7, \dots$
Pfund	5	$\frac{1}{\lambda} = -\frac{E_1}{ch}\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right)$	$n = 6, 7, 8, \dots$

Perhitungan tetapan Ryberg ( $R$ ):

$$R_H = -\frac{E_1}{ch} = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \left( \frac{1}{ch} \right)$$

$$R_H = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 ch^3}$$

$$R_H = \frac{(9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg})(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C})^4}{8(8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m})^2 (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})(6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js})}$$

$$R_H = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

Dengan mensubstitusi nilai tetapan Rydberg ke persamaan (28) maka rumusan untuk deret spektral atom hidrogen menjadi:

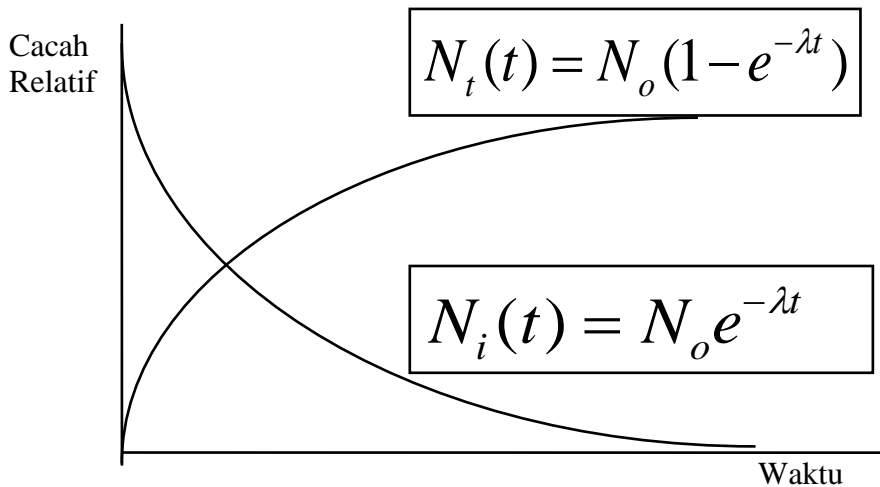
$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \dots\dots\dots(29)$$

**Peluruhan**

Proses peluruhan bersifat statistik eksponensial. Jumlah inti atom untuk meluruh setiap saat N bergantung pada jumlah sampel mula-mula inti induk  $N_o$ , selang waktu peluruhan t, dan tetapan desintegrasi  $\lambda$  yang memenuhi persamaan:

$$N = N_o e^{-\lambda t} \tag{30}$$

Grafik peluruhan inti atom induk dan pertumbuhan inti atom turunan disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Peluruhan dan Pertumbuhan Inti Radioaktif

**Waktu Paruh**

Waktu paruh didefinisikan sebagai periode waktu dimana jumlah cacah inti atom induk yang bersifat radioaktif tinggal separuh dari cacah semula.

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (31)$$

Pada saat  $t = nT_{1/2}$ , dengan  $n$  bilangan bulat maka persamaan (30) dapat dituliskan:

$$N_i(t) = \left(\frac{1}{2}\right)^n N_o \quad (32)$$

### Aktivitas

Aktivitas merupakan laju peluruhan dan didefinisikan sebagai jumlah peluruhan tiap satuan waktu.

$$A = \left| \frac{dN_i(t)}{dt} \right| = \lambda N_i(t) = \lambda N_o e^{-\lambda t} \quad (33)$$

Satuan aktivitas : curie (Ci) ( $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10}$  peluruhan/s).

Aktivitas inti pada setiap saat  $A$  memenuhi:

$$A = A_o e^{-\lambda t} \quad (34)$$

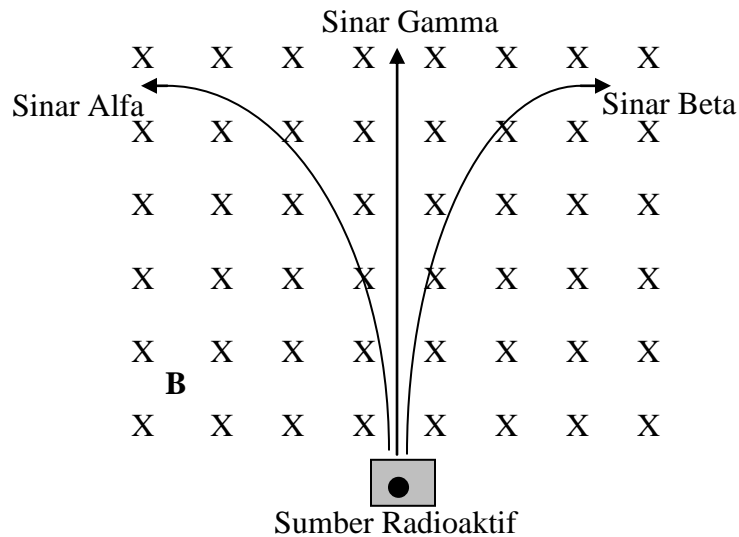
### Umur Rerata

Umur inti atom tertentu yang berdisintegrasi adalah antara nol sampai dengan tak hingga, oleh karena itu pengertian umur sebagai periode waktu sejak lahir sampai mati/habis tidak relevan, untuk itu diperkenalkan pengertian waktu rerata yang didefinisikan sbb:

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{N_o} t dN}{\int_0^{N_o} dN} = \frac{\int_0^{\infty} \lambda t N_o e^{-\lambda t} dt}{N_o} = \frac{1}{\lambda} \quad (35)$$

### Pengaruh Medan Magnet Terhadap Sinar Radioaktif

Partikel alfa dan beta adalah partikel bermuatan. Oleh sebab itu dalam medan magnet partikel alfa dan beta akan mengalami pembelokan arah. Arah pembelokan partikel alfa dan beta sesuai dengan arah gaya Lorentz yang bekerja pada partikel tersebut. Sedangkan sinar gamma adalah gelombang elektromagnetik yang tidak bermuatan, sehingga dalam medan magnet sinar gamma tidak dibelokkan. Arah pembelokan sinar alfa dan beta dalam medan magnet secara singkat disajikan pada gambar 9 sbb:



Gambar 9 Pembelokan Sinar-Sinar Radioaktif oleh Medan Magnet B

#### D. Soal-Soal

1. Panjang gelombang ambang pancaran fotolistrik pada tungsten adalah 230 nm. Berapa besar panjang gelombang cahaya yang harus dipakai supaya elektron dengan energi 1,5 eV terpancar ?
2. Frekuensi ambang fotolistrik pada tembaga adalah  $1,1 \cdot 10^{15}$  Hz. Carilah energi maksimum fotoelektron (dalam eV) bila cahaya dengan frekuensi  $1,5 \cdot 10^{15}$  Hz diarahkan pada permukaan logam tersebut ?
3. Berapa energi kinetik maksimum dari fotoelektron bila cahaya 200 nm jatuh pada permukaan natrium ?
4. Sampel  ${}_{92}^{238}\text{U}$  sebanyak 1 mg memancarkan 738 zarah alfa per menit. Sampel ini memperlihatkan aktivitas yang sama setelah waktu yang lama. Berapa umur paruhnya ?
5. Sampel  ${}^{108}\text{Au}$  sebanyak 1 mikro gram memiliki umur paruh 2,7 hari. Hitung tetapan peluruhan, aktivitas mula-mula!
6. Umur paruh  ${}_{11}^{25}\text{Na}$  adalah 15 hari. Berapa lamakah waktu yang diperlukan supaya 80% sampel ini meluruh?
7. Tentukan berapa beda potensial pemercepat minimum yang harus dipasang agar elektron dalam atom hidrogen dapat keluar dari keadaan dasarnya!
8. Sebuah elektron dalam atom hidrogen memiliki energi -13,6 eV. Tentukan berapa energi foton yang diserap elektron agar dapat berpindah ke lintasan dengan energi -3,4 eV!
9. Tentukan panjang gelombang de Broglie elektron pada atom hidrogen untuk lintas edar ke-2!



### Kunci Jawaban

No	Penyelesaian	Skor
1	$E_f = E_o + K$ $E_f = \frac{hc}{\lambda_o} + K = \frac{6,625 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{230 \cdot 10^{-9}} + (1,5)(1,6 \cdot 10^{-19}) = 1,104 \cdot 10^{-19} \text{ j}$ $\lambda = \frac{hc}{E_f} = \frac{6,625 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,104 \cdot 10^{-19}} = 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	<p>5</p> <p>5</p>
2	$K = h\nu = h\nu_o$ $K = 6,625 \cdot 10^{-34} \cdot 1,5 \cdot 10^{15} - 6,625 \cdot 10^{-34} \cdot 1,1 \cdot 10^{15} = 2,65 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,66 \text{ eV}$	<p>5</p> <p>5</p>
3	<p>Energi ambang natrium <math>E_o = 2,3 \text{ eV}</math></p> <p>Energi foton <math>E_f = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,625 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{200 \cdot 10^{-9}} = 9,94 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 6,21 \text{ eV}</math></p> <p>Energi kinetik maksimum fotoelektron:</p> $K = E_f - E_o = 6,21 - 2,3 = 3,91 \text{ eV}$	<p>5</p> <p>5</p>
4	<p>Jumlah Inti <math>{}_{92}^{238}\text{U}</math> :</p> $N = \frac{mN_A}{A} = \frac{10^{-3} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{235} = 2,56 \cdot 10^{18}$ $\lambda = \frac{A}{N} = \frac{738}{2,56 \cdot 10^{18}} = 2,88 \cdot 10^{-16} / \text{menit}$ <p>Umur paruh:</p> $T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} = \frac{0,693}{2,88 \cdot 10^{-16}} = 2,41 \cdot 10^{15} \text{ menit} = 4,5 \cdot 10^9 \text{ tahun}$	<p>5</p> <p>5</p> <p>5</p>
5	<p>Jumlah inti mula-mula:</p> $N_o = \frac{mN_A}{M} = \frac{10^{-6} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{108} = 5,57 \cdot 10^{15}$ <p>Tetapan peluruhan:</p> $\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{2,7 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60} = 2,97 \cdot 10^{-6} / \text{sekon}$ <p>Aktivitas mula-mula:</p> $A_o = \lambda N_o = 2,97 \cdot 10^{-6} \cdot 5,57 \cdot 10^{15} = 1,65 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$	<p>5</p> <p>5</p> <p>5</p>
6	<p>Jumlah Inti <math>{}_{11}^{25}\text{Na}</math> yang tersisa:</p> $N = 0,2N_o$ <p>Tetapan peluruhan:</p> $\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{15} = 0,0462 / \text{hari}$ <p>Waktu yang diperlukan untuk meluruh:</p> $t = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{N}{N_o} = -\frac{1}{0,0462} \ln \frac{0,2N_o}{N_o} = -21,64 \cdot (-1,6) = 34,83 \text{ hari}$	<p>5</p> <p>5</p> <p>5</p>

7	<p>Agar elektron pada atom hidrogen terlepas dari keadaan dasarnya maka diperlukan energi ionisasi:</p> $E_{ionisasi} = -E_1 = -(-13,6eV) = 13,6eV$ <p>Potensial pemercepat minimum yang diperlukan:</p> $V = 13,6 \text{ volt}$	5
8	<p>Energi foton yang diserap:</p> $E_f = E_2 - E_1 = -3,4 - (-13,6) = 10,2 \text{ eV}$	5
9	<p>Panjang gelombang de-Broglie elektron pada lintas edar ke-2:</p> $n\lambda = 2\pi r_2$ $2\lambda = 2\pi(2^2)r_1$ $\lambda = 8\pi r_1 = 8 \cdot 3,14 \cdot 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m} = 1,33 \cdot 10^{-9} \text{ m}$	5