

Sinar-X

Diseminarkan di Jurusan Pendidikan Fisika Pada tgl 18 September 1996

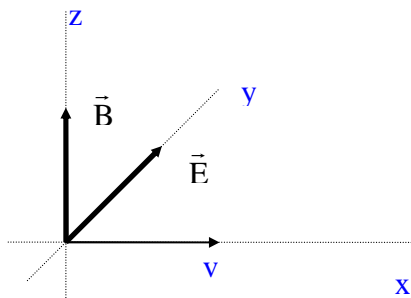
Oleh : Kardiawarman, Ph. D.

**JURUSAN PENDIDIKAN FISIKA
FAKULTAS PENDIDIKAN MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
IKIP BANDUNG
1996**

1. Sifat-sifat sinar-x.

Sinar-x ditemukan pertamakali oleh Roentgen pada tahun 1895. Pada saat ditemukan, sifat-sifat sinar-x tidak langsung dapat diketahui. Sifat-sifat alamiah (nature) sinar-x baru secara pasti ditentukan pada th 1912 seiring dengan penemuan difraksi sinar-x oleh kristal. Difraksi sinar-x ini dapat “melihat” atau “membedakan” objek yang berukuran kurang lebih 1 angstrom. Sifat-sifat sinar-x tersebut adalah:

- tidak dapat dilihat oleh mata, bergerak dalam lintasan lurus, dan dapat mempengaruhi film fotografi sama seperti cahaya tampak.
- daya tembusnya lebih tinggi dari pada cahaya tampak, dan dapat menembus tubuh manusia, kayu, beberapa lapis logam tebal.
- dapat digunakan untuk membuat gambar bayangan sebuah objek pada film fotografi (radiograf).
- sinar-x merupakan gelombang elektromagnetik dengan energi $E = hf$.
- orde panjang gelombang sinar-x adalah $0,5-2,5 \text{ \AA}$. (sedangkan orde panjang gelombang untuk cahaya tampak = 6000 \AA). Jadi letak sinar-x dalam diagram spektrum gelombang elektromagnetik adalah antara sinar ultra violet dan sinar gama.
- satuan panjang gelombang sinar-x sering dinyatakan dalam dua jenis satuan yaitu **angstrom** (\AA) dan **satuan sinar-x** (X Unit = XU). $1 \text{ kXU} = 1000 \text{ XU} = 1,00202 \text{ \AA}$.
- Persamaan gelombang untuk medan listrik sinar-x yang terpolarisasi bidang adalah $\vec{E} = A \sin 2\pi(x/\lambda - ft) = A \sin (kx - \omega t)$. Intensitas sinar-x adalah dE/dt (rata-rata aliran energi per satuan waktu) per satu satuan luas yang tegak lurus arah rambat. Nilai rata-rata intensitas sinar-x ini adalah berbanding lurus dengan A^2 . Satuan intensitas adalah $\frac{\text{ergs}}{\text{det.cm}^2}$.

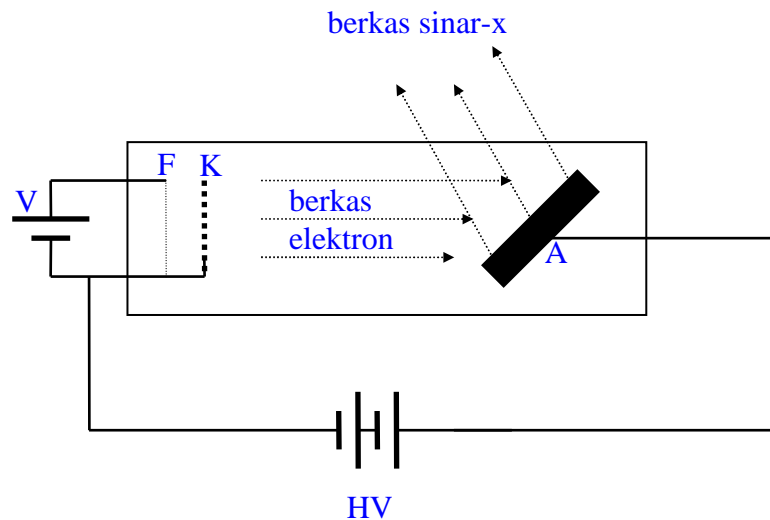


Gambar 1. Arah vektor medan listrik dan medan magnet dari sebuah gelombang yang terpolarisasi bidang.

2. Sumber sinar-x.

Salah satu cara untuk membangkitkan sinar-x adalah dengan cara menembakan elektron yang berenergi kinetik (berkecepatan) tinggi pada suatu target (anoda). Pembangkit (sumber) sinar-x jenis ini berdasarkan keadaan target (anoda) dapat dibedakan menjadi dua jenis sumber sinar-x, yaitu sumber sinar-x yang beranoda diam (fixed anode x-ray source) dan sumber sinar-x dengan anoda berputar (rotating anode x-ray source). Kedua jenis sumber sinar-x ini akan dijelaskan pada bagian berikut ini.

Sumber sinar-x beranoda diam. Komponen utama sumber sinar-x yang beranoda diam adalah sebuah anoda, sebuah katoda (K), sebuah filamen (F) sebagai sumber elektron, sebuah sumber tegangan tinggi (HV) untuk anoda dan katoda, dan sebuah tegangan rendah (V) untuk filamen. Sumber sinar-x jenis ini secara skema ditunjukkan pada gambar 2



Gambar 2. Skema sumber sinar-x beranoda tetap.

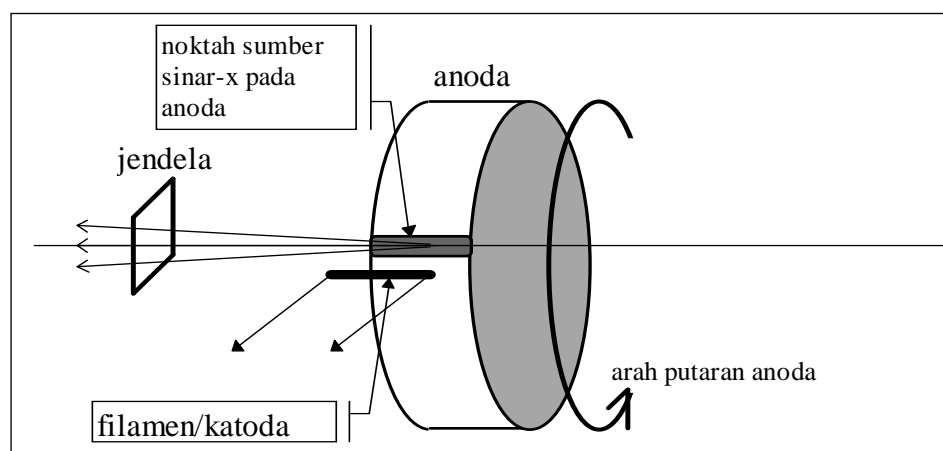
Filamen yang diberi catu daya dari sumber tegangan rendah (V) akan mengeluarkan elektron secara termal. Elektron-elektron ini selanjutnya dipercepat oleh tegangan tinggi (HV) yang timbul antara anoda dan katoda, sehingga mereka memperoleh energi kinetik yang sangat besar. Pada saat menumbuk anoda elektron-elektron ini akan melepaskan energi kinetiknya. Sebagian kecil dari energi tersebut berubah menjadi energi gelombang elektromagnetik yang kita sebut *sinar-x*, sedangkan sebagian besar dari energi kinetik itu berubah menjadi panas yang numpuk pada anoda. Berkas sinar-x yang dihasilkan dapat terdiri atas dua jenis sinar-x. Jenis pertama adalah *sinar-x polikhromatik*, yaitu sinar-x yang berasal dari akibat pengereman elektron oleh anoda. Berkas sinar-x jenis ini sering disebut sinar-x bremsstrahlung (sebuah kata dalam bahasa Jerman yang berarti pengereman). Jenis kedua adalah *sinar-x monokhromatik*, yaitu sinar-x yang berasal dari adanya transisi eksitasi di dalam anoda. Kedua jenis sinar-x ini akan dijelaskan secara rinci di dalam pasal berikutnya.

Disamping komponen-komponen utama tersebut di atas, sumber sinar-x ini sering juga dilengkapi dengan komponen lainnya, seperti aliran air dingin melalui anoda yang berfungsi untuk mengeluarkan panas yang timbul pada anoda.

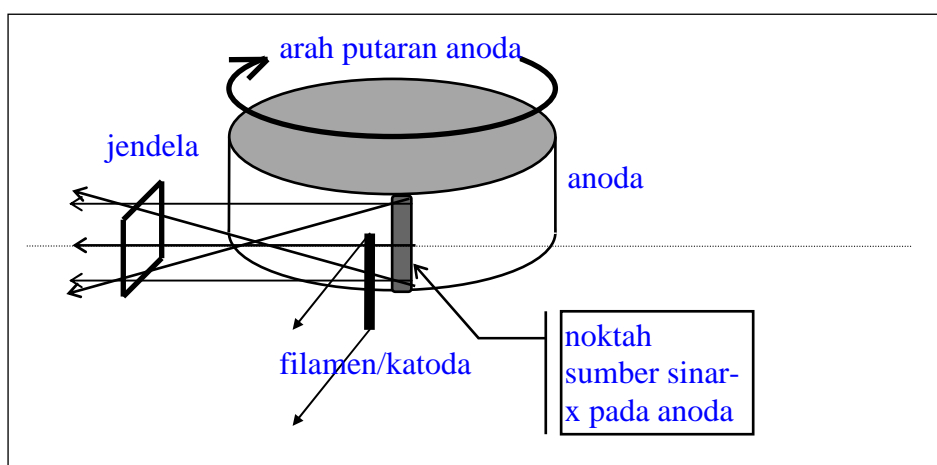
Sumber sinar-x dengan anoda berputar. Pada prinsipnya, komponen utama dari sumber sinar-x dengan anoda berputar adalah sama dengan komponen utama dari sumber sinar-x yang beranoda diam. Tetapi perbedaan yang paling mencolok diantara keduanya adalah bahwa anoda pada sumber sinar-x ini diputar oleh sebuah motor listrik dengan kecepatan yang sangat tinggi. Hal ini dimaksudkan supaya elektron-elektron akan menumbuk anoda pada tempat yang selalu berbeda. Keuntungan dari cara ini adalah untuk mengurangi panas yang timbul pada anoda sehingga sumber sinar-x jenis ini dapat menghasilkan berkas sinar-x yang berdaya besar. Sebagai perbandingan, sumber sinar-x beranoda diam hanya mampu menghasilkan sumber sinar-x yang berdaya kurang lebih 2 kilowatt (kW) sementara sumber sinar-x yang beranoda berputar mampu menghasilkan berkas sinar-x dengan daya maksimum sebesar 18 kW.

Keuntungan lain dari sumber sinar-x yang beranoda berputas adalah :

- bahan anoda dapat diubah dengan mudah tanpa harus mengganti tabung sumber sinar-x secara keseluruhan. Penggantian bahan anoda sering dilakukan apabila energi berkas sinar-x karakteristik yang dibutuhkan harus bermacam-macam.
- jenis dan ukuran filamen juga dapat diubah dengan mudah, sehingga ukuran noktah sinar-x yang dihasilkan dapat disesuaikan dengan kebutuhan.
- orientasi anoda dan filamen dapat disesuaikan dengan kebutuhan tanpa harus memilih arah berkas sinar-x yang dihasilkan. Hal ini sangat menguntungkan karena kita tidak perlu mengubah susunan alat-alat eksperimen lainnya, seperti goniometer $\theta - 2\theta$ misalnya, yang biasanya sangat sulit untuk setel dan kalibrasi ulang. Orientasi yang dapat dibuat oleh sumber sinar-x ini adalah *orientasi geometri titik* dan *orientasi geometri garis*. Kedua jenis orientasi ini ditunjukkan dalam gambar 3.



a



b

Gambar 3. Orientasi anoda dan filamen pada sumber sinar-x dengan anoda berputar. (a) orientasi geometri titik, (b) orientasi geometri garis.

Pada orientasi geometri titik, noktah sumber sinar-x pada anoda akan tampak dari jendela seperti sebuah titik sumber, sedangkan pada orientasi geometri garis noktah tersebut akan tampak dari jendela seperti sebuah garis sumber. Kedua jenis orientasi ini dengan mudah dapat diperoleh dari sumber sinar-x jenis ini tanpa harus mengganggu susunan alat-alat eksperimen lainnya.

Di sisi lain, kelemahan sumber sinar-x dengan anoda berputar adalah :

- a. harganya jauh lebih mahal
- b. untuk memperoleh sinar-x dengan daya yang besar, sumber ini memerlukan pompa pengisap udara yang sangat baik untuk dapat memvakumkan ruang anoda-katoda.

3. Spektrum sinar-x

Berkas sinar-x yang dihasilkan oleh sebuah sumber dapat terdiri atas dua jenis spektrum, yaitu spektrum kontinyus dan spektrum diskrit. Spektrum kontinyus dan spektrum diskrit masing-masing sering juga disebut polikhromatik dan monokromatik.

Spektrum kontinyus sinar-x timbul akibat adanya pengereman elektron-elektron yang berenergi kinetik tinggi oleh anoda. Pada saat terjadi pengereman tersebut, sebagian dari energi kinetiknya diubah menjadi sinar-x. Proses pengereman ini dapat berlangsung baik secara tiba-tiba ataupun secara perlahan-lahan, sehingga energi sinar-x yang dihasilkannya akan memiliki rentang energi yang sangat lebar. Jika elektron-elektron tersebut direm secara tiba-tiba, maka seluruh energi kinetiknya akan diubah seketika menjadi energi sinar-x dan energi panas yang numpuk pada anoda. Energi sinar-x ini merupakan energi tertinggi tertinggi yang dapat dihasilkan oleh sebuah sumber sinar-x. Atau dengan kata lain panjang gelombang sinar-x ini merupakan panjang gelombang terpendek (λ_{\min}) yang dapat dihasilkan oleh sebuah sumber. Tetapi jika elektron-elektron itu direm secara perlahan, maka energi kinetiknya akan diubah secara perlahan pula menjadi energi sinar-x dan energi panas, sehingga sinar-x yang dihasilkannya akan berenergi yang bervariasi sesuai dengan besarnya energi kinetik yang diubahnya. Sinar-x ini akan memiliki panjang gelombang (energi) yang berbeda, sehingga karena itulah sinar-x ini sering disebut sinar-x polikhromatik. Sinar-x yang dihasilkan oleh adanya pengereman elektron baik secara tiba-tiba atau pun secara perlahan sering disebut **sinar-x bremsstrahlung**. Spektrum sinar-x bremsstrahlung ini ditunjukkan di dalam Gambar 4. Gambar 4. menunjukkan spektrum sinar-x bremsstrahlung untuk beberapa harga tegangan tinggi yang digunakan. Dari Gambar 4 tersebut dapat kita lihat bahwa makin besar tegangan tinggi yang digunakan makin kecil harga λ_{\min} yang dihasilkan. Nilai λ_{\min} ini secara matematik dapat ditentukan sebagai berikut. Jika elektron yang berenergi kinetik tinggi itu direm secara tiba-tiba oleh anoda maka seluruh energi kinetiknya akan secara tiba-tiba pula diubah menjadi energi sinar-x tertinggi (hf_{\max}) dan energi panas (Q). Jadi jika energi kinetik elektron yang bergerak di dalam medan listrik yang ditimbulkan oleh tegangan tinggi dinyatakan oleh eV, maka:

$$eV = hf_{\max} + Q.$$

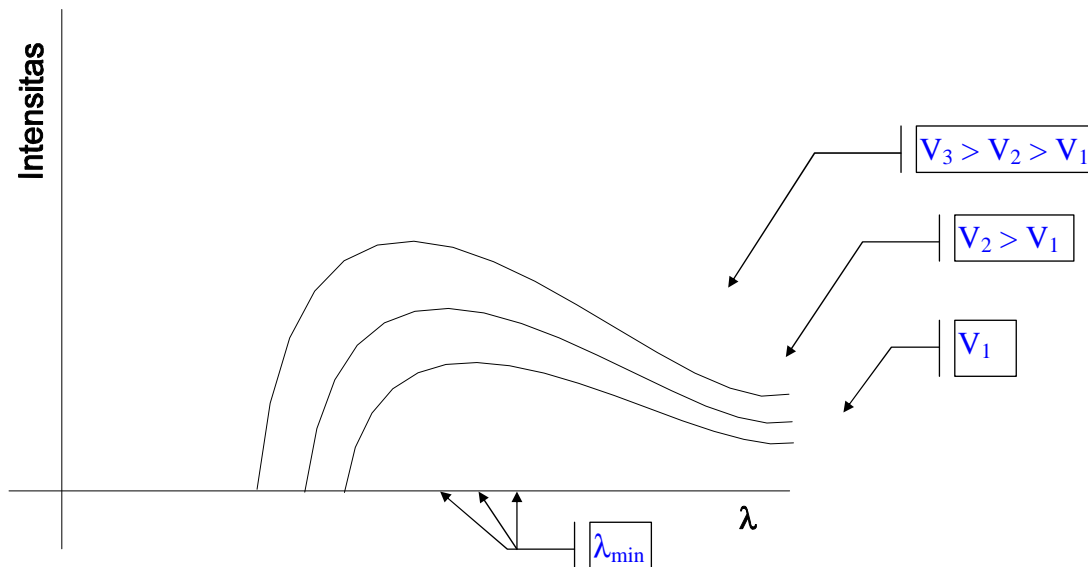
atau

$$eV = hc/\lambda_{\min} + Q,$$

sehingga

$$\lambda_{\min} = (eV - Q)/hc,$$

dimana h adalah konstanta Planck, c adalah cepat rambat cahaya, e adalah muatan listrik elektron, dan V adalah nilai tegangan tinggi yang digunakan. Dalam prakteknya, spektrum bremsstrahlung ini jarang digunakan untuk kegiatan eksperimen dan bahkan sering dihindari karena ia memiliki panjang gelombang yang bermacam-macam. Posisi puncak spektrum bremsstrahlung terletak pada $\frac{2}{3}E_{\max}$ atau pada $\frac{3}{2}\lambda_{\min}$, karena E_{\max} berbanding terbalik dengan λ_{\min} . Untuk menghindari penumpukan panas (Q) pada anoda, setiap sumber sinar-x

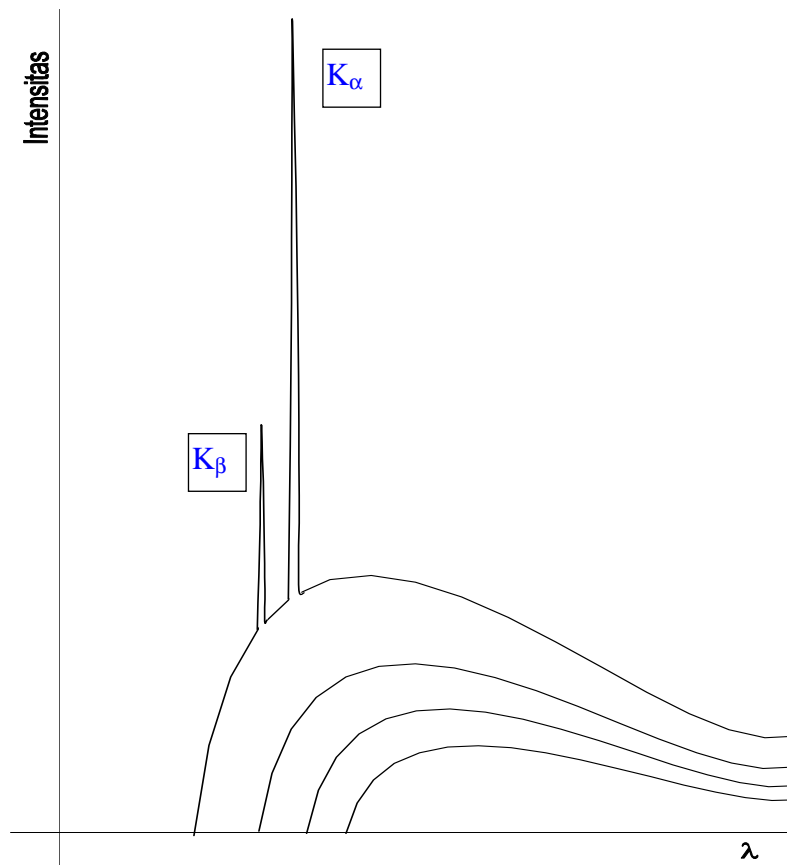


Gambar 4. Spektrum sinar-x bremsstrahlung untuk tegangan tinggi beberapa harga tegangan tinggi. $V_3 > V_2 > V_1$.

yang berdaya besar biasanya selalu dilengkapi dengan aliran air dingin untuk membuang panas (Q) yang timbul.

Sinar-x yang lebih bermanfaat dan sering digunakan dalam setiap kegiatan eksperimen adalah sinar-x monokromatik dan sering disebut *sinar-x karakteristik*. Sinar-x monokromatik (*sinar-x karakteristik*) ini timbul akibat adanya *proses transisi eksitasi elektron* di dalam anoda. Sinar-x ini timbul secara tumpang tindih dengan spektrum bremsstrahlung. Disamping panjang gelombangnya yang monokromatik, intensitas sinar-x monokromatik ini jauh lebih besar dari pada intensitas sinar-x bremsstrahlung. Proses terjadinya sinar-x monokromatik ini dapat dijelaskan sebagai berikut. Jika energi kinetik elektron itu sama dengan atau lebih besar dari pada energi eksitasi atom-atom di dalam anoda maka pada saat elektron-elektron tersebut menumbuk anoda, atom-atom tersebut akan tereksitasi sehingga pada saat atom-atom tersebut kembali ke keadaan ekuilibriumnya mereka akan melepaskan energinya dalam bentuk foton gelombang elektromagnetik yang kita sebut sinar-x *sinar-x karakteristik*. Karena tingkat-tingkat energi di dalam atom-atom itu terkuantisasi maka sinar-x yang dipancarkannya akan memiliki panjang gelombang atau energi yang tertentu, sehingga sinar-x ini disebut sinar-x monokromatik. Sebagai contoh, apabila sinar-x ini timbul akibat transisi elektron dari kulit L ke kulit K maka sinar-x ini akan memiliki energi $E = E_L - E_K$. Garis spektrum sinar-x tersebut lazim dinamai K_α , sehingga panjang gelombangnya sering disebut $\lambda-K_\alpha$. Nama-nama garis spektrum lainnya adalah K_β

(untuk transisi dari kulit M ke kulit K), K_γ (untuk transisi dari kulit N ke kulit K), dan seterusnya. Jika transisi itu terjadi dari tingkat-tingkat energi yang lebih tinggi ke kulit L, maka nama-nama untuk garis-garis spektrum sinar-x yang dihasilkannya adalah L_α , L_β , L_γ , dst., untuk transisi yang terjadi masing masing dari kulit M, N, O,, dst. Apabila kita bandingkan dengan sinar-x bremsstrahlung, sinar-x karakteristik tersebut muncul secara tumpang tindih di dalam spektrum bremsstrahlung, seperti ditunjukkan dalam Gambar 5.



Gambar 5. Sinar -x karakteristik K_α dan K_β yang tumpang tindih di dalam spektrum bremsstrahlung.

Nilai λ sinar-x karakteristik ini tidak bergantung pada besarnya tegangan tinggi yang digunakan, tetapi ia hanya bergantung pada jenis bahan anoda yang digunakan. Hal ini akan dibahas lebih rinci di dalam uraian tentang hukum Allard swt tentang λ karakteristik yang dirumuskan oleh Moseley.

Garis-garis spektrum tersebut di atas sebetulnya masih dapat diuraikan menjadi beberapa panjang gelombang, seperti K_α menjadi $K_{\alpha 1}$ dan $K_{\alpha 2}$ atau K_β menjadi $K_{\beta 1}$ dan $K_{\beta 2}$, sehingga kata “monokromatik” di atas masih belum tepat. Tetapi karena perbedaan antara panjang gelombang $K_{\alpha 1}$ dan $K_{\alpha 2}$ tersebut sangat kecil sehingga sangat sulit untuk dibedakan, maka orang masih lazim menyebut garis-garis spektrum K_α dan K_β tersebut di atas sebagai garis spektrum monokromatik. Namun demikian, kita akan membahas proses terjadinya $K_{\alpha 1}$, $K_{\alpha 2}$, $K_{\beta 1}$, $K_{\beta 2}$ dan seterusnya.

Peristiwa transisi eksitasi yang terjadi dalam atom-atom di dalam anoda untuk menghasilkan $K_{\alpha 1}$ dan $K_{\alpha 2}$ atau $K_{\beta 1}$ dan $K_{\beta 2}$ dan sebagainya diatur oleh *kaidah seleksi*. Kaidah seleksi menyatakan bahwa transisi yang diizinkan terjadi di dalam sebuah atom harus

memenuhi syarat-syarat $\Delta\ell = \pm 1$ dan $\Delta j = 0, \pm 1$, dimana ℓ adalah bilangan kuantum orbit dan j adalah momentum sudut total. Dari mekanika kuantum kita mengetahui bahwa hubungan antara bilangan kuantum orbit (ℓ) dengan bilangan kuantum utama (n) dinyatakan oleh hubungan berikut :

$$\ell = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots, (n-1).$$

Contoh: untuk $n = 4$, nilai-nilai ℓ yang mungkin adalah 0, 1, 2, dan 3.

Momentum sudut total (j) adalah jumlah dari vektor-vektor momentum sudut j_1, j_2, j_3, \dots dst. Dalam hal ini j merupakan jumlah dari momentum sudut orbit (ℓ) elektron dengan momentum sudut intrinsik elektron yang sering disebut *spin elektron* ($s = 1/2$). Dan dari mekanika kuantum pula kita mengetahui bahwa nilai-nilai j yang mungkin adalah

$$j = (\ell + s), (\ell + s - 1), (\ell + s - 2), (\ell + s - 3), \dots, |\ell - s|.$$

Contoh : untuk $n = 4$, nilai-nilai ℓ yang mungkin adalah 0, 1, 2, dan 3. Jadi nilai-nilai j yang mungkin adalah:

- a. untuk $\ell = 0, j = 1/2$.
- b. untuk $\ell = 1, j = 3/2, \text{ dan } 1/2$.
- c. untuk $\ell = 2, j = 5/2, \text{ dan } 3/2$.
- d. untuk $\ell = 3, j = 7/2, \text{ dan } 5/2$.

Sebelum menjelaskan kaidah seleksi lebih lanjut ada baik jika kita bahas terlebih dahulu jumlah elektron yang dapat menempati suatu tingkat energi tertentu.

Jumlah elektron yang menempati setiap tingkat energi yang ditandai oleh bilangan kuantum utama n dapat ditentukan dengan cara *menentukan jumlah komponen momentum sudut total dalam arah sumbu-z*. Jika \mathbf{J} menyatakan operator momentum sudut total, maka \mathbf{J}_z menyatakan operator momentum sudut dalam arah sumbu z . Di dalam mekanika kuantum kita biasa menyatakan eigenstate (keadaan yang tepat/cocok) untuk kedua operator tersebut dengan notasi **ket** sebagai berikut:

$$|j, m\rangle.$$

Jika ket $|j, m\rangle$ merupakan eigenstate bersama untuk \mathbf{J} dan \mathbf{J}_z maka eigenvalue (nilai yang tepat/cocok) untuk kedua operator \mathbf{J}^2 dan \mathbf{J}_z dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}^2 |j, m\rangle &= j(j+1) \hbar^2 |j, m\rangle \\ \mathbf{J}_z |j, m\rangle &= m \hbar |j, m\rangle \end{aligned}$$

dimana $j(j+1)\hbar^2$ dan $m\hbar$ masing masing merupakan eigenvalue dari operator \mathbf{J}^2 dan \mathbf{J}_z . Dengan kata lain, eigenvalue-eigenvalue tersebut merupakan kuadrat dari nilai momentum sudut total dan nilai komponen momentum sudut total dalam arah sumbu z . Nilai m memiliki rentang sebesar $-j < m < j$. Hal ini berarti bahwa nilai-nilai m adalah :

$-\ell, -\ell + 1, -\ell + 2, -\ell + 3, \dots, \ell - 3, \ell - 2, \ell - 1, \ell$. Jadi jumlah komponen momentum sudut total dalam arah sumbu z adalah sebanyak $(2\ell + 1)$. Dengan demikian jumlah elektron dalam setiap tingkat energi juga sebanyak $(2\ell + 1)$.

Contoh:

Jumlah elektron yang dapat menempati tingkat energi dengan bilangan kuantum utama $n = 4$ (kulit N) dapat ditentukan sebagai berikut:

Untuk $n = 4$, nilai-nilai ℓ yang mungkin adalah 0, 1, 2, dan 3. Jadi nilai-nilai ℓ yang mungkin adalah:

- a. untuk $\ell = 0, \ell = 1/2$.
- b. untuk $\ell = 1, \ell = 3/2, \text{ dan } 1/2$.
- c. untuk $\ell = 2, \ell = 5/2, \text{ dan } 3/2$.
- d. untuk $\ell = 3, \ell = 7/2, \text{ dan } 5/2$.

a'. Jumlah elektron yang dapat menempati tingkat energi $\ell = 1/2$ (untuk $n = 4, \ell = 0$) adalah $(2 \times 1/2 + 1) = 2$ buah, yaitu untuk nilai $m = -1/2$ dan $m = 1/2$.

b'. Jumlah elektron yang dapat menempati tingkat-tingkat energi $\ell = 3/2$ (untuk $n = 4, \ell = 1$) dan $\ell = 1/2$ (untuk $n = 4, \ell = 1$) adalah:
 $(2 \times 3/2 + 1) = 4$ buah, dan
 $(2 \times 1/2 + 1) = 2$ buah,
 yaitu untuk nilai-nilai $m = -3/2, -1/2, 1/2, 3/2$; dan $m = -1/2$ dan $1/2$.

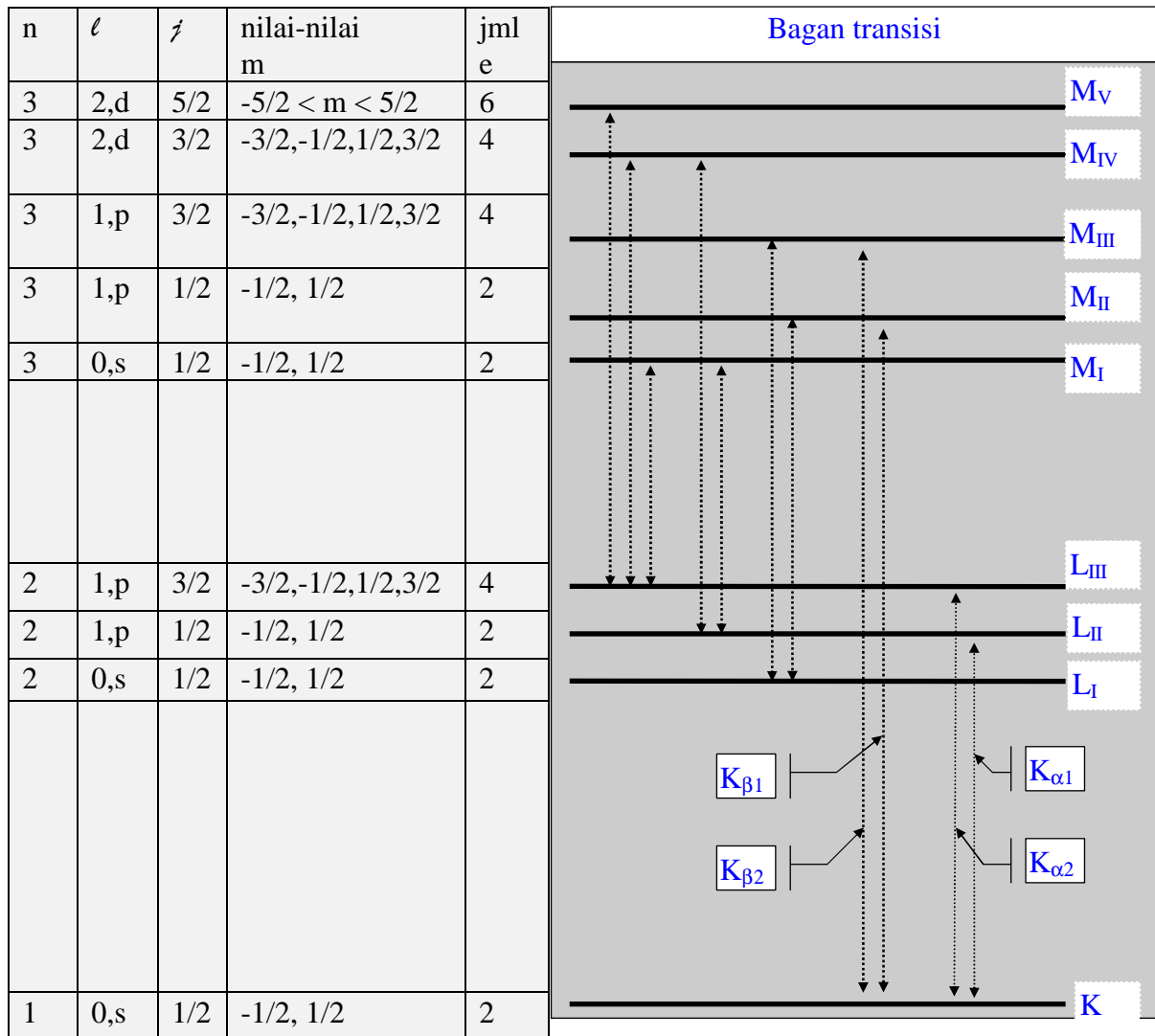
c'. Jumlah elektron yang dapat menempati tingkat-tingkat energi $\ell = 5/2$ (untuk $n = 4, \ell = 2$), dan $\ell = 3/2$ (untuk $n = 4, \ell = 2$) adalah :
 $(2 \times 5/2 + 1) = 6$ buah, dan
 $(2 \times 3/2 + 1) = 4$ buah,
 yaitu untuk nilai-nilai $m = -5/2, -3/2, -1/2, 1/2, 3/2, 5/2$; dan $m = -3/2, -1/2, 1/2, 3/2$.

d'. Jumlah elektron yang dapat menempati tingkat-tingkat energi $\ell = 7/2$ (untuk $n = 4, \ell = 3$), dan $\ell = 5/2$ (untuk $n = 4, \ell = 3$), adalah
 $(2 \times 7/2 + 1) = 8$ buah, dan
 $(2 \times 5/2 + 1) = 6$ buah,
 yaitu untuk nilai-nilai $m = -7/2, -5/2, -3/2, -1/2, 1/2, 3/2, 5/2, 7/2$; dan $m = -5/2, -3/2, -1/2, 1/2, 3/2, 5/2$.

Jadi jumlah elektron yang dapat menempati tingkat energi $n = 4$ (kulit N) adalah :

$$(2) + (4 + 2) + (6 + 4) + (8 + 6) = 32 \text{ buah.}$$

Dengan menggunakan contoh di atas anda dapat menentukan jumlah elektron yang dapat menempati tingkat-tingkat energi lainnya seperti untuk $n = 1$ (kulit K) adalah 2 buah, untuk $n = 2$ (kulit L) adalah 8 buah, untuk $n = 3$ (kulit M) adalah 18 buah, dan untuk nilai-nilai n lainnya. Berdasarkan contoh-contoh tersebut di atas kita dapat menyimpulkan bahwa jumlah elektron yang dapat menempati tingkat energi yang ke n



Gambar 6. Bagan transisi eksitasi yang diizinkan oleh kaidah seleksi $\Delta\ell = \pm 1$ dan $\Delta j = 0, \pm 1$. Setiap baris dalam tabel sebelah kanan bersesuaian dengan setiap tingkat energi dalam bagan di sebelah kanan.

dapat dinyatakan oleh rumus $2n^2$, dimana n adalah bilangan kuantum utama. Penjelasan tersebut di atas dapat dirangkum dalam bagan transisi eksitasi berikut ini. Dengan menggunakan kaidah seleksi $\Delta\ell = \pm 1$ dan $\Delta j = 0, \pm 1$ kita dapat memahami proses transisi eksitasi yang diizinkan terjadi di dalam sebuah atom. Perhatikanlah bagan transisi yang ditunjukkan dalam Gambar 6 untuk tingkat energi K, L, dan M.

Perhatikan bahwa dalam kolom ℓ kami juga mencantumkan notasi untuk sub-kulit (s, p, d, f, dan seterusnya) yang sesuai dengan setiap nilai ℓ . Notasi sub kulit ini dihubungkan dengan ℓ sebagai berikut:

Nilai ℓ	Nama sub-kulit
--------------	----------------

0	s
1	p
2	d
3	f
dst.	dst.

Dalam bagan di sebelah kanan pada Gambar 6 di atas telah ditunjukkan semua transisi yang mungkin terjadi yang sesuai dengan kaidah seleksi untuk $n = 1$ sampai $n = 3$. Semua transisi yang diizinkan ditunjukkan oleh anak panah dua arah. Kita dapat melihat bahwa terdapat beberapa proses transisi yang tidak mungkin terjadi, seperti dari L_I ke K . Hal ini karena $\Delta l = 0$ dilarang oleh kaidah seleksi. Demikian juga transisi dari sub kulit M_I ke L_I . Transisi dari M_V ke L_I dilarang tidak hanya karena $\Delta l \neq \pm 1$ tetapi juga karena $\Delta j \neq 0, \pm 1$. Sedangkan transisi dari M_V ke L_{II} dilarang hanya karena $\Delta j \neq 0, \pm 1$.

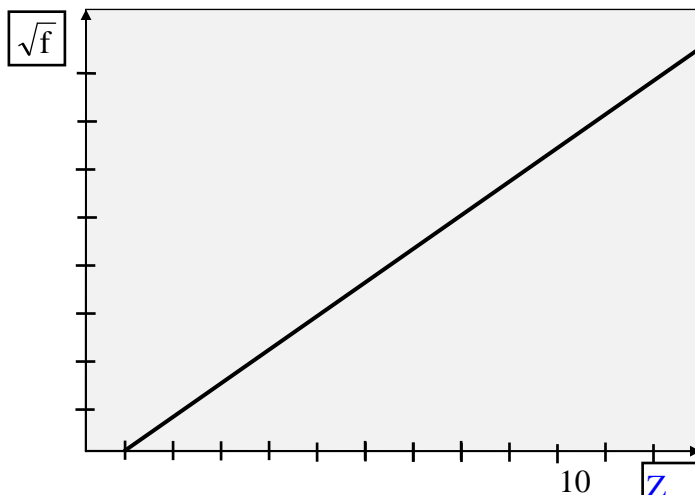
Akhirnya, dalam Gambar 6 tersebut kita dapat lihat dan memahami bahwa K_α terurai menjadi $K_{\alpha 1}$ dan $K_{\alpha 2}$. Disamping itu, K_β juga terurai menjadi $K_{\beta 1}$ dan $K_{\beta 2}$. Begitu juga dengan spektrum garis deret L.

4. Hukum Allah swt tentang λ karakteristik

Seperti dijelaskan di atas bahwa λ karakteristik tidak bergantung pada tegangan tinggi tetapi bergantung pada jenis bahan anoda yang digunakan. Keraturan tentang ketergantungan ini telah dipelajari dan diteliti oleh seorang ahli fisika yang bernama Moseley. Moseley telah meneliti λ karakteristik untuk 39 jenis bahan anoda, mulai dari bahan aluminium (Al) sampai bahan emas (Au). Dari hasil penelitian itu ia menemukan hubungan linier antara $\lambda^{-1/2}$ dengan nomor atom (Z) bahan anoda tersebut. Hubungan tersebut dinyatakan oleh persamaan

$$\sqrt{\frac{c}{\lambda}} = C_n (Z - \sigma) = \sqrt{f},$$

dimana c adalah cepat rambat cahaya, C_n adalah sebuah tetapan yang tidak bergantung pada Z , f adalah frekuensi sinar-x karakteristik, dan σ bernilai antara 1 dan 2 untuk deret K ($K_\alpha, K_\beta, K_\gamma, \text{dst.}$) dan bernilai antara 7,4 sampai 9,4 untuk deret L. Plot \sqrt{f} sebagai fungsi nomor atom ditunjukkan pada Gambar 7.

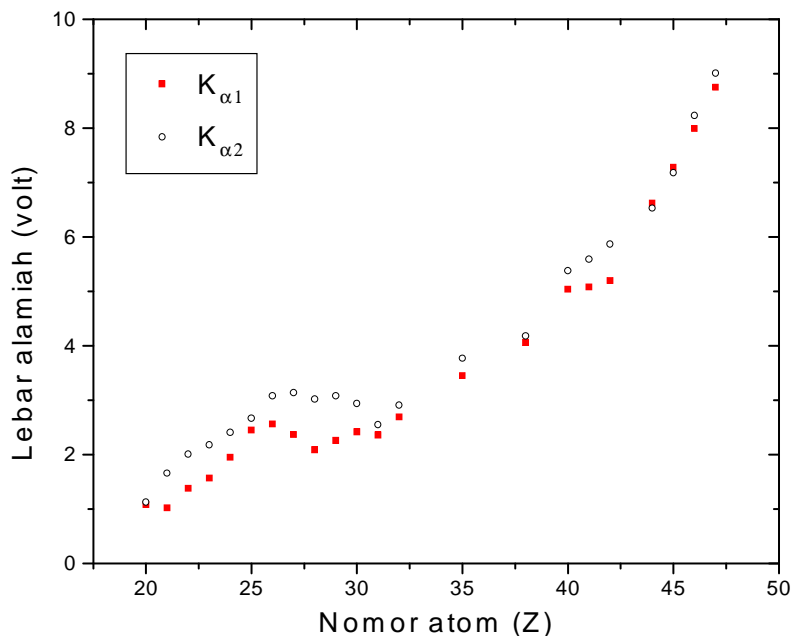


Gambar 7. Plot \sqrt{f} sebagai fungsi Z untuk garis K_α .

5. Lebar alamiah garis spektrum karakteristik

Pada pasal 1.3 kita telah mendiskusikan spektrum karakteristik sinar-x. Pada akhir pasal 1.3 kita lihat bahwa garis-garis K_{α} dan K_{β} yang masing-masing disebut monokromatik ternyata masih dapat di uraikan lagi masing-masing menjadi $K_{\alpha 1}$, $K_{\alpha 2}$ dan $K_{\beta 1}$, $K_{\beta 2}$. Hal ini menunjukkan bahwa garis-garis spektrum $K_{\alpha 1}$, $K_{\alpha 2}$ dan $K_{\beta 1}$, $K_{\beta 2}$ “lebih monokromatik” dari pada garis-garis K_{α} dan K_{β} itu sendiri. Meskipun kenyataannya memang demikian, tetapi sesungguhnya garis-garis $K_{\alpha 1}$, $K_{\alpha 2}$ dan $K_{\beta 1}$, $K_{\beta 2}$ masih memiliki **lebar garis** yang tidak dapat diabaikan, sehingga garis-garis $K_{\alpha 1}$, $K_{\alpha 2}$ dan $K_{\beta 1}$, $K_{\beta 2}$ tersebut tidak betul-betul hanya terdiri dari satu λ . Lebar garis ini lazim disebut **lebar alamiah sinar-x karakteristik**.

Lebar alamiah ini juga bergantung pada nomor atom bahan anoda. Banyak ahli fisika yang telah melakukan pengukuran lebar alamiah sinar-x dari beberapa unsur dengan menggunakan bermacam-macam metoda. Gösta Brogren, misalnya, pada tahun 1955 telah melaporkan hasil penelitian tentang lebar alamiah sinar-x di dalam jurnal Arkiv Fysik dengan menggunakan difraktometer yang memfokuskan sinar-x (Focusing diffractometer). Tetapi hasil yang ia peroleh dengan cara ini adalah kurang dapat dipercaya karena cara ini menimbulkan efek pelebaran (broadening effect) pada lebar alamiah yang diakibatkan oleh deformasi kristal yang digunakan di dalam difraktometer tersebut. Kemudian pada tahun 1962 ia melaporkan lagi hasil penelitian yang baru tentang lebar alamiah ini dengan menggunakan difraktometer kristal ganda (double crystal diffractometer). Kedua kristal yang digunakan dalam difraktometer ini adalah kristal quarsa (quartz) dan kristal kalsait (calcite). Hasil ini jauh lebih baik karena cara ini tidak menimbulkan efek pelebaran sehingga semua lebar alamiah yang terukur jauh lebih sempit dari pada lebar alamiah hasil pengukuran terdahulu. Hasil pengukuran ini ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Lebar alamiah sinar-x karakteristik sebagai fungsi nomor atom (Z).

Daftar Pustaka

1. C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, 6th ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991.
2. B. K. Agarwal, X-Ray Spectroscopy, an Introduction, 2nd ed., Springer-Verlag, London, 1991.
3. N. W. Ashcroft & N. D. Mermin, Solid State Physics, W. B. Saunder Co., Philadelphia, 1976.
4. M. A. Omar, Elementary Solid State Physics, Addison-Wesley, Reading, 1975.
5. B. H. Bransden & C. J. Joachain, Physics of Atoms and Molecules, Longman Scientific & Technical, New York, 1991.