Mengenal Fisika Nuklir

Imam Fachruddin

(Departemen Fisika, Universitas Indonesia)

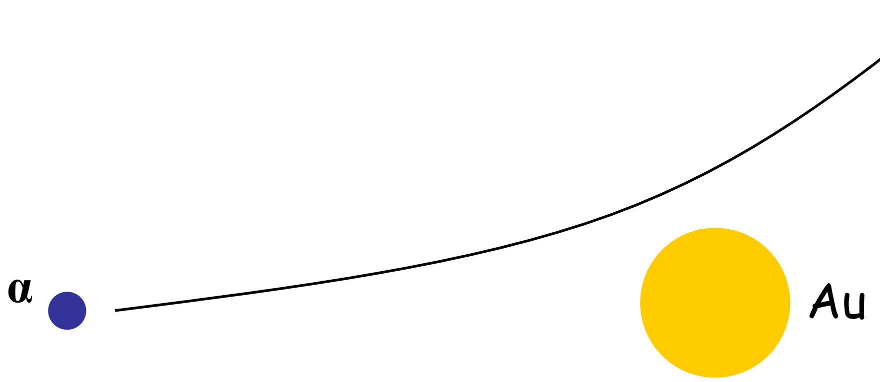
Daftar Pustaka:

- P. E. Hodgson, E. Gadioli, E. Gadioli Erba, Introductory Nuclear Physics (Oxford U. P., New York, 2000)
- J. M. Blatt & V. F. Weisskopf, Theoretical Nuclear Physics (Dover Publications, Inc., New York, 1991)
- W. E. Meyerhof, Elements of Nuclear Physics (McGraw-Hill Book Co., Singapore, 1989)

Isi

- pendahuluan
- sifat-sifat inti
- ketidakstabilan inti
- radioaktivitas
- model inti
- gaya nuklir / interaksi kuat
- fisika partikel
- astrofisika nuklir
- akselerator dan detektor
- reaktor nuklir

Perhitungan Hamburan Rutherford



proses : hamburan partikel alfa ($_2He^4$) oleh inti emas ($_{79}Au^{197}$)

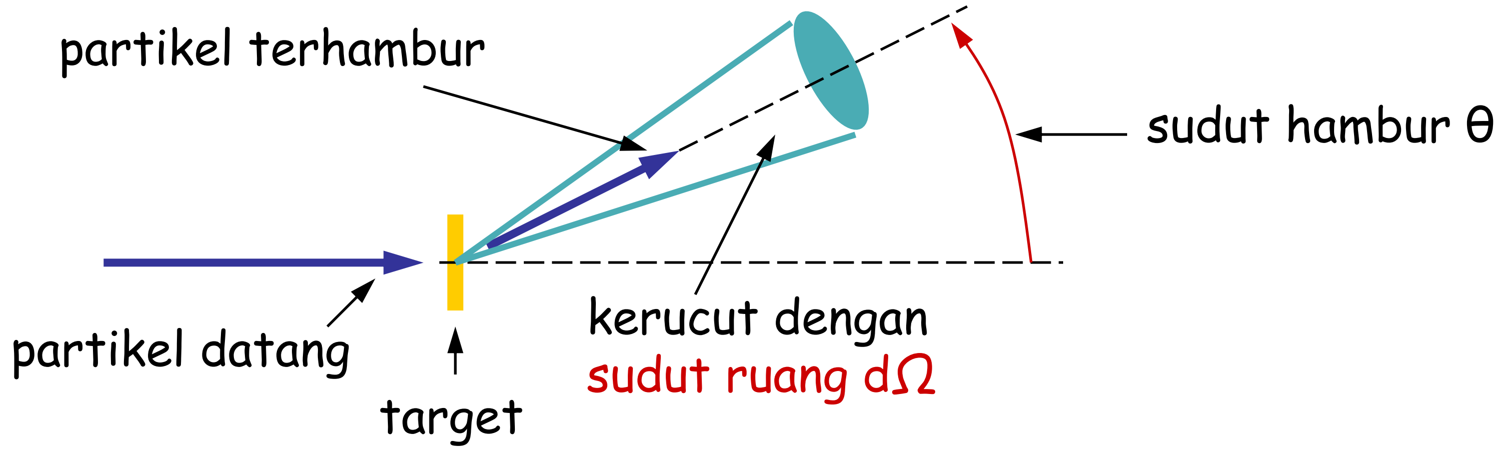
interaksi : Coulomb

muatan α = 2e

muatan Au = Ze, (Z = 79)

gaya: $\vec{F} = k\dfrac{2Ze^2}{r^3}\vec{r}$, ($\vec{r}$: posisi α relatif thd inti Au)

Besaran utama yang dicari untuk sebuah proses hamburan yaitu penampang lintangnya (σ). Penampang lintang hamburan berkaitan dengan peluang proses hamburan itu terjadi. Dalam ungkapan lain, rasio jumlah partikel yang terhambur terhadap jumlah partikel yang datang ditentukan oleh penampang lintang.



Penampang lintang differensial dihitung sebagai:

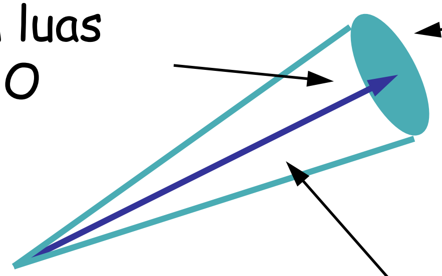
$$\boxed{\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\text{arus partikel terhambur ke arah } \theta \text{ per sudut ruang } d\Omega}{\text{arus partikel datang} \times \text{rapat luas pusat hamburan}}}$$

Arus partikel yaitu, jumlah partikel yang lewat per satuan waktu. Pusat hamburan Rutherford yaitu inti Au, yang merupakan pusat massa sistem α-Au.

Sudut Ruang

$\vec{r}$: posisi elemen luas dS terhadap O

elemen luas dS :
bidang dS tegak lurus terhadap $\vec{r}$



O

elemen sudut ruang $d\Omega$: $\boxed{d\Omega = \dfrac{dS}{r^2}}$

dalam koordinat bola: $dS = r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \longrightarrow d\Omega = \sin\theta \, d\theta \, d\varphi$

titik A:

kecepatan α: $\vec{v}_i = v_0\hat{k}$

posisi α: $\vec{r}_A$, $r_A \to \infty$, $\beta_A \to 0°$

momentum angular sistem α-Au:

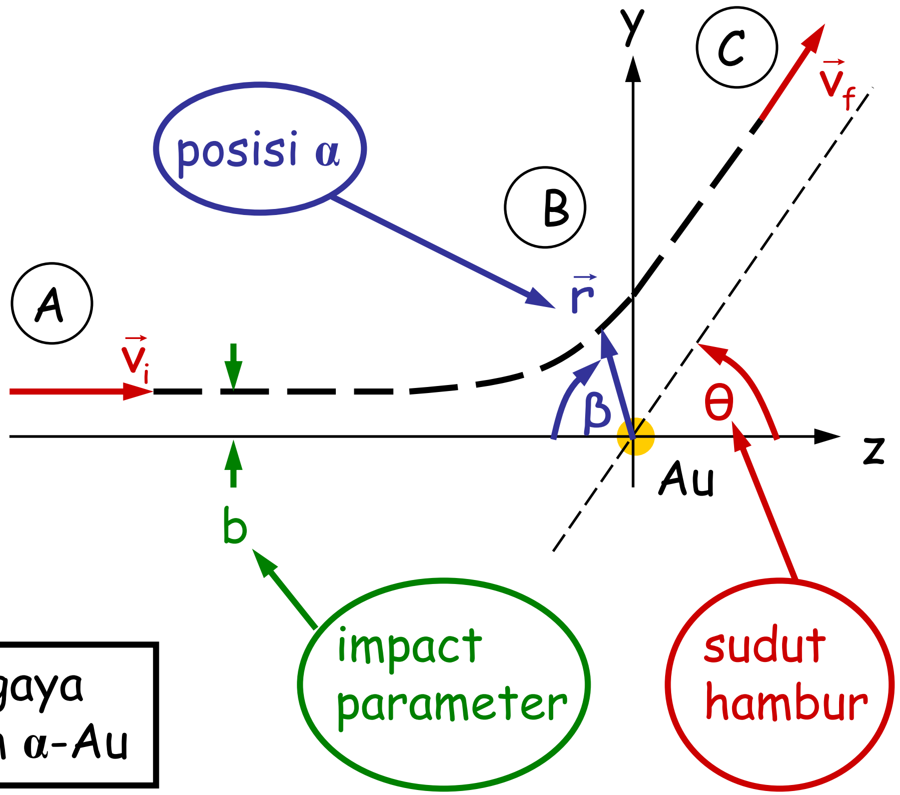
$$\vec{l}_A = \vec{r}_A \times \vec{p}_A \qquad \mu = \text{massa tereduksi}$$

$$= \mu\left(\vec{r}_A \times \vec{v}_i\right) \qquad = \frac{m_\alpha m_{Au}}{m_\alpha + m_{Au}}$$

$$l_A = \mu v_0 r_A \sin\beta_A$$

$$= \mu v_0 b$$

kekal, karena tidak ada gaya luar bekerja pada sistem α-Au



titik B:

posisi α pd sembarang waktu: $\vec{r} = (r, \beta)$

momentum angular α–Au: $l = l_A = \mu v_0 b$

titik C:

kecepatan α: $\vec{v}_f$, $v_f = v_0$

sudut hambur θ: $\cos\theta = \hat{v}_f \cdot \hat{v}_i$

posisi: $\vec{r}_C$, $r_C \to \infty$, $\beta_C = \pi - \theta$

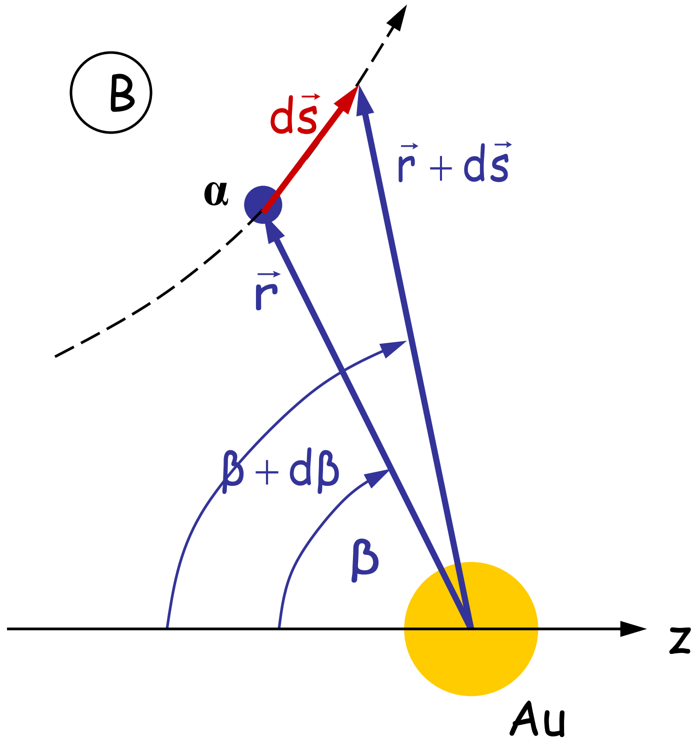
momentum angular α–Au: $l_C = l_A = \mu v_0 b$

momentum angular:

$$
\begin{aligned}
l &= \mu|\vec{r}\times\vec{v}| \\
&= \mu\left|\vec{r}\times\frac{d\vec{s}}{dt}\right| \\
&= \mu r^2\frac{d\beta}{dt}\left|\hat{r}\times d\hat{s}\right| \qquad (ds = r\,d\beta) \\
&= \mu r^2\frac{d\beta}{dt} \qquad (d\beta\to 0)
\end{aligned}
$$

momentum angular kekal:

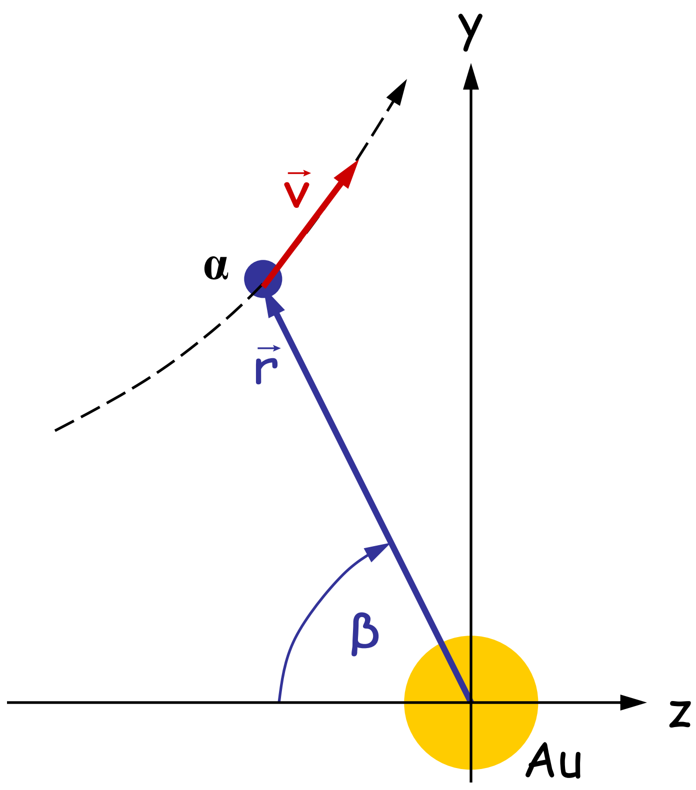
$$
l = \mu r^2\frac{d\beta}{dt} = \mu v_0 b \longrightarrow \boxed{\frac{d\beta}{dt} = \frac{v_0 b}{r^2}}
$$



gerak pada sumbu y:

$$\mu\frac{dv_y}{dt} = k\frac{2Ze^2}{r^2}\sin\beta$$

$$\rightarrow\ dv_y = k\frac{2Ze^2}{\mu r^2}\sin\beta\, dt$$
$$= k\frac{2Ze^2}{\mu r^2}\sin\beta\left(\frac{d\beta}{dt}\right)^{-1} d\beta$$
$$= k\frac{2Ze^2}{\mu v_0 b}\sin\beta\, d\beta$$



$$\rightarrow\ v_{f,y} = \int_0^{v_{f,y}} dv_y$$
$$= k\frac{2Ze^2}{\mu v_0 b}\int_0^{\pi-\theta}\sin\beta\, d\beta$$
$$= k\frac{2Ze^2}{\mu v_0 b}(1+\cos\theta)$$
$$= v_0\sin\theta$$

$$\cos\theta = \cos^2\frac{\theta}{2} - \sin^2\frac{\theta}{2}$$
$$\sin\theta = 2\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2}$$

$$\boxed{b = k\frac{2Ze^2}{\mu v_0^2}\cot\frac{\theta}{2}}$$

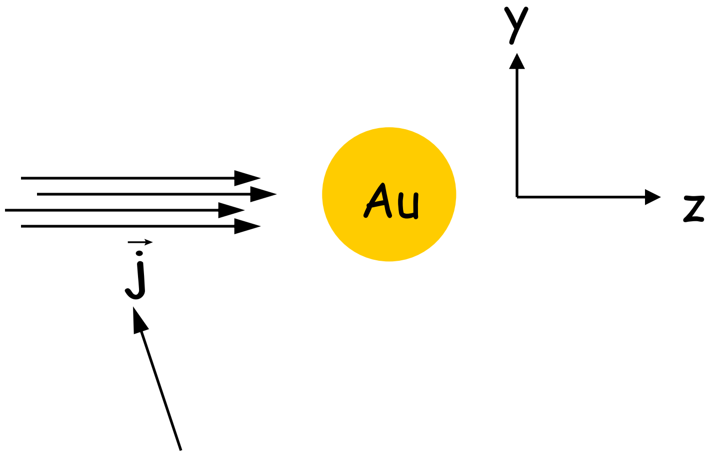
Sudut hambur θ berhubungan dengan impact parameter b; partikel α yang datang dengan impact parameter b akan terhambur ke arah θ:

$$b = k\frac{2Ze^2}{\mu v_0^2}\cot\frac{\theta}{2}$$

Partikel α yang datang dengan impact parameter lebih besar (jauh dari inti Au, interaksi lebih lemah) akan terhambur ke sudut yang lebih kecil:

$$db = k\frac{Ze^2}{\mu v_0^2}\operatorname{cosec}^2\frac{\theta}{2}(-d\theta)$$

Partikel α yang terhambur ke arah θ sampai θ+dθ (= partikel α yang terhambur ke sudut ruang dΩ pada arah θ) yaitu,
yang datang mendekati Au dengan impact parameter b sampai b-db. = ?

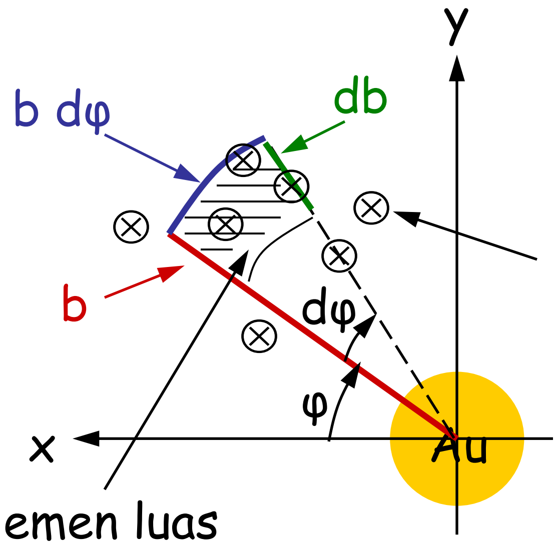


rapat fluks partikel α =
arus partikel α
per satuan luas
yang ditembus
secara tegak lurus:

$$\vec{j} = n\vec{v}$$

$n =$ jumlah partikel α per volume

$\vec{v} =$ kecepatan partikel α



partikel α datang searah sumbu z (masuk ke layar)

elemen luas
b db dφ

arus partikel α yang menembus elemen luas b db dφ pada arah φ yaitu,

$$jb\,db\,d\varphi$$

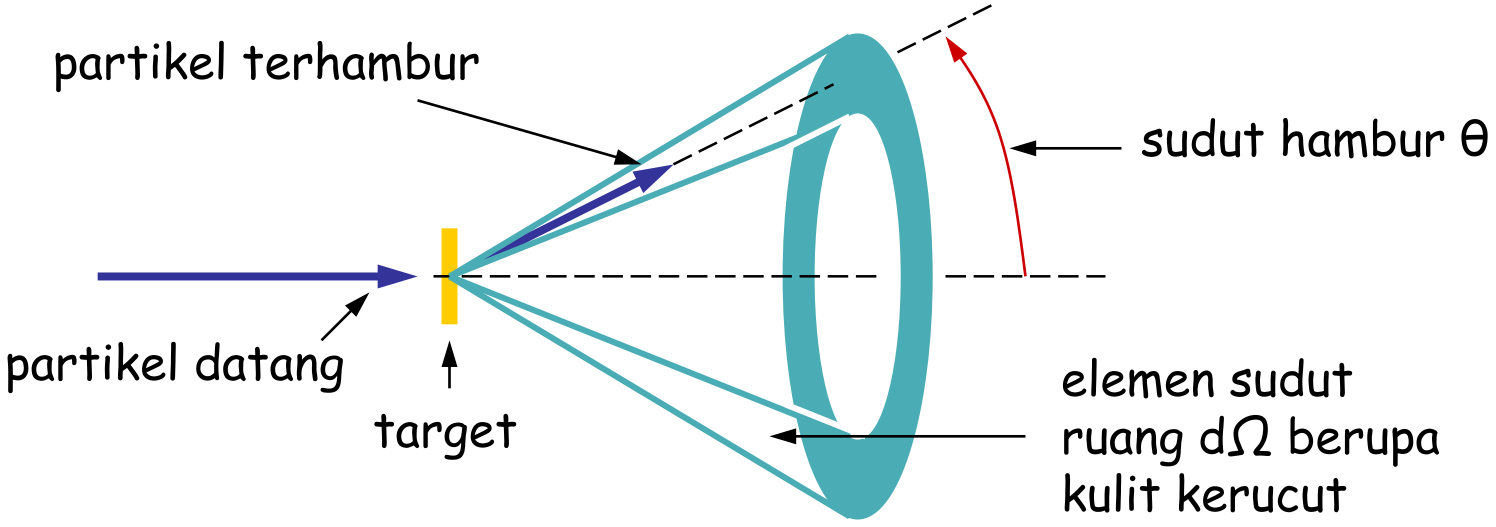
arus partikel α yang datang dengan impact parameter b sampai b-db yaitu,

$$\int_0^{2\pi} jb\,(-db)\,d\varphi = 2\pi\, jb\,(-db)$$

$$= \pi\, j\left(k\frac{2Ze^2}{\mu v_0^2}\right)^2 \cot\frac{\theta}{2}\,\mathrm{cosec}^2\frac{\theta}{2}\,d\theta$$

Jadi, arus partikel α terhambur ke sudut ruang $d\Omega$ pada arah θ $= \pi j \left(k \frac{2Ze^2}{\mu v_0^2} \right)^2 \cot \frac{\theta}{2} \operatorname{cosec}^2 \frac{\theta}{2} \, d\theta$

Nilai di atas merupakan arus partikel α yang terhambur ke sudut ruang $d\Omega$ pada arah θ untuk semua arah φ dari 0 sampai 2π. Dengan kata lain, ke elemen sudut ruang $d\Omega$ berupa kulit kerucut yang simetris terhadap arah partikel α datang:



Besar elemen sudut ruang seperti itu: $d\Omega = 2\pi \sin\theta \, d\theta$ $\left(2\pi \text{ didapat dari } \int_0^{2\pi} d\varphi \right)$

Dengan begitu diperoleh: $\boxed{\text{arus partikel } \alpha \text{ terhambur ke arah } \theta \text{ per sudut ruang } d\Omega = \frac{j}{4} \left(k \frac{2Ze^2}{\mu v_0^2} \right)^2 \operatorname{cosec}^4 \frac{\theta}{2}}$

Penampang Lintang

Penampang lintang differensial:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\text{arus partikel terhambur ke arah } \theta \text{ per sudut ruang } d\Omega}{\text{arus partikel datang} \times \text{rapat luas pusat hamburan}}$$

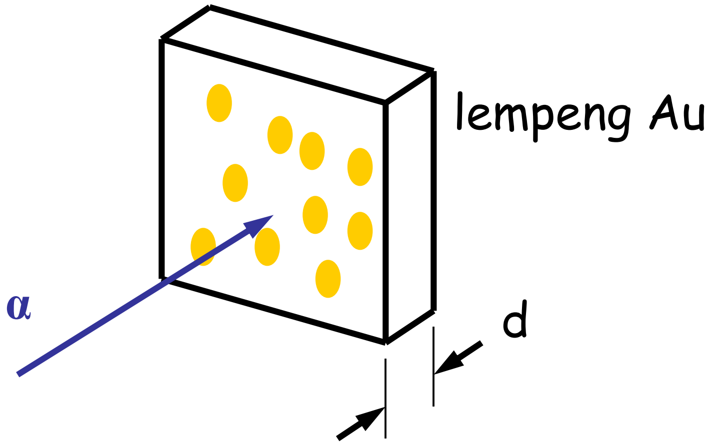
Pada perhitungan telah digunakan 1 inti Au sebagai target (pusat hamburan):

$$\begin{aligned} &\text{arus partikel datang} \times \text{rapat luas pusat hamburan} \\ &\quad = \text{arus partikel datang} \times 1 / \text{satuan luas} \\ &\quad = \text{arus partikel datang} / \text{satuan luas} \\ &\quad = \text{rapat fluks } j \end{aligned}$$

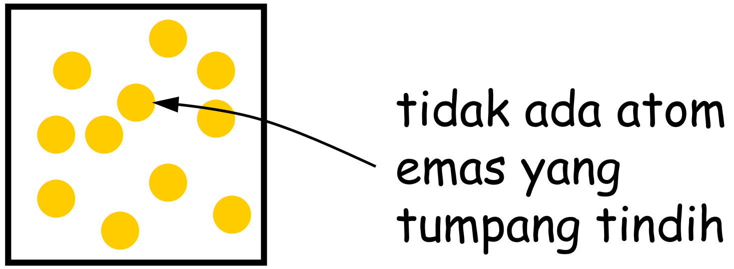
Jadi, diperoleh:

$$\boxed{\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{4}\left(k\frac{2Ze^2}{\mu v_0^2}\right)^2 \operatorname{cosec}^4 \frac{\theta}{2}}$$

Dalam eksperimen digunakan target berupa lempeng tipis emas. Berarti ada lebih dari satu atom emas sebagai pusat hamburan.



Lempeng itu dibuat setipis mungkin (d kecil sekali) sehingga dianggap tidak ada atom emas yang tumpang tindih (tidak ada atom emas yang berada di belakang yang lain). Dengan kata lain, atom-atom emas itu terdistribusi pada suatu luasan.



rapat luas pusat hamburan = rapat luas atom emas = ?

jumlah partikel terhambur = ?

- Satu mol zat berisi 6.022×10^{23} satuan penyusun zat itu (atom, sel, molekul, unit kristal dll). Contoh: 1 mol air berisi 6.022×10^{23} molekul air, 1 mol emas berisi 6.022×10^{23} atom emas. Angka ini disimpan dalam bilangan Avogadro N_A:

$$N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Bilangan itu juga merupakan jumlah atom dalam 12 gr C^{12}. Dengan begitu:

$$\text{massa molar } C^{12} = 12 \text{ gr.mol}^{-1}$$

- Nomor massa A suatu nuklida merupakan pembulatan nilai massa atomnya dalam satuan u (unified atomic mass unit), yang didefinisikan sebagai:

$$1\,\text{u} \equiv \frac{1}{12} \text{massa atom } C^{12}$$

Contoh: massa atom emas (Au^{197}) = 196.97 u.

Maka untuk atom X^A: $\text{massa atom } X^A \approx \frac{A}{12} \times \text{massa atom } C^{12}$

$$\longrightarrow \boxed{\text{massa molar } X^A \approx A \text{ gr.mol}^{-1}}$$

- Jumlah atom dalam M gram X^A: $\boxed{\frac{\text{massa}}{\text{massa molar}} \times N_A = \frac{M}{A} N_A}$

Jika ρ massa jenis (massa/volume) emas, A nomor massa Au, N_A bilangan Avogadro dan tebal target d, maka rapat luas atom emas: $\boxed{\frac{\rho d}{A} N_A}$

Pusat hamburan (atom Au) lebih dari satu; berapa jumlah partikel terhambur pada arah θ memasuki sudut ruang $\Delta\Omega$?

Jumlah partikel yang lewat dapat diketahui dari arus atau rapat fluksnya:

$$\frac{\text{rapat fluks partikel terhambur ke arah }\theta\text{ per sudut ruang }d\Omega}{\text{rapat fluks partikel datang}}$$

$$= \frac{\text{arus partikel terhambur ke arah }\theta\text{ per sudut ruang }d\Omega}{\text{arus partikel datang}}$$

$$= \text{rapat luas pusat hamburan} \times \frac{d\sigma}{d\Omega}$$

$$= \frac{\rho d}{A} N_A \frac{1}{4}\left(k\frac{2Ze^2}{\mu v_0^2}\right)^2 \operatorname{cosec}^4\frac{\theta}{2}$$

Maka, rapat fluks partikel yang terhambur ke sudut ruang $\Delta\Omega$ pada arah θ:

$$\boxed{\frac{\rho d}{A} N_A \frac{j}{4}\left(k\frac{2Ze^2}{\mu v_0^2}\right)^2 \operatorname{cosec}^4\frac{\theta}{2}\Delta\Omega}$$