

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
-

Pendahuluan

Beberapa istilah:

- **Atom** terdiri atas **inti** (**nucleus**, jamak: **nuclei**) dan **elektron** di sekitar inti.
- Sebutan **nuklir** (**nuclear**) menunjukkan sesuatu yang berhubungan dengan / melibatkan inti (inti atom). Sementara, sebutan inti bisa berarti inti atom itu sendiri atau sesuatu yang berhubungan dengan inti atom. Contoh:
 - reaksi nuklir atau reaksi inti: reaksi yang melibatkan inti atom,
 - energi nuklir: energi yang dihasilkan pada reaksi nuklir
 - bom nuklir: bom yang memanfaatkan reaksi inti
 - fisika nuklir atau fisika inti: fisika mengenai inti atom
- **Nuklida** (**nuclide**) yaitu, sebutan untuk inti atom suatu unsur (element). Contoh: nuklida hidrogen, nuklida aluminium, nuklida emas, nuklida yodium, nuklida fosfor dll.

Perbandingan ukuran beberapa benda:

benda	ukuran [m]
sel	10^{-5}
molekul	$10^{-9} - 10^{-10}$
atom	$10^{-10} - 10^{-11}$
inti	$10^{-14} - 10^{-15}$
nukleon	10^{-15}

- Catatan:
- nukleon yaitu **proton** dan **netron**
 - $10^{-6}\text{m} = 1\ \mu$ (**mikron**), $10^{-15}\text{m} = 1\ \text{fm}$ (**fermi**)

Saat-saat awal fisika nuklir:

waktu	penemu / pencetus	penemuan / ide	
± awal abad 20	Thomson	<ul style="list-style-type: none">• elektron• model atom Thomson	NOK!
1911	Rutherford	<ul style="list-style-type: none">• inti atom• model atom Rutherford	OK!
1919	Rutherford	<ul style="list-style-type: none">• proton• inti mengandung proton	OK!
sampai 1932	fisikawan	<ul style="list-style-type: none">• model inti: inti terdiri atas proton dan elektron	NOK!
1920	Rutherford	<ul style="list-style-type: none">• kemungkinan adanya obyek netral hasil pasangan proton dan elektron	NOK!
1932	Chadwick	<ul style="list-style-type: none">• netron	
1932	Heisenberg	<ul style="list-style-type: none">• model inti: inti terdiri atas proton dan netron	OK!

Hamburan Rutherford

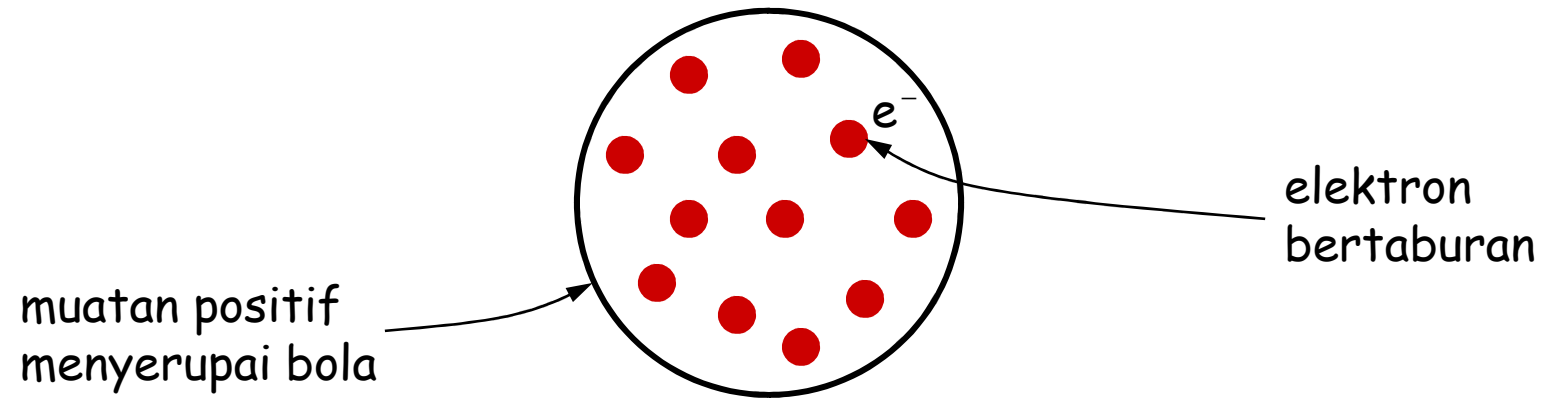
Untuk mempelajari struktur atom, Rutherford membuat eksperimen menembakkan partikel alfa ke lembar tipis emas.

Saat itu masih dipercaya model atom Thomson. Menurut model ini, diperkirakan partikel alfa akan dibelokkan hanya sedikit saja. Namun ternyata, ada juga partikel alfa yang dihamburkan balik ke belakang (sudut hambur besar).

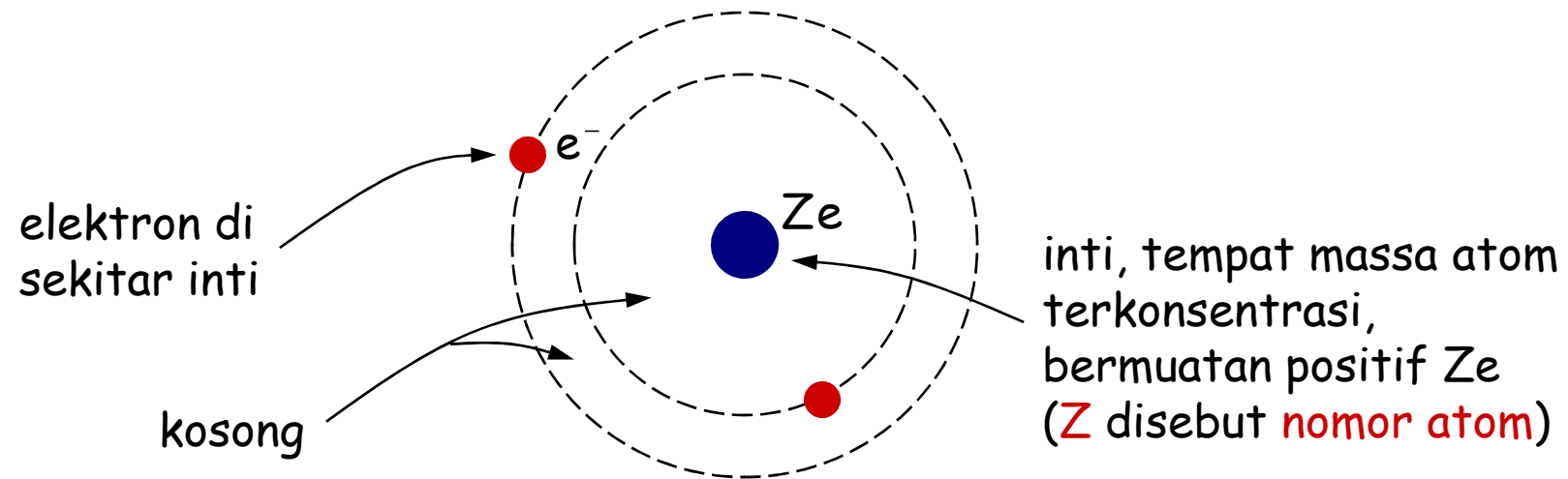
Eksperimen ini menunjukkan bahwa model atom Thomson salah dan membawa Rutherford pada model atom yang lebih baik yaitu, atom memiliki inti di pusat yang merupakan konsentrasi seluruh massa atom, sementara di sekeliling inti beredar elektron-elektron. Partikel alfa yang lewat dekat dari inti emas akan dibelokkan dengan kuat, sementara yang lewat jauh dari inti emas dibelokkan sedikit.

Perhitungan sederhana Rutherford (berbekal fisika 'SMA') berdasarkan model ini sesuai dengan hasil eksperimen.

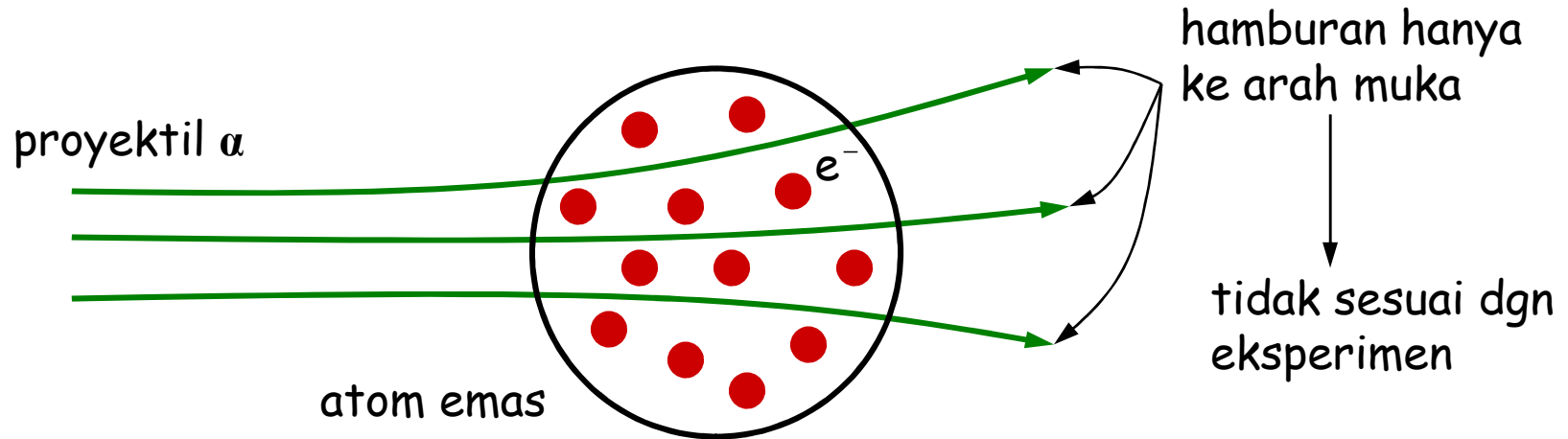
Model Atom Thomson



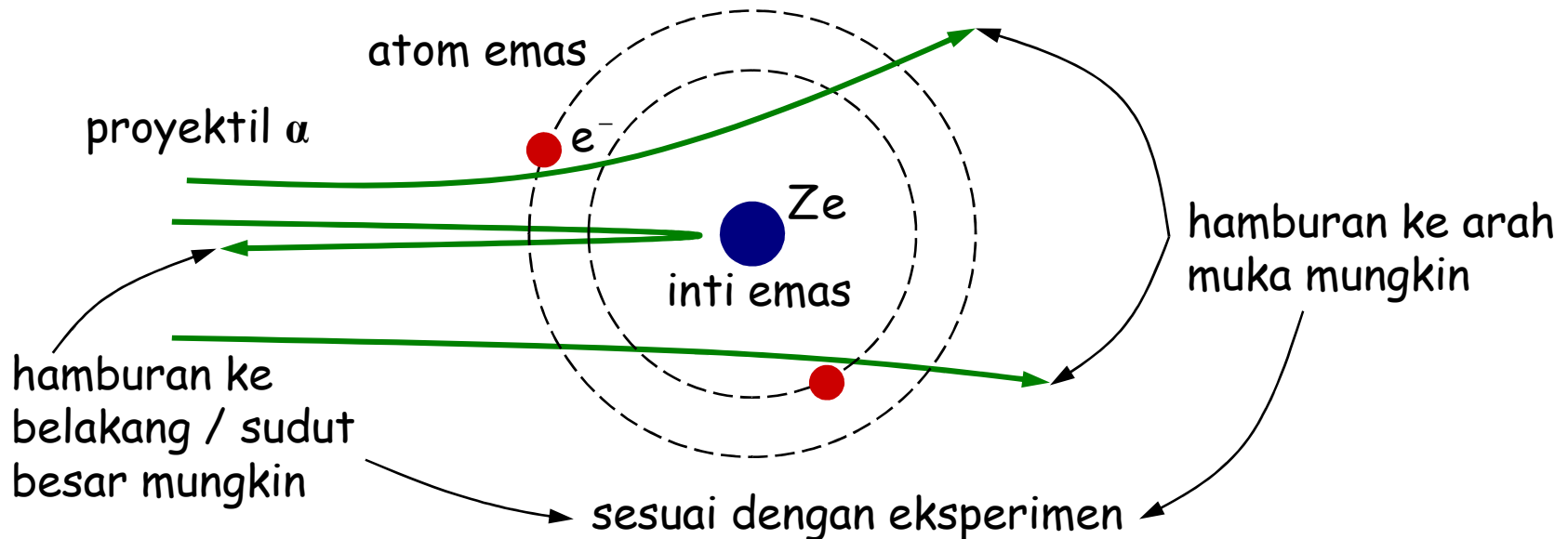
Model Atom Rutherford



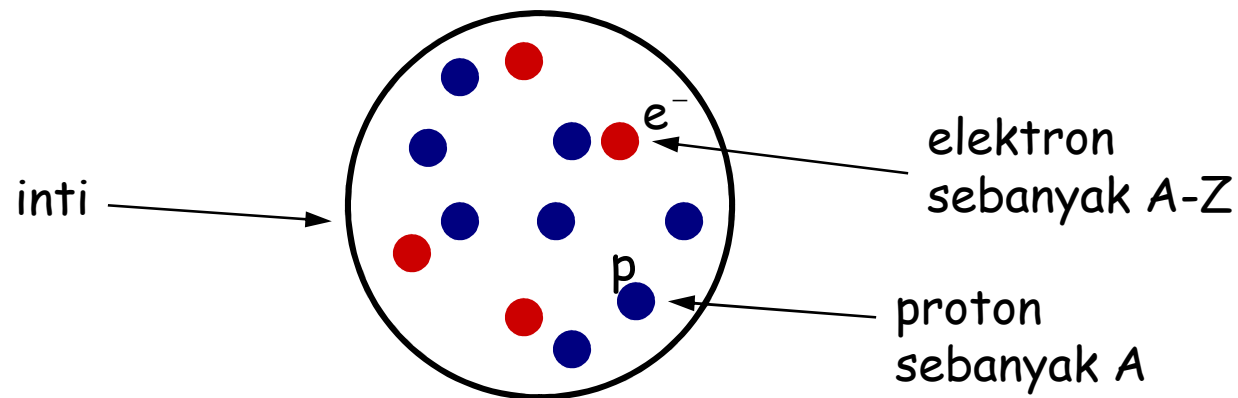
Hamburan Rutherford menurut model atom Thomson:



Hamburan Rutherford menurut model atom Rutherford:



Model Inti Sampai 1932



Inti terdiri dari proton dan elektron. Jumlah proton menentukan massa inti (**nomor massa A** sama dengan jumlah proton), jumlah elektron sedemikian sehingga bersama semua proton menentukan muatan inti (nomor atom Z sama dengan jumlah proton - jumlah elektron).

Contoh, nuklida Nitrogen dgn $A = 14$ (${}^7_{}N^{14}$) terdiri dari 14 proton dan 7 elektron.

Namun, model ini gagal menjelaskan spin N^{14} yang bernilai 1:

Proton dan elektron masing-masing berspin $\frac{1}{2}$. Tidak mungkin kombinasi 21 buah spin bernilai $\frac{1}{2}$ menghasilkan spin bernilai 1 (bilangan bulat).

Dengan begitu, model ini gagal, inti tidak terdiri dari proton dan elektron.

Nilai spin S yang mungkin hasil kombinasi N buah spin bernilai $\frac{1}{2}$:

$$S = \frac{N}{2}, \frac{N}{2} - 1, \frac{N}{2} - 2, \dots, \begin{cases} 0 & (N \text{ bilangan genap}) \\ \frac{1}{2} & (N \text{ bilangan ganjil}) \end{cases}$$

Contoh:

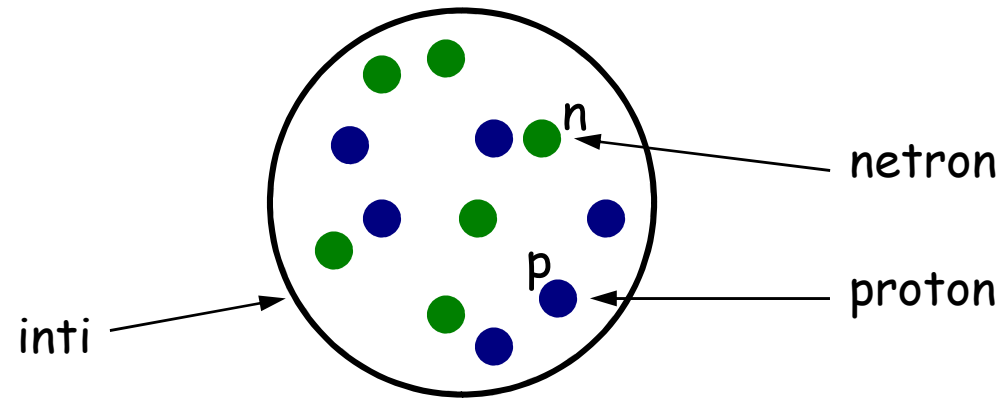
- $N = 2$: $S = 0, 1$
- $N = 3$: $S = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}$
- $N = 4$: $S = 0, 1, 2$
- $N = 5$: $S = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}$
- $N = 6$: $S = 0, 1, 2, 3$
- $N = 7$: $S = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \frac{7}{2}$

Menurut model inti 'proton-elektron', spin N^{14} yang mungkin yaitu,

$$\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \frac{7}{2}, \frac{9}{2}, \frac{11}{2}, \frac{13}{2}, \frac{15}{2}, \frac{17}{2}, \frac{19}{2}, \frac{21}{2}$$

Ini tidak sesuai dengan hasil eksperimen.

Model Inti yang Diterima

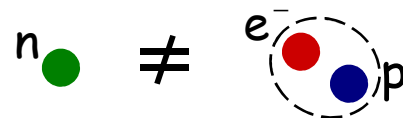


Inti terdiri dari proton dan netron. Jumlah proton merupakan nomor atom Z , muatan inti sebesar muatan total proton (Ze), jumlah proton (Z) dan jumlah netron (N) merupakan nomor massa ($A = Z + N = \text{jumlah nukleon}$).

Contoh, N^{14} terdiri dari 7 proton ($Z = 7$) dan 7 netron ($N = 7$).

Netron berspin $\frac{1}{2}$. Maka dengan model ini spin N^{14} bisa dijelaskan, bahwa kombinasi keadaan spin 14 partikel berspin $\frac{1}{2}$ dapat menghasilkan spin bernilai 1.

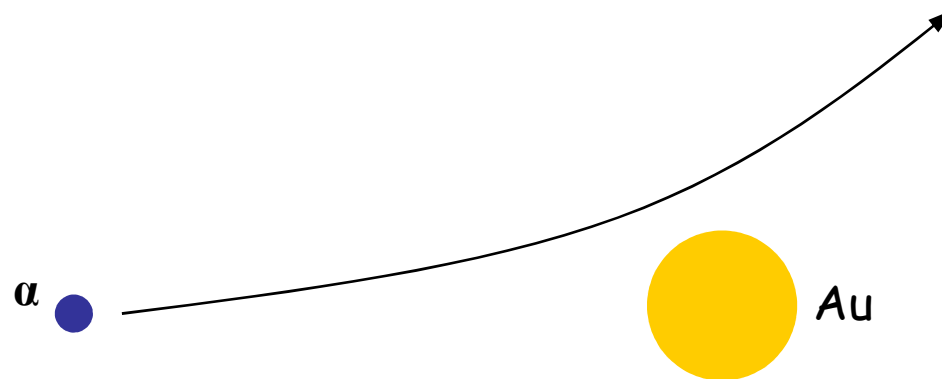
Netron bukan obyek netral hasil pasangan proton dan elektron (Rutherford 1920). Partikel netral seperti itu tidak mungkin berspin $\frac{1}{2}$, tapi 0 atau 1.



Beberapa catatan:

- Inti terdiri dari Z proton dan N netron (atau A nukleon).
- Z = nomor atom = jumlah proton
 N = jumlah netron
 A = nomor massa = jumlah nukleon ($A = Z + N$)
- Nuklida-nuklida yang memiliki Z sama tapi A berbeda disebut **isotop**.
- Nuklida-nuklida yang memiliki N sama tapi A berbeda disebut **isoton**.
- Nuklida-nuklida yang memiliki A sama tapi Z berbeda disebut **isobar**.
- Ada sekelompok bilangan yang disebut **bilangan ajaib (magic numbers)** yaitu, **8, 20, 28, 50, 82, 126,** Jika Z / N sama dengan salah satu dari bilangan ajaib tersebut, maka terdapat lebih banyak isotop / isoton dibandingkan jumlah isotop / isoton untuk nilai Z / N yang lain untuk nilai A yang sama atau berdekatan.
- Magic number juga menandakan **kestabilan inti**. (Inti bersifat stabil jika tidak pecah secara spontan, inti tidak stabil pecah secara spontan.) Inti dengan Z dan / atau N bernilai sama dengan salah satu magic number lebih stabil dari yang lain. Contoh, inti-inti berikut sangat stabil karena baik Z maupun N sama dengan magic number: O^{16} , Ca^{40} , Ca^{48} , Pb^{208} .

Perhitungan Hamburan Rutherford



proses : hamburan partikel alfa (${}_2\text{He}^4$) oleh inti emas (${}_{79}\text{Au}^{197}$)

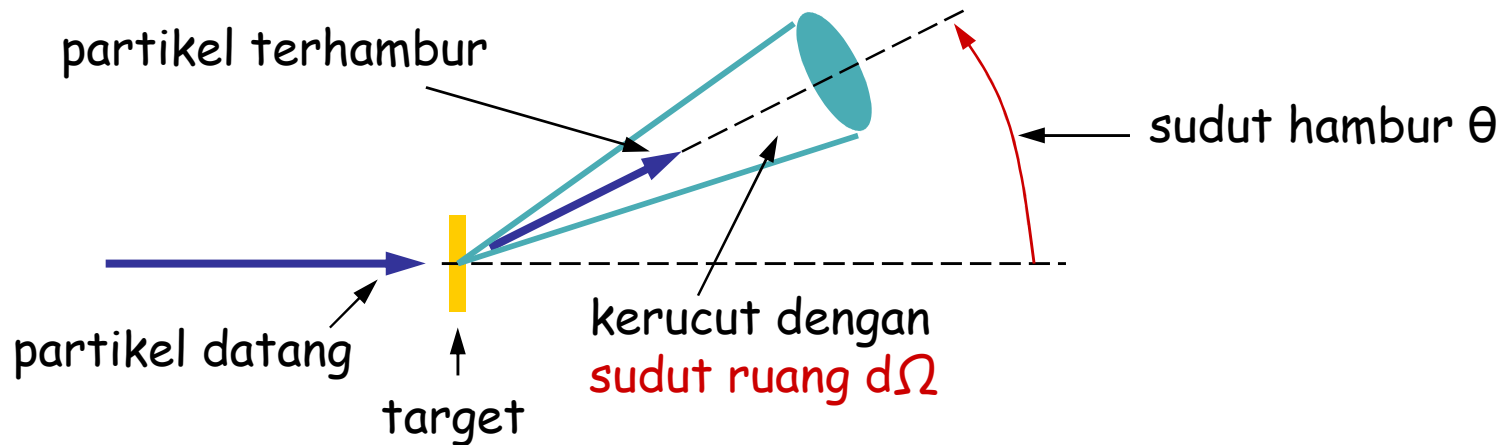
interaksi : Coulomb

muatan $\alpha = 2e$

muatan $\text{Au} = Ze$, ($Z = 79$)

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

Besaran utama yang dicari untuk sebuah proses hamburan yaitu **penampang lintang** (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.

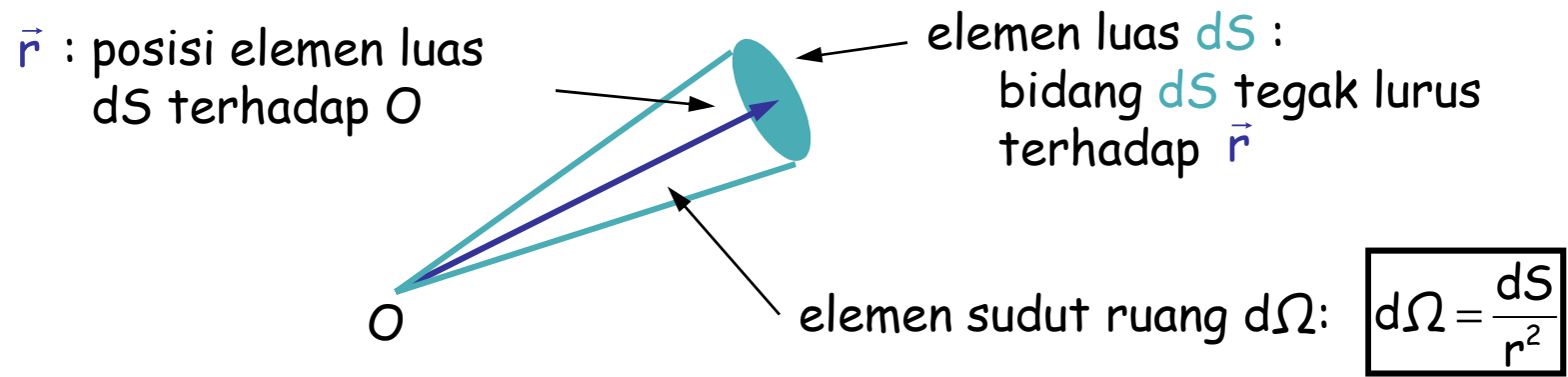


Penampang lintang differensial dihitung sebagai:

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

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



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

titik A:

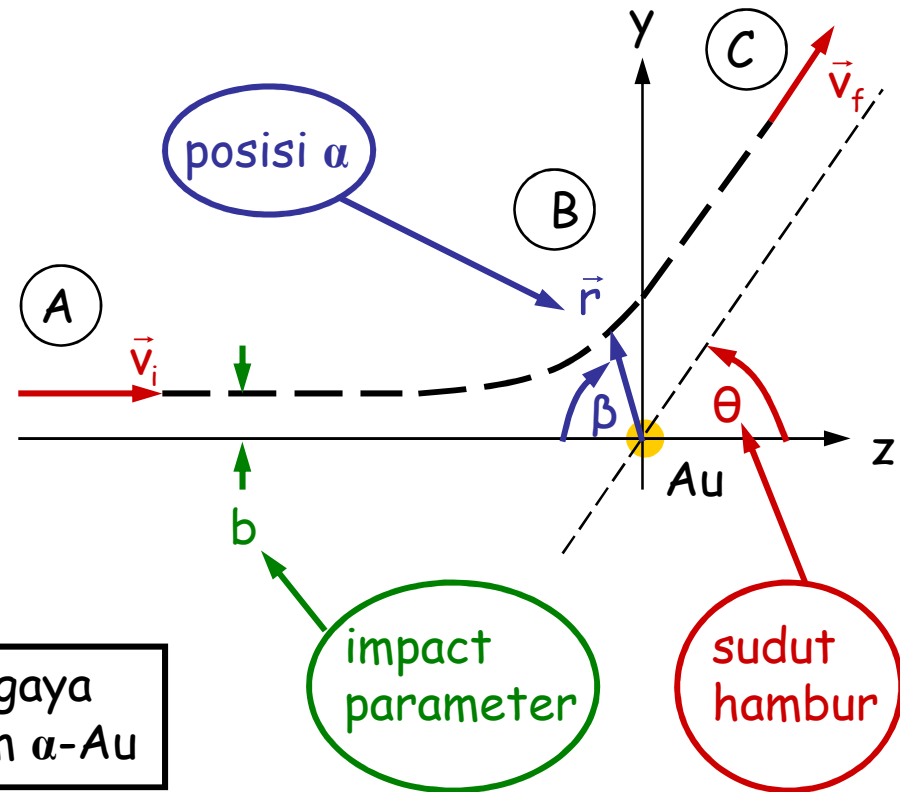
kecepatan α : $\vec{v}_i = v_0 \hat{k}$

posisi α : $\vec{r}_A, r_A \rightarrow \infty, \beta_A \rightarrow 0^\circ$

momentum angular sistem α -Au:

$$\begin{aligned} \vec{l}_A &= \vec{r}_A \times \vec{p}_A & \mu &= \text{massa tereduksi} \\ &= \mu(\vec{r}_A \times \vec{v}_i) & &= \frac{m_\alpha m_{Au}}{m_\alpha + m_{Au}} \\ l_A &= \mu v_0 r_A \sin \beta_A \\ &= \mu v_0 b \end{aligned}$$

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

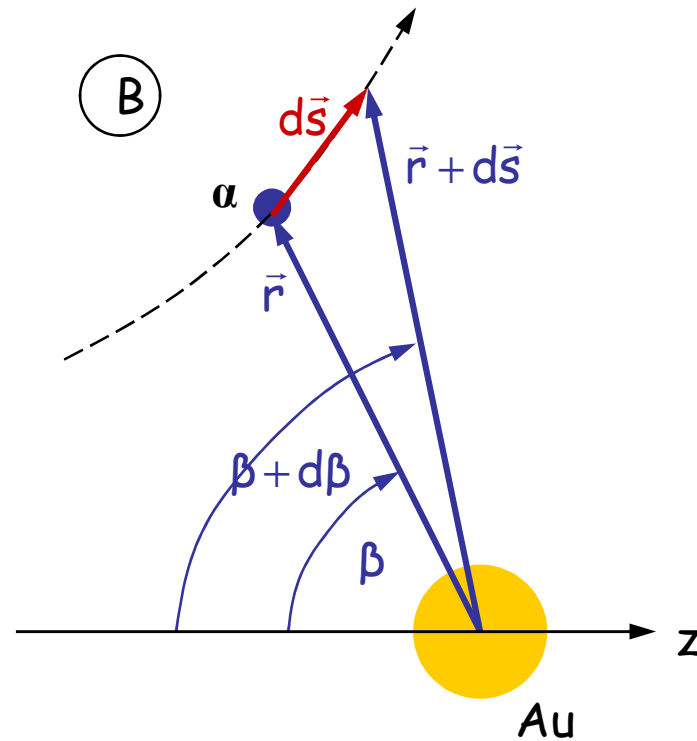
momentum angular α -Au: $l_C = l_A = \mu v_0 b$

momentum angular:

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

momentum angular kekal:

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

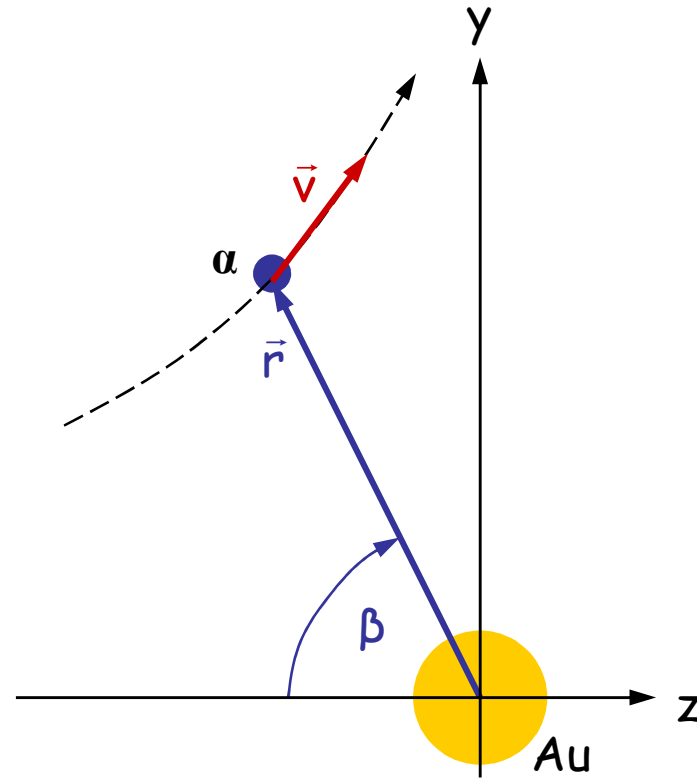


gerak pada sumbu y:

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

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

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



$$\begin{aligned} \cos \theta &= \cos^2 \frac{\theta}{2} - \sin^2 \frac{\theta}{2} \\ \sin \theta &= 2 \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \end{aligned}$$

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

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

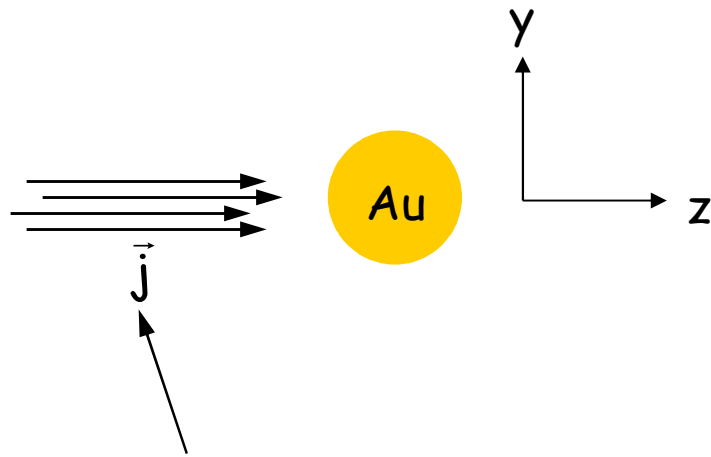
$$b = k \frac{2Ze^2}{\mu v_0^2} \cot \frac{\theta}{2}$$

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 $\theta+d\theta$ (= partikel α yang terhambur ke sudut ruang $d\Omega$ pada arah θ) yaitu,
yang datang mendekati Au dengan impact parameter b sampai $b-db$.

= ?

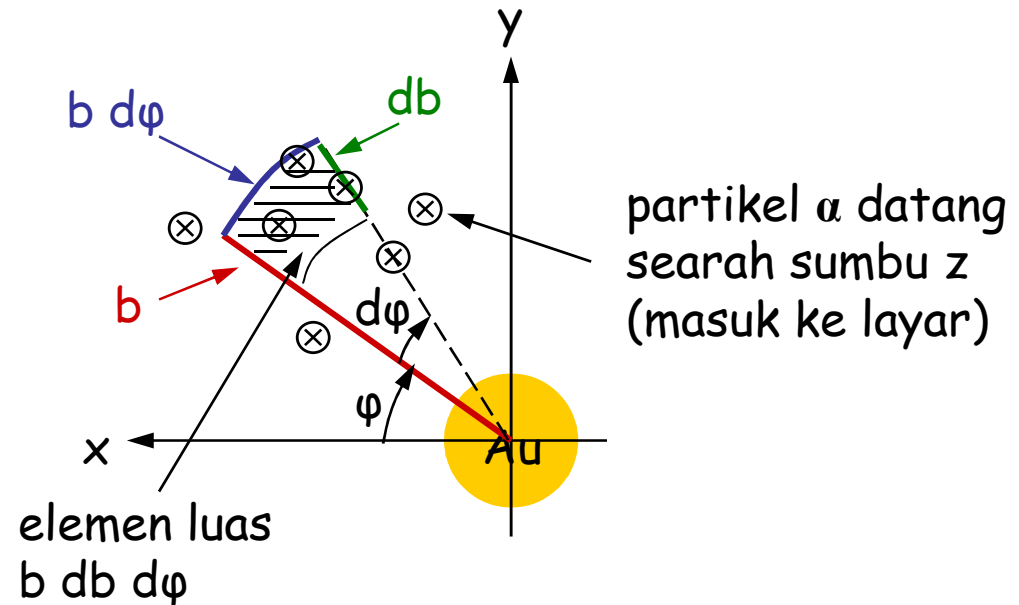


rapat fluks partikel α =
 arus partikel α
 per satuan luas
 yang ditembus
 secara tegak lurus:

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

n = jumlah partikel α per volume

\vec{v} = kecepatan partikel α



arus partikel α yang menembus elemen
 luas $b db d\phi$ pada arah ϕ yaitu,

$$j b db d\phi$$

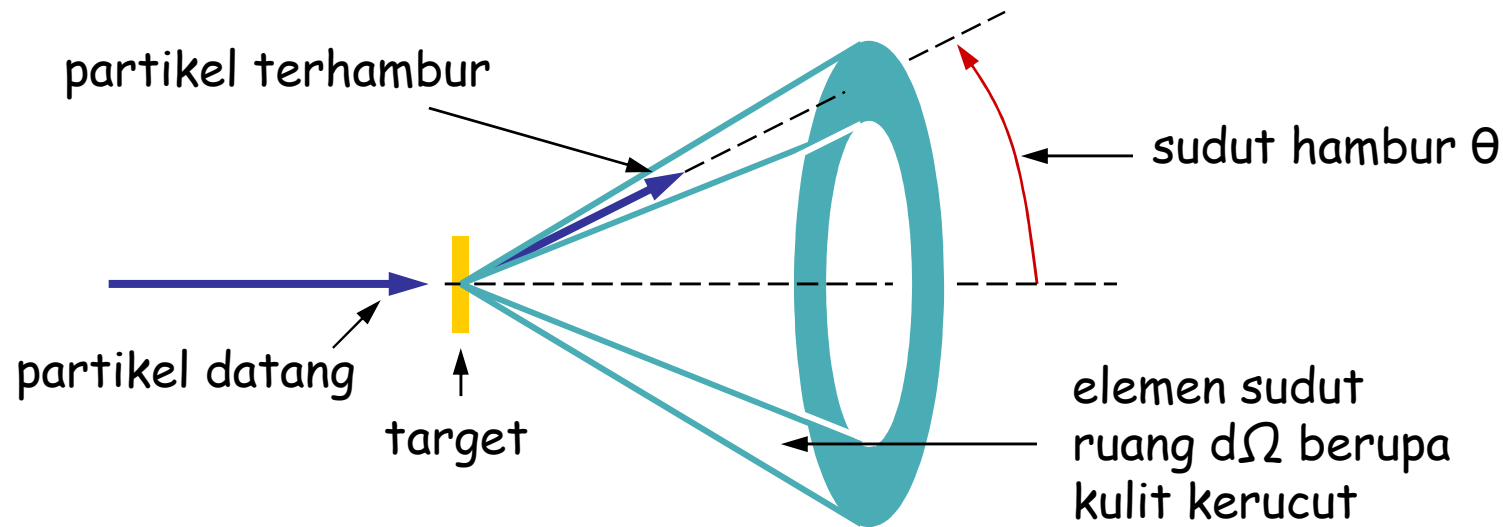
arus partikel α yang datang dengan
 impact parameter b sampai $b-db$ yaitu,

$$\int_0^{2\pi} j b (-db) d\phi = 2\pi j b (-db)$$

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

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

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: $d\Omega = 2\pi \sin \theta d\theta$ $\left(2\pi \text{ didapat dari } \int_0^{2\pi} d\phi \right)$

Dengan begitu diperoleh:

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

Penampang Lintang

Penampang lintang differensial:

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

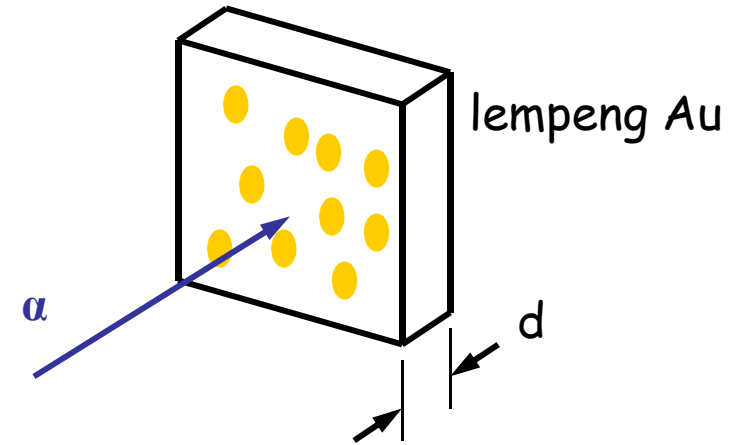
Pada perhitungan telah digunakan 1 inti Au sebagai target (pusat hamburan):

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

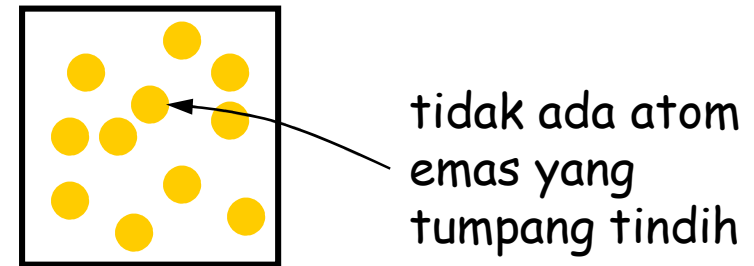
Jadi, diperoleh:

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

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 : 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:

$$\begin{aligned} & \frac{\text{rapat fluks partikel terhambur ke arah } \theta \text{ per sudut ruang } d\Omega}{\text{rapat fluks partikel datang}} \\ &= \frac{\text{arus partikel terhambur ke arah } \theta \text{ per sudut ruang } d\Omega}{\text{arus partikel datang}} \\ &= \text{rapat luas pusat hamburan} \times \frac{d\sigma}{d\Omega} \\ &= \frac{\rho d}{A} N_A \frac{1}{4} \left(k \frac{2Ze^2}{\mu v_0^2} \right)^2 \text{cosec}^4 \frac{\theta}{2} \end{aligned}$$

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

$$\boxed{\frac{\rho d}{A} N_A \frac{1}{4} \left(k \frac{2Ze^2}{\mu v_0^2} \right)^2 \text{cosec}^4 \frac{\theta}{2} \Delta\Omega}$$

Sifat-Sifat Inti

Energi Ikat Inti

Jika M_p massa proton, M_n massa neutron dan M massa inti, maka terdapat **selisih massa Δ** antara jumlah massa nukleon penyusun inti dan massa inti:

$$\Delta = ZM_p + NM_n - M$$

Di sini tidak ada massa yang hilang melainkan perubahan massa menjadi energi, sesuai **kesetaraan massa-energi** dari Einstein:

$$E = mc^2$$

Dalam hal ini, Δ berubah menjadi energi yang dilepaskan ketika Z proton dan N neutron diikat menjadi satu inti. Energi ini disebut **energi ikat inti B** :

$$B = \Delta c^2 = (ZM_p + NM_n - M)c^2$$

Catatan, biasanya c dinyatakan sama dengan 1, sehingga tidak muncul dalam rumus tersebut (juga rumus-rumus lain dalam fisika nuklir). Juga, massa dan energi biasa dinyatakan dalam satuan MeV:

$$B = \Delta = ZM_p + NM_n - M$$

Dapat juga selisih massa Δ (berarti juga energi ikat inti B) dihitung bukan berdasarkan massa inti melainkan massa atom; atom terdiri atas proton, neutron dan elektron yang massanya M_e :

$$\begin{aligned}\Delta &= Z(M_p + M_e) + NM_n - M_{\text{atom}} \\ &= ZM_H + NM_n - M_{\text{atom}}\end{aligned}$$

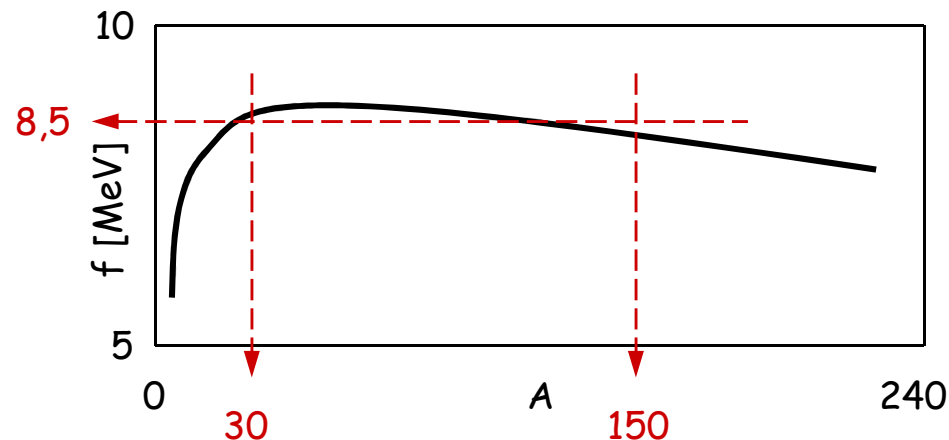
dengan M_H massa atom Hidrogen.

Pada perhitungan di atas energi ikat elektron dalam atom diabaikan karena relatif sangat kecil (orde eV) dibandingkan dengan energi ikat inti (orde MeV).

Fraksi Ikat Inti

Fraksi ikat inti f yaitu energi ikat rata-rata per nukleon B_{ave} : $f = B_{\text{ave}} = \frac{B}{A}$

Untuk inti-inti stabil diperoleh f sebagai berikut (hanya ilustrasi):



Kecuali untuk A besar dan A kecil, tampak f relatif konstan di sekitar 8,5 MeV (A di antara kurang lebih 30 dan 150), tidak bergantung pada A . Pada kedua ujung (A besar dan A kecil), f berkurang.

Apa artinya /
penjelasan untuk
itu?

Nilai f yang relatif konstan itu menunjukkan **saturasi (kejenuhan) energi ikat per nukleon** dalam inti, bahwa setelah sejumlah nukleon terkumpul energi ikat itu mencapai batasnya.

Secara kasar dikatakan, bahwa tidak bergantung pada jumlah nukleon, tiap nukleon merasakan ikatan yang sama kuat, penambahan / pengurangan nukleon tidak menambah / mengurangi kuat ikatan yang dirasakan satu nukleon dalam inti.

Secara kasar dengan begitu, energi ikat inti B sebanding dengan jumlah nukleon A.

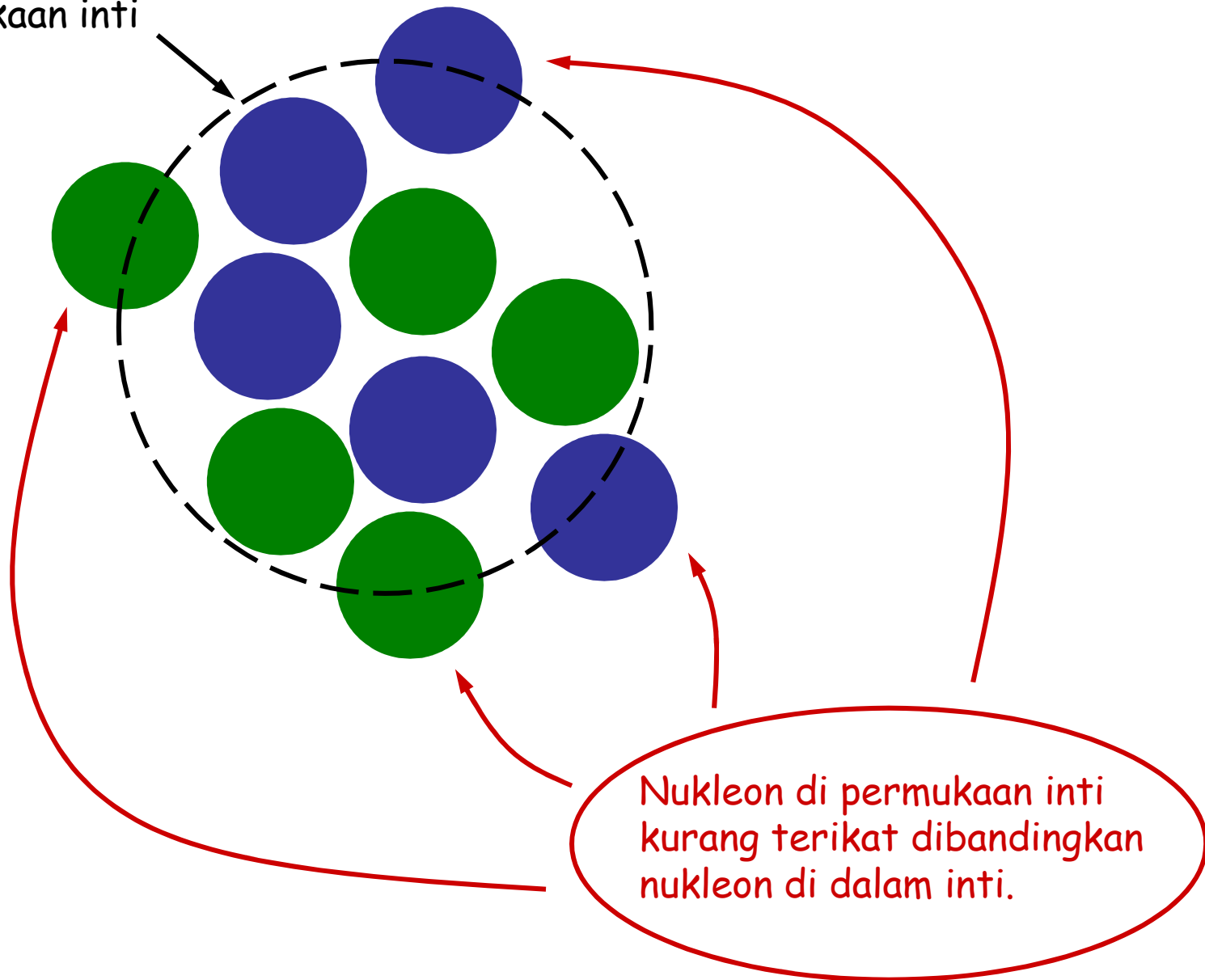
Sifat inti seperti ini serupa dengan sifat setetes cairan atau sekeping metal: energi ikat pada setetes cairan atau sekeping metal sebanding dengan jumlah molekul penyusun cairan atau metal itu; energi ikat per molekul sama.

Ketika A semakin besar jumlah proton semakin banyak. Maka gaya tolak Coulomb antar proton makin kuat, sehingga mengurangi ikatan dan energi ikat per nukleon berkurang.

Untuk A kecil energi ikat per nukleon mengecil dikarenakan **efek permukaan** yaitu, terdapat relatif banyak nukleon di permukaan inti, yang tentu saja kurang terikat dibandingkan nukleon-nukleon yang berada di dalam inti, sehingga energi ikat rata-rata per nukleon berkurang.

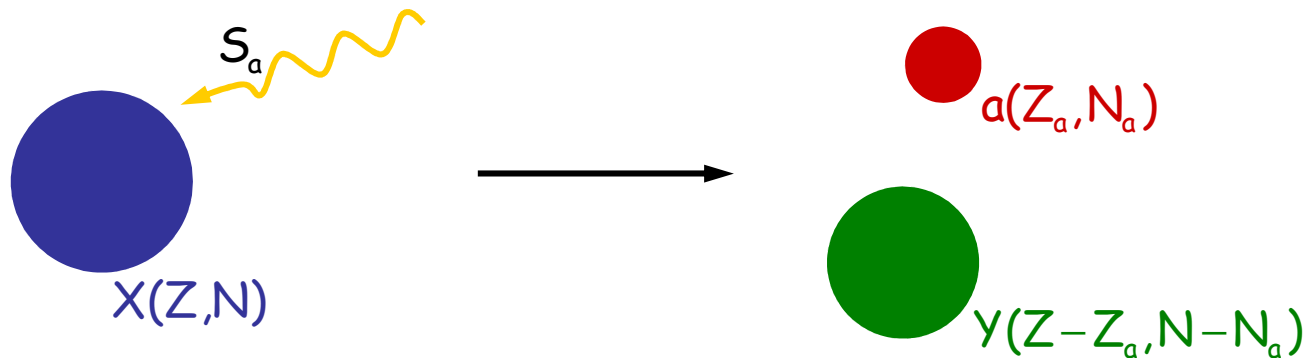
Efek Permukaan

permukaan inti



Energi Separasi

S_a = **energi separasi** partikel a yaitu, energi yang diperlukan untuk memisahkan partikel a dari inti X , meninggalkan inti tersisa Y .

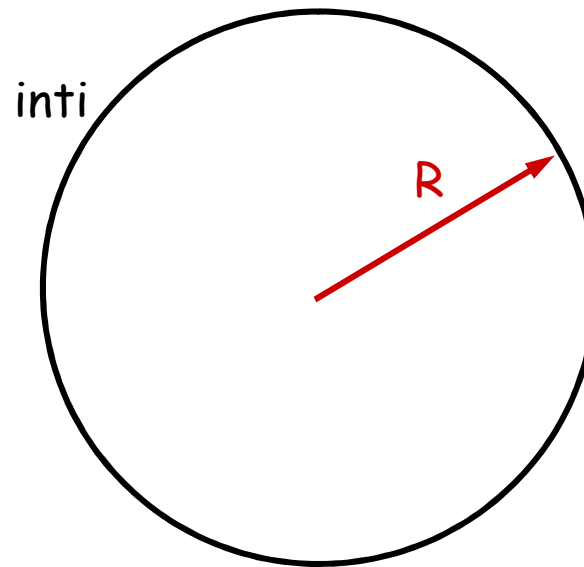


$$S_a = M_a + M_Y - M_X = B_X - (B_a + B_Y)$$

S_a dapat bernilai negatif, yang berarti inti X tidak stabil dan secara spontan meluruh menjadi inti Y sambil memancarkan partikel a . Contoh, S_a pada beberapa inti berat (inti dengan A besar) yang tidak stabil, yang meluruh sambil memancarkan sinar (partikel) α .

Radius Inti

Inti dianggap menyerupai bola —————> punya radius.



Radius inti:

$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}}$$

$$R_0 = 1,5 \times 10^{-15} \text{ m} = 1,5 \text{ fm}$$

Rumus Massa Semiempiris

Massa inti M dapat dinyatakan dalam rumus yang cukup akurat, sebagai fungsi Z , N dan A . Rumus ini disebut **rumus massa semiempiris**:

$$M = Zm_p + Nm_n - a_v A + a_s A^{\frac{2}{3}} + a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{\frac{1}{3}}} + a_a \frac{(N-Z)^2}{A} + \Delta(A)$$

Parameter a_v , a_s , a_c , a_a didapat dengan mencocokkan rumus massa di atas terhadap data eksperimen (fitting) atau dihitung berdasarkan model-model inti. Cara fitting biasanya memberikan hasil lebih akurat.

Salah satu hasil fitting: $a_v = 15,56$, $a_s = 17,23$, $a_c = 0,7$, $a_a = 23,285$

Dengan rumus ini energi ikat inti B menjadi (ingat, $B = Zm_p + Nm_n - M$):

$$B = a_v A - a_s A^{\frac{2}{3}} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{\frac{1}{3}}} - a_a \frac{(N-Z)^2}{A} - \Delta(A)$$

Makna Tiap Suku pada Rumus Massa Semiempiris

1. Inti terdiri dari proton dan neutron, maka sebagian besar massa inti berasal dari massa nukleon penyusunnya:

$$Zm_p + Nm_n$$

Untuk suku-suku berikutnya, pembahasan lebih mudah jika yang dilihat energi ikat, bukan massa inti.

2. Sifat interaksi/gaya nuklir yaitu short range (berjangkauan pendek). Ini berbeda dari interaksi elektromagnetik yang bersifat long (infinite) range.
Jadi, tiap nukleon hanya berinteraksi dengan nukleon-nukleon di dekatnya.
Maka diharapkan, berapapun jumlah nukleon yang ada dalam inti, tiap nukleon terikat sama kuat.
Dengan begitu, energi ikat inti kurang lebih sama dengan jumlah energi ikat tiap nukleon atau energi ikat inti sebanding dengan jumlah nukleon:

$$a_v A$$

3. Inti diketahui mempunyai ukuran, yang berarti punya batas, tepi atau permukaan.

Sebagian nukleon berada di permukaan inti. Nukleon-nukleon ini tidak terikat sama kuat seperti nukleon di dalam inti.

Karena itu, energi ikat inti yang sebelumnya dihitung sebanding dengan jumlah nukleon itu perlu dikoreksi, yaitu dikurangi oleh suatu faktor yang berkaitan dengan efek permukaan ini.

Radius inti sebanding dengan $A^{\frac{1}{3}}$, berarti luas permukaannya sebanding dengan $A^{\frac{2}{3}}$, maka ditambahkan faktor koreksi:

$$-a_s A^{\frac{2}{3}}$$

4. Antar proton dalam inti terjadi interaksi Coulomb yang saling tolak, sehingga mengurangi ikatan inti.

Tiap proton berinteraksi dengan $(Z-1)$ proton lain.

Sesuai energi interaksi Coulomb, ditambahkan koreksi Coulomb pada energi ikat inti berupa:

$$-a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{\frac{1}{3}}}$$

5. Sesuai **larangan Pauli**, dua nukleon yang sama (proton-proton atau neutron-neutron) tidak dapat memiliki/menempati **keadaan kuantum (quantum state)** yang sama. Sebaliknya, proton-neutron dapat menempati keadaan kuantum yang sama. Akibatnya, sistem proton-neutron memiliki **energi minimum** lebih rendah dari energi minimum sistem proton-proton atau neutron-neutron. (**Ingat, energi lebih rendah berarti ikatan lebih kuat, energi ikat lebih besar.**)
- Inti dengan jumlah proton sama dengan jumlah neutron memiliki energi minimum lebih rendah, yang berarti energi ikat lebih tinggi, ikatan lebih stabil, dibandingkan dengan inti dengan jumlah proton sangat tidak seimbang dengan jumlah neutron.
- Koreksi pada energi ikat menurut hal ini (**koreksi asimetri**) yaitu:

$$-a_a \frac{(N-Z)^2}{A}$$

6. Dua nukleon yang sama (proton-proton atau neutron-neutron) di sekitar tingkat energi terluar (**Fermi surface**) pada suatu inti memiliki kecenderungan untuk membentuk pasangan dengan energi terendah yaitu, keduanya memiliki momentum angular yang saling berlawanan. Jika sebuah inti memiliki jumlah proton genap dan jumlah neutron genap (inti genap-genap), maka proton dan neutron pada Fermi surface-nya berpeluang membentuk pasangan seperti itu. Sedangkan pada inti genap-ganjil, ganjil-genap, ganjil-ganjil terdapat proton atau neutron pada Fermi surface yang tidak berpasangan. Dengan demikian pada suatu isobar, inti genap-genap memiliki energi lebih rendah, energi ikat lebih tinggi, ikatan lebih stabil dari yang dimiliki inti genap-ganjil atau inti ganjil-genap, dan inti genap-ganjil atau inti ganjil-genap memiliki energi lebih rendah, energi ikat lebih tinggi, ikatan lebih stabil dari yang dimiliki inti ganjil-ganjil. Mengingat hal ini, ditambahkan **koreksi pasangan (pairing)** pada energi ikat:

$$-\Delta(A) = \pm |\Delta(A)|$$

Untuk inti genap-ganjil atau inti ganjil-genap dipilih $|\Delta(A)| = 0$, maka untuk inti genap-genap $-\Delta(A) = |\Delta(A)|$ dan untuk inti ganjil-ganjil $-\Delta(A) = -|\Delta(A)|$.

Salah satu perhitungan menghasilkan $|\Delta(A)| = 12 A^{-\frac{1}{2}}$.

Spin Inti

Inti terdiri dari nukleon (proton dan netron). Tiap nukleon memiliki spin (momentum angular intrinsik).

Di dalam inti nukleon tidak diam melainkan bergerak. Karena itu, selain spin nukleon juga memiliki momentum angular orbital.

Spin inti didefinisikan sebagai jumlah momentum angular atau momentum angular total (terdiri dari spin dan momentum angular orbital) seluruh nukleonnya:

The diagram illustrates the equation for nuclear spin, $\vec{I} = \sum_{i=1}^A \vec{S}_i + \sum_{i=1}^A \vec{L}_i$. Red arrows point from descriptive labels to the terms in the equation: 'spin inti' points to the total vector \vec{I} ; 'spin nukleon' points to the individual spin vectors \vec{S}_i ; and 'momentum angular orbital' points to the individual orbital angular momentum vectors \vec{L}_i .

$$\vec{I} = \sum_{i=1}^A \vec{S}_i + \sum_{i=1}^A \vec{L}_i$$

spin inti

spin nukleon

momentum angular orbital

spin inti: $\vec{I} = \vec{S} + \vec{L}$, $\vec{S} = \sum_{i=1}^A \vec{S}_i$, $\vec{L} = \sum_{i=1}^A \vec{L}_i$

$S = \begin{cases} \text{integer} & (A = \text{genap}) \\ (2n+1)\frac{1}{2} & (A = \text{ganjil}, n = 0, 1, 2, \dots) \end{cases}$
 $L = \text{integer}$

$I = \begin{cases} \text{integer} & (A = \text{genap}) \\ (2n+1)\frac{1}{2} & (A = \text{ganjil}, n = 0, 1, 2, \dots) \end{cases}$

teruji oleh eksperimen

Dari pengamatan diperoleh, inti dengan $A = \text{genap}$ berspin $I = 0$, kecuali inti ganjil-ganjil (Z dan N keduanya ganjil) berikut:



(Sekedar info, dari sekian banyak inti ganjil-ganjil, hanya keempat inti ganjil-ganjil di atas yang stabil.)

Spin inti pada **keadaan dasar** (**ground state**) dapat berbeda dari spin inti pada **keadaan tereksitasi** (**excited state**). Sebutan spin inti tanpa keterangan lebih lanjut berarti spin inti pada keadaan dasar.

Keadaan inti dengan spin I (ψ^I) terdegenerasi dalam $(2I + 1)$ keadaan ψ_m^I :

$$\psi^I : \psi_m^I, \quad -I \leq m \leq I \quad (m = -I, -I+1, \dots, I)$$

m = bilangan kuantum magnetik spin I
= proyeksi spin I pada sumbu quantisasi
(misal sumbu z)

Momen Listrik Inti

fungsi gelombang inti: $\psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_Z, \vec{r}_{Z+1}, \dots, \vec{r}_A)$

dengan: $\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_Z$: koordinat proton, $\vec{r}_{Z+1}, \dots, \vec{r}_A$: koordinat netron

ψ dinormalisasi sebagai berikut: $\int |\psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A)|^2 d\tau = 1 \quad \left(d\tau = \prod_{j=1}^A d\vec{r}_j \right)$

peluang mendapatkan inti dengan nukleon 1 berada di posisi \vec{r}_1 sampai $\vec{r}_1 + d\vec{r}_1$, nukleon 2 di \vec{r}_2 sampai $\vec{r}_2 + d\vec{r}_2$, ..., nukleon A di \vec{r}_A sampai $\vec{r}_A + d\vec{r}_A$: $|\psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A)|^2 d\tau$

peluang mendapatkan nukleon i berada di posisi \vec{r} sampai $\vec{r} + d\vec{r}$, nukleon yang lain pada posisi sembarang: $P_i(\vec{r})d\vec{r} = \left(\int |\psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_{i-1}, \vec{r}, \vec{r}_{i+1}, \dots, \vec{r}_A)|^2 \prod_{j \neq i}^A d\vec{r}_j \right) d\vec{r}$

$P_i(\vec{r})$ yaitu rapat peluang menemukan nukleon i: $P_i(\vec{r}) = \int |\psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_{i-1}, \vec{r}, \vec{r}_{i+1}, \dots, \vec{r}_A)|^2 \prod_{j \neq i}^A d\vec{r}_j$

rapat muatan listrik inti: $\rho(\vec{r}) = e \sum_{i=1}^Z P_i(\vec{r})$ (e = muatan proton)

muatan listrik inti: $\int \rho(\vec{r}) d\vec{r} = e \sum_{i=1}^Z \int P_i(\vec{r}) d\vec{r} = e \sum_{i=1}^Z \int |\psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A)|^2 d\tau = Ze$

Momen Dipol Inti

momen dipol inti dari proton i: $\vec{D}_i = e \int \vec{r}_i P_i(\vec{r}_i) d\vec{r}_i = e \int \vec{r}_i |\psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A)|^2 d\tau$

momen dipol inti dari Z proton: $\vec{D} = \sum_{i=1}^Z \vec{D}_i = e \sum_{i=1}^Z \int \vec{r}_i |\psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A)|^2 d\tau$

$$\begin{aligned} f(\vec{r}_i) &= \vec{r}_i |\psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A)|^2 \\ f(-\vec{r}_i) &= -\vec{r}_i |\psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A)|^2 = -f(\vec{r}_i) \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad f(\vec{r}_i) = \text{fungsi ganjil} \quad \longrightarrow \quad \int f(\vec{r}_i) d\vec{r}_i = 0$$

$$\longrightarrow \quad \vec{D} = e \sum_{i=1}^Z \int \vec{r}_i |\psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A)|^2 d\tau = 0$$

Jadi, inti tidak punya momen dipol listrik.

Momen Quadrupol Inti

momen quadrupol inti pada keadaan ψ : $Q(\psi) = e \sum_{i=1}^Z \int (3z_i^2 - r_i^2) |\psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A)|^2 d\tau \neq 0$

Mencari $Q(\psi)$:

Anggap $(3z_i^2 - r_i^2)$ sebagai sebuah fungsi gelombang $\phi(\vec{r}_i)$: $\phi(\vec{r}_i) = 3z_i^2 - r_i^2$

maka:

$$\begin{aligned} Q(\psi) &= \int (3z_i^2 - r_i^2) |\psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A)|^2 d\tau \\ &= \int \phi(\vec{r}_i) |\psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A)|^2 d\tau \\ &= \int \psi^*(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A) \phi(\vec{r}_i) \psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A) d\tau \\ &= \int \psi^*(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A) F(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A) d\tau \end{aligned}$$

dengan $F(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A)$ merupakan gabungan (coupled) dua fungsi gelombang:

$$F(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A) = \phi(\vec{r}_i) \psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A) = ?$$

$\psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A)$ memiliki momentum angular I (spin inti).

$\varphi(\vec{r}_i)$ mengingatkan pada polinomial Legendre orde 2 p_2 , dan dengan begitu pada fungsi spherical harmonics Y_{20} , berarti memiliki momentum angular $L = 2$.

maka:

$$F(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A) = \varphi(\vec{r}_i) \psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A) = \sum_{J=I-2}^{I+2} F_J(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A)$$

dengan $F_J(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A)$ fungsi gelombang dengan momentum angular J . $=?$

Sesuai aturan penjumlahan momentum angular:

$$\vec{J} = \vec{I} + \vec{L} \quad (L=2) \longrightarrow |I-2| \leq J \leq I+2$$

Kembali ke:

$$Q(\psi) = \int \psi^*(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A) F(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A) d\tau$$

maka ditemui:

$$\int \psi^*(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A) F_J(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A) d\tau = ?$$

momentum angular I

momentum angular J

Sesuai sifat orthogonal **eigenstate** operator momentum angular:

$$\int \psi^*(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A) F_J(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A) d\tau = 0 \quad (J \neq I)$$

Dengan kata lain integral di atas tidak nol jika $J = I$.

Ingat kembali nilai-nilai J : $|I-2| \leq J \leq I+2$

maka:

$I = 0$:	$J = 2$	\longrightarrow	$J \neq I$
$I = \frac{1}{2}$:	$\frac{3}{2} \leq J \leq \frac{5}{2}$	\longrightarrow	$J \neq I$
$I = 1$:	$1 \leq J \leq 3$	\longrightarrow	$J = 1 = I$
$I = \frac{3}{2}$:	$\frac{1}{2} \leq J \leq \frac{7}{2}$	\longrightarrow	$J = \frac{3}{2} = I$
$I = 2$:	$0 \leq J \leq 4$	\longrightarrow	$J = 2 = I$
$I > 2$:	$I-2 \leq J \leq I+2$	\longrightarrow	$J = I$

Jadi, ditemui $J = I$ jika $I \geq 1$, berarti $Q(\psi) = 0$ untuk inti berspin $I = 0$ & $\frac{1}{2}$.

Keadaan inti dengan spin I (ψ^I) terdegenerasi dalam $(2I + 1)$ keadaan ψ_m^I dengan $m = -I, -I + 1, -I + 2, \dots, I$.

Didefinisikan:

Q = momen quadrupol inti yaitu, momen quadrupol listrik inti untuk keadaan ψ_I^I

$Q(m)$ = momen quadrupol inti untuk keadaan ψ_m^I , dengan $m \neq I$:

$$Q(m) = \frac{3m^2 - I(I+1)}{I(2I-1)} Q \quad (m \neq I)$$

multipol:

$$Q_{lm}(\psi) = e \sum_{i=1}^Z \int r_i^l Y_{lm}(\theta_i, \varphi_i) |\psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A)|^2 d\tau$$

maka:

$$\text{muatan inti} = \sqrt{4\pi} Q_{00}$$

$$D_z = \sqrt{\frac{4\pi}{3}} Q_{10}, \quad D_x \pm iD_y = \pm \sqrt{\frac{8\pi}{3}} Q_{1,\mp 1}$$

$$Q = \sqrt{\frac{16\pi}{5}} Q_{20}$$

Momen Magnetik Inti

Sumber kemagnetan inti:

- gerakan orbital proton (partikel bermuatan listrik) dalam inti (ingat, kemagnetan ditimbulkan oleh arus listrik = muatan listrik yang bergerak)
- sifat magnetik intrinsik nukleon akibat spin
- sumber lain (tidak dibahas)

Momen Magnetik Nukleon

proton: $\vec{\mu}_p = g_p \frac{e\hbar}{2M_p c} \vec{S}$ (S dalam satuan \hbar)
 $g_p = \text{faktor gyromagnetik proton} = 5.59$

netron: $\vec{\mu}_n = g_n \frac{e\hbar}{2M_p c} \vec{S}$
 $g_n = -3.83$

Momen magnetik biasa dinyatakan dalam satuan **magneton Bohr** untuk proton (atau disebut **magneton nuklir**):

$$1 \text{ magneton nuklir} = \mu_0 \equiv \frac{e\hbar}{2M_p c} = 5.049 \times 10^{-24} \text{ erg/gauss}$$

Dalam satuan magneton nuklir: $\vec{\mu}_p = g_p \vec{S}$ $\vec{\mu}_n = g_n \vec{S}$

Momen Magnetik Inti

operator momen magnetik:

- dari spin nukleon:
$$\hat{\mu}_S = \mu_0 \left(g_p \sum_{k=1}^Z \hat{S}_k + g_n \sum_{k=Z+1}^A \hat{S}_k \right)$$
- dari gerakan orbital proton:
$$\hat{\mu}_C = \mu_0 \sum_{k=1}^Z \hat{L}_k \quad (L \text{ dalam satuan } \hbar)$$

operator momen magnetik total:
$$\hat{\mu} = \hat{\mu}_S + \hat{\mu}_C$$

Momen magnetik inti diperoleh sebagai nilai ekspektasi operator momen magnetik inti pada keadaan ψ :

$$\vec{\mu} = \langle \psi | \hat{\mu} | \psi \rangle = \int \psi^*(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A) \hat{\mu} \psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A) d\tau$$

Gerakan Orbital Proton

operator momen magnetik:

$$\begin{aligned}
 \hat{\vec{\mu}}_C &= \mu_0 \sum_{k=1}^Z \hat{\vec{L}}_k \\
 &= \frac{e\hbar}{2M_p c} \sum_{k=1}^Z \hat{\vec{L}}_k \\
 &= \frac{e}{2M_p c} \sum_{k=1}^Z \vec{r}_k \times \hat{\vec{p}}_k \quad (\hbar \vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}, L \text{ dalam satuan } \hbar) \\
 &= \frac{1}{2c} \sum_{k=1}^Z \vec{r}_k \times \frac{e \hat{\vec{p}}_k}{M_p}
 \end{aligned}$$

momen magnetik:

$$\vec{\mu}_C = \frac{1}{2c} \sum_{k=1}^Z \int \psi^*(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A) \left(\vec{r}_k \times \frac{e \hat{\vec{p}}_k}{M_p} \right) \psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A) d\tau$$

rapat arus proton ke-k:

$$\vec{j}_k(\vec{r}) = \int \psi^*(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_{k-1}, \vec{r}, \vec{r}_{k+1}, \dots, \vec{r}_A) \frac{e \hat{\vec{p}}_k}{M_p} \psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_{k-1}, \vec{r}, \vec{r}_{k+1}, \dots, \vec{r}_A) \prod_{j \neq k} d\vec{r}_j$$

$$\longrightarrow \quad \vec{\mu}_C = \frac{1}{2c} \sum_{k=1}^Z \int \vec{r} \times \vec{j}_k d\vec{r}$$

Momen Magnetik Inti Efektif

operator spin inti:

$$\hat{\mathbf{I}} = \sum_{k=1}^A \hat{\mathbf{L}}_k + \sum_{k=1}^A \hat{\mathbf{S}}_k$$

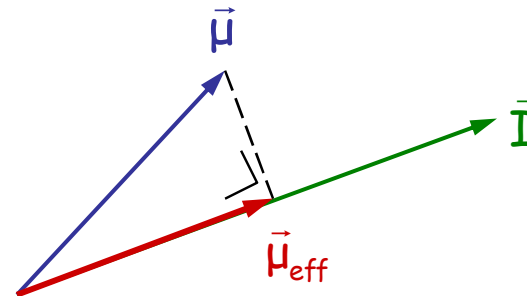
operator momen magnetik inti:

$$\hat{\boldsymbol{\mu}} = \mu_0 \left(\sum_{k=1}^Z \hat{\mathbf{L}}_k + g_p \sum_{k=1}^Z \hat{\mathbf{S}}_k + g_n \sum_{k=Z+1}^A \hat{\mathbf{S}}_k \right)$$

Tidak seperti momen magnetik nukleon, momen magnetik inti tidak berhimpit dengan spin.

Momen magnetik inti efektif yaitu, komponen momen magnetik inti pada arah spin:

$$\hat{\boldsymbol{\mu}}_{\text{eff}} = \frac{(\hat{\boldsymbol{\mu}} \cdot \hat{\mathbf{I}})}{I^2} \hat{\mathbf{I}}$$



Momen magnetik inti efektif untuk keadaan inti ψ_m^I :

$$\vec{\mu}_{eff} = \left\langle \psi_m^I \left| \hat{\vec{\mu}}_{eff} \right| \psi_m^I \right\rangle, \quad \hat{\vec{\mu}}_{eff} = \frac{(\hat{\vec{\mu}} \cdot \hat{\vec{I}})}{I^2} (\hat{I}_x \hat{i} + \hat{I}_y \hat{j} + \hat{I}_z \hat{k})$$

ψ_m^I eigenstate dari \hat{I}_z , bukan eigenstate dari \hat{I}_x dan \hat{I}_y :

$$\hat{I}_z |\psi_m^I\rangle = m |\psi_m^I\rangle \quad \hat{I}_x |\psi_m^I\rangle \neq |\psi_m^I\rangle \quad \hat{I}_y |\psi_m^I\rangle \neq |\psi_m^I\rangle$$

Lebih detail lagi, operasi masing-masing \hat{I}_x dan \hat{I}_y pada ψ_m^I menghasilkan keadaan dengan nilai m yang lain (ingat \hat{I}_x dan \hat{I}_y kombinasi dari operator tangga \hat{I}_{\pm}). Karena itu:

$$\left\langle \psi_m^I \left| \hat{I}_x \right| \psi_m^I \right\rangle = \left\langle \psi_m^I \left| \hat{I}_y \right| \psi_m^I \right\rangle = 0$$

Jadi:

$$\vec{\mu}_{eff} = \mu_{eff,z} \hat{k} \quad \mu_{eff,z} = \left\langle \psi_m^I \left| \frac{(\hat{\vec{\mu}} \cdot \hat{\vec{I}})}{I^2} \hat{I}_z \right| \psi_m^I \right\rangle$$

Keadaan inti ψ^I terdegenerasi dalam $(2I + 1)$ keadaan.

Didefinisikan:

μ = momen magnetik inti yaitu, $\mu_{\text{eff},z}$ untuk keadaan ψ_I^I :

$$\mu = \langle \psi_I^I | \hat{\mu}_{\text{eff},z} | \psi_I^I \rangle$$

$\mu(m) = \mu_{\text{eff},z}$ untuk keadaan ψ_m^I , dengan $m \neq I$:

$$\mu(m) = \langle \psi_m^I | \hat{\mu}_{\text{eff},z} | \psi_m^I \rangle \quad (m \neq I)$$

momen magnetik inti dapat dihitung sebagai:

$$\mu = g\mu_0 I$$

g = faktor gyromagnetik inti

μ_0 = magneton nuklir

momen magnetik inti dalam satuan magneton nuklir: $\tilde{\mu} = \frac{\mu}{\mu_0} = gI$

Ketidakstabilan Inti

Sebagian besar inti tidak stabil, yaitu inti tersebut **meluruh (decay)**, strukturnya berubah, lalu menjadi inti lain.

Contoh inti yang tidak stabil:

inti berat (inti dengan A besar): ${}_{92}\text{U}^{238}$, ${}_{92}\text{U}^{235}$, ${}_{90}\text{Th}^{234}$, ${}_{84}\text{Po}^{218}$

inti ringan (inti dengan A kecil): ${}_1\text{H}^3$, ${}_6\text{C}^{14}$, ${}_{19}\text{K}^{40}$

Secara umum, jika jumlah proton dan neutron sangat berbeda, maka inti tidak terbentuk, atau walaupun terbentuk tidak stabil.

Jumlah inti stabil yang diketahui ada 275 buah, terdiri atas:

166 inti genap-genap (Z genap, N genap)

55 inti genap-ganjil

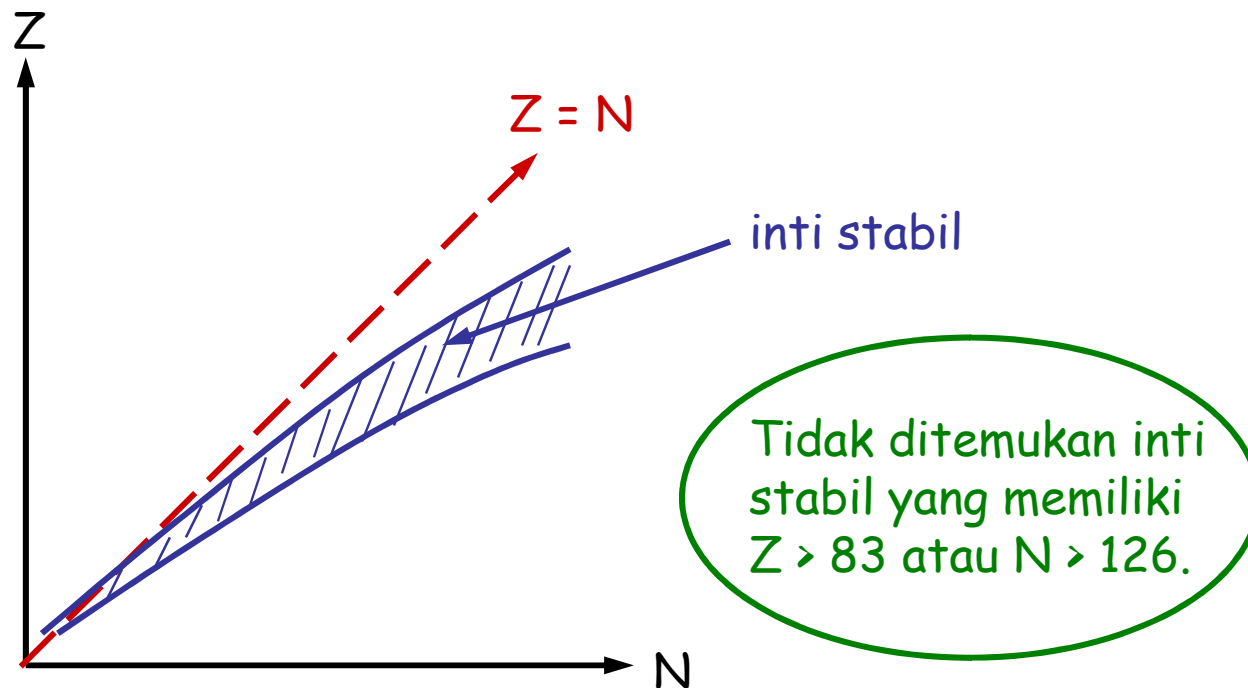
50 inti ganjil-genap

4 inti ganjil-ganjil

Inti dengan Z dan/atau N sama dengan magic number lebih stabil dari inti lain pada suatu isobar.

Jika diamati mulai dari inti ringan, inti stabil memiliki proton yang jumlahnya sebanding dengan jumlah neutron. Ketika A semakin besar, maka jumlah proton Z pun bertambah, yang berarti gaya tolak Coulomb semakin kuat. Karena itu, inti-inti berat yang stabil memiliki neutron lebih banyak dari proton, supaya memberikan gaya ikat nuklir lebih kuat dari gaya tolak Coulomb, sehingga inti tidak pecah.

(ilustrasi)



Bentuk Ketidakstabilan Inti

Bentuk ketidakstabilan inti ada dua macam:

1. ketidakstabilan dinamis:

inti pecah secara spontan menjadi dua atau lebih bagian, contoh: **fisi**,
peluruhan α

2. ketidakstabilan beta:

perubahan wujud nukleon: proton \longrightarrow netron atau sebaliknya
(berarti juga perubahan muatan listrik); peristiwa ini disertai
peluruhan beta, **penangkapan elektron** (**electron captured**)*

* Elektron orbital diserap / ditangkap oleh inti.

Ketidakstabilan Dinamis

misal: A : inti asal

B, C, \dots , dst : inti pecahan

syarat dalam massa:

Jika: massa $A >$ jumlah massa B, C, \dots , dst

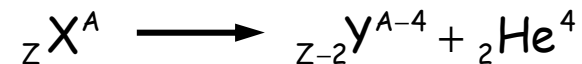
maka: $A \longrightarrow B + C + \dots$ dst

syarat dalam energi ikat:

Jika: energi ikat $A <$ jumlah energi ikat B, C, \dots , dst

maka: $A \longrightarrow B + C + \dots$ dst

contoh: peluruhan α (inti memancarkan sinar / partikel α)

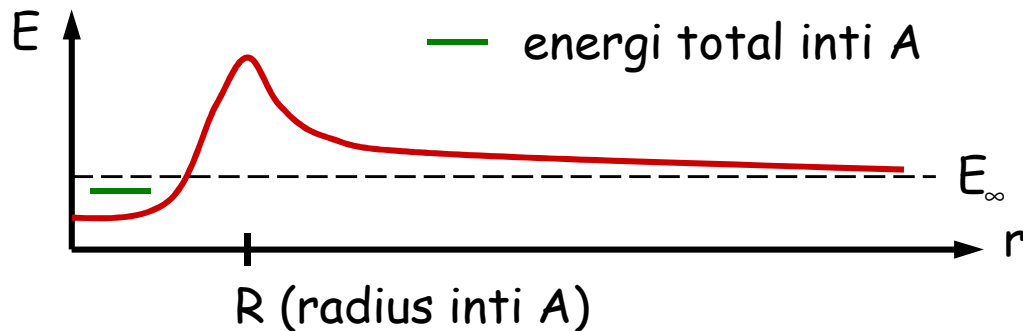


syarat: $m_X > m_Y + m_\alpha$ atau $B_X < B_Y + B_\alpha$

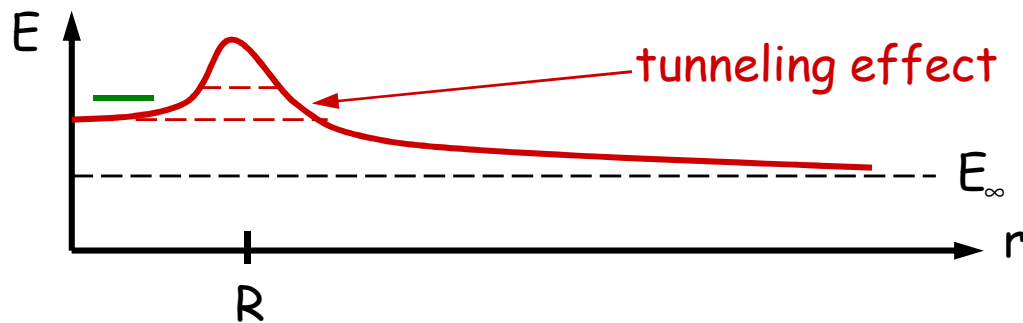
Penjelasan Kualitatif Ketidakstabilan Dinamis

Ambil suatu proses : $A \longrightarrow B + C$

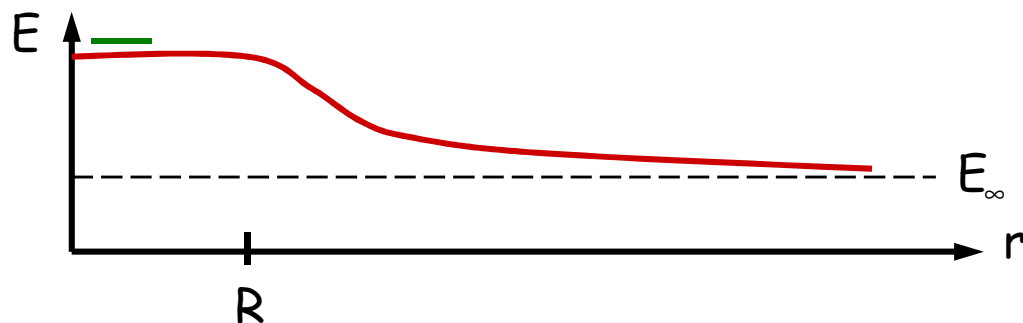
Setelah inti A pecah, inti B dan C berpisah. Kestabilan inti A bisa dilihat dari energi potensial E sistem inti B dan C itu sebagai fungsi jarak r antar keduanya (ini hanya penjelasan kualitatif).



inti B dan C 'terperangkap' dalam inti A; inti A stabil thd proses di atas



inti B dan C punya peluang keluar dari inti A melalui efek terobosan; inti A tidak stabil thd proses di atas



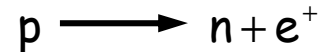
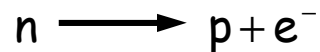
inti A sama sekali tidak terbentuk, yang ada inti B dan C yang terpisah

Ketidakstabilan Beta

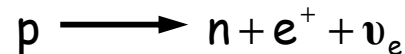
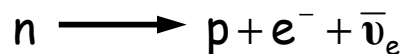
Nukleon dapat berwujud p atau n. Wujud nukleon dapat berubah:



Sesuai hukum kekekalan muatan listrik, proses di atas disertai pemancaran elektron e^- atau **positron e^+** :



(Antara lain) hukum kekekalan momentum (linear dan angular) menuntut keterlibatan **neutrino elektron ν_e** (spin $\frac{1}{2}$, massa diam sangat kecil $< 3 \text{ eV}$):



ν_e = neutrino elektron, $\bar{\nu}_e$ = anti neutrino elektron

Satu proses lain yaitu, proton di dalam inti menyerap elektron orbital.

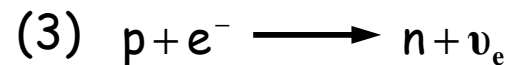


Proses serupa untuk neutron secara teoritis mungkin yaitu:



Namun, proses itu tidak terjadi karena di dalam atom tidak ada positron.

Terdapat 3 proses pada ketidakstabilan beta:



bisakah
berlangsung secara
spontan?

Perhatikan nilai massa berikut:

$$m_n = 939,565 \text{ MeV}$$

$$m_p = 938,272 \text{ MeV}$$

$$m_e = 0,511 \text{ MeV}$$

$$m_n - m_p = 1,293 \text{ MeV} > m_e$$

Maka:

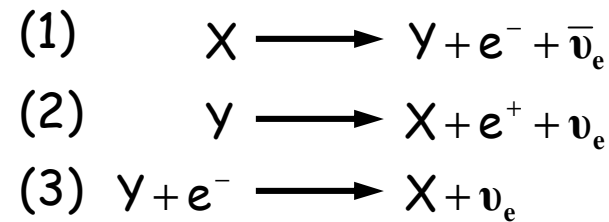
- Proses (1) dapat terjadi secara spontan karena tidak memerlukan energi. Karena itu, tidak ada neutron bebas hidup lama, **waktu hidup rata-rata (mean-life) τ** neutron 885.7 detik (< 15 menit).
- Proses (2) dan (3) memerlukan energi, karena itu tidak dapat terjadi secara spontan, sehingga proton bebas stabil. Namun, di dalam inti energi bisa diperoleh dari nukleon lain, sehingga kedua proses itu dapat terjadi secara spontan, tanpa mendapat energi dari luar inti.

Jadi, di dalam inti ketiga proses di atas dapat terjadi secara spontan. Di luar inti hanya proses (1) yang dapat berlangsung secara spontan.

Ketidakstabilan Beta dalam Inti

Ambil inti $X(Z,N)$ dan $Y(Z+1,N-1)$.

Tiga proses ketidakstabilan beta untuk inti X dan Y :



Jika selisih massa kedua inti:

$$\begin{aligned}\Delta_{xy} &= m_x - m_y \\&= B_y - B_x + m_n - m_p \\&= B_y - B_x + \Delta_{np}\end{aligned}$$

maka, syarat untuk ketiga proses di atas:

$$\begin{aligned}(1) \quad \Delta_{xy} &> m_e \\(2) \quad \Delta_{xy} &< -m_e \\(3) \quad \Delta_{xy} &< m_e - \varepsilon\end{aligned}$$

dengan ε energi ikat elektron (yang semula menempati keadaan kuantum tertentu) dalam atom.

Jika dihitung menggunakan massa atom:

$$M_X = m_X + Zm_e \quad (M_X = \text{massa atom } X, m_X = \text{massa inti } X)$$

$$M_Y = m_Y + (Z+1)m_e \quad (M_Y = \text{massa atom } Y, m_Y = \text{massa inti } Y)$$

maka:

$$\begin{aligned}\Delta_{XY} &= m_X - m_Y \\ &= M_X - M_Y + m_e\end{aligned}$$

sehingga syarat untuk ketiga proses ini:

- (1) $X \longrightarrow Y + e^- + \bar{\nu}_e$
- (2) $Y \longrightarrow X + e^+ + \nu_e$
- (3) $Y + e^- \longrightarrow X + \nu_e$

menjadi:

$$(1) \quad M_X > M_Y$$

$$(2) \quad M_X < M_Y - 2m_e$$

$$(3) \quad M_X < M_Y - \varepsilon$$

Radioaktivitas

Radioaktivitas yaitu fenomena mengenai sebuah inti tidak stabil secara spontan memancarkan partikel, sinar- γ atau menangkap sebuah elektron orbital.

Tiga proses radiaktivitas:

- peluruhan α (partikel α dipancarkan)
- peluruhan β^- (e^- dipancarkan)
- peluruhan β^+ (e^+ dipancarkan atau e^- orbital ditangkap inti)

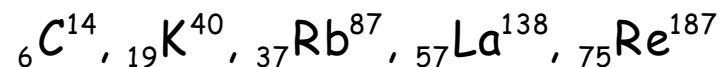
Pemancaran sinar- γ tidak berlangsung secara sendiri, melainkan bersama proses-proses di atas. Sinar- γ dipancarkan apabila peluruhan menghasilkan inti dalam keadaan tereksitasi, yang kemudian turun ke ground state sambil memancarkan sinar- γ .

Inti Radioaktif Alamiah

Inti radioaktif alamiah paling banyak merupakan inti unsur-unsur berat, yang terbagi dalam 3 deret (radioaktivitas beruntun):

- deret Th^{232} : berawal dengan ${}_{90}\text{Th}^{232}$, berakhir dengan ${}_{82}\text{Pb}^{208}$
- deret U^{238} : berawal dengan ${}_{92}\text{U}^{238}$, berakhir dengan ${}_{82}\text{Pb}^{206}$
- deret U^{235} : berawal dengan ${}_{92}\text{U}^{235}$, berakhir dengan ${}_{82}\text{Pb}^{207}$

Selain isotop-isotop radioaktif alamiah anggota tiga deret di atas ada juga beberapa isotop radioaktif alamiah lain, yang relatif lebih ringan dari yang termasuk dalam tiga deret di atas. Contoh:



Isotop radioaktif disebut dengan **radioisotop**.

Perhitungan Radioaktivitas

Anggap jumlah atom suatu bahan radioaktif pada suatu waktu t yaitu $N(t)$.

Inti atom bahan itu meluruh, berubah menjadi inti lain. Pengurangan jumlah atom bahan itu tiap waktu menunjukkan banyaknya peluruhan yang terjadi tiap waktu. Ini disebut sebagai **aktivitas** bahan radioaktif itu, yang juga bergantung pada waktu:

$$\text{aktivitas} = A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$$

Peluang terjadinya peluruhan tiap waktu, disebut sebagai **kecepatan peluruhan** (**decay rate**), sama dengan pengurangan jumlah atom bahan radioaktif itu tiap waktu relatif terhadap jumlah atomnya pada waktu itu. Didapatkan bahwa kecepatan peluruhan suatu bahan radioaktif tetap:

$$\text{kecepatan peluruhan} = \lambda = -\frac{1}{N(t)} \frac{dN(t)}{dt} = \frac{A(t)}{N(t)}$$

Jika terdapat lebih dari satu modulus peluruhan (lebih dari satu jenis partikel yang dipancarkan), maka kecepatan peluruhan total yaitu:

$$\lambda = \sum_i \lambda_i \quad (\lambda_i = \text{kecepatan peluruhan tiap modulus peluruhan})$$

Jika pada waktu t_0 jumlah atom N_0 dan aktivitas A_0 , maka pada waktu t jumlah atom $N(t)$ dan aktivitas $A(t)$:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda(t-t_0)} \quad A(t) = A_0 e^{-\lambda(t-t_0)} \quad A_0 = \lambda N_0$$

Waktu hidup rata-rata (mean-life) τ bahan radioaktif diperoleh sebagai:

$$\tau = \frac{\int_{t_0}^{\infty} t N(t) dt}{\int_{t_0}^{\infty} N(t) dt} = \frac{1}{\lambda}$$

Waktu yang berlalu sampai suatu bahan radioaktif berkurang menjadi separuhnya disebut **waktu paruh (half-life)** $T_{1/2}$:

$$N(T_{1/2} + t_0) = \frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \longrightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2$$

Satuan Radioaktivitas

Aktivitas : jumlah peluruhan yang terjadi per satuan waktu

- $C = \text{Curie}$:
 $1C = 3,7 \times 10^{10} \text{ peluruhan/detik}$
 $\approx \text{aktivitas } 1\text{g Ra}^{226}$
- $\text{Bq} = \text{Becquerel (SI)}$:
 $1\text{Bq} = 1 \text{ peluruhan/detik}$
 $\longrightarrow 1C = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$

Paparan / Exposure (untuk radiasi sinar γ dan sinar X): muatan total ion positif yang dihasilkan oleh radiasi per satuan massa udara pada 0°C dan 1 atm

- $R = \text{Roentgen}$:
 $1R = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$

Dosis Serap / Absorbed Dose : energi yang diberikan oleh suatu radiasi (baik sinar maupun partikel) per satuan massa bahan yang dilewatinya

- rad :
 $1\text{rad} = 100 \text{ erg/g}$
- $\text{Gy} = \text{Gray (SI)}$:
 $1\text{Gy} = 1 \text{ J/kg} = 100\text{rad}$

Faktor Bobot Radiasi (w_R) menunjukkan resiko jangka panjang akan timbulnya kanker dan leukemia akibat paparan kronis (berlangsung untuk waktu yang lama) tingkat rendah.

Contoh: radiasi sinar γ , sinar X, elektron, muon untuk semua energi: $w_R = 1$
radiasi proton berenergi > 2 MeV: $w_R = 5$
radiasi neutron berenergi 2-20 MeV: $w_R = 10$
radiasi α : $w_R = 20$

Dosis Ekuivalen (untuk kerusakan biologis): dosis (dosis serap) dikalikan dengan faktor bobot radiasi

- rem: $1\text{rem} = 1\text{rad} \times w_R$
- Sv = Sievert (SI): $1\text{Sv} = 1\text{Gy} \times w_R = 100\text{rem}$

“Sekedar gambaran, resiko akibat radiasi 1 milirem kurang lebih setara dengan 1/(8 juta) resiko meninggal akibat kanker. Radiasi 1 milirem diterima akibat, contoh, menonton TV dalam setahun, tinggal di sebelah PLTN selama setahun.”

(<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>)

Penentuan Umur Secara Radioaktif

Radioisotop meluruh dengan kecepatan tetap. Hal ini memudahkan orang menilai umur suatu obyek dengan mengukur kandungan / aktivitas radioisotop di dalamnya, baik itu obyek geologis (batuan, bumi) maupun obyek organik (benda-benda yang pernah hidup atau mengandung bahan organik).

Obyek Geologis:

Prinsip dasar, jika jumlah bahan radioaktif semula dan sekarang diketahui maka umur obyek tersebut dapat dihitung:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda(t-t_0)} \longrightarrow \Delta t = t - t_0 = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{N_0}{N(t)} \right) \quad N_0 = ?$$

Anggap inti X meluruh dan proses peluruhan berakhir pada inti Y. Inti X disebut inti **ortu** (**parent**) dan inti Y disebut inti **anak** (**daughter**). Pada saat awal (t_0) terdapat $N_p(t_0)$ inti ortu, pada waktu kini (t) terdapat $N_p(t)$ inti ortu sisa dan $N_d(t)$ inti anak. Maka:

$$N_p(t_0) = N_p(t) + N_d(t)$$

sehingga:

$$\Delta t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{N_d(t)}{N_p(t)} \right)$$

Prolem: Apakah semua inti Y dalam obyek tersebut berasal dari peluruhan inti X? Bagaimana jika pada saat awal sudah terdapat sejumlah $N_b(t_0)$ inti Y?

$$N_p(t_0) + N_b(t_0) = N_p(t) + N_b(t) \longrightarrow \Delta t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{N_b(t) - N_b(t_0)}{N_p(t)} \right) \quad N_b(t_0) = ?$$

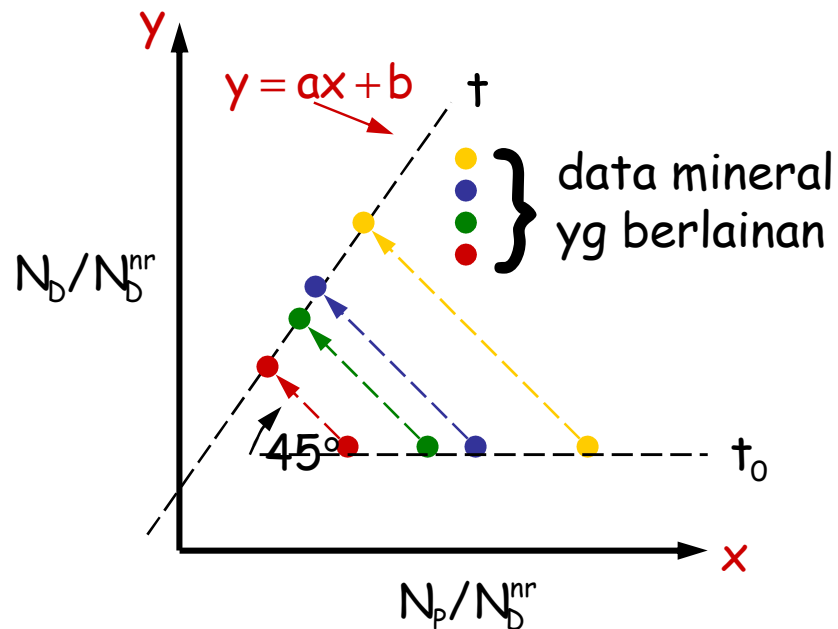
Inti Y hadir di alam dalam beberapa isotop (Z sama, N berbeda). Isotop Y yang merupakan anak radioisotop X disebut **radiogenik**, karena dapat dilahirkan melalui proses radioaktif. Sementara itu, mungkin saja terdapat isotop Y lain yang **non-radiogenik**, yaitu yang tidak dapat dihasilkan melalui proses radioaktif.

Andai ketika obyek (batuan) itu terbentuk terdapat radioisotop X, isotop radiogenik Y dan isotop non-radiogenik Y, yang selama proses peluruhan radioisotop X menjadi isotop radiogenik Y jumlahnya tetap. Bahan-bahan itu terdistribusi dalam mineral-mineral yang terbentuk dalam obyek itu.

Jika untuk satu mineral, $N_p(t_0)$ jumlah radioisotop X, $N_b(t_0)$ jumlah isotop radiogenik Y dan N_b^{nr} jumlah isotop non-radiogenik Y, maka mineral-mineral yang terbentuk memiliki rasio $N_b(t_0)/N_b^{nr}$ sama tetapi rasio $N_p(t_0)/N_b^{nr}$ berbeda.

Hal ini dikarenakan, baik isotop Y yang radiogenik maupun yang non-radiogenik memiliki sifat kimia yang sama, sehingga ketika terdistribusi dalam mineral-mineral perbandingan jumlahnya tetap sama sesuai yang terdapat dalam bahan asal mineral-mineral itu. Sedangkan isotop X berbeda secara kimia dari isotop Y, sehingga perbandingan jumlahnya pada mineral-mineral tidak sama.

Dengan berjalannya waktu, radioisotop X meluruh, tiap satu inti X berubah menjadi satu isotop radiogenik Y, sementara jumlah isotop non-radiogenik Y tetap. Sesuai sifat kecepatan peluruhan yang konstan, mineral dengan kandungan radioisotop X lebih banyak akan menghasilkan isotop radiogenik Y lebih banyak (aktivitas lebih besar).



plot data dari beberapa mineral:
(grafik di atas)

Jumlah inti dalam satu mineral terhadap N_D^{nr} pada saat awal dan saat kini:

$$\frac{N_P(t_0) + N_D(t_0)}{N_D^{nr}} = \frac{N_P(t) + N_D(t)}{N_D^{nr}}$$



$$\frac{N_D(t)}{N_D^{nr}} = \frac{N_P(t)}{N_D^{nr}} (e^{\lambda(t-t_0)} - 1) + \frac{N_D(t_0)}{N_D^{nr}}$$



$$y = x \quad a + b$$

Dari grafik tersebut (**isochron**) diperoleh umur obyek itu:

$$\Delta t = \frac{\ln(1+a)}{\lambda}$$

Contoh penentuan umur obyek geologis yaitu berdasarkan proses peluruhan radioisotop Rb^{87} menghasilkan isotop radiogenik Sr^{87} (rubidium-stronsium), yang waktu paruhnya 50 milyar (5×10^{10}) tahun. Sebagai isotop stronsium yang non-radiogenik yaitu Sr^{86} . Contoh material yang diukur umurnya, batuan metamorfik.

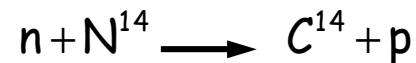
Contoh proses lain yang juga dipakai yaitu peluruhan U^{235} menghasilkan Pb^{207} dan peluruhan U^{238} menghasilkan Pb^{206} (uranium-timbal). Waktu paruh untuk proses pertama 0,7 milyar tahun dan yang kedua 4,5 milyar tahun. Sebagai isotop non-radiogenik timbal yaitu Pb^{204} . Contoh material yang diukur umurnya, zircon, bijih uranium.

Proses lain lagi yang dipakai untuk menentukan umur obyek geologis yaitu peluruhan K^{40} menghasilkan Ar^{40} (kalium-argon), yang waktu paruhnya 1,3 milyar tahun. Sifat argon yang tidak bereaksi kimia memberikan kepastian bahwa argon yang ditemukan dalam suatu obyek dihasilkan dari peluruhan tersebut. Contoh material yang diukur umurnya, batuan vulkanik.

Obyek Organik:

Benda-benda yang pernah hidup atau mengandung bahan-bahan organik dapat diperkirakan waktu matinya berdasarkan pengukuran aktivitas radioisotop C^{14} yang terdapat padanya. Radioisotop C^{14} meluruh menghasilkan isotop N^{14} sambil memancarkan elektron (proses ketidakstabilan beta).

Radioisotop C^{14} terbentuk di atmosfer melalui reaksi



Pada reaksi itu, neutron berasal dari reaksi **sinar kosmik** proton dan partikel-partikel di atmosfer atas, sementara N^{14} merupakan isotop terbanyak di atmosfer. Setiap saat sinar kosmik menghujani bumi, sehingga radioisotop C^{14} terus menerus terbentuk. Didapatkan bahwa kecepatan produksi C^{14} tetap.

Radioisotop C^{14} mempunyai waktu paruh yang cukup panjang (5730 tahun), sehingga menjadi bagian dari unsur karbon di bumi, bersama isotop karbon lain yaitu C^{12} yang stabil. Rasio jumlah C^{14} terhadap C^{12} sangat kecil, yaitu kurang lebih $1 : 10^{12}$, sehingga bahan karbon menunjukkan aktivitas yang lemah, kurang lebih 0,25 Bq atau 15 peluruhan tiap menit untuk 1 gram karbon.

Setiap makhluk hidup menyerap karbon, maka setiap makhluk hidup menyimpan sedikit radioisotop C^{14} dalam jumlah seperti ditunjukkan rasio di atas, serta menunjukkan aktivitas per gram karbon seperti di atas.

Setelah makhluk hidup itu mati, maka dia berhenti menyerap karbon, sehingga jumlah radioisotop C^{14} yang dikandungnya berkurang akibat peluruhan. Pengurangan ini mengakibatkan juga penurunan aktivitas karbon.

Dengan mengukur aktivitas C^{14} yang tersisa dapat diketahui kapan obyek organik itu mati.

Pengukuran waktu mati obyek organik dengan C^{14} hanya berlaku untuk rentang waktu 50 ribu tahun ke belakang dikarenakan aktivitas C^{14} yang lemah.

Model Inti

Inti terdiri atas nukleon.



Bagaimana dinamika
nukleon dalam inti?

Mengetahui hal itu diperlukan untuk:

- memahami / menjelaskan fenomena inti, misal penemuan, data eksperimen,
- menghitung sifat-sifat inti, proses-proses yang melibatkan inti.



Dibuatlah model inti.

Model tidak sepenuhnya dapat menggantikan hal yang sebenarnya (obyek yang dimodelkan).

Model bisa menjelaskan sebagian hal; model yang baik bisa menjelaskan banyak hal, meski tidak semua hal.

Model memiliki "daerah kerja":

- model A bisa menjelaskan hal-hal ini, tapi tidak hal-hal yang lain,
- model B bisa menjelaskan hal-hal lain, yang tidak dapat dijelaskan oleh model A,
- ...

Beberapa hal penting mengenai model:

- **berfungsi**; model yang tidak berfungsi tidak berguna,
- **sederhana / mudah / efisien**; model yang berfungsi dan lebih sederhana, mudah, efisien lebih disukai dari yang rumit meski juga berfungsi.

Model inti dapat dibagi dalam dua kelompok:

1

nukleon dilihat sendiri-sendiri (**independent**), bukan sebagai kelompok atau kesatuan

2

nukleon dilihat secara bersama (**collective**), sebagai kelompok atau kesatuan

Serupa, contoh:

Elektron-elektron dalam atom dilihat sendiri-sendiri, masing-masing menempati satu keadaan kuantum yang unik (n, l, m, s).

Setetes air dilihat sebagai kesatuan molekul-molekul air, gerakan setetes air merupakan gerakan kolektif molekul-molekulnya.

independent:

- Inti merupakan kumpulan nukleon yang berdiri sendiri-sendiri, diasumsikan nukleon-nukleon tidak saling berinteraksi atau berinteraksi secara lemah.
- Pengaruh / interaksi nukleon lain pada / dengan sebuah nukleon diwujudkan dalam bentuk suatu potensial, tiap nukleon dikenai potensial tersebut.

collective:

- Dinamika nukleon-nukleon dalam inti dilihat secara bersama, nukleon tidak terisolasi sendiri-sendiri, dengan kata lain nukleon saling berinteraksi, yang ditampilkan berupa dinamika kolektif seluruh nukleon.

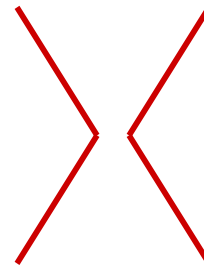
Kedua kelompok model itu saling berlawanan:

independent:

nukleon tidak saling berinteraksi



mean free-path
nukleon panjang



collective:

nukleon saling berinteraksi



mean free-path
nukleon pendek

Namun demikian, kedua kelompok model dapat menjelaskan sebagian fenomena inti; keduanya berfungsi.



Jawab: **Larangan Pauli**

- Interaksi menghasilkan suatu keadaan (state). Akibat larangan Pauli, tidak semua keadaan boleh ada. Karena itu, tidak selalu nukleon berinteraksi. Akibatnya, mean free-path nukleon panjang.

Model Tetes Cairan (Liquid Drop Model)

Beberapa kemiripan sifat inti dengan sifat setetes cairan:

- Dapat dikatakan, bahwa kerapatan setetes cairan tidak bergantung pada ukurannya. Dengan begitu, jika tetes itu menyerupai bola, maka radiusnya sebanding dengan akar 3 jumlah molekulnya.

$$\text{kerapatan} = \frac{\text{jumlah molekul}}{\frac{4}{3} \pi \text{radius}^3} \propto \frac{3}{4\pi}$$

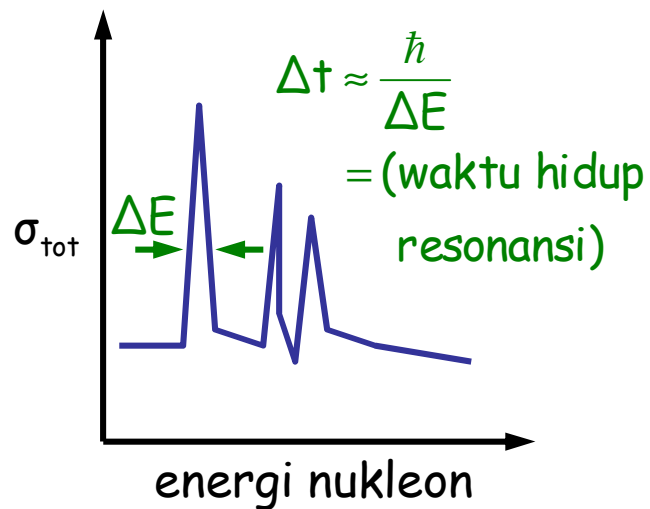
Hal serupa ditemui pada inti, bahwa radius inti (inti dianggap menyerupai bola) sebanding dengan $A^{\frac{1}{3}}$, sehingga kerapatannya tidak bergantung pada ukurannya.

- Energi ikat tiap molekul sama, sehingga energi yang diperlukan untuk memisahkan semua molekul cairan itu sebanding dengan jumlah molekulnya. Pada inti diketahui hal serupa, bahwa energi ikat rata-rata per nukleon (fraksi ikat) konstan, yang berarti, energi yang diperlukan untuk memisahkan semua nukleon sebanding dengan jumlah nukleon.
- Pada energi ikat tetes cairan tersebut di atas, dikenakan koreksi efek permukaan, dikarenakan molekul cairan di permukaan kurang terikat dibanding molekul di dalam tetes cairan. Untuk energi ikat inti berlaku juga koreksi efek permukaan serupa.

Menurut model tetes cairan, inti berperilaku seperti layaknya setetes cairan. Model ini termasuk model collective (model collective yang pertama).

Model tetes cairan mendasari rumus massa semiempiris: suku $a_v A$ menunjukkan energi ikat inti sebanding dengan jumlah nukleon, suku $a_s A^{\frac{2}{3}}$ menunjukkan efek permukaan.

Model ini dapat menjelaskan, contoh, munculnya keadaan **resonansi** pada reaksi nukleon dan inti (ditandai oleh 'peak' pada grafik penampang lintang total):



Data eksperimen menampakkan peak-peak yang lebarnya ΔE , menunjukkan selang waktu Δt sesuai **ketidakpastian Heisenberg**, yang ternyata sangat melebihi waktu yang diperlukan nukleon untuk sekedar bergerak melintasi inti.

Ini menunjukkan pada proses itu tercipta suatu keadaan sementara, akibat kesesuaian energi nukleon yang datang dengan salah satu modus gerak inti (karena itu disebut resonansi).

Keadaan resonansi kemudian meluruh ke salah satu jalur (kanal) proses:

kanal elastik : $N + X \longrightarrow N + X$ (nukleon terhambur, energinya tetap)

kanal inelastik : $N + X \longrightarrow N' + X^*$ (inti X tereksitasi, energi nukleon berkurang)

kanal reaksi : $N + X \longrightarrow Y + \dots$ (inti dan / atau partikel lain dihasilkan)

Ide Bohr:

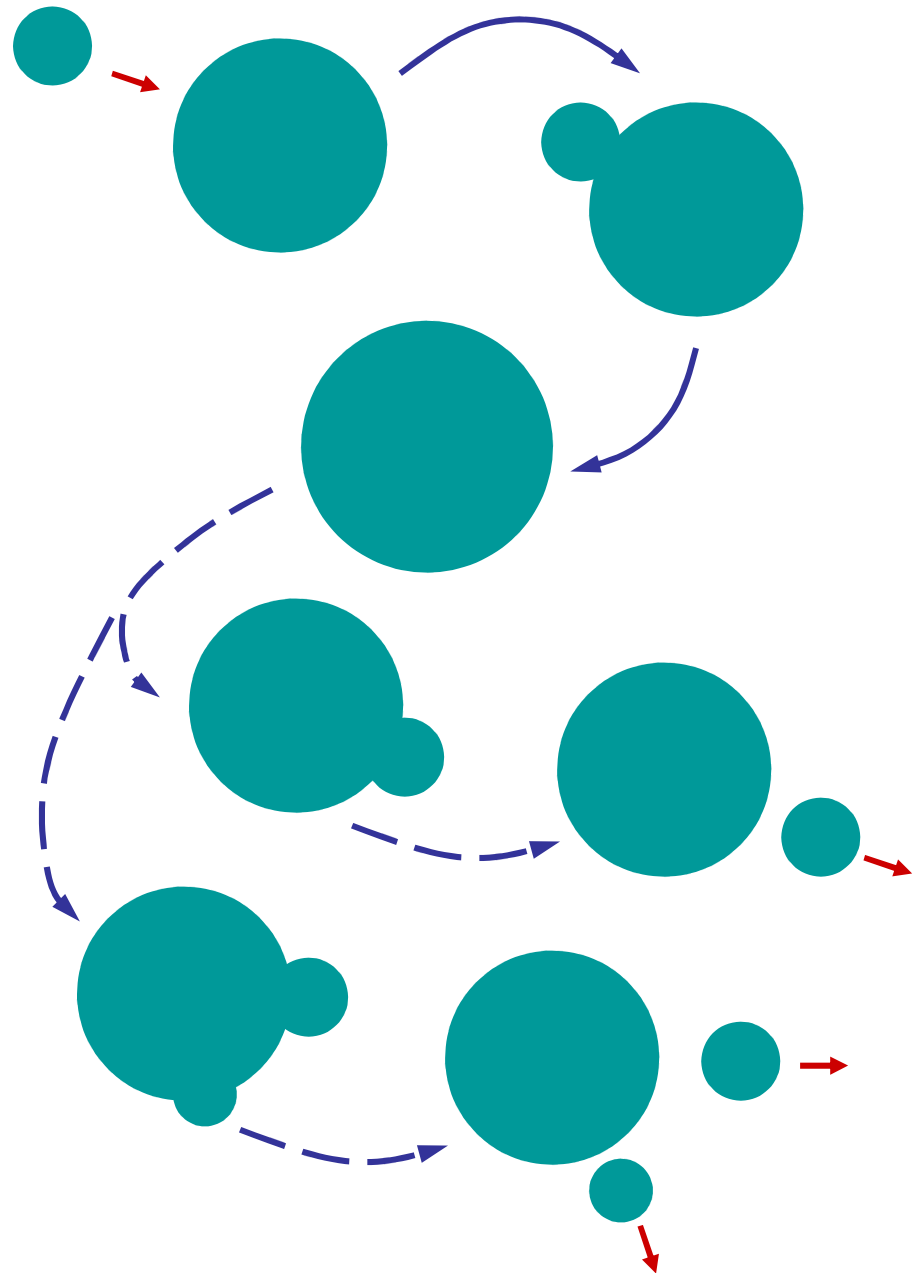
Nukleon datang, lalu ditangkap inti sehingga terbentuk suatu sistem paduan (compound system).

Energi nukleon datang dibagi ke nukleon-nukleon di dalam inti yang ditumbuknya. Demikian seterusnya, pada serangkaian tumbukan selanjutnya energi dibagi ke nukleon dalam inti.

Sistem paduan itu hidup selama beberapa waktu, kemudian meluruh ke salah satu kanal : kanal elastik, kanal inelastik, kanal reaksi.

Ketika sebuah (beberapa) nukleon di permukaan inti mendapat cukup energi, maka nukleon itu (beberapa nukleon sebagai satu partikel atau lebih) lepas dari inti.

Ibarat tetes cairan:

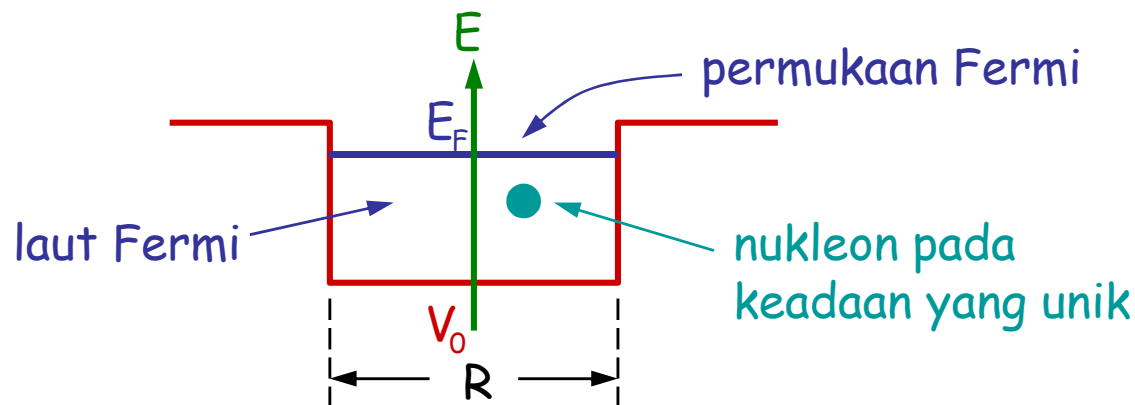


Model Gas Fermi (Fermi Gas Model)

Menghitung semua interaksi antar nukleon dalam inti terlalu rumit. Akan lebih mudah jika semua interaksi itu secara efektif diganti dengan sebuah potensial, sementara nukleon dianggap berdiri sendiri, tidak saling berinteraksi, namun berada dalam pengaruh potensial tersebut.

Model gas Fermi merupakan model inti independent yang pertama. Dalam model ini, nukleon-nukleon dianggap seperti molekul-molekul gas yang berdiri sendiri, namun dikenai suatu potensial.

Nukleon-nukleon sebuah inti (jumlah total A) digambarkan berada dalam suatu potensial sumur konstan sedalam V_0 dan selebar radius inti R , masing-masing menempati satu keadaan (state) yang berbeda dari yang lain, yang memenuhi **laut Fermi** (**Fermi sea**) dari dasar sampai permukaan (**permukaan Fermi**). Energi tertinggi yang dimiliki nukleon yaitu **energi Fermi** E_F .



Energi dihitung dari dasar potensial, maka energi berarti energi kinetik.

Dalam ruang momentum, tiap keadaan menempati ruang sebesar $(2\pi\hbar)^3/V$ Maka, dalam sebuah bola berradius p tersedia keadaan yang mungkin sebanyak:

$$N = \frac{\text{volume bola dengan radius } p}{\text{ruang tiap keadaan}} = \frac{4\pi p^3 V}{3(2\pi\hbar)^3}$$

Dalam ruang spin $\frac{1}{2}$ terdapat dua keadaan yang mungkin, spin up dan spin down. Maka, jika spin ikut diperhitungkan, jumlah keadaan N di atas menjadi:

$$N = \frac{8\pi p^3 V}{3(2\pi\hbar)^3}$$

Nukleon memiliki **isospin** $\frac{1}{2}$, maka terdapat dua keadaan: isospin up (proton) dan isospin down (netron). Dengan demikian, untuk sebuah nukleon dalam inti yang besar momentumnya p tersedia keadaan yang mungkin ditempatinya sebanyak:

$$N = \frac{16\pi p^3 V}{3(2\pi\hbar)^3}$$

Untuk inti pada keadaan dasar, tiap keadaan dari dasar sampai permukaan Fermi terisi satu nukleon. Nukleon pada permukaan Fermi memiliki momentum tertinggi yaitu, **momentum Fermi** p_F , serta energi Fermi E_F sebagai berikut:

$$A = \frac{16\pi p_F^3 V}{3(2\pi\hbar)^3}, \quad V = \frac{4}{3}\pi R_0^3 A \longrightarrow p_F = \frac{\hbar}{2R_0} (9\pi)^{\frac{1}{3}}$$

$$E_F = \frac{p_F^2}{2m} \longrightarrow E_F = \frac{\hbar^2}{8mR_0^2} (9\pi)^{\frac{2}{3}}$$

Jumlah nukleon yang memiliki energi E sampai $E + dE$ yaitu:

$$dN = \frac{16\pi p^2 V}{(2\pi\hbar)^3} dp = \frac{4}{3\pi} \left(\frac{R_0}{\hbar} \right)^3 (2m)^{\frac{3}{2}} A E^{\frac{1}{2}} dE$$

maka, didapat rapat nukleon $g(E)$:

$$g(E) = \frac{dN}{dE} = \frac{4}{3\pi} \left(\frac{R_0}{\hbar} \right)^3 (2m)^{\frac{3}{2}} A E^{\frac{1}{2}} \longrightarrow \int_0^{E_F} g(E) dE = A$$

Jumlah energi kinetik semua nukleon:

$$E_{\text{tot}} = \int_0^{E_F} E g(E) dE = \frac{3}{5} E_F A$$

Perhitungan sebelum ini menggunakan isospin: proton dan neutron dianggap partikel yang sama yaitu, nukleon, keduanya merupakan dua keadaan isospin nukleon. Karena itu, contoh, keadaan untuk proton dan neutron digabungkan menjadi jumlah keadaan nukleon.

Pilihan lain, proton dan neutron dilihat sebagai partikel berbeda. Perhitungan dilakukan terpisah, untuk proton dan neutron. Di sini dikenal, contoh, energi Fermi proton dan energi Fermi neutron, energi total proton dan energi total neutron.

Rapat proton $g_p(E)$ dan rapat neutron $g_n(E)$ masing-masing dinyatakan sebagai:

$$g_p(E) = g_n(E) = g(E) = \frac{2}{3\pi} \left(\frac{R_0}{\hbar} \right)^3 (2m)^{\frac{3}{2}} A E^{\frac{1}{2}}$$

Energi Fermi untuk proton dan neutron diperoleh sebagai:

$$\int_0^{E_F^p} g_p(E) dE = Z \rightarrow E_F^p = \frac{\hbar^2}{2mR_0^2} \left(\frac{9\pi Z}{4A} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad \int_0^{E_F^n} g_n(E) dE = A - Z \rightarrow E_F^n = \frac{\hbar^2}{2mR_0^2} \left(\frac{9\pi(A-Z)}{4A} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Energi kinetik total untuk proton dan neutron diperoleh sebagai:

$$E_{\text{tot}}^p = \int_0^{E_F^p} E g_p(E) dE = \frac{3}{5} E_F^p Z, \quad E_{\text{tot}}^n = \int_0^{E_F^n} E g_n(E) dE = \frac{3}{5} E_F^n (A - Z)$$

Maka, energi kinetik total seluruh nukleon:

$$E_{\text{tot}}^p + E_{\text{tot}}^n = \frac{3}{5} [E_F^p Z + E_F^n (A - Z)]$$

Untuk kasus $Z = N = \frac{1}{2}A$ (serta dibandingkan dengan perhitungan yang menggunakan isospin) didapat:

$$E_F^p = E_F^n = \frac{\hbar^2}{8mR_0^2} (9\pi)^{\frac{2}{3}} = E_F$$

$$E_{\text{tot}}^p = E_{\text{tot}}^n = \frac{3}{10} E_F A = \frac{1}{2} E_{\text{tot}}$$

$$E_{\text{tot}}^p + E_{\text{tot}}^n = \frac{3}{5} E_F A = E_{\text{tot}}$$

Selisih energi kinetik total untuk $Z = N$ dan untuk $Z \neq N$ dengan A yang sama:

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_{\text{tot}}^{Z \neq N} - E_{\text{tot}}^{Z=N} \\ &= \frac{3}{5} [E_F^p Z + E_F^n (A - Z)] - E_{\text{tot}} \\ &= \frac{3}{5} \frac{\hbar^2}{2mR_0^2} \left(\frac{9\pi}{4A} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{A}{2} \right)^{\frac{5}{3}} [(1-\delta)^{\frac{5}{3}} + (1+\delta)^{\frac{5}{3}} - 2] \end{aligned}$$

dengan

$$\delta = 1 - \frac{2Z}{A} \quad (\text{jika } Z \rightarrow A/2, \delta \ll 1)$$

Menurut deret Taylor:

$$(1 \pm \delta)^n = 1 \pm n\delta + n(n-1)\frac{1}{2}\delta^2 \pm \dots$$

maka:

$$\begin{aligned}(1-\delta)^{\frac{5}{3}} + (1+\delta)^{\frac{5}{3}} - 2 &= 1 - \frac{5}{3}\delta + \frac{5}{3}\frac{1}{3}\delta^2 - \dots + 1 + \frac{5}{3}\delta + \frac{5}{3}\frac{1}{3}\delta^2 + \dots - 2 \\ &= \frac{10}{9}\delta^2(1 + \frac{1}{27}\delta^2 + \dots) > 0\end{aligned}$$

Inti dengan jumlah proton dan neutron tidak sama memiliki energi kinetik total nukleon yang lebih besar dari yang dimiliki inti dengan jumlah proton dan neutron sama pada satu isobar.

Energi kinetik lebih besar mengakibatkan ikatan lebih lemah.

Ini cocok dengan pengamatan, bahwa pada satu isobar inti dengan jumlah proton dan neutron sama lebih stabil dari yang lain.

Jika $Z \rightarrow A/2$ maka:

$$(1-\delta)^{\frac{5}{3}} + (1+\delta)^{\frac{5}{3}} - 2 \approx \frac{10}{9}\delta^2$$

sehingga:

$$\Delta E = \frac{3}{5} \frac{\hbar^2}{2mR_0^2} \left(\frac{9\pi}{4A} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{A}{2} \right)^{\frac{5}{3}} \frac{10}{9} \delta^2 = \frac{1}{3} E_F \left(\frac{(N-Z)^2}{A} \right)$$

Ingat satu suku
pada rumus masa
semiempiris.

Model Kulit (Shell Model)

Beberapa sifat inti, contoh: kestabilan, jumlah di alam, menunjukkan suatu nilai atau keadaan yang menonjol jika jumlah proton dan / atau netron inti itu sama dengan salah satu bilangan berikut: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, ..., yang disebut sebagai bilangan ajaib (magic numbers).

Fenomena bilangan ajaib tidak dapat dijelaskan oleh model inti tetes cairan maupun model inti gas Fermi. Karena itu, diperlukan model inti lain.

Pada atom orang mendapatkan fenomena serupa, bahwa atom memiliki sifat-sifat yang tidak kontinyu (pada situasi tertentu menonjol) dikarenakan atom memiliki tingkat-tingkat keadaan yang diskrit (struktur kulit).

Ide ini lalu dipakai juga untuk inti, bahwa inti memiliki struktur kulit, tingkat-tingkat keadaan yang diskrit.

Model kulit termasuk model independent.

Pada atom orang mengenal jumlah keadaan yang mungkin sampai tingkat energi n yaitu:

$$2n^2$$

Ini menghasilkan bilangan ajaib untuk atom:

$$2, 8, 19, 32, 50, \dots$$

Hal itu disebabkan interaksi Coulomb dan spin dalam atom.

—————> Dalam hal ini hamiltonian atom diketahui.

Seperti apa hamiltonian inti?

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + \textcircled{V} = ?$$

Seperti apa potensial inti sehingga menghasilkan bilangan ajaib:

$$2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, \dots$$

Dicoba potensial kotak sederhana, dihasilkan bilangan ajaib:

2, 8, 18, 20, 34, 40, 58, 68, 90, 92, ... tidak cocok

Dicoba potensial osilator harmonik, dihasilkan bilangan ajaib:

2, 8, 20, 40, 70, 112, 168, ... tidak cocok

Dst.

Pada tahun 1949 Mayer dan Jensen atas saran Fermi mengusulkan bahwa ada komponen **spin-orbit** dalam potensial inti sebagai berikut:

$$V(r) = V_0(r) + \underbrace{V_s(r) \vec{L} \cdot \vec{S}}_{\text{komponen spin-orbit}}$$

dengan \vec{L} yaitu operator momentum angular orbital dan \vec{S} operator spin.

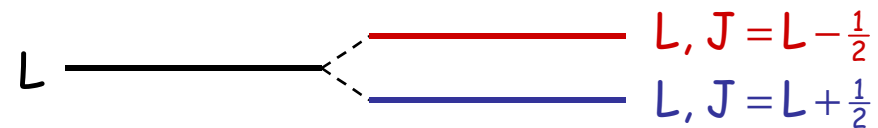
Dengan memasukkan komponen spin-orbit bilangan ajaib bisa dihasilkan. sukses!

Mencari eigenvalue spin-orbit operator $\vec{L} \cdot \vec{S}$ (di sini dipakai $\hbar = 1$):

$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S} \longleftarrow$ untuk nukleon $\vec{S} = \frac{1}{2} \vec{\sigma}$, dengan $\vec{\sigma}$ = matriks Pauli:

$$\sigma_1 = \sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_2 = \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_3 = \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Maka, untuk tiap nilai L berlaku $J = L \pm \frac{1}{2}$, yang berarti, akibat interaksi spin-orbit, maka tiap satu keadaan L terpecah menjadi dua keadaan untuk nilai J tersebut:



$$\vec{J}^2 = (\vec{L} + \vec{S})^2 = \vec{L}^2 + \vec{S}^2 + 2\vec{L} \cdot \vec{S} \longrightarrow \vec{L} \cdot \vec{S} = \frac{1}{2} (\vec{J}^2 - \vec{L}^2 - \vec{S}^2)$$

$$\begin{aligned} \text{eigenvalue } (\vec{L} \cdot \vec{S}) &= \frac{1}{2} \text{ eigenvalue } (\vec{J}^2 - \vec{L}^2 - \vec{S}^2) \\ &= \frac{1}{2} (J(J+1) - L(L+1) - S(S+1)) \\ &= \frac{1}{2} (J(J+1) - L(L+1) - \frac{3}{4}) \\ &= \begin{cases} \frac{1}{2}L & , \text{ untuk } J = L + \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2}(L+1) & , \text{ untuk } J = L - \frac{1}{2} \end{cases} \text{ untuk } L > 0 \\ &= 0 \quad , \text{ untuk } L = 0 \end{aligned}$$

Menurut model kulit didapatkan tingkat-tingkat energi inti. Satu tingkat dapat terdiri dari beberapa keadaan untuk nilai L dan J tertentu, serta satu bilangan kuantum lain n . Maka keadaan inti dinyatakan sebagai nL_J , sementara L dinyatakan dalam S, P, D, F, G, \dots untuk $L = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$

Tiap tingkat keadaan dengan momentum angular total J ter~~degenerasi~~ dalam $2(2J + 1)$ keadaan, yaitu untuk keadaan dengan bilangan kuantum magnetik momentum angular $M = -J, -J + 1, \dots, 0, \dots, J - 1, J$ serta spin 'up' dan 'down'.

Keadaan inti pada beberapa tingkat energi terendah menurut model kulit yaitu:

tingkat	keadaan (nL_J)	jml keadaan	jml keadaan total
1	$1S_{1/2}$	2	2
2	$1P_{1/2}, 1P_{3/2}$	6	8
3	$2S_{1/2}, 1D_{3/2}, 1D_{5/2}$	12	20
4	$1F_{7/2}$	8	28
5	$1G_{9/2}, 2P_{1/2}, 2P_{3/2}, 1F_{5/2}$	22	50

bilangan ajaib

Pada atom, yang juga dimodelkan memiliki kulit-kulit keadaan, beberapa sifat atom ditentukan oleh elektron-elektron pada kulit terluar. Demikian juga menurut model kulit untuk inti, beberapa sifat inti ditentukan oleh nukleon-nukleon pada kulit terluar, seperti paritas inti, spin inti.

Contoh lain, ingat kembali rumus massa semiempiris, di situ terdapat suku koreksi pasangan $\Delta(A)$. Suku ini berkaitan dengan nukleon-nukleon pada kulit terluar (di luar kulit terakhir yang terisi penuh), yang memiliki kecenderungan membentuk pasangan.

Jadi, pada model kulit yang diperhatikan hanya dinamika nukleon pada kulit terluar. Dinamika nukleon pada bagian dalam diabaikan. Ini merupakan sifat model inti yang melihat nukleon-nukleon secara independent, berlawanan dengan model inti yang melihat nukleon-nukleon secara kolektif.

Model kulit berhasil menjelaskan fenomena bilangan ajaib namun gagal menjelaskan beberapa sifat / fenomena inti lain, yang menunjukkan gerakan nukleon secara kolektif. Contoh:

- Inti yang turun ke keadaan dasar memancarkan foton. Dari spektrum foton yang dipancarkan dapat dipelajari struktur tingkat keadaan eksitasi inti. Pada tingkat eksitasi tertentu didapatkan spektrum yang sederhana, yang menunjukkan adanya modus gerak inti yang lain, bukan seperti yang digambarkan oleh model kulit, yang justru memprediksi spektrum eksitasi yang lebih rumit.
- Momen quadrupol ^{177}Lu didapatkan 25 kali lebih besar dari yang diberikan oleh model kulit. Momen quadrupol yang besar menunjukkan bahwa wujud inti bukan berupa bola yang simetris ke segala arah. Dengan kata lain, inti mengalami perubahan bentuk (**deformasi**). Ini menandakan adanya gerak kolektif nukleon dalam tubuh inti, yang justru tidak dipertimbangkan oleh model kulit.
- Pada hamburan inelastik inti mengambil energi dari proyektil untuk eksitasi. Seringkali perhitungan berdasarkan model kulit memberikan penampang lintang yang lebih kecil dari data eksperimen. Ini menandakan suatu proses eksitasi kolektif nukleon, sesuai suatu modus gerak kolektif tertentu.

Model Rotasional

Telah ditunjukkan bahwa beberapa sifat inti menandakan adanya gerak kolektif nukleon-nukleon dalam inti.

Gerak kolektif nukleon ini dapat menyebabkan perubahan bentuk (deformasi) inti dari bentuk seperti bola.

Deformasi dapat bersifat lunak atau permanen. Deformasi lunak berarti bentuk inti berubah-ubah di sekitar bentuk bola, sementara deformasi permanen menyebabkan perubahan bentuk yang permanen, bahwa inti tidak berbentuk seperti bola lagi.

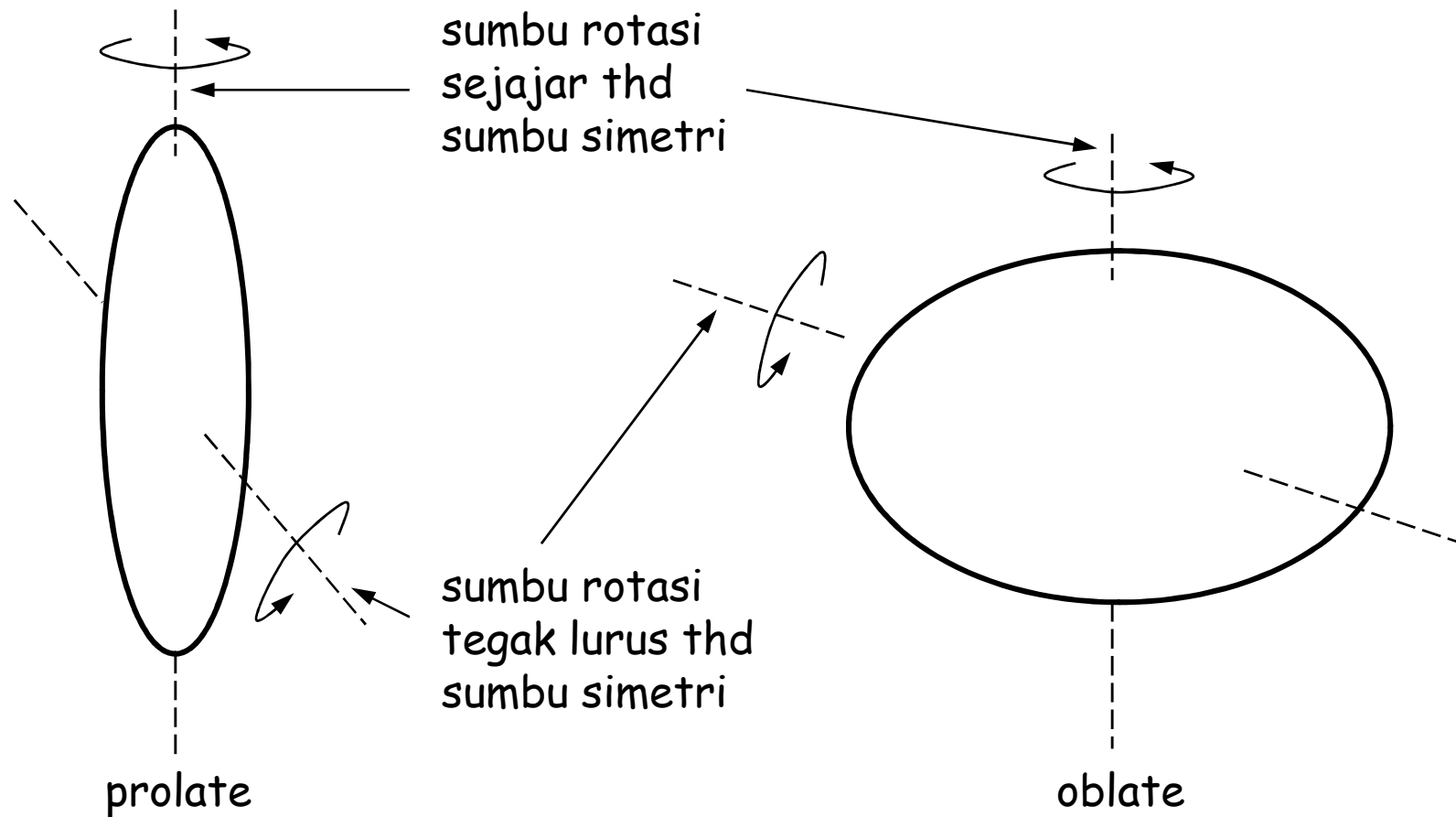
Dua macam gerakan kolektif inti:

- rotasi: menyebabkan deformasi permanen,
- getaran: menyebabkan deformasi lunak.

Gerak kolektif seperti rotasi dan getaran juga menghasilkan tingkat-tingkat keadaan. Inti dapat menjalani transisi antar tingkat-tingkat keadaan ini berupa eksitasi atau peluruhan ke tingkat keadaan lebih rendah.

Deformasi paling sederhana dari bentuk bola yaitu deformasi menjadi bentuk elips atau lonjong (**deformasi elipsoidal**), seperti telur, combro, lempeng, bola rugby, kacang almond dll.

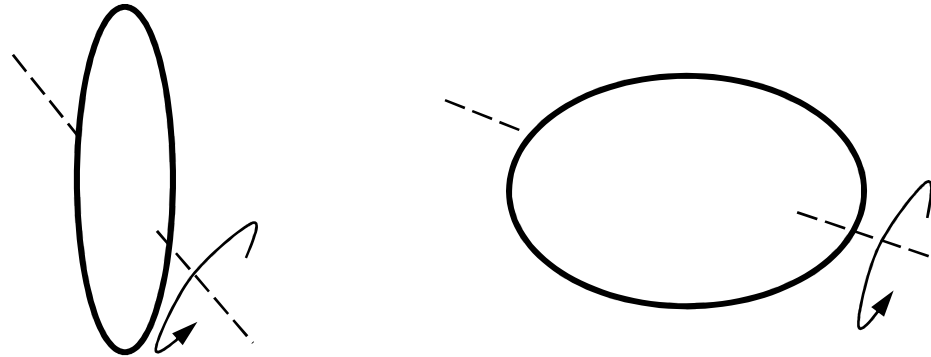
Dua jenis deformasi elipsoidal yaitu, **prolate** dan **oblate**:



Bentuk dan sumbu rotasi mana yang dipilih inti?

sumbu rotasi:

Nukleon tidak dapat dibedakan (indistinguishable). Karena itu, rotasi inti dapat diamati jika sumbu rotasinya tegak lurus terhadap sumbu simetrinya.



bentuk:

Sesuai prinsip energi minimum, rotasi lamban dapat mengakibatkan deformasi baik ke bentuk prolate maupun oblate, sementara rotasi cepat mengakibatkan deformasi ke bentuk prolate.

$$E_{\text{rotasi}} = \frac{J^2}{2I}, \quad J = \text{momentum angular}, I = \text{momen inersia}$$

Untuk momentum angular tetap E_{rotasi} akan kecil jika I besar. I besar diperoleh jika bentuk inti prolate dan berotasi pada sumbu yang tegak lurus terhadap sumbu simetri.

Selain hal-hal di atas masih ada faktor-faktor lain yang perlu dipertimbangkan.

Spektrum eksitasi yang dihitung berdasarkan energi rotasi:

klasik: $E = \frac{J^2}{2I} + \text{suku - suku lain}$

kuantum: $E = \frac{\hbar^2 J(J+1)}{2I} + \text{suku - suku lain}$

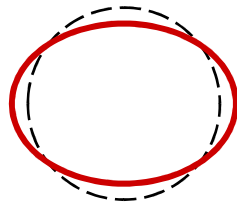
Suku-suku lain dapat berupa efek sentrifugal, permukaan dll.

Model Vibrasional

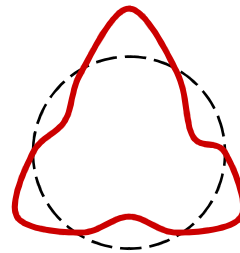
Modus gerak kolektif nukleon dalam inti yang lain yaitu getaran / vibrasi. Model vibrasional memperhitungkan gerak kolektif tersebut.

Menurut model vibrasional, permukaan inti tidak diam melainkan bergetar, seperti sebuah selaput yang bergetar. Jadi, di sini terjadi gerakan kolektif nukleon-nukleon di permukaan inti. Getaran ini membuat bentuk inti tidak tetap melainkan berubah-ubah secara periodik di sekitar bentuk bola.

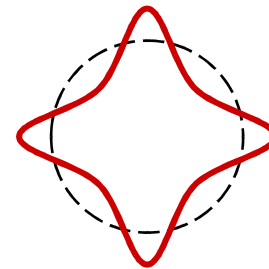
Modus getaran permukaan inti ditandai oleh suatu konstanta λ , contohnya:



$\lambda = 2$
(quadrupol)



$\lambda = 3$
(oktupol)

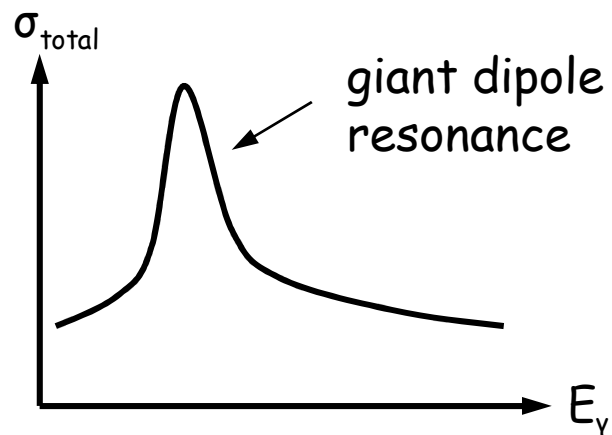


$\lambda = 4$
(heksadekapol)

$\lambda = 0$ untuk modus getaran kembang kempis, yang tidak dipertimbangkan, karena energinya terlalu besar.

$\lambda = 1$ untuk modus getaran translasi, yaitu pusat massa inti bergeser bolak balik. Modus ini tidak dimasukkan karena yang diperhitungkan hanya getaran dengan pusat massa inti diam.

Model inti vibrasional dapat menjelaskan, contoh, 'giant dipole resonance' pada reaksi (γ, n) pada ^{208}Pb (γ datang ke target ^{208}Pb , lalu neutron yang terhambur dideteksi). Giant dipole resonance ditunjukkan sebagai sebuah peak besar pada distribusi penampang lintang total proses tersebut pada energi γ yang datang.



"Proton bergetar terhadap neutron pada suatu frekuensi tertentu. Foton γ yang datang ke inti berinteraksi elektromagnetik dengan proton, tapi tidak dengan neutron. Apabila frekuensi (energi) foton γ sesuai dengan frekuensi getar proton terhadap neutron, maka terjadi resonansi, yang mengakibatkan getaran proton semakin kuat. Kejadian ini ditandai oleh peak pada penampang lintang total."

Model Nilsson

Telah ditunjukkan beberapa model baik dari kelompok independent maupun kolektif berfungsi baik untuk menjelaskan sifat-sifat inti.

Dalam hal itu terlihat bahwa memperhitungkan hanya salah satu dari dua modus gerak nukleon, yaitu gerak independent dan gerak kolektif, tidak cukup untuk menjelaskan sifat inti.

Lalu orang berusaha menggabungkan kedua ide model independent dan model kolektif. Berangkat dari model kulit (elemen model independent), lalu digunakan potensial yang mengandung juga faktor deformasi inti (elemen model kolektif).

Yang pertama melakukan perhitungan berdasarkan ide ini yaitu Nilsson, yang menggunakan potensial:

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{2} m \omega^2 r^2 (1 - 2\beta_2 Y_2^0(\theta, \varphi)) + C \vec{L} \cdot \vec{S} + D L^2$$

↑
parameter deformasi

Model Alfa

Model alfa termasuk model kulit (model independent). Pada model ini bukan nukleon yang dilihat sebagai satuan partikel penyusun inti melainkan partikel α . Jadi, nukleon-nukleon di dalam inti dipilah-pilah dalam cluster-cluster, yang masing-masing cluster membentuk partikel α (α clustering).

Model ini dapat bermanfaat untuk inti-inti ringan, seperti ^8Be , ^{20}Ne , ^{28}Si , juga untuk proses-proses seperti peluruhan α .

Gaya Nuklir / Interaksi Kuat

Yang dimaksud dengan gaya nuklir atau interaksi kuat (biasa dikenal juga dengan gaya inti kuat) di sini yaitu, interaksi antar 2 nukleon atau interaksi nukleon-nukleon (interaksi NN): antar p dan p, p dan n serta n dan n.

Pada model inti kulit, contohnya, ditemui juga interaksi inti, yang direpresentasikan oleh sebuah potensial inti. Dalam hal ini, interaksi tersebut merupakan interaksi inti efektif antar satu nukleon dan sisa nukleon dalam inti. Dapat dikatakan, bahwa interaksi inti efektif merupakan jumlah / resultan semua interaksi NN dalam inti.

Menurut **model standar fisika partikel** (yang sudah diterima fisikawan), interaksi kuat sebenarnya interaksi antar **quark**. Quark merupakan penyusun nukleon dan juga partikel-partikel lain, yang semuanya termasuk jenis partikel **hadron**, yang terdiri dari jenis **meson** dan **barion**. Jadi, interaksi kuat bermakna lebih luas dari sekedar interaksi NN.

Pada bagian ini akan dibahas interaksi kuat dalam arti khusus, yaitu sebagai interaksi NN. Ini tidak membuat pembahasan menjadi tidak penting, mengingat:

- sebelum ditemukan quark, interaksi kuat dianggap sebagai interaksi NN,
- karena kerumitan dalam perhitungan, sampai sekarang masih dikerjakan interaksi kuat dalam bentuk interaksi NN atau interaksi antar hadron.

Salah satu interaksi fundamental* selain interaksi kuat yaitu interaksi elektromagnetik (e.m.). Interaksi e.m. telah dengan sukses dijabarkan dengan 'alat' atau 'kerangka' yang disebut **elektrodinamika kuantum / quantum electrodynamics (QED)**. Interaksi e.m. digambarkan berlangsung sebagai pertukaran foton antar 2 muatan listrik. Jadi, foton merupakan pembawa (carrier) interaksi e.m.



Yukawa (1935) yang pertama melontarkan ide, bahwa interaksi kuat berlangsung sebagai pertukaran suatu partikel dari jenis meson antar nukleon.

Berdasarkan jangkauan interaksi kuat, Yukawa menghitung massa meson tersebut, yang pada saat itu belum ditemukan.

* Interaksi fundamental di alam ada 4 yaitu, interaksi gravitasi, interaksi elektromagnetik (e.m.), interaksi kuat dan interaksi lemah. Segala proses di alam berlangsung akibat satu atau lebih dari interaksi fundamental tersebut.

Beberapa sifat interaksi fundamental:

- Interaksi gravitasi paling lemah. Interaksi kuat paling kuat.
- Interaksi gravitasi dan interaksi e.m. berjangkauan panjang (tak berhingga). Interaksi kuat dan interaksi lemah berjangkauan pendek (kurang lebih seukuran dimensi nukleon).

Beberapa waktu kemudian ditemukan dalam sinar kosmik partikel yang dianggap sebagai meson yang diperkirakan Yukawa. Partikel itu diberi nama **meson- μ** (**μ -meson / muon**).

Pada kenyataan, muon bukanlah meson, melainkan dari jenis **lepton**. Ini diketahui dari, bahwa ternyata muon tidak berinteraksi kuat, yang berarti muon bukanlah hadron (hadron yaitu jenis partikel yang dapat berinteraksi kuat).

Tapi kesalahpahaman itu (bahwa muon dianggap meson) membawa keberuntungan yaitu, orang banyak menyelidiki interaksi kuat mengikuti ide Yukawa. Jadi, ide Yukawa tidak mati.

Pada tahun 1947 akhirnya ditemukan dalam sinar kosmik partikel yang memang termasuk meson, yang massanya sesuai dengan yang dihitung Yukawa. Partikel ini diberi nama **meson π** (**π -meson / pion**). Pion diyakini sebagai meson yang dipertukarkan dalam interaksi kuat. Pion hadir dalam 3 jenis, yaitu pion bermuatan listrik positif π^+ , netral π^0 dan negatif π^- . Pada tahun 1949 Yukawa menerima hadiah Nobel.

Mengikuti ide Yukawa, dikembangkan model-model interaksi kuat, yang tidak hanya melibatkan pion tapi juga meson-meson lain. Juga dikembangkan interaksi kuat berdasarkan pertukaran bukan hanya 1 pion melainkan 2 pion.

Hubungan antara massa meson carrier dan jangkauan interaksi:

Penciptaan meson carrier bermassa m memerlukan energi ΔE . Menurut ketidakpastian Heisenberg diperoleh waktu hidup Δt meson itu sebagai:

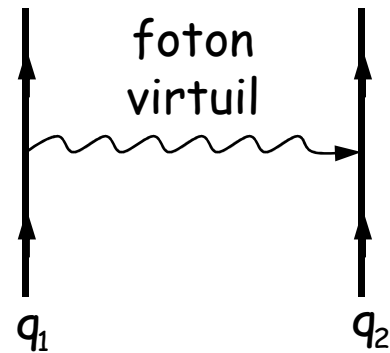
$$\Delta t \approx \frac{\hbar}{\Delta E}, \quad \Delta E = mc^2$$

Dalam waktu Δt meson itu bergerak paling jauh (anggap kecepatannya sama dengan c):

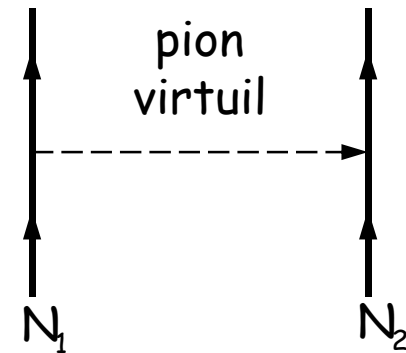
$$\begin{aligned} R &\approx c\Delta t \\ &\approx c \frac{\hbar}{\Delta E} \\ &\approx c \frac{\hbar}{mc^2} \\ &\approx \frac{\hbar}{mc} \end{aligned}$$

Untuk interaksi e.m., carriernya yaitu foton, yang massa diamnya 0. Sehingga, jangkauan interaksi e.m. tak berhingga.

Dalam interaksi, carrier yang dipertukarkan itu tidak terdeteksi. Carrier itu tercipta di satu titik dan kemudian musnah di titik lain dalam interaksi itu. Dengan begitu, carrier merupakan **partikel virtual**.

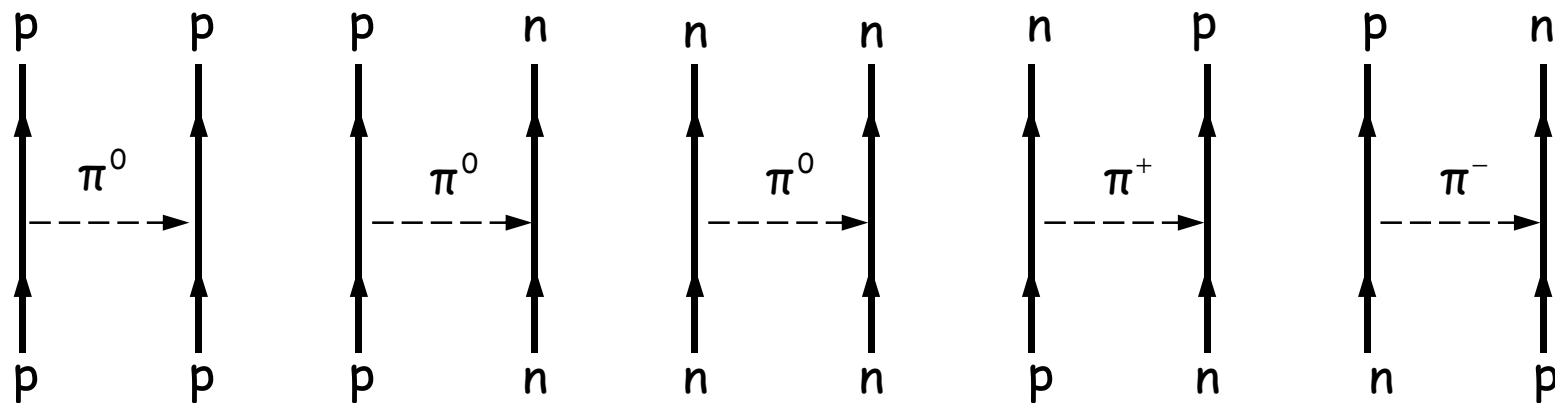


interaksi e.m.



interaksi kuat

Interaksi NN berupa pertukaran pion antar NN:



Catatan: Muon hanya ada dua jenis, yaitu μ^+ dan μ^- . Dari sini juga jelas bahwa muon tidak dapat menjelaskan interaksi NN.

Bentuk interaksi e.m. dan juga gravitasi sederhana, yaitu:

$$\text{potensial : } V \propto \frac{1}{r} \qquad \text{gaya : } F \propto \frac{1}{r^2}$$

Namun, bentuk interaksi kuat sampai sekarang masih belum diketahui. Salah satu penyebabnya yaitu, kebergantungan interaksi kuat pada spin sangat rumit.

Sampai sekarang yang dihasilkan hanya model-model interaksi NN. Model-model ini memiliki parameter yang nilainya ditentukan melalui suatu pencocokan (fitting) terhadap data eksperimen. Model-model yang mutakhir berfungsi sangat baik dan dapat dipakai sebagai input untuk perhitungan nuklir, seperti perhitungan hamburan nuklir.

Model-model interaksi NN dapat dibagi 2:

- **berdasarkan teori meson**: model ini mengikuti ide Yukawa, contoh **OBEP** (one boson exchange potential), **TPEP** (two pion exchange potential),
- **fenomenologis**


Pengembangan model yang berdasarkan teori meson, dalam rangka mendapatkan bentuk interaksi nuklir yang sebenarnya, meski mengalami kemajuan namun juga berjalan alot, karena adanya kesulitan dalam perhitungan.

Di tengah pengembangan model yang berdasarkan teori meson, model fenomenologis muncul sebagai sebuah ide yang bertujuan lebih praktis yaitu, sekedar menghasilkan suatu model interaksi NN agar bisa dijadikan input bagi perhitungan nuklir. Juga, jika sebuah model fenomenologis yang baik sudah didapat (baik berarti bisa mereproduksi banyak data eksperimen), maka perhitungan dengan model fenomenologis ini dapat dipakai sebagai pengganti data yang ekonomis untuk memeriksa model yang berdasarkan teori meson.

Model fenomenologis mula dikembangkan di tahun 1950-an, cukup lama setelah mulai dikembangkannya model yang berdasarkan teori meson.

Potensial NN fenomenologis memiliki paling tidak 5 komponen / suku penting:

- central
- spin-spin: $\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2$
- tensor: $S_{12} = 3(\vec{\sigma}_1 \cdot \hat{r})(\vec{\sigma}_2 \cdot \hat{r}) - \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2$
- spin-orbit: $\vec{S} \cdot \vec{L}$
- spin-orbit kuadratik: $(\vec{S} \cdot \vec{L})^2$



$$V(\vec{r}) = V_c(r) + V_s(r)\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2 + V_t(r)S_{12} \\ + V_{ls}(r)\vec{S} \cdot \vec{L} + V_{ls2}(r)(\vec{S} \cdot \vec{L})^2$$

Model interaksi NN yang berdasarkan teori meson diturunkan dalam ruang momentum. Model interaksi fenomenologis diturunkan dalam ruang konfigurasi (koordinat) dan memiliki parameter yang jauh lebih banyak (30 - 50 buah) dari parameter model interaksi yang berdasarkan teori meson.

Dengan transformasi Fourier, ekspresi model-model itu dalam ruang lain dapat dicari. Dengan cara ini dapat dilihat juga bahwa komponen-komponen penting model fenomenologis yang ditunjukkan pada halaman sebelum ini juga terkandung dalam model yang berdasarkan teori meson.

Sifat empiris interaksi NN:

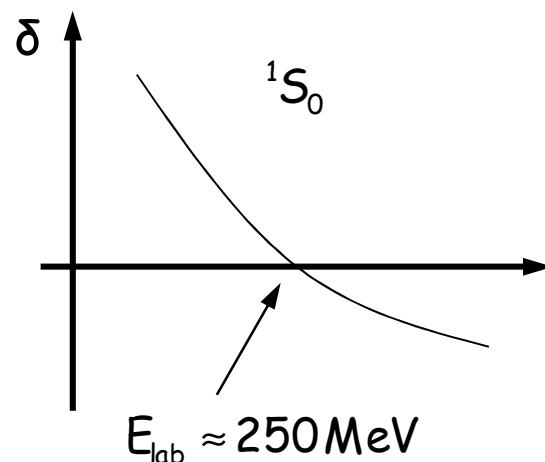
1. berjangkauan pendek

- interaksi NN tidak tampak pada tingkat molekul
- fraksi ikat / energi ikat rata-rata per nukleon relatif konstan (kecuali untuk nomor massa besar dan kecil), berarti interaksi NN memiliki titik jenuh terhadap nomor massa, nukleon hanya berinteraksi dengan nukleon di sekitarnya

2. atraktif mulai jarak tertentu

Inti tidak pecah, berarti interaksi NN saling tarik (atraktif).

3. repulsif pada jarak sangat kecil



Pada analisis phase shift δ (pergeseran fase) untuk hamburan NN didapatkan nilai phase shift yang negatif untuk keadaan 1S_0 (sesuai notasi $^{2S+1}L_J$ berarti total spin NN = 0, $L = 0$, $J = 0$) mulai energi proyektil pada kerangka laboratorium $\approx 250 \text{ MeV}$. Phase shift negatif menunjukkan interaksi saling tolak (repulsif) dan energi proyektil yang lebih tinggi berkenaan dengan jarak interaksi yang lebih kecil.

4. mengandung suku tensor

Deuteron dapat dijelaskan hanya jika komponen tensor disertakan.

5. mengandung suku spin-orbit

Pada hamburan NN, proyektil yang spinnya tidak terpolarisasi (unpolarized) menjadi terpolarisasi pada arah tegak lurus bidang hamburan ketika terhambur. Polarisasi ini menunjukkan interaksi NN memiliki komponen spin-orbit.

Faktor-faktor lain yang ada pada interaksi NN:

- spin-spin
- isospin: Tidak sama interaksi antara nn (atau pp) dan np (charge independent breaking). Juga, tidak sama interaksi antara nn dan pp (charge symmetry breaking).

Hamburan Nukleon-Nukleon & Deuteron

Model-model interaksi NN perlu diuji. Antara lain (yang utama) yaitu, pada hamburan NN dan deuteron.

Model interaksi NN yang baik harus dapat menghasilkan energi ikat deuteron, yang dalam eksperimen diperoleh sebesar kurang lebih 2,224 MeV.

Energi ikat deuteron diperoleh dengan menyelesaikan persamaan deuteron (persamaan Schrödinger untuk deuteron):

$$(H_0 + V_{NN} - E_d)|\Psi_d\rangle = 0$$

H_0 = hamiltonian bebas (operator energi kinetik), V_{NN} = interaksi NN,
 E_d = energi ikat deuteron, $|\Psi_d\rangle$ = keadaan deuteron)

Deuteron merupakan satu-satunya sistem NN (netron dan proton) terikat. Dilihat dari energi ikatnya yang kecil, ikatan deuteron termasuk lemah. Deuteron memiliki total spin $S = 1$, total angular momentum $J = 1$, total isospin $T = 0$ dan paritas genap.

Pada hamburan NN terdapat lebih banyak besaran yang dapat dipakai untuk menguji model-model interaksi NN, yaitu penampang lintang dan besaran-besaran spin, seperti polarisasi.

Reaksi pada suatu hamburan dapat ditulis sebagai $A(B,C)D$, yang berarti proyektil B datang ke target A , kemudian partikel C (secara umum bisa lebih dari 1) terhambur dideteksi, sementara partikel D (secara umum bisa lebih dari 1) tidak dideteksi.

Tujuh contoh reaksi dalam hamburan NN yaitu:

$N_2(N_1, N_1)N_2$ Nukleon 1 datang ke nukleon 2, kemudian nukleon 1 dideteksi. Sebelum hamburan spin nukleon 1 dan 2 tidak terpolarisasi, setelah hamburan polarisasi spin nukleon 1 dan 2 tidak diukur. Besaran yang diukur penampang lintang differensial yang dirata-ratakan terhadap keadaan spin yang mungkin.

$N_2(N_1, \vec{N}_1)N_2$ Nukleon 1 datang ke nukleon 2, kemudian nukleon 1 dideteksi. Sebelum hamburan spin nukleon 1 dan 2 tidak terpolarisasi, setelah hamburan polarisasi spin nukleon 1 diukur. Besaran yang diukur polarisasi. Reaksi ini menunjukkan bahwa interaksi NN dapat menyebabkan spin menjadi terpolarisasi.

$N_2(\vec{N}_1, N_1)N_2$ Nukleon 1 datang ke nukleon 2, kemudian nukleon 1 dideteksi. Sebelum hamburan spin nukleon 1 terpolarisasi, setelah hamburan polarisasi spin nukleon 1 dan 2 tidak diukur. Besaran yang diukur vektor analyzing power. Reaksi ini menunjukkan sifat asimetri hamburan NN, bahwa tidaklah sama besar penampang lintang untuk hamburan ke arah kiri ($\varphi = 0$) dan kanan ($\varphi = \pi$), untuk besar sudut hambur θ yang sama.

$N_2(\vec{N}_1, \vec{N}_1)N_2$ Nukleon 1 datang ke nukleon 2, kemudian nukleon 1 dideteksi. Sebelum hamburan spin nukleon 1 terpolarisasi, setelah hamburan polarisasi spin nukleon 1 diukur. Besaran yang diukur tensor depolarisasi. Reaksi ini untuk meneliti perubahan keadaan spin nukleon 1 akibat interaksi NN.

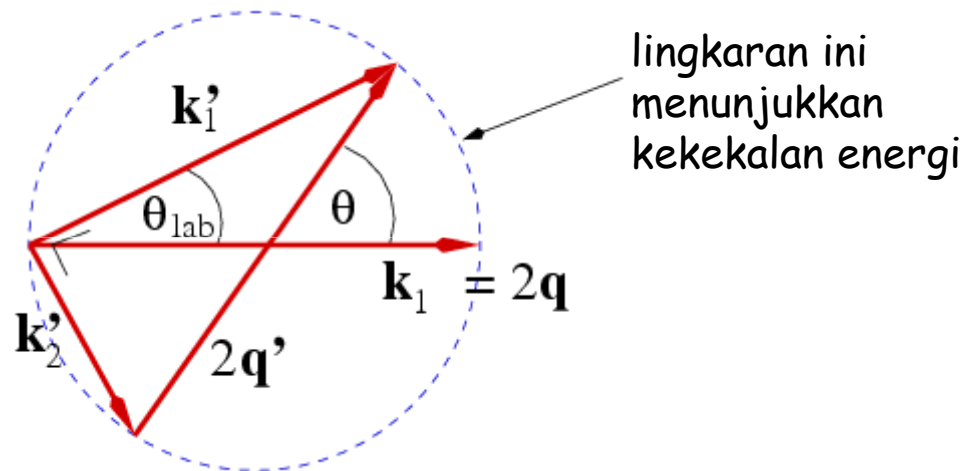
$N_2(\vec{N}_1, N_1)\vec{N}_2$ Nukleon 1 datang ke nukleon 2, kemudian nukleon 1 dideteksi. Sebelum hamburan spin nukleon 1 terpolarisasi, setelah hamburan polarisasi spin nukleon 2 diukur. Besaran yang diukur tensor transfer polarisasi. Reaksi ini untuk meneliti polarisasi spin nukleon 2 akibat berinteraksi dengan nukleon 1 yang memiliki polarisasi spin tertentu. Jika kedua nukleon sama, misal keduanya proton atau keduanya neutron, maka reaksi ini identik dengan reaksi sebelumnya, sehingga tensor transfer polarisasi sama dengan tensor depolarisasi.

$N_2(\vec{N}_1, \vec{N}_1)\vec{N}_2$ Nukleon 1 datang ke nukleon 2, kemudian nukleon 1 dideteksi. Sebelum hamburan spin nukleon 1 dan 2 tidak terpolarisasi, setelah hamburan polarisasi spin nukleon 1 dan 2 diukur. Besaran yang diukur parameter korelasi spin. Reaksi ini untuk meneliti polarisasi spin nukleon 1 dan 2 untuk segala arah polarisasi yang mungkin, baik keduanya menunjukkan arah polarisasi yang sama maupun tidak.

$\vec{N}_2(\vec{N}_1, N_1)N_2$ Nukleon 1 datang ke nukleon 2, kemudian nukleon 1 dideteksi. Sebelum hamburan spin nukleon 1 dan 2 terpolarisasi, setelah hamburan polarisasi spin nukleon 1 dan 2 tidak diukur. Besaran yang diukur tensor analyzing power. Pada reaksi ini dicari penampang lintang hamburan untuk berbagai polarisasi spin proyektil dan target yang mungkin.

Dengan macam-macam pengukuran polarisasi spin seperti di atas orang dapat mengetahui kebergantungan interaksi NN pada spin.

Kinematika hamburan NN dapat disampaikan dalam satu gambar, yang menunjukkan besaran-besaran kinematika dalam kerangka laboratorium (lab) maupun kerangka pusat massa (p.m.), serta hubungan antar keduanya.



k_i, k'_i = momentum awal, akhir di lab ($i=1,2$)

q, q' = momentum awal, akhir di p.m.

θ, θ_{lab} = sudut hambur di p.m., lab

Gambar itu menunjukkan:

$k_2 = 0$ (target diam)

$k_1 = k'_1 + k'_2$ (momentum kekal)

$q' = \frac{1}{2}(k'_1 - k'_2)$, $q = \frac{1}{2}k_1$

$k'_1 \perp k'_2$

$\theta = 2\theta_{lab}$

Mengingat energi (kinetik) sebanding dengan kuadrat momentum, maka lingkaran putus-putus pada gambar itu menunjukkan kekekalan energi dalam proses hamburan NN.

Fisika Partikel

Segala proses yang terjadi di alam dipicu oleh 4 interaksi fundamental, mulai dari yang kekuatannya paling kecil yaitu:

- interaksi gravitasi
- interaksi elektromagnetik
- interaksi lemah
- interaksi kuat

Interaksi gravitasi dan elektromagnetik berjangkauan tak berhingga, sementara interaksi lemah $\sim 10^{-4}$ fm dan interaksi kuat ~ 1 fm.

Tiap-tiap interaksi itu memiliki pembawa atau carrier (ingat penggambaran Yukawa tentang interaksi kuat) yaitu:

- interaksi gravitasi: **graviton** (massa = 0, muatan = 0, spin = 2)
- interaksi elektromagnetik: **foton** (massa = 0, muatan = 0, spin = 1)
- interaksi lemah: **partikel Z** (massa = 91 massa proton, muatan = 0, spin = 1) dan **partikel W^\pm** (massa 82 massa proton, muatan = $\pm e$, spin = 1)
- interaksi kuat: **gluon** (massa = 0, muatan = 0, spin = 1) ($e = \text{muatan elementer}$)

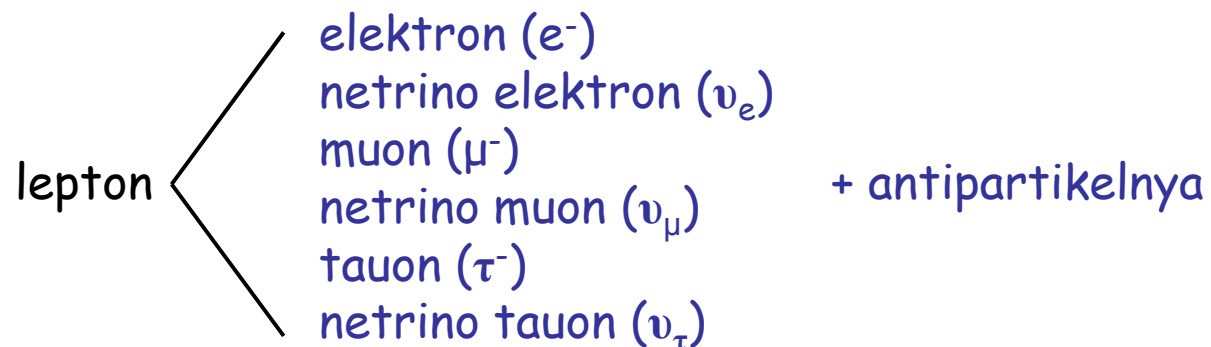
Berdasarkan interaksi kuat, partikel digolongkan menjadi **lepton** dan **hadron**.

- **lepton**: partikel yang tidak berinteraksi kuat, contoh: elektron, neutrino
- **hadron**: partikel yang dapat berinteraksi kuat, contoh: nukleon

Hadron dapat dibagi lagi berdasarkan perilaku statistiknya (fermion atau boson) yaitu, **meson** dan **barion**.

- **meson**: hadron yang berspin bulat (boson), contoh: pion (π), kaon (K)
- **barion**: hadron yang berspin kelipatan ganjil dari setengah (fermion),
contoh: nukleon, partikel lambda (Λ), sigma (Σ), omega (Ω)

Lepton merupakan fermion, semuanya berspin setengah, jumlahnya 12.



Antipartikel
memiliki
massa, spin
sama dengan
massa, spin
partikelnya,
tapi muatan
berlawanan.

Catatan: $m_\mu = 200 m_e$, $m_\tau = 3600 m_e$, m_ν sangat kecil
(bisa diabaikan), neutrino berarti si kecil netral

Suatu reaksi dapat terjadi jika memenuhi **hukum kekekalan energi, momentum** dan **muatan**. Contoh:

$n + e^- \rightarrow p + \pi^0$ tidak terjadi, antara lain karena muatan berubah

$e^- + p \rightarrow n + \nu_e$ dapat terjadi

Selain tiga hukum kekekalan di atas, suatu reaksi juga harus memenuhi hukum kekekalan **bilangan lepton**. Bilangan lepton ada 3: **bilangan lepton elektron (b.l.e.)**, **bilangan lepton muon (b.l.m.)**, **bilangan lepton tauon (b.l.t.)**.

$$\text{b.l.e. } e^- = 1 \quad \text{b.l.e. } e^+ = -1 \quad \text{b.l.e. } \nu_e = 1 \quad \text{b.l.e. } \bar{\nu}_e = -1$$

$$\text{b.l.m. } \mu^- = 1 \quad \text{b.l.m. } \mu^+ = -1 \quad \text{b.l.m. } \nu_\mu = 1 \quad \text{b.l.m. } \bar{\nu}_\mu = -1$$

$$\text{b.l.t. } \tau^- = 1 \quad \text{b.l.t. } \tau^+ = -1 \quad \text{b.l.t. } \nu_\tau = 1 \quad \text{b.l.t. } \bar{\nu}_\tau = -1$$

untuk yang lain b.l.e.,
b.l.m., b.l.t. = 0

Contoh reaksi terjadi dan tidak terjadi karena bilangan lepton:

$\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$ tidak terjadi

$\mu^- + p \rightarrow n + \nu_e$ tidak terjadi

$n + \nu_e \rightarrow p + e^-$ dapat terjadi

$n + e^+ \rightarrow p + \bar{\nu}_e$ dapat terjadi

$n + e^+ \rightarrow p + \bar{\nu}_\tau$ tidak terjadi

Catatan: neutrino hanya dapat berinteraksi lemah, karena itu setiap reaksi yang melibatkan neutrino pasti terjadi melalui interaksi lemah.

Reaksi juga harus memenuhi hukum kekekalan **bilangan barion**. Semua barion memiliki bilangan barion bernilai 1, semua yang bukan barion memiliki bilangan barion bernilai 0.

Contoh reaksi terjadi dan tidak terjadi karena bilangan barion:

$$n \rightarrow \pi^+ + \pi^- \quad \text{tidak terjadi}$$

$$\pi^- + p \rightarrow K^+ + \Sigma^- \quad \text{dapat terjadi}$$

$$\pi^- + p \rightarrow \Lambda + \bar{\Sigma}^0 \quad \text{tidak terjadi}$$

Kecuali reaksi yang berlangsung melalui interaksi lemah, suatu reaksi juga harus memenuhi hukum kekekalan **strangeness**. Nilai strangeness berkenaan dengan quark strange sebagai penyusun partikel. Contoh: pion, proton dan neutron memiliki strangeness 0, lambda dan sigma memiliki strangeness -1. Antipartikel memiliki strangeness yang berlawanan tanda.

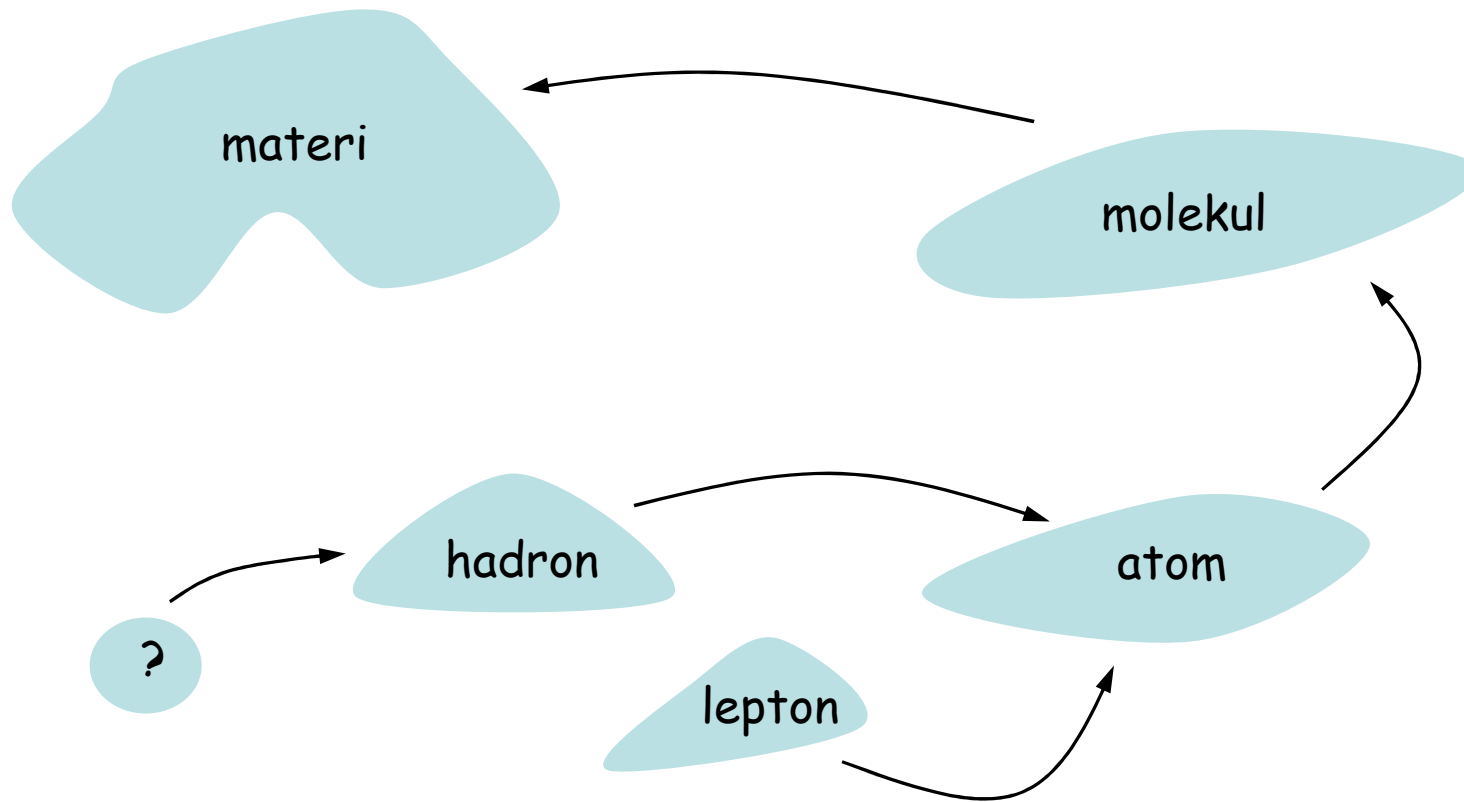
Contoh reaksi terjadi dan tidak terjadi karena strangeness:

$$\pi^- + p \rightarrow n + \pi^0 \quad \text{dapat terjadi}$$

$$\pi^0 + p \rightarrow \Lambda + \pi^+ \quad \text{tidak terjadi}$$

Model Quark Awal

Fisikawan mencari partikel dasar (fundamental) penyusun semua materi di alam. Lepton dianggap sebagai partikel fundamental, sementara hadron bukan. Tapi hadron tidak tersusun dari lepton, jadi masih ada lagi partikel fundamental selain lepton, yang menjadi penyusun hadron.



Gell-Mann dan Zweig (1964) mengusulkan bahwa hadron tersusun dari **quark**: barion tersusun dari 3 quark, sedangkan meson tersusun dari quark dan antiquark. Terdapat tiga 'rasa' (flavour) quark yaitu, **up**, **down** dan **strange**. Semua quark berspin 1/2. Antiquark memiliki muatan dan strangeness yang berlawanan tanda.

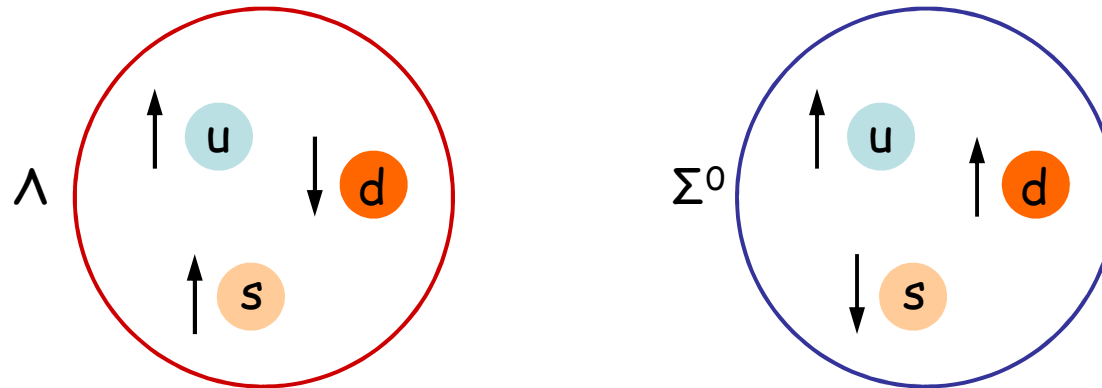
nama	simbol	muatan	strangeness
up	u	$2/3e$	0
down	d	$-1/3e$	0
strange	s	$-1/3e$	-1

Contoh:	barion	quark	strangeness s	meson	quark	strangeness s
	p, Δ^+	uud	0	π^0, η^0	$u\bar{u}$	0
	n, Δ^0	udd	0	π^-	$\bar{u}d$	0
	Δ^{++}	uuu	0	π^+	$u\bar{d}$	0
	Δ^-	ddd	0	K^+	$u\bar{s}$	1
	Σ^+	uus	-1	K^-	$\bar{u}s$	-1
	Λ, Σ^0	uds	-1	K^0	$d\bar{s}$	1
	Σ^-	dds	-1	\bar{K}^0	$\bar{d}s$	-1
	Ξ^0	uss	-2			
	Ξ^-	dss	-2			
	Ω^-	sss	-3			

sesuai dengan eksperimen

Tiga hal:

1. Terlihat bahwa kombinasi quark yang sama dapat membentuk beberapa partikel berbeda. Bagaimana mungkin? Ini mungkin karena keadaan spin sistem susunan quark itu bisa berlain-lainan; keadaan spin yang berbeda menghasilkan partikel yang berbeda. Contoh, partikel Λ dan Σ^0 yang keduanya disusun dari quark u , d dan s . Keadaan spin pada Σ^0 memiliki energi lebih tinggi dari keadaan spin pada Λ , sehingga massa Σ^0 lebih besar dari massa Λ .

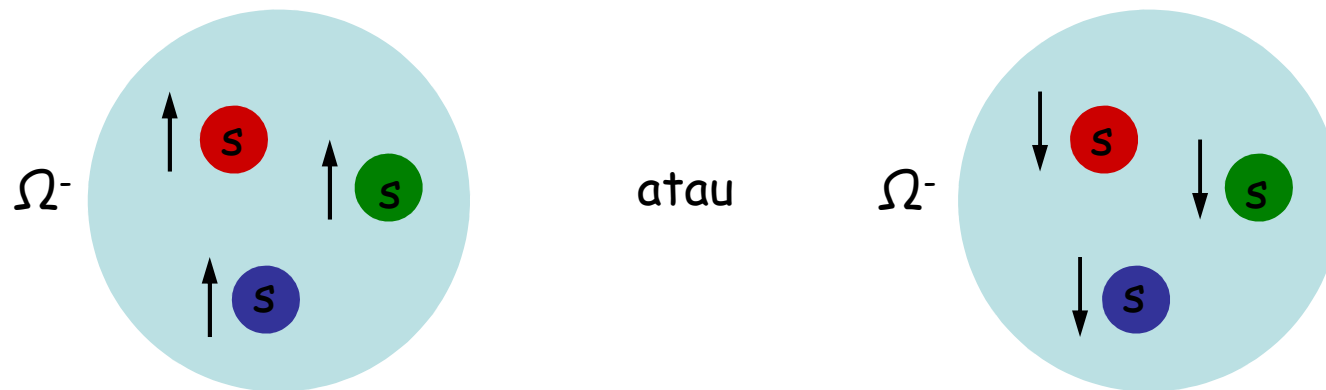


2. Antipartikel dari partikel netral memiliki muatan yang juga nol. Bagaimana membedakan keduanya? Antipartikel tersusun dari antiquark, sehingga distribusi muatan di dalamnya serta strangenessnya berbeda dari yang dimiliki partikel pasangannya. Contoh, neutron dan \bar{n} , K^0 dan \bar{K}^0 .

$$n : \text{quark} = udd, \quad \text{muatan} = \frac{2}{3}, -\frac{1}{3}, -\frac{1}{3} \quad \bar{n} : \text{quark} = \bar{u}\bar{d}\bar{d}, \quad \text{muatan} = -\frac{2}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}$$

$$K^0 : \text{quark} = d\bar{s}, \quad \text{strangeness } s = 1 \quad \bar{K}^0 : \text{quark} = \bar{d}s, \quad \text{strangeness } s = -1$$

3. Partikel Ω^- , yang tersusun dari 3 quark s, memiliki spin $3/2$. Ini berarti semua quark s memiliki arah spin sama, semua 'up' atau semua 'down'. Apakah ini tidak melanggar larangan Pauli, bahwa fermion identik tidak boleh menempati keadaan yang sama? Dari sini muncul ide bahwa tiap quark hadir dalam tiga 'warna' (color) yaitu, merah, hijau, biru. Jadi, quark dapat dibedakan dari rasa dan warnanya. Untuk Ω^- ketiga quark s itu memiliki warna yang berbeda. Jadi tidak melanggar larangan Pauli.



Alat teori yang digunakan untuk mengkaji quark yaitu Quantum Chromodynamics (QCD).

Model Quark dan Lepton Menurut 'The Standard Model'

Model quark awal masih belum cukup untuk menjelaskan semua partikel. Kemudian dikembangkan **model standar** fisika partikel, yang menjadikan quark dan lepton sebagai partikel fundamental.

berdasarkan penemuan sebelum 1974:

quark:	u	d	?	s
lepton:	ν_e	e^-	ν_μ	μ^-

—————→ dicari quark baru

1974: quark **charm** (c) ditemukan dengan muatan $2/3e$:

quark:	u	d		c	s
lepton:	ν_e	e^-		ν_μ	μ^-
partikel fundamental generasi 1				partikel fundamental generasi 2	

Quark c memiliki
bilangan charm 1,
quark yang lainnya 0.

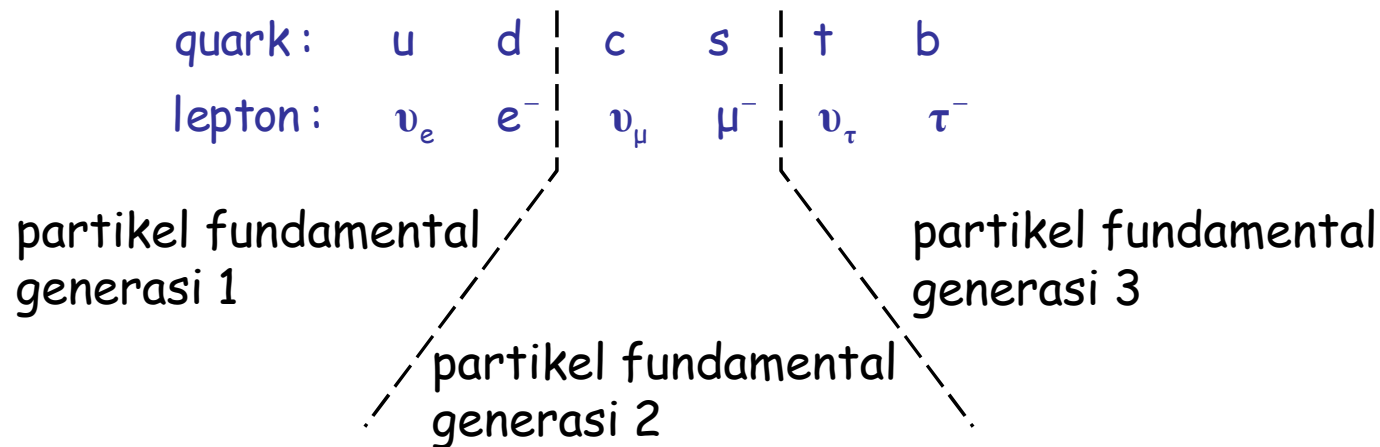
1975: lepton tauon (τ) ditemukan, kemudian juga neutrino tauon (ν_τ):

quark:	u	d	c	s	?	?
lepton:	ν_e	e^-	ν_μ	μ^-	ν_τ	τ^-

→ dicari 2 quark baru

Diajukan (diprediksi) 2 quark **top** atau **truth** (t) dan **bottom** atau **beauty** (b). Keduanya terbukti ditemukan dalam eksperimen. Quark b ditemukan di akhir dekade 70-an, muatannya $-1/3e$. Quark t ditemukan 1995, muatannya $2/3e$.

1995: partikel fundamental menurut model standar fisika partikel:



Quark t memiliki bilangan topness 1, quark yang lainnya 0.

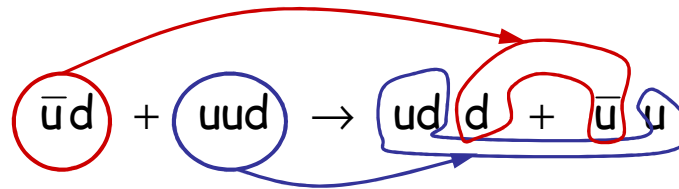
Quark b memiliki bilangan beauty -1, quark yang lainnya 0.

Interaksi Kuat dan Interaksi Lemah Menurut Quark

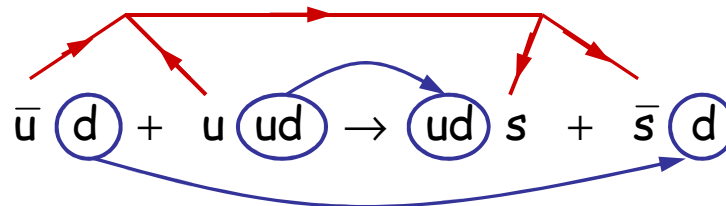
Interaksi kuat mengakibatkan:

- perubahan susunan quark yang terlibat dalam reaksi,
- penciptaan quark-antiquark.

Contoh: 1. $\pi^- + p \rightarrow n + \pi^0$
 $(\bar{u}d) \quad (uud) \quad (udd) \quad (\bar{u}u)$

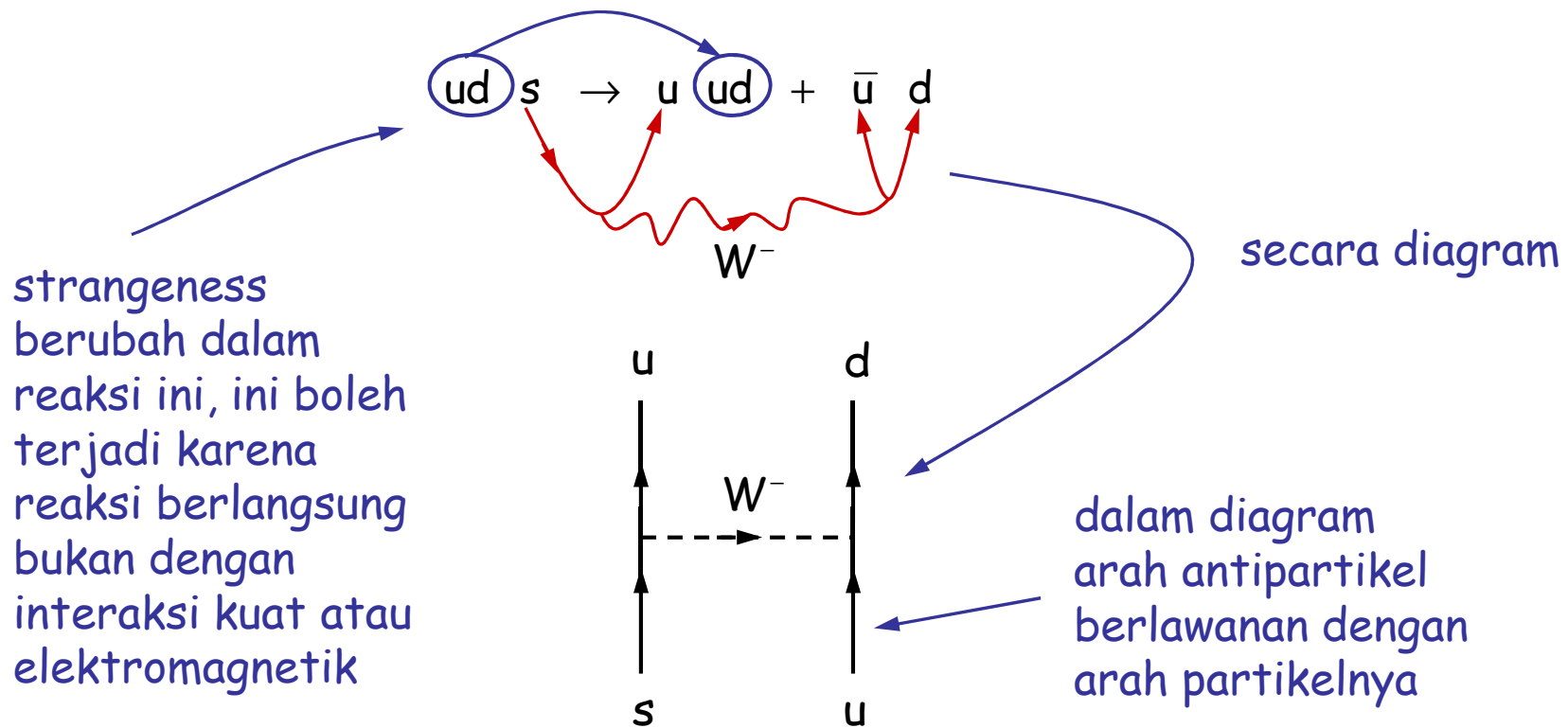
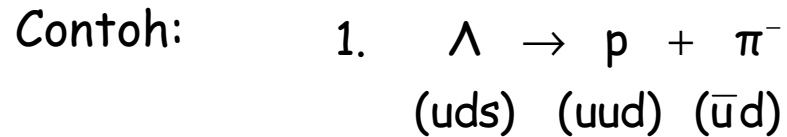


2. $\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0$
 $(\bar{u}d) \quad (uud) \quad (uds) \quad (\bar{s}d)$



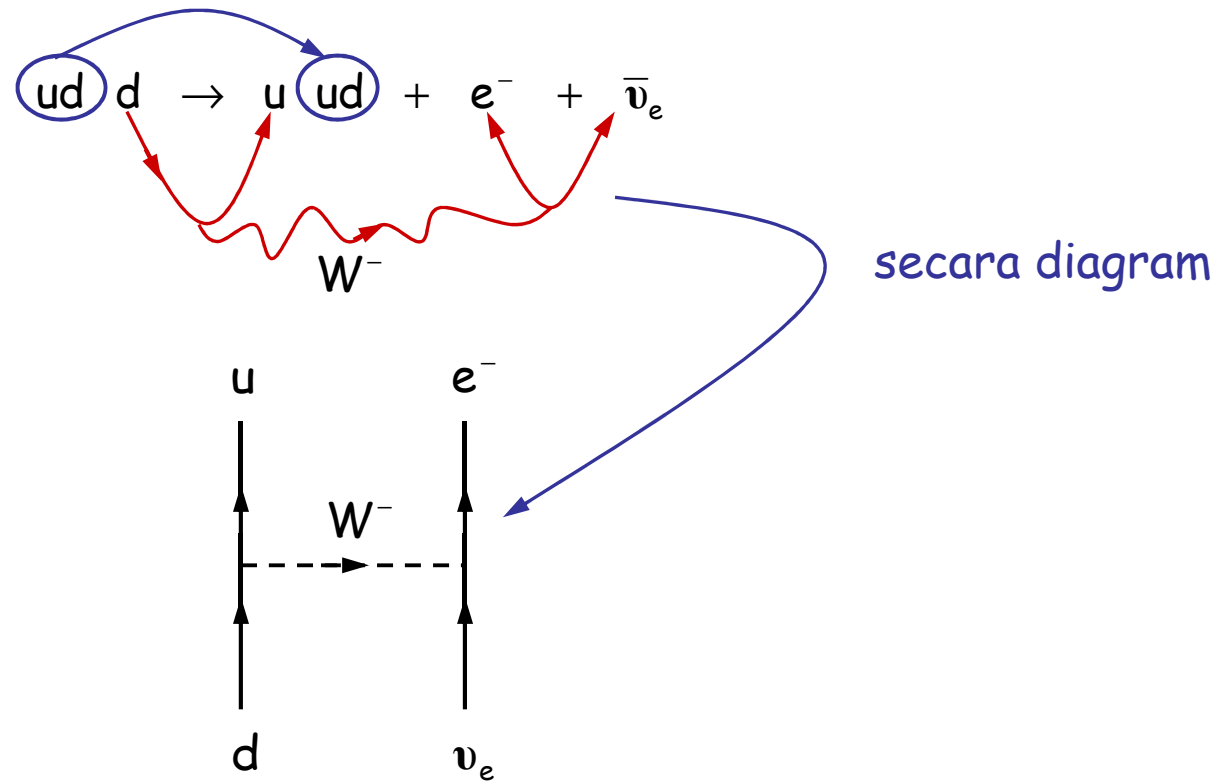
Interaksi lemah mengakibatkan:

- perubahan 'rasa' quark yang terlibat dalam reaksi.



$$2. \quad n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

(udd) (uud)



Astrofisika Nuklir

Obyek dalam astrofisika nuklir yaitu, produksi energi dan penciptaan unsur-unsur di alam (**nukleosintesis**) yang berlangsung di bintang.

Berdasarkan proses pembentukannya terdapat dua jenis bintang yaitu, **bintang generasi pertama** dan **bintang generasi kedua**.

Bintang Generasi Pertama

Bintang generasi pertama terbentuk akibat **keruntuhan gravitasi** (**gravitational collapse**) awan hidrogen dan helium-4. Akibat tarikan gravitasi maka ukuran atau radius awan tersebut mengecil. Mengecilnya ukuran awan itu mengakibatkan energi potensial gravitasi berkurang dan energi kinetik atom-atomnya meningkat, karena energi tetap. Kenaikan energi kinetik menyebabkan kenaikan temperatur awan itu. Suhu (energi kinetik) yang tinggi memungkinkan terjadinya reaksi fusi hidrogen menjadi helium-4, yang akhirnya menghasilkan energi. Reaksi itu menimbulkan tekanan yang melawan tarikan gravitasi. Jika massa awan itu melampaui suatu massa kritis, tekanan yang dihasilkan mampu mengimbangi tarikan gravitasi, maka jadilah awan itu sebuah bintang. Melalui reaksi yang menghasilkan energi itu tercipta juga unsur-unsur yang ditemui di alam, dengan $A \leq 60$.

Massa bintang menentukan temperatur T di dalamnya dan juga energi serta unsur yang diproduksinya.

suhu	contoh	produksi partikel
$10^7 \text{ K} \leq T \leq 5 \times 10^7 \text{ K}$	matahari	He^4
$10^8 \text{ K} \leq T \leq 2 \times 10^8 \text{ K}$	bintang raksasa merah	$\text{C}^{12}, \text{O}^{16}, \text{Ne}^{20}$
$T \leq 10^9 \text{ K}$		$\text{Mg}^{24}, \text{Si}^{28}, \text{S}^{32}, \text{Ar}^{36}, \text{Ca}^{40}$
$2 \times 10^9 \text{ K} \leq T \leq 5 \times 10^9 \text{ K}$		sampai Fe^{56}

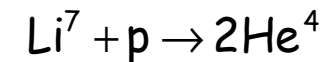
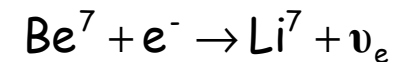
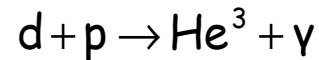
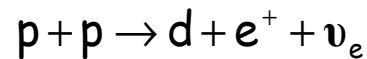
Untuk temperatur yang lebih tinggi tidak lagi terjadi nukleosintesis, karena setelah itu ($A \approx 60$) energi ikat rata-rata per nukleon (atau fraksi ikat) mengecil (ingat grafik fraksi ikat terhadap nomor massa).

Unsur-unsur yang tercipta di bintang itu disebar ke jagad raya melalui emisi yang lambat maupun emisi yang cepat akibat ledakan **supernova**.

Produksi energi dan nukleosintesis:

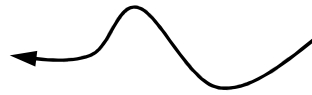
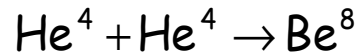
Pada pembentukan bintang, ketika tercapai suhu kurang lebih 10^7 K mulai terjadi reaksi fusi atom hidrogen menjadi helium-4. Proses ini disebut **siklus proton**.

siklus proton:



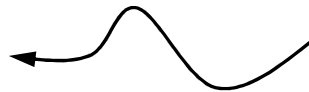
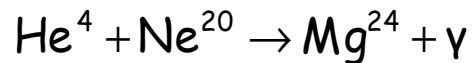
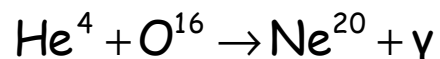
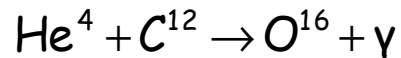
Setelah pada siklus proton itu atom H habis terbakar (terkonsumsi), maka tarikan gravitasi tidak lagi terimbangi, terjadi keruntuhan gravitasi, bintang mengecil, energi kinetik atom-atom meningkat, suhu meningkat sampai 10^8 K. Pada suhu ini mulai terjadi reaksi fusi atom helium-4. Reaksi ini meningkatkan tekanan sehingga ukuran bintang membesar. Bintang menjadi yang disebut si raksasa merah.

Proses pembakaran (konsumsi) helium-4:



Kedua reaksi harus seimbang, karena Be^8 juga meluruh menjadi He^4 . Reaksi yang pertama memerlukan energi (**endoterm**), namun yang kedua mengeluarkan energi (**eksoterm**).

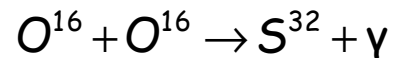
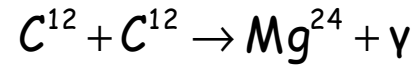
Reaksi berikutnya yang terjadi:



semuanya eksoterm

Setelah atom helium-4 habis terbakar, maka terjadi lagi keruntuhan gravitasi, suhu meningkat sampai 10^9 K. Pada suhu ini mulai terjadi reaksi fusi atom karbon-12 dan oksigen-16. Reaksi ini meningkatkan tekanan sehingga ukuran bintang membesar.

Contoh proses pembakaran karbon-12 dan oksigen-16:



Setelah karbon-12 dan oksigen-16 habis terbakar, maka terjadi lagi keruntuhan gravitasi, suhu meningkat sampai 5×10^9 K, reaksi fusi atom-atom yang lebih berat terjadi, sampai tercipta unsur dengan nomor massa kurang lebih 60.

Bergantung pada massa awalnya, tidak semua bintang menjalani semua siklus reaksi fusi di atas, dari mulai memproduksi helium-4 hasil reaksi fusi proton sampai memproduksi atom dengan $A \approx 60$. Bisa saja bintang itu kehabisan bahan bakar sebelum sampai pada siklus terakhir ($T \approx 5 \times 10^9$ K memproduksi unsur dengan $A \approx 60$).

Bintang yang lebih besar akan menjalani siklus reaksi fusi lebih cepat dari bintang yang lebih kecil, karena gravitasi yang lebih kuat dan temperatur yang lebih tinggi membuat proses pembakaran berlangsung lebih cepat.

Apa yang terjadi jika sebuah bintang kehabisan bahan bakar, baik sebelum maupun setelah mencapai siklus reaksi fusi terakhir?

Evolusi sebuah bintang:

Telah ditunjukkan tahap-tahap perjalanan bintang dari awal pembentukannya, kemudian menjalani siklus reaksi fusi dan sampai pada tahap produksi unsur dengan $A \approx 60$. Dalam perjalanan itu, bergantung pada sampai tahap mana bintang itu hidup, tercipta lapisan-lapisan pada bintang: lapisan terluar terdiri dari atom-atom hidrogen, berikutnya helium, oksigen, karbon, lalu silikon dan sulfur, terakhir di lapisan paling (inti) dalam besi. Kini disampaikan yang terjadi apabila sebuah bintang kehabisan bahan bakar.

bintang kecil:

Ketika reaksi fusi berhenti karena kehabisan bahan bakar, inti besi belum terbentuk dan bagian terluar bintang terlepas melalui ledakan. Akibat larangan Pauli, elektron-elektron yang ada di bintang yang tersisa memberikan tekanan keluar yang menahan tarikan gravitasi. Maka bergantung pada massanya, dapat terbentuk **bintang kerdil yang pucat (white dwarf)**. Ada suatu besaran yang disebut **massa Chandrasekhar**, yang nilainya bergantung pada rasio elektron-nukleon; jika massa white dwarf kurang dari atau sama dengan massa Chandrasekhar, maka white dwarf itu stabil.

bintang besar (massanya \geq massa matahari ($\approx 2 \times 10^{30}$ kg)):

Ketika reaksi fusi berhenti, inti besi tetap terus terbentuk melalui reaksi di lapisan luar (terdiri dari silikon). Akibatnya, massa inti menjadi terlalu besar dan tarikan gravitasi lebih kuat dari tolakan elektron. Maka, bintang runtuh, suhu menjadi naik dan unsur besi terurai menjadi nukleon-nukleon. Nukleon menyerap energi elektron, sementara jumlah elektron juga berkurang karena ditangkap oleh proton, menghasilkan neutron. Akibatnya, tekanan keluar semakin turun, sehingga bintang terus runtuh dan kerapatan intinya tinggi. Akhirnya, inti bintang terdiri dari hanya neutron, yang mampu menahan pengerutan bintang (ada resistansi).

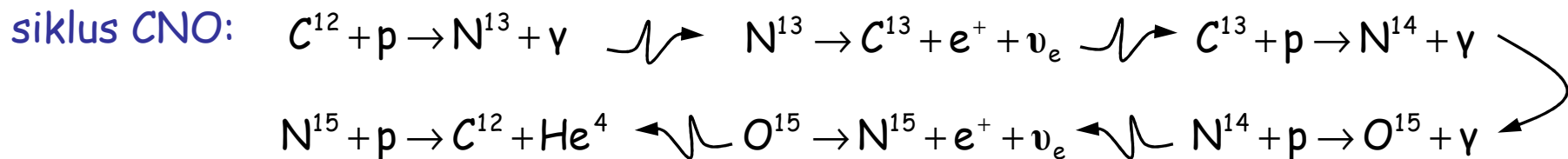
Resistansi terhadap pengerutan bintang ini menimbulkan gelombang kejut. Gelombang kejut merambat dari inti ke permukaan, memakan waktu beberapa hari, menimbulkan ledakan bagian luar bintang. Semua materi bintang, yang berada di luar radius tertentu (**bifurcation point**), terhambur lepas. Ledakan ini disebut supernova, yang menyebabkan kecerahan bintang itu melebihi kecerahan seluruh galaksi. Yang tersisa yaitu **bintang neutron**.

Jika massa awal bintang 20 kali massa matahari, maka bintang neutron terus runtuh dan menjadi **black hole**.

Bintang Generasi Kedua

Sisa-sisa bintang mati mengandung unsur-unsur berat. Dari sisa-sisa ini dapat terbentuk bintang baru, yang disebut bintang generasi kedua. Selain unsur-unsur berat, bintang generasi kedua juga terdiri dari atom-atom hidrogen dan helium-4.

Berbeda dari yang berlangsung di bintang generasi pertama, proses fusi empat proton menjadi helium-4 bukan melalui siklus proton, melainkan **siklus CNO**.



Perhatikan pada siklus CNO itu karbon-12 berperan sebagai katalisator, bahwa pada akhir reaksi karbon-12 didapatkan kembali.

Di bintang generasi kedua nukleosintesis melibatkan reaksi yang lebih kompleks. Proses yang dominan yaitu penangkapan neutron oleh inti-inti yang ada dan peluruhan beta. Di sini unsur-unsur yang lebih berat (sampai $A > 200$) dapat terbentuk.

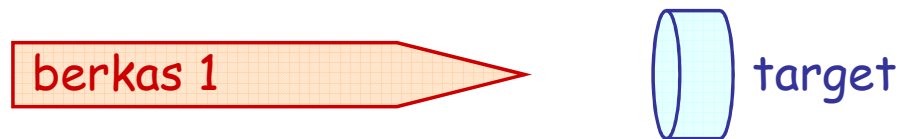
Akselerator dan Detektor

Pada bagian ini hanya akan disampaikan pengantar untuk topik akselerator dan detektor.

Tumbukan (Collision)

Ada 2 jenis tumbukan: - fixed target collision
- head on collision

fixed target collision: berkas proyektil diarahkan ke target yang diam



head on collision: dua berkas partikel diarahkan satu ke yang lain sehingga bertumbukan



Energi reaksi dalam kerangka pusat massa (p.m.):

fixed target collision:

Proyektil dan target membentuk satu sistem dengan energi total dalam kerangka laboratorium (lab) E_{lab} dan momentum total \mathbf{k}_{lab} :

$$\mathbf{k}_{\text{lab}} = \mathbf{k}_{1,\text{lab}} \quad (\text{target diam, } \mathbf{k}_{2,\text{lab}} = 0) \quad E_{\text{lab}} = E_{1,\text{lab}} + E_{2,\text{lab}} \\ = \left(m_1^2 c^4 + \mathbf{k}_{1,\text{lab}}^2 c^2 \right)^{\frac{1}{2}} + m_2 c^2$$

Dalam lab sistem ini punya massa M (disebut **massa invarian**), yang dalam p.m. merupakan energi total:

$$E_{\text{p.m.}}^2 = M^2 c^4 = E_{\text{lab}}^2 - \mathbf{k}_{\text{lab}}^2 c^2 = (m_1^2 + m_2^2) c^4 + 2 m_2 c^2 E_{1,\text{lab}}$$

Dapat dilihat hubungan energi total di p.m. terhadap energi proyektil di lab, bahwa $E_{\text{p.m.}}^2$ berubah secara linear terhadap $E_{1,\text{lab}}$.

head on collision:

Proyektil dan target membentuk satu sistem dengan energi total di lab E_{lab} dan momentum total k_{lab} :

$$k_{\text{lab}} = k_{1,\text{lab}} + k_{2,\text{lab}} \quad (\text{catatan : } k_{1,\text{lab}} \text{ dan } k_{2,\text{lab}} \text{ berlawanan arah})$$

$$E_{\text{lab}} = E_{1,\text{lab}} + E_{2,\text{lab}}$$

Energi total di p.m.:

$$E_{\text{p.m.}}^2 = M^2 c^4 = E_{\text{lab}}^2 - k_{\text{lab}}^2 c^2 = (m_1^2 + m_2^2) c^4 + 2E_{1,\text{lab}} E_{2,\text{lab}} + 2k_{1,\text{lab}} \cdot k_{2,\text{lab}}$$

Biasanya ditumbukkan berkas partikel dan antipartikelnya, maka:

$$m_1 = m_2 \quad E_{1,\text{lab}} = E_{2,\text{lab}} \quad k_{1,\text{lab}} = -k_{2,\text{lab}}$$

sehingga:

$$E_{\text{p.m.}} = E_{\text{lab}} = 2E_{1,\text{lab}} = 2E_{2,\text{lab}}$$

Jadi, $E_{\text{p.m.}}$ - bukan $E_{\text{p.m.}}^2$ - bergantung secara linear pada $E_{1,\text{lab}}$. Dengan begitu, pada head on collision tersedia energi reaksi yang lebih besar dari energi reaksi untuk fixed target collision. Head on collision dipakai untuk, contohnya mencari quark, karena diperlukan energi yang sangat besar untuk melepaskan quark dari suatu partikel.

Akselerator

Sesuai jenis tumbukan ada 2 jenis akselerator:

- fixed target accelerator
- colliding beam accelerator (disingkat **collider**)

Fixed target accelerator dapat dibagi dalam 2 jenis:

- electrostatic accelerator
- cyclic accelerator

Electrostatic accelerator menggunakan beda potensial konstan untuk mempercepat partikel. Cyclic accelerator menggunakan beda potensial yang berubah secara periodik untuk mempercepat partikel; partikel beberapa kali dipercepat oleh beda potensial yang berubah secara periodik.

Berdasarkan bentuk lintasan partikel yang dipercepat, cyclic accelerator dapat dibagi dua:

- linear accelerator (linac)
- circular accelerator

Pada circular accelerator partikel yang dipercepat menempuh lintasan tertutup; arah partikel dibelokkan oleh medan magnet.

Beberapa jenis circular accelerator:

- betatron
- cyclotron
- synchrocyclotron
- synchrotron

Detektor

Detektor diperlukan untuk mengetahui posisi, momentum, energi, jenis partikel yang datang / lewat. Contoh **bubble chamber**, **streamer chamber** dapat menunjukkan lintasan partikel dan dengan begitu juga jenis partikel. Detektor **proportional counter**, **drift chamber**, **semikonduktor** dapat menunjukkan posisi partikel. **Spektrometer massa** dapat dipakai untuk memilih partikel berdasarkan massanya, prinsip yang sama juga dapat dipakai untuk menentukan momentum partikel. **Kalorimeter elektromagnetik**, **kalorimeter hadron** dipakai untuk menentukan energi partikel.

Reaktor Nuklir

Dari grafik energi ikat rata-rata per nukleon atau fraksi ikat terhadap nomor massa dapat dilihat, bahwa jika inti-inti ringan bergabung (fusi) membentuk inti yang lebih berat, maka energi dilepaskan, karena fraksi ikat inti yang lebih berat itu lebih tinggi dari fraksi ikat inti-inti pembentuknya yang lebih ringan. Hal serupa berlaku jika inti berat pecah (fisi) menjadi inti-inti yang lebih ringan, energi juga dilepaskan. Dengan begitu, orang dapat menghasilkan energi dari reaksi inti.

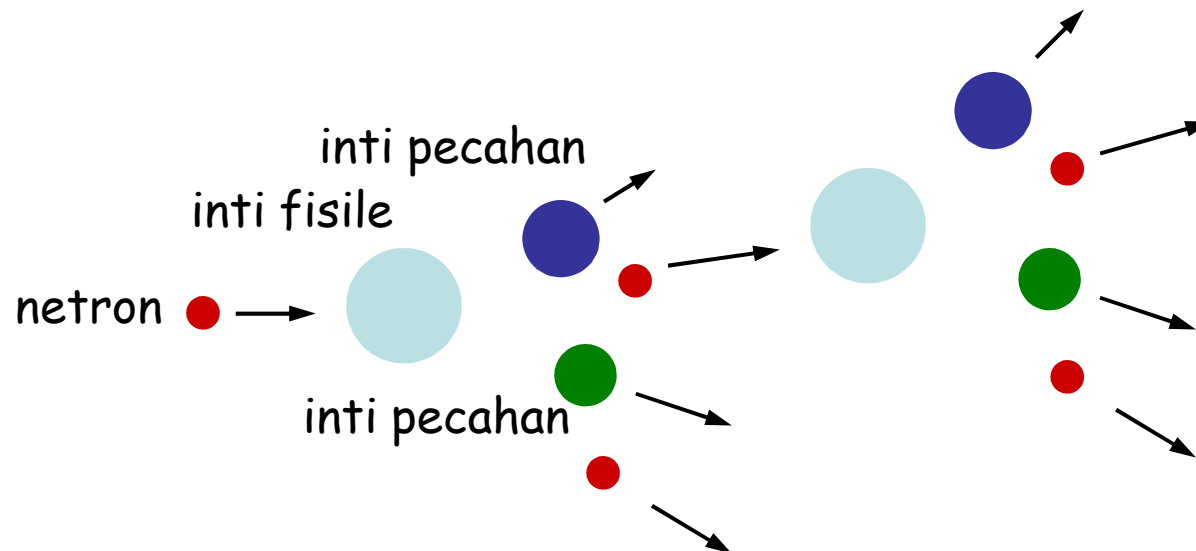
Reaksi fusi terjadi secara alamiah di bintang-bintang, tempat energi dan juga unsur-unsur dihasilkan. Di sana temperatur sangat tinggi, sehingga memungkinkan reaksi fusi terjadi (temperatur tinggi berarti energi kinetik tinggi, sehingga memperbesar peluang partikel-partikel untuk saling berdekatan melewati potensial penghalang Coulomb). Secara buatan reaksi fusi dengan begitu sulit dilakukan.

Reaksi fisi dapat dibuat dan ini dijadikan dasar penciptaan energi dalam reaktor nuklir. Reaktor nuklir pertama dibangun oleh Fermi 1942.

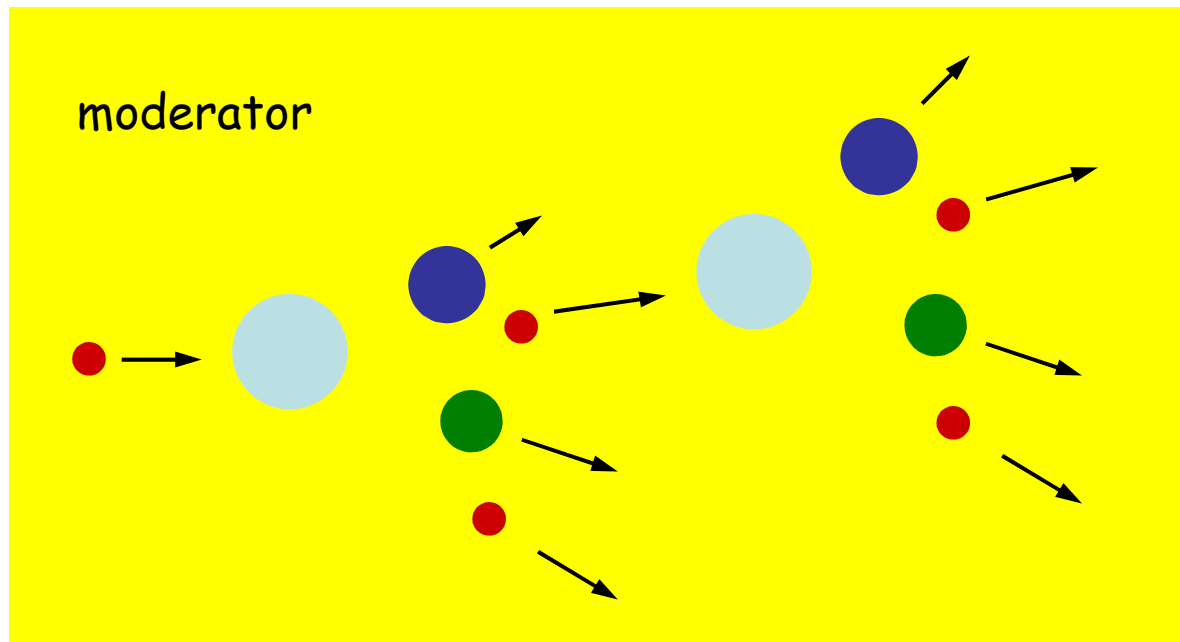
Reaktor nuklir dan bom nuklir sama-sama memanfaatkan reaksi berantai yang menghasilkan energi. Bedanya, dalam reaktor nuklir reaksi itu dikontrol sedangkan pada kasus bom nuklir reaksi itu tidak dikontrol.

Beberapa inti berat akan memecah diri (fisi) jika ditumbuk oleh neutron lambat (neutron thermal), yang energinya kurang lebih 0,025 eV. Inti-inti seperti ini disebut **inti fisile**, contohnya U^{235} , Pu^{239} . Ketika pecah inti-inti itu juga memancarkan neutron, yang kemudian menumbuk inti fisile lain, sehingga pecah, demikian seterusnya sehingga terjadi reaksi berantai.

Uranium terdapat di alam, dapat ditambang, karena itu dijadikan pilihan bahan bakar untuk reaktor nuklir. Sayangnya, dalam sejumlah bahan uranium hanya terdapat sedikit saja U^{235} (sekitar 0,72%), sisanya U^{238} . Berbeda dari U^{235} , U^{238} tidak bersifat fisile, melainkan menangkap neutron yang datang, sehingga justru mencegah reaksi fisi berantai. Namun meski U^{235} sedikit, tetap terdapat kemungkinan U^{235} ditemui oleh neutron dan menjalani reaksi fisi.



Untuk meningkatkan kemungkinan terjadinya reaksi fisi, maka harus diperbanyak jumlah netron thermal yang datang ke uranium. Mengingat netron yang dipancarkan oleh inti fisile yang pecah dapat memiliki energi yang tinggi (orde MeV), maka sebelum mencapai uranium netron ini perlu diperlambat sehingga menjadi netron thermal. Perlambatan ini dilakukan oleh **moderator**, melalui proses tumbukan. Moderator dapat berupa grafit (karbon), air berat (deterium), air biasa dll. Jadi di dalam reaktor nuklir, batang-batang uranium yang merupakan bahan bakar reaktor dikelilingi oleh moderator, contohnya grafit (karbon), seperti yang dipakai Fermi, air berat (deterium, D_2O). Jika bahan bakar uranium itu diperkaya dengan U^{235} sampai 3%, maka sebagai moderator dapat digunakan air biasa. Jika pengayaan sampai 10% tidak diperlukan moderator.



Terjadinya reaksi fisi itu dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti:

- jumlah neutron yang dipancarkan oleh inti fisile,
- peluang neutron yang dipancarkan inti fisile diperlambat oleh moderator tanpa ditangkap oleh moderator,
- peluang neutron yang sudah diperlambat itu berinteraksi dengan uranium,
- peluang neutron thermal bertemu U^{235} dan memicu reaksi fisi,
- peluang neutron thermal ditangkap U^{238} .

Reaksi dalam reaktor nuklir dikontrol dengan mengatur fluks neutron di dalam reaktor, menggunakan **batang-batang pengontrol**. Batang-batang ini terbuat dari boron atau kadmium, yang dapat menangkap neutron, khususnya neutron lambat. Dengan memasukkan atau mengeluarkan batang-batang ini ke atau dari reaktor fluks neutron dapat diatur. Jika diinginkan produksi energi bertambah, maka batang-batang pengontrol ditarik keluar sampai tercapa produksi energi yang diinginkan, lalu dimasukkan lagi supaya produksi energi stabil. Sebaliknya, jika diinginkan produksi energi berkurang, maka batang-batang pengontrol dimasukkan sampai tercapai produksi energi yang diinginkan, lalu ditarik keluar supaya produksi energi stabil.

Reaksi fisi berantai di dalam reaktor nuklir tentu menimbulkan panas yang tinggi. Suhu dalam reaktor bisa mencapai 300 sampai 800 °C. Karena itu, reaktor harus didinginkan, dengan cara mengalirkan cairan pendingin (seperti air pada mesin mobil) di sekitar reaktor. Sebagai cairan pendingin dapat digunakan air bertekanan tinggi, karbondioksida, helium dan sodium cair. Cairan pendingin yang keluar membawa panas dari reaktor. Melalui suatu penukar panas (heat exchanger), panas dalam cairan tersebut tersebut dipindahkan ke cairan lain. Pada akhirnya panas itu dipakai untuk menggerakkan turbin pembangkit listrik. Penukar panas itu juga bermanfaat agar bahan-bahan radioaktif yang mungkin terbawa dalam cairan pendingin yang pertama tidak terbawa keluar.

Sebagai pembangkit listrik, satu gram bahan bakar uranium dapat menghasilkan energi listrik 1 MWatt.hari. Ini sebanding dengan energi listrik yang dihasilkan oleh 2,5 ton batubara.

Setelah sekian waktu jumlah uranium di dalam bahan bakar reaktor tentu berkurang, karena menjalani fisi menghasilkan energi, neutron dan inti-inti lain. Karena itu, bahan bakar ini harus diganti. Bahan bakar yang telah terpakai tidak dapat dibuang begitu saja, karena mengandung bahan-bahan radioaktif, yang waktu paruhnya bervariasi, dari sepersekian detik sampai ribuan tahun. Setelah sisa uranium dipisahkan (untuk dimanfaatkan lagi), sampah ini disimpan melalui penyimpanan yang bertahap. Pertama-tama disimpan sampai radioisotop yang berumur pendek jauh berkurang, kemudian dipindahkan ke penyimpanan berikutnya, terakhir untuk disimpan di dalam tanah dalam wadah baja.