

Mengenai 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
-

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.

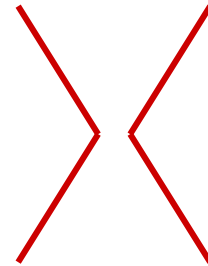
Kedua kelompok model itu saling berlawanan:

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.

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

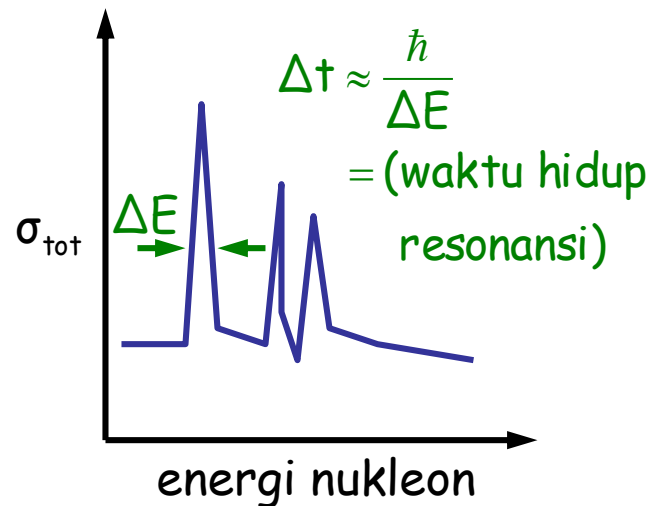
Hal serupa ditemui pada inti, bahwa radius inti (inti dianggap menyerupai bola) sebanding dengan $A^{\frac{1}{3}}$, sehingga kerapatannya tidak bergantung pada ukurannya.

- 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:

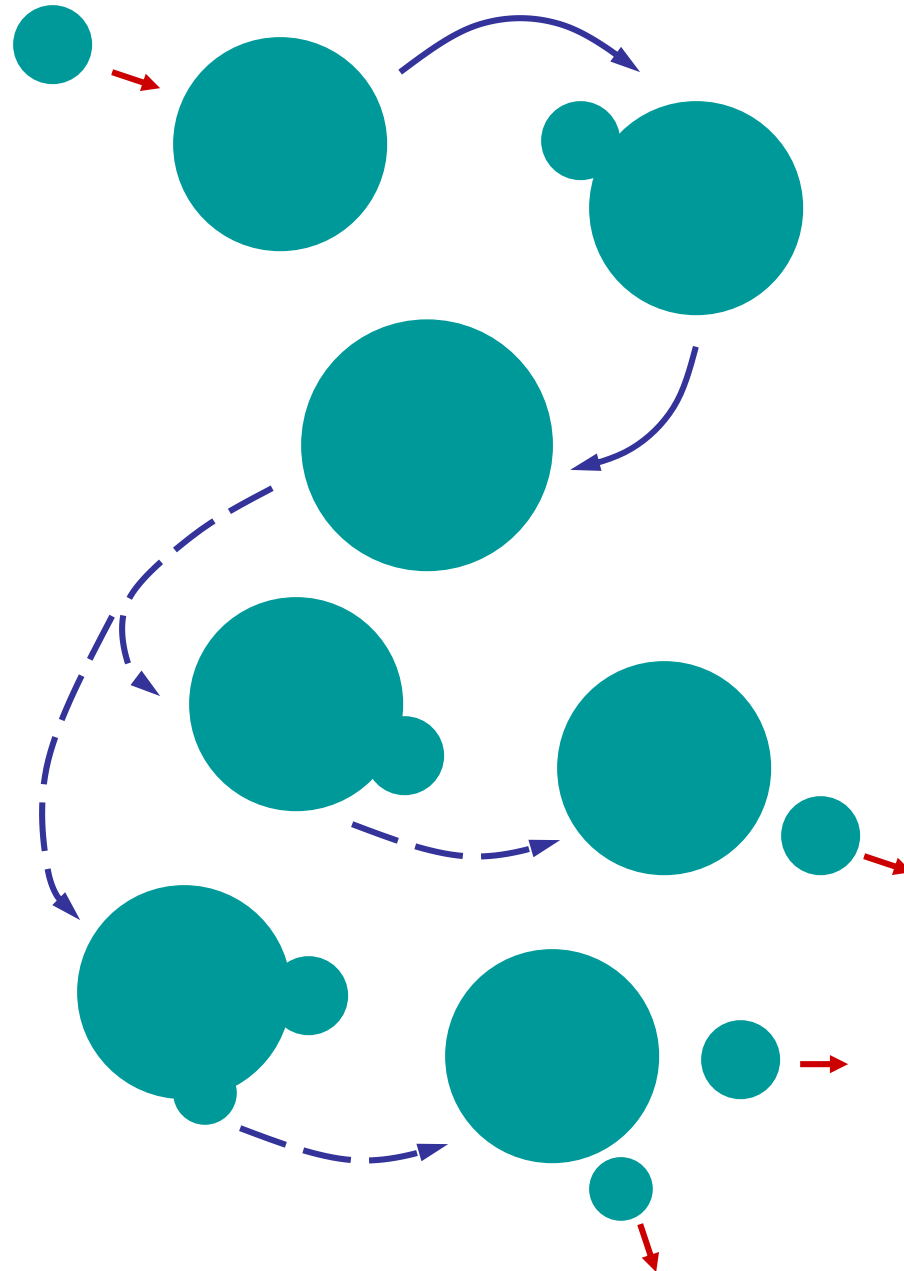
Nukleon datang, lalu ditangkap inti sehingga terbentuk suatu sistem paduan (compound system).

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:

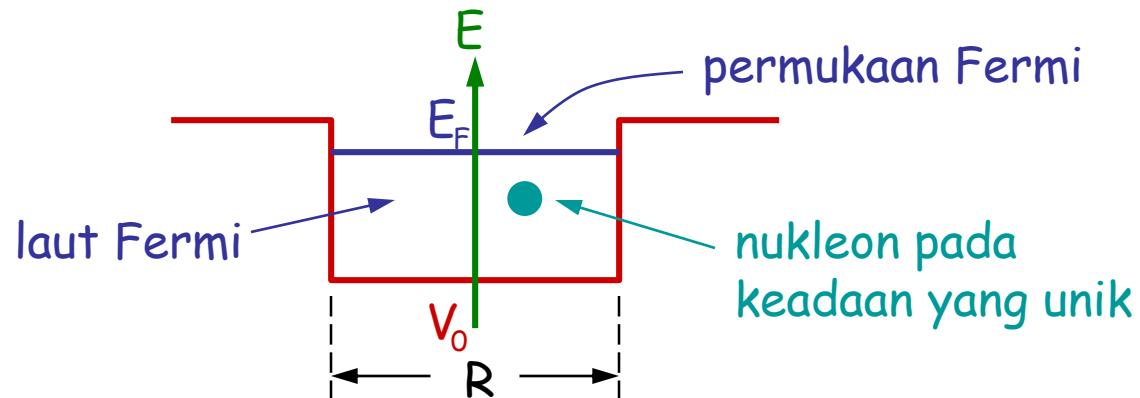


Model Gas Fermi (Fermi Gas Model)

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.