

# 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
-

# Sifat-Sifat Inti

## Energi Ikat Inti

Jika  $M_p$  massa proton,  $M_n$  massa neutron dan  $M$  massa inti, maka terdapat **selisih massa  $\Delta$**  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,  $\Delta$  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  $\Delta$  (berarti juga energi ikat inti B) dihitung bukan berdasarkan massa inti melainkan massa atom; atom terdiri atas proton, neutron dan elektron yang massanya  $M_e$ :

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

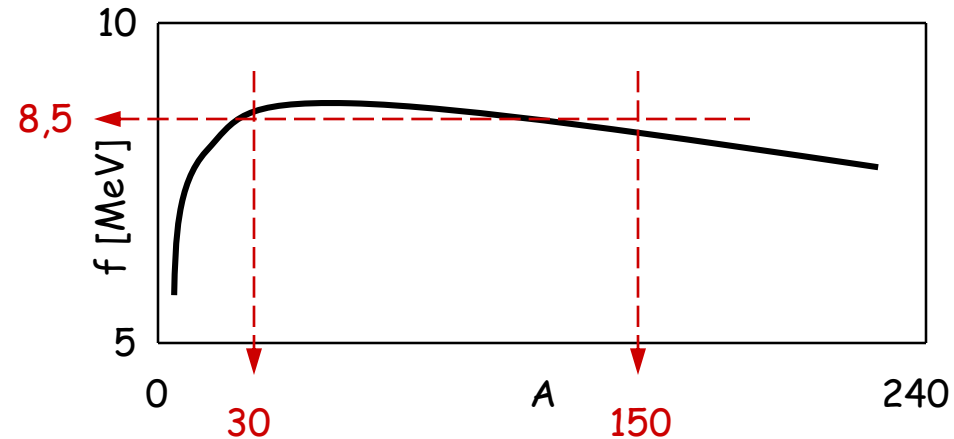
dengan  $M_H$  massa atom Hidrogen.

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  $B_{ave}$ :  $f = B_{ave} = \frac{B}{A}$

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.

---

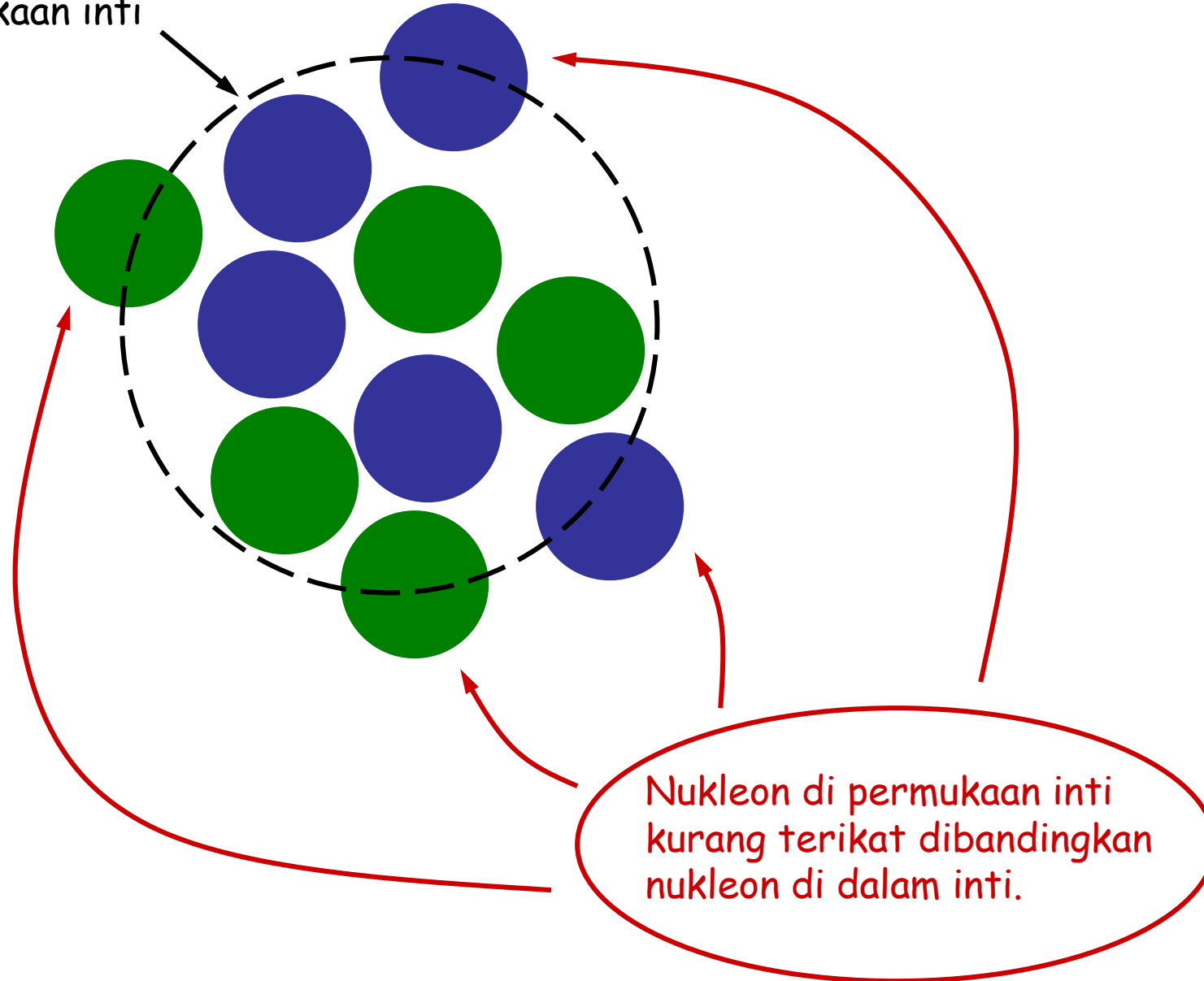
Ketika  $A$  semakin besar jumlah proton semakin banyak. Maka gaya tolak Coulomb antar proton makin kuat, sehingga mengurangi ikatan dan energi ikat per nukleon berkurang.

---

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.

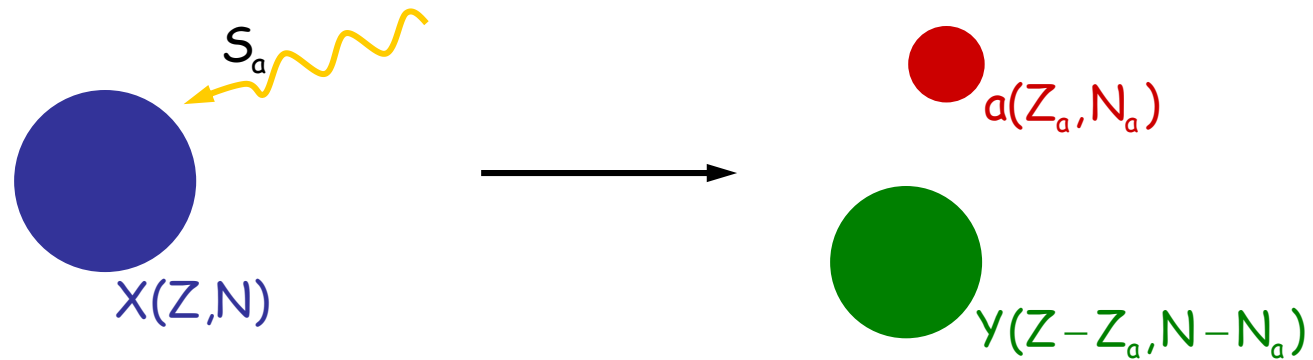
# Efek Permukaan

permukaan inti



# Energi Separasi

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



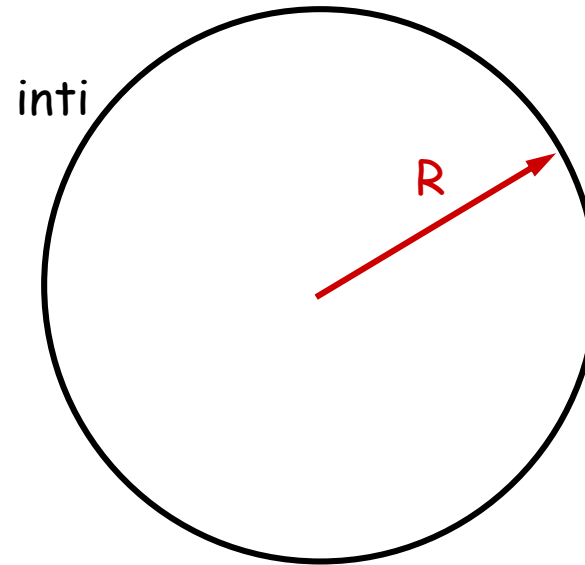
$$S_a = M_a + M_Y - M_X = B_X - (B_a + B_Y)$$

$S_a$  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)  $\alpha$ .



# 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  $|\Delta(A)| = 12A^{-\frac{1}{2}}$ .