

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
-

Model Kulit (Shell Model)

Beberapa sifat inti, contoh: kestabilan, jumlah di alam, menunjukkan suatu nilai atau keadaan yang menonjol jika jumlah proton dan / atau neutron 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:

$$V(r) = V_0(r) + V_s(r) \vec{L} \cdot \vec{S}$$

komponen spin-orbit

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

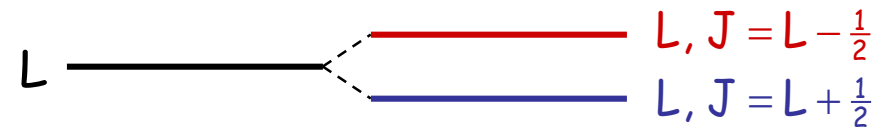
Dengan memasukkan komponen spin-orbit bilangan ajaib bisa dihasilkan. sukses!

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

$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$ ← 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:



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

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

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 terdegenerasi 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.

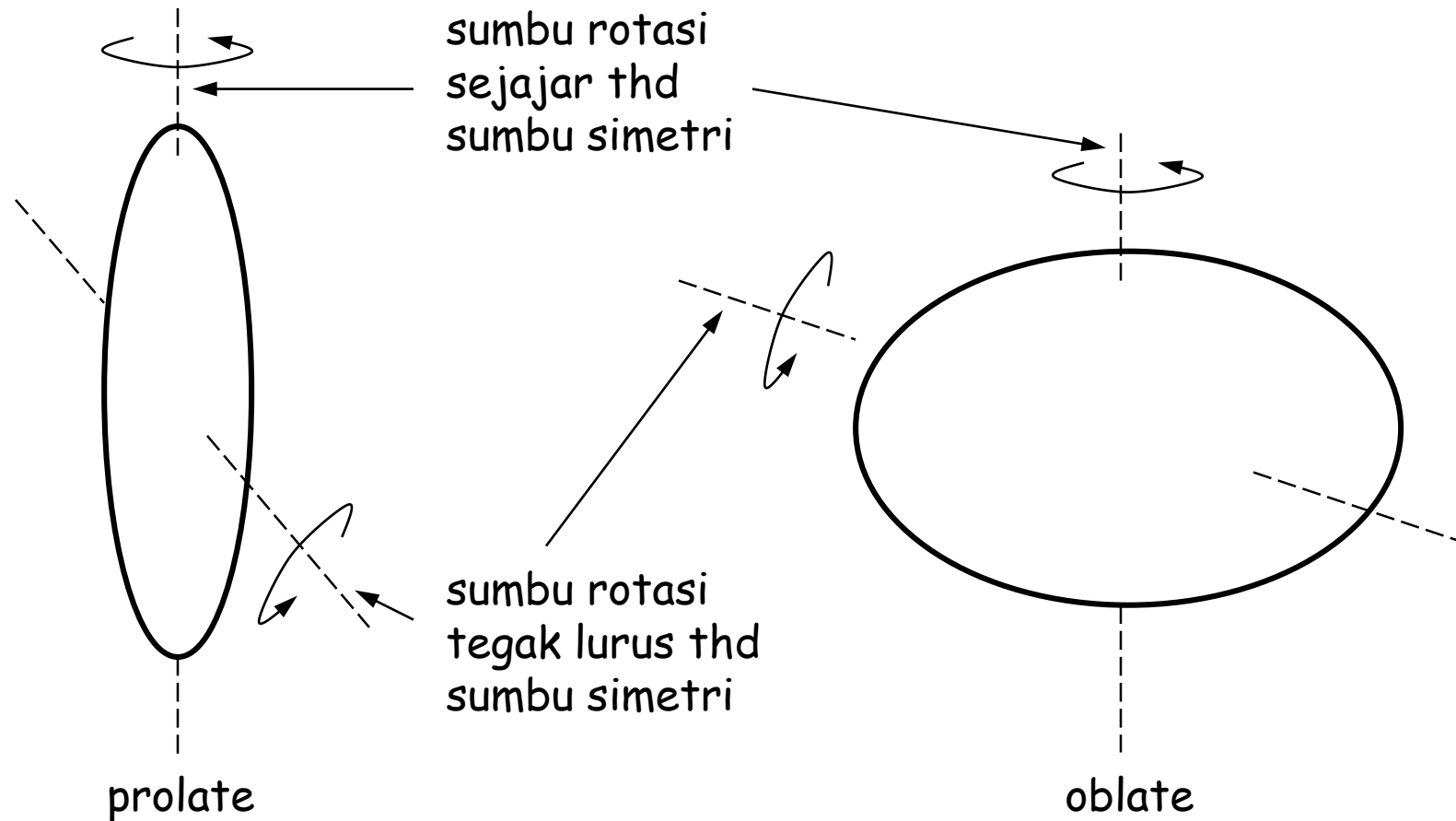
Dua macam gerakan kolektif inti:

- 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.

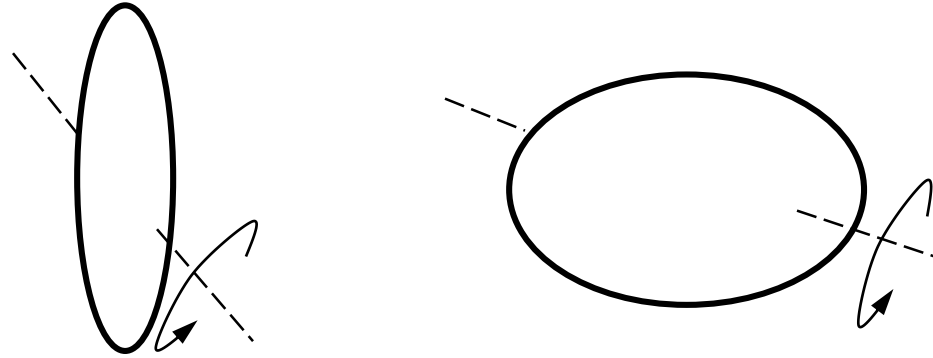
Dua jenis deformasi elipsoidal yaitu, **prolate** dan **oblate**:



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

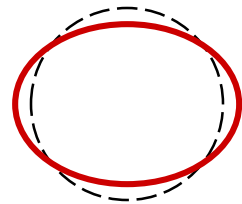
Suku-suku lain dapat berupa efek sentrifugal, permukaan dll.

Model Vibrasional

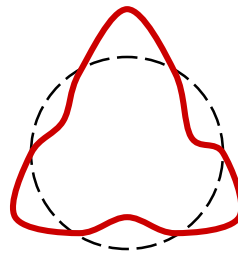
Modus gerak kolektif nukleon dalam inti yang lain yaitu getaran / vibrasi. Model vibrasional memperhitungkan gerak kolektif tersebut.

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.

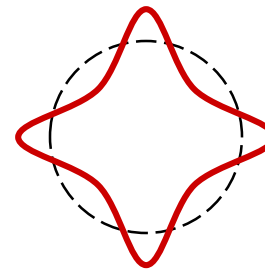
Modus getaran permukaan inti ditandai oleh suatu konstanta λ , contohnya:



$\lambda = 2$
(quadrupol)



$\lambda = 3$
(oktupol)

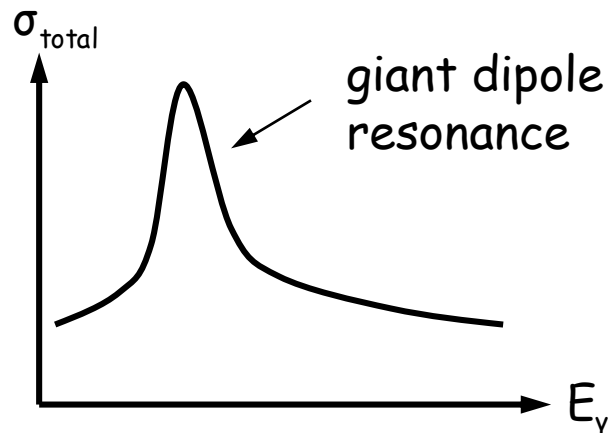


$\lambda = 4$
(heksadekapol)

$\lambda = 0$ 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 ${}^8\text{Be}$, ${}^{20}\text{Ne}$, ${}^{28}\text{Si}$, juga untuk proses-proses seperti peluruhan α .