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

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:

$$\underbrace{\vec{I}}_{\text{spin inti}} = \sum_{i=1}^{A} \underbrace{\vec{S}_i}_{\text{spin nukleon}} + \sum_{i=1}^{A} \underbrace{\vec{L}_i}_{\text{momentum angular orbital}}$$

spin inti: $\vec{I} = \vec{S} + \vec{L}$,

$$\vec{S} = \sum_{i=1}^{A} \vec{S}_i \longrightarrow S = \begin{cases} \text{integer} & (A = \text{genap}) \\ (2n+1)\frac{1}{2} & (A = \text{ganjil},\ n = 0, 1, 2, \ldots) \end{cases}$$

$$\vec{L} = \sum_{i=1}^{A} \vec{L}_i \qquad L = \text{integer}$$

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

teruji oleh eksperimen

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

$$H^2,\ Li^6,\ B^{10},\ N^{14}$$

(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^I_m:

$$\psi^I : \psi^I_m, \qquad -I \le m \le I \quad (m = -I, -I+1, \ldots, I)$$

$m =$ bilangan kuantum magnetik spin I

$=$ proyeksi spin I pada sumbu quantisasi

(misal sumbu z)

Momen Listrik Inti

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

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

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

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 $\vec{r}_A + d\vec{r}_A$: $\left|\psi(\vec{r}_1,\ldots,\vec{r}_A)\right|^2 d\boldsymbol{\tau}$

peluang mendapatkan nukleon i berada di posisi $\vec{r}$ sampai $\vec{r} + d\vec{r}$, nukleon yang lain pada posisi sembarang:

$$P_i(\vec{r})d\vec{r} = \left(\int \left|\psi(\vec{r}_1,\ldots,\vec{r}_{i-1},\vec{r},\vec{r}_{i+1},\ldots,\vec{r}_A)\right|^2 \prod_{j\neq i}^{A} d\vec{r}_j\right) d\vec{r}$$

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

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

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

Momen Dipol Inti

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

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

$$f(\vec{r}_i) = \vec{r}_i \left|\psi(\vec{r}_1,\ldots,\vec{r}_A)\right|^2$$

$$f(-\vec{r}_i) = -\vec{r}_i \left|\psi(\vec{r}_1,\ldots,\vec{r}_A)\right|^2 = -f(\vec{r}_i) \longrightarrow f(\vec{r}_i) = \text{fungsi ganjil} \longrightarrow \int f(\vec{r}_i) d\vec{r}_i = 0$$

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

Jadi, inti tidak punya momen dipol listrik.

Momen Quadrupol Inti

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

Mencari Q(ψ):

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

maka:

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

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

$$F(\vec{r}_1,\ldots,\vec{r}_A) = \varphi(\vec{r}_i)\psi(\vec{r}_1,\ldots,\vec{r}_A) \quad = ?$$

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

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

Sesuai aturan penjumlahan momentum angular:

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

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

maka ditemui:
$$\int \psi^*(\vec{r}_1,\ldots,\vec{r}_A) F_J(\vec{r}_1,\ldots,\vec{r}_A) d\tau \quad = ?$$

momentum angular I

momentum angular J

Sesuai sifat orthogonal eigenstate operator momentum angular:

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

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

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

maka:

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

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^I_m
dengan m = -I, -I + 1, -I + 2, …, I.

Didefinisikan:

Q = momen quadrupol inti yaitu, momen quadrupol listrik inti untuk keadaan ψ^I_I

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

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

---

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

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

$$D_z = \sqrt{\frac{4\pi}{3}} Q_{10}, \qquad D_x \pm i D_y = \pm\sqrt{\frac{8\pi}{3}} Q_{1,\mp 1}$$

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

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: $\vec{\mu}_p = g_p \dfrac{e\hbar}{2M_p c}\vec{S}$ (S dalam satuan $\hbar$)

$g_p =$ faktor gyromagnetik proton $= 5.59$

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

$g_n = -3.83$

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

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

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

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

Gerakan Orbital Proton

operator momen magnetik:

$$\hat{\vec{\mu}}_C = \mu_0 \sum_{k=1}^{Z} \hat{\vec{L}}_k$$

$$= \frac{e\hbar}{2M_p c} \sum_{k=1}^{Z} \hat{\vec{L}}_k$$

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

$$= \frac{1}{2c} \sum_{k=1}^{Z} \vec{r}_k \times \frac{e\hat{\vec{p}}_k}{M_p}$$

momen magnetik:

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

rapat arus proton ke-k:

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

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

Momen Magnetik Inti Efektif

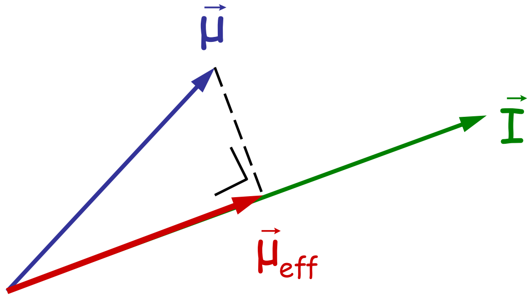
operator spin inti: $\hat{\vec{I}} = \sum_{k=1}^{A} \hat{\vec{L}}_k + \sum_{k=1}^{A} \hat{\vec{S}}_k$

operator momen magnetik inti: $\hat{\vec{\mu}} = \mu_0 \left(\sum_{k=1}^{Z} \hat{\vec{L}}_k + g_p \sum_{k=1}^{Z} \hat{\vec{S}}_k + g_n \sum_{k=Z+1}^{A} \hat{\vec{S}}_k \right)$

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

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

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



Momen magnetik inti efektif untuk keadaan inti ψ_m^I:

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

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

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

Lebih detil 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:

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

Jadi:

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

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

Didefinisikan:

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

$$\mu = \left\langle \psi_{I}^{I} \middle| \hat{\mu}_{eff,z} \middle| \psi_{I}^{I} \right\rangle$$

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

$$\mu(m) = \left\langle \psi_{m}^{I} \middle| \hat{\mu}_{eff,z} \middle| \psi_{m}^{I} \right\rangle \quad (m \neq I)$$

momen magnetik inti dapat dihitung sebagai:

$$\mu = g\mu_0 I$$

$$g = \text{faktor gyromagnetik inti}$$

$$\mu_0 = \text{magneton nuklir}$$

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