

# 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
-

# 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- $\mu$**  ( **$\mu$ -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  $\pi$**  ( **$\pi$ -meson / pion**). Pion diyakini sebagai meson yang dipertukarkan dalam interaksi kuat. Pion hadir dalam 3 jenis, yaitu pion bermuatan listrik positif  $\pi^+$ , netral  $\pi^0$  dan negatif  $\pi^-$ . 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 iteraksi 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  $\Delta E$ . Menurut ketidakpastian Heisenberg diperoleh waktu hidup  $\Delta t$  meson itu sebagai:

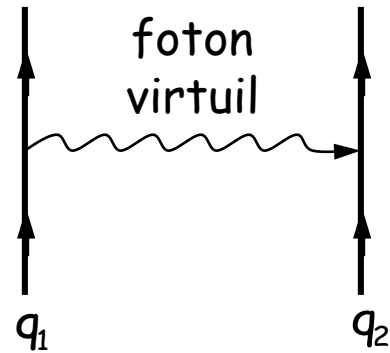
$$\Delta t \approx \frac{\hbar}{\Delta E}, \quad \Delta E = mc^2$$

Dalam waktu  $\Delta t$  meson itu bergerak paling jauh (anggap kecepatannya sama dengan  $c$ ):

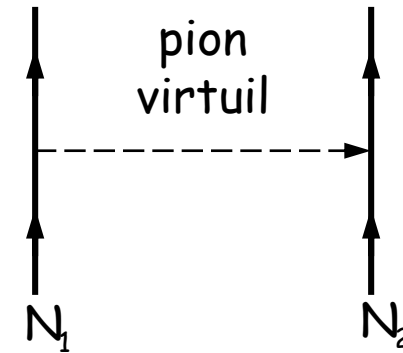
$$\begin{aligned} R &\approx c\Delta t \\ &\approx c \frac{\hbar}{\Delta E} \\ &\approx c \frac{\hbar}{mc^2} \\ &\approx \frac{\hbar}{mc} \end{aligned}$$

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**.

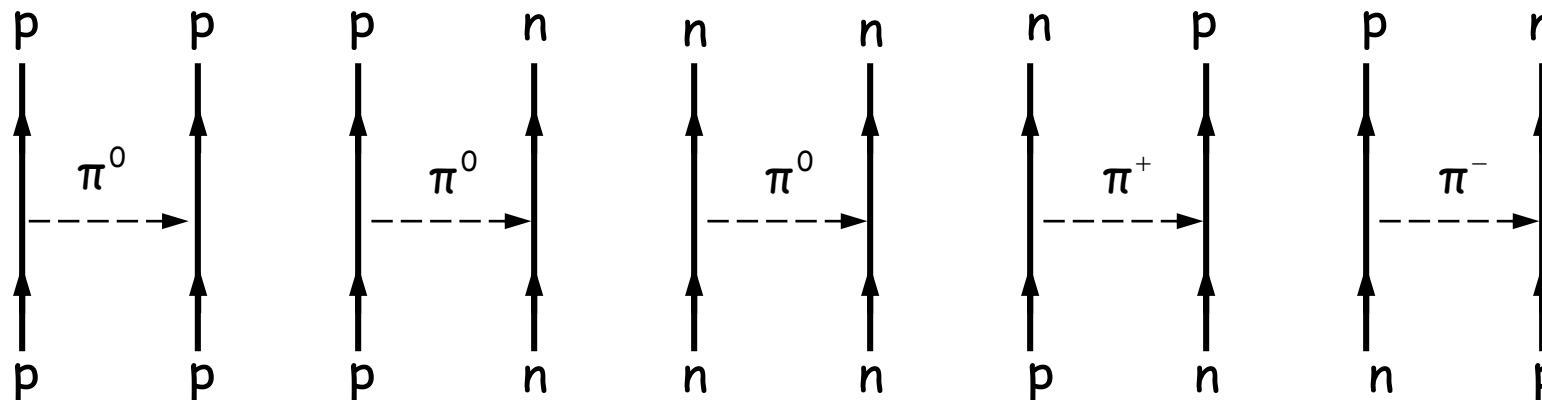


interaksi e.m.



interaksi kuat

Interaksi NN berupa pertukaran pion antar NN:



Catatan: Muon hanya ada dua jenis, yaitu  $\mu^+$  dan  $\mu^-$ . 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 kuadrat:  $(\vec{S} \cdot \vec{L})^2$



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

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:

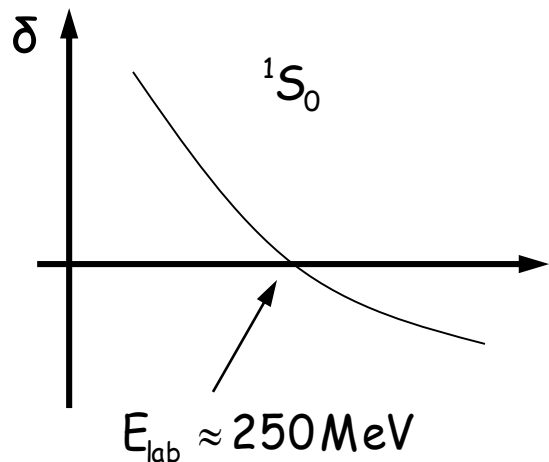
### 1. berjangkauan pendek

- 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  $\delta$  (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  $\theta$  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.

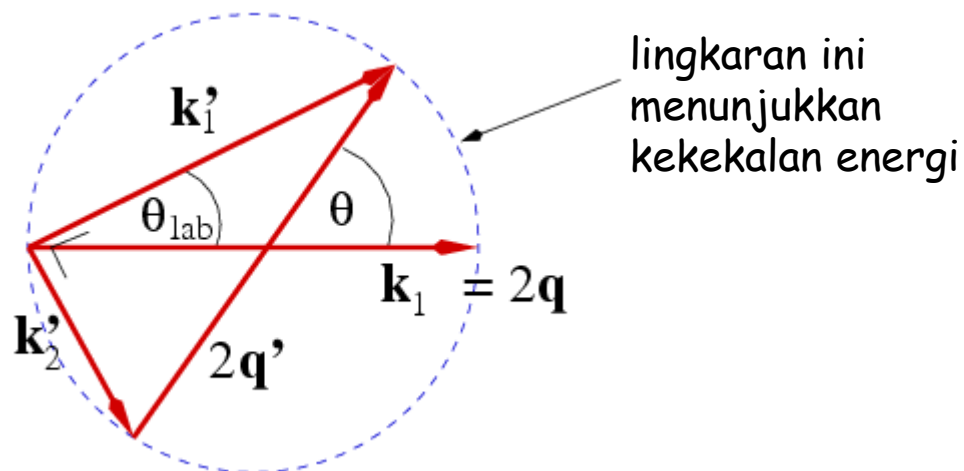
$\vec{N}_2(\vec{N}_1, \vec{N}_1)\vec{N}_2$  Nukleon 1 datang ke nukleon 2, kemudian nukleon 1 dideteksi. Sebelum hamburan spin nukleon 1 dan 2 tidak terpolarisasi, setelah hamburan polarisasi spin nukleon 1 dan 2 diukur. Besaran yang diukur parameter korelasi spin. Reaksi ini untuk meneliti polarisasi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



$\mathbf{k}_i, \mathbf{k}'_i$  = momentum awal, akhir di lab ( $i = 1, 2$ )

$\mathbf{q}, \mathbf{q}'$  = momentum awal, akhir di p.m.

$\theta, \theta_{lab}$  = sudut hambur di p.m., lab

Gambar itu menunjukkan:

$\mathbf{k}_2 = 0$  (target diam)

$\mathbf{k}_1 = \mathbf{k}'_1 + \mathbf{k}'_2$  (momentum kekal)

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

$\mathbf{k}'_1 \perp \mathbf{k}'_2$

$\theta = 2\theta_{lab}$

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