

Prosiding Seminar Nasional

“Meneguhkan Peran Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat dalam Memuliakan Martabat Manusia”

ANALISIS SIFAT-SIFAT PION DALAM REAKSI INTI DALAM TERAPI PION

R. Yosi Aprian Sari

Jurusan Pendidikan Fisika FMIPA UNY; ryosia@uny.ac.id, 081578010933

Abstrak

Pion dapat dihasilkan dari interaksi proton dan neutron. Pion merupakan salah satu keluarga meson yang dapat bermuatan listrik positif, negatif atau netral. Pion negatif bisa dimanfaatkan dalam terapi pion. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui massa pion dan jangkauan pion dari interaksi proton dan neutron yang berguna untuk membunuh sel kanker. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah komputasi numerik yang berawal dari analisis teoretis – matematis interaksi radiasi (partikel) dengan materi (misalkan tubuh manusia). Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini adalah massa pion $140,65 \text{ MeV}/c^2$ yang sekitar 273 massa elektron dan jangkauannya sangat pendek $> 1 \text{ fm}$, ukuran yang cukup efektif membunuh sel kanker.

Kata kunci: terapi pion, sel kanker, sifat-sifat pion

PENDAHULUAN

Dalam ikatan molekul terjadi pertukaran elektron antara atom-atom penyusunnya. Mekanisme ikatan tersebut juga bekerja dalam inti dengan nukleon penyusunnya saling mengikat dengan melalui pertukaran sejenis partikel tertentu di antara nukleon tersebut. Mekanisme tersebut pertama kali diselidiki oleh Heisenberg pada tahun 1932. Heisenberg mengusulkan bahwa elektron dan positron bolak-balik bergerak di antara nukleon-nukleon. Sebuah neutron, misalnya dapat memancarkan elektron menjadi sebuah proton, sedangkan sebuah proton dapat menyerap elektron menjadi sebuah neutron. Dalam perhitungan, gaya yang timbul dari pertukaran elektron dan positron dengan massa ringan oleh nukleon-nukleon terlalu kecil dengan faktor 10^{14} supaya dapat berperan dalam struktur inti.

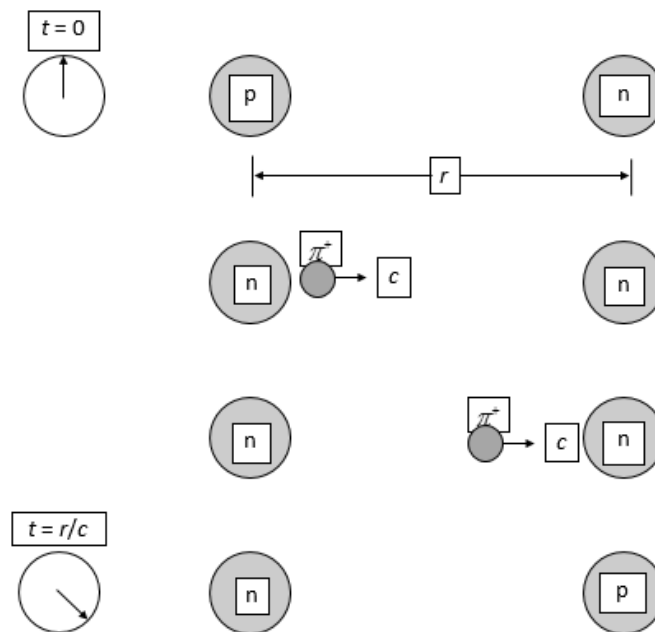
Pada tahun 1935, Hideki Yukawa²¹ mengusulkan adanya potensial inti yang menggambarkan interaksi nukleon-nukleon. Interaksi tersebut melalui medan potensial inti akan menghasilkan gaya inti yang terkait dengan simetri inti tertentu; Yukawa mengemukakan bahwa gaya di antara nukleon-nukleon tersebut dihasilkan oleh *pertukaran meson*. Teori ini merupakan perluasan elektrodinamika kuantum dan berhasil menjelaskan secara kuantitatif gaya di antara nukleon melalui pertukaran meson. Meson memiliki massa antara massa elektron dan nukleon. Meson merupakan salah satu dari tiga kelompok besar partikel elementer (yang lainnya adalah *lepton* dan *baryon*). Salah satu dari anggota

²¹ Hideki Yukawa, seorang ilmuwan warga negara Jepang yang pertama kali yang mendapat penghargaan Nobel pada tahun 1949 dalam hipotesa atau kajian teoritisnya mengenai adanya pertukaran meson dalam interaksi nukleon-nukleon.

kelompok partikel meson adalah *pion*. Pion dapat bermuatan (π^+, π^-) atau netral (π^0); membentuk triplet isospinor ($I = 1$).

Menurut Teori Yukawa, setiap nukleon terus-menerus memancarkan dan menyerap π -meson (pion). Jika terdapat nukleon lain didekatnya, pion yang dipancarkan dapat menyeberang dan akan kembali ke nukleon induknya; transfer momentum yang menyertainya setara dengan aksi gaya [Eisenberg dan Geiner:1986, Rho dan Wilkinson:1979]

Gaya inti bersifat saling tolak-menolak pada jarak yang sangat pendek dan saling tarik-menarik pada jarak nukleon-nukleon yang agak jauh, karena jika tidak demikian, nukleon dalam inti akan menyatu, dan salah satu kekuatan teori meson untuk gaya seperti itu ialah munculnya kedua aspek tercakup.



Gambar 1

Prinsip ketaktentuan mengizinkan penciptaan, transfer dan pemusnahan pion terjadi tanpa melanggar hukum kekekalan energi asal saja urutan terjadinya cukup cepat. Di sini pion positif yang dipancarkan oleh proton diserap oleh neutron, hasilnya, proton menjadi neutron dan neutron menjadi proton [Beiser, 1987]

Jika nukleon berkesinambungan memancarkan dan menyerap pion, seolah-olah proton dan neutron tidak pernah didapatkan mempunyai massa yang lain dari massa biasanya. Hal ini terletak pada prinsip ketakpastian. Hukum fisika hanya mengacu pada kuantitas terukur dan prinsip ketakpastian yang membatasi ketepatan suatu kombinasi pengukuran yang dapat dilakukan. Jika nukleon terus-menerus memancarkan pion, massa nukleon tersebut tidak mengalami perubahan oleh karena nukleon tersebut menyerap pion

lain yang dipancarkan oleh nukleon tetangganya. Secara *prinsip*, massa proton dan neutron yang memancarkan dan menyerap pion tidak mengalami perubahan massa.

Dari prinsip ketidakpastian dalam bentuk

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (1)$$

suatu kejadian dengan sejumlah energi ΔE tak kekal tidak dilarang, asal saja selang waktu kejadian itu tidak melebihi $\hbar/2\Delta E$. Persyaratan ini dapat dipakai untuk memperkirakan massa pion.

Dari hipotesa Yukawa, dijelaskan mekanisme pertukaran pion di antara dua partikel bermuatan sebagai berikut: partikel pertama memancarkan foton. Dari hukum kekekalan energi-momentum, foton tersebut bukan merupakan foton riil, prosesnya: setiap foton mempunyai energi yang tidak berkorespondensi terhadap momentumnya (yaitu, $E = pc$), atau foton tersebut riil dengan energi yang tidak kekal dalam reaksi:

$$e_1 \rightarrow e_1 + \gamma.$$

Ketika foton diserap oleh partikel kedua dalam bentuk energi dengan proses:

$$\gamma + e_2 \rightarrow e_2$$

yang juga tidak memenuhi kekekalan energi. Pertukaran foton tersebut akan menimbulkan gaya tarik (*attractive*) atau gaya tolak (*repulsive*) di antara partikel-partikel tersebut. Pertukaran foton tersebut berasal dari pergeseran energi gangguan orde dua terhadap potensial gangguan H_1 . Pergeseran energi dari interaksi energi bebas kedua muatan e_1 dan e_2 ,

$$E_{e_1 e_2}^{(2)} = - \sum_{n \neq e_1 e_2} \frac{\langle e_1 e_2 | H_1 | n \rangle \langle n | H_1 | e_1 e_2 \rangle}{E_n - E_{e_1 e_2}^{(0)}} \quad (2)$$

Jumlah dari semua keadaan dapat diperoleh dari H_1 yang melakukan tindakan terhadap keadaan $|e_1 e_2\rangle$ yang berkorespondensi terhadap keadaan selanjutnya, yaitu e_2 merupakan keadaan mula-mula dan e_1 yang melakukan tindakan terhadap H_1 . Foton yang dipancarkan adalah $|n\rangle = |e_1' \gamma, e_2\rangle$. Energi pada keadaan selanjutnya merupakan energi rekoil $e_1 \sqrt{(pc)^2 + (m_\pi c^2)^2}$, ditambah energi foton, pc . Jumlah dari keadaan-keadaan tersebut berkorespondensi terhadap integrasi dari momentum foton yang bersesuaian dengan kekekalan momentum [Wong:1990, Rho dan Wilkinson:1979].

Yukawa menyarankan adanya medan meson yang merupakan interaksi kuat. Medan meson tersebut berbeda dengan medan elektromagnetik. Medan meson $\phi(\hat{\mathbf{r}}, t)$ merupakan bentuk skalar, maka Hamiltonian nukleon interaksi

$$\hat{H} = \frac{\hat{\mathbf{p}}^2}{2m_\pi} - g\phi(\hat{\mathbf{r}}, t). \quad (3)$$

Pada kuantisasi medan riil, ϕ menjadi operator Hermitian, $\phi^\dagger = \phi$, relasi komutasi waktu:

$$\left. \begin{aligned} [\phi(\hat{\mathbf{r}}, t), \phi(\hat{\mathbf{r}}', t)] &= i\hbar c^2 \delta(\hat{\mathbf{r}} - \hat{\mathbf{r}}') \\ [\phi(\hat{\mathbf{r}}, t), \phi(\hat{\mathbf{r}}', t)] &= [\phi(\hat{\mathbf{r}}, t), \phi(\hat{\mathbf{r}}', t)] = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Medan meson dapat berupa pseudoskalar,²² yaitu

$$\phi(\hat{\mathbf{r}}, t) = \phi^+(\hat{\mathbf{r}}, t) + \phi^-(\hat{\mathbf{r}}, t) \quad (5a)$$

dengan

$$\phi^+(\hat{\mathbf{r}}, t) = \left(\frac{2\pi c^2 \hbar}{\omega V}\right)^{1/2} e^{-i\vec{k}\cdot\vec{r}} e^{i\omega t} \quad (\text{pemancaran}) \quad (5b)$$

dan

$$\phi^-(\hat{\mathbf{r}}, t) = \left(\frac{2\pi c^2 \hbar}{\omega V}\right)^{1/2} e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}} e^{-i\omega t} \quad (\text{penyerapan}). \quad (5c)$$

Faktor ω merupakan faktor normalisasi foton yang dapat diberikan sebagai energi kuantum meson $\hbar\omega$. Momentum meson adalah $\hbar\vec{k}$, dan meson mempunyai massa m_π , dan relasi energi-momentum adalah

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \quad (6)$$

sehingga menjadi

$$(\hbar\omega)^2 = (\hbar\vec{k}c)^2 + (m_\pi c^2)^2. \quad (7)$$

Dari pers. (5) dan relasi komutasi dari pers. (4), diperoleh relasi komutasi untuk operator-operator $a(\vec{k})$ dan $a^\dagger(\vec{k}')$ yang masing-masing adalah $e^{-i\omega t}$ dan $e^{i\omega t}$,

$$\left. \begin{aligned} [a(\vec{k}), a^\dagger(\vec{k}')] &= \delta_{\vec{k}\vec{k}'} \\ [a(\vec{k}), a(\vec{k}')] &= [a^\dagger(\vec{k}), a^\dagger(\vec{k}')] = 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

dengan $a(\vec{k})$ dan $a^\dagger(\vec{k}')$ merupakan operator kreasi dan anihilasi partikel. Ketika nukleon pertama memancarkan meson, diperoleh

$$\langle N_1 + \text{meson} | g\phi | N_1 \rangle = g \left(\frac{2\pi c^2 \hbar}{\omega V}\right)^{1/2} e^{-i\vec{k}\cdot\vec{r}_1} e^{i\omega t}. \quad (9)$$

Nukleon kedua tidak dipengaruhi oleh H_1 selama pemancaran oleh nukleon pertama. Penyerapan oleh nukleon kedua yang meninggalkan nukleon pertama tidak diubah, dan menjadi

$$\langle N_2 | g\phi | N_1 + \text{meson} \rangle = g \left(\frac{2\pi c^2 \hbar}{\omega V}\right)^{1/2} e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_2} e^{-i\omega t}. \quad (10)$$

Energi yang dimiliki adalah

²² Partikel pseudoskalar yaitu partikel yang memiliki spin nol dan paritas ganjil; Partikel skalar yaitu partikel yang memiliki spin nol dan paritas genap; Vektor meson memiliki spin satu dan paritas ganjil.

$$E_{interm} - E_{mula-mula} = (E'_{N_1} + E_{N_2} + \hbar\omega) - (E_{N_1} + E_{N_2}) \cong \hbar\omega \quad (11)$$

E'_{N_1} berbeda dari E_{N_1} ketika nukleon pertama memancarkan meson. Energi recoilnya adalah $(\hbar\hat{k})^2/2m_N$, dan secara umum berada pada pendekatan non-relativistik ketika massa nukleon tersebut besar, sehingga energi yang dimiliki adalah $\hbar\omega$. Pergeseran energinya berupa

$$\Delta E = -\sum \frac{2\pi c^2 \hbar}{\omega V} g^2 e^{i\hat{k}\cdot\hat{r}_2} e^{-i\hat{k}\cdot\hat{r}_1} \frac{1}{\hbar\omega}.$$

Jumlah dari semua keadaan momentum meson adalah berarti integrasi terhadap ruang fase

$$\Sigma = \int \frac{V d^3\hat{p}}{(2\pi\hbar)^3} = \int \frac{V d^3\hat{k}}{(2\pi)^3} \quad (12)$$

sehingga

$$\begin{aligned} \Delta E &= -\sum \frac{2\pi c^2}{V} \frac{g^2}{(2\pi)^3} V \int d^3\hat{k} \frac{e^{i\hat{k}\cdot(\hat{r}_1-\hat{r}_2)}}{\omega^2} \\ &= -\frac{g^2 c^2}{4\pi^2} \int d^3\hat{k} \frac{e^{i\hat{k}\cdot(\hat{r}_1-\hat{r}_2)}}{\hat{k}^2 c^2 + (m_\pi c^2/\hbar)^2} \\ &= -\frac{g^2}{4\pi^2} \int d^3\hat{k} \frac{e^{i\hat{k}\cdot(\hat{r}_1-\hat{r}_2)}}{\hat{k}^2 + (m_\pi c^2/\hbar)^2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Integrasi tersebut akan menghasilkan

$$\Delta E = -\frac{g^2}{4\pi^2} \frac{(2\pi)^3}{4\pi} \frac{e^{-m_\pi c|\hat{r}_1-\hat{r}_2|/\hbar}}{|\hat{r}_1-\hat{r}_2|}.$$

Oleh karena nukleon kedua melakukan pemancaran kembali, maka energinya menjadi dua kali lipat. Pertukaran energi terhadap medan meson adalah

$$\Delta E = -g^2 \frac{e^{-m_\pi c|\hat{r}_1-\hat{r}_2|/\hbar}}{|\hat{r}_1-\hat{r}_2|}. \quad (14)$$

Energi bergantung pada jarak pemisahan, $\hat{r} \equiv |\hat{r}_1 - \hat{r}_2|$, dan mengalami penurunan secara cepat pada $r > \hbar/m_\pi c$. Oleh karena jarak

$$a = \hbar/m_\pi c \quad (15)$$

dengan $a \cong 1,4 \times 10^{-15} m$ merupakan jarak antara kedua nukleon, diperoleh

$$m_\pi c^2 = \frac{\hbar c}{a} \cong \frac{10^{-27} \times 3 \times 10^{10}}{1,4 \times 10^{-13}} \text{ erg} \cong 130 \text{ MeV} \quad (16)$$

sehingga menghasilkan sebagai berikut:

$$m_\pi \approx \frac{1,05 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{(1,7 \times 10^{-15} \text{ m})(3 \times 10^8 \text{ m/s})} \approx 2,1 \times 10^{-28} \text{ kg}.$$

Besaran tersebut kira-kira 275 kali massa-diam elektron m_e . Massa-diam pion bermuatan ialah $248 m_e$ dan pion netral ialah $257 m_e$ [R. Yosi Aprian Sari, dkk: 2012, R. Yosi Aprian Sari: 2011, Gasiorowicz: 2003, Valderraman, M. P. and E. R. Arriola: 2005, Wong: 1990].

Terdapat dua faktor yang menyebabkan ditemukannya pion bebas agak lambat. Pertama, harus terdapat energi yang cukup untuk diberikan pada nukleon, sehingga pemancaran sebuah pion memenuhi kekekalan energi. Jadi sekurang-kurangnya energi sebesar $m_{\pi}c^2$ atau sekitar 130 MeV diperlukan. Untuk menyediakan energi sebesar itu untuk nukleon dalam suatu tumbukan, partikel yang datang harus berenergi kinetik jauh lebih besar dari $m_{\pi}c^2$ supaya momentum dan energinya kekal. Partikel dengan energi kinetik beberapa ratus MeV diperlukan untuk menghasilkan pion bebas. Jadi penemuan pion harus menunggu perkembangan metode yang cukup peka dan tepat dalam penelitian. Akselerator (pemercepat) dapat menghasilkan energi partikel yang diperlukan, dan pion yang terjadi dengan pertolongan alat ini dapat dipelajari langsung [Cooke dan Miller: 2002, Forest: 2000, Hanhart: 2007].

Terapi Pion

Pion adalah partikel elementer yang termasuk dalam keluarga *meson*. Pion memiliki masa 273 massa elektron sehingga dikategorikan sebagai partikel elementer menengah, dapat bermuatan listrik positif, negatif maupun netral (Littlefield dan Thorley: 1978). Pion adalah partikel yang merajut gaya untuk menjaga nukleon penyusun inti atom terikat dalam inti atom. Pion dalam keadaan menjadi partikel bebas jika sebuah inti atom ditembak dengan partikel berkecepatan tinggi (misalnya proton).

Pion negatif yang dimanfaatkan di dalam terapi pion ini, berinteraksi sangat sedikit dengan atom-atom sepanjang jejaknya karena massanya yang relatif kecil dan karena bergerak mengakibatkan interaksi Coulomb juga rendah. Ketika mendekati keadaan berhenti, terjadilah interaksi Coulomb antara pion negatif ini dengan inti atom bermuatan positif dan menyebabkan inti menjadi pecah. Karena harus memenuhi kekekalan momentum, pecahan hasil reaksi tersebut menyebar ke segala arah membentuk pola seperti bintang dan dinamakan bintang pion (*pion star*) yang memiliki daya bunuh terhadap sel dalam jangkauan yang sangat pendek. Dengan demikian terapi pion ini memiliki efek samping yang sangat rendah dan disamping itu tidak diperlukan lagi atom sasaran khusus yang harus dimasukkan ke dalam tubuh agar diakumulasi di dalam jaringan kanker yang menjadi sasaran.

Terapi pion masih jarang kita dengar khususnya di negara berkembang karena memerlukan fasilitas akselerator yang besar untuk menghasilkan pion. Sebagai contoh di *The Clinton P. Anderson Meson Physics Facility*, Los Alamos, Amerika, sebuah akselerator linear sepanjang setengah mil digunakan untuk mempercepat proton sampai energi 800 MeV (Thomsen: 1978).

Penelitian Dasar dan Fisikawan Kedokteran (*Medical Physicist*)

Pemanfaatan partikel untuk terapi kanker didasari oleh pengetahuan mengenai sifat mendasar interaksi partikel tersebut dengan atom-atom yang dikenainya. Semua itu diperoleh melalui penelitian yang intensif di bidang fisika. Penelitian semacam ini disebut penelitian dasar. Hasil penelitian dasar inilah yang selanjutnya menjadi modal utama pengembangan teknologi. Oleh karena itu ada ungkapan fisika hari ini adalah teknologi hari esok. Yukawa, fisikawan Jepang yang secara teori mengusulkan adanya partikel pion untuk menjelaskan keterikatan nukleon dalam inti atom sangat bahagia bahwa apa yang telah dikerjakannya di masa lalu secara nyata dapat dimanfaatkan untuk terapi kanker yang ia sendiri sedang mengidap penyakit tersebut, melalui ungkapan "*this news brought me great pleasure to see*

that pion, which I imagined forty years ago by pure reason of theoretical physics, is turned out to be useful for rescuing people from the affliction of cancer." (Thomsen: 1978).

Penelitian dasar ini memerlukan biaya besar sementara nilai ekonominya belum terlihat. Inilah yang menjadi kendala negara berkembang termasuk Indonesia dalam mendanai penelitian dasar. Jika masalah ini tidak dicarikan penyelesaian, selamanya bangsa kita hanya akan menjadi bangsa pembeli teknologi dari bangsa lain.

Rumusan Masalah

Bagaimana sifat-sifat pion yang digunakan dalam terapi pion untuk membunuh sel kanker?

Tujuan dan Manfaat

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui sifat-sifat pion yang digunakan dalam terapi pion untuk membunuh sel kanker?

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah dalam bidang kedokteran terutama penggunaan dalam terapi pion untuk deteksi tumor atau kanker.

METODE

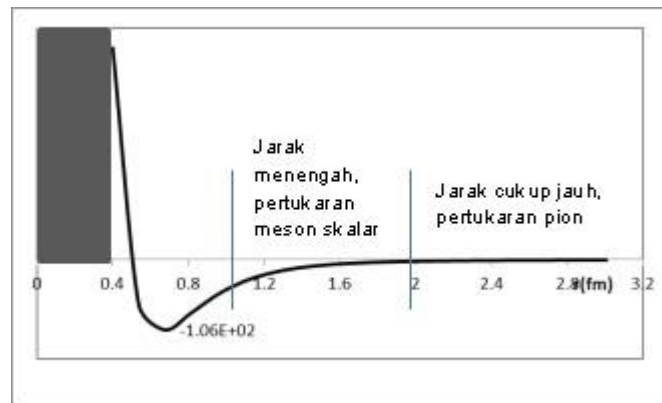
Penelitian ini merupakan penelitian teoretis komputasi yang didasari pada model interaksi radiasi (partikel) dengan materi (misalkan tubuh manusia) yang kemudian disesuaikan dengan data-data medis, misalkan jaringan tubuh manusia.

Secara garis besar, aktivitas penelitian teoretis – komputasi ini dilakukan dengan dua tahapan yaitu (i) *formulasi metode komputasi* dan (ii) *penuangan numerik dalam bahasa pemrograman komputasi*. Pada tahapan formulasi metode komputasi, aktifitas penelitian diawali dengan penentuan syarat batas berlakunya potensial OPEP. Kemudian dilakukan analisis sifat-sifat pion ditinjau dari fungsi gelombangnya. Langkah berikutnya penuangan metode komputasi numerik dalam program komputer untuk potensial OPEP. Sebelum dilakukan perhitungan secara komputerisasi, metode komputasi numerik diujicobakan kestabilan program terhadap syarat batas-syarat batas yang dimasukkan. Hal ini penting dilakukan agar hasil nilai perhitungan secara komputer bukan merupakan sekumpulan data tanpa makna fisis. Selain itu, prosedur ini juga menjadi *klarifikasi syarat batas* berlakunya parameter fisis yang telah dituangkan dalam numerik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dengan menggunakan komputasi, massa pion diperoleh sebesar $140,65 \text{ MeV}/c^2$, dan jangkauan pion (π meson) $> 1 \text{ fm}$, ukuran ini yang cukup efektif membunuh sel kanker. Dari gambar 2, pada jangkauan yang cukup pendek, $< 1 \text{ fm}$, proton dan neutron saling menolak dengan cukup kuat sehingga tidak mungkin ditemukan pion dalam rentang ini. Pada jarak $1 \sim 2 \text{ fm}$ merupakan bagian utama gaya, yang mana terdapat pertukaran meson skalar, yaitu jenis π , ρ , ω dan σ meson. Dan pada jarak $r > 2 \text{ fm}$ terdapat pertukaran pion. Pada jarak yang cukup jauh, $r \rightarrow \infty$, proton dan neutron akan mengalami gaya tarik-menarik sampai pada

jarak tertentu sebelum gaya tolak-menolak mulai muncul. Dari variasi jarak interaksi diperoleh beberapa jenis meson yang dipertukarkan.



Gambar 2. Potensial Interaksi Proton dan Neutron

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Interaksi proton dan neutron menghasilkan inti baru, yaitu deutron. Dalam interaksinya, proton dan neutron saling mempertukarkan jenis partikel elementer, yaitu salah satunya adalah π -meson atau pion. Pertukaran partikel inilah yang merupakan kekuatan gaya inti untuk saling “berikatan” untuk membentuk inti baru. Pion yang dihasilkan dalam jarak interaksi proton dan neutron sekitar > 1 fm. Sedangkan massa pion diperoleh $140,65 \text{ MeV}/c^2$ karena dalam terapi pion dibutuhkan pion yang dihasilkan dalam jangkauan yang sangat pendek untuk membunuh sel kanker.

Saran

Penelitian ini merupakan penelitian yang sangat kompleks karena melibatkan partikel yang “tidak nampak” oleh mata telanjang dan memiliki aplikasi dalam bidang kedokteran. Oleh karena tidak nampak oleh mata telanjang, maka diperlukan suatu pemodelan yang sangat akurat yang berkaitan dengan interaksi radiasi (partikel pion) dengan materi (tubuh manusia).

DAFTAR PUSTAKA

Beiser, A, 1987, *Concept of Modern Physics*, McGraw Hill Inc., Singapore

Cooke, J. R. and G. A. Miller.2002. Pion-only, chiral light-front model of the deuteron.*Phys.Rev. C65 067001*

Eisenberg, J.M., and W. Greiner, 1986, *Nuclear Theory; Microscopic Theory of The Nucleus*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, Netherlands

- Forest, J.L., 2000, Effects of Nonlocal One-Pion-Exchange Potential in Deuteron, *Phys. Rev C61*, 034007
- Gasiorowicz, 2003, *Quantum Physics* 3rded, John Wiley and Sons, Inc., New York, USA.
- Hanhart, C., 2007, Pion Reactions on Two-Nucleon Systems. *arXiv:nucl-th/0703028v1*
- Littlefield T.A. and Thorley N., 1979, *Atomic and Nuclear Physics, an Introduction*, p.385-391, Van Nostrand Reinhold Co., New York.
- R. Yosi Aprian Sari, 2011 "Sistem Dua Nukleon; Deuteron sebagai Sistem Terikat (p, n) pada Potensial Lokal" *Jurnal Media Fisika*, Vol 10 / No 2 / Mei 2011, ISSN: 1412-5676.
- R. Yosi Aprian Sari, Supardi. Agung BSU, Arief Hermanto (2012) "Dinamika Pertukaran Partikel Pada Interaksi Nukleon-Nukleon dalam Potensial Lokal" *Journal Indonesian Journal of Applied Physics (IJAP)* Vol 02 / No 1 / April 2012, ISSN: 2089-0133, <http://ijap.mipa.uns.ac.id>.
- Rho, M., and D. Wilkinson, 1979, *Mesons in Nuclei*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, Netherlands.
- Thomsen D.E., 1978, Pions in Tumor Therapy, *Science News*; 12/9/1978, Vol. 114 Issue 24, p.410-414
- Valderraman, M. P. and E. R. Arriola. 2005. Renormalization of the Deuteron with One Pion Exchange. *Phys.Rev.* C72:054002
- Wong, S.S.M., 1990. *Introductory Nuclear Physics*, Prentice Hall: New Jersey