

PERHITUNGAN BESARAN-BESARAN FISIS STATIS DAN PERTUKARAN PION TUNGGAL DALAM INTERAKSI PROTON-NEUTRON PADA POTENSIAL REID

(CALCULATION OF STATIC PHYSICAL QUANTITIES AND THE SINGLE PION EXCHANGE IN PROTON-NEUTRON INTERACTION FOR REID POTENTIAL)

R. Yosi Aprian Sari¹, Muslim², Arief Hermanto²
¹Universitas Negeri Yogyakarta (ryosia@uny.ac.id)
²Universitas Gadjah Mada

ABSTRAK

Telaah teoretis interaksi sistem dua nukleon yang berupa proton dan neutron yang terikat akibat suatu potensial tak sentral $V(\vec{r})$ yang menghasilkan keadaan terikat suatu inti yang dikenal sebagai *deuteron*, dan menghasilkan sejumlah besaran-besaran fisis statis deuteron serta perkiraan massa pion netral.

Interaksi proton dan neutron dalam penggambaran Yukawa diperoleh melalui analisis simetri dan teori medan meson. Interaksi antara dua nukleon melalui pertukaran meson bertanggung jawab terhadap adanya ikatan inti. Dalam penelitian ini digunakan bentuk potensial Reid teras keras (*hardcore*) dan teras lunak (*softcore*) yang memuat bagian sentral maupun tensor dan mengandung faktor Yukawa, $e^{-\mu r}/r$.

Dengan menggunakan potensial Yukawa termodifikasi, beberapa besaran fisis statis deuteron, yaitu energi ikat, fungsi gelombang, momen dwikutub magnetik, momen caturkutub listrik dan juga massa pion dapat ditentukan dengan menggunakan program komputer rakitan sendiri diperoleh hasilnya untuk potensial *hardcore* diperoleh sebagai energi ikat $E_B = 2,2427356$ MeV, momen dwikutub magnetik $\mu_d = 0,856521 \mu_N$, momen caturkutub listrik $Q_d = 0,002913967$ b dan massa pion $m_\pi = 122,132121$ MeV/c². Untuk potensial *softcore* diperoleh nilai energi ikat $E_B = 2,2314214706$ MeV, momen dwikutub magnetik $\mu_d = 0,8556642532 \mu_N$, momen caturkutub listrik $Q_d = 0,002894365788$ b dan massa pion $m_\pi = 125,2623232$ MeV/c². Perbandingan hasil-hasil ini dengan data eksperimental yaitu energi ikat $E_B = (2,22457312 \pm 0,00000002)$ MeV, momen dwikutub magnetik $\mu_d = (0,8574376 \pm 0,0000004 \mu_N)$, momen caturkutub listrik $Q_d = (0,00288 \pm 0,00002)$ b dan massa pion netral $m_\pi = (134,9745 \pm 0,0016)$ MeV/c² cukup memuaskan.

Kata kunci: deuteron, faktor Yukawa, potensial Reid, pertukaran pion

ABSTRACT

The interaction in a two nucleon system consisting of a bound proton and neutron via a non-central potential $V(\vec{r})$ resulting in a bound state known as the deuteron, has been investigated theoretically by solving the corresponding eigenvalue problem numerically and generating a number of deuteron static physical quantities and estimation of pion mass.

The two-nucleon interaction based on Yukawa picture is obtained through symmetry arguments on meson field. The interaction mediated by exchanges of various mesons is responsible as the major component contributing to the nuclear binding. In this investigation, the Reid potentials (hardcore and softcore) are used containing both a central and tensor parts and characterized by the Yukawa factor, $e^{-\mu r}/r$.

From the modified Yukawa potential various static physical quantities of deuteron, such as its binding energy, wave function components, magnetic dipole moment, electrical quadrupole moment, as well as the neutral pion mass can be computed using a specifically prepared computer program. The results obtained for the hardcore potential are as follows: the binding energy $E_B = 2,22427356$ MeV, magnetic dipole moment $\mu_d = 0,856521 \mu_N$, electrical quadrupole moment $Q_d = 0,002913967$ b and the pion mass $m_\pi = 122,132121$ MeV/c². And for the softcore potential we find the binding energy $E_B = 2,2314214706$ MeV, magnetic dipole moment $\mu_d = 0,8556642532 \mu_N$, electrical quadrupole moment $Q_d = 0,002894365788$ b, and the pion mass $m_\pi = 125,2623232$ MeV/c². The comparison between these resulting values match satisfactorily with the available experimental data which are binding energy $E_{B_e} = (2,22457312 \pm 0,00000002)$ MeV, magnetic dipole moment $\mu_{d_e} = (0,8574376 \pm 0,0000004) \mu_N$, electrical quadrupole moment $Q_{d_e} = (0,00288 \pm 0,00002)$ b, and neutral pion mass $m_{\pi_e} = (134,9745 \pm 0,0016)$ MeV/c².

Keywords: deuteron, Yukawa factor, Reid potential, static quantities, pion exchange

BAB I

PENDAHULUAN

1. Latar Belakang Masalah

Dalam inti, terjadi interaksi nukleon-nukleon (dua nukleon atau lebih) yang dapat berupa interaksi kuat, interaksi elektromagnetik dan interaksi lemah yang menentukan sifat-sifat atau perilaku inti meliputi fungsi keadaan, aras energi dan beberapa besaran mendasar lain. Besaran-besaran tersebut dapat berupa besaran statis seperti paritas, momentum sudut total, momen dwikutub magnet, momen caturkutub listrik dan lain-lain, maupun besaran dinamis (yang terkait dengan waktu) seperti proses peluruhan, eksitasi dan lain-lain. Ketiga interaksi ini bersama-sama dengan interaksi gravitasi dikenal sebagai interaksi fundamental (Walet, 1999; Mulders & Ubachs, 2003; Basdevant, *et al.*, 2005).

Interaksi dua nukleon dapat berwujud interaksi proton-proton, neutron-neutron dan proton-neutron. Pada interaksi proton-neutron pada keadaan terikat dihasilkan inti baru yang disebut *deuteron*. Deuteron merupakan sistem yang hanya memiliki satu keadaan terikat. Deuteron tak memiliki keadaan tereksitasi. Dalam interaksinya, proton dan neutron mengalami proses yang disebut pertukaran meson di antara mereka. Pertukaran meson diusulkan oleh Yukawa pada tahun 1935 yang dikenal sebagai *Teori Medan Meson*. Yukawa menyatakan bahwa terdapat partikel dengan parameter massa antara massa elektron dan massa nukleon yang bertanggung jawab atas adanya gaya inti. Partikel tersebut dikenal sebagai *pion* (Weber & Ligterink, 2005; Hanhart, 2007, & Lingzhi, *et al.*, 2007). Pion dapat bermuatan (π^+ , π^-) atau netral (π^0), ketiganya membentuk triplet isospin dengan $T = 1$. Pion ini merupakan anggota kelompok partikel elementer berinteraksi kuat (hadron) yang mempunyai massa menengah dan secara kolektif disebut *meson*; pion adalah singkatan dari π -meson (Wong, 1990; Valderrama, & Arriola, 2005; Basdevant, *et al.*, 2005).

2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana memahami interaksi nukleon-nukleon, dalam hal ini berupa interaksi dua nukleon yang berwujud proton dan neutron dan semua aspek yang terjadi didalamnya?
2. Bagaimana nilai-nilai besaran-besaran fisis statis yang timbul dari butir 1 dengan menggunakan program komputer?

3. Tujuan Penelitian

1. Memahami interaksi nukleon-nukleon, dalam hal ini berupa interaksi dua nukleon yang berwujud proton dan neutron dan semua aspek yang terjadi didalamnya.
2. Mencari besaran-besaran fisis statis yang timbul dari butir 1 dengan menggunakan program komputer.

4. Manfaat Penelitian

1. Mengetahui interaksi nukleon-nukleon beserta aspek yang terjadi dalam interaksi tersebut.
2. Mengetahui nilai besaran-besaran fisis statis yang timbul dari interaksi nukleon-nukleon.

BAB II METODE PENELITIAN

Momentum sudut total deuteron $\hat{\mathbf{J}}$ terdiri dari dua komponen spin tunggal proton dan neutron, yaitu S_p dan S_n , yang masing-masing memiliki bilangan kuantum spin $\frac{1}{2}$, dan momentum sudut orbital $\hat{\mathbf{L}}$ kedua nukleon yang mengelilingi pusat massa. Jadi, $\hat{\mathbf{J}} = \hat{\mathbf{S}}_p + \hat{\mathbf{S}}_n + \hat{\mathbf{L}}$. Sebagai vektor momentum sudut, momentum sudut total $\hat{\mathbf{J}}$ mempunyai bentuk kuadrat, $\hat{\mathbf{J}}^2$, dengan spektrum diskret, $\hat{\mathbf{J}}^2 \Rightarrow J(J+1)\hbar^2$. Untuk deuteron, $J = 1$ (Ballentine, 1998).

Spin proton dan neutron dapat paralel ($\uparrow\uparrow$) dengan bilangan kuantum spin total $S = 1$, atau anti-paralel ($\uparrow\downarrow$) dengan $S = 0$. Paritas bagi keadaan kuantum dengan bilangan kuantum momentum sudut orbital L , adalah $(-1)^L$. Dari reaksi: ${}^1\text{H} + n \rightarrow {}^2\text{H} + \gamma$, deuteron diketahui memiliki paritas genap. Dari eksperimen diketahui spin deuteron pada keadaan dasar bernilai 1. Nilai $[L, S]$ yang mungkin adalah $[0, 1]$ dan $[2, 1]$ untuk memperoleh nilai $J = 1$ secara serempak. Pada deuteron, keadaan $L = 0$ lebih dominan daripada keadaan $L = 2$.

Untuk $S = 0$ (spin singlet), nilai L yang mungkin adalah $L = J$; dan untuk $S = 1$ (spin triplet), L dapat memiliki tiga nilai yang mungkin, yaitu J dan $J \pm 1$. Dua nilai terakhir memiliki paritas perlawanan terhadap nilai $L = J$. Untuk sistem dua nukleon (deuteron) nilai isospin total $T = 0$ dan proyeksinya $M_T = 0$. Dengan demikian, swafungsi untuk $S = 1$ dan paritas $\pi = -(-1)^L$ hanya tersusun oleh fungsi gelombang terkopel,

$$\left. \begin{aligned} \frac{u}{r} |L = J - 1, S = 1, J = 1, M = 1, T = 0, M_T = 0\rangle &\Rightarrow \text{keadaan - S} \\ + \frac{w}{r} |L = J + 1, S = 1, J = 1, M = 1, T = 0, M_T = 0\rangle &\Rightarrow \text{keadaan - D} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

tetapi swafungsi untuk $L = J$ ($S = 0$ atau $S = 1$) dan paritas $\pi = (-1)^L$ tidak terkopel dan dapat ditulis

$$\frac{u}{r} |L = J, S, J, M, T, M_T\rangle. \quad (2)$$

Jadi, secara lengkap fungsi gelombang deuteron berbentuk

$$\begin{aligned} |\psi\rangle = & \frac{u}{r} |L = 0, S = 1, J = 1, M = 1, T = 0, M_T = 0\rangle \\ & + \frac{w}{r} |L = 2, S = 1, J = 1, M = 1, T = 0, M_T = 0\rangle \end{aligned} \quad (3)$$

Persamaan dari fungsi gelombang radial terkopel (u dan w) dapat ditulis dalam bentuk persamaan Schrödinger untuk keadaan terikat dengan $E < 0$ (Greiner & Maruhn, 1995, Negele & Vogt, 2002),

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2}{dr^2} u(r) + \frac{m^*}{\hbar^2} [E - V_C(r)] u(r) - \sqrt{8} \frac{m^*}{\hbar^2} V_T(r) w(r) &= 0 \\ \frac{d^2}{dr^2} w(r) + \frac{m^*}{\hbar^2} \left[E - \frac{6\hbar^2}{m^* r^2} - V_C(r) + 2V_T(r) \right] w(r) - \sqrt{8} \frac{m^*}{\hbar^2} V_T(r) u(r) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4),$$

dengan m^* adalah massa tereduksi, $V_C(r)$ adalah potensial sentral dan $V_T(r)$ adalah potensial tensor untuk bentuk *hardcore* dan *softcore* menurut model potensial Reid pada triplet isospin $T = 0$ (Eisenberg & Greiner, 1986; Krutov, *et al.*, 2006):

a. untuk potensial *hardcore* ($h = 10,463$ MeV dan $x = \mu r$ dengan $1/\mu = \hbar/m_\pi c$

yang merupakan panjang gelombang Compton-pion dengan (m_π) adalah massa pion dan r dalam orde fm = 10^{-15} m).

$$V_C(r) = -hx^{-1} (e^{-x} + 387,4e^{-6x})$$

$$V_T(r) = -hx^{-1} \left[(1 + 3x^{-1} + 3x^{-2}) e^{-x} - (59,968 + 18x^{-1} + 3x^{-2}) e^{-6x} \right] - 5,33e^{-3x}$$

b. untuk potensial *softcore*:

$$V_C(r) = -hx^{-1} e^{-x} + 102,012x^{-1} e^{-2x} - 2915x^{-1} e^{-4x} + 7800x^{-1} e^{-6x}$$

$$V_T(r) = -\hbar x^{-1} \left[(1 + 3x^{-1} + 3x^{-2})e^{-x} - (12x^{-1} + 3x^{-2})e^{-4x} \right] + 163x^{-1}e^{-4x}.$$

Sifat-sifat potensial antarnukleon dapat dijelaskan secara kuantitatif oleh Yukawa dan disempurnakan oleh kelompok Paris dan kelompok Bonn (Wong, 1990) dengan ditandai oleh adanya potensial pertukaran meson yang menyebabkan interaksi nukleon-nukleon yang sebagian besar di dalam potensial tersebut terjadi pertukaran π -meson atau pion. Kontribusi pertukaran ini terkait pada prinsip ketakpastian Heisenberg, yaitu mempunyai kuat potensial pada jarak $\hbar/m_\pi c$ ($\approx 1,4$ fm) dari pusat. Selain interaksi kuat yang merupakan komponen terbesar dari pertukaran pion, terdapat interaksi lain, berupa interaksi elektromagnetik dan interaksi lemah yang terlibat didalamnya, misalnya pada peluruhan kaon K^+ (Ivanov, *et al.*, 1997, & Krutov, *et al.*, 2002).

1. Diskretisasi Persamaan Terkopel

Secara matematis, fungsi gelombang deuteron untuk gerak relatif memenuhi sepasang persamaan diferensial orde dua terkopel, yaitu fungsi gelombangnya merupakan swafungsi operator diferensial. Pada keadaan dasar, fungsi gelombang deuteron terkait dengan bilangan kuantum momentum sudut orbital $L = 0$ (3S_1) untuk $u(r)$, dan $L = 2$ (3D_1) untuk $w(r)$; energi ikat deuteron, E_B , merupakan swanilai pada kedua persamaan terkopel tersebut. Fungsi gelombang keadaan terikat dan energi ikat deuteron dapat diperoleh dengan menyelesaikan pers. (4) secara numerik dan kemudian dihitung besaran momen dwikutub magnetik (μ_d) dan momen caturkutub listrik (Q_d) yang merupakan sifat-sifat statik inti sebagai partikel bebas dan massa pion.

Nilai momen dwikutub magnet (μ_d), dan momen caturkutub listrik deuteron (Q_d), dapat dihitung dari persamaan:

$$\mu_d = (\mu_p + \mu_n) - \frac{3}{2}(\mu_p + \mu_n - \frac{1}{2}) \int_0^\infty w^2(r) dr \quad (5a)$$

$$Q_d = \frac{1}{10} \sqrt{2} \int_0^\infty \left(uw - \frac{1}{4} \sqrt{2} w^2 \right) r^2 dr. \quad (5b)$$

dan massa pion (m_π) dapat diperkirakan dengan mengambil gradien semilog dari potensial sentral deuteron (Schiffer, *et al* 1999).

Pers. (4) tidak dapat diselesaikan secara analitik, dan hanya dapat diselesaikan melalui komputasi numerik. Dengan diskretisasi dan penskalaan, yaitu menjadikan kedua persamaan tersebut tidak berdimensi, maka pers. (4) menjadi

$$\frac{d^2u}{dr^2} + [E - V_{C1}]u - \sqrt{8} V_T w = 0 \quad (6a)$$

$$\frac{d^2w}{dr^2} + \left[E - \frac{6}{r^2} - V_C(r) + 2V_T(r) \right] w - \sqrt{8} V_T u = 0. \quad (6b)$$

2. Syarat Batas Persamaan Terkopel

Dengan menggunakan metode Masalah Nilai Batas (MNB) lewat Metode Selisih Hingga (MSH), dengan mengubah persamaan diferensial menjadi persamaan aljabar, dalam sistem persamaan swanilai yang linear yang berlaku dalam interval $a \leq r \leq b$, dengan syarat batas $u(a) = u(b) = w(a) = w(b) = 0$ untuk potensial teras lunak (*softcore*) dan $u(a) = w(a) = r_c$, $u(b) = w(b) = 0$ untuk potensial teras keras (*hardcore*).

Setelah diubah ke dalam bentuk persamaan aljabar yang identik dengan dua persamaan simultan, selanjutnya dapat dibuat dalam bentuk matriks besar \tilde{M} berukuran $(2N-2)$ yang memuat bentuk potensial sentral dan potensial tensor,

$$\tilde{M}\tilde{\Phi} = \lambda \tilde{\Phi} \quad (7)$$

adalah persamaan swanilai dengan λ adalah seperangkat swanilai dan $\tilde{\Phi}$ adalah seperangkat vektor yang memuat informasi $u(r)$ dan $w(r)$ yang nilainya tidak nol (real atau kompleks).

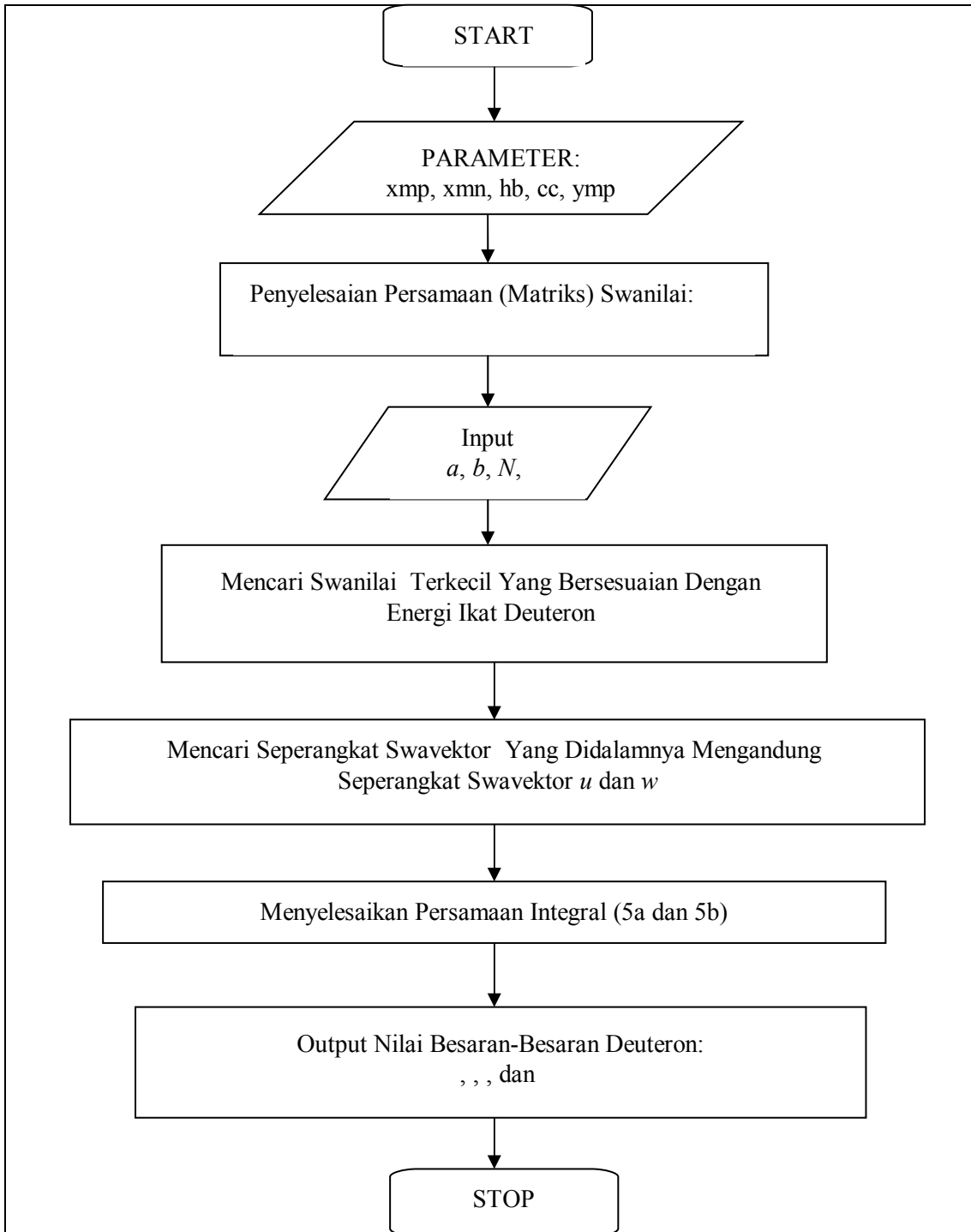
Deuteron merupakan sistem yang hanya memiliki satu keadaan terikat. Deuteron tidak memiliki keadaan tereksitasi. Jadi, energi ikat deuteron (E_B) bersesuaian dengan swanilai terkecil (Valderrama, & Arriola, 2005), dari

seperangkat swanilai pada pers. (7). Untuk mendapatkan swanilai terkecil dapat digunakan metode pangkat invers, yaitu dengan menganggap swanilai terkecil dari matriks \tilde{M} adalah real dan berbeda antara satu swanilai dengan swanilai lainnya (Nakamura, 1993),

$$|\lambda_1| < |\lambda_2| \dots \leq |\lambda_{N-1}| \leq |\lambda_N|. \quad (8)$$

Syarat normalisasi untuk komponen- 3S_1 dan 3D_1 keadaan dasar deutron,

$$\int_0^{\infty} [u^2(r) + w^2(r)] dr = 1. \quad (9)$$



Gambar 1. Diagram Alir (*flowchart*) Penyelesaian Persamaan Schrödinger Terkopel Untuk Deuteron

BAB III

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

1. Dengan menggunakan program komputer, dua persamaan diferensial terkopel dapat diselesaikan, sehingga diperoleh nilai besaran deuteron:

Tabel 1
Besaran-Besaran Fisis Statis Deuteron Dan Massa Pion Pada Potensial Reid
(Potensial Yukawa Termodifikasi)

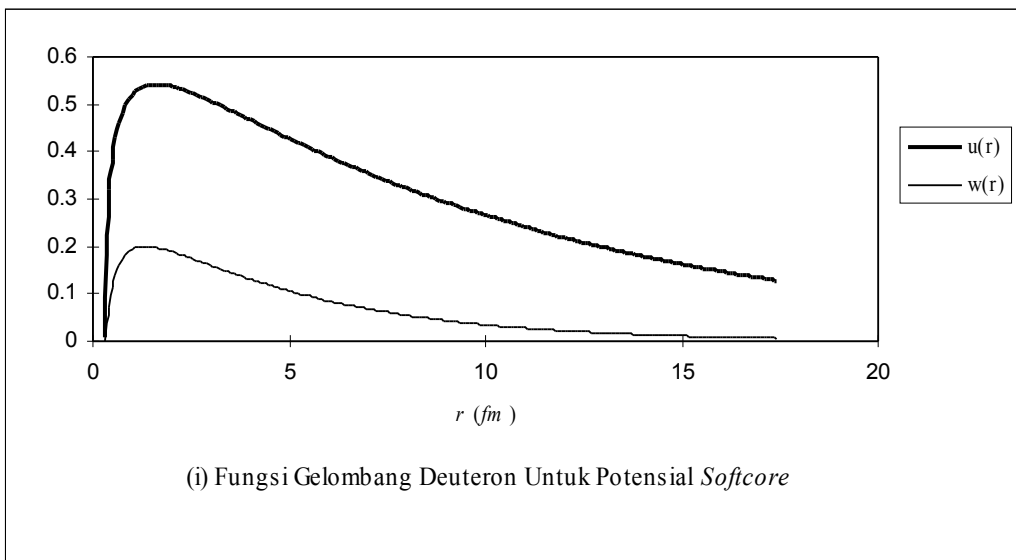
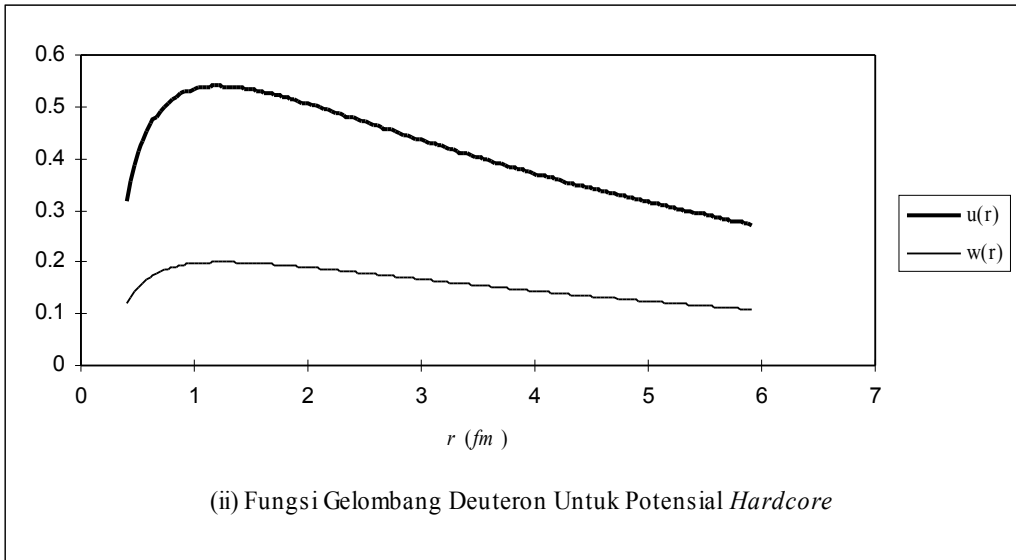
Keadaan Dasar	Nilai		
	Eksperimen (Wong, 1990; Basdevant, et al., 2005)	Komputasi	
		Hardcore	Softcore
Energi Ikat (E_B) MeV	- (2,22457312 $\pm 0,00000022$)	- (2,2427356) (0,82 %)	- (2,2314214706) (0,31%)
Momen Dwikutub Magnetik (μ_d) μ_N	(0,8574376 $\pm 0,0000004$)	(0,856521) (0,11 %)	(0,8556642532) (0,21 %)
Momen Caturkutub Listrik (Q_d) b	(0,00288 $\pm 0,00002$)	(0,002913967) (1,18 %)	(0,002894365788) (0,50 %)
Panjang Gelombang Compton ($1/\mu$) fm^{-1}	(1,414)	(1,6167) (14,36 %)	(1,5763) (11,48 %)
Massa Pion Netral (m_{π^0}) MeV/c^2	(134,9745 $\pm 0,0016$)	(122,132121) (9,51 %)	(125,2623232) (7,20 %)

Keterangan: Nilai yang di dalam kurung pada kolom komputasi adalah persentase selisih dengan nilai eksperimen.

2. Bentuk fungsi gelombang lebar Core deuteron dari hasil komputasi ditunjukkan pada tabel dan gambar di bawah ini:

Tabel 2
Lebar Core Deuteron

		Softcore	Hardcore
Lebar Core (r_c)	Komputasi	0,315 fm	0,40 fm
	Eksperimen	0,30 fm	0,38383 fm



- a. Dari data eksperimen, pada potensial *hardcore* terdapat gaya tolak (*repulsive*) yang sangat kuat, pada jarak yang cukup pendek, $0 \leq r \leq r_c = 0,38383$ fm; dengan menggunakan komputasi diperoleh gaya tolak tersebut mulai pada jarak $r_c = 0,4$ fm (lihat tabel 2). Berarti pada daerah $0 \leq r \leq r_c$ merupakan dinding potensial tinggi tidak terhingga sehingga dengan kebolehjadian untuk mendapatkan partikel dalam interval tersebut adalah nol.
- b. Pada potensial *softcore* yang merupakan bentuk sederhana dari potensial *hardcore*, dianggap tidak ada gaya tolak (*repulsive*), sehingga dengan

demikian fungsi gelombang deuteron secara teoretis dimulai dari daerah $r \rightarrow 0$. Dari data eksperimental, diperoleh $r = 0,3$ fm dan dari komputasi diperoleh $r = 0,315$ fm untuk potensial *softcore* (lihat tabel 2).

3. Sumbangan keadaan-*D* deuteron untuk potensial *softcore* dan *hardcore*

dapat dihitung dari persamaan $p_D = \int_{r_c}^{\infty} w^2(r) = -\frac{2}{3} \frac{\mu_D - (\mu_p + \mu_n)}{\mu_p + \mu_n - \frac{1}{2}}$ dan hasilnya

dapat dibandingkan dengan data eksperimen:

Tabel 3
Persentase Sumbangan Keadaan-*D* Deuteron

		Hardcore	Softcoree
Sumbangan Keadaan- <i>D</i>	Komputasi	4,06 %	4,21 %
	Eksperimen	4 - 7 %	
Sumbangan Keadaan- <i>S</i>	Komputasi	95,94 %	95,79 %
	Eksperimen	93 - 96 %	

4. Pada jarak yang cukup jauh, $r \rightarrow \infty$, terdapat gaya tarik (*attractive*) sehingga kedua partikel akan bergerak saling mendekat. Dari data eksperimen, bagian utama dari gaya tarik terletak pada sekitar radius $\sim 1 - 2$ fm, terjadi pertukaran meson skalar. Pada radius yang lebih jauh lagi, $r > \sim 2$ fm terjadi pertukaran pion tunggal.

Tabel 4
Jarak Terjadinya Pertukaran Meson

Jenis Pertukaran Meson	Meson Skalar	Pion Tunggal
Eksperimen	$\sim 1 - 2$ fm	> 2 fm
<i>Hardcore</i>	$\sim 0,924 - 2,057$ fm	$> 2,057$ fm
<i>Softcore</i>	$\sim 0,96 - 1,919$ fm	$> 1,919$ fm

5. Bila dibandingkan dengan antara hasil komputasi dengan data eksperimen (tabel 4), keadaan dasar deuteron pada bentuk potensial *softcore* mendekati nilai pada eksperimen. Dengan demikian berarti bahwa potensial Reid bentuk *softcore*, potensialnya mendekati bentuk potensial interaksi nukleon-nukleon (proton-neutron) pada eksperimen.

BAB IV

SIMPULAN DAN SARAN

1. SIMPULAN

Deuteron hanya memiliki satu keadaan terikat (*bound state*), hal ini dapat dibuktikan dengan komputasi yang hanya memunculkan satu swanilai terendah, yaitu berupa bentuk grafik yang fungsi gelombangnya konvergen. Swanilai terendah tersebut bersesuaian dengan energi ikat deuteron ($E_B \approx 2,22 \text{ MeV}$). Swanilai yang lebih tinggi bersesuaian dengan keadaan tereksitasi (*excited*) dan fungsi gelombangnya tidak konvergen (berupa bilangan kompleks).

Pada deuteron, terdapat kontribusi pertukaran meson berupa π -meson (atau pion) di antara proton dan neutron, dan juga terdapat percampuran (*mixing*) keadaan- 3S_1 dan 3D_1 pada keadaan terikat (*ground state*).

2. SARAN

Diperlukan pemahaman dan pengetahuan analisa numerik dan pemrograman lanjut untuk memperoleh optimasi program

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih sebanyak-banyak penulis haturkan kepada almarhum bapak Prof. Muslim yang telah banyak memberi kesempatan penulis berdiskusi dan berdebat. Semoga ilmu yang diberikan pada penulis dapat menjadi amal kebaikan bapak yang tiada putus-putusnya.

DAFTAR PUSTAKA

Ballentine, L.E. (1998). *Quantum Mechanics: A Modern Development*. Singapore: World Scientific Publising

Basdevant, J.L., Rich, J., & Spiro, M. (2005). *Fundamentals In Nuclear Physics: From Nuclear Structure to Cosmology*. New York: Springer Science

- Eisenberg, J.M. & Greiner, W. (1986). *Nuclear Theory; Microscopic Theory Of The Nucleus*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company.
- Greiner, W. & Maruhn, J. A. (1995). *Nuclear Models*. Berlin: Springer-Verlag.
- Hanhart, C., (2007), Pion Reactions on Two-Nucleon Systems. *arXiv:nucl-th/0703028v1*
- Ivanov, A.N., Troitskaya, N.I., Faber, M., & Oberhummer, H. (1997). On the relativistic field theory model of the deuteron II. *Nucl.Phys. A617* 414-448
- Krutov, A. F. & V. E. Troitsky, (2002), Relativistic Instant-Form Approach To The Structure Of Two Body Composite Systems, *Phys.Rev. C65* 045501
- Krutov, A. F., Muzafarov, V. M., & V. E. Troitsky, (2006), Analytical Form Of The Deuteron Wave Function Calculated Within The Dispersi Approach, *arXiv:nucl-th/0612014*
- Lingzhi, C., Hourong, P., Hongxia, H., Jialun, P., & F. Wang, (2007), An Alternative approach to the σ -meson-exchange in nucleon-nucleon interaction. *arXiv:nucl-th/0703103*
- Mulders, P.J., & Ubachs, W. (2003). *The Structure of Matter*. Amsterdam: Vrije University
- Nakamura, S., (1993). *Applied Numerical Methods In C*. New Jersey: Prentice-Hall International Inc.
- Negele, J.W. & Vogt, E. (2002). *Advances in Nuclear Physics* vol. 23. New York: Kluwer Academic Publisher
- Schiffer, J. P. *et al* (1999). *Nuclear Physics: The Core Of Matter, The Fuel Of Stars*. Washington, D.C.: National Academy Press.
- Valderrama, M. P., & E. R. Arriola, (2005), Renormalization of the Deuteron with One Pion Exchange, *Phys.Rev. C 72* 054002
- Walet, N. (1999). *Nuclear and Particle Physics*. Manchester: UMIST
- Weber, A, & N. E. Ligterink. (2005). Bound states in Yukawa theory. *arXiv:hep-ph/0506123*
- Wong, S.S.M. (1990). *Introductory Nuclear Physics*. New Jersey: Prentice Hall.