

**LAPORAN PENELITIAN BIDANG ILMU
TAHUN ANGGARAN 2010**



**DINAMIKA KUANTUM INTERAKSI DUA PARTIKEL;
TELAAH INTERAKSI KUAT GAYA INTI**

**Diajukan oleh:
R. Yosi Aprian Sari, M.Si**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA
TAHUN 2010**

**HALAMAN PENGESAHAN
LAPORAN PENELITIAN**

1	Judul Penelitian	:	Dinamika Kuantum Interaksi Dua Partikel; Telaah Interaksi Kuat Gaya Inti
2.	Bidang Penelitian	:	Fisika Komputasi
3.	Ketua Peneliti		
	a. Nama Lengkap dan Gelar	:	R. Yosi Aprian Sari, M.Si
	b. NIP	:	19730407 200604 1 001
	c. Pangkat dan Golongan	:	Penata Muda Tk. I / III b
	d. Jabatan	:	Asisten Ahli
	e. Fakultas / Jurusan / Prodi	:	FMIPA / Pendidikan Fisika / Fisika
	f. Bidang Keahlian	:	Fisika Komputasi
	g. Alamat Kantor & Telpon	:	Jurusan Pendidikan Fisika, FMIPA UNY Karang Malang, Yogyakarta 55281, (0274) 586168 pswt 107
4.	Nama Anggota Peneliti	:	2
5.	Lama Penelitian	:	6 (enam) bulan
6.	Lokasi Penelitian	:	FMIPA UNY
7.	Biaya yang Diperlukan	:	Rp.4.000.000,00 (Empat Juta Rupiah).
8.	Penilaian		
	a.		Pelaksanaan kegiatan penelitian telah / belum sesuai dengan rancangan dalam proposal penelitian.
	b.		Sistematika laporan sudah dapat / belum sesuai dengan ketentuan yang berlaku.
	c.		Hal-hal lain sudah / belum memenuhi persyaratan.
	d.		Laporan dapat / belum diterima.

Peneliti

R. Yosi Aprian Sari, M.Si
NIP. 19730407 20604 1 001

Yogyakarta, 6 Desember 2010
Mengetahui,
BPP FMIPA UNY

Sukiya, M.Si
NIP. 19530204 198303 1 002

Mengetahui,
Dekan Fakultas MIPA UNY

Dr. Ariswan
NIP. 19590914 198803 1 003

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).

$$\left(\left(\pi^0 \right) \right)$$

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 atau netral, 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).

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, tingkat energi dan beberapa variabel lainnya. Ketiga interaksi tersebut bersama-sama dengan interaksi gravitasi

dikenal sebagai empat interaksi fundamental. Empat jenis interaksi tersebut, ditemukan terjalin antara partikel elementer dan dapat menerangkan proses yang dikenal dalam alam semesta dalam segala skala dan ukuran. Interaksi tersebut bersama dengan partikel yang dipengaruhinya, jangkauan aksinya, kekuatan relatifnya dalam situasi yang dapat diperbandingkan dalam Tabel 1.

Tabel 1
Empat Interaksi Pokok [Beiser, 1987]

Interaksi	Partikel Yang Dipengaruhi	Jangkauan	Pertukaran Partikel	Aturan Universum
Kuat	Quark Hadron	$\cdot 10^{-15}$ m	Gluon Meson	Quark mengikat menjadi bentuk nukleon Nukleon mengikat menjadi bentuk atomik inti
Elektromagnetik	Partikel bermuatan	∞	Foton	Penentuan struktur atom, molekul, zat padat dan zat cair; adalah faktor yang penting dalam jagat raya
Lemah	Quark dan Lepton	$\cdot 10^{-17}$ m	Boson Madya	Transformasi menengah dari quark dan lepton; menolong dalam menentukan komposisi inti atom
Gravitasi	Semua	∞	Graviton	Penemuan materi menjadi planet, bintang dan partikel

Menurut teori Yukawa, setiap nukleon terus menerus memancarkan dan menyerap pion yang menyebabkan inti atom tetap utuh meski ada gaya tolak-menolak nukleon yang membangun inti itu. Interaksinya harus cukup kuat namun jangkauannya sangat pendek dan terbatas. Pion yang dipertukarkan adalah berupa partikel “virtual” karena terjadi dalam waktu yang sangat singkat sehingga massa nukleon tidak pernah berubah. Gaya tarik-menarik nukleon yang membangun inti terjadi pada jarak yang agak jauh karena jika tidak demikian, nukleon dalam inti akan menyatu dan Yukawa mendapatkan bahwa hal itu dapat dijelaskan menurut pertukaran partikel (*meson*) antara nukleon, dengan massa partikel yang dipertukarkan sekitar 200 kali massa elektron.

$$V(r) = \frac{e^{-\mu r}}{r}$$

Permasalahan yang dikaji dari penelitian ini adalah bentuk potensial dan kuadrat fungsi gelombang serta keterikatan parameter potensial Yukawa pada keadaan dasar. Adapun bentuk potensial Yukawa adalah dengan μ adalah suatu parameter merupakan konstanta kopling yang menyatakan kekuatan relatif gaya elektromagnetik dari interaksi nukleon-nukleon, dan r_0 merupakan jangkauan terpendek

nukleon-nukleon dalam berinteraksi. Adapun fenomena kritis yang dapat terjadi pada potensial Yukawa yaitu terkait dengan parameter konstantanya (Qian Luo, Yao Li and Kroger, 2005:2).

A. **Identifikasi Masalah**

Berdasarkan latar belakang masalah dapat diidentifikasi permasalahan yaitu:

1. Adanya interaksi dua nukleon, yaitu tanpa mengetahui jenis partikelnya.
2. Adanya kaitan parameter fisis dalam interaksinya dalam potensial tertentu.

B. **Batasan Masalah**

Dalam penelitian ini, permasalahan dibatasi pada pemecahan persamaan Schrödinger satu dimensi yang merupakan persamaan diferensial orde dua pada

keadaan dasar, $L=0$.

C. **Rumusan Masalah**

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana memahami interaksi dua nukleon tanpa mengetahui jenis partikelnya?
2. Bagaimana kaitan parameter fisis dalam interaksinya dalam potensial tertentu?

D. **Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Dapat memahami interaksi dua nukleon tanpa mengetahui jenis partikelnya.
2. Dapat memperoleh kaitan parameter fisis dalam interaksi dalam potensial tertentu.

BAB II KAJIAN PUSTAKA

$$M(\hbar^2)$$

Teori struktur inti berbeda dengan teori struktur atom, mengingat secara prinsip terdapat perbedaan antara gaya-gaya yang terjalin di antara partikel-partikel penyusunnya. Untuk menyelidiki gaya interaksi pada partikel tertentu yang bersifat sentral dan bebas terhadap spin dan dapat diturunkan dari suatu energi potensial yang bersimetri bola sehingga keadaan stasioner memiliki kuadrat momentum sudut sebesar dengan L adalah bilangan bulat tak negatif (0, 1, 2, ...) terhadap pusat gaya, baik untuk sistem atom maupun inti, digunakan persamaan gelombang Schrödinger radial untuk keadaan stasioner berenergi E yang berlaku untuk sistem mikroskopis tanpa spin,

$$\frac{\hbar^2}{2\mu} \frac{d^2 u}{dr^2} + [V(r) - E] u = 0$$

(2.1)

$$\mu = \frac{mM}{m+M}$$

dengan μ adalah massa tereduksi pasangan partikel m dan M ; dan $u(r)$ merupakan bagian radial fungsi gelombang partikel yang bergerak dengan normalisasi

$$\int_0^\infty |u(r)|^2 dr = 1$$

yang dalam fungsi gelombang gerak m relatif terhadap M berikut



yang menghasilkan penyelesaian



, dan (2.2)

dengan



(2.3)



dan yang memenuhi pers. (1). Fungsi sudut memenuhi pers. (3) merupakan fungsi harmonik bola.



Dalam potensial bersimetri bola yang ditimbulkan oleh partikel M yang berjarak r dari m ; L dinamakan bilangan kuantum gerak orbital m terhadap M yang nilainya berupa bilangan bulat positif atau nol; E merupakan energi relatif internal sistem .

Dalam inti terjadi interaksi antar nukleon-nukleon penyusunnya. Jika nukleon-nukleon tersebut adalah proton-proton yang didekatkan, secara elektrostatis proton-proton dalam inti atom akan berusaha saling menjauhkan diri karena adanya pengaruh gaya tolak menolak Coulomb (gaya elektrostatis) yang akan makin besar jika jarak proton-proton makin dekat. Fakta lain menunjukkan bahwa proton-proton seolah-olah menyatu dan terikat bersama dengan sangat kuat pada jarak yang sangat dekat (sekitar 1,4 fm), yang mana secara elektrostatis proton-proton tidak mungkin menyatu. Apapun yang mengikat proton-proton tersebut menjadi sebuah inti, menurut para fisikawan ada gaya yang sangat kuat dan jauh lebih besar dibanding gaya tolak elektrostatis yang menentanginya. Gaya tersebut dinamakan “gaya inti” (gaya kuat). [Yusman Wiyatmo, 2006]

Gaya inti dinamakan gaya kuat (*strong force*) karena gaya ini merupakan gaya paling kuat dari semua gaya yang diketahui. Gaya inti (*strong force*) memiliki jangkauan sangat pendek, yaitu hanya sejauh ukuran inti (sekitar 1,4 fm). Pada jarak lebih dari 1,4 fm gaya ini akan melemah dan akhirnya menjadi nol. Sehingga ketika kedua proton terpisah agak jauh, yang ada hanya gaya tolakan elektrostatis Coulomb, sementara gaya nuklirnya bernilai nol.

Untuk itu para ahli fisika mengusulkan teori tentang *gaya inti*, yaitu gaya tarik menarik antara partikel penyusun inti dengan sifat-sifat :

1. Gaya inti tidak disebabkan oleh muatan partikel atau bukan merupakan gaya listrik.
2. Gaya harus sangat kuat atau harus jauh lebih besar dari pada gaya elektrostatis
3. Gaya inti merupakan gaya dekat artinya gaya ini hanya bekerja jika kedua partikel dalam inti cukup dekat (berada pada jarak tertentu sekitar 10^{-15} m). Jika gaya

inti bekerja juga sampai jarak yang jauh, maka seluruh partikel di jagad raya akan berkumpul menjadi satu, sesuatu yang belum pernah terjadi.

4. Gaya inti tidak bekerja pada jarak yang sangat dekat sekali, karena pada keadaan ini akan berubah menjadi gaya tolak. Jika gaya inti bekerja juga pada jarak yang sangat dekat, maka semua neutron akan menjadi satu.

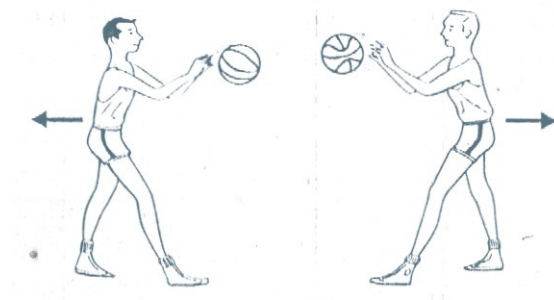
5. Gaya inti antara dua partikel tidak tergantung pada jenis partikelnya. Artinya gaya inti terjadi pada proton-proton, proton-neutron, dan neutron-neutron. [Yusman Wiyatmo, 2006]

Model yang berhasil menjelaskan asal usul gaya berjangkauan pendek ini adalah model gaya tukar (*exchange force*) atau dalam interaksinya proton dan neutron

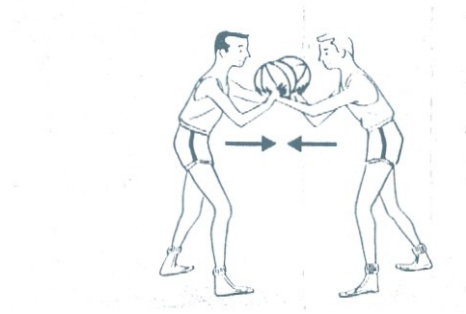
mengalami proses pertukaran *meson* (π -*meson*) di antara mereka. Pertukaran *meson*

diusulkan oleh Yukawa pada tahun 1935 yang dikenal sebagai *Teori Medan Meson*. Menurut model ini, neutron memancarkan sebuah partikel dan sekaligus menariknya dengan gaya yang sangat kuat. Jika partikel tadi menghampiri proton, ia akan tertarik pula oleh proton dengan suatu gaya tarik yang sangat kuat. Proton kemudian memancarkan sebuah partikel yang dapat diserap oleh neutron. Karena proton dan neutron masing-masing menarik partikel yang dipertukarkan tersebut dengan gaya tarik yang kuat, maka mereka seakan saling tarik menarik.

Yukawa menyatakan bahwa terdapat partikel dengan parameter massa antara massa elektron dan massa nukleon yang bertanggung jawab atas interaksi nukleon-nukleon penyusun inti atau adanya gaya inti.



(a) Gaya Tolak Yang Timbul Karena Pertukaran Partikel



(b) Gaya Tarik Yang Timbul Karena Pertukaran Partikel

Gambar 2

Gaya Tarik Dan Tolak Keduanya Dapat Timbul Karena Pertukaran Partikel [Beiser, 1987]

Secara umum, bentuk potensial Yukawa dapat ditulis secara sederhana sebagai



(3)



dengan λ dan masing-masing menunjukkan kuat dan jarak gaya inti. Adapun fenomena kritis yang dapat terjadi pada potensial Yukawa yaitu terkait dengan parameter konstantanya. Untuk $\lambda > 0$, potensial Yukawa dapat tereduksi menjadi potensial Coulomb dan mempunyai jumlah energi ikat tak terhingga. Pada $\lambda = 0$, tidak ada interaksi pada sistem atau sistem berada pada keadaan bebas. Sedangkan $\lambda < 0$, potensial Yukawa dalam keadaan yang sangat berbeda dengan potensial Coulomb, karena mempunyai jumlah energi ikat yang terbatas. Ketika λ sangat besar energi ikat hilang [Xiang Qian Luo. *et.al*, 2005].

BAB III METODE PENELITIAN

Dengan menggunakan analisa dimensi yang bertujuan menyederhanakan proses perhitungan secara numerik, maka perlu dibuat variabel-variabel tak berdimensi. Persamaan Schrodinger radial untuk keadaan stasioner berenergi E yaitu

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \left[\frac{2m}{\hbar^2} (E - U(r)) - \frac{l(l+1)}{2mr^2} \right] u = 0$$

(4)

dengan dan

Langkah pertama yang harus dilakukan adalah dengan penskalaan, yaitu dengan menganggap persamaan Schrödinger dalam bentuk tak berdimensi,

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \left[\frac{2m}{\hbar^2} (E - U(r)) - \frac{l(l+1)}{2mr^2} \right] u = 0$$

(5)

dalam komputasi, besaran yang akan dicari adalah dan yang merupakan besaran tidak berdimensi dalam interval .

Selanjutnya, persamaan diferensial orde dua dari persamaan Schrödinger satu dimensi orde dua diubah menjadi persamaan aljabar simultan, yaitu,

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \left[\frac{2m}{\hbar^2} (E - U(r)) - \frac{l(l+1)}{2mr^2} \right] u = 0$$

(6)

dengan $i = 1, 2, 3, \dots, (N-1)$ dan persamaan aljabar simultan tersebut juga dapat dibuat dalam bentuk matrik tridiagonal dengan mengingat syarat batas awal dan akhir sama dengan 0.

$$\begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & & & \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & & \\ & H_{32} & H_{33} & H_{34} & \\ & & H_{43} & H_{44} & \\ & & & H_{N-2,N-1} & H_{N-1,N-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \vdots \\ u_{N-1} \end{pmatrix} = 0$$

(7)

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Penelitian

Pada penelitian ini diperoleh beberapa hasil sebagai berikut :

1. Karakteristik dan kuadrat fungsi gelombang potensial Yukawa pada keadaan dasar
Hasil penelitian penggambaran karakteristik dan kuadrat fungsi gelombang potensial Yukawa pada keadaan dasar dengan program komputer pada Gambar 3.

Gambar 3.

Pola grafik karakteristik dan kuadrat fungsi gelombang potensial Yukawa pada keadaan dasar

2. Hubungan parameter-parameter potensial Yukawa



Dari penelitian diperoleh hubungan parameter-parameter potensial Yukawa pada keadaan dasar yaitu λ dan α , seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.

Gambar 4.

Hubungan parameter potensial Yukawa pada keadaan dasar



Dari gambar 4. diperoleh hubungan parameter potensial Yukawa (λ dan α) pada

keadaan dasar (α) menggunakan *fitting curve* logaritmik dengan nilai relevansi $R^2 =$

0,999 yaitu:

$$\alpha L=0=0.466 \ln(\lambda)+0.346$$



dengan λ adalah konstanta kopling yang menunjukkan kekuatan gaya elektromagnetik interaksi nukleon-nukleon dan a adalah jangkauan dari interaksi antara nukleon-nukleon.

B. Pembahasan



Pada permasalahan karakteristik, kuadrat fungsi gelombang dan hubungan parameter-parameter potensial Yukawa pada keadaan dasar dari interaksi nukleon-nukleon dapat didekati dengan metode numerik dan diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan dengan Gambar 3 dan Gambar 4. Untuk potensial Yukawa pada keadaan dasar dengan variasi parameternya (λ dan a) dengan nilai berapapun akan didapatkan pola grafik seperti Gambar 3. Pada Gambar 3 menunjukkan potensial Yukawa pada keadaan dasar akan bernilai negatif seiring dengan bertambah (semakin besar) jarak antar nukleon, pada jarak tertentu (besar) potensial akan melemah dan akhirnya menjadi nol. Hal ini menunjukkan bahwa nukleon-nukleon akan saling mengikat dan membentuk sebuah inti dengan kekuatan ikatan tertentu pada potensial yang bernilai negatif tersebut. Sedangkan potensial yang bernilai nol atau positif tidak terjadi ikatan, nukleon-nukleon berada dalam keadaan bebas dan tidak terjadi ikatan untuk membentuk sebuah inti. Pada Gambar 3 juga menunjukkan grafik kuadrat fungsi gelombang dengan puncak yang akan menuju konvergen untuk kuadrat fungsi gelombang keadaan dasar dengan λ , dan kebolehjadian terbesar (nilai probabilitas) nukleon-nukleon berinteraksi dan saling mengikat terletak pada jarak tertentu yang ditunjukkan dengan adanya puncak pada grafik kuadrat fungsi gelombang tersebut.

Potensial Yukawa dikemukakan oleh Hideki Yukawa ditunjukkan sebagai

$$V_r = -\lambda e^{-\alpha r}$$



Dari gambar 4. diperoleh grafik hubungan parameter potensial Yukawa (λ dan a) pada keadaan dasar (α) yaitu:

$$\alpha = 0 = 0.466 \ln(\lambda) + 0.346$$



Dengan λ adalah kekuatan gaya elektromagnetik interaksi nukleon-nukleon dan r adalah jangkauan dari interaksi antara nukleon-nukleon. Sehingga dalam hal ini dapat dilihat juga bahwa pada kekuatan gaya elektromagnetik yang semakin besar, jarak interaksi semakin kecil, maka nukleon-nukleon akan terikat kuat dengan swanilai terkecil tertentu yang semakin besar pula.

Dari teorema Yukawa yang mengatakan bahwa nukleon-nukleon dalam inti saling berinteraksi pada jarak yang sangat dekat dan tidak mungkin menyatu, pada jarak yang sangat dekat tersebut nukleon-nukleon akan saling mengikat. Pada jarak yang lebih besar nukleon-nukleon akan saling tolak menolak.

BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

A. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Interaksi dua partikel dapat dilihat dari karakteristik dan kuadrat fungsi gelombang potensial Yukawa

- a. Bentuk potensial Yukawa pada keadaan dasar menunjukkan potensial akan bernilai negatif seiring dengan bertambah jarak antar nukleon, pada jarak tertentu (besar) potensial akan melemah dan akhirnya menjadi nol. Hal ini menunjukkan bahwa nukleon-nukleon akan saling mengikat dengan kekuatan ikatan tertentu pada potensial yang bernilai negatif tersebut. Sedangkan potensial yang bernilai nol atau positif tidak terjadi ikatan antar nukleon .



- b. Grafik kuadrat fungsi gelombang potensial Yukawa pada keadaan dasar menunjukkan kuadrat fungsi gelombang dengan puncak yang akan menuju konvergen untuk kuadrat fungsi gelombang keadaan dasar dengan , dan kebolehjadian terbesar (nilai probabilitas) nukleon-nukleon berinteraksi terletak pada jarak tertentu yang ditunjukkan dengan adanya puncak pada grafik kuadrat fungsi gelombang tersebut.



2. Hubungan parameter-parameter potensial Yukawa (dan) pada keadaan dasar () ditunjukkan dengan relasi :



DAFTAR PUSTAKA

- Ballentine, L.E. (1998). *Quantum Mechanics: A Modern Development*. Singapore: World Scientific Publishing
- Basdevant, J.L., Rich, J., & Spiro, M. (2005). *Fundamentals In Nuclear Physics: From Nuclear Structure to Cosmology*. New York: Springer Science
- Beiser, A. (1987). *Konsep Fisika Modern* (Terj. The Houw Liong). Jakarta: Erlangga
- 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*
- Krutov, A. F. & V. E. Troitsky, (2002), Relativistic Instant-Form Approach To The Structure Of Two Body Composite Systems, *Phys.Rev. C65 045501*
- 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*
- 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.
- Tannoudji, C.C., B. Diu, and F. Laloë, (1977), *Quantum Mechanics I and II*, 2nd ed., Hermann and John Wiley and Sons, Inc., Paris: France
- 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. (2009). *Bound states in Yukawa theory*. *Few Body Syst.*46: 115 – 138
- Wong, S.S.M. (1990). *Introductory Nuclear Physics*. New Jersey: Prentice Hall.
- Yusman Wiyatmo. (2006). *Fisika Nuklir dalam Telaah Semi-Klasik dan Kuantum*. Yogyakarta : Pustaka Pelajar.
- Xiang-Qian Luo, Yong-Yao Li, Helmut Kröger (2005). *Bound States and Critical Behavior of the Yukawa Potential*. *Sci.China G35* (2005) 631-642