ASIMETRI ISOSPIN PADA MATERI QUARK

Ali Ikhsanul Qauli[1*)],Anto Sulaksono[2**)]

[1,2]Departemen Fisika Universitas Indonesia, Kampus UI Depok, Depok 16424

*)ali.ikhsanul@sci.ui.ac.id
**) anto.sulaksono@sci.ui.ac.id

Abstrak

Kami mengkaji sifat-sifat materi quark dengan menggunakan model asimetri isospin CIDDM (*Confined Isospin Density Dependent Mass*). Model ini cukup akurat dalam menjelaskan pulsar yang memiliki massa sekitar 2 kali massa matahari. Tetapi setelah kami bandingkan dengan hasil perhitungan persamaan keadaan pada pQCD (*perturbative Quantum Chromo Dynamics*) kami menemukan bahwa model asimetri isospin tidak bisa memprediksi secara akurat persamaan keadaan materi quark pada nilai densitas *baryon* yang besar dan temperatur rendah. Di sini kami memberikan beberapa plot dan perbandingan model CIDDM dan perhitungan pQCD.

Abstract

We review quark matter properties using of isospin asymmetric in confined-dependent-mass (CIDDM) model. This model is well enough for describing large mass pulsar by a quark stars. But after comparing its equation of state with the result from perturbative QCD calculation then we find that CIDDM model cannot precisely predicts equation of state of quark matter at high baryon density and low temperature. Here we give several plots and comparison to the pQCD calculation.

Keywords: *Quark Matter, isospin, baryon density, bag, pQCD.*

1. Pendahuluan

Bintang neutron dipercaya sebagai hasil akhir dari ledakan supernova [1] dan merupakan bintang dengan densitas massa yang sangat besar. Namun ilmuan percaya bahwa bintang neutron bukanlah satu-satunya hasil akhir dari ledakan supernova, melainkan ada jenis bintang lain yang lebih besar denistas massanya yakni bintang quark.

Bintang quark bisa terbentuk dikarenakan densitas massa yang sangat besar dapat memecah neutron menjadi quark-quark penyusunnya. Dari beberapa penelitian menunjukkan bahwa materi quark, sebagai penyusun bintang quark, memiliki kestabilan yang lebih baik dibandingkan dengan materi nuklir [2], sehingga sangat dimungkinkan untuk terbentuk pada pulsar.

Selanjutnya dengan model *Bag* MIT, ilmuwan mempelajari struktur dan dinamika bintang quark [3,4,5]. Selama beberapa waktu model *Bag* MIT mengalami banyak pengembangan sampai dikenal suatu model CDDM (*Confined Density Dependent Model*) yang mengikutsertakan densitas materi quark pada perumusan massa quark. Model ini digunakan pada materi quark yang hanya terdiri dari quark *up* dan *down* [6], namun kemudian juga digunakan untuk materi quark dengan quark *up*, *down*, dan *strange*.

Dari semua model tersebut, terdapat suatu batasan, bahwa materi quark yang terdiri dari 2 quark (u dan d) harus memiliki energi minimum tiap *baryon* yang lebih besar dari 930 MeV, sedangkan untuk 3 quark (u, d dan s) harus lebih rendah dari 930 MeV [2,3].

Pada model *Bag* MIT, quark diasumsikan bermassa tetap dan bergerak bebas dalam *bag*. Sedangkan pada model CDDM massa quark dengan densitas *baryon*n_B didefinisikan sebagai:

$$m_q = m_{q0} + \frac{D}{n^z{}_B} \quad , \tag{1.1}$$

Dengan suku D/n_B^zadalah suku interaksi quark dan bentuk ini adalah bentuk fenomenologis. Parameter Dditentukan dari argumen kestabilan materi quark, sedangkan parameter $z$merupakan parameter skala quark, yang telah dibuktikan pada referensi [7] bahwa nilainya adalah $z = 1/3$.

Dari defnisi massa quark, nantinya bisa dicari bagaimana persamaan keadaan bintang quark, untuk suhu nol, perumusan densitas energi materi quark adalah

$$\varepsilon = \sum_i \frac{g_i}{2\pi^2} \int_{\nu_i} \sqrt{k^2 + m^2}\, k^2 dk + B\,, \tag{1.2}$$

dengan $i = u, d, s$ kemudian B adalah konstanta *bag* dan g_i adalah faktor degenerasi untuk quark yang bernilai 6. Kemudian dengan menggunakan relasi termodinamika [8] akan diperoleh

$$P = \sum_i n_i \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial n_i} - \varepsilon \,, \qquad (1.3)$$

dengan faktor $\partial \epsilon_i / \partial n_i$ yang dikenal sebagai potensial kimia.

Pada penelitian lainnya, perhitungan pQCD juga memprediksi bagaimana persamaan keadaan dari materi quark pada nilai densitas *baryon* yang besar, dari referensi [9] perumusan tekanan materi quark pada kondisi tersebut adalah

$$\frac{P_{QCD}(\mu_B)}{P_{SB}(\mu_B)} = \left(c_1 - \frac{d_1 X^{-\nu_1}}{(\mu_B / GeV) - d_2 X^{\nu_2}} \right) \qquad (1.4)$$

dengan nilai konstanta-konstanta di atas adalah $c_1 = 0.9008$, $d_1 = 0.5034$, $d_2 = 1.452$, $\nu_1 = 0.3553$, $\nu_2 = 0.9101$ dan nilai X bisa divariasikan dari 1 sampai 4.

Terdapat besaran tekanan materi quark (3 quark) yang bebas dan tidak bermassa yang dirumuskan sebagai

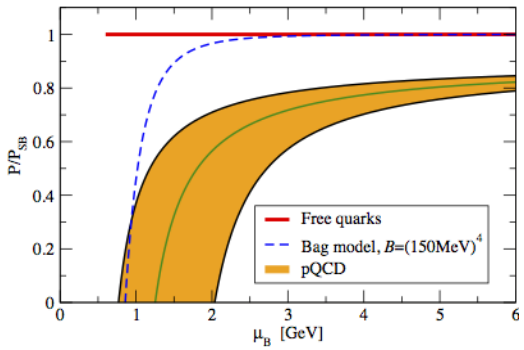
$$P_{SB}(\mu_B) = \frac{3}{4\pi^2}\left(\frac{\mu_B}{3}\right)^4 , \qquad (1.5)$$

dengan

$$\mu_B = \mu_u + \mu_d + \mu_s \,. \qquad (1.6)$$

Kemudian jika persamaan perbandingan tekanan tersebut diplot, akan diperoleh grafik seperti pada Gambar 1.

Pada penelitian ini, penulis menggunakan model lanjutan dari model CDDM yakni model CIDDM (*Confined Isospin Density Dependent Mass*) dengan batasan materi quark pada temperatur rendah dan densitas *baryon* rendah. Kemudian hasil dari model CIDDM akan dibandingkan dengan hasil dari perhitungan pQCD pada daerah nilai densitas *baryon* yang besar untuk mengetahui seberapa baik model CIDDM bisa memprediksi persamaan keadaan bintang quark.



Gambar 1. *Prediksi tekanan pada materi quark, dari referensi [9].*

2. Materi Quark dengan Model CIDDM

86 Model CIDDM menambahkan suku interaksi pin pada massa quark dari model CDDM, ngga perumusan massa quark untuk model CIDDM bisa ditulis sebagai

$$m_q = m_{q0} + \frac{D}{n_B^{1/3}} - \delta \tau_q D_I n_B^{\alpha} e^{-\beta n_B} \,, \qquad (2.1)$$

dengan D_I, α, dan β adalah parameter yang menentukan kebergantungan pada isospin, δ adalah parameter asimetri isospin, τ_q adalah bilangan kuantum isospin quark, $\tau_q = 1$ untuk quark *up*, $\tau_q = -1$ untuk quark *down*, dan $\tau = 0$ untuk quark *strange*.

Densitas *baryon* didefinisikan sebagai

$$n_B = \frac{n_u + n_d + n_s}{3} \,, \qquad (2.2)$$

yang mana *number density* untuk masing-masing quark didefinisikan sebagai

$$n_i = \frac{\nu_i^3}{\pi^2} \,, \qquad (2.3)$$

dimana ν_i adalah momentum Fermi untuk tiap quark $(i = u, d, s)$. Kemudian faktor asimetri isospin didefinisikan sebagai

$$\delta = 3\frac{n_d - n_u}{n_d + n_u} \,, \qquad (2.4)$$

sehingga didapatkan

$$\nu_u = \nu\left(1 - \delta/3\right)^{1/3} \,, \qquad (2.5)$$

$$\nu_d = \nu\left(1 + \delta/3\right)^{1/3} \,. \qquad (2.6)$$

Persamaan keadaan materi quark pada model CIDDM dirumuskan sebagai berikut, dari referensi [10]

$$\varepsilon = \sum_i \frac{g_i}{2\pi^2} \int_{\nu_i} \sqrt{k^2 + m^2} k^2 dk \quad , \tag{2.7}$$

$$P = \sum_{i=u,d,s,e} n_i \mu_i - \varepsilon \, ,$$

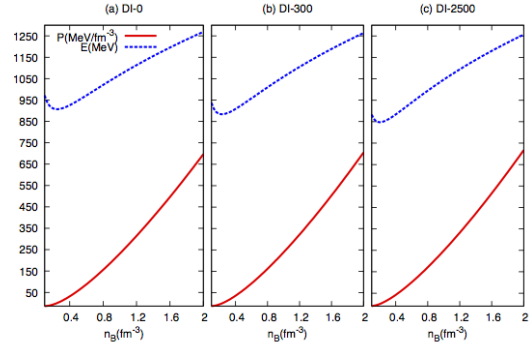
$$\mu_i = \frac{\partial \varepsilon}{\partial n_i} \, , \tag{2.8}$$

(2.9)

dimana ϵ adalah densitas energi quark, P adalah tekanan dan μ adalah potensial kimia. Untuk potensial kimia elektron dirumuskan sebagai

$$\mu_e = \sqrt{\nu_e^2 + m_e^2} \, . \tag{2.10}$$

Kondisi keseimbangan potensial kimia adalah



Gambar 2. *Persamaankeadaanmateri quark denganvariasi $D_I$berdasarkan model CIDDM.*

$$\mu_u + \mu_e = \mu_d = \mu_s \, , \tag{2.11}$$

dan untuk kondisi netralitas bintang quark dirumuskan dalam bentuk

$$\frac{2}{3} n_u = \frac{1}{3} n_d + \frac{1}{3} n_s + n_e \, . \tag{2.12}$$

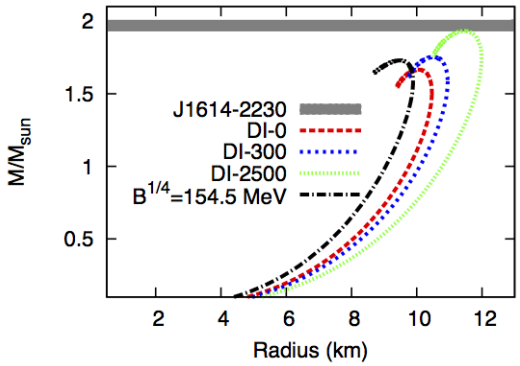
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil perhitungan secara umum terbagi menjadi 2, yakni perhitungan persamaan keadaan materi quark dan perhitungan persamaan TOV untuk memperoleh relasi massa-radius bintang.

Pada perhitungan persamaan keadaan bintang, kami menggunakan beberapa set parameter. Pada parameter $D_I - 0$ kami menggunakan parameter $D_I = 0$, $\alpha = 0$, $\beta = 0$, $D^{1/2} = 156$ MeV, kemudian pada parameter $D_I - 300$ digunakan $D_I = 300$ MeVfm$^{3\alpha}$, $\alpha = 1$, $\beta = 0.1$ fm^3, $D^{1/2} = 151$ MeV dan terakhir untuk set parameter $D_I - 2500$ digunakan $D_I = 2500$ MeVfm$^{3\alpha}$, $\alpha = 0.8$, $\beta = 0.1$ fm^3, $D^{1/2} = 144$ MeV.

Dari hasil plot persamaan keadaan bintang pada Gambar 2. terlihat bahwa energi minimum untuk materi quark yang terdiri dari 3 quark bernilai lebih kecil dari 930 MeV dan hal ini sesuai dengan prediksi referensi [3]. Nilai tekanan pada daerah nilai $n_B \to 0$ menunjukkan nilai negatif sedangkan pada plot energi menunjukkan nilai positif. Hal ini sesuai dengan kriteria model *Bag* MIT yang mengindikasikan hal yang sama [7].

Pada plot relasi massa dan radius bintang pada Gambar 3. terlihat bahwa persamaan keadaan yang kebergantungan pada isospin lebih besar memiliki massa maksimum yang lebih besar. Pada hasil pengamatan massa pulsar PSR J1614-2230 dengan massa 1.97 ± 0.04 massa matahari menunjukkan bahwa pada pulsar atau bintang yang memiliki massa mendekati 2 kali massa matahari interaksi isospin berdampak cukup signifikan.



Gambar 3. *Relasi massa dan radius bintang.*

Namun ketika persamaan keadaan dari model CIDDM dibadingkan dengan hasil perhitungan pQCD pada daerah nilai densitas *baryon* yang besar, ternyata prediksi dari model CIDDM tidak sesuai dengan hasil perhitungan pQCD. Hasil perhitungan pQCD pada Gambar 1. menunjukkan nilai asimtotik perbandingan tekanannya adalah kurang dari 1, sedangkan dari model CIDDM pada Gambar 4. menunjukkan nilai asimtotik 1.

Hasil prediksi CIDDM bisa ditelusuri secara analitik. Pada kondisi nilai n_B yang besar, mengakibatkan

1. $\nu_u = \nu_d = \nu_s = \nu$
2. $n_u = n_d = n_s = n_B = \nu^3/\pi^2$
3. $m_u = m_d = m \neq m_s$ =konstan
4. $\nu \gg m, m_s$

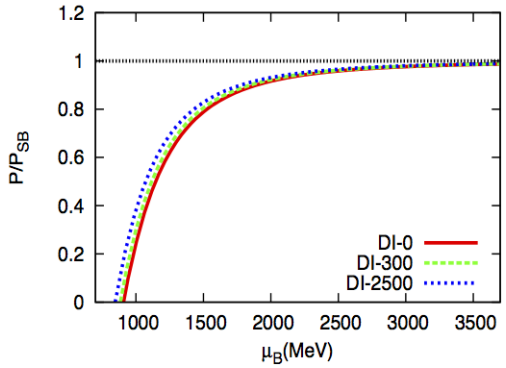
juga pada perumusan potensial kimia menjadi

1. $\mu_u = \mu_d \simeq \sqrt{\nu^2 + m^2}$
2. $\mu_s \simeq \sqrt{\nu^2 + m_s^2}$
3. $\mu_e \ll \mu_u, \mu_d, \mu_s$

yang menyebabkan perbandingan tekanan bintang menjadi

$$P / P_{SB} \approx 1 - \frac{2m^2}{3v^2} - \frac{m_s^2}{3v^2}, \qquad (3.1)$$

yang mana pada nilai momentum Fermi yang besar, nilai dari persamaan (3.1) akan bernilai 1.



Gambar 4. *Tekanan sebagai fungsi potensial kimia baryon pada materi quark berdasarkan model CIDDM.*

4. Kesimpulan

Dari hasil perhitungan model CIDDM dan perbandingan dengan perhitungan p QCD, bisa disimpulkan bahwa

1. Model CIDDM sesuai dengan kirteria model *Bag* MIT pada nilai densitas *baryon baryon* yang rendah
2. Model CIDDM cukup akurat dalam menentukan relasi massa dan radius bintang, dilihat dariGambar 3.
3. Pada nilai densitas *baryon* yang besar, menurut model CIDDM quark cenderung bersifat bebas (*free*) sedangkan menurut perhitungan p QCD quark cenderung memiliki interaksi rata-rata yang bergantung dengan densitas *baryon*.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih atas dukungan dari Universitas Indonesia.

Daftar Acuan

[1] Lattimer, J. M., Neutron Stars, SLAC Summer Institute on Particle Physics(2005)
[2] Weber, F., Strange Quark Matter and Compact Stars, ArXiv: astro-ph/0407155v2(2004)
[3] Farhi, E., Jaffe, R. L., Strange Matter, Phys. Rev. D, 30, 2379 (1984)
[4] Chodos, A., Jaffe, R. L., Johnson, K., Thorn, C. B., Weisskopf, V. F., New Extended Model of Hadrons, Phys. Rev. D, 9, 3471(1974)
[5] A. Chodos, R. L. Jaffe, K. Johnson, & C. B. Thorn., Baryon Structure in The Bag Theory, Phys. Rev. D 10, 2599 (1974)
[6] Fowler, G. N., Raha, S., & Weiner, R. M., Z. Phys. C, 9, 271 (1981)
[7] Peng, G. X., Chiang, H. C., Yang, J. J., Li, L., & Liu, B., Mass Formulas and Thermodynamics Treatment in The Mass-Density-Dependent Model of Strange Quark Matter, Phys. Rev. C, 61, 015201 (1999)
[8] Glendenning, N. K., Nuclear Physics, Particle Physics, and General Relativity (2nded). Springer (2000), p.83
[9] Fraga, E. S., Kurkela, A., Vourinen, A., Interacting Quark Matter Equation of State for Compact Stars, ArXiv:1311.5154v1 [nucl-th] (2013)
[10] Chu, P. C., & Chen, L. W., Quark Matter Symmetry Energy and Quark Stars. ArXiv:1212.1388v1 [astro-ph.SR](201