

EFEK MEDAN LISTRIK BINTANG NEUTRON

Riza Ibnu Adam^{*)}, Anto Sulaksono

Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Indonesia, Depok, 16424

^{*)} Email: rizaibnuadam@gmail.com

Abstrak

Pada permukaan bintang neutron, perubahan kerapatan partikel yang signifikan dapat menghasilkan separasi muatan dalam bentuk lapisan dipol listrik. Pada penelitian ini dipelajari efek medan listrik akibat lapisan tersebut terhadap properti dari bintang neutron. Pada perhitungan kami gunakan dua model dengan asumsi berbeda, yakni: model dengan asumsi bahwa bintang neutron hanya tersusun atas p , n , e dan μ serta model dengan asumsi bintang neutron tersusun dari p , n , e , μ dan hiperon. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa massa maksimum tidak sensitif terhadap medan listrik dipermukaan, tetapi radius bintang dengan massa kanonik $1,4 M_{\odot}$ cukup sensitif terhadap medan listrik. Bintang neutron dengan hiperon bersifat lebih *soft* dibandingkan bintang neutron tanpa hiperon.

Abstract

On the surface of a neutron star, a significant particle density changes can produce charge separation in the form electric dipole layer. This research studied electric field effect from dipole layer on the properties of neutron star. We use two models with different assumptions: namely a model assumes the neutron star only composed of p , n , e and μ and a model which assumes the neutron star is composed of p , n , e , μ dan hyperon. The result shows that the maximum mass is not sensitive to the electric field on the surface, but the radius of star with canonical mass $1,4 M_{\odot}$ is quite sensitive to the electric field. The neutron star with hyperon is softer than without hyperon.

Keywords: Neutron Star, Electric Field, TOV Equation, RMF Model, Gaussian Function

1. Pendahuluan

Setelah ditemukannya neutron pada tahun 1932, Baade dan Zwicky mengusulkan ide mengenai bintang mampat yang sebagian besar disusun oleh neutron[1]. Pada tahun 1939, Oppenheimer dan Volkoff mengemukakan bahwa bintang neutron memiliki massa $0.7 M_{\odot}$ dengan radius 10 km dan kerapatan pusat massa $5 \times 10^{15} \text{ gr/cm}^3$ [2]. Selanjutnya pada tahun 1967, Bell dan Hewish menemukan sinyal unik pada bintang neutron yang disebut pulsar[3]. Berdasarkan hasil tersebut penelitian mengenai bintang neutron terus dilakukan baik secara teoritis maupun observasi.

Bintang neutron tersusun secara dominan oleh neutron terdegenerasi dengan campuran proton dan elektron terdegenerasi. Elektron sebagai partikel yang lebih ringan akan cenderung naik ke tekanan yang lebih rendah karena ada perbedaan tekanan parsial antara elektron dengan ion[4]. Gerak elektron lepas dari permukaan bintang selanjutnya dihentikan oleh medan listrik yang tercipta dari separasi muatan[5]. Kesetimbangan dicapai setelah elektron lepas meninggalkan bintang listrik yang bermuatan positif

dan membentuk gas antar bintang yang bermuatan negatif.

Medan gravitasi yang sangat kuat menyebabkan efek relativitas umum harus diperhitungkan dan bintang membutuhkan lebih banyak muatan untuk berada dalam keadaan setimbang. Selain itu, untuk bintang yang sangat kompak memiliki medan listrik yang lebih tinggi daripada matahari. Misal dalam jumlah muatan yang sama medan listrik di permukaan bintang neutron menghasilkan sekitar 10^9 kali lebih besar daripada di permukaan matahari[6]. Bekenstein mengemukakan tentang kemungkinan produksi medan listrik signifikan ($10^{20} - 10^{21} \text{ V/m}$) pada bintang kompak, tetapi perkiraannya tidak menunjukkan bahwa bintang akan stabil[7]. Hal ini diverifikasi oleh Zhang et al., yang menemukan bahwa struktur bintang neutron dipengaruhi oleh muatan listrik ketika densitas muatan sebanding dengan kerapatan massa[8]. Menurut de Felice et al., besarnya distribusi muatan pada bintang neutron mengikuti fungsi tertentu dari koordinat radial[9]. Dalam hal ini maka dapat dilihat bahwa medan listrik yang kuat sangat berpengaruh pada hubungan massa-radius bintang.

Struktur bintang neutron terdiri dari *outer crust*, *inner crust* dan inti memiliki kerapatan dan partikel penyusun yang berbeda disetiap lapisannya. Outer

crust memiliki kerapatan sekitar $4 \times 10^{11} \text{ gr/cm}^3$ yang tersusun oleh ion Z dan elektron e . Pada bagian *inner crust* kerapatan menjadi lebih tinggi sekitar $4 \times 10^{13} \text{ gr/cm}^3$ dan tersusun oleh elektron e , neutron bebas n dan inti atom yang kaya dengan neutron. Bagian inti memiliki kerapatan sekitar $4 \times 10^{14} \text{ gr/cm}^3$ yang sebagian besar tersusun atas neutron dan beberapa elektron, proton dan muon. Semakin ke pusat, maka kerapatan dan tekanan di bintang akan semakin meningkat sehingga memungkinkan adanya barion lain selain nukleon dan materi quark. Namun masih banyak ketidakpastian mengenai materi penyusun yang terdapat di pusat bintang seperti hiperon, kondensasi kaon dan pion maupun materi quark[10].

Pemahaman yang terbatas mengenai persamaan keadaan (*EoS*) untuk materi nuklir membuat terdapat beberapa model tergantung dari materi penyusun dan interaksi antara materi penyusunnya. Kehadiran hiperon di dalam inti bintang neutron akan mengubah persamaan keadaan menjadi lebih *soft*. Persamaan keadaan *soft* memiliki massa maksimum bintang neutron yang lebih rendah dibandingkan persamaan keadaan *stiff*[11]. Konsekuensi dari ketidakpastian tersebut menunjukkan bahwa model yang berbeda akan memprediksi massa dan radius bintang neutron yang berbeda juga.

Seperti halnya tekanan, kepadatan materi dan medan gravitasi, tetapi medan listrik yang kuat juga dapat hadir di bintang neutron. Persamaan keadaan (*EoS*) diselesaikan melalui pendekatan *RMF* untuk mengetahui hubungan antara tekanan dengan kerapatan energi di bintang neutron[12]. Penjelasan mengenai pengaruh medan listrik terhadap kerapatan yang sangat tinggi akibat gaya gravitasi maka perlu digunakan teori relativitas umum. Persamaan *TOV* dimodifikasi untuk menggambarkan keadaan bintang neutron statis yang mempunyai distribusi muatan listrik pada permukaannya. Persamaan ini diturunkan dari persamaan medan *Maxwell-Einstein*[4,5]. Perbedaan utama persamaan *TOV* standar dengan persamaan *TOV* termodifikasi adalah hadirnya medan listrik elektrostatis di dalam kerapatan energi total sistem yang akan membantu penambahan massa total sistem.

2. Metode Penelitian

Tahap awal penelitian ini adalah menyelesaikan persamaan keadaan (*EoS*) untuk mengetahui hubungan antara tekanan dan kerapatan energi di dalam bintang neutron. Solusi persamaan keadaan (*EoS*) diselesaikan dengan pendekatan medan rata-rata relativistik (*RMF*) dengan asumsi bahwa partikel di bintang neutron terdistribusi secara homogen. Kerapatan Lagrangian standar dari model *RMF* dituliskan

$$L_{RMF} = L_B + L_L + L_M + L_{int} \quad (1)$$

Dimana L_B merupakan penjumlahan kerapatan lagrangian barion, L_L merupakan penjumlahan kerapatan lagrangian lepton, L_M merupakan penjumlahan kerapatan lagrangian meson dan L_{int} merupakan penjumlahan kerapatan lagrangian seluruh interaksi.

Pada bintang neutron yang tersusun dari p , n , e dan μ memiliki kerapatan barion dan meson sebagai berikut

$$L_B = \sum_{B=p,n} \bar{\psi}_B (i\gamma_\mu \partial_\mu - m_B) \psi_B \quad (2)$$

dan

$$L_M = L_\sigma + L_\omega + L_\rho + L_\delta \quad (3)$$

Sedangkan pada bintang neutron yang tersusun dari p , n , e , μ dan hiperon, kerapatan barion dan meson berubah menjadi

$$L_B = \sum_{B=p,n,\Lambda,\Sigma,\Xi} \bar{\psi}_B (i\gamma_\mu \partial_\mu - m_B) \psi_B \quad (4)$$

dan

$$L_M = L_\sigma + L_\omega + L_\rho + L_\delta + L_{\sigma^*} + L_{f_0^*} \quad (5)$$

Setelah persamaan keadaan untuk bintang neutron tanpa hiperon dan bintang neutron dengan hiperon telah diselesaikan, maka hubungan antara tekanan dan kerapatan energi dapat diketahui. Selanjutnya di tahap kedua, kami mengerjakan solusi persamaan *TOV* dengan medan listrik. Persamaan *TOV* diselesaikan menggunakan persamaan elemen garis (dr) dalam teori relativitas umum yaitu

$$d\tau^2 = -e^{2\nu} dt^2 + e^{2\lambda} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \quad (6)$$

dan tensor energi-momentum yang menggambarkan medan listrik dipermukaan bintang neutron sebagai berikut

$$T^\mu_\nu = (P + \varepsilon) u_\nu u^\mu + P \delta^\mu_\nu + \frac{1}{4\pi} \left(F^{\mu\alpha} F_{\alpha\nu} - \frac{1}{4} \delta^\mu_\nu F_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta} \right) \quad (7)$$

dimana P merupakan tekanan, ε merupakan kerapatan energi dan $F^{\mu\nu}$ merupakan tensor medan elektromagnetik yang mengikuti persamaan Maxwell berikut

$$[(-g)^{1/2} F^{\mu\nu}]_{,\nu} = 4\pi j^\mu (-g)^{1/2} \quad (8)$$

Sehingga diperoleh persamaan *TOV* yang merepresentasikan hubungan antara tekanan, kerapatan energi, massa, dan radius bintang neutron yang dituliskan pada persamaan berikut

$$\frac{dP}{dr} = \frac{-G\epsilon M}{r^2} \left(1 + \frac{P}{\epsilon} \right) \left(1 + \frac{4\pi r^3 P}{M} + \frac{Q^2}{Mr} \right) \times \left(1 - \frac{2GM}{r} + \frac{GQ^2}{r^2} \right)^{-1} + \frac{QQ'}{8\pi r^4} \quad (9)$$

$$\frac{dM}{dr} = 4\pi r^2 \epsilon + \frac{QQ'}{r}, \quad (10)$$

$$\frac{dQ}{dr} = 4\pi r^3 \rho_{ch} \left(1 - \frac{2GM}{r} + \frac{GQ^2}{r^2} \right)^{-1/2}, \quad (11)$$

dimana G merupakan konstanta gravitasi, M merupakan massa, Q merupakan muatan dan ρ_{ch} merupakan kerapatan muatan yang mengikuti fungsi *Gaussian* berikut

$$\rho_{ch} = \frac{\sigma}{4\pi \left[\frac{b^3 \sqrt{\pi}}{4} + rb^2 + \frac{r^2 b \sqrt{\pi}}{2} \right]} \times \left[e^{-\left[\frac{(r-R_+)}{b} \right]^2} - e^{-\left[\frac{(r-R_-)}{b} \right]^2} \right], \quad (12)$$

dengan b merupakan lebar celah *Gaussian* dan σ merupakan kekuatan medan listrik.

Persamaan 9, 10 dan 11 selanjutnya diselesaikan secara numerik menggunakan metode *Runge-Kutta* Orde 4. Dimana kondisi syarat batas pada pusat bintang ($r=0$) yaitu $P(0)=P_c$, sedangkan kondisi di permukaan bintang ($r=R$) yaitu $P(R)=0$. Nilai G , b dan σ masing-masing ditentukan secara berturut-turut sebesar $1,325 \times 10^{-42} \text{ fm/MeV}$, $0.1 \times 10^3 \text{ m}$ dan $3.0 \times 10^{19} \text{ C}$.

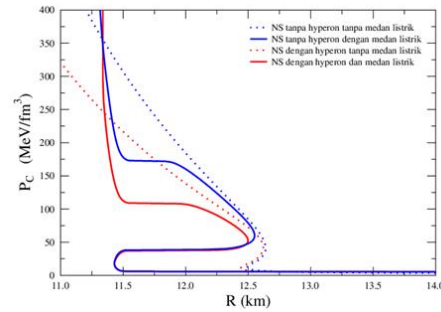
Medan listrik di bintang neutron dihasilkan oleh efek separasi muatan yang membentuk lapisan dipol. Kerapatan lapisan tersebut dimodelkan oleh fungsi *Gaussian* pada persamaan (12). Pada tahap akhir hubungan antara tekanan, kerapatan energi, massa dan radius bintang neutron dianalisis untuk mengetahui pengaruh medan listrik terhadap properti bintang neutron. Kemudian bintang neutron tanpa hiperon dan bintang neutron dengan hiperon dibandingkan untuk mengetahui perubahan struktur akibat medan listrik.

3. Hasil dan Pembahasan

Perbedaan utama antara bintang neutron tanpa hiperon dan bintang neutron dengan hiperon adalah bintang neutron tanpa hiperon memiliki kerapatan barion yang terdiri atas proton dan neutron, sedangkan bintang neutron dengan hiperon memiliki kerapatan barion yang terdiri atas proton, neutron dan

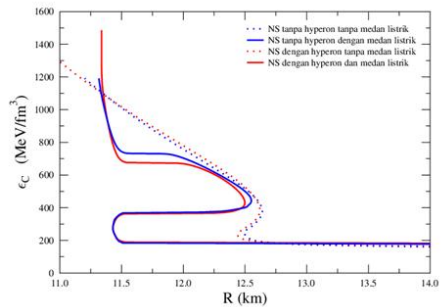
hiperon (Λ , Σ dan Ξ), serta hadirnya medan meson σ^* dan f_0^* . Hal tersebut berpengaruh terhadap persamaan keadaan (*EOS*) dari bintang neutron.

Pada gambar 1 diketahui bahwa hadirnya medan listrik berpengaruh terhadap perubahan tekanan di pusat bintang neutron. Pada variasi tekanan terlihat jelas bahwa bintang neutron dengan hiperon memiliki radius yang lebih pendek dari bintang neutron tanpa hiperon. Setelah ditambahkan medan listrik pada masing-masing model diperoleh penurunan radius bintang neutron, namun pada tekanan diatas 250 MeV/fm^3 , bintang neutron dengan hiperon mengalami peningkatan radius, sedangkan untuk bintang neutron tanpa hiperon peningkatan radius terjadi pada tekanan diatas 350 MeV/fm^3 .



Gambar 1. Grafik hubungan antara tekanan di pusat terhadap radius akibat medan listrik pada bintang neutron tanpa hiperon dan bintang neutron dengan hiperon.

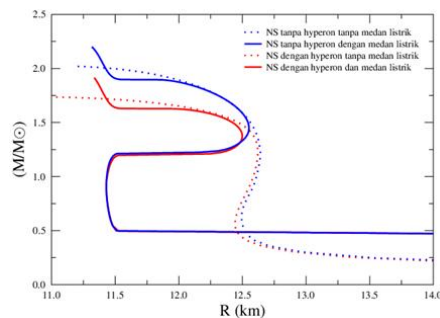
Pada gambar 2 diketahui bahwa bintang neutron dengan hiperon memiliki kerapatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan bintang neutron tanpa hiperon. Penambahan medan listrik turut mempengaruhi kedua model tersebut, namun hasilnya tidak terlalu signifikan.



Gambar 2. Grafik hubungan antara kerapatan energi di pusat terhadap radius akibat medan listrik pada bintang neutron tanpa hiperon dan bintang neutron dengan hiperon.

Gambar 3 menunjukkan bahwa bintang neutron dengan hiperon memiliki massa maksimum sebesar $1,7 M_\odot$ dan bintang neutron tanpa hiperon memiliki massa maksimum yang lebih besar, yaitu sekitar $2,0$

M_0 . Kemudian setelah diberikan medan listrik, massa maksimum di bintang neutron dengan hiperon meningkat menjadi $1,9 M_0$ dan massa maksimum bintang neutron tanpa hiperon menjadi $2,2 M_0$.



Gambar 3. Grafik hubungan antara massa maksimum terhadap radius akibat medan listrik pada bintang neutron tanpa hiperon dan bintang neutron dengan hiperon.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan diketahui bahwa bintang neutron dengan hiperon bersifat lebih *soft* dibandingkan bintang neutron tanpa hiperon. Penambahan medan listrik pada permukaan bintang neutron berpengaruh terhadap properti bintang neutron, terutama pada radius bintang neutron dengan massa kanonik $1,4 M_0$.

Daftar Acuan

- [1] W. Baade dan F. Zwicky, Remarks and supernovae and cosmic rays, Phys. Rev. 46 (1934), p. 76-77.
- [2] J. R. Oppenheimer dan G. M. Volkof, On massive neutron cores, Phys. Rev. 55 (1939), p. 374-381.
- [3] A. Hewish, S. Bell, J. Pilkington, P. Scott, and R. Collins, Observation of a rapidly pulsating radio source, Nature 217 (1968), p. 709-713.
- [4] J. P. Lemos dan V. T. Zanchin, Quasiblack holes with pressure : Relativistic charged spheres as the frozen stars, Phys. Rev. D 81, 124016 (2010), p. 1-15.
- [5] R. P. Negreiros, I. N. Mishustin, S. Schramm, dan F. Weber, Properties of bare strange stars associated with surface electric fields, Phys. Rev. D 82, 103010 (2010), p. 1-7.
- [6] S. Ray, M. Malheiro, J. P. S. Lemos, dan V. T. Zanchin, Charged polytropic compact star,

Brazilian Journal of Phys. 34, 1A (2004), p. 310-314.

- [7] J. D. Bekenstein, Hydrostatic equilibrium and gravitational collapse of relativistic charged balls*, Phys. Rev. D 4 (1971), p. 2185-2190.
- [8] J. L. Zhang, W. Y. Chau, dan T. Y. Deng, The influence of a net charge on the critical mass of a neutron star, Astrophys. and Space Sc. 88 (1982), p. 81-88.
- [9] F. de Felice, Y. Yunqiang, dan J. Fang, Relativistic charged spheres, Mon. Not. R. Astron. Soc. 277 (1995), p. L17-L19.
- [10] P. Haensel, A. Y. Potekhin, dan D. G. Yakovlev, Neutron star 1 : Equation of state and structure, New York, Springer (2007), p. 11-14.
- [11] I. Bednarek, P. Haensel, J. L. Zdunik, M. Bejger, dan R. Manka, Hyperons in neutron-star cores dan $2M_0$ pulsar, arXiv : 1111.6942v1 [astro-ph.SR] (2011), p. 1-7.
- [12] B. K. Agrawal, A. Sulaksono, dan P. G. Reinhard, Optimization of relativistic mean field model for finite nuclei to neutron star matter, Nucl. Phys. A 882 (2012), p. 1-20.