

## Tiga Fenomena Alam Pada Bintang Neutron

Dewi Lestari<sup>1</sup>, Harto Nuroso<sup>1</sup> and Joko Saefan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pendidikan Fisika, Universitas PGRI Semarang, Semarang, Indonesia

E-mail: dedew.lestari2312@gmail.com

Received 31 Desember 2021

Accepted for publication 13 Januari 2022

Published 11 Februari 2022

### Abstract

Kajian tentang tiga fenomena alam pada bintang neutron telah dilakukan. Kajian ini diharapkan dapat memberikan berbagai gambaran atau diskripsi yang luas terhadap pemahaman bintang neutron. Penelitian ini dilakukan dengan metode telaah pustaka. Hasil kajian ini adalah densitas atau kerapatan bintang neutron terbesar terdapat pada inti bintang kemudian diikuti oleh kerak dalam dan kerak luar. Kerak luar memiliki kerapatan sekitar  $4 \times 10^{11}$  g/cm<sup>3</sup>, kerak dalam memiliki kerapatan sekitar  $4 \times 10^{13}$  g/cm<sup>3</sup> dan inti memiliki kerapatan sekitar  $4 \times 10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>. Medan magnet bintang neutron terkuat yang dimiliki objek di alam semesta yaitu dapat mencapai  $10^{18}$  G. Medan magnet pada bintang neutron bergantung pada nilai besaran  $B$ . Medan magnet yang anisotropi menyebabkan bentuk bintang neutron terdeformasi dari bentuk bulat sempurna. Deformasi pada bintang neutron bergantung pada besaran  $\gamma$ .

*Keywords: densitas, medan magnet, deformasi, bintang neutron*

### 1. Pendahuluan

Bintang neutron adalah salah satu objek di alam semesta yang menarik perhatian fisikawan. Bintang neutron ditemukan tersebar diseluruh galaksi di tempat yang sama dengan bintang lain. Sejumlah bintang neutron yang telah ditemukan duduk di pusat sisa-sisa supernova yang diam-diam memancarkan sinar x, tetapi lebih sering ditemukan berputar liar dengan medan magnet ekstrem (Haensel, 2007). Keberadaan bintang neutron pertama kali diusulkan oleh Walter Baade dan Fritz Zwicky pada tahun 1934 setelah penemuan neutron oleh James Chadwick. Pada tahun 1965, Antony Hewish dan Samuel Okoye menemukan bintang neutron pertama yang terhubung dengan sisa supernova (Zeilik dkk., 1998). Bintang neutron yang diamati umumnya memiliki massa 1.5–2 massa matahari dengan jari-jari hanya sekitar 10 km atau 6.2 mil (Glendenning, 2012).

Bintang neutron merupakan objek bintang terkecil dan memiliki struktur terpadat di alam semesta (Glendenning, 2012). Sebutan bintang neutron diberikan karena bintang ini memiliki kelimpahan neutron terutama pada inti bintang. Sebagian besar model dasar ilmiah menyatakan bahwa hampir seluruh komposisi bintang neutron terdiri dari partikel neutron, elektron, dan proton yang berada dalam materi normal bergabung dan membentuk neutron (Oppenheimer dkk., 1939). Pada awalnya daerah pada bintang neutron dibedakan atas selubung dan inti bintang. Struktur selubung bintang terdiri dari atmosfer, lapisan lautan, kerak luar, kerak dalam dan mantel (Haensel, 2007), untuk struktur inti bintang terdiri dari inti luar dan inti dalam (Lander, 2010).

Kerapatan struktur bintang neutron dapat mencapai 2-3 kali inti atom. Jumlah massa terbesar pada bintang neutron terdapat pada inti bintang. Densitas atau kerapatan bintang neutron memberikan gravitasi permukaan yang sangat tinggi, dengan nilai tipikal berkisar dari  $10^{12}$  hingga  $10^{13}$  m/s<sup>2</sup>. Selain struktur yang sangat rapat,

bintang neutron dikenal juga dengan medan magnetnya yang sangat besar. Medan magnet bintang neutron berkekuatan antara  $10^8$ – $10^{15}$  kali lebih kuat dari medan magnet bumi. Medan gravitasi di permukaan bintang neutron berkisar  $2 \times 10^{11}$  kali lebih kuat dari medan gravitasi bumi (Haensel, 2007).

Bintang neutron dapat dikatakan sebagai sampah ruang angkasa karena merupakan sisa dari peristiwa ledakan supernova. Ledakan supernova merupakan ledakan dasyat yang dipicu oleh keruntuhan gravitasi bintang bermassa menengah yang disebabkan oleh ketidakseimbangan antara tekanan termal dan gaya gravitasi (Gomes dkk, 2019). Setelah kejadian supernova, bintang neutron yang lahir akan mempertahankan hukum kekekalan momentum angular dan fluks magnetik sehingga menyebabkan bintang neutron memiliki kecepatan angular yang tinggi dan medan magnet yang besar (Glendenning, 2012). Berdasarkan kedua hukum tersebut semakin kecil jari-jari bintang neutron, kecepatan sudut dan medan magnet semakin besar. Oleh karena itu bintang neutron dikenal dengan kecepatan rotasi dan medan magnet yang besar (Haensel, 2007).

Medan magnet pada bintang neutron dapat berkurang dengan signifikan apabila terjadi di sistem ganda. Sistem ganda adalah sistem yang terdiri dari dua atau lebih bintang Bhattacharya (2002), misalkan medan magnet dari  $\approx 10^{12}$  G dapat menurun menjadi  $\approx 10^8$  G (Potekhin, 2011). Medan magnet besar pada bintang neutron dapat memicu terjadinya deformasi pada bintang tersebut. Deformasi yang terjadi pada bintang neutron dapat bersifat sementara bahkan permanen pada bintang.

Permasalahan yang akan dikaji dalam penelitian ini meliputi tiga fenomena alam pada bintang neutron untuk densitas, medan magnet, dan deformasi. Hasil yang diperoleh, dapat dipergunakan untuk kajian lebih lanjut mengenai densitas, medan magnet, dan deformasi yang terjadi pada bintang neutron.

## 2. Densitas Bintang Neutron

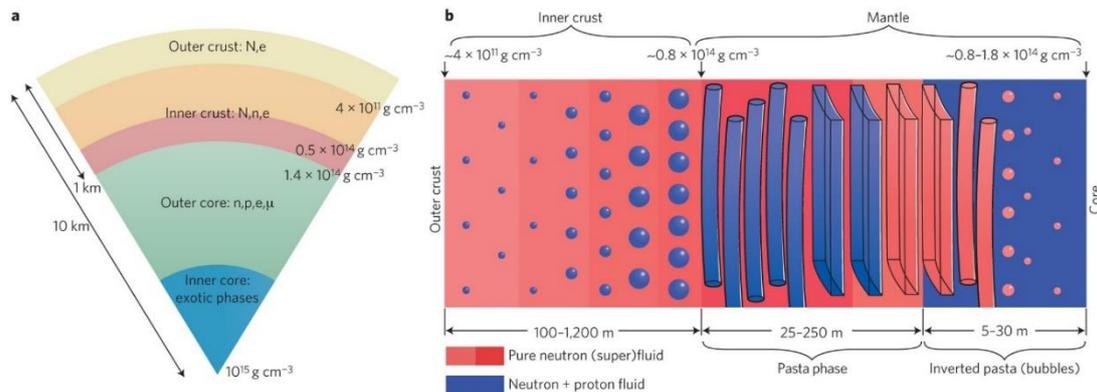
Menurut (Haensel, 2007) bintang neutron adalah bintang yang sangat rapat. Besarnya kerapatan bintang neutron adalah sebesar dua hingga tiga kalinya kerapatan normal inti atom. Kerapatan normal inti atom sebesar  $2.8 \times 10^{14}$  g cm<sup>3</sup>. Nilai tersebut menunjukkan dalam ruang 1 cm<sup>3</sup> terdapat massa  $2.8 \times 10^{14}$  g. Sementara besarnya rapat massa dapat dikaitkan dengan percepatan gravitasi. Bintang neutron dengan besar kerapatan tersebut memiliki percepatan gravitasi dipermukaannya sebesar  $g \sim GM/R^2 \sim 2 \times 10^{14}$  cm s<sup>-2</sup> atau  $10^{11}$  kali daripada bumi (Haensel, 2007). Bahan terpadat yang ditemukan di bumi adalah osmium logam, tetapi kerapatannya tidak ada artinya jika dibandingkan dengan kerapatan objek astronomi eksotis seperti bintang neutron.

Bintang neutron memiliki kerapatan sangat besar sehingga diperkirakan satu sendok teh bagian bintang neutron, memiliki massa lebih dari  $5.5 \times 10^{12}$  kg. Diasumsikan bintang ini memiliki kerapatan  $3.7 \times 10^{17}$  hingga  $6 \times 10^{17}$  kg/m<sup>3</sup>, yang sebanding dengan perkiraan kepadatan inti atom  $2.3 \times 10^{17}$  kg/m<sup>3</sup>. Struktur bintang neutron terdiri dari kerak luar (*outer crust*), kerak dalam (*inner crust*) dan inti yang memiliki kerapatan dan partikel penyusun yang berbeda disetiap lapisannya. Outer crust memiliki kerapatan sekitar  $4 \times 10^{11}$  g/cm<sup>3</sup> yang tersusun oleh ion *z* dan elektron *e*. Pada bagian inner crust kerapatan menjadi lebih tinggi sekitar  $4 \times 10^{13}$  g/cm<sup>3</sup> dan tersusun oleh elektron *e*, neutron bebas *n* dan inti atom yang kaya dengan neutron. Bagian inti memiliki kerapatan sekitar  $4 \times 10^{14}$  g/cm<sup>3</sup> 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 (Haensel, 2007).

Inti bintang neutron merupakan bagian kerapatan yang sangat tinggi sehingga materi penyusunnya masih menjadi misteri, pada selubung terdapat 2 bagian yaitu selubung padat dan non padat, selubung non padat rentan terhadap perubahan suhu bahkan bisa menghilang ketika suhu menurun. Selubung bintang neutron dengan  $\rho < 106$  g/cm<sup>3</sup> memiliki massa kecil  $\sim 10^{-10}$  massa matahari, selain itu komposisi dan strukturnya dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti penambahan materi antarbintang, dan/atau adanya magnet yang kuat pada bidang (Douchin dkk, 2001).

Kerak bintang neutron berdasarkan kerapatannya terbagi menjadi dua bagian yaitu kerak luar dan kerak dalam. Kerak luar terdiri atas atom yang tersusun dalam bentuk kisi BBC (*Body Centered Cubic*), kerak luar dimulai pada kerapatan  $104$  g/cm<sup>3</sup>, pada kerapatan ini atom sudah terionisasi sepenuhnya, pada kerapatan  $107$  g/cm<sup>3</sup> komposisi inti penyusun kerak luar menjadi kaya akan neutron sebagai akibat tangkapan elektron yang mengurangi komposisi neutron (Chamel dkk., 2013).

Struktur kerak dalam membentang dari kerapatan  $4 \times 10^{11} \text{ g/cm}^3$  atau disebut juga kerapatan tetes neutron ( $\rho_{\text{ND}}$ ) hingga kerapatan sekitar  $10^{14} \text{ g/cm}^3$  yang setara dengan  $\rho/3$  (Chamel dkk., 2013) atau  $0.5\rho_0$  (Haensel, 2007). Kerak Dalam memiliki karakteristik berupa lautan neutron bebas. Batas bawah dari kerak disebut daerah mantel yang diprediksi terdiri oleh inti yang berada dalam fase pasta dimana inti tersebut tidak berbentuk bola simetri, melainkan menyerupai bentuk pasta atau silinder (Haensel, 2007). Susunan struktur bintang neutron dapat dilihat pada gambar 2.1.



**Gambar 2.1:** Struktur Bintang Neutron, (Lattimer, 2004)

Struktur kerak bagian dalam mempengaruhi kekuatan dan kekakuan kerak, yang dapat memiliki implikasi besar bagi perilaku bintang. Misalnya, jika kerak bintang neutron cukup kuat, kerak tersebut dapat menopang struktur seperti gunung di permukaannya. Peningkatan kekakuan seperti itu juga akan mempengaruhi retakan seperti gempa di kerak yang mungkin terkait dengan ledakan sinar gamma yang diamati dari magnetar.

Atmosfer bintang neutron dihipotesiskan paling tebal beberapa mikrometer, dan dinamikanya sepenuhnya dikendalikan oleh medan magnet bintang neutron. Atmosfer bintang neutron merupakan kerak padat yang sangat keras dan bisa juga sangat halus dengan ketidakteraturan permukaan maksimum  $\sim 5 \text{ mm}$ . Ketidakteraturan permukaan atmosfer pada bintang neutron disebabkan oleh medan gravitasi yang ekstrim.

### 3. Medan Magnet Bintang Neutron

Bintang neutron merupakan objek astrofisika yang sangat ekstrem dan paling kompak di alam semesta. Bintang neutron menarik untuk dikaji salah satunya karena bintang ini memiliki medan magnet yang sangat besar. Potekhin dalam artikelnya tahun 2011 menyatakan bahwa medan magnet bintang neutron merupakan medan magnet terkuat yang dimiliki objek di alam semesta yaitu dapat mencapai  $10^{18} \text{ G}$  (Potekhin, 2011).

Bintang neutron dihasilkan dari sebuah bintang masif yang mengkonsumsi bahan bakar nuklirnya dan runtuh di bawah gravitasinya sendiri dalam ledakan supernova. Objek yang sangat padat ini memiliki radius sekitar 10 kilometer namun 1,5 kali lebih besar dari Matahari. Mereka memiliki medan magnet yang sangat kuat dan merupakan rotator yang cepat, dengan beberapa bintang neutron berputar lebih dari 100 kali per detik pada putaran porosnya. Bintang neutron biasanya dimodelkan dengan medan magnet yang memiliki kutub magnet utara dan selatan, seperti bumi. Namun, model dipol sederhana tidak menjelaskan aspek membingungkan dari bintang neutron, seperti mengapa beberapa bagian permukaannya jauh lebih panas daripada suhu rata-ratanya (Gourgouliatos dkk, 2017).

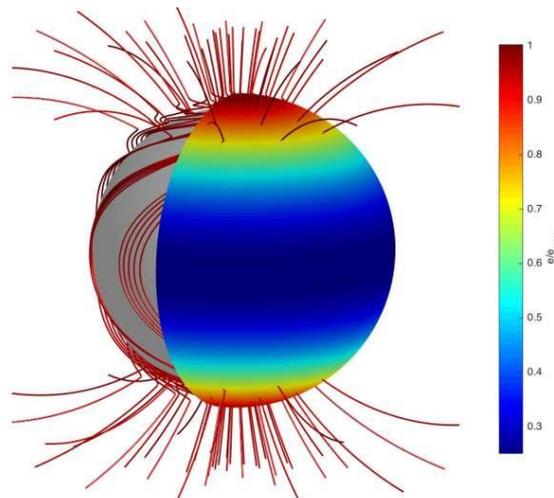
Spruit dkk (2008) menjelaskan bahwa medan magnet pada bintang neutron merupakan sisa-sisa dari bintang deret utama sebelumnya. Pernyataan tersebut disampaikan juga oleh Romani (1990) yang menjelaskan medan magnet yang besar pada bintang neutron telah dihasilkan saat bintang itu lahir, dan mengikuti evolusi medan selama waktu Hubble. Evolusi dan konduktivitas termal yang realistis menyebabkan bintang neutron yang terisolasi akan mempertahankan medan magnet yang besar selama lebih dari  $10^{10}$  tahun. Hipotesa lain mengenai sumber medan magnet yang kuat pada bintang neutron salah satunya dikarenakan konduktivitas listrik yang

tinggi dan proses peluruhan ohmic (Pons dkk., 2007). Peluruhan ohmic adalah proses mengubah energi magnet menjadi energi panas. Peluruhan ohmic murni lebih cepat ribuan tahun pertama ketika konduktivitas listrik relatif rendah karena suhu kerak yang tinggi. Namun, sampai saat ini belum ada yang sepakat mengenai sumber medan magnet pada bintang neutron baik itu asal medan magnet maupun proses terbentuknya.

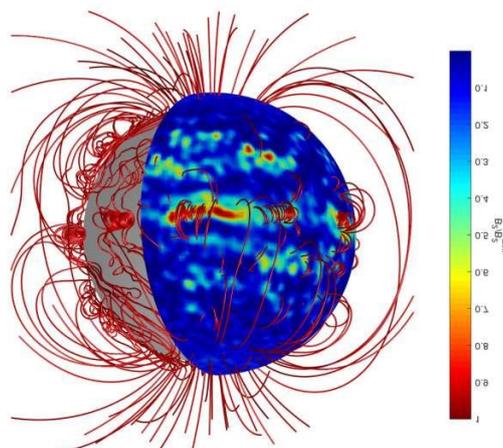
Sebuah studi tentang evolusi medan magnet di dalam bintang neutron menunjukkan bahwa ketidakstabilan dapat menciptakan titik panas magnet yang kuat yang bertahan selama jutaan tahun, bahkan setelah medan magnet bintang secara keseluruhan telah meluruh secara signifikan.

Gambar 3.1 memperlihatkan keadaan awal dalam simulasi medan magnet yang tertutup rapat pada simulasi numerik Gourgouliatos dan Rainer Hollerbach, dari Universitas Leeds, menggunakan superkomputer ARC di Universitas Leeds yang dilakukan untuk memahami bagaimana struktur kompleks terbentuk saat medan magnet berkembang di dalam bintang neutron.

Sebuah bintang neutron yang baru lahir tidak berotasi secara seragam, berbagai bagiannya berputar dengan kecepatan yang berbeda. Ini akan berakhir dan meregangkan medan magnet di dalam bintang dengan cara yang menyerupai bola benang yang rapat. Melalui simulasi komputer, ditemukan bahwa medan magnet yang sangat tidak stabil gambar 3.2. Ini secara spontan menghasilkan simpul yang muncul dari permukaan bintang neutron dan membentuk bintik-bintik di mana medan magnet jauh lebih kuat daripada medan skala besar. Bintik-bintik magnet ini menghasilkan arus listrik yang kuat, yang akhirnya melepaskan panas, dengan cara yang sama panas dihasilkan ketika arus listrik mengalir dalam resistor.



**Gambar 3.1:** Keadaan awal dalam simulasi medan magnet yang tertutup rapat (Gourgouliatos dkk, 2017)



**Gambar 3.2:** Struktur medan magnet tidak stabil yang mengarah pada pembentukan simpul dan bintik-bintik magnet (Gourgouliatos dkk, 2017).

Simulasi ini menunjukkan bahwa untuk menghasilkan tempat medan magnet dengan radius beberapa kilometer dan kekuatan medan magnet diperlukan lebih dari 10 miliar Tesla. Bintik tersebut dapat bertahan beberapa juta tahun, bahkan jika total medan magnet bintang neutron telah meluruh. Studi ini mungkin memiliki implikasi luas untuk pemahaman tentang medan magnet bintang neutron. Bahkan bintang neutron dengan medan magnet keseluruhan yang lebih lemah masih dapat membentuk titik panas magnet yang sangat kuat. Ini dapat menjelaskan perilaku aneh beberapa magnetar (bintang neutron dengan medan magnet yang sangat besar), misalnya SGR 0418+5729 yang eksotis, yang memiliki kecepatan putaran luar biasa rendah dan medan magnet skala besar yang relatif lemah tetapi meletus secara sporadis dengan radiasi energi tinggi.

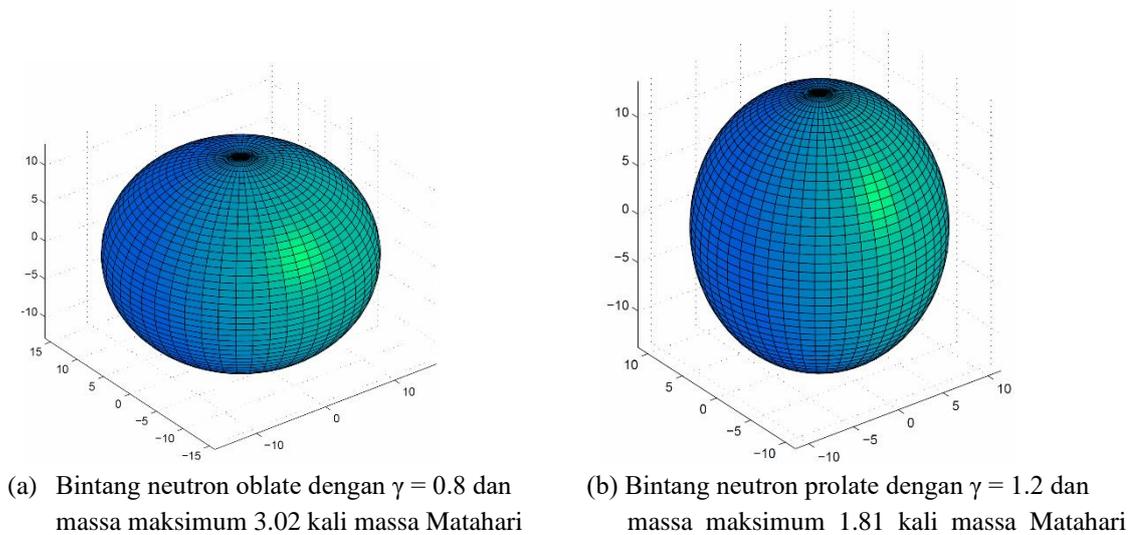
Struktur bintang neutron yang didominasi kuadropolar/oktupolar yang terkonsentrasi di kerak bagian dalam kecenderungan lebih kuat di dekat kutub. Kekuatan medan kutubnya disimpulkan dari perlambatan putaran pulsar yang diamati melalui model pengereman dipol magnetic (Bocquet dkk, 1995). Pulsar merupakan bintang neutron yang berotasi sangat cepat. Menurut Taylor dkk (1993) nilai pulsar berkisar dari  $B = 1,7 \cdot 10^{-5}$  GT (PSR B1957+20) sampai dengan  $B = 2,1$  GT (PSR B0154+61), dengan nilai median  $B = 0,13$  GT, sebagian besar pulsar muda memiliki medan permukaan dalam rentang  $B \sim 0,1-2$  GT.

Kekuatan medan magnet khas  $10^{14}$  G didominasi oleh penyimpangan Hall kemudian diikuti oleh peluruhan Ohmic murni yang berlangsung pada skala waktu 1 Myr. Penyimpangan hall dapat memberikan kontribusi nyata untuk mempercepat disipasi medan magnet. Setelah tahap Hall, ketika disipasi Ohmic mengontrol evolusi dan medan magnet dipolar berkurang secara bertahap, indeks pengereman meningkat secara bertahap dan mungkin mencapai nilai yang sangat tinggi. Proses ini akan berhenti setelah bidang kerak menghilang hampir seluruhnya, atau ketika konduktivitas meningkat saat bintang neutron mendingin. Selama era pendinginan foton, indeks pengereman kembali mendekati nilai kanonik (dipolar). Jika medan magnet awal terlalu lemah  $< 10^{12}$  G untuk tingkat Hall menjadi relevan, evolusi akan berlanjut sesuai dengan peluruhan medan Ohmic murni. Pada kekuatan dan struktur medan magnet awal, fase Hall ini berlangsung selama 103-104 tahun dan ditandai dengan pertukaran energi magnet yang intens antara komponen bidang poloidal dan toroidal dan oleh redistribusi energi medan magnet antara skala yang berbeda. Jika bintang neutron memulai hidupnya sebagai magnetar, medan dipolar eksternalnya adalah  $> 10^{14}$  G (Pons dkk, 2007).

#### 4. Deformasi Bintang Neutron

Bintang neutron memiliki medan magnet internal yang sangat besar dan tersebar secara tidak merata di dalam bintang anisotropi. Medan magnet yang anisotropi menyebabkan bentuk bintang neutron terdeformasi dari bentuk bulat sempurna (Mallick dkk, 2014). Deformasi adalah perubahan bentuk dan ukuran dari sebuah objek. Deformasi pada bintang neutron disebabkan adanya gaya gravitasi dan perubahan suhu. Deformasi bintang yang disebabkan oleh medan magnet hanya penting untuk nilai  $B$  yang besar  $B > 10^{10}$  T. Medan magnet poloidal maksimum adalah  $10^{14}$  T atau  $10^{18}$  G dan dicapai jika tekanan magnet sebanding dengan tekanan fluida di pusat bintang (Bocquet dkk, 1995).

Pada saat terjadi deformasi, gaya internal yang bersumber dari reaksi fusi nuklir inti melawan gaya gravitasi dari luar. Jika gaya gravitasi tidak terlalu besar maka memungkinkan sebuah objek untuk mencapai keadaan setimbang dan kembali ke kondisi awal. Namun, jika gaya gravitasi lebih besar maka menyebabkan deformasi permanen dari bintang atau dapat menyebabkan kegagalan struktural. Selain pengaruh gaya gravitasi dan suhu, bintang neutron juga dapat terdeformasi ketika melakukan rotasi yang sangat cepat. Kecepatan rotasi yang sangat besar pada bintang neutron dapat mengubah bentuk bintang neutron menjadi oval, dan apabila rotasi bintang neutron mulai melambat maka bentuknya akan kembali ke bentuk semula.



**Gambar 4.1:** Deformasi pada bintang neutron, (Zubairi dkk., 2015)

Pada tahun 1915, Albert Einstein muncul dengan teori relativitas umumnya, dimana saat itu Einstein mendefinisikan gravitasi sebagai manifestasi kelengkungan ruang dan waktu akibat keberadaan massa. Penyelesaian dari persamaan gravitasi Einstein menghasilkan sebuah persamaan yang disebut TOV (*The Oppenheimer-Volkoff*). Dari persamaan TOV dapat dipelajari profil dari bintang neutron. Persamaan TOV biasanya menjelaskan profil pada bintang neutron dalam keadaan bulat sempurna dan medan magnetnya isotropi, karena memang tensor metrik dan tensor energi-momentumnya dikondisikan seperti itu, sedangkan pada penelitian yang dilakukan Zubairi dkk. (2015) dengan modifikasi tensor metrik  $g_{\mu\nu}$  dan tensor energi momentum  $T_{\mu\nu}$  untuk mengakomodir bentuk deformasi bintang neutron serta ketidakseragaman medan magnet di dalam bintang. Dalam penelitian tersebut didapatkan bahwa bintang neutron dapat terdeformasi menjadi bentuk oblat atau prolata. Bentuk oblat dan prolata didapatkan dari parameterisasi arah sumbu polar ( $z$ ) fungsi equatorial ( $r$ ) dengan parameter deformasi  $\gamma$  (Zubairi dkk., 2015). Dideskripsikan sebagai  $z = \gamma r$ . Nilai parameter  $\gamma = 1$  menggambarkan bentuk bintang bulat sempurna, karena nilai sumbu  $z$  akan sama dengan sumbu  $r$ . Jika nilai  $\gamma < 1$  bintang akan terdeformasi menjadi bulat oblat dan nilai  $\gamma > 1$  bintang akan terdeformasi prolata.

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa massa maksimum bintang neutron meningkat dengan meningkatnya keoblitan, tetapi berkurang dengan meningkatnya keprolitan. Dengan asumsi bintang neutron bulat sempurna memiliki massa maksimum 2.3 kali massa Matahari. Jika sebaliknya bintang neutron memiliki oblat  $\gamma = 0.8$ , massa maksimumnya meningkat menjadi 3.02 kali massa Matahari. Sebaliknya, jika bintang neutron memiliki prolata  $\gamma = 1.2$ , massa maksimumnya berkurang menjadi 1.81 kali massa Matahari. Ketika nilai parameter deformasi ( $\gamma$ ) diperbesar, bentuk bintang semakin prolata, maka massa maksimum bintang akan berkurang. Sedangkan ketika nilai  $\gamma$  diperkecil maka massa maksimum bintang akan bertambah. Pengaruh nilai  $\gamma$  terlihat juga pada densitas energi dan tekanan pada bintang, dimana semakin kecil nilai  $\gamma$  semakin besar massa maksimumnya maka akan semakin besar pula tekanan dan kerapatan energinya.

## 5. Kesimpulan

Telah dilakukan kajian mengenai tiga fenomena alam pada bintang neutron dengan beberapa pendekatan untuk medan magnet, deformasi, dan densitas pada bintang neutron. Berdasarkan kajian tersebut, dapat disimpulkan bahwa bintang neutron merupakan bintang dengan densitas tertinggi di alam semesta. Densitas bintang neutron terbesar terdapat pada inti bintang kemudian diikuti oleh kerak dalam dan kerak luar. Besarnya medan magnet pada bintang neutron bergantung pada besaran  $B$ . Magnetar memiliki nilai  $B$  paling besar dibandingkan bintang neutron biasa. Deformasi bintang neutron bergantung pada besaran  $\gamma$ . Nilai parameter  $\gamma = 1$  menggambarkan bentuk bintang bulat sempurna, jika nilai  $\gamma < 1$  bintang akan terdeformasi menjadi bulat oblat dan nilai  $\gamma > 1$  bintang akan terdeformasi menjadi bentuk prolata.

## References

- [1] Bhattacharya D *Journal of Astrophysics and Astronomy* 23(1), 67-72
- [2] Bocquet M, Bonazzola S, Gourgoulhon E, and Novak J. 1995 *Astronomy and Astrophysics*
- [3] Chamel N and Haensel P 2008 *Living Reviews in relativity* 11(1), 1-182.
- [4] Douchin F and Haensel P 2001 *Astronomy and Astrophysics* 380(1), 151-167
- [5] Glendenning N 2012 *Springer Science & Business Media*
- [6] Gomes R, Pais H, Dexheimer V, Providencia C, and Schramm S 2019. *Astronomy & Astrophysics*, 627, A61
- [7] Gourgouliatos K. and Hollerbach R 2017. *The Astrophysical Journal*, Volume 852, Number 1
- [8] Haensel P, Potekhin A and Yakovlev D 2007 *Springer Science and Business Media* 326
- [9] Lander S 2010 *Doctoral dissertation, University of Southampton*
- [10] Mallick R and Schramm S 2014 *Physical Review C* 045805.
- [11] Oppenheimer J and Volkoff G. M 1939 *Physical Review* 55(4), 374.
- [12] Pons J and Geppert U 2007 *Astronomy & Astrophysics* 470(1), 303- 315.
- [13] Potekhin A 2011 *The astro-ph*
- [14] Romani R unified model of neutron-star magnetic fields. *Nature* 347, 741–743 (1990).
- [15] Spruit H, Bassa C, Wang Z, Cumming A, and Kaspi, V 2008 *AIP Conference Proceedings*.
- [16] Taylor J, Thorsett S, Arzoumanian Z, and McKinnon, M 1993 *arXiv preprint astro-ph/9303002*.
- [17] Zeilik, Michael, Gregory and Stephen A 1998 *Introductory Astronomy and Astrophysics, Saunders College Publishing* hlm. 369.
- [18] Zubairi O, Spinella W, Romero A, Mellinger R, Weber F, Orsaria M, and Contrera G 2015 *arXiv preprint arXiv* 1504.03006