

Tensor Elektromagnetik Bintang Neutron yang Berotasi Cepat Diukur oleh Pengamat ZAMO (*Zero Angular Momentum Observers*)

ATSNAITA YASRINA

Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang No. 5, Malang

E-mail: atsnaityasrina@yahoo.co.id

TEL: 081915564835

ABSTRAK: Medan magnet di bintang neutron yang mampu mencapai orde $10^{18} G$ dapat mengalami penurunan hingga berorde $10^8 G$. Penurunan besarnya medan magnet dikaji salah satunya dikarenakan bintang neutron yang mengakresi. Dibutuhkan persamaan dinamika medan magnet untuk merumuskan hubungan antara penurunan medan magnet dengan akresi. Telah dirumuskan tensor elektromagnetik bintang neutron yang berotasi cepat diukur oleh pengamat ZAMO (*Zero Angular Momentum Observers*) sebagai dasar untuk merumuskan persamaan dinamika medan magnet.

Kata Kunci: tensor elektromagnetik, bintang neutron, berotasi cepat, ZAMO.

PENDAHULUAN

Kajian medan magnet di bintang neutron merupakan salah satu tema yang banyak dikerjakan astrofisikawan baik pada ranah teoretik maupun pengamatan. Salah satu yang menarik dari kajian medan magnet di bintang neutron adalah penyusutan besarnya medan magnet yang dimiliki bintang neutron (Haensel *et al*, 2007). Besarnya medan magnet di bintang neutron mampu mencapai $10^{18} G$ (Potekhin, 2011). Sebagai contoh medan magnet dari $\approx 10^{12} G$ dapat menurun menjadi $\approx 10^8 G$ (Potekhin, 2011).

Para astrofisikawan banyak berhipotesa bahwa penurunan medan magnet tersebut karena bintang neutron yang mengakresi. Sebagai contoh Bhattacharya (2002) menjelaskan bahwa berkurangnya medan magnet dengan ketara terjadi hanya di sistem ganda. Sistem ganda menunjukkan bintang neutron mengkreasi bintang pasangannya.

Dibutuhkan persamaan matematis yang menunjukkan bahwa terdapat hubungan antara penurunan medan magnet dengan proses akresi. Penurunan medan magnet salah satu bagian dari dinamika atau evolusi medan magnet. Evolusi medan magnet banyak dikaji di antaranya Andrew Cumming, Ellen Zweibel, dan Lars Bildsten menjelaskan dinamika medan magnet di bintang

neutron yang mengakresi. (Cumming *et al*, 2001).

Dikarenakan bintang neutron merupakan salah satu bintang antap, dengan parameter kekompakan $x_g = 0,3$.

Oleh karena itu kajian bintang neutron termasuk medan magnetnya dikaji dengan relativitas umum (Yasrina *et al*, 2013).

Kajian elektromagnetik dari bintang yang relativistik di antaranya diawali oleh Anderson dan Cohen pada tahun 1970 yang mengulas medan elektromagnet yang stasioner di ruang waktu Schwarzschild (Anderson *et al*, 1970). Sengupta (1995) juga menjelaskan hal tersebut, dan menunjukkan medan listrik dengan latar belakang Schwarzschild di bintang neutron (Sengupta, 1995). Hasilnya ternyata bukan solusi persamaan Maxwell. Sengupta (1997) menjelaskan kecepatan peluruhan Ohmic di ruang waktu Schwarzschild, dan hasil yang diperoleh berlaku untuk ruang waktu eksternal bintang, dan tidak memberikan solusi untuk medan elektromagnetik internal dari bintang secara relativitas umum (Sengupta, 1997). Geppert, Page, dan Zannias (2000) menganalisa secara matematis jawaban atas persamaan Maxwell di ruang waktu internal untuk bintang, dan menggunakan metrik umum bintang reativistik yang tidak berotasi. Hasil yang diperoleh menegaskan adanya penyusutan medan magnet (waktunya)

lebih singkat dibanding yang ditemukan dalam ruang waktu yang datar (Geppert, 2000). Muslimov dan Tsygan (1992) pertama kali meneliti pengaruh relativitas umum yang disebabkan oleh rotasi bintang, dengan rotasi yang lambat (Muslinov, 1992).

Rezzola, Ahmedov, dan Miller menunjukkan secara analitik solusi bagi persamaan Maxwell di ruang waktu bintang neutron yang termagnetkan dan berotasi lambat tetapi di sekitar bintang neutron tidak terdapat materi. Dalam artikel tersebut juga diawali dengan menghasilkan tensor medan electromagnetic bintang neutron berotasi lambat yang diukur oleh pengamat ZAMO. ZAMO menjadi penting jika menganggap bintang berotasi atau menggunakan metric untuk bintang berotasi. (Rezzola *et al*, 2004)

Atsnaita Yasrina dan M. Farchani Rosyid dalam seminar HFI Jogja Jateng tahun 2013 menyampaikan hasil penelitiannya tentang persamaan dinamika medan magnet untuk bintang neutron berotasi lambat dengan terdapat materi di sekitar bintang neutron.

Persamaan dinamika medan magnet dibutuhkan untuk memperoleh persamaan penyusutan medan magnet di bintang neutron. Untuk memperoleh persamaan dinamika medan magnet di bintang neutron yang dikaji menggunakan relativitas umum, maka dibutuhkan pengetahuan tentang tensor medan elektromagnetik di bintang neutron yang dibangun dari metric bintang neutron berotasi cepat, seperti yang dikaji dalam artikel ini. Hasil yang diperoleh, akan dapat dipergunakan untuk kajian penyusutan medan magnet pada bintang neutron yang berotasi cepat dan mengakresi.

METODE PENELITIAN

Penelitian yang dilakukan merupakan suatu telaah teoretis-matematis secara analitik. Sebagai penelitian yang bersifat telaah teoritis-matematis, tentu saja dilakukan tinjauan terhadap beberapa pustaka mengenai perhitungan-perhitungan yang telah dikembangkan sebelumnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Metrik bintang neutron yang berotasi cepat di sistem koordinat bola (ct, r, θ, φ) adalah

$$ds^2 = -e^{2\phi} dt^2 + e^{2\lambda} r^2 \sin^2 \theta (d\varphi - \omega dt)^2 + e^{2\alpha} (dr^2 + r^2 d\theta^2) \quad (1)$$

(Gregory *et al*, 1994).

Tensor metrik yang menggambarkan bintang neutron yang berotasi cepat dalam sistem koordinat bola (ct, r, θ, φ) adalah

$$g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} -(e^{2\phi} - e^{2\lambda} r^2 \sin^2 \theta \omega^2) & 0 & 0 & -e^{2\lambda} r^2 \sin^2 \theta \omega \\ 0 & e^{2\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{2\alpha} & 0 \\ -e^{2\lambda} r^2 \sin^2 \theta \omega & 0 & 0 & e^{2\lambda} r^2 \sin^2 \theta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

dengan $\omega(r)$ adalah kecepatan angular dari kerangka acuan inersia. Fungsi metrik $\phi, \lambda, \omega, \alpha$ bergantung pada r dan θ .

Komponen kovarian dari komponen tensor elektromagnetik diberikan oleh

$$F_{\mu\nu} \equiv 2u_{[\mu} E_{\nu]} + \eta_{\mu\nu\sigma\delta} u^\sigma B^\delta, \quad (3)$$

dengan $\eta_{\mu\nu\sigma\delta}$ adalah *pseudo-tensorial* yang digambarkan oleh simbol Levi-Civita $\varepsilon_{\mu\nu\sigma\delta}$, yaitu

$$\eta_{\mu\nu\sigma\delta} = \sqrt{-g} \varepsilon_{\mu\nu\sigma\delta}; \quad \eta^{\mu\nu\sigma\delta} = -\frac{1}{\sqrt{-g}} \varepsilon_{\mu\nu\sigma\delta} \quad (4)$$

(dalam Rezzola *et al*, 2004). Sementara g diperoleh dari persamaan (2) adalah

$$g \equiv \det|g_{\mu\nu}| = -(e^\phi e^{2\alpha} e^\lambda r^2 \sin \theta)^2. \quad (5)$$

Kecepatan vektor-4 adalah

$$u^a = \frac{dx^a}{ds} = u^0 \frac{dx^a}{dt} \quad (6)$$

(Camenzind, 2007). Komponen u^0 untuk metrik bintang neutron berotasi cepat diperoleh

$$u^0 = \frac{e^{-\phi}}{\sqrt{1-V^2}}, \quad (7)$$

dengan

$$V^2 = e^{2\phi} \left[e^{2\lambda} r^2 \sin^2 \theta (\Omega - \omega)^2 + e^{2\alpha} v^r{}^2 + e^{2\alpha} r^2 v^\theta{}^2 \right] \quad (8)$$

Persamaan (6) dan (7) menghasilkan kecepatan vektor-4 adalah

$$u^\mu = \frac{e^{-\phi}}{\sqrt{1-V^2}}(1,0,0,\omega); u_\mu = -\frac{e^\phi}{\sqrt{1-V^2}}(1,0,0,0). \quad (9)$$

Persamaan (4) dan (9) disubstitusikan ke persamaan (3) diperoleh tensor kovarian elektromagnetik bintang neutron berotasi cepat seperti pada persamaan (10). Sementara untuk mendapatkan tensor kovarian elektromagnetik bintang neutron yang berotasi cepat diukur oleh pengamat ZAMO, terlebih dahulu dicari basis dan form-1 (jodoh basis) yang diukur oleh pengamat ZAMO. Berikut hasil perhitungan basis $\{e_\mu^\wedge\} = (e_0^\wedge, e_r^\wedge, e_\theta^\wedge, e_\phi^\wedge)$

$$\begin{aligned} e_0^\wedge &= e^{-\phi}(1,0,0,\omega), \\ e_r^\wedge &= e^{-\alpha}(0,1,0,0), \\ e_\theta^\wedge &= e^{-\alpha}r^{-1}(0,0,1,0), \\ e_\phi^\wedge &= \frac{(-e^{2\phi} + e^{2\lambda}r^2 \sin^2 \theta \omega^2)}{e^\phi e^\lambda r \sin \theta} e^{-\phi}(0,0,0,1). \end{aligned} \quad (11)$$

Perhitungan form-1 $\{w_\mu^\wedge\} = (w_0^\wedge, w_r^\wedge, w_\theta^\wedge, w_\phi^\wedge)$ dalam kerangka ZAMO adalah

$$w_0^\wedge = (e^{2\phi} - e^{2\lambda}r^2 \sin^2 \theta \omega^2)^{1/2}(1,0,0,0),$$

$$F_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{\sqrt{1-V^2}}(e^\phi E_r - e^{2\alpha}e^\lambda r^2 \sin \theta \omega B^\theta) & \frac{1}{\sqrt{1-V^2}}(-e^\phi E_\theta + e^{2\alpha}e^\lambda r^2 \sin \theta \omega B^r) & -\frac{e^\phi E_\phi}{\sqrt{1-V^2}} \\ \frac{1}{\sqrt{1-V^2}}(e^\phi E_r + e^{2\alpha}e^\lambda r^2 \sin \theta \omega B^\theta) & 0 & -\frac{1}{\sqrt{1-V^2}}e^{2\alpha}e^\lambda r^2 \sin \theta B^\theta & -\frac{1}{\sqrt{1-V^2}}e^{2\alpha}e^\lambda r^2 \sin \theta B^r \\ \frac{1}{\sqrt{1-V^2}}(e^\phi E_\theta - e^{2\alpha}e^\lambda r^2 \sin \theta \omega B^r) & \frac{1}{\sqrt{1-V^2}}e^{2\alpha}e^\lambda r^2 \sin \theta B^\theta & 0 & -\frac{1}{\sqrt{1-V^2}}e^{2\alpha}e^\lambda r^2 \sin \theta B^\phi \\ \frac{e^\phi E_\phi}{\sqrt{1-V^2}} & \frac{1}{\sqrt{1-V^2}}e^{2\alpha}e^\lambda r^2 \sin \theta B^\theta & \frac{1}{\sqrt{1-V^2}}e^{2\alpha}e^\lambda r^2 \sin \theta B^r & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$F_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{\sqrt{1-V^2}}(e^\phi E_r - e^{2\alpha}e^\lambda r^2 \sin \theta \omega B^\theta) & \frac{1}{\sqrt{1-V^2}}(-e^\phi E_\theta + e^{2\alpha}e^\lambda r^2 \sin \theta \omega B^r) & -\frac{e^\phi E_\phi}{\sqrt{1-V^2}} \\ \frac{1}{\sqrt{1-V^2}}(e^\phi E_r + e^{2\alpha}e^\lambda r^2 \sin \theta \omega B^\theta) & 0 & -\frac{1}{\sqrt{1-V^2}}e^{2\alpha}e^\lambda r^2 \sin \theta B^\theta & -\frac{1}{\sqrt{1-V^2}}e^{2\alpha}e^\lambda r^2 \sin \theta B^r \\ \frac{1}{\sqrt{1-V^2}}(e^\phi E_\theta - e^{2\alpha}e^\lambda r^2 \sin \theta \omega B^r) & \frac{1}{\sqrt{1-V^2}}e^{2\alpha}e^\lambda r^2 \sin \theta B^\theta & 0 & -\frac{1}{\sqrt{1-V^2}}e^{2\alpha}e^\lambda r^2 \sin \theta B^\phi \\ \frac{e^\phi E_\phi}{\sqrt{1-V^2}} & \frac{1}{\sqrt{1-V^2}}e^{2\alpha}e^\lambda r^2 \sin \theta B^\theta & \frac{1}{\sqrt{1-V^2}}e^{2\alpha}e^\lambda r^2 \sin \theta B^r & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} w_r^\wedge &= e^\alpha(0,1,0,0), \\ w_\theta^\wedge &= e^\alpha r(0,1,0,0), \\ w_\phi^\wedge &= e^\lambda r \sin \theta(-\omega,0,0,1). \end{aligned} \quad (12)$$

Persamaan (11) dan (12) digunakan untuk mentransformasikan setiap komponen medan listrik dan medan magnet di persamaan (10) yang diukur oleh pengamat ZAMO. Oleh karena itu, diperoleh tensor kovarian elektromagnetik bintang neutron berotasi cepat yang diukur oleh pengamat ZAMO seperti yang ditunjukkan persamaan (13).

Persamaan (10) dan (13) dapat menjadi dasar untuk mencari persamaan dinamika medan magnet di bintang neutron yang berotasi cepat dan mengakresi. Dengan terlebih dahulu menghitung tensor kontravarian elektromagnetik bintang neutron yang berotasi cepat. Persamaan dinamika medan magnet ini kemudian dicari hubungannya dengan persamaan akresi yang dapat menunjukkan bahwa adanya penurunan medan magnet di bintang neutron karena bintang neutron mengakresi materi di sekitarnya.

KESIMPULAN

Tensor kovarian elektromagnetik bintang neutron yang berotasi cepat diukur dari pengamat ZAMO ditunjukkan oleh persamaan (13). Persamaan (13) selanjutnya dapat digunakan untuk merumuskan persamaan dinamika medan magnet di bintang neutron yang berotasi cepat dan mengakresi materi di sekitarnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terimakasih kepada Dr. rer.nat. M. Farchani Rosyid dan Doni Andra, S.Pd, M.Sc atas diskusi terkait bintang neutron dan relativitas umum.

DAFTAR RUJUKAN

- Abramowicz, M.A., Wagoner, R. V., 1978. *Slowly Rotating Relativistic Stars*. ApJ. 1063-1078.
- Anderson, J. L., Cohen, J.M., 1970. *Gravitational Collapse of Magnetic Neutron Stars*. *Astrophys. Space Science*. 9, 146.
- Bhattacharya, D., 2002. *Evolution of Neutron Stars Magnetic Fields*. *Jurnal Astrophysics, The Astrophysical Journal*. Astr, 67-72.
- Camenzind, M., 2007. *Compact Objects in Astrophysics White Dwarfs, Neutron Stars, and Black Hole.*, Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
- Cumming, A., Zweibel, E., Bildsten, L., 2001. *Magnetic Screening in Accreting Neutron Stars*, <http://www.arXiv.astro-ph/0102178>, 9 February 2001
- Geppert, U., Page, D., Zannias, T., 2000. *General Relativistic Treatment Of The Thermal, Magnetic, And Rotational Evolution of Isolated Neutron Stars With Crustal Magnetic Fields*. *Astron-Astrophys*. 2-1066.
- Haensel, P., Potekhin, A.Y., Yakovlev, D.G., 2007. *Neutron Stars 1 Equation of State and Structure*. New York: Springer.
- Muslinov, A., Tsygan, A.I., 1992. *General Relativistic Electric Potential Drops Above Pulsar Polar Caps*, MNRAS. 255, 61.
- Potekhin, A.Y., 2011. *The Physics Of Neutron Stars*. astro-ph. SR, 1235-1256.
- Rezzolla L., dkk, 2004. *General Relativistic Elektromagnetic Fields of a Slowly Rotating Magnetized Neutron Stars I. Formulation of the Equation*. MNRAS. 1-19.
- Sengupta, S., 1995. *General Relativistic Effect on The Induced Electric Field Exterior To Pulsar*. ApJ. 449, 224.
- Sengupta, S., 1997. *General Relativistic Effect on The Ohmic Decay Of Crustal Magnetic Fields in Neutron Stars*, ApJ. 479, L133.
- Yasrina, A., Rosyid, M.F., 2013. *Tentang Medan Elektromagnetik Relativistik di Bintang Neutron yang Berotasi Lambat*. Tesis tidak diterbitkan. Jurusan Fisika Universitas Gadjah Mada.