

УДК 524.1

## Эволюция внешнего магнитного поля звезды во время гравитационного коллапса

*В.Г. Кривдик*

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, ул. Владимирская, 64/13, Киев, 01601  
*kryvdyk@gmail.com*

Поступила в редакцию 7 ноября 2013 г.

**Аннотация.** Во время гравитационного коллапса радиус звезды значительно уменьшается и ее магнитное поле будет расти, достигая крайних значений на заключительной стадии. Переменное магнитное поле будет генерировать вихревое электрическое поле, которое также очень быстро растет с уменьшением звездного радиуса. Это поле будет ускорять заряженные частицы, образуя магнитосферу вокруг коллапсирующей звезды. Это приводит к тому, что уже на ранних стадиях коллапса звезда будет иметь сильное магнитное поле и мощную магнитосферу, состоящую из релятивистских заряженных частиц, которые будут генерировать нетепловое электромагнитное излучение, двигаясь в магнитном поле. Это излучение может быть сигналом, что звезда находится на последнем этапе ее эволюции.

EVOLUTION OF THE EXTERNAL STELLAR MAGNETIC FIELD DURING GRAVITATIONAL COLLAPSE, *by V.G. Kryvdyk*. During the gravitational collapse the radius of a star decreases significantly, and its magnetic field will grow, reaching the extreme values at the final stage. The variable magnetic field will generate a vortex electrical field, which also grows very rapidly with decreasing stellar radius. This field will accelerate charged particles, forming the magnetosphere around a collapsing star. This leads to the fact that already at the early stages of the collapse a star will generate the strong magnetic field and powerful magnetosphere consisting of relativistic charged particles which will generate a nonthermal electromagnetic radiation, moving in the magnetic field. This radiation may be a signal that the star is at the last stage of its evolution.

**Ключевые слова:** магнитное поле коллапсирующей звезды

---

## 1 Предшественники релятивистских объектов

В зависимости от массы и химического состава звезда может эволюционировать к одному из трех типов релятивистских объектов – белому карлику, нейтронной звезде или черной дыре (Зельдович, Новиков, 1977; Шапиро, Тьюкольски, 1985; Арнетт, 1979).

Предшественниками звезд, которые могут образовывать релятивистские объекты, являются массивные красные и голубые гиганты, звезды Вольфа-Райе (WR) и сверхмассивные звезды (Черепашук, 2003; Ельдридж, Тоут, 2004; Шапиро, Тьюкольски, 1985; Вусли, Хегер, 2006). Звезды WR находятся на продвинутых этапах эволюции, они рассматриваются как непосредственные предшественники релятивистских объектов, которые образуются в результате коллапса ядер звезд WR.

Кроме того, релятивистские объекты могут быть сформированы в результате эволюции массивных красных и голубых гигантов с нормальным химическим составом. Например, предшественником сверхновой 1987 года в Большом Магеллановом Облаке был надгигант V31 (Шевальер, 1995). В последние годы было проведено много прямых измерений магнитного поля массивных звезд, которые указывают на наличие достаточно сильного магнитного поля этих звезд. Например, магнитное поле звезды  $\beta$  Cep (BIV) равно 360 Гс (Донати и др., 2001), звезда  $\theta$ 1OriC (O46V) – 1100 Гс (Донати и др., 2002) и  $\xi$  Sas (B2IV) – 335 Гс (Нейер и др., 2003). Довольно сильные магнитные поля наблюдаются у очень молодых массивных звезд W601 (NGC 6611) (до 1400 Гс) и OI 201 (NGC 2244) (до 550 Гс) (Алекиан и др., 2008). Такие достаточно большие поля играют значительную роль в формировании звездного ветра звезд и их эволюции. Магнитные поля этих звезд имеют дипольный вид.

## 2 Внешнее электромагнитное поле коллапсирующей звезды

На конечных стадиях эволюции образуются звездные релятивистские объекты типа белого карлика или нейтронной звезды, характерной особенностью которых является наличие сильных магнитных полей. Типичное значение магнитного потока для нейтронных звезд и белых карликов  $F_0 \approx 5 \cdot 10^{23}$  Гс  $\cdot$  см<sup>2</sup>. Внешнее магнитное поле этих объектов имеет дипольный вид, а их магнитосферы формируются вследствие ускорения заряженных частиц в магнитных полях (Голдрейх, Жюлиан, 1969; Манчестер, Тейлор, 1980; Смит, Меррил, 1980; Шапиро, Тьюкольски, 1985)

В данной работе мы будем рассматривать вопрос об эволюции внешнего электромагнитного поля звезды во время ее гравитационного коллапса, когда она теряет равновесие и сжимается под действием собственного гравитационного поля. Это внешнее магнитное поле будет отвечать за формирование магнитосферы звезды и генерацию электромагнитного излучения, которое может быть зарегистрировано с помощью современных телескопов в широком диапазоне частот от гамма- до радиочастот (Кривдик, 1998, 1999, 2001, 2008, 2009). Прежде всего, выберем модель звезды в начальный момент коллапса. Пусть звезда с начальной массой  $M_0$ , радиусом  $R_0$  и дипольным внешним магнитным полем с магнитным моментом  $\mu_0$  теряет равновесие и начинает сжиматься под действием собственного гравитационного поля. Будем также считать, что во время коллапса звезда не теряет свою массу в результате взрыва. В данном случае магнитный поток и дипольный вид магнитного поля сохраняются при коллапсе, и внешнее магнитное поле звезды изменяется в ходе коллапса в соответствии с законом (Гинзбург, 1964; Гинзбург, Озерной, 1964; Кривдик, 1998, 1999)

$$\begin{aligned} B_r &= 2r^{-3}\mu(t)\cos\theta, \\ B_\theta &= r^{-3}\mu(t)\sin\theta, \\ B_\varphi &= 0, \end{aligned} \tag{1}$$

$$E_\varphi = -c^{-1}r^{-2}\frac{\partial\mu}{\partial t}\sin\theta,$$

$$E_r = E_\theta = 0,$$

где  $\mu(t) = (1/2)F_0R(t)$  – магнитный момент звезды с радиусом  $R(t)$ , который изменяется со временем,  $B_r, B_\theta, E_\varphi$  – компоненты магнитного и электрического полей,  $F_0 = B_0R_0^2$  – начальный магнитный поток звезды. Здесь используется сферическая система координат, ось  $z$  которой совпадает с магнитной осью диполя.

Система уравнений (1) описывает внешнее электромагнитное поле коллапсирующей звезды с гравитационным полем Ньютона и их можно использовать для рассмотрения движения частиц в магнитосфере звезды на протяжении всего коллапса, за исключением области вблизи гравитационного радиуса, где нужно учитывать релятивистские эффекты.

Внешний вид электромагнитного поля показан на рис. 1.

Более подробно рассмотрим поведение электромагнитного поля звезды в ходе гравитационного коллапса звезды с массой  $M$  и первоначальным радиусом  $R_0$ , которая коллапсирует к объекту с радиусом  $R$ , изменяющемуся со временем по закону свободного падения

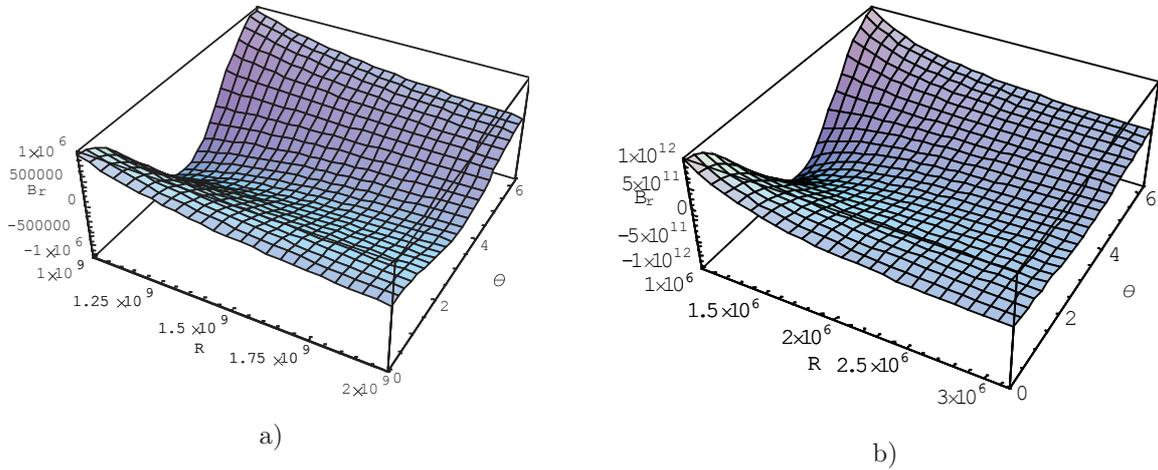
$$\frac{dR}{dt} = \left( \frac{2GM}{R_0} \right)^{1/2} \left( \frac{R_0 - R}{R} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

Здесь  $G$  – гравитационная постоянная.

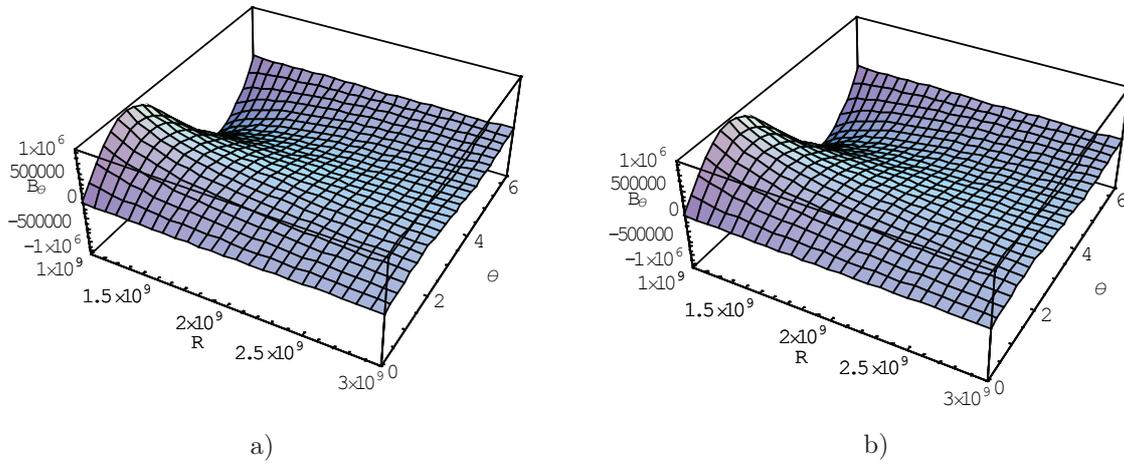
В будущем мы будем рассматривать только нерелятивистские стадии коллапса, когда радиус звезды меньше гравитационного радиуса. В этом случае, подставляя выражение (2) в (1), для внешнего электромагнитного поля звезды получим

$$\begin{aligned} B_r &= 2F_0 r^{-3} R(t) \cos \theta, \\ B_\theta &= F_0 r^{-3} R(t) \sin \theta, \\ B(r, \theta, R) &= (1/2)F_0 R(t) r^{-3} (1 + 3 \cos^2 \theta)^{1/2}, \\ E_\varphi &= -\frac{F_0}{2cr^2} \frac{dR}{dt} \sin \theta = -\frac{F_0}{2cr^2} \left( \frac{2GM}{R_0} \right)^{1/2} (R_* - 1)^{1/2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Как видно из первого уравнения системы (3), радиальная составляющая магнитного поля  $B_r$  имеет максимальное значение около полярной оси ( $\theta = 0$ ), уменьшаясь до нуля в экваториальных регионах ( $\theta = \pi/2$ ). Напротив, компонента  $B_\theta$  в полярных регионах имеет минимальное значение, достигая максимального значения в экваториальных областях магнитосферы. На рис. 1 показана радиальная составляющая магнитного поля около поверхности звезды ( $r \approx R$ ) для различных моментов коллапса в зависимости от угла  $\theta$ . Поведение компоненты  $B_\theta$  в зависимости от угла  $\theta$  для начальной и завершающей стадий коллапса изображено на рис. 2.

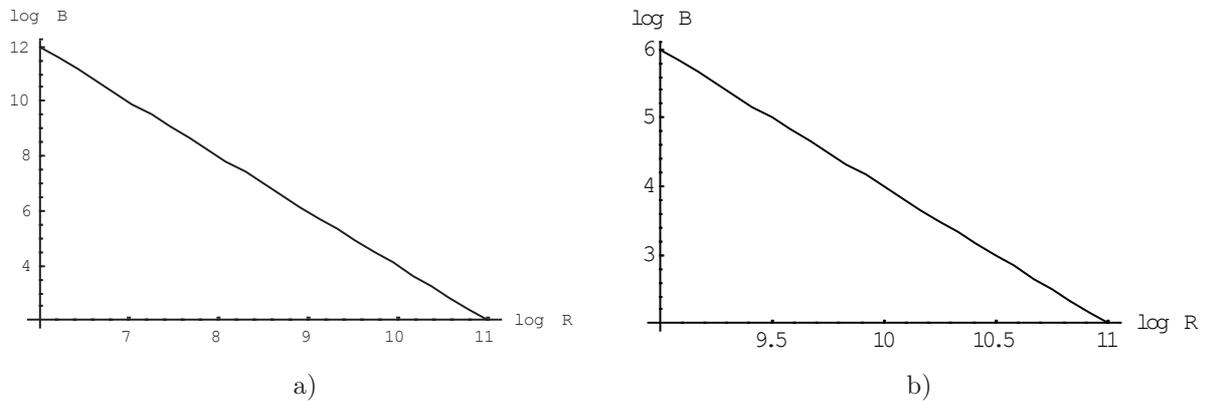


**Рис. 1.** Зависимость радиальной составляющей магнитного поля  $B_r$  от угла  $\theta$  для разных моментов коллапса: а) для  $10^9 \leq R$  (см)  $\leq 2 \times 10^9$ , б) для  $10^6 \leq R$  (см)  $\leq 10^7$



**Рис. 2.** Зависимость азимутальной составляющей магнитного поля  $B_\theta$  от угла  $\theta$  для разных моментов коллапса: а)  $10^9 \leq R$  (см)  $\leq 5 \times 10^9$ , б)  $5 \times 10^6 \leq R$  (см)  $\leq 10^7$

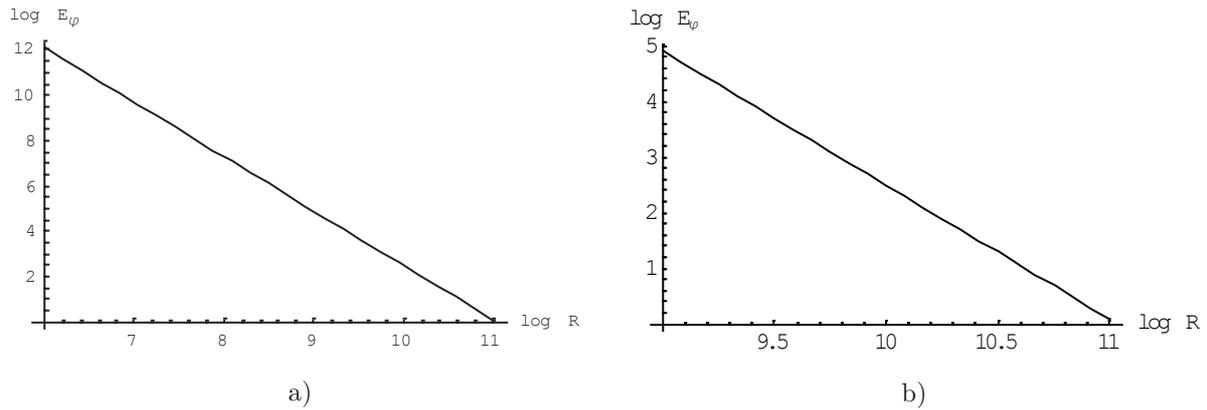
Полная интенсивность магнитного поля слабо зависит от угла  $\theta$ , уменьшаясь только наполовину при переходе от полярной оси к экваториальной плоскости. Электрическое поле имеет только один ненулевой компонент  $E_\varphi$ . Этот компонент изменяется от нуля на полярной оси до максимальной величины на экваторе. В процессе гравитационного коллапса, когда радиус звезды значительно уменьшается, ее магнитное поле будет увеличиваться. На рис. 3 показана динамика роста общего магнитного поля во время коллапса.



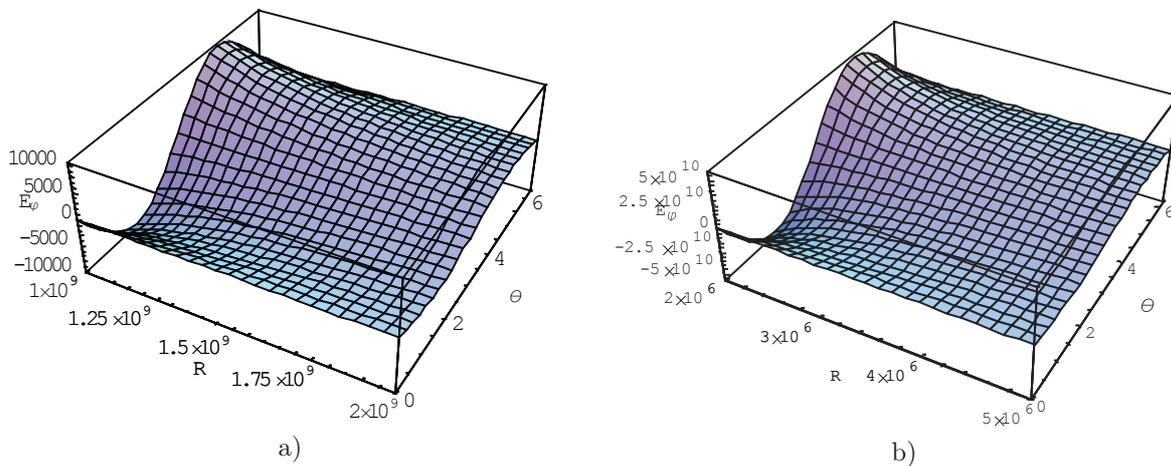
**Рис. 3.** Увеличение магнитного поля в ходе коллапса: а) для всего коллапса  $6 \leq \log R \leq 11$ , б) для начальной стадии коллапса  $9 \leq \log R \leq 11$

В ходе коллапса переменное магнитное поле генерирует вихревое электрическое поле, которое определяется последним уравнением системы (3). Как мы видим, величина электрического поля пропорциональна скорости уменьшения радиуса, который очень быстро возрастает уже на начальной стадии коллапса. Потому электрическое поле также очень быстро увеличивается во время коллапса. На рис. 4–5 показана подробная картина изменения электрического поля для начальной и

конечной стадий коллапса. Из этих рисунков мы видим, что электрическое поле также сильно возрастает в ходе коллапса, достигая очень больших значений на заключительной стадии. Это очень важный факт, потому что электрическое поле будет ускорять заряженные частицы в ходе гравитационного коллапса, что приводит к формированию мощной магнитосферы вокруг коллапсирующей звезды (Кривдик, 1998, 1999, 2001, 2008, 2009).



**Рис. 4.** Изменение электрического поля во время коллапса: а) для всего коллапса  $6 \leq \log R \leq 11$ , б) для начальной стадии коллапса  $9 \leq \log R \leq 11$



**Рис. 5.** Трехмерное изображение электрического поля для начальной и конечной стадий коллапса

На рис. 5 изображена трехмерная картина электрического поля для начальной и конечной стадий коллапса. Как видно из рис. 3–5, в ходе коллапса происходит довольно быстрый и сильный рост магнитных и электрических полей звезды. Уже на начальной стадии коллапса, когда радиус звезды уменьшается немного больше, чем на порядок, ее магнитное поле возрастает в миллионы раз. При дальнейшем уменьшении радиуса звезды ее магнитное поле возрастает в миллиарды раз,

достигая величины  $10^{12}$  Гс на конечной стадии. В процессе коллапса увеличивается также электрическое поле. Если на начальных стадиях коллапса электрическое поле возрастает в десятки тысяч раз, то на заключительной стадии коллапса оно возрастет в сотни миллиардов раз.

Магнитосфера, поле которой описывается уравнениями (1), может существовать только при условии, когда на ее структуру существенно не влияют такие факторы, как давление частиц, их взаимное столкновение и вращение звезды (Кривдик, 1998, 1999). Сначала оценим воздействие давления частиц на структуру магнитного поля. Это давление можно не учитывать, если оно меньше давления магнитного поля, или когда выполняется условие  $B^2/8\pi > \rho v^2/2$ . Для магнитосферы с дипольным магнитным полем  $B(r) \approx F_0 R r^{-3}$ , которая состоит из заряженных частиц с кинетической энергией  $E = mv^2/2$ , это неравенство можно записать  $N_e > F_0^2 R^2 / 8\pi E r^6$ . Для звезд на конечных стадиях эволюции (таких как нейтронные звезды и белые карлики) типичные значения магнитного потока  $F_0 \approx 5 \cdot 10^{23}$  Гс·см<sup>2</sup> (Манчестер, Тейлор, 1980; Смит, 1979; Шапиро, Тьюкольски, 1985; Эйнджел, 1978). При таких значениях потока указанное неравенство остается справедливым для очень плотных и протяженных магнитосфер, которые содержат релятивистские частицы с энергией  $E \leq 10^{12}$  эВ. Например, для магнитосферы с радиусом  $r = 100 R$  это неравенство выполняется для плотности  $N_e \leq 1 \cdot 10^{34}$  см<sup>-3</sup>. Такая плотность характерна для внутренних областей нейтронной звезды, а не для магнитосферы, для которой  $N_e = 10^{11} - 10^{14}$  см<sup>-3</sup> около поверхности звезды. Поэтому в дальнейшем мы не будем учитывать влияние давления частиц на структуру поля в магнитосфере коллапсирующей звезды.

Рассмотрим также влияние вращения звезды на структуру ее внешнего электромагнитного поля. Вследствие вращения звезды около ее поверхности возникает электрическое поле  $E_{\parallel} = 2\pi R B_s / P c$  (здесь  $P$  – период вращения звезды) (Голдрейх, Жюлиан, 1969). Это поле, как и вихревое поле  $E_{\varphi}$ , будет влиять на динамику заряженных частиц в магнитосфере. Соотношение между этими электрическими полями около поверхности звезды  $q = E_{\varphi} / E_{\parallel} \approx (P/2\pi)(2GM/R)^{1/2}$ . Оценки величины  $q$  для нейтронных звезд дают значения  $q \approx 10^{10} \gg 1$  для  $M = 2M_{\odot}$ ,  $R = 10^6$ ,  $P = 1$ с. Видно, что вихревое электрическое поле значительно больше электрического поля, обусловленного вращением звезды. Поэтому его можно не учитывать при рассмотрении динамики частиц в магнитосфере коллапсирующей звезды.

### 3 Выводы

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы. Вследствие гравитационного коллапса звезды происходит очень быстрое и сильное возрастание ее внешнего магнитного поля. Это магнитное поле будет генерировать вихревое электрическое поле. Уже на начальной стадии коллапса, когда радиус звезды уменьшается немного больше чем на порядок, ее магнитное поле возрастает в миллионы раз. При дальнейшем уменьшении радиуса звезды ее магнитное поле возрастает в миллиарды раз, достигая величины  $10^{12}$  Гс на конечной стадии. В процессе коллапса увеличивается также электрическое поле. Если на начальных стадиях коллапса электрическое поле возрастает в десятки тысяч раз, то на заключительной стадии оно возрастет в сотни миллиардов раз.

Таким образом, в процессе коллапса вокруг звезды формируется мощная магнитосфера, которая будет регулировать динамику заряженных частиц в магнитосфере.

### Литература

- Алекиан и др. (Alecian E. et al.) // *Astron. Astrophys.* 2008. V. 481. P. L99.  
 Арнетт (Arnett W.D.) // *Sources of gravitational radiation.* /Ed. Smarr. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 1979.  
 Вусли, Хереп (Woosley S.E., Heger A.) // *Astrophys. J.* 2006. V. 637. P. 914.  
 Гинзбург В.Л., Озерной Л.М. // *ЖЭТФ.* 1964. Т. 4. С. 1030.  
 Гинзбург В.Л. // *Доклады АН СССР.* 1964. Т. 156. С. 43.

- Голдрейх, Жюлиан (Goldreich P., Julian W.H.) // *Astrophys. J.* 1969. V. 157. P. 869.
- Донати и др. (Donati J.F. et al.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2001. V. 326. P. 1265.
- Донати и др. (Donati J.F. et al.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2002. V. 333. P. 55.
- Ельдридж, Тют (Eldridge J.J., Tout C.A.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2004. V. 353. P. 87.
- Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. // *Теория тяготения и эволюция звезд.* М.: Наука. 1977.
- Кривдик (Kryvdyk V.) // *Adv. Spac. Res.* 2008. V. 42. P. 533.
- Кривдик (Kryvdyk V.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1999. V. 309. P. 593.
- Кривдик В.Г // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 2009. Т.25. С. 415.
- Кривдик В.Г. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 2001. Т. 17. С. 233.
- Кривдик В.Г. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 1998. Т. 14. С. 475.
- Манчестер Р.Н., Тейлор Д.Н. // *Пульсары.* М.: Мир. 1980.
- Нейер и др. (Neiner C. et al.) // *Astron. Astrophys.* 2003. V. 406. P. 1019.
- Смит Ф. // *Пульсары.* М.: Мир. 1979.
- Смит, Меррил (Smith G., Merrill R.T.) // *Geophys. J. Intern.* 1980. V. 61. Issue 2. P. 329.
- Черепашук А.М. // *Успехи физ. наук.* 2003. Т. 173. С. 345.
- Шапиро С., Тьюкольски С. // *Черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды. Физика компактных объектов.* М.: Мир. 1985.
- Шевальер (Chevalier R.A.) // *Space Sci. Rev.* 1995. V. 74. P. 289.
- Эйнджел (Angel J.R.P.) // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1978. V. 16. P. 487.