

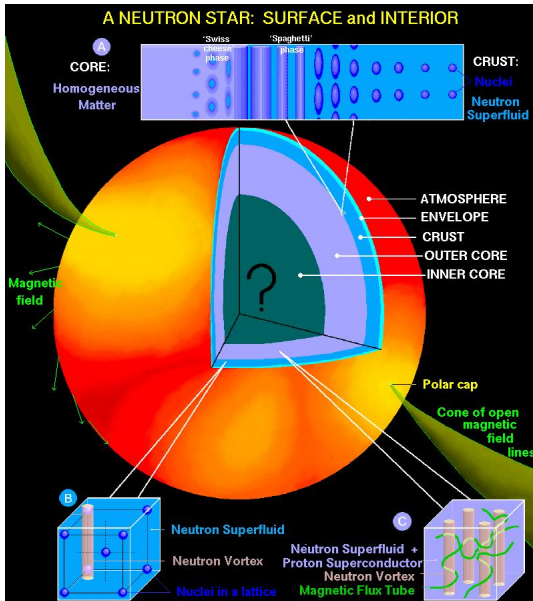
Численное моделирование динамики верхних слоёв атмосфер нейтронных звёзд

М. А. Гарасёв, Е. В. Деришев, Вл. В. Кочаровский

Институт прикладной физики РАН

БШФФ — 2015

Строение нейтронной звезды



$$R \approx 10 \text{ км}, M \sim 1.4 M_{\odot}$$

- Внутреннее ядро — кварковая материя, гипероны?
- Внешнее ядро — сверхтекучие нейтроны
- Мантия — тяжелые ядра, сверхтекучие нейтроны, сверхпроводящие протоны
- Внешняя кора (200м) — тяжелые элементы типа железа
- Атмосфера — горячая плазма

Циклотронные линии

- Непрозрачность замагниченной плазмы очень высока вблизи частот, кратных гирочастоте $\omega = n\omega_B$, где $\omega_B = eB/(mc)$:

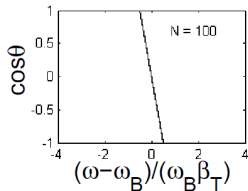
$$\frac{\sigma_{\text{сус}}}{\sigma_T} \sim \frac{1}{\alpha\beta_T} \frac{mc^2}{\hbar\omega_B} \approx 4 \cdot 10^5 \frac{1}{\sqrt{T_{100\text{эВ}}} B_{12}}$$

- Рассеяние сильно преобладает над поглощением для резонансного излучения:

$$\frac{P_{sc}}{P_{abs}} (\tau \sim 1) \approx 10^6 - 10^9$$

Захват резонансных фотонов в ядре циклотронной линии

Резонансное условие в нерелятивистском приближении. Квазикогерентное рассеяние (Wasserman, 1980)

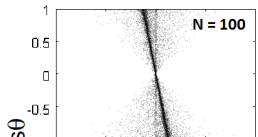


$$\omega(1 - \beta \cos \theta) = \omega_B.$$

$$\beta_* = (\omega - \omega_B) / (\omega \cos \theta)$$

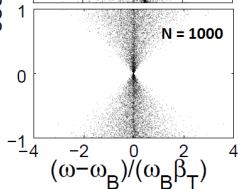
$$(\omega, \theta) \iff \left(\frac{\omega - \omega_B}{\omega \cos \theta}, \theta \right).$$

Резонансное условие в слабoreлятивистском приближении



$$\omega \left(1 - \beta \cos \theta + \frac{\beta^2}{2} \right) = \omega_B.$$

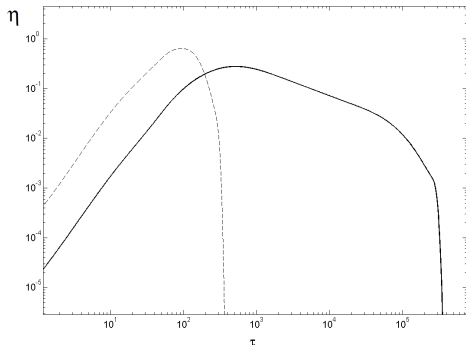
Существуют два резонансных значения скорости электронов:



$$\beta_{1,2} = \cos \theta \pm \sqrt{\cos^2 \theta - 2 \left(1 - \frac{\omega_B}{\omega} \right)}.$$

Полубесконечная атмосфера с поглощением

Перераспределение излучения по ядру линии приводит к сильному увеличению эффективной глубины термализации в атмосфере. Это делает формирование циклотронных особенностей в спектре в значительной мере не локальным, так что в них содержится информация о структуре и параметрах довольно глубоких слоёв атмосферы.



Относительная доля фотонов η рожденных на оптической глубине τ в спектре выходящего излучения. Сплошная линия — расчет с учетом перераспределения фотонов в циклотронной линии; штриховая — без учета (квазикогерентное рассеяние).
Параметры: $T = 50$ эВ, $\gamma/\omega_B = 10^{-6}$,
 $P_{\text{abs}}/P_{\text{sc}}(\tau = 1) = 10^{-6}$.

Намагничение вакуума.

- Двулучепреломление в магнитных полях $B \gtrsim 10^{12}$ Гс. Нормальные волны в сильном магнитном поле имеют разные показатели преломления, и, соответственно, разную фазовую и групповую скорость.
- В полях больших $B \gtrsim 4.4 \cdot 10^{13}$ Гс становится возможным распад фотонов на два.
- Подавление рассеяния в определенных направлениях, из-за того, что сильное магнитное поле препятствует движению электронов поперек.
- Рождение электрон-позитронных пар

Радиационные диски

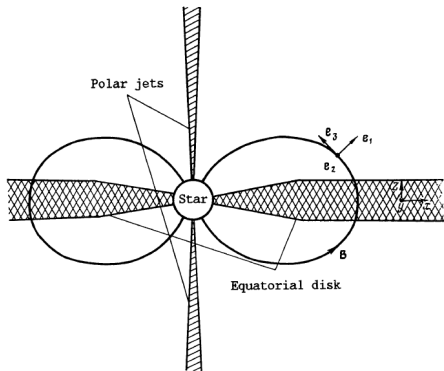


FIG. 1. Model of radiative discon.

Наблюдательные проявления:

- Широкая и глубокая полоса депрессии
- Квазипериодические колебания потока излучения

Модель радиационного диска.
Железняков, Беспалов, 1990

- Горячий магнитный белый карлик или нейтронная звезда
- Фотосфера из которой вытекает ветер, порождаемый циклотронным излучением
- Протяженная плазменная оболочка
- Полярные джеты, ускоряемые давлением циклотронного излучения вдоль магнитной оси

Уравнения переноса излучения

Рассмотрим изотермическую плоскопараллельную атмосферу, состоящую из плазмы с температурой T в однородном магнитном поле с индукцией \mathbf{B} , направленном по нормали к поверхности.

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{z}{H}\right),$$

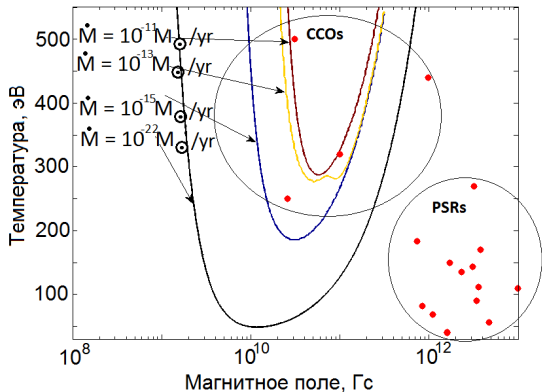
где

$$H = \frac{kT}{\rho g} \approx 9.5 \left(\frac{kT}{1 \text{кэВ}} \right) \left(\frac{10^{14} \text{см/с}^2}{g} \right) \left(\frac{m_p}{\rho} \right)$$

есть приведённая высота атмосферы, m_p — масса протона, ρ — приведенная молекулярная масса вещества плазмы (для водородной атмосферы $\rho = m_p/2$), g — ускорение свободного падения. Перенос интенсивности излучения описывается системой уравнений

$$\cos\theta \frac{dl_i}{dz} = -(\mu_i + \kappa_i)l_i + \sum_{j=1}^2 \int R_{ji}(\theta', \omega' \rightarrow \theta, \omega) l_j(\theta', \omega', z) d\theta' d\omega' + \epsilon_i, \quad \{i = 1, 2\}.$$

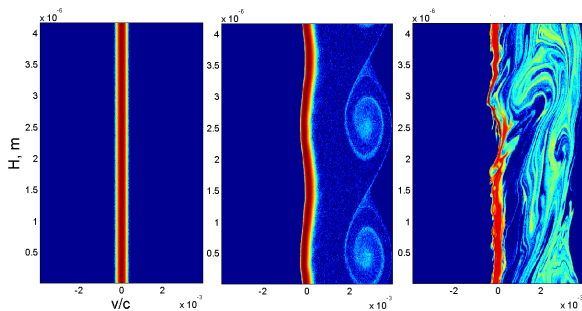
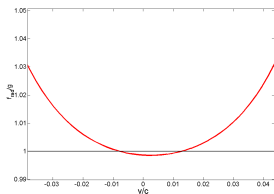
Циклотронный ветер в атмосферах нейтронных звезд

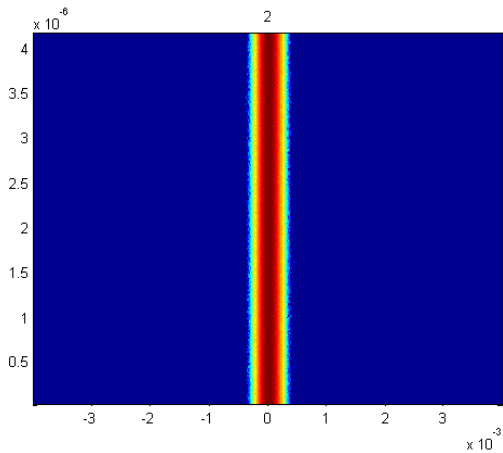


Точки соответствуют параметрам некоторых известных нейтронных звезд.

- Водородная, полностью ионизованная плазма.
- $M = 1.4 M_{\odot}$,
 $R = 1.2 \cdot 10^6 \text{ см}$.
- Учтены эффекты перераспределения по частотам и поляризация вакуума
- $\dot{M} = 4\pi R^2 N_s c_s$

Кинетические неустойчивости, порожденные давлением излучения





Publications

1. M.A. Garasyov, E.V. Derishev, V.I. Kocharovskiy. Influence of relativistic effects and vacuum polarization on the transfer of gyroresonance radiation and the stability of the atmospheres of compact stars // Astronomy Letters, 2008, V. 34, P. 305.
2. M.A. Garasyov, E.V. Derishev, V.I. Kocharovskiy. The influence of frequency redistribution on the transfer of gyroresonant photons in the atmospheres of compact stars: Monte-Carlo analysis // Radiophysics and Quantum Electronics, 2011, V. 53, P. 679.
3. M. Garasyov, E. Derishev, V. Kocharovskiy and V.I. Kocharovskiy. Spectral redistribution of gyroresonant photons in magnetized atmospheres of isolated compact stars // Astronomy & Astrophysics, 2011, V. 531, P. L14.
4. M.A. Garasyov, E.V. Derishev, V.I. Kocharovskiy. Statistics of the frequency redistribution for gyroresonance radiation in the atmospheres of compact stars // Astronomy Letters, 2012, V. 37, P. 699.
5. Garasev, M.; Derishev, E.; Kocharovskiy, V.I.; Kocharovskiy, V. Cyclotron line formation in the magnetized atmospheres of compact stars: I. The transfer equations for polarized radiation // arXiv:1507.03070, 2015.