

## О ВОЗМОЖНОСТИ НЕУСТОЙЧИВЫХ КОЛЕБАНИЙ НЕЙТРОННОЙ ЗВЕЗДЫ

*Ю.В.Вандакуров*

Известно, что критерий конвективной устойчивости записывается в виде

$$\rho' / \rho - \rho' / \gamma \rho \leq 0, \quad (1)$$

где  $\gamma(\rho, \rho)$  определяет зависимость между лагранжевыми компонентами возмущений давления и плотности:  $\delta p / \rho = \gamma \delta \rho / \rho$ , а штрих обозначает производную по радиусу  $r$ . При малом лучистом давлении и полной ионизации  $\gamma = 5/3$ .

Рассмотрим теперь сверхплотное тело, для которого давление является функцией только от плотности, а время установления равновесного химического состава много меньше периода колебаний. Эти условия выполняются в случае нейтронной звезды.

Величина  $\gamma$  как раз такая, что левая часть уравнения (1) обращается в нуль, и следовательно, нейтронная звезда нейтральна относительно возбуждения конвекции. Так как главные члены в выражении (1) сокращаются, то становятся существенными поправочные члены, а также те члены, которые появятся в левой части того же выражения (1) в присутствии дополнительных возмущающих сил. Особый интерес представляет возможность неустойчивости.

Известно, что критерий уравнения (1) остается справедливым при учете поправок порядка  $MG/c^2R$ , обусловленных эффектами ОТО [1]. Здесь  $M$  и  $R$  — масса и радиус звезды,  $G$  — постоянная тяготения. Расчеты с учетом последующих поправок (содержащих  $c^{-4}$  и т.п.) еще не производились. В настоящей работе будет изучаться возможность неустойчивости при наличии малых возмущающих сил, вызванных магнитным полем и вращением звезды. Для простоты поправки на ОТО учитываться не будут.

При выводе критерия конвективной неустойчивости обычно рассматриваются возмущения локального характера, которые имеют малые

инкременты и большое число узлов по радиусу. Колебания слабо возмущают гравитационный потенциал. В связи с условием локальности можно рассмотреть возмущения, имеющие большую амплитуду только вблизи поверхности звезды, тогда границу раздела можно приближенно принять плоской. Мы проведем анализ для более общей цилиндрической конфигурации при наличии продольного магнитного поля и вращения с угловой скоростью  $\Omega = \text{const}$ . Среду считаем идеально проводящей. В равновесном состоянии

$$\rho' + \frac{1}{4\pi} HH' - \rho r \Omega^2 + \frac{4\pi G \rho}{r} \int_0^r r \rho dr = 0. \quad (2)$$

Уравнения колебаний для возмущений вида  $f(r) \exp i(m\phi + \omega t)$  выписаны в работе [2]. Для рассматриваемого случая давления, зависящего от одной плотности, в уравнениях вместо  $\gamma$  будет входить  $\rho\rho'/\rho\rho'$ . В той же работе был выведен критерий конвективной устойчивости (при  $\Omega = 0$ ), из которого вытекает, что неустойчивость будет иметь место, если хотя бы в небольшой области

$$(H/\rho)' < 0. \quad (3)$$

Можно получить следующую асимптотическую формулу для частот колебаний вращающегося цилиндра

$$\omega + m\Omega = \pm \frac{2i}{\pi(2j + d)} \int \left\{ \frac{m^2 H (H/\rho)' (4\pi\rho' + HH')}{4\pi r^2 [4\pi\rho'(\rho/\rho') + H^2]} \right\}^{1/2} dr, \quad (4)$$

где  $j \gg d$ ,  $j \gg |m|$ ,  $j$  — целое,  $d$  — некоторая постоянная, а интегрирование производится по тем областям, где подкоренное выражение положительно. При выводе уравнения (4) было принято, что  $\rho' < 0$ ,  $\rho'' < 0$ ,  $4\pi\rho' + HH' < 0$ ,  $H^2/\rho$  — конечно.

Таким образом, при выполнении критерия выражения (3) нейтронная звезда с магнитным полем будет конвективно неустойчивой. Согласно формуле (4) рост возмущений в системе координат, связанной со звездой, происходит по экспоненциальному закону с инкрементом в  $j$  раз меньшим отношения альвеновской скорости к радиусу. Для более опасных возмущений, соответствующих небольшим  $j$ , следует ожидать колебательной неустойчивости с вещественной частотой  $\text{Re}(\omega + m\Omega)$  порядка угловой скорости вращения.

Причину неустойчивости нетрудно понять на основе простых качественных соображений. В связи с нейтральностью относительно конвек-

ции в отсутствии магнитного поля для суждения об устойчивости достаточно рассмотреть взаимозамещение отдельных магнитных силовых трубок вместе с находящимися в них частицами. Если деформация плоская, и магнитное поле перпендикулярно скорости, то сохраняется отношение  $H/\rho$ , поэтому при выполнении условия выражения (3) перемещение некоторой трубки наружу способствует замещению внутреннего поля частицами. Этот процесс приводит к неустойчивости (как в тяжелой жидкости, поддерживаемой снизу легкой).

В случае произвольного поля отношение  $H/\rho$  изменяется пропорционально длине элемента магнитной силовой линии  $dl$ , поэтому для расщепления, соответствующего границе устойчивости,  $H/\rho dl = \text{const}$ .

Трудным для теории является вопрос, может ли рассматриваемая неустойчивость привести к колебанию конечной амплитуды на одной частоте. Если в момент рождения магнитной вращающейся нейтронной звезды поле сильно отличается от того, которое определяет границу устойчивости, то первоначально в системе будет возбуждаться много мод. При наличии колебаний критерий неустойчивости изменится, поэтому возможно, что в установившемся состоянии останется только одна мода (для случая радиальных пульсаций качественные рассуждения, подтверждающие этот вывод, приведены в работе [3]). Оценку скорости конвекции  $v$  получим, приравняв кинетическую и магнитную энергии. При  $H \sim 10^{13}$  э,  $R \sim 10^6$  см,  $M \sim 10^{33}$  г найдем  $v \sim 10^5$  см/сек.

Можно предположить, что недавно обнаруженные пульсирующие радиоисточники (пульсары) [4] являются магнитными вращающимися нейтронными звездами, в которых возбуждена одна мода нерадиальных колебаний, неустойчивых в силу изложенного механизма. Эта гипотеза позволяет объяснить основные свойства пульсаров: высокую точность периода повторения сигналов, величину этого периода, имеющую порядок 1 сек, поляризацию излучения [5] и непостоянство амплитуды импульсов. Высокая точность периода является результатом того, что наблюдаются собственные колебания звезды. При этом амплитуда и форма импульса будут зависеть также от эмиссионных свойств атмосферы. Угловые скорости порядка 1/сек вполне возможны у нейтронных звезд<sup>1)</sup>.

---

<sup>1)</sup>Заметим, что гипотеза о том, что период повторения сигналов диктуется вращением звезды (при наличии какого-то неизвестного источника активности) уже высказывалось в литературе [6].

Автор благодарит Л.Э.Гуревича и Я.Б.Зельдовича за обсуждение работы.

Физико-технический институт  
им. А.Ф.Иоффе  
Академии наук СССР

Поступило в редакцию  
19 сентября 1968 г.

### Литература

- [ 1 ] S. Chandrasekhar. *Astrophys. J.*, 142, 1519, 1965.
- [ 2 ] Ю.В.Вандакуров, Э.Н.Колесникова. *Астрон.ж.*, 43, 99, 1966.
- [ 3 ] Я.Б.Зельдович. Препринт ИПМ, май 1968.
- [ 4 ] A. Hewish, S. J. Bell, J. D. H. Pilkington, P. F. Scott, R. A. Collins. *Nature*, 217, 709, 1968.
- [ 5 ] A. G. Lyne, F. G. Smith. *Nature*, 218, 124, 1968.
- [ 6 ] T. Gold. *Nature*, 218, 731, 1968; И.С.Шкловский, *УФН*, 95, 249, 1968.