

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 13

ФЕВРАЛЬ, 1977

ВЫПУСК 1

О ВЛИЯНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПУЛЬСАЦИОННУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ БЫСТРОВРАЩАЮЩИХСЯ СВЕРХМАССИВНЫХ ЗВЕЗД

В. В. УСОВ

Поступила 11 марта 1975

Пересмотрена 25 июня 1976

Рассмотрена пульсационная устойчивость быстро вращающихся сверхмассивных магнитных звезд. Показано, что напряженность полоидального магнитного поля звезды, необходимого для ее стабилизации, для звезды с $M \sim 10^3 M_{\odot}$ равна примерно вириальному значению и уменьшается с увеличением массы звезды.

Известно, что звезды, находящиеся на стадии ядерного горения и имеющие массу больше, чем $M_{cr} \sim 10^3 M_{\odot}$, пульсационно-неустойчивы [1]. Недавно было показано, что наличие у массивных звезд внешнего магнитного поля [2] или вращения [3] увеличивает величину критической массы M_{cr} и может даже обратить величину M_{cr} в бесконечность.

Влияние внешнего магнитного поля звезды на ее пульсационную устойчивость обусловлено тем, что при радиальных колебаниях звезды ее магнитный момент $d = H_p R^3$ меняется ($d \sim R$). При этом вне звезды генерируются электромагнитные волны, т. е. появляется дополнительный механизм затухания колебаний.

В работе [2] при рассмотрении пульсационной устойчивости сверхмассивной магнитной звезды ($M \gg 10^3 M_{\odot}$) предполагалось, что вращение звезды либо отсутствует, либо настолько медленное, что вызывает слабые возмущения окружающей ее плазмы. Это предположение справедливо, пока экваториальная скорость вращения звезды удовлетворяет условию [4]:

$$V_R < \left(\frac{H_{\infty}}{H_p} \right)^{1/3} v_{\infty}^{1/6} V_A, \quad (1)$$

где H_p — напряженность магнитного поля на поверхности звезды, $V_A = H_{\infty} / \sqrt{4\pi m_p n_{\infty}}$ — скорость распространения альвеновских волн

в межзвездной среде, $\beta_- = H_-^2/8\pi P_-$, а P_- , H_- и n_- — соответственно, давление, напряженность магнитного поля и концентрация частиц межзвездной среды. В случае сверхмассивной звезды, находящейся в межзвездной среде с $n_- \sim 0.1 \text{ см}^{-3}$, $H_- \sim 10^{-5} \text{ э}$, $\beta_- \sim 1$ и имеющей $H_P \geq 10^3 \text{ э}$ (такое магнитное поле необходимо для стабилизации сверхмассивной звезды), из (1) получим следующее ограничение на экваториальную скорость вращения звезды: $V_R < 10^4 \text{ см/сек}$. Отсюда видно, что возмущение окружающей среды вращающейся звездой будет невелико только при ее очень медленном вращении. Так, например, в случае звезды с $M \sim 10^5 M_\odot$ период вращения звезды $T = 2\pi R/V_R$ должен превосходить $\sim 10^3 \text{ лет}$.

Перейдем теперь к рассмотрению стабилизирующей роли внешнего магнитного поля сверхмассивной звезды в другом предельном случае — когда вращение звезды настолько быстрое, что окружающая ее плазма отбрасывается от звезды. Это происходит, если [4]

$$V_R > \left(\frac{H_-}{H_P}\right)^{1/3} \beta_-^{1/6} c. \quad (2)$$

С другой стороны, экваториальная скорость вращения звезды не может существенно превышать критическую величину $V_{cr} = (GM/R)^{1/2}$, при которой наступает ротационная неустойчивость. Таким образом, ниже мы будем предполагать, что $(H_-/H_P)^{1/3} \beta_-^{1/6} c \leq V_R \leq (GM/R)^{1/2}$. Вращение звезды будем считать однородным.

При малых колебаниях быстро вращающейся магнитной звезды средняя скорость потери энергии колебаний на генерацию электромагнитных волн равна

$$L_- \simeq \frac{H_P^2 R_0^4 \omega^4 R_0^2}{3c^3}, \quad (3)$$

где:

$$\omega \simeq 0.8 \cdot 10^{-3} \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{-19/44} \left[1 + 0.4 \cdot 10^{-2} \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{1/2} \left(\frac{V_R}{V_{cr}}\right)^2\right]^{1/2} \text{ сек}^{-1} \quad (4)$$

— частота радиальных колебаний вращающейся сверхмассивной звезды, а $R_0 \simeq 2.3 \cdot 10^{11} (M/M_\odot)^{5/11} \text{ см}$ — невозмущенное значение радиуса сверхмассивной звезды, находящейся на стадии ядерного горения по CNO циклу.

Скорость увеличения энергии колебаний сверхмассивной звезды за счет ядерных реакций составляет [1]

$$L_+ \simeq (3 + \nu) \left(\frac{R_0}{R_0}\right)^2 L_{th}, \quad (5)$$

где $L_{th} = 1.3 \cdot 10^{38} M/M_{\odot}$ эрг/сек — тепловая светимость сверхмассивной звезды, а ν — показатель температурной зависимости скорости ядерного энерговыделения, равный в случае горения по CNO циклу ~ 15 .

Сверхмассивная магнитная звезда будет пульсационно устойчивой, если $L > L_{th}$. Вводя $\eta = H_p^2 R_u^4 / 6GM^2$, равную по порядку величины отношению магнитной энергии звезды к модулю ее гравитационной энергии, можно переписать условие пульсационной устойчивости сверхмассивной однородно вращающейся магнитной звезды в виде: $\eta > \eta_{cr}$, где

$$\eta_{cr} = 0.3 (3 + \nu) \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-2/11} \left[1 + 0.4 \cdot 10^{-2} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{1.2} \left(\frac{V_R}{V_{cr}} \right)^2 \right]^{-2}. \quad (6)$$

Величина η_{cr} для различных значений M и V_R показана на рис. 1.

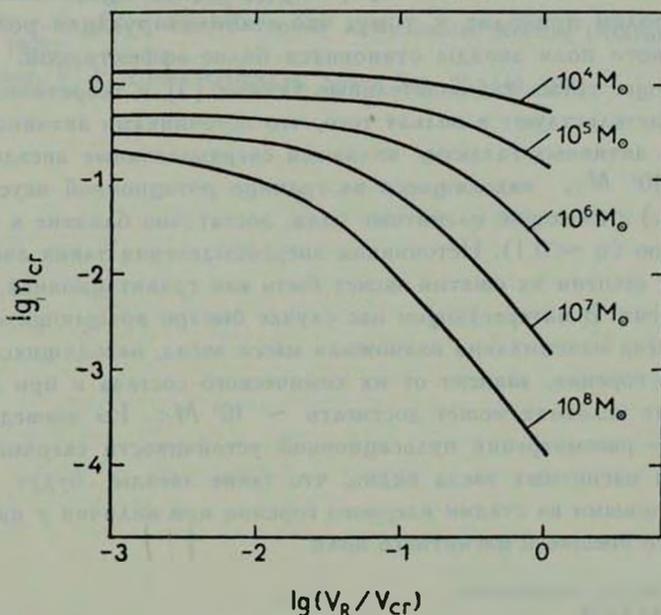


Рис. 1. Зависимость величины η_{cr} от отношения V_R/V_{cr} для различных значений массы звезды.

До сих пор при определении условия пульсационной устойчивости сверхмассивной магнитной звезды предполагалось, что распределение вещества внутри звезды описывается политропой индекса 3. Однако это возможно, лишь когда величина магнитного поля звезды значительно меньше его вириального значения H_p^{vir} , при котором магнитная энергия звезды

сравнима с модулем ее гравитационной энергии. При приближении H_p к H_p^{*ir} структура звезды меняется — звезда становится более однородной. При этом радиус сверхмассивной звезды, находящейся на стадии ядерного горения, уменьшается. Рассмотрим, как это скажется на стабилизирующей роли магнитного поля сверхмассивной звезды.

Известно, что при наличии магнитного поля колебания сверхмассивной звезды на основной частоте остаются квазигомологическими ($\delta r/r \approx \text{const}$ по объему звезды). Поэтому при $H_p \sim H_p^{*ir}$ формулы (3) и (5) для скорости потери и увеличения энергии колебаний имеют тот же вид, что и в случае $H_p \ll H_p^{*ir}$, только при подстановке в них величин R и ω необходимо учитывать отличие структуры сверхмассивной магнитной звезды от немагнитной политропы индекса 3. Легко показать, что в случае быстро вращающейся сверхмассивной магнитной звезды величина η_{cr} пропорциональна R^4 , т. е. уменьшается с уменьшением радиуса звезды. Следовательно, перераспределение вещества звезды ее магнитным полем приводит к тому, что стабилизирующая роль внешнего магнитного поля звезды становится более эффективной.

В настоящее время наблюдательные данные [5] и теоретические расчеты [6] свидетельствуют в пользу того, что источниками активности квазаров и ядер активных галактик являются сверхмассивные звезды с массой $\sim 10^5$ — $10^8 M_\odot$, находящиеся на границе ротационной неустойчивости ($V_R \sim V_{cr}$) и имеющие магнитные поля, достаточно близкие к вириальному значению ($\eta \sim 0.1$). Источником энерговыделения таких звезд в зависимости от степени их сжатия может быть как гравитационная, так и ядерная энергия. В интересующем нас случае быстро вращающихся сверхмассивных звезд максимально возможная масса звезд, находящихся на стадии ядерного горения, зависит от их химического состава и при наиболее благоприятных условиях может достигать $\sim 10^8 M_\odot$. Из проведенного в данной статье рассмотрения пульсационной устойчивости сверхмассивных вращающихся магнитных звезд видно, что такие звезды будут пульсационно устойчивыми на стадии ядерного горения при наличии у них достаточно сильного внешнего магнитного поля.

Институт космических исследований
АН СССР

ON THE EFFECT OF THE MAGNETIC FIELD ON THE PULSATION STABILITY OF RAPIDLY ROTATING SUPERMASSIVE STARS

V. V. USOV

The pulsational stability of rapidly rotating supermassive magnetic stars is considered. It is shown that the intensity of the poloidal magnetic field of the $10^5 M_{\odot}$ star, required for its stabilization, is of the order of the virial value. It decreases as the mass increases.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. Ledoux, Ap. J., 94, 537, 1941.
2. В. В. Усов, Письма АЖ, в печати, 1975.
3. R. Stothers, Ap. J., 192, 145, 1974.
4. R. M. Kulsrud, Ap. J., 163, 596, 1971.
5. L. M. Ozernoy, in „Proc. First European Astronomical Meeting (Athens 4—9 September, 1972)“.
6. L. M. Ozernoy, V. V. Usov, Astrophys. Space Sci., 25, 149, 1973.