

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 10

АВГУСТ, 1974

ВЫПУСК 3

ВЫДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В РЕЗУЛЬТАТЕ СЖАТИЯ ОБОЛОЧКИ БЕЛОГО КАРЛИКА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ОСТЫВАНИЯ

Т. А. ЭМИНЗАДЕ

Поступила 11 февраля 1974

Белые карлики имеют невырожденную оболочку, масса которой растет с увеличением внутренней температуры. В процессе эволюции белого карлика уменьшается внутренняя температура. Поэтому масса оболочки постепенно уменьшается и переходит в вырожденное ядро звезды. Это приводит к выделению энергии, значение которой сравнимо с тепловой энергией для масс $M < 0.5 M_{\odot}$. Если оболочка содержит водород, то в результате его перехода во внутренние части звезды может выделиться ядерная энергия, которая больше тепловой энергии белого карлика.

В теории строения звезд считается, что единственным источником энергии белых карликов является их тепловая энергия (на что впервые указал С. А. Каплан [1]), а эволюция этих звезд определяется их остыванием.

Однако в последнее время Г. С. Саакян, Р. М. Авакян, Д. М. Седракян, Э. Р. Чубарян указали, что в белых карликах могут быть эффективные источники энергии. В [3] указывается, что в недрах белых карликов могут существовать значительные запасы ядерной энергии, обусловленные превращением средних и тяжелых ядер в неустойчивое ядро. В [4] показано, что гравитационная энергия быстровращающихся белых карликов, связанная с их разбуханием, порядка их тепловой энергии или даже больше.

В настоящей заметке указывается, что в результате сжатия оболочки белого карлика может выделяться значительная энергия.

Белые карлики окружены лучистой невырожденной оболочкой. В оболочке градиент температуры велик из-за высокой лучистой непрозрачности и малого радиуса звезды. В нижней части оболочки наступает вырождение электронного газа и в переносе энергии главную

роль начинает играть теплопроводность электронов. Теплопроводность электронного газа сильно растет с увеличением плотности. Соответствующая теплопроводности кондуктивная непрозрачность K_c приблизительно может быть представлена выражением [2]:

$$K_c = 8.19 \cdot 10^{-5} (1 + X) \rho^{-5/3} T^{3/2}, \quad (1)$$

где X — весовое содержание водорода.

Из-за уменьшения K_c с ростом плотности градиент температуры уменьшается. В вырожденной области белых карликов температура растет очень медленно и поэтому в первом приближении можно принять, что она изотермична. Принимая за нижнюю границу лучистой невырожденной оболочки условие равенства давлений невырожденного и вырожденного газов

$$9.91 \cdot 10^{11} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{5/3} T^{3/2} = 8.31 \cdot 10^7 \frac{\rho T}{\mu}, \quad (2)$$

можно оценить температуру на этой границе [5].

В [6] были определены протяженность и масса лучистой оболочки белых карликов для двух предельных законов лучистого поглощения в оболочке: закона Крамерса $K = K_0 \rho T^{-3.5}$ и закона $K = K_0 T^{-2}$ [7]. Конечно, значения массы оболочки, данные в [6], приблизительно из-за принятия для непрозрачности аналитического выражения и условного определения нижней границы оболочки. Однако, как видно из расчетов в [6], разные законы непрозрачности мало влияют на результаты. Что касается условия определения нижней границы оболочки, то его более точное определение скорее повысит значение массы оболочки. Сравнение со значениями, полученными из точных расчетов, например в [8], показывает, что согласие в значениях масс оболочки удовлетворительное. Протяженность и масса оболочки уменьшаются с уменьшением центральной температуры.

Хотя гравитационная энергия белых карликов велика, сжатие вырожденной звезды не может быть источником энергии. При данной массе вырожденной звезды ее радиус определен однозначно и соответствует единственному устойчивому состоянию. Вырожденная звезда может сжиматься лишь при увеличении ее массы. Если исключить аккрецию вещества в двойных системах, то кажется невозможным указать причину, могущую привести к увеличению массы и, следовательно, к сжатию белого карлика. Поэтому гравитационная энергия обычно не учитывается при изучении эволюции белых карликов (за исключением начальной стадии образования белого карлика — перехода в вырожденное состояние).

Однако, как мы покажем в настоящей работе, гравитационная энергия может играть заметную роль в энергетическом балансе белых карликов. Дело в том, что белые карлики окружены невырожденной оболочкой. В ходе эволюции белый карлик остывает, тогда уменьшается масса оболочки. Эта убыль массы оболочки переходит в основное, вырожденное ядро звезды; рассеиваться она не может. Следовательно, масса вырожденного ядра белого карлика непрерывно растет. Хотя увеличение массы вырожденного ядра невелико — масса всей оболочки очень мала по сравнению с массой звезды — этот процесс оказывается довольно эффективным с энергетической точки зрения из-за большого значения гравитационной энергии белого карлика.

Полная энергия белых карликов, если их рассматривать как полностью вырожденные конфигурации, состоит из суммы гравитационной и внутренней энергий (энергии вырожденного электронного газа). Полная энергия отрицательна и уменьшается с увеличением массы звезды. При увеличении массы звезды гравитационная энергия звезды Ω уменьшается; часть ее идет на увеличение внутренней энергии, а остальная часть излучается. Излучаемая энергия как раз равна разности значений полной энергии. (Заметим, что для белых карликов теорема вириала не выполняется и полная энергия составляет все меньшую часть гравитационной энергии по мере увеличения массы). Энергия белых карликов для разных значений масс вычислена в [9]. Эти расчеты относятся к полностью вырожденным конфигурациям. Чтобы вычислить малое приращение полной энергии ΔE , вспомним, что полная энергия равна [9]:

$$E = \frac{3-n}{3} \Omega = -\frac{3-n}{5-n} \frac{GM^2}{R}, \quad (3)$$

где n — индекс политропы ($n = 3/2$ для малых масс и растет до 3 при приближении массы к предельной). Отсюда получаем выражение

$$\frac{\Delta E}{E} = 2 \frac{\Delta M}{M} - \frac{\Delta R}{R}, \quad (4)$$

где ΔM — прирост массы вырожденной звезды (за счет уменьшения массы оболочки), а $-\Delta R$ — уменьшение радиуса вырожденной звезды вследствие некоторого увеличения ее массы. Наши оценки показывают, что $\Delta R/R \approx \Delta M/M$. Используя из [6] данные о массе оболочки и из [9] о значении энергии вырожденной звезды, можно вычислить изменение полной энергии белых карликов за счет сжатия и уменьшения массы оболочки в процессе охлаждения белого карлика. Результаты приведены в табл. 1. Молекулярный вес электронного газа

$\mu_s = 2$ (в вырожденном ядре водорода нет). В оболочке принято, что $\mu = 1$; $Z = 0.1$; $X = 0.22$. Принято, что в оболочке коэффициент поглощения описывается законом Крамерса $K = K_0 Z(1 + X)\rho T^{-3.5}$. Там же приведены времена охлаждения τ и изменения тепловой энергии звезды за указанные времена. Для вырожденного ядра принят химический состав $Y = 0.9$; $Z = 0.1$; $\mu_A = 4.44$ [5].

Таблица 1

$Z=0.1$; $X=0.22$; $\mu=1$; $\mu_A=4.44$; $T_7=T/10^7$
 $M=1.08 M_\odot$, $-\Delta R/R=1.78 (\Delta M/M)$; $-E=2.045 \cdot 10^{50}$

T_7	τ (годы)	ΔE_t (эрг)	ΔE (эрг)	ΔE_n (эрг)
5.0	$3.44 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^{47}$	$4.56 \cdot 10^{46}$	$1.95 \cdot 10^{49}$
4.0	$6.10 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^{47}$	$3.30 \cdot 10^{46}$	
3.0	$1.23 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^{47}$	$2.11 \cdot 10^{46}$	
2.0	$3.40 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^{47}$	$1.06 \cdot 10^{46}$	
1.0	$1.92 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{47}$	$1.73 \cdot 10^{45}$	
0.5	$1.09 \cdot 10^{10}$			

$M=0.50 M_\odot$, $-\Delta R/R=0.50 (\Delta M/M)$; $-E=3.78 \cdot 10^{49}$

5.0	$3.44 \cdot 10^7$	$2.8 \cdot 10^{47}$	$1.31 \cdot 10^{47}$	$3.18 \cdot 10^{49}$
4.0	$6.1 \cdot 10^7$	$2.8 \cdot 10^{47}$	$1.09 \cdot 10^{47}$	
3.0	$1.23 \cdot 10^8$	$2.8 \cdot 10^{47}$	$8.13 \cdot 10^{46}$	
2.0	$3.40 \cdot 10^8$	$2.8 \cdot 10^{47}$	$4.68 \cdot 10^{46}$	
1.0	$1.92 \cdot 10^9$	$1.4 \cdot 10^{47}$	$9.83 \cdot 10^{45}$	
0.5	$1.09 \cdot 10^{10}$			

$M=0.22 M_\odot$, $-\Delta R/R=0.36 (\Delta M/M)$; $-E=3.81 \cdot 10^{46}$

5.0	$3.44 \cdot 10^7$	$1.22 \cdot 10^{47}$	$7.18 \cdot 10^{46}$	$8 \cdot 10^{49}$
4.0	$6.10 \cdot 10^7$	$1.22 \cdot 10^{47}$	$6.40 \cdot 10^{46}$	
3.0	$1.23 \cdot 10^8$	$1.22 \cdot 10^{47}$	$5.52 \cdot 10^{46}$	
2.0	$3.40 \cdot 10^8$	$1.22 \cdot 10^{47}$	$4.72 \cdot 10^{46}$	
1.0	$1.92 \cdot 10^9$	$6.1 \cdot 10^{46}$	$1.98 \cdot 10^{46}$	
0.5	$1.09 \cdot 10^{10}$			

ΔE_t — тепловая энергия, ΔE_n — ядерная энергия ($X=1$),
 ΔE_s — энергия, выделяющаяся при сжатии оболочки.

Как видно из табл. 1, энергия, которая выделяется при сжатии оболочки для $M = 0.22$ и $0.50 M_{\odot}$, сравнима с тепловой энергией белого карлика и ее роль растет с увеличением центральной температуры. Для $M = 1.08 M_{\odot}$ этот процесс не играет существенной роли.

Оболочка белых карликов может содержать водород. В результате сжатия оболочки водород переходит в ядро, где температура и плотность велики и поэтому водород может вступать в реакцию. По существу, это аналогично процессу аккреции вещества на белый карлик. В работах [10] и [11] этот процесс рассматривается с целью объяснения явления взрыва новых в двойных системах. Сжатие оболочки одиночной звезды к явлению взрыва типа новой, по-видимому, не может привести. Сжатие происходит довольно медленно и водород, накапливаясь в вырожденной области, постепенно будет гореть. В таком случае горение водорода будет дополнительным, еще более существенным источником энергии. В табл. 1 приведены значения энергии, выделяемой при горении водорода. Эта энергия значительно больше тепловой энергии для $M = 0.22$ и $0.5 M_{\odot}$, а для $1.08 M_{\odot}$ почти равна ей. Эти оценки относятся к случаю, когда в оболочке $X = 1.0$. Если водорода в оболочке меньше, то, конечно, запасы ядерной энергии меньше. Но для $M = 0.5 M_{\odot}$ запасы тепловой и ядерной энергий равны, если $X \approx 0.05$, а для $M = 0.22 M_{\odot}$ они равны, если $X \approx 0.008$. Такое низкое содержание водорода в оболочке вполне допустимо.

Указанный механизм освобождения энергии в белых карликах является еще одним указанием на то, что белые карлики вовсе не лишены источников энергии (кроме тепловой). Оболочка существует у всех белых карликов и поэтому все они имеют указанный здесь источник энергии. Если учесть, что средняя масса белых карликов составляет $0.5 - 0.7 M_{\odot}$ [12], то, следовательно, довольно много белых карликов имеет запас энергии, сравнимый (или даже больше) с их тепловой энергией.

Шемахинская астрофизическая
обсерватория

ENERGY RELEASE DUE TO THE COMPRESSION OF A WHITE DWARF ENVELOPE IN THE PROCESS OF ITS COOLING

T. A. EMINZADE

White dwarfs are known to have a non-degenerated envelope the mass of which increases with the increase of the inner temperature.
7-578

In the process of evolution the inner temperature of white dwarfs decreases. Therefore the envelope mass gradually decreases and passes into the degenerated star core. It leads to the release of an energy which is comparable with the thermal energy for masses $M < 0.5 M_{\odot}$. If hydrogen exists in the core, then as a result of the hydrogen transfer into the star interior, nuclear energy may be released which is more than the thermal energy of the white dwarf.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. С. А. Каплан, Астрон. ж., 27, 31, 1950.
2. P. Bodenheimer et al., Ap. J., 141, 1019, 1965.
3. Г. С. Саакян, Р. М. Авакян, Астрон. ж., 49, 316, 1972, *Астрофизика*, 8, 123, 1972.
4. Г. С. Саакян, Д. М. Седракян, Э. В. Чубарян, *Астрофизика*, 8, 541, 1972.
5. М. Шварцшильд, *Строение и эволюция звезд*, ИЛ, М., 1961.
6. П. И. Свидова, Т. А. Эминзаде, *Цирк. ШАО*, № 1, 1973.
7. R. E. Marshak, in „*Perspectives in Modern Physics*“ N.-Y., 1966.
8. S. A. Viti, Ap. J., 170, 153, 1971.
9. Т. А. Эминзаде, *Цирк. ШАО*, № 3, 1971.
10. Ю. Н. Редкобородый, *Астрофизика*, 8, 261, 1972.
11. А. В. Тутуков, Л. Ю. Юнгельсон, *Астрофизика*, 8, 381, 1972.
12. J. L. Greenstein, *Handbuch der Physik*, Bd. 50, ed. S. Flugge, Berlin, Springer-Verlag, 1968.