

О ВОЗМОЖНОСТИ УСКОРЕНИЯ ВЕЩЕСТВА В ГОРЯЧИХ
ЗВЕЗДАХ ЗА СЧЕТ ПОГЛОЩЕНИЯ В
СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЯХ

И. Ф. МАЛОВ

Поступила 5 августа 1971

Пересмотрена 13 декабря 1971

Получены максимальные значения импульса, который может быть передан от излучения веществу при поглощении в спектральных линиях в атмосферах звезд Вольфа-Райе и ОВ-сверхгигантов (результаты приведены на рис. 1, 2 и в табл. 1). На основании этих оценок показано, что максимальная скорость потери массы, обусловленная поглощением излучения в линиях, примерно на порядок меньше наблюдательных оценок, и, следовательно, механизм ускорения, связанный с этим поглощением, не играет определяющей роли в наблюдаемом истечении вещества из звезд Вольфа-Райе и ОВ-сверхгигантов.

1. Одной из возможных причин ускорения вещества в горячих звездах является поглощение выходящего из звезды излучения в звездной атмосфере в спектральных линиях. При этом, поскольку основной элемент (водород в ОВ-сверхгигантах и гелий в звездах Вольфа-Райе (WR)) почти полностью ионизован, взаимодействие с излучением осуществляется через ионы других элементов, а также через незначительную часть ионов основного элемента, у которых сохранился хотя бы один электрон (HI, HeI, HeII). Возникает вопрос о возможности передачи этими ионами импульса, полученного от излучения, на основную компоненту атмосферы, которая с излучением не взаимодействует*. Если такая передача возможна, то газ начинает

* В ряде работ [1—3] рассматривается возможность выброса ионов некоторых элементов (таких, как Ca, C и др.) вследствие селективного взаимодействия этих ионов с выходящим из звезды излучением. Однако в указанных работах не затрагиваются вопросы увлечения этими ионами основной компоненты атмосферы. Возможная роль селективных процессов в истечении вещества из звезд обсуждается также в [4, 5].

течь как целое, а параметры, характеризующие истечение, в этом случае могут быть получены в результате решения системы уравнений гидродинамики, описывающих указанную ситуацию. Попытка гидродинамического рассмотрения проблемы сделана в [6].

Применение строгих методов требует большой вычислительной работы. Может оказаться более целесообразным проведение простых оценок, если с их помощью можно показать непригодность данного механизма к рассматриваемой проблеме. В настоящей работе показывается, что простыми энергетическими оценками можно установить пределы применимости механизма ускорения, связанного с поглощением излучения в спектральных линиях*. Как будет установлено ниже, эти пределы находятся в согласии с результатами совместного решения уравнений гидродинамики, уравнения переноса и уравнения ионизационного равновесия, полученными в работе [6].

2. Наиболее обильными в атмосферах звезд WR следует, по видимому, считать ионы He II, C II, C III, C IV, N III, N IV, N V, O II, O III, O IV, O V, O VI, Si IV (см., например, [8]). В своих расчетах будем принимать во внимание линии первых трех серий He II и резонансные линии остальных ионов. Вычислим максимально возможный импульс, который может быть передан газу излучением при взаимодействии в этих линиях.

Будем считать, что при ускорении вещества от нулевой скорости до скорости V вследствие эффекта Доплера линия смещается вдоль спектра и „выедает“ из него участок шириной $\Delta\nu_i = \nu_i (V/c)$. Энергетическая доля всех таких участков в спектре равна

$$\gamma = \frac{\sum_i \int_{\nu_i}^{\nu_i + \Delta\nu_i} B_\nu d\nu}{\int_0^\infty B_\nu d\nu} = \frac{2\pi h}{\sigma c^2 T_*^4} \sum_i \int_{\nu_i}^{\nu_i + \Delta\nu_i} \frac{\nu^3 d\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT_*}} - 1}, \quad (1)$$

где B_ν — функция Планка, соответствующая температуре T_* . Остальные обозначения общепринятые. Суммирование проводится по всем рассматриваемым линиям.

* Мы уже указывали на такую возможность в [7], где использовались усредненные значения параметров звезд WR. Здесь приводятся результаты более детальных расчетов.

Нетрудно видеть, что γ является функцией температуры T_* , скорости V и химического состава. Мы будем считать, что все указанные выше линии играют роль в ускорении вещества, а их ширины соответствуют скорости $V = 1000$ км/сек. В этих условиях γ является функцией только T_* . Наиболее систематические сведения о температурах звезд WR даны в [9]. Ниже приведена таблица, взятая из этой работы и дополненная вычисленными значениями γ , светимости звезды L и скорости потери массы — M .

Таблица 1

НЕКОТОРЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВЕЗД
ВОЛЬФА-РАЙЕ (WR)

№ по HD	Sp	$T_* \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{K}$	M_b	$L \cdot 10^{-39}$ (эрг/сек)	γ (%)	$-M \cdot 10^{-7}$ $M_\odot/10 \text{ д}$
193576	WN 5.5	10.89	— 9.5	1.92	3.764	3.65
50896	WN 5.5	10.77	—11.4	11.04	3.772	21.86
193793	WC 6	10.37	—11.1	8.38	3.797	16.70
191765	WN 6	10.25	—11.8	15.94	3.806	31.85
192163	WN 6	10.03	—11.6	13.28	3.882	26.65
187282	WN 5	9.56	—10.2	3.65	3.866	7.41
192103	WC 7	9.18	—10.9	6.95	3.911	14.27
165763	WC 6(+?)	8.2:	—11.6:	13.28	4.104	28.61
193077	WN 5	8.19	—10.2	3.65	4.107	7.87
211853	WN 6+ B0:	7.90	(—11.1)	8.38	4.195	18.46
192641	WC 7	7.60	— 9.7	3.00	4.304	6.78
γ^2 Vel	WC7(+O7?)	7.20	(—10.5)	4.82	4.486	11.35
193928	WN 6+?	7.04	— 9.5	1.92	4.570	4.60

На рис. 1 представлена зависимость γ от температуры звезды. Падение γ с ростом T_* вызвано смещением максимума планковской кривой относительно области, в которой расположены линии, дающие наибольший вклад.

Импульс, теряемый звездой через излучение в единицу времени, равен L/c . На ускорение вещества в результате его взаимодействия с излучением в линиях может пойти доля этого импульса $\lesssim \gamma$. Это приведет к истечению с потоком импульса вещества на бесконечности, равным $-MV_\infty$, где V_∞ — асимптотическое значение скорости истечения. Следовательно, максимальная скорость потери массы вследствие поглощения излучения в спектральных линиях равна

$$-M = \gamma \frac{L}{cV_\infty}. \quad (2)$$

Взяв $V_{\infty} = 1000$ км/сек, получим значения \dot{M} , приведенные в последнем столбце табл. 1. На рис. 2 для сравнения представлены наблюдательные оценки \dot{M} , взятые из работы [10]. Вычисленные нами скорости потери массы всюду на полтора—два порядка ниже наблюдательных оценок.

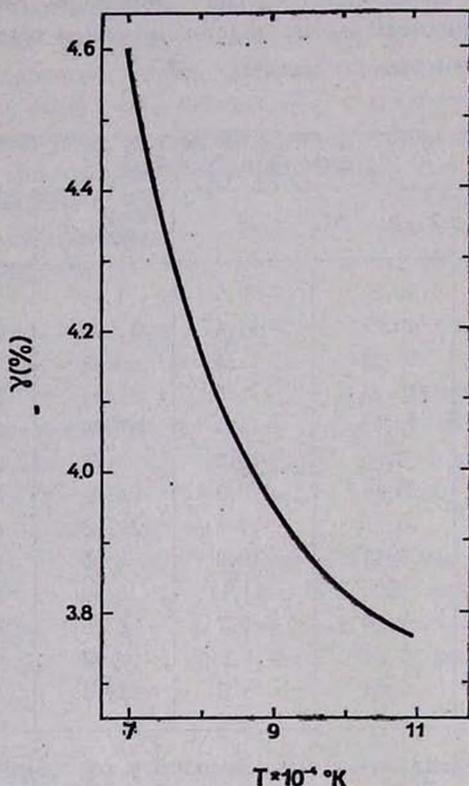


Рис. 1. Зависимость энергетической доли линий в спектрах звезд Вольфа-Райе от температуры.

Значения γ , приведенные в табл. 1, являются максимально возможными. Это связано со следующими факторами. 1) При вычислении γ по формуле (1) считалось, что участок планковской кривой, соответствующий данной линии, „выедается“ полностью, т. е. остаточная интенсивность всех линий предполагалась равной нулю. Ясно, что это требование не может быть выполнено для всех рассматриваемых линий. 2) При подсчете ширины каждой полосы принималось $V = 1000$ км/сек. Однако вследствие стратификации атмосферы некоторые линии должны образовываться в оболочке, разность скоро-

стей на границах которой меньше, чем 1000 км/сек. Поэтому для некоторых линий Δv_i будут меньше, чем принятые здесь значения. 3) Для всех звезд предполагалось, что ионы С и N вносят одновременный вклад. Известно, однако, что существует две последовательности звезд WR: углеродная последовательность (WC), в звездах которой не наблюдаются линии N, и азотная последовательность

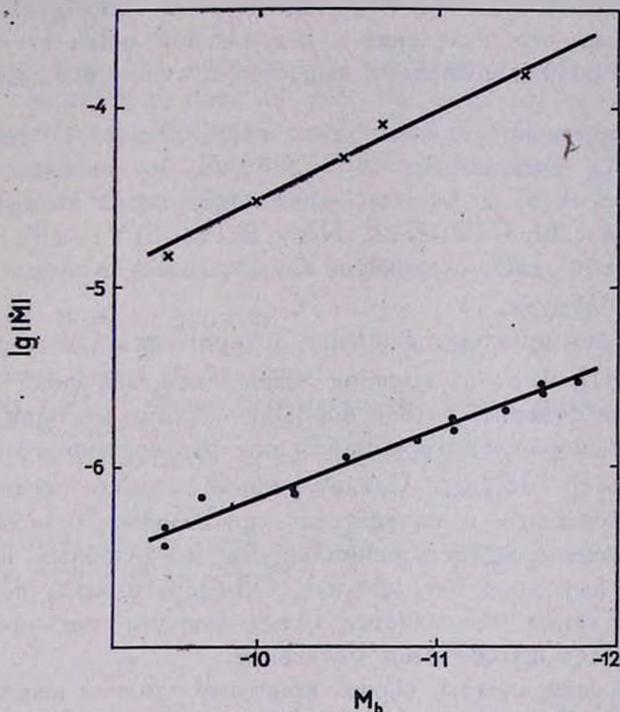


Рис. 2. Сравнение значений скорости потери массы, полученных по формуле (2), (точки) с наблюдательными оценками [10] (крестики). Величины $-M_b$ выражены в $M_{\odot/10d}$.

(WN), характеризующаяся отсутствием линий С и O*. Учет этого фактора для реальных звезд уменьшит значение γ . 4) Для линий вблизи границ серий считалось, что происходит полное „выедание“ от некоторой линии вплоть до границы. Ясно, что в действительности полного „выедания“ нет.

С другой стороны, учет вклада следующих серии He II и линий других ионов приведет к увеличению γ . Оценки, однако, показывают,

* У некоторых звезд WR наблюдается одновременное присутствие в спектре линий С, O и N. Однако одни из них бывают обычно значительно слабее других.

что линии следующих серий He II увеличивают γ лишь на 0.1—0.2%*, в то время, как исключение линий C и O приведет для звезд WN к уменьшению γ примерно на 0.5%. Следовательно, указанный эффект не изменяет вывода о максимальной полученных значений γ .

Таким образом, если только наблюдательные оценки для $-M$ не являются систематически завышенными на 1.5—2 порядка, поглощение в спектральных линиях всех элементов не обеспечивает истечения вещества из звезд WR. Этот вывод является обобщением утверждения [4] о том, что излучение в резонансной линии He II не играет существенной роли в ускорении вещества в атмосферах звезд WR.

3. Аналогичные оценки для сверхгиганта с температурой $T_* = 20\,120^\circ\text{K}$, светимостью $L = 1.9 \cdot 10^5 L_\odot$ и конечной скоростью $V_\infty = 3300 \text{ км/сек}$ [6] с учетом первых трех серий водорода и резонансных линий C III, C IV, N III, N V, Si IV, Si V, S III, S IV, S VI, приведенных в [6], дают следующие максимальные значения: $\gamma = 13.15\%$, $-M = 1.5 \cdot 10^{-7} M_\odot/\text{год}$.

Наблюдения приводят к оценке потери массы OB-сверхгигантами $10^{-6} M_\odot/\text{год}$ [11], т. е. на порядок выше, чем значение, полученное нами. Следует отметить, что с помощью строгих методов в [6] получено значение скорости потери массы для рассмотренного нами сверхгиганта $-M \sim 10^{-8} M_\odot/\text{год}$. Следовательно, только около 10% импульса, заключенного в соответствующих линиях, передается веществу**. Это подтверждает максимальность приведенных нами оценок и приводит к выводу о том, что и в OB-сверхгигантах поглощение в спектральных линиях не является определяющим механизмом, который обеспечивает наблюдаемое истечение.

В заключение считаю своим приятным долгом выразить благодарность М. В. Конюкову за обсуждение результатов и Р. А. Владимировой за помощь в вычислениях.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
АН СССР

* Можно ожидать, что вклад других ионов еще меньше.

** Если такая эффективность передачи импульса характерна и для звезд WR, то поглощение в спектральных линиях может обеспечить в этих звездах скорость потери массы порядка $10^{-7} M_\odot/\text{год}$.

ON THE POSSIBILITY OF ACCELERATION OF MATTER
IN HOT STARS BY ABSORPTION IN SPECTRAL LINES

I. F. MALOV

The maximal values of a momentum that may be contributed by radiation to a matter through absorption in spectral lines in Wolf-Rayet stars and OB-supergiants are obtained. (The results are shown in Figs. 1—2 and listed in the Table 1).

It is shown that the acceleration mechanism connected with an absorption in spectral lines does not play the main role in the observed outflow of matter from Wolf-Rayet stars and OB-supergiants, because the maximal rate of a mass loss due to this mechanism is approximately one order less than observational estimates.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *M. C. Johnson*, M. N., 85, 813, 1925.
2. *E. A. Milne*, M. N., 86, 459, 1926.
3. *С. Б. Пикельнер*, Астрон. ж., 24, 5, 1947.
4. *В. Г. Горбачук*, *И. Н. Минин*, Нестационарные звезды, Физматгиз, М., 1963.
5. *L. V. Lucy*, *P. M. Solomon*, A. J., 72, 310, 1967.
6. *L. V. Lucy*, *P. M. Solomon*, Ap. J., 159, 879, 1970.
7. *И. Ф. Малов*, Астрон. цирк., № 616, 1971.
8. *P. Swings*, Ap. J., 95, 112, 1942.
9. *С. В. Рублев*, Кандидатская диссертация, Ростов, 1965.
10. *С. В. Рублев*, Астрон. ж., 42, 718, 1965.
11. *D. C. Morton*, Astrophys. Space Sci., 3, 117, 1969.

