

Список литературы

1. Wolf M, Rayet G C R. *Acad. Sci.* **65** 292 (1867)
2. Van der Hucht K A. *New Astron. Rev.* **45** 135 (2001)
3. Cherepashchuk A M, in *Modern Problems of Stellar Evolution: Proc. of the Intern. Conf. in Honour of Professor A G Masevitch's 80th Birthday, Zvenigorod, Russian, 13–15 October 1988* (Ed. D S Wiebe) (Moscow: GEOS, 1998) p. 198
4. Cherepashchuk A M. *Space Sci. Rev.* **93** 473 (2000)
5. Черепашук А М. *Астрон. журн.* **78** 145 (2001)
6. Герштейн С С. *Письма в Астрон. журн.* **26** 848 (2000)
7. Постнов К А, Черепашук А М. *Астрон. журн.* **78** 602 (2001)
8. Paczynski B, in *Wolf–Rayet and High-Temperature Stars: Symp. № 49 of the Intern. Astron. Union, Buenos Aires, Argentina, Aug. 9–14, 1971* (Eds M K V Bappu, J Sahade) (Dordrecht: D. Reidel Publ. Co., 1973) p. 143
9. Conti P S. *Mem. Soc. R. Sci. Liege* **9** (6) 193 (1976)
10. Bisnovatyi-Kogan G S, Nadyozhin D K. *Astrophys. Space Sci.* **15** 353 (1972)
11. Де Ягер К. *Звезды наибольшей светимости* (М.: Мир, 1984)
12. Lamers H J G L M, Cassinelli J P. *Introduction to Stellar Winds* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1999) p. 248
13. Новиков И Д, Фролов В П. *УФН* **171** 307 (2001)
14. Черепашук А М. *УФН* **171** 864 (2001)
15. Charles P, in *Black Holes in Binaries and Galactic Nuclei* (Eds L Kaper, E P J van den Heuvel, P A Woudt) (Berlin: Springer, 2001) p. 27
16. Thorsett S E, Chakrabarty D. *Astrophys. J.* **512** 288 (1999)
17. Orosz J A et al., astro-ph/0103045 (submitted to *Astrophys. J.*)
18. Wagner R M et al., Preprint (2001)
19. Greiner J, Cuby J G, McCaughrean M J. *Nature* **414** 522 (2001)
20. Casares J et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **329** 29 (2002)
21. Shore S N, Livio M, van den Heuvel E P J. *Interacting Binaries* (Berlin: Springer-Verlag, 1994)
22. Iben I (Jr), Tutukov A V, Yungelson L R. *Astrophys. J. Suppl.* **100** 233 (1995)
23. Bailyn C D et al. *Astrophys. J.* **499** 367 (1998)
24. Barziv O et al. *Astron. Astrophys.* (2002) (in press)
25. Wijers R A M, in *Evolutionary Processes in Binary Stars* (NATO ASI Series, Ser. C. Vol. 477, Eds R A M J Wijers, M B Davies, C A Tout) (Dordrecht: Kluwer Acad., 1996) p. 327
26. Langer N. *Astron. Astrophys.* **220** 135 (1989)
27. Moffat A F J, in *Wolf–Rayet Stars: Binaries, Colliding Winds, Evolution: Proc. of the 163rd Symp. of the Intern. Astron. Union, La Biadola, Elba, Italia, May 2–6, 1994* (Eds K Avan der Hucht, P M Williams) (Dordrecht: Kluwer Acad., 1995) p. 213
28. Cherepashchuk A M, Khaliullin Kh F, Eaton J A. *Astrophys. J.* **281** 774 (1984)
29. Moffat A F J et al. *Astrophys. J.* **334** 1038 (1988)
30. Черепашук А М. *Астрон. журн.* **67** 955 (1990)
31. Ergma E, van den Heuvel E P J. *Astron. Astrophys.* **331** L29 (1998)
32. Harries T J, Hillier D J, Howarth I D. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **296** 1072 (1998)
33. Постнов К А, Прохоров М Е. *Астрон. журн.* **78** 1025 (2001)
34. Бисноватый-Коган Г С. *Астрон. журн.* **47** 813 (1970)
35. Richardson D et al. *Astrophys. J.* **123** 745 (2002); astro-ph/0112051
36. Иванова Л Н, Четкин В М. *Астрон. журн.* **58** 1028 (1981)
37. Ensman L M, Woosley S E. *Astrophys. J.* **333** 754 (1988)

PACS number: 97.60.Bw

Сверхновые типа Ib/c. Новые данные наблюдений

Д.Ю. Цветков

1. Введение

Эволюция звезд определенных классов заканчивается взрывом сверхновой, после которого звезда перестает существовать или переходит в качественно отличное состояние. Вспышки сверхновых звезд (СН) наблюдаются в галактиках как внезапное появление звезды, по светимости сравнимой со светимостью всей галактики.

В последние годы интерес к исследованиям сверхновых сильно возрос. Если двадцать лет назад в год открывалось не более 20 сверхновых, десять лет назад — около 60, то в 2001 г. было открыто рекордное количество — 282 сверхновых. Общее число открытых с 1885 г. внегалактических сверхновых уже составляет более 2000. Для поиска СН разработаны специальные полностью автоматические системы. Активно участвуют в поиске СН любители астрономии.

Наблюдательная астрофизика исследует зависимость мощности излучения СН от времени — кривые блеска в различных спектральных диапазонах, изменение спектров излучения со временем.

Осуществляются также статистические исследования популяции СН: определение частоты вспышек, пространственное распределение в родительских галактиках.

Теоретическое моделирование кривых блеска и спектров и статистические характеристики позволяют сделать вывод о том, какие звезды взрываются как сверхновые, какими могут быть остатки вспышек.

2. Классификация сверхновых

Уже в самом начале исследований сверхновых стало ясно, что они не представляют собой однородный класс объектов. Существующая классификация основана в основном на виде спектров вблизи максимума блеска. Сверхновые были разделены на два основных типа — I и II. Сверхновые II типа имели яркие эмиссионные линии водорода в спектре, СН I их не имели. СН I встречались в галактиках всех типов, в том числе в эллиптических, где звездообразование в настоящее время практически прекратилось, а СН II — только в спиральных, демонстрируя явную концентрацию в спиральных рукавах. Основными деталями в спектре сверхновых I типа вблизи максимума блеска были широкие линии поглощения однократно ионизованных элементов промежуточных масс: кремния, кальция, магния, натрия, железа. Одной из наиболее заметных деталей была линия поглощения Si II на длине волны 6150 Å. Еще в 60-е годы было замечено, что у некоторых СН I эта линия слаба или почти отсутствует. Эти СН стали называть пекулярными сверхновыми I типа. Только в середине 80-х годов стало ясно, что эти сверхновые представляют собой особый тип, существенно отличающийся от СН I. Спектры этих сверхновых были получены с помощью цифровых приемников, позволивших точно определять интенсивности линий; но наибольшее значение имело исследование спектров на поздних (> 200 сут после максимума) стадиях развития вспышки. Эти спектры оказались совершенно не похожими на спектры большинства СН I. В них доминировали запрещенные эмиссионные линии кислорода и кальция, в то время как в обычных СН I в спектре на этой фазе наиболее заметны бленды линий железа и кобальта. Было также обнаружено, что эти "пекулярные" СН I встречаются только в спиральных галактиках и в них демонстрируют тесную связь с областями звездообразования. Таким образом, было показано, что эти сверхновые не представляют собой разновидность СН I, а являются особым типом сверхновых, по эволюционному статусу предсверхновых скорее более похожим на СН II. Этот тип получил наименование Ib, а "обычные" сверхновые I стали обозначать как Ia. Более подробное исследование спектров СН Ib позволило установить, что наиболее заметные линии погло-

щения в их спектре вблизи максимума блеска на длине волны около 5700 Å принадлежат гелию. Присутствовали и обычные для СН Ia линии кальция, кремния и железа. С ростом числа исследованных СН Ib обнаружились различия в их спектрах. Наиболее явным было различие в интенсивности линий гелия, у некоторых СН Ib они практически отсутствовали. Эти сверхновые было предложено назвать типом Ic. Однако на поздней, небулярной стадии они не отличались по спектру от СН Ib. Было также показано, что в спектрах СН Ic гелий все же присутствует, так что скорее всего существуют не обособленные типы Ib и Ic, а непрерывная последовательность спектральных характеристик, связанная с различным обилием гелия в оболочке.

3. Возможная связь СН Ib/c с гамма-всплесками

25 мая 1998 г. аппаратура на спутниках ВерроSAX и CGRO зарегистрировала гамма-всплеск с координатами $\alpha = 19$ ч 34 мин 54 с; $\delta = -52^\circ 49,9'$ с вероятной ошибкой 8'. Оптические наблюдения области всплеска были начаты уже 26 мая, и было обнаружено, что на расстоянии 1,6' от координат гамма-всплеска находится довольно яркая и близкая спиральная галактика ESO 184-G82, расстояние до которой составляет около 34 Мпк, а в ней — сверхновая, которая еще находилась на подъеме к максимуму блеска, которого она достигла 12 мая [1]. Таким образом, налицо пространственное и временное совпадение сверхновой и гамма-всплеска. Однако исследования области гамма-всплеска при помощи камеры NFI на спутнике ВерроSAX показали присутствие двух рентгеновских источников, причем один практически совпадал с СН 1998bw, а другой находился на расстоянии $\sim 4'$, но в пределах радиуса ошибки гамма-всплеска [1]. Второй источник очень быстро ослабел, а первый наблюдался еще долгое время. Вполне возможно, что второй источник и был рентгеновским послесвечением гамма-всплеска, а первый и сверхновая лишь случайно оказались в этом месте, хотя вероятность такого совпадения оценена как $\sim 10^{-4}$. В пользу этого предположения свидетельствует также то, что светимость гамма-всплеска, если он действительно находился на таком близком расстоянии, составляет около 10^{-6} от типичной светимости гамма-всплесков.

Однако СН 1998bw оказалась необычной, что, конечно, является аргументом в пользу ее связи с гамма-всплеском.

Спектр СН 1998bw, хотя его и можно классифицировать как относящийся к типу Ic, около максимума блеска существенно отличался от обычных СН Ic, и основной причиной отличия можно считать очень высокую скорость расширения оболочки СН 1998bw [2]. Оказалось, что похожим спектром в максимуме блеска обладала еще одна сверхновая Ic — СН 1997ef, открытая в конце ноября 1997 г. [3]. Высокая скорость расширения оболочки, возможная ее большая масса и высокая светимость в максимуме СН 1998bw свидетельствовали о повышенной энергии взрыва.

4. Кривые блеска сверхновых

Кривые блеска СН Ia достаточно похожи друг на друга, показывают быстрый подъем к максимуму, продолжающийся около 20 сут, несколько более медленный спад блеска, который через 30–40 сут сильно замедляется и

продолжается с постоянной скоростью, выраженной в единицах звездных величин за единицу времени, что соответствует экспоненциальному ослаблению светимости. Кривые блеска сверхновых II типа очень разнообразны, что отражает разнообразие характеристик оболочек звезд-сверхгигантов на последних стадиях эволюции. Среди них встречаются и достаточно похожие по форме на СН Ia, и резко от них отличающиеся, с продолжительным (до 100 сут) периодом практически постоянного блеска.

Кривые блеска СН Ib/c в диапазонах В и V, для которых имеется наибольшее количество данных, достаточно похожи по форме на кривые СН Ia, однако они показывают очень большой разброс по скорости падения блеска после максимума, по ширине пика кривых, по времени начала линейного участка. Параметр Δm_{15} , которым принято описывать скорость падения блеска после максимума, принимает для них значения от $0^m, 3$ до $1^m, 8$, время начала линейного участка — от 20 до 40 сут.

По абсолютным величинам в максимуме блеска СН Ib/c также показывают очень большую дисперсию, от -16^m до -20^m . Наибольшую светимость среди хорошо исследованных СН Ib/c $M_V = -19^m, 4$ имеет СН 1998bw, однако сходная с ней по спектру СН 1997ef имеет достаточно сильно отличающуюся по форме кривую блеска и довольно низкую светимость в максимуме около -17^m . Недавно проведенное исследование [4] показало, что, возможно, существуют две отдельные группы СН Ib/c — "яркие", с абсолютной величиной около -20^m , и "слабые", с абсолютной величиной от -16^m до -18^m .

Наблюдения и анализ кривых блеска СН Ib/c проводились в Государственном астрономическом институте им. П.К. Штернберга (ГАИШ): осуществлены фотометрические наблюдения 14 СН Ib/c, из которых опубликованы данные для 8 СН [5–7].

5. Статистические характеристики СН Ib/c

Сверхновые Ib/c являются довольно редкими. Из почти 2000 СН, открытых после 1885 г., к этому типу отнесено 83 объекта. Из 282 СН, открытых в 2001 г., всего 9 сверхновых Ib/c.

Статистические исследования сверхновых включают изучение их пространственного распределения в родительских галактиках, в том числе распределение относительно таких деталей структуры галактик, как спиральные рукава и области H II, а также исследование частоты вспышек.

Последнее исследование частоты вспышек сверхновых, основанное на объединении результатов нескольких программ поиска СН [8], показало, что частота СН Ib/c существенно меньше частоты СН II и СН I. В единицах SNu (число СН/ $10^{10} L_\odot$ /100 лет) частота вспышек СН Ib/c в спиральных галактиках типов Sbc-Sd составляет около 0,14, в то время как для СН Ia — 0,21 и для СН II — 0,86. Согласно этим данным, в нашей Галактике одна СН Ib/c должна вспыхивать примерно раз в 400 лет, а общая частота всех СН — примерно одна в 50 лет, т.е. СН Ib/c составляют примерно одну восьмую всех СН. Однако недавно проведенное исследование [9] показало, что в сейфертовских галактиках — галактиках с активными ядрами частота вспышек СН Ib/c по отношению к сверхновым типа II может быть существенно повышена.

Неоднократно проводимые исследования пространственного распределения сверхновых [10] показали, что СН Ib/c демонстрируют очень сильную концентрацию в спиральных рукавах галактик и в зонах Н II, т.е. в местах активного звездообразования. Не вызывает сомнения, что как СН Ib/c вспыхивают молодые массивные звезды, возраст которых не превышает 10^7 лет, а начальная масса на главной последовательности больше $8-10 M_{\odot}$.

Радиальное распределение СН Ib/c в галактиках [11] имеет сходство с распределением молодых объектов — ОВ-ассоциаций и зон Н II. Сравнение радиальных распределений гамма-всплесков и СН Ib/c показало довольно значимое различие.

6. Радиоизлучение сверхновых Ib/c

Исследование радиоизлучения СН может установить ряд важных физических характеристик взрыва: скорость и замедление ударной волны, распространяющейся после взрыва; особенности в распределении околос звездного вещества; скорость потери массы звездой до взрыва [12].

Наблюдения показали, что радиоизлучение СН Ib/c является нетепловым синхротронным излучением с высокой яркостной температурой. Поглощение излучения уменьшается со временем, в результате максимум достигается сначала на более коротких длинах волн. После максимума плотность излучения уменьшается по степенному закону. Релятивистские электроны и магнитное поле, необходимые для создания излучения, образуются при взаимодействии ударной волны сверхновой с достаточно плотным околос звездным веществом, ионизованным и нагретым ультрафиолетовой и рентгеновской вспышкой, возникающей при выходе ударной волны на поверхность звезды. Предполагается, что околос звездное вещество образовано звездным ветром предсверхновой или ее спутника с постоянной скоростью потери массы и постоянной скоростью ветра. Ионизованное околос звездное вещество поглощает радиоизлучение. Быстрое увеличение потока объясняется прохождением ударной волны через вещество, в результате толщина слоя поглощающего вещества быстро уменьшается.

В рамках этой модели можно получить оценки скорости потери массы предсверхновой; для СН Ib/c характерное значение составляет $\dot{M} \sim 10^{-6} M_{\odot}$ в год.

7. Радиоизлучение СН 1998bw

Сверхновая 1998bw была детально исследована в радиодиапазоне, и ее свойства оказались достаточно необычными. Очень большая радиосветимость на длине волны 6 см — $7,9 \times 10^{28}$ эрг с^{-1} Гц $^{-1}$ [13], что примерно в 30 раз выше средней для СН Ib/c, была достигнута очень быстро после вспышки. При условии постоянной яркостной температуры, для которой принято значение $10^{11.5}$ К, это означает очень высокую скорость расширения "радиосферы" — около 200000 км с^{-1} .

Кривые радиоблеска имеют два максимума на коротких волнах 3,5 и 6,3 см, в то время как на волне 21,7 см виден только один максимум. В рамках модели с синхротронным излучением и тепловым тормозным поглощением наличие двух максимумов на кривых радиоблеска объясняется прохождением ударной волны через зоны с разной плотностью межзвездной среды. Моделирование также показывает, что межзвездная среда должна быть клочковатой, почти вся ее масса

сконцентрирована в отдельных сгустках со скважностью в пределах 0,1–0,25. Это помогает объяснить и высокую скорость ударной волны, которая распространяется практически в вакууме. Можно также сделать вывод, что максимумы плотности среды разделены расстоянием около $\sim 3 \times 10^{17}$ см, что, возможно, связано с изменением темпа потери массы предсверхновой или является результатом взаимодействия ветров предсверхновой и ее спутника в двойной системе. Была получена и оценка темпа потери массы предсверхновой $\dot{M} \sim 3,5 \times 10^{-5} M_{\odot}$ в год [12].

8. Теоретические модели вспышек СН Ib/c

Совокупность статистических характеристик и наблюдений кривых блеска и спектров СН Ib/c позволяет сделать некоторые выводы о природе предсверхновых. Это должны быть молодые массивные звезды, потерявшие в процессе эволюции водородную и, полностью или частично, гелиевую оболочку. Потеря оболочки может происходить в виде звездного ветра или при эволюции в тесной двойной системе; возможны и различные комбинации этих процессов.

Теоретические расчеты кривых блеска и спектров сверхновых позволяют оценить такие важные параметры, как энергия взрыва, масса сброшенной оболочки, характерный радиус предсверхновой, масса выброшенного ^{56}Ni .

Для СН Ic с узким пиком кривой блеска 1994I наиболее подходящей моделью является C+O звезда с массой $2,1 M_{\odot}$. Масса ^{56}Ni $M_{\text{Ni}} \approx 0,07 M_{\odot}$, масса выброса — $0,9 M_{\odot}$, энергия $E = 1 \times 10^{51}$ эрг [14].

В ГАИШе и в Институте теоретической и экспериментальной физики для расчетов кривых блеска СН разработан пакет программ STELLA, описывающий обмен энергией и импульсом между веществом и излучением без предположения о стационарности, позволяющий рассчитывать реалистические кривые блеска в различных фильтрах. С его помощью были исследованы и модели СН Ib/c [15]. В работе [16] были проведены расчеты эволюции массивных звезд с учетом эффекта потери массы. Одна из этих моделей, mt60, была предложена как предсверхновая. На главной последовательности эта модель имела массу $60 M_{\odot}$, в результате мощного истечения звезда перешла в класс Вольфа–Райе, а перед коллапсом осталось всего лишь $4,25 M_{\odot}$ полной массы, причем весь водород был потерян. Радиус предсверхновой $R_0 \approx 0,56 R_{\odot}$. В расчетах было принято, что коллапсирует ядро с массой $1,6 M_{\odot}$, так что масса выброса $\sim 2,65 M_{\odot}$. Масса ^{56}Ni $M_{\text{Ni}} \approx 0,22 M_{\odot}$. Кинетическая энергия выброса составляет $E_{\text{kin}} \approx 1,37 \times 10^{51}$ эрг. Сравнение полученных кривых блеска с наблюдаемыми для одной из сверхновых типа Ib, СН 1962L, показывает, что в целом качественное согласие наблюдается вблизи максимума, но хвост теоретической кривой слишком высок. Его можно снизить, понизив количество ^{56}Ni , но тогда и максимум снизится. Возможно, что это расхождение будет устранено при учете эффектов отклонения от ЛТР, которые очень сильны для СН Ib/c уже вблизи максимума блеска.

Наибольшее внимание в последнее время уделяется моделированию вспышек СН 1998bw и 1997ef. Для СН 1997ef рассматривались модели взрыва звезды с массой C+O $\sim 6 M_{\odot}$, энергией взрыва $E = 1 \times 10^{51}$ эрг, массой ^{56}Ni $M_{\text{Ni}} \approx 0,15 M_{\odot}$, а также модель с увеличенной

массой $M_{ej} = 9,5 M_{\odot}$ и энергией $E = 1,9 \times 10^{52}$ эрг; кривая блеска достаточно хорошо воспроизводится обеими моделями, но вторая лучше представляет спектры и скорости расширения оболочки [17]. Для SN 1998bw наилучшее сходство с наблюдениями дали модели кислородно-углеродной звезды с $M_{MS} \approx 40 M_{\odot}$, $M_{fin} = 13,8 M_{\odot}$, $M_{ej} = 10 M_{\odot}$, $M_{Ni} \approx 0,4 M_{\odot}$, $E = 5 \times 10^{52}$ эрг. Масса компактного остатка в этой модели превышает $3 M_{\odot}$ и, таким образом, вполне может быть черной дырой [18].

Список литературы

- Galama T J et al. *Nature* **395** 670 (1998)
- Patat F et al., astro-ph/0103111
- Millard J et al. *Astrophys. J.* **527** 746 (1999)
- Richardson D et al. *Astrophys. J.* **123** 745 (2002); astro-ph/0112051
- Цветков Д Ю *Письма в Астрон. журн.* **13** 894 (1987)
- Цветков Д Ю, Павлюк Н Н *Письма в Астрон. журн.* **21** 678 (1995)
- Цветков Д Ю, Павлюк Н Н, Павленко Е П *Астрон. журн.* **78** 613 (2001)
- Cappellaro E et al. *Astron. Astrophys.* **322** 431 (1997)
- Bressan A, Della Valle M, Marziani P *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **331** L25 (2002); astro-ph/0201085
- Bartunov O S, Tsvetkov D Yu, Filimonova I V *Publ. Astron. Soc. Pac.* **106** 1276 (1994)
- Цветков Д Ю, Блишников С И, Павлюк Н Н *Письма в Астрон. журн.* **27** 483 (2001)
- Weiler K W, Panagia N, Montes M J, astro-ph/0106131 (to appear in the *Astrophys. J.*)
- Kulkarni S R et al. *Nature* **395** 663 (1998)
- Iwamoto K et al. *Astrophys. J. Lett.* **437** L115 (1994)
- Блишников С И, Дисс. ... докт. физ.-мат. наук (М.: ИТЭФ, 2000)
- Woosley S E, Langer N, Weaver T A *Astrophys. J.* **411** 823 (1993)
- Mazzali P A, Iwamoto K, Nomoto K, astro-ph/0007222 (to appear in the *Astrophys. J.*)
- Iwamoto K et al. *Astrophys. J.* **534** 660 (2000)