

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
МАТЕМАТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА АСТРОФИЗИКИ

Сверхновые звезды.  
Механизмы вспышек.

Дорониной Яны

Санкт-Петербург 2013

# 1 Исторические сверхновые

С незапамятных времен астрономам известно, что время от времени на небе появляются звезды, прежде не наблюдавшиеся. Неожиданно вспыхнувшая звезда может стать столь яркой, что "нарушает" привычную конфигурацию созвездия, в котором она вспыхнула, и невольно обращает на себя внимание людей, пусть и далеких от астрономии, но знающих звездное небо. Такие яркие вспышки достаточно редки, однако исторические хроники из Восточной Азии, Европы и арабского мира донесли до нас свидетельства о таких удивительных явлениях, случившихся много веков назад.

Хорошо известно, что в нашей Галактике не наблюдалось ни одной сверхновой с 1604 года, потому при изучении таких событий приходится опираться исключительно на наблюдения, проведенные невооруженным глазом. К счастью, астрономы прошлого зафиксировали несколько таких событий, наряду с другими появляющимися на некоторое время "звездами" - кометами и новыми. Как и следовало ожидать, качество этих ранних наблюдений неодинаково. В случае двух последних вспышек 1572 и 1604 годов европейские астрономы измеряли положения с достаточной точностью - примерно до 1 угловой минуты, а также внимательно следили за изменениями яркости. Качество же более ранних наблюдений существенно хуже. Тем не менее, положения еще трех сверхновых уверенно определяются по средневековым восточноазиатским записям. В число потенциальных сверхновых звезд попадают преимущественно те звезды, которые были видимы как минимум три месяца. Это ограничение отсекает большинство новых и значительную долю комет.

Таблица 1: Исторические сверхновые

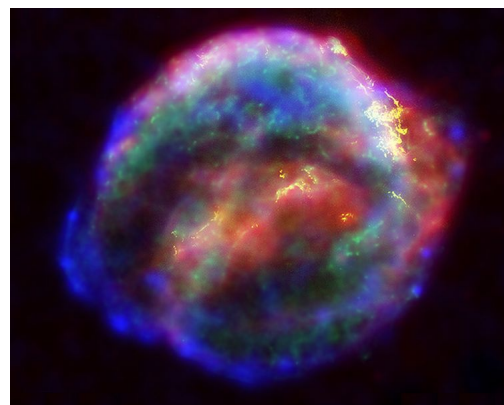
Название сверхновой	Тип	Остаток сверхновой
Сверхновая SN1987A	II	SNR 1987A
Сверхновая 1885 г.	Ia	SNR 1885A
Сверхновая 1680 г.	IIb	Кассиопея А
Сверхновая Кеплера 1604 г.	Ia	G4.5+6.8
Сверхновая Тихо Браге 1572 г.	Ia	SNR 3C 10
Сверхновая 1181 г.	II	SNR-3C58 - PSR J0205+6449
Сверхновая 1054 г.	II	Крабовидная туманность
Сверхновая 1006 г.	Ia	G327.4+14.6
Сверхновая 393(?) г.	?	?
Сверхновая 386 г.	II(?)	G11.2-0.3
Сверхновая 369(?) г.	?	?
Сверхновая 185 г.	Ia(?)	RCW 86(?)

## 2 Открытие сверхновых

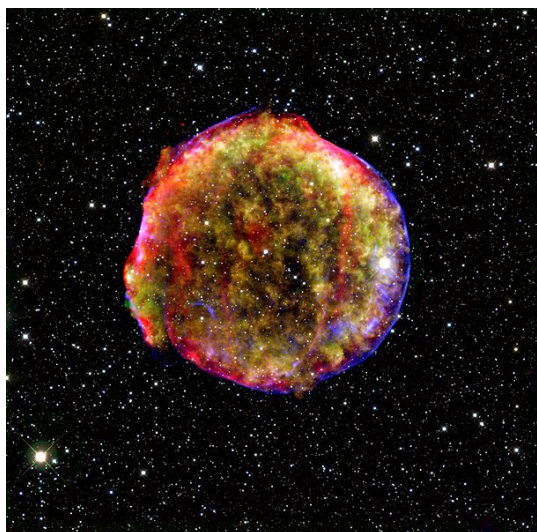
31 августа 1885 года на обсерватории, находящейся, в городе Тарту, астроном Гартвиг обнаружил звезду, находящуюся довольно близко от ядра туманности Андромеды. Эта звезда имела блеск около 6,5 звездной величины, т.е. люди с острым зрением могли бы ее видеть без всяких оптических инструментов. Видимая звездная величина всей туманности Андромеды близка к 4,5 величины. Это означает, что поток излучения от вспыхнувшей новой звезды был всего лишь в 6,25 раза меньше, чем от всей туманности. Так как не подлежало сомнению, что звезда вспыхнула в самой туманности, то это означает, что ее све-



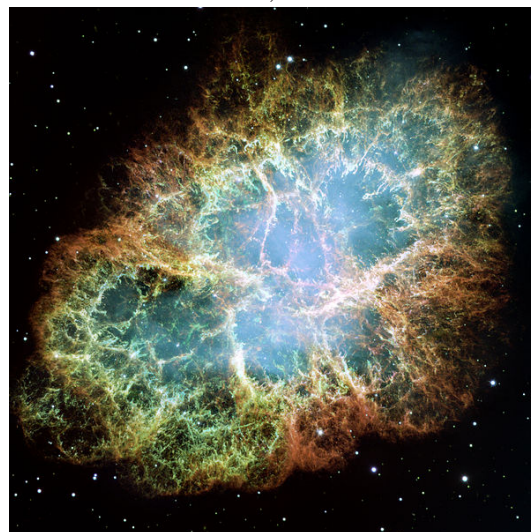
a)



b)



c)



d)

Рис. 1: Приведены изображения остатков сверхновых: а) Кассиопея-А (1680), б) остаток SN Кеплера 1604, с) остаток SN Браге 1572, д) Крабовидная туманность (1054)[3].

тимость была в 6,25 раза меньше светимости туманности Андромеды. Явление достаточно грандиозное. Туманность Андромеды, как известно сейчас, удалена от нас на расстояние 600 кпк, т.е. свыше 2 миллионов световых лет, и на таком гигантском расстоянии вспыхивает звезда, почти различимая невооруженным взглядом на Земле! Обнаруженная звезда была примерно на 12 величин ярче обычных новых звезд, что означает, что ее светимость в максимуме блеска была в десятки тысяч раз больше, чем обычных новых.

Из наблюдений Гартвига можно было восстановить кривую блеска (т.е. зависимость звездной величины от времени) этой звезды. Так, например, за две недели до максимума ее блеск соответствовал 9-й звездной величине, в то время как за год до этого на месте этой звезды ничего нельзя было обнаружить - значит, она была слабее 15-й звездной величины. Начиная с марта следующего, 1886 г. эту звезду уже нельзя было обнаружить даже в самые большие телескопы.

Всего за период 1885-1920 гг. было обнаружено в разных галактиках около 10 таких вспышек. Вспышки наблюдались в галактиках самой различной формы - эллиптических, спиральных, неправильных. Наблюдались они спорадически, преимущественно фотографическим методом. Уже из этого несовершенного ряда наблюдений можно сделать очень важный вывод, что вспышки такой феноменальной мощности происходят очень редко. Грубая оценка показывает, что в одной галактике одна вспышка происходит в среднем один раз за несколько сотен лет.



Рис. 2: Гартвиг, Карл Эрнст (1851—1923) — немецкий астроном [15].

В 1919 году шведский астроном Лундмарк выдвинул гипотезу, что в галактиках, кроме "обычных новых звезд" изредка вспыхивают звезды, светимость которых в максимуме в десятки тысяч раз больше.

В 1934 году американские астрономы Цвикки и Бааде предложили такие звезды называть "сверхновыми", и сейчас этот термин является общепринятым для обозначения грандиозного явления взрыва звезд.

### **3 Служба поиска сверхновых**

Тот же Лундмарк специально исследовал старинные исторические хроники с целью найти в них указания на вспышки сверхновых звезд в прошлом. Он и его последователи доказали, что за последние 1000 лет наблюдалось по крайней мере шесть сверхновых (см. Таблица 1). Ясно, что для изучения этого уникального явления древних хроник недостаточно, необходимо было наладить специальную наблюдательную службу поисков сверхновых. Идея поисков очень проста: если в каждой галактике вспышка сверхновой происходит раз в несколько сотен лет, то систематически "патрулируя" много сотен галактик, можно надеяться пронаблюдать одну-две сверхновых в год. Трудности таких по-



исков в том, что совершенно неизвестно где и когда в следующий раз вспыхнет такая сверхновая.

Впервые "службу вспышек сверхновых" осуществил в 1933 г. Цвикки, который для этой цели использовал весьма скромный 10-дюймовый телескоп. Он проводил систематические поиски в 175 площадках неба, в которых находилось большинство сравнительно близких к нам галактик. Таким образом, он внимательно следил за 3000 галактиками ярче 15-й величины, из которых 700 были ярче 13-й. Результаты не замедлили сказаться. Всего за период 1936-1939 гг. он наблюдал в разных галактиках 12 вспышек сверхновых.

Наблюдения проводилась в сотрудничестве с другими астрономами. Найденные им сверхновые со всей тщательностью исследовались фотометрически и спектроскопически. Были получены кривые блеска этих сверхновых, а также их спектры. После перерыва, вызванного второй мировой войной, исследования были возобновлены в 50х гг. с более совершенными наблюдательными средствами. Количество обнаруженных сверхновых резко увеличилось. Если за период времени 1885-1956 было обнаружено всего 54 сверхновых, то между 1956 и 1963 гг. их было обнаружено уже 82. К 1983 г. всего было зарегистрировано около 500 сверхновых.

К настоящему времени известно о 6391 сверхновых (Данные из каталога IAU Central Bureau for Astronomical Telegrams).

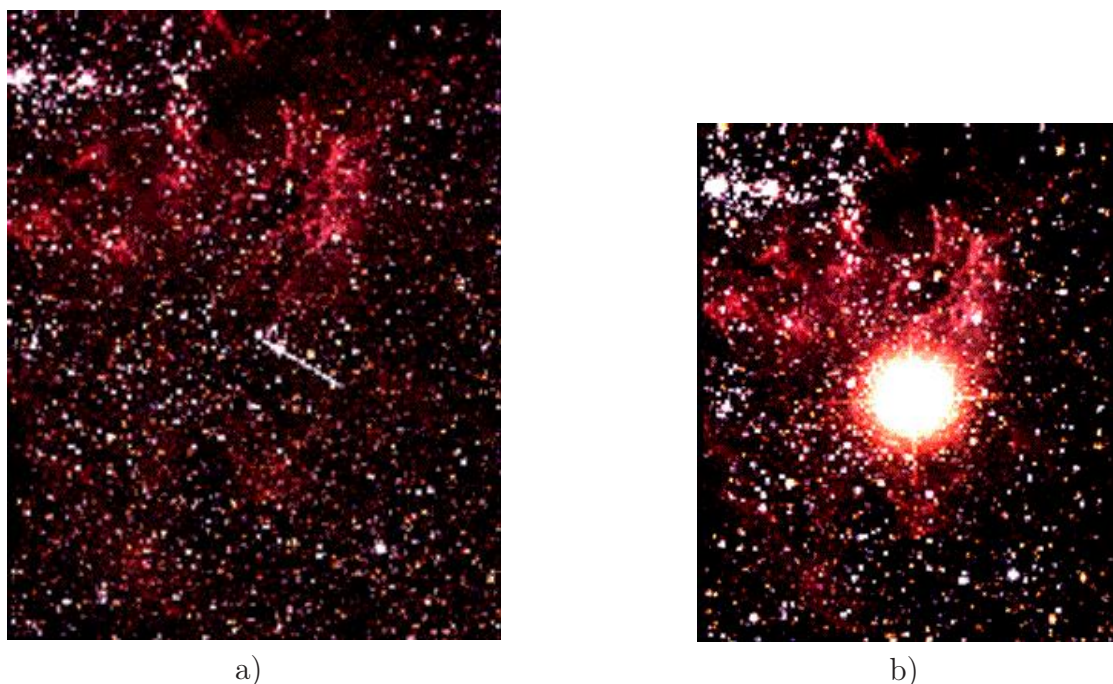


Рис. 3: Сверхновая 1987А (Прес) : а) До вспышки, б) После вспышки [16].

В 1987 году была открыта ярчайшая сверхновая XX века - SN 1987А в галактике Большое Магелланово Облако, являющейся "спутником" нашей Галактики и удаленной от нас всего на 55 килопарсек. В течение некоторого времени эта сверхновая была видна даже невооруженным глазом, достигнув в максимуме блеска около 4 звездной величины. Однако наблюдать ее можно было только в южном полушарии. Для этой сверхновой были получены уникальные по точности и продолжительности ряды фотометрических и спектральных наблюдений, и сейчас астрономы продолжают следить, как развивается процесс превращения сверхновой в расширяющуюся газовую туманность.

## 4 Анализ спектров сверхновых

Эти исследования показали, что сверхновые не представляют собой однородную группу объектов. Прежде чем делать какие-то выводы о физической природе явления, необходимо иметь полное представление о его наблюдаемых проявлениях, которые должны быть должным образом классифицированы. Естественно, самый первый вопрос, вставший перед исследователями сверхновых, был - одинаковы ли они, а если нет, то насколько отличаются и поддаются ли классификации. Уже первые сверхновые, открытые Бааде и Цвикки, показали существенные различия в кривых блеска и спектрах. В 1941 году Р.Минковский предложил разделить сверхновые на два основных типа по характеру спектров. К I типу он отнес сверхновые, спектры которых были совершенно не похожи на спектры всех известных в то время объектов. Линии наиболее распространенного во Вселенной элемента - водорода - совершенно отсутствовали, весь спектр состоял из широких максимумов и минимумов, не поддававшихся отождествлению, ультрафиолетовая часть спектра была очень слабой. Ко II типу были отнесены сверхновые, спектры которых показали некоторое сходство с "обычными" новыми звездами присутствием очень интенсивных эмиссионных линий водорода, ультрафиолетовая часть спектра у них яркая.

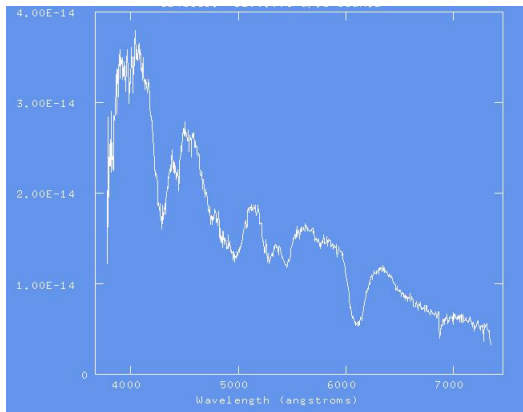


Рис. 4: Спектр типичной сверхновой Ia SN 1995al вблизи максимума блеска [17].

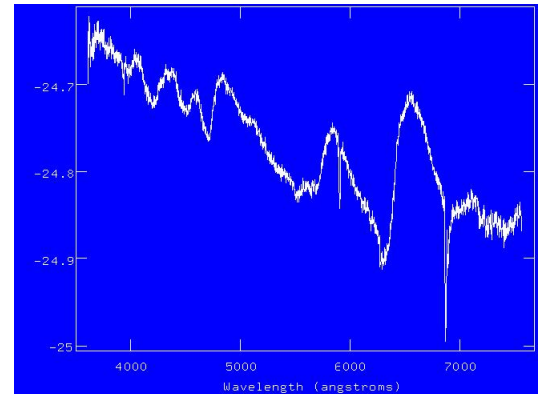


Рис. 5: Спектр типичной сверхновой II с "плато" SN 1999em [17].

Спектры сверхновых I типа оставались загадочными в течение трех десятилетий. Только после того, как Ю.П.Псковский показал, что полосы в спектрах - это не что иное, как участки непрерывного спектра между широкими и довольно глубокими линиями поглощения, отождествление спектров сверхновых I типа сдвинулось с мертвой точки. Был отождествлен ряд линий поглощения, прежде всего наиболее интенсивных линий однократно ионизованных кальция и кремния. Длины волн этих линий сдвинуты в фиолетовую сторону спектра из-за эффекта Доплера в расширяющейся со скоростью 10-15 тыс. км в секунду оболочке. Отождествить все линии в спектрах сверхновых I типа чрезвычайно трудно, так как они сильно расширены и накладываются друг на друга; кроме упомянутых линий кальция и кремния удалось отождествить линии магния и железа.

Анализ спектров сверхновых позволил сделать важные выводы: в оболочках, выброшенных при вспышке сверхновых I типа, почти нет водорода; в то время как состав оболочек сверхновых II типа почти такой же, как у солнечной атмосферы. Скорости расширения оболочек - от 5 до 15-20 тыс. км/с, температура фотосферы около максимума - 10-20 тыс. градусов. Температура быстро падает и через 1-2 месяца достигает значения 5-6 тыс. градусов.

## 5 Анализ кривых блеска

Различались у сверхновых и кривые блеска: для I типа все они были очень похожими, имеют характерную форму с очень быстрым ростом блеска к максимуму, который длится не более 2-3 суток, быстрым падением блеска на 3 звездные величины за 25-40 суток и последующим медленным ослаблением, практически линейным в шкале звездных величин, что соответствует экспоненциальному ослаблению светимости.

Кривые блеска сверхновых II типа оказались гораздо более разнообразными. Некоторые были похожи на кривые блеска сверхновых I типа, только с более медленным и продолжительным падением блеска до начала линейного "хвоста", у других сразу после максимума начинается участок почти постоянного блеска - так называемое "плато", которое может продолжаться до 100 суток. Затем блеск резко падает и выходит на линейный "хвост". Все ранние кривые блеска были получены на основании фотографических наблюдений в так называемой фотографической системе звездных величин, соответствующей чувствительности обычных фотопластинок (интервал длин волн 3500-5000 Å).

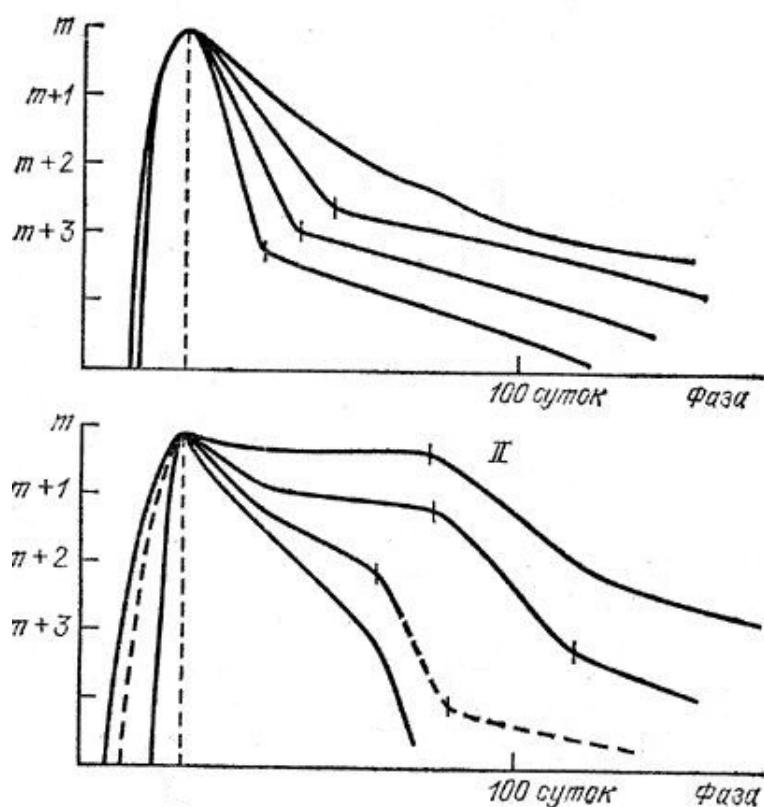


Рис. 6: Фотографические кривые блеска для звезд I и II типа [18].

Уже использование в дополнение к ней фотовизуальной системы (5000-6000 Å) позволило получить важные сведения об изменении показателя цвета (или просто "цвета") сверхновых: оказалось, что после максимума сверхновые обоих типов непрерывно "краснеют", то есть основная часть излучения сдвигается в сторону более длинных волн. Это покраснение прекращается на стадии линейного падения блеска и может даже смениться "поголубением" сверхновых.

Зная кривые блеска, можно найти, что за время вспышки такая звезды излучает до  $10^{50}$  эрг. Чтобы излучить такое количество энергии, Солнцу надо миллиард лет, а здесь она освобождается за несколько месяцев!

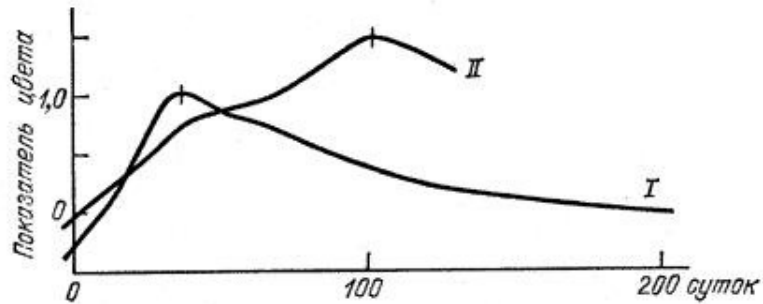


Рис. 7: Изменение показателей цвета сверхновых с фазой [18].

## 6 Сверхновые I типа

В таком виде классификация сверхновых сохранялась до середины 80-х годов. Начало широкого применения в астрономии ПЗС-приемников позволило существенно увеличить количество и качество наблюдательного материала. Современная аппаратура позволяла получать спектрограммы для слабых, недоступных прежде объектов; с гораздо большей точностью можно было определять интенсивности и ширины линий, регистрировать более слабые линии в спектрах. ПЗС-приемники, инфракрасные детекторы и приборы, установленные на космических аппаратах, позволили наблюдать сверхновые во всем диапазоне оптического излучения от ультрафиолетового до далекого инфракрасного диапазона; проводились также гамма-, рентгеновские и радио-наблюдения сверхновых.

В результате казавшаяся установившейся двоичная классификация сверхновых стала быстро изменяться и усложняться. Оказалось, что I тип сверхновых далеко не так однороден, как казалось. В спектрах этих сверхновых обнаружили существенные различия, наиболее значительными из них была интенсивность линии однократно ионизованного кремния, наблюдавшаяся на длине волны около 6100 Å. Для большинства сверхновых I типа эта линия поглощения около максимума блеска была самой заметной деталью в спектре, однако для некоторых сверхновых она практически отсутствовала, а наиболее интенсивными были линии поглощения гелия.

Эти сверхновые получили обозначение Ib, а "классические" сверхновые I типа стали обозначать Ia. В дальнейшем оказалось, что у некоторых сверхновых Ib отсутствуют и линии гелия, и их назвали типом Ic. Эти новые типы сверхновых отличались от "классических" Ia и по кривым блеска, которые оказались достаточно разнообразными, хотя по форме и похожи на кривые блеска сверхновых Ia. Сверхновые типа Ib/c оказались также источниками радиоизлучения.

## 7 Сверхновые II типа

Сверхновые II типа еще в 70-е годы были разделены по характеру кривых блеска на "линейные" (II-L) и имеющие "плато" (II-P). В дальнейшем стали обнаруживать все больше сверхновых II, показывающих те или другие особенности в кривых блеска и спектрах. Так, по кривым блеска резко отличаются от других сверхновых II типа две самые яркие сверхновые последних лет: 1987A и 1993J. Обе имели два максимума на кривых блеска: после вспышки блеск быстро падал, потом начинал снова расти и лишь после второго максимума начиналось окончательное ослабление светимости. В отличие от сверхновых Ia второй максимум наблюдался во всех диапазонах спектра, причем для SN 1987A он был гораздо ярче первого в более длинноволновых диапазонах. Среди спектральных особенностей наиболее частым и заметным было присутствие наряду с широкими эмиссионны-



ми линиями, характерными для расширяющихся оболочек, также системы узких линий излучения или поглощения. Это явление скорее всего связано с присутствием плотной оболочки, окружающей звезду перед вспышкой, такие сверхновые получили обозначение II-n.

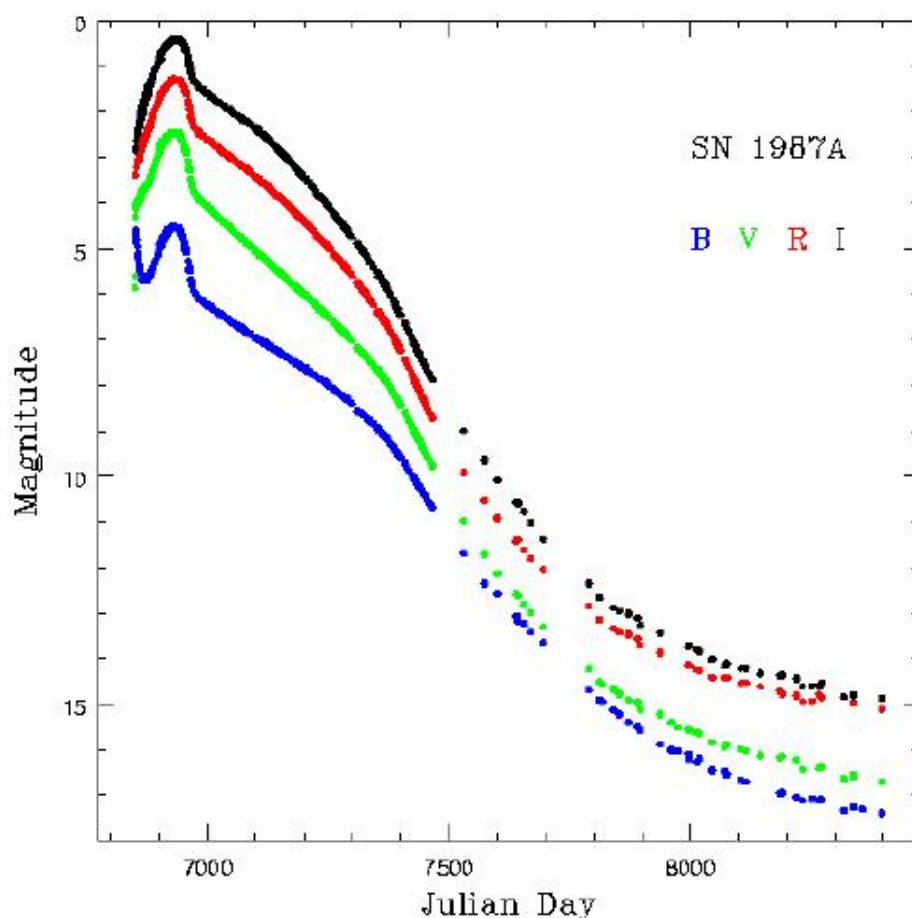


Рис. 8: Кривые блеска пекулярной сверхновой II типа 1987А [17].

## 8 Зависимость типа сверхновой от структуры галактики

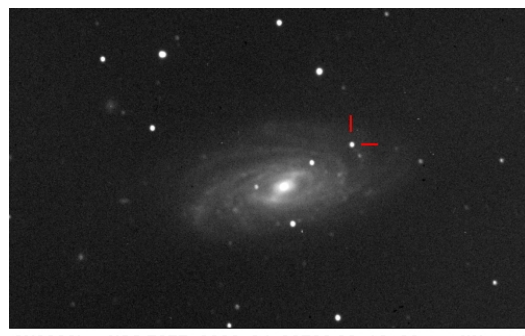
Очень важной является зависимость типа сверхновой от характеристики галактики, в которой произошла вспышка. Сверхновые II типа вспыхивают только в ветвях спиральных галактик (где из газо-пылевой среды рождаются звезды), из чего можно сделать вывод, что это молодые объекты. Они наблюдаются в сравнительной близости от места своего рождения, потому что за время своей жизни не успели далеко уйти. Так как беспорядочная скорость звезд в области спиральных рукавов близка к 10 км/с, а толщина рукавов порядка сотен парсек, то можно сказать, что возраст звезд, вспыхивающих как сверхновые II типа, не превышает десятков млн лет. Чтобы сойти с главной последовательности звезда должна быть достаточно массивна (более 10 масс Солнца). Предшественниками сверхновых II типа являются массивные молодые звезды спектральных классов O, B, т.е. горячие голубые гиганты.

Сверхновые I типа могут вспыхивать как в спиральных галактиках, так и в эллиптических и неправильных. В эллиптических галактиках процесс звездообразования уже прекратился (так как там нет межзвездной среды), и там практически нет звезд, масса которых превосходила бы солнечную (основываясь на теории звездной эволюции и наблюдательных данных), следовательно, население таких галактик - это очень старые звезды с малой массой. Так как кривые блеска и спектры звезд такого типа очень схожи, можно говорить о том, что и в спиральных галактиках звезды, которые вспыхивают как сверхновые I типа, это очень старые объекты с небольшой массой.

Сверхновые типа Ib/c, как уже говорилось, были обнаружены чуть позже. Все они были найдены в спиральных галактиках, в областях, где возможно недавно происходило образование звезд и в настоящее время еще существуют достаточно массивные звезды.



Рис. 9: SN2005ke type Ia расположена в спиральной галактике NGC1371 рядом с ее центром [19].



SN2006bp; NGC 3953; 2006-04-29T20:00; 16x60s; unfiltered  
12" LX200GPSUHTC OTA; Paramount ME; SBIG ST8XME  
Veli-Pekka Hentunen, Markku Nissinen  
Taurus Hill Observatory, Varkaus (A95)

Рис. 10: SN2006bp type II расположена в рукаве спиральной галактики NGC3953 [11].

## 9 Статистика вспышек сверхновых

Как часто вспыхивают сверхновые и каким образом они распределены в галактиках? На эти вопросы должны дать ответ статистические исследования сверхновых. Казалось бы, дать ответ на первый вопрос достаточно просто: нужно достаточно продолжительное время наблюдать за несколькими галактиками, подсчитать наблюдавшиеся в них сверхновые и разделить число сверхновых на время наблюдений. Но оказалось, что время, охваченное достаточно регулярными наблюдениями, еще слишком мало для определенных выводов для отдельных галактик: в большинстве наблюдалось только одна или две вспышки. Правда, в некоторых галактиках уже зарегистрировано достаточно большое число сверхновых: рекордсмен - галактика NGC 6946, в которой с 1917 года открыто 6 сверхновых. Однако и эти данные не дают точных данных о частоте вспышек. Во-первых, неизвестно точное время наблюдений этой галактики, а во-вторых, почти одновременные для нас вспышки на самом деле могли быть разделены достаточно большими промежутками времени: ведь свет от сверхновых проходит разный путь внутри галактики, а ее размеры в световых годах намного больше, чем время наблюдений. Пока возможно получить оценку частоты вспышек только для некоторой совокупности галактик. Для этого необходимо использовать данные наблюдений по поиску сверхновых: каждое наблюдение

дает некоторое "эффективное время слежения" за каждой галактикой, которое зависит от расстояния до галактики, от предельной звездной величины поиска и от характера кривой блеска сверхновой. Для сверхновых разных типов время наблюдений одной и той же галактики будет разным. Объединяя результаты для нескольких галактик, нужно принимать во внимание их различие по массе и светимости, а также по морфологическому типу.

В настоящее время принято нормировать результаты на светимость галактик и объединять данные только для галактик с близкими типами. Последние работы, основанные на объединении данных нескольких программ поиска сверхновых, следующие результаты: в эллиптических галактиках наблюдаются только сверхновые типа Ia, и в "средней" галактике со светимостью  $10^{10}$  светимостей Солнца одна сверхновая вспыхивает примерно раз в 500 лет. В такой же по светимости спиральной галактике сверхновые Ia вспыхивают с лишь немного более высокой частотой, однако к ним добавляются сверхновые типов II и Ib/c, и общая частота вспышек получается примерно раз в 100 лет. Частота вспышек примерно пропорциональна светимости галактик, то есть в гигантских галактиках она значительно выше: в частности, NGC 6946 - спиральная галактика со светимостью  $2.8 \cdot 10^{10}$  светимостей Солнца, следовательно в ней можно ожидать около трех вспышек за 100 лет, и наблюдавшиеся в ней 6 сверхновых можно считать не очень большим отклонением от средней частоты. Наша Галактика поменьше NGC 6946, и в ней можно ожидать одну вспышку в среднем через 50 лет. Однако известно, что за последнее тысячелетие наблюдалось только четыре сверхновых в Галактике. Нет ли здесь противоречия? Оказывается, нет - ведь большая часть Галактики закрыта от нас слоями газа и пыли, и окрестности Солнца, в которых наблюдались эти 4 сверхновые, составляют лишь малую часть Галактики.

## 10 Распределение сверхновых

Каким образом распределены сверхновые внутри галактик? Конечно, пока можно исследовать только сводные распределения, приведенные к некоторой "средней" галактике, а также распределения относительно деталей структуры спиральных галактик. К этим деталям относятся, в первую очередь, спиральные рукава; в достаточно близких галактиках хорошо видны также области активного звездообразования, выделяемые по облакам ионизованного водорода - области H II, или по скоплениям ярких голубых звезд - OB-ассоциации. Многократно повторяемые по мере увеличения числа открытых сверхновых исследования пространственного распределения дали следующие результаты: распределения сверхновых всех типов по расстоянию от центров галактик мало различаются между собой и сходны с распределением светимости - плотность падает от центра к краям по экспоненциальному закону. Различия между типами сверхновых проявляются в распределении относительно областей звездообразования: если к спиральным рукавам концентрируются сверхновые всех типов, то к областям H II - только сверхновые типов II и Ib/c. Можно сделать вывод, что время жизни звезды, дающей вспышку типа II или Ib/c - от  $10^6$  до  $10^7$  лет, а для типа Ia - около  $10^8$  лет. Однако сверхновые Ia наблюдаются и в эллиптических галактиках, где, как считается, нет звезд моложе  $10^9$  лет. Этому противоречию возможно два объяснения - или природа вспышек сверхновых Ia в спиральных и в эллиптических галактиках различна, либо в некоторых эллиптических галактиках все-таки продолжается звездообразование и присутствуют более молодые звезды.

## 11 Механизмы вспышек

На основании всей совокупности наблюдательных данных исследователи пришли к выводу, что вспышка сверхновой должна быть последним этапом в эволюции звезды, после которой она перестает существовать в прежнем виде. Действительно, энергия взрыва сверхновых оценивается как  $10^{50} - 10^{51}$  эрг, что превышает типичные значения гравитационной энергии связи звезд. Освободившейся при вспышке сверхновой энергии более чем достаточно, чтобы полностью рассеять в пространстве вещество звезды. Какие же звезды и когда заканчивают свою жизнь вспышкой сверхновой, какова природа процессов, приводящих к такому гигантскому выделению энергии?

## 12 Механизм взрыва сверхновых II и Ib/c типа

Данные наблюдений показывают, что сверхновые делятся на несколько типов, различающихся по химическому составу оболочек и их массам, по характеру выделения энергии и по связи с различными типами звездных населений. Сверхновые II типа явно связаны с молодыми, массивными звездами, в их оболочках в большом количестве присутствует водород. Поэтому их вспышки считают конечной стадией эволюции звезд, начальная масса которых составляет больше 8-10 масс Солнца.

В центральных частях таких звезд энергия выделяется при реакциях ядерного синтеза, начиная от самой простой - образования гелия при слиянии ядер водорода, и заканчивая образованием ядер железа из кремния. Ядра железа являются самыми стабильными в природе, и выделения энергии при их слиянии не происходит. Таким образом, когда ядро звезды становится железным, выделение энергии в нем прекращается. Ядро не может сопротивляться гравитационным силам и быстро сжимается - коллапсирует.

Процессы, происходящие при коллапсе, еще далеки от полного объяснения. Однако известно, что если все вещество ядра звезды превращается в нейтроны, то оно может противостоять силам притяжения. Ядро звезды превращается в "нейтронную звезду" и коллапс останавливается. При этом выделяется огромная энергия, поступающая в оболочку звезды и заставляющая ее начать расширение, которое мы и видим как вспышку сверхновой. Если эволюция звезды до этого происходила "спокойно", то ее оболочка должна иметь радиус в сотни раз превосходящий радиус Солнца, и сохранить достаточное количество водорода для объяснения спектра сверхновых II типа. Если же большая часть оболочки была потеряна при эволюции в тесной двойной системе или каким-либо другим образом, то линий водорода в спектре не будет - мы увидим сверхновую типа Ib или Ic.

С точки зрения физики, феномен сверхновой II типа и типа Ib/c есть очень быстрое (можно считать мгновенное) энерговыделение порядка  $E_0 = 10^{51}$  эрг внутри звезды с радиусом  $R_0 \approx 10^{14}$  см. Эта энергия в конечном счете переходит в кинетическую и тепловую энергию оболочки. Увеличение блеска связано с нагревом расширяющихся внешних слоев звезды ударной волной, причина которой связана с отскоком внутренних слоев от коллапсирующего ядра массивной звезды. Например, для звезды с массой 10 солнечных такой энергии будет соответствовать среднеквадратичная скорость :

$$v = (2E_0/M)^{1/2} \approx 3000(10M_{\odot}/M)^{1/2} \text{ км/с}$$

что превосходит адиабатическую скорость звука газа вплоть до температур порядка  $6 \times 10^8$  К. Ударная волна нагревает и ускоряет оболочку и в момент ее выхода на поверхность возникает кратковременная вспышка УФ-излучения, но основная часть энергии высвечивается позднее по мере ускорения диффузии излучения в процессе расширения.

Основным источником энергии свечения расширяющейся оболочки этого типа сверхновых является волна охлаждения, подпитываемая рекомбинацией водорода (выделяемая



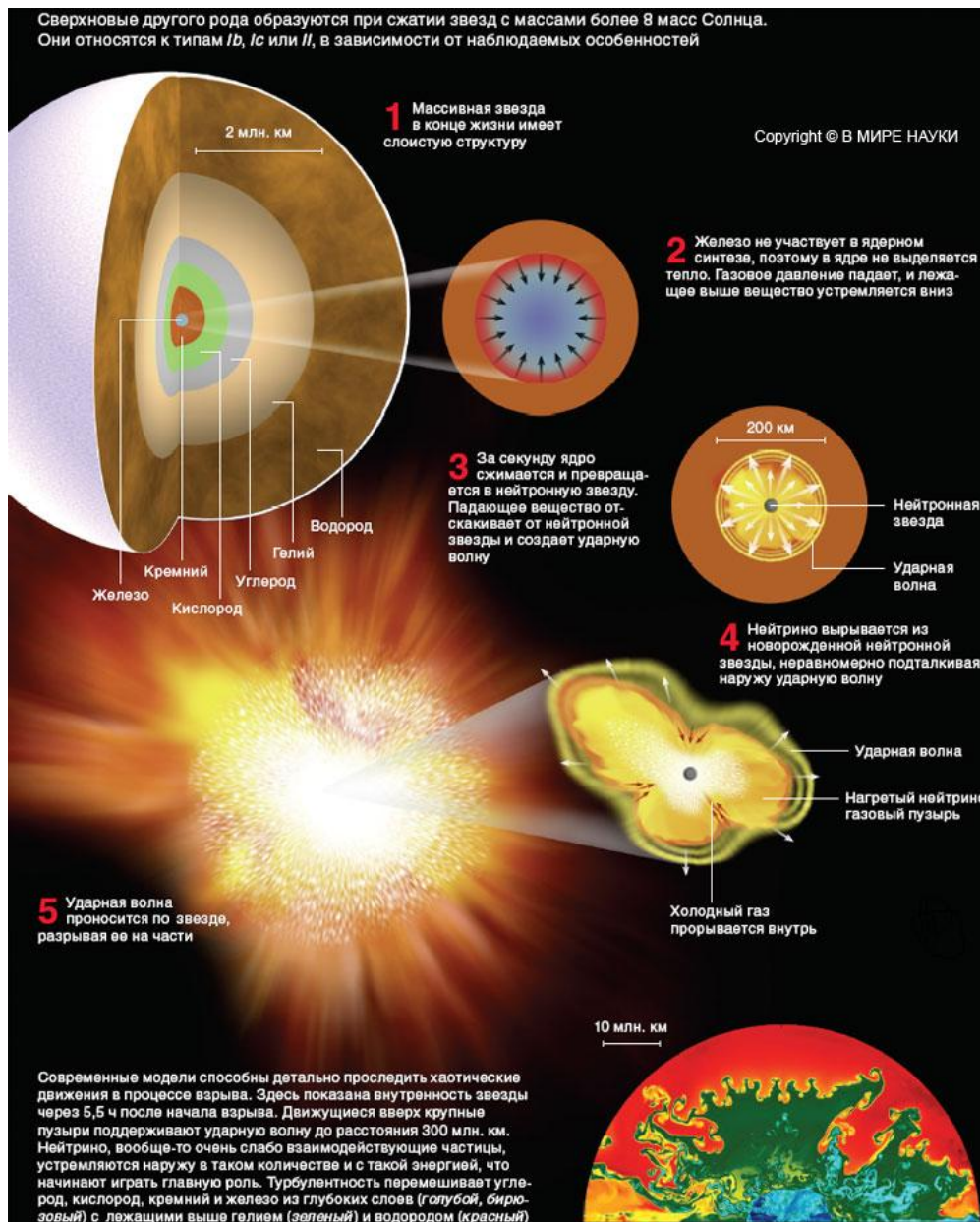


Рис. 11: Механизм взрыва сверхновых II, Ib/c типов [20].

энергия 13.6 эВ на один атом H). Для оболочки в 8-10 масс Солнца при рекомбинации водорода выделяется порядка  $10^{47}$  эрг. Из-за рекомбинационной волны охлаждения в расширяющейся оболочке на кривых блеска сверхновых II типа часто наблюдается плоский участок (плато) (т.н. сверхновые типа IIp). Стадия доминирования волны охлаждения в кривых блеска SN II заканчивается, когда диффузионный поток излучения в ходе расширения становится больше потока тепловой энергии, освобождающейся в рекомбинирующих слоях оболочки.

Другой источник энергии свечения оболочки сверхновой - радиоактивный распад



Он наиболее важен для сверхновых типа Ia. После максимума кривые блеска сверхновых II типа сначала спадают резко, а затем экспоненциально за счет радиоактивных

распадов. При распаде  $^{56}\text{Ni}$  энергия выделяется в виде  $\gamma$ -излучения в линиях с энергиями в диапазоне 0.163 - 1.56 МэВ. Гамма-фотоны взаимодействуют с веществом посредством Комптоновского рассеяния на электронах (формула Клейна-Нишины, в среднем около 1/3 Томсоновского сечения). При уменьшении энергии фотона  $E_\gamma$  до 100 кэВ (грубо, после 10 рассеяний) начинает преобладать фотопоглощение (на Ni и др. тяжелых элементах), причем при более низких энергиях сечение поглощения быстро возрастает (как  $E_\gamma^{-3}$ ) и термализация происходит очень быстро. Энерговыведение за счет радиоактивного распада  $^{56}\text{Ni}$

$$L(t)_{\text{Ni}} \approx 9.7 \times 10^{42} \left( \frac{M_{\text{Ni}}}{0.1 M_\odot} \right) \exp(-t/\tau_{\text{Ni}}) \text{ эрг/с}$$

где время полураспада  $\tau_{\text{Ni}} \approx 7.6 \times 10^5$  с. На последующих стадиях подключается распад  $^{56}\text{Co}$  (период полураспада порядка 100 дней) и других радиоактивных атомов. Видно, что полный запас энергии в радиоактивном распаде может быть порядка и больше энергии рекомбинации. Таким образом, полная излученная энергия  $\int L(t)dt$  составляет несколько процентов  $E_0$ . Отметим, что в результате коллапса физические условия не позволяют синтезировать слишком много  $^{56}\text{Ni}$ . Как показывает сравнение наблюдений и детальных расчетов кривой блеска SN 1987A, масса синтезированного при коллапсе никеля в этой сверхновой должна быть  $M_{\text{Ni}} \sim 0.08 M_\odot$ .

У "средней" сверхновой II типа уменьшение блеска в видимой области на порядок происходит примерно за 100 дней. Ширина максимума кривой блеска определяется диффузией фотонов в расширяющейся оболочке и по порядку величины равна

$$t_{\text{max,II}} \sim \sqrt{\tau_{\text{exp}} \tau_{\text{dif}}}$$

где  $\tau_{\text{exp}} = R_0/v$  - время расширения,  $\tau_{\text{dif}} \approx R_0^2/(c\lambda)$  - диффузионное время ( $\lambda = 1/\kappa\rho$  - средняя длина свободного пробега фотона в среде с непрозрачностью  $\kappa$ ). Поскольку  $t_{\text{max,II}} \propto \sqrt{R^3/v\lambda} \propto \sqrt{\rho R^3} \propto \sqrt{M}$ , по длительности максимума можно оценить массу сброшенной оболочки, которая во всех случаях оказывается больше 8 масс Солнца. Это подтверждает, что сверхновые II типа связаны с эволюцией массивных звезд, одиночных или не входящих в тесные двойные системы.

Отметим также, что из-за различных физических параметров предвзрывных II типа (массы, радиусы, химический состав и т.д.), кривые блеска SN II отличаются большим разнообразием. Например, абсолютные звездные величины SN II в максимуме блеска варьируются в широких пределах  $M_{\text{max,II}} = -17^m \pm 1^m.5$ .

При коллапсе ядер самых массивных звезд (с массой на главной последовательности  $> 40 M_\odot$ ) имплозия ядра, по-видимому, приводит к образованию черной дыры. Как следует из наблюдений двойных рентгеновских систем с черными дырами, массы последних лежат в широком диапазоне от 4 до 20 солнечных, в среднем около  $10 M_\odot$ .

## 13 Механизм взрыва сверхновой типа Ia

В менее массивных звездах эволюция протекает по-другому. После горения водорода ядро становится гелиевым, и начинается реакция превращения гелия в углерод. Однако ядро не нагревается до такой высокой температуры, чтобы начались реакции синтеза с участием углерода. Ядро не может выделять достаточно энергии и сжимается, однако в этом случае сжатие останавливают электроны, находящиеся в веществе ядра. Ядро звезды превращается в так называемый "белый карлик", а оболочка рассеивается в пространстве в виде планетарной туманности. Индийский астрофизик С.Чандрасекхар показал, что белый карлик может существовать, только если его масса меньше примерно 1.4 массы Солнца ( $M_{\text{Ch}}$ ). Если белый карлик находится в достаточно тесной двойной системе, то

может начаться перетекание вещества с обычной звезды на белый карлик. Масса белого карлика постепенно увеличивается, и когда она превосходит предельную - происходит взрыв, при котором идет быстрое термоядерное горение углерода и кислорода, превращающихся в радиоактивный никель. Звезда полностью разрушается, а в расширяющейся оболочке идет радиоактивный распад никеля в кобальт и далее в железо, который дает энергию для свечения оболочки. Таким образом вспыхивают сверхновые типа Ia.

Кривые блеска и энерговыделение в сверхновых типа Ia носят универсальный характер, что свидетельствует о близости свойств предсверхновых этого типа. Ближе всего к реальности оказалась модель термоядерного взрыва белого карлика с массой около  $M_{Ch}$ , поэтому этот тип сверхновых также называют "термоядерные сверхновые". Причина потери гидростатической устойчивости белого карлика - нейтронизация вещества и эффекты ОТО (давление в ОТО "весит" и поэтому вносит дополнительный вклад в гравитационное сжатие).

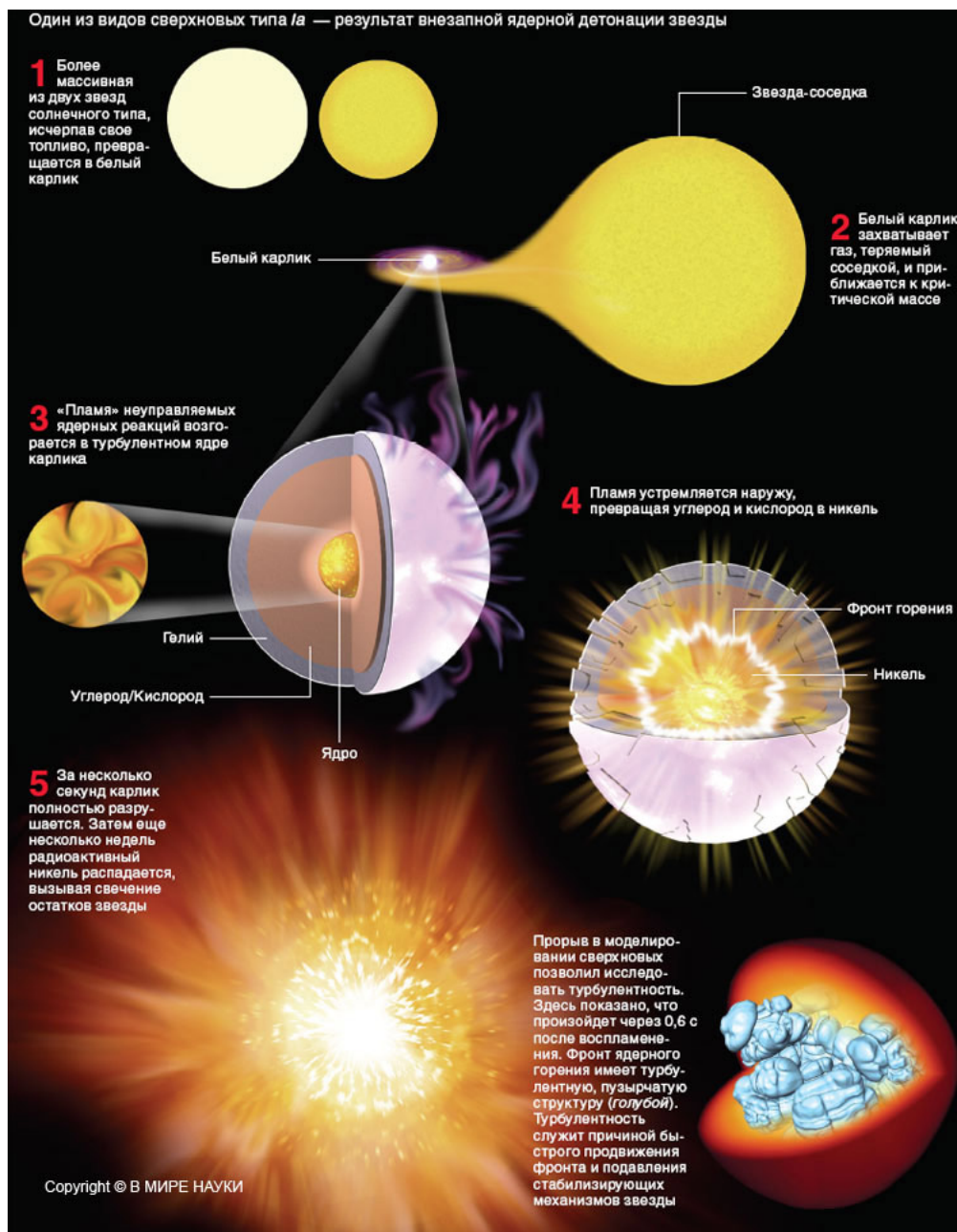


Рис. 12: Механизм взрыва сверхновых Ia типа [21].

Энергия, выделяемая при термоядерном горении белого карлика с массой около  $M_{Ch}$  порядка  $2 \times 10^{52}$  эрг, что вполне достаточно для объяснения феномена СН Ia. В этом случае масса оболочки порядка  $1 M_{\odot}$  и скорости расширения  $v \sim 10000$  км/с, что действительно получается из анализа профилей линий в спектрах СН Ia. Поскольку сверхновая в этом случае компактная,  $\tau_{exp} \ll 10^5$  с, тепловая энергия, выделившаяся при взрыве белого карлика, быстро передается оболочке. Оболочка начинает разогреваться за счет радиоактивного распада  $^{56}\text{Ni}$ , который и определяет форму кривой блеска. Сначала блеск возрастает до максимума, который определяется условием равенства радиоактивного нагрева и диффузионного охлаждения (примерно через  $\tau_{max} = 1.25\tau_{\text{Ni}} \sim 11$  дней для  $M_{\text{Ni}} = 0.5M_{\odot}$ ), а затем экспоненциально спадает, подпитываемый распадом кобальта. Светимость в максимуме при этом зависит только от массы выброшенного никеля и составляет около  $L_{max} \approx 1.4 \times 10^{43}$  эрг/с для  $M_{\text{Ni}} = 0.5M_{\odot}$ . Эта светимость соответствует болометрической абсолютной звездной величине  $M_{max, I} = -19^m.2$ .

Отметим одно важное отличительное свойство кривых блеска СН Ia. Казалось бы, с увеличением массы никеля светимость в максимуме должна возрастать. Однако это не так, поскольку с ростом массы растет время диффузии излучения из оболочки, возрастают затраты энергии на адиабатическое расширение оболочки, а светимость в максимуме не изменяется из-за экспоненциального спада радиоактивного энерговыделения от времени (см. формулу (6)  $L(t)$ ). Таким образом, в зависимости от массы никеля изменяется только форма кривой блеска, а светимость в максимуме остается постоянной. Эти соображения подтверждаются наблюдаемым малым разбросом абсолютных звездных величин СН Ia в максимуме:  $M_{max, I} = -19^m.5 \pm 0.2$ .

Поэтому СН Ia в настоящее время используются как "стандартные свечи" для определения расстояний до далеких галактик. Рекордно далекая галактика, в которой зарегистрирована СН Ia (1997ff), имеет красное смещение  $z=1.7$ , т.е. находится на колоссальном расстоянии более гигапарсека от Земли. Зависимость видимый поток - расстояние для источников со стандартным энерговыделением используется для проверки космологических моделей. Так, из наблюдений далеких СН Ia в 1998 г. стало ясно, что наилучшая космологическая модель должна включать значительную космологическую постоянную (порядка 70% от полной плотности!), которая на больших масштабах эффективно действует как антигравитация и заставляет Вселенную расширяться с ускорением. Эти новейшие наблюдения столь фундаментальны, что наши представления об эволюции Вселенной в последние годы решительно изменились.

Таким образом, сверхновые звезды - немаловажный этап в звездной эволюции. Современные теоретические исследования сверхновых - это преимущественно расчеты на самых мощных компьютерах моделей взрывающихся звезд. К сожалению, пока не удается создать модель, которая от поздней стадии эволюции звезды привела бы к вспышке сверхновой и к ее наблюдаемым проявлениям. Однако существующие модели достаточно хорошо описывают кривые блеска и спектры подавляющего большинства сверхновых. Обычно это модель оболочки звезды, в которую "вручную" вкладывается энергия взрыва, после чего начинается ее расширение и разогревание. Несмотря на большие трудности, связанные со сложностью и многообразием физических процессов, в последние годы в этом направлении исследований достигнуты большие успехи.

## 14 Вспышка сверхновой "рядом" с Землей

Напоследок хотелось бы представить, что будет если сверхновая звезда вспыхнет недалеко от Земли, скажем, на расстоянии 10 пк. Примерно в течение одного месяца на небе разгорелась бы яркая звезда, достигая в максимуме блеска - 18 видимой зв.величины. Если вспомнить, что блеск Солнца -27 звездных величин, а Луны в полнолуние - 12,6 звездной



величины, то сверхновая будет на Земле создавать освещенность в 1000 раз большую, чем Луны, и всего в 1000 раз меньшую, чем Солнце. Такая звезда была бы хорошо заметна в дневное время, а ночью от нее было бы так же светло, как в период белых ночей. Без преувеличения можно сказать, что вся наблюдательная астрономия свелась бы к наблюдениям сверхновой, ведь даже когда звезда находилась бы за горизонтом, она вызывала бы сильное свечение неба.

Дело в том, что основное свечение звезды в период максимума блеска приходилось бы на ультрафиолетовую область спектра. Это излучение ионизировало бы на 100 тысяч лет весь межзвездный водород на несколько пс вокруг звезды. Ультрафиолетовое излучение в сотни раз превышало бы ультрафиолетовое излучение Солнца. Оно вызвало бы необыкновенно яркое свечение верхних слоев атмосферы - полярное сияние, охватывающее всю ночную сторону Земли. Однако в опасных размерах, губительных для живых организмов, излучение не дошло бы до поверхности нашей планеты благодаря верхним слоям земной атмосферы, где оно было бы поглощено.

Яркое свечение сверхновой продолжалось бы несколько лет, пока звезда не перестала бы быть видимой простым глазом. Но вокруг звезды образовывалась бы яркая расширяющаяся туманность. Через 30 лет ее размер составлял бы 1 градус на небе, через триста - уже около десяти градусов. Затем размеры росли бы медленнее из-за торможения оболочки в межзвездной среде. Но все таки через 10 тыс. лет расширяющаяся оболочка достигла Солнечной системы, которая бы полностью погрузилась в нее. И без того светлое ночное небо Земли было бы покрыто причудливыми волокнистыми облаками, своей яркостью подобными Млечному Пути. Внутри оболочки сверхновой заперты релятивистские частицы с высокими энергиями. Они бы обрушились на Землю и другие планеты. Сила потоков этих космических лучей в 100 раз и более превышала бы эту силу в нормальную эпоху.

Появление мощных космических лучей у поверхности Земли оказало бы важное влияние на судьбу живых организмов. Средняя радиоактивность воздуха повысилась бы раз в 30, а временами - и значительно больше. С точки зрения оценки состояния здоровья людей это доза вовсе не опасна. Важно другое. Повышенная радиация существовала бы несколько десятков тысяч лет и могла быть опасной для будущих поколений. Существенное изменение наследственности животных и растений вследствие мутаций, вызываемых радиоактивностью среды, имело бы место быть.

С. И. Шкловский выдвигал идеи, что вымирание динозавров, да и зарождение жизни в целом могло быть связано со вспышками сверхновых.

Подробнее о сверхновых звездах и механизмах их вспышек можно узнать из литературы, приведенной ниже.

## Список литературы

- [1] И. С. Шкловский *Сверхновые звезды*, 1976 .
- [2] И. С. Шкловский. *Звезды: их рождение, жизнь и смерть*, 1984.
- [3] [http://ru.wikipedia.org/wiki/Сверхновые звезды](http://ru.wikipedia.org/wiki/Сверхновые_звезды).
- [4] Д. А. Грин, Р. Ф. Стивенсон. *Исторические сверхновые*, <http://www.astronet.ru/db/msg/1186669/index.html>
- [5] В. С. Имшенник. *Вспышки сверхновых и историческая хронология*, 2000.
- [6] <http://www.cbat.eps.harvard.edu/lists/Supernovae.html>, IAU Central Bureau for Astronomical Telegrams.
- [7] Д. Ю. Цветков. *Сверхновые звезды*, <http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1168207>

- [8] *Физика Космоса*, 1986. Гл. VII "Сверхновые в далеких галактиках" <http://www.astronet.ru/db/msg/1201870/07.html>
- [9] Н. Н. Гомулина. *Юбилей всплывек сверхновых. Методика организации учебно-исследовательской работы учащихся*, <http://www.astronet.ru/db/msg/1196579/index.html>
- [10] <http://www.vseprokosmos.ru/stars4.html>
- [11] <http://www.rochesterastronomy.org/sn2006/sn2006bp.html>
- [12] К. А. Постнов. *Эволюционная астрофизика. Лекция 2. "Сверхновые и остатки сверхновых"* <http://www.astronet.ru/db/msg/1174799/12/index.html>
- [13] Ю. П. Псковский. *Новые и сверхновые звезды*, 1974.
- [14] И. С. Шкловский, В. И. Красовский. *Сверхновые звезды*, 1966.
- [15] [http://en.wikipedia.org/wiki/Carl\\_Ernst\\_Albrecht\\_Hartwig](http://en.wikipedia.org/wiki/Carl_Ernst_Albrecht_Hartwig)
- [16] <http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1168207>
- [17] <http://www.astronet.ru/db/msg/1175009>
- [18] <http://www.astronet.ru/db/msg/1201870/07.html>
- [19] [http://www.world-science.net/othernews/080301\\_graphite.htm](http://www.world-science.net/othernews/080301_graphite.htm)
- [20] <http://www.modcos.com/articles.php?id=36>
- [21] [http://elementy.ru/lib/430397?page\\_design=print](http://elementy.ru/lib/430397?page_design=print)