

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
МАТЕМАТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АСТРОФИЗИКИ

Остатки исторических сверхновых и их
структура

Григорьев Виталий Валерьевич, 591 группа

2014 год

Содержание

1	Введение	3
2	Классификация сверхновых	4
3	Описание известных остатков Сверхновых	6
3.1	Остаток Сверхновой 386 года. G11.2-0.3	7
3.2	Остаток Сверхновой 1006 года	8
3.3	Остаток Сверхновой 1054 года. Крабовидная туманность	9
3.4	Остаток Сверхновой 1572 года. Сверхновая Тихо Браге	11
3.5	Остаток Сверхновой 1604 года. Сверхновая Иоганна Кеплера	12
3.6	Сверхновая 1680 года. Радиоисточник Кассиопея А.	13

1 Введение

Ещё древним астрономам было известно, что время от времени на небе появляются звёзды, до этого не наблюдавшиеся. В тех случаях, когда неожиданно вспыхнувшая звезда оказывается достаточно яркой, она меняет привычный вид того созвездия, в котором она вспыхнула, и невольно обращает на себя внимание людей, знающих звёздное небо. Заметим, однако, что такие вспышки довольно редки. Исторические хроники донесли до нас описания этих замечательных событий (китайские, японские, корейские, арабские летописи — о вспышках 1004 года и 1054 года; наблюдения Тихо Браге и Иоганна Кеплера — 1572 и 1604 годы соответственно).

В большинстве случаев такие звезды бывают слабые, поэтому глазом незаметны. Такие звезды получили название *Новых* (латинское название Nova, мн.ч. Novae). Как известно сейчас, эти звезды являются галактическими объектами. Их абсолютная звёздная величина может достигать -7^m , а амплитуда изменения лежит в диапазоне от 5.5^m до 16.5^m . Через несколько месяцев их блеск слабеет, при этом ослабление может происходить по-разному. Как правило, чем больше амплитуда, тем быстрее звезда возвращается к исходному блеску.

По факту, *Новая* звезда не является новой звездой, как физическим объектом, т.к. при изучении изображений соответствующей области неба до вспышки можно заметить слабый источник излучения, являющийся членом физически двойной звезды. Ежегодно в нашей Галактике вспыхивает около десятка Новых звезд.

Помимо Новых звёзд на небе иногда появляются и *сверхновые* звезды (лат. Supernova, мн.ч. Supernovae, сокращённо SN). Впервые Сверхновую наблюдали при помощи телескопа в Туманности Андромеды (M31) в 1885 году в обсерватории Тарту. Блеск этой сверхновой был сравним с интегральным блеском всей галактики. Самая известная Сверхновая — SN1054, породившая Крабовидную Туманность. Изучение Сверхновых показало, что их абсолютная звёздная величина (в оптическом диапазоне) в максимуме может достигать $-19^m \div -21^m$.

Подробное рассмотрение спектральных характеристик и кривых блеска позволили классифицировать Сверхновые по различным особенностям, проявляемым при их наблюдении.

2 Классификация сверхновых

Спектральные характеристики позволили разделить Сверхновые на два основных типа: у Сверхновых I типа в спектре отсутствуют линии водорода, у Сверхновых II типа они присутствуют. Далее, по наличию или отсутствию линий кремния и гелия Сверхновые I типа подразделяются ещё на три подтипа (см. Рис. 1).

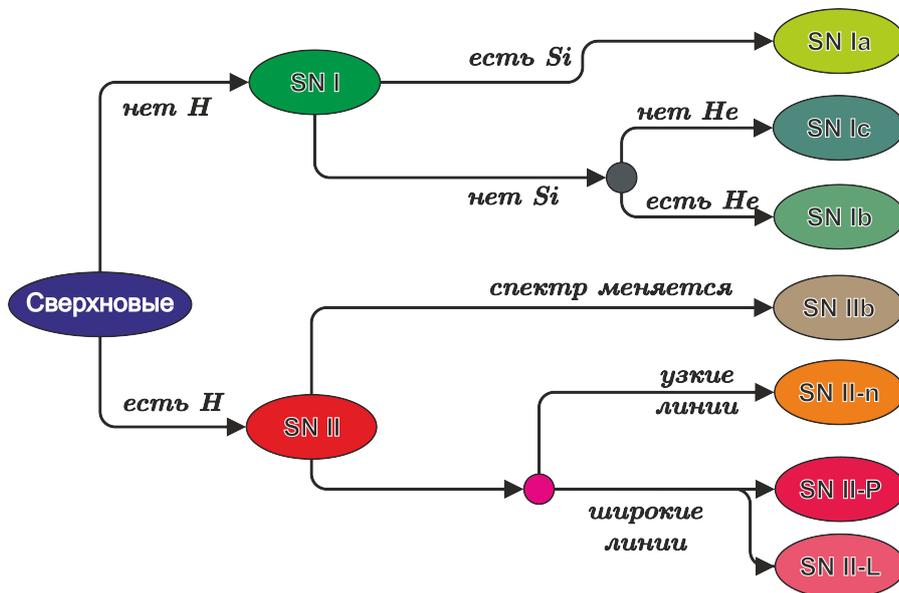


Рис. 1: Схематическая классификация Сверхновых по типам. Схема повторяет Fig.2 из работы Э. Капелларо (E. Cappellaro [4])

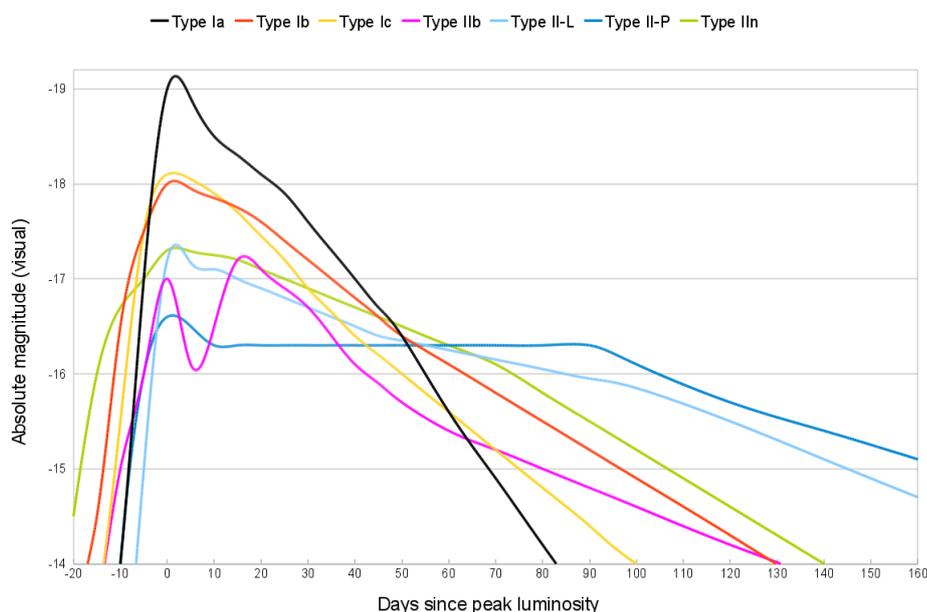


Рис. 2: Сравнительные кривые блеска Сверхновых разных типов

II тип также подразделяется на несколько подтипов, но критерий разделения в данном случае другой. Подтип IIb характеризуется изменением спектра (становится похожим на спектр Ib). Линии водорода могут быть либо очень узкими (получаем подтип II-n), либо широкими. Также важной характеристикой Сверхновых является кривая их блеска. Если в

кривой блеска SN II есть «плато», то её классифицируют как SN II-P. При линейном падении блеска Сверхновую относят к типу SN II-L. Также стоит заметить, что кривые блеска двух основных типов Сверхновых различаются. На Рис. 2 приведены типичные кривые блеска Сверхновых вышеописанных типов.

3 Описание известных остатков Сверхновых

В этом разделе мы постараемся как можно более подробно описать каждый из известных остатков Сверхновых в нашей Галактике, прилагая изображения в различных диапазонах длин волн. Грин и Стефенсон приводят ([7]) список Сверхновых (Табл. 1), которые в разные годы вспыхнули в нашей Галактике. Ими произведён анализ различных исторических летописей, о чём можно судить по содержанию таблицы.

Год вспышки	Исторические упоминания		
	Китай	Корея/Япония	Европа
185	одно	-	-
369	одно	-	-
386	одно	-	-
393	одно	-	-
1006	много	много	два
1054	много	немного	-
1181	немного	немного	-
1572	немного	два	много
1604	немного	много	много

Таблица 1: Таблица взята из работы Грина и Стефенсона [7]

Большую трудность представляет определение расстояния до остатков сверхновых, т.к. нельзя точно выяснить, какие были условия, при которых произошел взрыв: концентрацию вещества, сценарий взрыва, звездный ветер. Ранее для оценок использовалось лишь точное аналитическое решение о сильном взрыве в среде, полученное Седовым ([1]). В последнее же время эти параметры включаются в гидродинамическую модель взрыва и варьируются для более точного соответствия наблюдениям.

3.1 Остаток Сверхновой 386 года. G11.2-0.3

Этот остаток Сверхновой обнаружен и отождествлён с неким объектом, упоминающимся китайскими летописями, сравнительно недавно. G11.2-0.3 во многом напоминает остаток Cas A, но существенно старше его. Расположен в созвездии Стрельца. Название остатка сверхновой — индекс этого объекта из каталога Грина (D.A. Green, F.R. Stephenson [7]), включающий в себя галактические долготу и широту объекта. Данный остаток расположен на расстоянии 2.9 пк от Земли. Он расширяется со скоростью около 1000 км/с.

Явно видны волокна, состоящие из молекулярного водорода. Волокно (или филамент) — это тонкое газовое образование, ясно различимое на снимке, являющееся прямым следствием проявления неустойчивости Релея-Тейлора: быстро расширяющаяся оболочка взаимодействует с почти неподвижной средой. Также видно много филаментов, содержащих железо: наблюдаются яркие линии [Fe II].

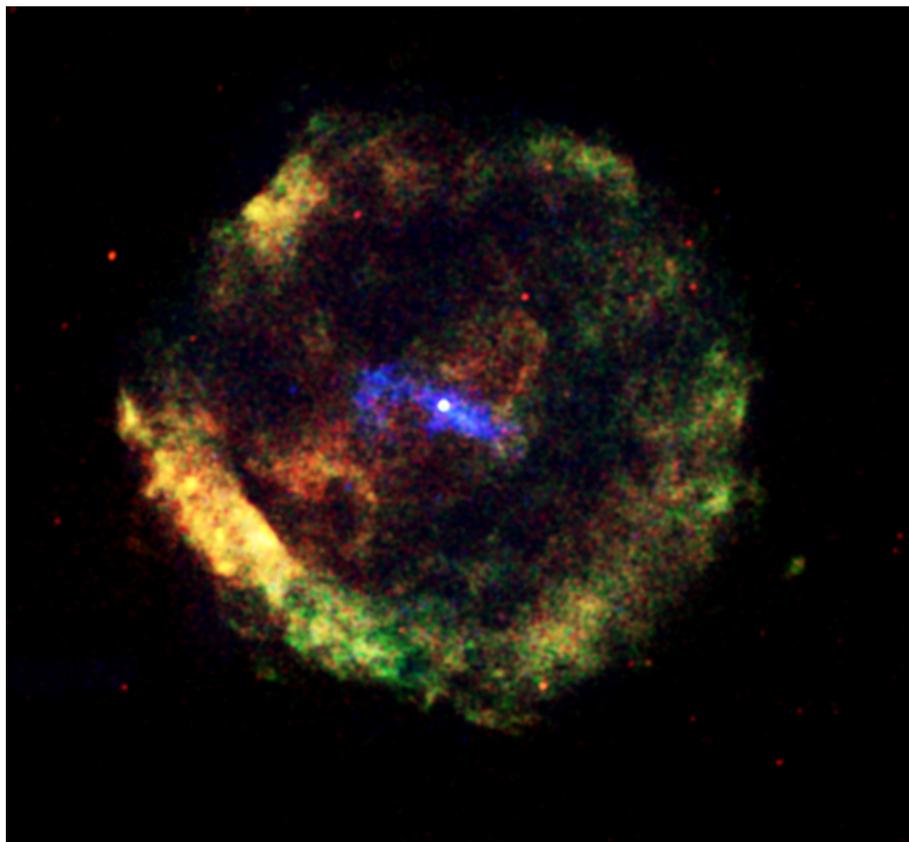


Рис. 3: Фотография остатка Сверхновой G11.2-0.3 в рентгене

3.2 Остаток Сверхновой 1006 года

Эта Сверхновая типа Ia вспыхнула в созвездии Волка в 1 мая 1006 года. Максимальная звёздная величина по оценкам зафиксировавших ее наблюдателей составила -7.5^m . Многочисленными летописцы из Египта, Ирака, Италии, Швейцарии, Японии, Китая, Сирии и др. ([13]) упомянули ее в летописях своих стран.

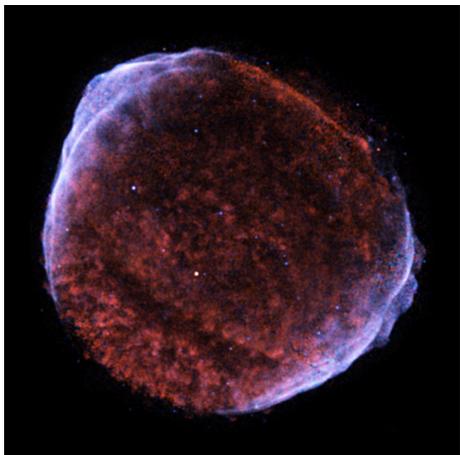


Рис. 4: Снимок в рентгеновском диапазоне, сделанный телескопом Чандра. Голубым отмечены высокоэнергичные электроны

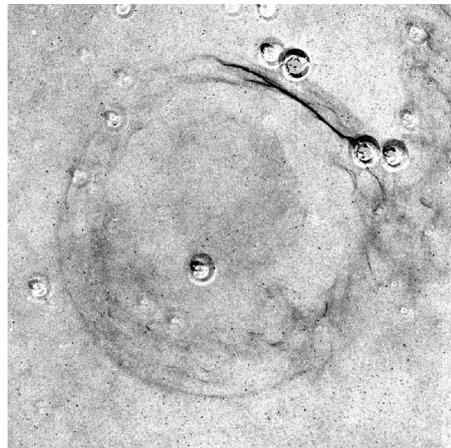


Рис. 5: Филамент, чётко проявляющийся на глубоком H_{α} -снимке. Направление на север — вверх, направление на восток — влево. Изображение из статьи [13].

Волокна этого остатка Сверхновой проявляются только в Бальмеровской серии линий водорода. Ударная волна видна в северо-западной части изображения в глубоком H_{α} -изображении. Скорость распространения ударной волны по последним данным ([13]) составляет 3000 км/с. Пока что не найдено ни нейтронной звезды, ни чёрной дыры, являющейся остатком взорвавшейся звезды, породившей эту Сверхновую.

3.3 Остаток Сверхновой 1054 года. Крабовидная туманность

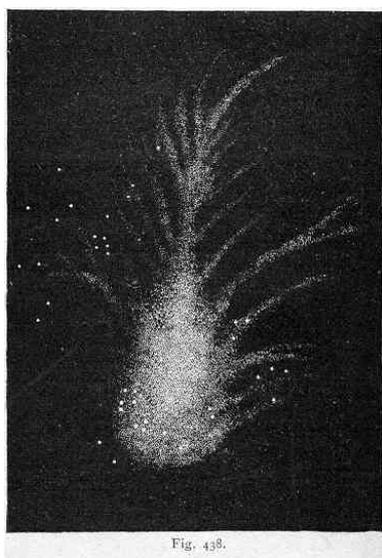


Рис. 6: Рисунок Уильяма Паронса. Напоминает краба или мечехвоста.



Рис. 7: Мечехвост (horse-crab).

По данным летописей китайских и арабских астрономов вспышка произошла 4 июля 1054 года. Остаток сверхновой был открыт в 1731 году Джоном Бэвисом, затем переоткрыт в 1758 году Мессье, а описан Уильямом Паронсом в 1844 году. Он находится на расстоянии 2 кпк от Земли. Его диаметр составляет 3.4 пк. Остаток продолжает расширяться с текущей скоростью 1500 км/с. В центре Крабовидной туманности находится пульсар, излучающий во всех диапазонах электромагнитного излучения.

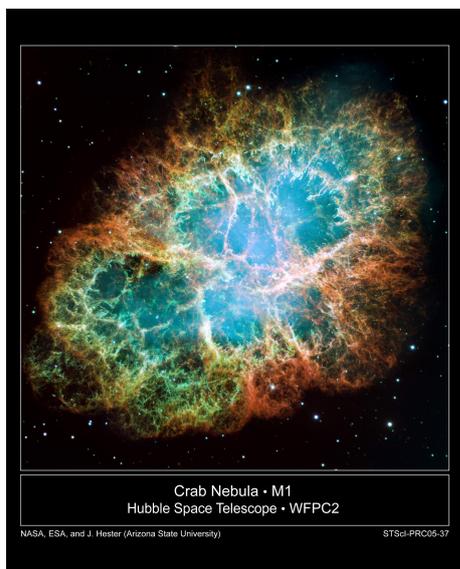


Рис. 8: Фотография с космического телескопа им. Хаббла. Синий — [O I], зелёный — [S II], красный — [O III]



Рис. 9: Совмещённое изображение Крабовидной туманности различных диапазонов длин волн: синий — рентген, зелёный — оптический диапазон, красный — инфракрасный диапазон

На оптическом изображении в первую очередь бросается в глаза явная несферичность туманности. Она объясняется результатами наблюдений в рентгеновском диапазоне. Также на

изображении хорошо видны волокна с ответвлениями, являющимися результатом магнитной неустойчивости Релея-Тейлора. Из теоретических моделей радиус филаментов оценивается величиной порядка 10^{16} см ([12]), а лучевые концентрации внутри них порядка 10^{19} см⁻². Они хорошо видны благодаря слабо ионизованным ядрам атомов, окружённым сильно ионизованными оболочками.

На рентгеновском изображении ясно прорисовывается тор, а также два противоположно направленных джета. Внутри тора выделяется кольцо. Вдали от пульсара поляриметрические измерения в рентгеновском и оптическом диапазоне прекрасно согласуются ([9]).

Наблюдения на длительном промежутке времени показывают, что внутреннее кольцо не является замкнутым, а состоит из большого количества «узелков». Более того, было замечено, что расположение узелков немного изменяется. Тор же стабилен на масштабах десятков секунд дуги.

3.4 Остаток Сверхновой 1572 года. Сверхновая Тихо Браге

Сверхновая вспыхнула 6 ноября 1572 года (по корейским летописям) в созвездии Кассиопеи. Максимальная звёздная величина составила -4^m . Названа в честь датского астронома Тихо Браге, довольно подробно описавшему и изучавшему её.

Сверхновая относится к типу Ia. Угловой радиус составляет $\sim 250''$, но расстояние чётко не определено и по разным оценкам колеблется от 1.8 до 5 кпк. Остаток характеризуется квази-радиальной формой с небольшим «ободком», говорящим о том, что структура продолжает эволюционировать. Скорость расширения остатка составляет 0.35 секунд дуги в год.

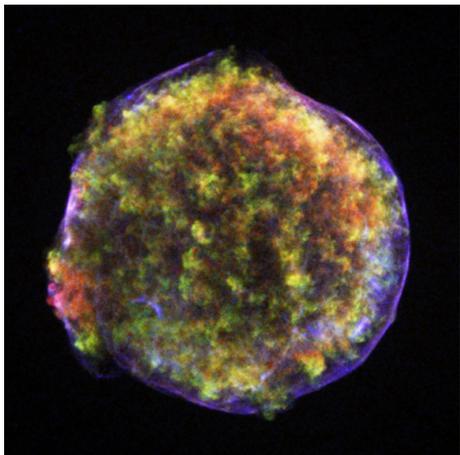


Рис. 10: Фотография остатка вспышки SN 1572, сделанная 29 апреля 2003 года телескопом Чандра. Условные цвета: красный 0.95-1.26 кэВ, зеленый 1.63-2.26 кэВ, синий 4.1-6.1 кэВ

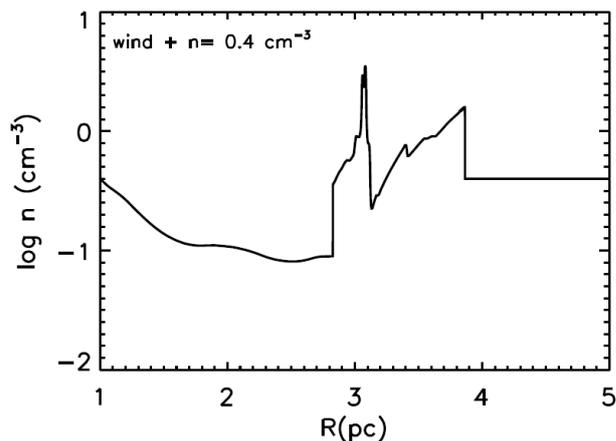


Рис. 11: Зависимость концентрации частиц от расстояния до центра взрыва на текущий момент в SNR1572 по одной из моделей, описанных в работе Чиотеллиса и др. [5]

Чиотеллис и др. (A. Chiotellis et. al. [5]) промоделировали взрыв этой Сверхновой. Из ряда моделей лучше всего (по согласованию с наблюдаемым спектром) подошла модель двойного вырождения, в которой взрыв происходил в межзвёздном веществе с концентрацией $n \sim 0.4 \text{ см}^{-3}$ и звёздным ветром $\sim 10 \text{ км/с}$ на начальной стадии эволюции. Вообще, модель двойного вырождения предполагает, что предшественником взрыва сверхновой является двойная система, состоящая из белых карликов. В процессе эволюции компоненты сближаются друг к другу, а при их слиянии превышает предел Чандрасекара, что и приводит к яркой вспышке сверхновой звезды.

3.5 Остаток Сверхновой 1604 года. Сверхновая Иоганна Кеплера

Вспышка была замечена в созвездии Змееносца и задокументирована 9 октября 1604 года европейскими наблюдателями. Основные данные наблюдений были опубликованы Иоганном Кеплером, в чью честь эта Сверхновая и получила своё название. Она относится к типу Ia. Угловой диаметр остатка на текущий момент составляет $\sim 4'$. Расстояние оценивается от 3 до 7 кпк.

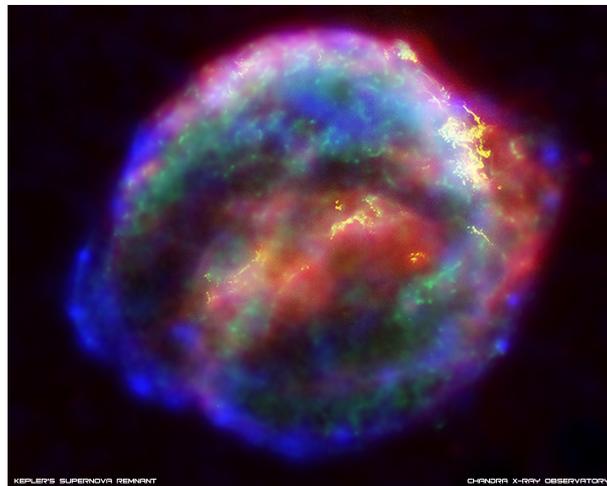


Рис. 12: Композитное изображение остатка вспышки SN1604, полученное слиянием рентгеновского (синий и зелёный), оптического (желтый) и инфракрасного (красный) снимков

На Рис. 12 можно заметить, что остаток имеет довольно правильную сферическую форму, но ясно видно сильное взаимодействие с межзвёздным веществом. Предполагается, что дугообразная ударная волна является следствием движения теряющей массу системы через межзвёздное вещество.

Патнауд и др. (D.J. Patnaude et.al. [10]) смоделировали взрыв данной Сверхновой. По их результатам лучше всего подходит модель, в которой взрыв произошёл из-за слияния двух белых карликов (сценарий двойного вырождения) в межзвёздной среде с плотностью $\sim 2 \times 10^{24}$ г/см³. Одним из параметров модели является звёздный ветер с характерной скоростью ~ 20 км/с на ранних стадиях эволюции. По их результатам расстояние до остатка должно составлять порядка 7 кпк.

3.6 Сверхновая 1680 года. Радиоисточник Кассиопея А.

Эту сверхновую относят к типу Ib. Она вспыхнула в 1680 году, но осталась незамеченной, возможно, из-за ранее сброшенной оболочки, поглотившей большую долю видимого излучения. Остаток является ярчайшим радиоисточником, находящимся за пределами Солнечной системы ([6]).

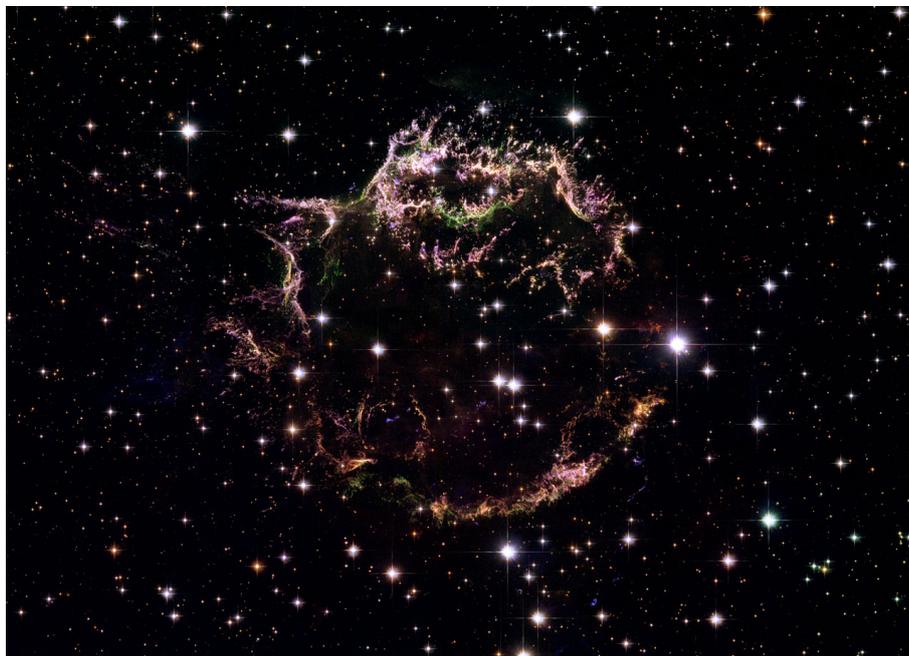


Рис. 13: Оптическое изображение остатка Сверхновой 1680 года.

Для этого остатка также характерно проявление неустойчивости Релея-Тейлора, что выражается в виде филаментов. Филаменты хорошо видно на Рис. 13. Также в глаза бросается явная асимметрия туманности. Предполагается, что она могла быть связана с испускаемыми джеттами на ранних стадиях эволюции, как и в Крабовидной туманности, но пока что не обнаруженными.

Список литературы

- [1] В.С. Имшеник, *Вспышки исторических сверхновых*, УФН, Т.170 №5, 2000
- [2] Ю.П. Псковский, *Новые и Сверхновые звёзды*, М., «Наука», 1985.
- [3] И.С. Шкловский, *Звёзды: их рождение, жизнь и смерть*, М., «Наука», 1984.
- [4] E. Cappellaro, M. Turatto, *Supernova types and rates*, [arXiv:astro-ph/0012455v1](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0012455v1), 2000
- [5] A. Chiotellis et. al., *Modeling the interaction of thermonuclear supernova remnants with circumstellar structures: The case of Tycho's supernova remnant*, MNRAS, **000**:1–12, 2013
- [6] R.A. Fesen et.al., *The expansion Assymetry and age of the Cassiopea A Supernova remnant*, The Ap.J., **645**:283-292, 2006
- [7] D.A. Green, F.R. Stephenson, *Historical Supernovae*, Lecture Notes in physics, Springer, 2003
- [8] B.C. Koo et al., *[Fe II] and H2 filaments in the Supernova Remnant G11.2-0.3: Supernova ejecta and presupernova circumstellar wind*, The Ap.J., **657**:308-317, 2007
- [9] K. Mori et.al., *Chandra Reveals the Dynamic Structure of the Inner Crab Nebula*, Neutron Star in Supernova Remnants, ASP Conference Series, Vol. 271, 2002
- [10] D.J. Patnaude et.al., *The origin of Kepler's Supernova remnant*, The Ap.J , **319**:885-892, 1987
- [11] O. Petruk et.al., *Observational constraints on the modelling of SN 1006*, MNRAS. **413**:1643-1656, 2011
- [12] R. Sankrit et. al., *WFPC2 studies of the Crab Nebula. II. Ionization structure of the Crab filaments*, The Aph. J., **504**:344-358, 1998
- [13] P.F.Winkler, G. Gupta, *The SN 1006 remnant: optical proper motions, deep imaging, distance, and brightness at maximum*, The Ap.J, **585**, no. 1, pp. 324-335, 2002
- [14] Википедия — свободная энциклопедия. [Статья Список остатков сверхновых](#)