

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОРДЕНА ЛЕНИНА ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

Каниовский Александр Сергеевич
РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СЕРХНОВОЙ 1987А
НАБЛЮДЕНИЯ НА МОДУЛЕ КВАНТ.

Специальность 01.03.02
(астрофизика, радиоастрономия)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
чл. - корр. АН СССР Сюняев Р. А.

Москва

1991



СОДЕРЖАНИЕ

Введение	
Глава 1. Детекторы жесткого рентгеновского излучения обсерватории «Рентген» на модуле «Квант». Наблюдения Сверхновой 1987А обсерваторией «Рентген».....	
1. 1. Рентгеновский детектор Пульсар X-1.....	
1. 2. Жесткий рентгеновский эксперимент «Гексе».....	
1. 3. Мягкие эксперименты обсерватории «Рентген».....	
1. 4. Циклограммы работы обсерватории «Рентген».....	
1. 5. Наземная обработка экспериментальных данных.....	
1. 6. Наблюдения Сверхновой 1987А обсерваторией «Рентген».....	
Глава 2. Исследование жесткого рентгеновского излучения Сверхновой 1987А Обсерваторией «Рентген» на модуле «Квант».....	
2.1 Формирование рентгеновского излучения Сверхновой как результат комптонизации Гамма-линий при распаде Co^{56}	
2. 2. Регистрация рентгеновского потока от Сверхновой 1987А...	
2. 3. Локализация источника жесткого рентгеновского излучения.	
2. 4. Оценки светимости других источников в поле зрения обсерватории «Рентген».....	
2. 5. Эволюция рентгеновского излучения Сверхновой 1987А.....	
2. 5. 1. Кривые блеска Сверхновой 1987А.....	
2. 5. 2. Рентгеновские спектры Сверхновой 1987А.....	
2. 6. Рентгеновские наблюдения SN1987a другими группами.....	
Глава 3. Интерпретация наблюдательных данных.....	
3. 1. Перемешивание радиоактивных элементов в оболочке сверхновой.....	

3.2.	Оценки для возможных дополнительных источников энергии в оболочке сверхновой 1987а.....
3.2.1.	Изотопы ^{57}Co ^{44}Ti ^{22}Na
3.2.2.	Излучение звездного остатка.....
Глава 4.	Возможности наблюдения сверхновой 1987а и других сверхновых в рентгеновском диапазоне орбитальной обсерваторией Спектр-Рентген-Гамма.....
4.1.	Наблюдение Сверхновой 1987а телескопом Содарт в линиях Co^{57} , Ti^{44} , Fe^{55}
4.2.	Наблюдение ударной волны от Сверхновой 1987а.....
4.3.	Наблюдение излучения звездного остатка.
4.4.	Наблюдения других сверхновых.
	Список литературы.....

ВВЕДЕНИЕ

Взрыв сверхновой 1987а 23 февраля 1987 года в Большом Магеллановом Облаке на расстоянии всего в 55 кпк явился одним из наиболее заметных астрофизических событий последнего десятилетия. Впервые в истории наблюдательной астрофизики стало возможным детальное, продолжительное исследование физических процессов, протекающих при взрыве сверхновой, путем наблюдений практически во всех диапазонах длин волн электромагнитного излучения, доступных современной экспериментальной астрофизике, от радиоизлучения до гамма-лучей. Обилие наблюдательных данных сделало возможным построить более детальную теоретическую модель процессов, протекавших при взрыве и дальнейшей эволюции этого уникального астрофизического объекта, дало материал для развития всего раздела астрофизики, занимающегося физикой сверхновых. Исследования сверхновой 1987а в рентгеновском диапазоне, проводившиеся орбитальными космическими аппаратами, а также в ходе баллонных и ракетных полетов дали существенную часть информации об этом источнике.

Сверхновая 1987а была открыта Я.Шелтоном в обсерватории Лас Кампанас, Чили (1). По данным спектральных наблюдений в ЮАР (1) и Чили (2) у источника были обнаружены мощные линии поглощения Бальмеровской серии водорода, что позволило сделать вывод о том, что в данном случае мы имеем дело со сверхновой II типа.

Сверхновая 1987а явилась вторым в истории наблюдений после Солнца источником, от которого был зарегистрирован поток нейтрино.

Положение сверхновой 1987а было идентифицировано со

звездой из каталога Сандулека # 202 -69 (далее Sk -69 202) (75 76). Sk -69 202 являлся сверхгигантом ВЗ I (58, 75, 76). Тот факт, что сверхновая 1987а образовалась при взрыве голубого сверхгиганта, во многом объясняет аномалии в поведении SN1987а.

Сверхновую 1987а отличала низкая светимость в максимуме $M = -15.5$ (по сравнению с характерной для сверхновых II типа $M = -18$). Реально вспышки сверхновых подобных 1987а могут быть достаточно распространенными, а «необычность» SN1987а может объясняться меньшим расстоянием на котором можно регистрировать источник данной светимости. Так вспышка подобной сверхновой в скоплении в Деве на 20 Мпк вероятно не была бы зарегистрирована (5).

Уже первые наблюдения источника показали, что поведение сверхновой во многом отличается от обычных Сверхновых II типа, образующихся при взрыве красного сверхгиганта. Ранние оптические и ультрафиолетовые наблюдения (IUE) показали необычайно быстрый рост светимости ~ 100 раз за 3 часа (вместо характерного времени порядка нескольких суток), что явилось свидетельством того, что атмосфера данной сверхновой была более компактна по сравнению со случаем красного сверхгиганта.

Для данной сверхновой по наблюдениям линий погашения бальмеровской серии были зарегистрированы необычайно высокие скорости в оболочке до $0.1c$ (30000 км/с) (1, 2).

Спектр сверхновой 1987а по данным ранних оптических и ультрафиолетовых исследований демонстрировал примерно в 10 раз более быструю переменность по сравнению с обычными сверхновыми II типа. Это проявлялось в быстром спаде ультрафиолетовой светимости (34 - 38), соответствующем спаде возбуждения атмосферы, уменьшении скорости расширения в области

формирования линий.

Радиоизлучение от сверхновой 1987a наблюдалось в течении первого месяца наблюдений (68). Поток в радиодиапазоне достиг максимума через пять дней после взрыва и был примерно в 1000 раз слабее радиоизлучения нормальных сверхновых II типа, для которых максимум радио светимости достигается только спустя год после взрыва. VLBI наблюдения на пятый день после взрыва зафиксировали протяженный радио источник $1.25 \cdot 10^{-3}$ угл. сек, что соответствует линейному размеру $8 \cdot 10^{14}$ см. подобный размер дает скорость расширения радио- источника ~ 19000 км/с. Данные радио-наблюдений свидетельствуют о том, что межзвездная среда окружающая сверхновую 1987a значительно менее плотная по сравнению с обычными сверхновыми II типа. Это объясняется тем, что звездный ветер от голубого сверхгиганта менее плотный и имеет более высокую скорость истечения по сравнению с красным сверхгигантом. Поскольку на ранних этапах эволюции Sk -69 202 должен был пройти стадию красного сверхгиганта, в межзвездной среде, окружающей сверхновую, должно существовать уплотнение связанное со звездным ветром красного сверхгиганта.

По данным ультрафиолетовых наблюдений SN1987a зарегистрированы линии излучения от элементов He II, C III, N III, N IV, N V и O III (70), характеризующиеся малой шириной (<30 км/с). Данные линии не могут формироваться в оболочке сверхновой и наиболее вероятно, являются результатом фотоионизации разреженного межзвездного газа ультрафиолетовой вспышкой образовавшейся в фотосфере звезды при прохождении ударной волны. Интенсивность этих линий нарастала до апреля 1988 (56), что дает оценку для расстояния от сверхновой до области более плотного звездного ветра на стадии красного

сверхгиганта порядка 1 светового года.

Наблюдательные данные о межзвездной среде окружающей сверхновую необычайно важны для планирования будущих наблюдений SN1987a. В настоящее время широко обсуждается вопрос о возможном возникновении мощной ударной волны на границе звездного ветра от Sk -69 202 на стадии красного сверхгиганта. (43, 44, 45)

В процессе эволюции SN1987a по данным непрерывных наземных измерений яркости источника в оптическом и инфракрасном диапазонах, а также по наблюдениям в течении первых нескольких дней после взрыва в ультрафиолете, со спутника IUE, была построена кривая болометрической светимости источника рис. 1 (29, 30, 77, 40). На раннем этапе эволюции светимость источника определялась энергией ударной волны, возникшей при коллапсе ядра и вышедшей на поверхность звезды. Основная энергия в этот момент содержалась в ультрафиолетовой части спектра. в дальнейшем светимость источника поддерживалась за счет энергии распадов радиоактивных изотопов ^{56}Ni и ^{56}Co . Основная энергия в этот момент содержится в оптической и инфракрасной частях спектра. На поздних стадиях эволюции (через несколько лет после взрыва) существенная часть энергии из оболочки уносится в γ -лучах прямого вылета и в рентгеновском континууме. Этим объясняется более быстрое падение болометрической светимости по сравнению с темпом распада ^{56}Co 111 дней. На данном этапе кривая светимости SN1987a, построенная по данным оптических и инфракрасных наблюдений фактически уже не является болометрической. На ещё более поздних этапах развития для энергетики внутри оболочки сверхновой может стать существенным вклад других источников энергии. такими источниками могут стать долгоживущие

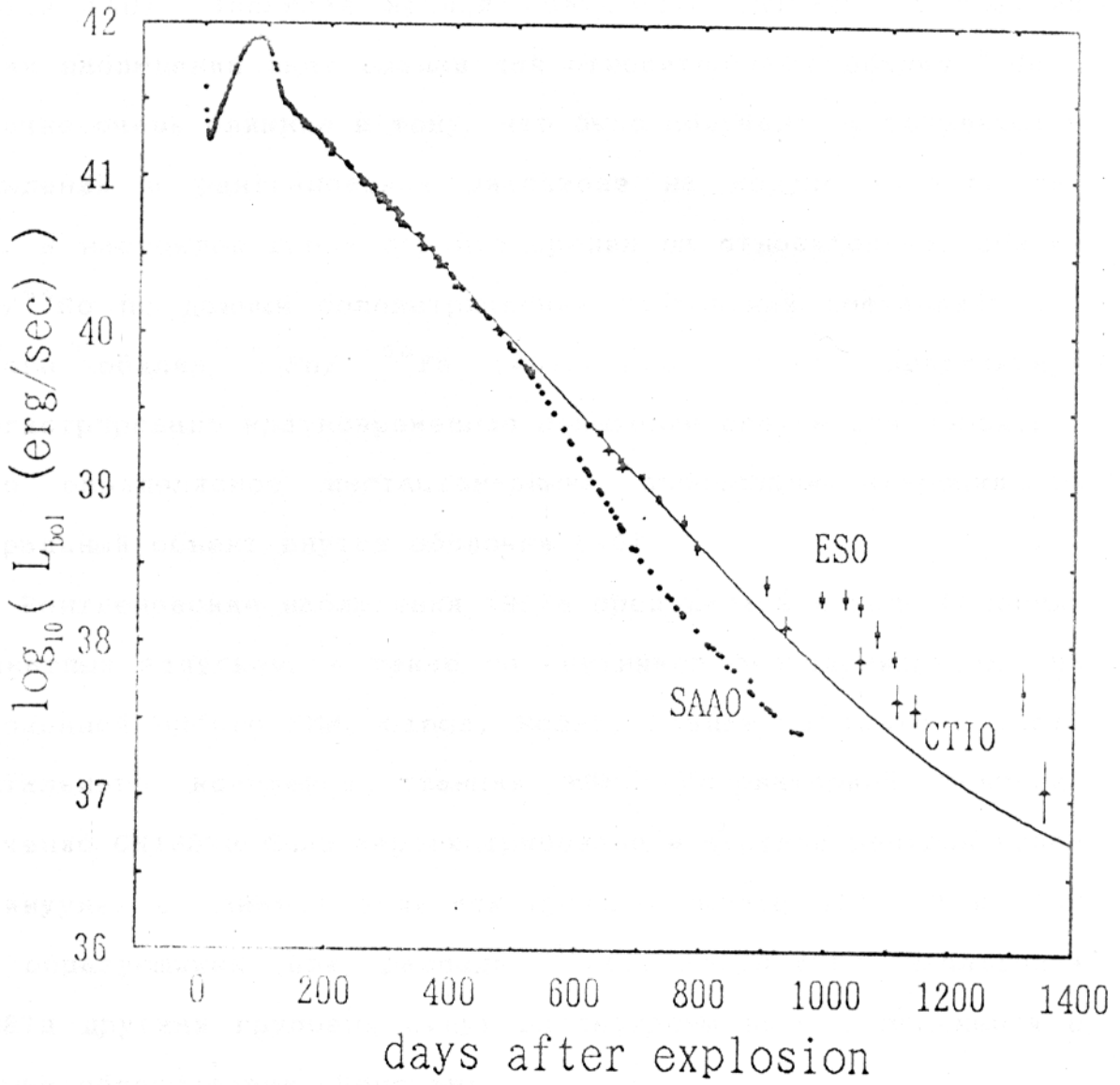


Рис 1. Кривая блеска SN1987a по данным наблюдений в Уф, оптическом и ИК диапазонах по данным разных групп SAAO, ESO, CTIO. Приведена также расчетная кривая светимости, соответствующая земному обилию тяжелых элементов.

радиоактивные изотопы образующиеся в процессе взрывного нуклеосинтеза, а также энергосвязанное со звездным остатком (нейтронной звездой или черной дырой), образовавшимся при коллапсе ядра. Указания на подобное энергосвязанное излучение уже имеются (40). Эволюция кривой светимости SN1987a на поздних этапах наблюдений даёт оценки для относительного обилия ^{57}Co в оболочке очень близкие к тому, что было получено по результатам наблюдений в рентгеновском диапазоне на модуле «Квант» см. гл.3. В настоящее время верхний предел на относительное обилие $^{57}\text{Co}/^{56}\text{Co}$ по данным болометрических наблюдений составляет 1.7 от обилия $^{57}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ (40). Кроме того, повидимому, зарегистрировано кратковременное повышение светимости, вероятнее всего определяемое нестационарными процессами аккреции на центральный объект внутри оболочки (40).

Рентгеновские наблюдения 1987a проводились в ходе балонных и ракетных запусков, а также со спутников функционирующих на околоземной орбите SMM, Ginga, Rosat, Гранат, а также с борта орбитального комплекса станции МИР обсерваторией Рентген. Излучение SN1987a было зарегистрировано в жестком рентгеновском континууме, а также в γ -линиях прямого вылета 847 кэВ и 1238 кэВ образующихся при распаде ^{56}Co . Результаты наблюдений SN1987a другими группами будут рассмотрены ниже в сравнении с данными обсерватории «Рентген».

Международная орбитальная обсерватория «Рентген» на модуле «Квант» комплекса космической станции «Мир» проводила непрерывные наблюдения сверхновой 1987a в течении 1987-1990 гг. Результаты наблюдений позволяют сделать ряд выводов о физических процессах в оболочке сверхновой. Выводы, сделанные по данным наблюдений в рентгеновском диапазоне, частично

подтверждаются наблюдениями в других диапазонах.

Программа наблюдений сверхновой 1987а в рентгеновском диапазоне не завершена. В настоящее время актуальны вопросы дальнейшей эволюции сверхновой 1987а. Будущие наблюдения в рентгеновском диапазоне могут дать ответы на вопросы об изотопном составе оболочки, природе звездного остатка, возможно образовавшегося в процессе взрыва, физике эволюции предсверхновой.

В 1995 году в Советском союзе планируется запуск орбитальной рентгеновской обсерватории «Спектр-Рентген-Гамма». Приборы этой обсерватории позволят наблюдать сверхновую 1987а через 8 лет после взрыва.

В работе приводятся результаты продолжительного наблюдения Сверхновой 1987а в рентгеновском диапазоне. Получены спектры жесткого рентгеновского излучения SN1987а. В работе прослежена эволюция жесткого рентгеновского спектра SN1987 на протяжении двух лет наблюдений. По данным наблюдений 1987-1989 гг. построены кривые рентгеновского блеска источника, позволившие получить оценки для распределения ^{56}Co в оболочке сверхновой. Поведение рентгеновского излучения SN1987а является мощным свидетельством в пользу моделей оболочки с перемешиванием радиоактивных элементов. По результатам наблюдений сверхновой 1987а в 1988-1989гг в работе получены верхние пределы на излучение от дополнительного источника энергии в оболочке сверхновой изотопа ^{57}Co , а также на излучение звездного остатка - черной дыры или нейтронной звезды, возможно образовавшейся при взрыве сверхновой. В заключительной части диссертации рассматриваются дальнейшие возможности исследования сверхновой 1987а средствами готовящейся к запуску орбитальной

обсерватории «Спектр-Рентген-Гамма».

Приведенные в диссертации результаты наблюдений рентгеновского излучения сверхновой 1987а свидетельствуют о радиоактивной природе формирующегося в оболочке излучения. Выводы о сильном перемешивании радиоактивных элементов, образующихся при взрыве сверхновой, получаемые по кривым рентгеновского блеска SN1987а, хорошо согласуются с более поздними результатами наблюдений в линиях прямого вылета 847 и 1238 кэВ. Простейшая модель перемешивания ^{56}Co в оболочке сверхновой, полученная в работе, может использоваться при расчетах процессов выхода излучения из оболочки. Данная модель использовалась в этой работе для расчетов прямого вылета из оболочки рентгеновских квантов, образующихся при распадах долгоживущих изотопов ^{57}Co , ^{55}Fe , ^{44}Ti , синтезированных при взрыве сверхновой. Некоторые из этих линий могут быть зарегистрированы орбитальной обсерваторией «Спектр-Рентген-Гамма», которая будет запущена в 1995 году. Результаты данной работы могут быть использованы для будущего планирования наблюдений этой обсерватории.

В процессе работы было создано математическое обеспечение, успешно применявшееся при исследовании других рентгеновских источников, наблюдавшихся обсерваторией «Рентген». Была проведена полетная калибровка детекторов прибора «Гексе» обсерватории «Рентген».

В Главе 1 дано описание приборов обсерватории «Рентген» на модуле «Квант», циклограмма функционирования обсерватории на орбите и методика наземной обработки данных.

Орбитальная обсерватория «Рентген» на модуле «Квант» запущена весной 1987 года. Обсерватория успешно функционирует в

составе орбитального комплекса станции «МИР». Отличительной особенностью комплекса научной аппаратуры обсерватории является широкий диапазон чувствительности - от 2 до 800 кэВ. Станция «Мир» функционирует на «низкой» орбите со значительным наклоном плоскости орбиты, что определяет высокий уровень переменности фоновых условий (широтный ход фона) для рентгеновских экспериментов на борту станции. В случае с наблюдениями рентгеновского излучения сверхновой 1987а отношение Сигнал/Шум было крайне низким, что наряду с переменностью фоновых условий и значительным процентом телеметрических сбоев существенно затрудняло обработку данных.

Основным прибором обсерватории «Рентген» при наблюдении жесткого рентгеновского излучения сверхновой 1987а был сцинтилляционный детектор «Гексе», работающий в диапазоне энергий 15 - 200 кэВ. В процессе наблюдений прибор был откалиброван и отъюстирован по данным наблюдений Крабовидной туманности.

Обсерватория «Рентген» вела непрерывные наблюдения области Большого Магеланового Облака в течении двух лет с 1987 по 1989 гг.

В Главе 2 приведены результаты исследований жесткого рентгеновского излучения сверхновой - 1987а по данным обсерватории «Рентген».

Теоретические расчеты ожидаемого рентгеновского излучения от сверхновой 1987а, проведенные в ИКИ АН СССР С. А. Гребеневым и Р. А. Сюняевым, а затем рядом групп за рубежом, сразу после открытия этого источника в оптических лучах, предсказали, что жесткий рентгеновский континуум, формирующийся в результате комптонизации в оболочке сверхновой гамма-квантов, образующихся

при распаде радиоактивного Кобальта-56, должен достигнуть уровня доступного для наблюдений приборами обсерватории в начале осени 1987г.

В августе 1987 г. прибором «Гексе» обсерватории «Рентген» был зарегистрирован необычайно жесткий рентгеновский поток (показатель степени для фотонного спектра ~ -1) из области вблизи сверхновой 1987а. По данным наблюдений в августе 1987 источник жесткого рентгеновского излучения был локализован. Положение источника совпало с положением SN1987а в пределах ошибки локализации 6 угл. мин.

За время наблюдений приборами «Гексе» и «Пульсар X-1» были построены спектры SN1987а в диапазоне 15 - 300 кэВ. По данным прибора «Гексе» была прослежена эволюция рентгеновского излучения SN1987а. Были выделены следующие характерные особенности эволюции рентгеновского излучения SN1987а: раннее появление рентгеновского потока (значимое рентгеновское излучение регистрировалось уже в июле 1987), медленный рост рентгеновской светимости до февраля 1988, последующее падение потока излучения, связанное с распадом Кобальта-56. На поздних этапах эволюции заметным становится изменение формы спектра (уменьшается число фотонов с энергиями меньше 30кэВ вследствие уменьшения оптической толщи по комптоновскому рассеянию оболочки сверхновой).

В процессе наблюдений получены верхние пределы на потоки в жестком рентгене от двух других известных источников, находившихся во время наблюдений в поле зрения прибора «Гексе»: LMC X-1 и PSR0540-693.

В Главе 3 рассмотрены возможности интерпретации результатов наблюдений SN1987а для построения модели оболочки

сверхновой, а также для оценки дополнительных источников энергии в оболочке сверхновой.

Сравнение результатов численного моделирования формирования рентгеновского излучения сверхновой с данными наблюдений приводит к необходимости объяснить раннее, по сравнению с модельным, появление рентгеновского континуума, выходящего из оболочки (аналогичная проблема возникает для гамма-линий прямого вылета 847 кэВ и 1238 кэВ). Одним из возможных объяснений данного несоответствия может являться перемешивание радиоактивных элементов в оболочке сверхновой при взрыве. Высокая статистическая значимость данных для кривой рентгеновского блеска SN1987a позволила построить модель распределения Кобальта-56 в оболочке в предположении сферической симметрии задачи. Модель требует сильного перемешивания ~40% кобальта практически по всей оболочке сверхновой. Модель объясняет как поведение рентгеновского континуума, так и эволюцию линий прямого вылета.

За период наблюдений с января 1988 по май 1989 прибор «Гексе» зарегистрировал падение рентгеновской светимости в континууме более чем в 8.5 раз, что хорошо согласуется с предположением о Кобальте-56 как основном источнике энерговыделения в оболочке сверхновой после взрыва. На поздних этапах эволюции актуальным становится вопрос о дополнительных долгоживущих источниках энергии в оболочке. К этим источникам относятся долгоживущие изотопы Кобальт-57, Натрий-22, Титан-44, а также звездный остаток (нейтронная звезда или черная дыра), который мог образоваться при взрыве. Во время последнего периода наблюдений обсерватория «Рентген» не зафиксировала значимого потока от SN1987a. Полученный верхний предел на

рентгеновскую светимость SN1987a $L_x(15-105 \text{ кэВ}) \leq 1.3 \cdot 10^{37}$ эрг/с соответствует пределу на светимость звездного остатка со спектром, подобным спектру пульсара в Крабе, $4.4 \cdot 10^{38}$ эрг/с. Наиболее мощным источником энергии в оболочке среди долгоживущих изотопов является Кобальт-57. По данным наблюдений был получен верхний предел на относительное обилие этого изотопа $\text{Co}^{57}/\text{Co}^{56}$, соответствующий 1.5 относительного обилия $\text{Fe}^{57}/\text{Fe}^{56}$ на Земле. Получен также менее интересный верхний предел на линию прямого вылета 122 кэВ, образующуюся при распаде этого изотопа $3.9 \cdot 10^{-4}$ фот/см²с, что соответствует относительному обилию превышающему земное в 6 раз.

В Главе 4 исследуются возможности наблюдения SN1987a обсерваторией «Спектр-Рентген-Гамма», готовящейся к запуску в 1995 году.

Одним из двух основных инструментов международной орбитальной обсерватории «Спектр-Рентген-Гамма» является Советско-Датский телескоп с рентгеновской оптикой косого падения СОДАРТ. Рабочий диапазон энергий данного инструмента - 0.1-30 кэВ. В состав телескопа в качестве фокального детектора входит охлаждаемый твердотельный кремний-литиевый спектрометр SIXA, с энергетическим разрешением порядка 200 эВ. К моменту запуска обсерватории в 1995 году оболочка сверхновой 1987a кроме центральной её части становится прозрачной по фотопоглощению для мягких рентгеновских линий, образующихся при распаде изотопов ^{57}Co , ^{55}Fe , ^{44}Ti . При оценке возможности регистрации линий использовалось модельное распределение радиоактивных элементов в оболочке, описываемое в Главе 3 диссертации. Согласно результатам численного моделирования, существует возможность наблюдения линии 6.4 кэВ от изотопа

Co^{57} , а также линии 5.9 кэВ от Fe^{55} .

Сверхновая 1987a может оказаться уникальным объектом для рентгеновских исследований в случае возникновения мощной ударной волны при столкновении вещества сброшенного при взрыве со звездным ветром от предсверхновой на стадии красного сверхгиганта.

В составе обсерватории «Спектр-Рентген-Гамма» входит телескоп с кодированной апертурой МАРТ, работающий в диапазоне энергий от 15 до 150 кэВ. При помощи этого телескопа будет возможен поиск излучения звездного остатка, находящегося внутри оболочки сверхновой. Его излучение должно трансформироваться из-за фотопоглощения в оболочке.

Глава 1. Детекторы жесткого рентгеновского излучения обсерватории «Рентген» на модуле «Квант». Наблюдения Сверхновой 1987А обсерваторией «Рентген».....

Наблюдения жесткого рентгеновского излучения SN1987a проводились приборами международной астрофизической обсерватории «Рентген» на модуле «Квант», входящем в состав орбитального комплекса станции «Мир».

Международная обсерватория «Рентген» была запущена на орбиту в апреле 1987года. Первые проверочные включения научной аппаратуры были проведены в конце мая 1987, а с июля 1987 начались регулярные наблюдения.

Комплекс научной аппаратуры обсерватории «Рентген» отличается необычайно широкий динамический диапазон, приборы обсерватории чувствительны к рентгеновскому излучению в диапазоне 2-1300 кэВ. В состав обсерватории входят «мягкие» приборы ТТМ и ГСПС, работающие в диапазоне 2-30 кэВ, а также жесткие рентгеновские детекторы «Гексе» 16-200 кэВ и Пульсар X-1 40-1300 кэВ. Именно «жесткими» приборами обсерватории и было зарегистрировано рентгеновское излучение Сверхновой 1987а. В этой главе дается краткое описание состава и режима функционирования обсерватории «Рентген», а также процедур наземной обработки данных.

§1.1. Рентгеновский детектор Пульсар X-1. Рентгеновский детектор Пульсар X-1 изготовленный ИКИ АН СССР, НПО «Каспий» г. Баку и ОКБ ИКИ АН СССР г. Бишкек, является наиболее «жестким» прибором обсерватории «Рентген» он рассчитан на наблюдения в диапазоне энергий 30-1000 кэВ.

Прибор является сцинтилляционным детектором типа «Фосвич». Он

состоит из четырех идентичных детекторов диаметром 20 см каждый на кристаллах NaI (3 см) и CsI (3 см). Прибор имеет неподвижный свинцовый коллиматор с «квадратной» диаграммой направленности и полем зрения $\pm 3^\circ$. На рисунке 1.1 приведена чувствительность 1 модуля прибора Пульсар X-1 видно, что наибольшей чувствительностью прибор обладает в диапазоне 100 - 300 кэВ. В процессе наблюдений фоновая загрузка для данного прибора составляла 30-50 фоновых событий в секунду на детектор и отличалась высокой переменностью ~ 50% связанной с движением орбитального комплекса «Мир» по орбите. На рис. 1.2. приведен спектр фона для прибора по сравнению со спектром регистрировавшимся от SN1987a в максимуме в январе 1988 г.

§1.2. Жесткий рентгеновский эксперимент «Гексе». Другим «жестким» рентгеновским инструментом обсерватории является прибор «Гексе» (HEXE), изготовленный кооперацией: Институт внеатмосферной физики Общества Макса Планка, Астрономический Институт Тюбингенского университета и концерн MBW в ФРГ. Прибор рассчитан на работу на энергиях 15-200 кэВ (см. рис. 1.1) Прибор состоит из 4 идентичных модулей с кристаллами NaI 0.3см и CsI 5см. Прибор имеет качающийся коллиматор с «шестиугольной» диаграммой направленности шириной 1.6° на полувысоте. В режиме работы с качанием коллиматора два модуля прибора в течении 2 минут наблюдают источник а два других проводят измерения фонового участка на расстоянии 2.4° от точки наведения. через 2 минуты детекторы, наблюдавшие источник, перенаводятся на фон и наоборот. Фоновая загрузка прибора составляла ~ 5-10 отсчетов в секунду на модуль и также как в случае Пульсара X-1 сильно менялась по орбите.

§1.3. Мягкие эксперименты обсерватории «Рентген».

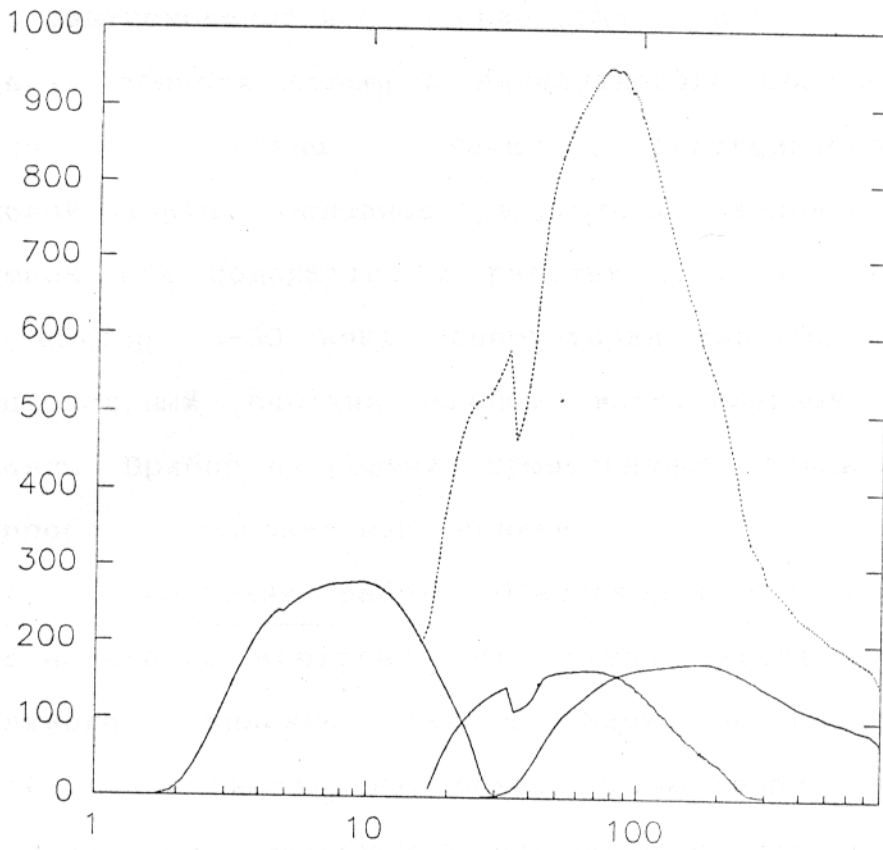


Рис. 1.1 Эффективная площадь регистрации приборов обсерватории «Рентген». Показаны эффективные площади приборов ТМ 3-30 кэВ, ГЕКСЕ 15-300 кэВ и Пульсар X-1 30-800 кэВ (сплошная линия). Показана также суммарная эффективная площадь обсерватории ТМ + 4 детектора ГЕКСЕ + 2 детектора Пульсар X-1 (пунктир).

Телескоп с кодированной апертурой ТТМ изготовленный совместно Бирмингемским Университетом, Великобритания и Лабораторией Космических Исследований, г. Утрехт, Нидерланды, является наиболее мягким инструментом обсерватории (2-30 кэВ). В качестве детектора рентгеновского излучения в телескопе применена многопроволочная пропорциональная камера. Телескоп позволяет строить рентгеновское изображение области неба $10^\circ \times 10^\circ$. За время наблюдения области Большого Магелланового Облака телескопом не было зарегистрировано значимого рентгеновского потока от Сверхновой 1987а. Основные результаты наблюдений области БМО телескопом ТТМ содержатся в работах (57, 58, 62, 63). Другой мягкий прибор (3-30 кэВ) обсерватории газовый сцинтилляционный пропорциональный счетчик «ГСПС» изготовленный в ESTEC ESOC Нидерланды. Прибор не получил существенных результатов по SN1987а из-за проблем с высоким напряжением.

§1. 4. Циклограммы работы обсерватории «Рентген».

Обсерватория «Рентген» на модуле «Квант» входит в состав орбитального комплекса станции «Мир», находящейся на низкой круговой орбите (высота над поверхностью Земли ~ 400 км). Орбита имеет значительное наклонение, что вызывает существенные изменения фоновых условий в высокоширотных участках орбиты. Наблюдения обсерваторией проводились преимущественно в экваториальной части орбиты. Продолжительность наблюдений колебалась от 12.5 до 29.5 мин. После завершения сеанса наблюдений проводился сеанс связи и информация сбрасывалась на землю. В сутки проводилось от 4 до 8 идентичных сеансов наблюдений.

Проблема переменного фона стояла на первом месте для жестких экспериментов. Характерное время изменения фоновых условий для

экваториальной части орбиты станции «Мир» - порядка 10 минут. В связи с этим была сформирована следующая циклограмма наведений станции. Первые 4 минуты приборы обсерватории наводились в фоновую точку, не содержащую рентгеновских источников в поле зрения $3^\circ \times 3^\circ$, а затем на протяжении времени наблюдений, чередовались наблюдения источника 4.5 мин. и фона 4 мин. Поскольку прибор «Гексе» имеет возможность автономного измерения фона, при качании коллиматора прибора на 2.3° в сторону от источника, часть наблюдений проводилась без перенаведений всего комплекса «Мир». Такая работа обсерватории применялась на поздних этапах наблюдения SN1987a, когда падение потока рентгеновского излучения от источника затруднило его наблюдение прибором Пульсар X-1.

Точность наведения обсерватории первоначально проверялась с помощью звездного датчика прибора ТМ. В мае 1988 г. произошел отказ звездного датчика и до ноября 1988 точное наведение обсерватории было неизвестно. С ноября 1988 г. для определения наведения использовались данные прибора ТМ, который использовался в качестве рентгеновского З.Д. В среднем за время наблюдений точность наведения была не хуже 0.5 град. Это позволяет надеяться, что для периода наблюдений без знания точного наведения комплекса, для прибора «Гексе», наиболее чувствительного к точности наведения (диаграмма направленности 1.6 град на полувысоте), интенсивность источника не была занижена более чем на 30 процентов.

§1.5. Наземная обработка экспериментальных данных.

При наземной обработке данных основными трудностями являлись переменность фоновых условий и сбои телеметрии.

На начальном этапе обработки проводилось вычитание фона и отбрасывались сбойные данные. В конечном итоге решение этих задач

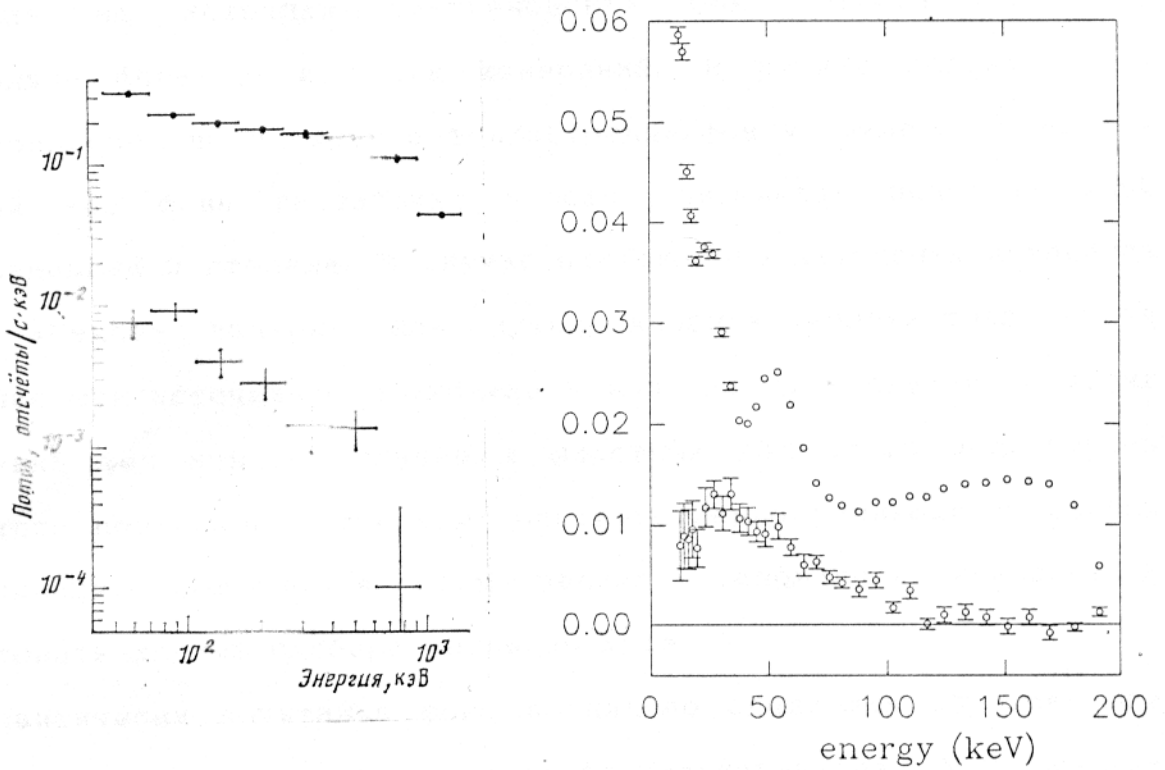


Рис. 1.2 а) Спектр фона измеряемого прибором Пульсар X-1 (верхни точки) в сравнении с выделяемым сигналом от сверхновой (нижняя группа точек).

б) тоже для прибора «Гексе».

было автоматизировано, однако при финальной обработке не удалось полностью избавиться от необходимости визуального контроля качества получаемой информации.

В процессе обработки данных по СН1987а фоновая загрузка для жестких рентгеновских экспериментов вычиталась на основании интерполяции фона по данным фоновых измерений. Для участка наведения на источник рентгеновский фон предсказывался по наблюдениям фона до и после измерений. В режиме перенаведения всего комплекса на измерение фон/источник/фон уходило 12.5 мин. и широтный ход фона достаточно хорошо описывался полиномиальной аппроксимацией 3 степени. В случае постоянного наведения комплекса прибор «Гексе» измерял фон путем качания коллиматора и на измерение фон/источник/фон уходило 6 мин. Во этом случае за время наблюдений фон менялся слабее и широтный ход достаточно хорошо описывался полиномом 2 степени. Соответственно уменьшались ошибки аппроксимации. Однако в этом режиме становилось невозможным обрабатывать данные прибора «Пульсар X-1».

Практически вычитание фона выглядело следующим образом: Для элементарного участка наведения фон/источник/фон формировался временной ряд скорости счета $X(t_i)$ в определенном энергетическом диапазоне. Разбиение по времени t_i выбиралось таким образом, чтобы прописывалось широтное изменение фона, а также чтобы статистическое распределение для одного временного бина было гауссовым. Апроксимирующая функция $f(t)$ подбиралась из условия минимизации критерия χ^2 или $\sum (f(t_i) - x(t_i))^2 / \sigma^2(x(t_i))$, где суммирование проводилось для t_i принадлежащих фоновым участкам. В случае когда $f(t)$ ищется в виде полинома, задача сводится к системе линейных уравнений и имеет аналитическое решение. В случае

источника, постоянного за время измерения, существует возможность улучшить аппроксимацию фона, используя также и участок наведения на источник, где переменность скорости счета целиком определяется переменностью фона. В этом случае аппроксимирующая функция $f(t)$ выбирается в виде:

$$f(t) = \begin{cases} P_n(t) & t \in \text{наведение на фон} \\ P_n(t) + \text{const} & t \in \text{наведение на источник} \end{cases}$$

где $P_n(t)$ - полином n -степени.

В этом случае задача сводится к системе $n+1$ линейных уравнений, причем const сразу дает интенсивность источника за время наблюдений. Вычитание фона проводилось первоначально для каждого элементарного наблюдения фон/источник/фон, однако оказалось, что более удобным является сначала усреднить элементарные наблюдения за необходимое время интегрирования, а затем проводить вычитание фона. В данном случае упрощалась процедура выбора оптимальной степени полинома, а также удаление нестатистических выбросов, связанных со сбоями телеметрии. Для иллюстрации на рис. 2.3 приведены результаты вычитания фона для элементарного наблюдения СН1987а в августе 1987 и для всего усредненного набора наблюдений за август 1987.

Для прибора «Гексе» был разработан альтернативный метод вычитания фона с использованием корреляции между загрузкой схемы антисовпадений в приборе и фоновой загрузкой (39). Данный метод достаточно удобен для работы с сильными переменными источниками, однако он не применялся при обработке данных по СН1987а из-за сложности оценки систематических ошибок вычитания фона при работе со слабыми источниками и большими объёмами наблюдательных данных.

Необычайно важной при обработке данных экспериментов с

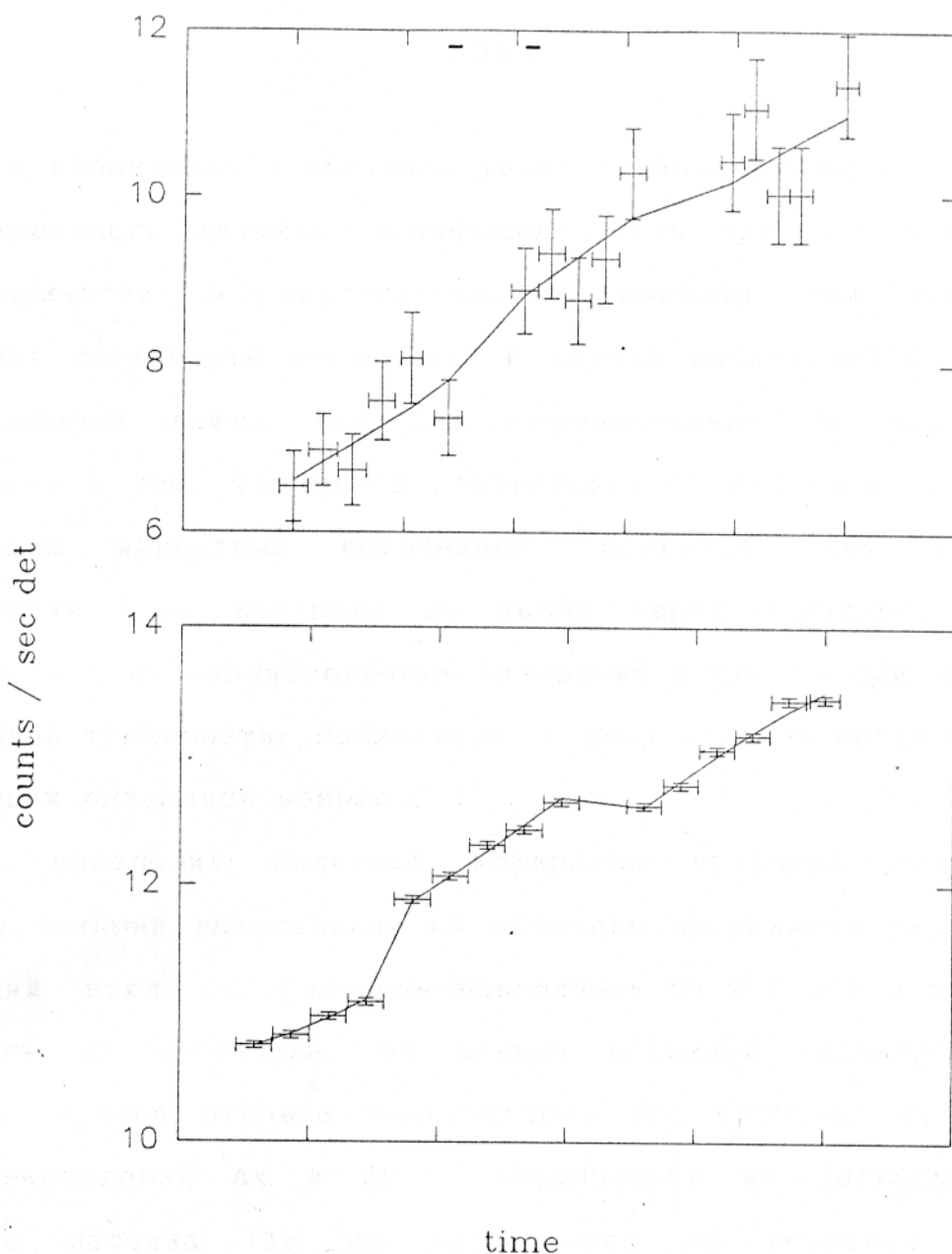


Рис. 1.3. Результаты аппроксимации фона прибора «Гексе» во всем диапазоне энергий для отдельного наведения на SN1987a (верхний рисунок) и для усредненных данных за 3 месяца наблюдений. Источник находился вблизи максимума светимости.

пассивным коллиматором являлась также задача привязки оси прибора к оси звездного датчика. Неопределенность привязки оси прибора могла привести к систематическим ошибкам при определении абсолютной светимости источника. В случае наблюдений SN1987a это было особенно важно так как первоначально не было полной уверенности в том, что поток рентгеновского излучения идет не от близлежащих известных источников. Привязка осей аппаратуры обсерватории была измерена на Земле перед запуском, а также проверена в ходе калибровочных измерений в полете при наблюдении крабовидной туманности. Расхождения с результатами предварительной калибровки оказались меньше 0.3° .

Для проведения полетной юстировки приборов обсерватории наряду с точными наведениями на источник проводился ряд офсетных наблюдений, когда обсерватория наводилась на 0.5 и 1.0 угл. град. в сторону от источника. По данным наземной калибровки были промерены функции отклика коллиматоров для приборов $S(\Delta x, \Delta y)$. В случае наблюдений Δx и Δy складываются из отклонения оси звездного датчика ТТМ от направления на источник $\Delta X, \Delta Y$ и расхождением между осями звездного датчика и прибора $\delta x, \delta y$. В отдельном измерении интенсивность источника таким образом будет $F \cdot S(\Delta X + \delta x, \Delta Y + \delta y)$. Где F - поток, регистрируемый от источника при точном наведении. Значения $\delta x, \delta y$ были получены при минимизации функции:

$$\sum (C_i - F \cdot S(\Delta X_i + \delta x, \Delta Y_i + \delta y))^2 / \sigma^2(C_i)$$

где C_i поток от источника в каждом конкретном измерении.

В данном случае минимизируемая функция является нелинейной относительно параметров минимизации $\delta x, \delta y, F$ и задача требует решения численными методами нелинейного программирования. В нашем случае был использован метод Недлера-Мида (79). Данный метод

успешно применялся и для решения других задач нелинейного программирования встретившихся в этой работе.

По данным наблюдений крабовидной туманности была проведена полетная калибровка приборов обсерватории. На рисунке 1.4. приведен Спектр крабовидной туманности полученный приборами «Гексе» и «Пульсар X-1» 7 октября за 6 сеансов наблюдений. Наблюдения крабовидной туманности проводились с использованием тех же матриц отклика и того же программного обеспечения, что и наблюдения сверхновой. следовательно качество данных полученных при наблюдении крабовидной туманности позволяет судить о качестве спектральных данных по сверхновой 1987а.

Задача спектрального анализа экспериментальных данных является классическим примером некорректной обратной задачи.

$$C_i = \int_0^{\infty} A_{ij}(E) F(E) dE \quad \text{или} \quad C_i = A_{ij} \cdot F(E_j)$$

где C_i - зарегистрированный спектр в отсчетах, $F(E)$ - искомый фотонный спектр источника, $A_{ij}(E)$ или A_{ij} - функция или матрица отклика прибора, E_j - энергетическое разбиение матрицы отклика. Как правило матрица A_{ij} является плохо обусловленной и в следствии статистических ошибок для C_i точное решение F_j теряет смысл. Поскольку спектр в отсчетах не является точным в строго физическом смысле, а представляет из себя некую статистическую реализацию истинного спектра C , то реально нас интересует не столько точное решение, сколько область приближенных решений обратной задачи, статистически совместимых с результатами измерений и содержащая истинный спектр. Плохая же обусловленность матрицы A_{ij} приводит к сильному расширению данной области. Решение данной задачи (получение фотонного спектра источника) может

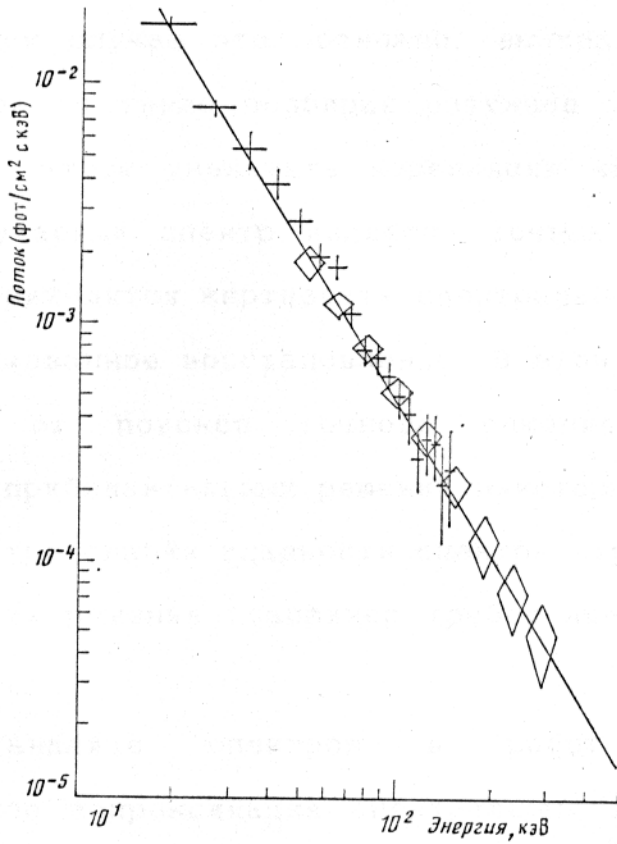


Рис. 1.4 Спектр источника Крабовидная Туманность по данным приборов «Гексе» (кресты) и «Пульсар X-1» (ромбы). Приведен степенной фит по экспериментальным данным (спектральный индекс $\alpha = -2.1$)

проводиться несколькими путями:

1. Аналитическая аппроксимация спектра. В этом случае задаваясь жесткими предположениями о форме спектра (сужая класс допустимых решений до простой аналитической зависимости) можно отказаться от решения обратной задачи как таковой.
2. Решение обратной задачи путем повышения обусловленности матрицы A_{ij} . В данном случае это возможно, выбирая меньшее число каналов на детекторе, а также подбирая разумное энергетическое разбиение A_{ij} с тем, чтобы уменьшить корреляцию между каналами. В данном случае получаемый спектр является точным решением системы, хотя для этого приходится жертвовать спектральным разрешением.
3. Регуляризованное восстановление. В этом случае также приходится отказаться от поисков точного решения, ограничивая область допустимых приближенных решений некоторыми предположениями. Это могут быть требования гладкости спектра, требования статистической достоверности решения (например требование χ^2 на степень свободы < 1) и др.

При анализе спектров в работе использовалось как аналитическое аппроксимация спектральных данных так и поточечное восстановление фотонных спектров. Поскольку в случае со сверхновой 1987а истинная форма спектра источника была неизвестна широкое применение в работе получило поточечное восстановление. При поточечном восстановлении в работе использовалась прямая итерационная процедура получающая гладкое решение (фотонный спектр), удовлетворяющее условию χ^2 на степень свободы < 1 . Реально для такого слабого источника как SN1987а трудно было получить спектр с большим числом энергетических каналов так, что матрица отклика была достаточно хорошо обусловлена и прямое восстановление

тоже давало удовлетворительные результаты.

§1. 6. Наблюдения Сверхновой 1987А обсерваторией «Рентген».

Сверхновая 1987а была одним из наиболее приоритетных источников наблюдения обсерватории «Рентген» в 1987-1989 гг. Наблюдения SN1987а составили более 30% (рис. 1.5) всего наблюдательного времени обсерватории. В таблице 1 приведены данные о наблюдениях SN1987а обсерваторией «Рентген».

Таблица 1.1 Наблюдения SN1987а обсерваторией «Рентген» на модуле «Квант»

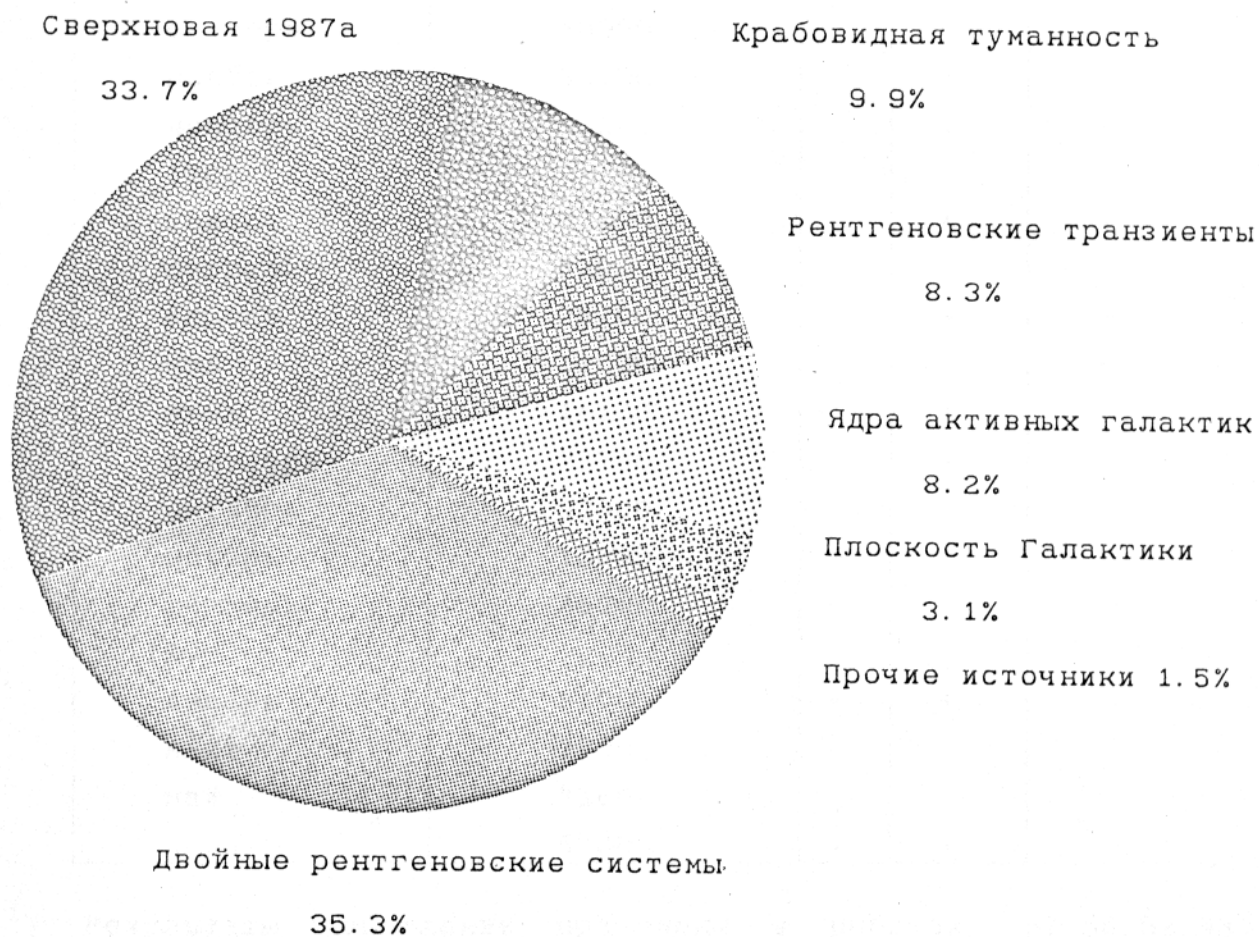


Рис. 1.5. Диаграмма распределения наблюдательного времени обсерватории «Рентген»

Дата	Полное время наблюдений (сек)	ТТМ ¹	Гексе	Пульсар X-1 ²
1987				
16 июля	5500	+	+	+
август	92500	+	+	+
сентябрь	35000		+	+
октябрь	40000		+	+
ноябрь	33000		+	+
декабрь	17300		+	+
1988				
январь	52400		+	+
февраль	8300			
апрель	35700		+	+
май	11500		+	+
июнь	14100		+	
сентябрь	23700		+	
октябрь	32000		+	
ноябрь	13800	+	+	
декабрь	25200	+	+	
1990				
январь	8400	+	+	
март	3500			
май	7100			
июнь	53000	+	+	

¹) Результаты наблюдений приведены в работах (57, 58, 62, 63)

²) При наблюдениях без перенаведения станции не было возможности вычесть фон.

Глава 2. Исследование жесткого рентгеновского излучения сверхновой 1987а обсерваторией «Рентген» на модуле «Квант».

§2.1 Формирование рентгеновского излучения сверхновой как результат комптонизации Гамма-линий при распад ^{56}Co .

Идея радиоактивного распада ^{56}Ni и ^{56}Co в качестве основного источника энергии ответственного за наблюдаемые кривые блеска сверхновых первого типа была выдвинута в Т. Панки в неопубликованном приложении к докторской работе (5) а также независимо Колгейтом и МакКи (37) В дальнейшем по результатам наблюдений блеска для некоторых сверхновых второго типа был сделан вывод, что синтез радиоактивного ^{56}Ni является общим для сверхновых обоих типов (12).

В случае SN1987а синтез ^{56}Ni был подтвержден в первую очередь поведением болометрической светимости источника, а также регистрацией линий прямого вылета 1238 и 847 кэВ от дочернего нуклида ^{56}Co (46, 48, 35, 54, 53, 8) и результатами наблюдений в рентгеновском континууме (57-63, 28, 69, 80). Если до вспышки сверхновой в Большом Магеллановом облаке в ряде работ предсказывалась возможность наблюдения рентгеновского излучения остатка сверхновой в γ -линиях (32, 33, 14), то возможность регистрации рентгеновского континуума от сверхновых была независимо предсказана двумя группами (16, 42) уже после вспышки SN1987а.

Образующийся в процессе взрывного нуклеосинтеза радиоактивный изотоп ^{56}Ni со временем жизни 8.8 дней распадается в дочерний нуклид ^{56}Co , который в дальнейшем и определяет энерговыделение в оболочке сверхновой. ^{56}Co распадается в ^{56}Fe с характерным временем 111.3 дней, при распаде в среднем 3.59 МэВ высвобождается

в виде γ -квантов с энергиями 847 кэВ (100%), 1238 кэВ (68%), 2.6 МэВ (18%), 1.77 МэВ (16%), 1.04 МэВ (14%), 3.26 МэВ (12%), 2.02 МэВ (11%), 1.36 МэВ (4%), в ~19% всех распадов при β^+ -распаде происходит рождение позитронов что приводит к появлению аннигиляционной линии 511 кэВ (66). Эти линии и являются источником, формирующим рентгеновский континуум, зарегистрированный от SN1987a. Следует отметить, что при аннигиляции с образованием позитрония при трехфотонной аннигиляции будет формироваться жесткий континуум, также участвующий в формировании рентгеновского континуума, выходящего из оболочки сверхновой.

Основным процессом, формирующим рентгеновское излучения в оболочке сверхновой, является комптоновское рассеяние. Оболочка SN1987a после взрыва непрозрачна по комптоновскому рассеянию для жестких γ -квантов, образующихся при распаде ^{56}Co . При рассеянии жестких γ -квантов на электронах оболочки, вследствие эффекта отдачи, энергия первых уменьшается в среднем на $-E^2/m_e c^2$ в рамках нерелятивистского приближения, которое хорошо применимо в данном случае, поскольку фотон с энергией, характерной для γ -линий ^{56}Co , теряет основную энергию при первых рассеяниях, а основная масса рассеяний в оболочке происходит при энергиях $E < m_e c^2$. Фотоны выходят из оболочки сверхновой испытывая разное количество рассеяний, в результате чего формируется непрерывный рентгеновский континуум. При энергиях ниже 30 кэВ в оболочке начинает сказываться влияние фотопоглощения на тяжелых элементах. В следствии этого формирующийся рентгеновский континуум имеет экспоненциальный обрыв на энергиях порядка 10 - 20 кэВ.

Практически форма рентгеновского континуума однозначно

определяется распределением выходящих из оболочки фотонов по числу комптоновских рассеяний, ими испытанных. В ходе расширения оболочки сверхновой, при изменении прозрачности оболочки, данное распределение существенно меняется, что в свою очередь приводит к изменениям интенсивности и формы рентгеновского континуума, формируемого в оболочке.

§2.2 Регистрация рентгеновского потока от сверхновой 1987a

10 Августа 1987 года рентгеновский телескоп ГЕКСЕ обсерватории Рентген на модуле Квант зафиксировал поток жесткого рентгеновского излучения в диапазоне 20-100 кэВ на уровне 10 стандартных отклонений из района Сверхновой 1987a в Большом Магеллановом облаке. С этого момента SN1987a стала основным объектом наблюдений обсерватории. В течение августа 1987 года другой прибор обсерватории - Пульсар X-1 зафиксировал рентгеновское излучение от SN1987a в диапазоне 50-300 кэВ рис. 2. 1.

Регистрируемый обсерваторией спектр оказался аномально жестким. Кроме того, верхие пределы на поток от сверхновой в мягком рентгеновском диапазоне, полученные прибором ТМ в августе 1987a, одновременно с положительным детектированием SN1987a прибором «Гексе» в диапазоне $E > 20$ кэВ, явились указанием на завал в спектре на энергиях ниже 20 кэВ. Подобная форма спектра достаточно хорошо согласуется с предположением о формировании рентгеновского континуума от сверхновой в результате комптонизации γ -квантов в оболочке сверхновой. По мере накопления наблюдательных данных вывод о форме регистрируемого спектра был подтвержден. На рис. 2. 2 приведен усредненный спектр в отчетах, зарегистрированный прибором «Гексе» от SN1987a за время наблюдений с августа 1987 по январь 1988. Как видно и рисунка 2.2a жесткая часть спектра

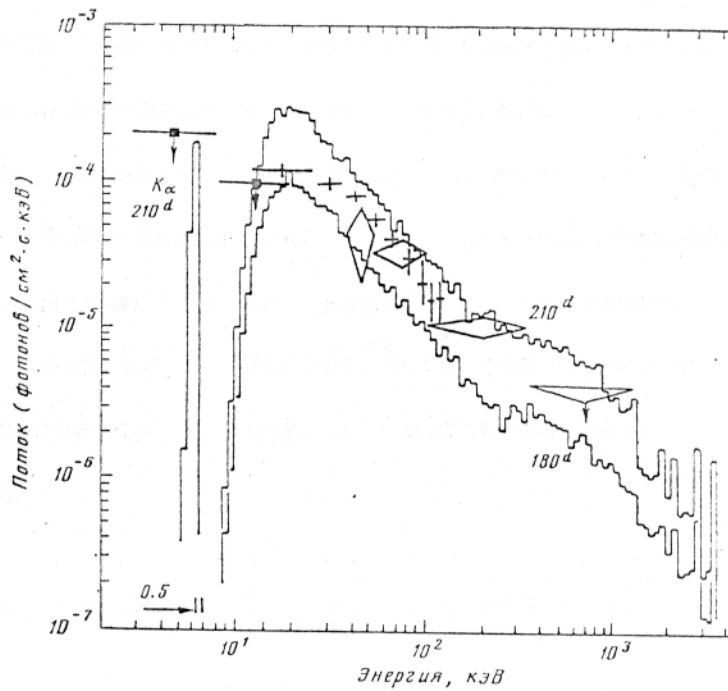


Рис. 21. Спектр жесткого рентгеновского источника согласно данным приборов обсерватории РЕНТГЕН на модуле «Квант»: квадраты — верхние пределы ТТМ (уровень достоверности 3σ); крестики — данные ГЕКСЕ (приведенные ошибки соответствуют 1σ); ромбы — данные и верхние пределы на уровне 3σ , полученные прибором Пульсар X-1. Гистограммы дают результаты расчетов Гребенева и Сюняева (1987) методом Монте-Карло для модели оболочки с параметрами: масса оболочки $16 M_{\odot}$, обилие тяжелых элементов — $1/3$ солнечного, средняя скорость расширения 4150 км/с , начальная масса радиоактивного кобальта $0.1 M_{\odot}$. Разрешение гистограммы в области флуоресцентной линии железа равно 0.5 кэВ

достаточно хорошо описывается степенным законом, причем показатель степени для фотонного спектра $\alpha \sim -1$, т.е. энергетический спектр источника на энергиях больше 40 кэВ плоский. Подобная форма спектра предсказывалась как аналитическими решениями задачи комптонизации жестких гамма-квантов в оболочке, так и расчетами Монте-Карло (16, 17). В мягкой области спектра четко виден завал, связанный с фотопоглощением. На энергиях ~ 20 кэВ сечение фотопоглощения на тяжелых элементах зависит от энергии как E^{-3} кроме того, как было показано (16) фотопоглощение в оболочке приводит к уменьшению числа квантов, дошедших в результате комптонизации до энергии E . Вероятность фотопоглощения для кванта с $x = E/m_e c^2$ определяется толщиной по фотопоглощению вдоль средней траектории фотона

$$\tau_{pa} = \int_0^t \sigma_{pa} N_e c dt' = \int_x^{x_0} \sigma_{pa}(x') / (\sigma_T \alpha(x')) dx'$$

где

$$\alpha(x) = - \frac{1}{\sigma_T N_e c} \frac{dx}{dt} = 1/\sigma_T \int (x' - x) d\sigma_c(x \rightarrow x) \approx x^2 / (1 + 4.6x + 1.1x^2)$$

для малых x (36)

$d\sigma_c(x \rightarrow x')$ - дифференциальное сечение комптоновского рассеяния

x', x - энергии фотона до и после рассеяния

считая приближенно $\alpha(x) \sim x^2$ $\sigma_{pa}(x) \sim x^{-3}$ получим:

$$\tau_{pa} \sim \int_x^{x_0} x'^{-5} dx' \sim x^{-4}$$

На рис. 2. 2. б видно что регистрируемый от СН1987а жесткий континуум идеально описывается спектром вида:

$$F(E) = \exp(-c E^{-4}) E^{-\alpha} \quad \alpha \sim 1$$

Характерная форма рентгеновского континуума явилась первым

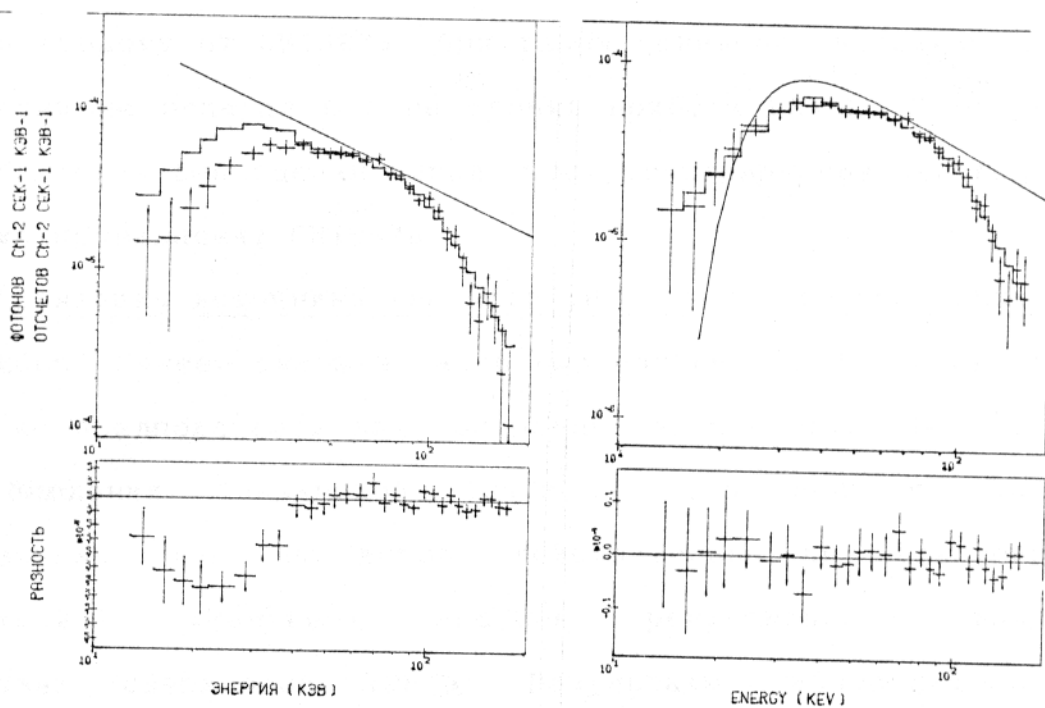


Рис. 2.2 Спектр сверхновой 1987а полученный по данным наблюдений прибором «Гексе» в августе, 1987-январе, 1988.

а) аналитическая аппроксимация спектра степенной зависимостью $F(E) = \text{const } E^{-\alpha}$ $\alpha = 1. \pm .1$ для энергий $E > 40$ кэВ

б) аналитическая аппроксимация спектра степенным спектром с поглощением: $F(E) = \exp(-\tau_{10\text{keV}} (E/10\text{keV})^{-4}) E^{\alpha}$ $\alpha = 1. \pm .1$

$$\tau_{10\text{keV}} = 39 \pm 8$$

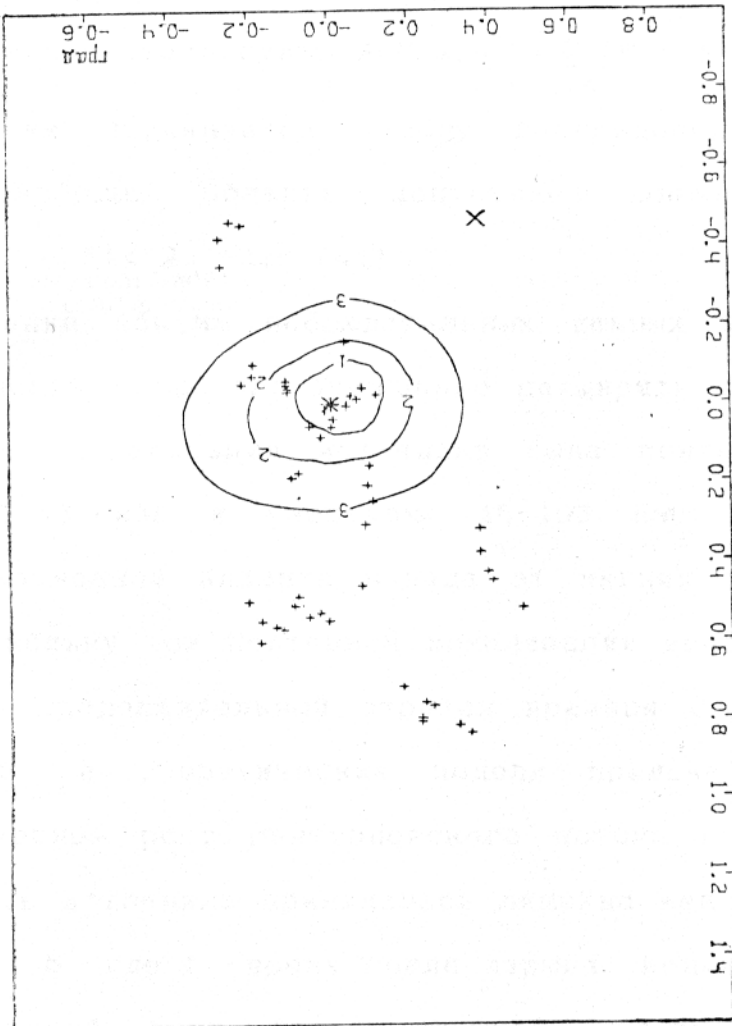
аргументом в пользу того, что регистрируемое обсерваторие «Рентген» жесткое рентгеновское излучение принадлежит SN1987a. Во время наблюдений SN1987a в поле зрения приборов попадал другой известный рентгеновский источник LMC X-1. С целью исключить возможное влияние этого источника, в августе был проведен ряд офсетных сеансов, когда приборы обсерватории наводились на 1 градус в сторону от SN1987a. При таком наведении источник LMC X-1 практически не попадал в поле зрения прибора ГЕКСЕ. В результате этих наблюдений был сделан вывод, что регистрируемое рентгеновское излучение принадлежит SN1987a.

§2.3 Локализация источника жесткого рентгеновского излучения.

Прибор «Гексе» снабжен пассивным коллиматором с полем зрения $\pm 1.6^\circ$ и не предполагался для построения изображений. Тем не менее при наблюдении Сверхновой 1987a с его помощью был дан окончательный ответ на вопрос действительно ли регистрируемое обсерваторией «Рентген» жесткое рентгеновское излучение принадлежит сверхновой 1987a. Результаты наблюдений SN1987a прибором ГЕКСЕ в августе 1987 позволили провести локализацию положения источника рентгеновского излучения. Полученное положение источника совпало с положением SN1987a в пределах одного стандартного отклонения с точностью порядка 6 угловых минут. Другие известные источники в БМО не попали в область 3 стандартных отклонений от локализованного источника рис. 2.3.

Практически локализация источника была выполнена следующим образом. Средняя точность наведения обсерватории «Рентген» составляла в процессе наблюдений SN1987a $\sim 0.3^\circ$. Кроме того примерно в 10% всех наблюдений точность наведения была хуже 0.5° . Часть этих наведений была специально запланирована, чтобы

Рис. 2.3 Локализация положения источника жесткого излучения по результатам анализа 54 сеансов наблюдений прибора ДИКСЕ с наведениями в различные точки (изображены крестиками). Показаны контуры, содержащие источник с вероятностями 68% (1), 99,9% (2), 99,99% (3). Указаны положения СН 1987А (*), ЛМС X-1 (X) и 50-миллисекундного нульсара (+)



исключить влияние LMC X-1. В предположении, что все регистрируемое излучение приходит к нам от одного источника, поток в отдельно взятом сеансе должен быть равен $C_i = F \cdot S(\alpha, \delta)$ где: C_i - регистрируемая скорость счета от источника, F - поток от источника в заданном диапазоне, $S(\alpha, \delta)$ - эффективная площадь, задаваемая откликом коллиматора прибора и зависящая от координат источника α, δ на небе.

Таким образом задача определения положения источника сводится к минимизации суммы $A(F, \alpha, \delta) = \sum_{i=1, n} (C_i - F \cdot S(\alpha, \delta))^2 / \delta^2 C_i$ Данная функция подчиняется закону распределения χ^2 для $n-3$ степеней свободы. Область допустимых значений определяется условием $A(F, \alpha, \delta) < A_{\min} + 3.5$ (41).

Увеличение объема наблюдательных данных в течении первого года наблюдений позволило несколько расширить постановку задачи. Прежде всего локализация источника была повторена отдельно в «мягком» 16-45 кэВ и «жестком» 45-105 кэВ диапазонах, чтобы исключить возможное влияние вклада от мягких источников в поле зрения. Поскольку при повторной локализации использовались данные за довольно продолжительный отрезок времени с августа 1987 по январь 1988, а теоретические модели предсказывали для этого периода заметный рост рентгеновского потока от SN1987a (16,17) интенсивность источника принималась линейно меняющейся по времени $F(t) = a \cdot t + b$, где t - время после взрыва. Конечно зависимость от времени реально была более сложной, однако как оказалось амплитуда изменений была не слишком высокой (с августа 1987 по январь 1988 ~ 30%), и в качестве первого приближения для задачи локализации подобное описание поведения источника во времени было

оправдано. Кроме того, в процессе локализации была сделана попытка учесть излучение двух наиболее ярких источников в поле зрения обсерватории LMC X-1 и PSP 0540-693. Для этого функция A задавалась в виде:

$$A(F, \alpha, \delta, F_{1mc}, F_{psr}) = \sum_{i, n} (C_i - F(t_i) \cdot S(\alpha, \delta) - F_{1mc} \cdot S_{1mc} - F_{psr} \cdot S_{psr})^2 / \delta^2 C_i$$

Результаты локализации представлены на рис. 2.4. Светимости других источников по результатам локализации оказались статистически незначимы, а 3σ верхние пределы на светимость данных источников оказались меньше 20% потока от SN1987a регистрировавшегося в августе 1987 - январе 1988.

§2.4 Оценки светимости других источников в поле зрения обсерватории «Рентген».

Совокупность наблюдений четырьмя детекторами ГЕКСЕ в августе 1987 - январе 1988 г. подтверждает отождествление с SN1987A жесткого рентгеновского источника с необычным спектром в Большом Магеллановом Облаке (см. рис. 2.4). Полученные в процессе локализации верхние пределы (на уровне 3σ) на поток от LMC X-1 и 50-миллисекундного пульсара PSR 0540-693 приведены в таблице 2.1

В мае-июне 1989 года «Квант» не зафиксировал статистически достоверного сигнала из области SN1987A, несмотря на то, что в поле зрения прибора ГЕКСЕ были и другие источники: LMC X-1 и PSR 0540-693. С учетом разницы в направлениях оси телескопа и направлениях на рентгеновские источники эффективность регистрации потока от них была разной. Верхние пределы на поток от SN1987A и других источников приведены на рис. 2.5, а также в таблице 2.2

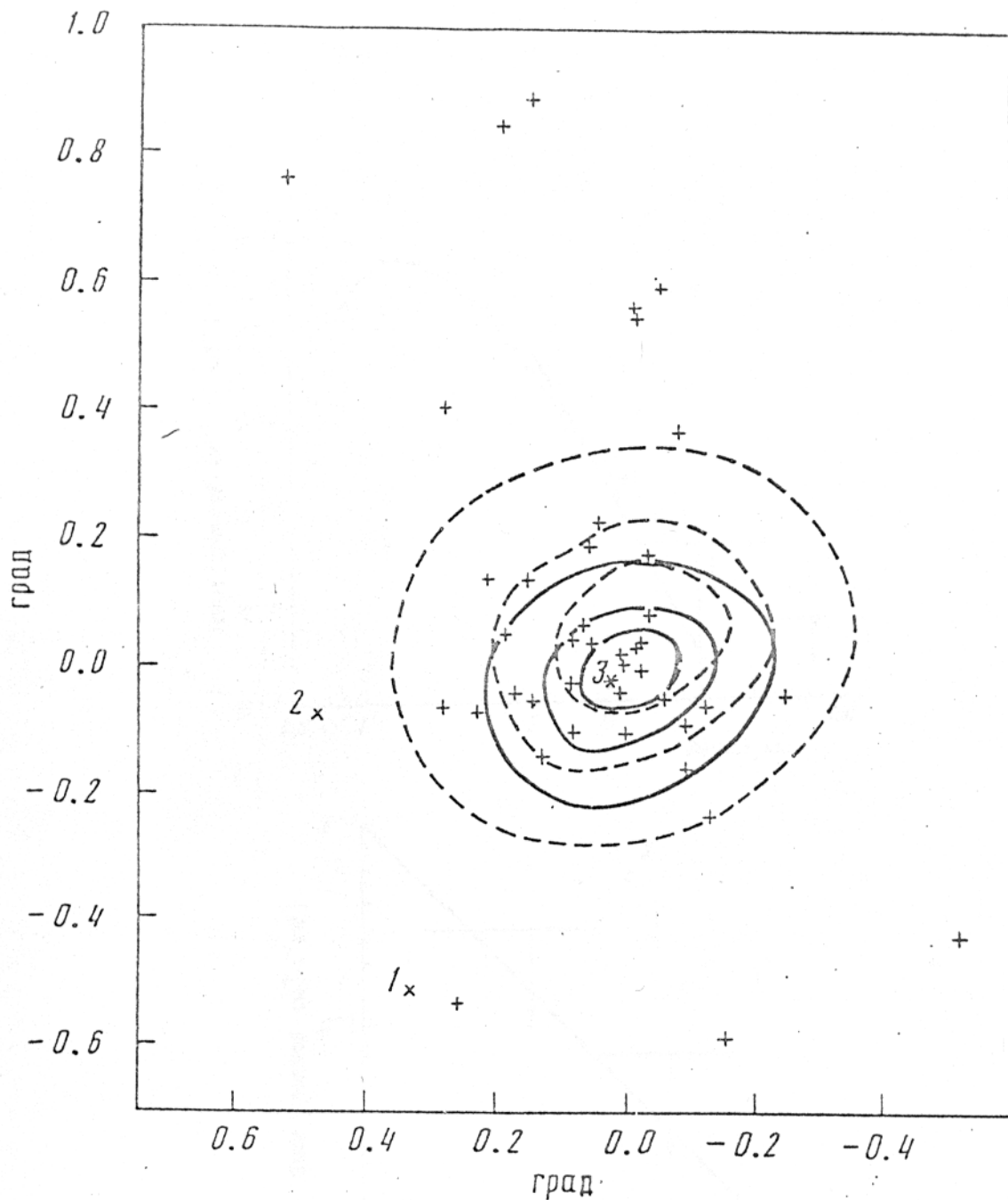


Рис. 2.4. Локализация жесткого рентгеновского источника в Большом Магеллановом Облаке (LMC) по данным прибора ГЕКСЕ с августа 1987 по январь 1988 года. Приводятся контуры ошибок 67%, 99%, 99.9% для диапазонов энергий 15-45 кэВ (пунктир) и 45-105 кэВ (сплошные линии). Отмечены положения источников LMC X-1 (1), PSR0540-693 (2), SN1987A (3) и направления наведения телескопа ГЕКСЕ по группам сеансов (малые кресты).

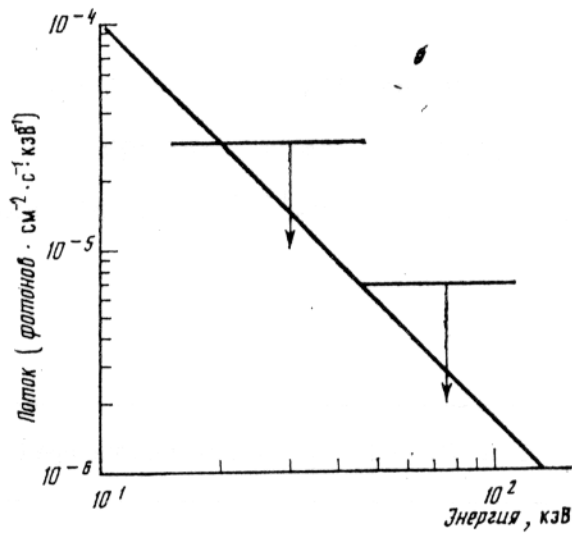
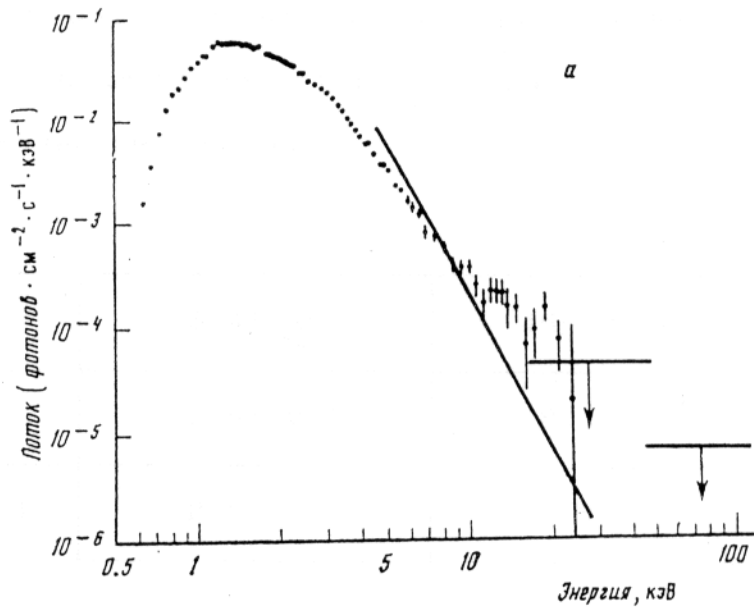


Рис. 6. Спектр LMC X-1 по данным эксперимента HEAO-A2 (точки) (Вайт и Маршалл, 1984). Верхние пределы на поток в жесткой части спектра для этого источника по данным прибора «Гексе», а также аналитическая аппроксимация данных прибора ТТМ обсерватории «Рентген» (сплошная линия) (Сюняев и др., 1990) (а). Спектр PSR 0540-693 (степенная аппроксимация) по данным обсерватории «Эйнштейн» (Севард и др., 1984, Кларк и др., 1982) и верхние пределы на жесткий рентгеновский поток по данным «Гексе». Спектр, полученный прибором ТТМ (Сюняев и др., 1990), согласуется с приведенной степенной аппроксимацией в пределах погрешностей экспериментальных данных (б).

Таблица 2.1

Верхние пределы на потоки [$\text{фот} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{кэВ}^{-1}$] от источников LMC X-1 и PSR 0540-693 на уровне трех стандартных отклонений порезультатам локализации, использующей данные, полученные в августе 1987 - январе 1988 гг.

Источник	15-45 кэВ	45-105 кэВ
LMC X-1	$5.5 \cdot 10^{-5}$	$8.0 \cdot 10^{-6}$
PSR 0540-693	$2.9 \cdot 10^{-5}$	$6.8 \cdot 10^{-6}$

Таблица 2.2

Средние геометрические эффективности и соответствующие верхние пределы (на уровне трех стандартных отклонений) на рентгеновские потоки [$\text{фот} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{кэВ}^{-1}$] для периода наблюдений в мае-июне 1989г.

Источник	Эффективность	15-45 кэВ	45-105 кэВ
SN1987a	52 %	$2.1 \cdot 10^{-5}$	$8.6 \cdot 10^{-6}$
LMC X-1	32 %	$8.5 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$
PSR 0540-693	45 %	$3.4 \cdot 10^{-5}$	$9.5 \cdot 10^{-6}$

Слабость потока от LMC X-1 в мае-июне 1989 г. (63) и близость полученных нами пределов на жесткое излучение LMC X-1 к пределам, полученных в эксперименте HEAO A2 (11) и HEAO A4 (47), свидетельствуют о малом вкладе LMC X-1 в поток, регистрировавшийся модулем «Квант» в августе 1987 - апреле 1988 г., который в январе 1988 г. почти на порядок превышал приведенные выше пределы. Следует также отметить, что в последнем сете наблюдений все же было зарегистрировано слабое $< 3\sigma$ излучение из области включающей в себя все три источника см. рис. 3.7. Как видно из рисунка данный поток сопоставим с ожидаемым потоком от пульсара PSR 0540-693. На финальном этапе обработки вклад PSR 0540-693 учтен при восстановлении спектров и кривых блеска SN1987a.

§2.5 Эволюция рентгеновского излучения сверхновой 1987a.

§2.5.1. Кривые блеска сверхновой 1987a.

Полный объем данных, полученных с прибора Гексе в составе обсерватории Рентген, позволяет проследить временную зависимость потока рентгеновского излучения от сверхновой 1987a. На рис. 2.6 представлена временная эволюция потока рентгеновского излучения от SN1987a в диапазоне 15-105 кэВ. Каждая точка этих рисунков представляет результаты обработки данных, за один день наблюдений.

За период с августа 1987 года по февраль 1988 года обсерватория Рентген зафиксировала постепенный рост рентгеновского потока от SN1987a на величину порядка 30% в диапазоне 45-105 кэВ. Увеличение рентгеновского потока от сверхновой на этом этапе происходит за счет просветления оболочки сверхновой в ходе расширения. Данный процесс на ранних этапах эволюции доминирует над уменьшением интенсивности источника гамма-квантов вследствие распада кобальта.

В мягком диапазоне ситуация менее очевидна. Здесь возможно

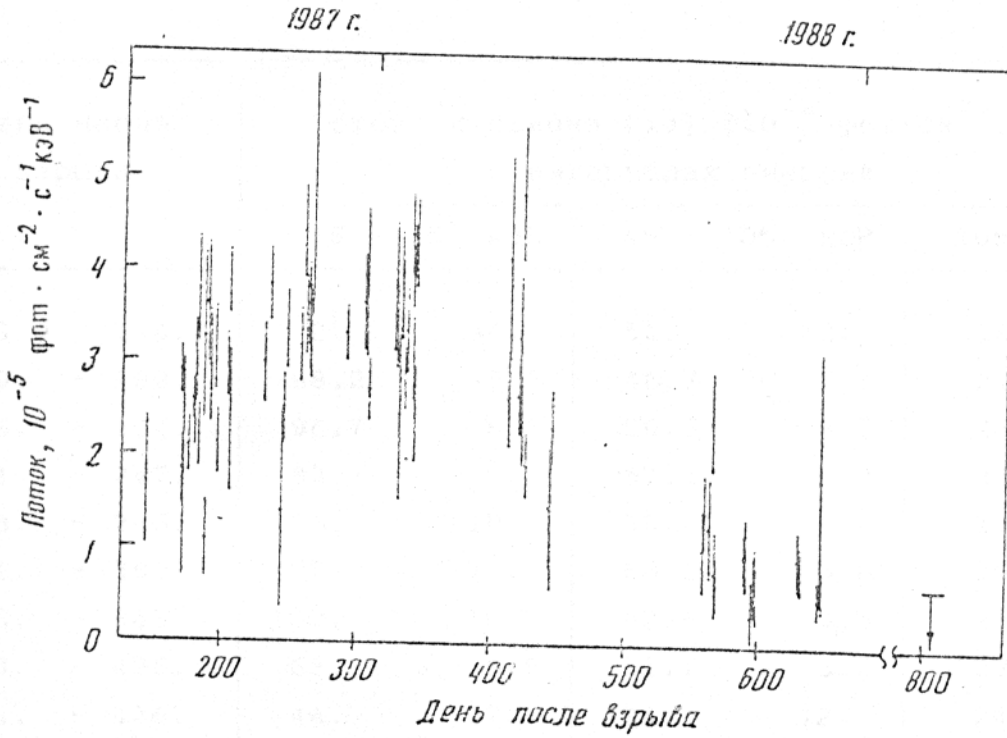


Рис. 2.6. Эволюция рентгеновской светимости SN1987A по данным прибора ГЕКСЕ в диапазоне 15-105 кэВ. Каждая точка соответствует одному дню наблюдений, ошибки соответствуют одному стандартному отклонению. приведен 3σ верхний предел на светимость за период наблюдений в мае-июне 1989.

Таблица 2.3

Эволюция рентгеновской светимости SN1987A по данным наблюдений прибором ГЕКСЕ в 1987-1989 гг.

День после взрыва	Потоки и ошибки (1σ) [10^{-6} фот·см $^{-2}$ с $^{-1}$ кэВ $^{-1}$] в интервалах энергий					
	15 - 45 кэВ		45 - 105 кэВ		105 - 200 кэВ	
143.9 - 144.1	2.	34.	51.	12.	18.	17.
169. - 182.	68.2	5.7	46.7	2.1	21.3	3.3
186. - 204.	96.7	8.5	50.9	3.5	26.0	5.2
231. - 247.	83.1	8.3	57.4	3.3	24.3	7.2
258. - 266.	85.	10.	55.2	4.4	12.8	9.7
291. - 309.	97.	11.	66.1	5.6	30.4	8.9
328. - 343.	100.	10.	62.6	3.5	25.1	4.8
413. - 426.	63.	9.5	51.1	3.8	27.9	6.1
444. - 446.	46.	27.	24.	12.	24.0	16.
559. - 569.	17.2	9.6	20.5	4.1	7.2	6.5
590. - 599.	21.4	6.1	14.5	3.0	8.2	4.7
630. - 648.	12.2	4.1	10.6	2.6	14.5	7.0
820. - 840.	8.2	7.0	3.8	2.9	-2.8	4.2

присутствует быстропеременное рентгеновское излучение мягкого рентгеновского источника, открытого японским спутником ГИНГА (20, 24). Этот источник очевидно имеет природу отличную от природы жесткого рентгеновского излучения, регистрируемого обсерваторией Рентген, и безусловно связанной с распадом ^{56}Co . Подобное мягкое рентгеновское излучение, наиболее вероятно, формируется в верхних слоях оболочки Сверхновой. В данном диапазоне не исключено также влияние от переменного жесткого хвоста источника LMC X-1.

К сожалению, в течении периода наблюдений с июня по октябрь 1988 года мы не располагаем точными данными о наведении обсерватории и результаты этого периода могут быть занижены на 10-30%. Тем не менее достаточно очевидно что с мая в период начиная с мая 1988 года рентгеновская светимость SN1987a уменьшилась в 3 раза. Это подтверждается последними измерениями в ноябре 1988 года, когда нам было известно точное положение станции. Подобное постепенное затухание потока согласуется с теоретическими моделями, где источником энергии в оболочке сверхновой является радиоактивный распад ^{56}Co (42, 16, 14, 15, 78, 49). Подобные модели также подтверждаются экспоненциальным уменьшением болометрической и инфрокрасной светимостей SN1987a с характерным временем 114 дней, совпадающим с периодом распада ^{56}Co .

Однако в этот период кроме энерговыделения ^{56}Co существенным становится влияние изотопа ^{57}Co с периодом распада 391 день.

В заключение следует отметить, что кривая блеска сверхновой в диапазоне 15-105 кэВ не показывает ни одного статистически достоверного резкого выброса типа вспышки, наблюдавшейся спутником «Гинга» в январе 1988 года в более мягком диапазоне. В жестких рентгеновских лучах кривая блеска была плавной, как и подобает

кривой блеска источника, связанного с радиоактивным распадом.

§2.5.2. Рентгеновские спектры сверхновой 1987а.

На рисунке 2.7 представлены результаты восстановления спектров жесткого рентгеновского излучения SN1987а полученных приборами «Гексе» и «Пульсар X-1» обсерватории «Рентген» на протяжении двухлетних наблюдений этого источника. Приводимые спектры демонстрируют не только сильное изменение светимости источника за время наблюдений, но также и переменность формы спектра источника.

На рисунке 2.8 представлены спектры SN1987а, полученные прибором ГЕКСЕ в течение января и сентября-октября 1988 года. Приведены спектры, рассчитанные в модели с распределением ^{56}Co в оболочке сверхновой, полученным на основании данных о временной эволюции рентгеновской светимости объекта (см гл.3), предполагаемое относительное обилие $^{57}\text{Co}/^{56}\text{Co}$ равно солнечному относительному обилию $^{57}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ - продуктов распада ^{57}Co и ^{56}Co . Кроме общего уменьшения потока от SN1987а заметно значительное изменение формы спектра. Из рисунка видно, что модельный спектр для сентября-октября имеет завал в области мягких энергий (< 50 кэВ). Указания на такой завал мы наблюдаем и в реально зарегистрированном спектре. Этот завал уже не связан более с фотопоглощением. Комptonовское диффузия фотонов вниз по оси энергий вследствие эффекта отдачи уже не успевает обеспечить заметный поток в области 20-50 кэВ. Фотоны выходят из источника за время меньшее, чем нужно для уменьшения энергии фотонов до 30-40 кэВ. Наблюдаемый спектр свидетельствует об оптической толще оболочки по томсоновскому рассеянию порядка $\tau_T \sim 3-5$ в модели с

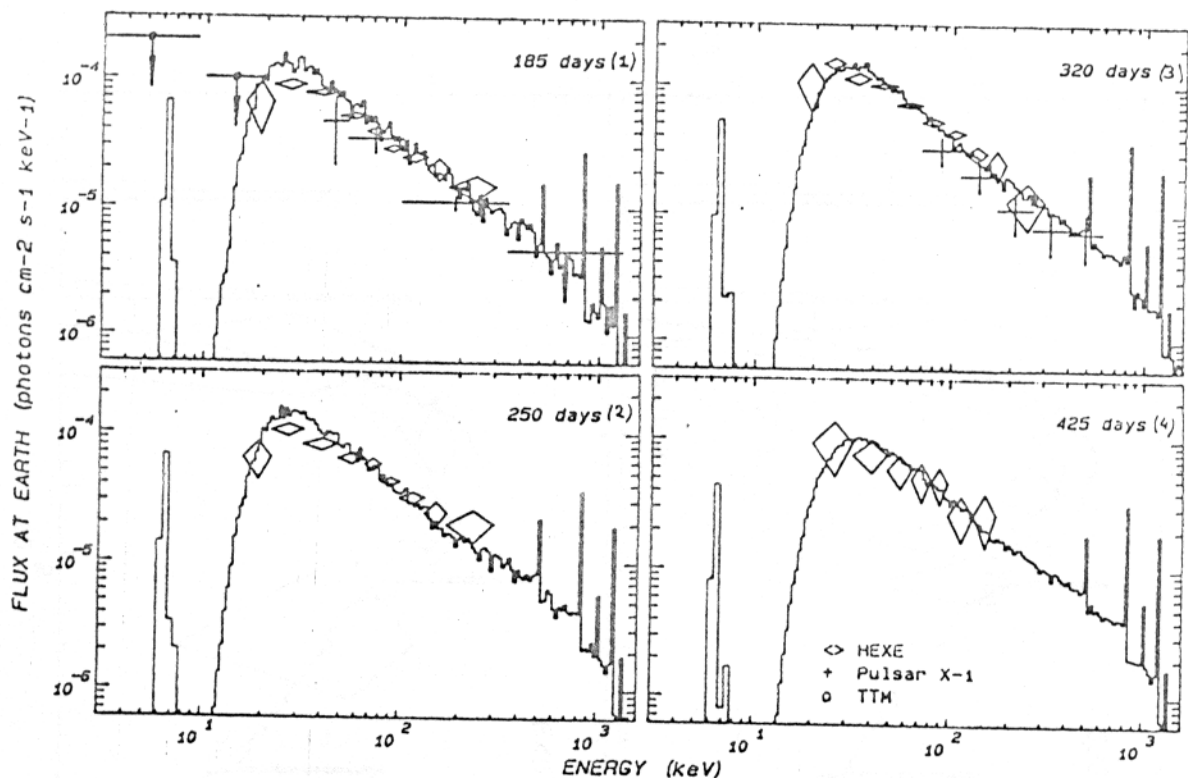
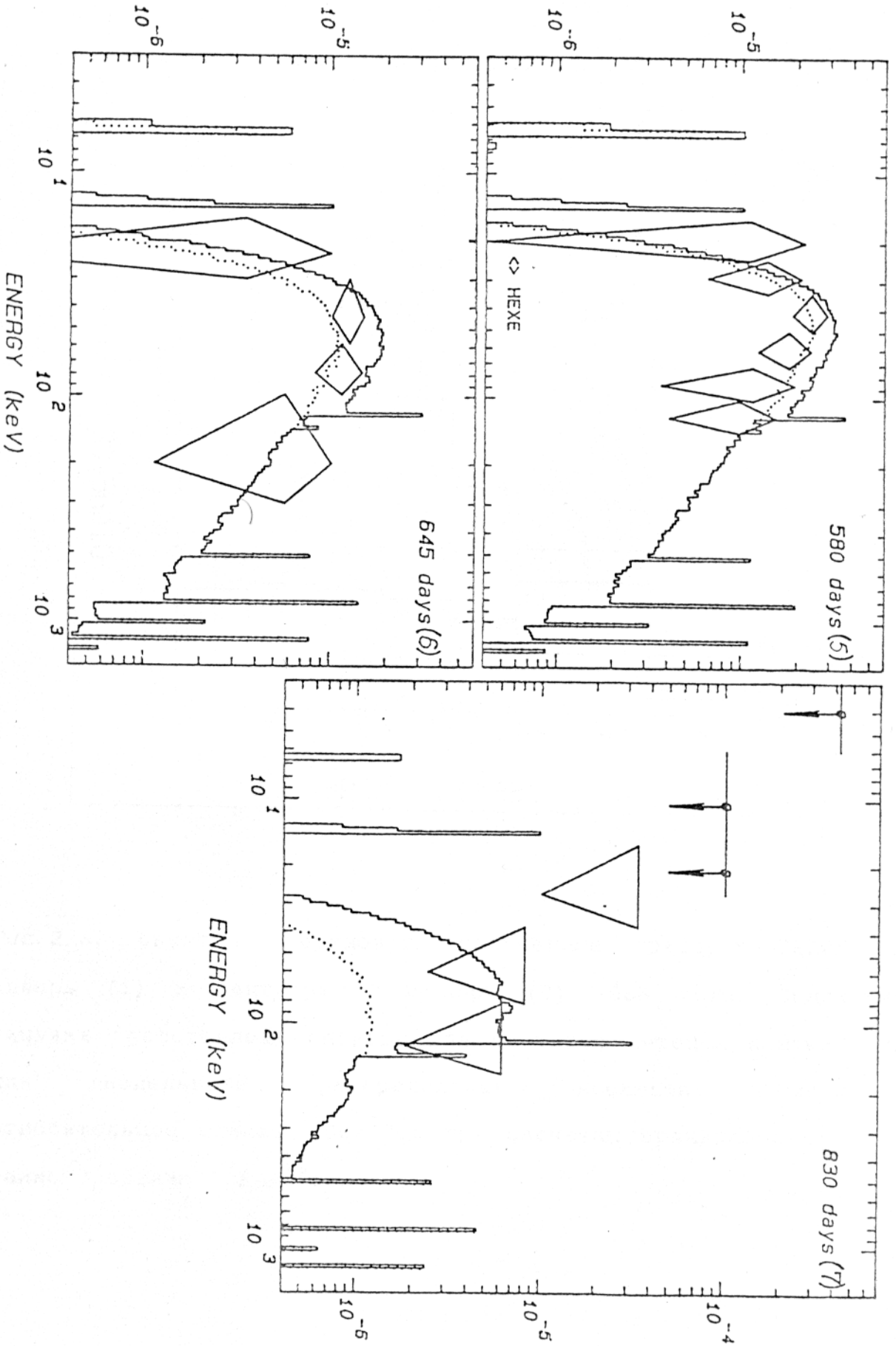


Рис. 2.7. Спектры SN1987A по данным наблюдений обсерватории «Рентген» в августе 1987 (1), октябре-ноябре 1987 (2), декабре 1987 - январе 1988 (3), апреле 1988 (4), сентябре-октябре 1988 (5), ноябре 1988 (6), мае-июне 1989 (7) (кресты с кружками - прибор TTM, ромбы - ГЕКСЕ, кресты - Пульсар X-1). Ошибки экспериментальных данных соответствуют одному стандартному отклонению, а верхние пределы - трем стандартным отклонениям (на последнем графике верхние пределы прибора ГЕКСЕ изображены треугольниками). Сплошными кривыми приведены результаты численного моделирования в соответствии с принятой в данной работе моделью оболочки SN1987A (время, прошедшее с момента взрыва, указано на графиках). На графиках 5, 6, 7 пунктиром показан вклад ^{56}Co в суммарное излучение ^{56}Co и ^{57}Co . Отношение обилий $^{56}\text{Co}/^{57}\text{Co}$ принято равным двухкратному земному $^{56}\text{Fe}/^{57}\text{Fe}$.

FLUX AT EARTH (photons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{keV}^{-1}$)



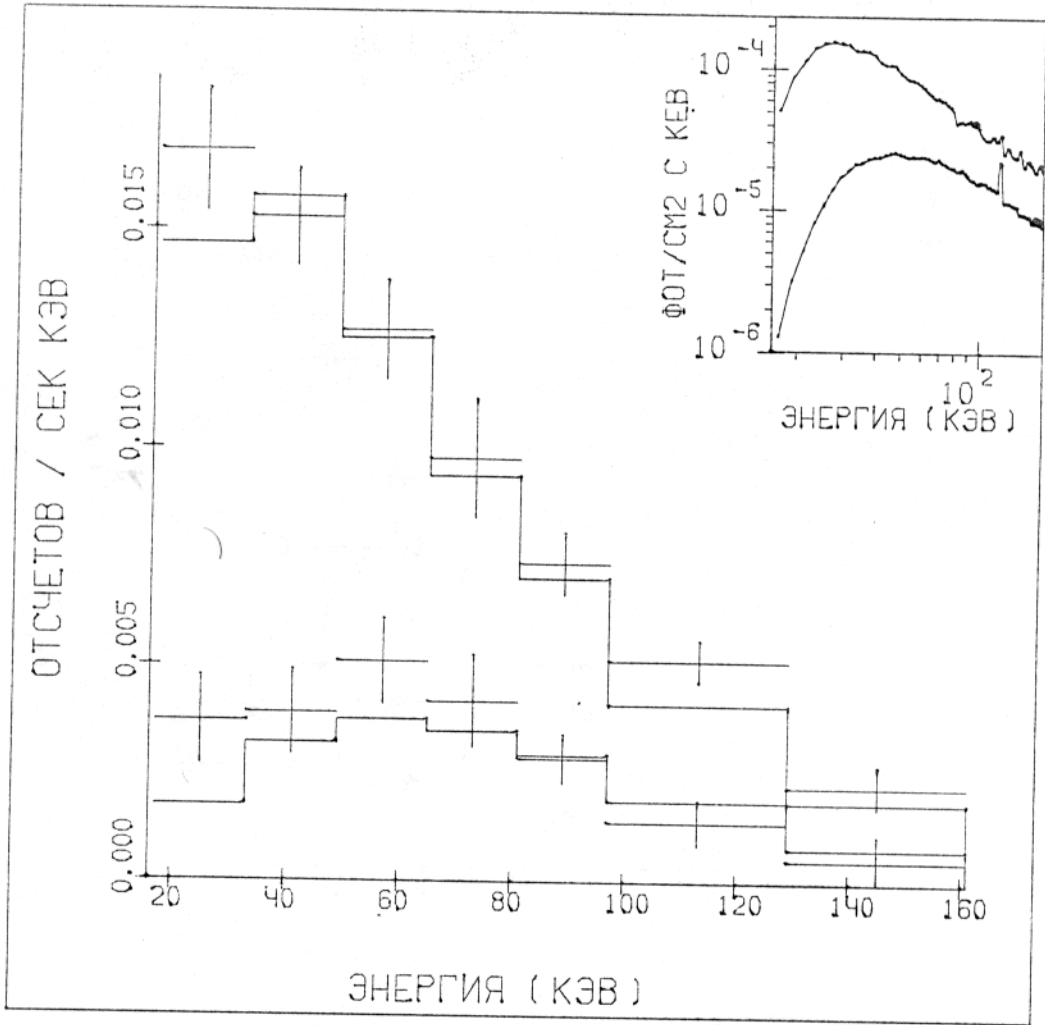


Рис. 2.8. Спектры сверхновой, полученные прибором ГЕКСЕ за январь (1) и сентябрь - октябрь (2) 1988 года. Сплошными линиями представлены спектры для расчетов методом Монте-Карло для модельного распределения кобальта (Рис. 3. _). Относительное обилие $^{57}\text{Co}/^{56}\text{Co}$ при расчетах принималось равным земному обилию $^{57}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$.

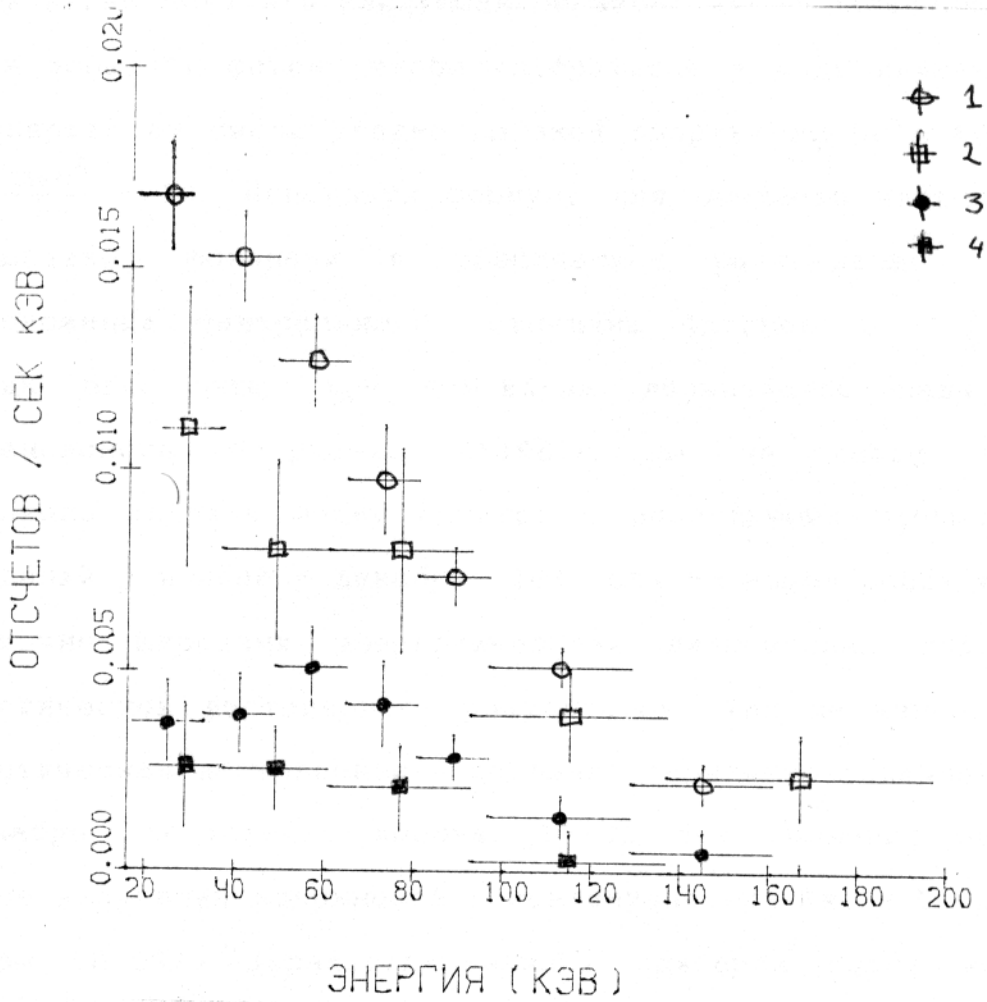


Рис. 2. 9. Результаты наблюдений SN1987A (спектры отсчетов) в январе (1), апреле (2), сентябре-октябре (3), декабре (4) 1988 года. Видно постепенное уменьшение потока рентгеновского излучения от сверхновой.

кобальтом, распределенным по $8 M_{\odot}$, внутренней части оболочки. Эту оценку легко получить следующим образом: число рассеяний, которое должен испытать фотон, чтобы «добраться» в ходе движения вниз по оси энергий от сколь угодно высокой энергии до $h\nu \sim 50$ кэВ равно $\mu \sim \frac{m_e c^2}{h\nu} \sim 10$. Используя формулу для среднего числа рассеяний, испытываемых фотонами в сферическом рассеивающем облаке, в предположении центрального источника фотонов $\mu \sim \frac{1}{2} \tau_T^2$ (64), находим его толщину $\tau_T \sim 4-5$. Из-за дальнейшего падения потока рентгеновского излучения SN1987a мы не имеем возможности детального анализа формы спектра в последующих наблюдениях. Для наблюдений в ноябре - декабре 1988 года мы можем работать только с достаточно широкими энергетическими диапазонами для повышения статистической достоверности результатов. Тем не менее, суммарная статистическая достоверность сигнала, зарегистрированного в ноябре - декабре, достаточно высока. ГЕКСЕ без сомнения регистрирует жесткое излучение сверхновой в континууме. На Рис. 2.9 представлены спектры SN1987a зарегистрированные прибором Гексе в период с января по декабрь 1988 года. Результаты наблюдений рентгеновского излучения SN1987a демонстрируют непрерывное уменьшение потока рентгеновского излучения SN1987a за этот период во всем диапазоне.

§2.6 Рентгеновские наблюдения SN1987a другими группами.

После регистрации рентгеновского излучения от SN1987a японским спутником «Гинга» (20, 24) и орбитальной обсерваторией «Рентген» на модуле «Квант» (57, 58) рентгеновский континуум от источника регистрировался рядом других групп на протяжении полутора лет после взрыва. на рисунке 2.10, взятом из обзора (5), приведены данные наблюдений SN1987a в ходе ракетных и баллонных

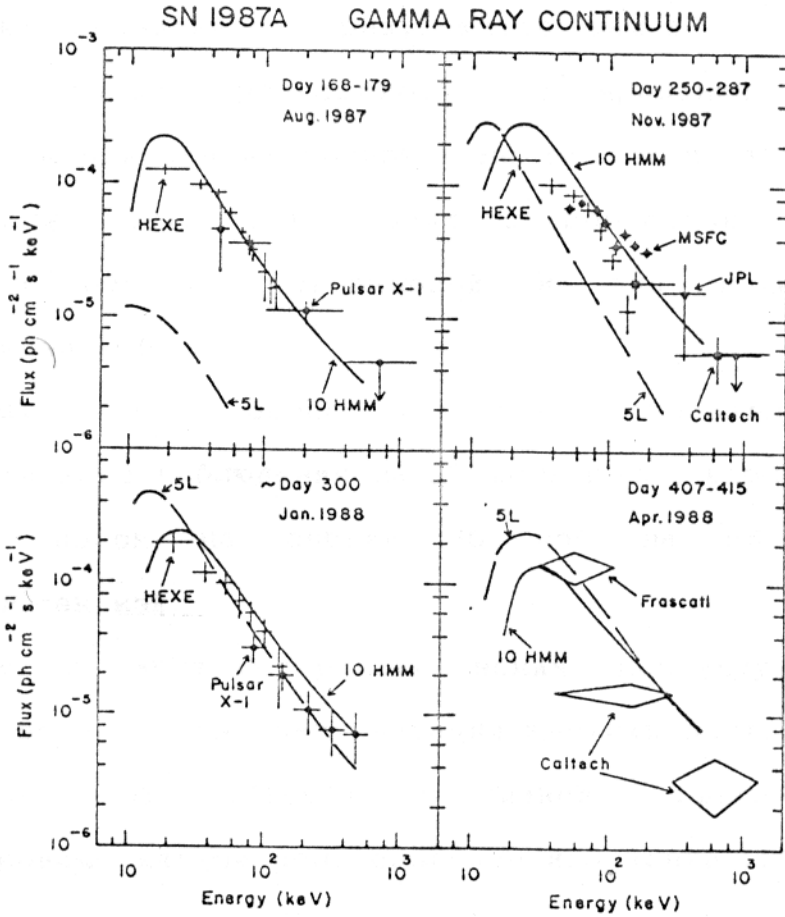


Рис. 2.10. Результаты наблюдений рентгеновского излучения SN1987 в 1987-1988 г.г. Приведены ранее опубликованные данные обсерватории «Рентген», групп MSFC, JPL, Caltech, Frascati (), а также результаты моделирования () для моделей оболочки с центральным распределением кобальта и сильным перемешиванием кобальта по оболочке.

экспериментов в сравнении с ранними результатами наблюдений на модуле «Квант» опубликованных в работе (59). Видно, что данные разных групп достаточно хорошо согласуются между собой и подтверждают правильность результатов нашей группы. На рисунке приводятся также результаты моделирования рентгеновского континуума выходящего из оболочки по данным независимых расчетов группы Вусли (50), для модели с центральным распределением кобальта в оболочке сверхновой и для модели с сильным перемешиванием кобальта.

Следует также особо отметить отрицательный результат полученный в ходе наблюдений на 55 день после взрыва (80). Верхний предел на поток на энергии 50 кэВ на 55 день составил $3 \cdot 10^{-5}$ фот/см²сек кэВ.

Наряду с жестким рентгеновским континуумом, безусловно являющимся результатом комптонизации жестких рентгеновских фотонов в оболочке, от SN1987a спутником «Гинга» также было зарегистрировано мягкое рентгеновское излучение (20, 24), очевидно имеющее другую природу. На рисунке 2.11 изображена кривая блеска SN1987a по данным спутника «Гинга». На рисунке хорошо видна так называемая январская вспышка зарегистрированная спутником «Гинга». За исключением этой вспышки данные спутника «Гинга» согласуются с данными жестких рентгеновских наблюдений.

Январская вспышка не была подтверждена в ходе одновременных наблюдений модуля «Квант». Это может быть объяснено прежде всего разными чувствительностями разных обсерваторий, поскольку чувствительность прибора «Гексе» практически равна нулю на энергиях ≤ 16 кэВ. см. рис. 1.1. Нельзя исключать также возможность того, что данная вспышка принадлежит другому

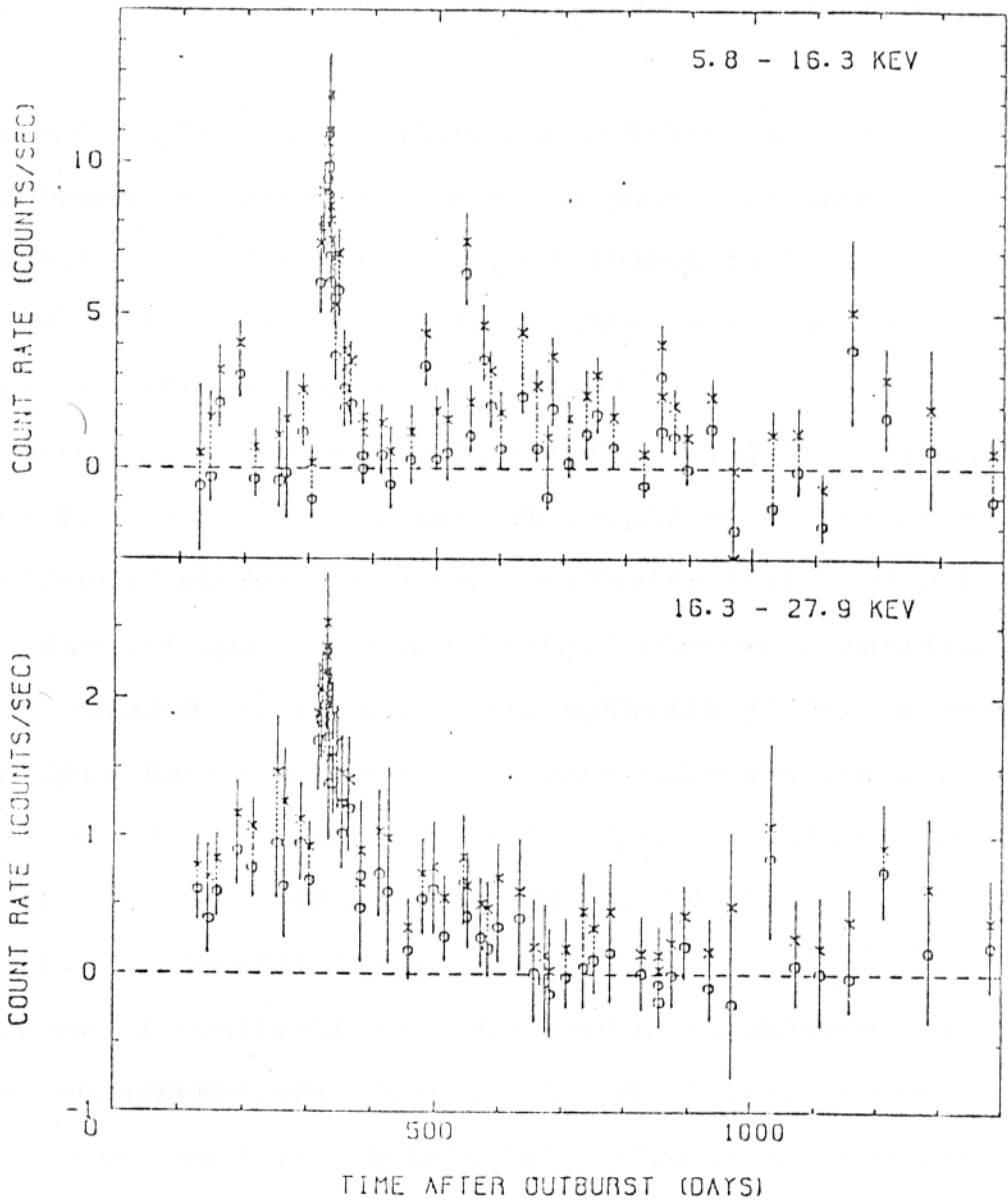


Рис. 2.11. Кривые рентгеновской светимости SN1987a по данным японского спутника «Гинга» () в диапазонах 6-16 кэВ и 16-25 кэВ. Кружки соответствуют верхним оценкам на светимость источников в поле зрения, кресты - нижним. Мягкая кривая демонстрирует более сильную быструю переменность.

источнику попадавшему в поле зрения основного инструмента спутника «Гинга» (24).

В любом случае можно уверенно говорить о том, что данное мягкое переменное излучение имеет природу отличную от жесткого рентгеновского континуума, регистрировавшегося в наших наблюдениях. Если мягкое рентгеновское излучение действительно принадлежит SN1987a оно может быть объяснено:

1) выходом излучения синхротронной природы, связанного с нейтронной звездой, через «окна», неоднородности в оболочке (7).

2) жестким хвостом тормозного излучения газа, сжатого ударной волной возникающей при обтекании плотных облаков в звездном ветре, испущенном звездой на стадии предсверхновой за сотни лет до её гибели. В этом случае характерное время переменности определяется размерами и плотностью облаков газа. Время переменности накладывает сильные ограничения на плотность газа (снизу) и размеры облаков (сверху). (43-45, 59).

3) Вспышкой рентгеновского излучения, возникающего вследствие ускорения релятивистских электронов на фронте ударной волны, теряющих свою энергию вследствие обратного комптон-эффекта оптических и инфракрасных фотонов, испускаемых оболочкой сверхновой. За наблюдаемое рентгеновское излучение с частотой $\nu \sim 4/3\gamma^2\nu_{\text{opt}}$ ответственны в этом случае электроны с релятивистским фактором $\gamma \sim E/m_e c^2 \sim 100-1000$ (59).

После запуска рентгеновской обсерватории «Гранат» рентгеновские наблюдения SN1987a были продолжены. В ходе наблюдений были получены верхние пределы на потоки от сверхновой в рентгене (81).

Кроме наблюдений рентгеновского излучения SN1987a в

континууме рядом групп проведен ряд успешных наблюдений в линиях прямого вылета 1238 и 847 кэВ. Рис. 3.6. Эти наблюдения хорошо согласуются с данными наблюдений в жестком рентгеновском континууме в рамках принятых теоретических моделей оболочки.

Глава 3. Интерпретация наблюдательных данных.

По данным прибора Гексе можно выделить несколько основных моментов связанных с наблюдаемой эволюцией рентгеновского спектра сверхновой:

а) Раннее появление потока рентгеновского излучения от сверхновой. Появление рентгеновского излучения от сверхновой в августе 1987 года на уровне 10^{-4} фот/см²сек кэВ противоречит простым моделям оболочки, в которых кобальт сосредоточен на внутренней границе (Рис. 3.1). Подобное раннее появление потока рентгеновского излучения может быть объяснено в рамках моделей с перемешиванием кобальта по оболочке сверхновой.

б) Медленный рост рентгеновской светимости. Как видно из рисунка 3.1, модель с сильным перемешиванием ⁵⁶Со по внутренней области с массой $\sim 8 M_{\odot}$, объясняющая раннее появление излучения, приводит к значительно более сильному росту потока по сравнению с наблюдаемым. Таким образом реальные наблюдательные данные дают достаточно сильные ограничения на теоретические модели, описывающие рентгеновское излучение от сверхновой, и требуют перемешивания небольшой доли кобальта практически по всей оболочке.

в) Последующее уменьшение потока излучения хорошо согласуется с теоретическими предсказаниями. Для всех моделей поток излучения от SN1987a заметно уменьшается к концу второго года после взрыва из-за распада основного источника энергии в оболочке ⁵⁶Со. К этому времени становится существенным влияние на рентгеновскую светимость сверхновой излучения ⁵⁷Со а также возможно рентгеновское излучение звездного остатка нейтронной звезды или черной дыры, образовавшейся в результате коллапса

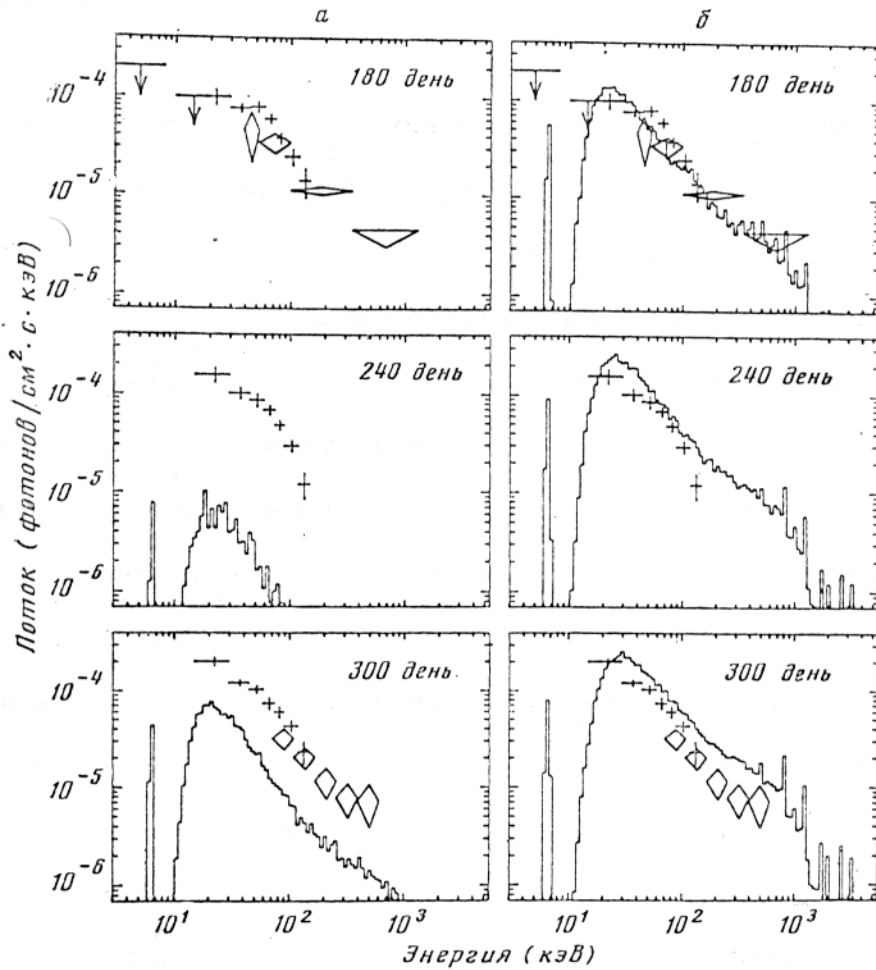


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных о потоке жестких рентгеновских лучей и теоретических моделей, рассчитанных методом Монте-Карло (Гребенев и Сюняев, 1988). *а* — показан поток, предсказанный на 180-й, 240-й и 300-й дни, в модели, где кобальт сосредоточен на внутренней границе расширяющейся оболочки сверхновой; *б* — на рисунках модель предполагает перемешивание кобальта во внутренних $8M_{\odot}$ вещества оболочки. На верхних рисунках приведены экспериментальные точки из статей Сюняева и др. (1987*а*, *б*), полученные приборами ТТМ, «Гексе» и «Пульсар X-1». На средних кривых приведены экспериментальные данные «Гексе» за ноябрь, а на нижних — данные «Гексе» за январь и «Пульсара X-1» за декабрь и январь. Видно, что предсказания модели, приведенные на рисунках *а*, противоречат экспериментальным данным

ядра предсверхновой. (16, 17, 19, 50). На этом этапе наблюдений даже верхние пределы на светимость источника дают ценную информацию о его дальнейшей эволюции.

§3.1 Перемешивание радиоактивных элементов в оболочке сверхновой

Раннее обнаружение «Гингой» и «Квантом» жесткого рентгеновского излучения от SN1987A (20, 57) было первым свидетельством сильного перемешивания радиоактивного кобальта по оболочке сверхновой (25, 21, 22, 18, 18), в настоящее время этот вывод подкреплен прямыми наблюдениями дисперсии скоростей в инфракрасных линиях ионов железа и кобальта (74), а также спектральной шириной гамма-линий кобальта-56 прямого вылета (46, 52, 53). Эти прямые наблюдения свидетельствуют о наличии радиоактивного кобальта в зонах оболочки со скоростями от 400 до 3000 км/с, что невозможно без сильнейшего перемешивания на ранней стадии расширения вследствие неустойчивости Рэлея-Тейлора (4, 72).

Спектр выходящего из оболочки излучения полностью определяется распределением фотонов по числу рассеяний, испытанных в оболочке. Среднее число рассеяний пропорционально квадрату оптической толщи оболочки по томсоновскому рассеянию и, следовательно, сильно зависит от времени, прошедшего с момента взрыва, $\langle u \rangle \sim t^{-4}$. Вид распределения фотонов по числу испытанных рассеяний $P(u/\tau^2)$ определяется прежде всего законом распределения источников фотонов по оболочке, которое однозначно соответствует распределению по оболочке радиоактивного кобальта. В диффузионной задаче (64, 51) при распределенном источнике фотонов жесткое рентгеновское излучение появляется

гораздо раньше, чем при центральном расположении источника. К настоящему времени, после работ Ито и др. (25), Ибисузаки и Шибазакки (21, 22), Пинто и Вусли (49), Гребенева и Сюняева (18), указавших на сильное перемешивание ^{56}Co по оболочке, как на возможную причину раннего появления рентгеновского излучения SN1987a, эта простейшая модель приобрела широкое распространение и известность. Имеющиеся данные наблюдений не позволяют, однако, окончательно отвергнуть другие модели оболочки с близким распределением $P(u/\tau^2)$, и, следовательно, со сходным спектром излучения. В числе таких моделей мы должны назвать модели с неоднородным распределением вещества - клочковатостью, в которых уже в ранние моменты времени часть фотонов выходит по коридорам оболочки, испытывая малое число рассеяний, и модели оболочки с отсутствием сферической симметрии (16). Критическим для этих моделей является соотношение потока рентгеновских фотонов и потока фотонов прямого вылета. В частности, в рамках этих моделей трудно объяснить стабильность наблюдаемого излучения в линиях 847 и 1238 кэВ ^{56}Co . В настоящей работе мы рассматриваем простейшую модель, предполагающую сильное перемешивание радиоактивного кобальта по оболочке в момент взрыва в предположении однородности и сферической симметрии оболочки.

На рисунке 3.2 приведены кривые блеска SN1987a полученные по данным наблюдений обсерваторией «Рентген» в сравнении с результатами расчетов рентгеновских спектров SN1987a для моделей с центральным распределением радиоактивного кобальта и с кобальтом, перемешанным по внутренним $8 M_{\odot}$ вещества (модели использовалась в расчетах Гребенева и Сюняева, (18, 19).

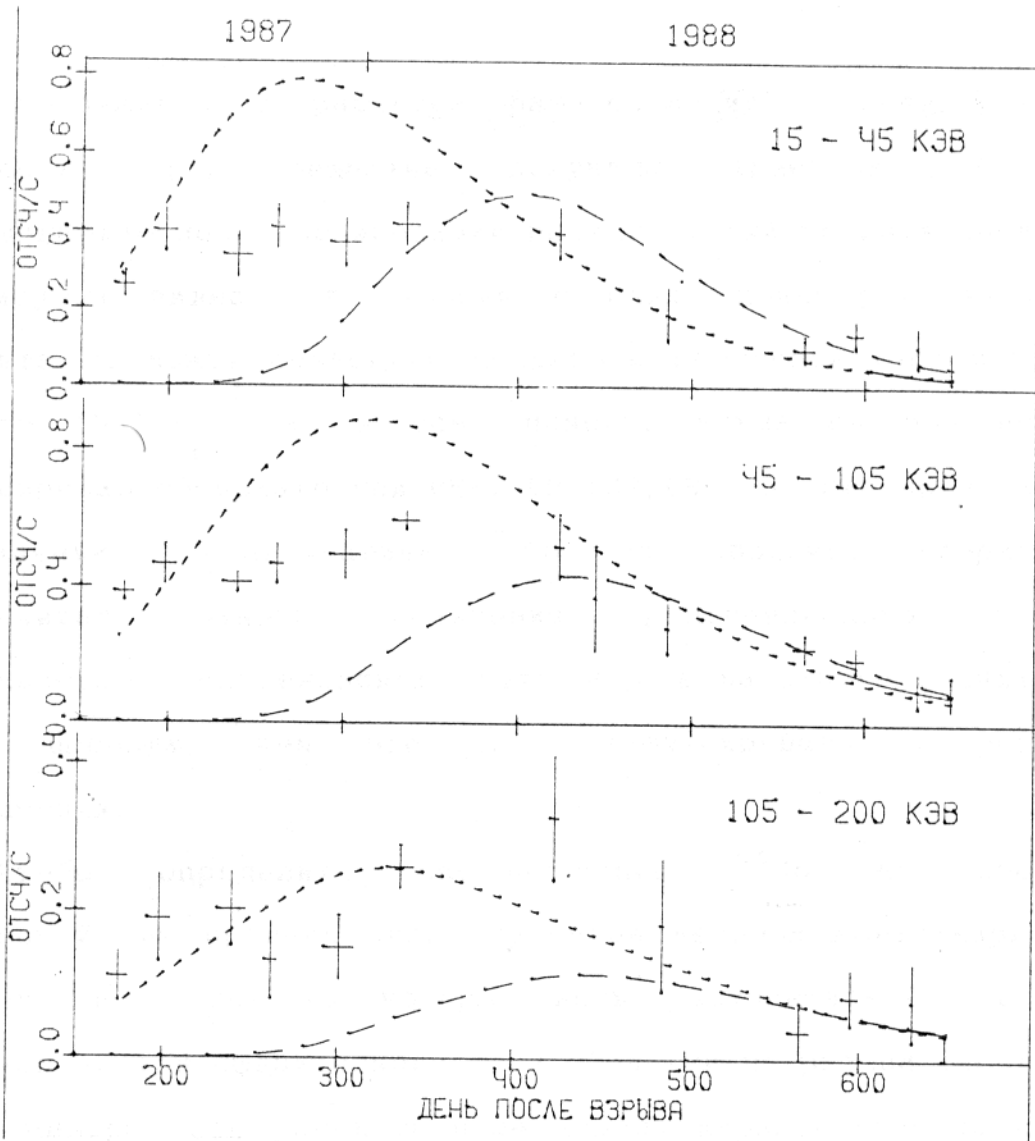


Рис. 3.2 Эволюция рентгеновского потока по данным наблюдений телескопа ГЕКСЕ в трех энергетических диапазонах 15-45 кэВ, 45-105 кэВ и 105-200 кэВ с августа 1987 года по декабрь 1988 года. Приведены кривые эволюции потока, соответствующие моделям с центральным распределением ^{56}Co (1), с перемешиванием ^{56}Co по внутренним $8 M_{\odot}$ (2), использовавшихся в работе (Сюняев и Гребенев 1988).

Использовавшиеся в расчетах распределения скорости $v(r)$ и плотности $\rho(r)$ вещества получены Арнеттом (3) при гидродинамическом моделировании ранних стадий разлета оболочки. Из рисунка видно, что модель с центральным распределением кобальта не может объяснить появление рентгеновского потока в августе 1987, т. е. к тому моменту когда он был впервые зафиксирован обсерваторией РЕНТГЕН (57, 58). В тоже время модели с сильным перемешиванием ^{56}Co по оболочке сверхновой, обеспечивая раннее появление рентгеновского потока, предсказывают рентгеновскую светимость в максимуме значительно более высокую, чем это было зафиксировано в реальных наблюдениях.

Чтобы определить распределение ^{56}Co по оболочке сверхновой, мы провели серию расчетов методом Монте-Карло для моделей, в каждой из которых весь радиоактивный ^{56}Co был заключен внутри сферического слоя оболочки на разном расстоянии от ее центра. Все рассмотренные модели характеризуются строго определенной временной зависимостью рентгеновского потока, выходящего из оболочки сверхновой рис 3.3. Зная реальное поведение рентгеновского потока от сверхновой, можно пытаться восстановить количество ^{56}Co в каждом из сферических слоев. Практически задача сводится к решению обратной задачи:

$$F(t_j) = \sum_i c_i F_i(t_j)$$

где $F(t_j)$ - экспериментально померенные потоки от сверхновой в рентгене в моменты t_j ; $F_i(t_j)$ - светимости рассчитанные для моделей, где весь кобальт содержится в сферическом слое оболочки на разном удалении от центра, а c_i искомое распределение.

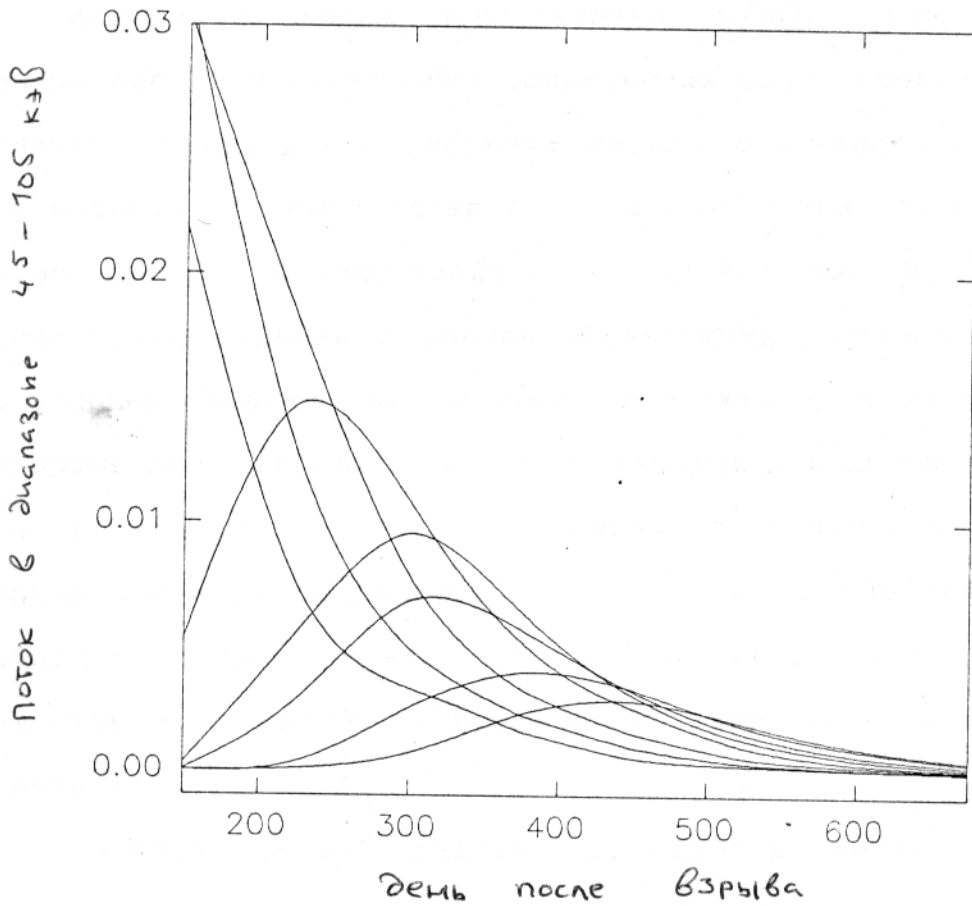


Рис. 3.3 Эволюция рентгеновской светимости SN1987a для моделей оболочки, где весь ^{56}Co сосредоточен в сферическом слое на расстоянии 1- $0 M_{\odot}$, 2- $0.6 M_{\odot}$, 3- $1.7 M_{\odot}$, 4- $3 M_{\odot}$, 5- $5.2 M_{\odot}$, 6- $8 M_{\odot}$, 7- $10.4 M_{\odot}$, 8- $12 M_{\odot}$ от центра. Решение для распределения кобальта в оболочке искалось в виде суперпозиции подобных моделей.

Подобная постановка задачи является возможной лишь для диапазона энергий $E > 30$ кэв, поскольку для более низких энергий существенным фактором, определяющим рентгеновскую светимость, является фотопоглощение в оболочке, которое в свою очередь сильно зависит от распределения тяжелых элементов. В этом случае задача становится существенно нелинейной по σ_1 .

Имеющихся данных недостаточно, чтобы решить эту задачу однозначно. Для внутренних сферических слоев оболочки (до $1 M_{\odot}$) отличия во временной эволюции потока излучения незначительны, что касается внешних слоев ($> 10 M_{\odot}$) оболочки, то рентгеновский поток от них резко спадает к 150-200 дню и, т.к. мы не располагаем данными о временной эволюции потока от сверхновой на ранних стадиях, мы не можем получить достоверных данных о распределении кобальта в самых внешних слоях. Отметим также, что проведенные вычисления верны с точностью до модели, определяющей распределения $v(r)$ и $\rho(r)$ по оболочке. В данной работе за основу брались распределения плотности и скорости вещества в оболочке, следующие из гидродинамических расчетов Арнета (3).

Решение данной задачи проводилось двумя независимыми методами: как в виде аналитической аппроксимации распределения, так и непосредственно путем поиска обилия ^{56}Co в каждом отдельном сферическом слое. Во втором случае число зон было значительно уменьшено (до 5), чтобы уменьшить степень корреляции между соседними зонами.

Результатом анализа явился вывод о невозможности в рамках однородной сферически-симметричной задачи получить наблюдаемую кривую рентгеновского блеска SN1987a пользуясь моделями с

однородным перемешиванием, аналогичными модели с сильным перемешиванием по $8 M_{\odot}$, использовавшейся в расчетах Гребенева и Сюняева. (18, 19). Для описания наблюдаемой кривой блеска необходимо, чтобы кобальт по оболочке был перемешан неоднородным образом.

Удовлетворительное согласие с экспериментом дает распределение, где основная масса кобальта сосредоточена в центральной области оболочки, а оставшийся радиоактивный кобальт размешан по оболочке практически равномерно. На рис. 3.4 крестами (размеры которых по вертикальной оси указывают ошибки на уровне одного стандартного отклонения) приведено распределение кобальта, способное обеспечить наблюдаемую кривую блеска.

Задача восстановления распределения кобальта по оболочке существенно упрощается, если искать его радиальное распределение в виде аналитической аппроксимации суперпозицией двух гауссовых кривых: узкой, центрированной на внутренней границе оболочки, и протяженной с гораздо более широким распределением ^{56}Co по оболочке. Зона, в которых должен быть распределен ^{56}Co согласно наблюдаемой кривой блеска в этой простейшей модели, также приведена на рис. 3.4. По результатам фитирования параметров распределения кобальта полная ширина на полувысоте для центрального гауссового распределения оказалась практически равной нулю $< 1.1 M_{\odot} (1\sigma)$, что может служить свидетельством в пользу того, что основная часть кобальта в оболочке осталась неперемешанной.

Видно, что два разных подхода дают достаточно близкие результаты. Около 60 процентов кобальта сосредоточено в

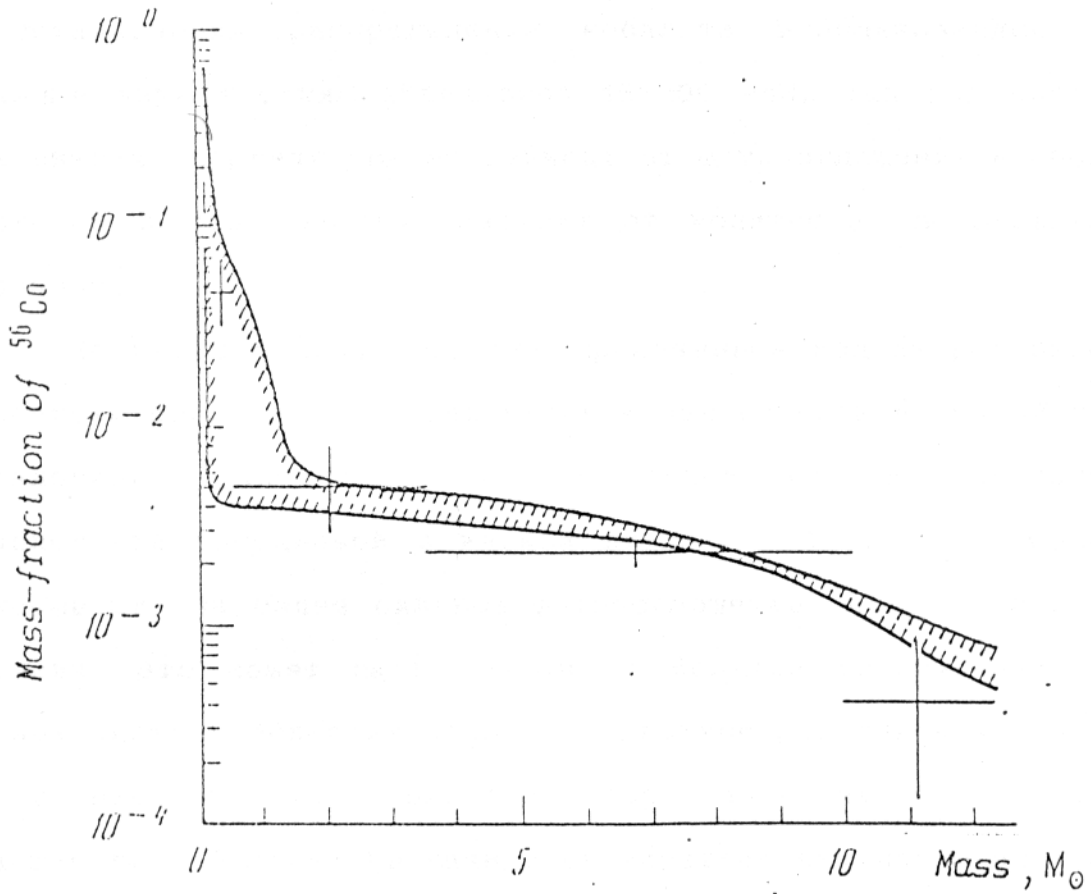


Рис. 3.4. Зона наиболее вероятного распределения ^{56}Co по оболочке SN1987A, способного обеспечить наблюдаемую кривую рентгеновского блеска источника. Приведены результаты независимой оценки распределения кобальта в 5 сферических слоях оболочки (ошибки - 1σ), а также область на уровне 67% достоверности для распределения, описываемого суперпозицией двух гауссовых кривых. Хорошо видно, что оба подхода к оценке распределения ^{56}Co в оболочке SN1987A дают близкие результаты.

центральном низкоскоростном источнике, и около 40 процентов перемешано практически по всей оболочке. Отметим, что при восстановлении распределения кобальта использовались только данные двух жестких диапазонов 45-200 кэВ, так как светимость на низких энергиях сильно зависит от фотопоглощения в оболочке, которое в свою очередь зависит от количества перемешиваемого кобальта.

На рис. 3.5 показано, как пролученная модель распределения кобальта согласуется с наблюдаемой рентгеновской кривой блеска. Отклонения максимальны на начальной стадии рентгеновских наблюдений сверхновой в мягком диапазоне 15-45 кэВ. Сравнения указывают, на более сильное фотопоглощение, чем в используемой модели. Это может быть связано с большим содержанием ^{56}Co в самых внешних областях оболочки. Жесткое рентгеновское и гамма-излучение от этих областей проявлялось на ранних стадиях расширения оболочки до начала систематических наблюдений обсерватории «Рентген».

Хорошее соответствие экспериментальных данных и результатов расчетов на поздних стадиях разлета оболочки (через 500 дней после взрыва), когда рентгеновский поток определяется содержанием кобальта в центре (порядка 60% от полного количества кобальта) и практически не зависит от распределения кобальта по основной массе оболочки, является сильным аргументом в пользу выбранной модели распределения $v(r)$ и $\rho(r)$.

К настоящему моменту накоплена обширная информация о переменности в линиях 847 и 1238 кэВ (46(SMM), 48(JPL), 35(Caltech), 54 (Lockheed/MSFC), 53,54 (Florida/GSFC),

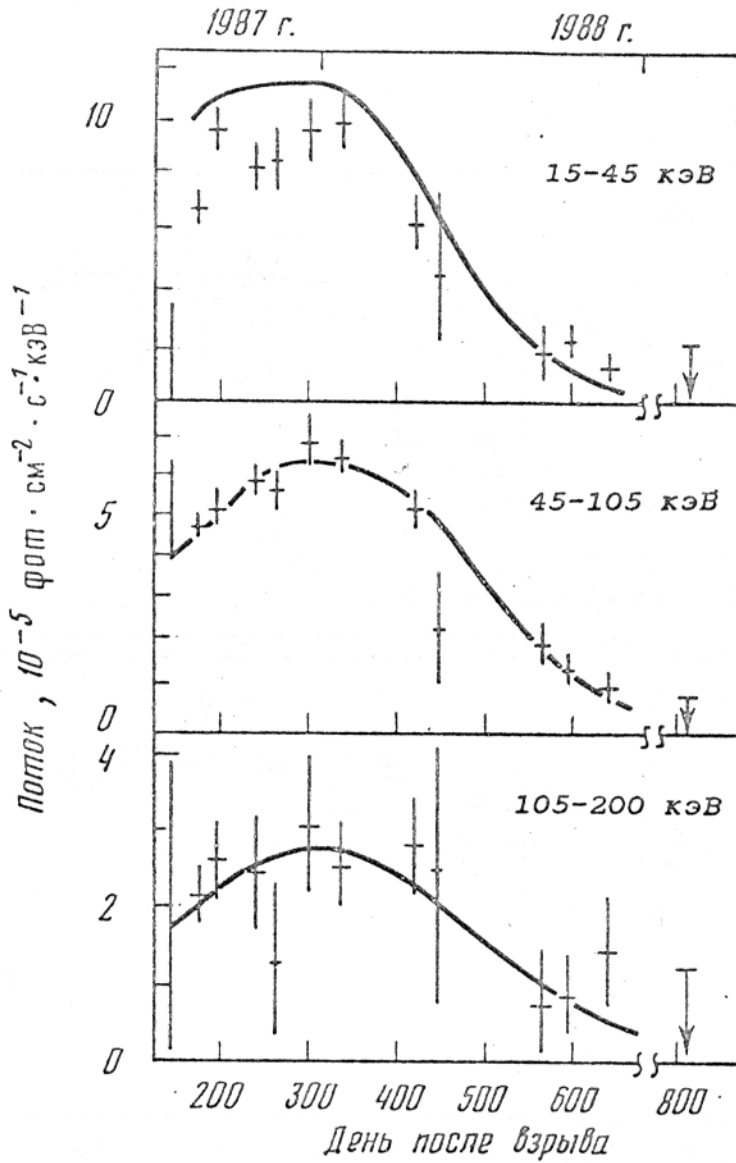


Рис. 3.5 Эволюция рентгеновской светимости SN1987A по данным прибора ГЕКСЕ в трех цветах 15-45, 45-105 и 105-200 кэВ, усредненная по продолжительным периодам наблюдений. Ошибки соответствуют одному стандартному отклонению. Приведены результаты математического моделирования в соответствии с принятой в данной работе моделью оболочки (сплошные кривые).

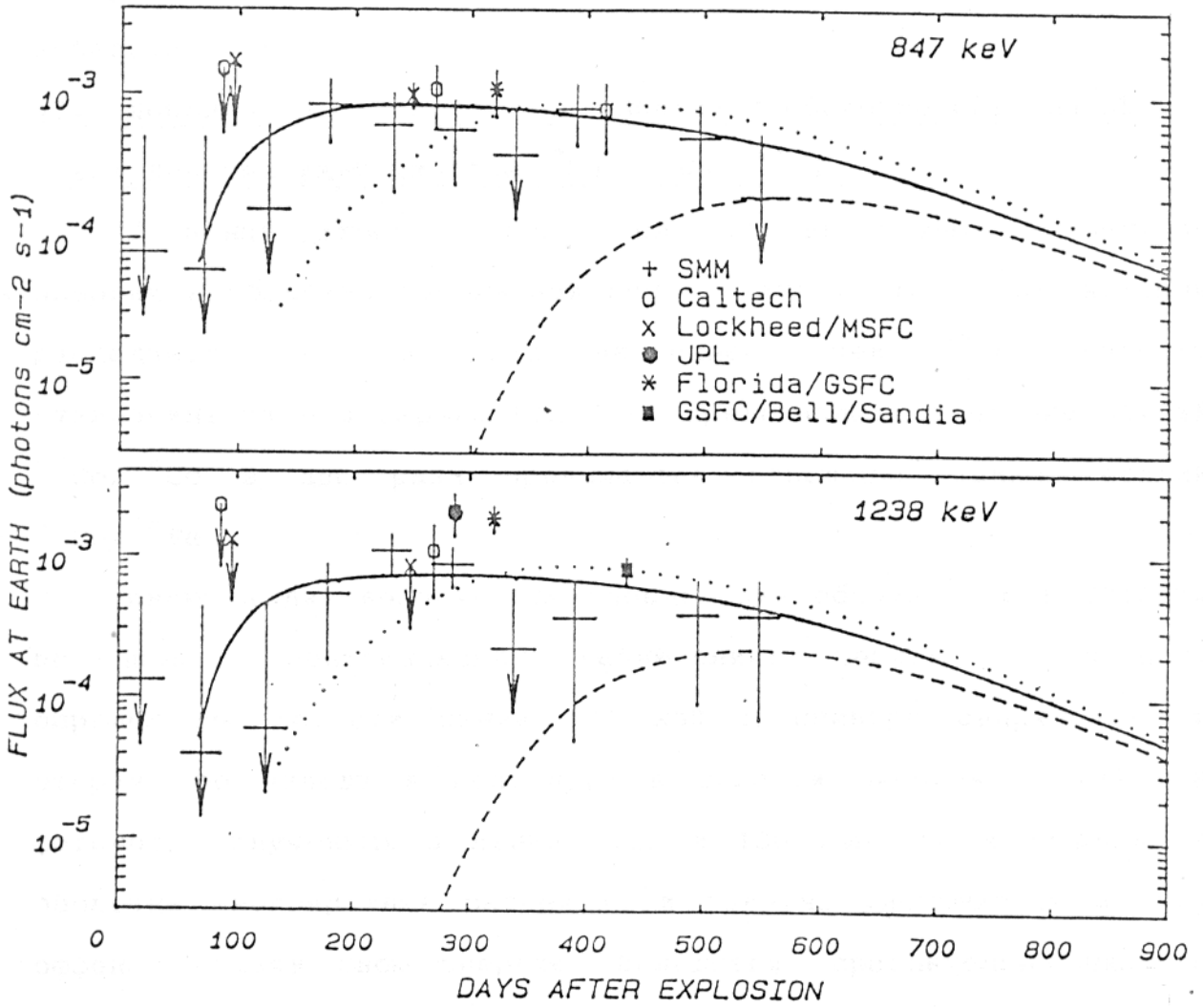


Рис. 3.6 Эволюция потока от SN1987a в линиях 847 кэВ и 1238 кэВ ^{56}Co , предсказываемая моделями с центральным распределением ^{56}Co (1), с ^{56}Co перемешанным по $8 M_{\odot}$ (2), с модельным распределением ^{56}Co (Рис. 3.5) (3). Приведены экспериментальные результаты наблюдений SN1987a в линиях.

8 (GSFC/Bell/Sandia)). Как видно из рис. 3.6, совокупность экспериментальных данных наблюдений в линиях хорошо согласуется с предлагаемым модельным распределением, в отличие от модели с центральным распределением кобальта и модели с перемешиванием кобальта по $8 M_{\odot}$.

§3.2 Дополнительные источники энергии в оболочке сверхновой.

3.2.1 Долгоживущие изотопы ^{57}Co , ^{22}Na , ^{44}Ti ,

К концу второго года после взрыва важным источником энергии в оболочке сверхновой может стать изотоп ^{57}Co , который распадается в 3.5 раза медленнее, чем ^{56}Co . Расчеты нуклеосинтеза при взрыве (12,71) предсказали отношение обилий $^{57}\text{Co}/^{56}\text{Co}$ в два раза превышающее отношение земных обилий $^{57}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$.

Имеются две возможности определения обилия ^{57}Co в SN1987A по данным рентгеновских наблюдений: первая по прямому определению яркости линии 122 кэВ в спектре сверхновой, и вторая, по вкладу в континуум в области энергий 45-105 кэВ фотонов, излученных в линиях 122 и 136 кэВ, но испытавших в оболочке многократные рассеяния и заметно уменьшивших в силу эффекта отдачи свою энергию. Вследствие сравнительно низкого энергетического разрешения приборов типа «фосвич» прибор ГЕКСЕ на модуле «Квант» дал существенно лучшие результаты при использовании второго метода.

Результаты, которые мы приводим ниже, зависят от принятой модели оболочки (используется модель Арнетта, (3)) и от распределения в ней кобальта (используется распределение, приведенное на рис. 3.4). Кроме того, предполагается, что ^{57}Co распределен также как и ^{56}Co .

За период с сентября 1988 г. по июнь 1989 г. обсерватория «Рентген» не зафиксировала статистически достоверного превышения рентгеновской светимости в диапазоне 45-105 кэВ над предсказаниями модели, в которой весь наблюдаемый поток связан с распадом ^{56}Co . При упомянутых выше предположениях верхние пределы на уровне трех стандартных отклонений на отношение обилия $^{57}\text{Co}/^{56}\text{Co}$ к земному обилию $^{57}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ были равны: 2.4 в сентябре 1988 г., 3.3 в декабре 1988 г. и 1.8 в июне 1989 г (см рис.). Отношение обилий $^{57}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ на Земле равно 0.024 (27). Совокупность данных, полученных с сентября 1988 года по июнь 1989 года, позволила нам получить предел на уровне трех стандартных отклонений на вклад фотонов распада ^{57}Co в кривую блеска жесткого рентгеновского излучения SN1987A. Этот верхний предел соответствует обилию $^{57}\text{Co}/^{56}\text{Co}$ в полтора раза превышающему земное относительное обилие $^{57}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$. Наблюдения в мае-июне 1989 года дали верхний предел на поток в линии 122 кэВ равный $3.9 \cdot 10^{-4}$ фот \cdot см $^{-2}$ с $^{-1}$. (на уровне 3σ). Этот предел в рамках обсуждаемых моделей соответствует обилию ^{57}Co в шесть раз превышающему земное обилие ^{57}Fe .

Данные наблюдений прибора ГЕКСЕ в мае-июне 1989 года позволяют получить также верхние пределы на вклад фотонов распада радиоактивных изотопов ^{22}Na и ^{44}Ti в рентгеновское излучение сверхновой в диапазоне 15-105 кэВ через 830 дней после взрыва. Соответствующие верхние пределы на уровне трех стандартных отклонений на количество содержащегося в оболочке ^{22}Na или ^{44}Ti равны $1.3 \cdot 10^{-3} M_{\odot}$ и $9 \cdot 10^{-3} M_{\odot}$. Эти пределы примерно на порядок превышают оценки содержания ^{22}Na и ^{44}Ti , сделанные Вусли и Уивером (12) и Хашимото и др. (71) в ходе моделиро-

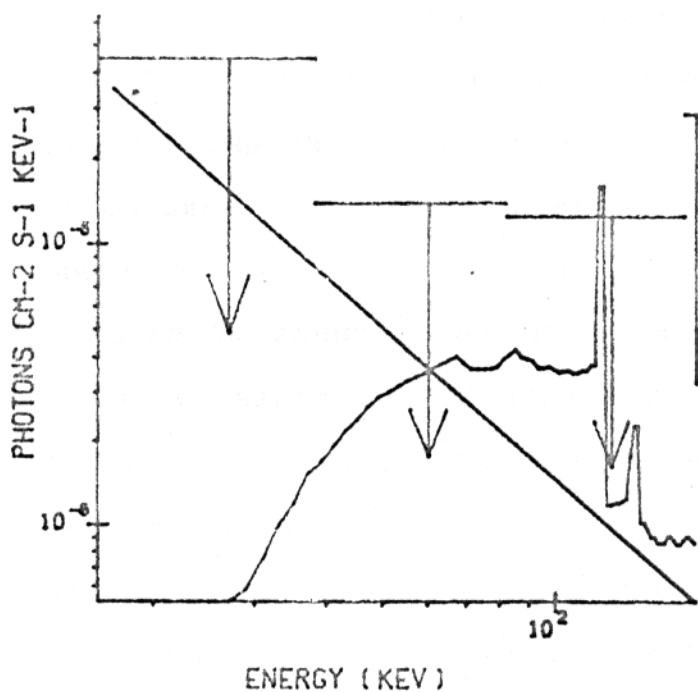
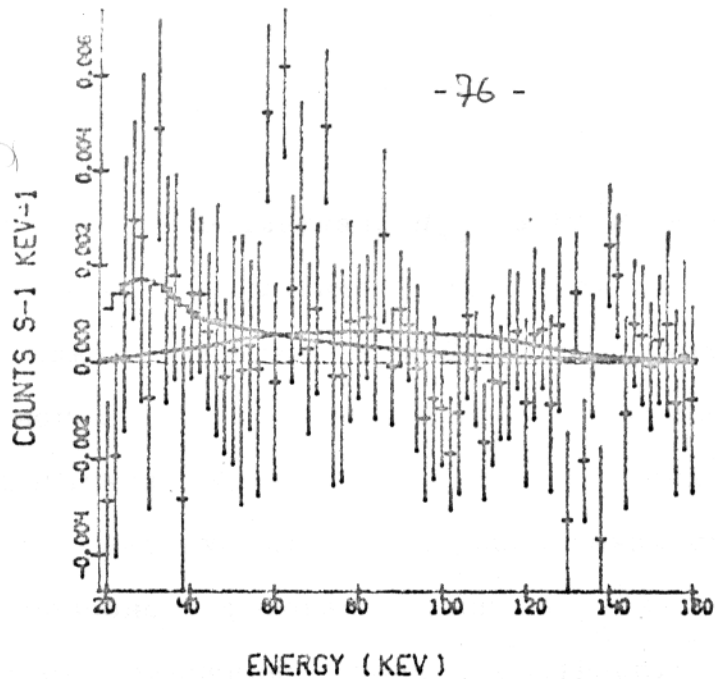


Рис. 3.7 Результаты наблюдения SN1987a в летом 1989 г. Приведен спектр в отсчетах зарегистрированный прибором «Гексе» за время наблюдений (верхний график) и верхние пределы на поток от источника по данным наблюдений (нижний график). Хорошо видно, что достоверный сигнал от SN1987a не был зарегистрирован. Незначительное превышение потока на мягких энергиях может быть связано со вкладом от пульсара PSR 0540-693 находившегося в поле зрения прибора. На рисунке показан вклад от степенного спектра этого источника. Приведен также спектр формирующийся в оболочке в результате комптонизации гамма-линий от ^{57}Co в предположении Земного относительного обилия.

вания взрывного нуклеосинтеза, $M_{22} \sim 3 \cdot 10^{-5} M_{\odot}$ и $M_{44} \sim 1.2 \cdot 10^{-4} M_{\odot}$.

Радиоактивное излучение ^{57}Co , ^{22}Na и ^{44}Ti в оболочке сверхновой может приводить к избытку инфракрасного излучения, по сравнению с излучением, определяемым ^{56}Co , зарегистрированному Буше и др. (9). Испускаемые при распаде этих изотопов жесткие фотоны перерабатываются в непрозрачной оболочке подобно фотонам распада ^{56}Co в наблюдаемое низкочастотное излучение пыли. Светимость в инфракрасном избытке через 1030 дней после взрыва составляла $\sim 2 \cdot 10^{38}$ эрг/с, и для ее объяснения необходимо, чтобы содержание этих изотопов в оболочке значительно превышало содержание, предсказываемые расчетами. Необходимо, чтобы на момент взрыва в оболочке находилось либо $\sim 4 \cdot 10^{-2} M_{\odot}$ изотопа ^{57}Co (т. е. отношение $^{57}\text{Co}/^{56}\text{Co}$ превышало бы земное отношение обилий $^{57}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ в 22 раза), либо $9 \cdot 10^{-4} M_{\odot}$ изотопа ^{22}Na либо $9 \cdot 10^{-3} M_{\odot}$ ^{44}Ti . Верхние пределы на обилия ^{57}Co , ^{22}Na и ^{44}Ti , полученные прибором ГЕКСЕ, $M_{57} \leq 2.8 \cdot 10^{-3} M_{\odot}$, $M_{22} \leq 1.3 \cdot 10^{-3} M_{\odot}$ и $M_{44} \leq 9 \cdot 10^{-3} M_{\odot}$ (см. выше), делают предположение о радиоактивной природе инфракрасного излучения пыли совершенно несостоятельным в случае ^{57}Co и маловероятным в случае ^{44}Ti и ^{22}Na .

3.2.2 Поиск рентгеновского излучения звездного остатка

- нейтронной звезды или черной дыры, образовавшегося при взрыве сверхновой, является важнейшей задачей продолжающихся наблюдений SN1987a с борта модуля Квант. В соответствии с расчетами Гребенева и Сюняева (18, 19) максимум выходящего наружу излучения звездного остатка, скрытого под оболочкой, должен приходиться на диапазон 30-100 кэВ как в случае

рентгеновского пульсара, так и в случае аккрецирующей черной дыры. К сожалению, предсказания потока сильно зависят от закона распределения кобальта по оболочке, так как это определяющим образом сказывается на оптической толщине оболочки по фотопоглощению. Для модели, в которой 60% кобальта сосредоточено в центральной части оболочки, наблюдения ГЕКСЕ позволяют установить верхний предел на светимость центрального источника в диапазоне 1-1000 кэВ со спектром подобным спектру Крабовидной туманности равный $1.6 \cdot 10^{39}$ эрг/с (3σ). Аналогичная оценка для центрального источника со спектром, подобным спектру Лебеда X-1, дает $7.8 \cdot 10^{38}$ эрг/с. Отметим, что регистрируемый прибором ГЕКСЕ на начало декабря 1988 года поток от сверхновой в диапазоне 30-120 кэВ составит $5.3 \cdot 10^{37}$ эрг/с.

Основная доля энергии излучения центрального источника поглощается внутри оболочки и должна переизлучаться в оптическом и инфракрасном диапазоне. Выход болометрического потока в оптическом и инфракрасном диапазонах на константу мог бы свидетельствовать о проявлении центрального пульсара или аккрецирующего объекта. На сегодняшний день наблюдаемый поток оптического и инфракрасного излучения позволяет установить верхний предел на светимость центрального объекта во всех диапазонах энергий на уровне $\cong 2 \cdot 10^{38}$ эрг/с.

Наблюдения обсерватории «Рентген» в мае-июне 1989 г. накладывают еще более сильные ограничения на рентгеновскую светимость звездного остатка, образовавшегося при взрыве, по данным прибора ТТМ составили $L_x(1-6 \text{ кэВ}) \leq 3.6 \cdot 10^{36}$, $L_x(6-15 \text{ кэВ}) \leq 5.4 \cdot 10^{36}$ (63) по данным прибора «Гексе» предел на поток от источника составил $L_x(15-105 \text{ кэВ}) \leq 1.35 \cdot 10^{37}$ эрг/с.

Томсоновская оптическая толща оболочки к этому времени еще была больше 3-4, и поэтому спектр остатка достаточно сильно искажался из-за фотопоглощения и комптоновского рассеяния. Поглощенная энергия шла на нагрев оболочки и переизлучалась в инфракрасном, субмиллиметровом и оптическом диапазонах. Измерения Буше и др. (9) показали, что излучение пыли в оболочке имело чернотельный спектр с $T + 160$ К и болометрическая светимость сверхновой составляла $(2.0 \pm 0.1) \cdot 10^{38}$ эрг/с на 1030 день после взрыва. Используя данные расчетов излучения звездного остатка, выходящего из оболочки, верхний предел на жесткое рентгеновское излучение в диапазоне 15-105 кэВ, полученный прибором ГЕКСЕ на 830 день, и информацию о низкочастотном излучении оболочки можно получить достаточно интересные ограничения на спектр звездного остатка. Так, например, если предположить, что спектр остатка (пульсара) степенной $I_\nu \sim \nu^{-\alpha}$ [фот·см⁻²с⁻¹кэВ⁻¹] в диапазоне 1-1000 кэВ, и что рентгеновский поток выходящего из оболочки излучения на 830 день равен приведенному выше верхнему 3σ пределу в диапазоне 15-105 кэВ, мы находим светимость пульсара в диапазоне 1-1000 кэВ $L_B \approx 2.4 \cdot 10^{38}$ и $4.4 \cdot 10^{38}$ эрг/с для двух значений спектрального индекса $\alpha + 1.5$ и 2.1 . Пренебрегая замедлением пульсара и изменением его светимости, можно найти поглощаемую в оболочке энергию, т.е. ее низко- частотную светимость на 1100 день $L_{IR} \approx 1.0 \cdot 10^{38}$ и $3.5 \cdot 10^{38}$ эрг/с соответственно для $\alpha + 1.5$ и 2.1 . Видно, что при спектральном индексе 1.5 такой спектр остатка не может обеспечить наблюдаемой низкочастотной светимости оболочки. Легко показать, что любой спектр с $\alpha \leq 1.75$ не может удовлетворить данным Буше и др. (9).

Приведенный пример демонстрирует возможность использования наших данных рентгеновских наблюдений SN1987a для получения ограничений на параметры пульсара, скрытого под расширяющейся оболочкой. В случае аккрецирующего объекта наши оценки менее определены. Тем не менее для объекта со спектром типа спектра известного источника Лебедь X-1 в низком состоянии (65) подобный анализ с использованием приведенных выше данных ГЕКСЕ также демонстрирует невозможность удовлетворить низкочастотным данным. Если инфракрасное излучение является продуктом переработки пылью жесткой эмиссии центрального объекта, то спектр рентгеновского излучения звездного остатка должен быть достаточно мягким.

Глава 4. Возможности наблюдения сверхновой 1987а и других сверхновых в рентгеновском диапазоне орбитальной обсерваторией Спектр-Рентген-Гамма.

Международная орбитальная рентгеновская обсерватория Спектр-Рентген-Гамма готовится к запуску в 1995 году. Обсерватория включает в себя ряд приборов чувствительных в диапазоне энергий от ультрафиолета до жесткого рентгена ~ 100 кэВ. Основным прибором обсерватории будет рентгеновский телескоп косого падения советско-датского производства СОДАРТ. Этот прибор отличается рекордной для приборов такого класса собирающая площадь зеркал и необычайно жесткий диапазон (прибор будет чувствителен до энергии 30 кэВ) см. рис. 4. 1. Одним из фокальных приборов телескопа будет охлаждаемый кремниевый детектор с энергетическим разрешением порядка 200 эВ. Кроме телескопа содарт в состав обсерватории войдут телескоп косого падения Jet-X, отличающийся от телескопа СОДАРТ меньшей собирающей площадью, но более высоким угловым разрешением, а также жесткий рентгеновский телескоп с кодированной апертурой МАРТ, который, как планируется, будет чувствителен в диапазоне энергий от 10 до 150 кэВ. гарантийный срок жизни обсерватории 3 года, однако как показал опыт рентгеновских обсерваторий в нашей стране «Астрон», «Рентген», «Гранат» срок жизни обсерватории может быть значительно продлен. Таким образом Обсерватория «Спектр-Рентген-Гамма» будет наблюдать сверхновую 1987а 8 лет спустя после взрыва.

§4. 1. Наблюдение сверхновой 1987а телескопом «Содарт» в линиях ^{57}Co , ^{44}Ti , ^{55}Fe .

Как отмечено в работах (12 71) в процессе взрывного нуклеосинтеза кроме $0.075 M_{\odot} ^{56}\text{Ni}$ должны были синтезироваться

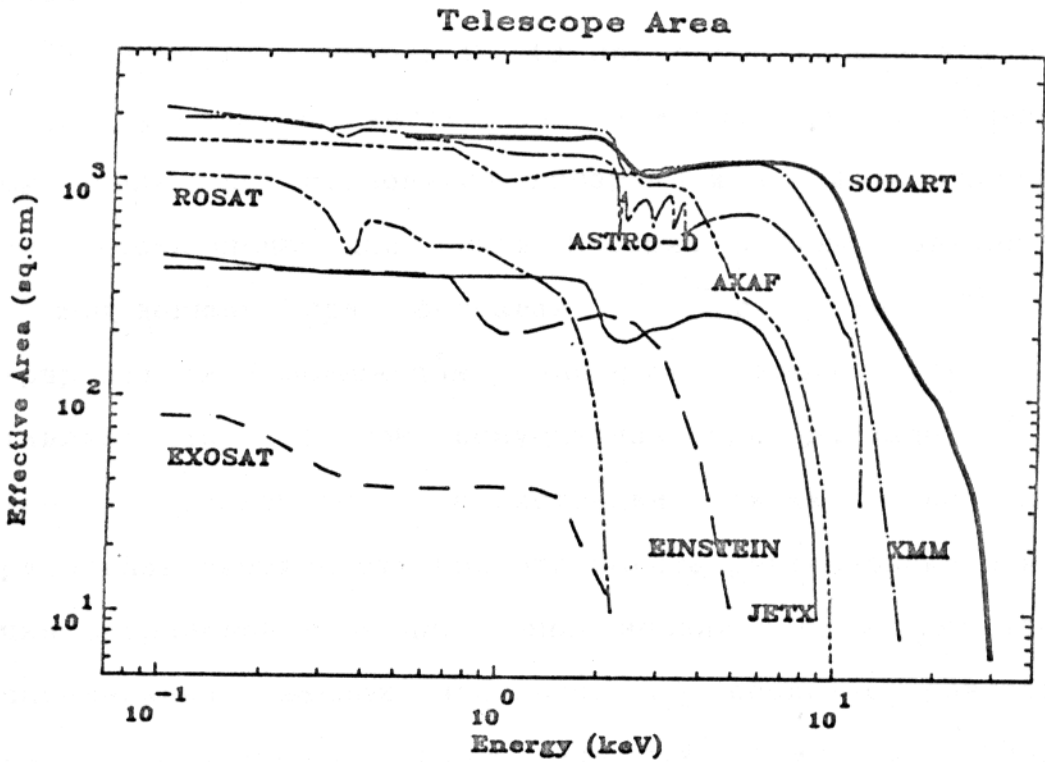


Рис. 4.1. Эффективные площади двух приборов обсерватории «Спектр-Рентген-Гамма» - «Содарт» и «Jet-X» по сравнению с уже работавшими, а также готовящимися к запуску телескопами косого падения.

другие радиоактивные изотопы. Если к моменту запуска обсерватории «Спектр-Рентген-Гамма» изотопа ^{56}Co , отвечавшего за энерговыделение в оболочке на ранних этапах эволюции сверхновой, практически не останется, то другие, долгоживущие изотопы в оболочке еще не успеют полностью распасться. К числу таких изотопов относятся ^{22}Na (время распада 1370 дней), ^{44}Ti (68 лет), ^{57}Co (391.9 дней), ^{55}Fe (3.89 лет). Через 8 - 10 лет после взрыва вся оболочка, кроме центральной её части, где наиболее высока концентрация тяжелых элементов, становится прозрачной по фотопоглощению для энергий, характерных для линий К-серии тяжелых элементов. Эти линии испущенные при распадах ^{57}Co , ^{55}Fe , ^{44}Ti , могут регистрироваться телескопом «Содарт». Кроме того, интерес представляет линия 14 кэВ испускаемая при распаде ^{57}Co . Для определения возможности регистрации линий было проведено интегрирование вероятности прямого вылета рентгеновского кванта по оболочке сверхновой в предположении модели $v(r)$ и $\rho(r)$ Арнета (3) и распределения тяжелых элементов по оболочке совпадающего с модельным, полученным нашей группой (рис. 3.4). Результаты расчетов приведены в таблице 4.1. Массы изотопов были приняты в соответствии с расчетами взрывного нуклеосинтеза (12,71). Были рассчитаны потоки в линиях у Земли, а также скорость счета в фокусе телескопа «Содарт». Вычисления проводились для 2866 дня после взрыва, соответствующего началу 1995 года, когда планируется запуск обсерватории «Спектр-Рентген-Гамма», также для 3000 и 4000 дней, причем день 4000 примерно соответствует концу гарантийного срока эксплуатации обсерватории. В таблице также приводится

Таблица 4.1

Потоки у Земли в мягких рентгеновских линиях прямого вылета от
1987а

Энергия	14кэВ	6.4кэВ	4.09кэВ	5.9кэВ
ИЗОТОП	CO57	CO57	TI44	FE55
	γ	$K_{\alpha 1} K_{\alpha 2}$	$K_{\alpha 1} K_{\alpha 2}$	$K_{\alpha 1} K_{\alpha 2}$
Масса M_{\odot}	1.8e-3	=	1.e-4	2.65e-4
N_{at}	2.1e+55	=	2.7e+51	5.7e+51
скорость распа- да P_r (1/s)	2.7e-9	1.5e-8	7.9e-11	2.04e-9
2866				
остаток	7.06e-4	=	.89	.133
прозрачность	.277	.23	.144	.22
поток				
фот/сек см ²	5.6e-8	2.5e-7	7.5e-8	9.7e-7
отсч/день	1.1	28.6	8.4	109.0
3000				
остаток	4.65e-4	=	.886	.121
прозрачность	.289	.239	.152	.227
поток				
фот/сек см ²	3.8e-8	1.7e-7	7.9e-8	8.8e-7
отсч/день	0.75	19.6	8.8	102.7
4000				
остаток	3.60e-5	=	.85	.06
прозрачность	.358	.272	.20	.27
поток				
фот/сек см ²	3.6e-9	1.5e-8	9.9e-8	5.16e-7
отсч/день	.073	1.7	10.1	59.5

средняя прозрачность оболочки по фотопоглощению для данной энергии на данный момент времени. Следует отметить интересный факт, что через 8 лет после взрыва на энергиях ~ 5 кэВ, в рамках принятой в данной работе модели перемешивания, непрозрачной остаётся часть оболочки, соответствующая узкому, центральному распределению кобальта. Т.е. доля квантов К-серий элементов ^{57}Co , ^{55}Fe , ^{44}Ti покидающих оболочку - порядка доли широко перемешанного кобальта в оболочке. Таким образом светимость сверхновой в мягких рентгеновских линиях необычайно чувствительна к выбранной модели перемешивания. Это позволяет надеяться, что по данным наблюдений в мягком рентгене совместно с данными оптических и ИК наблюдений на поздних стадиях эволюции сверхновой можно будет получить новую интересную информацию о перемешивании в оболочке. Здесь следует оговориться, что в расчетах мы оставались в рамках однородной сферически-симметричной модели оболочки.

В качестве фокального детектора телескопа «Содарт» для таких измерений наиболее удобен охлаждаемый твердотельный спектрометр SIXA. Прибор имеет необычайно высокое энергетическое разрешение ~ 200 эВ в интересующем нас диапазоне. За счет этого становится возможным разделить близкие по энергии линии от распада ^{57}Co и ^{55}Fe , а также существенно сократить фоновую загрузку прибора при наблюдениях в узком спектральном диапазоне. Оценки фоновой загрузки прибора сделанные разработчиками дают значение фоновой загрузки порядка 30 отсчетов в сутки. Это делает возможным регистрацию излучения в линиях 6.4 кэВ для ^{57}Co и 5.9 кэВ для ^{55}Fe за время наблюдений порядка суток.

Следует отметить, что железо-56, находящееся в оболочке сверхновой, может возбуждаться квантами диффузного рентгеновского фона, что могло бы приводить к генерации линии $K\alpha$ железа, однако, как показывают простейшие оценки этот эффект слабее на несколько порядков.

Осложнить ситуацию с наблюдениями сверхновой в мягких рентгеновских линиях может также мягкое рентгеновское излучение, образующееся при возникновении мощной ударной волны на звездном ветре от предсверхновой на стадии красного гиганта.

§ 4.1. Возможности наблюдения ударной волны от сверхновой 1987а.

По данным моделирования К. Масаи (47) при взаимодействии расширяющегося вещества оболочки сверхновой со звездным ветром предсверхновой на стадии красного сверхгиганта должен возникать мощный мягкий рентгеновский источник со светимостью порядка 10^{37} эрг/с и достаточно сложной формой спектра рис. 4.1. По данным наблюдения в рентгеновском диапазоне появляется уникальная возможность исследования звездного ветра красного сверхгиганта.

Ожидаемое время начала взаимодействия вещества, выброшенного при взрыве сверхновой с плотным звездным ветром красного сверхгиганта порядка 10 лет после взрыва. данная оценка делается по результатам ультрафиолетовых наблюдений в линиях He II, C III, N III, N IV, N V, OIII (70), как предполагается, возникающих в межзвездной среде под действием ионизирующей УФ вспышки от сверхновой. Поскольку рост интенсивности в линиях продолжался в течении года после взрыва (56), расстояние до уплотнения в звездном ветре предсверхновой оценивается порядка 1 светового

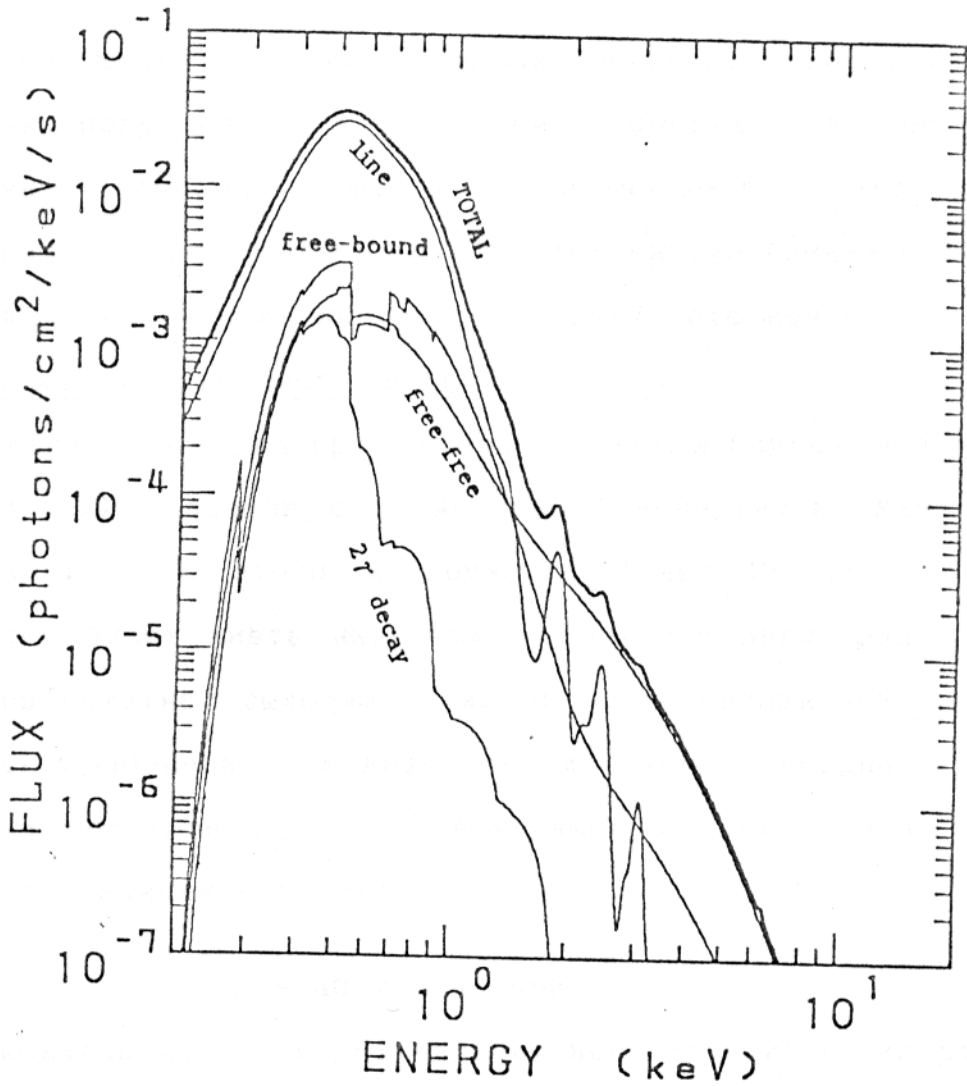


Рис. 4.2. Результаты моделирования для спектра ударной волны, возникающей при взаимодействии вещества оболочки SN1987a со звездным ветром от предсверхновой на стадии красного сверхгиганта, 11.6 лет после взрыва (из работы (45)). Спектр свернут с энергетическим разрешением прибора ~ 180 эВ, характерным для охлаждаемых спектрометров.

года. При скоростях для внешних областей оболочки до 0.1с, немедленно получаем характерное время порядка 10 лет после взрыва.

Таким образом существует возможность, что во время функционирования обсерватории «Спектр-Рентген-Гамма» СН1987а вновь станет источником внимания рентгеновских астрономов.

§4.3 Наблюдения звездного остатка.

В состав обсерватории «Спектр-Рентген-Гамма» войдет Жесткий рентгеновский телескоп с кодированной апертурой «Март». Рабочий диапазон энергий этого инструмента будет 5- 150 кэВ. Данный инструмент будет иметь наилучшие шансы для регистрации излучения звездного остатка, выходящего из оболочки сверхновой. Как следует из работы Гребенева и Сюняева (18) излучение звездного остатка со степенным спектром $I_{\nu} \sim E^{-\alpha}$ выходящее из оболочки на 3000 день будет иметь максимум на энергии:

$$E \sim 40 \sqrt[3]{1/\alpha} \text{ кэВ,}$$

что приходится на максимум чувствительности прибора «Март».

Следует отметить, что рентгеновское излучение выходящее из оболочки в это время имеет $\tau_T \ll 1$, что дает возможность поиска пульсаций связанных с центральным источником.

§ 4.4. Наблюдения других сверхновых

В заключении хочется остановиться на возможных перспективах обсерватории «Спектр-Рентген-Гамма» для наблюдения других сверхновых на ранних этапах их эволюции. Частота вспышек сверхновых в галактике нашего типа оценивается 1/44 года для сверхновых II типа и 1/36 лет для сверхновых I типа (67) хотя оптическое излучение от тех и других сильно затеняется пылью. Это

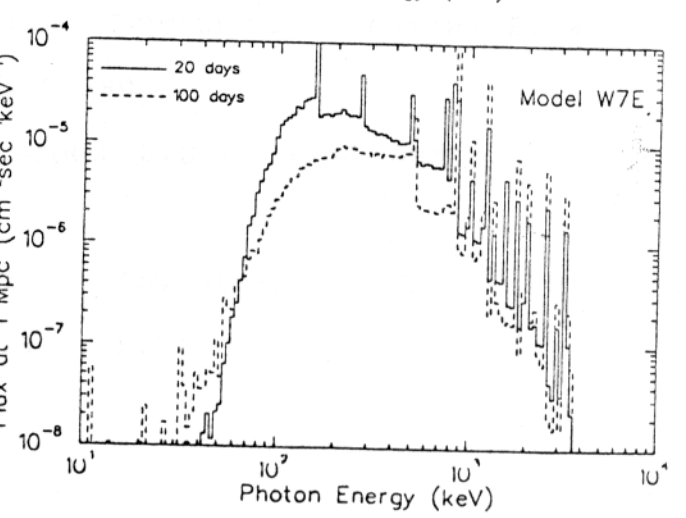
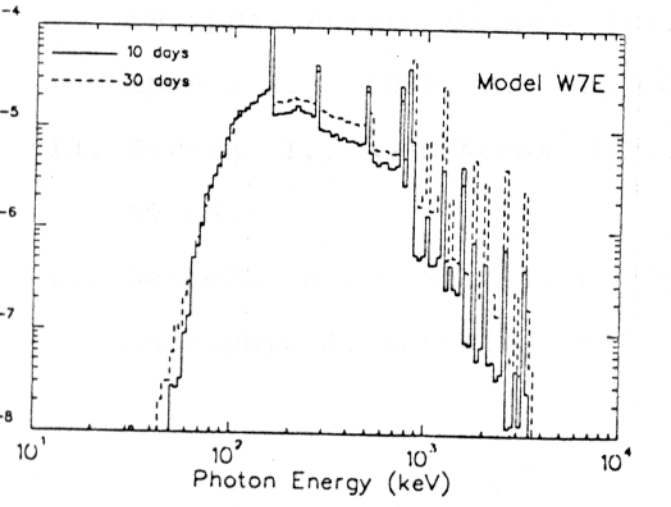
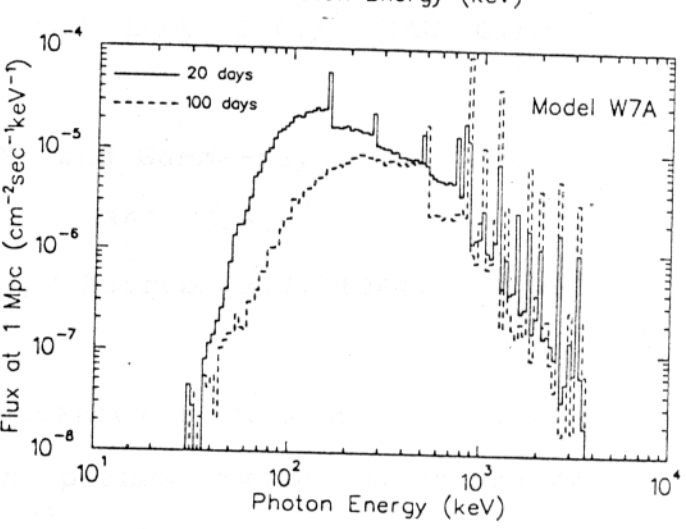
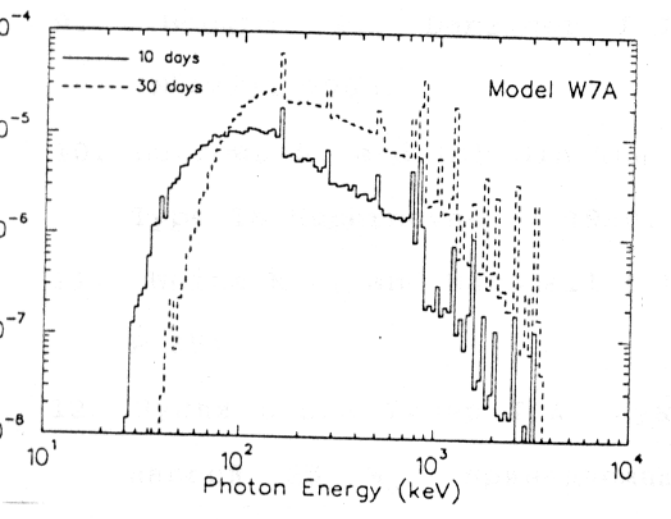
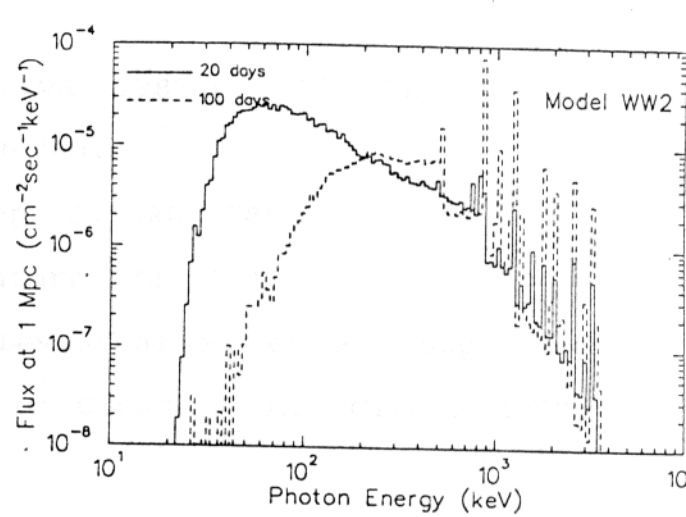
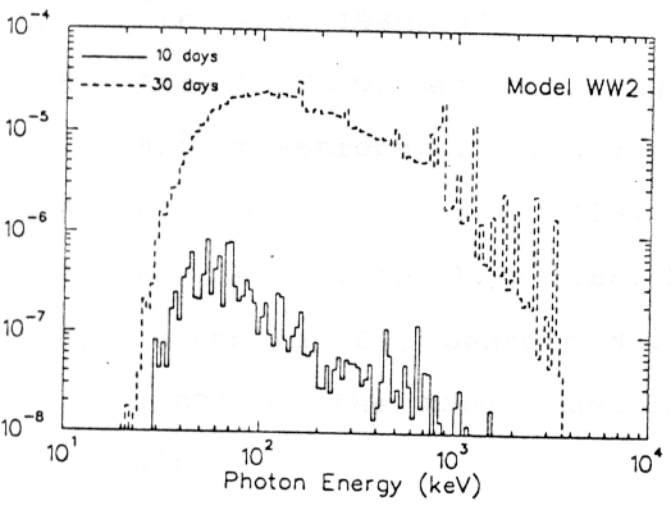
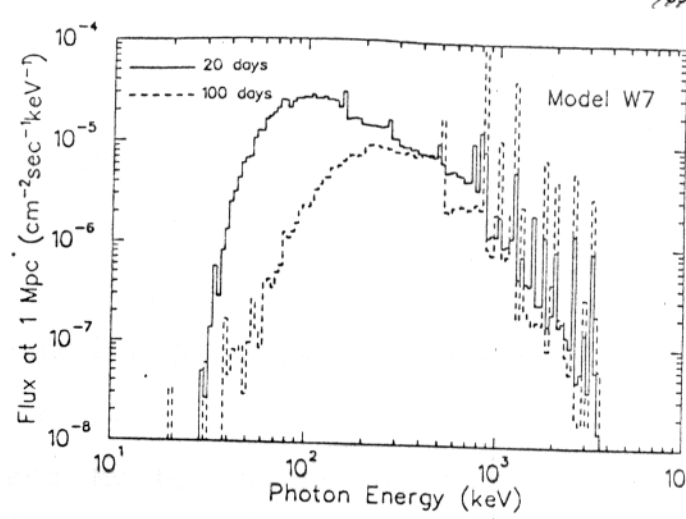
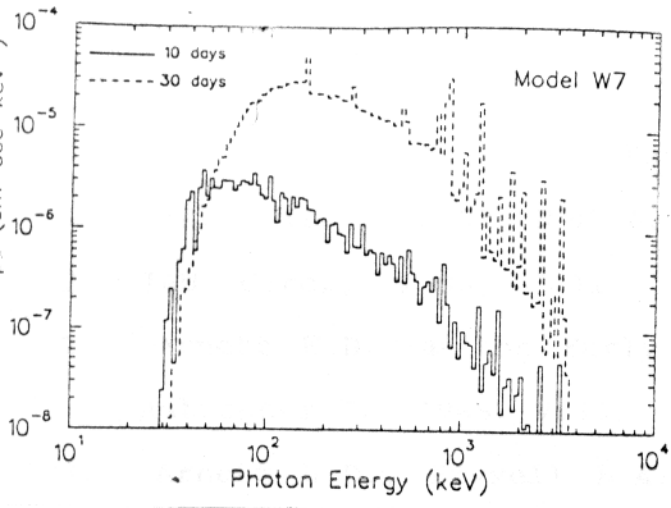
значит, что даже в самом благоприятном случае вероятность регистрации сверхновой в окрестности нашей Галактики достаточно мала. Тем не менее существуют реальные возможности наблюдать в рентгеновском диапазоне достаточно удаленные от нас вспышки сверхновых на расстояниях порядка 10 Мпк.

1. Регистрация ударной волны от сверхновой II типа взорвавшейся на стадии красного сверхгиганта. По данным обсерватории «Эйнштейн» (26) от сверхновой 1980к было зафиксировано мягкое рентгеновское излучение кТ ~ 0.5 кэВ. Светимость источника составила $2 \cdot 10^{39}$ эрг/с в диапазоне 0.2-4 кэВ на 10 Мпк. Подобный источник без сомнения будет зафиксирован обсерваторией «Спектр-Рентген-Гамма», причем в данном случае наиболее полезным может оказаться телескоп косо́го падения Jet-X обладающий высоким угловым разрешением порядка 20 угл. сек. Это может оказаться полезным для исключения собственного излучения Галактики где произошла вспышка.

2. Другая возможность наблюдения сверхновых на ранних этапах эволюции связана со сверхновыми I типа. Поскольку при взрыве сверхновых I типа может синтезироваться на порядок больше радиоактивного ^{56}Ni , интенсивность рентгеновского континуума формируемого за счет комптонизации для таких источников может быть значительно выше. Основное отличие от случая с SN1987a состоит в том, что комптонизация происходит в менее плотной оболочке с более высоким содержанием тяжелых элементов, что приводит к большему вкладу фотопоглощения и как следствие к завлу в спектре не на энергиях $\sim 10-20$ кэВ, как это было в случае с SN1987a, а на более

высоких энергиях порядка 30-40 кэВ. На рисунке 4.3 приведены результаты численного моделирования возможных рентгеновских спектров сверхновых I типа из работы Борроуза и Зе (10). 3σ предел регистрации для телескопа «Март» составит по оценкам за сутки 10^{-6} фотонов/см² сек кэВ на энергии 100 кэВ, что делает возможным наблюдение сверхновых I типа в диапазоне 50 - 150 кэВ на расстояниях до 10 Мпк.

Рис. 4.3. Результаты моделирования для рентгеновского континуума формируемого при взрыве сверхновой I типа по данным работы Борроуз и Зе (10) для различных моделей взрыва. Видно, что поток в максимуме светимости на энергиях порядка 50 - 100 кэВ ожидается на уровне $2 \cdot 10^{-5}$ для расстояния 1 Мпк.



Литература

1. IAU Circ., 1988, N°4316.
2. IAU Circ., 1988, N°4317.
3. Arnett W.D. On the Early Behavior of Supernova 1987A.// *Astrophys.J.*, 1988, V.331, P.377-387.
4. Arnett W.D., Fryxell B.A. and Muller E.)// *Astrophys.J. Letters*. 1989. 341. L63.
5. Arnett W.D. et al. Supernova 1987a. // *Annu. Rev. Astron.Astrophys.* 1989.27.629-700.
6. Blanco V.M. et al. // 1987. *Ap. J.* 320. 589.
7. Bandiera R. et al.// 1988. *Nature* 332. 418.
8. Barthelmy S., Gehrels N., Leventhal M. et al. Supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud.// *IAU Circ.*, 1988, N°4593.
9. Bouchet P., Danziger I.J. and Lucy L.B.// *IAU Circ.* N°4933. 1990.
10. Burrows A. and Lih-Sin The. X- and Gamma-ray Signatures of Type Ia Supernovae.// 1990. *Ap.J.* 360. 626.
11. White N.E. and Marshall F.E.)// *Astrophys.J.* 1984. V.281. P.354.
12. Вусли С.Е. и Уивер Т.А. Нуклеосинтез в двух моделях звезд массой $25 M_{\odot}$, принадлежащих разным типам населения.// «Ядерная астро- физика» (под ред. Барнса Ч., Клейтона Д. и Шрамма Д.), 1986, М.: Мир, С.359-380.
13. Girarg T., van Atena W.F., Lopez C.E.// 1988 *Asrtron.J.* 95.58.
14. Gehrels N., MacCallum C.J., Leventhal M.// *Astrophys.J. Letters*. 1987. V.320. P.L19

15. Gehrels N., Leventhal M., MacCallum C.J. Prospects for Gamma-Ray Line Observations of Individual Supernovae.// *Astrophys.J.*, 1987, V.322, P.215-233.
16. Гребенев С.А. и Сюняев Р.А. Ожидаемое рентгеновское излучение от сверхновой 1987А. Расчеты методом Монте-Карло.// *Письма в АЖ*, 1987, Т.13, С.945-963.
17. Гребенев С.А. и Сюняев Р.А. Ожидаемое рентгеновское излучение от сверхновой 1987А. Расчеты методом Монте-Карло.// *Письма в АЖ*, 1987, Т.13, С.1042-1045.
18. Гребенев С.А. и Сюняев Р.А. Выход жесткого излучения из оболочки и оптическая светимость сверхновой 1987А.// *Письма в АЖ*, 1988, Т.14, С.675-691.
19. Гребенев С.А., Сюняев Р.А. Сверхновая 1987А: возможные сценарии эволюции спектра жесткого рентгеновского излучения.// *Письма в АЖ*, 1988, Т.14, С.1066-1078.
20. Dotani T., Hayashida K., Inoue H. et al. Discovery of an Unusual Hard X-Ray Source in the Region of Supernova 1987A.// *Nature*, 1987, V.330, P.230-231.
21. Ebisuzaki T., Shibasaki N. The Effects of Mixing of the Ejecta on the Hard X-Ray Emissions from SN 1987A.// *Astrophys.J. Letters*, 1987, V.327, P.L5-L8.
22. Ebisuzaki T., Shibasaki N. The Effects of Mixing of the Ejecta on the Gamma-Ray Lines from SN 1987A.// *Astrophys.J. Letters*, 1987, V.327, P.L9-L12.
23. Englhauser J., Doebereiner S., Pietsch W. et al.)// 23d ESLAB Symp. Proc. 1989.
24. Inoue H. et al. X-ray Observation of SN1987a from Ginga. // 1991. ISAS RN 464.

25. Itoh M., Kumagai S., Shigeyama T. et al. X-Rays Expected from Supernova 1987A Compared with the Source Discovered by the Ginga Satellite.// Nature, 1987, V.330, P.233-235.
26. Canizares C.R. et al. Detection of X-rays During the Outburst of Supernova 1980k.// 1982. Ap.J.Lett. 253. L17.
27. Камерон А.Дж.У. Содержание химических элементов и нуклидов в Солнечной системе.// «Ядерная астрофизика» (под ред. Барнса Ч., Клейтона Д. и Шрамма Д.), 1986, М.: Мир, С.33-52.
28. Kaniovsky A. et al. Hard X-ray Radiation from Supernova 1987a //1990 ESO Workshop and Conference Proceedings No 37. 465-477.
29. Catchpole R.M., Menzies J.W., Monk A.S. et al. Spectroscopic and Photometric Observations of SN 1987A. Paper II: Days 51 to 134.// Monthly Not.Roy. Astron.Soc., 1987, V.229, P.15P-25P.
30. Catchpole R.M., Whitelock P.A., Feast M.W. et al. Spectroscopic and Photometric Observations of SN 1987A. Paper III: Days 135 to 260.// Monthly Not.Roy.Astron.Soc., 1988, V.231, P.75P- 89P.
31. Clark D.H., Tuohy I.R., Long K.S. et al.// Astrophys.J. 1982. V.255. P.440.
32. Clayton D.D., Colgate S.A., Fishman G.J. Gamma-Ray Lines from Young Supernova Remnants.// Astrophys. J., 1969, V.155, P.75-82.
33. Клейтон Д. Космическая радиоактивность: γ -излучение как индикатор происхождения атомных ядер.//«Ядерная астрофизика» (под ред. Барнса Ч., Клейтона Д. и Шрамма Д.),

- 1986, M. : Мир, С.381-406.
34. Cassatella A. et al. // 1987 *Asrton.Astrophys*, 177, L29.
 35. Cook W.R., Palmer D.M., Prince T.A. et al. An Imaging Observations of Gamma-Ray Line Emission from SN 1987A.// *Astrophys.J. Letters*, 1988, V.334, P.L87-L90.(Caltech)
 36. Cooper G.//1971. *Phys. Rev. v.D3*, p.2312.
 37. Colgate S.A., McKee C. Early Supernova Luminosity.// *Astrophys. J.*, 1969, V.157, P.623-643.
 38. Kirshner R.T. et al. // IAU Circ N4435.
 39. Kendziorra et al.// 23d ESLAB Symp. Proc. 1989.
 40. Kumagai S. et al. Implication of the recent light curve of SN1987a. // 1991. Accepted for publication in *Astr.& Astrophys. Tokio Univ. No91-1*.
 41. Lempton M. // 1976 *Ap.J.* 208. 177.
 42. McCray R., Shull J.M., Sutherland P. Inside Supernova 1987A.// *Astrophys.J. Letters.*, 1987, V.317, P.L73-L77.
 43. Masai.K.,et al.//1988. *Nature.* 330. 235.
 44. Masai.K.,et al.//1988. *Nature.* 335. 804.
 45. Masai.K. X-ray Emission Due to Interaction of SN1987a Ejecta With Its Progenitor's Stellar Wind Matter. 1990. Preprint. Nagoya Univ. PSC-8.
 46. Matz S.M., Share G.H., Leising M.D. et al. Detection of Gamma- Ray Line Emission from SN 1987A.// *Nature*, 1988, V.331, P.416.
 47. Matteson J.L., Peterson L.E.)// 1987. private communication.
 48. Mahoney W.A., Varnell L.S., Jacobson A.S. et al. Gamma-Ray Observations of ^{56}Co in SN 1987A.// *Astrophys.J. Letters*,

- 1988, V.334, P.L81-L85.
49. Pinto P.A., Woosley S.E. X-Ray and Gamma-Ray Emission from Supernova 1987A.// *Astrophys.J.*, 1988, V.329, P.820-830.
50. Pinto P.A., Woosley S.E. The theory of Gamma-Ray Emergence in Supernova 1987A.// *Nature*, 1988, V.333, P.534-537.
51. Поздняков Л. А., Соболев И. М., Сюняев Р. А. Комптонизация и формирование спектров рентгеновских источников. Методика расчетов методом Монте-Карло. // *Итоги науки и техники (сер. Астрономия)*, 1982, Т. 21, М.: ВИНТИ, С. 238-307.
52. Rester A.S., Eichhorn G., Coldwell R.L. et al. Supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud.// *IAU Circ.*, 1988, N°4535.
53. Rester A.S., Coldwell R.L. Dunnam F.E. et al.// *Astrophys.J.Letters*. 1989. V.342. P.L71.
54. Sandie W.G., Nakano G.H., Chase L.F. et al. High-Resolution Observations of Gamma-Ray Line Emission from SN 1987A.// *Astrophys.J. Letters*, 1988, V.334, P.L91-L94.
55. Seward F.D., Harnden F.R. and Helfand D.J.// *Astrophys.J.Letters*. 1984. V.287. P.L19.
56. Sonneborn G., Altner B., Kirshner R.P. The Progenitor of SN 1987A: Spatially Resolved Ultraviolet Spectroscopy of the Supernova Field.// *Astrophys.J. Letters*, 1987, V.323, P.L35-L39.
57. Sunyaev R., Kaniovskiy A., Efremov V. et al. Discovery of Hard X-Ray Emission from Supernova 1987A.// *Nature*, 1987, V.330, P.227-229.
58. Сюняев Р. А., Каниовский А. С., Ефремов В. В. и др. Обнаружение жесткого рентгеновского излучения сверхновой

- 1987А. Предварительные результаты модуля КВАНТ. // Письма в АЖ, 1987, Т.13, С.1027-1041.
59. Сюняев Р. А. , Ефремов В. В. , Каниовский А. С. и др. Увеличение потока жесткого рентгеновского излучения от сверхновой 1987А по данным приборов ГЕКСЕ и Пульсар X-1 обсерватории РЕНТГЕН на модуле КВАНТ. // Письма в АЖ, 1988, Т.14, С.579-590.
60. Сюняев Р. А. , Каниовский А. С. , Ефремов В. В. и др. Падение потока жесткого рентгеновского излучения сверхновой 1987А. Данные модуля КВАНТ. // Письма в АЖ, 1989, Т.15, С.291-300.
61. Сюняев Р. А. , Каниовский А. С. , Ефремов В. В. и др. Жесткое рентгеновское излучение сверхновой 1987А. Результаты наблюдений обсерватории «Рентген» на модуле «Квант» // Письма в АЖ, 1990, Т.16, С.403.
62. Сюняев Р. А. , Гильфанов М. Р. , Чуразов Е. М. и др. // Письма в Астрон.Ж. 1988. Т.14. с.591.
63. Сюняев Р. А. , Гильфанов М. Р. , Чуразов Е. М. и др. // Письма в Астрон.Ж. 1990. Т.16. с.124..
64. Sunyaev R. A. , Titarchuk L. G. Comptonization of X-Rays in Plasma Clouds. Typical Radiation Spectra. // Astron. Astrophys., 1980, V.86, P.121-138.
65. Sunyaev R. A. , Truemper J. Hard X-Ray Spectrum of Cyg X-1. // Nature, 1979, V.279, P.506-508.
66. Схемы распадов радионуклидов. Энергия и интенсивность излучения. М.: Энергоатомиздат, 1987, Книга 1, Часть 1.
67. Tamman G. A. // 1982. Supernovae: A Survey of Current Research. Dordrecht: Reidel p.371.
68. Turtle A. J. et al. // 1987. Nature. 327.38.

69. Teegarden B.J. et al. // 1988 submeeted for publication.
70. Fransson C. et al.// 1989. Astrophys.J. 336. 429.
71. Hashimoto M., Nomoto K., Shigeyama T. Explosive Nucleosynthesis in Supernova 1987A.// Astron.Astrophys., 1989, V.20. p.L5.
72. Hachisu I., Matsuda T., Nomoto K. and Shigeyama T.)// Astrophys.J. Letters. 1990. in press.
73. Hamuy M., Suntzeff N.B., Gonzales R., Martin G. Sn 1987A in the LMC: UBVRI Photometry at Cerro Tololo.// Astron.J., 1988, V.95, P.63-83.
74. Erickson E.F., Haas M.R., Colgan S.W.J. et al.)// Astrophys.J. Letters. 1988. V.330, P.139.
75. Walborn N.R. et al. // 1987. Ap.J.Lett. 321. L41.
76. West R.M. et al. // 1987. Astron. Astrophys. 177. L1.
77. Whitelock P.A., Catchpole R.M., Menzies J.W. et al. Spectro- scopic and Photometric Observations of SN 1987A. Paper IV: Days 260 to 385.//Monthly Not.Roy.Astron.Soc., 1988, V.234, P.5P-18P.
78. Xu Y., Sutherland P., McCray R., Ross R.R. X-Rays from Supernova 1987A.// Astrophys.J., 1988, V.327, P.197-202.
79. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. // «Мир» 1975.
80. Ubertini P. et al. Hard X-ray spectrum of SN1987a on day 407. // Ap.J in press.
81. Гребенев С. и др. Рентгеновские изображения области сверхновой 1987а. Наблюдения телескопом «Гранат» в 1990 г. // 1991 Письма в А. Ж. т. 17. 310.