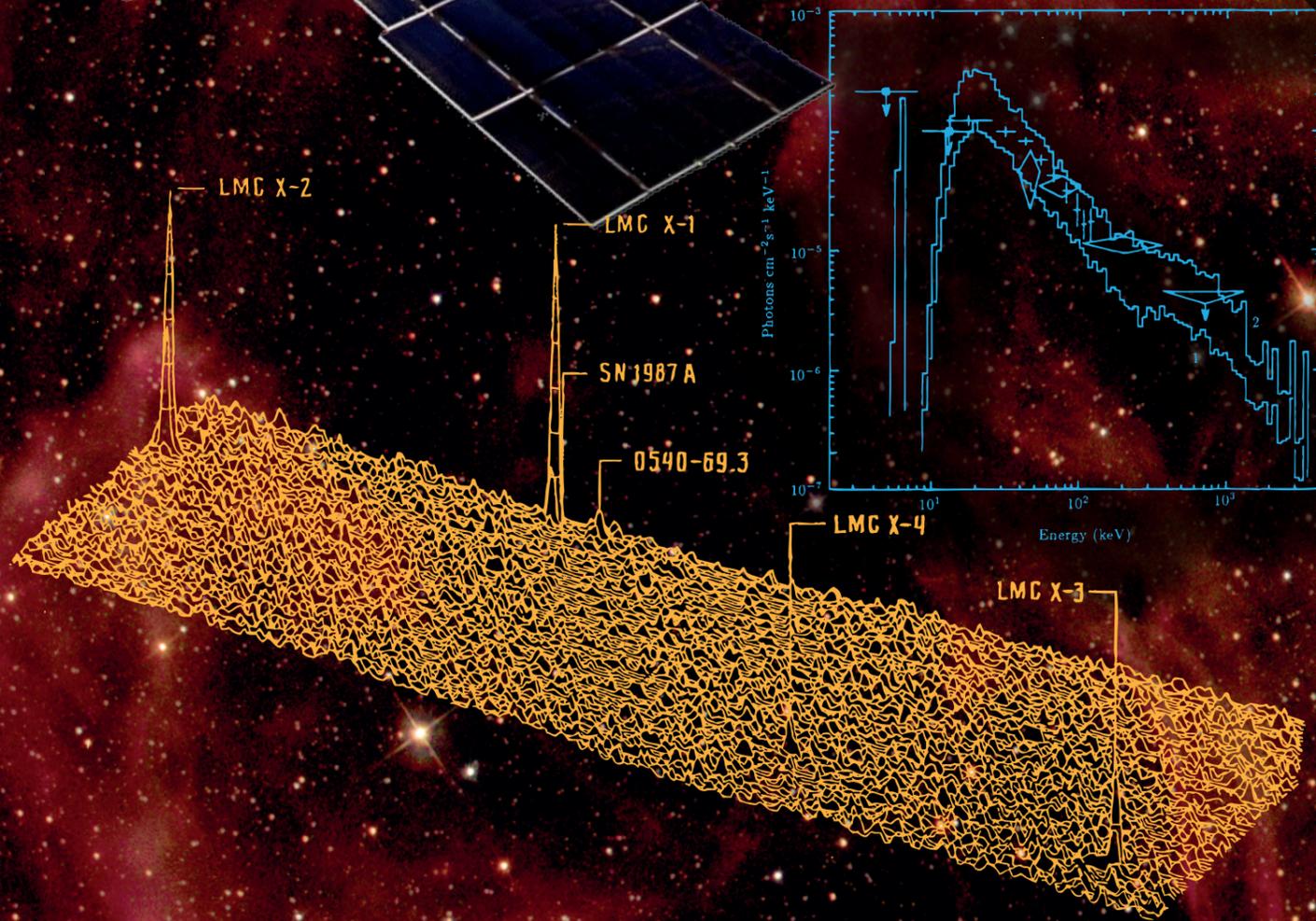
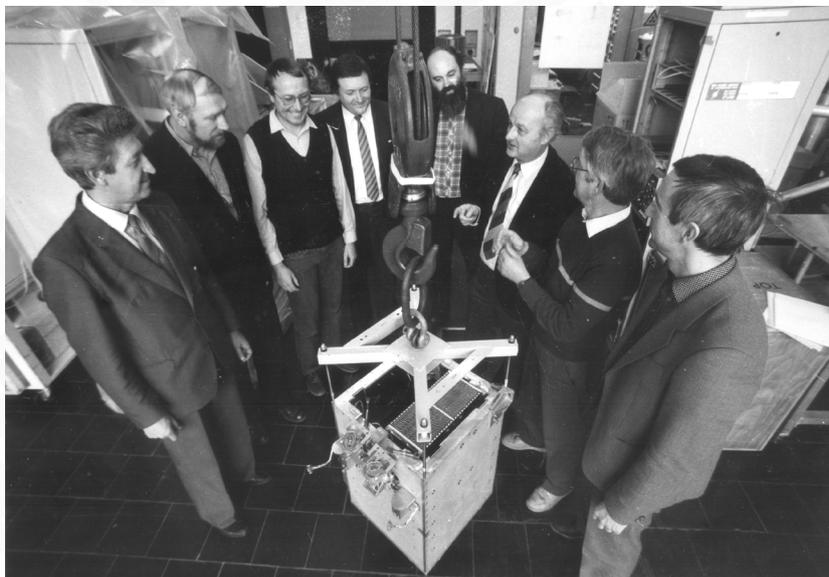


Обсерватория МИР-КВАНТ 25 лет со дня запуска





На обложке: БМО (теле-
скоп им. Хаббла)
Станция МИР, снимок с
Шаттла (НАСА)



Советские и немецкие ученые вокруг макета детектора ГЕКСЕ в Институте Внеатмосферной физики общества им. Макса Планка в Гаршинге (Германия). Слева направо: Анатолий Нестеренко (НПО Энергия), Александр Кузнецов (ИКИ), Вольфганг Питч (МПЕ), Рашид Сюняев (ИКИ), Олег Прилуцкий (ИКИ), Иоахим Трюмпер (МПЕ), Клаус Реппин (МПЕ), Николай Швец (НПО Энергия). 1987 год.

Одной из важнейших вех в становлении рентгеновской астрономии в Институте Космических Исследований и в Советском Союзе в целом явился проект рентгеновской обсерватории на модуле «Квант» комплекса космической станции МИР. Результаты, полученные модулем «Квант», собрали более 1000 цитирований в мировой научной литературе. Рентгеновские источники, открытые «Квантом», продолжают исследоваться новейшими рентгеновскими спутниками.

В 70-е и в начале 80-х годов интенсивные работы в области рентгеновской астрономии велись в группе профессора В.Г.Курта и к.ф.-м.н. Е.К.Шеффера, установивших рентгеновские детекторы на спутнике «Космос-335» еще до запуска американского спутника «Ухуру», а также в группе к.ф.-м.н. А.С.Мелиоранского, работавшего с детекторами жесткого рентгеновского излучения на спутниках «Прогноз» и советских космических станциях. Замечательные результаты были получены группой под руководством

Е.П.Мазеца, впоследствии член-корр. АН СССР, по исследованию гамма-всплесков и магнетаров на спутниках серии «Космос» и межпланетных станциях «Венера». Группа В.Г.Курта и Е.К.Шеффера установила рентгеновские счетчики на спутнике «АСТРОН», наблюдавшем, в частности, рентгеновский пульсар Геркулес X-1.

В 80х годах политическое руководство Советского Союза и руководство Академии Наук СССР инициировало и поддержало сильное расширение международного сотрудничества в области космических исследований. В основном это было сотрудничество в области планетных исследований и исследований околоземной и межпланетной плазмы. К этому же времени относится заключение соглашений с Техническим Центром Европейского Космического Агентства (ESTEC), голландским Центром Космических Исследований SRON в Утрехте и Институтом Внеатмосферной Физики Общества им. Макса Планка в Гаршинге (Германия) о возможности установки рентгеновских приборов, изготовленных в этих институтах, на одном из модулей проектируемой космической станции МИР. С советской стороны отвечать за эту программу было поручено Институту Космических Исследований АН СССР. Научным руководителем обсерватории стал член-корр. АН СССР Р.А.Сюняев. Техническую поддержку ученым и связь с космической промышленностью осуществлял отдел к.ф.-м.н. О.Ф.Прилуцкого и В.Г.Родина. Создание аппаратуры для планируемой обсерватории на первом модуле космической станции МИР, получившем впоследствии название «Квант», было поддержано председателем Интеркосмоса академиком В.А.Котельниковым, директором ИКИ АН СССР академиком Р.З.Сагдеевым и Трижды Героем Социалистического труда, крупнейшим советским физиком и астрофизиком академиком Я.Б.Зельдовичем.

Обсерватория

В состав рентгеновской обсерватории на модуле «Квант» было включено четыре прибора.

Телескоп с теневой маской ТТМ (английское название COMIS – Coded Mask Imaging Spectrometer) был способен строить изображения участков неба размером 15x15 градусов с угловым разрешением около 2 угл.минут. в диапазоне энергий 2-30 кэВ. Его кодирующая маска и позиционно-чувствительный детектор были изготовлены в SRON под руководством А. Бринкмана, а электроника и звездный датчик – в Бирмингемском университете Великобритании под руководством проф. П. Вилмора и Дж. Скиннера.

Вторым прибором обсерватории был прибор GSPC (Сирень-2) производства Технического Центра ЕКА, изготовленный под руководством Р. Андресена и А. Пикока. Это был газовый счетчик высокого давления, предназначенный для наблюдений в диапазоне энергий 2 – 100 кэВ. К сожалению, прак-

тически в самом начале работы обсерватории прибор вышел из строя.

Рентгеновский спектрометр ГЕКСЕ (HEXE – High Energy X-ray Experiment – «Эксперимент для жесткого рентгеновского диапазона») был изготовлен в Институте внеатмосферной физики Общества им.Макса Планка под руководством профессора Й.Трюмпера, К. Реппина при участии Тюбингенского университета. Это был детектор типа фосфич на основе сцинтилляционных кристаллов NaI/CsI с качающимся коллиматором, чувствительный в диапазоне энергий от 15 до 200 кэВ.



Эмблема прибора ГЕКСЕ (Нехе по-немецки означает «ведьма»)

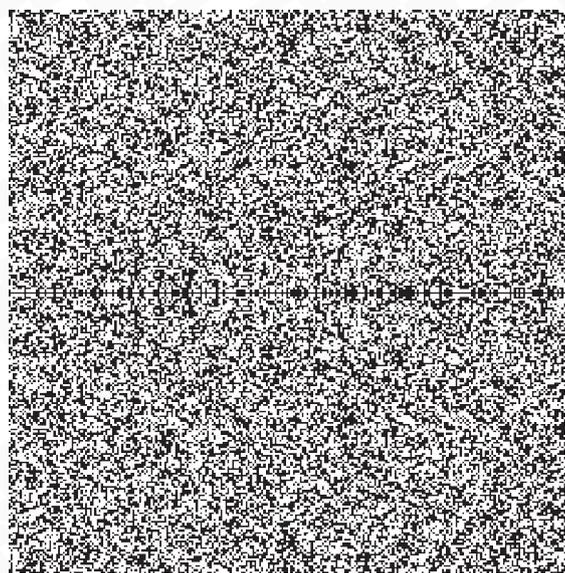
Советский прибор «Пульсар X-1» был изготовлен под руководством А.С.Мелиоранского. Также сделанный на основе детекторов из кристаллов NaI/CsI, он был способен строить спектры излучения в жестком рентгеновском и гамма-диапазоне энергий от 30 до 800 кэВ. В его создании участвовали производители кристаллов в Усолье-Сибирском и Харькове, механическая структура прибора, источники высокого напряжения и часть электроники были изготовлены в Институте космических исследований АН Азербайджанской ССР в Баку, а цифровая электроника в филиале ИКИ АН СССР в г.Фрунзе (ныне Бишкек) Киргизской ССР. Приемка приборов и работы по стыковке с аппаратурой модуля КВАНТ и станции МИР и испытания проводились в ИКИ РАН и в НПО Энергия. Сам модуль «Квант» был изготовлен заводом им. Хруничева.

Запуск и стыковка

Модуль «Квант» был выведен на орбиту ракетой ПРОТОН с космодрома Байконур 31 марта 1987 года. После запуска должна была произойти стыковка модуля с космической станцией МИР. К сожалению, две попытки стыковки завершились неудачей. Серьезно стоял вопрос о затоплении модуля в Тихом океане. В ходе бессонной и драматичной для многих людей ночи было выяснено, что в стыковочном узле оказались материалы, которых при нормальной ситуации там не должно было быть. Совершив выход в открытый космос, космонавты смогли удалить эти материалы из стыковочного узла, и 3-я попытка стыковки оказалась успешной. Через несколько недель, после проверки всех бортовых систем и рентгеновских детекторов, началась регулярная работа обсерватории. Руководство и технический персонал НПО Энергия и Центра Управления Полетами делали все возможное для успеха работы обсерватории.



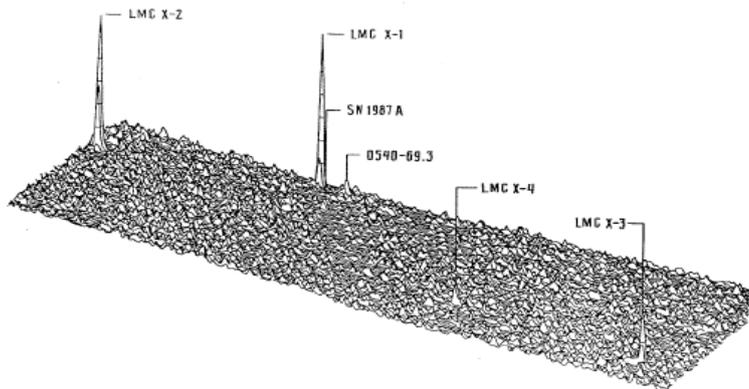
Габаритно-массовая модель телескопа с кодирующей апертурой ТТМ в Контрольно-испытательной станции ИКИ АН СССР



Кодирующая маска телескопа ТТМ. Построить изображение неба в рентгеновских лучах совсем не просто, особенно на энергиях выше десяти кэВ. Привычные зеркала нормального падения не способны сфокусировать рентгеновские фотоны из-за их высокой проникающей способности. Технология изготовления зеркал косоугольного падения для жестких рентгеновских фотонов стала реальностью только в наши дни. Поэтому за основу телескопа ТТМ был взят принцип кодирующей апертуры – маска, сделанная из непрозрачного для рентгеновского излучения материала, помещается над позиционно-чувствительным детектором. Излучение от рентгеновского источника через многочисленные отверстия в маске отбрасывает систему ярких пятен на детектор. Кросс-корреляция изображения детектора и маски позволяет восстановить направление приходящего излучения. Аспиранты М.Гильфанов и Е.Чуразов разработали целый комплекс алгоритмов, позволявший на компьютерах ИКИ строить изображения и спектры, полученные по данным телескопа ТТМ. Это был один из первых долговременных экспериментов с кодирующей маской, в полной мере продемонстрировавший потенциал подобной схемы. Замечательно, что такой принцип подходит для любого жесткого излучения, если можно сделать маску, непрозрачную для этого излучения. Этот принцип был использован и в телескопах обсерваторий ГРАНАТ и ИНТЕГРАЛ, работавших в более жестких рентгеновских лучах.

Сверхновая 1987А в Большом Магеллановом Облаке

Незадолго до запуска модуля «Квант», 23 февраля 1987 г., в ближайшей к нам галактике Большое Магелланово Облако вспыхнула Сверхновая звезда, которая в пике яркости была видна на пределе чувствительности человеческого глаза. Это была самая яркая Сверхновая за последние 400 лет, со времен Бориса Годунова. Она получила название Сверхновая 1987А.



Изображение области Большого Магелланова Облака в диапазоне 2-30 кэВ, полученное прибором ТТМ в ходе наблюдений летом 1987 года

Большинство ученых в области астрофизики высоких энергий считали, что почти сразу после взрыва близкой Сверхновой наблюдатели увидят следы ускорения космических лучей в ударных волнах и сопровождающие их радио и жесткое гамма-излучение с энергией фотонов в сотни МэВ и ГэВ, появление ярчайшего пульсара типа пульсара в Крабовидной Туманности или мощного источника излучения, связанного с аккрецирующей черной дырой.

Время шло, а оптические телескопы детектировали лишь экспоненциальное падение яркости оптического излучения от Сверхновой.

Рентгеновские телескопы «Кванта» начали систематические наблюдения Сверхновой в надежде увидеть ее рентгеновское излучение практически сразу после запуска.

Одновременно теоретики в ИКИ АН СССР пытались предсказать спектр излучения, возникающего вследствие радиоактивного распада никеля-56, синтезированного при коллапсе и гибели звезды и выброшенного в околосреднее пространство вместе с внешними слоями погибшей звезды. Первые же оценки показали, что оптическая толща расширяющейся оболочки по Комптоновскому рассеянию очень велика, и гамма-линии радиоактивного распада никеля-56, превращающегося в кобальт-56, а затем в привычное нам железо, не имеют никаких шансов выйти из оболочки. Эффект отдачи при каждом рассеянии должен был приводить к уменьшению энергии гамма-квантов от многих сотен и даже тысячи кэВ до нескольких кэВ. На этих энергиях в игру вступало фотопоглощение на атомах сброшенной оболочки, сильно обогащенной продуктами взрыва. В результате гамма-излучение полностью перерабатывалось на этой стадии в тепло и излучалось в оптических и инфракрасных лучах.

Аспирант (ныне д.ф.м.н.) С.А.Гребенев под руководством Р.А.Сюняева подготовил программу Монте-Карло и рассчитал ожидаемый спектр излучения Сверхновой. Оказалось, что на более поздней стадии, когда оптическая толща оболочки по Комптоновскому рассеянию упадет до ~10–20, Сверхновая должна стать видимой в жестких рентгеновских лучах.

Тем временем, наблюдения продолжались. Данные поступали в ИКИ на магнитных лентах в отдел П.Е.Эльясберга и Р.Р.Назирова. После

NATURE VOL. 330 19 NOVEMBER 1987

LETTERS TO NATURE

227

Discovery of hard X-ray emission from supernova 1987A

R. Sunyaev*, A. Kaniovsky*, V. Efremov*, M. Gilfanov*, E. Churazov*, S. Grebenev*, A. Kuznetsov*, A. Melioranskiy*, N. Yamburenko*, S. Yunin*, D. Stepanov*, I. Chulkov*, N. Pappe*, M. Boyarskiy*, E. Gavrilova*, V. Loznikov*, A. Prudkoglyad*, V. Rodin*, C. Reppin†, W. Pietsch‡, J. Engelhauser†, J. Trümper†, W. Voges†, E. Kendziorra‡, M. Bezler†, R. Staubert†, A. C. Brinkman§, J. Heise§, W. A. Mels§, R. Jager§, G. K. Skinner||, O. Al-Emam||, T. G. Patterson|| & A. P. Willmore||

* Space Research Institute, USSR Academy of Sciences, Moscow, USSR

† Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik, Institut für Extraterrestrische Physik, 8046 Garching, FRG

‡ Astronomisches Institut der Universität Tübingen, 7400 Tübingen, FRG

§ Space Research Laboratory, Utrecht, The Netherlands

|| Department of Space Research, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham B15 2TT, UK

We report the discovery of hard X-rays from the region of the supernova SN1987A in the Large Magellanic Cloud. The observations were made from the Mir-Kvant observatory 'Röntgen'. Hard X-rays were first observed on 10 August 1987 and SN1987A then became the main target of the observatory. Up to 15 September 1987, a total of 115 pointings on 21 days were made. The flux

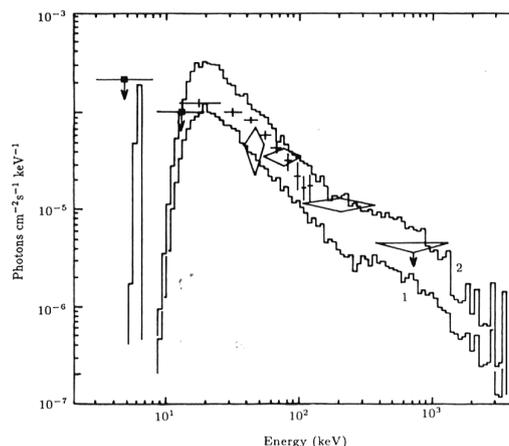
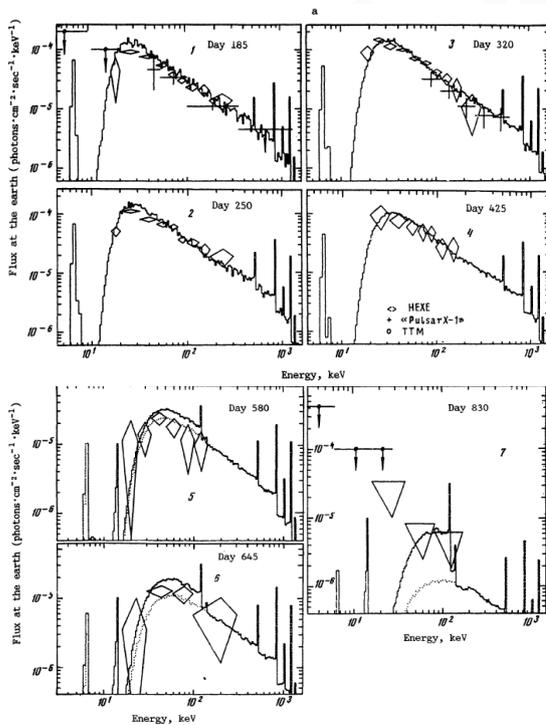


Fig. 1 Preliminary energy spectrum of the hard X-rays. Squares, 3σ upper limits from TTM; crosses, detections with HEXE (1σ error bars); diamonds, detections and 3σ upper limits obtained with Pulsar X-1. The histograms show the results of Monte Carlo simulations by Grebenev and Sunyaev¹⁰, assuming $0.1 M_{\odot}$ of ^{56}Co , an expanding envelope of $16 M_{\odot}$ with metallicity $1/3$ solar, and mean expansion velocity $4,150 \text{ km s}^{-1}$, 180 days (1) and 210 days (2) after the explosion. The histogram bins in the region of the Fe fluorescence line are 0.5 keV wide.

Титульная страница статьи в журнале Nature об открытии жесткого рентгеновского излучения от Сверхновой 1987А



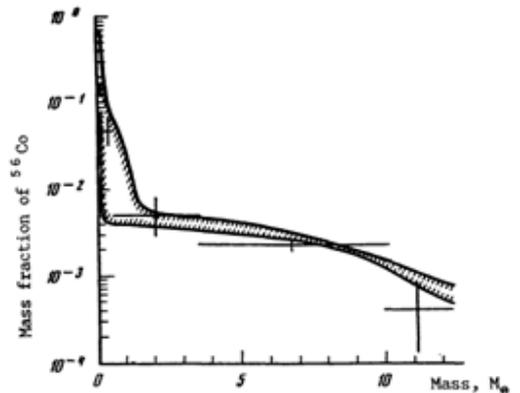
Спектры жесткого рентгеновского излучения от Сверхновой 1987А, зарегистрированные приборами модуля «Квант», в период с августа 1987 г. по июнь 1989 г. в сравнении с предсказаниями расчетов методом Монте-Карло. В верхнем углу каждого графика приведено время, прошедшее с момента взрыва. Радиоактивный никель распадается в радиоактивный кобальт на масштабе дней. Период полураспада кобальта в железо заметно длиннее -79 дней для изотопа кобальт-56 и 270 дней для изотопа кобальт-57. За время наблюдений КВАНТа количество радиоактивного кобальта-56 уменьшилось в 1400 раз, кобальта-57 в восемь раз.

предварительной обработки в группе под руководством Е.А.Гавриловой, данные поступали в молодой коллектив отдела астрофизики высоких энергий, проводивший детальную обработку данных. Роль связующего звена между ИКИ и ЦУПом на протяжении всех этих лет успешно исполнял А.В.Прудкогляд, сотрудник отдела О.Ф. Прилуцкого и В.Г. Родина. Следует отметить, что в то время главным прибором для визуализации данных был комплекс СВИТ, созданный в группе Л.С.Чесалина непосредственно в ИКИ.

Наконец в один из поздних вечеров молодой выпускник МФТИ А.С.Каниовский обнаружил необычный сигнал из направления на Сверхновую, зарегистрированный прибором HEXE в жестких рентгеновских лучах. Этот сигнал был необычен по своему спектру. Объект наблюдался приборами HEXE и Пульсар X-1 на энергиях, превышавших 20 кэВ, и имел очень жесткий спектр. Основная энергия излучения от Сверхновой приходила на самых высоких энергиях фотонов, доступных «Кванту». Обычно гораздо более чувствительный телескоп TTM одновременно строил карту всей галактики Большое Магелланово Облако, регистрируя там аккрецирующие черные дыры LMC X-1 и LMC X-3, нейтронные звезды LMC X-2 и LMC X-4, а также очень слабый пульсар PSR0540-69, аналог пульсара в Крабовидной Туманности, излучающий в рентгеновских лучах. Но TTM не регистрировал никакого сигнала от Сверхновой 1987А, которая в жестких рентгеновских лучах стала самым ярким источником в БМО.

Поразительно, но спектр, регистрировавшийся от Сверхновой, был очень похож на предсказания расчетов методом Монте-Карло. Именно этот факт позволил молодой команде отдела астрофизики высоких энергий ИКИ убедить западных коллег, что действительно наблюдается сигнал от Сверхновой. Опытным рентгеновским астрономам было непросто свыкнуться с мыслью, что наиболее чувствительный прибор обсерватории может не видеть источник, который оказался столь ярким в жестких рентгеновских лучах. Результаты этих наблюдений были опубликованы в журнале Nature, и к настоящему времени на эту работу сделано 165 ссылок. Это был уникальный результат – за 25 лет с момента появления на небе Сверхновой 1987А астрономам больше не выпал шанс наблюдать источники с таким спектром, несмотря на увеличение чувствительности инструментов в десятков раз.

Во время взрыва в недрах звезды было синтезировано около 7% массы Солнца в виде радиоактивного никеля-56. Раннее появление рентгеновского излучения от Сверхновой (через полгода после взрыва) явилось важным индикатором того, как радиоактивные элементы перемешаны в расширяющейся оболочке. Если бы весь никель был сосредоточен в центральной зоне, то потребовалось бы гораздо больше времени для того, чтобы внешние слои оболочки сверхновой расширились и стали прозрачными



Распределение радиоактивного никеля в оболочке Сверхновой

для излучения.

Другим важным результатом стало ограничение на долю другого радиоактивного изотопа – никеля-57. Конечными продуктами распада обоих изотопов никеля являются стабильные изотопы железа с массами 56 и 57. На Земле обилие железа-57 составляет примерно 2.4% от обычного железа-56. Например, в нашей крови гемоглобин содержит изотопы железа именно в таком соотношении. Трансформация никеля-57 в кобальт, а затем в железо-57 происходит гораздо медленнее, чем для никеля-56. Измерения поведения потока жесткого излучения от Сверхновой показали, что обилие никеля-57 не более чем в полтора раза превышает земное обилие этого изотопа.

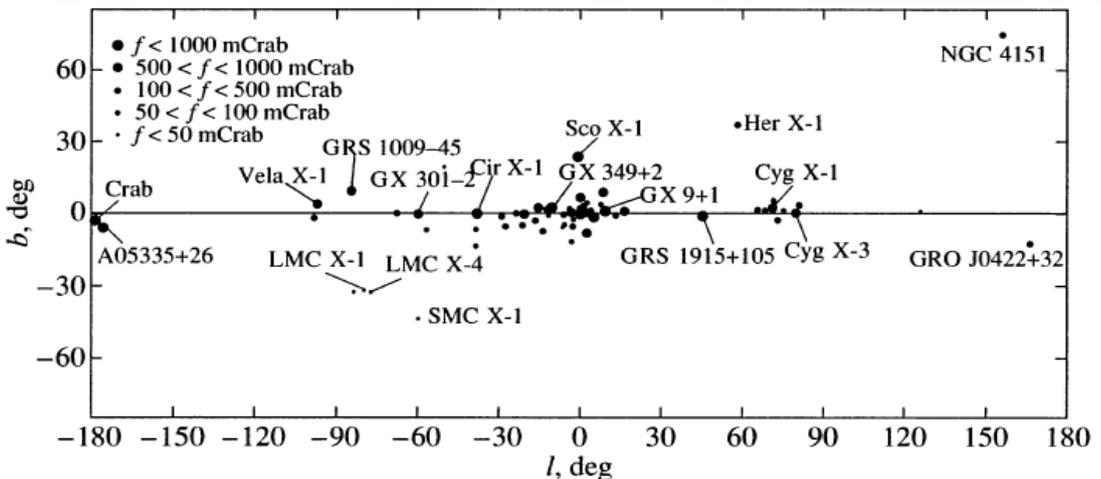
«Квант» продолжал следить за Сверхновой и



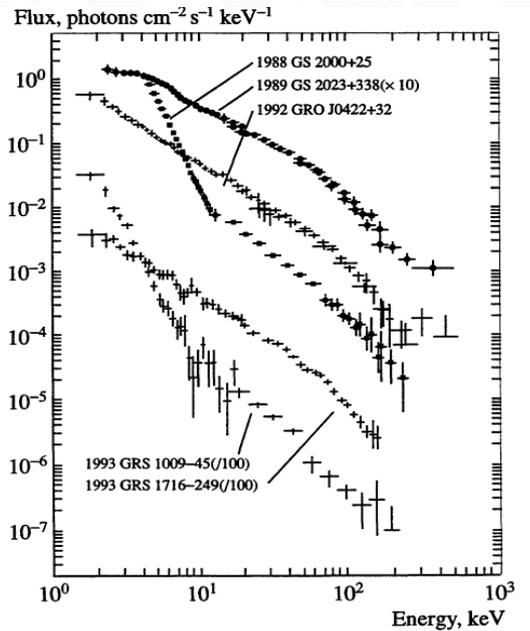
Титульная страница газеты «De Telegraaf» – наиболее популярной газеты в Нидерландах, выпуск в июне 1988 г. Заголовок статьи, посвященной замене детектора телескопа ТТМ, гласит: «Космонавты выполнили необычную работу для нашей страны» (из архива Жана ин'т Занда)

фиксировал, как она угасала в рентгеновских лучах. Люди, работавшие со станцией, совершали чудеса, понимая важность этой работы для науки. Ученые ИКИ АН СССР чувствовали постоянную поддержку Главного Конструктора НПО «Энергия» д.т.н. (впоследствии академика) Ю.П. Семенова и заместителя руководителя полетом Виктора Благова. Космонавты, работавшие на станции МИР в 1987-2001 годах, три раза выходили в открытый космос для обеспечения нормальной работы Обсерватории на модуле КВАНТ. Благодаря гиридинам, разработанным под руководством академика Н.Н.Шереметьевского, многотонный комплекс станции МИР наводился на Сверхновую практически с минутной точностью. В течение 1987-1988 года были проведены сотни сеансов наблюдений этого интереснейшего объекта.

Замена детектора телескопа ТТМ



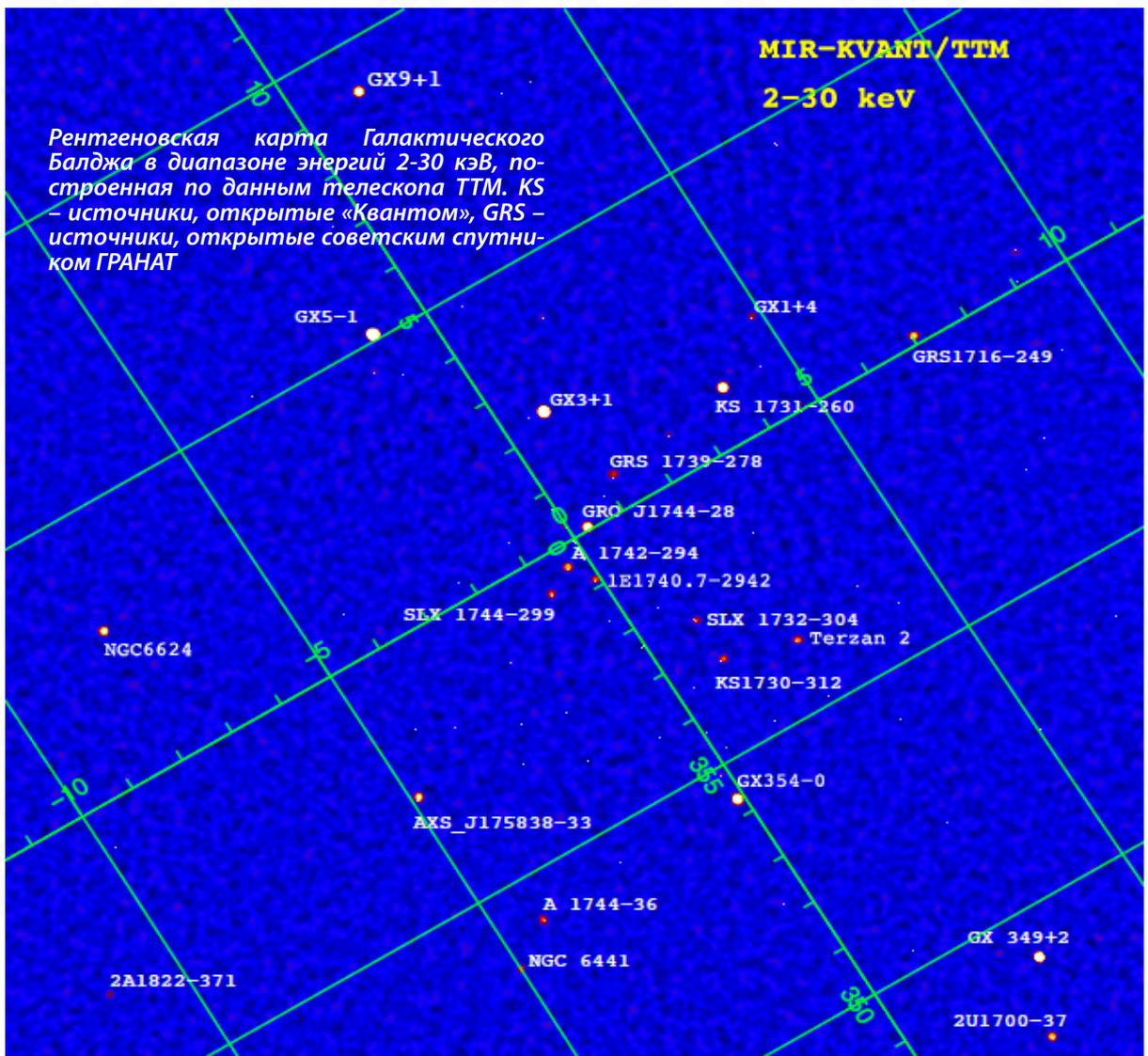
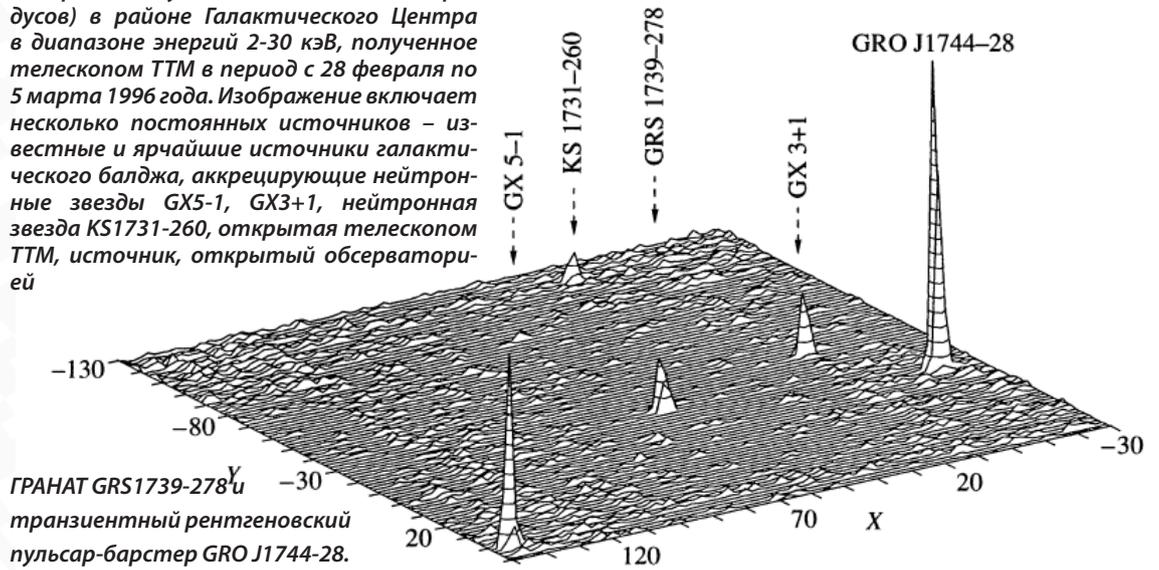
Расположение на небе ярчайших источников, исследовавшихся телескопом ТТМ. Размер символов пропорционален интенсивности источников.

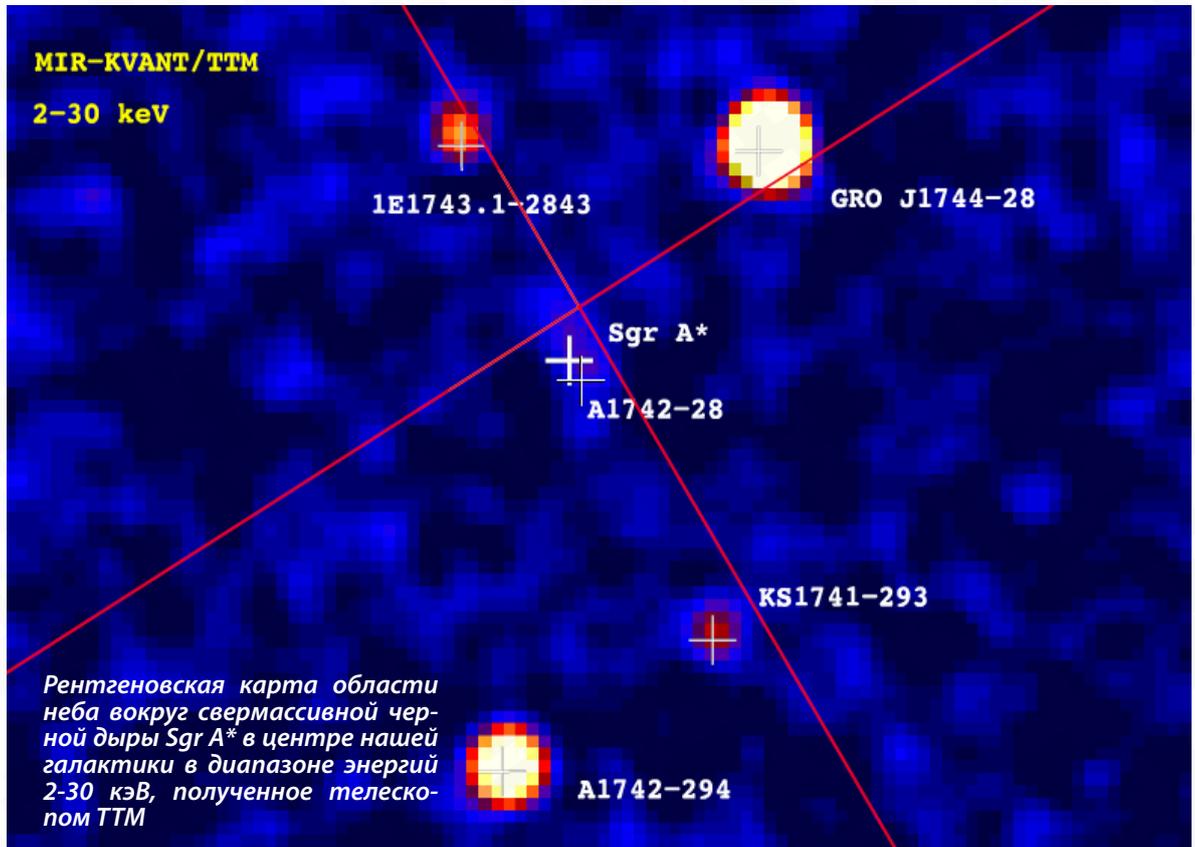


Широкополосные спектры рентгеновских транзиентов-кандидатов в черные дыры, исследовавшихся приборами модуля «Квант»

К концу 1987 г. возникли сбои в работе источника высоковольтного питания детектора телескопа ТТМ, и прибор постепенно вышел из строя. По просьбе ученых было решено произвести замену блока детектора на орбите. Для этого был необходим выход космонавтов в открытый космос. В начале лета 1988 г. новый детектор был доставлен на орбиту. Первый выход космонавтов в открытый космос в июне 1988 г. для замены детектора телескопа ТТМ закончился неудачно из-за проблем с удалением элементов крепления детектора. Эта проблема была решена, и во время второго выхода в космос 20 октября 1988 г. блок детектора телескопа ТТМ был успешно заменен. После этого телескоп без сбоев проработал до конца функционирования обсерватории.

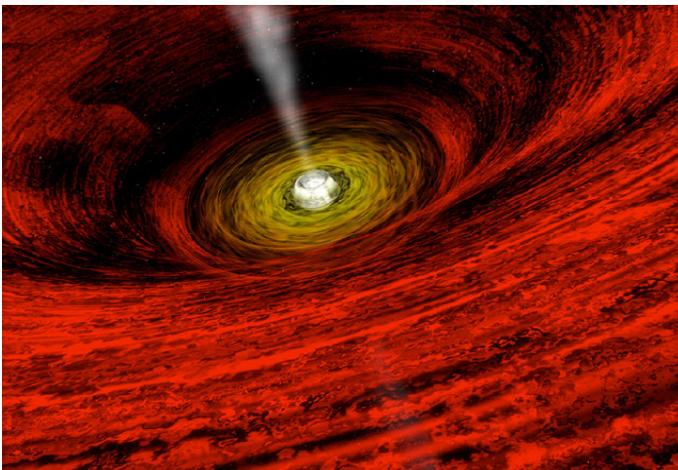
Изображение участка неба (9.1x5.8 градусов) в районе Галактического Центра в диапазоне энергий 2-30 кэВ, полученное телескопом ТТМ в период с 28 февраля по 5 марта 1996 года. Изображение включает несколько постоянных источников – известные и ярчайшие источники галактического балджа, аккрецирующие нейтронные звезды GX5-1, GX3+1, нейтронная звезда KS1731-260, открытая телескопом ТТМ, источник, открытый обсерваторией



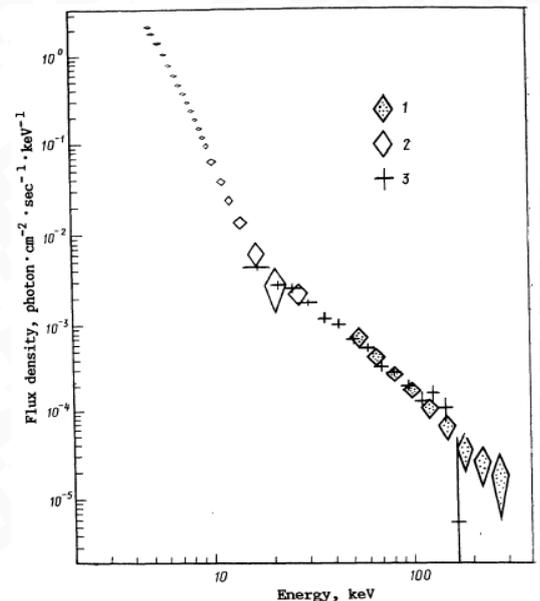


Кандидаты в черные дыры и рентгеновские Новые

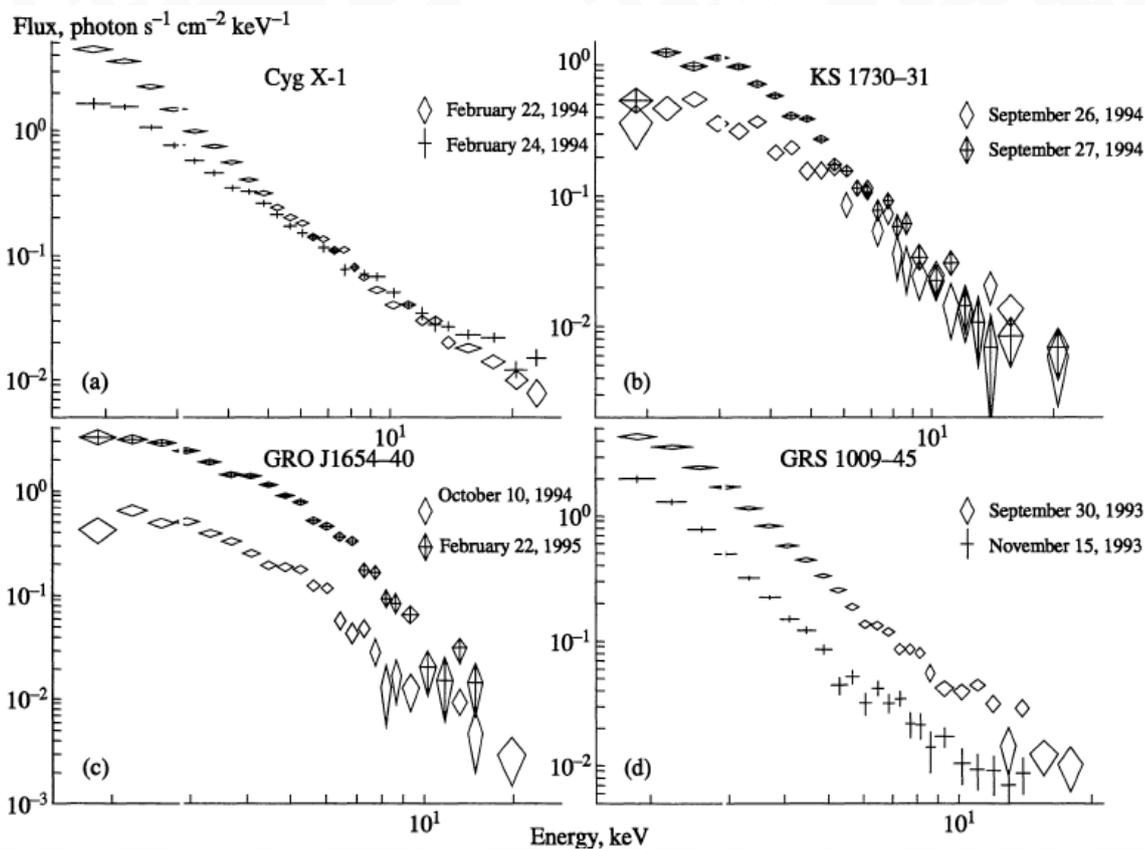
Несмотря на то, что подавляющее большинство астрофизиков не сомневалось в существовании черных дыр звездной массы, получить прямые доказательства того, что источник, излучающий в рентгеновском диапазоне длин волн, действительно является черной дырой, оказалось совсем не простым делом. Именно поэтому такие объекты в эпоху работы обсерватории «Квант»



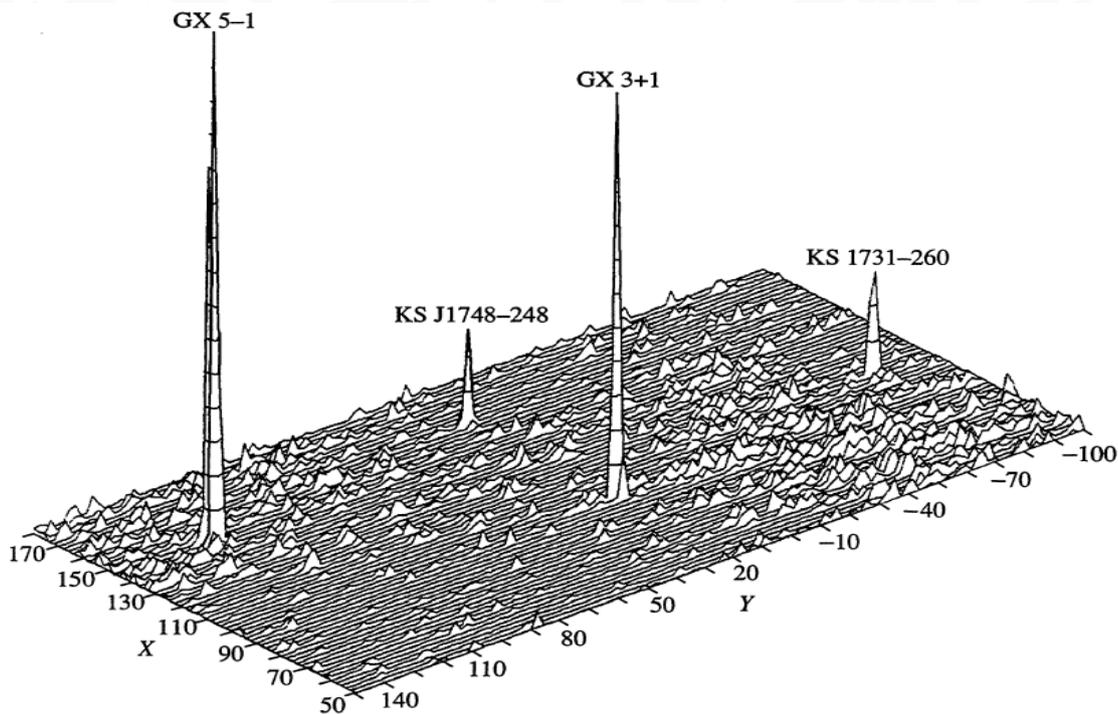
Изображение черной дыры, аккреционного диска вокруг нее и релятивистского джета в представлении художника (НАСА).



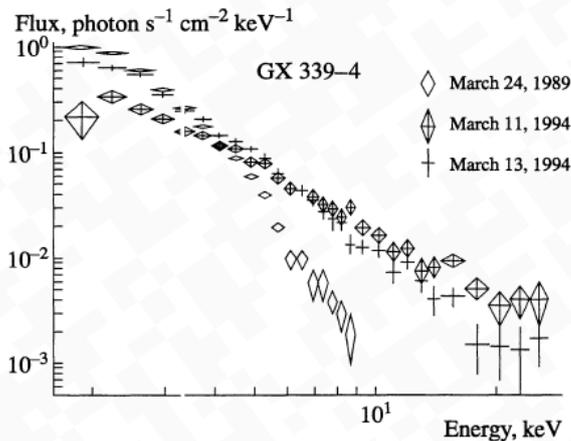
Спектр рентгеновской Новой в созвездии Лисички, полученный приборами модуля «Квант» в мае 1988 г. Различными символами показаны данные прибора Пульсар X-1 (1), ГСПС (2) и ГЕКСЕ (3). В спектре рентгеновской новой хорошо различимы две компоненты: мягкая компонента – тепловое излучение оптически толстого и геометрически тонкого аккреционного диска с характерной температурой около 20 миллионов градусов и жесткая компонента – результат Комptonизации мягкого излучения на горячих электронах короны вблизи черной дыры с температурой порядка миллиарда градусов.



Спектры аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр по данным телескопа ТТМ

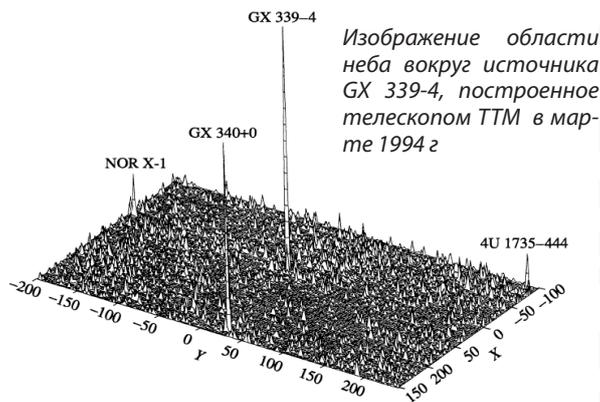


Изображение участка неба (4.0×7.8 градуса) в зоне Центра Галактики, построенное по данным наблюдений телескопа ТТМ в мае 1994 г. На изображении – два источника, открытые телескопом ТТМ, – KS1731-260 и KSJ1748-248.



Изменение спектрального состояния аккрецирующей черной дыры GX 339-4 по данным телескопа ТТМ

было принято называть «кандидатами» в черные дыры. Дело в том, что источником рентгеновского излучения является не сама черная дыра, а падающее на нее вещество с соседней



Изображение области неба вокруг источника GX 339-4, построенное телескопом ТТМ в марте 1994 г

нормальной звезды, которое в процессе падения разогревается до температур, превышающих миллиард градусов. Угловой момент закручивает вещество в диск, излучение которого и видят рентгеновские телескопы.

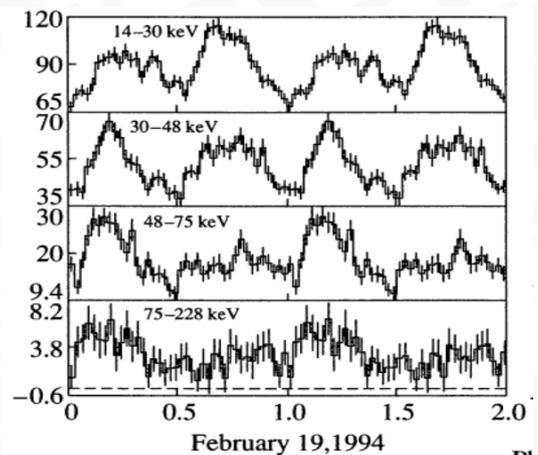
Приборы обсерватории КВАНТ покрывали широкий диапазон энергий от 1 кэВ до 300 кэВ и исследовали много транзиентных черных дыр – рентгеновских Новых, в которых темп аккреции вещества меняется на много порядков на масштабе дней и месяцев. В результате этого на небе появляются яркие нестационарные рентгеновские источники, блеск которых спадает с характерным временем несколько недель или месяцев. Источник исчезает, иногда появляясь вновь через 20-40 лет. Среди семи рентгеновских Новых, наблюдавшихся обсерваторией КВАНТ, есть такие «знаковые» объекты, как GS2023+338 или GROJ0422+32 – ярчайшие источники на всем небе, о каждом из которых написаны десятки статей. Характер течения вещества и спектр рентгеновского излучения Новых радикально меняются от очень мягкого излучения в состоянии с высоким темпом аккреции до

очень жесткого излучения при малых темпах аккреции. Широкополосные спектры кандидатов в черные дыры стали общепризнанным методом определения природы объекта и его темпа аккреции во многом благодаря результатам, полученным обсерваторией «Квант».

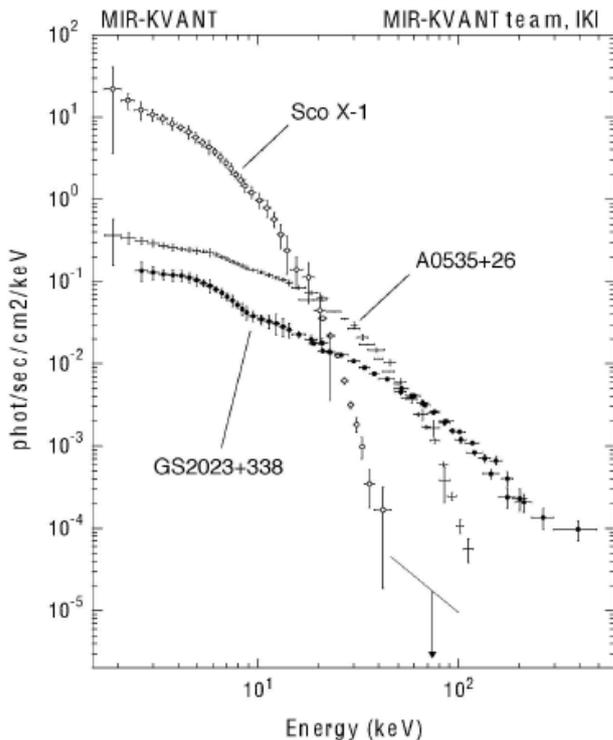
Центральная Зона Галактики в рентгеновских лучах и различные типы рентгеновских источников

Большое поле зрения и хорошее угловое разрешение телескопа ТТМ оказалось отлично приспособлено к мониторингованию больших участков неба в рентгеновском диапазоне. В частности, обсерватория провела детальное исследование области Центра нашей Галактики. В оптическом диапазоне Центр Галактики скрыт от нас толщей пыли и газа. В то же время, рентгеновские лучи свободно проникают сквозь пыль, позволяя заглянуть почти в любую точку Галактики. Сверхмассивная черная дыра с массой в 4 миллиона солнечных масс никак не проявляет себя на картах Центра Галактики, построенных обсерваторией «Квант», в то время как черные дыры звездной массы и нейтронные звезды являются мощными источниками рентгеновского излучения. Обсерватория «Квант» наблюдала в области Центра Галактики рентгеновские источники различной природы – рентгеновские пульсары, рентгеновские барстеры, аккрецирующие черные дыры. Часть из этих источников была открыта самим «Квантом», и во всех каталогах носит теперь название «KS» – «Kvant Source», или источник «Кванта». Например, источники KS1731-260, KS1732-273, KS1730-312, KS1724-356, KS1739-304, KS1741-293 были найдены в окрестности Центра Галактики. Спектры этих объектов были исследованы всеми приборами обсерватории и продемонстрировали высокий потенциал широкополосной спектроскопии для исследования природы источников и физических процессов формирования рентгеновского излучения.

«Квант» дал первые важные ограничения на яркость источника в Sgr A* – сверхмассивной чер-



Профиль импульса пульсара A0535+26, полученный спектрометром ГЕКСЕ

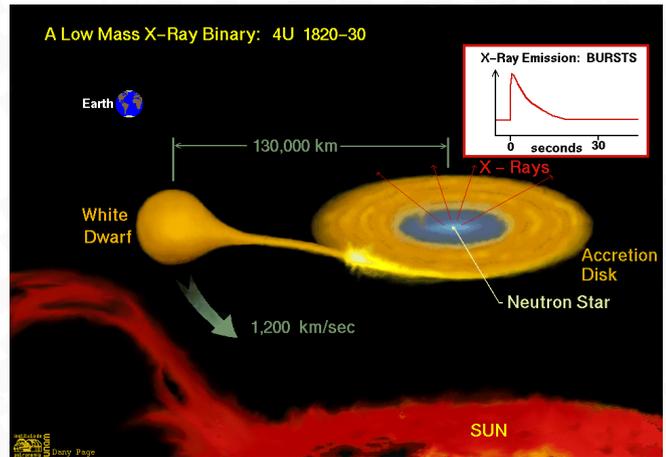


Широкополосные спектры аккрецирующей черной дыры (GS2023+338), аккрецирующей нейтронной звезды со слабым (Sco X-1) и с сильным (рентгеновский пульсар A0535+26) магнитными полями.

ной дыры в центре нашей Галактики, показав, что ее светимость не превышает 10^{35} эрг/с.

Пульсары и барстеры

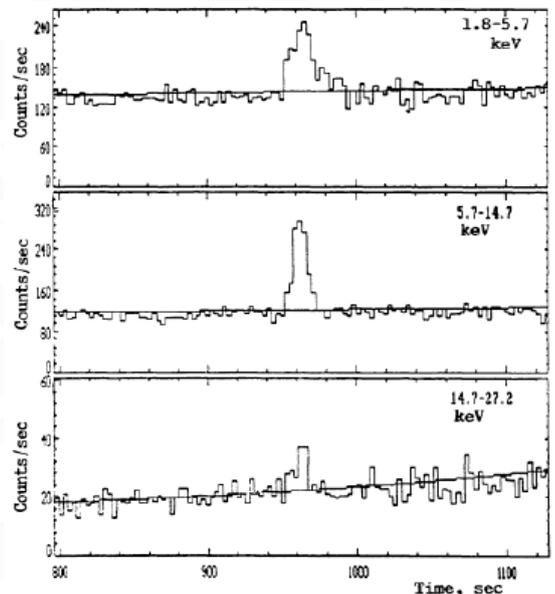
Рентгеновские пульсары и барстеры – это нейтронные звезды, аккрецирующие вещество с соседней звезды компаньона. Основное отличие – это напряженность магнитного поля нейтронной звезды. В пульсарах поле настолько сильное, что вещество фокусируется магнитным полем в узкий канал – аккреционную колонку – в районе полюсов нейтронной звезды. При вращении нейтронной звезды далекий наблюдатель регистрирует переменный поток излучения, пульсирующий с периодом вращения нейтронной звезды, – такая система наблюдается как пульсар. В барстерах, напротив, магнитное поле слабое, поток вещества не модулируется полем, и пульсаций рентгеновского излучения не видно. Однако, на поверхности нейтронной звезды время от времени происходят термоядерные взрывы накопленного в результате аккреции вещества, приводя к появлению коротких (порядка 10 секунд) всплесков рентгеновского излучения. Такие всплески являются одним из надежнейших доказательств того, что наблюдаемый объект является нейтронной звездой. Существует правило – источники всплесков не пульсируют, а пульсары не дают всплесков, хотя это правило иногда нарушается. Оба класса источников интенсивно исследовались обсерваторией «Квант». Телескопы «Кванта» следили за эволюцией периодов вращения



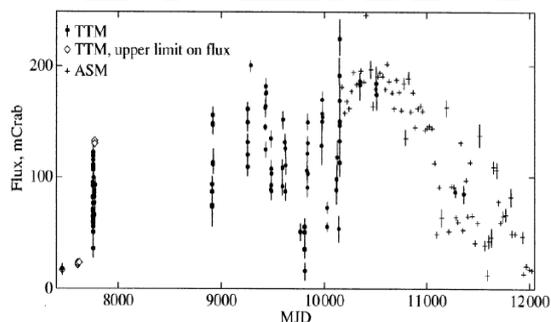
Аккрецирующая нейтронная звезда в составе двойной звездной системы в представлении художника (НАСА).

9 рентгеновских пульсаров, в том числе таких уникальных объектов, как ярчайшие транзитные пульсары GROJ1744-28 и A0535+26, и исследовали временные профили их излучения. Изменение периода вращения аккрецирующей нейтронной звезды определяется угловым моментом вещества, захватываемого на границе магнитосферы пульсара. Эта граница может сдвигаться при изменении темпа аккреции вещества, приводя к эпизодам ускорения или замедления пульсара. Убедительный пример такого поведения – эволюция периода пульсара Hercules X-1, исследовавшаяся приборами многих рентгеновских обсерваторий, включая «Квант».

KS1731-260: история одного барстера



Рентгеновский всплеск, зарегистрированный телескопом ТТМ от источника KS1731-260 в разных энергетических каналах. Всплеск связан с термоядерным взрывом накопленного за десятки часов в результате аккреции вещества. Его детектирование телескопом ТТМ послужило доказательством того, что компактный объект в рентгеновской двойной является нейтронной звездой.



История эволюции потока рентгеновского излучения от нейтронной звезды KS1731-260, открытой телескопом ТТМ

При аккреции на нейтронную звезду со слабым магнитным полем падающее вещество в аккреционном диске может достигать поверхности нейтронной звезды. Кеплеровская скорость вещества в диске быстро нарастает с уменьшением радиуса. В результате аккреция может ускорять вращение звезды вплоть до периодов 1-2 миллисекунды. Одна из таких быстровращающихся нейтронных звезд была открыта телескопом ТТМ в области Центра Галактики. Яркий новый источник, получивший название KS1731-260, был обнаружен М.Р.Гильфановым по данным телескопа ТТМ обсерватории «Квант» 16 августа 1989 года. Причем за год до этого никаких признаков рентгеновского излучения из этой области не было. Детектирование нескольких рентгеновских всплесков продолжительностью меньше 15 секунд сразу указало на природу источника – нейтронную звезду со слабым магнитным полем. Позднее было обнаружено, что это одна из наиболее быстро вращающихся нейтронных звезд, известных науке, с периодом вращения 1.9 мсек. Этот объект был одним из ярчайших на небе в течение 15 лет, а затем его светимость упала в 10000 раз. Наблюдения обсерватории «Чандра» обнаружили на месте источника остывающую нейтронную звезду с температурой поверхности около 3 миллионов градусов. Скорее всего, нейтронная звезда была разогрета во время активной фазы аккреции, наблюдавшейся обсерваторией «Квант». Последующие наблюдения показали, что звезда продолжает остывать.

Команда КВАНТА

Научным руководителем программы астрофизических исследований на модуле «Квант» был член-корр. АН СССР (ныне академик РАН) Р.А.Сюняев. За разработку и изготовление инструментов отвечали проф. Йоахим Трюмпер и др. Клаус Реппин (Германия), др. Берт Бринкман (Нидерланды), проф. Питер Вилмор и Др. Джерри Скинер (Великобритания), к.ф.м.н. А.С.Мелиоранский (ИКИ АН СССР). Важнейшую роль в обработке данных «Кванта» сыграли аспиранты М.Р.Гильфанов (ныне профессор,

д.ф.м.н.) и Е.М.Чуразов (ныне член-корр. РАН). Именно ими было создано программное обеспечение, позволившее строить рентгеновские изображения неба прибором с теневой маской ТТМ, и решена задача об измерении точных периодов рентгеновских пульсаров. Естественно, решению этой задачи способствовала привязка бортового времени ко всемирному времени с точностью 1 миллисекунда. После запуска обсерватории ГРАНАТ в декабре 1989 эстафету успешной работы с прибором ТТМ приняли к.ф.м.н. К.Н.Бороздин, В.А.Арефьев и Н.Л.Александрович. Ключевую роль в обработке данных спектрометра ГЕКСЕ и открытии жесткого рентгеновского излучения от Сверхновой 1987А сыграли А.С.Каниовский (ныне к.ф.м.н.) и В.В.Ефремов. Данные спектрометра «Пульсар X-1» обрабатывали Д.К.Степанов и С.Н.Юнин. С прибором ГСПС работали И.Ю.Лапшов (ныне к.ф.м.н.) и С.А.Гребенев (ныне д.ф.м.н.). На «Кванте» выросли и стали профессионалами в обработке данных с рентгеновских телескопов более десятка молодых ученых в отделе астрофизики высоких энергий ИКИ. На основе его данных было защищено 8 кандидатских диссертаций.

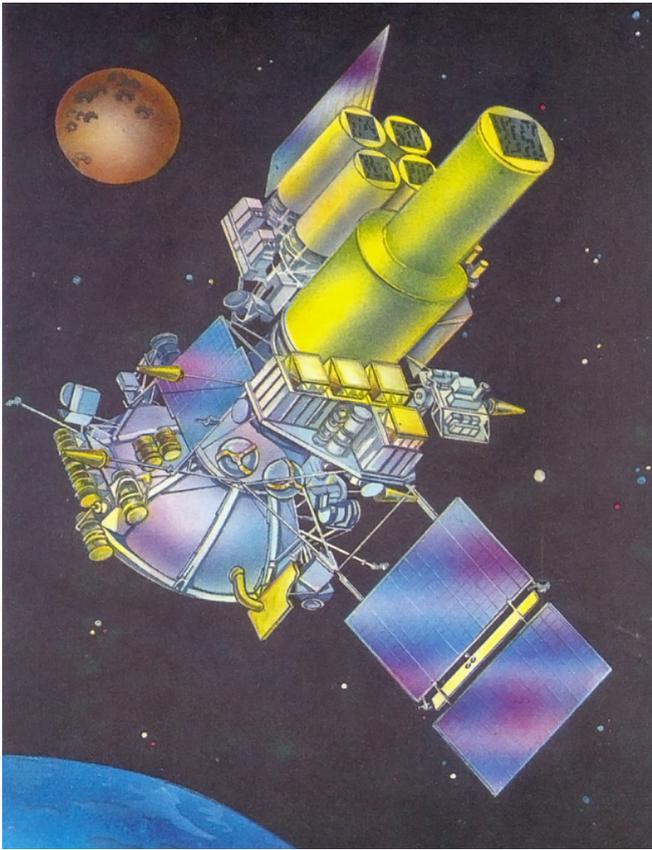
Настоящее и будущее рентгеновской астрономии в России: от модуля «Квант» до обсерватории Спектр-Рентген-Гамма

В 2001 году модуль «Квант» вместе со станцией МИР был затоплен в Тихом океане.

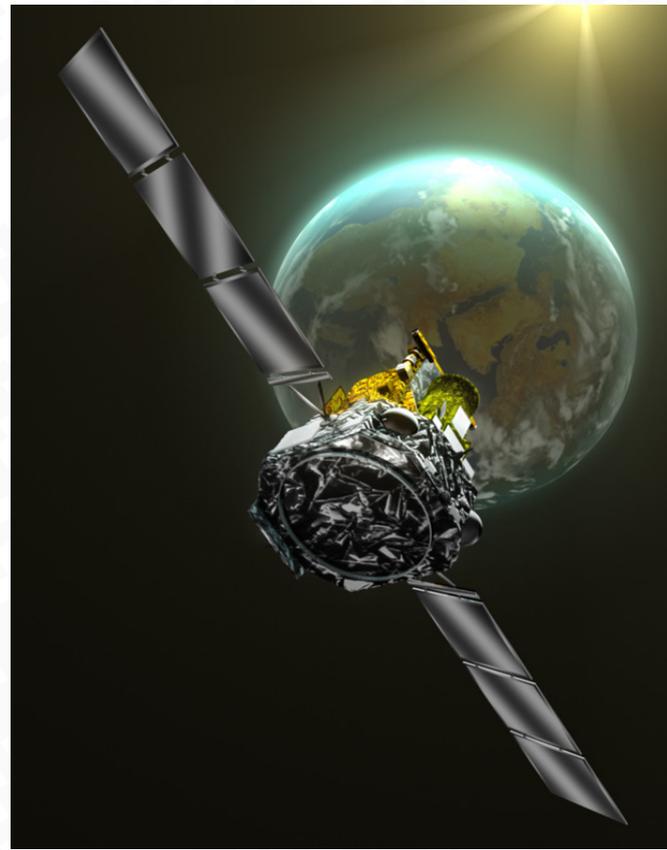
По данным обсерватории «Квант» было опубликовано около 100 статей, набравших более 1000 ссылок в мировой астрофизической литературе. Было исследовано множество ярких рентгеновских источников, прослежена эволюция мощнейших вспышек рентгеновских новых, открыто 11 новых источников, включая одну из самых быстровращающихся нейтронных звезд KS1731-260 и черную дыру KS1730-312, открыто жесткое рентгеновское излучение от Сверхновой 1987А в Большом Магеллановом Облаке. Все это принесло обсерватории «Квант» заслуженную известность.

Эстафету успешной работы отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН в области рентгеновской астрономии продолжили орбитальные обсерватории ГРАНАТ (1989–1999 г.) и ИНТЕГРАЛ, выведенный на орбиту ракетой-носителем ПРОТОН в 2002 г. ИНТЕГРАЛ продолжает успешную и продуктивную работу на орбите, отметив в этом году свое десятилетие.

В 1987 г. в СССР было принято решение о создании крупнейшей международной рентгеновской обсерватории Спектр-Рентген-Гамма с участием Великобритании, Дании, Италии, США, Финляндии, Израиля, Германии и Турции. К сожалению, в результате распада Советского Союза запуск обсерватории несколько раз откладывался, а затем в 2003 г. был и вовсе отменен, несмотря на то, что основные телескопы обсер-



Обсерватория ГРАНАТ



Обсерватория ИНТЕГРАЛ

ватории были изготовлены и готовы к работе в космосе (один из них, JET-X, был в 2004 г. запущен на борту американского спутника SWIFT и до сих пор успешно работает на орбите).

В середине 2000-х годов учеными Отдела Астрофизики Высоких Энергий ИКИ РАН, совместно с учеными из Института Внеатмосферной Физики общества им.Макса Планка (Германия), была предложена принципиально новая концепция обсерватории Спектр-Рентген-Гамма, научные задачи и состав научной аппаратуры которой отвечали вызовам современной астрофизики. В настоящее время новая обсерватория Спектр-Рентген-Гамма готовится к запуску. Она является крупнейшим совместным проектом России и Германии в области астрофизики, нацеленным на решение фундаментальных вопросов космологии – свойств и эволюции Вселенной, природы темной энергии и темной материи, возникновения и роста сверхмассивных черных дыр и поиску наиболее редких объектов. Обсерватория будет запущена во внешнюю точку либрации Солнце-Земля и должна проработать в этой точке как минимум семь лет. Главной целью первых четырех лет работы обсерватории должен стать обзор всего неба в рентгеновских лучах с рекордной чувствительностью. Ожидается, что в ходе обзора неба Спектр-Рентген-Гамма обнаружит все скопления галактик в наблюдаемой части Вселенной (около 100 000 скоплений), около 3 млн. аккрецирующих сверхмассивных черных дыр, сотни тысяч звезд с активными коронами, десятки тысяч звездообразующих галактик. И, конечно же, мы надеемся открыть объекты неизвестной природы.

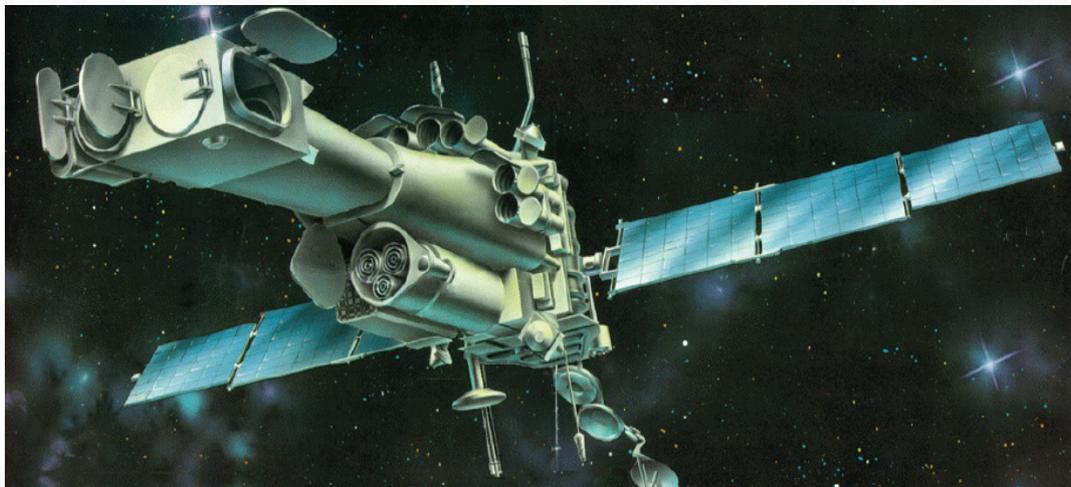
В подготовке материалов участвовали:

проф. М.Р.Гильфанов
академик РАН Р.А.Сюняев
член-корр. РАН Е.М.Чуразов

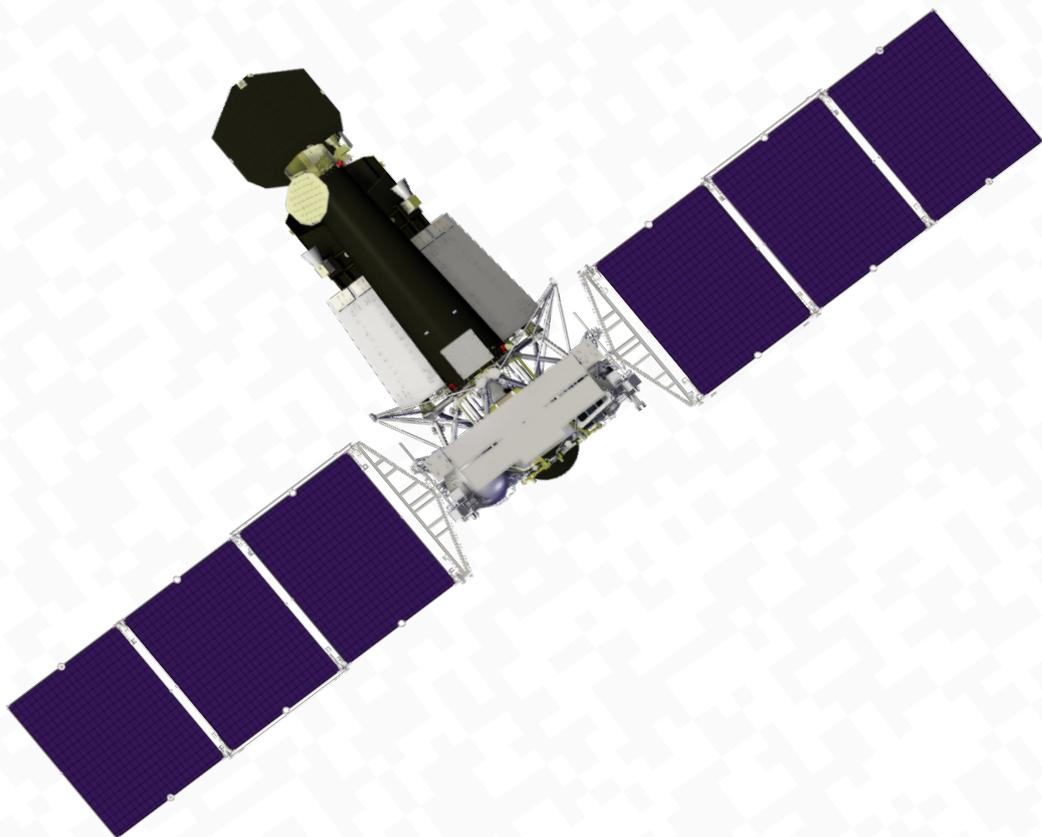
Верстка:

М.Г.Ревнивцев
А.А.Лутовинов

**Буклет изготовлен при поддержке
Российского Фонда Фундаментальных
Исследований (РФФИ)**



Обсерватория Спектр-Рентген-Гамма в ее первоначальной конфигурации, разработанной в конце 80-х – начале 90-х годов. Постер НПО им.Лавочкина. В результате распада Советского Союза, запуск обсерватории несколько раз откладывался, и затем был отменен, несмотря на готовность основных телескопов обсерватории к запуску в космос.



Новая концепция обсерватории Спектр-Рентген-Гамма, планируемой к запуску в 2014 году. Обсерватория будет запущена во внешнюю точку либрации Земля-Солнце и нацелена на решение фундаментальных вопросов космологии – свойств и эволюции Вселенной, природы темной энергии и темной материи, возникновения и роста сверхмассивных черных дыр и поиску астрофизических объектов новой природы.