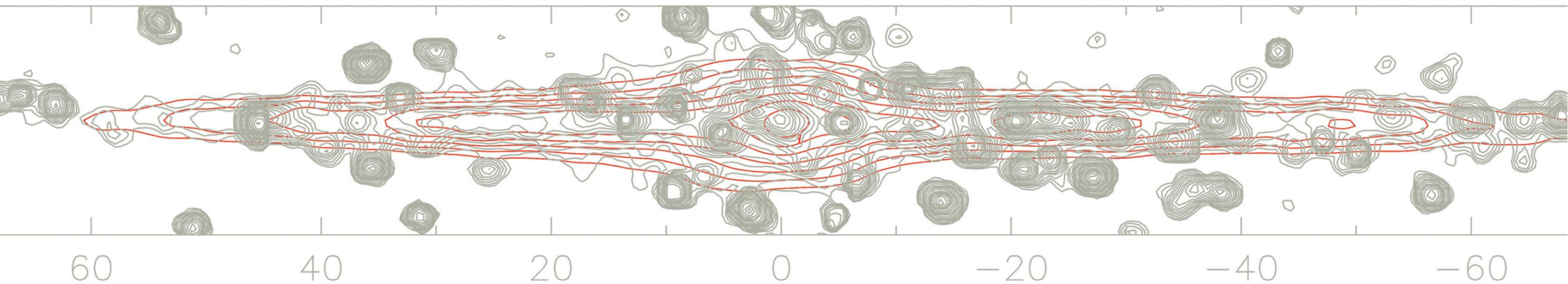


Посвящается памяти Михаила Геннадьевича Ревнивцева



Михаил Геннадьевич РЕВНИВЦЕВ

Mikhail REVNIVTSEV



Galactic longitude

биография

награды

труды

воспоминания

МОСКВА

2019

под редакцией *Лутовинова А. А.*
макет и обложка: *Захаров А. Н.*
вёрстка: *Комарова Н. Ю.*

ПАМЯТИ ДРУГА

Прошло уже больше двух лет, как от нас ушёл Миша Ревнивцев, но ощущение огромной потери не покидает и по сей день. До сих пор не верится, что это случилось. Кажется, что он просто в долгой командировке...

Миша был удивительным человеком, блестящим учёным, потрясающим другом и коллегой. Объём его знаний и невероятная работоспособность просто поражали. Он был генератором огромного количества научных идей, которые не только сам реализовывал, но и щедро делился с нами, совершенно искренне даря открытия и новые результаты. И он совершенно искренне радовался за успехи и своих учеников и коллег, при этом никак не показывая, что часто в этих успехах его вклад бывал очень велик.

Удивительно, но будучи совсем ещё молодым, Миша стал одним из ключевых людей в отделе астрофизики высоких энергий ИКИ РАН. С ним советовались практически по всем вопросам, его мнение было очень важно, часто становясь определяющим по той или иной проблеме. И что удивительно, Миша мог выражать и отстаивать своё мнение так, что это не вызывало у других отрицательных эмоций.

IN MEMORY OF A FRIEND

More than two years have passed since Misha Revnitssev left us, but the feeling of a huge loss still does not leave. It is still hard to believe that this happened. It seems that he is just on a long business trip...

Misha was an awesome person, a brilliant scientist, an amazing friend and colleague. The amount of his knowledge and incredible performance just amazed. He had created number of scientific ideas, which he not only realized himself but also generously shared with us, open-heartedly giving away new results and discoveries. He was very happy for the successes of his students and colleagues, never demonstrating that his contribution to these successes was often crucial.

Being still young, Misha became one of the key people in the High Energy Astrophysics Department of IKI RAS. Colleagues would consult with him on almost all issues. His opinion was very important and often was decisive for various problems. Amazingly, Misha could express and defend his opinion in such a way that it did not cause negative emotions from his opponents.

К Мише пришла и мировая известность, престижные российские и мировые награды. Его звали делать доклады на престижных международных конференциях, его авторитет в международном научном мире возрастал на глазах, он участвовал в крупнейших проектах. Нам всем казалось, что будущее Миши как научного лидера мирового уровня, которым он уже и стал, просто предопределено, он локомотив и основа наших идей, проектов, что впереди неизмеримо много новых идей, результатов, споров, и вместе с тем жизни, такой простой и понятной.

Но всё изменилось в те злосчастные месяцы начала 2015 года, когда Мише был поставлен ужасный диагноз. Но даже после этого верилось, что Миша победит и здесь. У меня в этом просто была убежденность. В то время мы написали несколько статей, продолжали работать над новыми исследованиями, которые он предложил. Но болезнь все-таки оказалась сильнее...

Третьего мая 2019 года Мише исполнилось бы 45 лет. Возраст расцвета сил, творчества, планов на будущее...

В память о Мише, друге и выдающемся учёном с мировым именем, мы решили издать эту книгу, в которую бы вошли самые яркие его результаты, простые и понятные всем объяснения сложнейших вещей, которые он сделал в научно-популярных статьях, воспоминания друзей и коллег, интересные факты и фотографии из его жизни.

Александр Лутовинов
профессор РАН, заместитель директора
Института космических исследований РАН

At some point, fame and prestigious awards came to Misha. He was invited to make, presentations at major international conferences, his authority in the international scientific community was quickly growing, and he participated in major astrophysical projects. We all thought that Misha's future as a world-class scientific leader was predetermined, that he would continue to be the engine and basis of many more ideas, disputes, results and projects, and that his vivid life would continue for a long time.

But that all changed in those ill-fated months at the beginning of 2015 when Misha learned about his terrible diagnosis. Nevertheless, we all hoped that he would win this battle. I was confident that it would happen. Even during this difficult time, we wrote several papers and continued to work on new studies proposed by Misha. But the disease turned out to be stronger...

On May 3rd, 2019, Misha would have turned 45 years old. Age of bloom, creativity and for the future...

In memory of Misha, a friend and an outstanding scientist, we decided to publish this book, which includes his most significant results, simple and understandable explanations of the most complex concepts that he presented in popular articles, memories of friends and colleagues, interesting facts and photos from his life.

Alexander Lutovinov
professor RAS, deputy director
of Space Research Institute of RAS



МИХАИЛ ГЕННАДЬЕВИЧ РЕВНИВЦЕВ
3 мая 1974 — 23 ноября 2016

Михаил Ревнивцев родился в 1974 году в Тольятти в семье работников Волжского Автозавода. В Тольятти родители приехали из Саратова в 1972 году.

Миша рос очень серьёзным, домашним мальчиком. Учился в школе прилежно и ответственно. Читать художественные книги поначалу не очень любил, а вот учебники старшей сестры Лены по математике, физике и истории притягивали его с четвёртого класса. В седьмом классе он решал задачи старшеклассникам. Из журнала «Юный техник» решал задачи МФТИ, стал увлекаться астрономией.

В беседе с местным известным журналистом, после получения премии президента, он так сказал про математику: «Стоит только начать понимать язык математики — и ты пропал. Если задача сложная, ты решаешь её, гуляя по улице, разговаривая с друзьями, даже во сне. Она звучит в тебе как музыка, иногда как навязчивая мелодия. Но когда приходит

решение (всегда кажется, что внезапно) — это как яркий свет в темноте, это восторг, с которым, по-моему, ничто не сравнится».

С первого класса Миша был определён в музыкальную школу, но гаммы, как и специальность (фортепиано) не любил. Про музыкальную школу говорил так: «Я бы конечно, лучше сидел за решением задач, чем за пианино. Но мне очень нравилась атмосфера музыки. Там ребята сильно отличались от детей обычной общеобразовательной школы. Они были увлечёнными, творческими. Каждый концерт как экзамен. Все в радостном волнении, нарядные, успех на сцене — маленькая победа. Музыкальная школа открыла мне удивительный и прекрасный мир музыки».

К 8 классу стал неоднократным победителем математических и физических олимпиад. К тому времени из победителей олимпиад отцами ВАЗа был сформирован класс, на базе школы № 51. На протяжении учёбы в старших классах Миша был абонентом самых крупных библиотек Тольятти, а когда этого не хватило, записался ещё и в библиотеку Куйбышевского авиационного института, ездил на автобусе в Куйбышев.

Наряду с точными предметами увлекался историей России, экономикой. «Капитал» Маркса купил и изучал на 1 курсе. Чем становился подкованнее, тем выше ему требовался оппонент. Спорщик вырос отменный, отстаивал свою точку зрения упорно, аргументированно. Преподаватели, в школе ещё, избегали с ним вступать споры. О чём не преминула заметить директор школы Любовь Николаевна Беднова, когда вручала ему аттестат о среднем образовании.

После окончания школы в 1991 году Михаил с несколькими одноклассниками поступил в Московский физико-технический институт (МФТИ), на кафедру космической физики факультета проблем физики и энергетики.

В 1994 году, ещё будучи студентом, он начал работать в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) в отделе астрофизики высоких энергий, возглавляемом академиком Рашидом Алиевичем Сюняевым. В то время в отделе полным ходом шла работа с данными отечественной (совместно с Францией, Данией и Болгарией) орбитальной рентгеновской обсерватории «Гранат». Михаил под руководством молодых кандидатов наук Марата Равильевича Гильфанова и Евгения Михайловича Чуразова начал обрабатывать данные французского гамма-телескопа «Сигма» и вскоре получил свои первые научные результаты. В 1997 году он с отличием закончил МФТИ и поступил в аспирантуру ИКИ РАН.

В 1996 году на околоземной орбите начала работать американская рентгеновская обсерватория Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE), которая впервые дала возможность изучать быструю переменность рентгеновских двойных систем — аккрецирующих нейтронных звёзд и чёрных дыр. Михаил Геннадьевич активно использовал данные RXTE в ходе своей научной карьеры, и многие из ярких научных открытий, связанных с его именем, сделаны именно по данным этой обсерватории. В 1999 году он успешно защитил в ИКИ РАН кандидатскую диссертацию по теме «Исследование рентгеновского излучения от аккрецирующих чёрных дыр и нейтронных звёзд» на основе результатов, полученных по данным обсерваторий «Гранат» и RXTE.

В последующие годы Михаил Геннадьевич сыграл ключевую роль в успехе обсерватории гамма-лучей ИНТЕГРАЛ (совместный проект Европейского и Российского космических агентств с участием НАСА), которая была выведена ракетой-носителем Протон на орбиту в октябре 2002 года. Приборы обсерватории продолжают работать спустя 16 лет после запуска. Результаты, полученные по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ, а также ряд новых результатов, полученных по данным RXTE, легли в основу докторской диссертации «Обзоры неба с обсерваторий ИНТЕГРАЛ и RXTE: природа рентгеновского фона Галак-

тики и переменности излучения чёрных дыр и нейтронных звёзд», которую М.Г. Ревнивцев защитил в ИКИ РАН в 2006 году (в возрасте 32 лет).

В последние годы своей жизни М.Г. Ревнивцев принимал активное участие в подготовке к рентгеновскому обзору всего неба российско-германской обсерватории «Спектр-Рентген-Гамма» (планируемый запуск летом 2019 года), а также был идейным вдохновителем проекта «Монитор всего неба», который планируется реализовать на борту Международной космической станции.

За свои научные достижения М.Г. Ревнивцев в 2006 году был награждён медалью им. Я.Б. Зельдовича Международного комитета по исследованию космического пространства, а в 2008 году стал одним из первых лауреатов премии Президента Российской Федерации в области науки и инноваций для молодых учёных. Его (с соавторами) цикл работ «Обзор центральных областей Галактики в жёстких рентгеновских лучах орбитальной обсерватории ИНТЕГРАЛ — открытие новых аккрецирующих нейтронных звёзд и чёрных дыр», опубликованный в журнале «Письма в Астрономический журнал», был удостоен главной премии Международной академической издательской компании «Наука/Интерпериодика» за лучшую публикацию 2006 года по физике и математике. В 2016 году он был избран профессором Российской академии наук.

М.Г. Ревнивцев отдавал много времени работе со студентами и аспирантами, воспитал несколько кандидатов физико-математических наук. Он читал лекции по астрофизике для студентов МФТИ, преподавал на нескольких летних школах для молодых учёных-астрофизиков. Понимая, что развитие науки невозможно без привлечения молодёжи, Михаил Геннадьевич также активно занимался популяризацией науки в России, написал несколько научно-популярных работ, много выступал с лекциями в разных городах страны.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ М. Г. РЕВНИВЦЕВА

За свою научную карьеру М. Г. Ревнивцевым было опубликовано более 170 работ в рецензируемых журналах мирового уровня, написано несколько глав в монографиях. Ниже кратко сформулированы его основные научные результаты и приведены оригинальные тексты трёх наиболее значимых научных статей, во многом определивших развитие целых областей астрофизики.

- Предложен метод распознавания нейтронных звёзд и чёрных дыр по переменности их рентгеновского излучения на миллисекундных масштабах времени. С помощью разработанного им математического аппарата М. Г. Ревнивцев обработал огромный объём информации, полученной орбитальной обсерваторией ХТЕ им. Росси для нескольких десятков рентгеновских двойных систем. Выявлены существенные отличия в спектрах мощности нейтронных звёзд и чёрных дыр, связанные с отсутствием у последних твёрдой поверхности, что позволяет веществу, перетекающему со звезды-компаньона, проваливаться под горизонт событий чёрной дыры, предсказанный общей теорией относительности Эйнштейна.
- С помощью разработанного им метода фурье-спектроскопии впервые надёжно разделены и изучены компоненты рентгеновского излучения, связанные с излучением аккреционного диска и пограничного слоя (слоя растекания) у поверхности нейтронной звезды в маломассивных рентгеновских двойных системах. Показано, что излучение пограничного слоя существенно более жёсткое и переменное на миллисекундных и секундных масштабах времени. Эти результаты существенно улучшили понимание, как происходит аккреция вещества на слабомагнитные нейтронные звёзды.
- По данным космических обсерваторий ИНТЕГРАЛ, НЕАО (High Energy Astronomy Observatory) и RXTE точно измерен спектр космического рентгеновского фона — суммарного излучения всех сверхмассивных чёрных дыр во Вселенной. По данным обзоров всего неба обсерваторий ИНТЕГРАЛ и RXTE осуществлена «перепись» активных ядер галактик в близкой Вселенной и доказано, что центральная сверхмассивная чёрная дыра нашей Галактики активно поглощала межзвёздное вещество и излучала энергию несколько сотен лет назад. Эти результаты существенно дополнили картину формирования и роста сверхмассивных чёрных дыр в ядрах галактик.
- Решена многолетняя загадка природы «рентгеновского хребта Галактики» — протяжённого рентгеновского излучения вдоль Млечного Пути. По данным обзоров всего неба обсерваторий ИНТЕГРАЛ и RXTE, а также организованных по заявке М. Г. Ревнивцева уникальных сверхглубоких наблюдений центральной области Галактики космическим телескопом «Чандра» показано, что излучение «хребта» практически целиком складывается из невидимых по отдельности сигналов от миллионов слабых рентгеновских источников — аккрецирующих белых карликов и звёзд с высокой корональной активностью. Это открыло широкие возможности по исследованию звёздных населений в нашей и других галактиках.







НАИБОЛЕЕ
ЗНАЧИМЫЕ
РАБОТЫ
МИХАИЛА
РЕВНИЦЕВА

LETTERS

Discrete sources as the origin of the Galactic X-ray ridge emission

M. Revnivtsev^{1,2}, S. Sazonov^{2,3}, E. Churazov^{2,3}, W. Forman⁴, A. Vikhlinin^{2,4} & R. Sunyaev^{2,3}

An unresolved X-ray glow (at energies above a few kiloelectronvolts) was discovered about 25 years ago and found to be coincident with the Galactic disk—the Galactic ridge X-ray emission^{1,2}. This emission^{3–10} has a spectrum characteristic of a $\sim 10^8$ K optically thin thermal plasma, with a prominent iron emission line at 6.7 keV. The gravitational well of the Galactic disk, however, is far too shallow to confine such a hot interstellar medium; instead, it would flow away at a velocity of a few thousand kilometres per second, exceeding the speed of sound in the gas. To replenish the energy losses requires a source of 10^{43} erg s⁻¹, exceeding by orders of magnitude all plausible energy sources in the Milky Way¹¹. An alternative is that the hot plasma is bound to a multitude of faint sources¹², which is supported by the recently observed similarities in the X-ray and near-infrared surface brightness distributions^{13,14} (the latter traces the Galactic stellar distribution). Here we report that at energies of ~ 6 –7 keV, more than 80 per cent of the seemingly diffuse X-ray emission is resolved into discrete sources, probably accreting white dwarfs and coronally active stars.

Observations clearly show that some fraction of the X-ray emission of the Galaxy is produced by hot, diffuse interstellar plasma, heated by, for example, supernovae¹⁵, while the bulk of previously unresolved X-ray emission at energies above 1–2 keV remains unexplained. The strong similarity of the Galactic ridge X-ray emission (GRXE) large-scale distribution and that of the near-infrared map of the Milky Way suggested a stellar origin of this emission. The stellar origin was further supported by the close agreement between the X-ray emissivity per unit stellar mass inferred for the GRXE and the collective X-ray emissivity of the stellar population within a few hundred parsecs of the Sun¹⁶.

These findings motivated us in 2008 to perform a decisive test with an ultra-deep 1 Ms observation of a small ($\sim 16 \times 16$ arcmin) field near the Galactic Centre ($l^{\text{II}} = 0.08$, $b^{\text{II}} = -1.42$) with the Chandra X-ray Observatory. We selected this region of the Galactic plane because, here, a high GRXE intensity (essential for minimizing the contribution from extragalactic sources) combines with weak interstellar absorption (crucial for maximizing the 0.5–7 keV Chandra sensitivity for discrete sources). From what we know about the Solar neighbourhood, we can expect the sources producing the bulk of the GRXE to be as faint as $\sim 10^{30}$ erg s⁻¹ and to have a surface density of 10^5 per square degree or even higher in the Galactic plane. Only with the combination of an ultra-deep exposure and the excellent angular resolution of Chandra¹⁷ (~ 0.5 arcsec) has the task of resolving the GRXE become possible.

To place the most stringent limits on the fraction of the GRXE resolvable into discrete sources, we selected a field where the telescope's angular resolution is best and spatial variations of the soft X-ray emission below 1.5 keV (which might be caused by supernova remnants) are minimal. We therefore restrict our present study to a

small circle of radius 2.56 arcmin near the telescope optical axis (see Fig. 1). We refer to this field ($l^{\text{II}} = 0.113$, $b^{\text{II}} = -1.424$) as HRES (high resolution).

The total measured X-ray surface brightness in HRES is $I_{3-7\text{keV}} = (4.6 \pm 0.4) \times 10^{-11}$ erg s⁻¹ cm⁻² deg⁻² in the 3–7 keV band, or equivalently $I_{2-10\text{keV}} = (8.6 \pm 0.5) \times 10^{-11}$ erg s⁻¹ cm⁻² deg⁻² in the more conventional 2–10 keV band, or, in scale-free units, $I_{2-10\text{keV}} = 3.8 \pm 0.2$ mCrab deg⁻² (here and below the uncertainties are 68% confidence intervals that include both statistical and count rate to flux conversion uncertainties). The brightest source detected in our region has a 2–10 keV flux of $\sim 1.8 \times 10^{-14}$ erg s⁻¹ cm⁻² and thus a luminosity of $\sim 10^{32}$ erg s⁻¹ if it is located at approximately the Galactic Centre distance (~ 8 kpc). More luminous, rarer sources are found in our Chandra field, but outside HRES; we exclude such sources ($L_{2-10\text{keV}} > 10^{32}$ erg s⁻¹) from consideration when addressing the resolved fraction of the GRXE below.

The total measured X-ray surface brightness must include the contribution from the nearly isotropic extragalactic cosmic X-ray background (CXB¹⁸). The mean CXB intensity over the sky measured by Chandra in the 2–10 keV energy band¹⁹ is $I_{\text{CXB}, 2-10\text{keV}} = 2.19 \times 10^{-11}$ erg s⁻¹ cm⁻² deg⁻², of which 31% is provided²⁰ by sources (mostly active galactic nuclei and quasars) brighter than 2×10^{-14} erg s⁻¹ cm⁻². Given the absence of such bright sources in HRES, the total CXB contribution is $\sim 1.5 \times 10^{-11}$ erg s⁻¹ cm⁻² deg⁻². After subtraction of this extragalactic emission, the GRXE intensity in HRES is $I_{\text{GRXE}, 2-10\text{keV}} = (7.1 \pm 0.5) \times 10^{-11}$ erg s⁻¹ cm⁻² deg⁻².

Looking at the same field in the near-infrared band, which provides the best window on the Galactic stellar mass distribution, the 3.5 μm intensity measured with the Spitzer IRAC instrument is 21 ± 2 MJy sr⁻¹ (the uncertainty being mainly due to the variance of the number of bright near-infrared point sources within the small area of the study). Given the interstellar extinction towards HRES $A_V \approx 3.5$ –4.5 (ref. 21) and adopting $A_{3.5\mu\text{m}}/A_V = 0.066$ (refs 21, 22), the extinction-corrected near-infrared surface brightness is $I_{3.5\mu\text{m}} = 26$ –29 MJy sr⁻¹. Therefore, the GRXE to near-infrared intensity ratio in HRES is $I_{2-10\text{keV}}$ (in units of 10^{-11} erg s⁻¹ cm⁻² deg⁻²)/ $I_{3.5\mu\text{m}}$ (in units of MJy sr⁻¹) = 0.25 ± 0.04 , in excellent agreement with the value characterizing the entire Galaxy, 0.26 ± 0.05 , deduced from large-scale mapping of the GRXE¹³. This confirms that the findings of the present study of a tiny region of the Galaxy may be regarded as representative of the GRXE as a whole.

We have detected sources in the broad 0.5–7 keV energy band in the summed image of the HRES region (see Fig. 1). The sensitivity limit $f_{\text{lim}} \approx 10^{-16}$ erg s⁻¹ cm⁻² (minimum detectable flux in the 0.5–7 keV band corrected for the interstellar absorption) corresponds to a minimum detectable luminosity of $L_{0.5-7\text{keV}} \approx 10^{30}$ erg s⁻¹ at a source distance of 8 kpc, where most of the Galactic objects in this field are expected to reside. In total, 473 sources have been detected

with statistical significance $> 4\sigma$ (minimum number of counts per source is about 10). In Fig. 2a we show the energy spectrum of the total emission from HRES, as well as the two components associated with the detected sources and with the remaining unresolved emission. Most importantly, the summed spectrum of detected sources exhibits a pronounced ~ 6.7 keV iron emission line, a distinctive feature of the GRXE which was often regarded as an important argument in favour of it being the emission of a truly diffuse hot plasma^{3,11}. But now we clearly see that the bulk of the 6.7 keV line emission, as well as of the neighbouring continuum, is in fact produced by point sources. We note that apart from the dominant 6.7 keV line, the unresolved (partially due to finite energy resolution of the instrument and due to limited statistics of the observation) blend of lines at 6–7 keV may contain some contribution from 6.4 keV iron fluorescent emission, part of which may be unrelated to the GRXE and result from irradiation of the interstellar medium by discrete X-ray sources^{23,24}.

The derived fraction of the X-ray emission resolved into point sources is shown as a function of energy in Fig. 2b. In the narrow

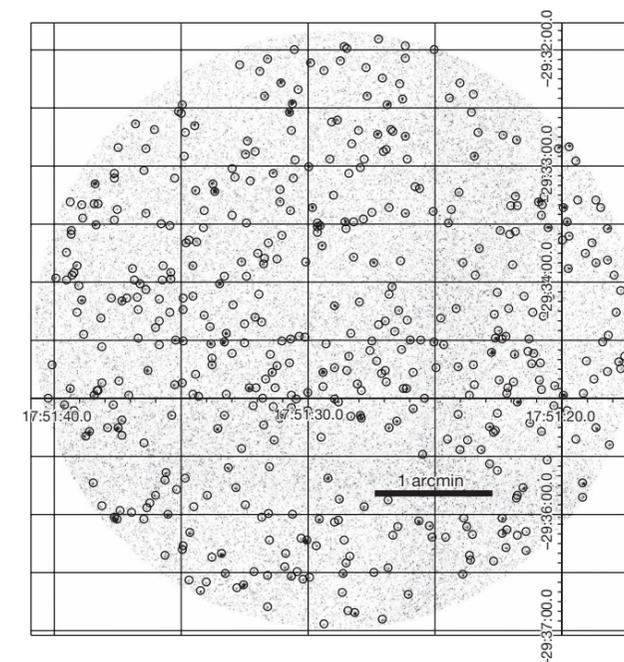


Figure 1 | The Chandra image in the 0.5–7 keV energy band. Circles of radius 2 arcsec denote the positions of point sources detected after 1 Ms exposure. The Chandra data were reduced following a standard procedure²⁵. The detector background was modelled using the stowed data set (<http://cxc.harvard.edu/contrib/maxim/stowed>) and adjusted to the conditions of the current observations using the count rate at energies 9–12 keV, where Chandra has almost zero effective area. The total measured X-ray surface brightness in HRES is $I_{3-7\text{keV}} = (4.6 \pm 0.4) \times 10^{-11}$ erg s⁻¹ cm⁻² deg⁻² in the 3–7 keV band, or equivalently $I_{2-10\text{keV}} = (8.6 \pm 0.5) \times 10^{-11}$ erg s⁻¹ cm⁻² deg⁻² in the 2–10 keV band. Throughout the field there are noticeable variations of the soft X-ray (<2 keV) surface brightness, due to what appears to be a previously unknown supernova remnant shell projected onto the Chandra field. We note that if a 1 Ms Chandra observation were repeated in a nearby field, the measured X-ray surface brightness would be slightly different because the number of brightest point sources varies from field to field, an effect known as cosmic variance in extragalactic studies. For the same reason, there may be subtle field-to-field variations in the GRXE spectral shape, and in particular in emission line ratios, and recent observations indicated that such variations do exist¹⁰. Additional variations of the spectrum of the unresolved Galactic X-ray emission can be caused by the presence of genuine diffuse X-ray emitters such as supernova remnants.

energy band 6.5–7.1 keV that contains the iron emission line, $84 \pm 12\%$ of the total X-ray emission is resolved. Moreover, we recall that the remaining unresolved X-ray emission contains a non-negligible contribution from the CXB. Assuming that the intensity of this unresolved component in our 1 Ms Chandra observation is the same as in the Chandra extragalactic deep fields¹⁹ ($I_{\text{CXB}, \text{unres } 1\text{Ms}} = (3.4 \pm 1.7) \times 10^{-12}$ erg s⁻¹ cm⁻² deg⁻² in the 2–8 keV energy band, or $(2.9 \pm 1.4) \times 10^{-13}$ erg s⁻¹ cm⁻² deg⁻² at 6.5–7.1 keV, assuming a power-law spectral shape with $\Gamma = 1.4$), we can estimate that $4 \pm 2\%$ of the total intensity in the 6.5–7.1 keV band is unresolved CXB emission. We conclude that we have resolved as much as $88 \pm 12\%$ of the GRXE emission into point sources at energies near the 6.7 keV line, the feature that was previously used as the strongest argument in favour of a diffuse origin for the GRXE.

Apart from a small contribution from extragalactic sources (about 40–50 sources out of 473), most of the sources detected by Chandra in HRES are probably accreting white dwarfs (with luminosities $L_{2-10\text{keV}} \approx 10^{31}$ – 10^{32} erg s⁻¹) and binary stars with strong coronal activity (with $L_{2-10\text{keV}} < 10^{31}$ erg s⁻¹). Indeed, if we plot the fraction of the total GRXE flux contained in sources with fluxes higher than a variable detection threshold (see Fig. 3), the resulting dependence proves to be in good agreement with the expectation based on the luminosity function of faint X-ray sources measured in the Solar

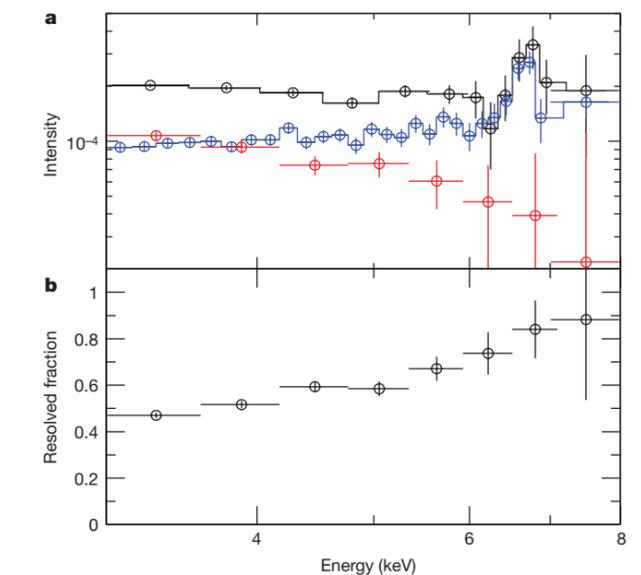


Figure 2 | GRXE spectrum and its resolved fraction. **a**, Spectra collected by Chandra within the HRES region. Black data points, error bars and the histogram show the spectrum of the total emission from HRES; the collective spectrum of all detected sources is presented in blue and the spectrum of the remaining unresolved emission in the current observations is in red. The integrated spectrum of detected sources exhibits a strong ~ 6.7 keV iron emission line, characteristic of hot (with temperatures 10 – 100×10^6 K) plasma emission. This line has been the main support for the popular hypothesis that the GRXE has a truly diffuse, interstellar origin, even though such hot interstellar plasma cannot be confined within the Galaxy by its gravitational potential. We took into account that a small fraction of photons, X (10% at energies 4–6 keV, according to the Chandra Proposers' Observatory Guide²⁶) from a point source are scattered by the telescope outside the surrounding circle of radius 2 arcsec. We therefore corrected the directly measured collective spectrum of detected sources $F_1(E)$ using the formula $F_1(E) = [F_1(E) - F_2(E)A_1/A_2]/[1 - X - XA_1/A_2]$, where $F_2(E)$ is the spectrum of the unresolved X-ray emission, A_1 ($\sim 2\%$ of the total) is the area covered by the circles of radius 2 arcsec used for collecting the source fluxes, and A_2 is the area outside these circles. **b**, Fraction of the X-ray emission resolved by Chandra into point sources as a function of X-ray photon energy. Error bars in **a** and **b** are 68% confidence intervals.

¹Excellence Cluster Universe, Technische Universität München, 85748, Garching, Germany. ²Space Research Institute, 117997, Moscow, Russia. ³Max-Planck-Institut für Astrophysik, 85748, Garching, Germany. ⁴Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, Massachusetts 02138, USA.

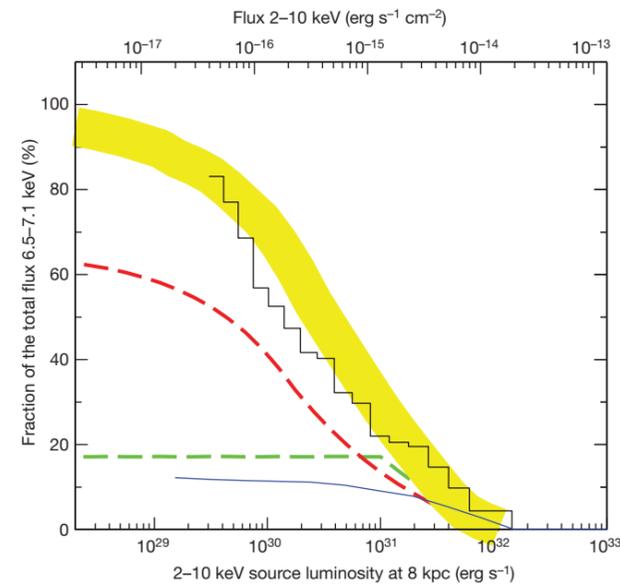


Figure 3 | Fraction of resolved X-ray emission around the 6.7 keV iron emission line as a function of the limiting source flux/luminosity. The histogram shows the fraction of the total flux in the 6.5–7.1 keV energy band in the Chandra field provided by discrete sources with fluxes above a given detection threshold in the 2–10 keV energy band. The wide yellow curve shows the corresponding dependence expected for a combination of Galactic sources with luminosities below $10^{32} \text{ erg s}^{-1}$ (all located at the Galactic Centre distance of 8 kpc) and extragalactic sources with fluxes below $2 \times 10^{-14} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ in this energy band. The blue curve shows the expected contribution of extragalactic sources (mostly active galactic nuclei)²⁰. The green and red curves show the expected contributions of accreting white dwarfs and coronally active stars correspondingly (X-ray spectra of these types of sources are described in refs 27 and 28, for example), estimated using the luminosity functions of these classes of objects measured in the Solar vicinity¹⁶. These Galactic curves were normalized so that the total resolved fraction given by the model is equal to the actual measured fraction of 84% at the detection limit of the 1 Ms Chandra observation of $10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$. Fluxes of sources detected in the total Chandra band 0.5–7 keV were converted into the 2–10 keV energy band using a count-rate-dependent conversion factor that was estimated using stacked Chandra spectra of bright, medium and faint sources (>100 , 10–100 and 5–10 net counts in the image, respectively). For Galactic sources, their fluxes in the 2–10 keV band were converted to the 6.5–7.1 keV band using a single conversion factor estimated from the stacked Chandra spectrum of all detected sources. Comparison of the stacked spectra of bright, medium and faint sources indicates that this conversion factor does not vary by more than a factor of 1.3 around the adopted value. Conversion of fluxes of extragalactic sources from 2–10 keV to 6.5–7.1 keV was done assuming that they have power-law spectra with photon index $\Gamma = 1.4$.

vicinity¹⁶. Furthermore, because this locally determined luminosity function continues to rise towards lower luminosities, we can expect the still unresolved ~ 10 –20% of the GRXE flux also to be composed of coronally active and normal (Sun-like) stars with luminosities $L_{2-10 \text{ keV}} < 4 \times 10^{29} \text{ erg s}^{-1}$, which are too weak to be detected at the Galactic Centre distance even in ultradeep Chandra exposures. The contribution of such faint stellar sources should rise with the decrease of the photon energies because they typically have quite soft spectra. This might be one of the reasons why we resolve more flux at high energies than at lower energies.

The final resolution of the GRXE into discrete sources has far-reaching consequences for our understanding of a variety of astrophysical phenomena. Apart from the removal of a major energy puzzle for the Galaxy, the important immediate outcome is that we

can now use the GRXE as a measure of the cumulative emission of faint Galactic X-ray sources in the sense that spatial variations of the GRXE properties over the Milky Way can indicate intrinsic variations in the stellar populations. It has also become clear that the apparently diffuse X-ray emission of external galaxies must contain, and in some cases be dominated by, unresolved emission from faint stellar-type sources, namely accreting white dwarfs and coronally active stars.

Received 4 December 2008; accepted 5 March 2009.

1. Worrall, D. M. *et al.* HEAO 1 measurements of the Galactic ridge. *Astrophys. J.* **255**, 111–121 (1982).
2. Warwick, R. S. *et al.* The Galactic ridge observed by EXOSAT. *Nature* **317**, 218–221 (1985).
3. Koyama, K. *et al.* Thermal X-ray emission with intense 6.7-keV iron line from the Galactic ridge. *Publ. Astron. Soc. Jpn* **38**, 121–131 (1986).
4. Yamauchi, S. & Koyama, K. The 6.7 keV iron line distribution in the Galaxy. *Astrophys. J.* **404**, 620–624 (1993).
5. Yamauchi, S. *et al.* Unresolved X-ray emission from the Galactic ridge with ASCA. *Publ. Astron. Soc. Jpn* **48**, L15–L20 (1996).
6. Hands, A. D. P. *et al.* X-ray source populations in the Galactic plane. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **351**, 31–56 (2004).
7. Ebisawa, K. *et al.* Chandra deep X-ray observation of a typical Galactic plane region and near-infrared identification. *Astrophys. J.* **635**, 214–242 (2005).
8. Koyama, K. *et al.* Iron and nickel line diagnostics for the Galactic Center diffuse emission. *Publ. Astron. Soc. Jpn* **59**, 245–255 (2007).
9. Ebisawa, K. *et al.* Spectral study of the Galactic ridge X-ray emission with Suzaku. *Publ. Astron. Soc. Jpn* **60**, 223–230 (2008).
10. Yamauchi, S. *et al.* Iron emission lines on the Galactic ridge observed with Suzaku. Preprint at <http://arxiv.org/abs/0810.0317> (2008).
11. Tanaka, Y. ASCA observation of X-ray emission from the Galactic ridge. *Astron. Astrophys.* **382**, 1052–1060 (2002).
12. Worrall, D. M. & Marshall, F. E. Stellar contributions to the hard X-ray Galactic ridge. *Astrophys. J.* **267**, 691–697 (1983).
13. Revnivtsev, M. *et al.* Origin of the Galactic ridge X-ray emission. *Astron. Astrophys.* **452**, 169–178 (2006).
14. Revnivtsev, M., Molokov, S. & Sazonov, S. Map of the Galaxy in the 6.7-keV emission line. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **373**, L11–L15 (2006).
15. Park, S. *et al.* Characteristics of diffuse X-ray line emission within 20 parsecs of the Galactic Center. *Astrophys. J.* **603**, 548–559 (2004).
16. Sazonov, S. *et al.* X-ray luminosity function of faint point sources in the Milky Way. *Astron. Astrophys.* **450**, 117–128 (2006).
17. Weisskopf, M. C. *et al.* An overview of the performance and scientific results from the Chandra X-Ray Observatory. *Publ. Astron. Soc. Jpn* **114**, 1–24 (2002).
18. Giacconi, R. *et al.* Evidence for X-rays from sources outside the Solar System. *Phys. Rev. Lett.* **9**, 439–443 (1962).
19. Hickox, R. C. & Markevitch, M. Absolute measurement of the unresolved cosmic X-ray background in the 0.5–8 keV band with Chandra. *Astrophys. J.* **645**, 95–114 (2006).
20. Moretti, A. *et al.* The resolved fraction of the cosmic X-ray background. *Astrophys. J.* **588**, 696–703 (2003).
21. Dutra, C. M. *et al.* Extinction within 10° of the Galactic Centre using 2MASS. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **338**, 253–262 (2003).
22. Indebetouw, R. *et al.* The wavelength dependence of interstellar extinction from 1.25 to 8.0 μm using GLIMPSE data. *Astrophys. J.* **619**, 931–938 (2005).
23. Sunyaev, R. A., Markevitch, M. & Pavlinsky, M. The center of the Galaxy in the recent past—a view from GRANAT. *Astrophys. J.* **407**, 606–610 (1993).
24. Koyama, K. *et al.* ASCA view of our Galactic Center: remains of past activities in X-rays? *Publ. Astron. Soc. Jpn* **48**, 249–255 (1996).
25. Vikhlinin, A. *et al.* Chandra temperature profiles for a sample of nearby relaxed galaxy clusters. *Astrophys. J.* **628**, 655–672 (2005).
26. Chandra. Proposers' Observatory Guide <http://cxc.harvard.edu/proposer/POG/html/index.html> (23 January 2009).
27. Hellier, C., Mukai, K. & Osborne, J. P. Iron K α linewidths in magnetic cataclysmic variables. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **297**, 526–530 (1998).
28. Huenemoerder, D., Canizares, C. & Schulz, N. X-ray spectroscopy of II Pegasi: coronal temperature structure, abundances, and variability. *Astrophys. J.* **559**, 1135–1146 (2001).

Acknowledgements M.R. thanks M. Markevitch for his help with the Chandra instrumental background. This research was supported by the DFG Cluster of Excellence “Origin and Structure of the Universe”, by NASA Chandra grant GO8-9132A, by the OFH-17 programme of the Russian Academy of Sciences, and by grants RFFI 07-02-01004 and RFFI 07-02-00961.

Author Information Reprints and permissions information is available at www.nature.com/reprints. Correspondence and requests for materials should be addressed to M.R. (mikej@mpa-garching.mpg.de).

A&A 452, 169–178 (2006)
DOI: 10.1051/0004-6361:20054268
© ESO 2006

Origin of the Galactic ridge X-ray emission

M. Revnivtsev^{1,2}, S. Sazonov^{1,2}, M. Gilfanov^{1,2}, E. Churazov^{1,2}, and R. Sunyaev^{1,2}

¹ Max-Planck-Institute für Astrophysik, Karl-Schwarzschild-Str. 1, 85740 Garching bei München, Germany
e-mail: mikej@mpa-garching.mpg.de
² Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russia

Received 28 September 2005 / Accepted 31 January 2006

ABSTRACT

We analyze a map of the Galactic ridge X-ray emission (GRXE) constructed in the 3–20 keV energy band from RXTE/PCA scan and slew observations. We show that the GRXE intensity follows the Galactic near-infrared surface brightness closely and thus traces the Galactic stellar mass distribution. The GRXE consists of two spatial components that can be identified with the bulge/bar and the disk of the Galaxy. The parameters of these components determined from X-ray data are compatible with those derived from near-infrared data. The inferred ratio of X-ray to near-infrared surface brightness $I_{3-20 \text{ keV}}(10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ deg}^{-2})/I_{3.5 \mu\text{m}}(\text{MJy/sr}) = 0.26 \pm 0.05$, and the ratio of X-ray to near-infrared luminosity $L_{3-20 \text{ keV}}/L_{3-4 \mu\text{m}} = (4.1 \pm 0.3) \times 10^{-5}$. The corresponding ratio of the 3–20 keV luminosity to the stellar mass is $L_x/M = (3.5 \pm 0.5) \times 10^{27} \text{ erg s}^{-1} M_\odot^{-1}$, which agrees within the uncertainties with the cumulative emissivity per unit stellar mass of point X-ray sources in the Solar neighborhood, determined in an accompanying paper (Sazonov *et al.*). This suggests that the bulk of the GRXE is composed of weak X-ray sources, mostly cataclysmic variables and coronally active binaries. The fractional contributions of these classes of sources to the total X-ray emissivity determined from the Solar neighborhood data can also explain the GRXE energy spectrum. Based on the luminosity function of local X-ray sources we predict that, in order to resolve 90% of the GRXE into discrete sources, a sensitivity limit of $\sim 10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ (2–10 keV) will need to be reached in future observations.

Key words. stars: binaries: general – Galaxy: bulge – Galaxy: disk – X-rays: general – X-rays: stars

1. Introduction

There are two major large-scale extended features in the X-ray sky (above 2 keV): the almost uniform cosmic X-ray background (CXB, Giacconi *et al.* 1962) and an emission concentrated toward the Galactic plane – the Galactic ridge X-ray emission (GRXE, see e.g. Worrall *et al.* 1982). While over the past two decades it has been firmly established that the CXB is a superposition of a large number of discrete extragalactic sources (namely active galactic nuclei, see e.g. Giacconi *et al.* 2002), the origin of the GRXE remains unexplained.

Exploration of the GRXE by different observatories has revealed that it is concentrated near the inner Galactic disk, extending tens of degrees in longitude and a few degrees in latitude (Cooke *et al.* 1970; Worrall *et al.* 1982; Warwick *et al.* 1985; Warwick *et al.* 1988; Yamauchi *et al.* 1990), and probably has a central bulge-like component (Yamauchi & Koyama 1993; Revnivtsev 2003). The energy spectrum of the GRXE contains a number of emission lines of highly ionized heavy elements, indicating that the emission should be thermal with a temperature of up to 5–10 keV (Koyama *et al.* 1986, 1989; Tanaka 2002; Muno *et al.* 2004). The total GRXE luminosity has been estimated at ~ 1 – $2 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ (Yamauchi & Koyama 1993; Valinia & Marshall 1998).

The GRXE has been detected at least up to 20–25 keV energies (Valinia & Marshall 1998; Revnivtsev 2003), and its spectrum in the 3–20 keV range consists of a continuum, which can be approximated by a power law of photon index $\Gamma \sim 2.1$, and powerful lines at 6–7 keV energies. Also a detection of GRXE at energies $>40 \text{ keV}$ (at Galactic longitude $l = 95$) was reported (e.g. Skibo *et al.* 1997; Valinia & Marshall 1998), but it now

appears that those CGRO/OSSE measurements were strongly contaminated by a few unresolved sources, including the active galactic nucleus IGR J21247+5058 recently discovered by the INTEGRAL observatory (Masetti *et al.* 2004). The IBIS telescope aboard INTEGRAL, capable of resolving point-like sources with flux $> \text{few} \times 10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ in crowded regions, has not detected the GRXE at energies above $\sim 40 \text{ keV}$ (Lebrun *et al.* 2004; Terrier *et al.* 2004).

Soon after discovery of the GRXE, it was proposed that it might consist of a large number of weak Galactic X-ray point sources, e.g. quiescent low-mass and high-mass X-ray binaries, cataclysmic variables, coronally active binaries, etc. (Worrall *et al.* 1982; Worrall & Marshall 1983; Koyama *et al.* 1986; Ottmann & Schmitt 1992; Mukai & Shiokawa 1993). However, it was not possible to draw a solid conclusion due to lack of detailed information about the space densities and X-ray luminosity distributions of these classes of X-ray sources.

Unless the GRXE is truly diffuse emission, it should eventually be possible to resolve it into a finite number of discrete sources. As the sensitivity of X-ray telescopes has been increasing, a progressively higher fraction of the GRXE has been resolved (Worrall *et al.* 1982; Warwick *et al.* 1985; Sugizaki *et al.* 2001). However, even the deepest observations of Galactic plane regions by the currently operating Chandra and XMM-Newton observatories, in which point-source detection sensitivities $F_x > 3 \times 10^{-15} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ in the energy band 2–8 keV (Ebisawa *et al.* 2001; Hands *et al.* 2004; Ebisawa *et al.* 2005) were achieved, resolved not more than 10–15% of the GRXE. This was regarded as a strong indication of the GRXE being truly diffuse.

However, the hypothesis of diffuse origin of the GRXE meets strong difficulties (e.g. Koyama *et al.* 1986; Sunyaev *et al.* 1993;

Tanaka et al. 1999; Tanaka 2002). The main problem is that the apparently thermal spectrum of the GRXE implies that the emitting plasma is so hot ($\sim 5\text{--}10$ keV) that it should be outflowing from the Galactic plane. A large energy supply is then required to constantly replenish the outflowing plasma.

Resolving the GRXE is additionally complicated by the fact that at fluxes near the present-day sensitivity limit ($\sim 10^{-15}$ erg s $^{-1}$ cm $^{-2}$), extragalactic sources outnumber Galactic ones even in the Galactic plane (e.g. Ebisawa et al. 2005). Since identification of weak sources detected in deep X-ray surveys of the Galactic plane is usually problematic and the CXB varies significantly on sub-degree angular scales, so far it has only been possible to place upper limits on the fraction of the GRXE resolved into Galactic X-ray sources (as mentioned above).

The only place where Galactic sources dominate over extragalactic ones is the inner $10'$ of the Galaxy (Muno et al. 2003), and Chandra has resolved up to 30% of the “hard diffuse” emission in certain parts of this region (Muno et al. 2004, region “Close” in this paper). Moreover, the flux-number distribution of Galactic X-ray sources detected in this Galactic Center survey shows no cutoff down to the Chandra detection limit, implying that at least an order of magnitude deeper observations will be needed to resolve the bulk of the hard X-ray emission from the Galactic Center if the source flux-number distribution continues with the same slope to lower fluxes than presently accessible.

It is therefore worth considering alternative ways to solve the problem of the GRXE origin, in particular via studying its spatial distribution. The distribution of the GRXE over the sky is still poorly known, mainly because of its large extent (approximately $120^\circ \times 10^\circ$) and low surface brightness ($< \text{few} \times 10^{-11}$ erg s $^{-1}$ cm $^{-2}$ deg $^{-2}$). The investigation of the GRXE in the HEAO-1/A2 experiment (e.g. Iwan et al. 1982; Worrall et al. 1982) was significantly hampered by point source confusion, whereas instruments with much better spatial resolution were not able to cover a sufficiently large solid angle of the sky (e.g. Sugizaki et al. 2001; Hands et al. 2004).

In this paper we present a brightness distribution of the GRXE measured in the 3–20 keV energy band by the RXTE/PCA instrument and show that this distribution closely follows the near-infrared brightness of the Galaxy, known to be a good tracer of the stellar mass distribution. We further compare the inferred Galactic ridge X-ray emissivity per unit stellar mass with the cumulative emissivity of point X-ray sources in the Solar neighborhood, determined by Sazonov et al. (2006), and argue that the bulk of the GRXE is very likely composed of weak discrete sources of known types.

2. RXTE observations and analysis

The best instrument so far for large-scale mapping of the X-ray (above 2 keV) sky is the PCA spectrometer aboard the RXTE observatory (Bradt et al. 1993). It combines a large effective area (~ 6400 cm 2 at 6 keV) and a moderate field of view ($\sim 1^\circ$ radius). The latter allows us both to achieve good coverage of the sky in the course of the mission (as compared to focusing instruments) and to alleviate the source confusion problem (as compared to X-ray collimators with larger fields of view). Over its 10-year lifetime RXTE/PCA has performed a large number of scan and slew observations over the whole sky, and we previously made use of these observations to catalog X-ray sources detected at high Galactic latitudes (Revnivtsev et al. 2004; Sazonov & Revnivtsev 2004) and to study the CXB (Revnivtsev et al. 2003). We now take advantage of the good coverage of the Galactic plane region by RXTE/PCA to study the GRXE.

We use the same set of observations and apply the same analysis as in Revnivtsev et al. (2004). Throughout the paper we will use only data from the first layers of all PCA detectors (PCUs) in the 3–20 keV energy band. The net exposure time of the utilized observations normalized to the single PCU effective area (~ 1300 cm 2) is approximately 29 Ms. Exposure is not uniformly distributed over the whole sky (see Revnivtsev et al. 2004), but it has a relatively uniform distribution within the inner $\sim 15^\circ$ of the Galactic Center.

2.1. Flux measurement uncertainties

Apart from statistical uncertainties (photon noise), PCA measurements of X-ray flux are subject to systematic uncertainties. One of the main possible uncertainties is the accuracy of the PCA background subtraction. The PCA background that typically has the level of approximately $\sim 3\text{--}4$ cnts/s/PCU/beam consists of an internal instrumental part and the CXB. In general, it depends on time and operational parameters of the PCU anodes. The current paradigm of the PCA background subtraction is to model it with the highest possible accuracy using different tracers measured onboard on a 16 sec time scale. The current version of the RXTE/PCA software (LHEASOFT 5.2) allows for an accuracy of background subtraction of $\sim 0.02\text{--}0.03$ cnts/s/PCU/beam in the 3–20 keV energy band, which corresponds to $\sim 2 \times 10^{-13}$ erg s $^{-1}$ cm $^{-2}$ deg $^{-2}$ for a Crab-like spectrum (e.g. Markwardt et al. 2002). In all our subsequent figures and plots, we always subtract instrumental and CXB backgrounds from obtained PCA measurements.

Another factor that needs to be taken into account in studying the GRXE (with a subtracted contribution of bright point sources) is small-scale variations of the CXB intensity (mainly due to unresolved extragalactic sources within a 1-deg 2 field of view of the PCA), which introduces an rms uncertainty of 1.5×10^{-12} erg s $^{-1}$ cm $^{-2}$ deg $^{-2}$ (3–20 keV) in measuring the X-ray surface brightness in a given direction (Revnivtsev et al. 2003). Note, however, that for most of the sky regions studied here this uncertainty does not exceed statistical errors.

Almost everywhere in the Galaxy, except in the very central regions where we practically cannot study the GRXE because of the high concentration of bright point sources, the interstellar gas column density does not exceed $\sim 2\text{--}3 \times 10^{22}$ atoms cm $^{-2}$. Photoabsorption in this gas attenuates the GRXE flux at 3–20 keV by less than 5%. We neglect this small effect in the subsequent analysis.

3. Map of the GRXE

In Fig. 1 we present an X-ray intensity map of the sky around the Galactic plane convolved with the response of the PCA collimator (triangular shape with a radius $\sim 1^\circ$, see Revnivtsev et al. 2003). The contour levels on this map are logarithmically spaced with a factor of 1.4, and the lowest shown level corresponds to an X-ray intensity of $\sim 10^{-11}$ erg s $^{-1}$ cm $^{-2}$ deg $^{-2}$.

The map clearly exposes many bright point-like sources and an underlying unresolved emission – the GRXE. Henceforth we reserve the term “GRXE” to describe Galactic X-ray emission that cannot be resolved into discrete sources with flux higher than 10^{-11} erg s $^{-1}$ cm $^{-2}$. We note that the exact value of the limiting flux is not important if it is in the range of $\sim 10^{-13}\text{--}10^{-5}$ erg s $^{-1}$ cm $^{-2}$, because the angular density of sources with such fluxes even in the Galactic plane is low and they do not contribute more than $< 10\%$ to the GRXE (Sugizaki et al. 2001; Hands et al. 2004).

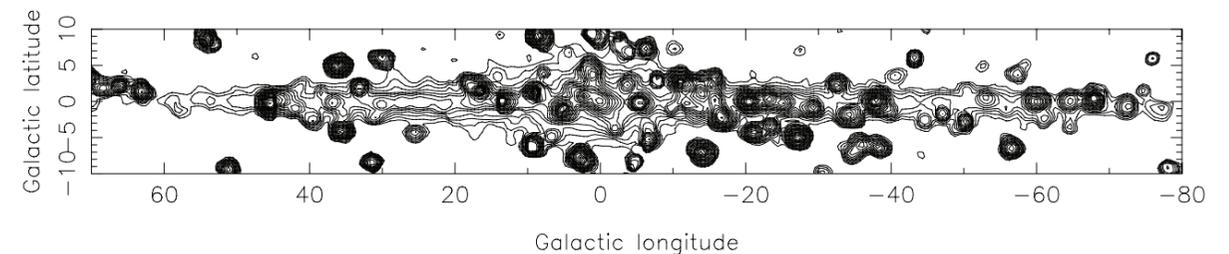


Fig. 1. RXTE/PCA map of the sky around the Galactic plane in the energy band 3–20 keV. Contour levels are logarithmically spaced with a factor of 1.4, with the lowest contour corresponding to an intensity of 10^{-11} erg s $^{-1}$ cm $^{-2}$ deg $^{-2}$. This contour level shows statistically significant intensity on the sky everywhere on the plot, and the map clearly exposes many bright point sources and an underlying unresolved emission

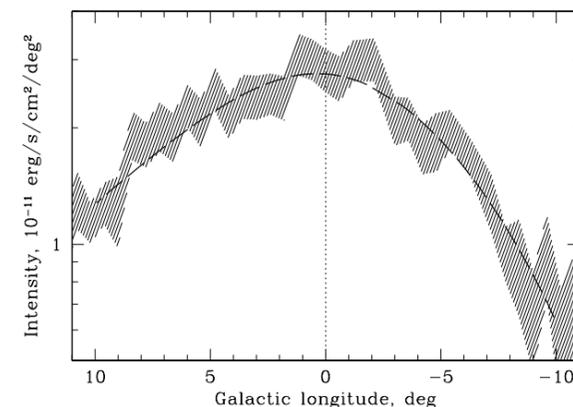


Fig. 2. Intensity profile of the bulge/bar component of the GRXE in the slice $3.0^\circ < |b| < 3.5^\circ$ parallel to the Galactic plane. The shaded region indicates the measurement uncertainty including the 10% systematics described in the text. The dashed line is the best-fit model of the bulge/bar defined by parameters given in Table 1.

The GRXE was given its name because it was originally detected as a prominent narrow ($\sim 1\text{--}2^\circ$) band of unresolved emission along the Galactic plane (e.g. Bleach et al. 1972; Worrall et al. 1982). However, it has since then become more evident that the unresolved X-ray emission of the Galaxy contains both a disk-like and a bulge-like component (Yamauchi & Koyama 1993; Revnivtsev 2003). The exponential scale height of the disk component of the GRXE is $\sim 1.5^\circ$ (Worrall et al. 1982; Warwick et al. 1985; Yamauchi & Koyama 1993), whereas it is much larger for the Galactic bulge – up to $3\text{--}5^\circ$ (Yamauchi & Koyama 1993; Revnivtsev 2003). Both components can now be clearly seen on the RXTE map shown in Fig. 1. We consider the bulge and disk components of the GRXE separately.

3.1. Galactic bulge

The observed intensity distribution of the GRXE in the Galactic Center region is strongly affected by the bright point sources located there. Therefore, in order to study the underlying GRXE we should mask out bright point sources. To this end we filtered out 1.5° -radius regions around point sources with flux higher than ~ 1 cnts/s/PCU/beam $\sim 1.2 \times 10^{-11}$ erg s $^{-1}$ cm $^{-2}$ (this flux conversion corresponds to the measured GRXE spectrum, Revnivtsev 2003). The catalog of detected point sources will be published elsewhere. This flux limit corresponds to a source luminosity $L_x \sim 10^{35}$ erg s $^{-1}$ for a Galactic Center distance of 8.5 kpc.

Since the number density of sources with flux higher than ~ 1 cnts/s/PCU/beam is quite high, we have practically no data left at $|b| < 1\text{--}2^\circ$ upon applying the above filtering procedure (similar to the analysis of Revnivtsev 2003). At higher latitudes the number density of bright point sources drops significantly (e.g. Grimm et al. 2002), but the applied mask still severely reduces the coverage of the bulge.

Relatively bright sources ($L_x > 10^{34}$ erg s $^{-1}$, or $F_x > 10^{-12}$ erg s $^{-1}$ cm $^{-2}$) below our filtering threshold might lead to significant deviations of the observed X-ray intensity map from the actual GRXE brightness distribution. However, as already mentioned, the density of such sources is less than ~ 1 deg $^{-2}$ (except in the central degree of the Galaxy), while the typical intensity of the GRXE is $\sim 10^{-11}$ erg s $^{-1}$ cm $^{-2}$ deg $^{-2}$ (e.g. Sugizaki et al. 2001). We thus expect that our filtering criterion enables us to recover the surface brightness distribution of the GRXE with approximately 10% accuracy.

In order to construct an intensity profile of the bulge component of the GRXE along the Galactic plane, we selected latitudes $3.0^\circ < |b| < 3.5^\circ$, where the disk component of the GRXE is weak while the bulge component is still relatively bright. Also an intensity profile of the bulge perpendicular to the Galactic plane was constructed from observations at $|l| < 4^\circ$ excluding $|b| < 1^\circ$. The resulting profiles are shown in Figs. 2 and 3, respectively. The shaded regions indicate the measurement uncertainties including the 10% systematics described above. One can see that the GRXE intensity profile is relatively symmetric with respect to the Galactic plane but is not symmetric along the plane with respect to $l = 0$.

It is natural to compare the inferred morphology of the GRXE bulge with the Galactic stellar bulge/bar (Bahcall & Soneira 1980; Blitz & Spergel 1991; Weiland et al. 1994; Dwek et al. 1995). For this purpose we use the analytic model of the bulge/bar stellar volume emissivity developed by Dwek et al. (1995), more specifically their model G3. This model is derived from the near-infrared surface brightness distribution of the Galaxy measured by COBE/DIRBE, which is believed to be a very good tracer of the stellar mass distribution.

Let us parameterize the volume emissivity of the bulge component of the GRXE following Dwek et al. (1995). The observed intensity of the GRXE is proportional to the line-of-sight integral of the bulge/bar volume emissivity predicted by the model. Specifically, the X-ray flux $F(l, b)$ measured within a solid angle $d\Omega$ is given by

$$F(l, b) = \frac{d\Omega}{4\pi} \int_0^\infty \rho(x, y, z) ds.$$

The volume emissivity of the bar is given by

$$\rho_{\text{bulge}}(x, y, z) = \rho_{0, \text{bulge}} r^{-1.8} \exp(-r^3),$$

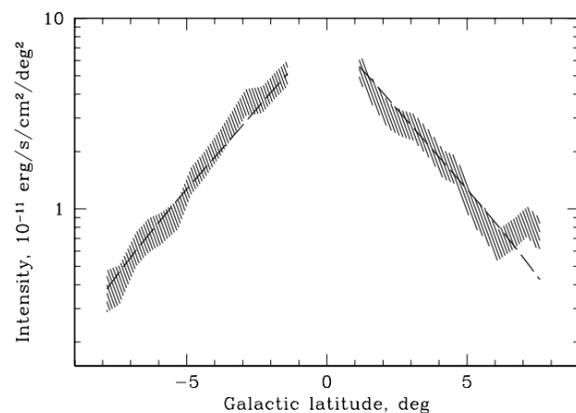


Fig. 3. Intensity profile of the bulge/bar component of the GRXE perpendicular to the Galactic plane at $|l| < 4^\circ$. The shaded region indicates the measurement uncertainty including the 10% systematics. The dashed line is the best-fit model defined by parameters given in Table 1.

Table 1. Best-fit parameters of the bulge/bar and disk components of the GRXE. The quoted errors on the values are 90% statistical uncertainties.

Parameter	Value
Bulge/bar	
$\alpha, ^\circ$	29 ± 6
x_0, kpc	3.4 ± 0.6
y_0, kpc	1.2 ± 0.3
z_0, kpc	1.12 ± 0.04
$L_{x,\text{bulge}}, 10^{37} \text{ erg s}^{-1}$	$3.9 \pm 0.5^*$
Reduced $\chi^2/\text{d.o.f.}$	1.24/55
Disk	
R_{disk}	2.5(fixed)
$z_{\text{Sun}}, \text{pc}$	19.5 ± 6.5
$z_{\text{disk}}, \text{kpc}$	0.13 ± 0.02
$L_{x,\text{disk}}, 10^{37} \text{ erg s}^{-1}$	$\sim 10^*$
Reduced $\chi^2/\text{d.o.f.}$	0.93/24

* Without bright point sources.

where

$$r = \left[\left(\frac{x}{x_0} \right)^2 + \left(\frac{y}{y_0} \right)^2 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{1/2}.$$

The major axes x and y of the bar are assumed to lie in the Galactic plane, and the x axis is inclined by an angle α to our line of sight.

Just by varying the normalization of the G3 model of Dwek et al. (1995), we obtain fairly good fits to the measured GRXE intensity profiles, with reduced $\chi^2 \sim 1.3$. This implies that the longitudinal asymmetry clearly evident in Fig. 2 is a natural observational consequence of the (triaxial ellipsoid) bar inclined to our line of sight. The near end of the bar lies in the first Galactic quadrant.

Allowing variations of the parameters, we fitted the measured GRXE intensity profiles shown in Figs. 2 and 3 in the ranges $|l| < 10^\circ$ and $1^\circ < |b| < 8^\circ$, respectively. The derived best-fit parameters are presented in Table 1. These values agree very well with the parameters of the stellar bar obtained by Dwek et al. (1995). We show the best-fit longitudinal and latitudinal intensity profiles in Figs. 2 and 3.

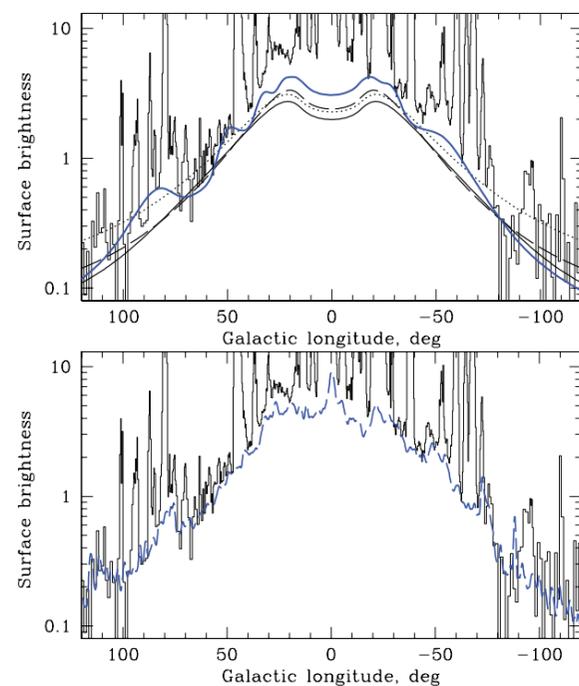


Fig. 4. *Upper panel:* X-ray intensity profile (in units of $10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ deg}^{-2}$) along the Galactic plane ($|b| < 0.5^\circ$). The dashed line shows a model of infinite exponential disk with scale length $R_{\text{disk}} = 2.0 \text{ kpc}$, the dotted line is a model with $R_{\text{disk}} = 2.5 \text{ kpc}$, solid line is a model with $R_{\text{disk}} = 2.5 \text{ kpc}$ with disk truncation at $R_{\text{max}} = 10 \text{ kpc}$. The thick solid line shows an intensity profile corresponding to a simple spiral structure of the Galaxy consisting of four logarithmic spirals with a pitch angle 15° . The intensity peaks manifest the tangents to the spiral arms. *Lower panel:* the solid line is again the X-ray surface brightness profile of the Galaxy ($|b| < 0.5^\circ$), and the dashed line is the near-infrared surface brightness distribution measured by COBE/DIRBE ($3.5 \mu\text{m}$) corrected for interstellar extinction and multiplied by a factor $0.26 \times 10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ deg}^{-2} (\text{MJy/sr})^{-1}$ (see text). The near-infrared map was convolved with the response of the RXTE/PCA collimator ($\sim 1^\circ$).

It is necessary to note that the determined value of the total X-ray luminosity of the bulge given in Table 1 should be regarded with caution because our analysis did not involve detailed modelling of the innermost (cuspy) region of the bulge.

3.2. Galactic disk

The severe confusion problem in the Galactic plane region prevents us from constructing an intensity profile of the GRXE along the Galactic plane with subtracted contribution of bright point-like sources. We can, however, construct a combined intensity distribution of the GRXE and bright point sources along the Galactic plane (within $|b| < 0.5^\circ$), as shown in Fig. 4. On this profile the contributions of discrete sources are seen as rapid (on angular scales $\sim 1^\circ$) variations of the intensity. The GRXE manifests itself as an underlying smooth component. The statistical uncertainty hardly exceeds $10^{-12} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ deg}^{-2}$ anywhere in the Galactic plane.

Despite the strong contamination by bright discrete sources, we can obtain important information about the properties of the GRXE disk from the longitudinal intensity profile shown in Fig. 4.

3.2.1. Longitudinal extent

Following Bahcall & Soneira (1980), Kent et al. (1991), Freudenreich (1996) and Dehnen & Binney (1998), we can parameterize the volume emissivity in the disk ρ_{disk} by two exponentials (of Galactocentric distance R and height above the disk plane z) with a central depression (parameter R_m). At radii $R < R_{\text{max}}$ the volume emissivity is given by

$$\rho_{\text{disk}} = \rho_{0,\text{disk}} \exp \left[- \left(\frac{R_m}{R} \right)^3 - \frac{R}{R_{\text{disk}}} - \frac{z}{z_{\text{disk}}} \right], \quad (1)$$

while $\rho_{\text{disk}} = 0$ at $R > R_{\text{max}}$.

The very limited information that we have about the emissivity of the disk near the Galactic Center (due to bright source contamination) does not allow us to determine the parameter R_m . We hence fixed it at the value $R_m = 3.0 \text{ kpc}$, which is approximately the size of the central stellar disk depression supposedly induced by the bulge/bar of approximately the same size (e.g. Freudenreich 1996, 1998). We note that a central disk depression within approximately $R = 3.0 \text{ kpc}$ is also evident on the Galactic plane map of 6.7 keV line emission obtained by Yamauchi & Koyama (1993), which is much less affected by bright point sources than the GRXE continuum map obtained by RXTE.

In Fig. 4 we show a number of modelled disk intensity profiles: a) an infinite disk with an exponential scale length $R_{\text{disk}} = 2.5 \text{ kpc}$ ($R_{\text{max}} = \infty$); b) a disk with $R_{\text{disk}} = 2.5 \text{ kpc}$ truncated at $R_{\text{max}} = 10 \text{ kpc}$ and c) an infinite disk with $R_{\text{disk}} = 2.0 \text{ kpc}$. Comparison with the measured surface brightness profile demonstrates that the first model provides the worst fit, because it predicts too much emission at large distances from the Galactic Center. Both the infinite disk with $R_{\text{disk}} = 2.0 \text{ kpc}$ and the finite disk with $R_{\text{disk}} = 2.5 \text{ kpc}$ and $R_{\text{max}} = 10 \text{ kpc}$ match the observed profile much better. In the subsequent analysis we assume that the GRXE disk has a scale length of $R_{\text{disk}} = 2.5 \text{ kpc}$ and is truncated at $R_{\text{max}} = 10 \text{ kpc}$. These values are very close to the parameters of the Galactic stellar disk (e.g. Freudenreich 1996; Binney et al. 1997; Freudenreich 1998).

The GRXE is not detectable with RXTE/PCA at longitudes $|l| > 80^\circ$, with an upper limit $\sim 3 \times 10^{-12} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ deg}^{-2}$ for any line of sight (quoted upper limit taken as a 2σ error of the measurement, which is the square root of the sum of squares of the statistical and systematic errors). We point out that measurement of the (weak) ridge emission at these longitudes by an instrument with poor angular resolution can be strongly affected by the presence of relatively bright discrete sources. For example, the published CGRO/OSSE measurement of GRXE at $l = 95^\circ$ (Skibo et al. 1997) is possibly dominated by emission from the active galactic nucleus IGR J21247+5058 recently discovered by INTEGRAL (Masetti et al. 2004).

3.2.2. Possible imprint of the disk spiral structure

There are indications that the GRXE is asymmetric with respect to the Galactic Center. In particular the ridge emission appears stronger at $l = -60^\circ$ than at $l = 60^\circ$ (see Figs. 1 and 4). This asymmetry is probably caused by a significant enhancement of the GRXE in spiral arms with respect to inter-arm regions. Such arm-interarm contrast of the volume emissivity is seen on near-infrared maps of stellar disks in spiral galaxies (e.g. Gonzalez & Graham 1996; Drimmel & Spergel 2001). The observed enhancement of the GRXE in the direction of $l = -60^\circ$ could then be a signature of the tangent to the Crux spiral arm. In Fig. 4 we

show an example of GRXE longitudinal intensity profile corresponding to a Galactic disk with spiral structure. For this model we assumed a simple four-logarithmic-arms spiral structure (e.g. Vallee 1995) with a pitch angle of 15° . The width of the spiral arms was assumed to be 600 pc , and the arm-interarm volume emissivity contrast was assumed to be 2.0.

Summarizing all of the above, we can conclude that the intensity of the disk component of the GRXE follows the near-infrared brightness distribution of the Galaxy. To strengthen this conclusion we present in Fig. 4b the near-infrared brightness profile of the Galaxy at $|b| < 0.5^\circ$ obtained by COBE/DIRBE (zodi-subtracted mission average map provided by the LAMBDA archive of the Goddard Space Flight Center, <http://lambda.gsfc.nasa.gov>). We have chosen the spectral band centered on $3.5 \mu\text{m}$, for which the interstellar extinction is fairly small, and made the simplest correction for the extinction using the map of interstellar HI gas of Dickey & Lockman (1990) and extinction law by Rieke & Lebofsky (1985). The infrared profile was additionally convolved with the PCA collimator response. A very good correspondence between the GRXE and near-infrared intensity profiles is apparent.

3.2.3. Vertical extent

As already mentioned, our study of the GRXE in the Galactic plane strongly suffers from the high density of bright X-ray sources and limited angular resolution of RXTE/PCA. Filtering out discrete sources in the Galactic plane greatly reduces the amount of data at $|b| < 1^\circ$. Only a few regions are suitable for studying the intensity profile of the GRXE perpendicular to the Galactic plane, with the best place evidently being the region around $l \sim 20^\circ$. At this longitude there are no sources brighter than $\sim 10^{-12} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ (Sugizaki et al. 2001) at $b \sim 0^\circ$ and no sources brighter than $\sim 10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ away from the plane (Molkov et al. 2004). We present the vertical profile of the GRXE intensity at $l = 20.2^\circ$ (within a stripe of width $\sim 1^\circ$) in Fig. 5.

One of the most interesting features of the vertical profile is the displacement of its peak from $b = 0^\circ$. The best-fit peak position is $b_{\text{peak}} = -0.15^\circ \pm 0.02^\circ$ (1σ statistical uncertainty). Using available scans across known persistent sources, including supernova remnants, we estimated that the systematic uncertainty in measuring b_{peak} is smaller than $\sim 0.03^\circ$. We therefore conclude that the observed displacement is real. A similar shift of the brightness peak was previously observed in a near-infrared spectral band (e.g. Djorgovski & Sosin 1989; Freudenreich et al. 1994; Porcel et al. 1997), and it was suggested that it arises from the elevation of the Sun above the disk plane.

By fitting the disk model given by Eq. (1), with the Sun elevation above the Galactic plane as an additional parameter (z_{Sun}) to the measured intensity profile at $l = 20.2^\circ$, we obtain the best fit shown in Fig. 5 by a solid line. The best-fit parameters are presented in Table 1.

The measured vertical profile of the X-ray disk volume emissivity is very similar to that of the stellar disk (see e.g. Binney et al. 1997). To better illustrate this we show in Fig. 5 a vertical profile of the near-infrared brightness of the Galactic disk measured at the same Galactic longitude at wavelength $3.5 \mu\text{m}$ (extinction corrected). The COBE/DIRBE infrared map was convolved with the PCA collimator response. Agreement with the X-ray intensity profile is excellent.

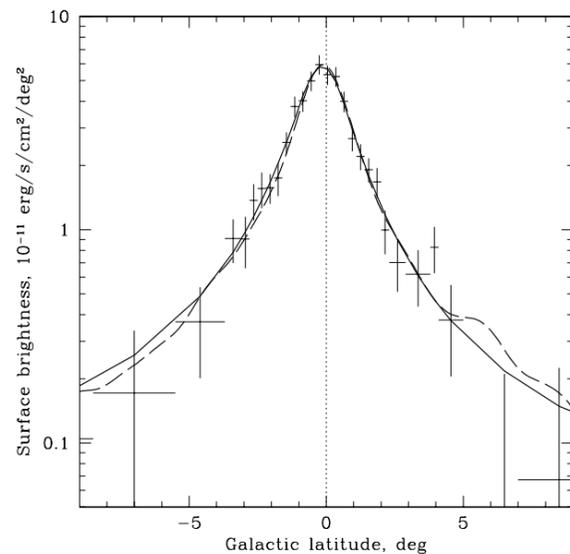


Fig. 5. The GRXE intensity profile in the $\sim 1^\circ$ -wide slide around $l = 20.2^\circ$ perpendicular to the Galactic plane. The solid line shows the best-fit model of the GRXE disk component (see text). The dashed line shows the near-infrared ($3.5 \mu\text{m}$, extinction corrected) brightness distribution in units of MJy/sr multiplied by a factor 0.26.

4. Summary of the GRXE map

Below we summarize the findings of the previous two sections.

1. The GRXE consists of two major components – a disk and a bulge.
2. The bulge/bar component of the GRXE can be described well by a triaxial ellipsoid similar to the one used for description of the Galactic stellar bar (Dwek et al. 1995). The best-fit parameters of the GRXE bulge/bar are fully compatible with those of the stellar bar.
3. The vertical intensity profile of the disk component of the GRXE at $l = 20^\circ$ exhibits a significant offset with respect to $b = 0^\circ$. This offset is compatible with that observed for the Galactic near-infrared (e.g. $3.5 \mu\text{m}$) brightness distribution and can be explained by the elevation of the Sun above the Galactic plane by ~ 20 pc.
4. The intensity profile of the disk component of the GRXE at $l = 20^\circ$ within $|b| < 4^\circ$ can be described by an exponent with a scale height $z_{\text{disk}} = 0.13 \pm 0.02$ kpc, which is compatible with the near-infrared brightness (i.e. stellar mass) distribution of the disk (e.g. Binney et al. 1997; Dehnen & Binney 1998). Further away from the Galactic plane where stellar near-infrared emission is still visible (e.g. Freudenreich 1996), the RXTE/PCA sensitivity is not sufficient to detect the ridge emission.
5. The longitudinal profile of the GRXE intensity is compatible with the profile of near-infrared brightness of the Galaxy. It can be approximated by an infinite exponential disk with a scale length $R_{\text{disk}} = 2.0$ kpc or by a finite disk with a scale length $R_{\text{disk}} = 2.5$ kpc and an outer boundary at $R_{\text{max}} \sim 10$ kpc. The inner stellar disk radius $R_{\text{in}} \sim 3.0$ kpc is compatible with our data but cannot be constrained by these data.
6. There are indications of asymmetry for the GRXE distribution in the Galactic plane with respect to $l = 0^\circ$. We propose that this asymmetry might be caused by the Galactic spiral structure. If this is the case, we expect an arm-interarm

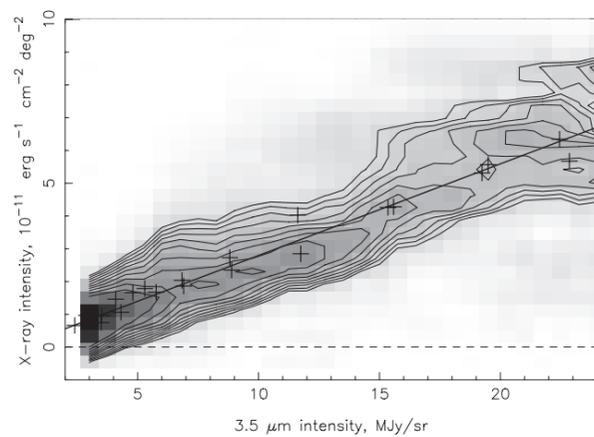


Fig. 6. Grayscale map and contours of isodensity of measurements of X-ray (3–20 keV, RXTE/PCA) and near-infrared ($3.5 \mu\text{m}$, COBE/DIRBE) intensity in multiple sky regions. Discrete X-ray sources with flux $> 1.5\text{--}2 \times 10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ were masked. The solid line shows the linear correlation between near-infrared and X-ray intensities $I_{3\text{--}20 \text{ keV}} (10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ deg}^{-2}) = 0.26 \times I_{3.5 \mu\text{m}} (\text{MJy/sr})$, obtained from a vertical slice of the GRXE disk near $l = 20.2^\circ$ (see Fig. 5). The near-infrared and X-ray intensities for this slice are shown by crosses.

contrast of the GRXE disk volume emissivity of $\sim 2\text{--}3$, as for the near-infrared surface brightness of stellar disks in spiral galaxies. The current observations do not allow us to place tight constraints on the suggested spiral structure of the GRXE.

7. The integral luminosities of the bulge and disk in the 3–20 keV energy band are $(3.9 \pm 0.5) \times 10^{37} \text{ erg s}^{-1}$ and $\sim 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$, respectively. The disk-to-bulge luminosity ratio $L_{\text{x,disk}}/L_{\text{x,bulge}} \sim 2.5$. This value agrees with the disk-to-bulge stellar mass ratio, indicating that the GRXE emissivity per unit mass is similar in the disk and in the bulge. We note, however, that a precise determination of the luminosities of the disk and bulge components, as well as of their ratio, would require an accurate modelling of the disk component across the Galaxy and of the bulge component near the Galactic Center, and such detailed modelling is not possible with RXTE/PCA data.

Based on all these observational facts we can conclude that the GRXE surface brightness (at 3–20 keV) closely follows the near-infrared brightness of the Galaxy and thus the Galactic stellar mass distribution.

To calculate the ratio of X-ray luminosity to stellar mass, it is preferable to use the bulge/bar component of the GRXE, since it is explored with RXTE/PCA in more detail compared to the disk. Assuming a bulge/bar stellar mass of $1\text{--}1.3 \times 10^{10} M_\odot$ (Dwek et al. 1995), we find that the ratio of X-ray luminosity to stellar mass is $L_{\text{x}}/M \sim (3.5 \pm 0.5) \times 10^{27} \text{ erg s}^{-1} M_\odot^{-1}$. The ratio of X-ray (3–20 keV) to near-infrared luminosity at $3.5 \mu\text{m}$ (in the COBE/DIRBE band with a width $\sim 1 \mu\text{m}$) is $L_{3\text{--}20 \text{ keV}}/L_{3\text{--}4 \mu\text{m}} = (4.1 \pm 0.5) \times 10^{-5}$. The latter estimate is based on the near-infrared luminosity of the bulge/bar $L_{3\text{--}4 \mu\text{m}} = 2.5 \times 10^8 L_\odot$ (Dwek et al. 1995).

To illustrate the nearly perfect correlation between the GRXE and the Galactic near-infrared brightness, we show a scatter plot of X-ray surface brightness vs. near-infrared brightness in Fig. 6, constructed by dividing the sky into many small regions. To obtain this diagram, detected point X-ray sources were

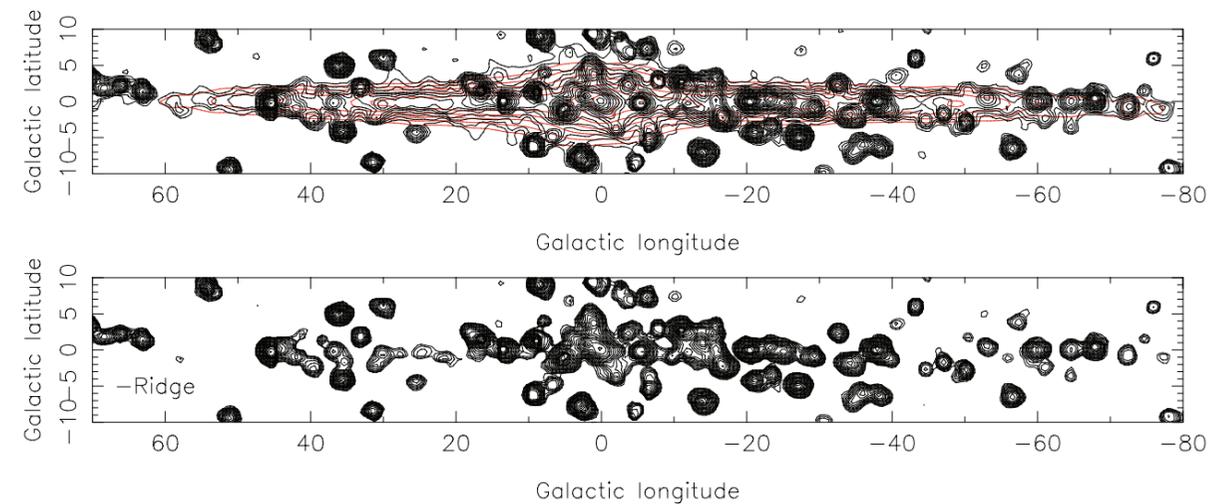


Fig. 7. *Top panel:* RXTE/PCA map of the sky around the Galactic plane in the 3–20 keV band. The red contours show the COBE/DIRBE near-infrared map ($3.5 \mu\text{m}$) rescaled by a factor $I_{3\text{--}20 \text{ keV}} (10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ deg}^{-2}) / I_{3.5 \mu\text{m}} (\text{MJy/sr}) = 0.26 \pm 0.05$ and convolved with the PCA collimator response. The contour levels are logarithmically spaced with a factor of 1.4, with the lowest contour corresponding to an X-ray intensity of $10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ deg}^{-2}$. *Lower panel:* the same RXTE/PCA map with subtracted rescaled near-infrared map. Contour levels are the same as for the upper panel.

masked and the infrared sky map, having much better angular resolution than the X-ray map, was convolved with the response of the RXTE/PCA collimator. The scatter plot is shown as a grayscale density map. The density is calculated within boxes of size $(3 \text{ MJy/sr}) \times (1.5 \times 10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ deg}^{-2})$. The observed strip of enhanced density signifies the correlation of near-infrared and GRXE intensities. The vertical width of the stripe can be fully accounted for by the uncertainty of X-ray measurements.

The one-to-one correspondence between the GRXE map and the Galactic near-infrared brightness map permits the GRXE intensity to be expressed through infrared intensity at wavelength $3.5 \mu\text{m}$ for any line of sight: $I_{3\text{--}20 \text{ keV}} (10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ deg}^{-2}) = (0.26 \pm 0.05) \times I_{3.5 \mu\text{m}} (\text{MJy/sr})$. This linear relation is derived by fitting the vertical slice of the GRXE at $l = 20^\circ$ to the corresponding profile of near-infrared surface brightness (see Fig. 5) and is shown in Fig. 6 (solid line) together with individual measurements for the $l = 20^\circ$ slice (crosses).

The discussion above suggests that the extinction-corrected COBE/DIRBE near-infrared ($3.5 \mu\text{m}$) map of the sky should be nearly identical to the GRXE map upon scaling by a factor $I_{3\text{--}20 \text{ keV}} (10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ deg}^{-2}) / I_{3.5 \mu\text{m}} (\text{MJy/sr}) = 0.26$. Figure 7 demonstrates that this is indeed the case. Subtracting the rescaled near-infrared map from the observed X-ray brightness map of the Galaxy (Fig. 7, upper panel) leaves only point-like X-ray sources (Fig. 7, lower panel).

5. Broad-band spectrum of the GRXE

The infrared brightness of the Galaxy sharply rises within $10'$ of the Galactic Center (Sgr A*) because of the so-called nuclear stellar cluster (e.g. Genzel & Townes 1987; Launhardt et al. 2002). We showed above that, regardless of the origin of the GRXE, its surface brightness traces the near-infrared surface brightness. One may therefore anticipate a sharp rise of the GRXE in the inner $10'$ of the Galaxy. Such an X-ray intensity spike has indeed been observed with Chandra

(Muno et al. 2003), and it has been demonstrated that the total X-ray flux from the inner $10'$ of the Galaxy is not dominated by bright point sources (e.g. Muno et al. 2003; Neronov et al. 2005).

If observed by a hard X-ray telescope with moderate angular resolution, such as IBIS aboard INTEGRAL (angular resolution $12'$, Winkler et al. 2003), the GRXE central cusp will be perceived as a point-like source in the Galactic Center. Assuming that the ratio of the GRXE emissivity to the stellar mass (L_{x}/M) is the same as in the other parts of the Galaxy, the total flux from this source will be determined by the total mass of the nuclear stellar cluster. The innermost 30 pc (corresponding to $12'$ at the Galactic Center distance) of the Galaxy enclose $M_{\text{cusp}} \sim 10^8 M_\odot$ of stars. This predicts a 3–20 keV luminosity of $L_{\text{x}} \sim 3.5 \times 10^{27} M_{\text{cusp}} \sim 4 \times 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$.

If we further assume that the GRXE spectrum in the 3–60 keV range is a power law with a photon index $\Gamma = 2.1$ (as measured in the 3–20 keV range for the bulge component of the GRXE, Revnivtsev 2003), we can roughly predict the hard X-ray luminosity (20–60 keV) of the GRXE from the central cusp: $L_{20\text{--}60 \text{ keV, estimate}} \sim 2 \times 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$. This proves to be only a factor of 2 less than the hard X-ray luminosity of the Galactic Center “point source” measured by INTEGRAL/IBIS (Neronov et al. 2005; Bélanger et al. 2006), which may be considered a good agreement in view of uncertainty concerning the mass of the nuclear stellar cluster and the solid angle subtended by the INTEGRAL source. This also leaves open the possibility that the GRXE from the nuclear region of the Galaxy, which is known to be peculiar in many respects, may be somewhat different from the rest of the Galaxy.

Given the good correspondence between the predicted hard X-ray flux from the central stellar cusp (based on the correlation between the GRXE and the Galactic stellar mass) and the measured flux from the Galactic Center hard X-ray source, it is interesting to attach the INTEGRAL/IBIS spectrum of the Galactic Center source at energies above 20 keV to the spectrum of the large-scale GRXE measured below 20 keV by RXTE/PCA. Both spectra need to be normalized to the same stellar mass. We show

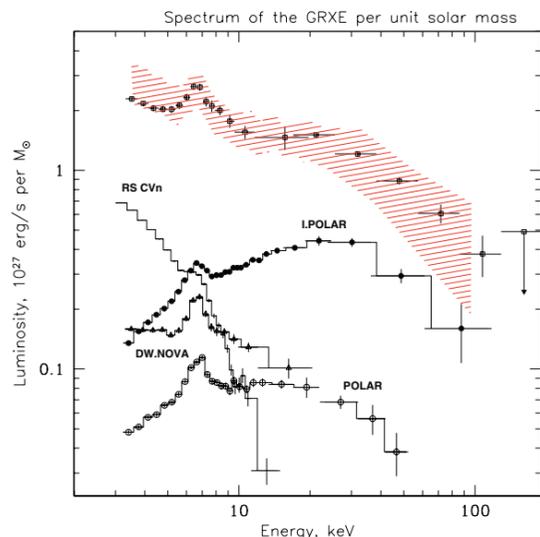


Fig. 8. GRXE broad-band spectrum (squares) and spectra of its main contributors divided by 2 for clarity. The data points in the 3–20 keV band (RXTE/PCA) were converted to unit-stellar-mass emissivity (based on the correlation of the GRXE with the near-infrared brightness, see text). The data points in the 20–100 keV band show the spectrum of the Galactic Center source IGR J17456–2901 measured by INTEGRAL/IBIS divided by the estimated total mass in stars ($\sim 10^8 M_\odot$) contained in the nuclear region (~ 30 pc around Sgr A*). The INTEGRAL/IBIS spectrum was additionally multiplied by a factor 0.6 to match the RXTE/PCA spectrum near 20 keV. Also shown are typical spectra of X-ray source classes expected to significantly contribute to the GRXE: intermediate polars (V1223 Sgr, filled circles), polars (AM Her, open circles), dwarf novae (SU UMa, triangles), and coronally active binaries (V711 Tau). These spectra are plotted with normalizations corresponding to their expected relative contributions to the GRXE (derived from the local statistics of X-ray sources) divided by 2 (for better visibility). The individual source spectra were obtained by the instruments PCA (3–20 keV) and HEXTE (20–100 keV) aboard RXTE. The shaded region shows a sum of these spectra reflecting uncertainties in the individual spectra and their relative weights.

in Fig. 8 the resulting combined spectrum covering a broad energy range from 3 to ~ 100 keV. This spectrum may, to a first approximation, be regarded as a broad-band spectrum of the GRXE. However, one should keep the possibility in mind that the actual hard X-ray spectrum of the GRXE from regions away from the Galactic Center may prove somewhat different, since the Galactic Center is a peculiar region.

6. Galactic ridge X-ray emission as a superposition of point sources

In the previous sections we have presented evidence that the GRXE volume emissivity traces the Galactic stellar density and estimated the ridge X-ray emissivity (3–20 keV) per unit stellar mass as $L_x/M \sim (3.5 \pm 0.5) \times 10^{27} \text{ erg s}^{-1} M_\odot^{-1}$. It is interesting to compare this number with the cumulative X-ray emissivity of the known classes of X-ray sources.

It is known (see e.g. Sazonov et al. 2006) that there is a clear tendency toward spectral hardening with increasing source luminosity. Specifically, the weakest known X-ray sources ($< 10^{31} \text{ erg s}^{-1}$) are characterized by multi-temperature thermal spectra peaking in the soft X-ray regime (stellar coronal sources, see e.g. Schmitt et al. 1990; Güdel 2004), while the

brightest sources contributing to the GRXE ($\sim 10^{33-34} \text{ erg s}^{-1}$) have very hard spectra with significant energy output above 10 keV (intermediate polars, see e.g. Suleimanov et al. 2005). Therefore, it is important to consider the same energy band (3–20 keV) as used in our GRXE study.

We recently used the RXTE slew survey of the sky at high Galactic latitude to construct an X-ray (3–20 keV) luminosity function of nearby (~ 1 kpc) sources, covering a broad range in luminosity from coronally active stellar binaries to white dwarf binaries (Sazonov et al. 2006). Based on this luminosity function, it is straightforward to estimate the contribution of point sources to the GRXE measured by RXTE in the same spectral band.

The total 3–20 keV emissivity of local Galactic X-ray sources per unit stellar mass $L_{x,\text{local}}/M = (5.3 \pm 1.5) \times 10^{27} \text{ erg s}^{-1} M_\odot^{-1}$ or $(6.2 \pm 1.5) \times 10^{27} \text{ erg s}^{-1} M_\odot^{-1}$, if the contribution of young coronal stars is excluded or included, respectively (Sazonov et al. 2006). The bulk of the local X-ray emissivity is produced by coronally active late-type binaries and cataclysmic variables. These classes of sources represent relatively old stellar populations, so their number density is expected to closely trace the overall stellar density in the Galaxy. On the other hand, the relative fraction of young stellar objects is expected to vary strongly from one Galactic region to another, so their locally estimated emissivity may not represent the Galaxy well as a whole. We find that the local X-ray emissivity, excluding the (small) contribution of young coronal stars, agrees within the uncertainties with the GRXE emissivity, $(3.5 \pm 0.5) \times 10^{27} \text{ erg s}^{-1} M_\odot^{-1}$, found in this paper. This suggests that the bulk of the GRXE may be composed of weak X-ray sources of known classes, mostly coronally active binaries and cataclysmic variables.

If the GRXE is indeed superposed on known populations of X-ray sources, then its energy spectrum must be a sum of the spectra of these sources. In Fig. 8 we compare the measured spectrum of the GRXE with typical spectra of those classes of sources that are expected to contribute significantly to the GRXE. Also a composite spectrum is shown, which is a weighted sum of the individual spectra. The weights describing the fractional contributions of different types of sources were fixed at the values determined by Sazonov et al. (2006) for X-ray sources in the Solar neighborhood, namely intermediate polars: polars: dwarf novae: coronally active binaries – 1:0.2:0.6:2.0. As can be seen in Fig. 8, the composite spectrum turns out to be very similar to the GRXE spectrum.

7. On the way toward resolving the GRXE

It is impossible to place strong constraints on the contribution of truly diffuse emission to the GRXE based on the X-ray luminosity function of local sources. First, there remains significant uncertainty about the local Galactic X-ray volume emissivity. But even if future dedicated survey missions like ROSITA (e.g. Predehl et al. 2003) will be able to determine this quantity more accurately, significant uncertainty will still remain owing to the fact that the locally determined unit-stellar-mass X-ray emissivity can only represent other parts of the Galaxy approximately.

It appears that the only possibility of tightly constraining the possible contribution of truly diffuse emission to the GRXE is to detect the weakest point sources at ~ 10 kpc distances and to subtract their contribution from the GRXE. In pursuing this goal, one is likely to face the following observational challenges.

7.1. Surface brightness limit

Far away from the Galactic Center and the Galactic plane, the GRXE is characterized by low surface brightness. It may be anticipated that, below a certain intensity level, the GRXE will be lost in the cosmic variance or small-scale fluctuations of the CXB.

This implies that it should be difficult to study the GRXE in regions characterized by surface brightness lower than $\sim 10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ deg}^{-2}$ (CXB intensity is $\sim 2 \times 10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ deg}^{-2}$). Higher GRXE surface brightness is observed only in the Galactic plane and in the Galactic bulge/bar. The best observational target in this respect is the Galactic Center region, but there the confusion limit may become a problem.

7.2. Confusion limit

In regions of very high GRXE surface brightness (e.g. the Galactic Center region), the surface density of Galactic sources can be very high and observations may be hampered by the confusion limit. For example, observation of the Galactic Center region with Chandra, with its excellent angular resolution ($\sim 1''$), will become confusion limited if the surface density of sources increases by a factor of ~ 40 (to ~ 500 sources arcmin^{-2}) compared to published observations (Muno et al. 2003).

7.3. Sensitivity limit

The observational sensitivity should be aimed at enabling the detection of sources contributing more than e.g. 80–90% of the total X-ray luminosity of discrete Galactic sources (excluding bright X-ray binaries). Using the cumulative luminosity function of Sazonov et al. (2006), we can estimate that sources with luminosities down to $L_x \sim 10^{30} \text{ erg s}^{-1}$ will need to be detected. For the Galactic Center region, where most sources dominating the total flux are located at the Galactic Center distance (~ 8.5 kpc), it will be necessary to achieve a sensitivity limit of $\sim 10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, which is a factor of ~ 13 improvement over the current limit (Muno et al. 2003).

We can also assess the required sensitivity for a given Galactic plane region using our model of the Galaxy (Sect. 3.2) and the luminosity function of Galactic X-ray sources (Sazonov et al. 2006). We use the Galactic plane region at $l = 20^\circ$ as an example. The resulting cumulative number-flux function and cumulative X-ray surface brightness as a function of flux are presented in Fig. 9. These dependencies were calculated for the standard 2–10 keV band to facilitate comparison with X-ray missions such as Chandra and XMM-Newton. Note that the relative contributions of different classes of sources are sensitive to the choice of energy band. In particular, the contribution of coronally active binaries to the GRXE at 2–10 keV is expected to be greater compared to the 3–20 keV band (see e.g. Fig. 8). One should be careful when comparing the presented figure with Chandra observations, because the effectively sensitive energy band of Chandra does not continue to energies higher than ~ 5 –6 keV.

It follows from Fig. 9 that, in order to resolve most of the GRXE into discrete sources and place tight constraints on the contribution of truly diffuse emission to the GRXE, it is necessary to reach point-source flux limits $\sim 10^{-16-16.5} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$. Interestingly, such sensitivity is not unfeasible for Chandra (XMM-Newton will be strongly limited by confusion already at fluxes $\sim 10^{-15} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$).

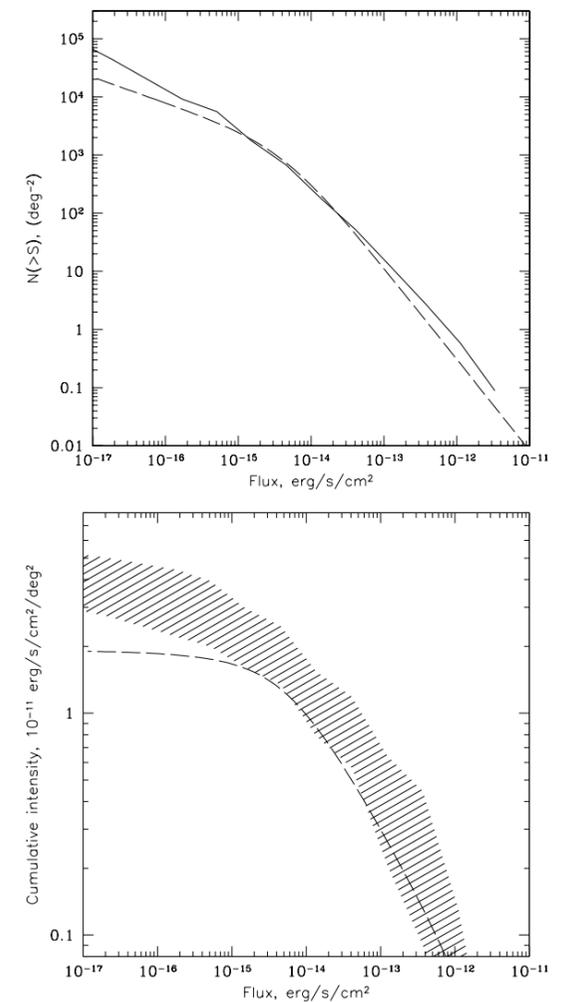


Fig. 9. Upper panel: predicted number-flux function of Galactic (solid line) and extragalactic (dashed line) sources in the 2–10 keV energy band in the direction $l = 20^\circ$, $b = 0.0^\circ$. The number-flux function of extragalactic sources is adopted from Moretti et al. (2003). Lower panel: cumulative surface brightness distribution for the same populations of sources. Shaded region reflects uncertainties in the Galactic X-ray volume emissivity.

Indeed, in the energy band > 3 keV (which we mostly consider here) the Chandra instrumental background is $\sim 7 \times 10^{-8} \text{ cts/s/pix}$ (e.g. Markevitch et al. 2003). The limit for point-source detection is then determined by the source photon counts unless the exposure is longer than ~ 3 –3.5 Ms (we assume that the detection of a point source occurs through a 2×2 pixel cell of the Chandra ACIS detector). For a statistically significant detection of a point source, one should collect ~ 4 –5 photons. We can estimate the time needed to accumulate this number of photons for sources with spectra presented in Fig. 8 using typical Chandra/ACIS-I response functions. We assume an interstellar absorption column of $N_H = 1.5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ in the direction of the observation (approximately corresponding to the interstellar absorption in the direction $l = 20^\circ$, $b = 0^\circ$). Using the spectral shape of V711 Tau, a coronally active binary star representing the dominant population of low luminosity ($< 10^{32} \text{ erg s}^{-1}$) Galactic X-ray sources, we find that a 3–20 keV energy flux of $10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ for Chandra/ACIS-I corresponds to a count

rate $\sim 5\text{--}6 \times 10^{-6}$ cts/s in the energy band 3–8 keV, which gives an estimate of the required exposure time of $\sim 800\text{--}1000$ ks. Note that similar sensitivities have already been achieved in deep surveys of extragalactic fields (e.g. Giacconi et al. 2002; Moretti et al. 2003).

It is important that the predicted number density of sources above the required flux limit ($\sim 5 \times 10^4 \text{ deg}^{-2}$, Fig. 9, upper panel), will not create a confusion problem for Chandra.

At higher energies (>20 keV) lower sensitivities are needed, $\sim 10^{-14\text{--}13.5} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$. This follows from the fact that according to the picture presented here the dominant contribution to the GRXE at these energies very likely comes from polars and intermediate polars with high luminosities ($L_x \sim 10^{32\text{--}34} \text{ erg s}^{-1}$). The surface density of such sources will be $10^{3\text{--}4} \text{ deg}^{-2}$. Both the required sensitivity and angular resolution should be achievable with the projected focusing hard X-ray telescopes, e.g. NuSTAR (e.g. Harrison et al. 2004).

8. Conclusions

- In this paper we have shown that the 3–20 keV map of the GRXE closely follows the near-infrared ($3.5 \mu\text{m}$) brightness distribution of the Galaxy and thus traces the Galactic stellar mass distribution.
- The GRXE map reveals the presence of the Galactic bulge/bar in the inner 3–4 kpc. The parameters of the bar determined from the X-ray data are fully compatible with those obtained from near-infrared observations.
- We demonstrated that the point-like source IGR J17456–2901 in the Galactic Center observed by INTEGRAL/IBIS is likely to be concentrated GRXE from the innermost $\sim 10'$. We used this fact to extend the GRXE energy spectrum up to 100 keV.
- Comparison of the GRXE luminosity-per-unit stellar mass with the cumulative emissivity of X-ray sources in the Solar neighborhood suggests that the bulk of the GRXE is very likely superposed of emission from weak Galactic X-ray sources, mostly cataclysmic variables and coronally active binaries.
- The GRXE energy spectrum in the 3–100 keV range can be explained as a composition of spectra of different X-ray-source classes weighted in accordance with their relative contributions to the local X-ray emissivity.
- Based on the model of Galactic stellar mass distribution, we predict that in order to resolve $\sim 90\%$ of the GRXE in the 2–10 keV band into discrete sources, it will be necessary to achieve a flux limit $\sim 10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$. This sensitivity is within Chandra capabilities.
- For the hard X-ray regime (20–100 keV), the requirement to sensitivity is much less strict, since the dominant contributors to the GRXE in this energy band are intermediate polars and polars with relatively high X-ray luminosities. The required flux limit $\sim 10^{-14\text{--}13.5} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ can be achieved by next-generation hard X-ray telescopes.

Acknowledgements. MR is grateful to Alexey Vikhlinin for valuable discussions about Chandra operations. MR thanks Ralf Launhardt for his advice during the work with COBE/DIRBE data and Andrii Neronov for providing information about XMM-Newton results on the Galactic Center. This research made use of data obtained from the High Energy Astrophysics Science Archive Research Center Online Service, provided by the NASA/Goddard Space Flight Center. We acknowledge the use of the Legacy Archive for Microwave Background Data Analysis (LAMBDA). Support for LAMBDA is provided by the NASA Office of Space Science.

References

- Bahcall, J. N., & Soneira, R. M. 1980, *ApJS*, 44, 73
 Bélanger, G., Goldwurm, A., Renaud, M., et al. 2006, *ApJ*, 636, 275
 Binney, J., Gerhard, O., & Spergel, D. 1997, *MNRAS*, 288, 365
 Bleach, R. D., Boldt, E. A., Holt, S. S., Schwartz, D. A., & Serlemitsos, P. J. 1972, *ApJ*, 174, L101
 Blitz, L., & Spergel, D. N. 1991, *ApJ*, 379, 631
 Bradt, H., Rotshild, R., & Swank, J. 1993, *Ap&SS*, 97, 355
 Cooke, B. A., Griffiths, R. E., & Pounds, K. A. 1970, *IAUS*, 37, 280
 Dehnen, W., & Binney, J. 1998, *MNRAS*, 294, 429
 Dickey, J. M., & Lockman, F. J. 1990, *ARA&A*, 28, 215
 Djorgovski, S., & Sosin, C. 1989, *ApJ*, 341, L13
 Drimmel, R., & Spergel, D. N. 2001, *ApJ*, 556, 181
 Dwek, E., Arendt, R. G., Hauser, M. G., et al. 1995, *ApJ*, 445, 716
 Ebisawa, K., Maeda, Y., Kaneda, H., & Yamauchi, S. 2001, *Science*, 293, 1633
 Ebisawa, K., Tsujimoto, M., Paizis, A., et al. 2005, *ApJ*, 635, 214
 Freudenreich, H. T. 1996, *ApJ*, 468, 663
 Freudenreich, H. T. 1998, *ApJ*, 492, 495
 Freudenreich, H. T., Berriman, G. B., Dwek, E., et al. 1994, *ApJ*, 429, L69
 Genzel, R., & Townes, C. H. 1987, *ARA&A*, 25, 377
 Giacconi, R., Gursky, H., Paolini, R., & Rossi, B. 1962, *Phys. Rev. Lett.*, 9, 439
 Giacconi, R., Zirm, A., Wang, J., et al. 2002, *ApJS*, 139, 369
 Gonzalez, R. A., & Graham, J. R. 1996, *ApJ*, 460, 651
 Grimm, H.-J., Gilfanov, M., & Sunyaev, R. 2002, *A&A*, 391, 923
 Güdel, M. 2004, *A&AR*, 12, 71
 Hands, A. D. P., Warwick, R. S., Watson, M. G., & Helfand, D. J. 2004, *MNRAS*, 351, 31
 Harrison, F., NuSTAR Science Team 2004, *HEAD*, 8, 4105
 Iwan, D., Shafer, R. A., Marshall, F. E., et al. 1982, *ApJ*, 260, 111
 Kent, S. M., Dame, T. M., & Fazio, G. 1991, *ApJ*, 378, 131
 Koyama, K., Makishima, K., Tanaka, Y., & Tsunemi, H., 1986, *PASJ*, 38, 121
 Koyama, K., Awaki, H., Kunieda, H., Takano, S., & Tawara, Y. 1989, *Nature*, 339, 603
 Launhardt, R., Zylka, R., & Mezger, P. G. 2002, *A&A*, 384, 112
 Lebrun, F., Terrier, R., Bazzano, A., et al. 2004, *Nature*, 428, 293
 Lindqvist, M., Habing, H. J., & Winnberg, A. 1992, *A&A*, 259, 118
 Masetti, N., Palazzi, E., Bassani, L., Malizia, A., & Stephen, J. B. 2004, *A&A*, 426, L41
 Markevitch, M., Bautz, M. W., Biller, B., et al. 2003, *ApJ*, 583, 70
 Markwardt, C., Jahoda, K., & Smith, D. A. 2002, <http://lheawww.gsfc.nasa.gov/users/craig/pca-bkg/bkg-users.html>
 Molkov, S. V., Cherepashchuk, A. M., Lutovinov, A. A., et al. 2004, *AstL*, 30, 534
 Moretti, A., Campana, S., Lazzati, D., & Tagliaferri, G. 2003, *ApJ*, 588, 696
 Mukai, K., & Shiokawa, K. 1993, *ApJ*, 418, 863
 Muno, M. P., Baganoff, F. K., Bautz, M. W., et al. 2003, *ApJ*, 589, 225
 Muno, M. P., Baganoff, F. K., Bautz, M. W., et al. 2004, *ApJ*, 613, 326
 Neronov, A., Chernyakova, M., Courvoisier, T. J., & Walter, R. 2005, *A&A* [arXiv:astro-ph/0506437]
 Ottmann, R., & Schmitt, J. H. M. M. 1992, *A&A*, 256, 421
 Porcel, C., Battaner, E., & Jimenez-Vicente, J. 1997, *A&A*, 322, 103
 Predehl, P., Friedrich, P., Hasinger, G., Pietsch, W., & the ROSITA Team 2003, *Astron. Nachr.*, 324, 128
 Revnivtsev, M. 2003, *A&A*, 410, 865
 Revnivtsev, M., Gilfanov, M., Sunyaev, R., Jahoda, K., & Markwardt, C. 2003, *A&A*, 411, 329
 Revnivtsev, M., Sazonov, S., Jahoda, K., & Gilfanov, M. 2004, *A&A*, 418, 927
 Rieke, G. H., & Lebofsky, M. J. 1985, *ApJ*, 288, 618
 Sazonov, S. Y., & Revnivtsev, M. G. 2004, *A&A*, 423, 469v
 Sazonov, S., Revnivtsev, M., Gilfanov, M., Churazov, E., & Sunyaev, R. 2006, *A&A*, 450, 117
 Schmitt, J. H. M. M., Collura, A., Sciortino, S., et al. 1990, *ApJ*, 365, 704
 Skibo, J. G., Johnson, W. N., Kurfess, J. D., et al. 1997, *ApJ*, 483, L95
 Sugizaki, M., Mitsuda, K., Kaneda, H., et al. 2001, *ApJS*, 134, 77
 Suleimanov, V., Revnivtsev, M., & Ritter, H. 2005, *A&A*, 435, 191
 Sunyaev, R. A., Markevitch, M., & Pavlinsky, M. 1993, *ApJ*, 407, 606
 Tanaka, Y. 2002, *A&A*, 382, 1052
 Tanaka, Y., Miyaji, T., & Hasinger, G. 1999, *AN*, 320, 181
 Terrier, R., Lebrun, F., Belanger, G., et al. 2004, *Proceedings of the 5th INTEGRAL Workshop, Munich 16–20 February 2004, ESA SP-552* [arXiv:astro-ph/0405207]
 Vallee, J. P. 1995, *ApJ*, 454, 119
 Valinia, A., & Marshall, F. E. 1998, *ApJ*, 505, 134
 Worrall, D. M., & Marshall, F. E. 1983, *ApJ*, 267, 691
 Worrall, D. M., Marshall, F. E., Boldt, E. A., & Swank, J. H. 1982, *ApJ*, 255, 111
 Warwick, R. S., Pye, J. P., & Fabian, A. C. 1980, *MNRAS*, 190, 243
 Warwick, R. S., Turner, M. J. L., Watson, M. G., & Willingale, R. 1985, *Nature*, 317, 218
 Warwick, R. S., Norton, A. J., Turner, M. J. L., Watson, M. G., & Willingale, R. 1988, *MNRAS*, 232, 551
 Weiland, J. L., Arendt, R. G., Berriman, G. B., et al. 1994, *ApJ*, 425, L81
 Winkler, C., Courvoisier, T. J.-L., Di Cocco, G., et al. 2003, *A&A*, 411, L1
 Yamauchi, S., & Koyama, K. 1993, *ApJ*, 404, 620
 Yamauchi, S., Kawada, M., Koyama, K., Kunieda, H., & Tawara, Y. 1990, *ApJ*, 365, 532
 Yamauchi, S., Kaneda, H., Koyama, K., Makishima, K., et al. 1996, *PASJ*, 48, L15

A&A 425, L49–L52 (2004)
 DOI: 10.1051/0004-6361:200400064
 © ESO 2004

Hard X-ray view of the past activity of Sgr A* in a natural Compton mirror

M. G. Revnivtsev^{1,2}, E. M. Churazov^{1,2}, S. Yu. Sazonov^{1,2}, R. A. Sunyaev^{1,2}, A. A. Lutovinov¹, M. R. Gilfanov^{1,2}, A. A. Vikhlinin^{1,3}, P. E. Shtykovsky¹, and M. N. Pavlinsky¹

- ¹ Space Research Institute Russian Academy of Sciences Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russia
 e-mail: revnivtsev@hea.iki.rssi.ru
² Max-Planck-Institut für Astrophysik, Karl-Schwarzschild-Str. 1, 85740 Garching bei München, Germany
³ Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 60 Garden Street, Cambridge, MA 02138, USA

Received 11 August 2004 / Accepted 31 August 2004

Abstract. We report the association of the recently discovered hard X-ray source IGR J17475–2822 with the giant molecular cloud Sgr B2 in the Galactic Center region. The broad band (3–200 keV) spectrum of the source constructed from data of different observatories strongly supports the idea that the X-ray emission of Sgr B2 is Compton-scattered and reprocessed radiation emitted in the past by the Sgr A* source. We conclude that 300–400 years ago Sgr A* was a low luminosity ($L \approx 1.5 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ at 2–200 keV) AGN with a characteristic hard X-ray spectrum (photon index $\Gamma \approx 1.8$). We estimate the mass and iron abundance of the Sgr B2 scattering gas at $2 \times 10^6 M_{\odot} (r/10 \text{ pc})^2$ and 1.9 solar, respectively (where r is the radius of the cloud).

Key words. Galaxy: center – ISM: clouds: individual: Sgr B2 – X-rays: ISM

1. Introduction

Our Galactic Center (GC) harbors a black hole (BH) with a mass of $3 \times 10^6 M_{\odot}$ (e.g. Schödel et al. 2003). It has remained puzzling why the source Sgr A* associated with the BH is faint despite the presence of significant amounts of ambient gas capable of fuelling it (Melia & Falcke 2001; Baganoff et al. 2003).

Among many complex structures near the GC, X-ray telescopes have detected 8–20 keV continuum (Sunyaev et al. 1993; Markevitch et al. 1993) and 6.4 keV line diffuse emission (Koyama et al. 1996; Murakami et al. 2000; Sidoli et al. 2001; Murakami et al. 2001b) associated with giant molecular clouds, in particular Sgr B2 located at a projected distance of 100 pc from Sgr A*. That was suggested to be radiation emitted in the past by Sgr A*, Compton-scattered and reprocessed by the cloud neutral gas and delayed by the light travel time (Sunyaev et al. 1993; Koyama et al. 1996).

The scattered emission is strongly photoabsorbed within the Sgr B2 cloud at energies below 5–10 keV. However, since the efficiency of photoabsorption rapidly declines with energy, one could expect Sgr B2 to be a strong X-ray source at energies above 15 keV. We show below that such a hard X-ray source has now been observed with the INTEGRAL observatory.

2. Observations and results

The INTEGRAL satellite (Winkler et al. 2003) expands the frontiers of X-ray and gamma-ray imaging. The several-fold

increased effective area of the telescope IBIS (Ubertini et al. 2003) compared to the previous space-borne hard X-ray imager GRANAT/SIGMA, opens up a possibility to study hard X-ray sources located in crowded regions of the sky, at flux levels (above 20 keV) down to 1 mCrab (Revnivtsev et al. 2004a).

During the period 2003–2004 INTEGRAL extensively observed the central 20×20 arcmin area of the Galaxy (Revnivtsev et al. 2004a). Figure 1 shows a hard X-ray image of the innermost 3.5×2.5 arcmin region obtained from observations with a total effective exposure of 2.3 Ms. Thanks to the good angular resolution ($12'$) of IBIS, practically all bright sources in this area are resolved, most of them being known low-mass X-ray binaries. The newly discovered source IGR J17475–2822 (Revnivtsev et al. 2004a) is coincident with the Sgr B2 molecular cloud. Since the X-ray flux below 10 keV collected from the IBIS PSF centered on IGR J17475–2822 is completely dominated by diffuse emission of Sgr B2 (Sidoli et al. 2001; Murakami et al. 2001b), we can safely associate IGR J17475–2822 with this diffuse component. The observed flux in the 20–200 keV band is $2.5 \pm 0.1 \text{ mCrab}$, or $7 \times 10^{-11} \text{ erg s}^{-1}$, which corresponds to a luminosity of $6 \times 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$ at a distance of 8.5 kpc. To our knowledge, this is the first ever detection of X-ray emission above 20 keV from any molecular cloud.

We constructed a broad band spectrum of the source (Fig. 2) by combining data of GRANAT, ASCA and INTEGRAL. The ASCA/GIS spectrum was collected from a $6.5'$ -radius region centered on IGR J17475–2822 using data of observations carried out in 1993–1994.

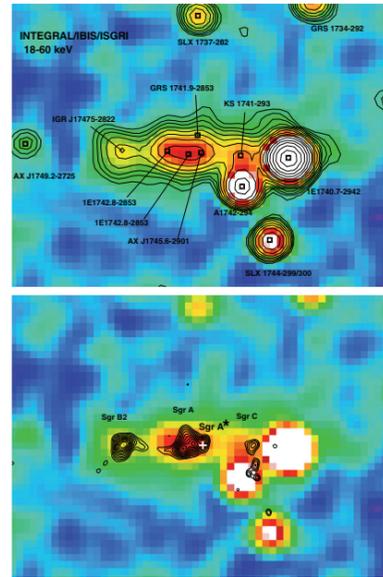


Fig. 1. Upper panel: $3.5^\circ \times 2.5^\circ$ hard X-ray (18–60 keV) image of the GC region obtained with INTEGRAL/IBIS. Contours denote levels of the signal to noise ratio, which start from $S/N = 5.0$ and increase with a multiplicative factor of 1.4. Detected known X-ray sources are indicated (see Revnivtsev et al. 2004a for details). Lower panel: The same IBIS color image, with overplotted contours of brightness distribution in the 6.4 keV line as measured by ASCA/GIS. Largest molecular clouds are indicated and the position of the Sgr A* source is marked with a cross.

The GRANAT/ART-P spectral point was obtained from observations in 1991–1993 (Pavlinsky et al. 1994). Note that the different effective beam sizes of the instruments ($\sim 5'$ for GRANAT/ART-P and $\sim 12'$ for INTEGRAL/IBIS) can affect the obtained spectrum. This effect should however be small given the limited size (3–5') of the Sgr B2 cloud in X-rays.

3. Discussion

3.1. X-ray reflection nebula model

The 2–10 keV flux from Sgr B2 is dominated by diffuse emission in a line at 6.4 keV superposed on strongly absorbed continuum emission (Koyama et al. 1996). A number of smaller molecular clouds in the GC region also exhibit powerful 6.4 keV line emission, although with low absolute fluxes compared to Sgr B2 (Murakami et al. 2001a; Bamba et al. 2002; Predehl et al. 2003; Park et al. 2004). Common for all of these sources is the huge (1–2 keV) equivalent width of the 6.4 keV line.

According to an early prediction (Sunyaev et al. 1993), X-ray activity of Sgr A* in the recent past should lead just to such observational consequences, i.e. to the appearance of scattered X-ray radiation, strongly photoabsorbed at low energies, and of a powerful fluorescent iron K_α line (see detailed analysis of 6.4 keV emission line in Murakami et al. 2000, 2001b).

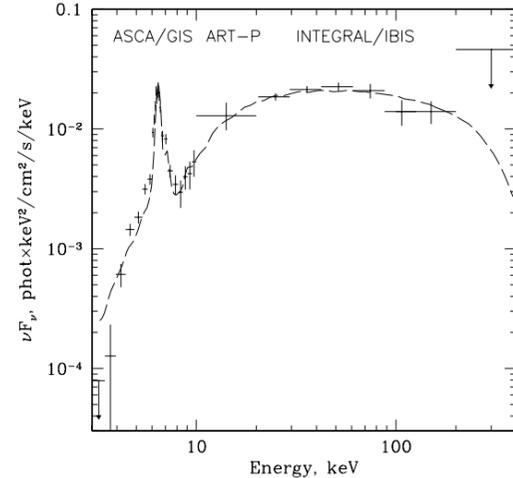


Fig. 2. Broad band X-ray spectrum of the source IGR J17475–2822 associated with the Sgr B2 cloud. Data of ASCA/GIS (3–10 keV), GRANAT/ART-P (10–20 keV) and INTEGRAL/IBIS (20–400 keV) are presented. 1σ error bars and 2σ upper limits are shown. The dashed line is the best-fit model (see main text) convolved with the resolution of ASCA/GIS ($\sigma \approx 230$ eV).

The X-ray echo from Sgr B2 should be delayed by 300–400 years relative to the direct signal from Sgr A* due to the light travel time from Sgr A* to Sgr B2. The equivalent width of the K_α line is so large because we do not see the primary source itself. The fact that INTEGRAL sees X-ray emission above 20 keV from the zone of 6.4 keV emission in Sgr B2 (see Fig. 1) provides strong support to this scenario. Unfortunately, the angular resolution of IBIS is not sufficient to study the diffuse emission of the other GC molecular clouds due to the presence of a large number of strong point sources.

Our spectral analysis further supports the Sgr A* scenario. As shown in Fig. 2, the spectral energy distribution of Sgr B2 measured with INTEGRAL at 20–200 keV matches the 3–20 keV spectrum measured with ASCA and GRANAT/ART-P. The combined spectrum at 3–200 keV can be well fit by a model in which X-rays from Sgr A* are scattered and reprocessed in a homogeneous spherical cloud of cold gas. Scattering of the hard X-rays occurs on the neutral molecular hydrogen and helium (Sunyaev & Churazov 1996) while the abundance of iron determines the intensity of the fluorescent K_α line.

The spectrum emerging from Sgr B2 depends on several parameters: the slope (Γ) of the incident spectrum (assumed to be a power law), the cloud radial optical depth to Thomson scattering [$\tau_T = \sigma_T(2n_{H_2})r$, where n_{H_2} is the number density of hydrogen molecules and r is the cloud radius], the iron abundance relative to solar (A), the scattering angle (θ) for photons traveling from Sgr A* to Sgr B2 and then to us, and the ISM column density toward Sgr B2 (N_H). Using Monte Carlo simulations of the radiative transfer in the gas cloud, we find the following best-fit values: $\Gamma = 1.8 \pm 0.2$, $\tau = 0.4 \pm 0.1$, $A = 1.9 \pm 0.2$, $\theta = 80^\circ \pm 10^\circ$, and $N_H = (8 \pm 2) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ (given are 1σ statistical errors). Note that the obtained parameters are in

general agreement with those derived by Murakami et al. (2000, 2001b) but now we have significantly widened the energy spectrum of Sgr B2 that allowed to obtain additional constraints on the intrinsic shape of the spectrum of Sgr A* and the relative positions of Sgr B2 and Sgr A*. The uncertainties associated with the gas density distribution in Sgr B2 and with the cross-calibration of the instruments can lead to additional $\sim 30\%$ systematic uncertainties on the values of τ and θ , while our estimates of the iron abundance and spectral slope are more robust. The best-fit model is shown in Fig. 2.

Based on the measured optical depth we can estimate the mass of the scattering gas in Sgr B2 as $M_{H_2} = (4\pi/3)m_p(2n_{H_2})r^3 = (4\pi/3)(m_p/\sigma_T)\tau r^2 \approx 2 \times 10^6 M_\odot (r/10 \text{ pc})^2$.

In the above model the high-energy rollover tentatively seen in the INTEGRAL spectrum is explained by the Compton recoil of hard X-ray photons in the cloud and is very sensitive to θ . Allowing for the possibility of an intrinsic cutoff in the illuminating spectrum, we are able to place an upper limit of $\theta < 135^\circ$ on the mutual position of Sgr A* and the Sgr B2 cloud.

Using the measured X-ray flux from Sgr B2 and best-fit spectral parameters, we find that the luminosity of Sgr A* in the 2–10 keV and 2–200 keV band was 0.5 and $1.5 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1} (r/10 \text{ pc})^{-2} (d/100 \text{ pc})^2$, respectively, where d is the distance between Sgr A* and Sgr B2.

3.2. Alternative scenarios

Alternative explanations of the X-ray emission of Sgr B2 meet severe difficulties. Instead of attributing the primary emission to Sgr A* one could hypothesize that a transient source inside the Sgr B2 cloud was irradiating the molecular gas. The large equivalent width of the 6.4 keV line implies that we are seeing pure reprocessed emission but not the primary source. The source therefore should have faded away before the ASCA observations of 1993, i.e. more than 10 years ago. Since the light crossing time of the Sgr B2 cloud is ~ 30 years, one would expect to see a decline of the 6.4 keV line flux by a factor of 2 from 1993 till now (Sunyaev & Churazov 1998).

Using archival data of ASCA, BeppoSAX, Chandra and XMM observatories we find no significant variability of the line flux during the period 1993–2001 (see Fig. 3) in contradiction with the internal source hypothesis. For each X-ray telescope, we extracted the 6.4 keV line flux from the same $3'$ radius circular region centered at the peak (RA = 266.830126, Dec = -28.386593) of the Chandra image in the 6.4 keV line. The background emission (instrumental plus diffuse sky background unrelated to Sgr B2) was similarly estimated for all the instruments in a $3'$ -radius region around RA = 266.874812, Dec = -28.501369 . The data were reduced using standard utilities recommended by the Guest Observer Facilities.

INTEGRAL observations similarly indicate that the continuum 18–60 keV flux was constant within 25% during 2003–2004. For the Sgr A* model, the constancy of the line flux merely means that the luminosity of Sgr A* remained approximately constant for more than 10 years a few hundred years

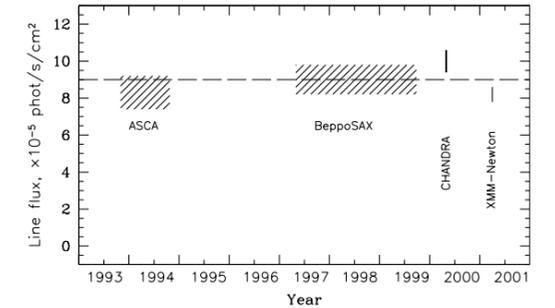


Fig. 3. Summary of flux measurements in the 6.4 keV line from the Sgr B2 cloud. 1σ uncertainties are indicated. See text for details.

ago, while the fact that other molecular clouds in the GC region also shine in the 6.4 keV line indicates that the entire period of activity lasted much longer than 10 years. The possibility that the GC molecular clouds have been irradiated by external transient sources such as X-ray binaries has been ruled out before (Sunyaev & Churazov 1998; Murakami et al. 2001b).

The diffuse emission from the Sgr B2 cloud being a superposition of a large number of weak point sources inside the cloud is very unlikely. First of all, the cumulative emission of X-ray sources (mostly young, low mass stars) in nearby, well-studied molecular clouds such as Orion and ρ Oph is substantially softer (Revnivtsev et al. 2004b) than that of Sgr B2 and does not exhibit a strong intrinsic 6.4 keV emission line (Feigelson et al. 2002; Imanishi et al. 2001). The observed huge equivalent width of the 6.4 keV line cannot then be explained by reprocessing of the point sources' emission by the molecular gas. An even stronger constraint comes from the fact that several GC molecular clouds with hydrogen column densities ranging between 10^{23} and 10^{24} cm^{-2} (Bamba et al. 2002; Park et al. 2004) all exhibit a similar equivalent width of the 6.4 keV line. We briefly note that for reflecting clouds with a small optical depth, the absorption edge above 7.1 keV (Predehl et al. 2003) need not be strong even if the 6.4 keV line equivalent width is large.

The bombardment of molecular gas by low energy cosmic ray electrons was put forward (Valinia et al. 2000; Yusef-Zadeh et al. 2002) to explain the 6.4 keV emission. The electrons produce inner-shell ionizations of iron atoms, leading to 6.4 keV line emission, and simultaneously generate bremsstrahlung radiation. In this model, the lack of a strong cutoff below 200 keV in the spectrum of Sgr B2 implies that electrons with energies higher than a few hundred keV should be present, while the slope of the observed spectrum ($\Gamma \approx 2$) constrains the distribution of electrons in energy. Given these observational constraints, we can estimate in the thick target approximation that only $(1-3) \times 10^{-5}$ of the cosmic ray electrons' energy can go into hard X-ray radiation around 50 keV. Thus, to produce the observed luminosity at 50 keV of $\sim 3 \times 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$ at least $(1-3) \times 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$ of energy in cosmic ray electrons ought to be dumped into the cloud. This power is comparable to the bolometric (mostly infrared) luminosity of Sgr B2 (Gordon et al. 1993) which is thought to be mostly due to hot stars. Since Sgr B2 with its dust is an almost perfect calorimeter, no room is

left for additional energy in nonthermal, low energy cosmic ray protons. Furthermore, the equivalent width of the 6.4 keV line (with respect to the bremsstrahlung continuum) is predicted to be 250–350 eV for solar abundance of iron. Therefore, the observed ~2 keV equivalent width requires a factor of 5–6 overabundance of iron in Sgr B2.

Production of a 6.4 keV line by cosmic ray ions rather than electrons (Dogiel et al. 1998; Tatischeff et al. 1998) requires similar high energetics and strong overabundance of iron. In addition, heavy ions (e.g. oxygen) should produce multiple ionizations of iron atoms leading to a blue shift of the 6.4 keV line, which is not observed. Charge exchange reactions of nonthermal iron ions with the ambient H₂ and He should produce a broad hump at ~6.7 keV, which is not observed in Sgr B2 either. The cosmic rays model thus encounters very serious problems.

4. Conclusion

We thus come to the conclusion that the Sgr B2 cloud is sending us an X-ray echo of violent activity of the GC supermassive BH some 300 years ago, which lasted at least 10 years. The luminosity of Sgr A* at that time was $\approx 5 \times 10^{38}$ erg s⁻¹ in the 2–10 keV band, i.e. a few $\times 10^5$ times higher than it is now (Baganoff et al. 2003). The 2–200 keV luminosity was $\approx 1.5 \times 10^{39}$ erg s⁻¹. Sgr A* was therefore similar to low luminosity active galactic nuclei (LLAGN) rather than to more powerful Seyfert galaxies. LLAGN emit most of their energy in the near infrared (Ho 1999) and we can estimate that the bolometric luminosity of Sgr A* was $\sim 10^{40}$ erg s⁻¹. This is still only $\sim 3 \times 10^{-5}$ of the critical Eddington luminosity of the central BH. Thanks to INTEGRAL, we now know that Sgr A* had a power-law spectrum with a photon index of ~1.8, without a significant cutoff up to 100 keV. This spectrum is remarkably similar to the few directly measured hard X-ray spectra of LLAGN (Pellegrini et al. 2000a,b).

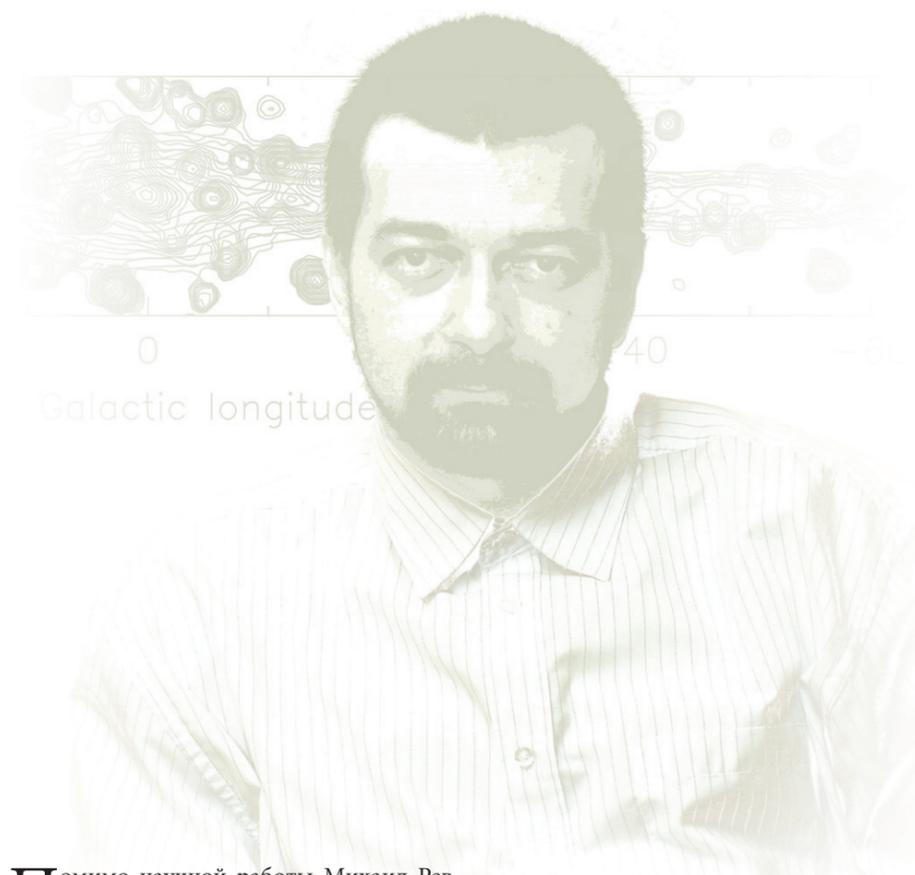
It is actually not surprising that our GC was so active in the recent past, as AGN with luminosities higher than 10^{38} erg s⁻¹ (2–10 keV) are found in ~50% of galaxies morphologically similar (of type Sb) to the Milky Way (Ho et al. 1997, 2001). There is a significant probability that Sgr A* will become bright again in the foreseeable future. That would provide the much needed information about the duty cycle of activity in galactic nuclei.

Future instruments will be able to further test the Sgr A* irradiation model. In particular ASTRO-E2 will probe the Compton shoulder with a peculiar spectrum on the low-energy side of the 6.4 keV line, caused by down-scattering of the line photons on the molecular hydrogen and helium atoms (Sunyaev & Churazov 1996; Vainshtein et al. 1998; Sunyaev et al. 1999). The relative strength of the shoulder should be proportional to the optical depth of individual molecular clouds. In addition, the Compton scattered X-ray continuum should be more than 50% polarized in contrast to the fluorescent line (Churazov et al. 2002), and future X-ray polarimeters will be able to determine the scattering angle and hence the location of Sgr B2 on the line of sight. Polarization mapping of the GC molecular clouds would yield a full 3D geometry of the region.

Acknowledgements. This work is based on observations belonging to the Russian share (proposal IDs 120213 and 0220133) in the observing time of INTEGRAL, an ESA project with instruments and science data center funded by ESA member states (especially the PI countries: Denmark, France, Germany, Italy, Switzerland, Spain), Czech Republic and Poland, and with the participation of Russia and the USA. We thank Kevin Hurley for sharing with us his INTEGRAL TO observations. This research has made use of data obtained through the High Energy Astrophysics Science Archive Research Center Online Service, provided by the NASA/Goddard Space Flight Center.

References

- Baganoff, F. K., Maeda, Y., Morris, M., et al. 2003, ApJ, 591, 891
 Bamba, A., Murakami, H., Senda, A., et al. 2002, in *New Visions of the X-ray Universe in the XMM-Newton and Chandra Era*, ed. F. Jensen (Noordwijk: ESTEC)
 Churazov, E., Sunyaev, R., & Sazonov, S. 2002, MNRAS, 330, 817
 Dogiel, V. A., Ichimura, A., Inoue, H., & Masai, K. 1998, PASJ, 50, 567
 Feigelson, E. D., Broos, P., Gaffney, J. A., et al. 2002, ApJ, 574, 258
 Gordon, M. A., Berkermann, U., Mezger, P. G., et al. 1993, A&A, 280, 208
 Ho, L. C. 1999, ApJ, 516, 672
 Ho, L. C., Filippenko, A. V., & Sargent, W. L. W. 1997, ApJ, 487, 568
 Ho, L. C., Feigelson, E. D., Townsley, L. K., et al. 2001, ApJ, 549, 51L
 Imanishi, K., Koyama, K., & Tsuboi, Y. 2001, ApJ, 557, 747
 Koyama, K., Maeda, Y., Sonobe, T., et al. 1996, PASJ, 48, 249
 Markevitch, M., Sunyaev, R. A., & Pavlinsky, M. 1993, Nature, 364, 40
 Melia, F., & Falcke, H. 2001, ARA&A, 39, 309
 Murakami, H., Koyama, K., Sakano, M., et al. 2000, ApJ, 534, 283
 Murakami, H., Koyama, K., Tsujimoto, M., et al. 2001a, ApJ, 550, 297
 Murakami, H., Koyama, K., & Maeda, Y. 2001b, ApJ, 558, 687
 Park, S., Muno, M. P., Baganoff, F. K., et al. 2004, ApJ, 603, 548
 Pavlinsky, M., Grebenev, S., & Sunyaev, R. 1994, ApJ, 425, 110
 Pellegrini, S., Cappi, M., Bassani, L., et al. 2000a, A&A, 353, 447
 Pellegrini, S., Cappi, M., Bassani, L., della Cecca, R., & Palumbo, G. G. C. 2000b, A&A, 360, 878
 Predehl, P., Costantini, E., Hasinger, G., & Tanaka, Y. 2003, Astron. Nachr., 324, 73
 Revnivitsev, M. G., Sunyaev, R. A., Varshalovich, D. A., et al. 2004a, Astron. Lett., 30, 382
 Revnivitsev, M., Sazonov, S., Jahoda, K., & Gilfanov, M. 2004b, A&A, 418, 927
 Schödel, R., Ott, T., Genzel, R., et al. 2003, ApJ, 596, 1015
 Sidoli, L., Mereghetti, S., Treves, A., et al. 2001, A&A, 372, 651
 Sunyaev, R. A., & Churazov, E. M. 1996, Astron. Lett., 22, 648
 Sunyaev, R., & Churazov, E. 1998, MNRAS, 297, 1279
 Sunyaev, R. A., Markevitch, M., & Pavlinsky, M. 1993, ApJ, 407, 606
 Sunyaev, R. A., Uskov, D. B., & Churazov, E. M. 1999, Astron. Lett., 25, 199
 Tatischeff, V., Ramaty, R., & Kozlovsky, B. 1998, ApJ, 504, 874
 Ubertini, P., Lebrun, F., Di Cocco, G., et al. 2003, A&A, 411, 131L
 Vainshtein, L. A., Syunyaev, R. A., & Churazov, E. M. 1998, Astron. Lett., 24, 271
 Valinia, A., Tatischeff, V., Arnaud, K., Ebisawa, K., & Ramaty, R. 2000, ApJ, 543, 733
 Winkler, C., Courvoisier, T. J.-L., Di Cocco, G., et al. 2003, A&A, 411, L1
 Yusef-Zadeh, F., Law, C., & Wardle, M. 2002, ApJ, 568, L121



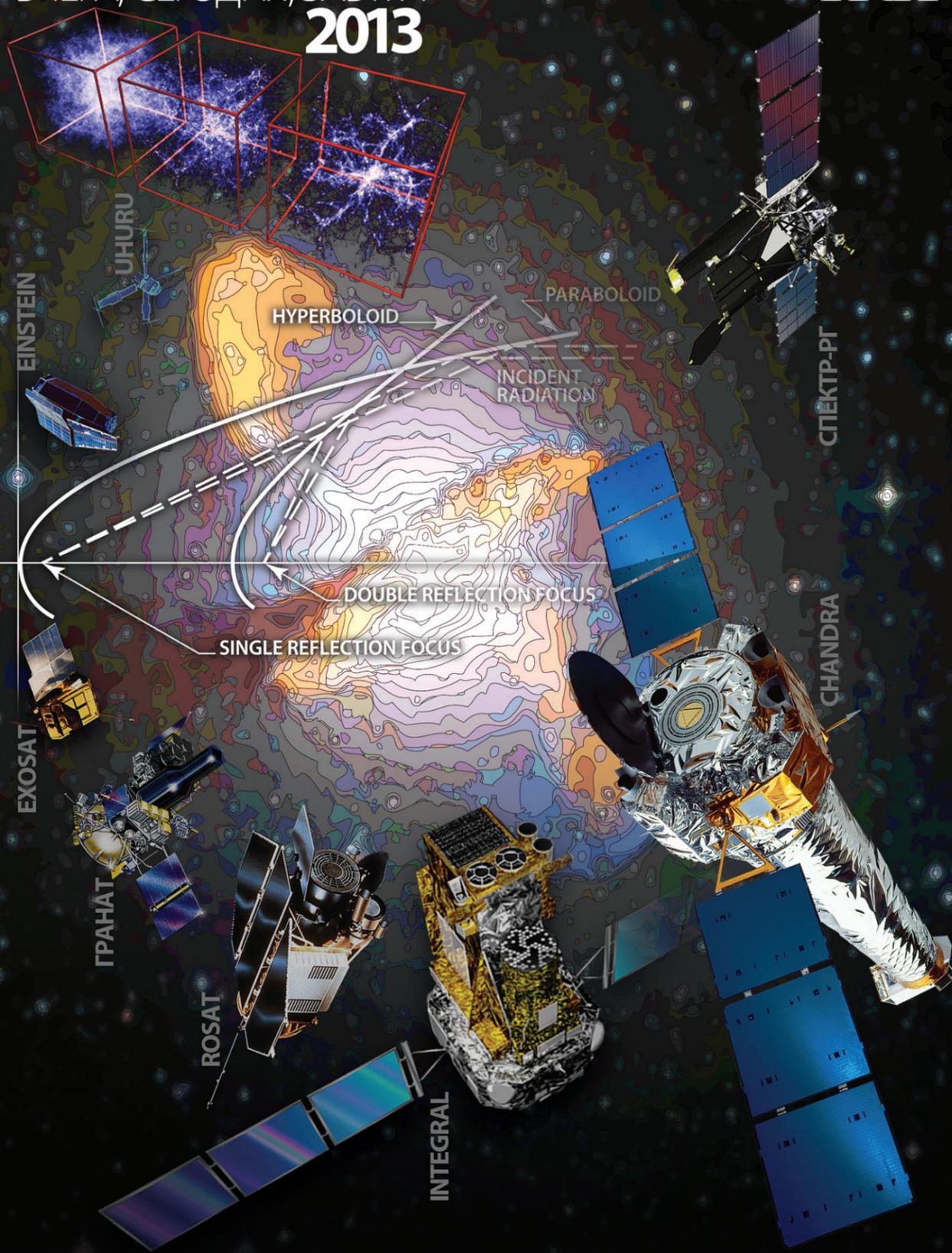
НАУЧНО-
ПОПУЛЯРНЫЕ
СТАТЬИ
МИХАИЛА
РЕВНИВЦЕВА

Помимо научной работы Михаил Ревнивцев посвящал большую часть времени обучению студентов, популяризации науки. Он много выступал с лекциями, читал образовательные курсы для студентов и аспирантов, руководил их научно-исследовательскими работами, писал научно-популярные статьи и обзоры. В книгу включены три, возможно, наиболее ярких и увлекательных научно-популярных статьи Михаила Ревнивцева в их оригинальном издании.

РЕНТГЕНОВСКАЯ АСТРОНОМИЯ

ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА
2013

ИКИ®



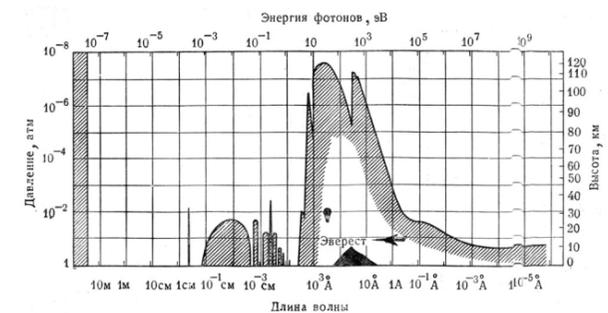
Рентгеновская астрономия: вчера, сегодня, завтра

Открытие космического рентгеновского излучения

Рентгеновская астрофизика - уникально богатая наука. В рентгеновском диапазоне (т.е. в диапазоне энергий фотонов от ~0.5 до 10-100 кэВ) излучает много классов объектов Вселенной - от межзвездной среды и гелиосферы, от обычных звезд, белых карликов, нейтронных звезд, до черных дыр в нашей Галактике и в ядрах огромного количества других галактик, и межгалактической среды скоплений галактик.

Атмосфера Земли абсолютно непрозрачна для рентгеновского излучения. Если измерения в области энергий фотонов выше 20 кэВ возможны с высотных стратостатов (на высотах выше 20-30 км), то для того чтобы регистрировать излучение с энергией около 1 кэВ (длина волны около 12 ангстрем) необходимо подняться на высоту не менее 100 км, поэтому первые шаги в этой области стали возможны только с развитием ракетных технологий.

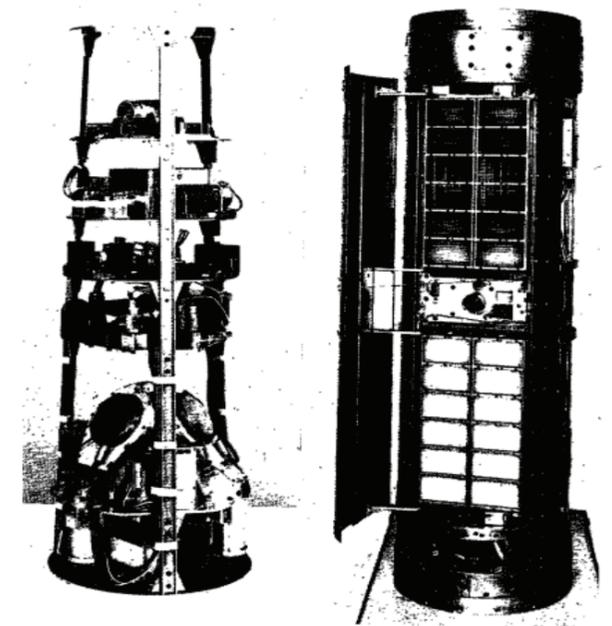
Первые астрономические измерения рентгеновского излучения начались в конце 40х - начале 50х годов с наблюдений Солнца на ракетах V-2 (см, например, Фридман и др. 1951). В качестве регистрирующего прибора использовался модифицированный счетчик Гейгера, т.е. газоразрядная трубка, регистрирующая сигнал при прохождении через нее ионизирующего фотона. Однако простое масштабирование рентгеновского потока Солнца на расстояния до других звезд показывало, что при имеющихся характеристиках рентгеновских инструментов регистрация потока любых других звезд кроме Солнца невозможна. Оценки рентгеновских светимостей других астрофизических



Высота, до которой проникает электромагнитное излучение разных энергий. Показаны высоты, до которых доходит 1/10 от падающего излучения. Хорошо видно, что с поверхности Земли нам доступно лишь излучение в узкой полосе видимого света и в радио-диапазоне.

объектов (таких как остатки вспышек сверхновых, вспыхивающие звезды и т.д.) имели огромные неопределенности, поэтому ожидалось, что следующим по яркости объектом рентгеновского неба будет Луна (за счет флуоресценции в потоке рентгеновских лучей Солнца).

В начале 60х годов были предприняты шаги по улучшению регистрирующей аппаратуры на основе пропорциональных газовых счетчиков. Улучшение чувствительности было достигнуто за счет появления антисовпадетельной защиты (из-за этого существенно



Общий вид полезной нагрузки в ракетных экспериментах группы AS&E в полетах 1962 года (слева) и 1964 года (справа)

уменьшилась скорость счета событий, регистрирующихся при прохождении через счетчик заряженных частиц, не связанных с рентгеновскими фотонами) и увеличения эффективной площади прибора. Полет ракеты Aerobee 18 июня 1962 года, пронесшей рентгеновский детектор группы Риккардо Джаккони (AS&E) на высотах до 225 км (общее время на высоте выше 80 км составило 350 секунд), ознаменовал собой начало эры рентгеновской астрономии.

Рентгеновское излучение Луны обнаружено не было (оно впервые было зарегистрировано на советском спутнике Луна-12 в 1966 г, Мандельштам и др. 1968), но были сделаны два важнейших открытия: 1) обнаружено изотропное (имеющее одинаковую яркость в разных направлениях) рентгеновское излучение - космический рентгеновский фон (КРФ) Вселенной, 2) открыт яркий источник рентгеновского излучения, названный в дальнейшем Скорпион X-1, ярчайший источник рентгеновского неба (Джаккони и др. 1962)

В течение последующих десяти лет было проведено большое количество экспериментов в области рентгеновской астрономии при помощи запуска регистрирующей аппаратуры на ракетах. Также было проведено большое количество экспериментов на стратостатах. Эксперименты на стратостатах должны были регистрировать более жесткие рентгеновские лучи, с энергией выше 20 кэВ (фотоны меньших энергий не достигают высоты стратостатов). Пропорциональные газовые счетчики практически прозрачны на таких энергиях, поэтому регистрирующая аппаратура строилась на других принципах.

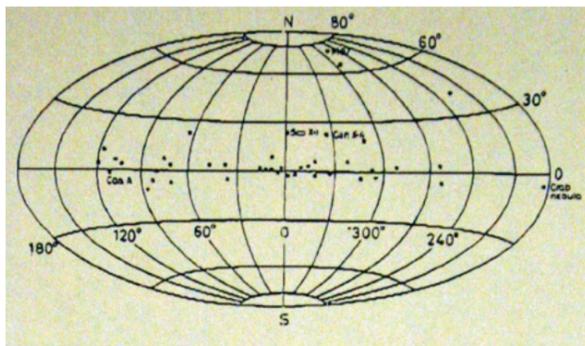
Для регистрации жесткого рентгеновского фотона использовались, как правило, сцинтилляционные кристаллы NaI(Tl), окруженные либо пластиком, либо CsI(Tl) сцинтиллятором, служащим антисовпадетельной защитой. При прохождении фотона через сцинтиллятор возникает вспышка света, которая ре-



Запуск стратостата рентгеновской группы MIT 15 октября 1970 г. В этом полете был открыт рентгеновский пульсар GX 1+4

гистрируется при помощи фотоумножителя. Яркость вспышки зависит от энергии фотона, что позволяет проводить спектрометрические измерения.

В ходе этих экспериментов было открыто значительное количество рентгеновских источников, включая объект в Крабовидной туманности (так называемый источник Таурус X-1). Большим плюсом экспериментов на стратостатах была возможность проводить наблюдения в течении многих часов, что позволило достичь чувствительностей лучше, чем в области энергий 1-10 кэВ. Более того, у некоторых источников удалось обнаружить переменность их яркости на масштабах минут, которая, как оказалось в дальнейшем, возникала из-за вращения формирующих это рентгеновское излучение нейтронных звезд. Однако в то время такие выводы не могли быть сделаны из-за малой длительности наблюдений отдельных объектов.



Карта всего неба с положениями рентгеновских источников, открытых к концу 1960х годов

Следующей ступенью к увеличению длительности работы рентгеновских инструментов стало размещение их на спутниках. В первых спутниковых экспериментах аппаратура рентгеновского диапазона была лишь дополнительной полезной нагрузкой, например на советских разведывательных спутниках типа Зенит: Космос-208 (1968), Космос-251 (1968), Космос-264 (1969), Космос-428 (1971), Космос-856 (1976), Космос-914 (1977) и т.д., на лунных модулях Космос-60 (1965), Луна-10 (1966), Луна-12 (1966), на малых спутниках Космос-135 (1966), Космос-163 (1967), Космос-461(1971-1979).

Практически все инструменты этих спутников, работающие в области рентгеновских лучей, представляли собой сцинтилляторы, либо обзорающие всю доступную часть неба с целью измерения космического рентгеновского фона (как, например, аппаратура спутников Космос-135, Космос-163, Космос-461), либо наблюдающие части неба, ограниченные пассивным коллиматором. В первых экспериментах сцинтилляторы не были снабжены антисовпадательной защитой, что существенно снижало их чувствительность к рентгеновским фотонам. В более поздних экспериментах сцинтилляторы снабжались антисовпадательной защитой (Космос-856, Космос-914).

Среди результатов, полученных в ходе этих экспериментов, необходимо отметить получение надежных измерений космического рентгеновского фона в области энергий 20-500 кэВ (Голенецкий и др. 1971, Мазец и др. 1975). В ходе сканирующих наблюдений было обнаружено несколько рентгеновских источников (Братолюбова-Цулукидзе и др. 1976, Бабушкина и др. 1975), в том числе открытых незадолго до этого специализированной рентгеновской обсерваторией UHURU. Среди существенных недостатков части этих экспериментов можно назвать малое время работы на орбите (около двух недель) из-за небольших высот орбит спутников, а также сложности орбитальной калибровки инструментов. Отсутствие хорошей калибровки (полетная калибровка рентгеновских приборов, как правило, не проводилась) приводило к тому, что заявленные характеристики обнаруженных источников не подтверждались другими группами исследователей, и результаты этих измерений мало использовались в научной литературе.

Первые спутниковые измерения и обзоры неба в рентгеновских лучах

Прорывом в рентгеновской астрономии стало появление специализированных орбитальных обсерваторий. Это позволило увеличить время наблюдений объектов от 5 минут, доступных для ракетных измерений, до месяцев и даже лет, т.е. практически в десятки тысяч раз. Первая специализированная орбитальная рентгеновская обсерватория была создана в рамках программы НАСА малых астрономических спутников (SAS-Small Astronomical Satellite) и получила название SAS-A или UHURU.

Орбитальная обсерватория SAS-A или UHURU (Ухуру в переводе с суахили означает 'свобода'; спутник был назван так в честь 7-ой годовщины независимости Кении, у берегов которой с морской платформы Сан-Марко 12 декабря 1970 г. состоялся запуск обсерватории SAS-A) предназначалась для обзора всего неба с недостижимой ранее чувствительностью (время работы на орбите 1970-1973 гг).

Уже до запуска этой обсерватории было ясно, что, по всей видимости, рентгеновские источники имеют разную природу, поэтому необходимо было составить перепись наиболее ярких объектов неба, а также иметь возможность провести более детальное исследование отдельных источников. С этой целью обсерватория должна была систематически сканировать небо при помощи двух коллимированных (т.е. имеющих поле зрения, ограниченное пассивным коллиматором) пропорциональных газовых счетчиков собирающей площадью около 840 кв.см. каждый. Скорость сканирования могла быть изменена по требованию программы наблюдений. В стандартном режиме на-

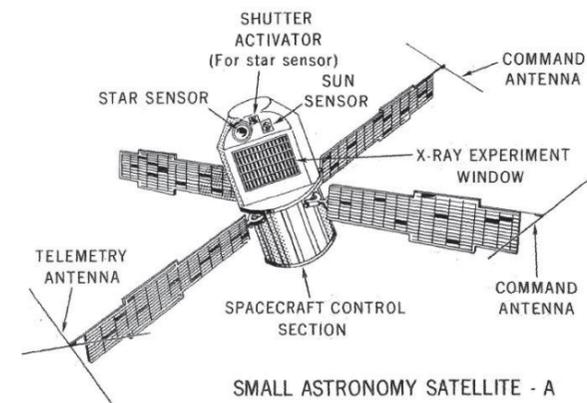


Схема рентгеновской обсерватории SAS-A (UHURU).

блюдений оптические оси спектрометров (с полями зрения 0.5x5 градусов и 5x5 градусов) сканировали небо по большим окружностям, смещаясь на 1 градус в день.

Результатом обзора неба обсерватории UHURU стал каталог из 399 источников разной природы от белых карликов и нейтронных звезд до галактик и скоплений галактик (Форман и др. 1978). Благодаря возможности проведения длительных наблюдений индивидуальных источников удалось решить проблему природы рентгеновского излучения ярких источников в нашей Галактике.

Дело в том, что, несмотря на открытие значительного количества рентгеновских источников в предыдущее десятилетие и даже оптическое отождествление ярчайшего из них - Скорпион X-1 (Сандэдж и др. 1966), механизм генерации такой большой светимости (рентгеновская светимость источника Скорпион X-1 приблизительно в 100 тысяч раз больше болометрической светимости Солнца) был не ясен. К началу 70х годов XX века появились идеи, что источником энергии для нее может быть выделение гравитационной энергии при падении вещества на компактный звездный остаток (Зельдович 1964, Салпитер 1964), однако с наблюдательной точки зрения убедительных подтверждений этим предположениям не было найдено.

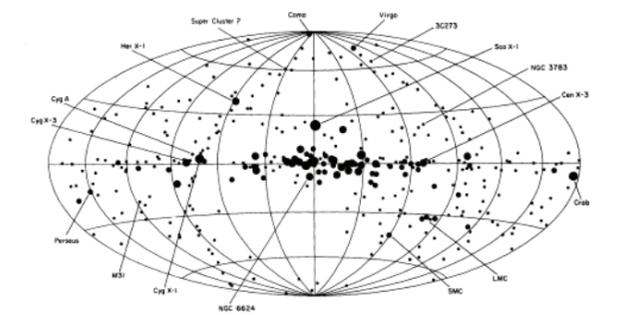
Ситуация существенно изменилась в начале 1970х годов, когда при помощи наблюдений обсерватории UHURU было показано, что по крайней мере некоторые рентгеновские источники являются двойными звездными системами (Шрайер и др. 1972). Было обнаружено, что один из ярких рентгеновских источников (Cen X-3) пульсирует, и частота пульсаций меняется систематическим образом из-за движения пульсирующего объекта вокруг центра масс двойной системы вследствие эффекта Доплера. Более того, было обнаружено систематическое уменьшение частоты пульсаций этого источника (ускорение вращения пульсирующего объекта), показывающее, что существует взаимодействие вещества обычной звезды с пульсирующим объектом. Вместе с открытием радиопульсаров (в 1967 году А.Хьюишом и Дж.Белл) это указывало на то, что пульсирующим источником является компактный объект - нейтронная звезда.

Обсерватория UHURU открыла целый ряд направлений в рентгеновской астрономии. Благодаря относительно лучшей точности локализации зарегистрированных рентгеновских источников часть из них удалось связать с известными источниками радиоиз-

лучения и впоследствии отождествить. Таким образом, например, была отождествлена первая двойная система с черной дырой Лебедь X-1.

За время работы обсерватории UHURU было обнаружено, что излучение объекта Лебедь X-1 существенно меняет свои характеристики. Это стало предвестником феномена 'рентгеновских транзиентов' (источников, время от времени вспыхивающих на рентгеновском небе), также открытых в ходе работы обсерватории UHURU (например, рентгеновская Новая в созвездии Волка 3U1543-47), на изучение которых впоследствии будут направлены большие усилия.

Благодаря улучшенному угловому разрешению спектрометров обсерватории UHURU впервые удалось обнаружить рентгеновское излучение скоплений галактик, причем не как суммарное излучение большого количества отдельных галактик, а как излучение межгалактической среды (Гурски и др. 1971). Позже, обсерваторией Ariel-V (1974-1980), в спектре излучения скопления галактик была обнаружена эмиссионная линия высокоионизированного железа (Митчелл и др. 1976), что непосредственно указало на природу этого излучения как излучения горячей оптически тонкой плазмы - межгалактического газа скопления.

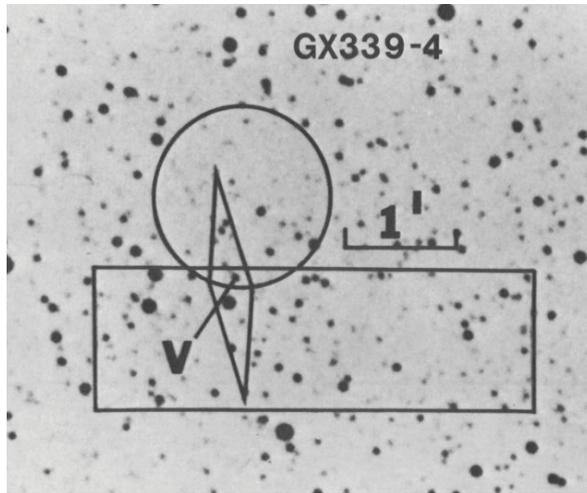


Положение на небе источников, открытых обсерваторией UHURU

После обсерватории SAS-A (UHURU) обзоры неба с аналогичной или с несколько лучшей чувствительностью были проведены со спутников HEAO1 (США, 1977-1979), Ariel-V (Великобритания/США, 1974-1980). Увеличение чувствительности достигалось увеличением эффективной площади детекторов.

Для определения природы рентгеновского источника критически важно получить его отождествление в оптическом, инфракрасном или радио-диапазонах длин волн. Однако для большей части источников, открытых этими обсерваториями, сделать это было невозможно при наличии только имеющейся грубой локализации. Проблема была особенно острой в области Галактической плоскости и Галактического балджа (центральной области Галактики), где поверхностная плотность звезд очень велика и для надежного отождествления галактических рентгеновских источников с оптическими объектами необходимы астрометрические точности их положения на уровне угловой секунды. Для решения этой проблемы было предложено несколько методов.

Первые попытки более точно определить как угловой размер рентгеновского источника (Крабовидной туманности), так и его положение на небе, были сделаны при помощи затмения исследуемого объекта Луной (Бауер и др. 1964). Было обнаружено, что источник существенно неточный с диаметром около 1-2



Изображение области неба вокруг рентгеновского источника GX 339-4 в оптическом диапазоне. Круг и прямоугольник показывают положение, определенное при помощи наблюдений коллимированными спектрометрами обсерваторий UHURU и Ariel-V. Ромб показывает положение, определенное при помощи наблюдений инструмента с модуляционным коллиматором АЗ на обсерватории HEAO1. Истинное положение источника показано буквой V. Из работы Докси и др. (1979)

угловых минут. Однако затмения источников Луной происходят редко, и набор источников, подходящих для такого исследования, существенно зависит от типа орбиты космической обсерватории. Например, для спутника на близкой околоземной орбите это будет возможно лишь для источников в области плоскости эклиптики. Для того, чтобы иметь возможность наблюдать большое количество рентгеновских источников методом их покрытия Луной в конце 60х годов Европейской организации по исследованию космоса (предшественнику современной ЕКА) был предложен проект HELOS (англ. Highly Eccentric Lunar Occultation Satellite), с сильно вытянутой эллиптической орбитой с большим наклоном. К середине 70х годов, ввиду появления более совершенных методов достижения высокого углового разрешения рентгеновских инструментов, проект был переориентирован на долговременные наблюдения рентгеновских источников инструментами с большой собирающей площадью и был реализован в 1983-1986 годах как обсерватория EXOSAT.

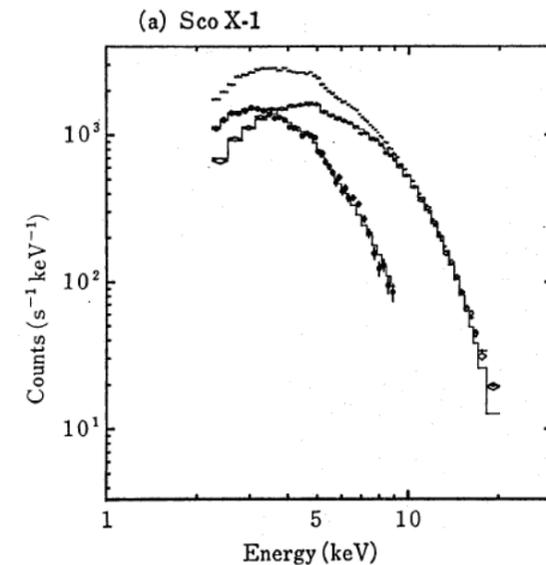
Другим способом определения размеров и угловых положений источников на небе стали наблюдения при помощи так называемых модуляционных коллиматоров. Основным принципом работы такого прибора является модуляция потока источников системой открытых и закрытых элементов коллиматора, анализируя который можно восстановить астрометрическое положение источника. Такие исследования начали проводиться еще на ракетных экспериментах, что позволило определить положение десятка ярчайших источников с точностью около 0.5-1 угл. минуты (Гурски и др. 1966, Шноппер и др. 1970). Существенное развитие эта методика получила на спутниках SAS-3 (1975-1979), HEAO1 (1977-1979), Ariel-V (1974-1980). В ходе этих экспериментов были определены положения нескольких десятков объектов с точностями до 20 угловых секунд (см. например Докси и др. 1977), которую смогли превзойти в дальнейшем только при помощи рентгеновских телескопов с фокусирующей оптикой.

Аккреционные диски, горячая плазма внутренних частей аккреционного диска

Совершенствование рентгеновских детекторов шло по пути увеличения их эффективной площади, улучшения пространственного, спектрального и временного разрешения. С конца 1970х годов до 2010х годов сменилось несколько поколений рентгеновских обсерваторий, каждая следующая из которых в чем-то улучшала характеристики предыдущих.

Если первые инструменты имели всего несколько энергетических каналов (в особенности это ограничение было сильно у советских приборов из-за сильно ограниченного объема телеметрической информации, выделенного под результаты научных измерений), то к 1980-ым годам количество энергетических каналов превысило сотню.

Большой комплекс наблюдений, проведенных при помощи японской обсерватории Tenma (время работы на орбите 1983-1985), позволил сравнить предсказания модели излучения аккреционных дисков вокруг компактных объектов (Шакура, Сюняев 1973) и показать очень хорошее согласие с экспериментальными результатами (Митсуда и др. 1984). Модель излучения аккреционных дисков (Шакура, Сюняев 1973) позволяла оценить размер их внутренних ра-



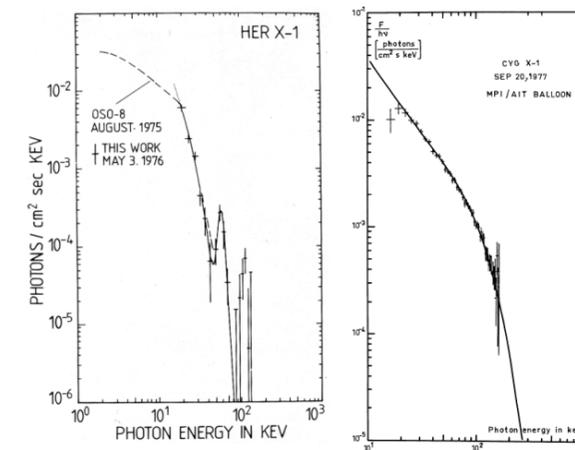
Спектр излучения ярчайшего источника рентгеновского неба Скорпион X-1 по данным наблюдений обсерватории Tenma. Гистограммами показаны модели спектра излучения аккреционного диска (модель из работы Шакуры и Сюняева 1973) и нейтронной звезды (модель излучения абсолютно черного тела). Из работы Митсуда и др. (1984)

диусов, что в свою очередь давало возможность оценить размер компактного источника (черной дыры, нейтронной звезды), вокруг которого сформировался аккреционный диск. Этот метод оценки параметров компактных объектов претерпел определенные изменения в связи с учетом различных эффектов переноса излучения и т.д., но до сих пор широко используется в рентгеновской астрономии.

В жестком рентгеновском диапазоне энергий (выше 10-20 кэВ) чрезвычайно важным оказывается

влияние скорости счета заряженных частиц в детекторе. Поэтому для надежного измерения потока даже самых ярких объектов рентгеновского неба (например, излучения двойной системы с черной дырой Лебедь X-1) необходимо очень точно контролировать вклад фоновой скорости счета в полную скорость счета детектора. Чтобы решить эту проблему для инструментов жесткого рентгеновского диапазона был предложен так называемый 'метод качающегося коллиматора': измерения потока от источника систематически чередуются с измерениями потока с пустых площадок рядом с ним. Эксперименты, проведенные на стратостатах в конце 1970х годов, позволили сделать важные измерения спектров источников разных классов и открыть несколько особенностей в спектрах, давших важную диагностику физических параметров вещества вблизи нейтронных звезд и черных дыр.

При наблюдениях с помощью рентгеновских спектрометров жесткого рентгеновского диапазона со стратостатов в 1976 году в спектре излучения нейтронной звезды в двойной системе Геркулес X-1 были обнаружены эмиссионные особенности (Трюмпер и др. 1978). Они практически сразу же были интерпретированы как проявление циклотронного поглощения



Слева: спектр излучения аккрецирующей нейтронной звезды в двойной системе Геркулес X-1. Хорошо видны линейчатые эмиссионные особенности на энергии около 40 кэВ -- циклотронная линия поглощения излучения в сильном магнитном поле нейтронной звезды (из работы Трюмпер и др. 1978). Справа: спектр излучения двойной системы с черной дырой Лебедь X-1 по данным стратостатных экспериментов. Сплошной кривой показана модель формирования излучения в результате комптоновского рассеяния фотонов на горячих электронах вблизи черной дыры (из работы Сюняев, Трюмпер 1980)

- поглощения рентгеновского излучения электронами при их переходе между квантовыми уровнями Ландау в сильном магнитном поле (этот эффект был предсказан незадолго до его обнаружения в работе Гнедина и Сюняева 1974).

Открытие линий циклотронного поглощения (наблюдения более современными обсерваториями позволяют обнаруживать до четырех гармоник циклотронного поглощения) впервые позволило напрямую измерить значение напряженности магнитного поля вблизи поверхности нейтронных звезд - около 10^{12} Гаусс.

Наблюдения излучения черных дыр в жестком рентгеновском диапазоне энергий долгое время

не давали ответа на вопрос, - какой физический механизм ответственен за его формирование. Первые эксперименты на стратостатах показывали простой степенной спектр (т.е. степенную зависимость плотности потока фотонов от их энергии) на энергиях 10-50 кэВ, что не позволяло сделать надежные выводы о механизме возникновения этого излучения. Высказывались предположения о том, что излучение в жестком рентгеновском диапазоне должно, скорее всего, рождаться не в оптически толстой среде, рассмотренной в работах Шакуры и Сюняева (1973), а в очень горячей разреженной плазме в непосредственной близости к компактному объекту. Собственно жесткое рентгеновское излучение в рамках этой модели должно было формироваться в результате рассеяния затравочных фотонов на горячих электронах в этой внутренней области (Шапиро, Лайтман, Эрдли 1976).

Необходимым следствием этой модели являлось наличие экспоненциального завала в спектре излучения на энергии, соответствующей температуре горячих электронов вблизи черной дыры. Только в конце 1970х годов удалось надежно обнаружить эту особенность в спектре излучения Лебедь X-1 и детально объяснить ее форму (Сюняев, Трюмпер. 1979, Сюняев, Титарчук 1980). Это дало надежную диагностику физических параметров плазмы вблизи черных дыр.

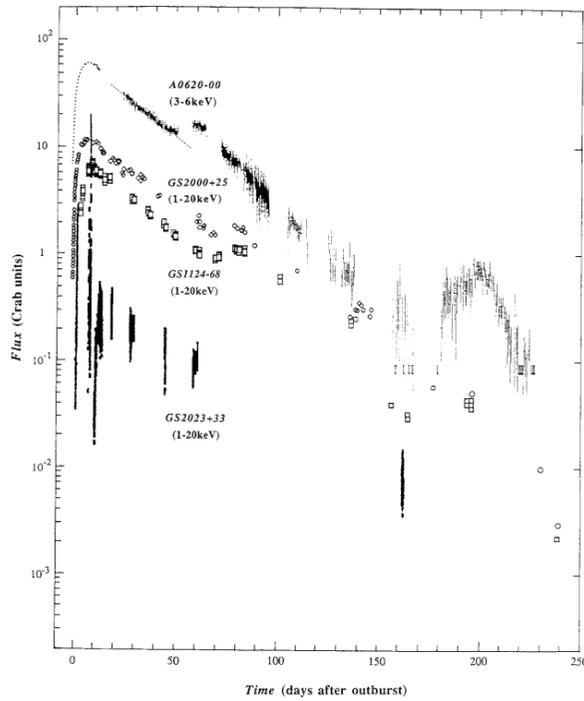
Следующее существенное увеличение чувствительности измерений и, в особенности, картографирование неба на энергиях 20-200 кэВ, стало возможным лишь после появления позиционно чувствительных детекторов этого энергетического диапазона.

Термоядерные взрывы на поверхности нейтронных звезд, рентгеновские Новые

Возможность проводить длительные наблюдения рентгеновских источников позволили открыть их новые важные свойства. Уже в наблюдениях спутника SAS-A/UHURU было отмечено, что источники в области галактической плоскости и галактического балджа (т.е. по всей видимости, источники, расположенные в нашей Галактике) иногда сильно меняют как свою светимость в рентгеновском диапазоне, так и характеристики своего рентгеновского излучения.

Во время наблюдений рентгеновского источника в шаровом скоплении NGC 6624 (название источника в каталоге UHURU 4U1820-30) в сентябре 1975 года спутник ANS (время работы на орбите 1974-1976 гг) обнаружил два всплеска яркости с характерным временем подъема потока менее 1 секунды и экспоненциальным спадом потока с характерным временем около 10 секунд (Гриндлэй и др. 1976) Анализ полученных данных позволил исключить вероятность того, что открытый всплеск является фоновым событием (т.е. связанным с прохождением через детектор заряженных частиц). Оказалось, что уже в 1969 году в данных обзорных спутников Vela-5B аналогичное событие наблюдалось от источника Cen XR-4 (Белиан и др. 1972), однако в то время никто не высказал предположение, что наблюдавшийся всплеск является проявлением какого-то особенного механизма выделения энергии.

Дальнейшие исследования таких событий позволили сделать вывод, что они являются результатом взрывного термоядерного горения на поверхностях нейтронных звезд (см. обзор Льюин 1981). Излучение формируется в оптически толстой атмосфере нейтронной звезды, внутри которой за короткое время



Кривые яркости нескольких рентгеновских Новых - двойных систем с черными дырами, яркость которых на некоторое время (несколько месяцев) возрастает в тысячи раз по отношению к их яркости в «выключенном» («спокойном») состоянии. Из обзора Танака, Шибасаки (1996)

произошло большое выделение энергии. С тех пор все рентгеновские обсерватории посвящают большую часть своего наблюдательного времени изучению таких событий. Интерес к изучению всплесков термоядерного горения связан как с возможностями использовать эти события для определения масс и радиусов нейтронных звезд, так и возможностью с их помощью «просвечивать» окрестности нейтронных звезд.

Еще одним феноменом, обнаруженным в ходе долговременных наблюдений рентгеновских источников в нашей Галактике, было открытие так называемых рентгеновских Новых. Рентгеновские Новые представляют собой объекты, чье излучение в спокойном состоянии на много порядков слабее, чем их излучение во время вспышек. Измерения рентгеновской светимости в так называемом «выключенном» состоянии обсерваториями последнего поколения (Chandra, XMM-Newton) показывают, что в это время их светимость не превышает 10^{32} - 10^{33} эрг/сек, в то время как во время вспышек светимость рентгеновских Новых может достигать значений 10^{38} эрг/сек и выше.

Изучение феномена рентгеновских Новых показало, что их вспышки, по всей видимости, связаны с нестационарной аккрецией в двойной системе (см. обзор Ласота 1991). В выключенном состоянии темп аккреции (темп течения вещества) через диск очень мал. Постепенное накопление вещества аккреционного диска приводит к его «переключению» в «активное» состояние, при котором темп аккреции достигает значений 10^{-8} масс Солнца в год и наблюдается мощная вспышка излучения. После выпадения в результате аккреции большей части накопленного вещества из диска он опять может перейти в «выключенное» состояние

и источник может фактически исчезнуть с рентгеновского неба.

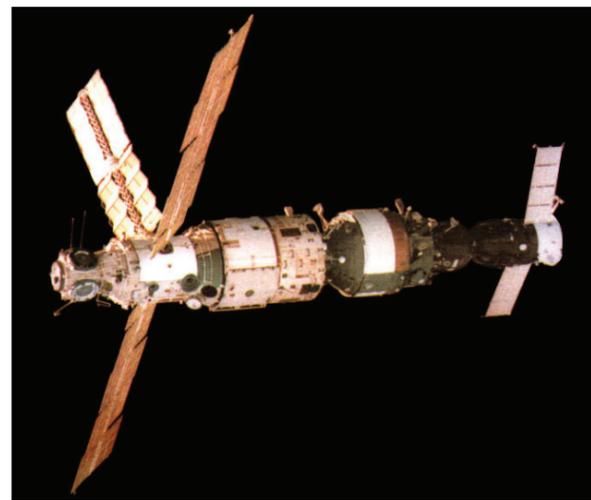
Оказалось, что среди рентгеновских Новых большую часть составляют двойные системы с черными дырами. Интерес к изучению таких объектов в большой степени обусловлен их большой яркостью, что дает возможность проводить измерения характеристик излучения черных дыр с точностями невозможными для других источников.

Одной из наиболее ярких вспышек рентгеновских Новых за всю историю рентгеновской астрономии стала вспышка в созвездии Единорога в 1975 году. Эта рентгеновская Новая получила обозначение A0620-00 (буква 'A' в названии показывает, что объект был открыт обсерваторией Ariel-V). Ее яркость в пике блеска в несколько десятков раз превышала яркость Крабовидной туманности (источник рентгеновского неба, часто используемый как некий стандарт яркости). Изучение этого события привело к всплеску интереса к рентгеновским Новым.

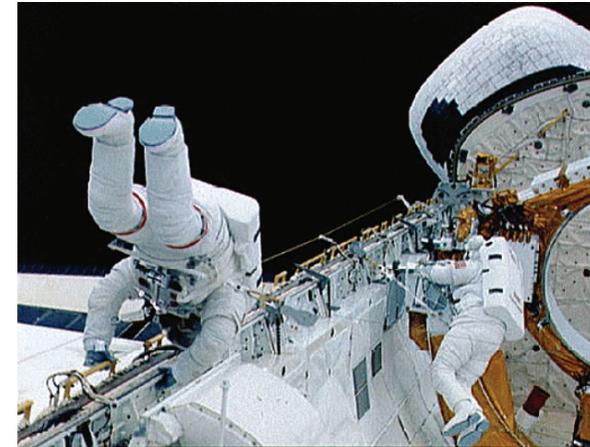
Рентгеновские эксперименты на пилотируемых аппаратах

Рентгеновские исследования на космических аппаратах в 1970х годах были существенно ограничены возможностями записи и передачи информации на Землю. Проблемы возникали с надежностью записывающей и передающей аппаратуры, пропускной способностью телеметрического канала, надежностью автоматики и т.д. Дополнительной возможностью обеспечить организацию астрофизических экспериментов и доставку результатов наблюдений на Землю стало проведение астрофизических наблюдений космонавтами.

Одним из первых опытов астрономических экспериментов на пилотируемых аппаратах стали орбитальные космические обсерватории ультрафиолетового диапазона Орион-1 и рентгеновский телескоп РТ-2, работавшие на орбитальной станции Салют-1 в июне 1971 года и обсерватория ультрафиолетового диапазона Орион-2, работавшая на космическом корабле Союз-13 в декабре 1973 года. В ходе экспедиции Аполлон-16 в апреле 1972 г. с поверхности Луны были



Орбитальная станция МИР с пристыкованным модулем КВАНТ-1



Астронавты работают с рентгеновским спектрометром диффузного излучения (DXS) в грузовом отсеке космического челнока Эндевор в январе 1993 года

сделаны фотографии ряда объектов в ультрафиолетовом диапазоне.

Наблюдения Солнца ультрафиолетовыми и первыми рентгеновскими телескопами проводились на американской орбитальной станции Skylab в 1973г. В 1970-х годах в Советском Союзе разрабатывался проект орбитальной обсерватории Гамма-1, которая содержала стыковочный модуль для возможности ее посещения космонавтами с целью замены носителей информации (планировалось использование фото- и кино-пленок) и, возможно, инструментов (затем от такой схемы эксперимента отказались).

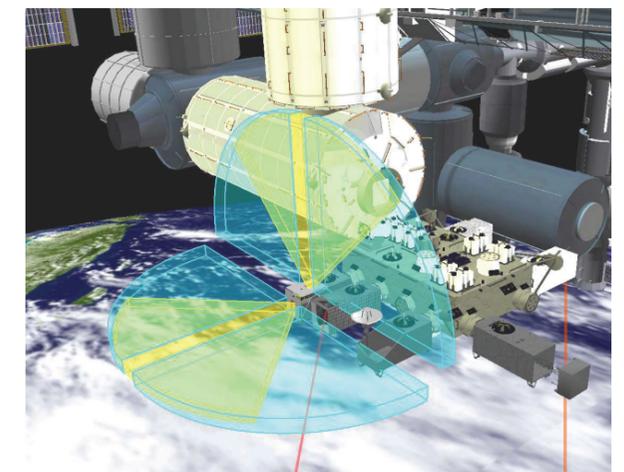
Астрофизические наблюдения в рентгеновском диапазоне на пилотируемых аппаратах продолжились в 1975 году на станции Салют-4 при помощи телескопов РТ-4 и 'Филин'. Телескоп РТ-4 (развитие телескопов РТ-1 Лунохода-1 и РТ-2 Салюта-1) представлял собой параболический концентратор мягких рентгеновских фотонов (с энергией около 0.25 кэВ) и пропорциональный газовый счетчик в качестве детектора. Для наведения на объекты телескоп имел свою собственную систему ориентации. Одной из главных задач этого инструмента было обнаружение и измерение мягкого рентгеновского излучения близких звезд, которое не удалось обнаружить на эксперименте S150 на американской орбитальной станции Skylab (1973-1974 гг). Аналогичный по параметрам и задачам телескоп был установлен на голландско-американском спутнике ANS (1974-1976), и, благодаря более длительным наблюдениям на этой автоматической станции, задача обнаружения рентгеновского излучения близких звезд была успешно решена.

Спектрометр «Филин» представлял собой более стандартный рентгеновский прибор (коллимированный газовый счетчик) для диапазона энергий 0.2-10 кэВ. Несмотря на значительную эффективную площадь детекторов спектрометра «Филин» (около 450 кв.см) с его помощью был получен очень небольшой комплекс результатов (в частности, были получены результаты по рентгеновской Новой 1975 года в созвездии Единорога A0620-00), в основном из-за крайне ограниченного количества сеансов наблюдений (Бейгман и др. 1976, Курт и др. 1976). Астрофизическая программа рентгеновского диапазона была продолжена на орбитальной станции Салют-7 при помощи телескопа РТ-4М и газового сцинтилляционного пропорционального счетчика «Сирень» (производства Франции).

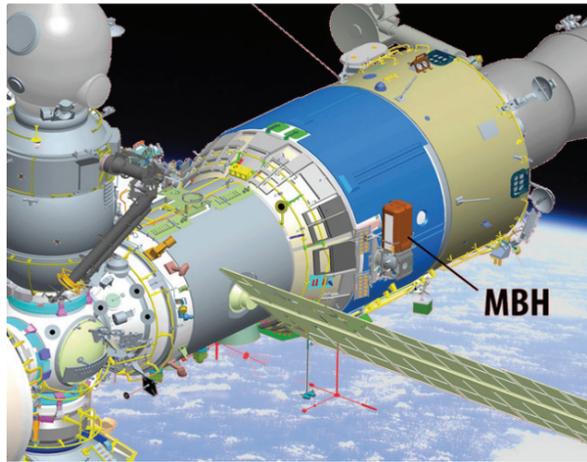
Опыт работы на пилотируемых станциях показал существенные сложности для инструментов рентгеновского диапазона. Среди них: ограниченность сеансов наблюдений в случае, если есть необходимость привлекать для работы с инструментами космонавтов, поглощение мягкого рентгеновского излучения в микроатмосфере вокруг орбитальной станции, а также оседание вещества этой микроатмосферы на захлаженные части рентгеновских инструментов. Кроме того, динамические механические нагрузки на станции накладывают свои ограничения на параметры системы автономного наведения и стабилизации аппаратуры.

Увеличение надежности работы аппаратуры, усовершенствование регистрирующей техники и пропускной способности телеметрического канала спутников постепенно привели к отказу от реализации масштабных астрофизических проектов на базе пилотируемых космических кораблей. Хотя необходимо отметить, что возможность замены приборов обсерватории была успешно использована в 1984 году при ремонте инструментов Solar Maximum Mission астронавтами космического челнока Челленджер, в 1988 году на модуле КВАНТ станции МИР, когда космонавты заменили неисправный детектор телескопа ТТМ, и в нескольких экспедициях в период 1994-2009 гг космических челноков НАСА для ремонта и замены аппаратуры на космическом телескопе имени Хаббла.

Основным направлением использования пилотируемых кораблей для рентгеновской астрономии стали тестовые наблюдения инструментами, изготовленными с использованием новых технологий. Так, например, в ноябре-декабре 1983 года на космическом челноке Колумбия (STS-9) в рамках программы Spacelab-1 был испытан новый тип газового пропорционального счетчика, использующего принцип сцинтилляции (что позволяло в два раза повысить энергетическое разрешение прибора). Интересно заметить, что период 1983-1984 гг газовые сцинтилляционные пропорциональные счетчики, как приборы с принципиально лучшим энергетическим разрешением, в были установлены сразу на ряд космических аппаратов: на японскую обсерваторию Тенма (запущена в феврале 1983 года), на европейскую обсерваторию EXOSAT (запущена в мае 1983 года), на станцию Салют-7 (прибор



Расположение астрофизического эксперимента MAXI на японском модуле Международной Космической Станции и его поля зрения



Планируемое размещение астрофизического эксперимента MBN на российском сегменте Международной Космической Станции.

Сирень, изготовление технического центра ЕКА, доставлен кораблем Прогресс в августе 1984 года).

В декабре 1990 года в ходе экспедиции космического челнока Колумбия (STS-35) впервые был испытан спектрометр широкого рентгеновского диапазона BBXRT (0.3-13 кэВ), изготовленный на основе охлаждаемого кремния Si(Li). Концентратором рентгеновских лучей для спектрометра стала зеркальная система на тонких фольгах, ставшая после этих успешных испытаний основной для телескопов японских обсерваторий ASCA и Suzaku.

В январе 1993 года с борта космического челнока Эндевор (STS-54) были проведены спектрометрические измерения космического рентгеновского фона в диапазоне энергий 0.15-0.28 кэВ при помощи Брегговского спектрометра DXS.

Самым успешным долговременным опытом работы астрофизической обсерватории рентгеновского диапазона на пилотируемой станции стала обсерватория РЕНТГЕН (1987-2001 гг), установленная на модуле КВАНТ-1 орбитальной станции МИР.

В настоящее время на Международной Космической Станции проводится один астрофизический эксперимент рентгеновского диапазона - MAXI. Задачей этого прибора является систематический обзор всего неба в диапазоне энергий 1-20 кэВ с чувствительностью на уровне обзора неба обсерватории UHURU за день. Монитор всего неба MAXI является проектом японского космического агентства (JAXA) и установлен на японском модуле МКС/Кибо.

Планируется, что в 2015 году на российском сегменте МКС будет установлен еще один астрофизический эксперимент - рентгеновский спектрометр MBN. Задачей прибора MBN (изготавливаемого в Институте космических исследований РАН) является высокоточное измерение спектра космического рентгеновского фона (КРФ) в энергетическом диапазоне 6-70 кэВ. Основой прибора являются 4 термостабилизированных рентгеновских детектора на полупроводниковых кристаллах теллурида кадмия (CdTe). Основным преимуществом прибора MBN при измерении КРФ является система модуляции апертуры рентгеновских детекторов, что позволит с высокой точностью учесть вклад счета заряженных частиц в полную скорость счета (Ревнивец и др. 2012)

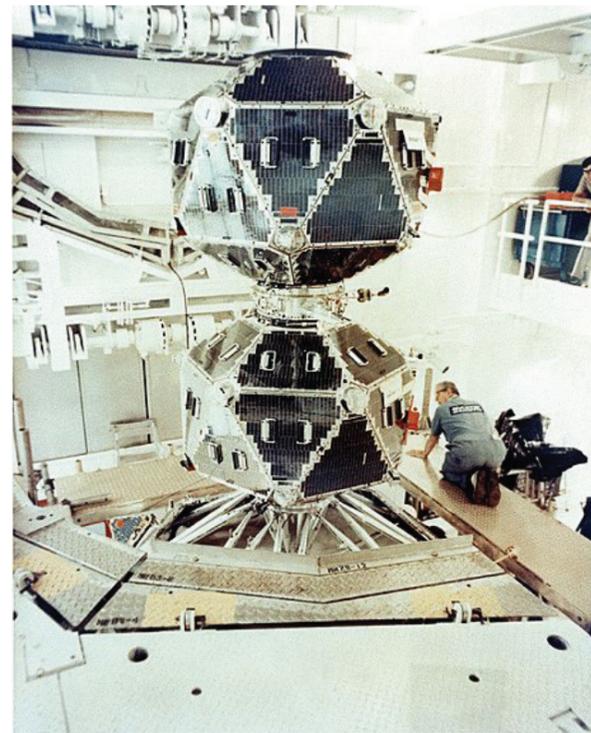
Гамма-всплески

Рентгеновое небо не является стационарным. Множество объектов на нем способно менять свою яркость на разных масштабах времен, от миллисекунд до десятков и сотен лет. Исключением являются только большие протяженные объекты, такие как скопления галактик, имеющие размеры сотни килопарсек и мегапарсеки, и остатки вспышек сверхновых, имеющие размеры парсек и десятки парсек.

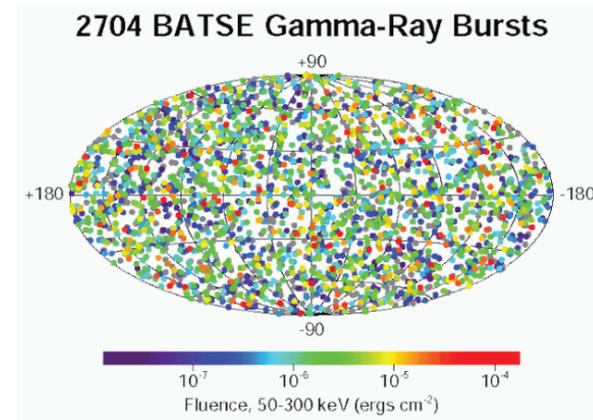
За годы развития рентгеновской астрономии были обнаружены транзитные события разных типов: всплески нестационарного термоядерного горения на поверхностях нейтронных звезд и белых карликов, режимы нестационарной аккреции в дисках вокруг компактных объектов, приливные разрушения звезд и последующая аккреция образовавшегося вещества в окрестностях сверхмассивных черных дыр и т.д.

Одним из первых 'быстрых' транзитных явлений в истории рентгеновской астрономии был феномен 'гамма-всплесков'. Гамма-всплески были открыты в ходе работы спутников военного назначения Vela 5A, 5B, 6A, 6B, основной целью которых было слежение за всплесками гамма-излучения, возникающими при атмосферных ядерных взрывах.

Гамма-всплески были обнаружены в 1969 году, однако впервые эта информация была опубликована только в 1973 году после тщательной проверки данных спутников Vela (Клебесадел и др. 1973). Независимое подтверждение феномена гамма-всплесков было получено на спутнике Космос-461 в 1971 году (Мазец и др. 1974).



Спутники Vela 5a и 5b, открывшие феномен гамма-всплесков.



Распределение гамма-всплесков, обнаруженных в эксперименте BATSE обсерватории им. Комптона (1991-2000). Хорошо видно, что распределение всплесков изотропно по небу

Гамма-всплеск появляется на гамма (и жестком рентгеновском) небе в течении очень небольшого времени, но в это время он становится самым ярким источником на всем небе. Исследования показали, что распределения длительности гамма-всплесков имеют два пика: в области менее секунды и в области нескольких десятков секунд. По прошествии некоторого времени объект полностью исчезает с рентгеновского неба и его дальнейшее исследование становится невозможным.

Уже первые измерения гамма-всплесков показали, что их распределение по небу достаточно однородно, т.е. гамма-всплеск может возникнуть в любом направлении, что с учетом малой длительности события делало определение их точных положений очень затруднительным. Это привело к тому, что даже природа гамма-всплесков долгое время оставалась неясной. До конца 1990х годов основными характеристиками, исследовавшимися у гамма-всплесков, были формы их кривых блеска и спектральные характеристики.

В период 1970х-1980х годов разные спутники (в том числе межпланетные станции) несли на себе детекторы жесткого рентгеновского и гамма-диапазонов с целью исследования феномена гамма-всплесков: американские аппараты Аполлон, советские спутники серии Метеор, Космос, Прогноз, советские межпланетные аппараты Венера, Фобос, американские аппараты Пионер и т.д.

В исключительных случаях, когда гамма-всплеск регистрировался более чем двумя-тремя спутниками, отстоящими друг от друга на больших расстояниях, удавалось получить его относительно точное положение на небе методом триангуляции (определение направления, откуда идет излучение, по задержкам между временами регистрации прихода всплеска на разных аппаратах).

Одним из первых успешных реализаций метода триангуляции всплесков гамма-излучения при помощи межпланетной сети космических аппаратов был всплеск, произошедший 5 марта 1979г. Всплеск жесткого рентгеновского и гамма-излучения был обнаружен приборами Конус на советских межпланетных станциях Венера-11 и -12 (Мазец и др. 1979). Пульсации во время спадающей части всплеска однозначно указывали на то, что источником яркого излучения является вращающаяся нейтронная звезда в галактике

Большое Магелланово Облако. Появившиеся идеи, что все гамма-всплески имеют такую же природу, в дальнейшем не подтвердились.

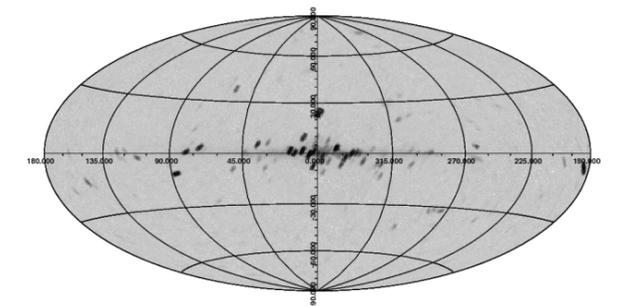
Оказалось, что всплеск 5 марта 1979 года не является представителем семейства собственно 'гамма-всплесков', а является так называемым 'мягким гамма-повторителем' (soft gamma repeater, SGR) -- нейтронной звездой со сверхмощным магнитным полем (10^{14} - 10^{15} Гс), дающей всплески жесткого рентгеновского и гамма-излучения при перестройке магнитного поля нейтронной звезды (Дункан, Томсон 1992).

За прошедшее время было обнаружено еще несколько таких источников в нашей Галактике. В декабре 2004 года вспышка одного из них, SGR 1806-20, стала ярчайшей вспышкой рентгеновского излучения за всю историю рентгеновской астрономии - поток в максимуме всплеска достигал значений несколько миллионов фотонов в секунду на квадратный сантиметр.

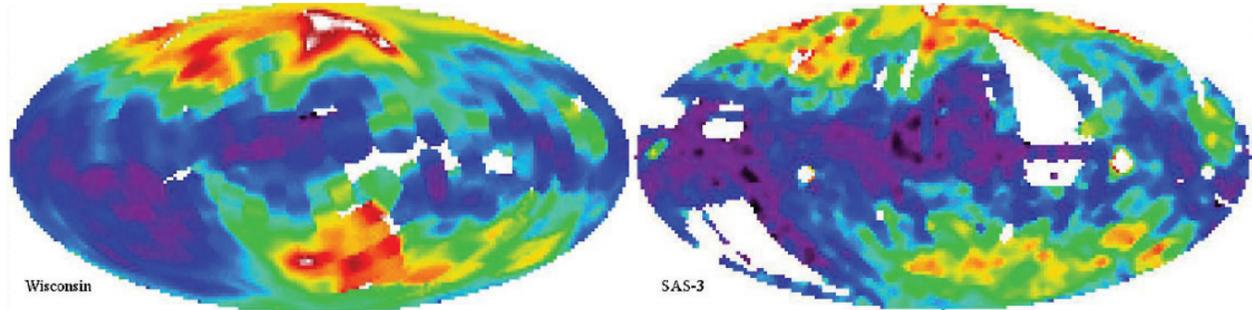
Долгое время считалось, что гамма-всплески имеют галактическую природу. Основная проблема состояла в том, чтобы связать источники гамма-всплесков с объектами в каком-нибудь другом спектральном диапазоне, в котором их можно было бы изучить более детально. Самое большое количество гамма-всплесков - более 3000, обнаруженных на одном аппарате, было зарегистрировано прибором BATSE обсерватории им. Комптона (НАСА, время работы на орбите 1991-2000). Оказалось, что их распределение на всех потоках очень изотропно, что практически исключало гипотезу о галактическом происхождении гамма-всплесков.

Лишь в 1997 году при помощи рентгеновских телескопов орбитальной обсерватории ВерроSAX (время работы на орбите 1996-2003) удалось получить относительно точное положение гамма-всплеска GRB970228 (Коста и др. 1997), и затем определить расстояние до него (Ван Парадайс и др. 1997) доказав, что гамма-всплески расположены от нас на космологических расстояниях.

В настоящее время считается, что гамма-всплески представляют собой проявление либо коллапса массивной звезды, либо слияния двух нейтронных звезд с выбросом струи ультрарелятивистского вещества, создающего всплеск жесткого рентгеновского и гамма-излучения. Энергии, высвобождаемые в этих процессах, могут достигать значений 10^{52} эрг, т.е. уже сравнимы с энергией покоя звезды небольшой массы.



Карта неба, полученная инструментом A2 обсерватории HEAO1 (1977-1979). Благодаря специальной конструкции инструмента A2 он, наряду с обнаружением дискретных источников на небе, мог измерять поток космического рентгеновского фона. Серая область, покрывающая все небо -- это не инструментальный фон детектора, а действительное фоновое излучение неба.

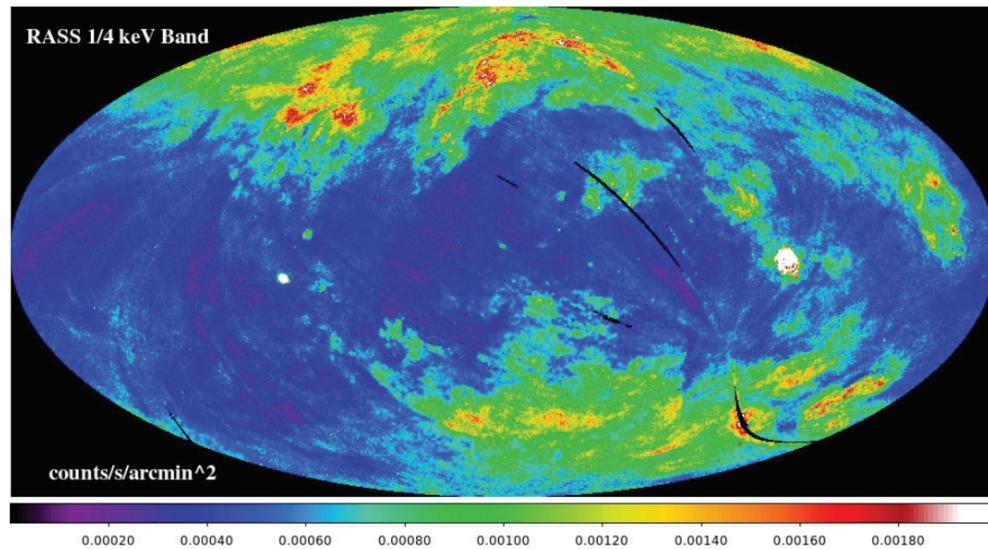


Карты поверхностной яркости неба в мягком рентгеновском диапазоне по данным ракетных экспериментов (Университет Висконсина), и по данным наблюдений на спутнике SAS-3 (из обзора Сноуден и др.)

Для того, чтобы рутинным образом определять точные положения гамма-всплесков, что позволило бы изучать их в оптическом, инфракрасном и радио-диапазонах, необходимо сочетать большое поле зрения инструмента, способного зарегистрировать/обнаружить гамма-всплеск, с хорошей точностью его локализации. Попытка реализовать один из способов комбинации таких противоречивых требований к рентгеновским инструментам была сделана на приборе 'Подсолнух' орбитальной обсерватории ГРАНАТ (1989-1999). Прибор представлял собой комплекс рентгеновского и оптического детекторов на поворотной платформе, включаемый по результатам грубого измерения положений гамма-всплеска, полученного всплесковым прибором 'Конус'. К сожалению, комплекс 'Конус'-'Подсолнух' не заработал в штатном режиме.

Современной реализацией этого принципа комбинации гамма-всплескового прибора, способного обнаружить всплеск на большей части неба, и прибора, способного определить его положение с точностью в несколько угловых секунд, является спутник SWIFT (НАСА, запущен в 2004 г). В качестве поискового гамма-всплескового прибора выступает телескоп с кодирующей маской BAT (Burst Alert Telescope), обзоревающий в каждый момент времени телесный угол в один стерадиан (около 8% всего неба, или 1/6 части неба, не закрытого Землей для аппарата, находящегося на низкой околоземной орбите).

После обнаружения гамма-всплеска спутник доворачивается на объект и его точное положение определяется уже при помощи наблюдений рентгеновского телескопа косоугольного падения XRT. За время работы обсерватория SWIFT обнаружила более 700 гамма-всплесков, из них у более 200 всплесков измерены красные смещения (космологические расстояния).



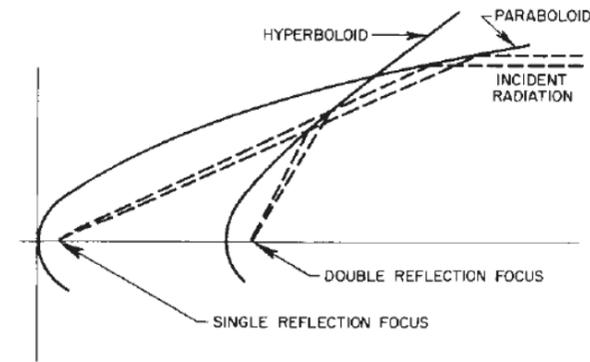
Карта поверхностной яркости неба в мягком рентгеновском диапазоне (0.25 кэВ) по данным обсерватории ROSAT

Фоновое излучение неба в мягком рентгеновском диапазоне

Космический рентгеновский фон, открытый в начале 60х годов в диапазоне энергий выше 1-2 кэВ, неоднократно наблюдался разными инструментами, подтверждая, что его угловое распределение с высокой точностью изотропно по небу.

Одно из наиболее точных измерений распределения поверхностной яркости КРФ было сделано инструментом A2 обсерватории HEAO1 благодаря его специальной конструкции (Маршалл и др. 1980). Инструмент представлял собой пропорциональный газовый счетчик, над разными анодными проволоками которого были расположены коллиматоры с разными полями зрения (отличающимися приблизительно в 2 раза). Это приводило к тому, что при практически идентичной скорости счета разных анодов детектора за счет прохождения заряженных частиц, поток фотонов на разные аноды был разный. Вычитая скорости счета соседних анодов можно было практически идеально вычесть инструментальный фон детектора (фон заряженных частиц) и измерять поверхностную яркость КРФ в разных направлениях на небе.

Однако уже в конце 60х годов измерения, проводимые на меньших энергиях (~0.25 кэВ), показыва-



Принципиальная схема рентгеновского телескопа 'косоугольного падения'. Плоскопараллельный пучок фотонов от космических источников фокусируется из-за двойного отражения в системе зеркал

ли, что яркость рентгеновского фона в этом диапазоне не согласуется с продолжением спектра КРФ, измеренного на энергиях 1-10 кэВ, в область меньших энергий и существенно не изотропна по небу.

Карта поверхностной яркости мягкого рентгеновского фона постепенно пополнялась новыми данными. Множество измерений было проведено как ракетными экспериментами (программа Университета Висконсина), так и со спутников (HEAO1, SAS-3). Особенностью мягкого рентгеновского фона являлось его явное подавление в области плоскости Галактики, что вначале привело к гипотезе о его внегалактическом происхождении (межзвездная среда в плоскости Галактики очень эффективно поглощает рентгеновское излучение малых энергий).

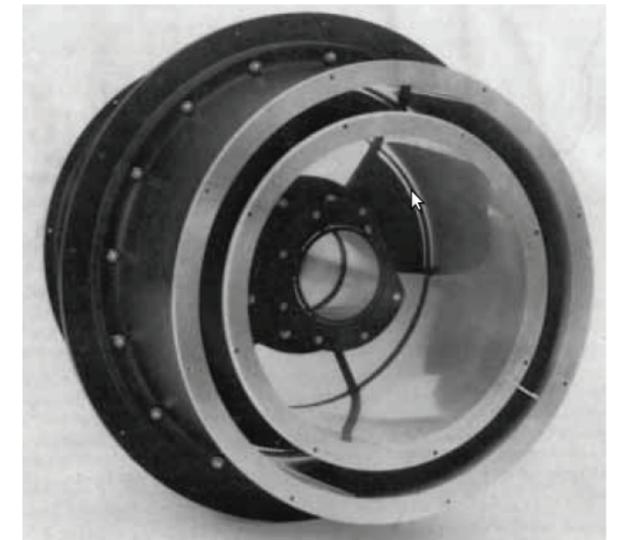
Огромный скачок в качестве наблюдательных данных для исследования диффузного излучения в мягких рентгеновских лучах произошел с началом работы на орбите рентгеновской обсерватории ROSAT (Германия, США, Великобритания, время работы на орбите 1990-1999 гг). В отличие от предыдущих экспериментов на обсерватории ROSAT был установлен рентгеновский телескоп косоугольного падения, позволяющий существенно увеличить угловое разрешение получаемого изображения по сравнению с коллимированными спектрометрами, а также сильно уменьшить фон, создаваемый заряженными частицами.

Детальные исследования яркости мягкого рентгеновского фона, и ее корреляции с распределением межзвездной среды в Галактике показали, что это фоновое излучение имеет Галактическую природу и возникает в результате излучения плазмы горячей фазы межзвездной среды.

Одним из интереснейших результатов, полученных по данным обсерватории ROSAT, стало обнаружение переменного излучения, возникающего в гелиосфере за счет перезарядки высокоионизированных ионов тяжелых элементов (например, кислорода) с нейтральным межпланетным веществом.

Рентгеновские телескопы косоугольного падения

Наличие на небе протяженных источников рентгеновского излучения со всей очевидностью ставило вопрос об угловом разрешении следующего поколения инструментов. Прогресс в этом направлении



Один из первых прототипов рентгеновских телескопов косоугольного падения

так же позволил бы значительно увеличить чувствительность приборов.

Предел чувствительности большинства рентгеновских инструментов определяется шумами детекторов, среди которых важнейшую роль играет скорость счета 'фоновых' событий, обусловленных не регистрацией рентгеновских фотонов, а прохождением через детектор заряженных частиц (либо первичных космических лучей, либо вторичных частиц, возникающих после взаимодействия космических лучей высоких энергий с космическим аппаратом). Рентгеновские счетчики, снабженные коллиматорами (ограничивающими их поля зрения) собирают как полезный сигнал (рентгеновские фотоны), так и счет заряженных частиц с общей площади детектора. Однако, если научиться фокусировать рентгеновские фотоны так же как оптические или инфракрасные в небольшое пятно в фокальной плоскости инструмента, то можно получить очень большой выигрыш за счет того, что эти

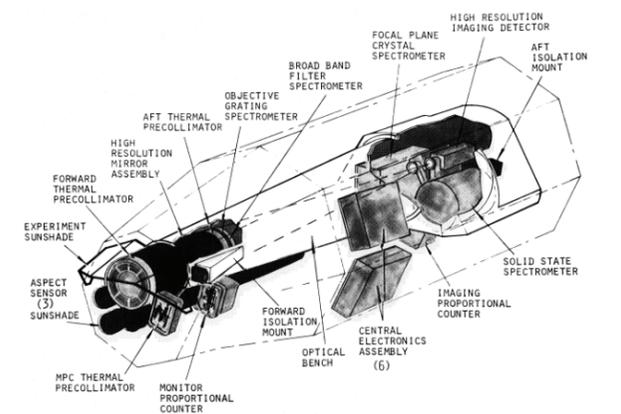
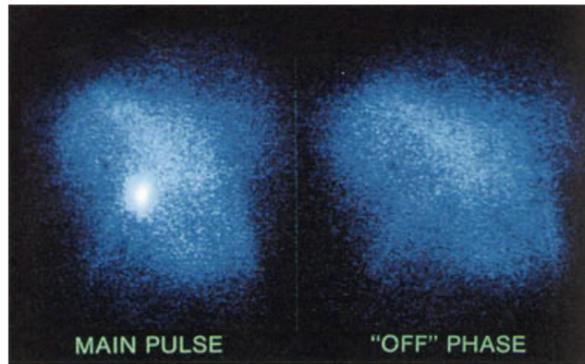
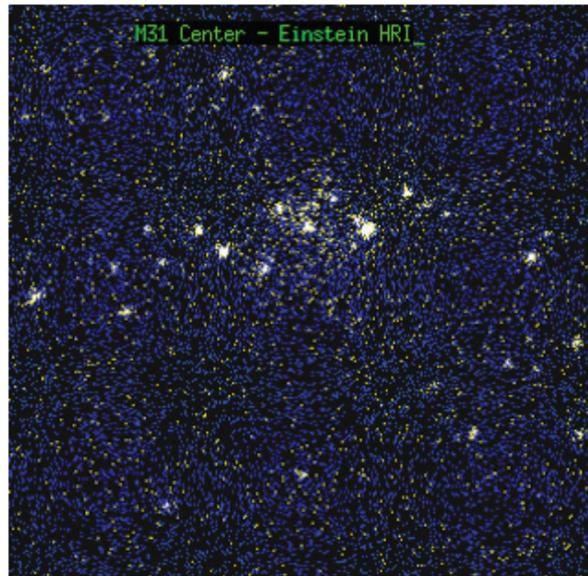


Схема орбитальной обсерватории HEAO2, обсерватории им. Эйнштейна с первым рентгеновским телескопом косоугольного падения. Качество изображения в области энергий 0.5-4 кэВ не было превзойдено до запуска в 1999 году обсерватории Чандра



Изображения Крабовидной туманности, полученные обсерваторией им.Эйнштейна (HEAO2), усредненные за разные периоды яркости нейтронной звезды - пульсара в ее центре. Присутствие яркого пятна (пульсара) в центре левого изображения и его отсутствие на правом связано с импульсным характером излучения нейтронной звезды из-за ее собственного вращения с периодом приблизительно 0.033 сек.



Изображение центральной области галактики M31 (Туманность Андромеды) по данным рентгеновского телескопа обсерватории им. Эйнштейна.

фотоны будут собираться в очень малой части фокального детектора, в которой счет заряженных частиц может быть в сотни и тысячи раз меньше, чем во всем детекторе.

Первое предложение по созданию телескопов, работающих в рентгеновском диапазоне появилось еще в 1960 году (Джиакони и др. 1960). Однако до первой реализации этого принципа на обсерватории HEAO-2 (обсерватория им.Эйнштейна) прошло около 20 лет. Основная проблема была связана с тем, что для фокусировки рентгеновских фотонов были необходимы новые технологии. Рентгеновские лучи нельзя отразить обычным способом (на большие углы), однако это становится возможным, если углы их падения на хорошо отполированную поверхность очень малы (менее одного градуса). В таком случае плоскопараллельный пучок рентгеновских фотонов можно сконцентрировать в фокальной плоскости. Таким образом, рентгеновский телескоп фактически представляет собой систему вложенных конусов или параболоидов и гиперboloидов, внутренние поверхности которых должны быть отполированы с точностью до нескольких ангстрем, а сама форма трубы-зеркала должна быть выдержана с точностью несколько микрон.

Первое применение такая технология нашла в научной аппаратуре космической станции Skylab в солнечном рентгеновском телескопе S-054 (диапазон энергий 0.2-5 кэВ) в 1973-1974 гг (Вайана и др. 1977). Первой астрофизической рентгеновской обсерваторией с телескопом косоугольного падения на борту стала обсерватория HEAO2/обсерватория им. Эйнштейна, работавшая с 1978 до 1980 года.

Результаты работы обсерватории HEAO2 сильно расширили границы рентгеновской астрономии. Чувствительность фактически выросла в 1000 раз по сравнению с инструментами обсерватории UHURU. Рентгеновское излучение было обнаружено от огромного числа типов объектов: от полярных областей Юпитера и обычных звезд всех типов до остатков вспышек сверхновых, белых карликов и горячего газа в эллиптических галактиках. Исследования нейтронных звезд и черных дыр в двойных системах, с которых началась рентгеновская астрономия, стало возможным во всей нашей Галактике, а также и в других галактиках. Были получены удивительные по качеству

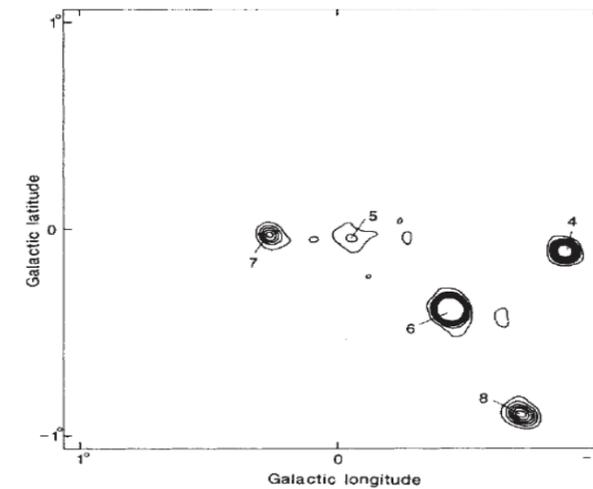
изображения центральной области галактики Туманность Андромеды

Огромный прорыв произошел в понимании природы космического рентгеновского фона, открытого еще в первых ракетных экспериментах. Высококачественные измерения спектра КРФ, проведенные в 1977-1979 годах обсерваторией HEAO1 показывали, что форма КРФ может быть хорошо описана моделью тормозного излучения горячих электронов температурой около 40 кэВ. Означает ли это, что вся Вселенная заполнена горячей разреженной плазмой?

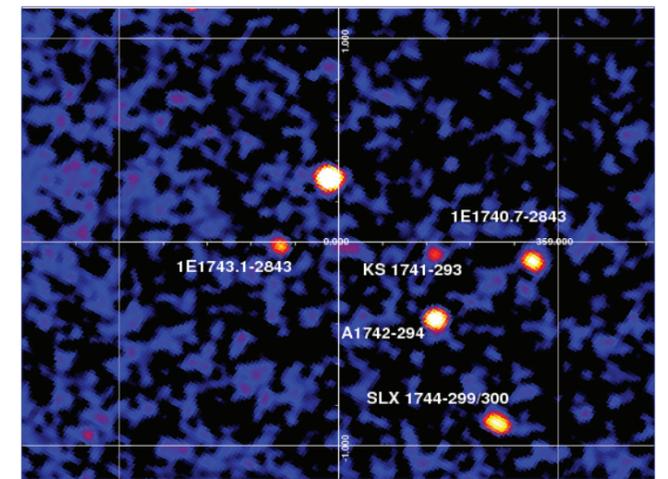
Ответ на этот вопрос был дан при помощи глубоких наблюдений обсерватории им. Эйнштейна. Было показано (Джиакони и др. 1979), что при увеличении чувствительности наблюдений количество регистрируемых источников существенно возрастает. При этом поток от источников, обнаруженных на пределе чувствительности, достигнутой обсерваторией им. Эйнштейна (HEAO2), позволял объяснить уже около 40% всей поверхностной яркости КРФ на энергиях 1-2 кэВ. Кроме того было ясно, что следует ожидать существования рентгеновских источников с еще более слабыми потоками, и, следовательно, еще большая доля КРФ может быть в будущем разрешена на вклад отдельных объектов. В настоящее время обсерватория Chandra разрешает более 80% КРФ на отдельные источники.

Подавляющее большинство объектов, обнаруженных в таком обзоре, оказываются активными ядрами в далеких галактиках - аккрецирующими сверхмассивными черными дырами. Обнаружение огромного количества таких источников открыло целое направление в астрофизике - исследование космологической эволюции черных дыр.

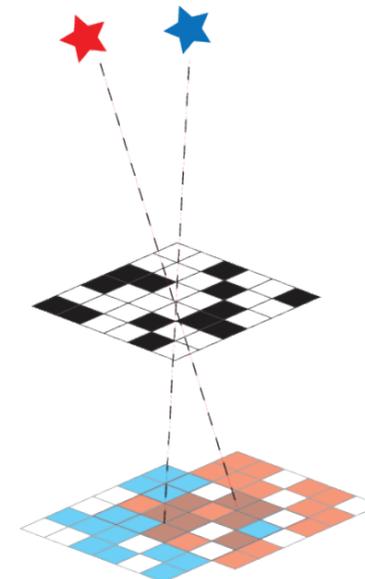
С технической точки зрения возможности зеркальной системы обсерватории им.Эйнштейна превосходили возможности фокальных приборов. Ширина пятна, в которое зеркальная система фокусировала фотоны, оставляла около 80-100 микрон (что соответствовало 5-6 угловым секундам на небе), в то время как газовые пропорциональные счетчики (IPC), имевшие максимальную эффективность регистрации



Изображения области центра Галактики, полученные по результатам наблюдений на телескопах с кодирующими масками в диапазоне энергий 3-30 кэВ: слева - телескопа Spacelab2/XRT, справа - телескопа МИР/КВАНТ/ТТМ. Размер изображения - около 2x2 градуса, что всего в два-три раза больше углового разрешения обзоров неба, проведенных обсерваториями UHURU и HEAO1. Подписаны некоторые объекты, обнаруженные в ходе наблюдений. Объекты, имеющие в названии буквы «KS» были впервые открыты аппаратурой модуля КВАНТ станции МИР.



фотонов среди приборов обсерватории, давали пространственное разрешение около 1 мм, что соответствовало примерно 1 угловой минуте. Таким образом, максимальное количество фотонов от источника можно было получить при помощи детекторов IPC, в то время как для достижения максимального пространственного разрешения использовались детекторы на основе микроканальных пластин (HRI), имеющих на порядок меньшую эффективность, чем детекторы IPC. Лишь дальнейшее развитие детекторных технологий в 1980х и 1990х годах (с запуском обсерваторий с промежуточными характеристиками ROSAT/1990-1999 гг и ASCA/1993-2000 гг) позволило полностью согласовать возможности фокусирующей оптики и регистрирующей аппаратуры.

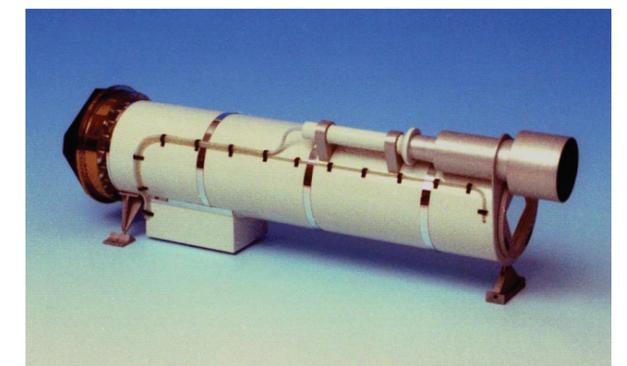


Принцип построения изображений при помощи кодирующей апертуры. Поток квантов, приходящий от рентгеновского источника, «кодируется» маской и создает свою уникальную тень на детекторе (тенезграмма)

Широкополосные спектры рентгеновских источников

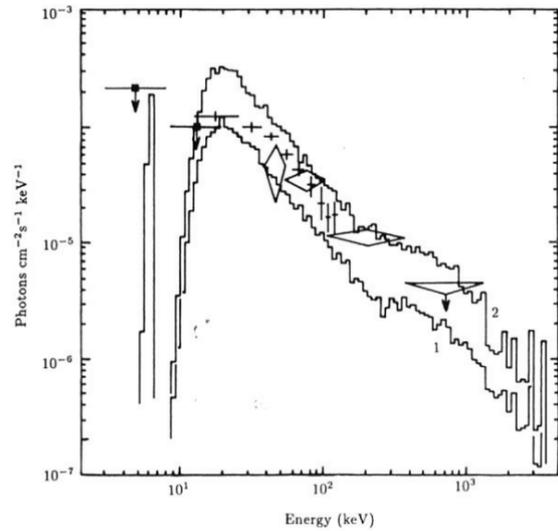
Широкий диапазон температур объектов, излучающих в рентгеновском диапазоне, таких как двойные системы с черными дырами и нейтронными звездами, требовал расширения диапазона энергий, в котором происходит регистрация спектра их излучения. Было обнаружено, что в разное (или даже в одно и то же) время излучение аккрецирующих черных дыр может иметь в излучении компоненты с характерными температурами в 1-2 кэВ и свыше 30-50 кэВ. Эффективную регистрацию фотонов в таком широком диапазоне энергий практически невозможно провести при помощи одного прибора. Решением этой проблемы стали комбинации приборов на орбитальных обсерваториях.

Интерес к более жесткому рентгеновскому излучению (с энергиями выше 5-10 кэВ) также обусловлен



ТТМ - «телескоп с теневой маской», один из основных инструментов обсерватории РЕНТГЕН на модуле КВАНТ-1 станции МИР. При помощи наблюдений этого телескопа были получены наилучшие на конец 1980х-начало 1990х годов карты области центра Галактики в рентгеновских лучах выше 4 кэВ.

тем фактом, что фотоны таких энергий практически не поглощаются в межзвездной среде в нашей Галактике. Для фотонов более низких энергий межзвездное фотопоглощение является эффективным экраном, закрывающим от нас области в направлении плоскости Галактики, и в особенности интереснейшую область центра Галактики. Первые картографирования области Галактического Центра обсерваторией им. Эйнштейна показали, что межзвездное поглощение на энергиях ниже 2-3 кэВ существенно ограничивает чувствительность к источникам в этом направлении. На более высоких энергиях угловое разрешение инструментов составляло не лучше 20-30 угловых минут, что было совершенно недостаточно для картографирования этой густонаселенной области неба.



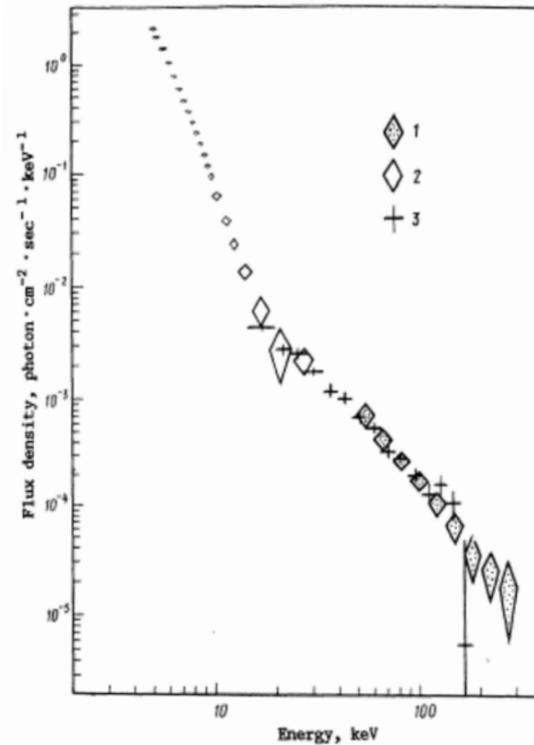
Энергетический спектр Сверхновой 1987А, полученный обсерваторией РЕНТГЕН: разными значками показаны результаты измерений разных приборов обсерватории, гистограммами - результаты моделирования. Из работы Сюняева и др. (1987).

Одна из первых попыток построения карты области Галактического Центра на энергиях выше 3-4 кэВ была предпринята в ходе экспедиции STS-51-G космического челнока Дискавери в июне 1985 года при помощи аппаратуры SPARTAN-1. Рентгеновский инструмент представлял собой два спектрометра, работающих в диапазоне энергий 1-12 кэВ и наблюдавших небо через коллиматоры с полями зрения 0.5 угл. минуты x 3 градуса. Узкая полоса пропускания коллиматоров по одной оси позволяла при сканировании объектов получать изображение со значительно улучшенным, относительно существующих, угловым разрешением. Для получения полноценного изображения направление сканирования инструмента несколько раз менялось в ходе эксперимента.

Следующим шагом в получении изображений на энергиях выше 3-4 кэВ стал эксперимент XRT (X-Ray Telescope) в составе орбитальной обсерватории Spacelab2, работавшей в составе экспедиции STS-51-F на космическом челноке Челленджер в июле-августе 1985 года. Время наблюдений телескопа Spacelab2/XRT было невелико (общее время наблюдений на область центра Галактики составило всего около 6 часов), что ограничило чувствительность полученной карты неба.

Основной принцип построения изображения, использованный в этом телескопе, существенно отличался как от принципа построения изображения в телескопах косоугольного падения, так и от метода модуляционных коллиматоров. Если в первом случае рентгеновские фотоны фокусируются в малой области в фокальной плоскости телескопа, то во втором поток квантов модулируется во времени. В телескопе Spacelab2/XRT использовался так называемый метод кодирующей апертуры. Этот метод основан на пространственной модуляции первичного потока рентгеновских квантов при помощи маски, расположенной над детектором и состоящей из большого числа случайно расположенных прозрачных и непрозрачных элементов. Поток фотонов, приходящий от рентгеновского источника, находящегося на бесконечности, «кодируется» маской и регистрируется позиционно-чувствительным детектором. Важнейшей особенностью описываемого метода является то, что для разных направлений прихода излучения (т.е. для разных источников на небе) формируется своя, отличная от других, засветка детектора (теннеграмма). При наличии в поле зрения нескольких источников на детектор проецируется тень, являющаяся суперпозицией разных теннеграмм, и вклад каждой зависит от интенсивности источника. Принимая во внимание, что фон детектора маской не кодируется, имеется возможность однозначно выделить полученный сигнал и восстановить двумерное изображение участка небесной сферы, что и было впервые продемонстрировано в эксперименте Spacelab2/XRT.

Концепция телескопа с кодирующей апертурой получила свое органичное развитие при создании



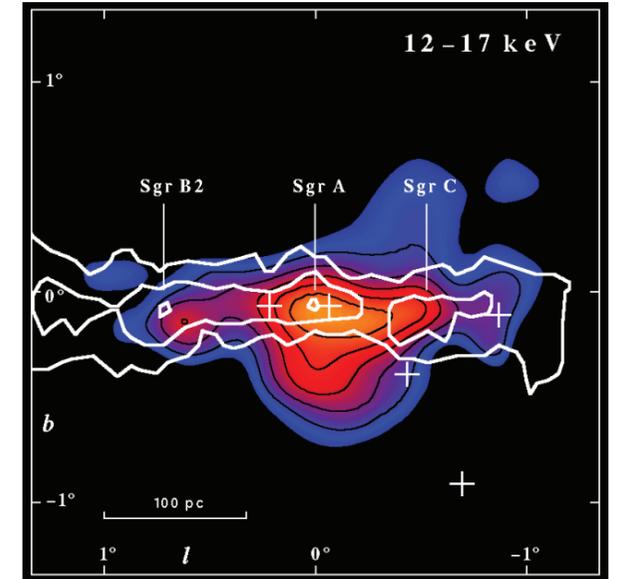
Широкополосный рентгеновский спектр одной из рентгеновских Новых (X-ray Nova Vul 1988) по данным инструментов модуля МИР/Квант. На то время это были рекордные спектральные измерения на высоких энергиях (выше 100 кэВ). Из работы Сюняева и др. (1988)

приборов обсерватории РЕНТГЕН на модуле КВАНТ орбитальной станции МИР (1987-1996). В создании уникальной аппаратуры обсерватории, позволявшей исследовать рентгеновские источники в широчайшем диапазоне энергий 2-800 кэВ, участвовали ученые и специалисты СССР (телескоп-спектрометр Пульсар X-1), Нидерландов и Великобритании (телескоп с кодирующей маской ТТМ), Германии (спектрометр Гексе), и Европейского космического агентства (спектрометр Сирень-2). С помощью телескопа ТТМ были впервые получены карты больших участков рентгеновского неба в диапазоне энергий до 30 кэВ, открыты новые источники в области Галактического Центра.

Выдающимся результатом, полученным обсерваторией РЕНТГЕН, безусловно, является открытие жесткого рентгеновского излучения от Сверхновой 1987А. Эта сверхновая вспыхнула в феврале 1987 г. в соседней галактике Большое Магелланово Облако и до сих пор является самой близкой к нам из известных сверхновых за последние 400 лет. Ее наблюдения стали наиболее приоритетными в ранней программе обсерватории. Дело в том, что оболочка, образовавшаяся при взрыве звезды с общей массой более 15 солнечных масс, сначала является настолько плотной, что полностью задерживает рентгеновские лучи. Но, поскольку оболочка разлетается во все стороны с огромными скоростями, она постепенно становится прозрачной для рентгеновских и гамма-лучей. Как показывали теоретические расчеты (Гребенев и др. 1987), гамма-излучение, обусловленное распадом радиоактивного кобальта ⁵⁶Co, должно выходить наружу сквозь расширяющуюся оболочку примерно через полгода после взрыва.



Обсерватория Гранат (1989-1999). Основные инструменты обсерватории представляли собой рентгеновские телескопы с кодирующими масками АРТ-П и СИГМА. Телескоп СИГМА был первым астрофизическим телескопом, способным строить изображения в диапазоне энергий выше 50 кэВ.

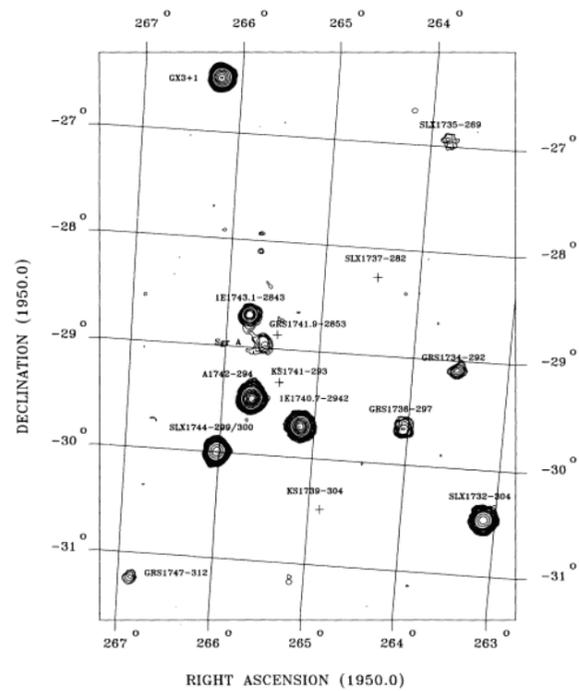


Изображение области Центра Галактики в диапазоне энергий 12-17 кэВ, полученное телескопом АРТ-П обсерватории ГРАНАТ. Белые контуры показывают распределение молекулярного газа. Рентгеновское излучение, регистрируемое от молекулярного облака Sgr B2, рождается в результате переизлучения прошлой активности сверхмассивной черной дыры в центре Галактики.

10 августа 1987 г. приборы обсерватории впервые зарегистрировали жесткое рентгеновское излучение из области Сверхновой. Для выяснения природы и истинного источника этого излучения (так как вблизи от Сверхновой находятся другие рентгеновские источники) было предложено развернуть и «покачать» весь орбитальный комплекс МИР, чтобы исключить из поля зрения обсерватории другие объекты, а также для измерения фона (последнее требовалось для правильного определения значения жесткого рентгеновского потока, регистрируемого прибором Пульсар X-1). Система управления комплексом блестяще справилась с этой задачей - было показано, что излучение действительно идет от Сверхновой, и с высокой точностью был измерен ее спектр в широком диапазоне энергий, подтвердив сделанные теоретические расчеты (Сюняев и др. 1987)

Помимо открытия рентгеновского излучения от Сверхновой 1987А, среди важнейших результатов обсерватории РЕНТГЕН, которая продолжила свои наблюдения вплоть до 1996 года, следует отметить следующие: было впервые обнаружено жесткое рентгеновское/гамма излучение рентгеновских Новых, простирающееся до энергий выше 200-300 кэВ, что позволило указать на необходимость учета нетепловых процессов в формировании, по крайней мере, части излучения от аккрецирующих черных дыр; открыт целый ряд аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр, для которых были впервые получены широкополосные спектры; получены изображения области центра Галактики в широком диапазоне энергий.

Необходимо сказать, что стыковка модуля КВАНТ с базовым модулем станции МИР прошла достаточно драматично. Стыковка увенчалась успехом лишь с третьей попытки, когда топлива на борту модуля оставалось либо на успешную стыковку, либо на контролируемый спуск с орбиты и последующее зато-



Карта неба области балджа нашей Галактики по данным наблюдений телескопа АРТ-П (3-17 кэВ) обсерватории ГРАНАТ.

пление в Тихом океане. Для решения задачи стыковки, в том числе под давлением ученых, опасавшихся потерять уникальную обсерваторию, был организован незапланированный выход космонавтов в открытый космос, во время которого летчик-космонавт Александр Лавейкин обнаружил застрявший в стыковочном узле посторонний предмет - предположительно, мешок с выброшенным ранее станционным мусором. После этого стыковка модуля КВАНТ со станцией МИР была успешно завершена, означая начало почти десятилетней успешной работы обсерватории.

Практически одновременно с подготовкой запуска обсерватории РЕНТГЕН в Советском Союзе велись разработки по созданию космической обсерватории на самостоятельном спутнике, которая получила название ГРАНАТ (1989-1998). Этот проект осуществлялся совместно советскими, французскими, датскими и болгарскими учеными. Обсерватория была задумана как комплекс приборов для проведения детальных исследований астрофизических объектов в диапазоне энергий 2 кэВ - 100 МэВ.

Основными приборами обсерватории ГРАНАТ являлись французско-советский телескоп СИГМА и телескоп АРТ-П (Астрофизический Рентгеновский Телескоп Позиционно-чувствительный), разработанный в Институте космических исследований АН СССР. Оба телескопа работали по принципу кодирующей апертуры и взаимно дополняли друг друга, имея перекрывающиеся рабочие диапазоны энергий: 2-60 кэВ (АРТ-П) и 40 кэВ-2 МэВ (СИГМА). Телескоп АРТ-П состоял из 4 идентичных модулей, каждый из которых содержал позиционно-чувствительный газовый счётчик и кодирующую маску. Каждый модуль имел эффективную площадь около 600 кв.см и поле зрения 1.8x1.8 градуса. Угловое разрешение телескопа АРТ-П составляло 5 угловых минут. Телескоп СИГМА был первым в мире

астрофизическим телескопом, способным строить изображения в жёстком рентгеновском диапазоне (40-1300 кэВ).

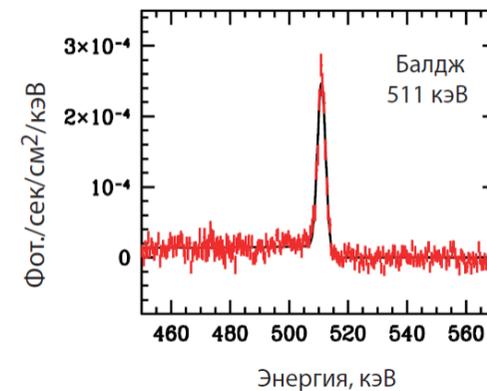
Помимо этих инструментов на борту обсерватории были установлены обзорные детекторы комплекса научной аппаратуры «Вотч», «Фебус», «Конус». Они перекрывали широчайший диапазон энергий от 5 кэВ до 100 МэВ и были, в основном, предназначены для регистрации и исследования гамма-всплесков, хотя прибор «Вотч», работавший в диапазоне энергий 5-150 кэВ, вполне успешно использовался для обнаружения и локализации новых и транзитных рентгеновских источников. В частности, именно этим прибором был открыт первый микроквazar в нашей Галактике - GRS 1915+105 (GRS здесь означает GRanat Source, источник ГРАНАТа), у которого позднее было обнаружено окколосветовое движение релятивистских струй.

Необходимо упомянуть советско-болгарский прибор «Подсолнух», предназначенный для наблюдения гамма-всплесков и транзитных источников в диапазоне энергий 2-25 кэВ. Особенностью прибора было его размещение на поворотной платформе, обеспечивающей оперативный поворот (со скоростью 90 градусов в секунду) и наведение в автоматическом режиме установленных на ней приборов в предполагаемую точку расположения источника космического гамма-всплеска по сигналам прибора «Конус». В рамках программы исследований предполагалось изучение временной структуры гамма-всплеска, проведение спектрального анализа его послесвечения, осуществление точной локализации источника гамма-всплеска. На поворотной платформе устанавливались также оптический монитор, построенный на основе ПЗС-матрицы. Таким образом, весь комплекс приборов на поворотной платформе был задуман и создан для исследования гамма-всплесков. К сожалению, после запуска обсерватории он так и не заработал в штатном режиме, отсрочив, таким образом, открытие природы гамма-всплесков на целых восемь лет, до 1997 года, когда на орбите начала свою работу итало-голландская обсерватория ВерроSAX (1996-2003), впервые обнаружившая рентгеновское послесвечение гамма-всплесков и способная быстро и точно проводить их локализацию и сообщать об этом всем наземным телескопам.

Среди наиболее значимых результатов обсерватории ГРАНАТ следует отметить: глубокие изображения области Центра Галактики в жёстком (40-150 кэВ) и мягком (4-20 кэВ) рентгеновских диапазонах (Сюняев и др. 1991, Павлинский и др. 1994, Ревнивцев и др. 2004),



Обсерватория ИНТЕГРАЛ (ЕКА, РКА). Выведена на орбиту 17 октября 2002 г.

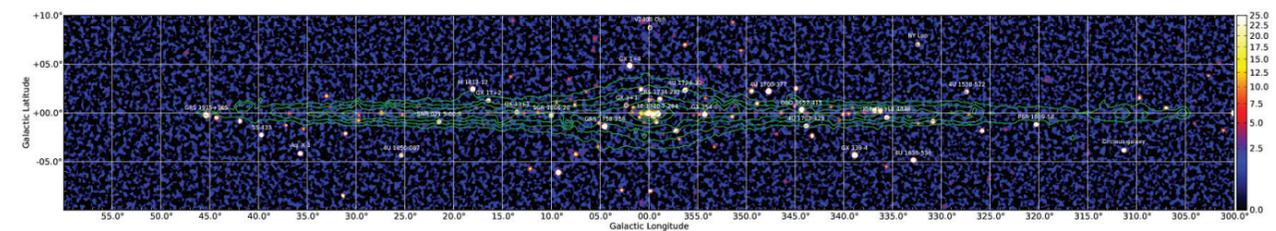


Спектр галактического балджа по данным спектрометра SPI обсерватории ИНТЕГРАЛ вблизи энергии аннигиляции позитронов (511 кэВ). Из работы Чуразова и др. (2011)

в которых был открыт ряд неизвестных ранее чёрных дыр и нейтронных звезд в нашей Галактике; получение высококачественных широкополосных спектров кандидатов в чёрные дыры и нейтронных звезд; открытие протяжённого жёсткого (8-22 кэВ) диффузного излучения вокруг центра Галактики и в направлении на молекулярное облако Sgr B2 - эхо прошлой активности центральной сверхмассивной чёрной дыры Стрелец А* (Сюняев и др. 1993). Последний результат был блестяще подтвержден наблюдениями обсерватории ИНТЕГРАЛ спустя почти 15 лет.

Серьезные успехи и научные результаты, полученные обсерваториями РЕНТГЕН и ГРАНАТ (особенно последней в жестком рентгеновском и гамма-диапазонах), подвели ученых к мысли о создании полноценной космической лаборатории гамма-лучей, которая позволяла бы не только строить изображения неба в жестких рентгеновских и гамма-лучах и проводить спектральный и временной анализ рентгеновских источников в широком диапазоне энергий, но также проводить и тонкую спектроскопию (спектроскопию с высочайшим энергетическим разрешением) регистрируемого излучения на энергиях вплоть до 8 МэВ. Так родилась концепция Международной Астрофизической Лаборатории Гамма Лучей ИНТЕГРАЛ (INTErnational Gamma Ray Astrophysical Laboratory (INTEGRAL), совместного проекта Европейского (ЕКА) и Российского космических агентств (работает на орбите с 2002 г.).

Основными приборами обсерватории ИНТЕГРАЛ являются гамма-телескоп IBIS и спектрометр SPI. Как и в случае основных инструментов обсерватории ГРАНАТ задача восстановления изображений

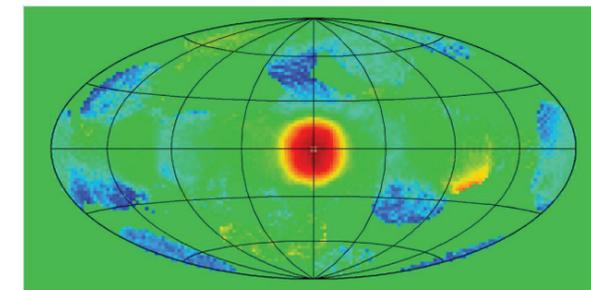


Карта Галактической плоскости в диапазоне энергий 17-60 кэВ, полученная обсерваторией ИНТЕГРАЛ. Контуры показывают яркость нашей Галактики в инфракрасном спектральном диапазоне - распределение обычных звезд. Из работы Кривоноса и др. (2012)

инструментами обсерватории ИНТЕГРАЛ решается с использованием принципа кодирующей апертуры. Спектрометр SPI (SPectrometer on INTEGRAL) по своей чувствительности в ядерных линиях намного превосходит все существовавшие до сих пор инструменты орбитальных обсерваторий. Его регистрирующие элементы изготовлены из сверхчистого германия и охлаждаются до температуры 90К. Диапазон чувствительности этого детектора от 20 кэВ до 8 МэВ, спектральное разрешение составляет E/dE~500.

Гамма-телескоп IBIS (Imager on Board the INTEGRAL Satellite, диапазон энергий 15 кэВ-10 МэВ) позволяет получать изображения в жестком рентгеновском и гамма-диапазонах с более высоким угловым разрешением, нежели любые предшествующие приборы.

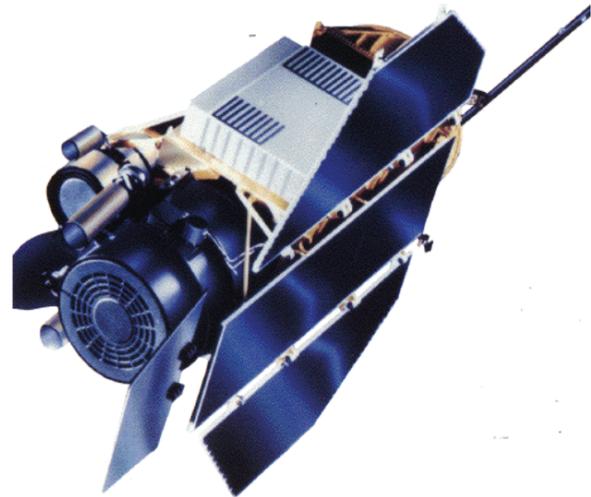
Успешный вывод обсерватории на высокоапогейную орбиту ракетой-носителем ПРОТОН, выполненный с точностями много лучше (более, чем на порядок) гарантированных величин, позволил значительно сократить расходы топлива при формировании окончательной орбиты двигателями космического ап-



Изображение неба в области энергий 511 кэВ (в галактической системе координат). Хорошо видно концентрацию излучения в направлении центра Галактики. Из работы Чуразова и др. (2011)

парата и увеличить операционное время жизни обсерватории с 5 лет до 21 года. Таким образом, на настоящий момент и в ближайшие годы обсерватория будет являться действующим и эффективным инструментом для исследований неба в жестких рентгеновских лучах.

В результате многолетней работы обсерватории был получен ряд важных результатов в разных областях рентгеновской и гамма-астрономии. Одним из них является измерение энергии линии аннигиляции электронов и позитронов с высочайшей точностью $E/m_e c^2 = 1.00002 \pm 0.00007$ (Чуразов и др. 2011). Пространственное распределение интенсивности излучения этой линии показывает, что аннигиляция по-



Обсерватория ROSAT (годы работы на орбите 1990-1999)

зитронов происходит в центральной зоне Галактики. По ширине линии 511 кэВ и относительной яркости трех-фотонного континуума (на энергиях ниже 511 кэВ) показано, что аннигиляция происходит в теплой (~10 тыс. градусов), частично ионизованной межзвездной среде, причем в основном не напрямую, а через образование позитрония - короткоживущей связанной системы из электрона и позитрона. Интенсивность линии свидетельствует о том, что в области ее формирования аннигилирует порядка 10^{43} позитронов в секунду.

Среди других важных результатов обсерватории ИНТЕГРАЛ необходимо отметить построение карты нашей Галактики с беспрецедентной чувствительностью в такой большой части неба (Кривонос и др. 2012); разрешение проблемы протяженного жесткого рентгеновского излучения вдоль плоскости Галактики (проблема 'хребта' Галактики, Ревнивцев и др. 2006, 2009, Кривонос и др. 2007), открытие эмиссионных гамма-линий от Сверхновой 1987А на энергиях 67.9 и 78.4 кэВ, возникающих в результате распада радиоактивного титана и скандия (Гребенев и др. 2012).

Прогресс в пространственном и спектральном разрешении обсерваторий в 1980х-1990х годах

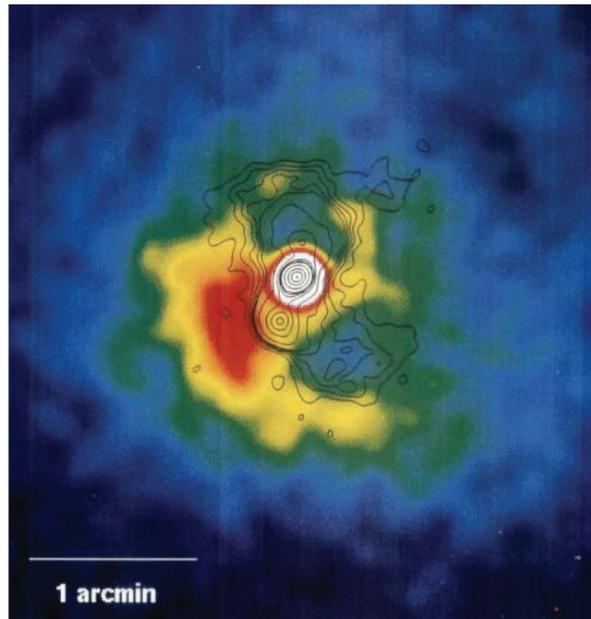
Исследования объектов Вселенной методами астрономии дают информацию только трех типов: пространственную (изображение), спектральную (распределение плотности потока фотонов от энергии или длины волны) и временную (зависимость яркости объектов от времени).

Орбитальная обсерватория HEAO2/Эйнштейн, впервые имевшая возможность получать высокоточную пространственную информацию о рентгеновском излучении неба, в то же время имела и несколько существенных недостатков. Прежде всего, эффективная площадь детекторов, имеющих возможность строить пространственное изображение с высоких разрешением, была очень мала - около 10 кв. см на энергии 1 кэВ. Этого было совершенно недостаточно для полной реализации потенциала фокусирующих рентгеновских телескопов. Тем не менее, в 1980х годах на спут-

нике EXOSAT еще раз были использованы рентгеновские зеркала косоугольного падения с малой эффективной площадью (около 10 кв. см).

Огромным шагом вперед стало создание телескопов косоугольного падения с большим полем зрения и со значительно увеличенной эффективной площадью (около 240 кв.см) на немецкой орбитальной обсерватории ROSAT. Такой скачок в эффективной площади, и в особенности в таком параметре как произведение эффективной площади на поле зрения зеркальной системы, дало возможность провести беспрецедентный по чувствительности обзор всего неба в рентгеновских лучах на энергиях 0.2-2.5 кэВ. Результатом обзора неба стало обнаружение более 150 000 источников и составление каталогов объектов разных классов, открытие ранее неизвестных и детальное изучение известных остатков вспышек сверхновых, обнаружение изолированных нейтронных звезд, открытие излучения комет и многое другое.

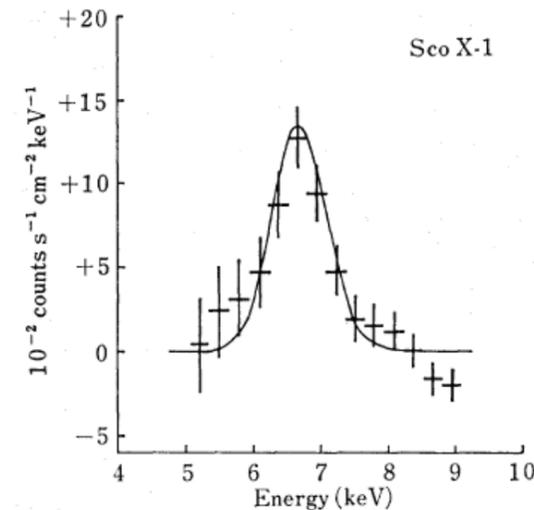
При исследованиях черных дыр, нейтронных звезд, белых карликов, т.е. компактных объектов, пространственная информация оказывается практически недоступной: источники имеют слишком малые разме-



Рентгеновское изображение скопления галактик в созвездии Персея (данные обсерватории ROSAT), с наложенными контурами радиояркости этого скопления галактик. Хорошо видна антикорреляция яркости скопления галактик в рентгеновском и радио диапазонах, указывающая на существенное влияние выбросов центральной сверхмассивной черной дыры (выбросы вещества из черной дыры видны по их излучению в радиодиапазоне) на горячий межгалактический газ. Из работы Берингер и др. (1993)

ры (например, нейтронная звезда имеет размер около 10-15 км на расстоянии от нас в сотни и тысячи парсек). Остаются только спектральная и временная информация.

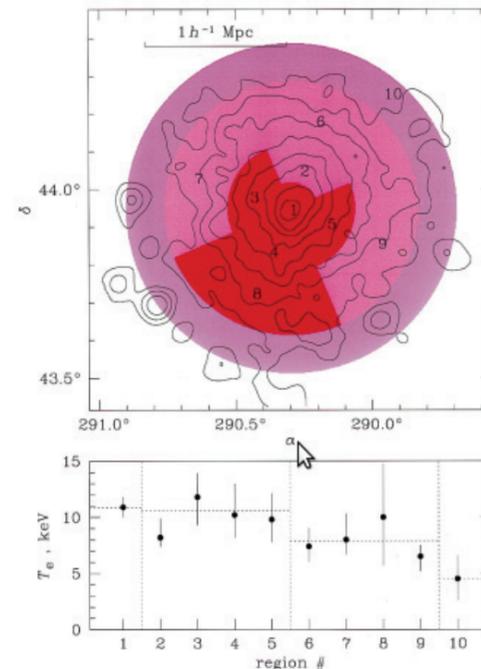
Для того, чтобы увеличить научную ценность спектральной информации необходимо увеличить энергетическое разрешение регистрирующих приборов. Первые инструменты рентгеновского диапазона имели энергетическое разрешение на уровне 20-25% до энергий 5-10 кэВ (газовые пропорциональные



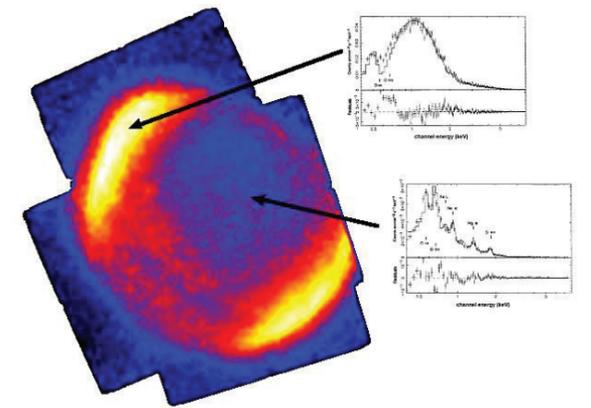
Эмиссионная линия железа, открытая в спектре аккрецирующей нейтронной звезды Sco X-1 благодаря увеличенному спектральному разрешению инструмента ГСПС обсерватории Тенга (из работы Сузуки и др. 1984)

счетчики) и на уровне 10-15% в диапазоне 50-300 кэВ (сцинтилляторы).

Кардинально новым способом получения хорошего энергетического разрешения стало использование диспергирующих элементов - Брэгговских кристаллов или дифракционных решеток. Основным принципом работы таких приборов является их свойство отклонять плоскопараллельный пучок фотонов



Распределение температуры горячей плазмы внутри скопления галактик по данным наблюдений обсерватории ASCA. Контуров показывают рентгеновскую яркость скопления, цвет секторов - их температуру. Из работы Маркевича (1996).



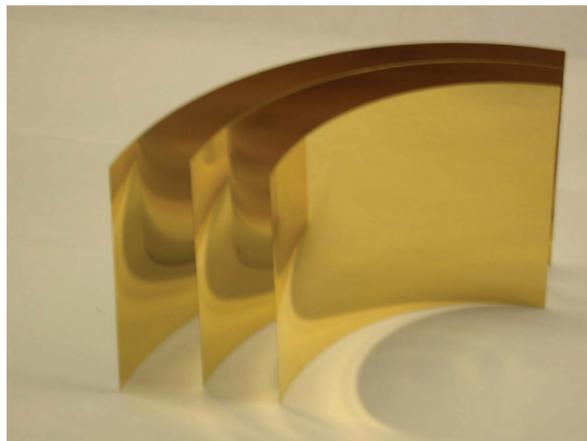
Изображение остатка вспышки сверхновой SN1006, полученное обсерваторией ASCA. Показано, что на краях остатка вспышки рентгеновское излучение формируется за счет нетепловых процессов, в отличие от излучения во внутренней части остатка.

на угол, пропорциональный энергии фотонов. Регистрация потока фотонов позиционно-чувствительным детектором позволяет приписать фотонам, отклоненным на разные углы, определенную энергию. Впервые этот метод построения спектров астрофизических источников был использован на орбитальной обсерватории HEAO2/Эйнштейн, затем на обсерватории EXOSAT (1983-1986 гг). Однако, наряду с преимуществами, этот метод получения спектров высокого разрешения обладает и недостатком - большой потерей потока фотонов.

Важным шагом для увеличения энергетического разрешения на энергиях ниже 10 кэВ при высокой эффективности регистрации фотонов стало использование газовых сцинтилляционных пропорциональных счетчиков (ГСПС), что позволило улучшить энергетическое разрешение приборов (без потери эффективности регистрации фотонов) до 10%. Это сразу дало возможность открыть несколько новых явлений в рентгеновской астрономии. По данным обсерватории Тенга, на которой впервые были использованы газовые сцинтилляционные пропорциональные счетчики рентгеновских фотонов, были открыты предсказанные незадолго до этого (Баско и др. 1974) флуоресцентные линии железа у целого ряда источников в нашей Галактике (см. например, Сузуки и др. 1984) и у внегалактических объектов.

Флуоресцентные линии возникают в результате отражения рентгеновского излучения от относительно холодного вещества. Обнаружение этих эмиссионных линий дало очень важный инструмент для изучения окрестностей черных дыр и нейтронных звезд. Профили линий, их ширина, смещение энергии относительно истинного положения и т.д., дает информацию о движении вещества, в котором возникают эти линии, вокруг компактных объектов, о гравитационном красном смещении в этом месте. Однако для детальных исследований эмиссионных линий в спектрах рентгеновских источников имеющегося качества наблюдательных данных пока было недостаточно.

В 1978 году впервые на рентгеновской обсерватории HEAO2/Эйнштейн для измерения спектров с высоким разрешением были использованы твердотельные детекторы рентгеновского излучения. Спектрометр SSS (Solid State Spectrometer) представлял собой криогенно-охлаждаемый кремниевый детектор



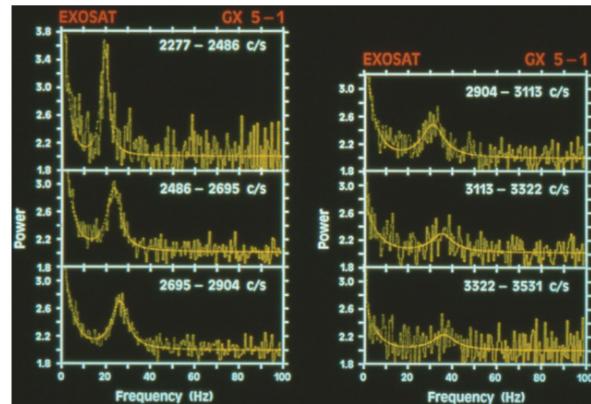
Тонкие фольги, используемые для легких рентгеновских зеркал косоугольного падения. Эта технология позволила существенно облегчить рентгеновские зеркала. Если для толстых зеркал, обеспечивающих рекордное угловое разрешение (HEAO2/обсерватория им.Эйнштейна, Chandra) соотношение масса-эффективная площадь было около 2кг/кв.см, то зеркала на тонких фольгах обеспечивали соотношение около 30 г/кв.см (телескопы BBXRT, ASCA, Suzaku).

(рабочая температура 100К), обеспечивающий энергетическое разрешение около 160 эВ (до 4%) во всем рабочем диапазоне энергий. Однако в этом эксперименте рабочий энергетический диапазон спектрометра был ограничен свойствами зеркальной системы и фактически заканчивался на энергиях 4-4.5 кэВ, не захватывая флуоресцентные линии железа.

В 1990 году в ходе орбитального полета космического челнока Колумбия криогенно-охлаждаемый кремниевый спектрометр был установлен в фокусе зеркал косоугольного падения, выполненных по технологии тонких фольг (телескоп BBXRT). Телескоп не обеспечивал такое пространственное разрешение как телескоп обсерватории Эйнштейн/HEAO2 (угловое разрешение его зеркал составляло около 1 угловой минуты), однако позволял успешно концентрировать рентгеновские фотоны на небольшой криогенно-охлаждаемый кремниевый спектрометр. В этом эксперименте рабочий диапазон спектрометра составлял 0.3-12 кэВ с энергетическим разрешением 90 эВ на энергии 1 кэВ и 150 эВ на энергии 6 кэВ.

Впервые скомбинировать умеренное пространственное разрешение с хорошим энергетическим разрешением фокального прибора удалось на японской обсерватории ASCA (1993-2000). Обсерватория состояла из четырех телескопов косоугольного падения, выполненных по технологии тонких фольг (изготовлены в Центре космических полетов им. Годдарда, США), в фокусах которых стояли два позиционно чувствительных газовых сцинтилляционных пропорциональных счетчика и два твердотельных спектрометра, сделанных на основе четырех ПЗС матриц (размером 420x400 элементов, изготовлены в Массачусетском технологическом институте, США). Рабочая температура твердотельных спектрометров составляла около -60С.

Возможность получать пространственно-разрешенную информацию с хорошим спектральным разрешением от протяженных объектов рентгеновского неба (галактики, скопления галактик, остатки вспышек сверхновых и т.д.) сразу привела к ряду важных открытий. Например, было обнаружено нетепловое излуче-



Спектр мощности (Фурье-образ) переменности яркости аккрецирующей нейтронной звезды GX 5-1. Хорошо виден пик квазипериодических осцилляций яркости источника на частотах 20-30 Гц.

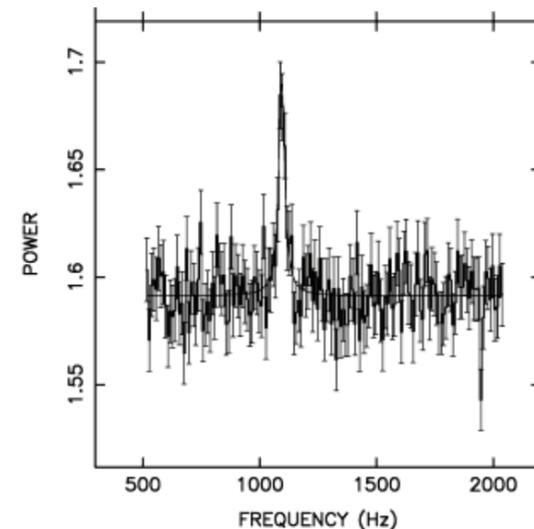
ние в некоторых частях оболочек остатков вспышек сверхновых, стало возможным исследование распределения температур и обилия тяжелых элементов в оболочках - относительно широкий энергетический диапазон инструментов обсерватории (0.5-10 кэВ) позволил выделять более жесткое излучение компактных объектов в тепловом излучении разлетающейся оболочки. При изучении горячего газа скоплений галактик новые возможности инструментов обсерватории ASCA привели к обнаружению температурных неоднородностей. Хорошее спектральное разрешение твердотельного детектора/ПЗС матрицы обсерватории позволило обнаружить структуру флуоресцентных эмиссионных линий компактных объектов.

Временная информация о рентгеновских источниках

Скопления галактик, галактики, остатки вспышек сверхновых не демонстрируют значительной



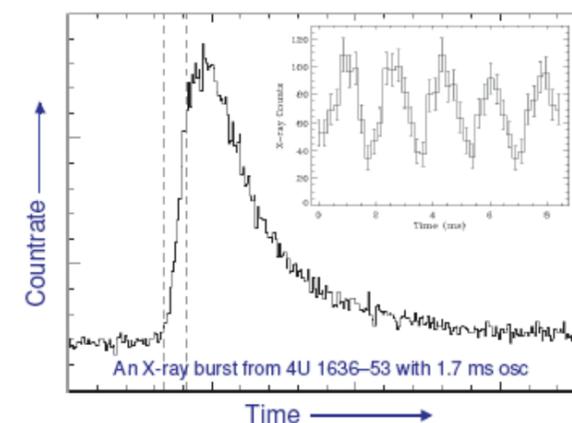
Обсерватория RXTE (1995-2012). Основной спектрометр этой обсерватории имел самую большую эффективную площадь (около 6400 кв.см) среди всех когда либо использовавшихся для наблюдений астрофизических рентгеновских объектов.



Спектр мощности переменности (Фурье-образ) кривой блеска аккрецирующей нейтронной звезды Скорпион X-1. На спектре мощности явно виден пик квазипериодических осцилляций яркости на частоте около 1100 Гц. Из работы ван дер Клиса и др. (1996)

переменности своего потока на малых временных масштабах. Действительно, существенные изменения яркости объектов (без учета эффектов, связанных с очень узкими диаграммами направленности излучения) не может происходить на масштабах времени, которые короче времени пролета объекта светом. Однако релятивистские компактные объекты (белые карлики, нейтронные звезды, черные дыры) имеют размеры менее световой секунды, что означает, что переменность их рентгеновской яркости может быть весьма значительна на временах до миллисекунды или даже меньше.

Уже первые ракетные и спутниковые измерения ярчайших компактных объектов (например, источника Лебедь X-1) показали, что их рентгеновский поток



Кривая блеска источника 4U1636-53 во время всплеска термоядерного горения на поверхности звезды. В начальный период всплеска до того, как термоядерное горение распространилось на всю поверхность звезды, наблюдаются осцилляции яркости (на врезке) из-за быстрого вращения звезды. Из работы Стромейера и др. (1998)

может меняться на масштабах существенно меньших секунды (Ода и др. 1971). Именно на таких масштабах происходит движение вещества вокруг черных дыр и нейтронных звезд (размер черной дыры звездной массы или нейтронной звезды составляет около 10-30 км, а скорость движения вещества на круговой орбите вокруг них может доходить до половины скорости света).

Работа с временными масштабами малых долей секунд представляет собой очень сложную задачу. Основная сложность наблюдений такой быстрой переменности состоит в том, что объекты наших исследований находятся так далеко, что количество фотонов, приходящих от них в единицу времени, очень мало. Особенно серьезна эта проблема в рентгеновском и жестком рентгеновском диапазонах.

В частности, одна из наиболее известных и ярчайших в рентгеновском диапазоне двойных звездных систем с черной дырой в нашей Галактике - система Лебедь X-1 - имеет светимость в рентгеновском диапазоне в сто тысяч раз больше светимости нашего Солнца, однако расстояние до нее настолько велико (2 тысячи световых лет или в 400 миллионов раз дальше, чем Солнце), что в окрестностях Земли от двойной системы Лебедь X-1 в рентгеновском диапазоне энергий приходит лишь по несколько фотонов в секунду на квадратный сантиметр. Поэтому, чтобы накопить полезный сигнал, позволяющий проводить измерения физических параметров вещества в окрестностях черной дыры в этой системе, нужны достаточно большие инструменты, позволяющие собирать фотоны с большой площади.

Одна из первых попыток сконцентрироваться на изучении быстрой переменности яркости рентгеновских источников была реализована в программе Европейского космического агентства EXOSAT (годы работы на орбите 1983-1986). Основным инструментом обсерватории стала система пропорциональных газовых счетчиков с общей эффективной площадью около 1600 кв.см., самой большой для спутников с трехосной стабилизацией на то время.

Результатом работы обсерватории стало открытие разных типов квазипериодических осцилляций яркости рентгеновских источников (см., например, обзор Хазингера, ван дер Клиса 1989), по-видимому связанных с особенностями аккреционных течений вблизи компактного объекта. Это открытие дало новый метод диагностики поведения вещества у черных дыр и нейтронных звезд.

Следующим шагом в этом направлении стали обсерватории GINGA (1987-1991, эффективная площадь основного инструмента около 4000 кв.см.) и RXTE (1995-2012, эффективная площадь основного детектора около 6400 кв.см).

Достижения рентгеновской астрономии последних лет

В последние 10-15 лет наблюдается бурное развитие рентгеновской астрономии. Основной прогресс здесь связан с запуском и успешной работой на орбите ряда рентгеновских обсерваторий, имеющих самые лучшие параметры углового разрешения, энергетического разрешения, эффективной площади. Об обсерватории ИНТЕГРАЛ и полученных с ее помощью результатах в жестком рентгеновском диапазоне энергий уже было сказано выше. Здесь речь пойдет об обсерваториях более мягкого диапазона.

Необходимо сказать что ввиду новых технических возможностей рентгеновской астрономии ее



Обсерватория Чандра (НАСА). Выведена на орбиту 23 июля 1999 г

задачи начинают сильно пересекаться с задачами современной фундаментальной физики.

Среди задач, находящихся на переднем крае рентгеновской астрономии/астрофизики - задачи об уравнении состояния материи при сверхядерных плотностях, о существовании кварковой материи, задачи об устройстве Вселенной, доли так называемой 'темной энергии' в полном энергетическом балансе Вселенной, о природе 'темной энергии', фундаментальные задачи плазменной физики, такие как теплопроводность, диффузия, развитие неустойчивостей в присутствии магнитных полей, и многое другое.

В конце 1995 года на орбиту была запущена обсерватория Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE), имевшая, до ее выключения в начале 2012 года, самую большую собирающую площадь рентгеновских детекторов - около 6400 кв.см. Такое значительное увеличение эффективной площади по сравнению с предыдущими миссиями позволило продвинуться существенно дальше по шкале временной переменности, что привело к открытию квазипериодических осцилляций с частотами до 1 кГц, которые близки к частотам обращения вещества у горизонта событий черных дыр и у поверхностей нейтронных звезд (Ван дер Клис и др. 1996).

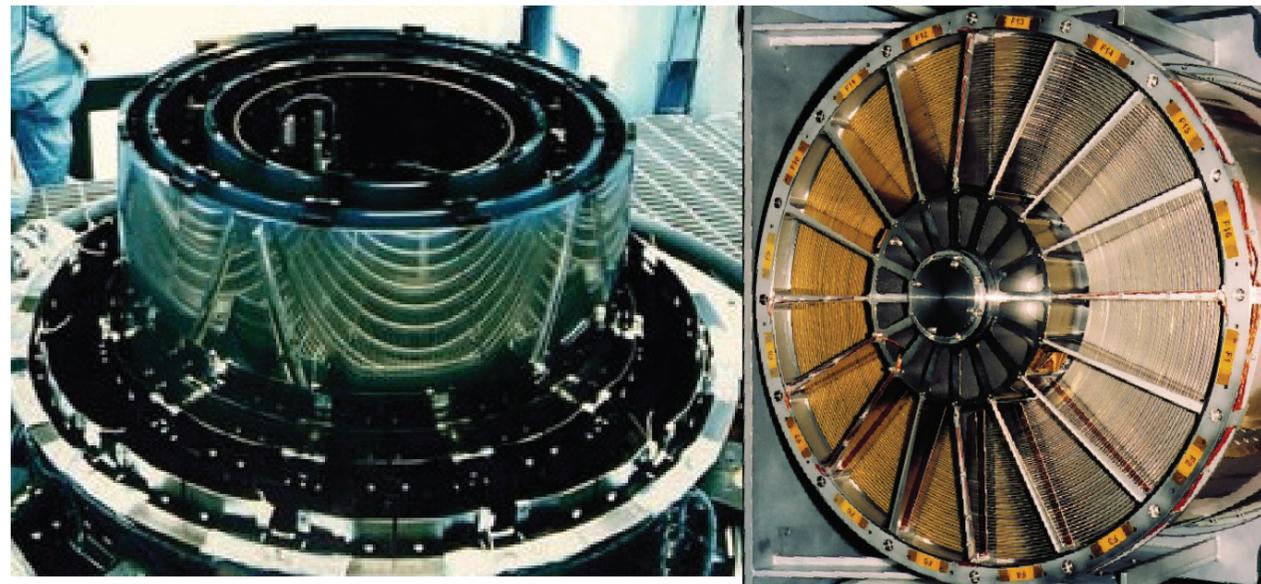
Еще одним важным открытием, сделанным обсерваторией RXTE, стало открытие пульсаций яркости нейтронных звезд с частотами в сотни Гц или периода-

ми вращения нейтронных звезд в 1-2 миллисекунды (Вэйнандс и др. 1998). Это впервые позволило подтвердить предсказанный путь эволюции нейтронных звезд в двойных системах - их раскрутку при аккреции и превращение, после исчерпания вещества звезды-компаньона, в одиночные миллисекундные радиопульсары.

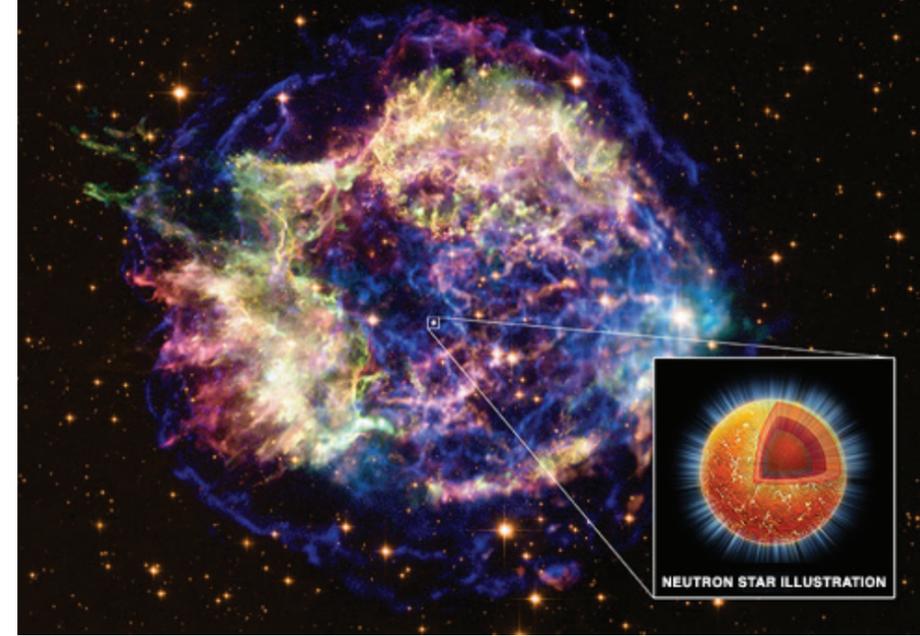
Быстровращающиеся нейтронные звезды были обнаружены не только среди пульсаров (т.е. нейтронных звезд, у которых магнитное поле достаточно сильно для того, чтобы направить падение аккрецируемого вещества на магнитные полюса, что в свою очередь, совместно с вращением нейтронной звезды, создает эффект 'маяка'), но и среди нейтронных звезд со слабыми магнитными полями.

В частности, пульсации были обнаружены во время всплесков термоядерного горения, происходящего в атмосферах нейтронных звезд. Был обнаружено, что в самом начале термоядерного горения в течение времени, за которое оно еще не успело распространиться по всей поверхности нейтронной звезды, видны осцилляции яркости горячего пятна (возникшего из-за термоядерного горения в этой области) на частоте вращения нейтронной звезды (Стромайер и др. 1998).

Обнаружение таких больших частот вращения нейтронных звезд дало новый инструмент диагностики их физических параметров. При частотах вращения около 500 Гц линейная скорость поверхности нейтронной звезды составляет 10-20% скорости света, что должно приводить к видимым эффектам на кривой яркости пульсаций. Ожидается, что измерение этих искажений может стать одним из самых надежных методов определения радиусов нейтронных звезд. Эти измерения очень важны для понимания уравнения состояния вещества при сверхядерных плотностях в центрах



Слева: Зеркальная система обсерватории Чандра (НАСА). Справа: зеркальная система обсерватории XMM-Newton (ЕКА)



Рентгеновское изображение остатка вспышки сверхновой Кассиопея А по данным обсерватории Чандра. Разными цветами показаны разные энергии фотонов. В центре хорошо виден компактный объект, по всей видимости, нейтронная звезда, образовавшаяся в результате взрыва сверхновой.

этих компактных объектов - являются ли нейтронные звезды на самом деле кварковыми? образуется ли канонный или бозонный конденсат в центре компактной звезды? и т.д.

В 1999 году состоялись запуски сразу двух рентгеновских обсерваторий, обеспечивших скачок в наблюдательной технике рентгеновской астрономии. В июле 1999 года была запущена обсерватория AXAF/Chandra (НАСА), в декабре 1999 года была запущена обсерватория XMM (X-ray Multi Mirror mission)/обсерватория им. Ньютона (XMM-Newton, ЕКА).

Основой обсерватории Chandra являются зеркала косоугольного падения, технологически являющиеся наследниками зеркал обсерватории HEAO2/Эйнштейн. При этом эффективная площадь зеркал увеличилась

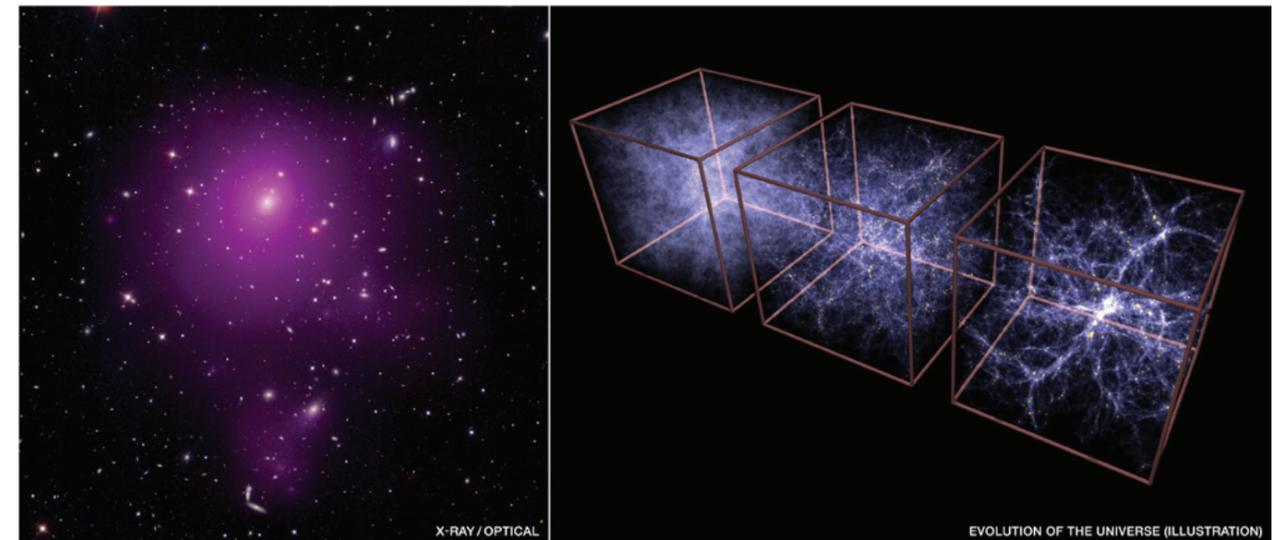
до 600-700 кв.см на энергиях 1-2 кэВ, продолжившись до энергий около 8 кэВ. В качестве фокальных детекторов используются ПЗС матрицы нового поколения, обеспечивающие энергетическое разрешение около 150-200 кэВ на энергии 6 кэВ. Введение в комплекс инструментов дифракционных решеток позволяет получать спектры точечных источников с еще большим энергетическим разрешением (до E/dE ~ 1000).

Обсерватория XMM-Newton также использует зеркала косоугольного падения, однако технология их изготовления немного другая. Для увеличения эффективной площади зеркал косо-

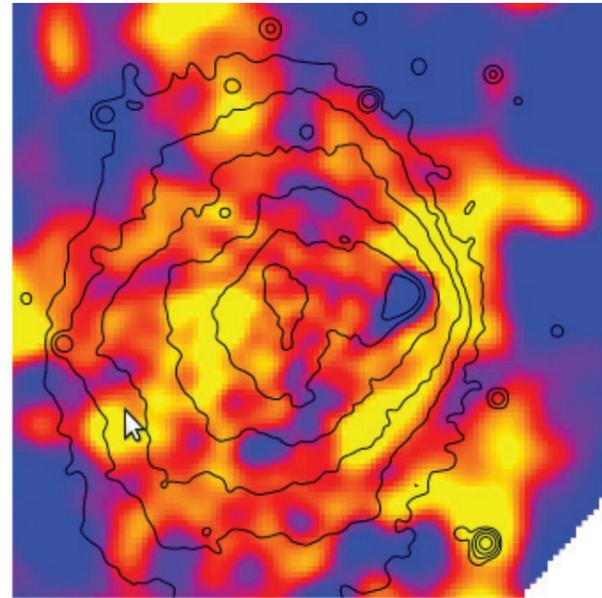
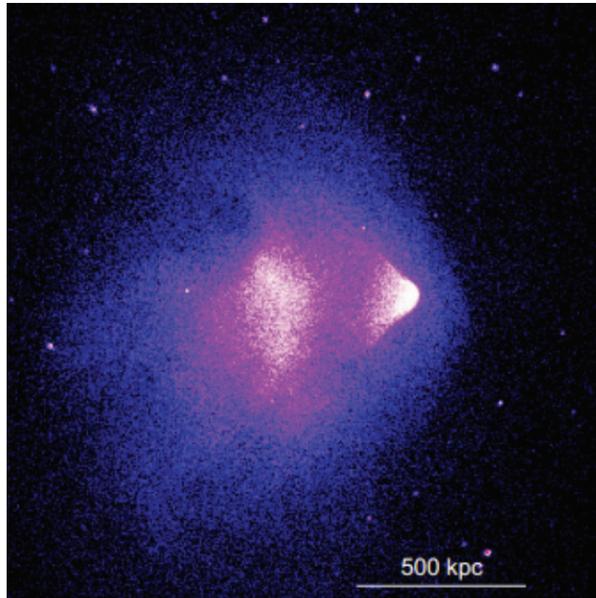
угольного падения большое количество параболоидов и гиперболоидов вкладывают друг в друга, создавая, таким образом, сложную систему вложенных труб. Целью обсерватории Chandra было получение максимально возможного углового разрешения телескопа, поэтому вложенных зеркал в ее зеркальной системе всего 4. Угловое разрешение этой зеркальной системы составляет около 0.5 угловой секунды.

Обсерватория XMM-Newton нацелена на получение максимально возможной эффективной площади зеркальной системы при умеренном угловом разрешении. Она имеет три зеркальные системы, каждая из которых состоит из 58 вложенных слоев зеркал. Сложности выравнивания такой большой системы не позволили сделать угловое разрешение лучше, чем 5-7 угловых секунд.

За годы работы обсерваторий Chandra и XMM-Newton было получено большое количество результатов. Здесь мы хотели бы упомянуть лишь о некоторых из них, связанных с наиболее фундаментальными проблемами современной физики.



Слева: рентгеновское изображение скопления галактик, наложенное на оптическое. В рентгеновском диапазоне хорошо видно протяженное излучение, возникающее из-за тормозного излучения горячей плазмы. Справа: схематично показан процесс роста возмущенной плотности вещества во Вселенной. В узлах хорошо видной сети повышенной плотности вещества находятся скопления галактик. Рост скоплений галактик зависит от космологических параметров Вселенной (НАСА).



Изображение скопления галактик 1E 0657-56 ('Пуля') по данным обсерватории Chandra. Слева -- рентгеновская карта скопления, справа -- температурная карта (синий цвет обозначает плазму с температурой меньше 6 кэВ, желтый -- с температурой более 20 кэВ). Хорошо видно, что перед летящей холодной 'пулей' стоит ударная волна. Из работы Маркевича и др. (2010)

Открытие излучения горячего газа в скоплениях галактик в наблюдениях обсерватории UHURU дало начало космологическим исследованиям в рентгеновской астрономии. Рост скоплений галактик, являющихся наиболее массивными гравитационно-связанными объектами во Вселенной, существенно зависит от эволюции Вселенной, от ее космологических параметров. Измерение распределения скоплений по их массам, а также измерения эволюции этого распределения с красным смещением, дает возможность сделать надежные оценки космологических параметров Вселенной. В случае существенного вклада темной энергии (темная энергия фактически расталкивает пространство, препятствуя образованию сгущений вещества на больших расстояниях) рост массивных скоплений галактик должен быть подавлен по сравнению со случаем отсутствия темной энергии.

Поиск скоплений галактик на небе - нетривиальная задача. В настоящее время такие исследования ведутся как в рентгеновском, так и в оптическом, инфракрасном, и в субмиллиметровом (на основе эффекта Сюняева-Зельдовича, связанного с искажением излучения реликтового фона при его прохождении че-

рез горячий газ скоплений галактик) диапазонах длин волн. Однако пока оказывается, что наиболее полную выборку скоплений галактик можно получить только при использовании обзоров неба в рентгеновском диапазоне энергий. Используя обзоры неба обсерватории ROSAT и детальные наблюдения скоплений галактик при помощи обсерваторий Chandra и XMM-Newton, удалось получить независимое подтверждение существования темной энергии во Вселенной (Вихлинин и др. 2009)

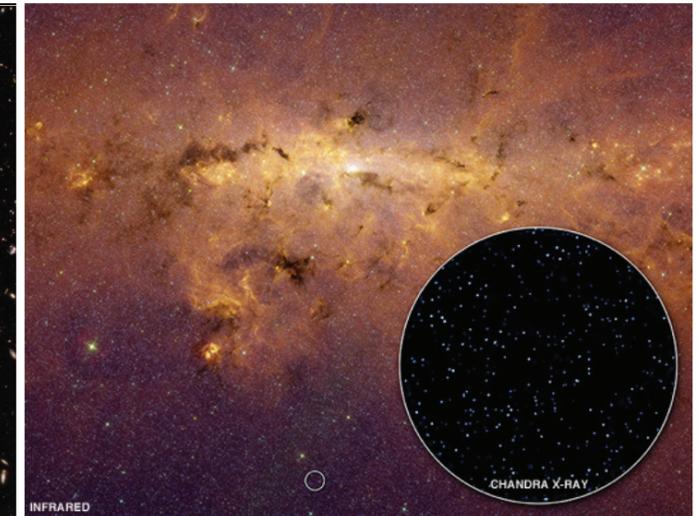
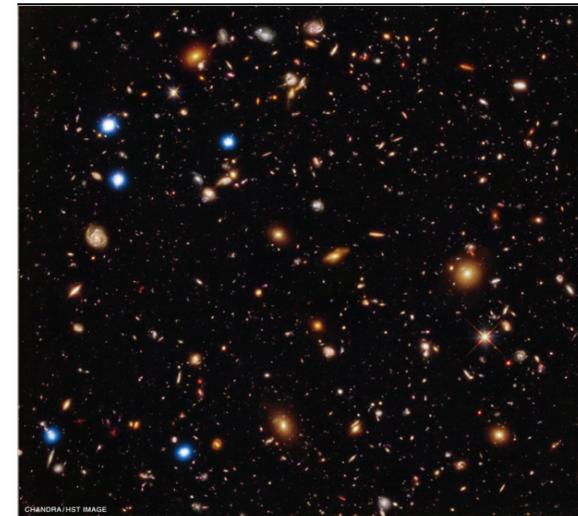
Горячий газ скоплений галактик представляет собой разреженную плазму, поведение которой в присутствии магнитного поля очень сложно предсказать теоретически. Благодаря разрешающей способности инструментов обсерватории Chandra и XMM-Newton свойства такой плазмы можно измерить в астрофизических наблюдениях (Маркевич и др. 2007), что представляет большой интерес для плазменной физики.

Комбинация хорошего пространственного, энергетического разрешения и большой эффективной площади обсерваторий Chandra и XMM-Newton позволила развиваться целым направлениям в рентгеновской астрономии, таким как изучение популяций аккрецирующих объектов в далеких галактиках, детальное изучение химического состава горячей плазмы в галактиках, в скоплениях галактик, в остатках вспышек сверхновых и т.д. На новый уровень точности вышли измерения влияния активности центральных сверхмассивных черных дыр в галактиках и в скоплениях галактик на галактическую и межгалактическую среду.

Новые шаги рентгеновской астрономии

Улучшение характеристик рентгеновских инструментов в ближайшее десятилетие ожидается по нескольким направлениям.

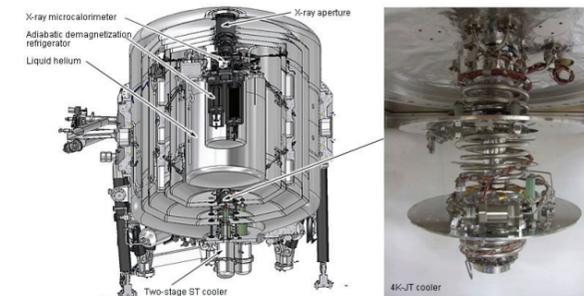
Прежде всего, планируется сделать скачок в энергетическом разрешении приборов, которое в современных рентгеновских инструментах ограничено



Рекордное угловое разрешение рентгеновского телескопа обсерватории Chandra (около 0.5 угл.секунд в центре поля зрения) позволило разрешить на огромное количество точечных источников внегалактический рентгеновский фон Вселенной (его подавляющая часть складывается из излучения миллиардов активных ядер галактик), а также фоновое рентгеновское излучение нашей Галактики. Слева показана комбинация изображений некоторой области неба орбитальными телескопами Chandra и Хаббл. Справа показано как разрешается на большое количество источников протяженное излучение области вдоль плоскости Галактики.

физическими свойствами полупроводников. Давно ожидаемый ввод в строй рентгеновских микрокалориметров, способных довести энергетическое разрешение в области энергий 6 кэВ до уровня в 3-5 эВ, был задержан несколькими техническими авариями. Рентгеновская обсерватория Астро-Е (Япония), на которой были установлены криогенные рентгеновские микрокалориметры, была потеряна в ходе неудачного запуска в феврале 2000 года. Ее копия (с немного улучшенными характеристиками энергетического разрешения) была успешно запущена в июле 2005 года. К сожалению, уже через несколько недель проблемы в системе охлаждения привели к полной потере жидкого гелия, что фактически означало выход из строя микрокалориметра. Следующей орбитальной обсерваторией с микрокалориметрами на борту должна стать обсерватория Astro-H (запуск запланирован на 2015 год).

В области жесткого рентгеновского диапазона современные технологии построения изображения и увеличения чувствительности фактически достигли своего технического предела (обсерватории ИНТЕРГРАЛ, SWIFT). Дальнейшее увеличение чувствительности инструментов в этом диапазоне энергий требует



Микрокалориметр для новой рентгеновской обсерватории ASTRO-H космического агентства Японии JAXA. Сложная система криогенного охлаждения доводит температуру микрокалориметра до величины около 50 миллиК.

значительного увеличения площади и массы регистрирующей аппаратуры (более 10 тонн), что делает практически невозможным выведение таких обсерваторий на орбиту. Поэтому для улучшения характеристик аппаратуры, работающей в жестком рентгеновском диапазоне, требуются принципиально новые технические решения.

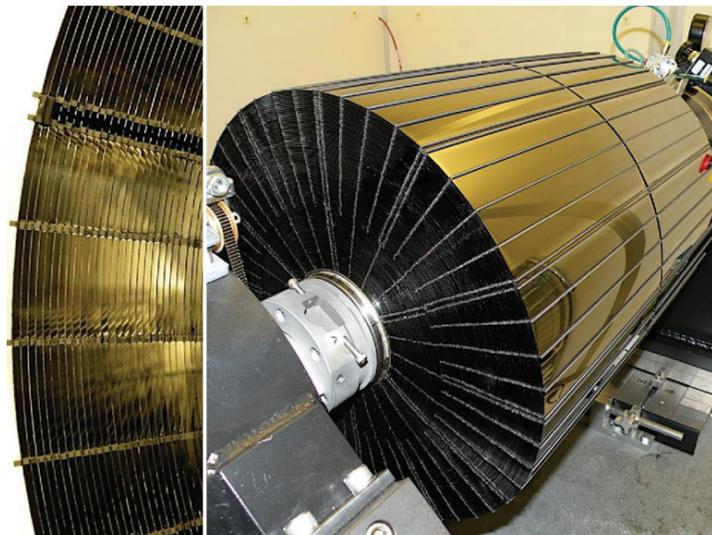
Одним из таких решений является использование рентгеновских зеркал косоугольного падения с многослойными покрытиями, которые позволяют поднять верхнюю границу энергии фотонов, отражаемых от зеркал, до 70-80 кэВ. Орбитальная обсерватория с



Изображение галактик Antennae в рентгеновском (синий цвет, данные обсерватории Чандра), оптическом (желтый, обсерватория им. Хаббла) и инфракрасном (красный, обсерватория Спитцер) диапазонах



Согласно последним исследованиям, активные ядра - сверхмассивные черные дыры в центрах галактик - существенно влияют на темпы роста самих галактик в ходе эволюции Вселенной.



Слева: Рентгеновские зеркала косоугольного падения с многослойным покрытием обсерватории NuSTAR. Справа: Художественное представление обсерватории NuSTAR на орбите. (НАСА)

такими зеркалами - NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array, Гаррисон и др. 2010) была запущена на орбиту в июне 2012 года. Ожидаемая чувствительность рентгеновских телескопов NuSTAR в области жесткого рентгеновского диапазона приблизительно в 100 раз лучше чувствительности обсерватории ИНТЕГРАЛ (это достигается за счет фокусирующей оптики). Однако поле зрения телескопа при этом очень мало, менее 12 угловых минут.

Основными мишенями обсерватории NuSTAR являются остатки вспышек сверхновых, активные ядра галактик, ультраяркие рентгеновские источники, природа которых пока остается неясной.

Потенциал открытий, созданный обзором всего неба обсерватории ROSAT в 1990х годах, постепенно заканчивается. Особенно это видно по тому, что за последние годы рентгеновские обсерватории посвя-

щают достаточно много времени обзорам разных площадей на небе. Задачами этих обзоров, как правило, являются исследования космологической эволюции галактик и сверхмассивных черных дыр.

Следующим обзором рентгеновского неба, который даст огромный импульс рентгеновской астрономии на ближайшие десятилетия станет обзор обсерватории Спектр-Рентген-Гамма (Спектр-РГ). Обсерватория является совместным проектом России и Германии и нацелена на решение фундаментальных вопросов космологии - свойств и эволюции Вселенной, природы темной энергии и темной материи, возникновения и роста сверхмассивных черных дыр и поиск наиболее редких объектов.

Основой обсерватории являются два рентгеновских телескопа косоугольного падения - eROSITA (Германия) и АРТ-ХС (Россия), совместно перекрывающих область энергий 0.2-30 кэВ. Задачей обсерватории является получение обзора всего неба с чувствительностью практически в сто раз превышающей чувствительность существующих обзоров неба, и продление такого обзора в область более жесткого рентгеновского диапазона.

Ожидается, что в ходе обзора всего неба обсерватория Спектр-Рентген-Гамма обнаружит все скопления галактик в наблюдаемой части Вселенной (около 100 000 скоплений), около 3 миллионов аккрецирующих сверхмассивных черных дыр, сотни тысяч звезд с активными коронами, десятки тысяч звездобразующих галактик



Общий вид спутника Спектр-РГ

Авторы:
М.Г.Ревнивцев, А.А.Лутовинов, М.Н.Павлинский (ИКИ РАН)
С использованием материалов, подготовленных авторами для монографии «Фундаментальные космические исследования»
Верстка: М.Г.Ревнивцев
Дизайн обложки: А.Н.Захаров

Буклет изготовлен при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ)

Список литературы

- Бабушкина О.П. и др. 1975, Письма в *Астрономический Журнал*, 1, 32
- Basko M.M., Sunyaev R.A., Titarchuk L.G., 1974, *A&A*, 31, 249
- Бейгман И.Л. и др. 1976, Письма в *Астрономический Журнал*, 2, 6
- Belian R.D., Conner J.P., Evans W.D., 1972, *ApJ*, 171, L87
- Boehringer H., Voges W., Fabian A.C., Edge A.C., Neumann D.M., 1993, *MNRAS*, 264, L25
- Bowyer S., Byram E.T., Chubb T.A., Friedman H., 1964, *Sci*, 146, 912
- Братолобова-Цулукидзе Л.С. и др. 1976, Письма в *Астрономический Журнал*, 2, 71
- Churazov E., Sazonov S., Tsygankov S., Sunyaev R., Varshalovich D., 2011, *MNRAS*, 411, 1727
- Costa E., et al., 1997, *Nature*, 387, 783
- Doxsey R.E., Bradt H.V., Dower R.G., Jernigan J.G., Apparao K.M.V., 1977, *Nature*, 270, 586
- Doxsey R., Bradt H., Johnston M., Griffiths R., Leach R., Schwartz D., Schwarz J., Grindlay J., 1979, *ApJ*, 228, L67
- Duncan R.C., Thompson C., 1992, *ApJ*, 392, L9
- Forman W., Jones C., Cominsky L., Julien P., Murray S., Peters G., Tananbaum H., Giacconi R., 1978, *ApJS*, 38, 357
- Friedman H., Lichtman S.W., Byram E.T., 1951, *PhRv*, 83, 1025
- Giacconi R., Rossi B., 1960, *JGR*, 65, 773
- Giacconi R., Gursky H., Paolini F.R., Rossi B.B., 1962, *PhRvL*, 9, 439
- Giacconi R., et al., 1979, *ApJ*, 234, L1
- Gnedin I.N., Sunyaev R.A., 1974, *A&A*, 36, 379
- Golenetskii S.V., Mazets E.P., Il'inski V.N., Aptekar' R.L., Bredov M.M., Gur'yan Y.A., Panov V.N., 1971, *ApL*, 9, 69
- Grebenev S.A., Syunyaev R.A., 1987, *SvAL*, 13, 397
- Grebenev S.A., Lutovinov A.A., Tsygankov S.S., Winkler C., 2012, *Nature*, 490, 373
- Grindlay J., Gursky H., Schnopper H., Parsignault D.-R., Heise J., Brinkman A.C., Schrijver J., 1976, *ApJ*, 205, L127
- Gursky H., Giacconi R., Gorenstein P., Waters J.R., Oda M., Bradt H., Garmire G., Sreekantan B.V., 1966, *ApJ*, 146, 310
- Gursky H., Kellogg E., Murray S., Leong C., Tananbaum H., Giacconi R., 1971, *ApJ*, 167, L81
- Harrison F.A., et al., 2010, *SPIE*, 7732,
- Hasinger G., van der Klis M., 1989, *A&A*, 225, 79
- Klebesadel R.W., Strong I.B., Olson R.A., 1973, *ApJ*, 182, L85
- Krivonos R., Revnivtsev M., Churazov E., Sazonov S., Grebenev S., Sunyaev R., 2007, *A&A*, 463, 957
- Krivonos R., Tsygankov S., Lutovinov A., Revnivtsev M., Churazov E., Sunyaev R., 2012, *A&A*, 545, A27
- Курт В.Г. и др. 1976, Письма в *Астрономический Журнал*, 2, 42
- Lasota J.-P., 2001, *NewAR*, 45, 449
- Lewin W.H.G., Joss P.C., 1981, *SSRv*, 28, 3
- Мандельштам С.Л., Тиндо И.П., Черемухин Г.С., Сорокин Л.С., Дмитриев А.Б., 1968, *Космические Исследования*, т.4, вып.1, стр. 119
- Markevitch M., 1996, *ApJ*, 465, L1
- Markevitch M., Vikhlinin A., 2007, *PhR*, 443, 1

- Markevitch M., 2010, arXiv, arXiv:1010.3660
- Marshall F.E., Boldt E.A., Holt S.S., Miller R.B., Mushotzky R.F., Rose L.A., Rothschild R.-E., Serlemitsos P.J., 1980, *ApJ*, 235, 4
- Мазец Е.П., Голенецкий С.В. & Ильинский В.Н., 1974, Письма в *ЖЕТФ*, 19, 126
- Mazets E.P., Golenetskii S.V., Ilinski V.N., Gurian I.A., Kharitonova T.V., 1975, *Ap&SS*, 33, 347
- Mazets E.P., Golenetskii S.V., Ilinski V.N., Aptekar R.L., Guryan I.A., 1979, *Nature*, 282, 587
- Mitchell R.J., Culhane J.L., Davison P.J.N., Ives J.C., 1976, *MNRAS*, 175, 29P
- Mitsuda K., et al., 1984, *PASJ*, 36, 741
- Oda M., Gorenstein P., Gursky H., Kellogg E., Schreier E., Tananbaum H., Giacconi R., 1971, *ApJ*, 166, L1
- Pavlinsky M.N., Grebenev S.A., Sunyaev R.-A., 1994, *ApJ*, 425, 110
- Ревнивцев М.Г., Сюняев Р.А. Гильфанов М.Р., Чуразов Е.М., Годвурм А., Поль Ж., Мандру П., Рок Ж.П., 2004, Письма в *Астрономический Журнал*, 30, 527
- Revnitsev M., Sazonov S., Churazov E., Forman W., Vikhlinin A., Sunyaev R., 2009, *Nature*, 458, 1142
- Revnitsev M., et al., 2012, *SPIE*, 8443,
- Salpeter E.E., 1964, *ApJ*, 140, 796
- Sandage A., et al., 1966, *ApJ*, 146, 316
- Schnopper H.W., Bradt H.V., Rappaport S., Boughan E., Burnett B., Doxsey R., Mayer W., Watt S., 1970, *ApJ*, 161, L161
- Schreier E., Levinson R., Gursky H., Kellogg E., Tananbaum H., Giacconi R., 1972, *ApJ*, 172, L79
- Shakura N.I., Sunyaev R.A., 1973, *A&A*, 24, 337
- Shapiro S.L., Lightman A.P., Eardley D.M., 1976, *ApJ*, 204, 187
- Skinner G.K., Willmore A.P., Eyles C.J., Bertram D., Church M.J., 1987, *Nature*, 330, 544
- Strohmayer T.E., Zhang W., Swank J.H., White N.E., Lapidus I., 1998, *ApJ*, 498, L135
- Sunyaev R.A., Truemper J., 1979, *Nature*, 279, 506
- Sunyaev R.A., Titarchuk L.G., 1980, *A&A*, 86, 121
- Sunyaev R., et al., 1987, *Nature*, 330, 227
- Сюняев Р.А. и др., 1988, Письма в *Астрономический Журнал*, 146 327
- Sunyaev R., et al., 1991, *A&A*, 247, L29
- Sunyaev R.A., Markevitch M., Pavlinsky M., 1993, *ApJ*, 407, 606
- Suzuki K., Matsuoka M., Inoue H., Mitsuda K., Tanaka Y., Ohashi T., Hirano T., Miyamoto S., 1984, *PASJ*, 36, 761
- Tanaka Y., Shibasaki N., 1996, *ARA&A*, 34, 607
- Truemper J., Pietsch W., Reppin C., Voges W., Staubert R., Kendziorra E., 1978, *ApJ*, 219, L105
- Vaiana G.S., van Speybroeck L., Zombeck M.V., Krieger A.S., Silk J.K., Timothy A., 1977, *SSI*, 3, 19
- van der Klis M., Swank J.H., Zhang W., Jahoda K., Morgan E.H., Lewin W.H.G., Vaughan B., van Paradijs J., 1996, *ApJ*, 469, L1
- van Paradijs J., et al., 1997, *Nature*, 386, 686
- Vikhlinin A., et al., 2009, *ApJ*, 692, 1060
- Wijnands R., van der Klis M., 1998, *Nature*, 394, 344
- Zel'dovich Y.B., 1964, *SPhD*, 9, 195

Загадка рентгеновского «хребта» Галактики

М.Г.Ревнивцев

Основная масса вещества в галактиках (если не считать темной материи) содержится в звездах. Однако значительная его доля распылена и в межзвездной среде. Вообще можно сказать, что для астрофизики межзвездная среда — важнейший элемент, исследуя свойства которого, можно много узнать о различных физических процессах, происходящих в галактиках и их скоплениях. Простейшим наглядным примером будут, наверное, ударные волны, которые в межзвездной среде создают взрывами сверхновых. По динамике движения ударных волн, по измерениям температур на их фронтах и положений последних можно оценивать энергию, выделившуюся во время взрыва или столкновения — такую информацию другим образом получить очень сложно. В межзвездной среде нашей Галактики сильные ударные волны порождаются только взрывами сверхновых (рис.1, слева), а в межгалактической среде волны могут возникать также в результате столкновения галактик (рис.1, справа) и т.д. Таким образом, изучение свойств межзвездной среды представляет большой интерес для астрофизиков — ее параметры важны для понимания энергетики Галактики в целом. Поэтому неудивительно, что когда в начале 80-х годов прошлого века рентгеновские наблюдения вроде бы указали на ее темпера-

© Ревнивцев М.Г., 2009



Михаил Геннадьевич Ревнивцев, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела астрофизики высоких энергий Института космических исследований РАН. Научные интересы связаны с исследованием аккреции на релятивистские объекты.

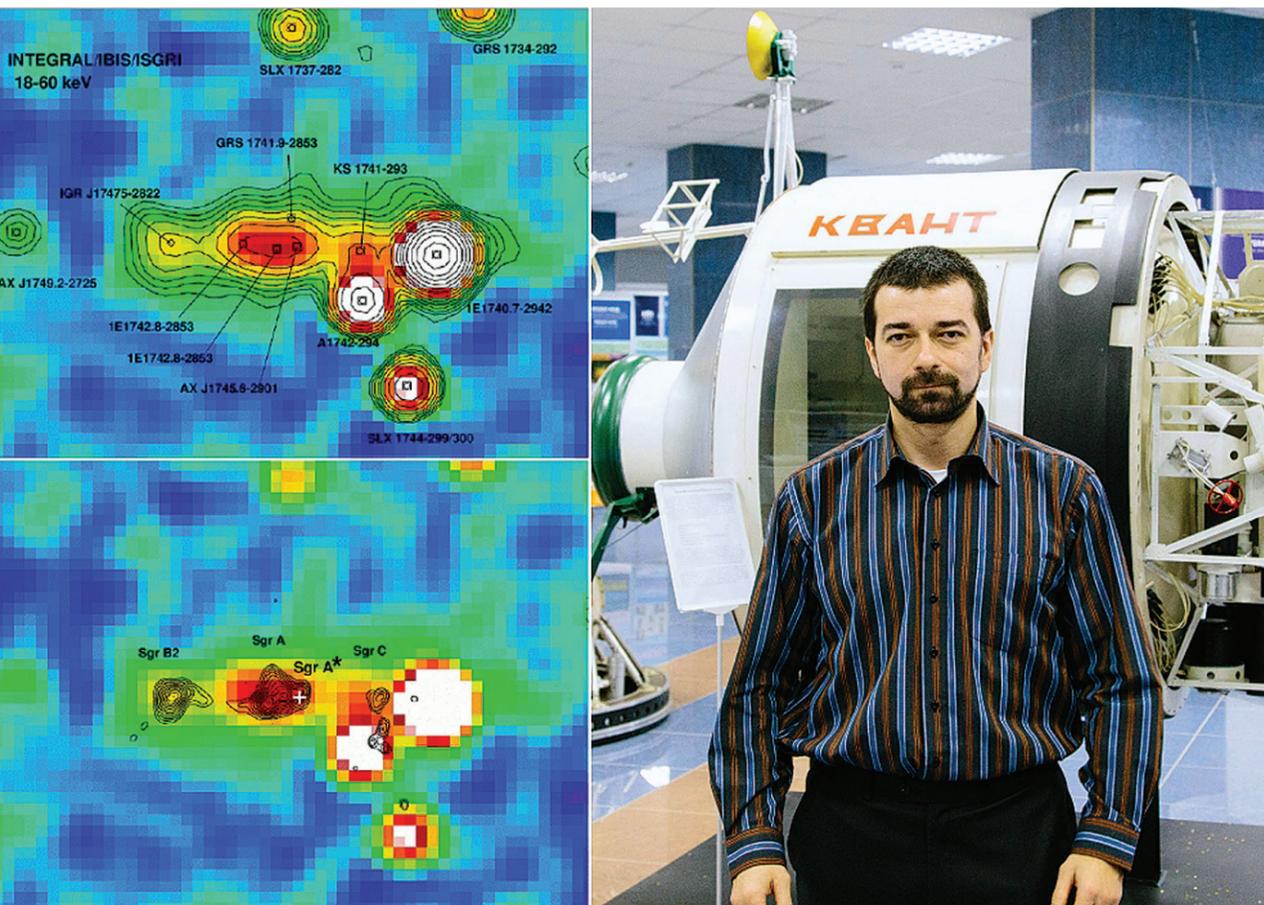
туру в 100 млн градусов, астрофизики были поставлены в тупик. Но обо всем по порядку.

Неожиданная мощь

Пространство между звездами заполнено атомарным (ионизованным и нейтральным) и молекулярным водородом, электронами — продуктами ионизации газа, микроскопическими конгломератами атомов легких элементов (включая органические молекулы) — пылью; его пронизывают потоки высокоэнергичных частиц — космические лучи. Все участники этого ансамбля способны генерировать разнообразные фотоны. И действительно, межзвездная среда нашей Галактики светит в различных участках электромагнитного спектра. В радиодиапазоне свечение возникает в результате излучения свободных электронов и синхротронного

излучения релятивистских электронов космических лучей. Пример такого свечения можно видеть на рис.2, где легко определяется положение нашей Галактики — его выдает светлая полоса, проходящая через середину карты.

Взаимодействие космических лучей высоких энергий с веществом межзвездной среды должно приводить к испусканию гамма-лучей (энергии фотонов более нескольких МэВ). Этот феномен был предсказан более 40 лет назад и был обнаружен уже в одном из первых экспериментов по изучению неба в гамма-диапазоне (обсерватория OSO-3, NASA, время работы на орбите 1967—1969 гг.). В настоящее время наилучшие измерения излучения неба в данной области электромагнитного спектра дает обсерватория «Ферми» (NASA), запущенная в 2008 г. Карта неба по результатам работы первых 3 мес этой обсерватории показана на рис.2.



Слева: изображение области Галактического Центра по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ (из статьи "Hard X-ray view of the past activity of Sgr A* in a natural Compton mirror", M. G. Revnivtsev, E. M. Churazov, S. Yu. Sazonov, R. A. Sunyaev, A. A. Lutovinov, M. R. Gilfanov, A. A. Vikhlinin, P. E. Shtykovsky, M. N. Pavlinsky, 2004, A&A 425, L49).
Справа: Михаил Ревнивцев в музее ИКИ РАН у макета модуля КВАНТ, 2013 год

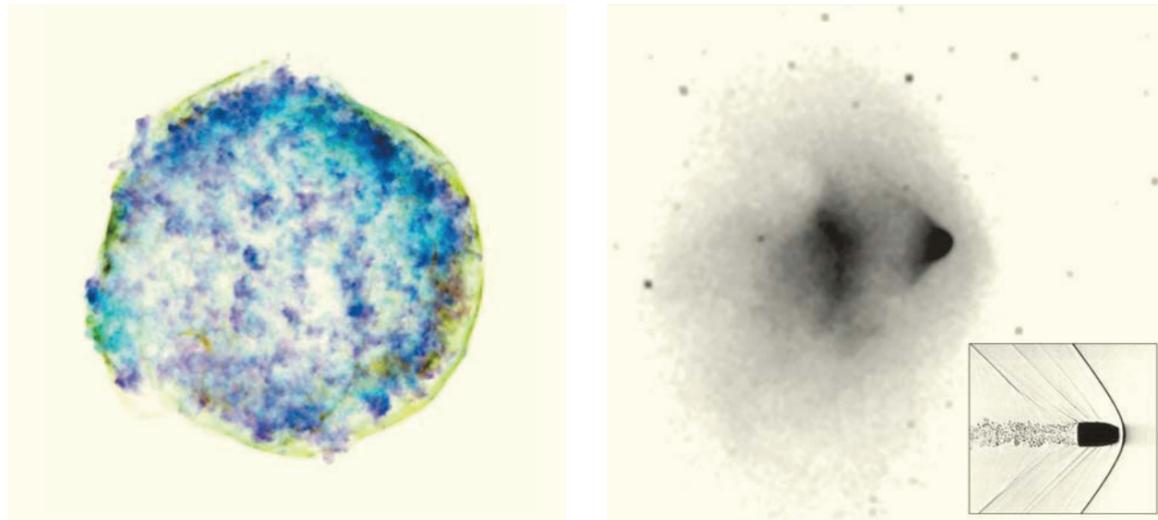


Рис.1. Изображение остатка вспышки сверхновой 1572 года (сверхновая Тихо) по данным наблюдений рентгеновской обсерватории Chandra (слева). Расширяющаяся внешняя граница излучения остатка вспышки сверхновой — ударная волна, которую взрыв сверхновой создал в межзвездной среде. Изображение скопления галактик Пуля (1E 0657—56) по данным наблюдений обсерватории Chandra (справа). Хорошо виден конус ударных волн в правой части, идущих спереди от летящей массы газа (темная «пуля», летящая на карте направо). Для сравнения в правом нижнем углу рисунка показано изображение полета сверхзвуковой пули в воздухе.

Изображение NASA

В рентгеновской части спектра основная часть излучения Галактики возникает в двойных системах с компактными объектами — черными дырами и нейтронными звездами. Эти экзотические объекты имеют уникально сильные гравитационные поля, двигаясь в которых, любое вещество приобретает скорости в десятки и сотни тысяч киломе-

тров в секунду. При соударении частиц между собой часть их энергии переходит в тепло и таким образом приводит к значительному нагреву — до температур в десятки и сотни миллионов градусов, когда характерным становится свечение именно в рентгеновских лучах. Для того чтобы черная дыра или нейтронная звезда «засветила», нужно

обеспечить поступление материи в ее окрестности. В Галактике проще всего это сделать, «посадив» компактный объект в двойную систему с обычной звездой. В такой двойной системе обычная звезда выполняет роль своего рода «бензобака», т.е. поставляет вещество для его использования в мощнейшем «реакторе» компактного объекта.

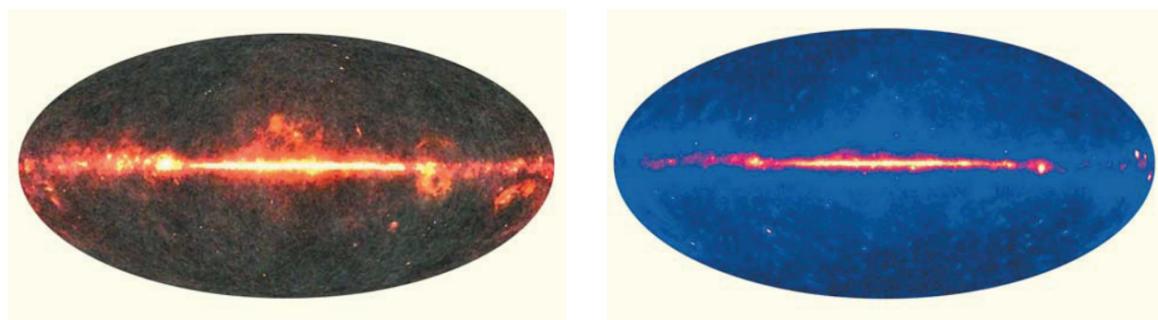


Рис.2. Карта неба в радиодиапазоне (10—100 ГГц) по данным обсерватории WMAP, NASA (слева). Хорошо заметно излучение межзвездной среды Галактики (полоса в центре карты). Карта неба в гамма-лучах по данным обсерватории «Ферми», NASA (справа). Излучение межзвездной среды Галактики, рождающееся при взаимодействии релятивистских частиц космических лучей с веществом межзвездной среды, видно как яркая полоса посередине карты. На левой и правой картах обнаруживается много общего в распределении яркости Галактики по небу — это следствие формирования свечения обоих типов с участием межзвездной среды.

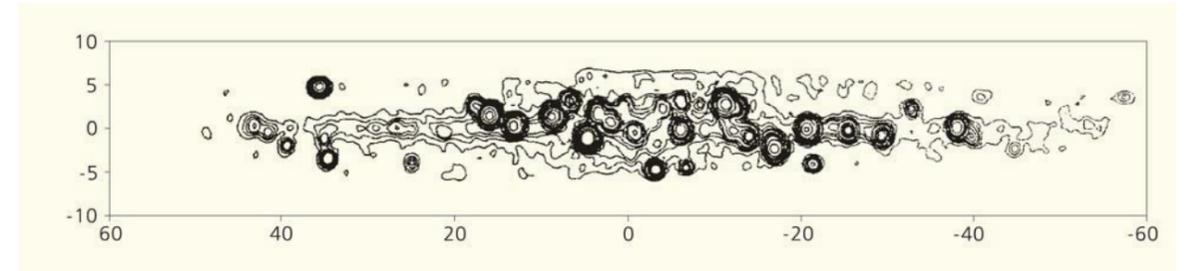


Рис.3. Карта галактической плоскости по результатам наблюдений обсерватории EXOSAT (время работы на орбите 1983—1986 гг.). Большие кружки — яркие рентгеновские источники, преимущественно двойные системы с черными дырами и нейтронными звездами. Хребет Галактики виден как полоса свечения, проходящая через середину карты.

Светимости подобных двойных систем в нашей Галактике достигают значений в 10^{38} — 10^{39} эрг/с, что в сотни тысяч и миллионы раз больше, чем светимость нашего Солнца.

Рентгеновские наблюдения, начавшиеся вскоре после появления первых ракет и спутников, сразу же показали наличие значительного числа таких систем в Галактике. Но выяснилось, что не все рентгеновское излучение Галактики можно приписать таким объектам. В области галактической плоскости остается тусклое свечение (рис.3), получившее название «рентгеновский хребет Галактики» [1, 2]. При более детальном исследовании этого излучения обнаружились эмиссионные линии сильно ионизованных атомов тяжелых элементов (например, железа), которые свидетельствовали о том, что излучение рождается в очень горячей плазме [3].

Горячая плазма вообще-то не является чем-то необычным для нашей Галактики. Процессы, происходящие в ней, нередко связаны со взрывами, с движениями с большими скоростями, которые часто приводят к нагреву окружающей объект плазмы до больших температур. Однако, как правило, это происходит в достаточно ограниченной области Галактики, т.е. основная часть межзвездной среды галактики остается относительно холодной. Теперь же оказывалось, что практически весь диск Галактики заполнен плазмой

с температурой в сотню миллионов градусов.

Самая главная загвоздка в понимании природы свечения рентгеновского хребта состояла в том, что плазму таких больших температур, как указывали наблюдения, гравитационное поле Галактики удержать не в силах. Поскольку, согласно наблюдениям, рентгеновское свечение концентрируется вблизи галактической плоскости (ширина области излучения составляет не более нескольких градусов), для того, чтобы картина рентгеновского хребта была стационарной, что-то должно предотвращать «разбегание» горячей плазмы. Гравитационного поля диска Галактики для этого явно недостаточно. Действительно, по результатам измерения движения звезд известно, что скорость убегания из диска Галактики составляет всего несколько десятков километров в секунду, в то время как тепловые скорости плазмы с температурой в сотню миллионов градусов достигают около тысячи километров в секунду. Такую горячую плазму могут удерживать лишь огромные скопления галактик с массами в $10^{15} M_{\odot}$, что примерно в 10 тыс. раз больше, чем масса нашей Галактики.

Другим вариантом существования горячей межзвездной плазмы в Галактике может быть ее постоянный отток, аналогично тому, как это часто наблюдается в галактиках с мощным звездообразованием (рис.4). Од-

нако оказывается, что для восполнения энергии, уносимой вместе с оттоком со скоростями более 1 тыс. км/с, необходимо каждую секунду закачивать по всей Галактике в межзвездную среду энергию порядка 10^{43} эрг — подобная величина совершенно не вписывается в наши текущие представления об энергетике Галактики. Для объяснения излучения хребта пытались также привлечь взаимодействие малоэнергичных электронов космических лучей с межзвездной средой, но безуспешно.

В начале 80-х годов был предложен еще один альтернативный способ объяснить формирование рентгеновского хребта Галактики. Предлагалось рассматривать хребет не как результат свечения собственно межзвездной среды, а как итог сложения свечения большого числа слабых рентгеновских источников, индивидуально необнаружимых на существовавших тогда картах галактического диска. Такое объяснение полностью снимало бы проблему загадочного и до сих пор неизвестного источника огромной энергии в Галактике.

Однако до недавнего времени эта гипотеза не находила поддержки среди астрономов. Основной причиной тому была скудость сведений о демографии (статистических свойствах различных классов объектов) — было сложно предсказать, какой вклад они могут дать в масштабе всей Галактики. Настоящим прорывом в изучении рентгеновско-



Рис.4. Изображение галактики M82 в разных участках электромагнитного спектра (белый — оптическое изображение, красный — инфракрасное). Видно, что большая часть рентгеновского излучения (голубой цвет) формируется в горячей оттекающей плазме.

го хребта стало получение его высококачественной карты [4] и составление «переписи рентгеновского звездного населения» в окрестностях Солнца [5].

Под прицелом — хребет

Исследование морфологии излучения, т.е. его распределения по небу, и сопоставление полученной карты с уже известными распределениями различных объектов очень часто дают ключи к разгадке природы явления. Например, если рентгеновское свечение хребта возникает в результате взаимодействия космических лучей с веществом межзвездной среды, можно ожидать, что свечение хребта будет ярче там, где межзвездная среда более плотная и больше космических лучей. Если же свечение хребта связано с влиянием сверхновых на межзвездную среду, рентгеновское свечение должно быть ярче там, где больше сверхновых, и т.д. Так, в конце 60-х годов, после открытия свечения Галактики в гамма-лучах, распределение этого свечения было сопос-

тавлено с известными картами межзвездной среды, что сразу же указало на причину формирования гамма-излучения — взаимодействие космических лучей больших энергий с межзвездным газом (см. рис.2).

Получение хорошей карты рентгеновского хребта Галактики оказалось очень непростой задачей. Основная проблема была в том, что поверхностная яркость хребта очень мала, всего около 10^{-11} эрг/с/см²/кв. градус, или $\sim 10^{-3}$ фот./с/см²/кв. градус. При типичных размерах и полях зрения рентгеновских инструментов (эффективная площадь менее 200–500 см², поля зрения — 0.05–0.2 кв. градуса) для того, чтобы накопить разумное количество фотонов от свечения хребта (например, 1 тыс. фотонов) в определенном направлении на небе, необходимо наблюдение в течение почти половины суток! А все свечение хребта занимает на небе площадь более 300 кв. градусов. Что означает: таких наблюдений длительностью до полусуток необходимо провести не одну тысячу! Для построения хорошей карты обыч-

ными инструментами необходимо было бы потратить много лет наблюдений только хребта Галактики, что, конечно же, нереально. Разумеется, можно увеличить поле зрения инструмента, однако тогда в это поле может попасть очень яркий источник (например, аккрецирующая черная дыра или нейтронная звезда), на фоне которого излучение хребта будет совершенно незаметно.

Решением стало использование инструмента, имеющего умеренное поле зрения — 1 кв. градус, и самую большую из всех существующих инструментов рентгеновского диапазона собирающую площадь — 6500 см². Это спектрометр PCA обсерватории RXTE (NASA, находится на орбите с декабря 1995 г.). Обсерватория RXTE не имеет на борту собственно телескопов — инструментов, предназначенных для построения изображений. Инструменты обсерватории — спектрометры, т.е. детекторы, измеряющие поток с определенной площадки неба (их поле зрения ограничено трубой-коллиматором). После наведения на небесный объект они собирают рентгеновские лучи с этой площадки в течение длительного времени (обычно нескольких часов), а затем перенаводятся на следующий в своей наблюдательной программе объект. Однако ввиду того, что инструменты обсерватории RXTE имеют большую собирающую площадь, даже за те несколько сотен секунд, в которые обсерватория перенацеливает свои инструменты с одного объекта на следующий, им удается собрать много полезной информации — измерить рентгеновское излучение разных точек неба по пути между одним источником и другим. Настолько много, что с помощью таких «скользящих» наблюдений удалось построить самую лучшую на текущий момент карту всего неба в стандартных рентгеновских лучах, в том числе и карту хребта Галактики (рис.5).

Ввиду того что большое количество ярких источников все-таки сильно затрудняло работу с излучением собственно хребта Галактики даже по данным наблюдений обсерватории RXTE, было решено применить дополнительный «трюк». Трюк заключался в том, чтобы строить карту не всех рентгеновских лучей, зарегистрированных инструментом, а только эмиссионной линии высокоионизированного железа (на энергии ~ 6.7 кэВ), которая характерна для свечения именно хребта Галактики и практически отсутствует в излучении ярких рентгеновских источников. Результат превзошел все ожидания — яркие источники убились с карты очень эффективно. Первая попытка построить такую карту [6] была предпринята по данным наблюдений японского спутника GINGA (время работы на орбите 1987–1991 гг.). Однако самая лучшая карта была построена с помощью наблюдений обсерватории RXTE [7] (рис.6).

Детальные исследования хребта Галактики по картам обсерватории RXTE привели к удивительному выводу — рентгеновское излучение хребта оказалось ярче там, где ярче светят обычные звезды, и слабее ровно там, где они светят слабо. И так, обнаружено: рентгеновское излучение хребта каким-то образом связано с массой звезд, которые мы просматриваем в своих наблюдениях.

Если предположить, что свечение хребта связано с большим количеством слабых рентгеновских источников, каким-то образом распределенным среди звезд, то точно такие же источники должны иметься и в окрестности Солнца, потому как она представляет собой довольно типичную область Галактики (возможно, за исключением присутствия немного большего числа молодых звезд). А поскольку ожидается, что их должно быть достаточно много, значит, они должны быть и на небольших расстояниях от

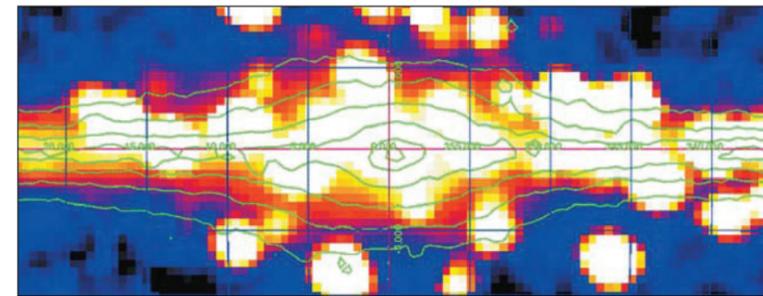


Рис.5. Карта неба в рентгеновском диапазоне, полученная с помощью данных RXTE, накопленных во время перенаведений обсерватории. Цвета указывают различную яркость объектов: темнее красного означают, что в этом месте отдельный рентгеновский источник не обнаружен. Крупные круглые пятна — яркие источники, преимущественно аккрецирующие нейтронные звезды и черные дыры. Их большой размер есть результат того, что карта имеет плохое угловое разрешение (у нее плохая «резкость»). Видно, что яркие источники сильно затрудняют получение карты собственно хребта Галактики. Зеленые контуры показывают яркость Галактики в инфракрасных лучах, т.е. фактически — распределение звезд в Галактике.

Солнца, т.е. в пределах досягаемости существующих обзоров неба. Результаты переписи звездного населения окрестностей Солнца, сделанного по результатам обзора всего неба обсерватории RXTE, подтвердили — суммарное излучение слабых рентгеновских источников во всей Галактике способно дать наблюдаемую картину хребта. Кроме того, предсказания на основе составленной переписи того, как должны выглядеть эти источники на существующих картах хребта Галактики, объяснили, почему их было так слож-

но обнаружить — не хватало чувствительности и углового разрешения приборов.

Чтобы напрямую разрешить излучение хребта Галактики на отдельные источники (показать, что излучение не размазано по небу, а сосредоточено в большом количестве отдельных точек-источников), необходимо было значительно увеличить чувствительность наблюдений и при этом иметь угловое разрешение не хуже 1–2 секунд дуги ($1/3600$ – $1/1800$ доли градуса). Эта задача могла быть решена только с помощью сверхдлинных

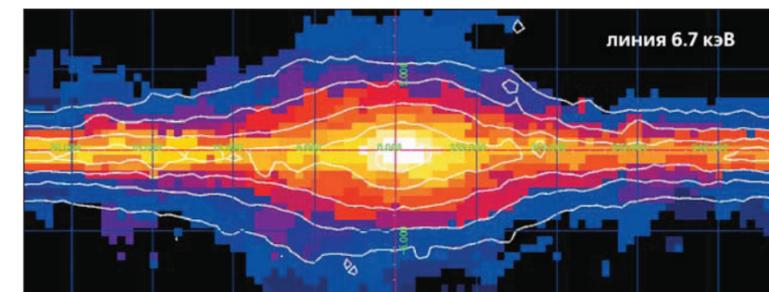


Рис.6. Карта хребта Галактики в излучении эмиссионной линии высокоионизированного железа (6.7 кэВ), очень характерной для свечения хребта, но отсутствующей в ярких рентгеновских источниках. Контурами показана яркость Галактики в инфракрасных лучах (фактически это распределение звезд). Видно хорошее соответствие между двумя наложенными картами.

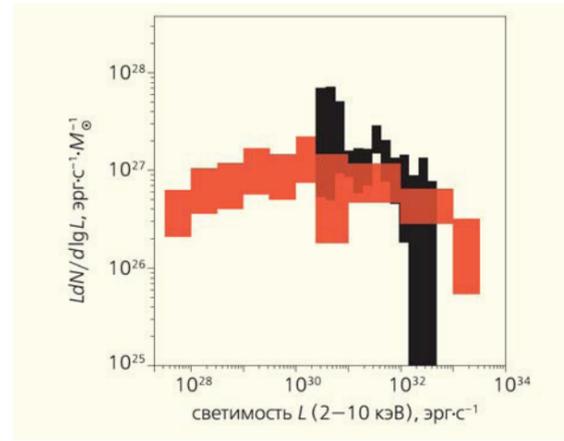
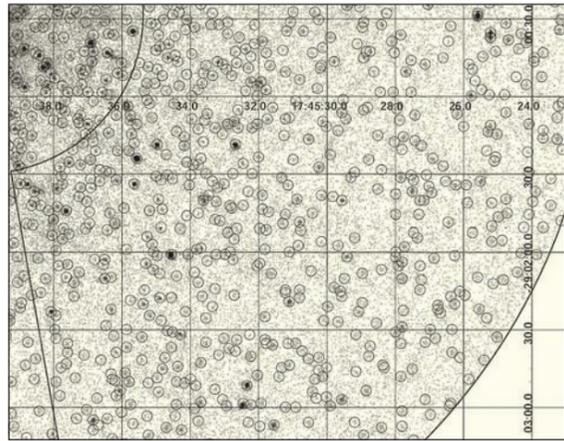


Рис.7. Рентгеновская карта области вблизи центра Галактики по результатам наблюдений обсерватории Chandra (слева). Кружками показаны обнаруженные на карте рентгеновские источники. Каждый источник скорее всего представляет собой двойную систему, в которой белый карлик перетягивает вещество со звезды-компаньона. Падая на поверхность белого карлика, это вещество нагревается до температур в десятки и сотни миллионов градусов и светит в рентгеновских лучах. Функция светимости рентгеновских звезд в Галактике (справа). Красным цветом показаны измерения, проведенные в окрестностях Солнца, серым — в области центра Галактики. N — число звезд в данном интервале светимостей.

наблюдений орбитальной обсерватории Chandra (NASA). Эта обсерватория в настоящее время имеет самое лучшее угловое разрешение среди всех существующих рентгеновских инструментов, а именно это свойство наиболее важно для решения загадки хребта Галактики.

Разрешение удалось!

Предварительные исследования области центра Галактики и галактической плоскости, проведенные с помощью уже существовавших наблюдений обсерватории Chandra, обнаружили очень хорошее согласие регист-

рации рентгеновского «населения» в окрестностях Солнца и в области центра Галактики, по меньшей мере в области светимостей, до которых «дотягивались» эти наблюдения (рис.7). Иначе говоря, наши оценки вклада слабых источников в свечение хребта Галактики, сделанные только по исследованиям окрестностей Солнца, верны. Таким образом, чтобы окончательно решить проблему свечения хребта Галактики, было необходимо лишь увеличить чувствительность наблюдений.

Для этого требовалось выбрать площадку на небе, в которой влияние межзвездного поглощения было бы минимальным. Проблема здесь состоит в том, что межзвездная среда в диске Галактики существенно препятствует прохождению рентгеновских лучей малых энергий, т.е. как раз там, где чувствительность обсерватории Chandra максимальна. Действительно, несмотря на довольно малую плотность межзвездного вещества в нашей Галактике (типичное значение плотности межзвездного вещества всего несколько частиц в кубическом

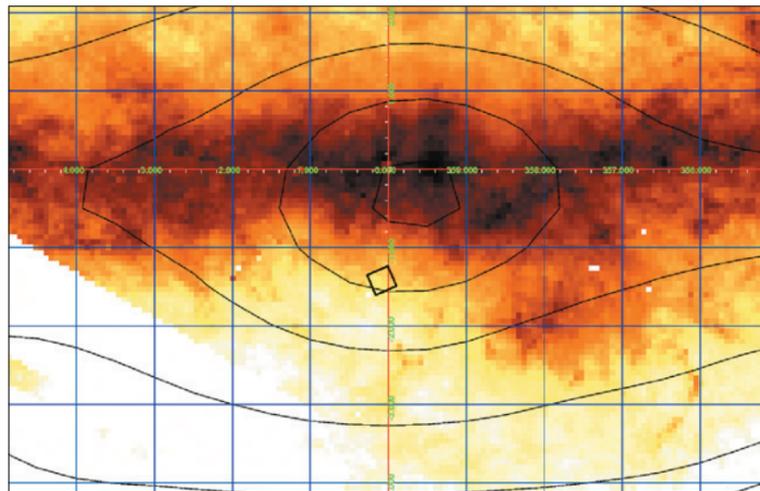


Рис.8. Карта межзвездного поглощения в центральной части Галактики [8]. Область неба, выбранная для глубоких наблюдений обсерватории Chandra, обозначена черным квадратом. Контурные линии показывают яркость Галактики в инфракрасных лучах, т.е. дают распределение звезд в этой части неба.

сантиметре), расстояния в Галактике настолько велики — десятки тысяч световых лет, или 10^{22} см, — что на луче зрения накапливается большое число частиц, которые поглощают рентгеновское излучение. Фактически смотреть сквозь Галактику — это смотреть сквозь свинцовую пластину толщиной в несколько миллиметров! Поэтому, чтобы избежать существенных потерь в чувствительности наблюдений, была выбрана самая близкая к галактическому центру область с окном поглощения (рис.8).

Такие наблюдения общей длительностью около 12 дней (!) были проведены в 2008 г. (рис.9), с их помощью удалось, что называется, «забить последний гвоздь в гроб» загадки происхождения хребта Галактики. Чтобы подчеркнуть уникальность наблюдений, достаточно, наверное, сказать, что самые слабые обнаруженные рентгеновские источники дали за все время наблюдений лишь несколько фотонов — имели поток менее 10^{-17} эрг/с/см², что чуть больше, чем поток у поверхности Земли от 200-ваттной лампочки, расположенной на Венере!

Благодаря данным, полученным в этих наблюдениях, удалось показать, что более 88% излучения хребта разрешается на вклад отдельных рентгеновских источников [9]. Согласно оценкам, основная часть этих источников должна быть либо аккрецирующими белыми карликами, либо звездами с активными коронами. Оставшаяся малая доля

Литература

1. Worrall D.M., Marshall F.E., Boldt E.A., Swank J.H. // *Astrophysical Journal*. 1982. V.255. P.111—121.
2. Warwick R.S., Turner M.J.L., Watson M.G., Willingale R. // *Nature*. 1985. V.317. P.218—221.
3. Koyama K., Makishima K., Tanaka Y., Tsunemi H. // *Publications of Astronomical Society of Japan*. 1986. V.38. P.121—131.
4. Revnivtsev M., Sazonov S., Gilfanov M. et al. // *Astronomy & Astrophysics*. 2006. V.452. P.169—178.
5. Sazonov S., Revnivtsev M., Gilfanov M. // *Astronomy & Astrophysics*. 2006. V.450. P.117—128.
6. Yamauchi S., Koyama K. // *Astrophysical Journal*. 1993. V.404. P.620—624.
7. Revnivtsev M., Molokov S., Sazonov S. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2006. V.373. P.L11—L15.
8. Dutra C.M., Santiago B.X., Bica E.L.D., Barbay B. // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. 2003. V.338. P.253—262.
9. Revnivtsev M., Sazonov S., Churazov E. // *Nature*. 2009. V.458. P.1142—1144.



Рис.9. Область неба вблизи центра Галактики по данным наблюдений телескопа Spitzer (NASA) в инфракрасном диапазоне. Кружком показана область, наблюдавшаяся обсерваторией Chandra в течение 12 дней. На врезке показано изображение этой области в рентгеновских лучах.

излучения хребта может быть результатом сложения излучения еще более слабых объектов, не обнаруженных даже в этих сверхглубоких наблюдениях.

Таким образом, проблема неизвестного резервуара энергии Галактики, возникшая практически на заре эры рентгеновской астрономии, решена. Показано, что рентгеновское свечение хребта Галактики есть суммарное излучение огромного числа слабых рентгеновских источников, среди которых чувствительный вклад дают даже настолько рентгеновски слабые объекты, как наше Солнце. Пол-

ное число источников, которые заметно участвуют в свечении хребта во всей Галактике, более миллиарда!

Исследования, аналогичные описанным выше, явно показывают, насколько важно знать демографию различных объектов во Вселенной. Огромным шагом вперед в этом направлении должен стать рентгеновский обзор всего неба астрофизической орбитальной обсерваторией «Спектр-РГ», которая в настоящее время разрабатывается Россией совместно с Германией и запланирована к запуску в 2012 г. ■



На рабочем месте
в ИКИ РАН, 1997 год



С Сергеем Сазоновым
(стоит) и Сергеем
Трудолобовым, 1997 год

“Интеграл” проводит перепись “населения” Галактики

М. Г. РЕВНИВЦЕВ,
доктор физико-математических наук,
лауреат премии Президента РФ в области науки
и инноваций для молодых ученых
ИКИ РАН

Основное “население” нашей Галактики – звезды различных классов, включая “умершие” звезды (белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры). Общее число “умерших” звезд в нашей Галактике невелико, но интерес к нейтронным звездам и черным дырам огромен. Основные причины такого интереса – их уникальные свойства. Эти объекты представляют собой природные лаборатории для изучения поведения вещества в условиях сверхвысоких температур (десятки и сотни миллионов градусов), давлений, плотностей (до ядерных в центрах нейтронных звезд, то есть до миллиарда тонн в кубическом сантиметре вещества), магнитных и гравитационных полей. Подобное невозможно создать в земных лабораториях, следовательно астрофизические компактные объекты – единственное доступное нам в настоящий момент окно

2* © Ревнивцев М.Г.

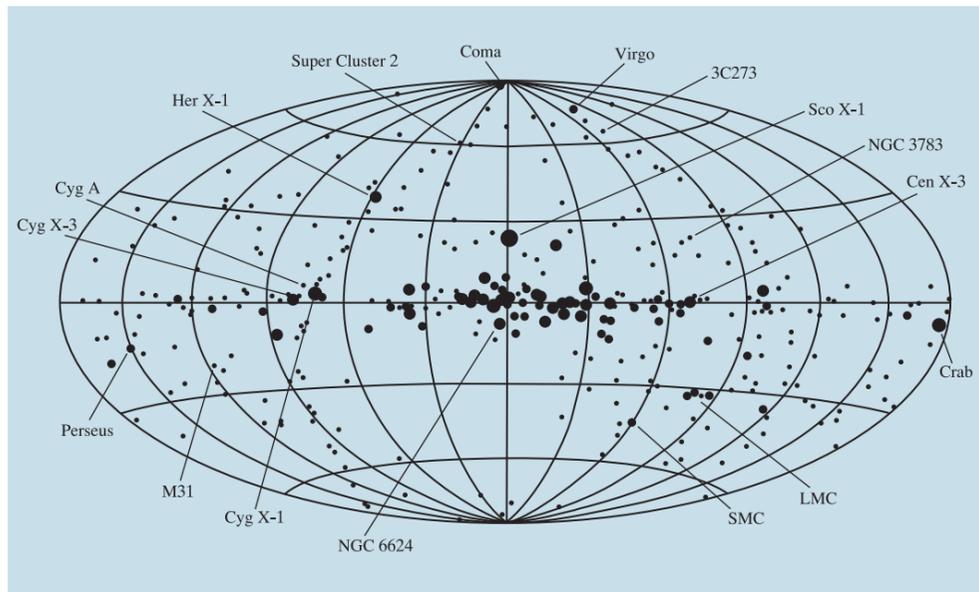


новских лучах Млечный Путь не светлая полоса на небе, а лишь около сотни ярчайших “точек”. Каждая из них – это, как правило, двойная звезда, один из компонентов которой представляет собой компактный объект (нейтронная звезда или черная дыра). Компактный объект может либо перетянуть вещество с поверхности обычной звезды, если она малой массы, либо захватить вещество, истекающее с поверхности звезды в виде звездного ветра, если это молодая массивная звезда. При падении (аккреции) захваченного вещества на поверхность компактного объекта или под горизонт событий черной дыры выделяется огромная энергия – в сотни раз больше, чем выделилось бы при сгорании этого же вещества в термоядерных реакциях. Падающее вещество нагревается до температуры в десятки и сотни миллионов граду-

в экстремальный мир.

Поиск таких “лабораторий” в нашей Галактике очень не прост. Фактически в нашей Галактике “ярких лабораторий” не более сотни. Поэтому важно не пропустить ни одного кандидата. Пожалуй, самый эффективный способ поиска компактных релятивистских звезд – наблюдать Галактику в рентгеновских лучах.

Небо в рентгеновских лучах разительно отличается от неба в оптических лучах. В рентге-



сов и начинает светиться в рентгеновских лучах. Благодаря этому компактные объекты могут быть легко обнаружены в тесных двойных системах при рентгеновских наблюдениях.

Первые систематические обзоры неба в рентгеновских лучах проведены более 35 лет назад американской космической обсерваторией "Ухуру" ("Uhuru"; 1970–1973). Уже тогда было обнаружено много ярких рентгеновских источников, подавляющее большинство которых оказалось двойными системами с компактными объектами. Нейтронные звезды, открытые с помощью "Ухуру" и других космических обсерваторий и научных ИСЗ, привлекали и продолжают привлекать пристальное внимание астрофизиков всего мира.

С появлением первых обзоров неба в рентге-

новских лучах интерес к ним не угас, а, наоборот, возрос. За последние 10 лет практически все космические обсерватории значительное время своей работы посвятили обзорам нашей Галактики или обзорам внегалактических областей.

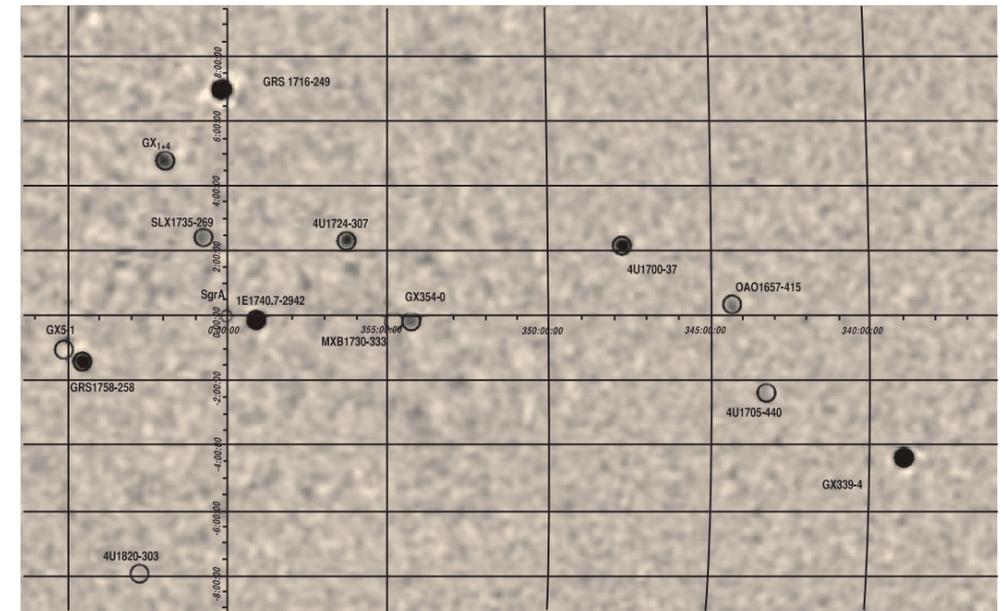
Один из самых глубоких обзоров всего неба в рентгеновских лучах проведен космической обсерваторией "Интеграл". Это совместный проект Европейского и Российского космических агентств. "Интеграл" успешно работает на орбите с 2003 г.

СМОТРЕТЬ СКВОЗЬ СТЕНЫ

Солнечная система располагается в диске Галактики, а потому излучение, идущее к нам из области галактического центра или из других областей диска, вынуждено проникать по дороге через

Карта рентгеновского неба по результатам наблюдений первой космической рентгеновской обсерватории "Ухуру". Отмечены наиболее известные рентгеновские источники. Рисунок NASA.

довольно большую толщину вещества (с плотностью, проинтегрированной по лучу зрения около g/cm^2). Фактически это эквивалентно тому, что рентгеновские лучи прошли через лист свинца толщиной несколько миллиметров. В результате значительная доля мягкого рентгеновского излучения галактических объектов до нас не доходит, поглощаясь в межзвездной среде. Поэтому уже давно стало ясно, что, если нужно проводить максимально тщательный обзор области плоскости Галактики, необходимо использовать лучи как можно больших энергий. Известно, что



Область центра Галактики в диапазоне энергий 40–100 кэВ, по результатам наблюдений телескопа СИГМА космической обсерватории "Гранат". Черными кружками обозначены обнаруженные источники рентгеновского излучения – преимущественно аккрецирующие нейтронные звезды и черные дыры. Рисунок ИКИ РАН.

с увеличением энергии фотонов их проникающая способность сильно увеличивается, в частности фотоны энергий выше 10–15 кэВ беспрепятственно проходят сквозь всю Галактику. Однако долгое время такие обзоры Галактики были лишь мечтой астрофизиков. Основная проблема при работе с рентгеновскими фотонами высоких энергий – их большая проникающая способность. Такие фотоны очень трудно сфокусировать, а значит,

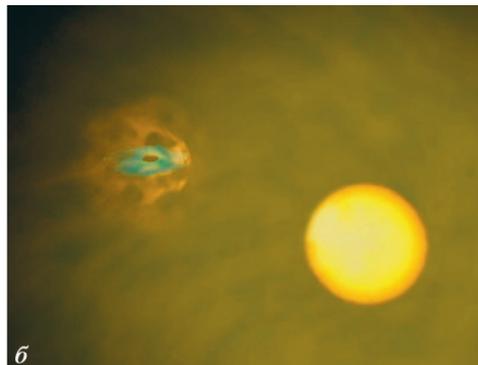
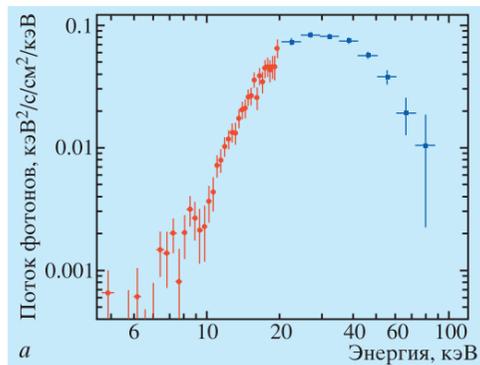
невозможно получить качественное изображение.

Первые грубые изображения нашей Галактики (да и всего неба) в жестких рентгеновских лучах получены с помощью коллиматоров, то есть инструментов, поле зрения которых ограничено коллиматором-трубой, как, например, на американской космической обсерватории "HEAO-1" (1977–1979). К сожалению, чувствительность и угловое разрешение таких приборов сильно ограничены.

Следующим большим шагом на пути к получению высококачественной карты неба в жестких рентгеновских лучах стал французский телескоп СИГМА, установленный на борту советской космической обсерватории "Гранат" (1989–1998). В телескопе СИГМА для построения изображения использовался метод кодирующей апертуры, который рабо-

тал по следующему принципу. Над детектором рентгеновских лучей находилась толстая пластина из поглощающего вещества ("кодирующая маска"), в которой прорезано много отверстий. Рентгеновское излучение проходит только через эти отверстия, и на поверхности детектора возникает картина ярких пятен, расположение которых зависит от положения источника излучения на небе. Другими словами, кодирующая маска отбрасывает "тень" на детектор, а компьютерный анализ "тени" позволяет восстановить изображение неба. За восемь лет работы на орбите телескоп СИГМА получил уникальные результаты, в том числе карту плоскости нашей Галактики в жестких рентгеновских лучах.

Логическим развитием инструментов обсерватории "Гранат" стал комплекс



аппаратуры, установленной на обсерватории "Интеграл". Все основные приборы этой обсерватории работают по принципу кодирующей апертуры. Чувствительность ее инструментов, благодаря значительному большому размерам и улучшенным приемным детекторам, выросла практически на порядок относительно возможностей телескопа СИГМА.

"УКРЫТЫЕ ВЕТРОМ" НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ

Одно из интереснейших открытий, сделанных обсерваторией "Интеграл", – обнаружение нового класса "поглощенных" источников. Первым источником стал IGR J16318-4848 (в названии источника отражено, что он был открыт обсерваторией "Интеграл" – IGR, и указаны его небесные координаты), разительно отличающийся от открытых, например, обсерваторией "Ухуру". В жестких рентгеновских лучах он был очень ярким, а с уменьшением энергии фотонов становился все более тусклым и фактически пропал на энергиях ниже 4–5 кэВ, то есть в диапазоне, где работают

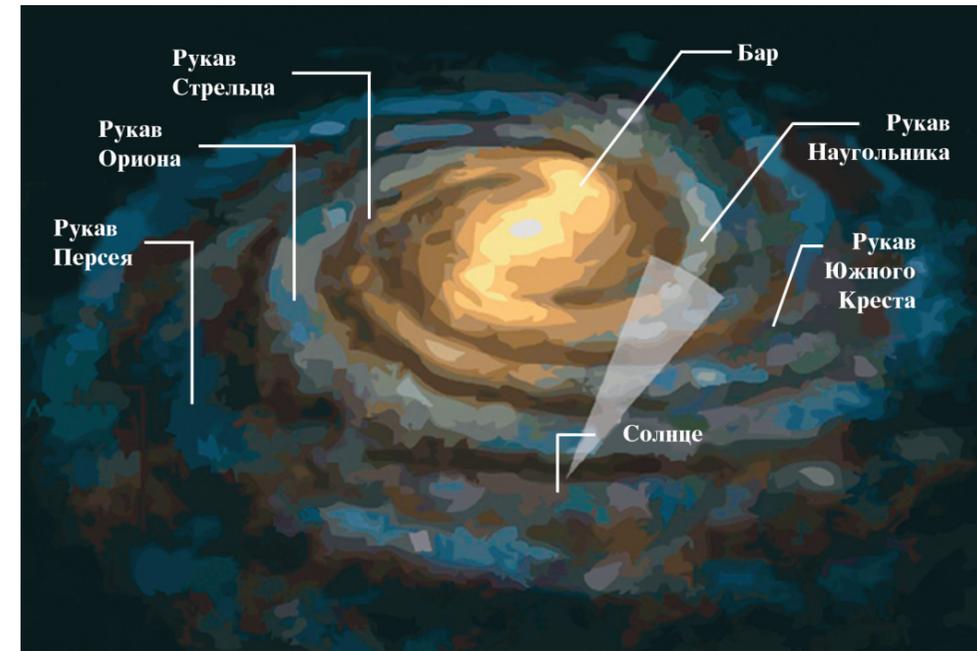
практически все рентгеновские телескопы. Исследования этого источника с помощью космических и наземных инструментов позволили установить, что причиной такого необычного поведения является мощный звездный ветер звезды-компаньона. Очень плотный звездный ветер не только "питает" нейтронную звезду, давая топливо для ее мощнейшего энергетического реактора, но и скрывает ее от наблюдателя, поглощая излучение мягкого и стандартного рентгеновского диапазона (энергии менее 7–10 кэВ).

Влияние звездного ветра не ограничивается поглощением рентгеновского излучения нейтронной звезды. Холодное вещество ветра настолько плотно "обволакивает" двойную систему, что почти полностью поглощает и оптическое излучение звезды-компаньона. Оказалось, что только инфракрасные лучи могут покидать эту двойную систему почти беспрепятственно. Именно в этих лучах были проведены исследования, позволившие пролить свет на природу загадочного объекта. К сожалению, в нашей стране пока нет

Источники рентгеновского излучения IGR J16318-4848, прототип класса "поглощенных" источников, в большом количестве обнаруженных космической обсерваторией "Интеграл": а) его спектр (распределение фотонов по энергии; красными точками обозначен поток, зарегистрированный космической обсерваторией "RXTE", синими – "Интегралом"). Видно, что яркость источника сильно падает с уменьшением энергии фотонов. Обработка ИКИ РАН; б) так, возможно, выглядит эта двойная система, в которой мощный звездный ветер обычной звезды "укрывает" аккрецирующую нейтронную звезду. Рисунок ESA.

высококачественных астрономических инструментов для работы в данном участке спектра.

Мощный звездный ветер, который может скрыть мягкие рентгеновские лучи источника, возникает обычно лишь у молодых массивных звезд. Ввиду небольшого возраста они, как правило, не могут улететь далеко от места, где образовались, а такие области в нашей Галактике расположены преимущественно в спиральных рукавах. Следовательно, спиральные рукава должны быть "излюбленным" местом обитания "поглощенных" ис-



Спиральные рукава нашей Галактики. Белый сектор выделяет направление в область созвездия Наугольника, в котором космическая обсерватория "Интеграл" открыла большое число "поглощенных" источников. Рисунок ИКИ РАН.

точников. Дальнейшие наблюдения с помощью обсерватории "Интеграл" полностью подтвердили эти ожидания: в областях спиральных рукавов было открыто более десятка новых "поглощенных" источников рентгеновского излучения, компактных источников, "погребенных" под ветром молодых звезд.

ГРАВИТАЦИОННЫЕ "МАЯКИ" ГАЛАКТИКИ?

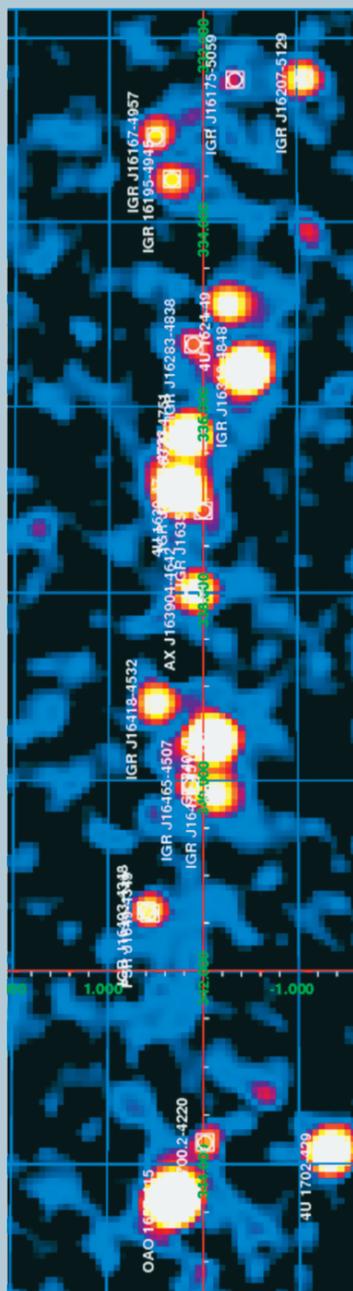
Основное количество ярких (в рентгеновских лучах) нейтронных звезд

находится в двойных системах с маломассивными звездами. В таких системах вещество обычной звезды постепенно перетекает на компактную, поставляя "топливо", необходимое для ее рентгеновского свечения. Перетекание происходит в результате того, что звезда переполняет свою полость Роша – геометрическую область, в которой притяжение звезды преобладает над притяжением компактного объекта и центробежными силами во вращающейся двойной системе, то есть фактически "вытекает" из своих "границ", переливаясь в область преобладания гравитации компактного объекта.

С самого начала исследования аккрецирующих объектов в двойных системах было ясно, что такой процесс (с учетом только долговременной эволюции самой звезды) не может

обеспечивать перетекание вещества сколько-нибудь долгое время. Как только какое-то заметное количество вещества перетечет с маломассивной звезды на более массивную (компактную), параметры двойной системы изменятся. Полость Роша обычной звезды слегка увеличится, и перетекание остановится, пока эволюция звезды не приведет к "распуханию" звезды до нового размера полости Роша (то есть через десятки и сотни миллионов лет).

Для того чтобы перетекание продолжалось долгое время (возраст маломассивных двойных систем составляет миллиарды лет) и с необходимым темпом, каким-то образом надо обеспечить торможение вращения двойной системы. Это, в свою очередь, приведет к постепенному сжиманию полости Роша



Карта части плоскости Галактики в направлении созвездия Наугольника. В этой области находится большинство ярких источников рентгеновского излучения в массивных двойных системах. ИКИ РАН.

обычной звезды, что будет эквивалентно “выдавливанию” вещества звезды в сторону компактного объекта. В 1970-х гг. был предложен механизм торможения двойной системы за счет магнитного звездного ветра оптической звезды. Согласно этому механизму, оптическая звезда, теряя вещество в виде звездного ветра, тормозится о него (о вещество ветра) за счет взаимодействия через магнитное поле, а затем торможение вращения оптической звезды передается всей двойной системе приливными силами.

Пожалуй, самый интригующий механизм торможения двойной системы – излучение гравитационных волн. Расчеты показали, что в достаточно тесных двойных системах – системах, орбитальный период которых не превышает 2–3 ч (их размер близок к радиусу орбиты Луны), – гравитационные волны должны играть основную роль в необходимом торможении двойной системы.

Обнаружить гравитационное излучение таких двойных систем в настоящее время еще не представляется возможным, хотя попытки и предпринимаются, например эксперимент LISA (Laser Interferometer Space Antenna – лазерная интерферометрическая космическая антенна, проект NASA). Но можно попытаться обнаружить влияние гравитационного излучения на долговременную эволюцию всей популяции рентгеновских двойных систем с маломассивными компаньонами. Например, можно систематически исследовать системы с ма-

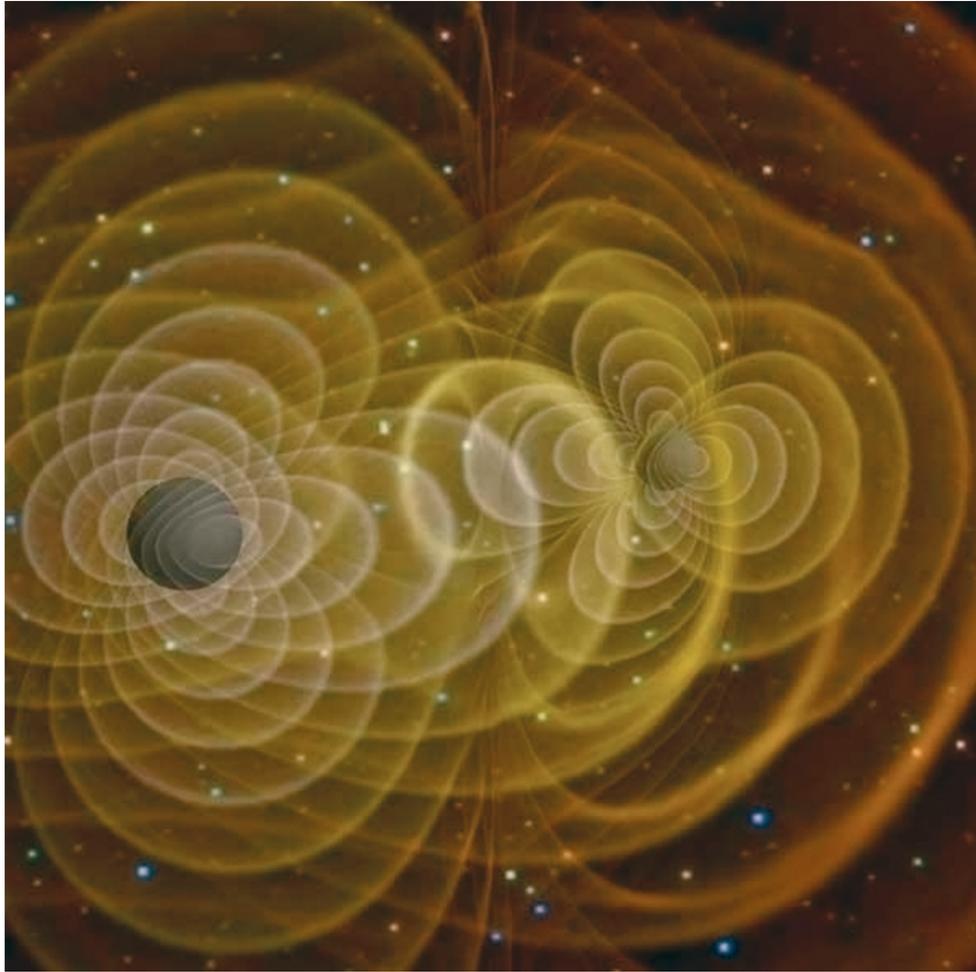
лой рентгеновской светимостью (с малым темпом перетекания вещества с оптической звезды на компактную) и показать, что такие системы являются достаточно тесными, чтобы эффективно тормозиться за счет излучения гравитационных волн. Это задача не из легких, ведь нужно не только обнаружить такие слабые рентгеновские источники, но и измерить параметры их орбит. Обычно орбитальные параметры двойных систем измеряют в оптическом диапазоне с помощью различных наземных телескопов. А для двойных систем малых размеров эти наблюдения представляют очень большую сложность. Оптическое излучение маломассивных двойных систем рождается преимущественно в результате переработки рентгеновского и ультрафиолетового излучений компактного объекта в холодных областях аккреционного диска. Следовательно, если размер двойной системы мал (именно за такими двойными системами мы и хотим охотиться), то и их оптическое излучение будет чрезвычайно слабо и такой объект очень легко “потерять” на фоне огромного количества звезд, которые мы наблюдаем в направлении галактического центра и галактической плоскости.

Тем не менее значительный прогресс в этом направлении есть. Для первичного поиска рентгеновских объектов – кандидатов в тесные двойные системы – был использован обзор центральной части Галактики (балджа), проведенный

с помощью обсерватории “Интеграл”. Этот обзор в настоящее время является самым чувствительным обзором такой большой части Галактики и практически идеально подходит для наших целей. Единственный существенный его “минус” – недостаточная точность определения положения обнаруженных источников. Но это плата за большое поле зрения основных приборов обсерватории “Интеграл”. Для исправления данного недостатка были подключены “собратья” обсерватории “Интеграл” – космические рентгеновские обсерватории “Чандра”, “Свифт”, “ХММ-Ньютон”, которые снабжены фокусирующей оптикой. С их помощью в 2009 г. положения открытых систем рождаются источников будут уточнены вплоть до 1–0.5 секунды дуги (примерно две десятитысячные доли градуса), что позволит в дальнейшем провести глубокие оптические наблюдения соответствующих областей неба. Есть все основания полагать, что эти гравитационные “маяки” Галактики будут обнаружены.

НЕБОЛЬШИЕ “КОСТОЧКИ” ГАЛАКТИЧЕСКОГО “ХРЕБТА”

Белые карлики (начальная масса звезд при “рождении” менее $8 M_{\odot}$) – наиболее многочисленная группа среди “умерших” звезд, их в Галактике может быть не один миллиард. Если белый карлик находится в тесной двойной системе с обычной звездой, он, как и нейтронные звезды и черные дыры, может пере-



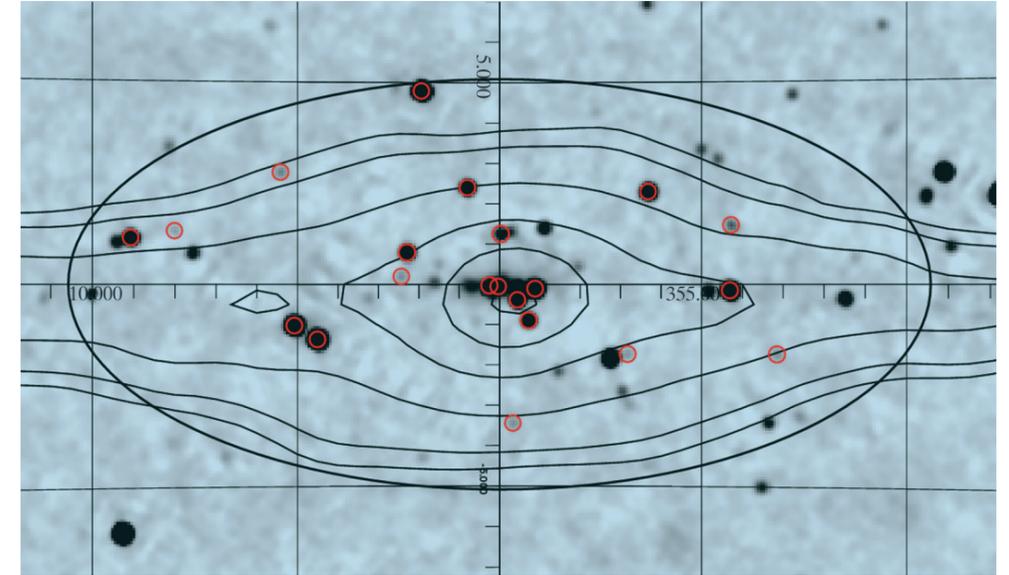
тягивать на себя вещество обычной звезды и превращаться в источник рентгеновского излучения. Число таких “рентгеновски ярких” белых карликов – предмет длительных оживленных дебатов среди астрономов. Если число таких систем велико, то суммарно они должны создать достаточно мощное свечение, которое для нас как для наблюдателей, располагающихся в диске Галактики достаточно далеко от ее центра, будет формировать поло-

су, проходящую через половину неба. Такая полоса рентгеновского свечения в Галактике действительно была обнаружена – это “хребет” Галактики, однако до недавнего времени астрономы не понимали, чем вызвано это свечение (Земля и Вселенная, 2007, № 6). Например, широко обсуждалось, не может ли излучение “хребта” Галактики быть результатом взаимодействия частиц космических лучей малых энергий с межзвездной

Гравитационные волны, излучаемые в тесной двойной системе. Рисунок Хензе, NASA.

средой. В значительной степени это было связано с тем, что оценить число “рентгеновски ярких” белых карликов достаточно сложно.

Один из широко распространенных способов расчета численности такого “населения” Галактики – метод популяционного



Область центра Галактики (балдж Галактики обозначен овалом), по результатам наблюдений обсерватории “Интеграл”. Чем больше рентгеновский поток из какой-то области неба, тем темнее цвет на карте. Контуры показывают области одинаковой яркости Галактики в инфракрасных лучах. Красными кружками обозначены системы, предположительно состоящие из компактного объекта и звезды-компаньона малой массы. Слабейшие из них – потенциальные гравитационные “маяки” Галактики. ИКИ РАН.

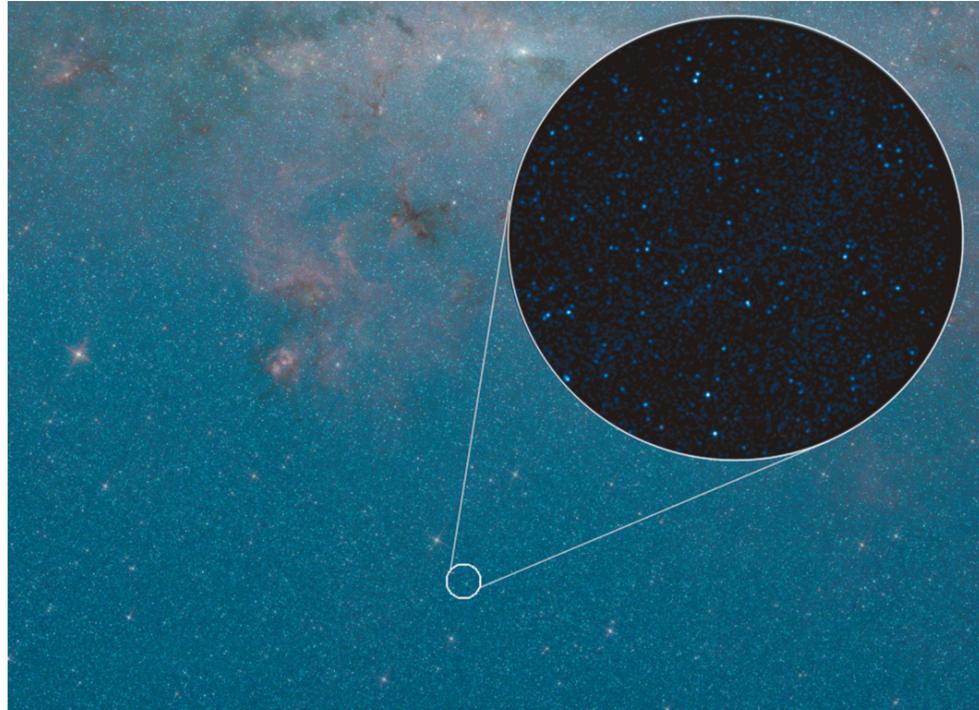
синтеза, который рассматривает эволюцию популяций двойных систем во времени (начиная с их зарождения) и в рамках своих модельных предположений может предсказать, какое количество каких двойных систем с какими свойствами мы должны наблюдать. Различные группы специалистов во всем мире, применяющие данный метод, часто получают различные оценки. Основной проблемой здесь является то, что параметры модели эволюции двойных систем известны в настоящее время плохо, поэтому их вариации приводят к существенно разным ответам.

Как известно, практика – критерий истины, единственный способ проверки правильности мо-

дельных расчетов – измерение свойств популяции аккрецирующих белых карликов в Галактике. Для этой цели необходимы чувствительные обзоры всего неба. Ожидаемая светимость слабых рентгеновских источников – всего $10^{30} - 10^{34}$ эрг/с, то есть в тысячи раз меньше полной светимости нашего Солнца. С помощью современных рентгеновских обсерваторий такие источники можно обнаружить на расстояниях не более нескольких сотен парсек. Сфера такого радиуса почти полностью помещается внутри диска Галактики, следовательно объекты, лежащие внутри такой области, будут разбросаны для нас по всему небу. Кроме того, нужно не только получить чувстви-

тельный обзор всего неба, необходимо также провести классификацию всех обнаруженных объектов.

Обзор неба, выполненный с помощью обсерватории “Интеграл”, идеально подходит для этой цели. Мало того, что он покрывает все небо с хорошей чувствительностью и не подвержен влиянию межзвездного поглощения, его жесткий рентгеновский диапазон (энергии фотонов 20–100 кэВ) является очень хорошим фильтром для выделения именно аккрецирующих систем. Огромное число звезд, у которых есть заметная корональная активность (как у нашего Солнца), излучает в мягком рентгеновском диапазоне (энергии фотонов менее 1–5 кэВ). Таких звезд много,



Область неба вблизи центра Галактики (вверху), по результатам наблюдений космической обсерватории "Спитцер" в ИК-спектре. На врезке показан фрагмент участка неба (обозначен маленьким кружком внизу), наблюдавшегося около двух недель в рентгеновских лучах космической обсерваторией "Чандра". Видно множество рентгеновских источников, составляющих излучение "хребта" Галактики. Фото NASA.

и не столь большое "население" аккрецирующих белых карликов просто потеряется среди них. А основная доля энергии аккрецирующих белых карликов приходится именно на стандартный (2–10 кэВ) или жесткий (20–100 кэВ) рентгеновский диапазон электромагнитного спектра, что и позволяет обсерватории "Интеграл" эффективно отфильтровывать их от остальных, менее "горячих" источников рентгеновского излучения.

По результатам обзора всего неба обсерватории

"Интеграл" были получены наиболее точные в настоящее время оценки популяции ярких в рентгеновском диапазоне белых карликов, определены их плотности и характеристики распределения по небу. Оказалось, что, действительно, их число достаточно для того, чтобы сложиться в "хребет" рентгеновского свечения галактического диска.

Дополнительным и уже, наверное, самым "неперебиваемым" аргументом в пользу того, что рентгеновский "хребет" Галактики складывается из излу-

чения большого числа отдельных источников, в том числе и аккрецирующих белых карликов, явились исследования, проведенные недавно с помощью уникальных длительных наблюдений области галактической плоскости космической обсерватории "Чандра" (Земля и Вселенная, 2007, № 4). Посвятив в общей сложности около двух недель (!) наблюдениям определенной области Галактики, обсерватория "Чандра" напрямую смогла увидеть те источники, из которых состоит излучение галактического "хребта".



ВОСПОМИНАНИЯ
О МИХАИЛЕ
РЕВНИВЦЕВЕ

Тяжело писать в Книгу Воспоминаний о человеке, который был намного моложе тебя и которого ты хорошо знал, работал с ним вместе, и уважал за исключительную преданность науке, удивительно высокую работоспособность и преданность своему делу, за способность непрерывно учиться; который был одним из самых ярких и способных молодых учёных среди окружающей тебя группы единомышленников, где каждый был отнюдь не слаб в своём деле.

Михаил Геннадьевич Ревнивцев пришёл в наш отдел студентом Физтеха (МФТИ). Его научным руководителем в студенческие и аспирантские годы был Марат Гильфанов — тогда молодой кандидат наук, затем доктор, а сейчас член-корреспондент Российской академии наук. Как и большинство студентов и аспирантов нашего отдела астрофизики высоких энергий ИКИ в то время, Миша жил в общежитии Физтеха не так далеко от здания ИКИ, и работал в Институте долгими вечерами. Физтех дал Мише отличные знания физики и математики. Было интересно наблюдать, как быстро Миша становился астрофизиком и овладевал чисто астрономическими познаниями (необходимыми для учёного, работающего с данными орбитальных рентгеновских обсерваторий) и вникал в непростую физику работы рентгеновских телескопов косого падения, рентгеновских газовых и твёрдотельных детекторов, и в частности, приборов с зарядовой связью (ПЗС). Одновременно он глубоко вникал в теорию аккреции и космологию. Астрономия — это не только красивое небо и названия ярких звёзд, туманностей и галактик, данные сотни и даже тысячи лет назад.

Заметную роль в его творческом росте сыграли и семь лет работы постдоком в Институте астрофизики общества имени Макса Планка в Гархинге, Германия, интересные семинары в МПА и экспериментальном Институте веземной физики МПЕ, где создавались многие уникальные приборы для рентгеновских и инфракрасных орбитальных телескопов. Не говорю уже о еженедельных обзорных колоквиумах в соседней штаб-квартире Европейской южной обсерватории — одной из ведущих наземных обсерваторий мира, с четырьмя знаменитыми восьмиметровыми оптическими телескопами VLT и крупнейшим миллиметровым интерферометром АЛМА на 5-км высоте в Чили. Всё это расширяло кругозор Миши, и вело к появлению новых идей. Отмечу, что все эти годы Миша не прерывал тесной связи с родным отделом в ИКИ: инициировал совместные статьи и обсуждения, приезжал с интереснейшими докладами на все конференции отдела, регулярно инструктировал коллег и аспирантов по скайпу. Знаменательно, что на средства своего первого гранта в рамках Мюнхенского Excellence Cluster он закупил детектор для российско-турецкого телескопа в горах в 40 км от Анталы, позволяющий следить за быстрой (килогерцы!!!) переменностью излучения маломассивных рентгеновских двойных в оптических лучах. Этот детектор используется в исследованиях отдела до сих пор.

В 2006 году Миша блестяще защитил докторскую диссертацию на совете в ИКИ и вскоре стал заведовать лабораторией в родном отделе. Он был реальным «мотором» в любой совместной работе с коллегами.

Миша много и успешно работал с данными американского спутника Rossi X-Ray Time Explorer (RXTE), изучая переменность излучения аккрецирующих чёрных дыр и нейтронных звёзд. Но я был удивлён масштабом его интересов, глубиной основной идеи и готовностью взяться за громадный объём работы, когда Миша рассказал мне о своих дальнейших планах. Он тогда собрался проанализировать данные этого спутника, записанные во время его многих тысяч переориентаций с одного яркого объекта на другой с 1996 по 2006 год. Поразительно, но через несколько месяцев он показал нам результат: карту сканирования всего неба в рентгеновских лучах, полученную им по данным RXTE. На базе этой карты он получил замечательную карту свечения нашей Галактики в рентгеновских лучах и сравнил с картой её свечения в инфракрасных лучах, которое, как известно, определяется старыми звёздами. Распределение яркости в двух цветах менялось

пропорционально друг другу. Это однозначно доказывало, что яркость рентгеновского излучения хребта нашей Галактики определяется звёздной массой на луче зрения.

На базе тех же данных Миша сумел получить спектр рентгеновского фонового излучения вселенной. Это одно из лучших измерений спектра фона. Хочется напомнить о многих ярчайших идеях и наблюдательных результатах Миши, ссылки на которые идут непрерывно и сейчас. Заглянул в NASA ADS: сегодня на его работы сделано 5830 ссылок, индекс Хирша — 42. Это отличный результат для человека, который прожил лишь 42 года.

В 2016 году Миша был избран профессором РАН.

Помню, как легко шло выдвижение Миши на «Премии Президента Российской Федерации в области науки и инноваций для молодых учёных».

Все, с кем я разговаривал, понимали, что он достойнейший кандидат. Конечно, запомнилась торжественная церемония, счастливое лицо Ани, и экскурсия по палатам (старинным и парадным) Большого Кремлёвского Дворца, которую попросил организовать Миша (лауреат!!!) для своей семьи и коллег.

Миша очень любил свою семью: сыновей, Аню, родителей. Это было видно невооружённым глазом. И он был достойным сыном своей страны.

Рашид Сюняев,
академик Российской академии наук,
член Национальной академии наук Германии «Леопольдина»,
иностраный член Национальной академии наук США,
иностраный член Королевского Общества (Лондон)

УЧЕНИК, КОЛЛЕГА, ТОВАРИЩ.
ПАМЯТИ MIKEJ

В начале осени 1994 года в наш кабинет на пятом этаже Института космических исследований (который мы делили с таким же, как и я, молодым кандидатом наук Женей Чуразовым, ныне членом-корреспондентом РАН) пришли два студента четвёртого курса Физтеха — Миша Ревнивцев и Сергей Трудюлюбов. Они подошли к моему столу и сказали, что слышали об успехах советских и российских орбитальных рентгеновских обсерваторий «Рентген» (обсерватория «Рентген» на модуле «Квант» комплекса орбитальной космической станции «Мир») и «Гранат» (Международная астрофизическая обсерватория) и хотели бы заниматься астрофизикой высоких энергий. После короткого мини-экзамена я согласился руководить их дипломными работами и ни разу не пожалел об этом решении. Очень скоро стало очевидно, что мне крупно повезло — судьба свела меня с отнюдь неординарными студентами. Работы по анализу и интерпретации данных обсерватории «Гранат» в то время шли полным ходом, и я предложил Сергею и Мише задачи по исследованию Галактических транзиентных источников — кандидатов в чёрные дыры. Позднее к этим работам подключился и Женя Чуразов.

Через три года Миша блестяще защитил диплом — к этому времени он уже был соавтором нескольких научных работ по исследованию Галактических рентгеновских источников приборами обсерваторий «Рентген» и «Гранат». К тому моменту ни у кого не было сомнений в том, что мы имеем дело с талантливым и чрезвычайно работоспособным студентом, так что вопроса, что делать дальше, не было, и Миша поступил в аспирантуру ИКИ РАН, продолжая работать под моим научным руководством. Работал Миша с огромным азартом и энтузиазмом, поэтому кандидатская диссертация была готова уже через два года, в 1999 году, на год раньше обычного срока.

После защиты диссертации Миша несколько лет работал в Институте астрофизики Общества имени Макса Планка в Гаршинге недалеко от Мюнхена. Это были незабываемые годы поиска, открытий, новых идей и жарких дискуссий о механизмах формирования рентгеновского излучения вблизи аккрецирующих нейтринных звёзд и чёрных дыр, природе их короткомасштабной переменности, механизмах возникновения квазипериодических осцилляций излучения компактных объектов, природе рентгеновского излучения так называемого «хребта» Галактики и по многим другим проблемам современной астрофизики. В этих дискуссиях активно участвовали Е. М. Чуразов и Р. А. Сюняев, позднее к обсуждению функции светимости слабых Галактических источников и их вклада в неразрешённое излучение Галактики подключился С. Ю. Сазонов. В эти годы были написаны наиболее известные и широко цитируемые работы Миши, которые определили направления исследований на многие годы вперёд. Миша работал с необыкновенным азартом и настойчивостью. Вспоминаю начало 2005 года, когда он заинтересовался проблемой излучения «хребта» Галактики. Считалось, что это излучение имеет истинно диффузную природу, производится горячим ионизованным газом, однако у общепринятой модели был ряд серьёзных нестыковок. Миша буквально каждый день приходил в наши кабинеты в Институте астрофизики в Гаршинге обсудить данные наблюдений, поделиться новой идеей, проверить на нас очередную гипотезу. Так, в муках, родилась теория, ныне ставшая общепринятой, которая объяснила излучение «хребта» Галактики как совокупное излучение большого числа слабых компактных источников — аккрецирующих замагниченных белых карликов и активных двойных звёзд. За эту работу в 2008 году Миша был удостоен премии Президента Российской Федерации в области науки и инноваций для молодых учёных. Эти годы также запомнились частым дружеским общением в неформальной обстановке вне работы, с выездами на природу, празднованиями дней рождений взрослых и детей. Двери гостеприимного дома Миши и Ани были всегда открыты для друзей и коллег, а в доме царила необыкновенная атмосфера любви, согласия и взаимного уважения.

Преданность астрофизике, стремление работать и покорять новые высоты были подкреплены потрясающей работоспособностью Миши. В те времена, конец 1990-х – начало 2000-х годов, домашний интернет ещё был редкостью, да и скорость передачи данных была довольно низкой, поэтому вся работа происходила на рабочем месте, в Институте космических исследований РАН в Москве и в Институте астрофизики Общества имени Макса Планка в Гаршинге. В традициях сотрудников Отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН всегда было засиживаться в Институте допоздна, работать в выходные и праздники. Руководитель Отдела академик Рашид Алиевич Сюняев эти традиции подерживал, не уставая подкреплять их личным примером. С самых первых месяцев Миша гармонично вписался в наш молодой коллектив астрофизиков-теоретиков и специалистов по обработке рентгеновских данных, был готов работать практически круглосуточно, выпуская статью за статьёй. Однажды, в начале 2000-х Миша выступал с докладом на семинаре в Астрономическом институте имени Антона Паннекука в Амстердаме. Наш давний коллега, и в некотором смысле конкурент, профессор Амстердамского университета Михил ван дер Клис, представляя Мишу аудитории, пошутил, что он единственный человек в мире, которому удалось обойти его ученика Руди Вейнандса (ныне также профессор Амстердамского университета), известного своей производительностью, по числу статей, выпускаемых в год. В устах Михила, признанного авторитета в области исследования короткомасштабной переменности рентгеновских двойных, это было наивысшей похвалой «по Гамбургскому счёту», признанием профессионализма Миши и его вклада в мировую астрофизику.

С большой теплотой вспоминаю декабрь 2012 года, запоздалое празднование моего 50-летия в ИКИ РАН, поздравление молодых сотрудников отдела астрофизики высоких энергий, срежиссированное и организованное Мишей. К тому времени Миша был полностью сформировавшимся учёным с широким кругом научных интересов и с неповторимым, присущим только ему стилем работы. У него росли собственные ученики, и молодёжь считала за честь работать под его руководством. Тем более дорогим и запоминающимся стало для меня это поздравление.

Миша был одним из наиболее неординарных, талантливых и успешных студентов и аспирантов, с которыми мне посчастливилось работать, и я благодарен судьбе за тот осенний день 1994 года, когда он появился в моём кабинете. За более чем 20 лет совместной работы мы с ним написали и стали соавторами 65 статей в рецензируемых журналах и трудах международных конференций, многие из них с участием Р. А. Сюняева, Е. М. Чуразова, С. Ю. Сазонова, А. А. Лутовинова, С. В. Молькова и других сотрудников отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН. На эти статьи было сделано более 2300 ссылок в мировой научной литературе, индекс Хирша по нашим совместным публикациям составил 24 (по данным библиографической базы данных NASA ADS на апрель 2019 года). Это наиболее внушительный результат совместной работы с аспирантами и молодыми учёными, с которыми мне довелось сотрудничать. Полная научная библиография Миши ещё более впечатляет — более 300 публикаций, на которые было сделано более 5800 ссылок в мировой научной литературе, индекс Хирша — 42. К несчастью жизнь Миши оборвалась слишком рано, когда он был в самом расцвете творческих сил, и многим планам было не суждено сбыться, многие открытия не были сделаны.

Для своих компьютерных аккаунтов Миша использовал имя *mikej*. Многие годы я собирался спросить его, что оно означает, но так и не спросил... В памяти многих из нас он навсегда останется *mikej*.

Марат Гильфанов,
член-корреспондент РАН, профессор



The second edition of the Mike Revnivtsev Prize, INTEGRAL LOOKS AHEAD TO MULTI-MESSENGER ASTROPHYSICS, 11–15 February 2019, Geneva, Switzerland

REMEMBERING MIKE REVNIVTSEV

I met Mike for the first time at the 3rd INTEGRAL workshop organised by our institute in Taormina (Sicily, Italy) in 1998. He was a young Russian PhD student, apparently very talented and was formally invited by Angela Bazzano, on behalf of the conference SOC.

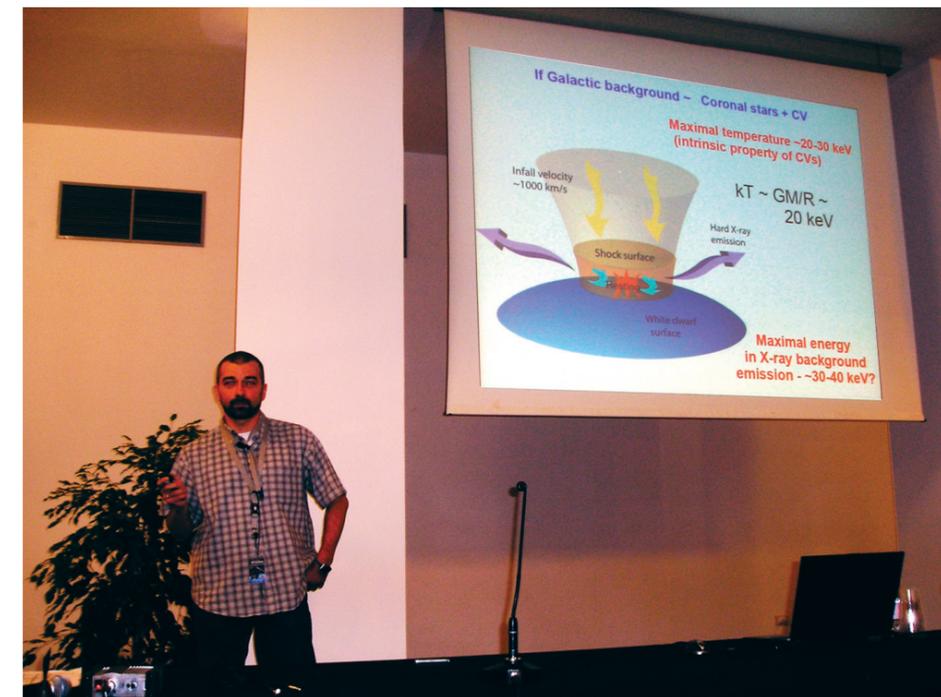
The aim of the meeting, held in a beautiful Sicilian sea-side location, was to have an update of the high energy astrophysics panorama and to better tune the ‘core’ science achievable with the INTEGRAL Observatory, at that time under construction in Europe, Russia and US: a real worldwide endeavour. Surprisingly enough, for a meeting organised years before the satellite launch, the attendance was much larger than expected (almost 300 people) and scientifically very successful. It was a “hot boiler” with a lot of outstanding results from a number of working satellites showing the potentiality of the newly born soft gamma-ray astronomy, with a view from lower (BeppoSAX, RXTE, ASCA etc) and higher (SIGMA-GRANAT, CGRO satellites) energies.

Mike was at the beginning of his formation as an astrophysicist and I am sure the conference was a great push for him to continue in the direction he was undertaking, in view of the harvest of scientific results presented from worldwide scientists.

The “Space Group” in Frascati already spent years collaborating with Prof. Rashid Sunyaev team in IKI and we were always stroke by the outstanding level of the PostDocs we met, and worked with, during the common work on the Spectrum X-Gamma instrumentation. Though Mike was quite different, surely impressive to me for several reasons: very energetic, also from a physical side, reserved, determined and he knew the “physics”. I mean not only astrophysics, but the “physics” in general... he obviously had good teachers at IKI!



Mike Revnivtsev talk: INTEGRAL contribution to the discovery of the nature of the Galactic ridge X-ray emission, 5th year INTEGRAL Workshop, Chia Laguna (Sardinia, Italy), 17 October 2007



INTEGRAL was launched in 2002 and we were all very busy to understand how the instruments were working, to tune the “Core Programme” and to tail our own scientific interests and main goals... among those there was a basic output expected from the Observatory that was the first all sky Survey in gamma-rays. For the Imager (IBIS) this work was led by the Survey Team and

we planned regular meetings. The first was held in Southampton (UK) and Mike was among the participants. It was struggling to see how he was “senior”, how much was changed from the first time we met in Taormina. He was already an outstanding scientist, ready to argue on all the scientific topics connected with the initial Survey work and scientific targets to achieve, and analysing how the Team and himself could benefit from the work to be done in the future few years lifetime planned: we all never would have thought the satellite could be operational for more than 16 years!.. and still going well.

The first edition of the Mike Revnivtsev Prize, Venice, Italy, 2017, 15 years INTEGRAL Symposium: Energetic Time Domain Astrophysics, 16–20 October 2017, Venice, Italy



Then we met again several times, in particular I have very good memories of him at the INTEGRAL Science Workshop organised in Sardinia — Chia Laguna, to celebrate the 5th anniversary of the launch in October 2007. He was a clear leader in Galactic high energy astrophysics, talking with scientists and postdocs and students from different countries...

Later on we had several scientific discussions and arguments, in particular how to tune the INTEGRAL observing program, at the many Integral User Group meeting held in ESA-ESTEC. Once I remember we strongly argued, in full disagreement, about the fate of the extragalactic observations to be done with the satellite... it was an invigorating discussion between a talented young scientist and an old PI... he was probably right!

I will never forget Mike, and was very pleased when, together with his IKI, ESA and IAPS colleagues, in particular Sasha, Erik and Angela, we decided to establish the “Mikhail G. Revnivtsev prize”, in his memory, to be awarded to a young scientist with excellent recent achievements in the field of X-ray and gamma-ray astronomy. The competition, open to individuals from all countries is announced at every INTEGRAL conference... it is a way to remember how much Mike has done for science and INTEGRAL in particular.

Pietro Ubertini,
Associate Director of Research at Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali
(IAPS, INAF — National Institute for Astrophysics, Italy)
13 March 2019



I have met many remarkable scientists in my INTEGRAL years, but Mike was different: he was able to look Science in the eye. He had a momentum I have never encountered in anyone else. With Mike gone, Science zoomed out.

We met a long time ago at the INTEGRAL Science Data Centre in Geneva. I had arrived from Italy two years before the launch, in 2000, freshly graduated and keen to absorb all I could from my international INTEGRAL adventure. Among the scientists from all over the world that I had the fortune to meet at the ISDC, were the scientists from Russia. I started chatting very quickly — and very loudly — with Sasha Lutovinov. Then Mike appeared. I saw a scientist, slightly younger than me, always focused and not prone to talking to strangers. If it hadn't been for Sasha and for X-ray binaries, it is highly unlikely that I would ever have spoken to Mike so extensively.

Time passed, INTEGRAL was launched and the first data started to come in. Science is a very powerful channel and, over time, our talks with Mike evolved and moved from science to society and politics. We often disagreed, but these differences only made it more fun and challenging — even in the small things, like when we bet whether he could open a bottle of wine with just a pen (he could, I lost); or when we decided to play a trick on his dad sending him a postcard from Milan where he had lived and worked before Mike was born. A message from the past with a touch of mystery.

Mike Revnivtsev, Diego Götz and Adamantia Paizis at the “Five years with INTEGRAL” Workshop, Sardinia, Italy, October 2007

Михаил Ревнивцев, Диего Гётц и Адамантия Паизис на конференции “Five years of INTEGRAL”, Сардиния, Италия, октябрь 2007 года

At the ISDC, I had the pleasure to meet Ann, Mike's wife, and their first, newborn child, Vlad. I remember him, so tiny, in his mother embrace in the garden of the ISDC, with Mike proudly introducing me to his beautiful family. They say that you realize how time passes when you see children grow up. This is very true and I felt it for the first time some months later, when Mike and Ann invited me to their home in Munich during an *INTEGRAL* conference. Vlad was crawling around the couch bumping into me every now and then and laughing, along with his mom and dad.

I have watched Vlad grow up in the photos Mike sent me or showed me at the not-to-be-missed *INTEGRAL* conferences. After Vlad, came the photos of Egor and then of Gleb. Over time, one picture after the other, I saw Mike's family grow, I saw past the scientist: the husband, the father. Proud. Happy. Worried.

In my musings of the days gone by, I also like to stop at Nordwijk where on a windy and rainy afternoon, Mike taught me and Diego Götz a very bad word in Russian. I remember it and smile, but I won't write it down. The more Sasha tried to convince us that we shouldn't say it, not even for fun, the more vociferously we repeated it, and the louder Mike laughed.

Sasha introduced me to Mike almost twenty years ago. He told me why Mike was missing at an *INTEGRAL* conference and allowed me to feel close to Mike and his family along their difficult path. He wrote to me when we lost him. Now he is asking me to write a few words for this book. It is a deep and painful honor. I never thought this would happen: I assumed Mike was an immortal warrior. If he could not make it, nobody could.

One day, after that terrible November, I was at work and I received an email from an address that looked like Mike's. My blood froze. I cautiously opened the message and it was from Ann. I am so grateful to her for reaching out to me, for our email exchanges and for the fact that she continues to keep Mike's tradition alive, sending me photos of their wonderful kids as they grow up.

Echoes of immortality.

Mike did so much in so little time. His strength, scientific voracity, results, impetus and competence will timelessly pulsate in the high-energy sky, and in the memory of those who have had the chance to meet him.

Mike, you are missed. You will be remembered.

Adamantia Paizis,
INAF, IASF Milano



First time I met Michail, Mike as we used to call him, was in Taormina where we were hosting the 3rd *INTEGRAL* Conference, “*The Extreme Universe*”, September 1998. He was on the way to get his PHD at IKI and was invited to attend with an ESA support grant. When I talked to him, I remember I immediately realized that I was in front of a very peculiar and bright young smiling man with deep-set eyes. He started his scientific activity working on data from the instruments on board the “*Mir-Kvant*” module and in short time became an expert in the X-Ray regime. Since then I met him time to time during conferences or meeting and looked at his continuous progress. Soon after the *INTEGRAL* launch at the end of 2002 I had many more chances to see him again as he was spending time at ISDC to become confident and support the *INTEGRAL* scientific data analysis. On December 2003 we met at the Southampton University during the first *IBIS* Survey team meeting and, in spite of the different roles and rules, we had the chance to chat and have fun especially during the dinner in front of good pints of beer. He was already expert and had clear idea on our *IBIS* instrument performances and giving positive and important inputs to the discussion. Then, we had different way to go on survey but always with infinite respect. He was publishing the first hard X-ray survey with the *SIGMA* instrument on 2004 when we were ready with the first *IBIS* Survey and he was even more active using all possible X- and Gamma ray operative facilities to explore the Universe.

Here is a picture from Taormina, 1998 and Mike is just in the middle of the first row

The most beautiful memory is from 2007, in the wonderful location of Chia Laguna, Sardinia during the celebration of the 5th year of *INTEGRAL* in-flight operations. After the workshop dinner we were all around the swimming pool drinking and talking: Mike had his midnight swim while talking with Ada Paizis and other colleagues met at ISDC: Mike facial expression was relaxed, smiling and happy. He gave me the feeling of a young strong and powerful man. I will never forget.

Afterwards we were together in the INTEGRAL User Group and of course he was contributing to all issues with criticism and strategic suggestions in particular for the INTEGRAL Extensions documents to be reviewed by ESA Advisory Structure first and for final decision by the Science Programme Committee. He demonstrated once again how competent he was on sciences as well as on instrumentation. During the last meeting he attended, unfortunately, I saw a change. He was somehow absent, silent, I would say sad. I was surprised and wondered why, after some months I understood. We lost a great man.

Angela Bazzano
CNR/INAF, Roma, Italy

MEMORIES OF MIKHAIL REVNIVTSEV

It was 2003, and Mike was working at a desk on the top floor of the “Castle” of the INTEGRAL Science Data Centre (ISDC) near Geneva. He was visiting and would return to his home institute after a few days. I was beginning a doctoral thesis, and X-ray astronomy was a strange, new world. The software was complicated. The data were obscure. After a brief introduction, he helped answer some questions about the process of stitching individual images together into a larger picture: a mosaic. He was unassuming but confident, helpful but direct. I did not yet know that I was sitting next to a rare scientific talent.

In 2006, the INTEGRAL Workshop was hosted by IKI in Moscow. This was my first visit to Russia, but also to an INTEGRAL conference. Moscow is an odd city in that it looks much better below the surface than above. The metro stations are sublime palaces while the streets are mostly treeless and dull. It was my first real chance to spend time with Mike. Born one day before me, Mike had already written oft-cited publications in multiple fields of X-ray astronomy while I was still writing my thesis. Even among the company of heavyweights like Rashid Sunyaev, Nikolai Shakura, and others, Mike was a scientific prodigy able to discuss any topic of astrophysics with an expertise that seemed beyond his years.

One evening, Mike took some of us for a tour of the Arbatskaya which is a charming village-like neighborhood of the city. The goal was to watch a World Cup semi-final match. Mike found a perfect place to watch the game while sharing the essentials of beer, vodka, food, and company. For those that care about such things, France beat Portugal that night to book a trip to the Final a few days later against Italy; a game that featured the infamous Zidane headbutt against a trash-talking Materazzi. After dinner, a young couple who was friends with Mike drove me to a metro station where I could catch a train that would take me near my hotel. I wonder if that couple remembers the guy with the thick American accent, in addition to his slurred speech, claiming Mike was a rising star in our field and served as an inspiration for young X-ray astronomers.

The next time I saw Mike was at the 2011 XMM-Newton Workshop in Berlin. By this time, Mike was an established figure in the X-ray community. I was a postdoc sitting by chance at a table outside the venue, listening to a discussion where Mike asked a general question to anyone within earshot. If you knew that Chandra was being shut down, and you were given all available exposure time for a year, which represents around 20–30 million seconds or a huge amount for a telescope that can confidently detect faint sources within 1000 seconds, what would you choose to observe, and why? There were many fine suggestions, and I offered mine. I cannot express what it meant to hear Mike agree with my proposal. A few months later, with his help and with other collaborators, we wrote a proposal for the Chandra X-ray Visionary Program and submitted it for peer review. It hurt when I learned that the proposal was rejected, but I will tell anyone who listens that Mike agreed with me on what the lasting legacy objective of Chandra should be. Given the respect I have for him, that makes me feel a sense of validation that is invaluable.

After the banquet of this meeting, Mike, Gabrielle Schönherr, Felix Fuerst, and I enjoyed rounds of vodka-limes at a bar on the Eastern side of where the Wall had split the city for two generations. Here, a pair of Germans, a Russian, and an Iranian-American all free of the burdens that history had placed on our parents and grandparents, could chat about politics, about INTEGRAL, and about science. Mike showed me a photo in which he received an award for scientific achievement given to him personally by the President of the Russian Federation, Dmitrii Medvedev. It might have been the only time I sensed an outward display of pride from him. Just as I had been validated by Mike, so too was Mike validated by his country.

The following year, we met again at the INTEGRAL Workshop in Paris. With Marion Cadolle Bel, Jerome Rodriguez, Erik Kuulkers, and others, we shared dinner in the back room of a restaurant devoted to food from the Reunion Islands. It was a beautiful evening. We shared stories

about our past meetings, and we talked about our ambitions and our fears. We ate extraordinary food from exotic places, and we drank intoxicating wine from local vineyards. I never expected that it would be the last time we would laugh together.

When I learned that Mike had passed away, I was heartbroken and in disbelief since it was so sudden, and since he was private with his struggle with illness. I will always feel tremendous grief for the loss of a friend. Admittedly, mine is a selfish reaction compared with the deeper loss experienced by a family member, or what it means when an irreplaceable member of our community is silenced forever.

In his absence, I take some comfort in the knowledge that fate or chance allowed our paths to intersect multiple times, and that I was able to know him as a fellow scientist and as a friend. Mike challenged me by constantly asking “What do you mean?” or “How are you sure?” whenever I stated some fact that I had casually taken for granted, or one that I had not completely understood. This lesson is something that I still use today: when I write a bold statement in an article or in a proposal, I often picture Mike giving me a skeptical look and a stern admonishment of “No. Why?” Then I think that as long as I can answer Mike’s question, I have succeeded in answering any query that might arise. His skepticism and constructive criticism made be a better scientist. For that, I sincerely thank Mike’s family and closest friends for sharing his spirit with us.

Arash Bodaghee,
Georgia College, GA, USA
March 8, 2019

TENDERLY FRAGILE BY GUILLAUME BELANGER

Late in the fall of 2016, towards the end one of our regular science operations meetings, one of my colleagues mentioned that the INTEGRAL Picture of the Month for December would be the obituary. “Obituary!?! For whom!?!”, I asked, with surprise and a little anxiety. “Oh! You didn’t know? Mike died last week”. It came like a slap in the face. I had no idea he was ill. And obviously, I had no idea he was dying. He was 42.

Mike and I met in Moscow in 2006 at the 6th INTEGRAL Workshop. I had read his papers, and he had read mine, but we had never met. There was a tension between the Russians and the rest of us. The reason is mostly related to the fact that 1) Russian scientists, formally can, and in practice do, work and share data or analysis results only with other Russians; 2) the Russian space agency put INTEGRAL into orbit, and in return, negotiated with ESA to get one quarter, 25 %, of the observing time for the lifetime of the mission; and 3) more specifically related to the topic of my own research, the Galactic Centre, the head of the Russian delegation, the great and famous Professor Sunyaev, had negotiated to get half the observing time on this region, and therefore, share all the data half way down the middle with the official Principle Investigator for the Galactic Centre, my PhD co-supervisor, Andrea Goldwurm. So, there were subtle but definitely palpable tensions.

Professor Sunyaev gave a stunning presentation in which he talked about the science that could be and was being done with INTEGRAL data, he drew on his vast mastery of all fields of physics, making analogies, explaining connections, and clarifying issues that most of us could not even see, freshly and spontaneously, without any arrogance, in a simple matter-of-factly kind of way. I was immensely impressed. His was a 40-minute review talk. Mine, on the same day, was a 30-minute presentation, which was also a long one, since the programme contained mostly 20-minute presentations, invited review talks of 40 minutes, and a handful of 30-minute presentations. I gave a shortened version of the talk I had presented in the main amphitheatre of the CEA two months before to my PhD defence committee, and the public in attendance.

Everyone was very impressed, I think because, unlike anything I’ve ever seen at such a scientific conference, the first 10 minutes were spent with my narrating a Discovery Channel video of an voyage through the Galaxy, from the Earth to the Galactic Centre, that I slowed down to give myself enough time to describe the large scale structures and global features of our Galaxy, the distribution of stars and gas that make up its visible contents, talk about their formation and dynamics, about open and globular clusters, types of stars and their different life cycles, about planetary nebulae and supernovae remnants, magnetic field structures betrayed by particles trapped spiralling along them and seen at radio wavelengths, and on and on.

It was during the break after that session that Mike came up to me for the first time. He was bright, quick, sharp as a whistle, energetic and curious, open and friendly, but serious. He had a kind of grave seriousness to him. All these qualities appealed to me. He complimented me on the presentation, and we talked for a few minutes. What struck me most was that he was simple and straight forward: not puffed up, not arrogant, not condescending; and not cautious, hesitant, distant, or reserved either. Just open, simple, and straight forward: nothing hidden, nothing fake. I’m like that too. We connected.

Later that night, we had the banquet dinner, and we spoke a lot more together after eating. Naturally, given that we were in Moscow, everyone (or almost) drank plenty of wine with dinner, and everyone (or almost) was now drinking vodka. Conversations and laughter flowed freely and echoed in the large hall. Mike invited me to come out in the evening, and meet him with other people at a bar where we could watch, while chatting, the football game. It was the time of the 2006 Football World Cup, and this is what defined the plans for the evenings. I agreed, and we spent the evening together.

When it was time to call it a night, after all buses had stopped their service, he offered to walk back with me from the bar to the hotel. I gladly accepted. It was a 45 minute walk across the city, which I didn't know at all, but which was his beloved home town. So somehow, in those few days in Moscow, we became friends. Friends who didn't really know much about one another, but friends that connected on a deeper level. These things are hard to explain, and have to do with personal traits and upbringing, tendencies and sensitivities, affinities and outlook. The few other times we saw each other, either at conferences or meetings, it was always the same. We saw each other for a short time, didn't really have much to talk about because neither of us liked small talk, but we felt happy to see one another. We exchanged a few Skype chats over the years, but that was the extent of our relationship.

And when I heard that he had passed, that he was no longer alive, that he was dead, I was really shocked. What first struck me with sadness is that there was no way for me to express to him how I felt about him, and how sorry I was that he was gone. We often hear of someone's passing after they have already passed. This makes it impossible for us to express anything to them: no expression of kinship or feelings of empathy, no sentiments of understanding at what they are going through, no words of support, comfort, or warmth. Nothing more can be expressed to them because they are gone. Tears welled up in the eyes. Impossible to say anything. Impossible to write anything. Impossible to reach him. Impossible, now and forever. Feeling sad and helpless, I sat in silence, tender and fragile.

This is what we are: tender and fragile. It's just that most of the time we don't realise it, nor do we think about it. When it hits us, and we feel it for a fraction of a second, we push it away, push it down under the shell that we think hides and protects us.

Mike was a very special person. I wish I could have worked with him, and gotten to know him better. I wish there was something that could be done to bring him back, but I know there isn't. Mike will remain in my memory as he was each time we met: sharp and quick, energetic and motivated, intense and sincere, simple and straight forward, completely present and alert, unhesitating, open-minded and totally honest. What a rare collection of qualities. I send all of my sympathy to his close friends and colleagues, and especially to his parents, his wife, and his little boys.

Guillaume Belanger
ESA – ESAC, Madrid, España

ВОСПОМИНАНИЯ О М. Г. РЕВНИВЦЕВЕ

Мы познакомились ещё будучи студентами МФТИ. Перейдя на старшие курсы я пришёл на работу в Институт космических исследований в отдел Астрофизики высоких энергий, где Михаил уже трудился почти два года. Через некоторое время мы начали общаться сначала по работе, а впоследствии стали товарищами и затем друзьями. С Майком легко было подружиться (друзья и коллеги называли его исключительно так, даже когда Михаил Геннадьевич уже стал известным учёным, доктором наук, профессором РАН...), он притягивал людей своим дружелюбием, умением слушать и вести диалог. В этом небольшом воспоминании я бы хотел написать именно о некоторых его человеческих достоинствах, иллюстрируя рассказ случаями из жизни. За его профессиональную работу однозначно говорят сотни научных статей, опубликованных им в лучших изданиях, десятки «приглашённых» научных докладов на международных симпозиумах и глубокое уважение и безусловное признание Михаила ведущими мировыми учёными в области астрофизики. Во главе такого успеха на научном поприще стоят Мишин талант и невероятная трудоспособность. Если талант особо не измерить, то его трудолюбие и умение грамотно организовать работу поражали многих. Специфика экспериментальных исследований подразумевает, что над одним проектом совместно трудятся несколько человек, отвечая каждый за свой фронт работы. Я участвовал с Майком в нескольких совместных работах и каждый раз безнадежно от него отставал. Меня утешало только то, что я в этом был не одинок, эта участь настигала многих коллег. Наверное именно поэтому Майк всегда параллельно работал над несколькими проектами. Самое поразительное было в том, что профессиональная деятельность не занимала у Миши все время, он ещё успевал много читать, заниматься семьёй, встречаться с друзьями, увлекался спортом и даже смотреть новинки кинопроката. Беллетристика мало занимала Михаила, хотя конечно же он прекрасно ориентировался в произведениях русской и зарубежной классики. Его научный склад ума требовал фактов и статистических данных, ему хотелось знать, как всё устроено и работает и в обществе людей, поэтому он очень интересовался историей (особенно военной тематикой) и исследованиями современных экономистов. Никогда он не основывал своего мнения только на работах одного автора; если его интересовала какая-то тема, он черпал информацию из многих источников и зачастую перепроверял авторов, докапываясь до первоисточников. Поэтому спорить с ним (а Миша был страстный спорщик) на эти темы было крайне непросто не только друзьям за светскими беседами, но и профессионалам в данных вопросах. Ходили слухи, что ещё будучи юношей довелось Майку вести спор по вопросам марксизма-ленинизма с дипломированным экономистом, и тот спор закончился не в пользу Михаила, так как ему попросту не хватало теоретической базы для «битвы» на аргументах. Тогда он взялся за изучение соответствующей литературы и прочёл несметное количество трудов, включая всем известный (но мало кем даже пролистанный) «Капитал. Критика политической экономии» Карла Маркса. Через полгода (да, Миша подходил к вопросам основательно) оппонент был разбит в пух-и-прах. Доводить дела до конца, не смотря ни на какие трудности — вот одна из главных черт характера Михаила. Но он не был что называется «упёртым», он всегда слушал и слышал оппонента, и если уж понимал, что в каком-то вопросе оказался неправ, то обязательно признавал это.

А ещё Михаил Геннадьевич был настоящим патриотом своей страны, России! Он искренне гордился её историей, старался внести свой вклад в развитие страны, терпеливо и методично объяснял неправоту тем, кто огульно обвинял Россию в его присутствии. При этом Миша более 10 лет проработал за границей, где иной соотечественник предпочтёт согласиться с собеседником, безосновательно критикующим Россию. Майк был не из таких, он возражал, не смотря на статус или возраст человека ему оппонирующего, и разговор вёл исключительно миролюбиво с привлечением конкретных фактов, доказывающих ошибочность высказываемой мысли. Не раз мы наблюдали, что после таких споров человек может и не соглашался сразу, но явно менял отношение по сути вопроса

с категорического на дискуссионное. И наши иностранные коллеги уважали Михаила не только за научные достижения, но и за такую жизненную позицию. И у Миши было множество хороших знакомых и друзей по всему миру.

Хочется ещё отметить, что Михаил всегда был внимателен к окружающим. У него вообще было «большое» сердце и он искренне радовался успехам и достижениям коллег и друзей и первым предлагал свою помощь, если у кого-то происходили неприятности. Часто он даже не афишировал своё участие, так что некоторые и не догадывались об этом.

Особых слов заслуживает отношение Михаила к своей семье, которая для него была абсолютной ценностью. Не смотря на свою занятость, Миша даже умудрился собрать информацию и оформить в книгу фамильную историю своей семьи, охватывающую несколько поколений. Я был знаком с Майком более 20 лет, и за все это время никогда от него не слышал не то что жалобы на семейные дела, но даже намёка на то, что у него возникают моменты недопонимания в семье. Это не значит, что таковых не могло быть, но совершенно точно, что даже если таковые и возникали, то он решал все вопросы сам, как настоящий мужчина. Да и вообще никогда от него не слышал никаких жалоб, разве что он иногда сетовал, что кто-то медленно работает. А как за ним было поспеть?..

Михаил очень любил жизнь, ему было интересно жить, у него было планов лет на двести вперёд и очень жаль, что судьба распорядилась иначе... Но он оставил свою частичку в каждом из своих троих сыновей и я уверен, что они не уронят знамя отца.

Сергей Мольков
старший научный сотрудник
Отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН

ВОСПОМИНАНИЯ О МИХАИЛЕ РЕВНИВЦЕВЕ

С Мишей Ревнивцевым я впервые встретился в Институте космических исследований РАН (Москва) в тот период, когда он завершал работу над своей кандидатской диссертацией и защищал её в Совете ИКИ РАН в конце 1990-х годов. В ИКИ я приезжал по совместным делам по проекту российско-турецкого 1,5-метрового телескопа РТТ-150, либо на рабочие совещания, либо на научные конференции. Мне интересно было общаться с молодыми сотрудниками ИКИ, которые с головой были погружены в обработку и анализ данных рентгеновских обсерваторий. Уже тогда для меня Михаил выделялся среди своих сверстников — аспирантов и молодых кандидатов наук — уверенностью в высказываниях по научным проблемам, которые обсуждались во время конференций, совещаний и в перерывах на кофе-брейках. У Миши были тонкие чёрные длинные усики, и тогда мне он напоминал молоденького Дон-Кихота, который отчаянно сражался, но не с ветряными мельницами, а с реальными астрофизическими проблемами, пытаясь найти возможные научные решения. Его уверенность, прежде всего, была основана на фундаментальных знаниях и умениях в физико-математических дисциплинах, которые он приобрёл во время учёбы в средней школе и МФТИ. Конечно, ему повезло, что он попал в сильный и многочисленный коллектив отдела Астрофизики высоких энергий в ИКИ РАН (будучи ещё студентом МФТИ), в котором тон задавали опытные учёные, имеющие феноменальные знания в физике, умения в методах математической физики, и опыт их приложения в астрофизике. В таком ярком коллективе, с большим количеством молодёжи, были созданы условия для творческого роста. Но Миша обладал ещё и колоссальной работоспособностью. Не случайно, что уже в 32 года он успешно защитил докторскую диссертацию и стал покорять мировой олимп в астрофизике высоких энергий.

Примерно к 2005 году усилиями партнёров по проекту (Казанский университет, Академия наук Республики Татарстан, Институт космических исследований РАН, Государственная обсерватория ТЮБИТАК) 1,5-метровый телескоп РТТ-150 был оснащён современным научным оборудованием — фотометрами и спектрометрами с охлаждаемыми ПЗС-матрицами. Началась активная работа по оптическому отождествлению жёстких рентгеновских источников, которые обнаруживала гамма-обсерватория ИНТЕГРАЛ. Михаил был в команде ИКИ одним из лидеров, который активно помогал казанской группе в этой работе. Мне посчастливилось принять участие в нескольких исследованиях, где вклад Михаила был очень и очень важным. У спутника ИНТЕГРАЛ низкая точность локализации источников (5–10 угловых минут) из-за чего в поле ошибок ИНТЕГРАЛа на оптических снимках РТТ-150 попадало большое число объектов и изначально трудно было понять, какой же из этих оптических источников связан физически с рентгеновским. Михаил активно работал с электронными архивами предыдущих рентгеновских миссий (ROSAT (сокр. от нем. Röntgensatellit), RXTE) и часто ему удавалось сузить область локализации источников на картах ИНТЕГРАЛА. Это сильно облегчало казанской группе задачу оптического отождествления. Таким образом нам совместно с Михаилом удалось отождествить несколько активных ядер галактик (среди них XSS J05054-2348, XSS J16151-0943, XSS J21354-2720, IGR J18559+1535, IGR J19473+4452, IGR J2127+5656) и маломассивных тесных двойных звёздных систем с аккрецирующими белыми карликами (XSS J00564+4548, IGR J00234+6141).

В ряде случаев он вместе с коллегами из ИКИ РАН напрямую писал заявку для получения наблюдательного времени на (американском!) спутнике «Чандра» в счёт директорского фонда времени. Как правило, спутник «Чандра» при своей высокой астрометрической точности напрямую указывал на искомый оптический компонент в плотных звёздных полях в плоскости Галактики. Таким образом был отождествлён источник ИНТЕГРАЛа IGR J21343+4738, оптический компонент которого оказался Ве-звездой, а компактный источник — аккрецирующей нейтронной звездой. Важно, что благодаря активному участию Михаила в этой работе приоритет в отождествлении уникальных рентгеновских

источников на РТТ-150 оставался за российскими группами учёных из Казанского университета и ИКИ РАН.

Мне лично Михаил помог в работе над одной из глав моей докторской диссертации. Возможности телескопа РТТ-150 позволили мне в 2004 году получить наиболее длительные ряды оптической фотометрии микроквара SS433 в течение нескольких ночей подряд (продолжительностью 6–8 часов в ночь, и впервые с временным разрешением 6 с). По этим данным Михаил получил оптические спектры мощности флукутации блеска аккреционного диска SS433 и сравнил их с рентгеновскими данными спутника RXTE. Было показано, что спектры мощности в оптике и рентгене имеют одинаковый наклон в широком диапазоне частот (10–100 000 с), из чего был сделан важный вывод о том, что оптические кванты являются следствием отражений (переизлучений) рентгеновских квантов от стенок аккреционной колонки в SS433. Эта работа стимулировала коллег из ИКИ РАН пойти дальше в сторону увеличения временного разрешения для исследования SS433 на РТТ-150. В результате дальнейших совместных наблюдений на частотах около 1 Пц был обнаружен излом в оптическом спектре мощности, связанный с физической аккреции вещества в SS433. Эта работа стимулировала Михаила предложить новое направление исследований по изучению физических параметров двойных систем через выявление особенностей в их оптических спектрах мощности. Для усиления экспериментальных возможностей Михаил получил грант Германского фонда, за счёт средств которого он приобрёл для РТТ-150 быстродействующую ПЗС-матрицу фирмы АНДОР, позволяющую регистрировать изображения с временным разрешением до 2 мс. Он испытал возможности этой матрицы на РТТ-150, используя в качестве тестового источника пульсар в Крабовидной туманности с известной переменностью блеска с периодом в 33 мс.

Михаил планировал применить эту ПЗС-матрицу к исследованию параметров аккрецирующих белых карликов с сильными магнитными полями (полярнов), регистрируя кризовые блеска в моменты быстрых затмений полярных шапок маломассивной оптической звездой, которая играла роль своеобразной природной диафрагмы, движущейся поперёк луча зрения.

Отдельное направление исследований на РТТ-150, в котором нам удалось вместе поработать — это поиск и исследование рентгеновских источников в направлении на центр Галактики. В этой части Галактики велико влияние межзвёздного поглощения в оптической области спектра. Чтобы ослабить и учесть это влияние, Михаил искал варианты соединения наших оптических наблюдений с имеющимися инфракрасными архивными данными. Он освоил методику построения распределения энергии в широком диапазоне длин волн — на основе имеющихся программ расчёта излучения атмосфер холодных звёзд, которые в большинстве своём имеются в направлении на центр Галактики.

Я с большой благодарностью вспоминаю десятилетие моей научной жизни на РТТ-150, в котором мне посчастливилось работать вместе Михаилом Ревнивцевым.

Ильфан Бикмаев
Казанский федеральный университет

МАЙК, КАКИМ Я ЕГО ЗНАЛ

В жизни каждого человека есть люди, оказавшие на него большое влияние, задавшие вектор развития. Считаю своей большой жизненной удачей, что одним из таких людей стал для меня Михаил Ревнивцев. Он был сильным учёным, и как-то естественно сложилось, что я стал относиться к нему как к старшему товарищу по науке, несмотря на обратную разницу в биологическом возрасте. Больше всего привлекала его манера увлечённо, но в то же время спокойно и аргументированно вести дискуссии на любые темы, от научных до чисто житейских. Если человек в чём-то ошибался, он находил способ его поправить так, чтобы это было не обидно и убедительно. И не ленился делать это, помогая тем самым лучше понять существо затронутой темы. Любое общение с ним обогащало, заставляло по-новому взглянуть на обсуждаемые проблемы, и было крайне полезно, думаю для всех, кто с ним работал. Настоящий научный лидер, генератор новых и вдохновляющих идей и подходов, способный увлечь людей, и побудить их к совместной работе. Таким он был. А любовь и преданность семье гармонично дополняли личность Михаила, вызывая радость и уважение. Пустота в наших душах после его ухода не может быть ничем восполнена. Трудно выразить, насколько не хватает Миши. Но он и жив в нас, мы продолжаем с ним мысленно спорить, и по-прежнему вдохновляемся его преданностью науке и глубочайшим интересом к ней.

Так получилось, что дольше всего мы общались во время моих визитов в Гархинг, в Институт астрофизики. Познакомились во время первого визита, ещё в прошлом тысячелетии, когда он был студентом Рашида Алиевича Сюняева. Во время следующего визита, в 2004 году, Миша был уже известным учёным, и, по словам его учителя, работал как трактор. В этом я незамедлительно убедился и сам. Тогда и повезло узнать его как человека необыкновенной душевной щедрости и подружиться с ним. Он умел вовлечь в обсуждение научных проблем, которые его в данный момент интересовали. Делился идеями и был готов помочь (и помог!) при малейшей необходимости.

Одной из горячих тем в то время были результаты наблюдений международной рентгеновской обсерватории ИНТЕГРАЛ, выведенной на орбиту в 2002 году. В том числе появилась необходимость интерпретации жёсткого рентгеновского излучения промежуточных полярнов, наблюдаемых обсерваторией. И Миша сумел заинтересовать меня этой проблемой.

Промежуточные полярны — это тесные двойные системы, в которых вторичная звезда, красный карлик, переполняет свою полость Роша. Истекающее вещество образует аккреционный диск вокруг главной звезды — замагниченного белого карлика. Его магнитное поле разрушает внутренние части диска, в результате чего вещество выпадает на белый карлик в районе его магнитных полюсов.

Источником рентгеновского излучения является горячая (сотни миллионов градусов) аккреционная колонка на поверхности замагниченного белого карлика, возникающая за фронтом ударной волны. Структура такой оптически тонкой колонки довольно проста, и мы быстро поняли, что сможем сами рассчитать её спектр. Непросто было убедить Мишу, что всё считается правильно, он досконально вникал в гидродинамику оседающего в колонке вещества, и не отставал от меня до тех пор, пока мы не начинали понимать результаты численных расчётов во всех тонкостях. К тому времени ИНТЕГРАЛ получил данные лишь для нескольких промежуточных полярнов, и у нас возникла идея применить рассчитанную сетку спектров к данным, принятым рентгеновской обсерваторией RXTE. Михаил включил в анализ данные детектора HEXTE (работавшего на более высоких энергиях), что для промежуточных полярнов было сделано впервые. Благодаря этим данным о потоках на энергиях больше 20 кэВ нам удалось довольно точно оценить массы полутора десятков белых карликов в промежуточных полярнах, и статья наша получила известность.

Однако самой значимой оказалась другая наша работа, опубликованная в 2011 году. Совместно с Юрием Поутаненом и Клаусом Вернером мы предложили новый метод определения масс и радиусов нейтронных звёзд в маломассивных тесных рентгеновских двойных системах, демонстрирующих термоядерные взрывы на поверхности (так называемые рентгеновские барстеры). Оказалось, что спектральная эволюция таких вспышек, случающихся при низком темпе аккреции, может быть описана эволюцией спектров моделей атмосфер изолированных горячих нейтронных звёзд, которые я как раз и умею рассчитывать. Сравнивая спектральную эволюцию вспышки на фазе её угасания с предсказаниями моделей можно определить и массу, и радиус нейтронной звезды, причём не надо знать расстояние до источника. Михаил проделал огромную работу по всему наблюдательному анализу термоядерных вспышек источника, на котором тестировался метод. И он же дал ему название, метод угасающей вспышки (*cooling tail method*). У работы была трудная судьба, поскольку она противоречила господствовавшим в то время представлениям, и статья дважды отклонялась редакциями различных журналов. И была опубликована почти через два года после того, как была написана. В дальнейшем метод многократно применялся, был доработан, и наивысшей точкой его развития является сейчас возможность прямой аппроксимации наблюдаемых последовательностей спектров вспышки спектрами моделей атмосфер. Полученные с его помощью значения радиуса нейтронных звёзд подтверждены в настоящее время по результатам недавних наблюдений гравитационно-волнового сигнала от сливающихся нейтронных звёзд (GW170817) и электромагнитного послесвечения от слияния.

Миша владел и создавал сам богатейший инструментарий в области обработки рентгеновских данных. Он в совершенстве, можно сказать виртуозно, владел различными методами анализа переменности рентгеновского излучения. В частности, значительно развил метод частотно-разрешённой энергетической спектроскопии, Михаил с коллегами, Сергеем Мольковым и Маратом Гильфановым, достигли значительного прогресса в понимании природы пограничного слоя между поверхностью слабомагнитной нейтронной звезды и аккреционным диском. В последующей нашей работе с Михаилом, при участии Юрия Поутанена, нам удалось показать, что модель пограничного слоя как слоя растекания, предложенная Наилем Иногамовым и Рашидом Сюняевым на исходе прошлого тысячелетия, подтверждается наблюдениями.

Впоследствии мне довелось работать с Михаилом и ещё над несколькими проблемами. И всегда его убеждённость в значимости выбранной задачи и твёрдость в последовательном движении к её решению, придавала нам, его коллегам, уверенности, и вдохновляла к работе.

Вспышки памяти

Июнь 2013 года. Общеввропейская астрономическая конференция в городе Турку, Финляндия. Михаил на пике своей научной карьеры. Он лучится здоровьем и счастьем. Совсем недавно родился его третий сын. Комната гостиницы, где он живёт, центр неформального вечернего общения нашей русскоговорящей компании. Дым коромыслом. Горячие споры о науке и о жизни. Миша главный заводила всех дискуссий. Что же будет с Родиной и с нами...

Новый, 2015 год. Миша по скайпу поздравляет с наступающим. Он с семьёй в Красной Поляне. Катается на горных лыжах в отпуске. В этом наши увлечения тоже совпадают. На холмах севера Финляндии, в далёком 2005 году, он направлял мои первые робкие шаги в этом деле.

Во всех делах Миша был хорошим товарищем и добрым наставником. Как жаль, что лучшие уходят первыми. И как горько это осознавать...

Валерий Сулейманов
Университет Тюбингена, Германия



ЗВЕРЬ НА БЕГУ И ПТИЦА ВЛЁТ...

Михаил Ревнивцев

Умер один из сильнейших российских астрофизиков Михаил Ревнивцев. Больше года назад у него обнаружили рак. Для коллег, встречавшихся с ним лишь эпизодически, эта смерть стала полной неожиданностью, жутким шоком — Михаилу было всего 42 года, и он был на подъёме. Недавно получил звание профессора РАН. Казалось, что членство в РАН для него — вопрос времени, причём небольшого.

Михаил был полностью погружён в науку и обладал фантастической работоспособностью. Он мог одновременно работать в нескольких окнах на компьютере: в одном — контролировать вычисления, во втором — писать статью, в третьем дискутировать по электронной почте — всё одновременно — Цезарь бы мог позавидовать. Его коньком была рентгеновская астрономия, особенно всяческие аккрецирующие компактные источники.

Пожалуй, его самый известный цикл работ — объяснение «рентгеновского хребта Галактики». Это рентгеновское излучение вдоль галактической плоскости, не сводившееся ни к космическим лучам, ни к дискретным источникам, — оно выглядело непрерывным и имело линии, будто излучает космическая плазма. Но такая плазма не может удерживаться тяготением Галактики — поэтому явление выглядело загадочным. Михаил, перелопатив массивы данных нескольких рентгеновских обсерваторий, в том числе изучив все типы близлежащих источников, нашёл ответ. Хребет Галактики — рентгеновское излучение огромного числа белых карликов, входящих в двойные системы. Карлик стягивает на себя звёздный ветер компаньона — отсюда и возникает рентгеновское свечение. Каждый из этих объектов довольно слаб, но число их огромно — миллионы, поэтому и возникает впечатление непрерывного фона.

За этот цикл работ Михаил получил Премию Президента Российской Федерации. Как пошутил на банкете один из коллег — два миллиона белых карликов скинулись по рублю и преподнесли их Мише в виде премии.

Он был светлым и очень дружелюбным человеком. Всегда был готов помочь, иногда тратя на это немало ценного времени. Обсуждать с ним любую научную проблему было большим удовольствием — он очень быстро и чётко мыслит и схватывал на лету. Всё у него было хорошо — и коллеги, и семья, и друзья. И ещё больше у него было впереди. В частности, наконец-то скоро должны запустить космическую обсерваторию «Спектр-Рентген-Гамма», где Миша наверняка стал бы одним из первых добытчиков интересных данных.

Это тот случай, когда нечего сказать себе и другим в утешение. Светлая память...

Борис Шустов
член-корреспондент РАН, научный
руководитель Института астрономии РАН

В 1989 году в средней школе № 51 города Тольятти из участников городских олимпиад по физике и математике набирали класс для углублённого изучения физики и математики. Отбор прошли 16 человек, среди которых был Михаил Ревнивцев. Тогда мы и познакомились с Майком.

В этом классе до окончания школы мы вместе проучились два года. Учебная программа для этого класса была изменена. Было увеличено количество учебных часов по математике, физике и информатике, добавлены новые предметы: психология, социология, мировая художественная культура и др. Часть предметов вели преподаватели из Тольяттинского педагогического института и специалисты Волжского автомобильного завода. Особенно хочу выделить Потоскуева Евгения Викторовича — ученика Андрея Николаевича Колмогорова, который преподавал у нас геометрию. Уроки Евгения Викторовича всегда были особенно интересны. Он относился к нам с теплотой и терпением. Евгений Викторович выделял Мишу. Наверное, он видел в Майке качества, которые в будущем сделали его учёным. С классом мы приезжали в Долгопрудный в МФТИ. Там мы делали небольшие доклады. Доклад Майка был о фотонном двигателе. Майк уже тогда проявлял интерес к космосу. В итоге из класса выпустились 14 человек, шестеро из которых (в том числе Майк) в 1991 году поступили в МФТИ. Все мы успешно закончили институты, но в науке остался только Майк.

Во время учёбы в институте, живя в общежитии, мы ещё больше сдружились. Майк никогда не отказывал в помощи ни в мелочах, ни в каких-то более серьёзных ситуациях. Всегда поражала энергия Майка. Он успевал и учиться, и заниматься спортом, и читать художественную литературу, слушать музыку, ходить в театр и многое другое. Всегда делал всё быстро, часто несколько дел одновременно. Миша всегда любил большие компании. На его день рождения всегда приходило много друзей и однокурсников. Когда приезжали домой на каникулы, он часто организовывал тусовки, где были одноклассники, друзья и знакомые. Вокруг него неизменно было много интересных людей. Много всего случалось в нашей жизни, но особо хочется поведать об одной истории, которая, как мне кажется, очень чётко характеризует Мишу.

В 2003 году Майк, когда они с Аней и Владом жили в Мюнхене, пригласил меня к себе в гости, и мы все вместе поехали на машине в Австрию, в Санкт-Антон кататься на горных лыжах. Майк к тому времени уже неплохо освоил спуск на лыжах с горных склонов, а я кататься не умел. На склоне Майк показал мне азы катания и укатил вниз. Они с Аней катались по очереди, Влад был ещё маленький. Через несколько дней под чутким руководством Майка я уже мог как-то съехать с горы. Но мне этого было достаточно, чтобы почувствовать себя крутым горнолыжником. В итоге за пару дней до отъезда я упал и надорвал связку на ноге. Майк со мной полночи провёл у врача. В день отъезда старенький «Ниссан микро», который всё это время простоял, не захотел заводиться (он, наверное, знал, что будет дальше и не хотел ехать). Был выходной, автомастерская не работала. Надо было ехать, и мы с Майком начали разбираться с поломкой. Просушили и почистили трамблёр, и «Ниссан» завёлся. Из Санкт-Антон мы выехали с опозданием. Было решено ехать по короткому пути через перевал Фернпасс, а не в объезд по автобану. В горах пошёл снег, который внизу на автобане превратился в дождь, а потом в ливень. Дворники у «Ниссана» сломались, и Майку приходилось опускать стекло водительской двери, чтобы привести дворники в движение вручную и почистить лобовое стекло. Казалось, всё говорило о том, что нужно остановиться и переждать непогоду. Но это не про Майка. Мы остановились на заправке, Майк отремонтировал дворники, и мы поехали к перевалу. На Фернпасе шёл снег, который быстро укатывался машинами. Фуры, у которых не было цепей на колёсах, ехали с большим трудом и буксовали. У нас тоже не было цепей на колёсах. Иногда казалось, что маленькая «микро» не вытянет на обгоне какую-нибудь буксующую фуру, мы съедем куда-нибудь в сторону, и нам придётся толкать машину. Но машина выдержала, Аня — тоже, в Майке никто и не сомневался, а Влад был ещё

маленький и ничего не понял. В общем, ещё постояв немного в пробке, мы вполне благополучно доехали до Мюнхена. Навигатора с мобильной связью у нас тогда не было, поэтому оценить, сколько мы сэкономили времени, поехав через перевал, а не по автобану, невозможно. Но мы не свернули с пути, не развернулись, а доехали до намеченной цели намеченным маршрутом.

В этом и был весь Майк...

Воспоминания о Мише всегда будут со мной. Сейчас я понимаю, насколько большое влияние на мою жизнь он оказал, и насколько его не хватает.

Павел Анохин

Майка я знаю очень давно — ещё с первого курса института. Я приехал из провинциального города и ещё не привык к модным причёскам, которые были распространены в Москве в то время (1991 год). Помню, как я стоял у здания общаги МФТИ в конце августа и смотрел на несколько крепких людей, идущих с большими сумками на плечах, с модной короткой стрижкой под Dersch Mode. Основная масса студентов выглядела иначе («задохлики»), эта же группа сильно выделялась — я даже принял их за местных («долгопа»). Каково же было моё удивление, когда в мою комнату в общежитии завалился один из них и сказал, что он здесь живёт. Это был Майк.

Майк был большим фанатом Dersch Mode. На входной двери в нашей комнате в общежитии он привесил маленькую фотографию этой рок-группы, а моя мама, когда меня навещала, пыталась найти нас на этой фотографии. В любую свободную минуту Майк слушал Dersch Mode, чем вызывал неудовольствие нашего третьего соседа по комнате, Витька. В конечном итоге, эту модную группу Мише приходилось слушать только в наушниках.

Прошли годы. Майк стал известным учёным. Помню, что как-то я решил заняться наукой и Майк взял меня в свой отдел. Мы начали писать статью. Вскоре я понял, что наука — не моё, и ушёл из отдела. Через пару месяцев Майк принёс мне «мою» статью (я был первым автором), напечатанную в научном журнале, и ещё нахваливал, какая у меня статья хорошая. Понятно, что в этой статье от меня был только один параграф, остальное написал Майк.

Майк очень любил объяснять всякие вещи. Как-то я готовился к экзамену по эконометрике (статистика на экономический лад), и мне была непонятна некая формула. Майк принялся объяснять теорию статистики, которая лежала в основе этой формулы. Когда же я предложил перейти к выводу формулы, Майк сказал, что она легко выводится на основе той теории, которую он мне только что объяснил, и оставил меня с формулой один на один. Как оказалось, я был не настолько силен в статистике, и вывод формулы пришлось искать в другом месте.

Я увлёкся любительской астрономией (наблюдение галактик, туманностей и прочих звёздных объектов глазом в телескоп небольшой апертуры) и неоднократно звал его поехать с собой на наблюдения. Майк дотошно выспрашивал, что же я вижу в окуляр, и когда понимал, что цветной картинка как с телескопа им. Хаббла там не будет, отказывался. Он регулярно придумывал научные задачи, которые можно было решать на маленьком телескопе. Майк подарил мне большую распечатанную фотографию галактики M104 (галактика Сомбреро), которая напоминает мне о нём. M104 — иконка моего приложения на Android, которое я написал для использования любителями астрономии.

Майк был замечательным другом. Светлая ему память!

Леонид Васильев



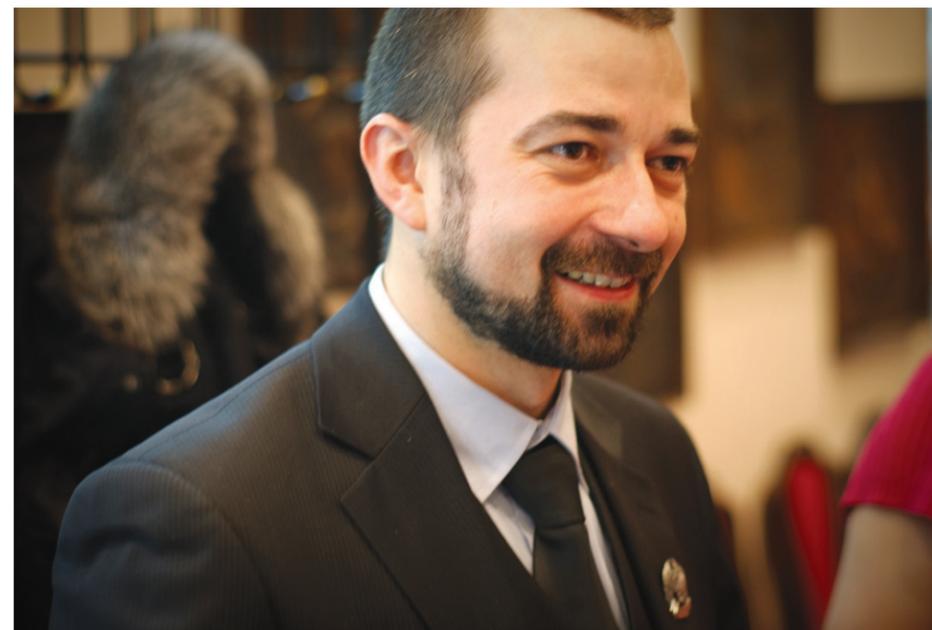
ФОТОГРАФИИ



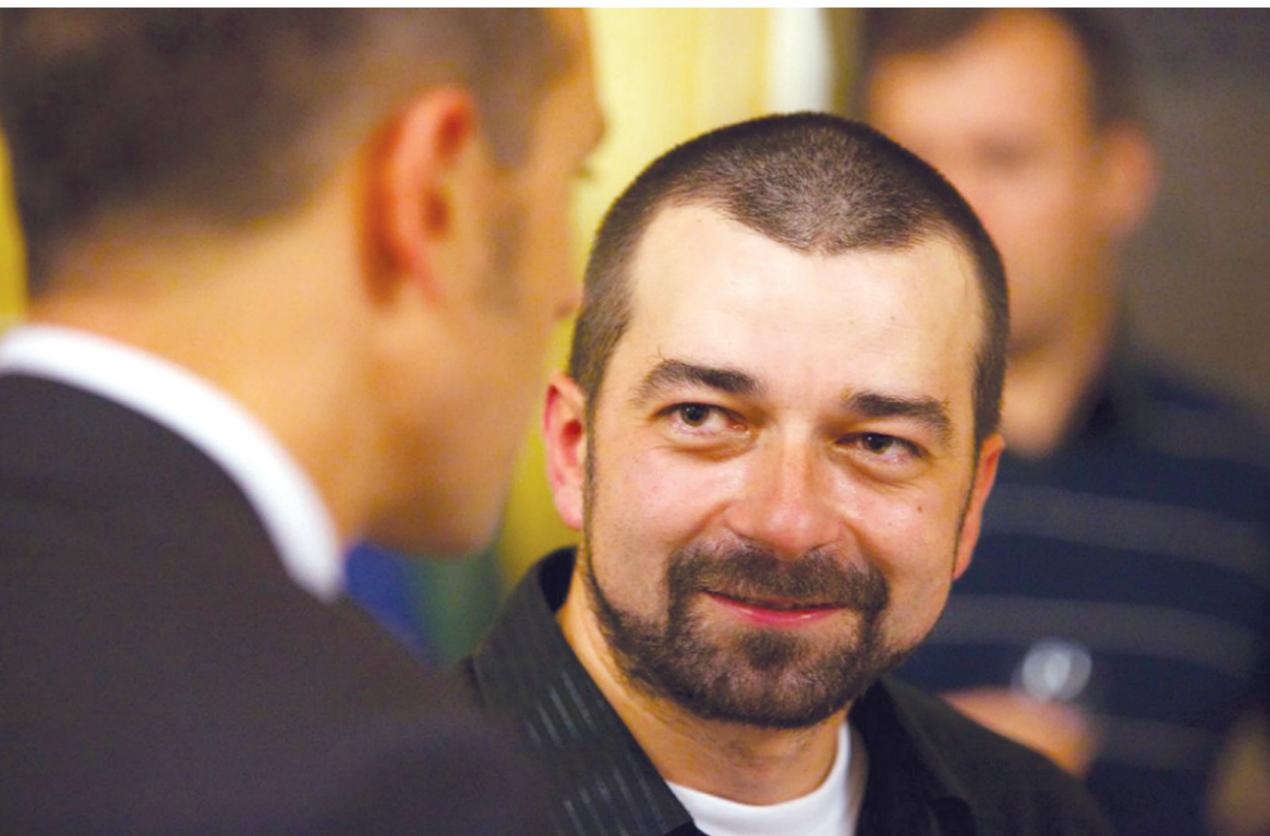
Вручение Михаилу Ревнивцеву Премии Президентом РФ Д. А. Медведевым, Москва, Кремль, февраль 2009 года



С Маратом Гильфановым после вручения Премии Президента РФ, Москва, февраль 2009 года



После вручения Премии Президента РФ, Москва, февраль 2009 года



Дискуссия со время товарищеского ужина на конференции "An INTEGRAL view of the high-energy sky (the first 10 years)", Париж, Франция, октябрь 2012 года



Выходные на горных лыжах в Гармиш-Партенкирхене. Германия, декабрь 2005 года



Возле Института астрофизики общества им. Макса Планка (МПА), Гархинг, Германия, 1997 год



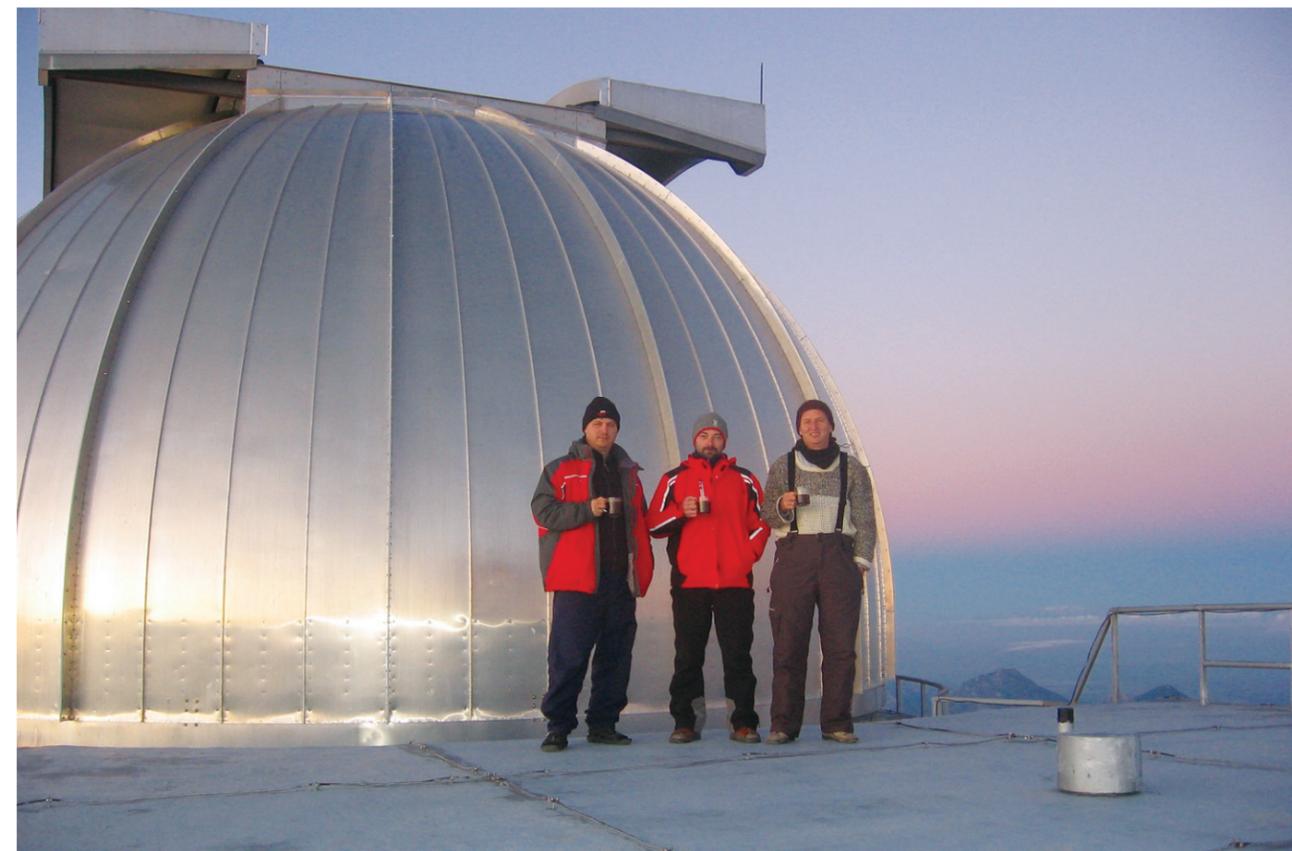
С Сергеем Трудолобовым и Константином Бороздиным, Германия, 1997 год



С Иреком Хамитовым
в обсерватории
Тубитак, Турция,
ноябрь 2009 года



Михаил Ревнивцев
с Родионом Бурениным
во время установки
новой быстрой
ПЗС-матрицы,
приобретенной
Михаилом для
телескопа РТТ-150,
Обсерватория
Тубитак, Турция,
ноябрь 2009 года



На крыше здания
телескопа РТТ-150,
возле купола,
с Родионом Бурениным
и Иреком Хамитовым,
Турция, ноябрь
2009 года



В подкупольном
помещении телескопа
РТТ-150, Турция ноябрь
2009 года



У крупнейшего в России оптического телескопа БТА во время Всероссийской астрономической конференции, Нижний Архыз, сентябрь 2010 года



У радиотелескопа РТ-32 во время Всероссийской астрономической конференции, Нижний Архыз, сентябрь 2010 года



С коллегами Евгением Чуразовым, Биллом Форманом, Михаилом Павлинским, Сергеем Гребневым и Сергеем Сазоновым, Стокгольм, Швеция, апрель 2008 года



В перерыве между совещаниями рабочих групп в Международном институте космических исследований (ISSI, Берн). Михаил Павлинский, Александр Лутовинов, Михаил Ревнивцев, Сергей Мольков. Швейцария, март 2004 года



С Рашидом Алиевичем Сюняевым и Александром Лутовиновым на конференции "The Extreme Universe", Таормина, Италия, сентябрь 1998 года



Новий 2008 Год



Дома,
февраль 2011 года



После получения диплома об окончании МФТИ. С учительницей физики Надеждой Николаевной Мокроусовой и другом Павлом Анохиным. Долгопрудный, июнь 1997 года



По дороге в ИКИ. Москва, 1997 год



Семья Ревнивцевых от дедушки и бабушки до внуков. Новый 2013 Год. Москва



*С женой Аней
и старшими сыновьями
Владиславом и Егором,
апрель 2012 года*



*С сыновьями Егором,
Владиславом и Глебом,
апрель 2015 года,
за несколько дней
до операции*



НОЯБРЬ
2016 ГОДА...

Тяжёлая болезнь и безвременный уход от нас Миши Ревнивцева — это страшный удар по его семье и детям, громадная потеря для нашего отдела и для всей рентгеновской астрономии в нашей стране и в мире. Мы все знали Мишу как талантливого, блестящего и признанного учёного, человека, обладавшего своим почерком в науке, своим ярким и обычно неожиданным подходом к решению задач, которые он ставил перед собой. Он обладал необычайной работоспособностью, пользовался громадным уважением коллег и был центром притяжения для окружающих его молодых учёных. Астрономы, даже далёкие от нашей тематики, чувствовали его силу и преданность науке. У него была международная известность и высочайшая репутация профессионала и эксперта в своём деле. Михаил Геннадиевич был не просто видным членом нашей группы, он был одним из её основных стержней.

Прошу прощения, что из-за сильного бронхита не решился нарушить рекомендацию врача отменить, как минимум на три недели, все полёты.

Прошу передать мои искренние соболезнования Ане, родителям и всем родственникам Миши, его друзьям и коллегам.

Рашид Сюняев

 **Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»**

Ульянова ул., 46, ГСП-120, Нижний Новгород, 603950
Тел. (831) 436-58-10
Факс (831) 436-60-86, (831) 436-97-17
E-mail: dir@appl.sci-nnov.ru
http://www.ipfran.ru
ОКПО 04683326, ОГРН 1025203020193,
ИНН/ КПП 5260003387/526001001

№ 11226 –
На № _____ от _____

Соболезнования от сотрудников отдела астрофизики и физики космической плазмы
Института прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород)

Сотрудники отдела астрофизики и физики космической плазмы Института прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород) выражают соболезнования коллегам и родным Михаила Ревнивцева. Мы запомнили Михаила как выдающегося учёного в области рентгеновской астрономии, талантливого организатора, душевного и отзывчивого человека. Помним его научные выступления в Нижнем Новгороде. Ценим его помощь и поддержку в Москве на ежегодной конференции по астрофизике высоких энергий и в Гархинге в Институте астрофизики Общества имени Макса Планка. Мы вместе радовались его успехам, получению государственной премии. Верили в его будущие открытия, в его новые идеи. Мы скорбим вместе с вами о преждевременном уходе Михаила. Мы навсегда сохраним светлую память о нём.

Академик В. В. Железняков, чл.-корр. РАН Вл. В. Кочаровский,
М. А. Гарасёв, Е. В. Деришев, С. А. Корягин

24 ноября 2016 года

СОТРУДНИКИ СПЕЦИАЛЬНОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ ВЫРАЖАЮТ ГЛУБОКИЕ СОБОЛЕЗНОВАНИЯ
РОДНЫМ И БЛИЗКИМ
МИХАИЛА ГЕННАДЬЕВИЧА РЕВНИВЦЕВА
И ВСЕМ СОТРУДНИКАМ ИНСТИТУТА КОСМИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

В СВЯЗИ СО СМЕРТЬЮ ОДНОГО ИЗ АКТИВНЕЙШИХ
СОТРУДНИКОВ ИНСТИТУТА, ВНЕСШЕГО ЗНАЧИТЕЛЬНЫЙ
ВКЛАД В РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ
РЕНТГЕНОВСКОЙ АСТРОНОМИИ И АСТРОФИЗИКИ ВЫСОКИХ
ЭНЕРГИЙ, ПОДГОТОВКУ НАУЧНЫХ КАДРОВ.

МНОГИЕ ИЗ СОТРУДНИКОВ САО РАН ЗНАЛИ ЕГО И БЫЛИ
ЕГО КОЛЛЕГАМИ. МИХАИЛ ГЕННАДЬЕВИЧ ВСЕГДА БЫЛ
ЖИЗНЕРАДОСТНЫМ И ДРУЖЕЛЮБНЫМ ЧЕЛОВЕКОМ,
ГОТОВЫМ ПРИЙТИ НА ПОМОЩЬ В ЛЮБОМ ДЕЛЕ, ОБРАЗЦОМ
УВЕРЕННОСТИ, БОДРОСТИ, ПОЗИТИВНОГО ОТНОШЕНИЯ К
ЖИЗНИ, ДОБРОТЫ. ЭТО БЫЛ ЧЕЛОВЕК, ПРЕДАННЫЙ СВОЕМУ
ДЕЛУ И УВЛЕЧЁННЫЙ НАУКОЙ.

ОН МНОГО СИЛ ОТДАЛ РАБОТЕ И УШЕЛ ОЧЕНЬ РАНО.

ПАМЯТЬ О СВЕТЛОМ И ДОСТОЙНОМ ЧЕЛОВЕКЕ МИХАИЛЕ
ГЕННАДЬЕВИЧЕ РЕВНИВЦЕВЕ НАВСЕГДА ОСТАНЕТСЯ В
НАШИХ СЕРДЦАХ.

ДИРЕКТОР САО РАН

ВЛАСЮК В.В.



Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics
60 Garden Street, Cambridge, MA 02138-1516 (617) 495-7000



22 December 2016

We are sorry that we are not able to join with you at the annual IKI gathering to remember our friend Mike Revnivtsev. From the time we first met Mike he was always enthusiastic at everything he did - from organizing a party to conceiving and writing a proposal or a paper. No one was more excited or dynamic than Mike. Mike had strong opinions and views about how everything should be done. Grocery shopping with him was a thrilling event - from the drive in his car to the actual act of shopping - all were unforgettable. No one could compare to Mike for getting everyone together on a weekend evening and being the most charming and welcoming host. Pulling out all the stops. Offering the most amazing variety and quantities of food! and piling it all high on the plates that were offered to his guests.

Mike was the enthusiastic driver of the program to use a 1Ms Chandra observation to image the Galactic Ridge emission. He crafted the proposal, carried out the observation planning, analyzed the data, and conceived a masterful Nature paper (Revnivtsev et al. 2009 Nature, 458, 1142) that definitively resolved the bulk of the "diffuse" X-ray glow into discrete stellar sources. Untangling a mystery that had lasted a quarter of a century, Mike showed that "at energies of ~6–7 keV, more than 80 per cent of the seemingly diffuse X-ray emission is resolved into discrete sources, probably accreting white dwarfs and coronally active stars." (Note that recent studies suggest that there might still be some residual emission that is truly diffuse.)

This Galactic Ridge study prompted further papers that revealed a component of X-ray emission from all galaxies - the integrated emission from their populations of coronally active stars and accreting white dwarfs - that could only be resolved into discrete sources in our own Galaxy. In more distant galaxies, the equivalent of the Galactic Ridge, the emission from the old stellar population, appears as an unresolvable glow from millions of individual stellar sources.

Mike's scientific contributions, his enthusiasm, and irrepressible passion for everything that he undertook will always be remembered.

With great sadness,
Bill & Christine, Julia, Daniel, Miranda

Сотрудники Специальной астрофизической обсерватории выражают глубокое соболезнование родным и близким Михаила Геннадьевича Ревнивцева и всем сотрудникам Института космических исследований в связи со смертью одного из активнейших сотрудников института.

Учёный секретарь САО РАН, Кайсина Е. И.

Дорогие коллеги! Только что получил письмо о страшном несчастье, постигшем всех нас...

Безвременный уход Миши, блестящего учёного с фантастической работоспособностью, большими перспективами и замечательными человеческими качествами — огромная потеря для всей науки. Передайте, пожалуйста, мои соболезнования его семье.

С уважением и печалью
К. Постнов

Уважаемые коллеги ИКИ РАН!

С большим прискорбием мы восприняли печальную весть об уходе из жизни нашего коллеги Михаила Ревнивцева.

Мы знали Михаила как одарённого и талантливого учёного, практически каждый год дарившего нам свои яркие научные результаты, рассказывая о них на декабрьских конференциях в ИКИ. С ним всегда было интересно общаться на разные темы в науке и в жизни.

Он инициировал оригинальные научные задачи для 1,5-м телескопа РТТ-150, принимая активное участие в их обсуждении, решении, интерпретации результатов. Его знания и опыт всегда нам помогали и всегда были важны для нас. Михаил был неутомимым тружеником науки. Благодаря его оригинальным научным результатам, имя его стало известным не только в нашей стране, но и среди широкого круга зарубежных учёных.

Примите наши искренние соболезнования от имени всех казанских коллег.

Наши глубокие соболезнования семье и родным Михаила. Светлая ему память.

Ильфган Бикмаев, Наиль Сахибуллин
Казанский университет

We lost a great person. I will never forget the first time I met him in Taormina in 1998. Mike was young and promise scientist and our expectation were right. I big hug to his family.

Angela Bazzano

These are indeed very sad news. I have very fond memories of working with Mike at the ISDC in the early days of the INTEGRAL mission and of the many occasions to discuss with him and to enjoy life throughout the years. Please send my deepest condolences to his family.

Volker Beckmann

These are very sad news indeed and a great loss both personally and professionally for our community. My thoughts go out to Mike's family and friends and also hope our condolences can be passed on.

Peter Kretschmar

This is indeed very bad news, a big loss professionally and humanly. Please bring our condolences to Mike's family.

Diego Götz

I was shocked to learn of Misha Revnivtsev's death. The world of astronomy has lost one of the foremost explorers of the x-ray sky, and those of us who knew him personally lost a great colleague, and a great friend. I treasured my own conversations with Misha during the annual high-energy astrophysics meetings at IKI. Great encyclopedic knowledge, combined with deeply original thinking and powerful intuition. Always a new insight, always something to think about afterwards. I will remember his larger than life personality, his modesty, his kindness and empathy, his calm demeanor and his deep passion for science and for life. It is so sad that he is no longer with us. Please pass on my deepest condolences to Misha's family.

Yura Levin

I heard about the tragic loss of Mikhail. I meant to send you, as ones of his closest colleagues, my condolences. Please transmit them to whoever you see appropriate. He was young, very bright and will be missed.

Didier Barret

This is indeed very sad news. I knew that Mike was sick, but I did not expect such a tragic event. Please express my condolences to the whole group at IKI and to Mike's family. This is indeed a major loss also for our scientific community.

Marco Feroci

This is a tragic news. This is a loss for the entire scientific community, beside being a horrible loss for the family and your institute.

We send our deepest condolences to Mike's family. He has been a greatly estimated colleague, and his contribution to science has been enormous.

Enrico Bozzo (on behalf of the whole team)
ISDC — Science data center for Astrophysics

Jens Chluba has just informed me about the terribly sad news from Mike Revnivtsev. I had no idea about his sickness. <...> I thought everything would be fine with him by now.

I remember very well his very young family at MPA during the time he was a student, and how proud the High Energy group was of him at the time he was recognised by the Russian Government. I also vividly remember his picture with Medvedev. He was active, happy, and strong at his work, and I admired him for how he was able to cope with work challenges and serious family problems.

These things are particularly hard to accommodate when they involve young people with such a great future perspective, and I guess it is even harder if you have supervised him during his early career years.

Please transmit my sincere condolences to his family and to the entire High Energy group at MPA, which I would like to make extensive to Sazonov and the other colleagues at IKI in Moscow.

Dr. Carlos Hernández-Monteagudo

This is very sad news. Mike was a wonderful scientist and a great colleague, with which we worked constructively and always in good harmony for many years with INTEGRAL, in the TAC, in the IUG and in a variety of other capacities connected with our observatory. I had not been aware that he was so gravely ill, and it is very sad to hear that he has passed away.

Please forward my condolences to his wife and family.

Ed van den Heuvel

This is shocking and unexpected for us, not knowing about his illness. I am going to miss him as a good friend and excellent scientist. I always enjoyed interacting with him about our science, our political interests and personally. My thoughts are with his wife, children and family.

Wim Hermsen

This is a great loss indeed for the Astrophysics community. Mike was a great scientist and a very pleasant person. My deepest condolences to his family.

J.P. Roques

We are shocked and sad about this news. Mike was a wonderfully lively, inspiring, constructive, creative, and friend-like colleague in our INTEGRAL community, we also have fond memories especially from the time while he had a fellowship at the Garching Universe cluster. Please convey to his family our condolences, as well as these extremely positive memories of Mike. Unbelievable.

Roland Diehl (with his friends in Garching)

Please, bring our condolences to the family and all Russian colleagues from the whole IBIS team.

I had the privilege to work with Mike for some time at the beginning of the survey and had a constructive exchange with him at his IUG time. As you all know was a very talented scientist, front line men and great person... he left an abyss for all of us.

Pietro Ubertini

I am shocked hearing the tragic news about Mike. He was an outstanding, very excellent scientist and a very pleasant colleague. I enjoyed every moment of his company. Truly an unbelievable loss.

Please convey my best wishes and regards to his family.

Christoph Winkler

I learned today that Mike Revnirtsev prematurely died on 23 November after a long illness. We lost a bright astrophysicist and a very charming person with whom we had the privilege to discuss during several IUG meetings. I have memories of very pleasant chats with him, full of humanity, not only outstanding competence. I wish that Sasha could bring my condolences to his family.

Carlo Ferrigno

ISDC — Science data center for Astrophysics

I just learnt the very sad news about Mike Revnirtsev, and I am still stunned and deeply saddened. Please convey my sincerest condolences to his family, and extend them to all his friends and colleagues.

Jose Alberto Rubino-Martin
Instituto de Astrofísica de Canarias

I have just heard the sad news of the death of Mikhail Revnirtsev. I have very fond memories of Misha, who was such a brilliant and kind person, and a privilege to work with. This is very sad, and he will be missed.

I have no contact with his family, but at least I'd like to pass to you and to you colleagues at IKI my sincere condolences.

Andrea Merloni

I heard about Mike and am so saddened by this news. He was such a great guy and scientist, and far too young. Life is so fragile. Will there be a service? I am so sorry about this...

Mike was really great and will be dearly missed. I remember many nice evenings with him in Garching and Munich and also am still extremely grateful for when he took a day off to show me around Moscow after the Zeldovich celebration. That was a really great day and I many times think back to it. I wished had had a chance to return the favor, but I sadly never managed to invite him for a visit. I am so sorry for Anya and his kids. It must be horrible for them. My thoughts are with them. Please send them my sincerest condolences.

Jens Chluba

I am deeply regret to hear from Irek Khamitov that Dr. Mikail Revnirtsev has passed away. We lost a friend and a scientist. His works will be kept in the common memory of the civilisation, and his memories in his friends.

Please accept my condolences.

A. K. Tansel
Istanbul University, Faculty of Science,
Dept. of Astronomy and Sciences

I just learned the very sad news of Mike's passing. A real tragedy for one so young and talented and with a young family. Words can't express my feelings. Please pass on my sincerest condolences to his family, friends and colleagues.

David Buckley