

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе  
Российской академии наук

На правах рукописи  
УДК 520+524+539.1

Июдин Анатолий Федорович

**Ядерные гамма-линии в исследованиях  
астрофизических объектов  
Галактики и Метагалактики**

Специальность 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург -- 2013

Работа выполнена в Учреждении Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Московского Государственного Университета имени М.В. Ломоносова

**Официальные оппоненты:**

Доктор физико-математических наук, профессор Бисноватый-Коган Геннадий Семенович (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Космических Исследований Российской академии наук, главный научный сотрудник)

Доктор физико-математических наук, профессор Быков Андрей Михайлович (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, заведующий лабораторией)

Доктор физико-математических наук Надежин Дмитрий Константинович (Государственный научный центр Российской Федерации – Институт Теоретической и Экспериментальной Физики, ведущий научный сотрудник)

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Астрономии Российской академии наук

Защита состоится «11» апреля 2013 г. в 14.00, на заседании Диссертационного совета Д.002.205.03. при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

А.М. Красильщиков

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы

### *Ядерные гамма-линии*

Научный интерес к наблюдениям ядерных гамма-линий возник естественным образом из попыток объяснить наблюдаемую распространенность элементов их происхождением в результате термоядерного взрыва звезды завершающей свою эволюцию (Хойл 1946), а также, из-за предложенной еще на ранней стадии развития ядерной астрофизики теории объясняющей кривую блеска сверхновой звезды присутствием в выбросе сверхновой радиоактивных изотопов, энергия распада которых поддерживает светимость материала выброшенного во время взрыва в видимой области спектра. Например, в ранней публикации Бэрбидж и др. (1956) предполагали, что энергия высвобождаемая в результате распада изотопа  $^{254}\text{Cf}$ , имеющего период полураспада  $\sim 60$  дней, достаточна чтобы объяснить кривую блеска сверхновой звезды.

Предположение что именно распад  $^{56}\text{Co}$  (период 77 дней), из цепи распадов  $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ , а не распад изотопа  $^{254}\text{Cf}$ , подпитывает яркость кривой блеска сверхновой было сделано в тезисах PhD диссертации Pankey (1962). Это указание было отмечено в 1969 году в статье Colgate and McKee (1969). Возможность наблюдений гамма-линий возникающих после распадов образованных в термоядерном взрыве сверхновой таких радиоактивных изотопов как изотопы  $^{56}\text{Ni}$  и  $^{44}\text{Ti}$ , а по их интенсивности, и параметрам кривой блеска сверхновой в оптическом излучении, делать вывод как о характере взрыва сверхновой, так и о продуктах термо-ядерного синтеза во время взрыва сверхновой, впервые были рассмотрены в статье Клэйтона, Колгэйта и Фишмана (Clayton, Colgate and Fishman 1969).

В этой же работе было обращено внимание на потенциальную возможность обнаружения остатков сверхновых в нашей Галактике с помощью прибора установленного на борту спутника и имеющего чувствительность на уровне  $\sim 4 \times 10^{-5} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  при регистрации гамма-линии с энергией 1.157 МэВ от цепочки распада  $^{44}\text{Ti} \rightarrow ^{44}\text{Sc} \rightarrow ^{44}\text{Ca}$ .

Экспериментальная проверка справедливости предсказаний роли распада радиоактивного  $^{56}\text{Ni}$  ( $^{56}\text{Co}$ ) в поведении кривой блеска сверхновой звезды была осуществлена с помощью прямых наблюдений результатов взрыва сверхновой 1987А (SN1987А) в Большом Магеллановом Облаке гамма-спектрометром GRS, работавшем на борту Solar Maximum Mission, и привели к регистрации гамма-линии с энергией  $843 \pm 5$  кэВ в спектре излучения SN1987А, с потоком на уровне  $(1.0 \pm 0.2) \times 10^{-3} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  (см. Matz et al. 1988). Вторая линия от распада  $^{56}\text{Co}$ , с энергией 1238 кэВ, была также зарегистрирована, но с меньшей достоверностью, с потоком величиной  $(6 \pm 2) \times 10^{-4} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Интересно, что в

работах посвященных регистрации рентгеновского излучения от SN1987A (Гребенев и Сюняев 1988; Kumagai et al. 1988), было показано что раннее появление жесткого рентгеновского излучения может быть объяснено комптонизацией излучения в гамма-линиях, а также, тем что масса  $^{56}\text{Co}$  в выбросе сверхновой, концентрируется в комках вещества сверхновой звезды, которые перемешаны по всему объему выброса вплоть до самых внешних слоев. Эти особенности перемешивания продуктов термоядерного синтеза при взрыве сверхновой типа SN1987A были позже объяснены с помощью довольно детального 2-мерного моделирования прохождения ударной волны от центра сверхновой до ее поверхности (Arnett, Fryxell, Mueller 1989).

Наблюдения гамма-линий от взрыва сверхновой SN1987A послужили стимулом для последующих предсказаний возможности наблюдения гамма-линий других изотопов от самой SN1987A, или от другой сверхновой, приборами COMPTEL и OSSE, установленными на борту гамма-обсерватории GRO, получившей после запуска 04 Апреля 1991 года имя Compton Gamma-Ray Observatory (CGRO). Конечно, к моменту запуска CGRO потоки фотонов в линиях с энергиями 847 кэВ, 1238 кэВ и 2596 кэВ, от распада  $^{56}\text{Co}$ , были уже существенно ниже порогов чувствительности приборов COMPTEL и OSSE, но регистрация линий от распада  $^{57}\text{Co}$ , с энергиями 122 кэВ и 136 кэВ, к моменту запуска CGRO еще оставалась актуальной задачей, и могла послужить целям определения соотношения синтезированных продуктов  $^{57}\text{Ni}/^{56}\text{Ni}$ , что несет в себе информацию о плотности нейтронов в зоне термоядерного синтеза (Woosley, Pinto, Hartman 1989).

Кроме того, к моменту запуска CGRO значительно вырос интерес также к возможной регистрации как присутствия, так и количества радиоактивного изотопа  $^{44}\text{Ti}$  в выбросе материала сверхновой. Этот изотоп титана должен синтезироваться примерно в той же зоне горения сверхновой что и изотопы никеля, но его количество выносимое наружу взрывной волной должно сильно зависеть от положения обрезания по массе выброса (Рис. 1).

Расчеты выполненные, например, в работах Woosley, Pinto, Weaver (1988), Woosley, Pinto, and Hartmann (1989), а также Kumagai et al. (1989), для конкретного случая модели взрыва сверхновой 1987A позволили предсказать наличие около  $10^{-4} M_{\odot}$   $^{44}\text{Ti}$  в сброшенной, эжектированной оболочке сверхновой. Этого количества  $^{44}\text{Ti}$  явно мало для надежной регистрации гамма-телескопами CGRO сигнала от распада этого изотопа в остатке SN1987A, как по излучению в гамма-линиях 68 кэВ и 78 кэВ от первого распада в цепочке превращений  $^{44}\text{Ti}$ , так и в линии 1157 кэВ от распада  $^{44}\text{Sc}$  в  $^{44}\text{Ca}^*$ , с последующим переходом  $^{44}\text{Ca}^*$  из возбужденного в основное состояние.

Действительно, для расстояния Большого Магелланового Облака от Земли порядка 55 кпс, поток фотонов в гамма-линии с энергией 1157 кэВ, от распада  $10^{-4} M_{\odot}$   $^{44}\text{Ti}$  в оболочке сверхновой, ожидается на уровне  $4 \times 10^{-6}$  фотонов/см<sup>2</sup> с, что существенно ниже минимально регистрируемых потоков от точечного

источника в этих гамма-линиях для приборов OSSE и COMPTEL. Более обнадеживающими были предсказания о возможности зарегистрировать гамма-линию от распада  $^{44}\text{Ti}$  от еще неизвестного, т.е. не зарегистрированного молодого остатка сверхновой в нашей Галактике, с возрастом  $\sim 100$  лет.

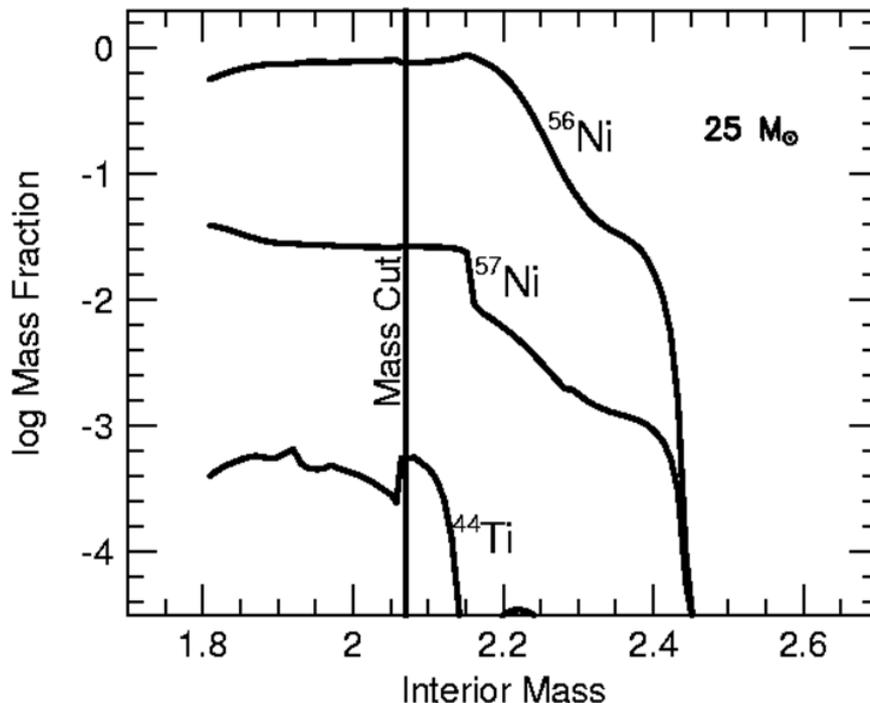


Рис. 1. Положение ожидаемого обрезания по массе выброса во взрыве сверхновой II-типа, в результате эволюции пред-сверхновой с массой в  $25 M_{\odot}$  (courtesy Hoffman 1996).

В случае образования  $\approx 10^{-4} M_{\odot}$  изотопа  $^{44}\text{Ti}$  во взрыве одной сверхновой, при расстоянии от остатка сверхновой до солнечной системы в  $d$  килопарсек, можно ожидать поток в гамма-линии с энергией 1.157 МэВ на уровне:

$$F_{1.157} \approx 1.4 \times 10^{-2} \exp(-t/\tau_{44}) 1/d^2 (\text{кпс}) (M_{44}/10^{-4} M_{\odot}) \text{ фот. см}^{-2} \text{ с}^{-1} \quad [1].$$

Поэтому, для молодого остатка сверхновой в районе центра Галактики, т.е. на расстоянии  $d \sim 8$  кпс от Солнца, можно ожидать потока на уровне  $2 \times 10^{-5} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  или более в линии с энергией 1.157 МэВ, в случае если возраст этого остатка равен или меньше 160 лет. Единственно существенной неопределенностью на период начала работы обсерватории CGRO для оценки возможности регистрации линии с энергией 1.157 МэВ от распада изотопа титана, была величина времени жизни радиоактивного  $^{44}\text{Ti}$  измеренная к тому времени экспериментально.

Известная на период 1991-92 гг. величина времени полураспада этого изотопа варьировалась по результатам измерений разных авторов от минимальной величины 46.4 лет до 67 лет, см. работы Adelberg, Harbottle (1990); Frekers et al. (1983), Wing, Wahlgren, Stevens, Orlandini (1965). Различие величин времени

полураспада изотопа  $^{44}\text{Ti}$  на период 1991-92 гг. приводит к вариации коэффициента  $1.4 \times 10^{-2}$  в выражения [1] на уровне 30%.

Довольно очевидно, что открытие одного, или нескольких, молодых остатков сверхновых в Галактике предоставит уникальную возможность исследования взаимодействия сверхновой с окружающей средой на ранних этапах эволюции остатка. Такая возможность, кстати, в действительности реализовалась для молодого, галактического остатка сверхновой RX J0852.0-4622, известного также под именем Vela Junior (Vela Jr.).

В принципе наблюдения новых молодых остатков сверхновых по их излучению в линии радиоактивного  $^{44}\text{Ti}$ , могут дать независимую оценку частоты взрывов сверхновых в нашей Галактике, которые не наблюдались в оптике уже более 400 лет. Наблюдения излучения в гамма-линиях от распада изотопа  $^{44}\text{Ti}$  также важны и для теории ядерного синтеза, так как позволяют уточнить влияние асимметрии взрыва сверхновой на обрезание массы компактного остатка коллапсирующей сверхновой, а также и на количество образующегося при этом изотопа  $^{44}\text{Ti}$ . Вообще говоря, выявление механизма взрыва сверхновой при коллапсе ядра звезды - это проблема, которая обсуждается теоретиками уже несколько десятилетий. Укажем три возможных способа взрыва: 1) взрыв под действием нейтринного излучения; 2) магнито-ротационный механизм взрыва сверхновой (см. Бисноватый-Коган (1989), с.38); 3) слияние и взрыв нейтронных звезд. Все эти механизмы в той или иной мере сопряжены с асимметрией.

На сегодня существует довольно много наблюдательных указаний на то, что взрывы сверхновых действительно асимметричны, в частности по наблюдениям сверхновых SN 1987A, SN 1997X, SN 2008ax и остатка сверхновой Кассиопея А (Cas A).

Известно также, что многие нейтронные звезды в остатках сверхновых, по результатам наблюдений разнесенных во времени, движутся со скоростями до 1000 км/с. Большой импульс, соответствующий этой скорости перемещения нейтронной звезды, пульсара, скорее всего, связан с асимметрией взрыва. Трехмерные изображения остатка Cas A показывают, что распределения кальция, серы и кислорода несимметричны относительно направления к наблюдателю. Простые сферические оболочки не наблюдаются. Компактный, звездный остаток от взрыва сверхновой в Кассиопее А, как и многие другие подобные остатки, имеет системную скорость движения относительно локальной межзвездной среды достигающую 350 км/с. Все эти наблюдаемые проявления асимметрии должны быть связаны с асимметричным истечением вещества в пред-сверхновых, которые заканчивают свою жизнь взрывами типа взрыва сверхновой в Cas A, или асимметричными взрывами в конце эволюции пред-сверхновых звезд типа Вольф-Райе.

Последние рентгеновские наблюдения Cas A, выполненные приборами на спутнике *Chandra*, показывают, что сгустки выброса богатые железом, находятся в более удаленных от центра остатка слоях, чем слои вещества обогащенные кремнием.

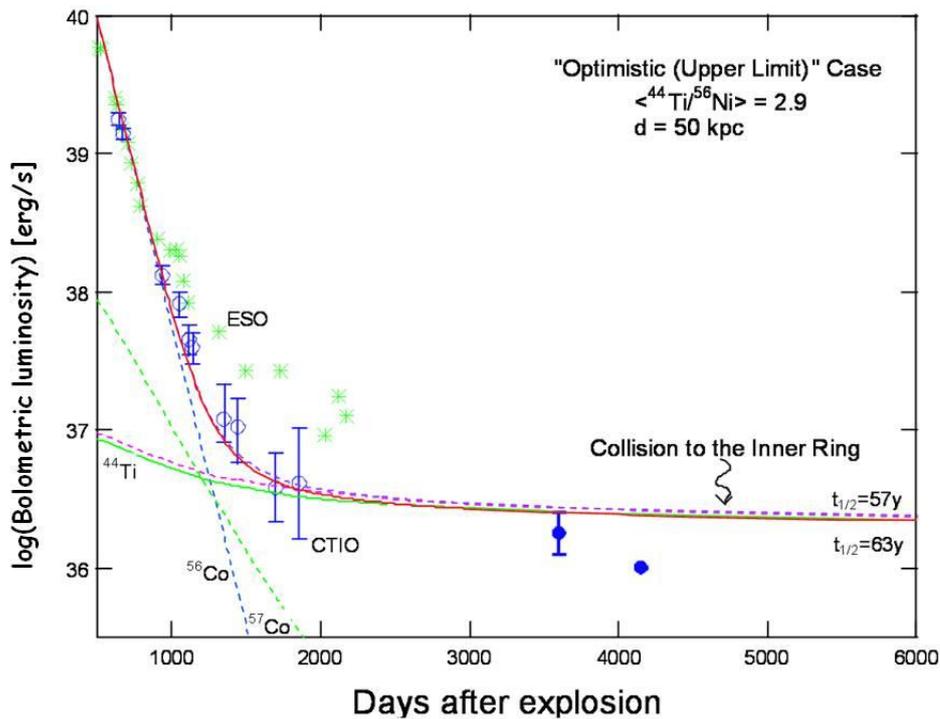


Рис. 2. Кривая болометрической светимости сверхновой SN1987A, и вклад в эту светимость обусловленный энергией распадов различных радиоактивных изотопов образованных в результате взрыва сверхновой (Motizuki and Kumagai 2004).

Подобные выбросы в виде сгустков за пределами основной оболочки наблюдались также спутником ROSAT для остатка Vela SNR. Связанные с этими «пулями» остатка Vela SNR радиоизлучающие ударные волны говорят о большой скорости вылета этих сгустков при взрыве сверхновой. Приведенные факты указывают на существование механизма перемешивания тяжелых продуктов нуклеосинтеза при взрыве сверхновой с асимметричным выносом этих продуктов во внешние слои оболочки сверхновой.

Второй, интересный, исследованный в данной работе изотоп  $^{22}\text{Na}$ , был предложен для гамма-астрономических наблюдений в работе Клэйтона и Хойла (Clayton, Hoyle 1974), поскольку эти и другие теоретики предсказывали большую частоту вспышек классических новых в районе галактического центра, с количествами суммарно выброшенного радиоактивного  $^{22}\text{Na}$  достаточного для наблюдений гамма-линии от  $^{22}\text{Na}$  в течение нескольких лет. В самом деле, ожидаемая частота вспышек новых в центре галактики, и время жизни изотопа  $^{22}\text{Na}$  около 3.75 лет, позволяли надеяться что накопленного в области центра галактики изотопа  $^{22}\text{Na}$ , будет более чем достаточно для его уверенной регистрации. Эта надежда была еще более подогрета открытием особого класса

классических новых в которых белый карлик оказался значительно обогащенным изотопом  $^{20}\text{Ne}$ , так называемые быстрые кислородно-неоновые новые (Law, Ritter 1982; Livio, Truran 1994).

Изотоп  $^{22}\text{Na}$  образуется также и во взрыве сверхновой. Масса  $^{22}\text{Na}$  образующегося во взрыве сверхновой II типа была также оценена в ряде работ, а также и поток в линии 1.275 МэВ от распада  $^{22}\text{Na}$  для коллапсирующей сверхновой в нашей Галактике.

Например, Woosley, Pinto, Hartman (1989) оценили массу  $^{22}\text{Na}$  в  $2 \times 10^{-6} M_{\odot}$  синтезируемого в той же зоне неоновой оболочки сверхновой что и радиоактивный  $^{26}\text{Al}$ , который был зарегистрирован экспериментом HEAO-3 (Mahoney et al. 1984). В случае вспышки такой сверхновой в нашей Галактике можно зарегистрировать поток излучения в гамма-линии 1.275 МэВ от распада  $^{22}\text{Na}$  величиной порядка:

$$F_{1.275} \approx 8.0 \times 10^{-3} \exp(-t / 3.75 \text{ лет}) / d^2 \text{ (кпс)} (M_{22} / 10^{-6} M_{\odot}) \text{ фот. см}^{-2} \text{ с}^{-1} \quad [2].$$

Хотя такой величины потока еще недостаточно чтобы уверенно регистрировать линию от сверхновой в Магеллановом Облаке, но достаточно для того чтобы зарегистрировать гамма-линию с энергией 1.275 МэВ от сверхновой в любой точке нашей Галактики, которая вспыхнула не более чем за 10 лет до наблюдений этой гамма-линии от точечного источника.

Современные астрофизические исследования в гамма-диапазоне электромагнитного излучения позволяют получить уникальные данные как об относительно близких, т.е. галактических, так и об очень отдаленных, метагалактических, космологических объектах, и возможно также о событиях происходивших в ранней Вселенной, в период зарождения звезд и галактик. Детальное изучение как галактических, так и внегалактических астрофизических источников возможно с использованием гамма-излучения МэВ-ного диапазона энергий, которое благодаря своему относительно малому сечению поглощения в межзвездной и межгалактической среде, может регистрироваться от объектов, которые находятся за оптически толстыми газо-пылевыми образованиями, не пропускающими прямое оптическое, радио или рентгеновское излучение.

Вместе с тем, даже гамма-излучение все таки поглощается веществом земной атмосферы, что вынуждает исследователей выносить аппаратуру за пределы земной атмосферы при проведении наблюдений в этом диапазоне электромагнитного излучения.

После запуска специализированных спутников, обсерваторий от многих астрофизических объектов, таких как: пульсары, ядра активных галактик, квазары, активные области на Солнце, и т.д., было зарегистрировано мощное гамма-излучение. Наблюдения в гамма-диапазоне привели к ряду неожиданных результатов. Среди них следует отметить открытие мощных всплесков космического гамма-излучения с энергией фотонов от 0,1 МэВ до нескольких

десятков ГэВ, а также открытие галактических дискретных источников как с  $E > 100$  МэВ (Hartman et al. 1996), так и с  $1 \text{ МэВ} \leq E \leq 30 \text{ МэВ}$  (Schoenfelder et al. 2001).

Диапазон гамма-излучения очень широк, и его принято условно делить на несколько участков, каждый из которых использует свою, характерную методику наблюдений, а именно: область мягкого гамма-излучения с  $E = 0,1 - 5$  МэВ, область промежуточных энергий с  $E = 5 - 50$  МэВ, область жесткого гамма-излучения с  $E = 50 \text{ МэВ} - 10 \text{ ГэВ}$ , и область гамма-излучения сверхвысоких энергий с  $E > 10 \text{ ГэВ}$ .

Область линейчатого гамма-излучения попадает в область мягкого излучения и излучения с промежуточными энергиями, потому что нам известны как гамма-линия с энергией 122 кэВ от распада радиоактивного изотопа  $^{57}\text{Co}$ , так и линия с энергией 15.1 МэВ излучаемая ядрами возбужденного  $^{12}\text{C}^*$  при переходе в основное состояние.

Энергии фотонов гамма-линий резонансного поглощения занимают область несколько более высоких энергий, простираясь от энергии  $\sim 4$  МэВ для дейтерия, до 25 МэВ для ядер  $^4\text{He}$  и других, более тяжелых чем гелий ядер, т.е. энергий характерных для процесса поглощения фотонов в результате гигантского дипольного резонанса на том или ином ядре. В то же время поглощение гамма-фотонов путем образования дельта-избарного резонанса происходит при энергии  $\sim 325$  МэВ, как в случае поглощения фотона отдельным нуклоном, так и для поглощения фотона ядром, состоящим из двух и более нуклонов.

Таким образом, ядерные гамма-линии несут в себе важную информацию о составе и эволюции межзвездной и межгалактической среды, а тем самым о структуре и эволюции Вселенной. Так как гамма-излучение, в том числе и в линиях, обладает высокой проникающей способностью, оно может быть использовано для получения информации о процессах происходящих в чрезвычайно удаленных областях Вселенной. Из самых далеких наблюдаемых гамма-источников можно отметить гамма-всплески, галактики и квазары, см., например, обзорную статью Fan, RA&A, vol.12, p. 865 (2012).

Анализ спектров гамма-линий поглощения позволяет получить информацию о красном смещении неопознанных далеких источников гамма-излучения, удаленных от нас на космологические расстояния, помогая таким образом их последующей идентификации в других длинах волн, а также позволяя выяснить природу физических процессов, происходящих в подобных источниках, в том числе и на стадии вспышечной активности ядер активных галактик, в частности блазаров. Эта методика может быть использована также и для определения красного смещения гамма-всплесков по спектру их гамма-излучения.

## **Цель работы**

Целью работы является: 1) - последовательное исследование линейчатого гамма-излучения от астрофизических объектов путем целенаправленных и обзорных наблюдений потенциальных галактических и метагалактических источников гамма-излучения.

2) - анализ физических характеристик астрофизических объектов, таких как молодые остатки сверхновых, классические новые, используя параметры характерных гамма-линий от распадов изотопов, ключевых для понимания физики процесса образования, и переноса этих изотопов, синтезированных во взрывном нуклеосинтезе объекта исследования, как в процессе взрыва, так и после его завершения, т.е. на стадии эволюции остатка взорвавшегося объекта, например, новой или сверхновой звезды. Анализ смещения гамма-линии, ее уширения и изменение формы линии, позволяет получить дополнительную информацию о свойствах объекта, например, о скорости расширения оболочки сверхновой, или об асимметрии взрыва сверхновой.

3) – проверить экспериментально возможность получения информации о красном смещении и о свойствах среды окружающей ядра активных галактик, путем анализа информации о характерных гамма-линиях, в том числе и линий поглощения.

## **Научная новизна работы.**

В представленной работе впервые произведено надежное, позже подтвержденное многими другими приборами, детектирование линии 1.157 МэВ излучения изотопа  $^{44}\text{Ti}$  от молодого остатка сверхновой в нашей Галактике, а именно от Кассиопеи-А (возраст на сегодня около 330 лет).

Также впервые линия 1.157 МэВ была использована для обнаружения ранее не известного молодого остатка сверхновой в Галактике RX J0852.0-4622/GRO J0852-4642, позже получившего название Vela Junior.

Впервые форма линии 1.157 МэВ использована для получения информации об асимметричном характере взрыва сверхновой в которой родился остаток Кассиопея А, а также и для взрыва сверхновой образовавшей остаток Vela Jr.

Впервые построены карты Галактики в линиях 1.157 МэВ и 1.275. Показано существование выделенного избытка излучения в линии 1.275 МэВ от галактического балджа, которое объяснено совокупным излучением изотопа  $^{22}\text{Ne}$ , возбужденного галактическими космическими лучами с характерной энергией 30-100 МэВ/нуклон.

Впервые зарегистрировано излучение в линии 1.275 МэВ от медленной классической новой Новая Кассиопеи 1995 г., что ставит новые вопросы перед современной моделью эволюции двойных систем классических новых.

Впервые предложена и опробована методика применения гамма-линий резонансного поглощения для определения красного смещения объектов обладающих струеподобными релятивистскими выбросами вещества, для

определения оптической толщи на пути гамма-излучения от подобных объектов, и оценки металличности окружающей эти объекты среды.

### **Практическая значимость работы.**

Впервые диссертантом был разработан и применен метод анализа спектральной плотности излучения в струях (джетах) от источников гамма-излучения для получения оценки их красного смещения, что очень важно для последующей спектральной идентификации неопознанных источников гамма-излучения.

Результаты данной работы по исследованию излучения в гамма-линиях были использованы для обоснования активно работающей в настоящее время обсерватории ЕКА «INTEGRAL», для недавно запущенного эксперимента NuSTAR, для обоснования планируемых, или планировавшихся, к запуску в ближайшие годы экспериментов NeXT, ASTRO-H и Simbol-X, а также и многих других, еще не запущенных экспериментов в области гамма-астрономии, таких как ACT, DUAL, ГРОМ, CAPSiTT и др..

Полученные в данной работе результаты были использованы, а также могут быть использованы и в будущем для разработки экспериментальных методов поиска и диагностики физического состояния, возраста остатков сверхновых в нашей Галактике, а при существенном улучшении чувствительности гамма-телескопов к МэВ-ному гамма-излучению, и для регистрации сверхновых в ближайшей Метагалактике. В то же время применение методики регистрации гамма-линий резонансного поглощения позволит исследовать этапы эволюции ранней Вселенной.

### **Достоверность результатов.**

Достоверность экспериментальных результатов, полученных в диссертации, подтверждается сравнением с данными других, как более поздних космических экспериментов, в том числе: PDS (Beppo-SAX), HEXTE (RXTE), IBIS(ISGRI) INTEGRAL, ASCA, XMM-Newton, Chandra, так и одновременными измерениями приборов EGRET CGRO, OSSE CGRO, и др., где такие данные имеются.

### **Апробация работы**

Перечисленные выше результаты докладывались на многочисленных конференциях у нас в стране и за рубежом ( всего около 100 докладов). Автор работы являлся приглашенным докладчиком на 20 международных конференциях и симпозиумах.

А именно:

на Международной Конференции по Ядерной Физике 1998 г. , г. Париж, Франция; на Втором Комптоновском Симпозиуме в 1993 г., Мэриленд, США;

на Пятом Комптоновском Симпозиуме в Портсмуте, США, в 1999 г.; на симпозиуме «Gamma-Ray Astrophysics - 2001» в г. Балтимор, США, в 2001 г.; на Международном симпозиуме в Йокогаме «New Century of X-ray astronomy» 2001 г.; Международном симпозиуме «Gamma-Ray Bursts: Prospects for GLAST» в Стокгольме, 2006 г.; на секции Генеральной ассамблеи Международного Астрономического Общества в Рио-де-Жанейро, 2009 г.; на Втором Международном Симпозиуме по «Гамма-Астрономии Сверхвысокой Энергии», 2004 г., Гейдельберг, Германия; на Астрофизическом Симпозиуме Европейской Южной Обсерватории «Relativistic Astrophysics and Cosmology – Einstein's Legacy» 2005 г., Мюнхен, Германия.

Отдельные результаты работы докладывались также: на Всероссийских астрофизических конференциях «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра, 2003, 2005 и 2006 гг.»; на объединенном митинге Европейского и Национального астрономических обществ 1997 г., г. Тессалоники, Греция; на Коллоквиуме № 158 «Cataclysmic variables and related objects» Международного Астрономического Общества, состоявшемся в 1995 в г. Киель, Великобритания; на 2-ом, 3-ем, 4-ом, и 5-ом симпозиумах по проекту ИНТЕГРАЛ состоявшихся в 1997, г. Ст.-Мало, Франция; в 1998, в г. Таормина, Италия; в 1999, в г. Аликанте, Испания; в 2000, в г. Мюнхен, Германия, соответственно, и, наконец, на шестом симпозиуме по проекту ИНТЕГРАЛ «The obscured Universe» состоявшемся в 2006, в г. Москва, Россия; на семи международных симпозиумах «Nuclear Astrophysics» организованных Институтом Макса-Планка по астрофизике в 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010 и в 2012 гг.; на международных симпозиумах по теме «Astronomy with Radioactivities» проводимых в 1999, 2001 гг.; в рамках Workshop within the Munich Cluster of Excellence “Origin and Evolution of the Universe” в 2009 г.; на международном симпозиуме «Baryons in Dark Matter Halos» состоявшемся в 2004 г. в г. Новиград, Хорватия;

Результаты работы также докладывались и обсуждались на семинарах ИНАСАН, НИИЯФ МГУ, ФИАН, ФТИ имени А.Ф. Иоффе, семинарах Институтов Макса-Планка по Астрофизике и Внеземной физики; Института Астрофизики секции Болонья (IASF-INAF) г. Болонья, Италия; на семинаре Университета Иннсбрука, г. Иннсбрук, Австрия; на семинаре факультета физики Саутгемптонского университета, г. Саутгемптон, Великобритания; на семинаре Бохумского университета, г. Бохум, Германия; на семинарах кафедры Астрономии университета Стокгольма, г. Стокгольм, Швеция; на семинарах в центрах «САКЛЕ», г. Жив-сюр-Иветт, и «ОРСЭ», г. Орсе, Франция; на совместных семинарах Тулузского университета и Обсерватории Верхнего Прованса, г. Тулуза, Франция; на семинаре университета в г. Йена, Германия; на семинарах университета в г. Тюбинген, Германия; на семинаре национального астрономического центра Австралии в г. Сидней, Австралия; на семинаре Токийского университета, г. Токио, и Киотского университета, г. Киото, Япония.

Результаты работы опубликованы в 54 статьях в рецензируемых журналах. Основные результаты работы цитируются в тексте диссертации. Выполненная работа поддерживалась также грантами РФФИ, стипендиями немецкого Общества Макса-Планка и грантами космического агентства Германии.

### **Личный вклад автора**

Автор принимал активное участие в разработке и планировании программ наблюдений, что подтверждается принятыми предложениями для наблюдений обсерваторией КГО, выполненными радио наблюдениями на радиотелескопе АТСА, Австралия; наблюдениями на оптических телескопах NTT (ЕММI), и на широкоапертурном имэджеру установленном на 2.2 м телескопе общества Макса-Планка ( MPG) Европейской Южной Обсерватории, рентгеновской обсерватории ЕКА ХММ-Newton.

Автором были разработаны методики отбора полезных событий из числа регистрируемых гамма-квантов для комптоновского телескопа на борту КГО, методика построения спектров для точечных объектов в плоскости Галактики; методика коррекции критериев отбора с учетом выключенных, и утративших первоначальную эффективность регистрации частиц детекторов второго уровня прибора КОМПТЕЛ, учета при обработке зависящего от времени работы обсерватории сдвига пороговой энергии регистрации полезных событий детекторов первого уровня регистрации гамма-квантов прибора КОМПТЕЛ. Автор выполнял также первичную обработку и анализ сырых данных прибора КОМПТЕЛ, прежде всего для отбора массивов данных не загрязненных частицами радиационного пояса, или гамма-квантами приходящими от направления на горизонт атмосферы Земли, а также обработку и анализ данных высокого уровня обработки для приборов COMPTEL, BATSE, EGRET и OSSE при анализе спектров излучения объектов типа ядра активных галактик или рентгеновских новых, и т.д., и т.п.. Автором выполнен также астрофизический анализ полученных результатов, анализ стабильности и достоверности полученных результатов по величине потоков в гамма-линиях, энергии гамма-линий, и формы гамма-линий.

**Степень обоснованности научных положений, рекомендаций и выводов,** полученных в работе определяется использованием хорошо калиброванных приборов, с калибровкой выполненной как до запуска аппаратуры, так и в течение проведения наблюдений приборами КГО в течении всего времени существования обсерватории. Учитывались времена работы прибора КОМПТЕЛ в период с 26 апреля 1991 г. до 04 июня 2000 г., а также, учитывались отказы отдельных модулей плоскости детекторов Д2 прибора КОМПТЕЛ. Также использовалось наличие больших массивов наблюдательных данных,

позволяющих проверить повторяемость результатов в условиях проведения наблюдений в различных временных фазах работы обсерватории КГО, и сопоставление с результатами более поздних наблюдений других приборов, которые подтверждают результаты полученные автором.

## **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из восьми глав, где первая глава является введением в проблематику представленной диссертации, заключения и списка цитируемой литературы из 337 наименований. Общий объем диссертации составляет 256 страниц, включает 107 рисунков и 11 таблиц.

## **Содержание работы**

В **Введении** (Глава 1) обосновывается актуальность выбранной темы, определяются предмет и цели исследований, отмечается научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения выносимые на защиту, дано краткое содержание диссертации.

В **Главе 2** работы излагаются сведения о методах исследования астрофизических объектов базирующихся на использовании регистрируемого гамма-излучения, включая линейчатое гамма-излучение от этих объектов, а также основные принципы работы приборов использованных в этой работе для регистрации гамма-излучения от астрофизических объектов, и методах обработки регистрируемых данных.

В **разделе 2.1** описаны принцип работы прибора КОМПТЕЛ, и показаны подходы к анализу гамма-излучения от точечных источников по результатам наблюдений этих источников прибором КОМПТЕЛ (COMPTEL).

COMPTEL регистрировал гамма-кванты с энергиями от 700 кэВ до 30 МэВ по результатам их комптоновского взаимодействия с детекторами прибора, обладал умеренными угловым  $\sim 2^\circ$ , и энергетическим разрешением  $\sim 9\%$ , и мог детектировать МэВ-ные фотоны в довольно широком поле зрения ( $FoV \geq 120^\circ$ ) (Schoenfelder et al. 1993). COMPTEL проработал на борту Комптоновской Гамма-Обсерватории (КГО, или CGRO в английской транскрипции) с апреля 1991 года до июня 2000 года. Будучи телескопом COMPTEL мог наблюдать избыток излучения от места нахождения объекта на карте звездного неба, а также искать линии в спектре гамма-квантов регистрируемых от этой точки звездного неба с координатами заданного объекта в режиме мониторинга, используя наблюдения нацеленные на совсем другой астрофизический объект.

В главе описана методика отбора полезных событий от выбранного точечного источника, принципы борьбы с фоновыми событиями в наборе данных, для которых отбирались наблюдения в которых положение источника было не далее  $50^\circ$  от оси симметрии телескопа COMPTEL. Так, для поиска сигнала в гамма-

линии 1.275 МэВ от двух ярких новых Новая Геркулеса 1991, и Новая Лебедя 1992, с максимальной чувствительностью, были использованы 34 периода наблюдений позиции новой начиная с июля 1991 года и по сентябрь 1993 года (Таблица 1 в статье Iyudin et al. 1995). Описана методика создания стандартного набора данных одного наблюдения, включающего в себя геометрическую матрицу прибора, матрицу экспозиции, и матрицу событий отобранных по согласованным (стандартным) критериям отбора полезных событий (Schoenfelder et al. 1993) для всех используемых наблюдательных периодов. В разделе также описан анализ отобранных данных, который проводился двумя методами. Прежде всего избыток излучения в гамма-линии искался в пространственных координатах, т.е., с помощью построения карты звёздного неба в выбранном интервале энергий, который задавался равным  $4\sigma_{\text{прибора}}$ , т.е.  $E_{\text{линии}} \pm 2\sigma_{\text{прибора}}$ , а затем, также и спектральным методом с целью получения спектра гамма-излучения от заданной точки на карте звёздного неба. Обе эти стадии анализа избытка излучения в гамма-линии описаны последовательно в подразделах 2.1.3.1 и 2.1.3.2 раздела 2.1 диссертации. Этот анализ применялся не только к обработке данных для линий 1.157 МэВ и 1.275 МэВ и их источников, но и для гамма-линий других энергий, как например для линий 1.332 МэВ, 1.634 МэВ, и т.п..

В этой же **Главе 2, раздел 2.2** приведено описание прибора ЭГРЕТ, объясняется принцип регистрации фотонов прибором, и стандартная методика обработки регистрируемых данных прибором ЭГРЕТ, которые использовались в данной работе для построения спектров ЯАГ в широком диапазоне энергий от 700 кэВ до 30 ГэВ.

В **Главе 3** приводятся результаты исследований молодого галактического остатка сверхновой Кассиопея А в линии 1.157 МэВ, испускаемой при распаде радиоактивного изотопа  $^{44}\text{Ti}$ . Рассмотрены результаты первой регистрации гамма-линии с энергией 1157 кэВ, завершающей цепочку распада радиоактивного  $^{44}\text{Ti}$ , что было впервые доложено в 1993 году нами (Iyudin et al. 1994a), при анализе данных наблюдений прибором COMPTEL молодого остатка галактической сверхновой Cas A (Рис. 3).

Далее в главе описывается процедура собственной верификации полученного результата на основе больших массивов наблюдательных данных прибора КОМПТЕЛ, а также попытки получить независимое подтверждение измерений прибора КОМПТЕЛ другими приборами. К сожалению, такое подтверждение было получено только в 2001 году, по результатам наблюдений остатка Кассиопея А прибором PDS работавшим на борту итальянского спутника Верро-SAX, удалось получить уверенное подтверждение регистрации присутствия радиоактивного изотопа  $^{44}\text{Ti}$  в остатке сверхновой Кассиопея А путем регистрации двух других линий от распада  $^{44}\text{Ti}$  в  $^{44}\text{Sc}$ , на энергиях

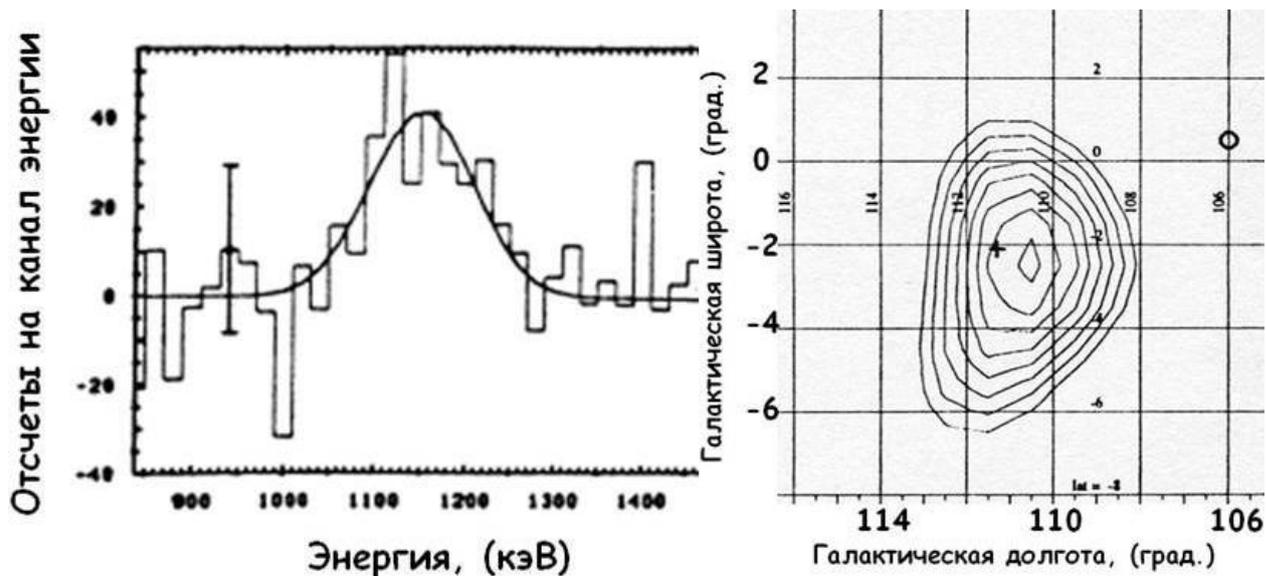


Рис. 3. Слева: Спектр гамма-излучения в линии 1.157 МэВ от распада радиоактивного изотопа  $^{44}\text{Ti}$  полученный по измерениям прибором COMPTEL в первой фазе экспериментов КГО. Справа: Карта области вокруг остатка сверхновой Кассиопея А в гамма-линии 1.157 МэВ. Положение самого остатка Кассиопея А показано крестом.

~68 кэВ, и ~78 кэВ, тем самым подтвердив наличие еще не распавшегося, т.е. «живого»  $^{44}\text{Ti}$  в Cas A, синтезированного во взрыве сверхновой типа IIb, как было показано в работе Krause et al. (2008).

Существенным фактором, взаимно подтверждающим достоверность результатов различных инструментов, является то обстоятельство, что величины потоков излучения измеренные в линии 1157 кэВ, ~68 кэВ, и ~78 кэВ, в конечном итоге оказались сопоставимы по своей величине, в пределах ошибок измерений.

Заметим также, что первоначально опубликованная величина потока в линии 1.157 МэВ, была после публикации 1994 г (Iyudin et al. 1994b) уточнена с учетом большей экспозиции прибором COMPTEL остатка сверхновой Cas A набранной к 1997 году (Iyudin et al. 1997), и за все время работы КГО (Iyudin et al. 1999; Schoenfelder et al. 2001).

В главе далее рассмотрены последствия доплеровского уширения линии 1.157 МэВ для теории взрыва звезды с учетом асимметричного разлета выброса содержащего тяжелые элементы типа титана и железа, синтезированных во взрыве звезды массой 20-25 М. Анализируется также возможное влияние скорости движения ядер титана в среде на ионизационное состояние титана, т.е. на величину времени распада титана в скандий через захват электронов с К оболочки иона титана.

В **Главе 4** проводится обсуждение практического использования гамма-линии от распада  $^{44}\text{Ti}$  для обнаружения других молодых остатков сверхновых в Галактике, которые не наблюдались в других диапазонах электромагнитного

излучения, приводятся результаты построения и анализа карты излучения галактики в гамма-линии с энергией 1.157 МэВ.

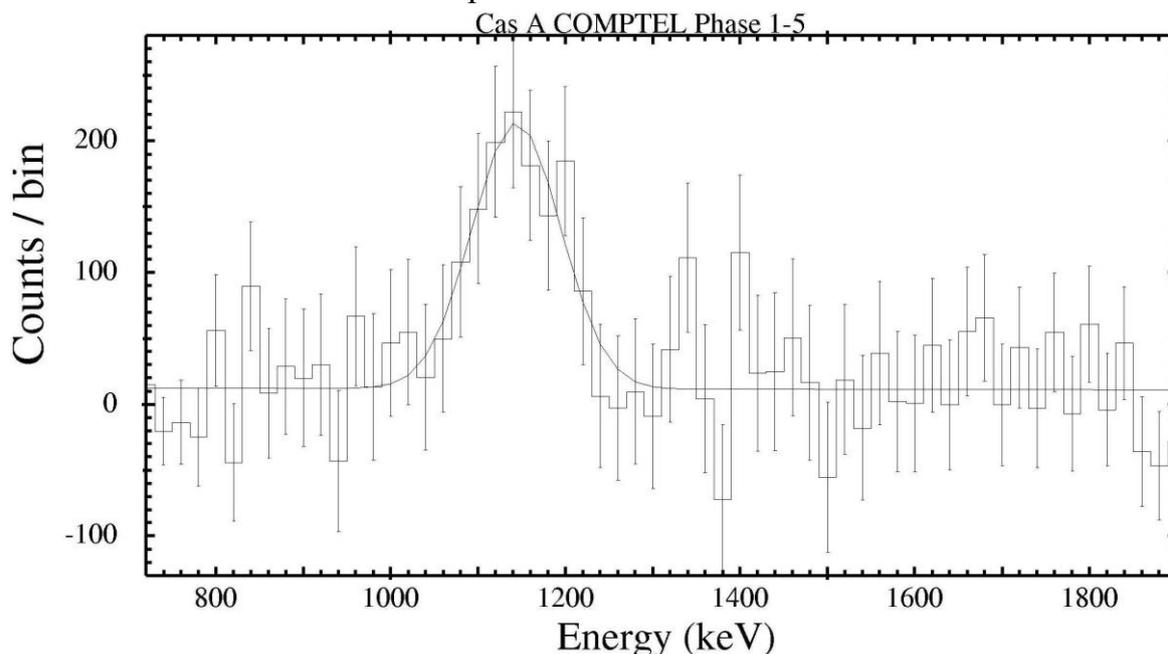


Рис. 4. Спектр гамма-линии от распада радиоактивного изотопа  $^{44}\text{Ti}$  через цепочку распадов  $^{44}\text{Ti} \rightarrow ^{44}\text{Sc} \rightarrow ^{44}\text{Ca}$  в стабильный изотоп  $^{44}\text{Ca}$  полученный в комбинации наблюдений прибором COMPTEL остатка сверхновой Cas A, выполненных за период работы прибора на борту CGRO в течение 1991-1997 гг.

Первая попытка построения такой карты была выполнена с моим участием и базировалась на экспозиции галактического неба, накопленной в течении 3 лет работы прибора COMPTEL на борту КГО, см. Dupraz et al. (1997).

Метод использованный для построения этой карты базировался на сравнении карт галактики в трех соседних диапазонах энергии гамма-излучения. А именно, для построения карт использовался метод максимального правдоподобия в интервале энергии гамма-линии от распада изотопа  $^{44}\text{Ti}$  от 1.07 МэВ до 1.25 МэВ, что немного больше чем энергия линии  $1.157 \text{ МэВ} \pm 2 \sigma_{\text{прибор}}$ , а также в двух соседних интервалах энергии той же ширины, т.е., от 0.89 МэВ до 1.07 МэВ, и от 1.25 МэВ до 1.43 МэВ.

Сопоставление избытков излучения в работе Dupraz et al. (1997), в трех соседних интервалах энергии гамма-излучения, позволило подтвердить наличие избытка излучения в диапазоне энергии линии 1.157 МэВ от остатка сверхновой Кассиопеи А.

В окончательном виде карта галактического неба в гамма-линии 1.157 МэВ была построена автором данной работы (Iyudin 1999; Iyudin et al. 1999) на базе данных прибора COMPTEL аккумулярованных в течение 6 лет работы прибора с момента его запуска и до второго подъема орбиты КГО. В главе далее обсуждаются методы анализа карты неба в гамма-линиях разработанные в период 1994-1997 гг., и результаты применения наиболее жестких критериев отбора полезных событий разработанных автором данной работы.

Анализ этой карты позволил сделать вывод о том что наряду с существенно более значимым выделением избытка излучения в линии 1.157 МэВ от остатка в Кассиопее А, на карте обнаружен еще один избыток излучения в линии 1.157 МэВ в плоскости Галактики.

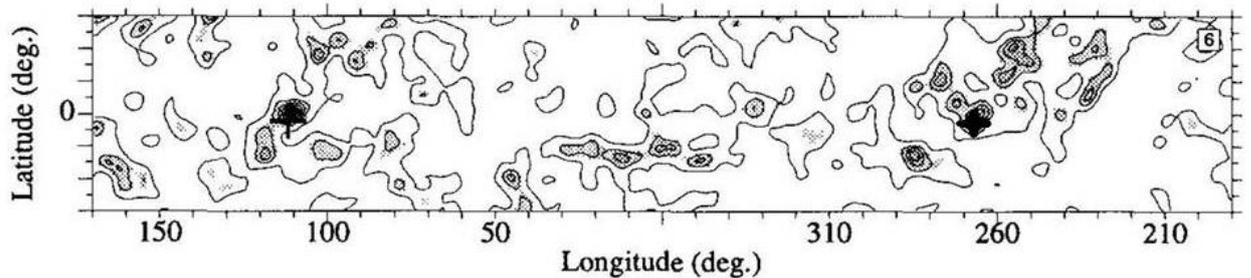


Рис. 5. Карта плоскости галактики в излучении гамма-линии 1.157 МэВ построенная с помощью метода максимальной энтропии. Знаком плюс отмечены позиции двух значимых избытков излучения от точечных источников соответствующих позиции Кассиопеи А, и позиции нового остатка сверхновой (Vela Jr.) в созвездии Дева.

Значимость этого второго избытка была установлена равной  $\sim 7\sigma$ , и поток излучения в линии 1.157 МэВ от этого нового источника был определен равным  $F_{1.157 \text{ МэВ}} = (3.8 \pm 0.7) 10^{-5}$  фотонов  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$  (см. Iyudin et al. 1998; Iyudin 1999; Iyudin et al. 1999).

Результаты выполненного картографирования галактического неба в линии с энергией 1.157 МэВ были использованы как база для работы посвященной частоте взрывов сверхновых в Галактике, и физическим особенностям механизма самих взрывов, см. статью The et al. (2006). В глае обсуждаются также полученные верхние пределы на поток излучения в линии 1.157 МэВ изотопа  $^{44}\text{Ti}$  от исторических сверхновых. Заметим, что рассчитанное количество изотопа  $^{44}\text{Ti}$  в остатках исторических сверхновых зависит от принятой величины расстояния до остатка, и от величины времени жизни  $^{44}\text{Ti}$ , которое было взято равным 87 годам для таблицы приведенной ниже.

В **Главе 5** приводятся и обсуждаются результаты исследований свойств нового остатка сверхновой Vela Jr., в различных диапазонах электромагнитного излучения.

Выводы о возрасте и возможном удалении этого остатка в созвездии Дева были проанализированы нами в статьях Iyudin et al. (1998), Aschenbach, Iyudin and Schoenfelder (1999), и Iyudin et al. (2007), и сводятся к следующим основным характеристикам остатка. Приняв количество синтезированного в сверхновой изотопа  $^{44}\text{Ti}$  на уровне предсказанном в работах Woosley and Weaver (1995), т.е.  $5 \times 10^{-5} M_{\odot}$ , и учитывая среднюю скорость расширения оболочки остатка величиной в 5000 км/сек, возраст остатка может быть оценен величиной в  $680 \pm 100$  лет, при удаленности остатка порядка 200 парсек. В предположении максимально возможного выхода синтезированного во взрыве сверхновой  $^{44}\text{Ti}$ , расстояние до остатка может быть увеличено до 500 парсек, но при этом возраст

остатка должен быть также больше. В главе приводится подробное обсуждение пределов на возраст и расстояние до этого вероятно молодого, остатка сверхновой.

В главе также обсуждается интересная особенность обеих остатков, Кассиопея А, и Vela Jr., которая проявляется как большая скорость движения сгустков материала сверхновой которые содержат изотоп  $^{44}\text{Ti}$ . Учет движения сгустков вещества сверхновой и соответствующего Доплеровского уширения линии 1.157 МэВ за счет этого движения, привели к оценке скорости движения материала содержащего изотоп  $^{44}\text{Ti}$  в Кассиопее А величиной  $V_{44\text{Ti}} = 7200 \pm 2900$  км/сек.

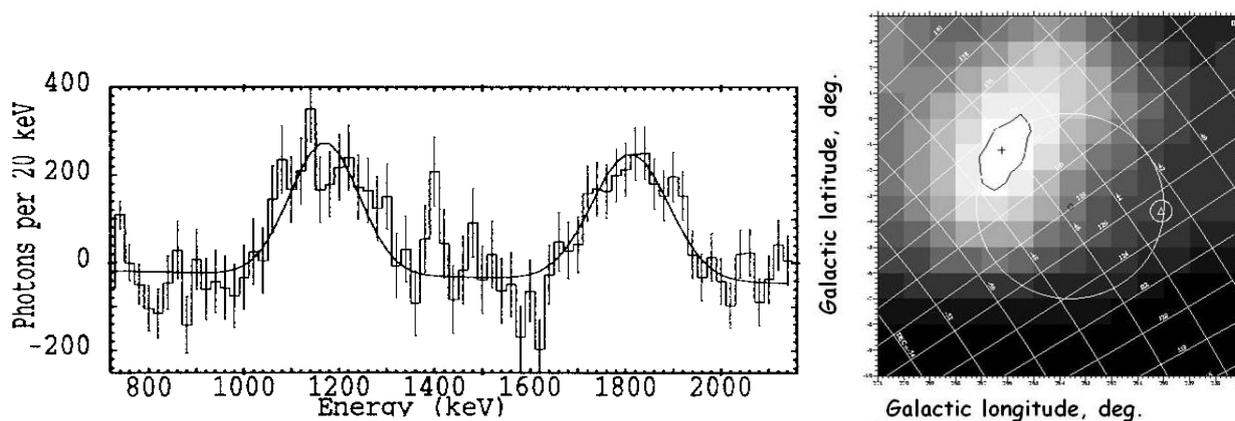


Рис. 6. Слева: спектр гамма-излучения от нового точечного источника линейчатого гамма-излучения в линиях 1.157 МэВ и 1.809 МэВ, который был одновременно идентифицирован с остатком сверхновой RX J0852.0-4622/GRO J0852-4642 по результатам анализа данных рентгеновского телескопа спутника ROSAT (Aschenbach 1998), и в результате анализа данных COMPTEL (Iyudin et al. 1998). Справа: положение избытка излучения в линии 1.157 МэВ показано контуром, и положение центра рентгеновского источника RX J0852.0-4622 для энергий рентгена от 1.3 кэВ до 2.4 кэВ обозначено крестом.

Сравнение полученной скорости движения сгустков изотопа  $^{44}\text{Ti}$  с измеренными несколько позже скоростями движения материала выброса сверхновой в Кассиопее А которые определены набором скоростей вещества сверхновой от 6500 км/сек до 14500 км/сек (Fesen et al. 2006; Hammell and Fesen 2008), поддерживает возможность существования таких скоростей сгустков выброса содержащего  $^{44}\text{Ti}$  в остатке Кассиопея А.

Это обстоятельство, а также и само количество изотопа  $^{44}\text{Ti}$ , которое нужно для объяснения зарегистрированного потока излучения в гамма-линии 1.157 МэВ от остатка сверхновой Кассиопея А, и которая на сегодня определяется величиной порядка  $Y_{\text{CasA}}(^{44}\text{Ti}) = (1.4 \pm 0.4) \times 10^{-4} M_{\odot}$ , наталкивают на мысль, что взрыв сверхновой в Кассиопее А, а также и сверхновой ответственной за остаток RX J0852.0-4622, где выброс содержащий  $^{44}\text{Ti}$  движется с еще большей, нежели в Кассиопее А, скоростью  $V_{44\text{Ti}} = 14300 \pm 3700$  км/сек, был очень асимметричным,

джетоподобным. Заметим, что прямые измерения потоков в линиях 68 и 78 кэВ от распада  $^{44}\text{Ti}$  в остатке SN 1987A дали большую величину для массы  $^{44}\text{Ti}$  синтезированного во взрыве SN 1987A, а именно  $Y(^{44}\text{Ti}) = (3.1 \pm 0.8) \times 10^{-4} M_{\odot}$  (Grebenev et al. 2012), что в два раза превышает расчетные предсказания. Известно, что взрыв SN 1987A был асимметричным (Wang et al. 2002; Wang and Wheeler 2008), и это обстоятельство делает наблюдения излучения в линии  $^{44}\text{Ti}$  от остатков сверхновых еще более интересными и информативными.

Далее в главе описана продолжающаяся работа по подтверждению молодого возраста остатка RX J0852.0-4622/GRO J0852-4642, G266.2-1.2, или Vela Jr.. Высказывается мнение, что для уверенного подтверждения регистрации гамма-линий от остатка Vela Jr. необходимо использовать широкоугольный телескоп с умеренным энергетическим разрешением порядка нескольких процентов на энергиях в 68 кэВ, 78 кэВ и/или 1157 кэВ. Такие параметры гамма-телескопа достижимы в телескопах использующих методику комптоновского рассеяния. В главе также обсуждаются морфологические особенности остатка Vela Jr. по измерениям в различных длинах волн простирающихся от радио диапазона и до сверхвысоких, ТэВ-ных энергий гамма-излучения и делается вывод о том что остаток относится к остаткам со смешанной морфологией, с размерами остатка существенно большими нежели размеры заявленные в первой публикации о форме остатка в рентгеновских лучах с  $E_x > 1.3$  кэВ.

В **Главе 6** приводятся результаты исследований гамма-излучения в линии  $^{22}\text{Na}$  с энергией 1.275 МэВ от классических новых вспыхнувших в Галактике в период 1991-1999 г.г..

Вспышка классической новой звезды моделируется как термоядерный взрыв в аккрецированной, богатой водородом оболочке белого карлика, находящегося в двойной системе. При взрыве новой ожидается синтез нескольких радиоактивных изотопов  $^7\text{Li}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{22}\text{Na}$  и  $^{26}\text{Al}$ . Наблюдательные данные классических новых полученные в оптическом, УФ и ИК диапазонах неплохо согласуются с моделью термоядерного взрыва в оболочке новой (Gallagher & Starrfield 1978; Gehrz, Truran, Williams & Starrfield 1998).

Интерес к исследованию синтеза радиоактивных изотопов во взрыве новой подогревается предполагаемой ролью распадов этих изотопов во время самого явления, на стадии расширения и выброса оболочки новой.

Гамма-линии от распадов  $^{22}\text{Na}$  и  $^{26}\text{Al}$  могут регистрироваться так как эти ядра имеют относительно большое время жизни для того чтобы расширяющаяся оболочка выброса новой стала прозрачной для гамма-квантов образующихся в распадах  $^{22}\text{Na}$  и  $^{26}\text{Al}$ .

Радиоактивный изотоп  $^{22}\text{Na}$ , образующийся при взрыве новой, распадается с характерным временем жизни 3.75 лет в возбужденное состояние изотопа  $^{22}\text{Ne}$ , испуская при этом гамма-линию с энергией 1.275 МэВ.

В главе рассматриваются оценки возможности детектировать линию  $^{22}\text{Na}$  от классической новой, взрывающейся на расстоянии порядка 1 кпс от Солнца. Если полная масса  $^{22}\text{Na}$  в оболочке новой может достигать величин порядка  $10^{-8}$  массы Солнца, то такое количество ядер  $^{22}\text{Na}$  можно наблюдать в линии 1.275 МэВ на уровне потоков  $\sim 4 \times 10^{-5} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  (Weiss & Truran 1990). Отмечается также, что даже на сегодня существует большая неопределенность в предсказаниях количества  $^{22}\text{Na}$  синтезируемого при взрыве новой (Bishop et al. 2003; D'Auria et al. 2004; Jenkins et al. 2004; Coc 2008; Sallaska et al. 2010).

В главе приведены примеры попыток зарегистрировать гамма-излучение новой в линии 1.275 МэВ, которые предпринимались в прошлом, но не были успешными (Leventhal et al. 1977; Mahoney et al. 1982; Leising et al. 1988).

Первые попытки регистрации гамма-линии от распада радиоактивного изотопа  $^{22}\text{Na}$  прибором COMPTEL были инициированы вспышками ярких в оптическом диапазоне классических новых в Геркулесе 1991 года, и в Лебеде 1992 года и ажиотажем вокруг этих новых, для которых были предсказаны значительные потоки гамма-излучения в линии 1.275 МэВ на уровне  $\sim 1.2 \times 10^{-4} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Это послужило толчком к началу целой программы наблюдений в течение 1992-2000 годов. Анализ наблюдений прибором COMPTEL в конечном итоге позволил получить наиболее жесткие ограничения на модельные предсказания по синтезу  $^{22}\text{Na}$  во вспышках новых звезд в диске и балдже Галактики.

В главе приведены результаты анализа потоков гамма-излучения в линии 1.275 МэВ от новых ONeMg типа. Для Новой Лебеда 1992 был измерен верхний предел на поток в гамма-линии 1.275 МэВ равный  $2.3 \times 10^{-5} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Этот верхний предел на поток гамма-излучения в линии 1.275 МэВ от Новой Лебеда 1992 полученный для комбинации наблюдений этой новой прибором COMPTEL, оказался примерно в 5 раз меньше предсказанного в работах Starrfield et al. (1992; 1993) потока фотонов в линии 1.275 МэВ от этой классической новой ONeMg типа. Исходя из полученного предела на поток в линии 1.275 МэВ величиной был посчитан верхний предел на массу  $^{22}\text{Na}$  синтезированного при взрыве этой новой равный  $M(^{22}\text{Na}) \leq 3.0 \times 10^{-8} \times M_{\odot} (D/2.3 \text{ кпс})^2$  (Iyudin et al. 1995). Дальнейшие наблюдения этого района Галактики прибором COMPTEL, и повышение точности определения расстояния до новой, позволили уменьшить верхний предел на выброшенную массу  $^{22}\text{Na}$ , синтезированной в этой новой, до величины  $1.8 \times 10^{-8} M_{\odot}$ .

Полученные прибором COMPTEL верхние пределы на величину синтезированного  $^{22}\text{Na}$  во взрыве этой новой и Новой Геркулес 1991, привели к необходимости пересмотра существующих моделей взрыва классической новой (Gomez-Gomar et al. 1998; Starrfield et al. 1998b).

В разделе отмечается, что во многих случаях быстрые новые имеют довольно большие скорости расширения сброшенных оболочек, величиной до  $\sim 5000 \text{ км/с}$ . Делается вывод, что с учетом ударных волн, образующихся при взаимодействии расширяющихся оболочек новых с окружающим новым межзвездным

веществом, или же с веществом вынесенным из двойной системы классической новой ветром (Kato & Nachisu 1994; Nachisu & Kato 2005), в системе могут образоваться частицы обладающие кинетической энергией превышающей пороговую энергию реакции возбуждения изотопа  $^{22}\text{Ne}^*$ , из которого возможен переход в основное состояние  $^{22}\text{Ne}$  с испусканием гамма-кванта с энергией 1.275 МэВ. Регистрация излучения с энергией 1.275 МэВ в подобных системах, будет имитировать регистрацию излучения от  $^{22}\text{Na}$ , который возможно и не был синтезирован во взрыве новой (Iyudin et al. 2001). Отсюда следует, что для надежной регистрации распада изотопа  $^{22}\text{Na}$  в новой необходимы длительные наблюдения новой в линии 1.275 МэВ, с целью получить кривую блеска новой в линии, т.е. получить подтверждение распада величины потока излучения в линии 1.275 МэВ от новой с характерным периодом полураспада изотопа  $^{22}\text{Na}$ .

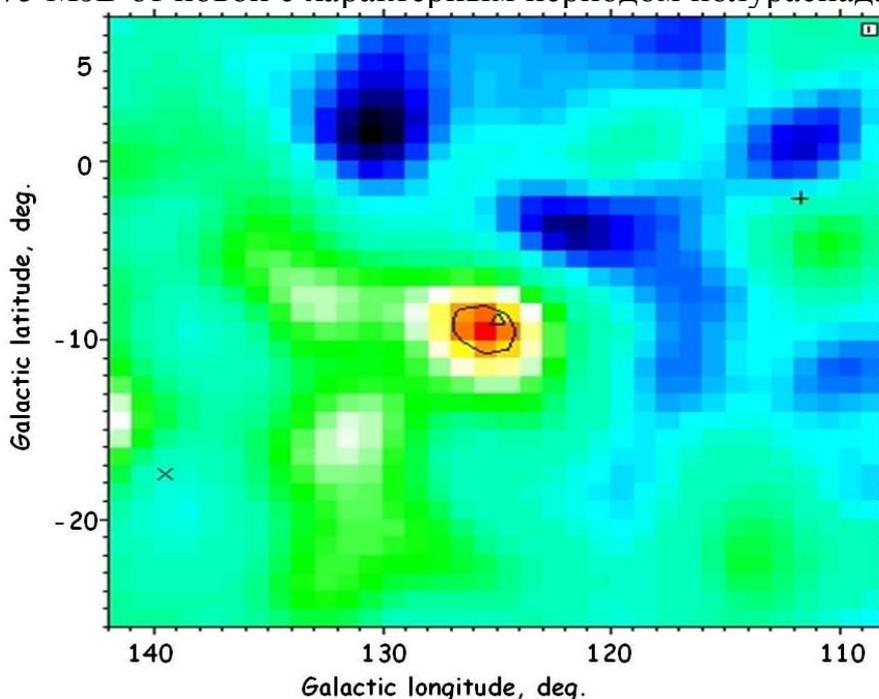


Рис. 7. Карта звездного неба в фотонах гамма-излучения в линии 1.275 МэВ от точечного источника излучения с координатами Новой Кассиопеи 1995. Позиция новой в галактических координатах показана треугольником.

Эта идея (см. также работу Shara (1994)) впервые была реализована автором в исследованиях медленных новых, которые образуются в процессе эволюции двойных систем содержащих белые карлики CO типа. Примером такой системы является Новая Кассиопеи 1995 г., от которой нам удалось зарегистрировать линию 1.275 МэВ от распада синтезированного во взрыве этой новой  $^{22}\text{Na}$ .

Далее в главе рассмотрены наблюдения Новой Кассиопеи 1995 прибором COMPTEL в течение 32 наблюдательных периодов, начиная с периода 2.0 и заканчивая периодом 828.0 .

Общее время в течение которого кривая яркости новой в линии 1.275 МэВ наблюдалась прибором COMPTEL после вспышки новой составило около 4.5

лет (1490 дней). После того как факт регистрации излучения новой в гамма линии с энергией 1.275 МэВ был установлен, мы дополнительно проанализировали также и периоды наблюдений позиции новой в течение ~4 лет (1320 дней) до вспышки новой, т.е. до 24 августа 1995 г.

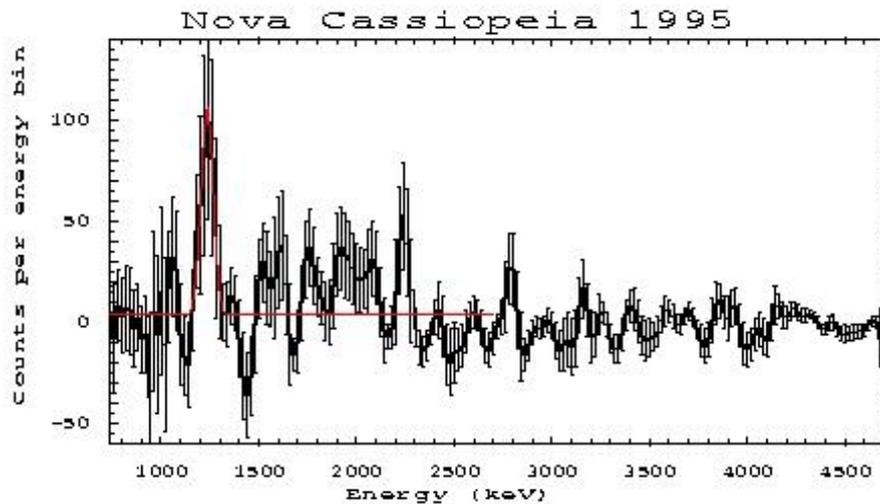


Рис. 8. Спектр гамма-излучения от точечного источника излучения с координатами Новой Кассиопеи 1995 построенный для суммы экспозиций периодов наблюдений новой 530, 623.5, 713.0, 728.9, 827.0 и 828.0. Измеренный спектр от Новой Кассиопеи 1995 показан точками с ошибками. Сплошной линией показан фит спектра новой с линией на 1.275 МэВ от распада  $^{22}\text{Na}$ .

Все полученные потоки, или верхние пределы на поток, гамма-излучения в линии 1.275 МэВ были использованы в построении кривой блеска этой новой в гамма-линии с энергией 1.275 МэВ. При этом наблюдения выполненные после второго подъема орбиты КГО, с началом подъема орбиты 24 марта, 1995 г. и с завершением подъема орбиты 04 июня, 1995 г., были объединены в одну точку на кривой блеска с целью уменьшить ошибку потока в гамма-линии до уровня сопоставимого с ошибками потока точек кривой характерных для периодов наблюдений новой до второго подъема орбиты.

В главе обсуждается построение упрощенной модели ожидаемой кривой блеска от Новой Кассиопеи 1995, и математическое описание (функции времени)  $f(t)$  описывающей изменения регистрируемого потока излучения на линии с энергией 1.275 МэВ в виде двух сомножителей. А именно:

$$f(t) = \tau(t) \cdot D(t) \quad [3].$$

Здесь первый сомножитель  $\tau(t)$  описывает изменение поглощающей толщи сброшенной оболочки новой для  $\gamma$ -квантов с энергией 1.275 МэВ, при заданной полной массе сброшенной оболочки,  $M_{env}$ .

Оптическая толща оболочки в зависимости от времени оценивалась с использованием следующей формулы:

$$\tau(t) \sim \{M_{env}/10^{-5} M_{\odot}\} \{v_{exp}/10^8 \text{ cm s}^{-1}\}^{-2} \{t/100 \text{ days}\}^{-2} \quad [4].$$

Второй множитель  $D(t)$  в выражении [3] описывает обычную экспоненциальную зависимость от времени количества нераспавшихся ядер  $^{22}\text{Na}$  после взрыва новой, т.е. после сброса оболочки новой.

В главе показано, что в результате анализа кривой блеска, а также карты области гамма-линия 1.275 МэВ от Новой Кассиопея 1995 зарегистрирована прибором COMPTEL со значимостью на уровне  $\sim 4 \sigma$ .

В главе далее обсуждается значение этого результата как для понимания особенностей термоядерного взрыва аккрецирующего белого карлика в двойной системе звёзд, так и для понимания природы эволюции двойной системы с маломассивным белым карликом в качестве компактного объекта.

Действительно, довольно смелое предсказание о том что  $^{22}\text{Na}$  будет скорее всего зарегистрирован от медленной новой (Shara 1994; Shara and Prialnik 1994) с карликом небольшой массы, но с массивной, сброшенной во время взрыва оболочкой, а не от быстрой новой с массивным белым карликом, полностью подтверждено данной работой. В главе также обсуждается простая модель демонстрирующая возможность подобного сценария.

В **Главе 7** приводятся и обсуждаются результаты исследований глобального галактического излучения в линии с энергией 1.275 МэВ, пределы на вклад новых звезд в суммарное излучение протяженных областей галактики, таких как балдж Галактики, где масса радиоактивного изотопа  $^{22}\text{Na}$  синтезируемого в десятках, или даже в сотнях, классических новых накапливается и может превысить порог регистрации конкретного прибора (телескопа). В главе также рассмотрен альтернативный сценарий, в котором линия с энергией 1.275 МэВ может испускаться ядрами изотопа  $^{22}\text{Ne}$ , возбуждаемого в столкновениях галактических космических лучей сравнительно небольших энергий с ядрами изотопа  $^{22}\text{Ne}$ . В этом случае также можно ожидать излучение в линии 1.275 МэВ от протяженных областей в нашей Галактике.

В главе проведен анализ карты Галактики в линии 1.275 МэВ на наличие протяженных областей ярких в линии 1.275 МэВ, охватывающая галактические долготы от  $-150^\circ$  до  $+150^\circ$ , и галактические широты от  $-25^\circ$  до  $+25^\circ$ .

Обсуждается методика построения карты и сглаживание карты для выявления крупно-масштабной структуры в районе центра Галактики. Рисунок 9 представляет карты построенные методом максимального правдоподобия, в том числе Рис. 9 а) без сглаживания, а Рис. 9 б) с использованием метода сглаживания.

Для сглаживания карты галактического излучения в линии 1.275 МэВ мы выбрали два гауссиана с  $\sigma_b=5^\circ$  и  $\sigma_l=15^\circ$ , чтобы учесть характерные размеры галактического балджа полученные по результатам анализа инфракрасного излучения от балджа, выполненного в работе Dwek et al. (1995).

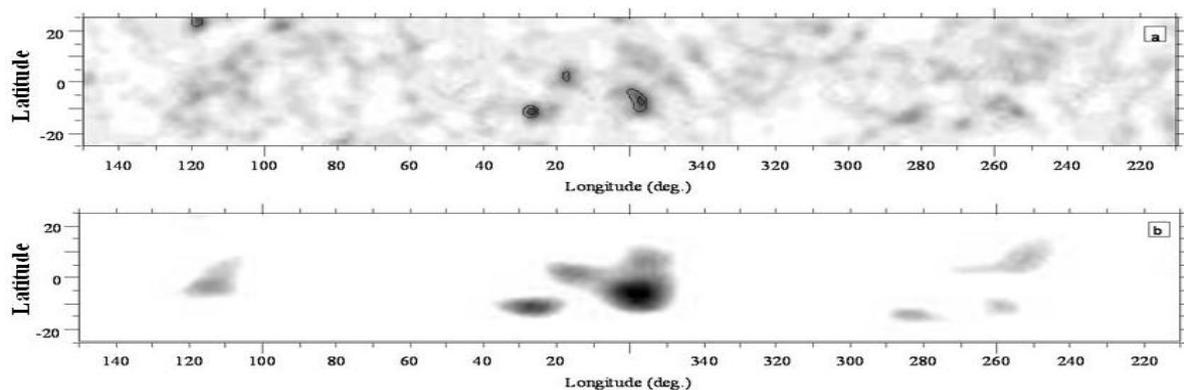


Рис. 9. а). Карта галактической плоскости в излучении гамма-линии с энергией 1.275 МэВ построенная методом максимальной энтропии для совокупности всех наблюдений Галактики прибором КОМПТЕЛ. Излучение в непрерывном спектре подавлено методически. в) та же карта сглаженная двумерным гауссианом. Использованы все наблюдения прибором КОМПТЕЛ выполненные до апреля 1997 г.

Сглаженная с помощью двумерного гауссового фильтра карта области центра Галактики показывает наличие четырех избытков излучения в линии 1.275 МэВ. Избыток излучения в линии 1.275 МэВ, который маркирован как *Aquila* на Рис. 10, по-видимому является действительно точечным для прибора КОМПТЕЛ и относится к области Галактики, которая находится близко к Солнечной системе. Возможно, что этот избыток линейчатого гамма-излучения является результатом взаимодействия двух сверх-пузырей (Local Bubble and Loop I; Egger and Aschenbach (1995)). Три других избытка, наблюдающихся на карте внутренней области Галактики, мы связываем с процессами звездообразования и эволюции звезд в галактическом балдже. Эти три избытка анализируются далее в главе подробнее, с использованием спектрального анализа.

Спектр избытка ВР1 показаны на Рис. 11. Избыток ВР1 в своем спектре (Рис. 11) однозначно показывает наличие линии 1.275 МэВ, и остаток урезанной линии 1.809 МэВ от радиоактивного  $^{26}\text{Al}$ , который накапливается и присутствует в этой области галактики в результате эволюции и взрывов коллапсирующих массивных звезд, см. Oberlack (1997); Plueschke et al. (2001); Diehl et al. (2007). В главе описан спектральный анализ областей ВР1, ВР2, и ВР3, и процесс создания модели фонового излучения построенной на основе спектров областей галактики вокруг северного и южного галактических полюсов, от которых не предполагается излучение в линии 1.275 МэВ, при этом избегая областей где могут излучаться фотоны от остатков сверхновых Loop I и Loop IV. В главе обсужден также процесс контроля правильности спектрального анализа избытков излучения в линии 1.275 МэВ.

Установив наличие в центре галактики протяженных областей излучения в гамма-линии с энергией 1.275 МэВ, мы также проанализировали профили

распределения излучения в линии 1.275 МэВ на больших галактических масштабах вдоль галактической широты и галактической долготы.

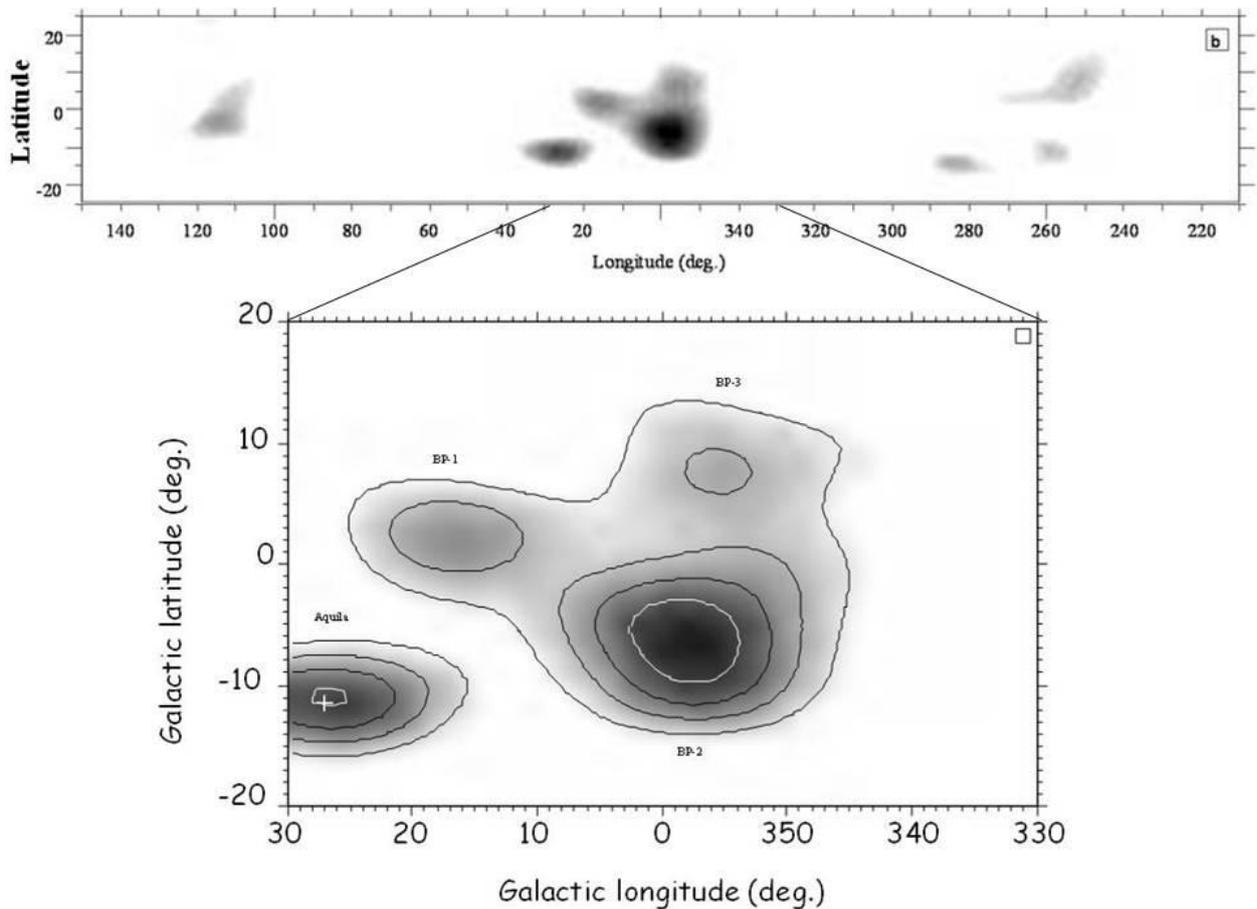


Рис. 10. Карта полученная методом максимальной энтропии сглаженная двухмерным гауссианом для излучения гамма-линии с энергией 1.275 МэВ, показывающая укрупненно район галактического балджа. На карте обозначены четыре области, из которых области BP1, BP2 и BP3 относятся непосредственно к балджу. Контуры приведенные на карте показывают интенсивность излучения от соответствующей области начиная с величины потока  $1.7 \times 10^{-4}$  фотонов  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{стер}^{-1}$ , с шагом нарастания равным  $4.0 \times 10^{-5}$  фотонов  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{стер}^{-1}$ .

По сути своей эти распределения представляют собой эмиссию в линии 1.275 МэВ выделенную из карты звездного неба построенной методом максимальной энтропии, в предположении что галактический балдж имеет форму параллелепипеда с границами по долготе  $|l| \leq 20^\circ$ , и широте  $|b| \leq 10^\circ$ , т.е. форму которая следует из анализа инфракрасного излучения галактического балджа выполненного в работах (Weiland et al. 1994; Dwek et al. 1995; Freudenreich 1998).

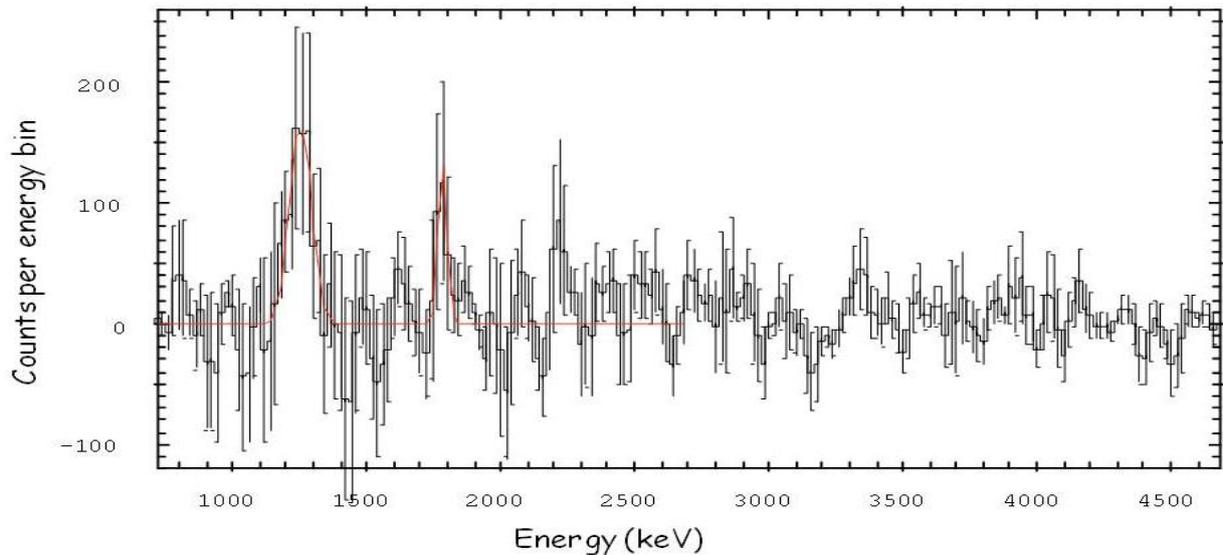


Рис. 11. Спектр гамма-излучения от области балджа P1. Четко выделяется линия гамма-излучения с энергией 1.275 МэВ. Виден также остаток линии с энергией 1.809 МэВ, которая подавлена используемым методом анализа.

Построенные таким образом широтный профиль галактического излучения в гамма-линии с энергией 1.275 МэВ (Рис. 12) показывает уверенно выделяемую компоненту излучения от галактического балджа. Погрешности интенсивности излучения в линии 1.275 МэВ, отложенные на широтном и долготном профилях излучения получены из распределения потока излучения в этой линии от галактического гало, а также из результатов моделирования карт фонового излучения звездного неба в линии 1.275 МэВ методом Монте-Карло.

Из широтного профиля распределения интенсивности излучения в линии 1.275 МэВ было определено что компонента излучения от балджа примерно в два раза больше нежели все суммарное излучение в линии 1.275 МэВ от галактического диска, т.е. поток излучения проинтегрированный по области галактики ограниченной координатами  $180^\circ \geq |l| \geq 20^\circ$ ,  $|b| \leq 10^\circ$ .

Необходимо отметить, что полученное нами распределение излучения в линии 1.275 МэВ отличается от аналогичных распределений гамма-излучения полученных командой прибора КОМПТЕЛ для энергетических интервалов 1.0-3.0 МэВ, см. работу Strong et al. (1997), или распределения излучения в линии от радиоактивного  $^{26}\text{Al}$  с энергией 1.809 МэВ, см. работу Oberlack (1997).

Из полученного профиля полная ширина на полувысоте распределения интенсивности (FWHM) излучения в линии 1.275 МэВ имеет величину  $(\text{FWHM})_{\text{lat}} \sim 16^\circ$  (Рис. 6.6);  $(\text{FWHM})_{\text{long}} \sim 45^\circ$ . Полный поток излучения в линии 1.275 МэВ от галактического балджа равен:

$$I_{\text{bulge}} = [1.68 \pm (0.17)_{\text{stat}}] \times 10^{-4} \text{ фотонов см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{стер}^{-1},$$

или в единицах потока:

$$F_{bulge} = [3.68 \pm (0.46)_{stat} \pm (0.67)_{syst}] \times 10^{-5} \text{ фотонов см}^{-2}\text{с}^{-1}$$

для области балджа с границами по долготе  $|l| \leq 20^\circ$ , и широте  $|b| \leq 10^\circ$ .

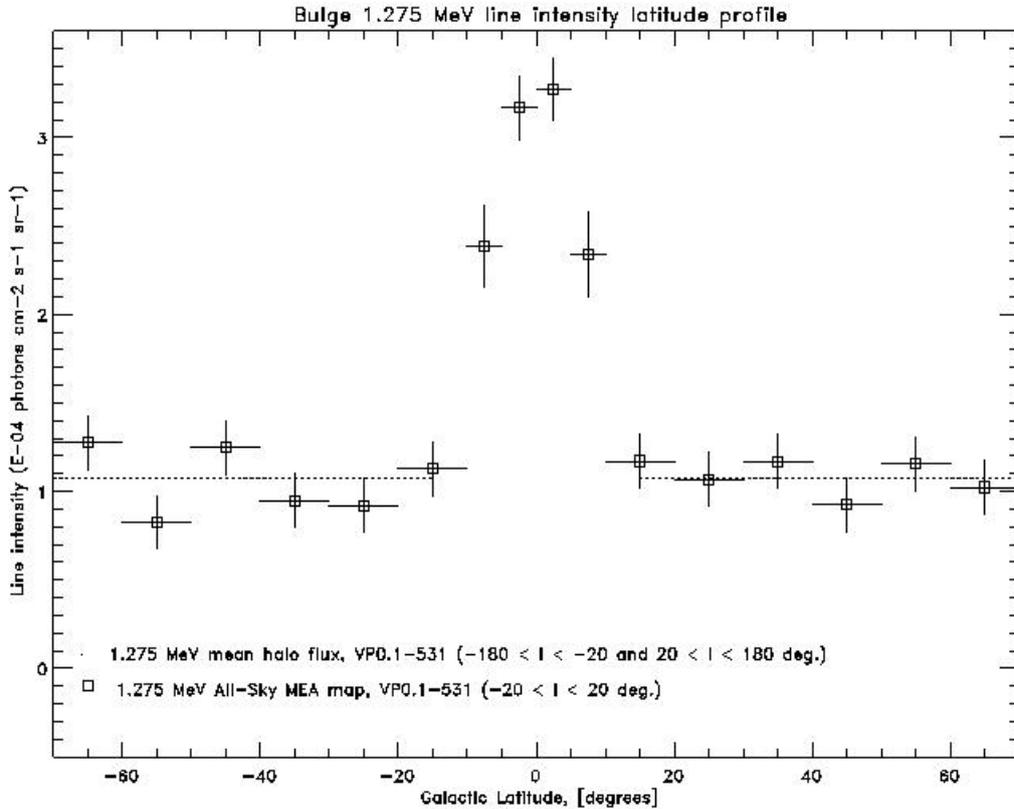


Рис. 12. Детальное распределение излучения в гамма-линии с энергией 1.275 МэВ в галактическом балдже, в зависимости от галактической широты, полученная интегрированием интенсивности излучения карты Рис. 10.

Полученный таким образом поток излучения в линии 1.275 МэВ от области галактического балджа был использован далее для оценки возможных частот вспышек новых в балдже Галактики, а также для оценок спектра космических лучей малой энергии от этой области галактики. В главе обсуждаются также ограничения полученных результатов и практическая возможность применения гамма-телескопов с широким полем зрения в МэВ-ном диапазоне энергий для измерения распределения интенсивностей различных линий гамма-излучения, которые должны сопровождать взаимодействие галактических космических лучей малой энергии с веществом межзвездной среды, включая области галактического балджа и галактического центра. Это позволит получить информацию как о спектре таких космических лучей, так и о скорости ионизации межзвездной среды малоэнергичной компонентой космических лучей в указанных областях нашей Галактики. Обсуждается подобный подход и применительно к оценке скорости ионизации в других галактиках.

В **Главе 8** приводятся результаты исследований спектральной плотности излучения в гамма-диапазоне от источников с джетами, включающими активные ядра галактик и гамма-всплески. В анализе спектральной плотности излучения от джетовых источников учитывалась роль процессов резонансного поглощения гамма-квантов ядрами межзвездного и межгалактического вещества, т.е. новая методика, впервые предложенная, и использованная нами в применении к астрофизическим источникам гамма-излучения. В главе отмечается что использование линий резонансного поглощения в спектрах квазаров, в различных диапазонах длин волн электромагнитного излучения (ЭМИ) является широко распространенным методом исследования вещества межзвездной и межгалактической среды на пути ЭМИ от источника излучения до наблюдателя (Field 1959; Gunn and Peterson 1965).

Наряду с измерениями количества нейтрального водорода по линии 21 см в радио диапазоне ЭМИ, изучение линий резонансного поглощения в оптическом и УФ диапазонах в спектрах квазаров до настоящего времени остаются важнейшим методом и источником информации о межгалактической среде (Meiksin 2009). Подобные исследования в подавляющем большинстве случаев используют спектры квазаров (Savage et al. 2000; Trip et al. 2000; Fang et al. 2002; Kaspi et al. 2002; Nicastro et al. 2002; Fang et al. 2003; Savage et al. 2003), хотя поглощение межгалактической средой были зарегистрированы также и в спектрах гамма-всплесков (Totani et al. 2006), что сыграло важнейшую роль в установлении факта внегалактического происхождения некоторых гамма-всплесков (Metzger et al. 1997).

Резонансные линии поглощения регистрируемые в УФ, и рентгеновском излучении интенсивно использовались также для исследований химического состава вещества выносимого ветром в сейфертовских галактиках (Arav et al. 1997; 2002; 2003). Вообще говоря, подобные исследования позволяют проследить химическое обогащение активных галактик на космологических шкалах времен, см. например Hamann et al. (2003), Di Matteo et al. (2004), Hamann et al. (2007), Germain et al. (2009), Barai et al. (2011).

Анализ спектров излучения от ядер активных галактик в рентгеновских лучах, в широком диапазоне энергий от 0.1 кэВ до 10 кэВ, в свою очередь позволило исследовать толщину вещества в окрестностях АЯГ до величин в диапазоне от  $10^{19}$  см<sup>-2</sup> до  $5 \times 10^{24}$  см<sup>-2</sup> (George et al. 1997; 1998; Burlon et al. 2011, and references therein).

При выборе диапазона ЭМИ для исследований распределения и состава поглотителя вокруг ядра активной галактики, в настоящее время необходимо учитывать установленный в работах Arav et al. (2002), и Arav et al. (2003) факт, что измеренные по линиям поглощения толщи поглощающего излучение ионизированного вещества (иона) на луче зрения к одному и тому же квазару, всегда примерно в 50 раз меньше для измерений в УФ диапазоне длин волн по сравнению с измерениями в рентгеновских лучах. Более широко, это замечание

можно перефразировать как следующее утверждение: большие длины волн из спектра ЭМИ регистрируемого от ЯАГ позволяют измерять малые толщии поглощающего вещества вокруг этого объекта, см. также Iyudin et al. (2005); Рисунок 1 в докладе Iyudin et al. (2007), и доклад (Iyudin 2008).

В главе отмечается что резонансное поглощение гамма-излучения ядрами меж-или около-звездного, а также, меж- и около-галактического вещества, обладает определенным преимуществом перед другими длинами волн применяемыми в оценках толщи поглощающего вещества на луче зрения к источнику излучения.

**А именно, резонансное поглощение в гамма-лучах является результатом взаимодействия фотонов с нуклонами ядер среды и не зависит от ионизационного состояния поглощающего вещества, в отличие от поглощения на конкретном ионе в оптическом, УФ или рентгеновском диапазоне излучения.**

Более того, линии резонансного поглощения в гамма-диапазоне позволяют измерить вклад в поглощение средой вызываемое ядрами водорода отдельно, и ядрами гелия отдельно. Это уникальная особенность метода, недоступная анализу с использованием рентгеновского излучения.

К резонансным линиям поглощения гамма-излучения относятся линии возбуждения ядер и “Pygmy”-резонанс (Hanna & Meyer-Schuetzmeister 1959; Axel 1962; Bohr & Mottelson 1975; Hayward 1977; van Isacker et al. 1992; Enders et al. 1998; Bauwens et al. 2000; ), Гигантский Дипольный Резонанс (далее ГДР), и дельта резонанс (ДР), который является возбуждением отдельного нуклона, или нуклона в составе ядра, включая ядро водорода, или отдельный нейтрон, через изовекторный магнитный дипольный переход который идет через  $\Delta$  (1232) изобар. Положение вдоль оси энергии каждого из выше названных резонансов соответствует примерно 5-9 МэВ для линий возбуждения фотонами ядер таких распространенных элементов как  $^{16}\text{O}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{28}\text{Si}$  и  $^{56}\text{Fe}$ . Наиболее значимым является 25 МэВ ГДР на ядрах  $^4\text{He}$ , наиболее распространенного элемента после водорода и на всех элементах с  $z > 4$  (Arens et al. 1975; Arens 1985), а также ДР на всех элементах на энергии порядка 320 МэВ (Arens 1985; Eramzyan et al. 1986; MacCormic et al. 1996; 1997; Iyudin et al. 2005, and references therein). Интересно, что позиция ДР не меняется от элемента к элементу, единственно что меняется это ширина на полувысоте резонанса, которая равна FWHM  $\sim 160$  МэВ для протонов, и FWHM  $\sim 300$  МэВ для ядер (Iyudin et al. 2005). Это уширение резонанса ДР происходит из-за того обстоятельства, что существенно больше выходных каналов реакции открывается в реакциях на ядре,  $\Delta N \rightarrow NN$ , нежели в реакции гамма-кванта на свободном протоне (ядре  $^1\text{H}$ ),  $\gamma p \rightarrow \Delta$ , где открыт только один выходной канал  $\Delta \rightarrow \pi N$ .

Первая попытка обосновать и применить метод резонансного поглощения ЭМИ в гамма-диапазоне для исследования астрофизических объектов был предложен нами в ряде статей и докладов на международных конференциях.

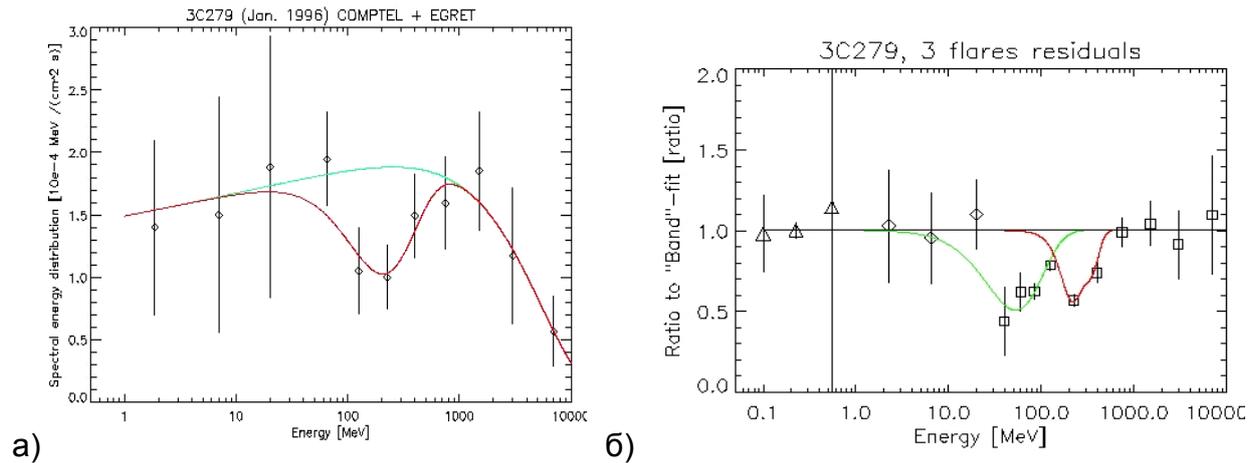


Рис. 13. Спектральная плотность энергии фотонов а): от вспышки квазара 3С279 в январе 1996 г. с линией поглощения из-за процесса резонансного поглощения гамма-фотонов в  $\Delta$ -изобарном резонансе сечения поглощения гамма-фотонов на ядрах среды возле ядра квазара (Iyudin et al. 2005); б) плотность энергии фотонов отнесенная к спектральной плотности в форме Band – функции, для трех вспышек квазара 3С279 (Iyudin et al. 2005).

Прежде всего мы показали что положение линии резонансного поглощения может быть использовано для определения красного смещения излучающего объекта на примерах блазаров 3С279 и BL Lac, зарегистрированных приборами КГО в фазе вспышки (Iyudin et al. 2005), и самого яркого гамма-всплеска GRB930131 из числа зарегистрированных в поле зрения приборами EGRET и COMPTEL, в период работы КГО (Iyudin et al. 2007).

Для обоснования применимости метода резонансного гамма-поглощения были проведены ряд численных вычислений (моделирование методом Монте-Карло) прохождения как отдельных гамма-фотонов, так и спектров фотонов сквозь толщи вещества с заданной геометрией и распространенностью элементов (Июдин, Джатдоев, Галкин 2009) и определены пределы применимости метода.

**В ЗАКЛЮЧЕНИИ** приводятся основные результаты работы и подводятся итоги проведенных исследований.

### Основные положения выносимые на защиту

По результатам выполненной автором работы на защиту выносятся следующие положения:

- 1) Обнаружение наличия радиоактивного изотопа  $^{44}\text{Ti}$  в молодом остатке сверхновой Кассиопея А и проверка основных положений теории нуклеосинтеза при взрыве массивной звезды;
- 2) Обнаружение, нового, ранее неизвестного по измерениям в других длинах волн молодого галактического остатка сверхновой по гамма-излучению в

- линии р/а изотопа  $^{44}\text{Ti}$ ;
- 3) Обнаружение наличия радиоактивного изотопа  $^{22}\text{Na}$  в выбросе классической новой, и проверка современной теории термоядерного взрыва классической новой;
  - 4) Исследование распределения интенсивности линии 1.275 МэВ в галактическом звездном небе, проверка возможности определения частот вспышек классических новых в галактической плоскости и в галактическом балдже по излучению в гамма-линии с энергией 1.275 МэВ;
  - 5) Регистрация и определение количества вещества на пути от источника гамма-излучения, т.е. блазара, до наблюдателя в периоды повышенной активности блазаров по особенностям спектра гамма-излучения блазаров;
  - 6) Использование положения особенностей в спектрах удаленных источников гамма-излучения связанных с резонансным поглощением гамма-квантов за счет изобарного дельта-резонанса для определения красного смещения объекта, излучающего в гамма-диапазоне.

### **Основные публикации по теме диссертации**

Основные результаты диссертации, опубликованы в следующих 30 статьях:

1. Iyudin A.F., Diehl R., Bloemen H., Hermsen W., Lichti G.G., Morris D., Ryan J., Schoenfelder V., Steinle H., Varendorff M., de Vries C., Winkler C. "COMPTEL observations of Ti-44 gamma-ray line from Cas A", *Astron. & Astrophys.*, Vol. 284, p. L1 (1994).
2. Iyudin A.F., Bennett K., Bloemen H., Diehl R., Hermsen W., Lichti G.G., Morris D., Ryan J., Schoenfelder V., Steinle H., Strong A., Varendorff M., Winkler C. "COMPTEL search for  $^{22}\text{Na}$  line emission from recent novae", *Astron. & Astrophys.*, Vol. 300, p. 422 (1995).
3. Lichti G.G., Iyudin A.F., Bennett K., Collmar W., Diehl R., Hermsen W., Morris D., Ryan J., Schoenfelder V., Steinle H., Strong A. W., van Sant T., Winkler C. "COMPTEL upper limits on gamma-ray line emission from supernova 1993J", *Astron. & Astrophys. Suppl.*, Vol. 120, p. 353 (1996).
4. Diehl R., Iyudin A.F., Oberlack U., Schoenfelder V., Bloemen H., Dupraz C., Hermsen W., Knodleseder J., Ryan J., Winkler C. "COMPTEL gamma-ray measurements of radioactivity in the galaxy", *Nuclear Phys. A.*, Vol. 621, p. 79 (1997).
5. Dupraz C., Bloemen H., Bennett K., Diehl R., Hermsen W., Iyudin A.F., Ryan J., Schoenfelder V. "COMPTEL three-year search for galactic sources of  $^{44}\text{Ti}$  gamma-ray line emission at 1.157 MeV", *Astron. And Astrophys.*, Vol. 324, p. 683 (1997).
6. Iyudin A.F., Diehl R., Lichti G.G., Schoenfelder V., Strong A.W., Bloemen H., Hermsen W., Ryan J., Bennett K., Winkler C. "Cas A in the light of the  $^{44}\text{Ti}$  1.15 MeV gamma-ray line emission", *ESA SP-382*, p. 37 (1997).
7. Iyudin A.F., Schoenfelder V., Bennett K., Bloemen H., Diehl R., Hermsen W., Lichti G.G., van der Meulen R.D., Ryan J., Winkler C. "Emission from  $^{44}\text{Ti}$  associated with a previously unknown Galactic supernova", *Nature*, Vol. 396, p. 142 (1998).
8. Iyudin A.F. " $^{44}\text{Ti}$  line emission from historical SNe", *Physica Scripta*, Vol. T77, p. 144 (1998).

9. Iyudin A. "Ti-decay gamma-ray emission from young galactic supernova remnants", Nucl. Phys. A, vol. 654, p. 900 (1999).
10. Aschenbach B., Iyudin A.F., and Schoenfelder V. "Constraints of age, distance and progenitor of the supernova remnant RX J0852.0-4622/GRO J0852-4642", Astron. & Astrophys., Vol. 350, p. 997 (1999).
11. Iyudin A.F., Schoenfelder V., Bennett K., Bloemen H., Diehl R., Hermsen W., Knoedlseder J., Lichti G.G., Oberlack U., Ryan J., Strong A.W., Winkler C. "COMPTEL all-sky survey in  $^{44}\text{Ti}$  line emission", Astrophysical Letters and Communications, Vol. 38, p. 383 (1999).
12. Iyudin A.F., Bennett K., Bloemen H., Diehl R., Hermsen W., Knoedlseder J., Lichti G.G., Ryan J., Schoenfelder V., Strong A.W., Winkler C. "COMPTEL constraints on nova-produced  $^{22}\text{Na}$ ", Astrophysical Letters and Communications, Vol. 38, p. 371 (1999).
13. Schoenfelder V., Bennett K., Blom J.J., Bloemen H., Collmar W., Connors A., Diehl R., Hermsen W., Iyudin A., Kippen R.M., Knoedlseder J., Kuiper L., Lichti G.G., McConnell M., Morrius D., Much R., Oberlack U., Ryan J., Stacy G., Steinle H., Strong A., Suleiman R., van Dijk R., Varendorff M., Winkler C., Williams O.R. "The first COMPTEL source catalogue", Astron. & Astrophys. Supplement, Vol. 143, p. 145 (2000).
14. Iyudin A.F., Diehl R., Lichti G.G., Schoenfelder V., Strong A.W., Bennett K., Winkler C., Bloemen H., Hermsen W., Ryan J. "Study of the nova-produced  $^{22}\text{Na}$  with COMPTEL", ESA SP-459, p. 41 (2001).
15. Iyudin A.F. "Terrestrial impact of the galactic historical SNe", Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 64, Issue 5-6, p. 669 (2002).
16. Iyudin A.F. "Study of global galactic distribution of classical novae by their gamma-ray line emission at 1.275 MeV", Nucl. Phys. A, Vol. 718, p. 413 (2003).
17. Iyudin A., Aschenbach B., Haberl F., Freyberg M. "Results of the joint X-ray and gamma-ray analysis of the SNR RX J0852.0-4622/GRO J0852-4642", Nucl. Phys. A, Vol. 718, p. 416 (2003).
18. Iyudin A.F., Burwitz V., Greiner J., Reimer A., Reimer O. "Gamma-ray probe of the dense QSO environment", Mem. Soc. Astron. Ital., Vol. 76, p. 146 (2005).
19. Iyudin A.F., Aschenbach B., Becker W., Dennerl K., Haberl F. "XMM-Newton observations of the supernova remnant RX J0852.0-4622/GRO J0852-4642", Astron. & Astrophys., Vol. 429, p. 225 (2005).
20. Iyudin A.F., Reimer O., Burwitz V., Greiner J., Reimer A. "Resonant absorption troughs in the gamma-ray spectra of QSO", Astron. & Astrophys., Vol. 436, p. 763 (2005).
21. Iyudin A.F., Bennett K., Lichti G.G., Ryan J., Schoenfelder V. "Global galactic distribution of the 1.275 MeV gamma-ray line emission", Astron. & Astrophys., Vol. 443, p. 477 (2005).
22. The L.-S., Clayton D.D., Diehl R., Hartmann D., Iyudin A.F., Leising M., Meyer B.S., Motizuki Y., Schoenfelder V. "Are  $^{44}\text{Ti}$  producing supernovae exceptional?", Astron. & Astrophys., Vol. 450, p. 1037 (2006).
23. Iyudin A.F., Aschenbach B., Burwitz V., Dennerl K., Freyberg M., Haberl F., Filipovic M. "Multiwavelength appearance of Vela Jr.: Is it up to expectations?", ESA SP-622, p. 91 (2007).
24. Iyudin A., Burwitz V., Greiner J., Larsson S., Kupcu Yoldas A. "Gamma-ray absorption method (GRAM) application to the identification of EGRET unidentified sources", Astron. & Astrophys., Vol. 468, p. 919 (2007).
25. Iyudin A.F. "The resonance-like gamma-ray absorption processes for use in astrophysics", Astronomische Nachrichten, Vol. 328, p. 596 (2007).
26. А.Ф. Иудин, В.В. Богомолов, С.И. Свертилов, И.В. Яшин, Р.В. Классен, С.З. Шмурак, А.Д. Орлов " Особенности внутреннего фона сцинтилляционных

- кристаллов  $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$  и  $\text{CeBr}_3$ ”, Приборы и Техника Эксперимента, 2009, № 6, стр. 16-24 (2009).
27. А.Ф. Июдин, Т. Джатдоев, В.И. Галкин, “Возможности наблюдения резонансного гамма-поглощения в спектрах активных ядер галактик” Астр. Журнал, т. 86, стр. 123-133 (2009).
28. А.Ф. Июдин “ Наблюдение линейчатого излучения изотопа  $^{22}\text{Na}$  от классической новой ”, Астрономический Журнал, Т. 87, № 7, стр. 667-676 (2010).
29. Iyudin A.F., Pakhomov Yu.V., Chugai N.N., Greiner J., Axelsson M., Larsson S., Ryabchikova T.A. “Search for broad absorption lines in spectra of stars in the field of supernova remnant RX J0852.0-4622 (Vela Jr.)”, *Astron. & Astrophys.*, Vol. 519, id. A86 (2010).
30. Pakhomov Yu.V., Chugai N.N., Iyudin A.F. “Interstellar absorptions and shocked clouds towards the supernova remnant RX J0852.0-4622”, *MNRAS*, Vol. 424, p. 3145 (2012).

#### Список использованных литературных ссылок

1. Adelberg D.C., Harbottle G., *Phys. Rev.C*, v. 41, p. 2320 (1990)
2. Ahrens J., et al., *Nucl. Phys. A*, v. 251, p. 479 (1975)
3. Ahrens J., *Nucl. Phys. A*, v. 446, p. 229c (1985)
4. Arav N., Shlossman I., Weymann R.J. “Mass ejection from AGN: proceedings of a workshop held at the Carnegie Observatories in Pasadena, California, 19-21 February, 1997” *ASP Conference Series*, Vol. 128 (1997).
5. Arav N., Korista K.T., de Kool M., *ApJ*, Vol. 566, p. 699 (2002).
6. Arav N., et al., *ApJ*, Vol. 590, p. 174 (2003)
7. Arnett D., Fryxell B., Mueller E., *ApJ*, v. 341, p. L63 (1989)
8. Aschenbach B., *Nature*, vol. 396, p. 141 (1998)
9. Axel P., *Phys. Rev.*, v. 126, p. 671 (1962)
10. Bahcall J.N., Greenstein J.L., Sargent W.L.W., *ApJ*, v. 153, p. 689 (1968)
11. Bahcall J.N., Spitzer L.Jr., *ApJ*, v. 156, p. 63 (1969)
12. Bamba A., et al., *ApJ*, v. 632, p. 294 (2005)
13. Barai P., Martel H., Germain J., *ApJ*, v. 727, p. 54 (2011)
14. Bauwens F., et al., *Phys. Rev. C*, v. 62, 024302 (2000)
15. Bishop S. et al., 2003, *Phys.Rev.Lett.*, v. 90, Number 16, P. 162501-1 (2003)
16. Бисноватый-Коган Г.С. “Физические вопросы теории звездной эволюции”. М.: Наука, 1989.
17. Bohr A. & Mottelson B.R. “Nuclear Structure II” (New-York: Benjamin) (1975)
18. Burbidge E.M., et al., *Rev. Mod. Physics*, Vol. 29, Issue 4, pp. 547-650 (1957).
19. Burlon D., et al., *ApJ*, v. 728:58 (2011)
20. Clayton D.D., Colgate S.A., Fishman G.J., *ApJ*, v. 155, p. 75 (1969)
21. Clayton D., Hoyle F., *ApJ*, v. 187, p. L101 (1974)
22. Coc A., *AIP CP-1016*, p. 119 (2008)
23. Colgate S.A. and McKee C., *ApJ.*, v. 157, p. 623 (1969)
24. Dai et al., *ApJ*, v. 672, p. 108 (2008).
25. D’Auria J.M., et al., *Physical Review C* 69, P. 065803-1 (2004)
26. Diehl R., et al., *Nature*, v. 439, p. 45 (2006)
27. Di Matteo T., Croft R.A.C., Springel V., Hernquist L. “Quasars and their environment along cosmic history” , *IAUS*, v. 222, p. 471 (2004).
28. Dunn et al., *AJ*, v. 136, p. 1201 (2008).

29. Dwek E., et al., *ApJ*, v. 445, p. 716 (1995)
30. Egger R. and Aschenbach B., *Astr. And Astrophys.*, v. 294, p. L25 (1995)
31. Enders J., et al., *Nucl. Phys. A*, v. 636, p. 139 (1998)
32. Eramzhyan R.A., et al., *Phys. Reports*, v. 136, p. 229 (1986)
33. Fan X., *RA&A*, vol.12, p. 865 (2012)
34. Fang T., et al., *ApJ*, v. 572, p. 127 (2002)
35. Fang T., Sembach K.R., Canizares C.R., *ApJ*, v. 586, p. 49 (2003)
36. Fesen R.A., et al., *ApJ*, v. 645, p. 283 (2006)
37. Field G.B., *ApJ*, v. 129, p. 525 (1959)
38. Frekers D. et al., *Phys. Rev C*, v. 28, p. 1756 (1983)
39. Freudenreich H.T., *ApJ*, v. 492, p. 495 (1998)
40. Gallagher J.S., and Starrfield S., *ARA&A*, v. 16, P. 171 (1978)
41. Gehrz R. D., Truran J.W., Williams R.E., Starrfield S., *PASP*, v. 110, P. 3 (1998)
42. George I.M., et al., *ApJ*, v. 491, p. 508 (1997)
43. George I.M., et al., *ApJS*, v. 114, p. 73 (1998).
44. Germain J., et al., *ApJ*, v. 704, p. 1002 (2009)
45. Gomez-Gomar J., et al., *MNRAS*, v. 296, p. 913 (1998)
46. Grebenev S.A., Sunyaev R.A., *Pisma Astron.Zh*, vol. 14, p. 675 (1988)
47. Grebenev S.A. et al., *Nature*, vol. 490, p. 373 (2012)
48. Gunn J.E., Peterson B.A., *ApJ*, v. 142, p. 1633 (1965)
49. Hachisu I. & Kato M., *ApJ*, v. 631, P. 1094 (2005)
50. Hamann F., et al., *ASP Conference Series*, vol. 290, p. 593 (2003)
51. Hamann F., et al., *ASP Conference Series*, vol. 373, p. 653 (2007)
52. Hammell M.C., and Fesen R.A., *ApJS*, v. 179, p. 195 (2008)
53. Hanna S.S. & Meyer-Schuetzmeister L., *Phys. Rev.*, v. 115, p. 986 (1959)
54. Hartman R.C., et al. , *ApJ.*, v. 461, p. 698 (1996)
55. Hayward E., *Lecture Notes in Physics*, ed. Costa & Schaerf, v. 61, p. 340 (Berlin-Heidelberg:Springer-Verlag (1977)
56. Hewett P.C., Foltz C.B., *AJ*, v. 125, p. 1784 (2003).
57. Hiraga J.S., et al. , *PASJ*, v. 61, p. 275 (2009)
58. Hoyle F., *MNRAS*, v. 106, p.343 (1946)
59. Iyudin A.F. et al., *ESA SP-459*, p. 41 (2001)
60. Jenkins D., et al., *Phys.Rev.Lett.*,v. 92, Number 3, P. 031101-1 (2004)
61. Kaspi S., et al., *ApJ*, Vol. 574, p. 643 (2002)
62. Kato M. & Hachisu I., *ApJ*, v. 437, P. 802 (1994)
63. Katsuda S., Tsunemi H. and Mori K., *ApJ.*, v. 678, L35 (2008)
64. Knigge et al., *MNRAS*, Vol. 386, p. 1426 (2008).
65. Krause O., Birkman S.M., Usuda T., et al., *Science*, Vol. 320, p. 1195 (2008).
66. Kumagai S., et al., *A&A*, v. 197, p. L7 (1988)
67. Kumagai S., et al., *ApJ*, v. 345, p. 412 (1989)
68. Law W.J., Ritter H., *Astron. and Astrophysics*, v.63, p. 265 (1983)
69. Leising M., et al., *ApJ*, v. 328, p. 755 (1988)
70. Leventhal M., MacCallum C., Watts A., *ApJ*, v. 216, P. 491 (1977)
71. Livio M., Truran J., *ApJ*, v. 425, p. 797 (1994)
72. Lynds R., *ApJ*, Vol. 168, p. 87 (1971)
73. MacCormic M., et al., *Phys. Rev. C*, v. 53, p. 41 (1996)
74. MacCormic M., et al., *Phys. Rev. C*, v. 55, p. 1043 (1997)
75. Maeda K. and Nomoto K., *ApJ.*, v. 598, p. 1163 (2003)
76. Mahoney W.A. et al., *ApJ*, v. 262, P. 742 (1982)
77. Matz S.M., et al., *Nature*, v. 331, p. 416 (1988)

78. Meiksin A.A., Review of Modern Physics, Vol. 81, p. 1405 (2009).
79. Metzger M.R., et al., Nature, Vol. 387, p. 878 (1997).
80. Motizuki Y., and Kumagai S., AIP CP-704, p. 369 (2004)
81. Nagataki S., Hashimoto M., Sato K., Yamada S., ApJ, Vol. 486, p. 1026 (1997).
82. Nicastro F., et al., ApJ, Vol. 573, p. 157 (2002).
83. Nomoto K., in "Supernovae and gamma-ray bursts", ed. M. Livio et al., Cambridge: Cambridge Univ. Press, p. 114 (2001)
84. Oberlack U., PhD Thesis, TUM (1997);
85. Pankey T., PhD Thesis, Howard Univ, Washington, DC, Abstract 23:4 (1962)
86. Pannuti et al., ApJ, v. 721, p. 1492 (2010)
87. Plueschke S., et al., ESA SP-459, p. 55 (2001)
88. Renaud M., et al. ApJ, v. 647, p. L41 (2006)
89. Sallaska A.L. et al., arXiv:1009.3925v1 (2010)
90. Savage B.D., et al., ApJ, Vol. 538, p. 27 (2002)
91. Savage B.D., et al., ApJS, Vol. 146, p. 125 (2003).
92. Schoenfelder V., Aarts H., Bennett K., et al., ApJSuppl., v. 86, P. 629 (1993)
93. Shara M.M., The Astronomical Journal., V. 107, P. 1546 (1994)
94. Shara M.M. and Prialnik D., AJ, v. 107, P. 1542 (1994)
95. Starrfield S. et al., MNRAS, v. 296, P. 502 (1998a)
96. Starrfield et al., ASP Conference Series, v. 137, P. 352 (1998b)
97. Starrfield S., Shore S.N., Sparks W.M., et al., ApJ, v. 391, P. L71 (1992)
98. Starrfield S., Shore S.N., Sonnerborn G., et al., AIP, CP-280, P. 168 (1993)
99. Strong A.W., et al., AIP CP-410, p. 1198 (1997)
100. Totani T., et al., PASJ, v. 58, p. 485 (2006)
101. Tripp T.D, Savage B.D, Jenkins E.B., ApJ, v. 534, p. 1 (2000)
102. van Isacker P., et al., Phys. Rev C, v. 45, p. R13 (1992)
103. Vink et al., ApJ, v. 650, p. L79 (2001)
104. von Kienlin A., et al., ESA SP-552, p. 87 (2004).
105. Wang L., Wheeler J.C., Hoeflich P., et al., ApJ, v. 579, p. 671 (2002).
106. Wang L., and Wheeler J.C., ARA&A, v. 46, p. 433 (2008).
107. Weiland J.L., et al., ApJ, v. 425, p. 81 (1994)
108. Weiss A. and Truran J., Astronomy and Astrophysics, v. 238, P. 178 (1990)
109. Wing J., et al., Nucl. Chemistry, vol. 27, p. 487 (1965)
110. Woosley S.E., Weaver T.A., ApJ. Suppl., v. 101, p. 181 (1995).
111. Woosley S.E., Hartmann D., Pinto P.A., ApJ, v. 346, p.395 (1989)
112. Woosley S.E., Pinto P.A., Weaver T.A., Astr. Soc. Austr. Proc., v. 7, No. 4, p. 355 (1988)