

На правах рукописи

КСЕНОФОНТОВ Леонид Трофимович

**Теория ускорения космических лучей в остатках
сверхновых**

01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Якутск – 2016

Работа выполнена в *Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук.*

Научный консультант: **Бережко Евгений Григорьевич,**
доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН

Официальные оппоненты: **Быков Андрей Михайлович,**
доктор физико-математических наук, профессор,
руководитель отделения, ФТИ им. А.Ф.Иоффе

Лагутин Анатолий Алексеевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой, ФБГОУ ВО Алтайский государственный университет

Стожков Юрий Иванович,
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник, Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН

Ведущая организация: ФГБУН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН

Защита состоится «_____» _____ 2017 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д501.001.77 на базе *Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова* по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5 («19 корпус НИИЯФ МГУ»), ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГУ и на web-сайте <http://www.sinp.msu.ru/ru/dissertation/25229> .

Автореферат разослан «_____» _____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор

С.И. Страхова

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Проблема происхождения космических лучей (КЛ) является одной из наиболее актуальных задач современной астрофизики. Идея о том, что вспышки сверхновых генерируют основную долю наблюдаемых КЛ, значительное время была основана только на соображениях энергетического характера. Согласно современным представлениям, в Галактике в среднем каждые 30 лет взрываются сверхновые звезды. Существенная доля энергии $\sim 10^{51}$ эрг выделяется при взрыве звезды в форме кинетической энергии, выбрасываемой в межзвездную среду (МЗС) массы вещества оболочки. Выделяющаяся в Галактике при этом мощность $\sim 10^{42}$ эрг/с достаточна для восполнения потерь энергосодержания галактических КЛ $\sim 10^{41}$ эрг/с, обусловленных их выходом из Галактики (см., например, [31, 32]).

Предположение о том, что остатки сверхновых (ОСН) являются главным источником КЛ в Галактике, было подкреплено открытием процесса регулярного ускорения на ударных волнах [33, 34]. Набор энергии частицами в данном механизме ускорения происходит в процессе их многократного рассеивания на неоднородностях магнитного поля (например, на альфвеновских или магнито-звуковых волнах) перед и за фронтом ударной волны. Из-за наличия скачка скорости рассеивающих центров на ударном фронте, движущихся, в первом приближении, вместе со средой, каждый цикл пересечения частицей фронта сопровождается увеличением ее энергии. Часть частиц уносится потоком плазмы от фронта и выбывает из процесса ускорения. В результате формируется степенной спектр частиц по импульсу с показателем, величина которого определяется степенью сжатия среды на ударном фронте.

Жесткий характер спектра КЛ, ускоряемых сильной ударной волной, и высокий темп их ускорения являются причиной того, что очень скоро (с момента начала процесса ускорения) КЛ становятся важным динамическим фактором, существенно влияющим на структуру ударного фронта. Обратное влияние

КЛ приводит к значительному уширению толщины ударного фронта: наряду с обычным тепловым фронтом в модифицированной ударной волне образуется плавный участок — предфронт. Чем выше энергосодержание КЛ, тем большую в ударном переходе долю по амплитуде составляет предфронт и соответственно меньшую — тепловой фронт.

За время прошедшее с момента установления процесса регулярного ускорения КЛ теория этого процесса получила значительное развитие (см., например, обзоры [35–40]). Был выявлен и исследован ряд важных аспектов, главными из которых является высокая эффективность ускорения, характеризуемая высоким темпом ускорения и передачей большой доли энергии ударной волны ускоренным частицам. В применении к ударным волнам от сверхновых это означает, что процесс регулярного ускорения способен переработать в КЛ существенную долю выделившейся при взрыве энергии. Поэтому регулярное ускорение КЛ в ОСН рассматривается в настоящее время в качестве источника основной доли КЛ в Галактике.

Наличие ускоренных релятивистских электронов и особенности их пространственного и энергетического распределения в ОСН удастся изучать методами радиоастрономии. Помимо этого, для ряда исторических остатков установлена нетепловая, синхротронная природа рентгеновского излучения. Электронная компонента КЛ в процессе обратного комптоновского рассеяния на фотонах реликтового излучения также производит гамма-излучение высокой энергии ($\epsilon \geq 1$ ТэВ). Указанные обстоятельства существенно расширяют возможности получения прямой экспериментальной информации о спектре электронной компоненты ускоренных КЛ в широком энергетическом диапазоне вплоть до предельно высоких энергий ($\epsilon_e \sim 10^{14}$ эВ).

Что касается нуклонной компоненты КЛ, то окончательный вывод о роли сверхновых как источника КЛ можно сделать проведя детальные сравнения рассчитанного спектра ускоренных КЛ и их химического состава с результатами измерений в области энергий $\epsilon \leq 10^{15}$ эВ (именно таким образом формулиру-

ется основная цель ряда планируемых экспериментов). Второй, более прямой способ — регистрация гамма-излучения высоких энергий $\geq 10^{12}$ эВ от ОСН, что может дать непосредственную информацию о количестве, спектре и предельной энергии нуклонной компоненты КЛ в ОСН. Особую роль в этом плане играет новое поколение гамма-телескопов H.E.S.S., Veritas, MAGIC, а также космическая обсерватория Fermi.

В обоих случаях роль теории, способной давать детальные предсказания спектра и химического состава КЛ генерируемых в ОСН, а также ожидаемого потока гамма-излучения, возникающего при взаимодействии высокоэнергичных КЛ с окружающим веществом, исключительно высока. Достаточно отметить, что гамма-телескопы — это приборы с довольно узкой апертурой. Поэтому уже сам выбор конкретных ОСН, от которых можно ожидать измеримого потока гамма-излучения высокой энергии (≥ 1 ТэВ), должен базироваться на достаточно надежных теоретических предсказаниях.

Цель диссертационной работы состоит в выполнении детального исследования процесса регулярного ускорения КЛ в ОСН, которое позволит сделать обоснованное заключение о роли ОСН, как основного источника КЛ в Галактике.

Для достижения поставленной цели было выполнено описание эволюции ударной волны от сверхновой и процесса регулярного ускорения КЛ ударной волной в рамках кинетического подхода с учетом обратного влияния КЛ на структуру и динамику ударной волны и с учетом зависящего от времени магнитного поля в остатке. Описание основано на численном решении газодинамических уравнений для параметров среды совместно с диффузионным уравнением переноса для функции распределения КЛ. Знание в каждый текущий момент эволюции ОСН пространственного и энергетического распределения КЛ и пространственного распределения вещества позволяет рассчитать ожидаемые спектры излучения, возникающего при взаимодействии КЛ со средой за счет ряда физических процессов (синхротронное и тормозное излучение, обратное

комптоновское рассеяние на фотонах реликтового излучения, нуклон-нуклонные столкновения КЛ со средой, приводящее к рождению π^0 -мезонов).

Существенным при расчете ожидаемых характеристик КЛ и порождаемого ими излучения является величина магнитного поля в ОСН. Было показано, что магнитное поле во всех молодых ОСН значительно усилено по сравнению с типичным полем в МЗС, что, предположительно, является результатом нелинейного воздействия КЛ на среду.

Научная новизна. Развитый вариант теории регулярного ускорения КЛ в ОСН является в настоящее время наиболее продвинутым и практически единственным, способным давать надежные предсказания ожидаемых характеристик КЛ и порождаемого ими излучения из ОСН. В последнее время решение задачи ускорения КЛ в ОСН в аналогичной постановке было выполнено двумя другими исследовательскими группами [41, 42]. При этом отмечается хорошее согласие выполненных расчетов с полученными ранее результатами.

Научная и практическая значимость. Результаты, изложенные в диссертации, носят фундаментальный характер и представляют большой научный интерес с точки зрения решения проблемы происхождения космических лучей. Роль теории, способной давать надежные предсказания спектра ускоренных КЛ, на основе которого непосредственно может быть рассчитан весь спектр нетеплового излучения, исключительно высока. Выбор источников, перспективных с точки зрения гамма-астрономии, а также интерпретация результатов измерений возможна только на основе детальных теоретических расчетов.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Разработанный метод численного решения диффузионного уравнения переноса КЛ совместно с системой газодинамических уравнений, позволяющий изучать процесс ускорения КЛ в ОСН, эволюцию остатков и свойства их нетеплового излучения.

Результаты исследования процесса ускорения КЛ в ОСН заключающиеся в

следующем:

2. Процесс ускорения КЛ ударной волной от сверхновых характеризуется высокой эффективностью: энергосодержание ускоренных ударной волной от сверхновой КЛ достаточно для восполнения потерь галактических КЛ, связанных с их выходом из Галактики. При этом процесс ускорения сопровождается значительным усилением магнитного поля.
3. Теория объясняет все наблюдаемые свойства нетеплового излучения остатков SN 1006, SN Тихо, SN 1987А, что является решающим подтверждением эффективного ускорения КЛ в ОСН.
4. Усиление магнитного поля в ОСН приводит к значительному увеличению максимальной энергии КЛ, ускоренных в ОСН. Теория удовлетворительно воспроизводит наблюдаемый спектр и химический состав КЛ в области энергий вплоть до $\sim 10^{17}$ эВ. Установлено, что ОСН вносят значительный вклад в спектр вторичных КЛ.
5. На основе детального исследования процесса регулярного ускорения КЛ в ОСН установлено, что ОСН являются основным источником галактических КЛ вплоть до $\sim 10^{17}$ эВ.

Апробация работы. Все результаты представленные в диссертации опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах. Они докладывались на 23-ей (Калгари, 1993), 24-ой (Рим, 1995) 25-ой (Дурбан, 1997), 27-ой (Гамбург, 2001), 28-ой (Цукуба, 2003), 29-ой (Пуна, 2005), 30-ой (Мерида, 2007), 31-ой (Лодзь, 2009), 32-ой (Пекин, 2011), 33-ей (Рио де Жанейро, 2013), 34-ой (Гаага, 2015) Международных конференциях по космическим лучам, на 35-ой (Париж, 2004), 36-ой (Пекин, 2006), 37-ой (Монреаль, 2008), 38-й (Бремен, 2010) Генеральных Ассамблеях КОСПАР, в целом ряде других международных и всероссийских конференций и симпозиумов по космическим лучам и

гамма-астрономии, а также научных семинарах ИКФИА, НИИЯФ МГУ, Института ядерной физики им. Макса Планка (Гейдельберг, Германия) и Института исследования космических лучей Токийского университета (Токио, Япония).

Работа над материалами, вошедшими в диссертацию, выполнялась при поддержке грантов РФФИ № 97-02-16132-а, 98-02-26955-з, 00-02-17728-а, 00-02-27294-з, 00-07-96200-р98арктика, 03-02-16524-а, 07-02-00221-а, 09-02-08263-з, 10-02-00154-а, 11-02-12193-офи-м-2011, 13-02-00943-а, 13-02-12036-офи-м и 16-02-00765-а, грантов Президента Российской Федерации для поддержки ведущих научных школ № НШ422.2003.2, НШ-3968.2008.2, НШ-3526.2010.2, НШ-1741-2012.2 и НШ-3269.2014.2, ФЦП НОЦ № 8404, а также гранта JSPS (2002–2004 гг.), прошедших независимую научную экспертизу.

Публикации. Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в рецензируемых журналах [1–30], входящих в перечень ВАК. Всего же по теме исследования опубликовано около 90 печатных работ, индексируемых в SAO/NASA Astrophysics Data System (ADS), из них 58 в реферативной базе данных Web of Science.

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Обсуждение и подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, библиографии и приложения. Общий объём диссертации 222 страниц, из них 181 страница текста, включая 51 рисунок. Библиография включает 233 наименований на 21 странице.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель, аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава посвящена описанию разработанного и реализованного эффективного численного алгоритма решения задачи ускорения КЛ ударной волной от сверхновой.

Кинетическое описание процесса ускорения КЛ ударной волной основано на диффузионном уравнении переноса для функции распределения КЛ $f(r, p, t)$ [43–45]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \nabla(\kappa \nabla f) - \vec{w}_c \nabla f + \frac{\nabla \vec{w}_c}{3} p \frac{\partial f}{\partial p} + Q, \quad (1)$$

где p — импульс частиц КЛ, $w_c = w$ при $r < R_s$ и $w_c = w + c_a$ при $r > R_s$, w — скорость среды (газа), c_a — скорость альфвеновских волн, генерация которых осуществляется ускоренными КЛ в области перед фронтом ударной волны $r > R_s$, где раскачиваемые волны распространяются преимущественно в радиальном направлении. Проходя через ударный фронт, альфвеновская турбулентность в значительной степени изотропизуется, поэтому скорость рассеивающих центров w_c в области $r < R_s$ совпадает со скоростью среды w . Источник Q описывает инжекцию надтепловых частиц в режим ускорения. Ускоренные КЛ интенсивно раскачивают альфвеновские волны в области предфронта. Поэтому есть основания принять предположение о боровском коэффициенте диффузии КЛ

$$\kappa(p) = \rho_B c / 3, \quad (2)$$

где $\rho_B = pc/eB$ — гирорадиус частиц с импульсом p , B — напряженность магнитного поля; c — скорость света, e — заряд протона.

Динамика среды (газа) описывается системой газодинамических уравнений

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{w}) = 0, \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{w}}{\partial t} + \rho(\vec{w} \nabla) \vec{w} = -\nabla(P_c + P_g), \quad (4)$$

$$\frac{\partial P_g}{\partial t} + (\vec{w} \nabla) P_g + \gamma_g (\nabla \vec{w}) P_g = \alpha_a (1 - \gamma_g) c_a \nabla P_c, \quad (5)$$

в которых ρ , w , P_g , $\gamma_g = 5/3$ — плотность, скорость, давление и показатель адиабаты газа, давление КЛ определяется соотношением

$$P_c = \frac{4\pi c}{3} \int_0^\infty dp \frac{p^4 f}{\sqrt{p^2 + m^2 c^2}}. \quad (6)$$

Функция распределения электронов $f_e(p)$ отличается от функции распределения релятивистских протонов $f(p)$ с соответствующими жесткостями лишь постоянным множителем: $f_e(p) = K_{ep} f(p)$. Только при достаточно больших импульсах в результате синхротронных потерь функция распределения электронов $f_e(p)$ отклоняется от этого соотношения. Это учитывается добавлением соответствующего члена потерь в уравнение переноса (1).

В Приложении А описан разработанный алгоритм численного решения самосогласованной задачи ускорения КЛ сферической ударной волной от сверхновой. Применение эффективной замены переменных, использование неявных конечно-разностных схем для решения уравнения переноса КЛ и уравнений газовой динамики, а также явное выделение положения фронта ударной волны методом распада разрыва позволило на несколько порядков повысить эффективность решения задачи.

Описаны возможные механизмы и приведены формулы, используемые при вычислении потоков нетеплового излучения порождаемого ускоренными частицами в ОСН.

Обсужден вопрос инжекции КЛ в режим ускорения. В соответствии с результатами измерений и численного моделирования бесстолкновительных ударных волн, принято, что в процесс ускорения вовлекается небольшая доля частиц газа после их разогрева на тепловом ударном фронте. Количество инжектируемых частиц в единицу времени (темп инжекции) является свободным параметром теории. Установлено, что эффективное ускорение КЛ происходит в областях, занимающих около 20% поверхности ударной волны ОСН.

Результаты первой главы опубликованы в работах [1, 4–7, 12].

Во второй главе обсуждаются теоретические и экспериментальные указания на значительное усиление магнитного поля в ОСН ускоренными КЛ.

Наблюдения космического рентгеновского телескопа Chandra в жестких рентгеновских лучах от ряда молодых ОСН оболочечного типа различили пространственные структуры излучения с масштабами вплоть до угловой секунды, такие как фронты ударных волн. Предполагая, что эти волокнистые структуры образованы синхротронным излучением электронов вблизи фронтов ударных волн, их ширина рассматривается как длина синхротронного охлаждения ускоренных электронов и используется для вывода напряженности эффективного магнитного поля B_d в области за фронтом ударной волны. Сходство это B_d и напряженности магнитного поля внутри ОСН, требуемого для воспроизведения интегрированного по пространству синхротронного спектра от радио до жесткого рентгеновского диапазона, свидетельствует об адекватности используемых предположений.

Выведена зависимость B_d от толщины волокон l_2 и частоты излучения ν :

$$B_d = [3m_e^2 c^4 / (4e r_0^2 l_2^2)]^{1/3} (\sqrt{1 + \delta^2} - \delta)^{-2/3}, \quad (7)$$

где $\delta^2 = 0.12 [c / (r_0 \nu)] [V_s / (\sigma c)]^2$. Это соотношение достаточно для качественной интерпретации пространственного распределения различных компонент КЛ в ОСН и оценки степени усиления магнитного поля. Однако, для количественного

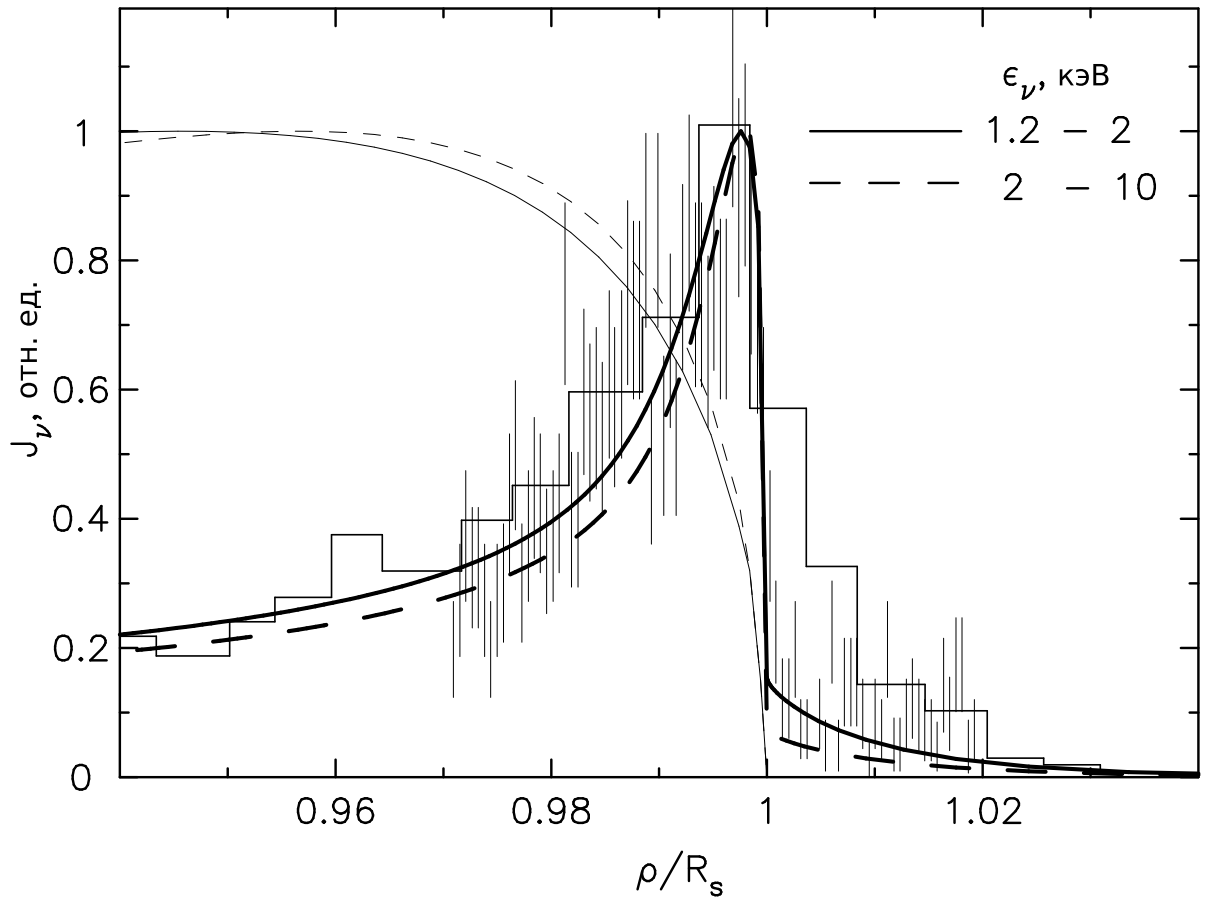


Рис. 1. Радиальная зависимость проецированной яркости рентгеновского излучения в интервалах энергий от 1.2 до 2 кэВ (сплошная кривая) и от 2 до 10 кэВ (штриховая кривая). Толстые и тонкие кривые соответствуют эффективной и, так называемой, неэффективной модели. Самый узкий профиль по данным Chandra представлен в виде гистограммы [46] и вертикальных черточек [47].

сравнения используются точные численные результаты.

Рассчитанные для случая SN 1006 проецированные профили яркости в рентгеновском диапазоне энергий представлены на Рисунке 1. Они характеризуются масштабом $L_2 \approx 0.1$ пк, при этом магнитное поле за фронтом ударной волны составляет $B_d = 120$ мкГс.

В рассмотренных примерах SN 1006 и ОСН Тихо разработанная нелинейная теория ускорения и рентгеновские наблюдения волокнистых структур дают одинаковую морфологию и одинаковый эффект усиления магнитного поля. Эффективная плотность энергии магнитного поля за фронтом ударной волны при этом описывается как $B_d^2/(8\pi) = 3.5 \times 10^{-2} \rho_0 V_s^2$. Расчеты, выполненные для Кассиопея А, ОСН Кеплера, RCW 86 и RX J1713.7-3946 подтверждают такой вывод,

хотя из-за их менее четко определенных значений параметров, менее определено.

Установлено, что наблюдаемые волокнистые структуры рентгеновского излучения являются неотъемлемым аспектом процесса регулярного ускорения в ОСН. Из того факта, что усиление магнитного поля происходит во всех молодых ОСН, для которых существуют соответствующие данные, и, учитывая связь между усилением магнитного поля и эффективностью ускорения ядерных КЛ, можно заключить, что ОСН являются основным источником галактических КЛ.

Результаты второй главы опубликованы в работах [10, 15].

В третьей главе на основе сравнения результатов расчетов и данных наблюдений нетеплового излучения проведено детальное исследование параметров ускорения КЛ и физических свойств остатков СН 1006 и Тихо. В этой главе обобщены результаты, опубликованные в работах [2, 8, 9, 16, 20–22, 26, 27].

Поскольку астрономические параметры, а также синхротронный спектр ОСН 1006 измерены с высокой точностью, значения соответствующих физических параметров модели можно оценить с аналогичной точностью: темп инжекции протонов $\eta \approx 3 \times 10^{-4}$, отношение электронов к протонам $K_{ep} \approx 3.8 \times 10^{-4}$ и магнитное поле за фронтом ударной волны $B_d \approx 150$ мкГс.

На Рисунке 2 приведен поток энергии нетеплового излучения всего остатка СН 1006. Поток ТэВ-ного излучения, обнаруженный H.E.S.S., согласуется с концентрацией водорода в окружающей МЗС $N_H \approx 0.06$ см⁻³, что находится в соответствии со значением полученным по рентгеновским измерениям.

Эффективность производства КЛ в настоящее время оценивается около 5 – 6 процентов и в ходе дальнейшей эволюции остатка ожидается ее рост вплоть до 10 процентов.

Усиление магнитного поля увеличивает максимальную энергию ускоренных протонов вплоть до энергий $\approx 10^{15}$ эВ.

Показано, что спектр γ -излучения при высоких энергиях подвержен влиянию выхода КЛ из ОСН в область предфронта с относительной низкой плот-

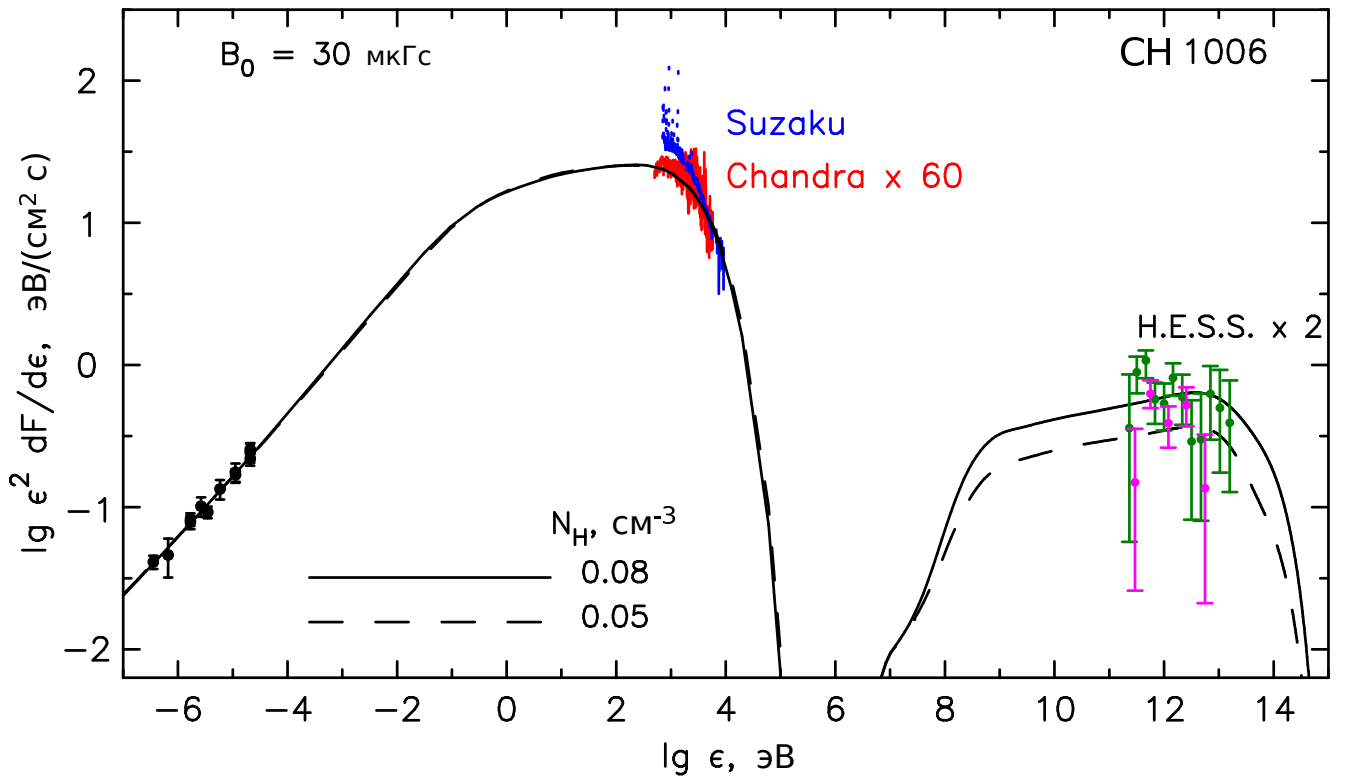


Рис. 2. Поток энергии нетеплового излучения всего остатка SN 1006 в зависимости от энергии фотона, рассчитанный для $N_H = 0.08 \text{ см}^{-3}$ (сплошная линия) и $N_H = 0.05 \text{ см}^{-3}$ (штриховая линия), в сравнении с наблюдательными данными. Данные по радио излучению взяты из компиляции [48]. Приведены измерения Chandra рентгеновского потока из небольшой яркой области на северо-восточном краю SN 1006 [48] (красным цветом) и полный рентгеновский спектр Suzaku (синим цветом) [49]. Данные H.E.S.S. [50] представлены для NE области (зеленый цвет) и для SW области (пурпурный цвет).

ностью газа, что приводит к сравнительно низкой энергии обрезания γ -спектра около 10^{13} eV .

Сделан вывод, что радиальный профиль ТэВ-ного γ -излучения, измеренный H.E.S.S., является свидетельством того, что ядерная компонента КЛ действительно ускоряется эффективно. В противном случае усиления магнитного поля не ожидается и профиль доминирующего IC излучения был бы значительно плавнее наблюдаемого.

Суммируя эти результаты сделан вывод, что SN 1006 является источником КЛ с высокой эффективностью производства ядерной компоненты КЛ, удовлетворяющей требованиям к галактическим источникам КЛ, как по потоку, так и по максимальной энергии.

Спектр γ -излучения от ОСН Тихо, измеренный в экспериментах Fermi и VERITAS, можно объяснить суперпозицией двух компонент: первая компонента, с максимальной энергией около 100 ТэВ, генерируется расширяющейся взрывной ударной волной в разреженной “теплой” фазе окружающей МЗС; вторая, с максимальной энергией 100 ГэВ, рождается в плотных облаках вкрапленных в эту “теплую” МЗС.

В четвертой главе исследуется эволюция нетеплового излучения остатка СН 1987А [7, 13, 18, 24, 30].

Выполненные расчеты показали, что наблюдаемые свойства радиоизлучения ОСН 1987А могут быть удовлетворительно объяснены на основе представлений о регулярном ускорении нуклонной и электронной компонент КЛ ударной волной от вспышки сверхновой, распространяющейся по звездному ветру предсверхновой. При этом теория предсказывает высокую эффективность ускорения КЛ и сильную степень модификации ударной волны обратным воздействием давления КЛ на ударную волну. Имеющийся набор экспериментальных данных позволяет сделать достаточно определенное заключение о величине физических параметров ОСН 1987А.

Относительно низкий темп потери массы голубого сверхгиганта, предсверхновой СН 1987А, $\dot{M} = 7.5 \times 10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$ определяется средней скоростью расширения ударной волны в течении первых 1500 суток после взрыва: $V_s \approx 30000 \text{ км/с}$. Более высокое значение \dot{M} вело бы к более сильному торможению в области сверхзвукового ветра голубого сверхгиганта.

Темп инжекции протонов в режим ускорения непосредственно влияет на степень модификации ударной волны, которая характеризуется значениями степеней сжатия теплового (σ_s) и всего ударного перехода σ . Наблюдаемый относительно мягкий спектр радиоизлучения ОСН 1987А $S \propto \nu^{-\alpha}$, $\alpha \approx 0.9$ производится синхротронным излучением релятивистских электронов со степенным спектром $f \propto p^{-q}$, $q \approx 4.8$, который естественным образом воспроизводится модифицированной ударной волной со степенью сжатия на тепловом фронте

$\sigma_s \approx 3$. Такая степень модификации достигается, когда в процесс ускорения вовлекается (инжектируется) доля $\eta = 10^{-2}$ протонов среды, заметаемой ударной волной.

Помимо указанных двух параметров \dot{M} и η , на величину потока радиоизлучения непосредственно влияет магнитное поле. Согласие с измеренным потоком в течение первых двенадцати дней достигается при значении поля на поверхности голубого сверхгиганта $B_* = 59$ Гс, которое является типичным для звезд этого класса.

Зарегистрированный рост радиоизлучения ОСН 1987А на фазе $t \approx 1200$ сут [51, 52] естественным образом связывается с моментом достижения взрывной ударной волной зоны II термализованного звездного ветра $r > R_T$. Резкое увеличение плотности среды и магнитного поля на фронте стоячей ударной волны ($r = R_T$), отделяющей эту зону I от зоны II сверхзвукового ветра, обуславливает рост радиоизлучения. Согласно расчету размер стоячей ударной волны $R_T = 3.1 \times 10^{15}$ см.

Наблюдаемое в эксперименте значительное торможение ударной волны на фазе $t = 1500 \div 3000$ сут, во время которой скорость ударной волны по измерениям динамики радиоизображения ОСН 1987А упала с 30000 км/с до 3000 км/с [52], воспроизводится в расчете за счет третьей, более плотной зоны III, занятой веществом ветра красного сверхгиганта с концентрацией $N_g = 420 \text{ см}^{-3}$, расположенной в области $r > 5 \times 10^{17}$ см. Теория обеспечивает приемлемое согласие свойств радиоизлучения ОСН 1987А с экспериментом при значении магнитного поля $B = 76$ мкГс и $B = 38$ мкГс в зоне II и III соответственно.

Радио данные свидетельствуют об эффективном производстве КЛ, приводящей к сильной модификации ударной волны. Значительная модификация ударной волны приводит к образованию крутого и вогнутого спектра КЛ, который хорошо вписывается в наблюдаемый спектр радиоизлучения, при условии чрезвычайно сильного магнитного поля $B_d \sim 1$ мГс. Для того, чтобы соответствовать также измерениям потока рентгеновского излучения Chandra, которое должно

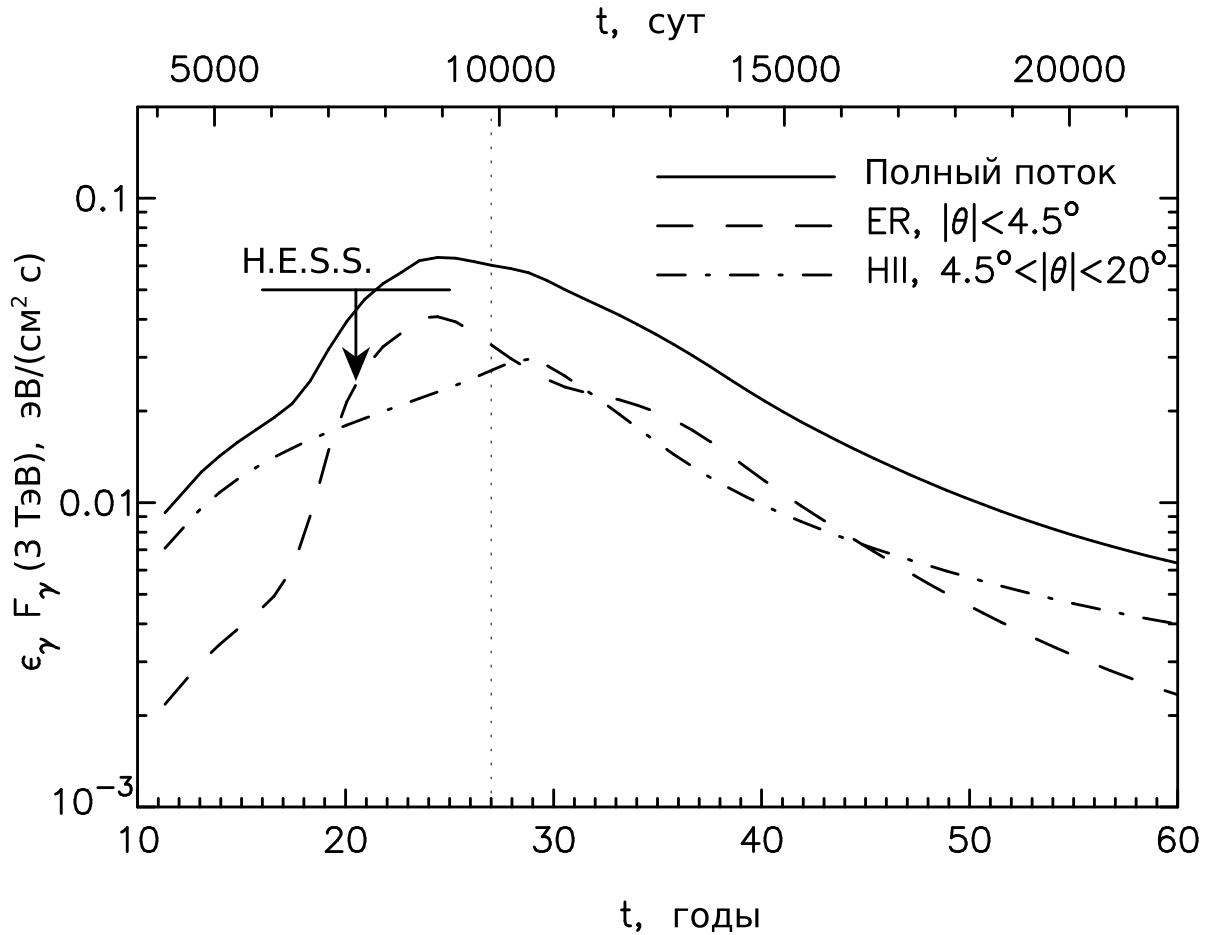


Рис. 3. Интегральный поток энергии γ -излучения выше 3 ТэВ от ОСН 1987А как функция времени. Приведен также верхний предел Н.Е.С.С. [53], соответствующий периоду наблюдений с 2005-го по 2012-й год.

рассматриваться как верхний предел для нетеплового рентгеновского излучения, требуется еще большее поле за фронтом $B_d \approx 10$ мГс. Такое высокое поле обеспечивает сильные синхротронные потери электронов КЛ, излучающих нетепловые рентгеновские лучи, что делает высокочастотную часть спектра синхротронного излучения гораздо более крутым и обеспечивает согласованность с экспериментом. Заметим, что хотя нет прямых экспериментальных свидетельств эффективного ускорения нуклонной компоненты КЛ в СН 1987А, необходимость существенной модификации ударной волны и сильного усиления магнитного поля может рассматриваться в качестве указания на то, что ускорение нуклонной компоненты КЛ действительно имеет место.

Как видно из Рисунка 3, ожидаемый поток γ -излучения ТэВ-ных энергий от остатка СН 1987А в настоящее время достиг своего максимального значения

и попадает в диапазон чувствительности γ -телескопа H.E.S.S. и планируемой установки СТА. В дальнейшем ожидается постепенный спад потока. Период времени с 2008-го по 2018-й год является наиболее перспективным для наблюдения ТэВ-ного γ излучения от СН 1987А.

Изучению особенностей спектра и химического состава КЛ, ускоренных ударной волной ОСН, посвящена **пятая глава** диссертации. Результаты этой главы опубликованы в работах [4, 6, 25].

Выявлены отличия спектров ускоренных КЛ в режиме ненасыщенной (слабой) и насыщенной (сильной) инжекции частиц в режим ускорения. Установлены значения предельной энергии (энергии обрезания) в спектре ускоренных КЛ. Спектр КЛ, производимых ударной волной в ОСН, имеет сложный характер, отражающий механизм нелинейного взаимодействия КЛ со средой, а также явления убегания КЛ на поздних стадиях эволюции остатка.

Усиление магнитного поля приводит к значительному увеличению максимальной энергии КЛ, ускоренных в ОСН. Максимальное значение предельной энергии достигается в конце стадии свободного разлета. Как показали выполненные расчеты спектры КЛ ускоренных в ОСН удовлетворительно воспроизводят наблюдаемую форму энергетического спектра вплоть до энергии 10^{17} эВ. “Колено” в наблюдаемом спектре всех частиц связано с максимальной энергией протонов, произведенных в ОСН. Укрупнение спектра выше энергии “колена” 3×10^{15} эВ связано со снижением вклада легких ядер с ростом энергии.

Теория также воспроизводит наблюдаемую зависимость (рост) относительного содержания элементов в составе КЛ $e(A)$ при фиксированной энергии на нуклон как функции атомного числа A , т.е. соотношение амплитуд спектров различных элементов в составе КЛ. При этом частично эффект роста $e(A)$ обусловлен свойством нелинейного процесса регулярного ускорения более эффективно ускорять частицы с большим отношением A/Q массового и зарядового чисел. Для количественного воспроизведения зависимости $e(A)$ необходимо чтобы механизм инжекции также обладал свойством обогащения тяжелыми элементами

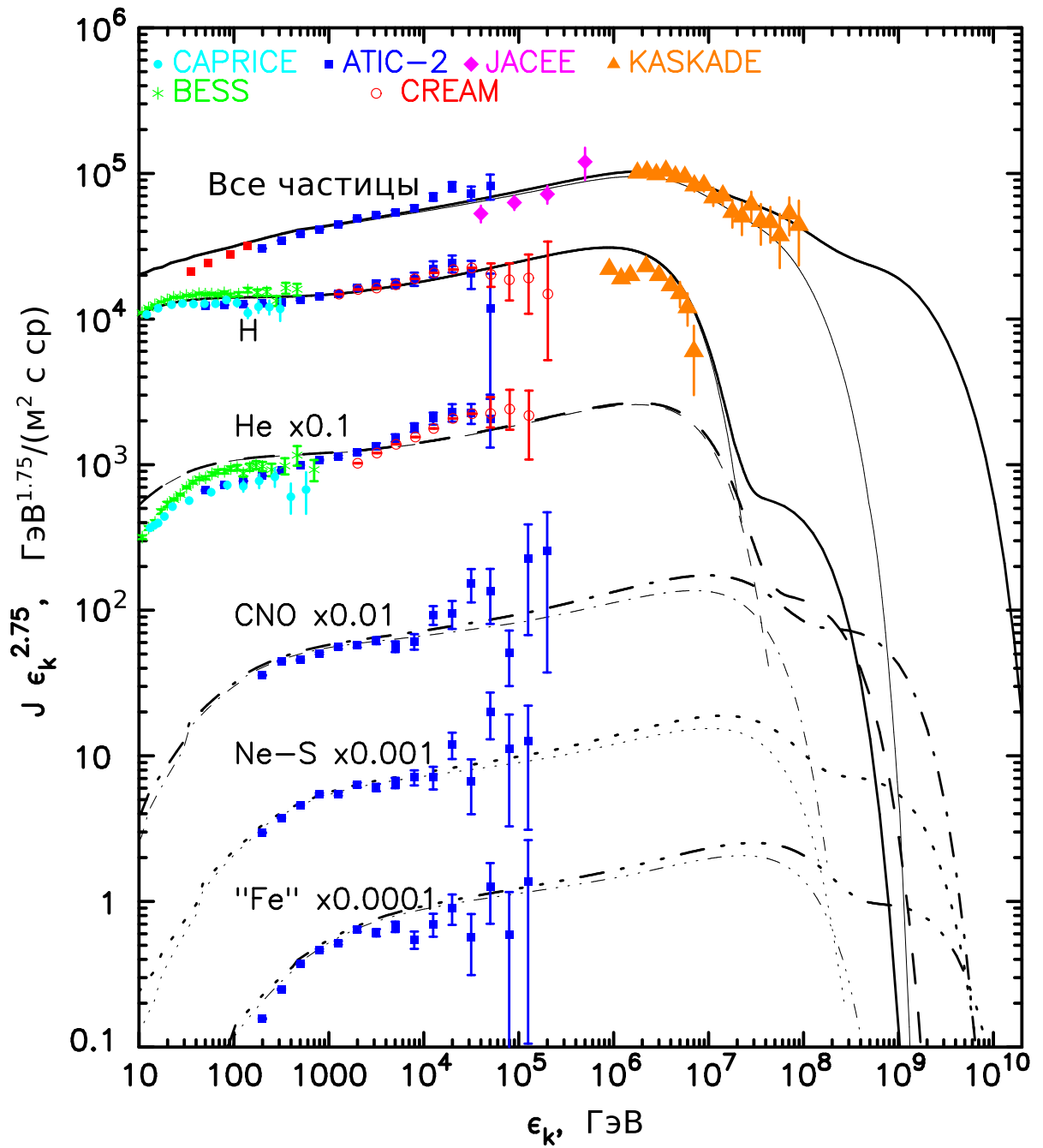


Рис. 4. Интенсивность КЛ вблизи Земли как функция кинетической энергии. Представлены данные полученные в экспериментах CAPRICE [54], BESS [55], ATIC-2 [56], CREAM [57], JACEE [58] и KASCADE [59]. Тонкие линии соответствуют случаю ОСН типа Ia в однородной МЗС, толстые — учитывают еще и вклад от ОСН в плотном ветре предсверхновой.

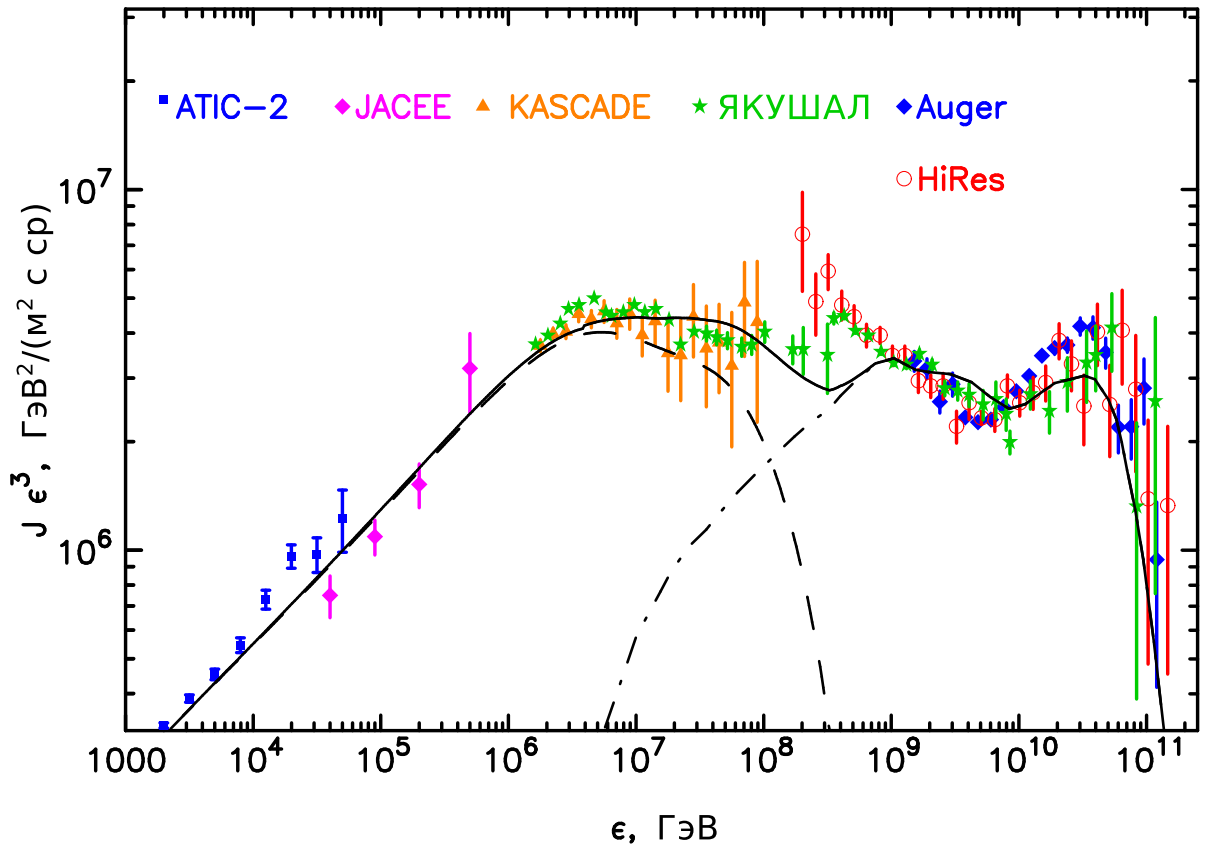


Рис. 5. Суммарная интенсивность КЛ (толстая сплошная линия), галактическая компонента КЛ, произведенная в ОСН (тонкая штриховая линия) и внегалактическая компонента КЛ (тонкая штрих-пунктирная линия) как функции энергии для сценария “dip”. Приведенные данные получены в экспериментах ATIC-2 [56], JACEE [58], KASCADE [59], Auger [60], HiRes [61] и ЯКУШАЛ при $\epsilon < 3 \times 10^{17}$ эВ [62] и при $\epsilon > 3 \times 10^{17}$ эВ [63].

$$e_{inj} \propto A^\alpha, \alpha \approx 1.$$

Экспериментальные данные по составу КЛ сверхвысоких энергий характеризуются наличием локального максимума среднего логарифма атомного числа ядер КЛ $\langle \ln A \rangle \approx 2.5$ при энергии $\epsilon \sim 10^{17}$ эВ (см. Рисунок 6). Это может рассматриваться как указание на переход от галактической компоненты КЛ, производимой в галактических ОСН, к внегалактической компоненте КЛ в интервале энергий 10^{17} – 10^{18} эВ.

Шестая глава посвящена исследованию процесса ускорения вторичных КЛ в ОСН [11, 28, 29]. Описание также основано на самосогласованной кинетической нелинейной модели. Показано, что доускорение существующих галактических КЛ и расщепление первичных КЛ в столкновениях с ядрами газа в ОСН сильно влияет на энергетические спектры вторичных КЛ. Благодаря этим допол-

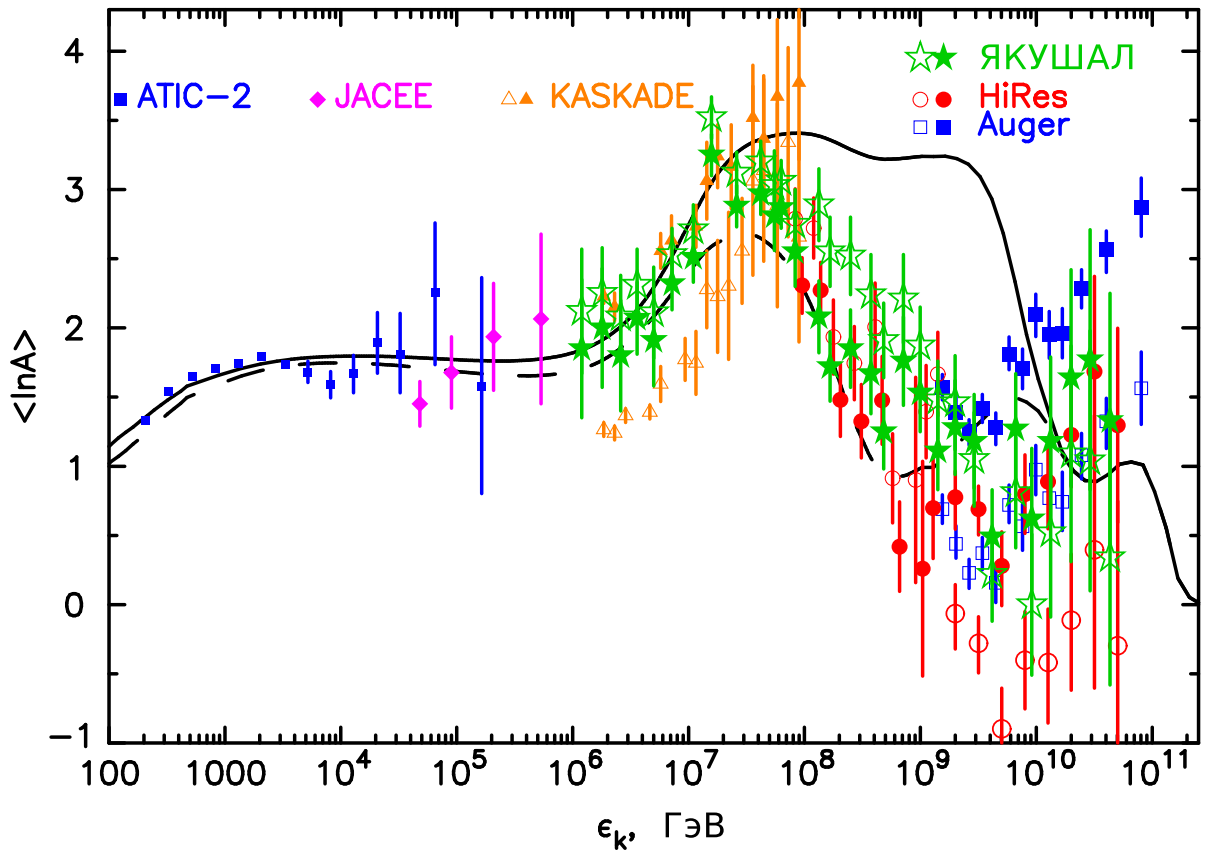


Рис. 6. Средний логарифм атомного числа ядер КЛ в зависимости от энергии. Расчеты, соответствующие моделям “ankle” и “dip” показаны соответственно сплошными и пунктирными линиями. Приведены данные, полученные в экспериментах ATIC-2 [64], JACEE, KASCADE [65], Auger [66], HiRes при $\epsilon < 10^{18}$ эВ [67], HiRes при $\epsilon > 10^{18}$ эВ [68] и ЯКУШАЛ.

нительным механизмам, спектры всех вторичных КЛ становятся более пологими при высоких энергиях.

Эффективность производства ядер вторичных КЛ ОСН зависит от плотности МЗС, в которой эволюционируют ОСН. Чем ниже плотность МЗС, тем большего объёма достигает ОСН за время активного периода эволюции. Соответственно отношение числа заметённых и доускоренных фоновых галактических КЛ к инжектируемым из теплового распределения будет больше. Увеличение плотности МЗС приводит к уменьшению эффекта доускорения. В то же время, производство вторичных КЛ в ОСН при расщеплении первичных становится все более важным. Если значение типичной плотности, где взрываются сверхновые, находится примерно между $N = 0.3$ и 1 см^{-3} , то доускорение и расщепление дают примерно равный вклад в отношение В/С при $\epsilon_k \approx 1$ ТэВ/нуклон,

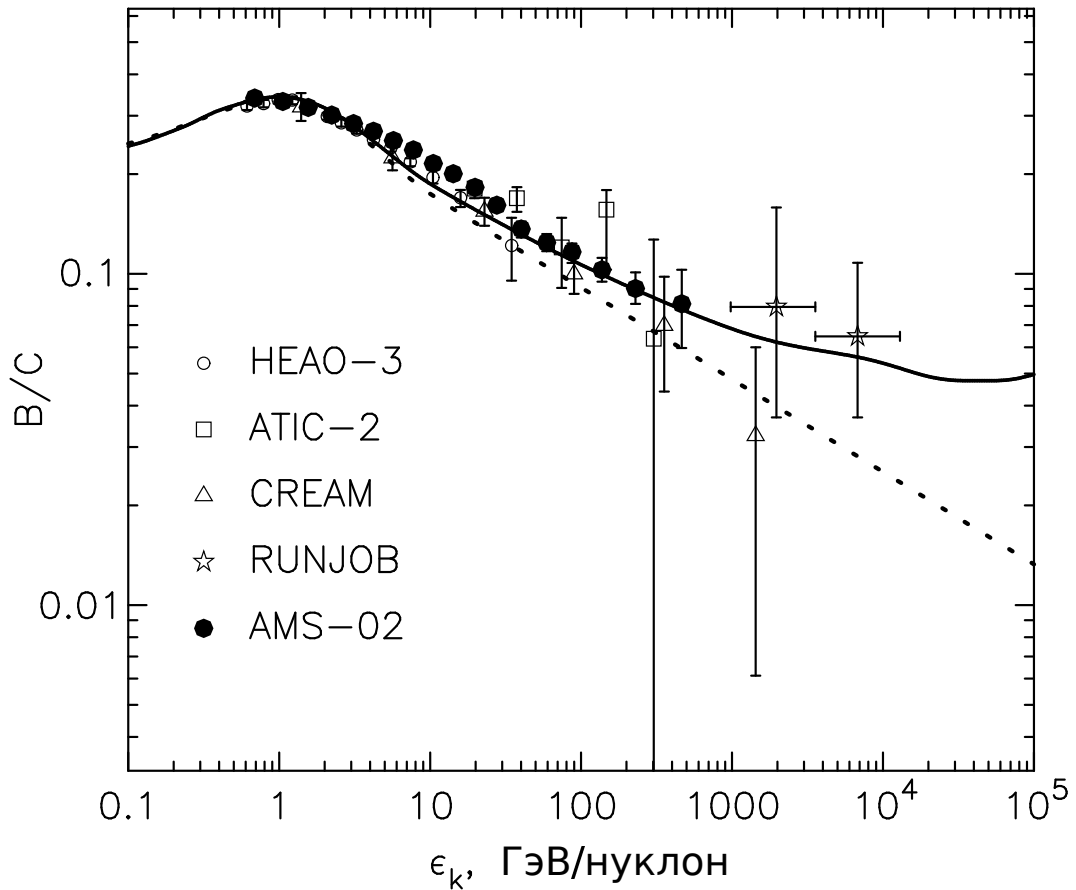


Рис. 7. Рассчитанное отношение бора к углероду в зависимости от кинетической энергии на ядро и с результаты экспериментов HEAO-3 [69], ATIC-2 [56], CREAM [57], RUNJOB [70] и AMS-02 [71]. Пунктирная линия соответствует спектру бора, произведенного в ядерных столкновениях в МЗС, сплошная линия представляет спектр бора, включающий вклад ОСН.

при более высоких энергиях расщепление становится доминирующим.

Если сверхновые взрываются в основном в МЗС с $N_H = 1 \text{ см}^{-3}$, то производство бора в ОСН приведет к чрезвычайно пологому, почти не зависящему от энергии отношению В/С при $\epsilon_k > 1 \text{ ТэВ/нуклон}$. Обнаружение такого пологого, не зависящего от энергии отношения будет подтверждением происхождения галактических КЛ в ОСН.

Рассчитанные спектры позитронов и антипротонов согласуются с существующими данными. Растущее отношение позитронов к электронам может быть объяснено значительным, если не доминирующим, вкладом ОСН (см. Рисунок 8).

Поскольку установлено, что ОСН являются основными источниками галактических КЛ, то вклад ОСН в спектр вторичных галактических КЛ необходимо

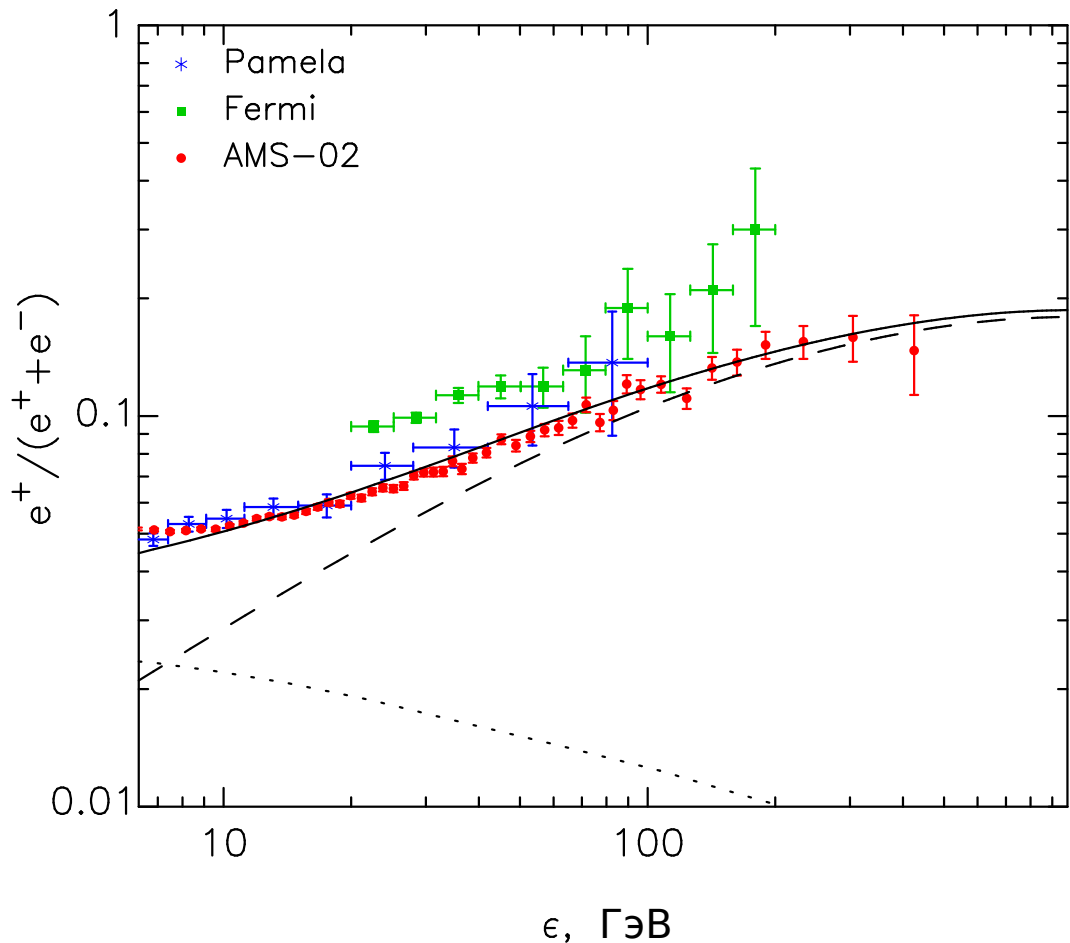


Рис. 8. Рассчитанное отношение позитронов к электронам как функция кинетической энергии. Приведены данные экспериментов PAMELA [72], Fermi [73] и AMS-02 [74]. Штриховая (пунктирная) линия представляет собой отношение, которое включает позитроны, произведенные только в ОСН (МЗС); сплошная линия соответствует сумме этих компонент.

учитывать в любых сценариях формирования их спектра.

В Заключение приведены основные результаты полученные в диссертации:

Реализован эффективный метод численного решения задачи ускорения КЛ ударными волнами от сверхновых. Детальное исследование процесса ускорения КЛ в ОСН позволило получить надежные сведения о том, что он характеризуется высокой эффективностью: энергосодержание ускоренных ударной волной от сверхновой КЛ достаточно для пополнения галактических КЛ.

Установлено наличие сильного магнитного поля в молодых ОСН, на два порядка превосходящего типичные значения магнитного поля в МЗС. Установленная связь пространственного размера области излучения и величины магнит-

ного поля дает возможность надежного определения величины магнитного поля в ОСН.

На примере остатков SN 1006, Тихо показано, что развитая теория позволяет не только адекватно описывать всю имеющуюся совокупность экспериментальных данных (размер и скорость расширения ударной волны; потоки радио-, рентгеновского и γ -излучения), а в случае SN 1987A и их эволюцию во времени; но и предсказывать их.

Одним из следствий значительного усиления магнитного поля в остатках является то, что наблюдаемое γ -излучение высокой энергии в основном производится нуклонной компонентой КЛ, а не электронами, как считается другими авторами, чьи выводы основаны на приближенных оценках. При этом требуемое для объяснения наблюдаемого γ -излучения содержание нуклонной компоненты в остатках согласуется с представлением о том, что сверхновые – основной источник КЛ в Галактике.

Установленное усиление магнитного поля приводит к значительному увеличению максимальной энергии КЛ, ускоренных в ОСН. Как показали выполненные расчеты, спектры КЛ, ускоренных в ОСН, удовлетворительно воспроизводят наблюдаемую форму энергетического спектра вплоть до энергии 10^{17} эВ. “Колено” в наблюдаемом спектре всех частиц связано с максимальной энергией протонов, произведенных в ОСН. Укручение спектра выше энергии “колена” 3×10^{15} эВ связано со снижением вклада легких ядер с ростом энергии.

Установлено, что ОСН вносят значительный вклад в спектр вторичных КЛ. Если считать, что ОСН являются основным источником галактических КЛ, то их вклад в спектр всех вторичных КЛ необходимо учитывать.

Таким образом, на основе детального исследования процесса регулярного ускорения КЛ в ОСН установлено, что ОСН являются основным источником галактических КЛ вплоть до $\sim 10^{17}$ эВ.

Список публикаций

1. Berezhko E. G., Yelshin V. K., Ksenofontov L. T. Numerical Investigation of Cosmic Ray Acceleration in Supernova Remnants // *Astroparticle Physics*. 1994. Vol. 2. P. 215–227.
2. Аммосов А. Е., Ксенофонтов Л. Т., Николаев В. С., Петухов С. И. Синхротронное излучение остатков сверхновых I типа // *Письма в Астрон.ж.* 1994. Т. 20. С. 191–197.
3. Berezhko E. G., Ksenofontov L. T., Yelshin V. K. Efficiency of Cosmic Ray Acceleration in Supernova Remnants // *Nuclear Phys.B (Proc.Suppl.)*. 1995. Vol. 39. P. 171–181.
4. Бережко Е. Г., Ёлшин В. К., Ксенофонтов Л. Т. Ускорение космических лучей в остатках сверхновых // *ЖЭТФ*. 1996. Т. 109. С. 3–43.
5. Бережко Е. Г., Ёлшин В. К., Ксенофонтов Л. Т. Численное исследование ускорения космических лучей в остатках сверхновых // *Астроном.ж.* 1996. Т. 73. С. 176–188.
6. Бережко Е. Г., Ксенофонтов Л. Т. Состав космических лучей, ускоренных в остатках сверхновых // *ЖЭТФ*. 1999. Т. 116. С. 737–759.
7. Бережко Е. Г., Ксенофонтов Л. Т. Космические лучи, радио- и гамма-излучение остатка сверхновой 1987 А // *Письма в Астрон. ж.* 2000. Т. 26. С. 741–760.
8. Berezhko E. G., Ksenofontov L. T., Völk H. J. Emission of SN 1006 produced by accelerated cosmic rays // *Astron. Astrophys.*. 2002. Vol. 395. P. 943–953.
9. Völk H. J., Berezhko E. G., Ksenofontov L. T., Rowell G. P. The high energy gamma-ray emission expected from Tycho's supernova remnant // *Astron. Astrophys.*. 2002. Vol. 396. P. 649–656.
10. Berezhko E. G., Ksenofontov L. T., Völk H. J. Confirmation of strong magnetic field amplification and nuclear cosmic ray acceleration in SN 1006 // *Astron. Astrophys.*. 2003. Vol. 412. P. L11–L14.

11. Berezhko E. G., Ksenofontov L. T., Ptuskin V. S. et al. Cosmic ray production in supernova remnants including reacceleration: The secondary to primary ratio // *Astron. Astrophys.*. 2003. Vol. 410. P. 189–198.
12. Völk H. J., Berezhko E. G., Ksenofontov L. T. Variation of cosmic ray injection across supernova shocks // *Astron. Astrophys.*. 2003. Vol. 409. P. 563–571.
13. Enomoto R., Ksenofontov L. T., Katagiri H. et al. A Search for TeV Gamma Rays from SN 1987A in 2001 // *Astrophys. J.*. 2003. Vol. 591. P. L25–L28.
14. Ksenofontov L. T., Enomoto R., Katagiri H. et al. Search for TeV γ -rays from the remnant of SN 1987A // *New Astronomy Review*. 2004. Vol. 48. P. 485–487.
15. Völk H. J., Berezhko E. G., Ksenofontov L. T. Magnetic field amplification in Tycho and other shell-type supernova remnants // *Astron. Astrophys.*. 2005. Vol. 433. P. 229–240.
16. Ksenofontov L. T., Berezhko E. G., Völk H. J. Dependence of the gamma-ray emission from SN 1006 on the astronomical parameters // *Astron. Astrophys.*. 2005. Vol. 443. P. 973–980.
17. Berezhko E. G., Ksenofontov L. T., Völk H. J. Gamma-ray emission expected from Kepler's supernova remnant // *Astron. Astrophys.*. 2006. Vol. 452. P. 217–221.
18. Berezhko E. G., Ksenofontov L. T. Magnetic Field in Supernova Remnant SN 1987A // *Astrophys. J. Letters*. 2006. Vol. 650. P. L59–L62.
19. Völk H. J., Berezhko E. G., Ksenofontov L. T. New evidence for strong nonthermal effects in Tycho's supernova remnant // *Astrophys. Space Sci.*. 2007. Vol. 309. P. 389–394.
20. Völk H. J., Berezhko E. G., Ksenofontov L. T. Internal dynamics and particle acceleration in Tycho's SNR // *Astron. Astrophys.*. 2008. Vol. 483. P. 529–535.
21. Völk H. J., Ksenofontov L. T., Berezhko E. G. Inverse Compton gamma-ray models for remnants of Galactic type Ia supernovae? // *Astron. Astrophys.*. 2008. Vol. 490. P. 515–519.
22. Berezhko E. G., Ksenofontov L. T., Völk H. J. Cosmic ray acceleration parame-

- ters from multi-wavelength observations. The case of SN 1006 // *Astron. Astrophys.*. 2009. Vol. 505. P. 169–176.
23. Ksenofontov L. T., Völk H. J., Berezhko E. G. Nonthermal Properties of Supernova Remnant G1.9+0.3 // *Astrophys. J.*. 2010. Vol. 714. P. 1187–1193.
 24. Berezhko E. G., Ksenofontov L. T., Völk H. J. Expected Gamma-Ray Emission of Supernova Remnant SN 1987A // *Astrophys. J.*. 2011. Vol. 732. P. 58.
 25. Berezhko E. G., Knurenko S. P., Ksenofontov L. T. Composition of cosmic rays at ultra high energies // *Astroparticle Physics*. 2012. Vol. 36. P. 31–36.
 26. Berezhko E. G., Ksenofontov L. T., Völk H. J. Nonthermal Emission of Supernova Remnant SN 1006 Revisited: Theoretical Model and the H.E.S.S. Results // *Astrophys. J.*. 2012. Vol. 759. P. 12.
 27. Berezhko E. G., Ksenofontov L. T., Völk H. J. The Nature of Gamma-Ray Emission of Tycho's Supernova Remnant // *Astrophys. J.*. 2013. Vol. 763. P. 14.
 28. Berezhko E. G., Ksenofontov L. T. Energy spectra of electrons and positrons produced in supernova remnants // *Journal of Physics Conference Series*. 2013. Vol. 409, no. 1. P. 012025.
 29. Berezhko E. G., Ksenofontov L. T. Antiprotons Produced in Supernova Remnants // *Astrophys. J. Letters*. 2014. Vol. 791. P. L22.
 30. Berezhko E. G., Ksenofontov L. T., Völk H. J. Re-examination of the Expected Gamma-Ray Emission of Supernova Remnant SN 1987A // *Astrophys. J.*. 2015. Vol. 810. P. 63.

Цитированная литература

31. Гинзбург В. Л., Сыроватский С. И. Происхождение космических лучей. М.: Наука, 1963. С. 384.
32. Березинский В. С., Буланов С. В., Гинзбург В. Л. и др. Астрофизика космических лучей / Под ред. В. Л. Гинзбург. М.: Наука, 1984. С. 360.
33. Крымский Г. Ф. Регулярный механизм ускорения заряженных частиц на

- фронте ударной волны // Докл. АН СССР. 1977. Т. 234. С. 1306–1308.
34. Bell A. R. The Acceleration of Cosmic Rays in Shock front. I // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.. 1978. Vol. 182. P. 147–156.
 35. Drury L. O. An Introduction to the Theory of Diffusive Shock Acceleration of Energetic Particles in Tenuous Plasmas // Rep.Progr.Phys. 1983. Vol. 46. P. 973–1027.
 36. Blandford R. D., Eichler D. Particle Acceleration at Astrophysical Shocks: a Theory of Cosmic Ray Origin // Phys. Reports. 1987. Vol. 154. P. 1–75.
 37. Бережко Е. Г., Крымский Г. Ф. Ускорение космических лучей ударными волнами // УФН. 1988. Т. 154. С. 49–91.
 38. Бережко Е. Г., Ёлшин В. К., Крымский Г. Ф., Петухов С. И. Генерация космических лучей ударными волнами. Новосибирск: Наука, 1988. С. 182.
 39. Malkov M. A., Drury L. O. Nonlinear theory of diffusive acceleration of particles by shock waves // Reports of Progress in Physics. 2001. Vol. 64. P. 429–481.
 40. Berezhko E. G. Cosmic ray acceleration by supernova shocks // Advances in Space Research. 2008. Vol. 41. P. 429–441.
 41. Kang H., Jones T. W. Numerical studies of diffusive shock acceleration at spherical shocks // Astropart. Phys. 2006. Vol. 25. P. 246–258.
 42. Zirakashvili V. N., Ptuskin V. S. The influence of the Alfvénic drift on the shape of cosmic ray spectra in SNRs // American Institute of Physics Conference Series / Ed. by F. A. Aharonian, W. Hofmann, F. Rieger. Vol. 1085 of American Institute of Physics Conference Series. 2008. P. 336–339.
 43. Крымский Г. Ф. Диффузионный механизм суточной вариации космических лучей // Геомагнетизм и аэрномия. 1964. Т. 4. С. 977–986.
 44. Parker I. N. The Passage of Energetic Charged Particles Through Interplanetary Space // Planet. Space Sci. 1965. Vol. 13. P. 9–49.
 45. Долгинов А. З., Топтыгин И. Н. Многократное рассеяние частиц в магнитном поле со лучайными неоднородностями // ЖЭТФ. 1966. Т. 51. С. 1771.
 46. Bamba A., Yamazaki R., Ueno M., Koyama K. Small-Scale Structure of the

- SN 1006 Shock with Chandra Observations // *Astrophys. J.*. 2003. Vol. 589. P. 827–837.
47. Long K. S., Reynolds S. P., Raymond J. C. et al. Chandra CCD Imagery of the Northeast and Northwest Limbs of SN 1006 // *Astrophys. J.*. 2003. Vol. 586. P. 1162–1178.
48. Allen G. E., Houck J. C., Sturmer S. J. Fits to X-ray, radio, and TeV data for the eastern rim of SN 1006 // *Advances in Space Research.* 2004. Vol. 33. P. 440–445.
49. Bamba A., Fukazawa Y., Hiraga J. S. et al. Suzaku Wide-Band Observations of SN1006 // *Publ. of Astron. Soc. of Japan.* 2008. Vol. 60. P. S153–S162.
50. Acero F., Aharonian F., Akhperjanian A. G., et al. First detection of VHE γ -rays from SN 1006 by HESS // *Astron. Astrophys.* 2010. Vol. 516. P. A62.
51. Staveley-Smith L., Manchester R. N., Kesteven M. J. et al. Birth of a radio supernova remnant in supernova 1987A // *Nature.* 1992. Vol. 355. P. 147–149.
52. Gaensler B. M., Manchester R. N., Staveley-Smith L. et al. The Asymmetric Radio Remnant of SN 1987A // *Astrophys. J.*. 1997. Vol. 479. P. 845–858.
53. H.E.S.S. Collaboration, Abramowski A., Aharonian F. et al. The exceptionally powerful TeV γ -ray emitters in the Large Magellanic Cloud // *Science.* 2015. Vol. 347. P. 406–412.
54. Boezio M., Bonvicini V., Schiavon P., et al. The cosmic-ray proton and helium spectra measured with the CAPRICE98 balloon experiment // *Astroparticle Physics.* 2003. Vol. 19. P. 583–604.
55. Haino S., Sanuki T., Abe K., et al. Measurements of primary and atmospheric cosmic-ray spectra with the BESS-TeV spectrometer // *Physics Letters B.* 2004. Vol. 594. P. 35–46.
56. Panov A. D., Adams J. H., Ahn H. S., et al. The results of ATIC-2 experiment for elemental spectra of cosmic rays // *ArXiv e-prints.*, 2006. [astro-ph/0612377](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0612377).
57. Yoon Y. S., Ahn H. S., Allison P. S., et al. Cosmic-ray Proton and Helium Spectra from the First CREAM Flight // *Astrophys. J.*. 2011. Vol. 728. P. 122.

58. Asakimori K., Burnett T. H., Cherry M. L., et al. Cosmic-Ray Proton and Helium Spectra: Results from the JACEE Experiment // *Astrophys. J.*. 1998. Vol. 502. P. 278–283.
59. Antoni T., Apel W. D., Badea A. F., et al. KASCADE measurements of energy spectra for elemental groups of cosmic rays: Results and open problems // *Astroparticle Physics*. 2005. Vol. 24. P. 1–25.
60. Abraham J., Abreu P., Aglietta M., et al. Observation of the Suppression of the Flux of Cosmic Rays above 4×10^{19} eV // *Phys. Rev. Lett.*. 2008. Vol. 101, no. 6. P. 061101.
61. Bergman D. R., The High Resolution Fly's Eye Collaboration. Observation of the GZK Cutoff Using the HiRes Detector // *Nuclear Physics B Proceedings Supplements*. 2007. Vol. 165. P. 19–26.
62. Ivanov A. A., Knurenko S. P., Sleptsov I. Y. Measuring extensive air showers with Cherenkov light detectors of the Yakutsk array: the energy spectrum of cosmic rays // *New Journal of Physics*. 2009. Vol. 11, no. 6. P. 065008.
63. Egorova V. P., Glushkov A. V., Ivanov A. A., et al. The spectrum features of UHECRs below and surrounding GZK // *Nuclear Physics B Proceedings Supplements*. 2004. Vol. 136. P. 3–11.
64. Panov A. D., Adams J. H., Ahn H. S., et al. Energy spectra of abundant nuclei of primary cosmic rays from the data of ATIC-2 experiment: Final results // *Bulletin of the Russian Academy of Science, Phys.* 2009. Vol. 73. P. 564–567.
65. Hörandel J. R. A review of experimental results at the knee // *Journal of Physics Conference Series*. 2006. Vol. 47. P. 41–50.
66. Abraham J., Abreu P., Aglietta M., et al. Measurement of the Depth of Maximum of Extensive Air Showers above 10^{18} eV // *Phys. Rev. Lett.*. 2010. Vol. 104, no. 9. P. 091101.
67. Abbasi R. U., Abu-Zayyad T., Archbold G., et al. A Study of the Composition of Ultra-High-Energy Cosmic Rays Using the High-Resolution Fly's Eye // *Astrophys. J.*. 2005. Vol. 622. P. 910–926.

68. Abbasi R. U., Abu-Zayyad T., Al-Seady M., et al. Indications of Proton-Dominated Cosmic-Ray Composition above 1.6 EeV // *Phys. Rev. Lett.*. 2010. Vol. 104, no. 16. P. 161101.
69. Engelmann J. J., Ferrando P., Soutoul A. et al. Charge composition and energy spectra of cosmic-ray nuclei for elements from Be to Ni - Results from HEAO-3-C2 // *Astron. Astrophys.*. 1990. Vol. 233. P. 96–111.
70. Derbina V. A., Galkin V. I., Hareyama M. et al. Cosmic-Ray Spectra and Composition in the Energy Range of 10-1000 TeV per Particle Obtained by the RUNJOB Experiment // *Astrophys. J. Letters*. 2005. Vol. 628. P. L41–L44.
71. Aguilar M. et al. (AMS Collaboration). AMS-02 provides a precise measure of cosmic rays // *CERN Courier*. 2013. Vol. 53, no. 8. P. 23–26.
72. Adriani O. et al. Cosmic-Ray Positron Energy Spectrum Measured by PAMELA // *Phys. Rev. Lett.*. 2013. Vol. 111, no. 8. P. 081102.
73. Ackermann M. et al. Measurement of Separate Cosmic-Ray Electron and Positron Spectra with the Fermi Large Area Telescope // *Phys. Rev. Lett.*. 2012. Vol. 108. P. 011103.
74. Accardo L. et al. High Statistics Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5-500 GeV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station // *Phys. Rev. Lett.*. 2014. Vol. 113. P. 121101.

Научное издание

КСЕНОФОНТОВ Леонид Трофимович

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук на тему:

Теория ускорения космических лучей в остатках сверхновых