

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Ксенофонтова Леонида Трофимовича «Теория ускорения космических лучей в остатках сверхновых», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертация Л. Т. Ксенофонтова содержит результаты многолетних исследований автора по развитию теории ускорения космических лучей в остатках сверхновых звезд. Развитая автором модель используется для получения физических результатов по нетепловому излучению остатков ряда сверхновых и спектру космических лучей, а также по поиску доказательств того, что остатки сверхновых являются основным источником галактических космических лучей вплоть до  $\sim 10^{17}$  эВ.

**Актуальность темы диссертации.** Установление источников галактических космических лучей принадлежит к числу наиболее актуальных нерешенных проблем современной астрофизики частиц высоких энергий. Несмотря на значительное развитие, которое получила теория регулярного ускорения космических лучей на ударных волнах с момента открытия этого процесса (Крымский Г.А., 1977; Bell A.R., 1978), роль детальных теоретических результатов, способных давать предсказания энергетических спектров и химического состава космических лучей, генерируемых в остатках сверхновых, а также ожидаемого потока гамма-излучения, возникающего при взаимодействии высокоэнергетических космических лучей с окружающим веществом исключительно высока. В силу этого диссертационная работа Л. Т. Ксенофонтова, нацеленная на развитие теории ускорения космических лучей в остатках сверхновых, интерпретацию на ее базе результатов измерений нетеплового излучения, а также на анализ гипотезы о том, что сверхновые — основные источники космических лучей высокой энергии в Галактике, является, безусловно, актуальной.

**Целью диссертационной работы** является детальное исследование процесса регулярного ускорения частиц в остатках сверхновых, которое позволит сделать обоснованное заключение о роли остатков сверхновых как основного источника космических лучей в Галактике.

**Структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем диссертации составляет 222 страницы, включая 51 рисунок и список использованной литературы из 233 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, представлены основные научные результаты и новизна диссертации, личный вклад автора и апробация результатов.

**Первая глава** содержит формулировку задачи ускорения космических лучей на ударной волне от остатка сверхновой. Изложен кинетический подход с учетом реальной геометрии ударной волны и ее модификации обратным воздействием ускоренных космических лучей. Описан разработанный и реализованный автором оригинальный численный алгоритм решения задачи ускорения космических лучей с применением эффективной замены переменной, использованием неявных конечно-разностных схем для решения уравнений переноса частиц и уравнений газодинамики, а также явного выделения положения фронта ударной волны методом распада разрыва. Показано, что разработанный алгоритм позволяет на несколько порядков повысить эффективность численного решения задачи. Описаны возможные механизмы нетеплового излучения, порождаемого ускоренными частицами космических лучей. Рассмотрен вопрос инжекции космических лучей в режим ускорения. Установлено, что эффективное ускорение частиц происходит в областях, занимающих около 20% поверхности ударной волны.

**Во второй главе** рассмотрены теоретические и экспериментальные указания на значительное усиление магнитного поля в остатках сверхновых обратным воздействием ускоренных космических лучей. Установлено, что наблюдаемые волокнистые структуры рентгеновского излучения являются неотъемлемым аспектом процессом регулярного ускорения в остатках сверхновых. Выведена зависимость напряженности эффективного магнитного поля в области за фронтом ударной волны от толщины волокон и частоты излучения. На основе данных об усилении магнитного поля в молодых остатках сверхновых, сделан предварительный вывод об их существенной роли как источников галактических космических лучей.

**В третьей главе** проводится оценка параметров разработанной модели ускорения частиц. Параметры находятся путем сравнения теоретических результатов с данными наблюдений остатков SN 1006 и SN Тихо в радио-, рентгеновском и  $\gamma$ -диапазонах. Установлены темп инжекции протонов, отношение электронов к протонам, магнитное поле за фронтом ударной волны, диапазон плотностей окружающей межзвездной среде. Важными результатами главы являются также предсказание роста эффективности производства космических лучей в остатке SN 1006 от 5-6 процентов в настоящее время до 10 процентов в дальнейшем, анализ влияния неоднородности среды в двухфазной модели «теплая фаза + мелкомасштабные плотные облака» на спектр и морфологию  $\gamma$ -излучения остатка SN Тихо.

**Четвертая глава** посвящена исследованию нетеплового излучения остатка SN 1987A. Показывается, что наблюдаемые свойства радиоизлучения этого источника могут быть объяснены в рамках развиваемой теории, если ускорение нуклонов и электронов происходит на ударной волне, распространяющейся по звездному ветру предсверхновой. Теоретические результаты автора предсказывают высокую эффективность ускорения частиц и, в то же время, сильное влияние обратного воздействием давления ускоренных частиц на ударную волну источника. Важными другими результатами этой главы являются установленный «мягкий» спектр радиоизлучения, соответствующий показателю спектра  $\sim 2.8$  ускоренных электронов, а также вывод о том, что в современный период интенсивность гамма-излучения источника в ТэВ-ном диапазоне может быть измерена установками H.E.S.S. и СТА.

**В пятой главе** представлены результаты сопоставления расчетов автора спектров различных компонент космических лучей, произведенных в остатках галактических сверхновых, с имеющимися экспериментальными данными. Главной целью этой главы является проверка соответствия установленного в развиваемой теории спектра и химического состава космических лучей наблюдаемым данным. В этой главе показано, что при коэффициенте диффузии частиц в галактической среде с показателем энергетической зависимости  $\sim 0.75$  удастся, в основном, описать наблюдаемые особенности спектров различных частиц. Излом в наблюдаемом спектре всех частиц («колени») автор связывает с максимальной энергией протонов.

**Шестая глава** посвящена разработке модели ускорения вторичных космических лучей (позитронов, антипротонов,  $Li$  и других вторичных ядер) в остатках сверхновых. Описание процессов ускорения этих частиц также основано на развиваемой автором теории ускорения. Главными результатами этой главы являются: 1) утверждение о том, что возможно доускорение существующих в оболочках сверхновых галактических космических лучей и частиц, возникающих при взаимодействии ускоренных сверхновой космических лучей с ядрами газа в оболочке источника; 2) вывод о том, что спектры всех вторичных частиц становятся более пологими при высоких энергиях; 3) при взрывах сверхновых в среде с концентрацией водорода  $\sim 1 \text{ см}^3$  производство бора в источнике приведет к почти не зависящему от энергии отношению  $B/C$  при энергиях  $> 1 \text{ ТэВ/нуклон}$ ; 4) модельные

спектры позитронов и антипротонов, полученные в рамках развиваемого в работе подхода, согласуются с существующими экспериментальными данными.

**В заключении** приведены основные результаты работы.

**В Приложении** описан разработанный автором алгоритм численного решения задачи ускорения КЛ сферической ударной волной от сверхновой.

**Степень обоснованности научных положений и выводов.** Основные научные положения и выводы работы обоснованы, подтверждены теоретическими расчетами и экспериментальными результатами. Они обсуждались на международных и всероссийских конференциях, опубликованы в 30 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК.

**Оценка новизны и практической значимости.** Научная новизна диссертации состоит в разработке эффективного численного метода решения газодинамических уравнений, описывающих эволюцию ударной волны от сверхновой, и уравнений процесса регулярного ускорения космических лучей этой ударной волной, в получении оригинальных физических результатов по нетепловому излучению остатков сверхновых SN 1006, SN Тихо и SN 1987А, а также спектру космических лучей.

Практическая значимость работы состоит в создании вычислительных технологий, позволяющих проводить расчеты характеристик космических лучей, генерируемых сверхновыми.

**Диссертация написана** ясным языком с использованием принятой в данном направлении исследований терминологии. По каждой главе и работе в целом сделаны четкие выводы. Оформление диссертации существенных замечаний не вызывает. Основные результаты работы полностью отражены в публикациях автора. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

В качестве **замечаний и пожеланий** к представленной диссертации можно указать следующее.

1. Автор отмечает, что развитие теории ускорения космических лучей в остатках сверхновых в аналогичной постановке было выполнено двумя другими исследовательскими группами (работы [11,22] диссертации). Однако, в диссертации отсутствует сопоставление подхода автора с исследованиями этих групп, не отмечены новые элементы, предложенные автором.

2. Практически во всех наблюдаемых в ТэВ-ном диапазоне  $\gamma$ -источниках имеются указания на наличие обрезания в спектре в области  $\sim 10$  ТэВ. Как это согласуется с выводом о том, что остатки сверхновых являются источниками космических лучей вплоть до  $10^{17}$  эВ?

3. Согласие теоретических результатов автора по спектрам космических лучей у Земли с экспериментальными данными достигается при большом показателе энергетической зависимости коэффициента диффузии  $\mu=0.75$ . На стр. 139-140 диссертации отмечается, что «теория предсказывает несколько более жесткий спектр космических лучей, чем требуется. Возможным решением этого противоречия может быть доускорение КЛ. ...Также можно ожидать, что учет процессов диссипации волн и выхода частиц из ОСН на поздних стадиях эволюции может исправить ситуацию.». Однако, в работе отсутствуют количественные оценки влияния этих механизмов на спектр генерации частиц, в силу чего не ясно, какие используемые в расчетах модели - ускорения или распространения (или обе) - необходимо модифицировать для описания экспериментальных данных по спектрам частиц при показателе  $\mu=1/3$ , установленном коллаборацией AMS-02 (Aguilar M. et al. // PRL, 2016, v. 117, 231102).

4. На рисунке 5.8 (стр. 150) представлены данные по среднему логарифму  $\langle \ln A \rangle$  массового числа ядер космических лучей в зависимости от энергии, включая данные эксперимента Auger для моделей QGSJET и SIBYLL. Однако, в диссертации не обсуждается

подход, используемый автором при расчете  $\langle \ln A \rangle$  по данным о положении глубины максимума ШАЛ, зарегистрированных в этом эксперименте.

5. Имеются неточности при оформлении списка литературы (например, ссылки [17], [64], [127], [218]).

Однако, сделанные замечания не меняют общей высокой оценки работы. Диссертация Л. Т. Ксенофонтова является законченным оригинальным научным исследованием, вносящим существенный вклад в решение фундаментальной проблемы ускорения космических лучей в остатках сверхновых, имеющей важное значение для астрофизики высокой энергии. Полученные Л. Т. Ксенофонтовым результаты могут быть использованы в ИКИ РАН, ФТИ им. Иоффе РАН, ФИАН, ИЗМИРАН, МГУ им. М.В. Ломоносова и в ряде других организаций.

По уровню и объёму выполненных исследований, степени научной новизны и ценности полученных результатов диссертация полностью отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., а Леонид Трофимович Ксенофонтов, безусловно, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой радиофизики  
и теоретической физики ФГБОУ ВО  
«Алтайский государственный университет»,  
пр. Ленина, 61, Барнаул, 656049, Россия,  
тел. +7 (3852) 367075, e-mail: lagutin@theory.asu.ru  
доктор физико-математических наук  
по специальности 01.04.16 - Физика атомного ядра  
и элементарных частиц, профессор

*Лагутин*

Лагутин Анатолий Алексеевич

22.02.2017 г.

Подпись удостоверяю:

НАЧАЛЬНИК  
ДОКУМЕНТАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОГО  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ШЕХТМ

