

ОТЗЫВ

официального оппонента, главного научного сотрудника Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, доктора физико-математических наук, профессора **Стожкова Юрия Ивановича на работу** сотрудника Института космофизических исследований и аэронауки СО РАН **Ксенофонтова Леонида Трофимовича «Теория ускорения космических лучей в остатках сверхновых»**, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Идея об ускорении космических лучей ударными волнами, образованными взрывами сверхновых, была высказана в 30-е годы прошлого столетия. Однако теоретическое и экспериментальное обоснование она получила в последние ~40 лет. Данная работа посвящена одной из актуальных задач физики космических лучей и астрофизики - детальному рассмотрению проблемы происхождения космических лучей в остатках сверхновых. В основу диссертации положен механизм регулярного ускорения космических лучей на ударной волне от взрыва сверхновой.

Актуальность темы не вызывает сомнений. Об этом свидетельствуют широкие обсуждения вопроса о происхождении космических лучей на многочисленных российских и международных конференциях, симпозиумах и семинарах, а также и большое число публикаций по данному направлению в ведущих мировых журналах.

Диссертация включает в себя введение, 6 глав, заключение, приложение, список литературы.

Во введении обоснована актуальность и новизна работы, сформулированы цели, показана практическая значимость полученных результатов, приведены вопросы, выносимые на защиту.

Первая глава описывает алгоритм численного решения задачи ускорения космических лучей ударной волной от взрыва сверхновой. Используются кинетическое уравнение в предположении о справедливости

бомовского коэффициента диффузии и система газодинамических уравнений. Функции распределения электронов и релятивистских протонов отличаются множителем. Разработанный автором диссертации алгоритм численного решения самосогласованной задачи ускорения космических лучей сферической ударной волной, образованной взрывом сверхновой, приведен в приложении.

Детально обсужден вопрос инъекции частиц в режим ускорения. Только небольшая доля частиц попадает в режим ускорения. Показано, что область ускорения занимает около 20% поверхности ударной волны и эффективное ускорение происходит в полярных районах..

Важной характеристикой процесса ускорения является усиление магнитного поля в остатке сверхновой. Этот вопрос рассмотрен во 2-ой главе, где обсуждаются теоретические и экспериментальные указания значительного усиления магнитного поля в остатках сверхновых. Это усиление связано с воздействием ускоренных космических лучей. Для анализа были использованы рентгеновские данные телескопа Chandra. Наблюдаемые им волокнистые структуры в молодых остатках сверхновых, по-видимому, образованы синхротронным излучением электронов вблизи фронтов ударных волн. Рассмотрены остатки сверхновых SN1006 и Тихо.

Третья глава сравнивает наблюдательные и расчетные данные вышеупомянутых остатков сверхновых. Астрономические параметры SN1006 и спектр синхротронного излучения измерены с высокой точностью. Используя эти данные, можно получить параметры модели с высокой точностью, такие как темп инъекции протонов $\eta \approx 3 \cdot 10^{-4}$, отношение электронов к протонам $K_{ep} \approx 3.8 \cdot 10^{-4}$, магнитное поле за фронтом ударной волны $B_d \approx 150 \text{ мкГс}$. На основе таких сравнений сделан вывод, что SN1006 является эффективным источником космических лучей. В этой же главе объяснен спектр гамма-излучения от SN Тихо.

Показано, что усиление магнитного поля ядерной компонентой космических лучей позволяет ускорять протоны до $\sim 10^{15}$ эВ.

Четвертая глава посвящена детальному рассмотрению экспериментальных данных SN1987A и их описанию на основе нелинейной кинетической теории ускорения заряженных частиц ударными волнами. Показано, что наблюдаемые свойства радиоизлучения этой сверхновой удовлетворительно объясняются, если принять во внимание регулярное ускорение нуклонов и электронов ударной волной, которая распространяется в звездном ветре предсверхновой. Теория предсказывает высокую эффективность ускорения космических лучей и сильное воздействие давления ускоренных частиц на ударную волну. Теория говорит о том, что в настоящее время наземные гамма-установки могут зарегистрировать кванты в области Тэв-ных энергий.

Особенности спектра и химического состава космических лучей, ускоренных остатками сверхновых, рассматриваются в пятой главе. Выявлены особенности спектров космических лучей в ненасыщенной (слабой) и насыщенной (сильной) инжекции частиц в режим ускорения, рассчитаны их предельные энергии, показано, что максимальные энергии космических лучей существенно увеличиваются с ростом магнитного поля в ударной волне остатка сверхновой.

Показано, что спектр частиц от сверхновой 1987A удовлетворительно описывается расчетами вплоть до энергий 10^{17} эВ. Теория воспроизводит зависимость относительного содержания элементов космических лучей при фиксированной энергии на нуклон как функции атомного числа A , т.е. соотношение амплитуд их спектров. При этом механизм инжекции должен обладать свойством обогащения ускоренных частиц тяжелыми элементами.

В шестой главе рассматриваются вопросы ускорения вторичных частиц в остатках сверхновых. Вторичные частицы производятся первичными при взаимодействиях последних с ядрами газа в остатках сверхновых. Обсуждается вопрос об отношении B/C в зависимости от энергии на ядро.

Т.к. основной вклад в космические лучи дают остатки сверхновых, то вклад этих остатков во вторичные частицы необходимо учитывать во всех расчетах.

Выполненные расчеты спектров позитронов и антипротонов согласуются с имеющими экспериментальными данными. Рост отношения потока позитронов к суммарному потоку электронов и позитронов с увеличением энергии этих частиц по мнению автора диссертации может быть существенным вкладом остатков сверхновых.

Нужно отметить, что данные ПАМЕЛЫ и AMS-02 показывают сложную зависимость показателя энергетического спектра протонов и альфа-частиц от жесткости (энергии/нуклон). Объяснение этой зависимости может встретить большие сложности в сценарии ускорения космических лучей остатками сверхновых.

К недостаткам работы следует отнести немногочисленные грамматические неточности, например, в конце параграфа 3.2.5 написано «...,которые производят Тэв-ное IC излучение, будет распределены по сферическому остатку почти равномерно». Эти недостатки в целом не оказывают влияния на добротню выполненную работу.

Основные результаты работы представлены в тексте диссертации и в автореферате. В отзыве нецелесообразно их повторять еще раз.

Рассматриваемая работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям. В работе получены новые важные результаты, относящиеся к проблеме происхождения космических лучей.

Автор работы Ксенофонов Леонид Трофимович является опытным теоретиком, специалистом высокого класса в области физики космических лучей и астрофизики. За полученные новые результаты, представленные в диссертации и опубликованные в иностранных и отечественных журналах высокого уровня, а также детально обсужденных на многих российских и

международных конференциях, симпозиумах и семинарах, диссертант достоин присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Главный научный сотрудник ФИАН,
д.ф.-м.н., профессор



Ю.И. Стожков

Подпись Ю.И. Стожкова заверяю

Зав. Долгопрудненской научной станцией ФИАН

д. ф.-м.н.



В.С. Махмутов

25 февраля 2017 г.