

УТВЕРЖДАЮ

Зам. Директора Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Физико-технический институт им.
А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Доктор физико-математических наук, профессор

Брунков П. Н.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Диссертация «Импульсное ускорение частиц в солнечных вспышках и их роль в нагреве плазмы» выполнена в лаборатории Экспериментальной астрофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН). В период подготовки диссертации соискатель Александра Львовна Лысенко работала в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН в должности и.о. младшего научного сотрудника.

В 2006 г. А.Л. Лысенко окончила Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет по специальности «прикладная ядерная физика». В 2007 г. А.Л. Лысенко поступила на очную аспирантуру Санкт-Петербургского Государственного Политехнического Университета по специальности «астрофизика и звёздная астрономия».

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов по истории и философии науки и по английскому языку выдано Санкт-Петербургским Государственным Политехническим Университетом в 2008 г., удостоверение о сдаче кандидатского экзамена по специальности «физика Солнца» выдано Главной (Пулковской) Астрономической Обсерваторией РАН в 2020 г.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФТИ им. А.Ф.Иоффе, заслуженный профессор-исследователь Центра Солнечно-Земных Исследований факультета физики Технологического Института Нью Джерси Флейшман Григорий Давидович.

По результатам рассмотрения диссертации «Импульсное ускорение частиц в солнечных вспышках и их роль в нагреве плазмы» принято следующее заключение:

1. Актуальность темы диссертации

Солнечные вспышки – одно из проявлений солнечной активности, которое представляет собой резкое увеличение светимости Солнца, наблюдаемое в очень

широком диапазоне электромагнитного излучения от радиоволн до жёсткого рентгеновского и даже гамма-диапазона. Наблюдения солнечных вспышек продолжаются около полутора веков, при этом начиная с 1940-60 гг помимо оптического стали доступны радио- и рентгеновский диапазоны. Согласно современным представлениям, солнечная вспышка является следствием магнитного пересоединения – резкого перестроения структуры магнитного поля в атмосфере Солнца, в результате чего выделяется значительная энергия. Эта энергия может расходоваться на ускорение частиц, электронов и ионов, нагрев солнечной плазмы, выброс макроскопического объёма плазмы (корональный выброс массы) и пр. Эти явления за счёт различных механизмов порождают излучение, наблюдаемое в широком диапазоне длин волн.

Процессы магнитного пересоединения, сопровождаемые нагревом плазмы и ускорением частиц, происходят во многих астрофизических объектах, но именно исследования Солнца позволяют изучить такие явления вблизи с хорошим пространственным разрешением.

Несмотря на многолетние наблюдения и теоретические исследования солнечных вспышек, в их физике остаётся ещё немало нерешённых вопросов. В частности, до сих пор неясно, какой механизм или механизмы задействованы в ускорении частиц при магнитном пересоединении, отвечает ли за ускорение один и тот же механизм или на различных пространственных и временных масштабах работают различные механизмы, есть ли различия в ускорении электронов и ионов и каковы они. Также открытым остаётся вопрос, чем обусловлено распределение энергии, выделенной при пересоединении, между различными компонентами солнечной вспышки, в частности, между непосредственным нагревом плазмы и ускорением частиц.

Основным источником наблюдательных данных, использованных в работе, является эксперимент по исследованию космических гамма-всплесков *Konus-Wind*. Он проводится с 1994 г. по настоящее время и предоставляет уникальный массив наблюдения солнечных вспышек в жёстком рентгеновском и мягком гамма-диапазонах, активное использование которого в интересах физики Солнца началось относительно недавно. За всё время наблюдений *Konus-Wind* зарегистрировал более 1000 вспышек в триггерном режиме и более 13000 – в фоновом. Широкий энергетический диапазон прибора (20 кэВ — 15 МэВ) предоставляет возможность получить информацию об ускоренных во вспышке электронах и ионах, а хорошее временное разрешение в триггерном режиме – оценить характеристики ускорения до малых временных масштабов. Ещё одним преимуществом инструмента *Konus-Wind* является его положение вблизи точки Лагранжа L1 системы Земля-Солнце, благодаря чему он наблюдает Солнце практически непрерывно, без затенений Землёй и влияния зон захваченной радиации. Сочетание этих факторов делает *Konus-Wind* исключительно важным источником данных как для статистических исследований солнечных вспышек, так и для изучения отдельных вспышек в сочетании с наблюдениями в других диапазонах электромагнитного излучения.

Сейчас уникальный набор данных, накопленных инструментом *Konus-Wind* более чем за два полных цикла солнечной активности, стал доступен для исследований в области физики Солнца. Возросшие за последние десятилетия вычислительные мощности позволяют проводить сложные теоретические расчёты и моделирование, что, в сочетании с доступными наблюдательными данными высокого временного, пространственного и спектрального разрешения, позволит пролить свет на нерешённые вопросы физики Солнца. Таким образом, задача исследования ускорения частиц в солнечных вспышках и теплового отклика плазмы с привлечением данных нового для

физики Солнца эксперимента *Konus-Wind*, данных других диапазонов электромагнитного излучения и моделирования, является исключительно актуальной.

2. Цели работы

Цель представленной работы заключается в определении характеристик ускоренных в солнечных вспышках электронов и ионов, а также теплового отклика плазмы в ответ на ускоренные электроны.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Сформирована открытая база данных солнечных вспышек, зарегистрированных *Konus-Wind* в триггерном режиме.
2. По данным наблюдений *Konus-Wind* сформирована выборка вспышек с низким тепловым откликом относительно излучения ускоренных электронов, «холодных вспышек».
3. Для индивидуальных холодных вспышек было выяснено, какая доля в общем нагреве плазмы была обеспечена исключительно ускоренными частицами, без привлечения механизмов непосредственного нагрева плазмы.
4. Исследованы свойства холодных вспышек в рентгеновском и микроволновом диапазонах, определено, в чём заключаются их отличия от прочих вспышек по морфологии и характеристикам ускоренных частиц.
5. Исследованы энергетика и спектральные параметры протонов, ускоренных в солнечных вспышках, сравнить спектральную эволюцию ионов и электронов.

3. Личный вклад автора при получении результатов, представленных в диссертации

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, были получены соискателем лично или соавторами при непосредственном участии соискателя.

Соискатель внёс основной вклад в создание базы данных KW-Sun, которая содержит более 1000 солнечных вспышек, зарегистрированных в эксперименте *Konus-Wind* в 1994-2020 гг.

Соискателем разработаны методики корректировок данных *Konus-Wind* от искажений вследствие инструментальных эффектов при больших нагрузках (переполнения в каналах, наложения импульсов, насыщения детектора).

Соискателем был проведён поиск холодных вспышек среди триггерных событий, зарегистрированных *Konus-Wind*. Получены характеристики холодных вспышек в рентгеновском диапазоне, проведено сравнение между характеристиками в микроволновом и рентгеновском диапазонах.

Соискатель внёс основной вклад в анализ вспышки класса X9.3 6 сентября 2017 г., основываясь на данных эксперимента *Konus-Wind*: были предложены спектральные модели излучения вспышки в гамма-диапазоне, оценены характеристики ускоренных во вспышке ионов, проведено моделирование, которое позволило оценить быструю спектральную эволюцию ускоренных протонов.

4. Научная новизна работы

Следующие основные результаты получены впервые:

1. Определены статистические свойства излучения холодных солнечных вспышек в микроволновом и рентгеновском диапазонах.

2. На основании проведённого статистического анализа показано, что свойства «холодных» вспышек статистически значимо отличаются от свойств вспышек из опорных групп.

3. Разработана физическая модель холодной вспышки с задержкой нагрева, которая показала, что весь нагрев был связан только с потерями энергии электронов, ускоренных во вспышке, без участия других механизмов нагрева. 4. Установлена быстрая спектральная эволюция ускоренных протонов на временном масштабе ~ 30 с для солнечной вспышки класса X9.3 6 сентября 2017 г.

5. Для того же события обнаружена временная задержка ~ 18 с между излучением в сравнительно низкоэнергичной (< 500 кэВ) области континуума, где спектр формируется за счёт торможения ускоренных электронов, и высокоэнергичной области континуума.

5. Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием данных ряда широко известных и надёжных астрофизических инструментов, обоснованным выбором методов обработки экспериментальных данных и использованием стандартных программ обработки. Все основные результаты работы подтверждены публикациями в рецензируемых изданиях из перечня ВАК и индексируемых базами Scopus, Web of Science, РИНЦ.

6. Научная и практическая значимость диссертационной работы

Представленная работа вносит вклад в решение ряда фундаментальных проблем физики солнечных вспышек и связанных с ними явлений.

Созданная база данных наблюдений солнечных вспышек в эксперименте *Konus-Wind* используется в научном сообществе в работах, посвящённых исследованиям ускорения частиц, солнетрясениям, квазипериодическим пульсациям вспышечного излучения.

Результаты, полученные при изучении холодных вспышек, важны для понимания распределения энергии между компонентами вспышки, а также при исследовании механизмов прямого нагрева плазмы. Набор холодных вспышек, выделенный в этой работе, используется для анализа энергетике ускоренных частиц и нагрева ими окружающей плазмы.

Оценки спектральной эволюции солнечных вспышек в гамма-диапазоне важны для понимания процессов ускорения ионов в солнечных вспышках, а также природы солнечных космических лучей.

7. Основные положения, выносимые на защиту

1. Вспышки с низким тепловым откликом, «холодные» вспышки, статистически значимо отличаются по своим свойствам от других вспышек, они характеризуются более жёсткими спектрами, меньшими длительностями в жёстком рентгеновском и микроволновом диапазонах, и либо высокими, либо, напротив, очень низкими пиковыми частотами гиротронного спектра в микроволновом диапазоне.

2. Холодные вспышки не представляют однородную группу событий. Часть таких вспышек ассоциируется с компактными петлями с высоким магнитным полем, а другая часть — напротив, с протяжёнными разреженными петлями.

3. Физическая модель холодной вспышки с задержкой нагрева, объясняющая наблюдательные особенности этого события и иллюстрирующая, что для наблюдаемого

нагрева плазмы достаточно только энергии, запасённой в ускоренных электронах, без привлечения других механизмов нагрева.

4. Быстрая спектральная эволюция протонов, ускоренных во вспышке класса X9.3 6 сентября 2017 г.

5. Спектральная эволюция ускоренных протонов коррелирует с эволюцией континуума, порождённого тормозным излучением ускоренных электронов нерелятивистских и среднерелятивистских энергий, но не коррелирует с эволюцией жёсткого компонента континуума на больших энергиях (>500 кэВ).

8. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Statistics of “Cold” Early Impulsive Solar Flares in X-Ray and Microwave Domains // A.L. Lysenko et al., // *Astrophys. J.* 2018, Vol. 856, Issue 2, article id. 111;

2. A Cold Flare with Delayed Heating // G.D. Fleishman, . . . , A.L. Lysenko et al., // *Astrophys. J.* 2016, Vol. 822, Issue 2, article id. 71;

3. Gamma-Ray Emission from the Impulsive Phase of the 2017 September 6 X9.3 Flare // A.L. Lysenko et al., // *Astrophys. J.* 2019. Vol. 877, Issue 2, article id. 145;

4. Gamma-ray lines in solar flares with proton spectra measured by PAMELA experiment // A.L. Lysenko et al., // *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, Volume 1400, Issue 2, article id. 022042.

5. Энергетика вспышек X-класса в минимумах 22, 23 и 24 солнечных циклов // Г. Г. Моторина, А.Л. Лысенко и др. // *Геомагнетизм и Аэрономия*, принята к публикации;

6. Рентгеновское и гамма-излучение солнечных вспышек // А.Л. Лысенко и др. // *Успехи Физических Наук*, принята к публикации.

Работы опубликованы или приняты к публикации в журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в системах РИНЦ, Web of Science, Scopus.

Соискатель также является соавтором ещё шести работ по гамма-всплескам и солнечным вспышкам.

Основные результаты диссертации представлялись на всероссийских и международных конференциях:

1. The 4th RadioSun Workshop and Summer School, Irkutsk, Russia, 8-12 June, 2015 (устный доклад);

2. CESRA 2016: Solar radio physics from the chromosphere to near Earth, Orleans, France, 13 - 17 June, 2016 (устный доклад);

3. 15th RHESSI Workshop, Graz, Austria, 26 - 30 July, 2016 (устный доклад);

4. Good Hope for Earth Sciences, Cape Town, South Africa, 27 August - 1 September, 2017 (устный доклад);

5. European Solar Physics Meeting (ESPM'15), Budapest, Hungary, 4-8 September, 2017 (стендовый доклад);

6. Солнечная и солнечно-земная физика-2017, Санкт-Петербург, Россия, 9-13 октября 2017 года (устный доклад);

7. Физика плазмы в солнечной системе, Москва, Россия, 11-16 февраля, 2018 (устный доклад);

8. 17th RHESSI Workshop, Dublin, Ireland, 18-23 June, 2018 (устный доклад);

9. 18th RHESSI Workshop, Minneapolis, USA, 28 May - 1 June, 2019 (устный доклад);
10. 234th meeting of the American Astronomical Society, St. Louis, USA, 9-13 June, 2019 (устный доклад);
11. Ioffe Workshop on GRBs and other transient sources: 25 Years of Konus-Wind Experiment, St. Petersburg, Russia, 9 - 13 September, 2019 (устный доклад).
12. PhysicA.SPb/2019, St. Petersburg, Russia, 22\-, \-, 24 октября, 2019 г. (стендовый доклад).

9. Соответствие содержания диссертации паспорту специальности «01.03.03 – Физика Солнца»

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и **соответствует специальности 01.03.03. – физика Солнца.**

Вывод: Кандидатская диссертация Лысенко Александры Львовны «Импульсное ускорение частиц в солнечных вспышках и их роль в нагреве плазмы» соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней». Диссертация рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 Физика Солнца.

Заключение принято на совместном заседании лаборатории Экспериментальной астрофизики и семинара сектора теоретической астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН от «19» мая 2020 года. На заседании присутствовали 25 научных сотрудника. Результаты голосования: "ЗА" – 25, "ПРОТИВ" – нет, "ВОЗДЕРЖАВШИХСЯ" – нет.

Председатель семинара
сектора теоретической астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН
зав. сектором, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.



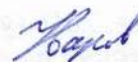
Яковлев Д.Г.

И.о. заведующего лабораторией
Экспериментальной астрофизики ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН
к.ф.-м.н.



Аптекарь Р.Л.

Секретарь семинара
к.ф.-м.н.



Уваров Ю. А.