

Термоядерные процессы в Звездах

Данная книга является дополненным и переработанным изданием предыдущей книги автора «Термоядерные процессы Вселенной» Алматы: А-три. 2011г. 402с. Первая глава содержит обзор термоядерных процессов на Солнце и звездах. Вторая посвящена описанию используемой модели и основных методов расчета некоторых характеристик для связанных состояний и континуума ядерных частиц. В остальных 13-ти главах рассмотрены процессы радиационного захвата для систем p^2H , p^3H , p^6Li , p^7Li , p^9Be , $p^{10}B$, $p^{11}B$, $p^{12}C$, $p^{13}C$, $p^{14}C$, $p^{15}N$, а также $2H^4He$, $3H^4He$, $3He^4He$ и $4He^{12}C$ при астрофизических энергиях. Показано, что используемый подход позволяет хорошо описать имеющиеся экспериментальные данные в этой области энергий. Кроме того, для некоторых ядерных систем удалось предсказать поведение астрофизических S - факторов при энергиях ниже 100 - 200 кэВ, поскольку эти расчеты были опубликованы в 1995г., а новые экспериментальные данные появились только в 1997-2002г.

Термоядерные процессы в Звездах

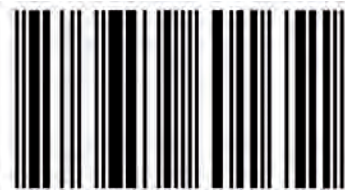


Сергей Борисович Дубовиченко

Термоядерные процессы в Звездах и Вселенной



Дубовиченко С.Б. - академик EANS (EU), академик ПАНИ (Россия), академик РАЕ (Россия), академик МАИп (Казахстан), доктор физико-математических наук в Казахстане и России, профессор, член Американского физ. общества, член Европейского физ. общества, зав. лаб. Ядерной астрофизики, Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова «НЦКИТ» АКК МИИР, Алматы



978-3-659-60165-1

Дубовиченко


Palmarium
academic publishing

Сергей Борисович Дубовиченко
Термоядерные процессы в Звездах

Сергей Борисович Дубовиченко

**Термоядерные процессы в Звездах
и Вселенной**

Palmarium Academic Publishing

Impressum / Выходные данные

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Alle in diesem Buch genannten Marken und Produktnamen unterliegen warenzeichen-, marken- oder patentrechtlichem Schutz bzw. sind Warenzeichen oder eingetragene Warenzeichen der jeweiligen Inhaber. Die Wiedergabe von Marken, Produktnamen, Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen u.s.w. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Библиографическая информация, изданная Немецкой Национальной Библиотекой. Немецкая Национальная Библиотека включает данную публикацию в Немецкий Книжный Каталог; с подробными библиографическими данными можно ознакомиться в Интернете по адресу <http://dnb.d-nb.de>.

Любые названия марок и брендов, упомянутые в этой книге, принадлежат торговой марке, бренду или запатентованы и являются брендами соответствующих правообладателей. Использование названий брендов, названий товаров, торговых марок, описаний товаров, общих имён, и т.д. даже без точного упоминания в этой работе не является основанием того, что данные названия можно считать незарегистрированными под каким-либо брендом и не защищены законом о брендах и их можно использовать всем без ограничений.

Coverbild / Изображение на обложке предоставлено: www.ingimage.com

Verlag / Издатель:

Palmarium Academic Publishing

ist ein Imprint der / является торговой маркой

OmniScriptum GmbH & Co. KG

Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Deutschland / Германия

Email / электронная почта: info@palmarium-publishing.ru

Herstellung: siehe letzte Seite /

Напечатано: см. последнюю страницу

ISBN: 978-3-659-60165-1

Copyright / АВТОРСКОЕ ПРАВО © 2015 OmniScriptum GmbH & Co. KG

Alle Rechte vorbehalten. / Все права защищены. Saarbrücken 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ (К изданию)	7
ПРЕДИСЛОВИЕ (Автора)	11
БЛАГОДАРНОСТИ	13
КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ.....	15
ВВЕДЕНИЕ.....	21
1. ТЕРМОЯДЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ.....	27
Введение.....	27
1.1 Термоядерные реакции в звездах	28
1.2 Протон - протонный цикл	31
1.3 Звездный CNO - цикл	36
1.4 Тройная гелиевая реакция.....	39
1.5 Другие термоядерные процессы в звездах.....	40
1.6 Зависимость термоядерных реакций от массы звезды.....	43
1.7 Успехи и проблемы ядерной астрофизики.....	46
2. МОДЕЛЬ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА	51
Введение.....	51
2.1 Кластерная модель.....	55
2.2 Астрофизические S - факторы	59
2.3 Потенциалы и волновые функции.....	62
2.4 Численные математические методы	65
2.5 Классификация кластерных состояний	66
2.6 Методы фазового анализа.....	68
2.7 Обобщенная матричная задача на собственные значения.....	70
2.8 Построение межкластерных потенциалов	74

3. АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ S - ФАКТОР РАДИАЦИОННОГО $p^2\text{H}$ ЗАХВАТА	77
Введение.....	77
3.1 Потенциалы и фазы рассеяния.....	79
3.2 Астрофизический S - фактор.....	85
Заключение.....	90
4. ПРОЦЕСС $p^3\text{H}$ ЗАХВАТА	93
Введение.....	93
4.1 Потенциалы и фазы рассеяния.....	94
4.2 Астрофизический S - фактор.....	100
4.3 Вычисление астрофизического S - фактора.....	102
Заключение.....	127
5. ПРОЦЕСС РАДИАЦИОННОГО $p^6\text{Li}$ ЗАХВАТА	129
Введение.....	129
5.1 Дифференциальные сечения.....	130
5.2 Фазовый анализ.....	131
5.3. Классификация кластерных состояний.....	134
5.4 Потенциальное описание фаз рассеяния.....	136
5.5 Астрофизический S - фактор.....	141
Заключение.....	143
6. S - ФАКТОР РАДИАЦИОННОГО $p^7\text{Li}$ ЗАХВАТА	145
Введение.....	145
6.1 Классификация орбитальных состояний.....	146
6.2 Потенциальное описание фаз рассеяния.....	149
6.3 Астрофизический S - фактор.....	154
Заключение.....	157
7. РАДИАЦИОННЫЙ ЗАХВАТ В $p^9\text{Be}$ СИСТЕМЕ	159
Введение.....	159
7.1 Классификация орбитальных состояний.....	159
7.2 Потенциальное описание фаз рассеяния.....	160
7.3 Астрофизический S - фактор.....	166
Заключение.....	168

8 РАДИАЦИОННЫЙ ЗАХВАТ ПРОТОНОВ НА ЯДРЕ ^{10}B.....	171
Введение.....	171
8.1 Классификация кластерных состояний и структура уровней $p^{10}\text{B}$ системы	171
8.2 Построение потенциалов $p^{10}\text{B}$ взаимодействий	174
8.3 Полные сечения радиационного $p^{10}\text{B}$ захвата	176
Заключение.....	180
9. РАДИАЦИОННЫЙ $p^{11}\text{B}$ ЗАХВАТ	181
Введение.....	181
9.1 Структура кластерных состояний.....	182
9.2 Потенциалы взаимодействия	185
9.3 Полные сечения захвата	190
Заключение.....	193
10. РАДИАЦИОННЫЙ $p^{12}\text{C}$ ЗАХВАТ	195
Введение.....	195
10.1 Дифференциальные сечения	195
10.2 Контроль компьютерной программы.....	198
10.3 Фазовый анализ упругого $p^{12}\text{C}$ рассеяния.....	200
10.4 Астрофизический S - фактор	202
Заключение.....	210
11. S - ФАКТОР $p^{13}\text{C}$ ЗАХВАТА	211
Введение.....	211
11.1 Фазовый анализ и межкластерные потенциалы.....	211
11.2 Астрофизический S-фактор	216
Заключение.....	219
12. РАДИАЦИОННЫЙ $p^{14}\text{C}$ ЗАХВАТ	221
Введение.....	221
12.1 Классификация по схемам Юнга и структура кластерных состояний.....	222
12.2 Фазовый анализ упругого $p^{14}\text{C}$	224

рассеяния.....	224
12.3 Потенциалы взаимодействия и полные сечения захвата	226
Заключение.....	231
13. РАДИАЦИОННЫЙ $p^{15}N$ ЗАХВАТ	233
Введение.....	233
13.1 Потенциалы взаимодействия и структура состояний	233
13.2 Полные сечения $p^{15}N$ захвата	238
Заключение.....	240
14. S - ФАКТОРЫ РАДИАЦИОННОГО $^3He^4He$, $^3H^4He$ И $^2H^4He$ ЗАХВАТА	243
Введение.....	243
14.1 Потенциалы и фазы рассеяния.....	244
14.2 Новые варианты потенциалов.....	247
14.3 Результаты вариационных расчетов	251
14.4 Астрофизический S - фактор	255
14.5. Вариационная двухтельная программа	260
Заключение.....	278
15. РЕАКЦИЯ РАДИАЦИОННОГО $^4He^{12}C$ ЗАХВАТА	279
Введение.....	279
15.1 Дифференциальные сечения	280
15.2 Фазовый анализ	281
15.3 Описание фаз рассеяния в потенциальной модели	284
15.4 Астрофизический S - фактор	289
Заключение.....	292
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	293
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	297
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	309

ЛИТЕРАТУРА.....319

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ.....341

Дубовиченко С.Б.

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЗВЕЗДАХ

*Третье, дополненное и переработанное, издание книги
“Термоядерные процессы Вселенной”, изданной на русском
языке в Серии “Казахстанские космические исследования.
Т.7”. Казахстан. Алматы: А-три. 2011. 402с.*

Рецензенты

Профессор **Багров В.Г.** (ТГУ, Томск, Россия),
профессор **Блохинцев Л.Д.** (МГУ, Москва, Россия),
профессор **Дуйсебаев А.Д.** (INP, Алматы, Казахстан),
профессор **Ишханов Б.С.** (MSU, Москва, Россия),
профессор **Страковский И.И.** (GWU, Вашингтон, США)

ПРЕДИСЛОВИЕ

К изданию

Настоящая монография - это фундаментальный труд, охватывающий широкий круг вопросов, касающихся структуры ядер и механизмов ядерных реакций, а также применения ядерных методов для анализа астрофизических процессов в звездах. Изложение опирается на многочисленные оригинальные работы автора, опубликованные в престижных научных журналах. В книге рассмотрен широкий набор ядерных систем, содержащих от трех ($p + {}^2\text{H}$) до шестнадцати (${}^4\text{He} + {}^{12}\text{C}$) нуклонов.

Уникальность изложенного в книге материала состоит в том, что теоретическое описание всех этих разнообразных систем основано на едином подходе, который можно назвать двухтельной потенциальной кластерной моделью с классификацией состояний по схемам Юнга. Несмотря на относительную простоту (по сравнению с другими известными методами), этот подход позволил автору добиться хорошего описания, как состояний дискретного спектра (связанных состояний), так и состояний непрерывного спектра (состояний рассеяния) рассмотренных систем.

Актуальность материала книги в значительной мере определяется приложением развитого подхода к проблемам ядерной астрофизики, являющейся в настоящее время одной из наиболее бурно развивающихся областей науки. Для каждой рассмотренной двухкластерной системы $b+c$ автор рассчитывает астрофизический S - фактор радиационного захвата $b(c,\gamma)a$, где a - связанное состояние b и c . Астрофизический S - фактор пропорционален сечению данного процесса и определяет скорость его протекания во внутренних областях звезд (включая наше Солнце).

При этом следует особенно выделить хорошее согласие теоретических результатов автора с экспериментальными зна-

чениями астрофизических S - факторов, измеренных в лабораторных условиях при доступных для экспериментаторов энергиях. Дело в том, что, несмотря на прогресс в технике эксперимента, для большинства астрофизических ядерных реакций, протекающих в звездах и определяющих распространенность элементов и изотопов во Вселенной, прямое измерение их сечений и астрофизических S - факторов при звездных энергиях до сих пор невозможно из-за малости сечений, обусловленной кулоновским отталкиванием.

Поэтому для получения информации о скоростях подобных реакций в звездах остаются два возможных пути:

1) Экстраполяция значений астрофизических S - факторов, измеренных при более высоких энергиях, в область астрофизических энергий (порядка единиц или десятков кэВ).

2) Расчет S - факторов при нужных энергиях в рамках каких-либо теоретических моделей.

Более оправданным и перспективным в настоящее время представляется второй путь, который и был выбран автором.

Достигнутое согласие с экспериментальными результатами при более высоких энергиях, являющееся обязательным условием адекватности используемого подхода, позволяет надеяться на надежность полученных результатов при интересующих астрофизиков низких (звездных) энергиях. В ряде случаев (например, для систем $p + {}^2\text{H}$ и $p + {}^3\text{H}$) результаты расчетов автора с хорошей точностью совпали с данными эксперимента, появившимися заметно позже выполнения этих расчетов.

Представляемая книга выгодно отличается от других монографий в области ядерной физики и ядерной астрофизики необычно широким сочетанием разных типов материала. В ней подробно излагаются как физические подходы и полученные на их основе результаты, так и математические и численные методы расчета и даже компьютерные программы.

К несомненным достоинствам книги следует отнести также и наличие в ней Введения и Главы 1, в которых в сжатой форме

излагаются основы физики термоядерных процессов в звездах (ядерные звездные циклы, эволюция звезд и т.п.).

Книга, безусловно, будет полезна для студентов старших курсов, аспирантов (PhD докторантов) и научных сотрудников, специализирующихся в области физики атомного ядра и ядерной астрофизики.

Доктор физико -
математических
наук, профессор,
главный научный
сотрудник НИИЯФ
МГУ

Блохинцев Л.Д.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Автора

Ядерная астрофизика - один из наиболее молодых разделов современной астрофизики, который, по существу, представляет собой сферу применения результатов, полученных в области экспериментальной и теоретической ядерной физики, к астрономическим объектам для объяснения их природы и источников энергии, возраста и особенностей химического состава [1].

Благодаря современному развитию астрономии и астрофизики мы в целом представляем, как устроена наша Вселенная, причем эти знания распространяются на понимание нами ее эволюции и структуры на расстояниях порядка 14 миллиардов световых лет. Наблюдения Вселенной показывают области очень компактной концентрации материи и огромные пространства между ними, которые кажутся «пустыми». Однако все это «пустое» пространство заполнено газопылевым молекулярным или атомарным веществом и разными видами излучений, включая нейтрино. Кроме того, современные представления о Вселенной включают понятия темной материи и темной энергии, которые определяют ее массу и характеризуют тип расширения.

Вещество, которое концентрируется в звездах и планетах наблюдаемой нами Вселенной и входит в состав газопылевых облаков, состоит из нуклидов, т.е. атомов с различным числом протонов и нейтронов в ядре девятиста двух химических элементов от водорода до урана. Все разнообразие ядерного состава Вселенной сводится примерно к нескольким сотням нуклидов, и современный уровень науки, ядерной астрофизики, в целом, позволяет объяснить историю их образования и относительную распространенность.

Окружающий нас земной мир также состоит из различных химических элементов и в настоящее время общепризнанной является точка зрения, что все эти элементы, из которых состоит Земля, Солнце и вся наша солнечная система образовались в ходе звездной эволюции.

Наша Земля – это одна из восьми планет нашей солнечной системы, а наше Солнце – рядовая, стабильная звезда нашей галактики – Млечного Пути. По современным оценкам только Млечный Путь насчитывает несколько сотен миллиардов звезд, которые могут родиться и в современную эпоху, т.е. спустя примерно 14 млрд. лет после образования наблюдаемой нами Вселенной, которая может включать сотни миллиардов подобных галактик [1,2].

В настоящей книге рассмотрены методы анализа некоторых термоядерных реакций, которые происходят на Солнце и звездах и входят в p-p, CNO и три-альфа термоядерные циклы. Такой анализ основан на модифицированной потенциальной кластерной модели [3] легких ядер, которая учитывает методы классификации кластерных состояний по схемам Юнга. Более подробно рассматриваемые здесь термоядерные реакции описаны в следующем разделе, который назван «Краткое содержание».

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает большую признательность проф. Неудачину В.Г. (НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия), проф. Страковский И.И. (Вашингтонский Университет, Вашингтон, США), проф. Багрову В.Г. (ТГУ, Томск, Россия), д.ф. - м.н. Узикову Ю.Н. (ОИЯИ Дубна, Россия), академику НАН РК Боос Э.Г. (Физико - технический институт, Алматы, Казахстан), проф. Дуйсебаеву А.Д. и проф. Буртебаеву Н.Т. (Институт ядерной физики Национального ядерного центра РК, Алматы, Казахстан), проф. Данаеву Н.Т., проф. Шмыгалевой Т.А. (Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан) за ценное обсуждение некоторых, рассмотренных в книге вопросов.

Кроме того, хочется выразить отдельную благодарность проф. Ишханову Б.С. (НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия) за возможность пользоваться в Интернете его лекциями для студентов МГУ по термоядерному синтезу и книгой "Нуклеосинтез во Вселенной", часть материала которых были использовано в Предисловии, Введении и Первой главе данной книги.

Автор благодарен также Джазаирову - Кахраманову А.В. (Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан) и Зазулину Д.М. (Казахский Национальный Университет им. аль - Фараби, Алматы, Казахстан) за поиск и подбор определенной части экспериментального материала. Кроме того, автор благодарен Джазаирову - Кахраманову А.В. за редактирование английского издания данной книги.

Не могу не отметить особый вклад научных редакторов член-корр. НАН РК, проф. Чечина Л.М. (Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан) и проф. Бурковой Н.А. (Казахский Национальный Университет им. аль - Фараби, Алматы, Казахстан), которые сделали ряд полезных замечаний, правок и дополнений при редактировании книги.

В заключение выражаю исключительную благодарность проф. Блохинцеву Л.Д. (НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия). Он не только выполнил обязанности научного консультанта, а впоследствии, и рецензента, сделав несколько принципиальных предложений по содержанию книги и написав, в результате, рецензию, помещенную в качестве Предисловия, но и детально отчитав рукопись, взял на себя большую часть функций технического редактора, внося существенные правки в первоначальный текст книги.

Данная работа частично поддерживалась грантами Программы фундаментальных исследований МОН РК через Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова "НЦКИТ" НКА РК. В связи с этим, выражаю особую благодарность президенту "НЦКИТ" НКА РК член-корр. НАН РК, проф. Жантаеву Ж.Ш. и директору Астрофизического института им.В.Г. Фесенкова PhD Омарову Ч.Т. за постоянную поддержку работы над данной книгой и всей тематики по Ядерной астрофизике.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

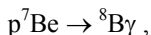
Прогресс в области изучения Вселенной во многом связан с достижениями физики атомного ядра и элементарных частиц. Оказалось, что именно законы микромира позволяют понять, что происходит во Вселенной. Это единство микро- и макрокосмоса - замечательный и поучительный пример внутреннего единства Природы [2].

Прежде чем переходить к изложению основных результатов приведем краткое содержание книги. В первой главе мы коротко и довольно популярно (для любого, кто изучал ядерную физику) рассмотрим все основные термоядерные реакции, которые могут проходить в звездах на разных этапах их формирования и развития. А затем подробно остановимся на анализе большинства термоядерных процессов, относящихся к радиационному захвату, при котором две сталкивающиеся частицы сливаются в одну с испусканием γ -кванта. Такие процессы протекают за счет электромагнитных взаимодействий, что несколько упрощает их рассмотрение с теоретической точки зрения, поскольку гамильтониан такого взаимодействия точно известен. Мы будем далее, наряду со свойствами связанных состояний легких атомных ядер, участвующих в термоядерных реакциях, рассматривать основные характеристики, а именно, астрофизические S -факторы процессов радиационного захвата протонов и других частиц на таких ядрах при астрофизических энергиях. Рассмотрение этих реакций проводится в рамках модифицированной потенциальной кластерной модели (МПКМ) с запрещенными состояниями (ЗС) легких атомных ядер [3].

Приведем теперь краткий обзор возможных реакций трех основных термоядерных циклов для стабильных звезд Главной последовательности и расскажем, какие процессы рассмотрены в данной книге, а какие будут анализироваться в ближайшее время.

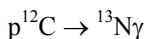
Первый из циклов - это протон - протонная цепочка, которая на-

считывает пять двухчастичных по входному каналу процессов, происходящих за счет сильных или электромагнитных взаимодействий, в том числе, три из них относятся к радиационному захвату. Два из которых будут рассмотрены в гл.3 и 14. Еще пять реакций этого цикла (всего их 10, как показано далее на рис.1.4 – гл.1) происходят за счет слабых взаимодействий и такие процессы в этой книге рассматриваться не будут. Поэтому в этом цикле остается только реакция

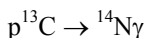


которая будет рассмотрена в дальнейшем.

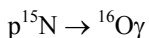
Звездный CNO - цикл состоит из 9 подобных реакций (всего 13 процессов, показанных далее в табл.1.2 ÷ 1.4 – гл.1. Из них четыре протекают за счет слабых сил) и шесть из них – это радиационный захват. Первая из этих реакций



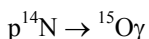
рассмотрена далее в гл.10, вторая с захватом протона на ядре



приведена в гл.11, а результаты для третьей реакции



даны в гл.13. Две последние реакции (см. табл.1.2 ÷ 1.4) приводят к образованию ${}^{17,18}\text{F}$, которые не принадлежат к ядрам $1p$ -оболочки и возможность применения модифицированной потенциальной кластерной модели, которая была использована во всех дальнейших расчетах, для таких случаев проверялась только для реакции $n^{16}\text{O}$ захвата, описанной в работе [3]. Поэтому в будущем, в первую очередь, будет рассмотрена только одна реакция

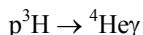


из оставшихся процессов CNO - цикла.

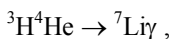
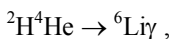
Тройной гелиевый цикл – это две реакции, одна из которых протекает за счет двухчастичного радиационного захвата, анализ которого на основе потенциальной кластерной модели выполнен далее в гл.15.

В результате мы имеем 15 основных термоядерных реакций, протекающих в двухчастичных входных каналах за счет сильных и электромагнитных взаимодействий. Десять из них являются процессами радиационного захвата, шесть из которых рассмотрены в данной книге. Еще две будут изучены в дальнейшем, а две, как уже говорилось, по-видимому, не подлежат рассмотрению в рамках МПКМ. Хотя такое предположение также будет проверено в дальнейшем непосредственными расчетами.

Кроме перечисленных процессов, существует еще несколько реакций радиационного захвата, которые, как предполагается, протекали на дозвездной стадии развития Вселенной, т.е. в первые секунды ее существования. К ним относятся, например, реакции [1,2]

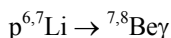


или

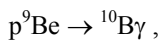


которые могли иметь место в первичном нуклеосинтезе [4,5] и астрофизические S - факторы таких процессов рассмотрены далее в гл.4, а последние две реакции в гл.14.

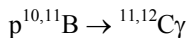
Дополнительно к рассмотренному выше радиационному захвату в трех термоядерных циклах и реакциям первичного нуклеосинтеза изучены процессы типа



или

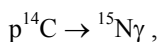


результаты для которых приведены далее в гл.5, 6 и 7 и



- реакции захвата протона двумя стабильными изотопами бора, результаты для которых приведены в гл.8 и 9.

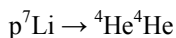
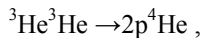
Кроме того, рассмотрена реакция



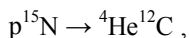
которая может играть определенную роль в процессах Большого Взрыва – она рассмотрена в гл.12. Итого из 15 реакций, рассмотренных в данной книге, имеется десять термоядерных процессов, которые непосредственно входят в различные циклы и процессы первичного нуклеосинтеза нашей Вселенной [3].

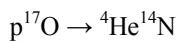
В заключение заметим, что столь общее название книги "Термоядерные процессы Вселенной" выбрано с перспективой на будущее. В самое ближайшее время будет закончено рассмотрение всех возможных термоядерных реакций типа радиационного захвата заряженных частиц на легких атомных ядрах. Полученные результаты будут отражены в следующем издании данной книги.

А именно, в будущем рассмотрим все остальные термоядерные процессы протон - протонного и CNO - циклов, которые протекают за счет сильных взаимодействий и происходят с перестройкой каналов. Всего существует 5 таких реакций

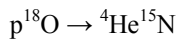


для p-p цикла и





и



для CNO.

Причем только три первые из них протекают на ядрах $1p$ -оболочки, которые мы и будем рассматривать в дальнейшем. Анализ всех этих процессов и далее предполагается выполнить на единой основе с использованием модифицированной потенциальной кластерной модели легких ядер и классификации орбитальных состояний по схемам Юнга, которая в некоторых кластерных системах приводит к понятию запрещенных принципом Паули состояний [3].

ВВЕДЕНИЕ

Применение достижений современной ядерной физики к изучению космических явлений и термоядерных реакций позволило построить качественно согласующиеся с наблюдениями теорию образования, строения и эволюции звезд, теорию взрыва сверхновых, образования пульсаров и объяснить распространенность химических элементов во Вселенной [2].

Прежде всего, рассмотрим предпосылки и условия необходимые для возникновения термоядерных реакций в астрономических объектах, а именно, звездах различной массы. Поскольку в известной нам области Вселенной значительная часть наблюдаемого вещества содержится именно в звездах на разных этапах их развития или в объектах, уже прошедших стадию звезды, объяснение процессов образования и эволюции звезд является одной из наиболее важных задач современной астрофизики в целом и ядерной астрофизики в частности.



Рис.В1. Звездообразующая туманность в Галактике Треугольника.

(http://ru.wikipedia.org/wiki/Эмиссионная_туманность_с_рассеянным_скоплением)

Согласно наиболее распространенной точке зрения, звезды, на начальном этапе своего образования, конденсируются под действием гравитационных сил из гигантских газовых молекулярных облаков [4]. Эти газовые облака состоят преимущественно из молекулярного водорода с небольшой примесью дейтерия и гелия. Последние два элемента образуются в результате первичного нуклеосинтеза на дозвездной стадии развития Вселенной. Звезды

формируются в этом гигантском молекулярном облаке из отдельных неоднородностей или зон звездообразования [6] и пример такого облака приведен на рис.В1 [7].

Сжатие такой зоны начинается с коллапса ее внутренней части, т.е. со свободного падения вещества под действием гравитации в ее центр. Постепенно область сжатия перемещается от центра к периферии, охватывая полностью всю зону – начинается процесс звездообразования. Сгусток, образующийся в центре коллапсирующего облака, называют протозвездой или звездой на ранней стадии своего формирования [2].

В общих чертах эволюцию протозвезды можно разделить на несколько этапов. Первый этап – это обособление фрагмента облака и его уплотнение, которое может произойти, например, в результате случайной флуктуации или под действием внешней гравитационной силы. Благодаря увеличению массы и росту силы гравитационного притяжения к центру протозвезды притягивается все больше материи. Этот процесс, падения вещества на протозвезду из окружающего ее внешнего облака, называется аккрецией.

Далее наступает второй этап – быстрое сжатие. В этот момент протозвезда практически непрозрачна для видимого света, но прозрачна для инфракрасного излучения, которое уносит излишки тепла, выделяющегося при сжатии. Поэтому температура внутри нее существенно не повышается и давление газа не препятствует дальнейшему коллапсу. Однако по мере сжатия, из-за увеличения плотности вещества, протозвезда делается все менее прозрачной, что затрудняет выход излучения и приводит к росту температуры газа внутри нее. В определенный момент протозвезда становится практически непрозрачной для собственного теплового излучения. Температура, а вместе с ней и давление газа быстро возрастают и уже могут частично компенсировать гравитационную силу притяжения, сжатие протозвезды замедляется.

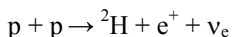
Наступает третий этап – медленное сжатие. Дальнейшее повышение температуры вызывает значительные изменения свойств вещества. При температуре несколько тысяч градусов молекулы распадаются на отдельные атомы, а при температуре около 10 тыс. градусов Кельвина (Кельвинов, которые обозначаются буквой К) атомы ионизуют-

ся, т.е. разрушаются их электронные оболочки. Эти энергоемкие процессы, в результате которых вещество переходит в состояние плазмы, на некоторое время задерживают рост температуры, но затем, после перехода всего вещества в плазму, он возобновляется. Постепенно протозвезда достигает состояния, когда сила гравитационного притяжения практически уравновешена внутренним давлением газа. Но поскольку тепло все еще уходит наружу, а иных источников энергии, кроме сжатия, у протозвезды еще нет, она продолжает постепенно сжиматься, и температура в ее недрах продолжает расти.

Когда температура протозвезды доходит до определенного предела, дальнейшее развитие событий зависит от размеров и массы формируемого небесного тела. Если его масса небольшая и составляет менее 8% от массы Солнца m_{\odot} , то нет условий для начала протекания стабильных термоядерных реакций, поддерживающих ее равновесие, и такая протозвезда не сможет превратиться в настоящую звезду. Такое образование переходит в состояние, называемое, коричневый карлик, который со временем остывает и может превратиться в плането-подобный объект [7].

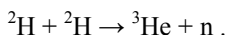
Если масса сжимающегося вещества больше 8% от m_{\odot} , то этого достаточно для того, чтобы в процессе сжатия внутри протозвезды начали происходить устойчивые термоядерные реакции и из такого облака получится стабильная звезда, находящаяся на Главной последовательности (см. Приложение 2). Когда масса наиболее плотной центральной части облака, благодаря аккреции, достигает примерно 0.1 массы Солнца, температура в центре звезды составляет примерно 10^6 К и в жизни протозвезды может начаться новый этап – первые реакции термоядерного синтеза.

Однако эти термоядерные реакции существенно отличаются от реакций, протекающих в звездах, типа Солнца, находящихся в стационарном состоянии [2]. Дело в том, что протекающие на Солнце реакции синтеза, первая из которых это горение водорода (первая реакция протон-протонного или p-p цикла)



требуют более высокой температуры $\sim 10^7$ К, а температура в центре

протозвезды только 10^6 К. При такой температуре может эффективно протекать лишь реакция слияния дейтерия



Дейтерий, также как ${}^4\text{He}$, образуется на дозвездной стадии эволюции Вселенной [8] и его содержание в веществе протозвезды составляет около 10^{-5} от содержания протонов. Однако даже этого небольшого количества достаточно для появления в центре протозвезды эффективного источника энергии, который приводит к дальнейшему повышению температуры [2].

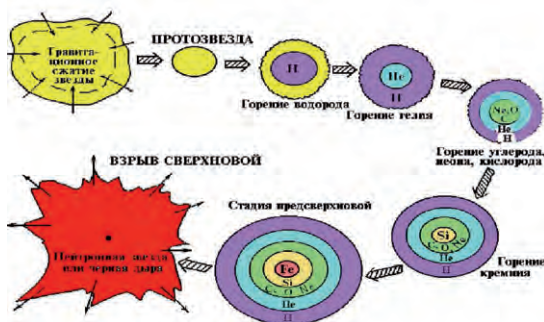


Рис.В2. Основные этапы эволюции массивной звезды с массой $M > 25 M_{\odot}$ (M_{\odot} – масса Солнца) [2].

(<http://nuclphys.sinp.msu.ru/nuclsynt/n01.htm>)

а холодное вещество с поверхности спускается к центру протозвезды, поставляя дополнительное количество дейтерия. Однако начавшиеся термоядерные реакции слияния ядер дейтерия выделяют сравнительно мало энергии и еще не способны противостоять гравитационному сжатию, которое продолжается и на этой стадии.

Дальнейшее сжатие звездного вещества за счет гравитационных сил приводит к еще большему повышению температуры в центре звезды, что создает условия для начала термоядерной реакции горения водорода. В этот момент протозвезда становится стабильной звездой, поскольку термоядерное энерговыделение уже способно уравновесить сжимающее действие гравитации и, в зависимости от своей массы, звезда занимает определенное место на диаграмме Герцшпрунга - Рассела [6] (см. Приложение 2).

Непрозрачность протозвездного вещества приводит к тому, что в протозвезде, как предположил Хаяши [6], начинают возникать конвективные потоки газа. Нагретые области газа устремляются от центра звезды к периферии,

На рис.В2, в качестве примера, представлена условная схема механизма образования, развития и гибели массивной звезды, которая в ходе своей эволюции может превратиться в сверхновую [2]. Далее на рис.В3 показан процесс эволюции, т.е. образования, жизни и превращения в белый карлик звезды с массой близкой к массе нашего Солнца [7]. Такая звезда постепенно переходит в красный гигант, а затем, после сброса планетарной туманности, оставшееся ядро превращается в белый карлик (см. Приложение 2).

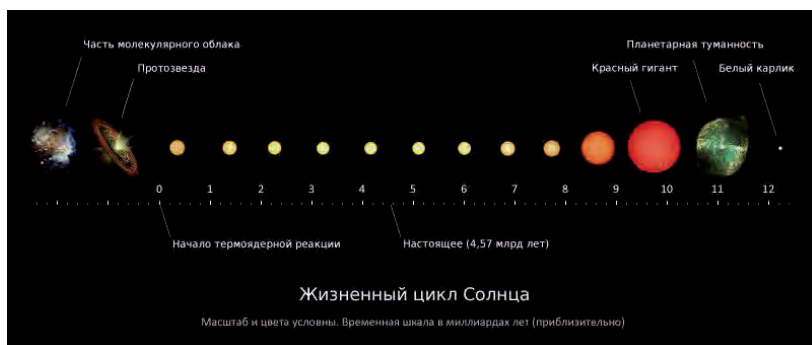


Рис.В3. Этапы развития звезды подобной нашему Солнцу ($M \sim M_{\odot}$).

Цифры показывают время существования в миллиардах лет.

(http://ru.wikipedia.org/wiki/звездная_эволюция)

Тем самым, мы кратко рассмотрели процесс эволюции протозвезды в обычную звезду, стабильное состояние которой поддерживается благодаря протеканию в ней термоядерных реакций р-р цикла. Конечно, такое рассмотрение не является строгим и носит качественный характер. Строгое решение проблемы образования звезд из межзвездной среды, т.е. молекулярного газа, и звездной эволюции в целом, сейчас вряд ли возможно. Можно только строить отдельные части теории звездообразования, постоянно контролируя их новыми астрономическими наблюдениями [6].

Таким образом, мы показали, что астрофизический объект становится звездой, когда в нем зажигаются стабильно протекающие термоядерные реакции, благодаря которым звезда, в зависимости от своей массы, занимает определенное место на Главной последовательности. Перейдем далее к непосредственному обзору различных типов термоядерных реакций, которые входят в три основных цикла: р-р,

CNO и гелиевый или три-альфа цикл. Рассмотрим причины их протекания при взаимодействии атомных ядер в звездах различной массы на разной стадии их развития.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ядерная астрофизика / Под. ред. Ч. Барнса, Д. Клейтона, Д. Шрама. М.: Мир, 1986. 519с.
2. Капитонов И.М., Ишханов Б.С., Тутынь И.А. Нуклеосинтез во вселенной. М.: Либроком, 2009; Ишханов Б.С. Нуклеосинтез // <http://nuclphys.sinp.msu.ru/lect/index.html>.
3. Дубовиченко С.Б. Избранные методы ядерной астрофизики. Изд. третье, исправленное и дополненное. Germany, Saarbrücken: Lambert Academy Publ. GmbH&Co. KG. 2014. 668с.
4. Горбунов Д.С., Рубаков В.А. Введение в теорию ранней Вселенной. Теория горячего Большого взрыва. М.: ЛКИ, 2008. 552с.
5. Засов А.В., Постнов К.А. Общая астрофизика. М.: Фрязино, 2006. 496с.; Постнов К.А. Лекции по общей астрофизике для Физиков // <http://www.astronet.ru:8101/db/msg/1170612/index.html>.
6. Шкловский И. С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть. М.: Наука, 1984. 384с.
7. <http://ru.wikipedia.org>.
8. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. Строение и эволюция Вселенной. М.: Наука, 1975. 735с.
9. <http://astronet.ru>.
10. Гуляев С.А., Жуковский В.М., Комов С.В. Система мира // <http://detc.usu.ru/assets/ansci0011/general/index.html>.
11. Epelbaum E, Glockle W., Meissner U.G. The two - nucleon system at next - to - next - to - next - to - leading order // Nucl. Phys. 2005. V. A747. P. 362-424; Epelbaum E. et al. Three-nucleon forces from chiral effective field theory // Phys. Rev. 2002. V. C66. P. 064001.1–064001.17; Epelbaum E. Four-nucleon force using the method of unitary transformation // Eur. Phys. J. 2007. V. A34. P. 197-214.
12. Фаддеев Л.Д. Теория рассеяния для системы из трех частиц // ЖЭТФ 1960. Т. 39. С. 1459-1467.
13. Якубовский О.А. Об интегральных уравнениях теории рассеяния для N частиц // ЯФ 1967. Т. 5. С. 1312-1320.

14. Grassberger P. and Sandhas W. Systematical treatment of the non-relativistic N-particle scattering problem // Nucl. Phys. 1967. V. B2. P. 181-206; Alt E.O., Grassberger, P. and Sandhas W. Systematical and practical treatment of the few-body problem // JINR Report No. E4-6688. Dubna. 1972.

15. Deltuva A., Fonseca A.C. Four-body calculation of proton- ^3He scattering // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98 . P. 162502.1–162502.4; Deltuva A., Fonseca A.C. Ab initio four-body calculation of $n\text{-}^3\text{He}$, $p\text{-}^3\text{H}$, and d-d scattering // Phys. Rev. 2007. V. C76. P. 021001.1–0211001.4.

16. Lazauskas R. Elastic proton scattering on tritium below the $n\text{-}^3\text{He}$ threshold // Phys. Rev. 2009. V. C79. P. 054007.1–054007.5.

17. Tang Y.C., Lemere M., Thompson D.R. Resonating-group method for nuclear many-body problems // Phys. Rep. 1978. V. 47. P. 167-223.

18. Navratil P., Vary J.P., and Barrett B.R. Properties of ^{12}C in the ab initio nuclear shell model // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 5728-5731.

19. Quaglioni S. and Navratil P. Ab initio many-body calculations of $n\text{-}^3\text{H}$, $n\text{-}^4\text{He}$, $p\text{-}^3,^4\text{He}$, and $n\text{-}^{10}\text{Be}$ scattering // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 101. P. 092501-1-092501-4.

20. Kievsky A., Viviany M., Rosati S. Polarization observables in p-d elastic scattering below 30 MeV // Phys. Rev. 2001. V. C64. P. 024002-1-024002-18.

21. Немец О.Ф. и др. Нуклонные ассоциации в атомных ядрах и ядерные реакции многонуклонных передач. Киев: Наукова Думка, 1988. 488с.

22. Дубовиченко С.Б. Свойства легких атомных ядер в потенциальной кластерной модели. Алматы: Данекер, 2004. 248с.; <http://xxx.lanl.gov/abs/1006.4944>.

23. Загуский В.Л. Справочник по численным методам решения уравнений. М.: Физ. мат. лит., 1960. 215с.

24. Мелентьев П.В. Приближенные вычисления. М.: Физ. мат. лит., 1962. 387с.

25. Демидович Б.П., Марон И.Ф. Основы вычислительной математики. М.: Наука, 1966. 664с.

26. Дубовиченко С.Б. Методы расчета ядерных характеристик. Алматы: Комплекс, 2006. 311с.; <http://xxx.lanl.gov/abs/1006.4947>.

27. Baktybaev M.K. et al. The scattering of protons from ${}^6\text{Li}$ and ${}^7\text{Li}$ nuclei // The Fourth Eurasian Conference “Nuclear Science and its Application”. October 31–November 3. Baku. Azerbaijan. 2006. P. 62; Burtebaev N. et al. The new experimental data on the elastic scattering of protons from ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^{16}\text{O}$ and ${}^{27}\text{Al}$ nuclei // Book of Abstracts the Fifth Eurasian Conference on “Nuclear Science and its Application”. October 14–17. Ankara. Turkey. 2008. P. 40.

28. Zazulin D.M. et al. Scattering of protons from ${}^{12}\text{C}$ // The Sixth International conference “Modern Problems of Nuclear Physics” September 19–22. Tashkent. Uzbekistan. 2006. P. 127; Baktybaev M.K. et al. Elastic scattering of protons from ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$ and ${}^{27}\text{Al}$ // The 4th Eurasia Conf. “Nucl. Sci. and its Appl.” Baku. Azerbaijan. 2006. P. 56.

29. Neudatchin V.G. et al. Generalized potential-model description of mutual scattering of the lightest p+d, d+ ${}^3\text{He}$ nuclei and the corresponding photonuclear reactions // Phys. Rev. 1992. V. C45. P. 1512–1527.

30. Дубовиченко С.Б. Фотопроцессы в Nd и d ${}^3\text{He}$ системах на основе кластерных моделей для потенциалов с запрещенными состояниями // ЯФ 1995. Т. 58. С. 1253–1259.

31. Дубовиченко С.Б., Узиков Ю.Н. Астрофизические S-факторы реакций с легкими ядрами // ЭЧАЯ. 2011. №2. С.478–577; Dubovichenko S.B., Uzikov Yu.N. Astrophysical S-factors of reactions with light nuclei // Physics of Particles and Nuclei 2011. V.42. №2. P.251–301; Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Astrophysical S-factors of proton radiative capture in thermonuclear reactions in the Stars and the Universe. // The Big Bang: Theory, Assumptions and Problems. NOVA Sci. Pub. New-York. USA. 2011. P.1–60.

32. Fowler W.A., Caughlan G.R., Zimmerman B.A. Thermonuclear reaction rates. II // Ann. Rev. Astr. Astrophys. 1975. V. 13. P. 69–112.

33. Mohr P.J., Taylor B.N. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2002 // Rev. Mod. Phys. 2005. V. 77(1). P. 1–107.

34. Angulo C. et al. A compilation of charged-particle induced thermonuclear reaction rates // Nucl. Phys. 1999. V. A656. P. 3–183.

35. Варшалович Д.А., Москалев А.Н., Херсонский В.К. Квантовая теория углового момента. Л.: Наука, 1975. 436с.

-
36. http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?mud|search_for=atomnuc!
37. Айзенберг И., Грайнер В. Механизмы возбуждения ядра. М.: Атомиздат, 1973. 347с.
38. Plattner G.R., Viollier R.D. Coupling constants of commonly used nuclear probes // Nucl. Phys. 1981. V. A365. P. 8-12.
39. Mukhamedzhanov A.M., Tribble R. E. Connection between asymptotic normalization coefficients, sub threshold bound states, and resonances // Phys. Rev. 1999. V. C59. P. 3418-3424.
40. Блохинцев Л.Д., Борбей И., Долинский Э.И. Ядерные вершинные константы // ЭЧАЯ 1977. Т. 8. С. 1189-1245.
41. Марчук Г.И., Колесов В.Е. Применение численных методов для расчета нейтронных сечений. М.: Атомиздат, 1970. 304с.
42. Абрамовиц И.Г. и др. Справочная математическая библиотека. Математический анализ. Дифференцирование и интегрирование. М.: Физ. мат. лит., 1961. 350с.
43. Barnet A. et al. Coulomb wave function for all real η and ρ // Comput. Phys. Comm. 1974. V. 8. P. 377-395.
44. Дубовиченко С.Б., Чечин Л.М. Методы расчета кулоновских функций и фаз рассеяния // Вестник КазНПУ физ.-мат. Алматы. 2003. № 1(7). С. 115-122.
45. Itzykson C., Nauenberg M. Unitary groups: Representations and decompositions // Rev. Mod. Phys. 1966. V. 38. P. 95-101.
46. Ходгсон П.Е. Оптическая модель упругого рассеяния. М.: Атомиздат, 1966. 230с.
47. Дубовиченко С.Б. Фазовый анализ упругого ${}^4\text{He}^4\text{He}$ рассеяния в области энергий 40-50 МэВ // ЯФ 2008. Т. 71. С. 66-75.
48. Дубовиченко С.Б., Такибаев Н.Ж., Чечин Л.М. Физические процессы в дальнем и ближнем космосе. Алматы: Дайк-Пресс, 2008. 228с.; <http://xxx.lanl.gov/abs/1012.1705>.
49. Kukulin V.I. et al. Detailed study of the cluster structure of light nuclei in a three-body model : (I). Ground state of ${}^6\text{Li}$ // Nucl. Phys. 1984. V. A417. P. 128-156.
50. Скорняков Л.А. Справочная математическая библиотека. Общая алгебра. М.: Наука, 1990. 591с.

-
51. Попов Б.А., Теслер Г.С. Вычисление функций на ЭВМ. Киев: Наукова думка, 1984. 598с.
52. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Мир, 1974. 832с.
53. Дубовиченко С.Б., Чечин Л.М. Методы решения обобщенной задачи на собственные значения // Вестник КазНПУ физ.-мат. Алматы. 2003. № 1(7). С. 110-115; Дубовиченко С.Б. Некоторые методы решения задач ядерной физики на связанные состояния // Вестник КазНУ сер. физ. Алматы. 2008. № 1. С. 49-58.
54. Дубовиченко С.Б. Альтернативный метод решения обобщенной матричной задачи на собственные значения // Изв. НАН РК физ.-мат. сер. 2007. № 4. С. 52-55.
55. Михлин С.Г., Смолицкий Х.Л. Приближенные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений. М.: Наука, 1965. 383с.
56. Дубовиченко С.Б., Чечин Л.М. Современные методы программирования актуальных физических задач // Труды конф. Современные проблемы и задачи информатизации в Казахстане. КазНТУ. Алматы. Казахстан. 6-10 октября 2004. С. 358-390.
57. Блат Дж., Вайскопф В. Теоретическая ядерная физика. М.: ИЛ, 1954. 658с.
58. Fowler W.A. Experimental and theoretical nuclear astrophysics: the quest for the original of the elements // Nobel Lecture. Stockholm. 8 Dec. 1983; Фаулер У.А. Экспериментальная и теоретическая ядерная астрофизика, поиски происхождения элементов // УФН. 1985. Т. 145. С. 441-488.
59. Snover K.A. // Solar p-p chain and the ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$ S-factor // University of Washington, CEPRA. NDM03. 1/6/2008.
60. Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Astrophysical S-factor of the radiative $p^2\text{H}$ capture // Euro. Phys. Jour. 2009. V. A39. № 2, P. 139-143.
61. Schiavilla R., Pandaripande V.R., Wiringa R.B. Momentum distributions in A=3 and 4 nuclei // Nucl. Phys. 1986. V. A449. P. 219-242.
62. Uzikov Yu.N. Backward elastic $p^3\text{He}$ scattering and high momentum components of ${}^3\text{He}$ wave function // Phys. Rev. 1998. V. C58. P. 36-39.

63. Uzikov Yu.N. and Haidenbauer J. ^3He structure and mechanism of $p^3\text{He}$ elastic scattering // Phys. Rev. 2003. V. C68. P. 014001-1-014001-6.

64. Schmelzbach P. et al. Phase shift analysis of $p^2\text{H}$ elastic scattering // Nucl. Phys. 1972. V. A197. P. 273-289; Arvieux J. Analyse en dephasages des sections efficaces et polarisations dans la diffusion elastique $p^2\text{H}$ // Nucl. Phys. 1967. V. A102. P. 513-528; Chauvin J., Arvieux J. Phase shift analysis of spin correlation coefficients in $p^2\text{H}$ scattering // Nucl. Phys. 1975. V. A247. P. 347-358; Huttel E. et al. Phase shift analysis of $p^2\text{H}$ elastic scattering below break-up threshold // Nucl. Phys. 1983. V. A406. P. 443-455.

65. Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В. Потенциальное описание процессов упругого Nd , dd , $\text{N}\alpha$ и $\text{d}\tau$ рассеяния // ЯФ 1990. Т. 51. С. 1541-1550.

66. Griffiths G.M., Larson E.A., Robertson L.P. The capture of proton by deuteron // Can. J. Phys. 1962. V. 40. P. 402-411.

67. Ma L. et al. Measurements of $^1\text{H}(\text{d}\rightarrow,\gamma)^3\text{He}$ and $^2\text{H}(\text{p}\rightarrow,\gamma)^3\text{He}$ at very low energies // Phys. Rev. 1997. V. C55. P. 588-596.

68. Schimid G.J. et al. The $^2\text{H}(\text{p}\rightarrow,\gamma)^3\text{He}$ and $^1\text{H}(\text{d}\rightarrow,\gamma)^3\text{He}$ reactions below 80 keV // Phys. Rev. 1997. V. C56. P. 2565-2681.

69. Casella C. et al. First measurement of the $\text{d}(\text{p},\gamma)^3\text{He}$ cross section down to the solar Gamow peak // Nucl. Phys. 2002. V. A706. P. 203-216.

70. Дубовиченко С.Б. Астрофизический S-фактор радиационного $p^2\text{H}$ захвата при низких энергиях // Доклады НАН РК 2008. Т. 60. № 3, С. 33-38.

71. Tilley D.R., Weller H.R., Hasan H.H. Energy Levels of Light Nuclei $A = 3$ // Nucl. Phys. 1987. V. A474. P. 1-60.

72. Tilley D.R., Weller H.R., Hale G.M. Energy levels of light nuclei $A = 4$ // Nucl. Phys. 1992. V. A541. P. 1-157.

73. Киржниц Д.А. Содержится ли дейтрон внутри тритона? // Письма в ЖЭТФ 1978. Т. 28 С. 479-481.

74. Bornard M. et al. Coupling constants for several light nuclei from a dispersion analysis of nucleon and deuteron scattering amplitudes // Nucl. Phys. 1978. V. A294. P. 492-512.

75. Plattner G.R., Bornard M., Viollier R.D. Accurate determination of the $^3\text{He}\text{-pd}$ and $^3\text{He}\text{-pd}^*$ coupling constants // Phys. Rev. Lett. 1977. V. 39.

P. 127-130.

76. Lim T.K. Normalization of the tail of the trinucleon wave function // Phys. Rev. Lett. 1973. V. 30. P. 709-710.

77. Kievsky A. et al. The three-nucleon system near the N-d threshold // Phys. Lett. 1997. V. B406. P. 292-296.

78. Ayer Z. et al. Determination of the asymptotic D- to S-state ratio for ${}^3\text{He}$ via ($d, {}^3\text{He}$) reactions // Phys. Rev. 1995. V. C52. P. 2851-2858.

79. Мотт Н., Мессе Г. Теория атомных столкновений. М.: Мир, 1969. 756с.

80. Schimid G.J. et al. Effects of Non-nucleonic Degrees of Freedom in the $D(p \rightarrow, \gamma) {}^3\text{He}$ and $p(d \rightarrow, \gamma) {}^3\text{He}$ Reactions // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 76. P. 3088-3091.

81. Schimid G.J. et al. Polarized proton capture by deuterium and the ${}^2\text{H}(p, \gamma) {}^3\text{He}$ astrophysical S-factor // Phys. Rev. 1995. V. 52. P. R1732-R1735.

82. Viviani M., Schiavilla. R., Kievsky A. Theoretical study of the radiative capture reactions ${}^2\text{H}(n, \gamma) {}^3\text{H}$ and ${}^2\text{H}(p, \gamma) {}^3\text{He}$ at low energies // Phys. Rev. 1996. V. C54. P. 534-553.

83. Warren J.B. et al. Photodisintegration of ${}^3\text{He}$ near the Threshold // Phys. Rev. 1963. V. 132. P. 1691-1692.

84. Berman B.L., Koester L.J., Smith J.H. Photodisintegration of ${}^3\text{He}$ // Phys. Rev. 1964. V. 133. P. B117-B129.

85. Fetisov V.N., Gorbunov A.N., Varfolomeev A.T. Nuclear photo effect on three-particle nuclei // Nucl. Phys. 1965. V. 71. P. 305-342.

86. Ticcioni G. et al. The two-body photodisintegration of ${}^3\text{He}$ // Phys. Lett. 1973. V. B46. P. 369-371.

87. Geller K.N., Muirhead E.G., Cohen L.D. The ${}^2\text{H}(p, \gamma) {}^3\text{He}$ reaction at the breakup threshold // Nucl. Phys. 1967. V. A96. P. 397-400.

88. Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В. Электромагнитные эффекты в легких ядрах на основе потенциальной кластерной модели // ЭЧАЯ 1997. Т. 28. С. 1529-1594.

89. Дубовиченко С.Б. Фазовый анализ $p^{12}\text{C}$ рассеяния при астрофизических энергиях // Изв. ВУЗов физ. 2008. №11. С. 21-27.

90. Дубовиченко С.Б. М1 процесс и астрофизический S - фактор реакции $p^2\text{H}$ захвата // Изв. ВУЗов 2011. Т.54. С.28-34; Dubovichenko

S.B. Contribution of the $M1$ process to the astrophysical S -factor of the p^2H radiative capture // Russian Physics Journal 2011. V.54. P.157-164.

91. Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Examination of astrophysical S -factors of p^2H , p^6Li , p^7Li , $p^{12}C$ and $p^{13}C$ radiative capture reactions // Int. Jour. Mod. Phys. 2012. V.E21. №3. V. P.1250039(1-44).

92. Дубовиченко С.Б., Неудачин В.Г., Сахарук А.А., Смирнов Ю.Ф. Обобщенное потенциальное описание взаимодействия легчайших ядер pt и ph // Изв. АН СССР сер. физ. 1990. Т. 54. С. 911-916; Neudatchin V.G., Sakharuk A.A., Dubovichenko S.B. Photodisintegration of 4He and supermultiplet potential model of cluster-cluster interaction // Few Body Systems. 1995. V. 18. P. 159-172.

93. Дубовиченко С.Б. Фотопроцессы в p^3H и n^3He каналах ядра 4He на основе потенциальных кластерных моделей // ЯФ 1995. Т. 58. С. 1377-1384.

94. Tombrello T.A. Phase shift analysis for $^3He(p,p)^3He$ // Phys. Rev. 1965. V. 138. P. B40-B47.

95. Yoshino Y. et al. Phase shift of p^3He scattering at low energies // Prog. Theor. Phys. 2000. V. 103. P. 107-125.

96. McSherry D.H., Baker S.D. 3He polarization measurements and phase shifts for p^3He elastic scattering // Phys. Rev. 1970. V. C1. P. 888-892.

97. Drigo L., Pisent G. Analysis of the p^3He low energy interaction // Nuovo Cim. 1967. V. B11. P. 419-436.

98. Szaloky G., Seiler F. Phase shift analysis of $^3He(p, p)^3He$ elastic scattering // Nucl. Phys. 1978. V. A303. P. 57-66.

99. Tombrello T.A. et al. The scattering of protons from 3He // Nucl. Phys. 1962. V. 39. P. 541-550.

100. McIntosh J.S., Gluckstern R.L., Sack S. Proton triton interaction // Phys. Rev. 1952. V. 88. P. 752-759.

101. Frank R.M., Gammel J.L. Elastic scattering of proton by 3He and 3H // Phys. Rev. 1955. V. 99. P. 1406-1410.

102. Kankowsky R. et al. Elastic scattering of polarized protons on tritons between 4 and 12 MeV // Nucl. Phys. 1976. V. A263. P. 29-46.

103. Berg H. et al. Differential cross section, analyzing power and

phase shifts for $p^3\text{He}$ elastic scattering below 1.0 MeV // Nucl. Phys. 1980. V. A334. P. 21-34; Kavanagh R.W., Parker P.D. He+p elastic scattering below 1 MeV // Phys. Rev. 1966. V. 143. P. 779-782; Morrow L., Haeberli W. Proton polarization in $p^3\text{He}$ elastic scattering between 4 and 11 MeV // Nucl. Phys. 1969. V. A126. P. 225-232.

104. Аркатов Ю.М. и др. Изучение реакции $^4\text{He}(\gamma,p)^3\text{H}$ при максимальной энергии гамма излучения 120 МэВ // ЯФ 1970. Т. 12. С. 227-233.

105. Hahn K. et al. $^3\text{H}(p,\gamma)^4\text{He}$ cross section // Phys. Rev. 1995. V. C51. P. 1624-1632.

106. Canon R. et al. $^3\text{H}(p,\gamma)^4\text{He}$ reaction below $E_p = 80$ keV // Phys. Rev. 2002. V. C65. P. 044008.1-044008.7.

107. Дубовиченко С.Б. Астрофизический S-фактор радиационного $p^3\text{H}$ захвата при низких энергиях // Известия НАН РК физ.-мат. сер. 2008. №4. С. 89-92; Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Astrophysical S-factors of the $p^2\text{H}$ and $p^3\text{H}$ radiative capture at low energies // Uz. J. Phys. 2008. V. 10. № 6. P. 364-370.

108. Lim T.K. ^3He -n vertex constant and structure of ^4He // Phys. Lett. 1975. V. B55. P. 252-254; Lim T.K. Normalization of the p - ^3H and n - ^3He tails of ^4He and the ^4He charge from factor // Phys. Lett. 1973. V. B44. P. 341-342.

109. Gibson B.F. Electromagnetic disintegration of the $A = 3$ and $A = 4$ nuclei // Nucl. Phys. 1981. V. A353. P. 85-98.

110. Дубовиченко С.Б. Астрофизические S-факторы радиационного $p^2\text{H}$ и $p^3\text{H}$ захвата // Изв. ВУЗов физ. 2009. № 3. С. 68-73.

111. Perry J.E., Vame S.J. $^3\text{H}(p,\gamma)^4\text{He}$ reaction // Phys. Rev. 1955. V. 99. P. 1368-1375.

112. Balestra F. et al. Photodisintegration of ^4He in Giant-Resonance Region // Nuo. Cim. 1977. V. 38A. P. 145-166.

113. Meyerhof W. et al. $^3\text{He}(p,\gamma)^4\text{He}$ reaction from 3 to 18 MeV // Nucl. Phys. 1970. V. A148. P. 211-224.

114. Feldman G. et al. $^3\text{H}(p,\gamma)^4\text{He}$ reaction and the $(\gamma,p)/(\gamma,n)$ ratio in ^4He // Phys. Rev. 1990. V. C42. P. R1167- R1170.

115. Дубовиченко С.Б. Астрофизический S - фактор радиационного захвата протонов на ядрах ^3H и ^7Li // ЯФ. 2011. Т.74. С.378-390.

116. Дубовиченко С.Б. и др. Астрофизический S-фактор радиационного ${}^6\text{Li}$ захвата при низких энергиях // Изв. ВУЗов физ. 2010. №7. С. 78-85.

117. Skill M. et al. Differential cross section and analyzing power for elastic scattering of protons on ${}^6\text{Li}$ below 2.2 MeV // Nucl. Phys. 1995. V. A581. P. 93-106.

118. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/nuclsynt>

119. Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В., Сахарук А.А. Потенциальное описание упругого $N^6\text{Li}$ и αt рассеяния // ЯФ 1993. Т. 56. С. 90-106.

120. Неудачин В.Г., Сахарук А.А., Смирнов Ю.Ф. Обобщенное потенциальное описание взаимодействия легчайших кластеров - рассеяние и фотоядерные реакции // ЭЧАЯ 1992. Т. 23. С. 480-541; Неудачин В.Г., Стружко Б.Г., Лебедев В.М. Супермультиплетная потенциальная модель взаимодействия легчайших кластеров и единое описание различных ядерных реакций // ЭЧАЯ 2005. Т. 36. С. 888-941.

121. Petitjean C., Brown L., Seyler R. Polarization and phase shifts in ${}^6\text{Li}(p,p){}^6\text{Li}$ from 0.5 to 5.6 MeV // Nucl. Phys. 1969. V. A129. P. 209-219.

122. Дубовиченко С.Б., Зазулин Д.М. Фазовый анализ упругого ${}^6\text{Li}$ рассеяния при астрофизических энергиях // Изв. ВУЗов физ. 2010. №5. С. 20-25.

123. Неудачин В.Г., Смирнов Ю.Ф. Нуклонные ассоциации в легких ядрах. М.: Наука, 1969. 414с.

124. Tilley D.R. et al. Energy levels of light nuclei $A=5,6,7$ // Nucl. Phys. 2002. V. A708. P. 3-163.

125. Nollett K.M., Wiringa R.B. Asymptotic normalization coefficients from ab initio calculations // arXiv:1102.1787v3 [nucl-th] 14 Apr 2011.

126. Switkowski Z.E. et al. Cross section of the reaction ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$ // Nucl. Phys. 1979. V. A331. P. 50-60; Bruss R. et al. Astrophysical S-factors for the radiative capture reaction ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$ at low energies // Proc. 2nd Intern. Symposium on Nuclear Astrophysics. Nuclei in the Cosmos. Karlsruhe. Germany. 6-10 July. 1992. Kappeler F., Wisshak K., Eds. IOP Publishing Ltd. Bristol. England. 1993. P. 169.

127. Arai K., Baye D., Descouvemont P. Microscopic study of the ${}^6\text{Li}(p, \gamma){}^7\text{Be}$ and ${}^6\text{Li}(p, \alpha){}^3\text{He}$ reactions // Nucl. Phys. 2002. V. A699. P.

963-975.

128. Prior R. M. et al. Energy dependence of the astrophysical S-factor for the ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$ reaction // Phys. Rev. 2004. V. C70. P. 055801-055809.

129. Burkner F.C. Neutron and proton capture by ${}^6\text{Li}$ // Austr. J. Phys. 1980. V. 33. P. 159-176.

130. Cecil F.E. et al. Radiative capture of protons by light nuclei at low energies // Nucl. Phys. 1992. V. A539. P. 75-96.

131. Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В. Астрофизический S-фактор радиационного ${}^6\text{Li}$ захвата // Доклады НАН РК 2009. № 6. С. 41-45.

132. Дубовиченко С.Б., Буртебаев Н., Зазулин Д.М., Керимкулов Ж.К., Амар А.С.А. Астрофизический S - фактор реакции ${}^6\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Be}\gamma$ захвата // ЯФ 2011. Т. 74. С. 1013-1028.

133. Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В. Астрофизический S-фактор радиационного ${}^p{}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{13}\text{N}\gamma$ захвата // Изв. ВУЗов физ. 2009. № 8. С. 58-73.

134. Дубовиченко С.Б. Астрофизические S-факторы радиационного ${}^3\text{He}{}^4\text{He}$, ${}^3\text{H}{}^4\text{He}$ и ${}^2\text{H}{}^4\text{He}$ захвата // ЯФ 2010. Т. 73. № 9. С. 1573-1584.

135. Дубовиченко С.Б. Астрофизический S-фактор ${}^p{}^7\text{Li} \rightarrow {}^8\text{Be}\gamma$ захвата при низких энергиях // Изв. ВУЗов физ. 2010. №12. С.30-38; Дубовиченко С.Б. и др. Астрофизический S-фактор радиационного ${}^p{}^7\text{Li}$ захвата // Изв. НАН РК физ.-мат. сер. 2010. №4. С.32-36.

136. Tilley D.R. et al. Energy level of light nuclei. $A = 8,9,10$ // Nucl. Phys. 2004. V. A745. P. 155-363.

137. <http://cdfc.sinp.msu.ru>.

138. Warters W.D., Fowler W.A., Lauritsen C.C. The elastic scattering of proton by Lithium // Phys. Rev. 1953, V. 91, P. 917-921.

139. Brown L. et al. Polarization and phase shifts in ${}^7\text{Li}(p,p){}^7\text{Li}$ from 0.4 to 2.5 MeV and the structure of ${}^8\text{Be}$ // Nucl. Phys. 1973. V. A206. P. 353-373.

140. Zahnow D. et al. The S-factor of ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ and consequences for S-extrapolation in ${}^7\text{Be}(p,\gamma_0){}^8\text{B}$ // Z. Phys. 1995. V. A351. P. 229-236.

141. Авотина М.П., Золотавин А.В. Моменты основных и возбужденных состояний ядер. Часть 2. М: Атомиздат, 1979. 522с.

142. Godwin M.A. et al. ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ reaction at $E_p = 80-0$ keV // Phys.

Rev. 1997. V. C56. P. 1605-1612.

143. Spraker M. et al. Slope of the astrophysical S-factor for the ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ reaction // Phys. Rev. 1999. V. C61. P. 015802-015808.

144. Zahn D. et al. Thermonuclear reaction rates of ${}^9\text{Be}(p,\gamma){}^{10}\text{B}$ // Nucl. Phys. 1996. V. A589. P. 95-105.

145. Бор О., Моттelson Б. Структура атомного ядра. Том 1. М.: Мир, 1971. 456с.

146. Ajzenberg - Selove F. Energy level of light nuclei $A = 5 - 10$ // Nucl. Phys. 1988. V. A490. P. 1-225.

147. Wulf E.A. et al. Astrophysical S-factors for the ${}^9\text{Be}(p,\gamma){}^{10}\text{B}$ reaction // Phys. Rev. 1998. V. C58, P. 517-523.

148. Sattarov A. et al. Astrophysical S-factors for ${}^9\text{Be}(p,\gamma){}^{10}\text{B}$ // Phys. Rev. 1999. V. C60. P. 035801-035808.

149. Mukhamedzhanov A.M. et al. Asymptotic normalization coefficient for ${}^{10}\text{B} \rightarrow {}^9\text{Be} + p$ // Phys. Rev. 1999. V. C56. P. 1302-1312.

150. Дубовиченко С.Б. Астрофизический S-фактор радиационного p - ${}^9\text{Be}$ захвата // Изв. ВУЗов физ. 2011. №7. С. 80-86.

151. Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. The ${}^7\text{Li}(n,\gamma){}^8\text{Li}$ radiative capture at astrophysical energies // Ann. der Phys. 2012. V.524. P.850-861.

152. Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Neutron radiative capture by ${}^2\text{H}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{13}\text{C}$, ${}^{14}\text{C}$ and ${}^{14}\text{N}$ at astrophysical energies // Book: The Universe Evolution. Astrophysical and Nuclear Aspects. New-York, NOVA Sci. Publ. 2013. P.49-108.

153. Kelley J.H. et al. Energy level of light nuclei $A = 11$ // Nucl. Phys. 2012. V.A880. P.88-195.

154. Дубовиченко С.Б. Методы расчета ядерных характеристик. Ядерные и термоядерные процессы. Изд. второе, исправленное и дополненное. Saarbrucken, Germany: Lambert Acad. Publ. GmbH&Co. KG. 2012. 425с; <https://www.lap-publishing.com/catalog/details//store/ru/book/978-3-659-21137-9/metody-rascheta-yadernyh-kharacteristic>. (in Russian).

155. Artemov S.V. et al. Estimates of the astrophysical S-factors for proton radiative capture by ${}^{10}\text{B}$ and ${}^{24}\text{Mg}$ nuclei using the ancs from proton transfer reactions // Int. Jour. Mod. Phys. 2010. V.E19. P.1102-1108.

-
156. Wiescher M. et al. ^{11}C level structure via the $^{10}\text{B}(p,\gamma)$ reaction // Phys. Rev. 1983. V.C28. P.1431-1442.
157. Tonchev A.P. et al. The $^{10}\text{B}(p,\gamma)^{11}\text{C}$ reaction at astrophysically relevant energies // Phys. Rev. 2003. V.C68. P.045803(1-12).
158. Dubovichenko S.B., Adilbekov D.N., Tkachenko A.S. Radiative proton capture on ^{10}B // Bul. NAS (Kazakhstan) Ser. Phys.-Mat. 2014. №4. P.3-20.
159. Kelley J.H. et al. The $^{11}\text{B}(p\rightarrow,\gamma)^{12}\text{C}$ reaction below 100 keV // Phys. Rev. 2000. V.C62. P.025803(1-6).
160. Anderson B.D. et al. A new determination of the partial widths of the 16.11 MeV state in ^{12}C // Nucl. Phys. 1974. V.A233. P.286-296.
161. Ajzenberg-Selove F. Energy level of light nuclei $A=11,12$ // Nucl. Phys. 1990. V.A506. P.1-158.
162. Cecil F.E. et al. Radiative capture of protons by light nuclei at low energies // Nucl. Phys. 1992. V.A539. P.75-96.
163. Huus T., Day R.B. The Gamma Radiation from ^{11}B Bombarded by Protons // Phys. Rev. 1953. V.91. P.599-605.
164. Segel R.E., Hanna S.S., Allas R.G. States in ^{12}C Between 16.4 and 19.6 MeV // Phys. Rev. 1965. V.139. P.B818-B830.
165. Allas R.G. et al. Radiative capture of protons by ^{11}B and the giant dipole resonance in ^{12}C // Nucl. Phys. 1964. V.58. P.122-144.
166. Дубовиченко С.Б. Радиационный $p^{11}\text{B}$ захват при астрофизических энергиях // Изв. ВУЗов Физика 2015. Т.58. №1. С.16-23.
167. Дубовиченко С.Б. Программа поиска фаз упругого рассеяния ядерных частиц со спином $1/2$ // Вестник КазНТУ 2004. №3. С. 137-144.
168. Дубовиченко С.Б. и др. Фазовый анализ дифференциальных сечений упругого $p^{12}\text{C}$ рассеяния при астрофизических энергиях // Изв. НАН РК физ.-мат. сер. 2007. №6. С. 58-67.
169. Jahns M.F., Bernstein E.M. Polarization in $p\alpha$ scattering // Phys. Rev. 1967. V. 162. P. 871-877.
170. Barnard A., Jones C., Well J. Elastic scattering of 2-11 MeV proton by ^4He // Nucl. Phys. 1964. V. 50. P. 604-620.
171. Brown R.I., Haeberli W., Saladin J.X. Polarization in the scattering of protons by α particles // Nucl. Phys. 1963. V. 47. P. 212-213.

172. Jackson H.L. et al. The $^{12}\text{C}(p,p)^{12}\text{C}$ differential cross section // Phys. Rev. 1953. V. 89. P. 365-369.
173. Jackson H.L. et al. The excited states of the ^{13}N nucleus // Phys. Rev. 1953. V. 89. P. 370-374.
174. Ajzenberg-Selove F. Energy levels of light nuclei $A = 13, 14, 15$ // Nucl. Phys. 1991. V. A523. P. 1-116.
175. Moss S.J., Haerberli W. The polarization of protons scattered by Carbon // Nucl. Phys. 1965. V. 72. P. 417-435.
176. Barnard A.C.L. et al. Cross section as a function of angle and complex phase shifts for the scattering of protons from ^{12}C // Nucl. Phys. 1966. V. 86. P. 130-144.
177. Burtebaev N. et al. New measurements of the astrophysical S-factor for $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$ reaction at low energies and the asymptotic normalization coefficient (nuclear vertex constant) for $p+^{12}\text{C} \rightarrow ^{13}\text{N}$ reaction // Phys. Rev. 2008. V. C78. P. 035802-035813.
178. Adelberger E.G. et al. Solar fusion cross sections. II. The pp chain and CNO cycles // Rev. Mod. Phys. 2011. V. 83. P. 195-245.
179. Дубовиченко С.Б. Термоядерные процессы Вселенной. Издание второе, исправленное и дополненное. Серия "Казахстанские космические исследования". Т.7. Алматы: А-Три, 2011. 402с.; <http://arxiv.org/abs/1012.0877>; <http://nuclphys.sinp.msu.ru/thpu/index.html>
180. Hebbard D.F., Vogl J.L. Elastic scattering and radiative capture of protons by C^{13} // Nucl. Phys. 1960. V. 21, P. 652-675.
181. Galster W. et al. Target and detection techniques for the $^{13}\text{N}(p,\gamma)^{14}\text{O}$ reaction using radioactive ion beams: $^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$ reaction as a test case // Phys. Rev. 1991. V. C44. P. 2776-2787.
182. Дубовиченко С.Б. Фазовый анализ упругого $p^{13}\text{C}$ рассеяния при астрофизических энергиях // ЯФ 2012. Т. 75. С.314-319.
183. Clegg T. et al. The elastic scattering of protons from ^3He from 4.5 to 11.5 MeV // Nucl. Phys. 1964. V.50. P.621-628.
184. Дубовиченко С.Б. Астрофизический S-фактор радиационного $p^{13}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N}\gamma$ захвата // ЯФ 2012. Т. 75. С.196-203.
185. Yarmukhamedov R. et al. Asymptotic normalization coefficients for $A+a \rightarrow B$ and the R-matrix method of analysis of nuclear-astrophysical

radiative capture $A(a,\gamma)B$ reactions // *Uzbek. J. Phys.* 2010. V. 12. №4-6. P. 233-247.

186. King J.D. et al. Cross section and astrophysical S-factor for the $^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$ reaction // *Nucl. Phys.* 1994. V. A567. P. 354-376.

187. Mukhamedzhanov A.M. et al. Asymptotic normalization coefficients from proton transfer reactions and astrophysical S factors for the CNO $^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$ radiative capture process // *Nucl. Phys.* 2003. V. A725. P. 279-294.

188. Mukhamedzhanov A.M. et al. Astrophysical S factor for $^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$ and asymptotic normalization coefficients // *Phys. Rev.* 2002. V. C66. P. 027602-1–027602-4.

189. Caughlan G.R., Fowler W.A. Thermonuclear reaction rates V // *At. Data Nucl. Data Tables* 1988. V. 40. P. 283-334.

190. Artemov S.V. et al. Nuclear Asymptotic Normalization Coefficients for $^{14}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + p$ Configurations and Astrophysical S Factor for Radiative Proton Capture // *Phys. Atom. Nucl.* 2008. V. 71. P. 998-1011.

191. Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В. Астрофизический S-фактор реакции $^4\text{He}^{12}\text{C}$ захвата при низких энергиях // *Изв РАН. Сер. физ.* 2011. Т. 75. С. 1614-1620.

192. Applegate J.H. and Hogan C.J. Relics of cosmic quark condensation // *Phys. Rev.* 1985. V.D31. P.3037-3045.

193. Applegate J.H., Hogan C.J. and Scherer R.J. Cosmological quantum chromodynamics, neutron diffusion, and the production of primordial heavy elements // *Astrophys. J.* 1988. V.329. P.572-579.

194. Malaney R.A. and Fowler W.A. Late-time neutron diffusion and nucleosynthesis in a post-QCD inhomogeneous $\Omega=1$ Universe // *Astrophys. J.* 1988. V.333. P.14-20.

195. Gorres J. et al. Proton capture on ^{14}C and its astrophysical implications // *Nucl. Phys.* 1990. V.A517. P.329-339.

196. Heil M. et al. The (n,γ) cross section of ^7Li // *Astrophys. Jour.* 1998. V.507. P.997-1002; Guimaraes V. and Bertulani C.A. Light radioactive nuclei capture reactions with phenomenological potential models // *arXiv:0912.0221v1 [nucl-th]* 1 Dec 2009; Masayuki Igashira, Toshiro Oh-saki Neutron capture nucleosynthesis in the Universe // *Sci. Tech. Adv. Materials* 2004. V.5. P.567-573; Nagai Y. et al. Fast neutron capture reac-

tions in nuclear astrophysics // *Hyperfine Interactions* 1996. V.103. P.43-48; Liu Z.H. et al. Asymptotic normalization coefficients and neutron halo of the excited states in ^{12}B and ^{13}C // *Phys. Rev.* 2001. V.64. P.034312(1-5); Horvath A. et al. Cross section for the astrophysical $^{14}\text{C}(n,\gamma)^{15}\text{C}$ reaction via the inverse reaction // *Astrophys. Jour.* 2002. V.570. P.926-933.

197. Yaffe L. and Stevens W.H. The reaction $^{14}\text{C}(n,\gamma)^{15}\text{C}$ // *Phys. Rev.* 1950. V.79. P.893-893.

198. Дубовиченко С.Б. Захват нейтронов легкими ядрами при астрофизических энергиях // *ЭЧАЯ* 2013. Т.44. С.1353-1624; Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V., Burkova N.A. Neutron radiative capture by ^2H , ^6Li , ^7Li , ^{12}C and ^{13}C at astrophysical energies // *Int. J. Mod. Phys.* 2013. V.E22. P.1350028(1-52); Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V., Afanasyeva N.V. Neutron radiative capture by ^9Be , ^{14}C , ^{14}N , ^{15}N and ^{16}O at astrophysical energies // *Int. J. Mod. Phys.* 2013. V.E22. P.1350075(1-53).

199. Дубовиченко С.Б. Легкие ядра и ядерная астрофизика. Изд. второе, исправленное и дополненное. Lambert Academy Publ. GmbH&Co. KG., Saarbrucken. 2013. 320с.

200. Henderson J.D. et al. Capture and elastic scattering of proton be ^{14}C // *Phys. Rev.* 1968. V.172. P.1058-1062.

201. Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Neutron radiative capture by ^{10}B , ^{11}B and proton radiative capture by ^{11}B , ^{14}C and ^{15}N at thermal and astrophysical energies // *Int. Jour. Mod. Phys.* 2014. V.E23. №8. P.1430012(1-55).

202. Bartholomew G.A. et al. Capture radiation and neutrons from the bombardment of ^{14}C with protons // *Can. Jour. Phys.* 1955. V. 33(8). P.441-456; Bartholomew G.A. et al. Note on the $T = 3/2$ State in ^{15}N // *Can. Jour. Phys.* 1956. V. 34. P.147.

203. Dubovichenko S.B. et al. Astrophysical S-factor of the radiative proton capture on ^{14}C at low energies // arXiv:1402.5236v1 [nucl-th].

204. Rolfs C. et al. Proton capture by ^{15}N at stellar energies // *Nucl. Phys.* 1974. V.A235. P.450-459.

205. Dubovichenko S.B., Afanasyeva N., Burkova N.A. Radiative neutron capture on ^{15}N // *Phys. Sci. Int. Jour.* 2014. V.4. №.4 P.636-648.

206. Ajzenberg-Selove F. Energy levels of light nuclei $A=16,17$ //

Nucl. Phys. 1993. V.A564. P.1-183.

207. Mukhamedzhanov A.M., Cognata M.L., and Kroha V. Astrophysical S factor for the $^{15}\text{N}(p,\gamma)^{16}\text{O}$ reaction // Phys. Rev. 2011. V.C83. P.044604(1-11).

208. Mukhamedzhanov A.M. // Private Communication 2013.

209. Cacioli A. et al. Revision of the $^{15}\text{N}(p,\gamma)^{16}\text{O}$ reaction rate and oxygen abundance in H-burning zones // arXiv:1107.4514v1 [astro-ph.SR] 22 Jul 2011.

210. Bemmerer D. et al. Direct measurement of the $^{15}\text{N}(p,\gamma)^{16}\text{O}$ total cross section at novae energies // Jour. Phys. 2009. V.G36. P.045202(1-10).

211. LeBlanc P.J. et al. Constraining the S factor of $^{15}\text{N}(p,\gamma)^{16}\text{O}$ at astrophysical energies // Phys. Rev. 2010. V.C82. P.055804(1-10).

212. Bashkin S., Carlson R.R., Douglas R.A. Cross Sections for Elastic Scattering and Reactions Due to Protons on ^{15}N // Phys. Rev. 1958. V.114. P.1543-1551.

213. Кукулин В.И., Неудачин В.Г., Смирнов Ю.Ф. Взаимодействие составных частиц и принцип Паули // ЭЧАЯ 1979. Т. 10. С. 1236-1255.

214. Imbriani G. Underground laboratory studies of pp and CNO some astrophysical consequences LUNA // Third European Summer School on Experimental Nuclear Astrophysics. October 2-9. 2005. Catania. Sicily. Italy.

215. Cacioli A. et al. Ultra-sensitive in-beam γ -ray spectroscopy for nuclear astrophysics at LUNA // Eur. Phys. J. 2009. V. A39. P. 179-186.

216. Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В. Фотопроцессы на ядрах ^7Li и ^7Be в кластерной модели для потенциалов с запрещенными состояниями // ЯФ 1995. Т. 58. С. 635-641; Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В. Фотопроцессы на ядре ^6Li в кластерных моделях для потенциалов с запрещенными состояниями // ЯФ 1995. Т. 58. С. 852-859.

217. Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В. Потенциальное описание кластерных каналов лития // ЯФ 1993. Т. 56. С. 87-98; Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В. Кулоновские факторы ядер лития в кластерной модели на основе потенциалов с запрещенными состояниями // ЯФ 1994. Т. 57. С. 784-791.

218. Barnard A.C., Jones C.M., Phillips G.C. The scattering of ^3He by ^4He // Nucl. Phys. 1964. V. 50. P. 629-640.
219. Spiger R., Tombrello T.A. Scattering of He^3 by He^4 and of He^4 by Tritium // Phys. Rev. 1967. V. 163. P. 964-984.
220. Ivanovich M., Young P.G., Ohlsen G.G. Elastic scattering of the several hydrogen and helium isotopes from tritium // Nucl. Phys. 1968. V. A110. P. 441-462.
221. McIntyre L.C., Haeblerli W. Phase shifts analysis of d- α scattering // Nucl. Phys. 1967. V. A91. P. 382-398.
222. Keller L.G., Haeblerli W. Vector polarization measurements and phase shift analysis for d- α scattering between 3 and 11 MeV // Nucl. Phys. 1979. V. A156. P. 465-476.
223. Gruebler W. et al. Phase shift analysis of d- α elastic scattering between 3 and 17 MeV // Nucl. Phys. 1975. V. A242. P. 265-284.
224. Schmelzbach P.A. et al. Phase shift analysis of d- α elastic scattering // Nucl. Phys. 1972. V. A184. P. 193-213.
225. Дубовиченко С.Б. Тензорные $^2\text{H}^4\text{He}$ взаимодействия в потенциальной кластерной модели с запрещенными состояниями // ЯФ 1998. Т. 61. С. 210-217.
226. Mertelmeir T., Hofmann H.M. Consistent cluster model description of the electromagnetic properties of lithium and beryllium nuclei // Nucl. Phys. 1986. V.A459. P.387-416.
227. Blokhintsev L.D. et al. Determination of the $^6\text{Li}(\alpha+d)$ vertex constant (asymptotic coefficient) from the $^4\text{He}+d$ phase-shift analysis // Phys. Rev. 1993. V. C48. P. 2390-2394.
228. Блохинцев Л.Д. и др. Расчет ядерной вершинной константы для виртуального распада $^6\text{Li} \rightarrow \alpha+d$ в модели трех тел и ее применение для описания астрофизической ядерной реакции $d(\alpha,\gamma)^6\text{Li}$ при сверхнизких энергиях // ЯФ 2006. Т. 69. С. 456-466.
229. Lim T.K. The $^6\text{Li}-\alpha-d$ vertex constant // Phys. Lett. 1975. V. B56. P. 321-324.
230. Igamov S.B., Yarmukhamedov R. Modified two-body potential approach to the peripheral direct capture astrophysical $a+A \rightarrow B+\gamma$ reaction and asymptotic normalization coefficients // Nucl. Phys. 2007. V. A781. P. 247-276.

231. Brune C.R. et al. Sub-Coulomb α transfers on ^{12}C and the $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ S-factor // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. P. 4025-4028.
232. Igamov S.B., Tursunmakhatov K.I., Yarmukhamedov R. Determination of the $^3\text{He}+\alpha$ to ^7Be asymp. normalization coefficients (nucl. vertex constants) and their application for extrapolation of the $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ astrophysical S-factors to the solar energy region // arXiv:0905.2026v4 [nucl-th] 6 Jan. 2010. 28p.
233. Блохинцев Л.Д. и др. Определение ядерных вершинных констант для вершины $^7\text{Be} \rightarrow ^3\text{He}^4\text{He}$ с помощью N/D - уравнений и вычисление астрофизического S-фактора для реакции $^4\text{He}(^3\text{He},\gamma)^7\text{Be}$ // Изв. РАН сер. физ. 2008. Т. 72. С. 321-326.
234. Langanke K. Microscopic potential model studies of light nuclear capture reactions // Nucl. Phys. 1986. V. A457. P. 351-366.
235. Kajino T. The $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ and $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$ reactions at astrophysical energies // Nucl. Phys. 1986. V. A460. P. 559-580.
236. Burkova N.A. et al. Is it possible to observe an isoscalar E1-multipole in $^6\text{Li}\gamma\alpha$ reactions? // Phys. Lett. 1990. V. B248. P. 15-20.
237. Brune C.R., Kavanagh R.W. Rolf C. $^3\text{H}(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$ reaction at low energies // Phys. Rev. 1994. V. C50. P. 2205-2218.
238. Griffiths G.M. et al. The $^3\text{H}(^4\text{He},\gamma)^7\text{Li}$ reactions // Can. J. Phys. 1961. V. 39. P. 1397-1403.
239. Schroder U. et al. Astrophysical S-factor of $^3\text{H}(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$ // Phys. Lett. 1987. V. B192. P. 55-58.
240. Brown T.A.D. et al. $^3\text{He} + ^4\text{He} \rightarrow ^7\text{Be}$ astrophysical S-factor // Phys. Rev. 2007. V. C76. P. 055801.1-055801.12; arXiv:0710.1279v4 [nucl-ex] 5 Nov. 2007.
241. Confortola F. et al. Astrophysical S-factor of the $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ reaction measured at low energy via detection of prompt and delayed γ rays // Phys. Rev. 2007. V. C75. P. 065803; arXiv:0705.2151v1 [nucl-ex] 15 May 2007.
242. Gyurky G. et al. $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ cross section at low energies // Phys. Rev. 2007. V. C75. P. 035805-035813.
243. Singh N. et al. New Precision Measurement of the $^3\text{He}(^4\text{He},\gamma)^7\text{Be}$ cross section // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. P. 262503-262507.
244. Osborn J.L. et al. Low-energy behavior of the $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ cross

section // Nucl. Phys. 1984. V. A419. P. 115-132.

245. Bemmerer D. et al. Activation measurement of the ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ cross section at low energy // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97. P. 122502-122507; arXiv:nucl-ex/0609013v1 11 Sep. 2006.

246. Costantini H. The ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ S-factor at solar energies: the prompt experiment at LUNA // arXiv:0809.5269v1 [nucl-ex] 30 Sep. 2008.

247. Robertson R.C. et al. Observation of the Capture Reaction ${}^2\text{H}(\alpha,\gamma){}^6\text{Li}$ and Its Role in Production of ${}^6\text{Li}$ in the Big Bang // Phys. Rev. Lett. 1981. V. 47. P. 1867-1870.

248. Mohr P. et al. Direct capture in the 3^+ resonance of ${}^2\text{H}(\alpha,\gamma){}^6\text{Li}$ // Phys. Rev. 1994. V. C50. P. 1543-1549.

249. Kiener J. et al. Measurements of the Coulomb dissociation cross section of 156 MeV ${}^6\text{Li}$ projectiles at extremely low relative fragment energies of astrophysical interest // Phys. Rev. 1991. V. C44. P. 2195-2208.

250. Igamov S.B., Yarmukhamedov R. Triple-differential cross section of the ${}^{208}\text{Pb}({}^6\text{Li},\alpha){}^{208}\text{Pb}$ Coulomb breakup and astrophysical S-factor of the $d(\alpha,\gamma){}^6\text{Li}$ reaction at extremely low energies // Nucl. Phys. 2000. V. A673. P. 509-525.

251. Кукулин В.И., Неудачин В.Г., Смирнов Ю.Ф., Эль-Ховари Р. Роль принципа Паули в формировании оптических потенциалов // Изв. АН СССР сер. физ. 1974. Т. 38. С. 2123-2128.

252. Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Справочная математическая библиотека. Матрицы и вычисления. М: Физ. мат. лит., 1984. 318с.

253. Дубовиченко С.Б., Чечин Л.М. Вариационные методы решения уравнения Шредингера // Вестник АГУ физ.-мат. сер. 2003. №.2(8). С.50-58.

254. Salpeter E.E. Nuclear reactions in stars // Phys. Rev. 1957. V. 107. P. 516-525; Salpeter E.E. Nuclear Reactions in stars without hydrogen // Astrophys. Jour. 1952. V. 115. P. 326; Rolfs C. Nuclear reactions in stars far below the Coulomb barrier // Progress in Particle and Nuclear Physics 2007. V. 59. P. 43.

255. Schurmann D. et al First direct measurement of the total cross-section of ${}^{12}\text{C}(\alpha,\gamma){}^{16}\text{O}$ // Eur. Phys. J. 2005. V.A26. P.301-305; ArXiv: nucl-ex/0511050v1. 29 Nov. 2005.

256. Дубовиченко С.Б. Фазовый анализ ${}^4\text{He}{}^4\text{He}$ рассеяния при 40-

50 МэВ // Изв. ВУЗов физ. 2007. № 6. С. 74-79.

257. Jones C.M. et al. The scattering of alpha particles from ^{12}C // Nucl. Phys. 1962. V. 37. P. 1-9.

258. Дубовиченко С.Б. Фотопроцессы в $^4\text{He}^{12}\text{C}$ канале ядра ^{16}O на основе потенциальной кластерной модели // ЯФ 1996. Т. 59. С. 447-553.

259. Plaga R. et al. The scattering of alpha particles from ^{12}C and the $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ stellar reaction rate // Nucl. Phys. 1987. V. A465. P. 291-316.

260. Tilley D. R., Weller H. R., Cheves C. M. Energy levels of light nuclei $A = 16, 17$ // Nucl. Phys. 1993. V. A564. P. 1-183.

261. Дубовиченко С.Б. и др. Фазовый анализ и потенциальное описание упругого $^4\text{He}^{12}\text{C}$ рассеяния при низких энергиях // Изв. ВУЗов физ. 2009. № 7. С. 55-62; Дубовиченко С.Б. и др. Фазовый анализ упругого $^4\text{He}^{12}\text{C}$ рассеяния при энергиях 1.5-6.5 МэВ // Доклады НАН РК 2008. №6. С. 24-32.

262. Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В. Астрофизический S-фактор радиационного $^4\text{He}^{12}\text{C}$ захвата при низких энергиях // Доклады НАН РК 2009. № 3. С. 30-36; Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В. Астрофизический S-фактор радиационного $^4\text{He}^{12}\text{C}$ захвата // Изв РАН. 2011. Т. 75. №11. С.1614-1620.

263. Kettner K.U. et al. The $^4\text{He}(^{12}\text{C},\gamma)^{16}\text{O}$ reaction at stellar energies // Z. Phys. 1982. V. A308. P. 73-94.

264. Dyer P., Barnes C.A. The $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ reaction and stellar helium burning // Nucl. Phys. 1974. V. A233. P. 495-520.

265. Asuma R.E. et al. Constraints on the low-energies E1 cross section of $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ from the β -delayed α spectrum of ^{16}N // Phys. Rev. 1994. V. C50. P. 1194-1215.

266. Descouvemont P., Baye D. $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ reaction in a multiconfiguration microscopic model // Phys. Rev. 1987. V. C36. P. 1249-1255.

267. Абрамовиц М. Справочник по специальным функциям. М: Наука, 1979. 830с.

268. Люк Ю. Специальные математические функции и их аппроксимация // М: Мир, 1980. 608с.

269. Melkanoff M.A. Fortran program for elastic scattering analysis with nuclear optical model // Univ. California Pres. Berkley. Los Angeles.

1961. 116р.

270. Lutz H.F., Karvelis M.D. Numerical calculation of coulomb wave functions for repulsive coulomb fields // Nucl. Phys. 1963. V. 43. P. 31-44.

271. Melkanoff M. Nuclear optical model calculations // Meth. in Comput. Phys. Acad. Press. N-Y. 1966. V. 6. P. 1-80.

272. Gody W.J., Hillstrom K.E. Chebyshev approximations for the coulomb phase shifts // Meth. Comput. 1970. V. 111. P. 671-677.

273. Smith W.R. Nuclear penetrability and phase shift subroutine // Usics Communs. 1969. V. 1. P. 106-112.

274. Froberg C.E. Numerical treatment of Coulomb wave functions // Rev. Mod. Phys. 1955. V. 27. P. 399-411.

275. Abramowitz M. Tables of Coulomb wave function. V.1. Washington. N.B.S. 1952. 141р.

276. Данилов В.Л. и др. Справочная математическая библиотека. Математический анализ. Функции, пределы, цепные дроби. М: Физ. мат. лит., 1961. 439с.

277. Кузнецов Д.С. Специальные функции. М: Высшая школа. 1965. 272с.

278. <http://phys.bsu.edu.ru/resource/nphys/spargalka/038.htm>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ



Дубовиченко Сергей Борисович

Доктор физико-математических наук по специальностям физика атомного ядра и элементарных частиц и математическое моделирование, численные методы и комплексы программ в Республике Казахстан (РК) и Российской Федерации (РФ), профессор РК;

Академик Европейской Академии Естественных Наук (EANS EU), академик Петровской Академии Наук и Искусств (ПАНИ РФ), академик Российской Академии Естествознания (РАЕ РФ), академик Международной Академии Информатизации (МАИН РК), академик Нью-Йоркской Академии наук (NYAS US);

Член Американского физического общества (US), член Европейского физического общества (EU);

Лауреат Европейской "Золотой Медали" и ордена Почетный крест "За заслуги", лауреат премии международного фонда Дж. Сороса (US), лауреат премии ЛКСМ Каз.ССР (Former USSR);

Представитель Европейской научно-промышленной Палаты в Казахстане (EU), руководитель Казахстанского отделения Европейской Академии Естественных Наук по физике и астрофизике;

Зав. лабораторией Ядерной астрофизики Астрофизического института им. В.Г. Фесенкова Национального Центра Космических Исследований и Технологий (НЦКИТ) Аэрокосмического Комитета (АКК) Министерства Инвестиций и Развития (МИИР) РК.

E-mail: dubovichenko@mail.ru , sergey@dubovichenko.ru ,

Web-site: www.dubovichenko.ru

Астрофизический институт - Обсерватория 23, Каменское плато, 050020, Алматы, Республика Казахстан, www.aphi.kz

Люблю **книги**
ljubljuknigi.ru

yes

I want more books!

Покупайте Ваши книги быстро и без посредников он-лайн - в одном из самых быстрорастущих книжных он-лайн магазинов!
Мы используем экологически безопасную технологию "Печать-на-Заказ".

Покупайте Ваши книги на
www.ljubljuknigi.ru

Buy your books fast and straightforward online - at one of the world's fastest growing online book stores! Environmentally sound due to Print-on-Demand technologies.

Buy your books online at
www.ljubljuknigi.ru

OmniScriptum Marketing DEU GmbH
Heinrich-Böcking-Str. 6-8
D - 66121 Saarbrücken
Telefax: +49 681 93 81 567-9

info@omniscrptum.com
www.omniscrptum.com

OMNIScriptum

