2010
Казахстанские Космические Исследования
Том 7

Дубовиченко С.Б.

Термоядерные процессы Вселенной

Алматы

НАЦИОНАЛЬНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Қазақстан Республикасының Ұлттық ғарыш агенттігі
Национальное космическое агентство
Республики Казахстан
National space agency of the Republic of Kazakhstan

сериясы

ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ҒАРЫШТЫҚ ЗЕРТТЕУЛЕР

серия

КАЗАХСТАНСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

series

KAZAKHSTAN SPACE RESEARCH

Алматы, 2010

Кітап ФАФИ 60-жылдығына арналады

Алматы қаласында 1941ж. Құрылған астраномия және физика институтынан 1950ж. КСРО ҒА академигі В.Г. Фесенковтың бастауымен астрофизика институты (ФИФА) бөлініп шықты.

Книга посвящается 60-ти летию АФИФ

В 1950г. из Института астрономии и физики, созданного в 1941г. в г. Алма - Ата, выделился Астрофизический Институт (АФИФ), создателем которого является академик АН СССР В.Г. Фесенков.

The Book is devoted to 60-years of APHI

On the base of the astronomy and physics institute, which was formed in 1941 in Alma-Ata, the new Astrophysical Institute (APHI) was founded in 1950 thanks to academician AS USSR V.G. Fessenkov.

2010 Қазақстандағы Ғарыштық Зерттеулер

Том 7

Қазақстан Республикасының Ұлттық ғарыш агенттігі
Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы
В.Г. Фесенков атындағы астрофизикалық институты

Дубовиченко С.Б.

Әлемнің Термоядролық *процестері*

Физикалық моделдеу және нәтижелері, математикалық және сандық есептеу әдістері, компютерлік бағдарламалар

Алматы
2010

УДК 524+539
ББК 22.62: 22.38
Д 79

Редакция ұжымы
Т.А. Мусабаев (төраға)
М.М. Молдабеков, Ж.Ш. Жантаев, Л.М. Чечин

Басылымға ұсынған ғылыми техникалық кеңесі АҚ«ҰҒЗТОҚ» ҚР ҰҒА, ЖШС В.Г. Фесенков атындағы астрофизикалық институтының ғылыми кеңесі және ХААН (ҚР) Президиумі

Ғылыми кеңесшісі
Д.ф.-м.н., профессор **Блохинцев Л.Д.** (ММУ, Москва, Россия)

Ғылыми редактор
Д.ф.-м.н. **Узиков Ю.Н.** (БЯЗИ, Дубна, Россия),
д.ф.-м.н., профессор **Буркова Н.А.** (ҚазҰУ, Алматы, Казакстан)

Рецензент
Академик ҚР ҰҒА, д.ф.-м.н., профессор **Боос Э.Г.** (ИФТ),
академик ҚР ҰҒА , д.ф.-м.н., профессор **Такибаев Н.Ж.** (ҚазҰПУ),
академик ҚР ҰИА, ҚР мемлекеттік сыйлық лауреаты
д.ф.-м.н., профессор **Данаев Н.Т.** (ҚазҰУ),
академик ХААН (ҚР), д.т.н., профессор **Шмыгалева Т.А.** (ҚазҰУ),
академик ХААН (ҚР), д.ф.-м.н., профессор **Чечин Л.М.** (ФИФА),
д.ф.-м.н., профессор **Дуйсебаев А.Д.** (ЯФИ),
д.ф.-м.н., профессор **Буртебаев Н.Т.** (ЯФИ)

Дубовиченко С.Б.
Д 79 Әлемнің термоядрлық процестері. Алматы: баспасы В.Г. Фесенков атындағы астрофизикалық институт ҚР ҒЗТҰО, 2010 -530б.

ISBN 978-601-278-331-5

Кітап кейбір ядролық астрофизика жылу энергиясының және жеңіл атом ядросының теориясын қарастырады. Редакция талдауы үшін жеңіл атом ядросының потенциялдық екікластерлік моделінің Юнг орбиталдық сұлбасы бойынша кластарға бөлінуі пайдаланылады. Оның құрамында p_2H, p_3H, p_6Li, p_7Li, p_9Be және $p_{12}C$ фотоядерлік процесі қарастырылған, сонымен қатар $_2H_4He$, $^3H^4He$, $^3He^4He$ и $^4He^{12}C$ каналдарында және соған сәйкес келетін астрофизикалық *S* - факторы есептелінген. Көрсетілгендей, пайдаланылған талдаулар астрофизикалық энергия саласындағы эксперимент нәтижелерін жақсылап суреттеуге жол ашады.

© Дубовиченко С.Б., ФИФА, 2010

ISBN 978-601-278-331-5

2010
Казахстанские Космические Исследования

Том 7

**Национальное космическое агентство
Республики Казахстан
Национальный центр космических исследований
и технологий
Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова**

Дубовиченко С.Б.

Термоядерные *процессы* Вселенной

***Физические модели и результаты,
математические и численные методы,
компьютерные программы***

**Алматы
2010**

УДК 524+539
ББК 22.62: 22.38
Д 79

Редакционная коллегия
Т.А. Мусабаев (председатель)
М.М. Молдабеков, Ж.Ш. Жантаев, Л.М. Чечин

Рекомендовано к изданию научно - техническим советом АО "НЦКИТ" НКА РК, научным советом ДТОО "Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова" и Президиумом МАИН (РК)

Научный консультант
Д.ф.-м.н., профессор **Блохинцев Л.Д.** (МГУ, Москва, Россия)

Научные редакторы
Д.ф.-м.н. **Узиков Ю.Н.** (ОИЯИ, Дубна, Россия),
д.ф.-м.н., профессор **Буркова Н.А.** (КазНУ, Алматы, Казахстан)

Рецензенты
Академик НАН РК, д.ф.-м.н., профессор **Боос Э.Г.** (ФТИ),
академик НАН РК, д.ф.-м.н., профессор **Такибаев Н.Ж.**(КазНПУ),
академик НИА РК, Лауреат государственно премии РК,
д.ф.-м.н., профессор **Данаев Н.Т.** (КазНУ),
академик МАИН (РК), д.т.н., профессор **Шмыгалева Т.А.** (КазНУ),
академик МАИН (РК), д.ф.-м.н., профессор **Чечин Л.М.** (АФИФ),
д.ф.-м.н., профессор **Дуйсебаев А.Д.** (ИЯФ),
д.ф.-м.н., профессор **Буртебаев Н.Т.** (ИЯФ)

Дубовиченко С.Б.
Д 79 Термоядерные процессы Вселенной. Алматы: Изд. Астрофизического института им. В.Г. Фесенкова НЦ КИТ НКА РК, 2010 -530с.

ISBN 978-601-278-331-5

Книга рассматривает некоторые теоретические вопросы ядерной астрофизики тепловых энергий и легких атомных ядер. Для анализа реакций используется потенциальная двухкластерная модель легких атомных ядер с классификацией состояний по орбитальным схемам Юнга. На ее основе рассмотрены фотоядерные процессы в p_2H, p_3H, p_6Li, p_7Li, p_9Be и $p_{12}C$, а также $_2H_4He$, $_3H_4He$, $_3He_4He$ и $^4He^{12}C$ каналах и рассчитаны соответствующие им астрофизические *S* - факторы. Показано, что используемые методы позволяют хорошо описывать имеющиеся экспериментальные данные в области астрофизических энергий.

© Дубовиченко С.Б., АФИФ, 2010

ISBN 978-601-278-331-5

2010 KAZAKHSTAN SPACE RESEARCH

Vol. 7

National space agency of the Republic of Kazakhstan
National center of the space research and technology
V.G. Fessenkov Astrophysical Institute

Dubovichenko S.B.

Thermonuclear *processes of the* Universe

Physical models and results, mathematical and calculations methods, computer programs

Almaty
2010

PACS 26.; 25.20.-x; 24.10.-i; 21.60.-n; 21.60.Gx; 02.

Editorial board
T.A. Mussabaev (chairman)
M.M. Moldabekov, Zh.Sh. Zhantaev, L.M. Chechin

The book was recommended to the publish by the Scientific and Technical Council of NC SRT NSA RK, Scientific Council of V.G. Fessenkov Astrophysical Institute and Presidium IIA (RK)

Scientific consultant
Doctor, professor **Blokhintsev L.D.** (MSU, Moscow, Russia)

Scientific redactors
Doctor **Uzikov Yu. N.** (JINR, Dubna, Russia),
doctor, professor **Burkova N.A.** (KazNU, Almaty, Kazakhstan)

Reviewers
The academician NAS RK, doctor, professor **Boos E.G.** (PTI),
academician NAS RK, doctor, professor **Takibaev N.Zh.** (KazNPU),
academician IEA RK, winner of the state awards RK,
doctor, professor **Danaev N.T.** (KazNU),
academician IIA (RK), doctor, professor **Shmygaleva T.A.** (KazNU),
academician IIA (RK), doctor, professor **Chechin L.M.** (APHI),
doctor, professor **Duisebaev A.D.** (INP),
doctor, professor **Burtebaev N.T.** (INP)

Dubovichenko S.B.
Thermonuclear processes of the Universe. Almaty: Fessenkov Astrophysical Institute NC SRT NSA RK, 2010 -530p.

ISBN 978-601-278-331-5

The book considers some theoretical questions of nuclear astrophysics thermal energies and light atomic nuclei. For the analysis of reactions is used potential two cluster model of light nuclei with classification of states by orbital schemes. On its basis photonuclear processes in p^2H, p^3H, p^6Li, p^7Li, p^9Be and $p^{12}C$, and also $^2H^4He$, $^3H^4He$, $^3He^4He$ and $^4He^{12}C$ channels are considered and astrophysical *S* - factors corresponding to them are calculated. It is shown, that used methods allow to describe well available experimental data in the field of astrophysical energies.

© Dubovichenko S.B., APHI, 2010

ISBN 978-601-278-331-5

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ (К изданию) 13
АЛҒЫ СӘЗ (Автор) 16
ПРЕДИСЛОВИЕ (Автора) 18
FOREWORD (Autor) 20
ҚЫСҚАША МАЗМҰНЫ 22
КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ 26
SHORT CONTENTS 30
ВВЕДЕНИЕ 33
1. ТЕРМОЯДЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ 40
Введение 40
1.1 Термоядерные реакции в звездах 41
1.2 Протон - протонный цикл 46
1.3 Звездный CNO - цикл 51
1.4 Тройная гелиевая реакция 55
1.5 Другие термоядерные процессы в звездах 57
1.6 Зависимость термоядерных реакций от массы звезды 60
1.7 Успехи и проблемы ядерной астрофизики 64
2. МОДЕЛЬ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА 70
Введение 70
2.1 Кластерная модель 74
2.2 Астрофизические S - факторы 78
2.3 Потенциалы и волновые функции 82
2.4 Численные математические методы 85
2.5 Классификация кластерных состояний 86
2.6 Методы фазового анализа 89
2.7 Обобщенная матричная задача на собственные значения 90
3. АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ S - ФАКТОР РАДИАЦИОННОГО p^2H ЗАХВАТА 95

Введение 95
3.1 Потенциалы и фазы рассеяния 97
3.2 Астрофизический S - фактор 103
3.3 Альтернативный метод вычисления энергии связи 110
Заключение 128
4. ПРОЦЕСС p^3H ЗАХВАТА 129
Введение 129
4.1 Потенциалы и фазы рассеяния 130
4.2 Астрофизический S - фактор 138
4.3 Вычисление астрофизического S - фактора 141
4.4 Программы фазового анализа в системе нетождественных частиц со спином 1/2+1/2 166
Заключение 203
5. ПРОЦЕСС РАДИАЦИОННОГО p^6Li ЗАХВАТА 204
Введение 204
5.1 Дифференциальные сечения 205
5.2 Фазовый анализ 206
5.3. Классификация кластерных состояний 211
5.4 Потенциальное описание фаз рассеяния 213
5.5 Астрофизический S - фактор 219
Заключение 221
6. S - ФАКТОР РАДИАЦИОННОГО p^7Li ЗАХВАТА 223
Введение 223
6.1 Классификация орбитальных состояний 224
6.2 Потенциальное описание фаз рассеяния 227
6.3 Астрофизический S - фактор 232
6.4 Программа расчета фаз упругого рассеяния 236
6.5 Программа вычисления S - фактора p^7Li захвата 246

7. РАДИАЦИОННЫЙ ЗАХВАТ В p^9Be СИСТЕМЕ 267
Введение 267
7.1 Классификация орбитальных состояний..... 267
7.2 Потенциальное описание фаз рассеяния 269
7.3 Астрофизический S - фактор 275
7.4 Программа расчета астрофизического S - фактора 278
8. РАДИАЦИОННЫЙ $p^{12}C$ ЗАХВАТ 307
Введение 307
8.1 Дифференциальные сечения 307
8.2 Контроль компьютерной программы 310
8.3 Фазовый анализ упругого $p^{12}C$ рассеяния 314
8.4 Астрофизический S - фактор 318
8.5 Программа для $p^{12}C$ фазового анализа 326
9. S - ФАКТОРЫ РАДИАЦИОННОГО ЗАХВАТА В $^3He^4He$, $^3H^4He$ И $^2H^4He$ СИСТЕМАХ 337
Введение 337
9.1 Потенциалы и фазы рассеяния 338
9.2 Новые варианты потенциалов..... 343
9.3 Результаты вариационных расчетов 347
9.4 Астрофизический S - фактор 351
9.5. Вариационная двухтельная программа..... 358
10. РЕАКЦИЯ РАДИАЦИОННОГО $^4He^{12}C$ ЗАХВАТА 377
Введение 377
10.1 Дифференциальные сечения 378
10.2 Фазовый анализ 379
10.3 Описание фаз рассеяния в потенциальной модели 385
10.4 Астрофизический S - фактор 390

ҚОРЫТЫНДЫ..... *394*
ЗАКЛЮЧЕНИЕ *398*
CONCLUSION..... *402*
АЛҒЫС БІЛДІРУ *406*
БЛАГОДАРНОСТИ..... *408*
ACKNOWLEDGMENTS *410*
ПРИЛОЖЕНИЕ 1..... *412*
Фазовый анализ упругого
^{4}He^{4}He рассеяния..... 412
ПРИЛОЖЕНИЕ 2..... *450*
Трехтельная модель ядра ^{9}Be..... 450
ПРИЛОЖЕНИЕ 3..... *486*
Методы расчета кулоновских
волновых функций и функций
Уиттекера..... 486
ПРИЛОЖЕНИЕ 4..... *497*
Основные астрофизические термины
и понятия 497
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ *509*

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}H) до шестнадцати (^{4}He + ^{12}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 значениями 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}H и p + ^{3}H) результаты расчетов автора с хорошей точностью совпали с данными эксперимента, появившимися заметно позже выполнения этих расчетов.

Представляемая книга выгодно отличается от дру-

гих монографий в области ядерной физики 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 "Термоядерные процессы Вселенной" будет, безусловно, 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.

АЛҒЫ СӨЗ

Автор

Ядролық астрофизика - қазіргі астрофизиканың бірден бір анағұрлым жас бөлімі болып табылады. Ол астрономиялық объектілердің табиғаты мен энергия көздері, жасы және химиялық құрамының ерекшеліктерінің түсінігі үшін ядролық физикасының эксперименттік және теориялық саласында алынған нәтижелерінің қолдану аясын көрсетеді. [1].

Астрономия мен астрофизика қазіргі дамуының біздің Әлем қалай құрылғаны және бізге оның 14 миллиард жарық жылдардың қашықтықта эволюциясы мен құрылымының түсінігіне мүмкіндігін береді. Әлемді бақылау материясының өте тұтас концентрациясының аймақтарын және олардың аралығындағы «бос» көрінетін үлкен кеңістігін көрсетеді. Дегенмен осы «бос» кеңістігін газтозаңды молекулалық немесе атомдық затпен және нейтрино қосылған әр түрлі сәуле шығаруымен толтырылған. Бұдан баска Әлемге жаңа көзқараспен қарасақ қара материя мен қара энергия түсінігін береді, ол оның массасын анықтайды және ұлғаюының түрін сипаттайды.

Әлемдегі бақыланатын жұлдыздарда және планеталарда зат шоғырланады және газтозаңды бұлттардың құрамына кіреді және нуклидтерден құрылады, яғни сутегіден уранға дейін тоқсан екі химиялық элементтердің ядроларында протондар мен нейтрондар әр түрлі сандарымен атомдар топтасады. Бізді қоршаған Әлем әр түрлі ядролық құрамы шамамен бірнеше жүздеген нуклидтерден тұрады және қазіргі заманға сай ғылым, ядролық астрофизика тұтастай, олардың құрылуын және салыстырмалы түрде таралуының тарихын түсіндіруге мүмкіндігін береді.

Бізді қоршаған Жер әлемі әр түрлі химиялық элементтерден құрылды және Жер, Күн, біздің Күн жүйесіндегі химиялық элементтер жұлдыздар эвалюциясында пайда болады. Біздің Жер - Күн жүйесіндегі сегіз планетаның біріне жатады, ал Күн біздің галактикада (Құс жолында) орналасқан, ол кезекті тұрақты жұлдыздардың біріне жатады. Қазіргі заманға сай Құс жолында бірнеше жүздеген миллиард жұлдыздар орналасқан және олар біздің Әлемін бақылағаннан бастап шамамен 14 миллиард жылдан кейін пайда болды, ол жүздеген миллиард ұқсас галактикадан тұрады. [2].

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 девяноста 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 их 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 рождаться и в современную эпоху, т.е. спустя примерно 14 млрд. лет после образования наблюдаемой нами Вселенной, которая может включать сотни миллиардов подобных галактик [2].

FOREWORD

Author

Nuclear astrophysics is one of the youngest branches of the modern astrophysics, which practically represents the sphere of application of the results obtained in experimental and theoretical physics to the astronomical objects with a view to explain their nature, energy sources, age and chemical composition peculiarities [1].

Owing to the modern development of astronomy and astrophysics we have a general understanding of the Universe – of its evolution and structure within the distances of the order of 14 billion light years. The observations of the Universe reveal the areas of very compact matter concentration and extremely large distances between them which seem to be "empty". However, all this "empty" space is filled with gas and dust matter, atoms and various kinds of radiation including neutrino. Furthermore, the modern theories about the Universe involve such concepts as dark matter and dark energy, which determine its mass and characterize its mode of Expansion.

The matter which concentrates in the stars and planets of the visible Universe and which forms the gas and dust clouds consists of nuclides, i.e. the atoms of ninety two chemical elements having different numbers of protons and neutrons in their nuclei and ranging from hydrogen to uranium. All the diversity of nuclear composition of the Universe is made up of several hundreds of nuclides and the current level of science – nuclear astrophysics – allows explaining in general the history of their formation and their relative occurrence.

The world around us also consists of various chemical elements and, presently, it is generally recognized that all the elements forming the Earth, the Sun and the whole solar system were produced in the course of the stellar evolution. Our Earth is

one of the eight planets of the solar system and our Sun is a common stable star of our galaxy – the Milky Way. According to the current estimates the Milky Way only comprises several hundred billion stars and even at present time, i.e. 14 billion years after the formation of the visible Universe, which may contain hundred billions of similar galaxies, new stars can be born [2].

ҚЫСҚАША МАЗМҰНЫ

Әлемді зерттеу саласында прогрес атомдық ядромен элементар бөлшектердің физикасының жетістіктеріне байланысты. Атап айтканда микроәлемдегі заңдары Әлемдегі болып жатқан оқиғаларды түсінуі үшін қолданылады. Бұл микро – және макро – ғарыштың бірлігі табиғаттын ішкі бірлігінің ғажайып оқыту мысалдарының барлығы болып табылады. [2].

Негізгі нәтижелеріндегі баяндамаға өтпес бұрын кітаптың қысқаша мазмұнына өтеміз. Бірінші бөлімінде барлық негізгі термоядролық реакцияларын қысқаша және жеткілікті жалпыға түсінікті қарастырамыз, олар әртүрлі этаптағы жұлдыздардың қалыптастыруы және дамуы өтуі мүмкін. Содан радиациялық қармауына тиісті көпшілік термоядролық процестердің талдауына толығырақ тоқталамыз, оның жанында екі соқтығысқан бөлшектер γ-квант сәуле шығаруымен бір бөлшекке тұтасады және электромагниттік өзара әрекеттесуінен өтеді, олардың теориялық көзқарасымен қарастырылуын жеңілдетеді. Біз келесіде термоядролық реакциясында қатысқан жеңіл атом ядроларының байланысты күйлерінің қасиеттерімен бірге негізгі сипаттамаларын қарастырамыз, атап айтқанда астрофизикалық энергияларымен осындай ядроларындағы протондар мен басқа бөлшектердің радиациялық қармауының процестердің астрофизикалық S - факторы.

Енді Бас тізбектердің тұрақты жұлдыздар үшін үш негізгі термоядролық циклдердің болуы мүмкін радиацияларына қысқаша шолу береміз және осы кітапта қандай процестер қарастырылған, ал басқаларын жақын уақытта талдаймыз.

Циклдердің біріншісі – бұл протон – протондық тізбек, ол күшті немесе электромагниттік өзара әрекетімен өтетін процестердің кіру каналы бойынша бес екібөлшекті есептелінеді. Олардың ішінен үшеуі радиациялық қармауына қатысады. Екі осындай процес кітабымызда қарастырылатын болады, ал нәтижелері 3 және 9 тарауында көрсетіледі. Тағы бұл циклдің бес реакциясы (барлығы 10, суретте 1.4 көрсетіледі) әлсіз өзара әрекетінен болады және осы процестер біздің кітапта болашақта қарастырылмайды.

Жұлдыздық CNO - цикл 9 ұқсастық реакциясынан құрылады (барлығы 13 процес, кестеде 1.2 ÷ 1.4 көрсетілген, яғни төртеуі әлсіз күшімен өтеді) және олардың ішінде алтауы - радиациялық қармауымен. Осы реакциялардың біріншісі ($p^{12}C \rightarrow {}^{13}N\gamma$) 8 - ші тарауында қарастырылады, ал соңғы екеуі (кестеде 1.2 ÷ 1.4 көрсетілген) ${}^{17,18}F$ ядроларының құрылуына келтіріледі, олар *p* - қабықшасындағы ядроларына жатпайды және потенциалдық кластерлік моделдер (ПКМ) басқа есептерінде пайдаланылған, осы жағдайларда қолданылуы мүмкін тексерілмеген. Сонымен қатар болашақта тек қалған үшеуі CNO - реакциялары қарастырылады.

Үш есе гелийдік цикл – бұл екі реакция, олардың біреуі екібөлшекті радиациялық қармауымен өтеді, оның талдауы потенциалдық кластерлік моделінің негізінде 10 - ші тарауында орындалды.

Нәтижесінде бізде барлығы 15 негізгі термоядролық реакциялары бар, олар екі бөлшекті кіріс каналында күшті және электромагниттік өзара әрекеті мен өтеді, олардың ішінде 10 ішінен радиациялық қармауының процесінен болады, олардың төртеуі біздің кітапта қарастырылады, басқа төртеуі болашақта зерттелетін болады, ал екеуі ПКМ айналасында қарастырылмайды.

Қарастырылған басқа да радиациялық қармауының бірнеше реакциялары болады, олар біздіңше Әлем дамуының жұлдыздарға дейін кезеңде өтті, яғни олар Әлемнің алғашқы секунттарында өтті. Оларға қатысты реакциялар [1,2]

$p + {}^{3}H \rightarrow {}^{4}He + \gamma$

немесе

${}^{2}H + {}^{4}He \rightarrow {}^{6}Li + \gamma$,

${}^{3}H + {}^{4}He \rightarrow {}^{7}Li + \gamma$,

олар алғашқы нуклеосинтезінде [3,4] болуы мүмкін және осы процестердің астрофизикалық *S* - факторлары 4 және 9 тарауында көрсетіледі.

Қорытындысында байқаймыз "Әлемнің термоядролық процесі" кітабына берілген жалпы аты болашаққа таңдаланылады. Жақында жеңіл атом ядроларындағы радиациялық қармауының түрлерінің термоядролық реакциялары қарастырылуын бітіреміз, сонымен бірге бірінші орында олардың төртеуі термоядролық циклдарға тікелей қатынасу бар екені және алынған нәтижелері осы кітаптың екінші басылымында көрсетіледі, ал бірінші басылымда қармаушы тоғыз реакциясы көрсетілді.

Барлығы радиациялық қармауының 16 негізгі процестері, олар соңғы күйінде *p* - қабықшасының ядроларға келтіріледі және ПКМ аймағында оларға қосылған алғашқы нуклеосинтез реакциялары мен көрсетілген 5, 6 және 7 тарауындағы реакциялары

$p{}^{6,7}Li \rightarrow {}^{7,8}Be\gamma$

және

$p{}^{9}Be \rightarrow {}^{10}B\gamma$

немесе

$p{}^{10,11}B \rightarrow {}^{11,12}C\gamma$

мүмкін қарастырылады.

Олар барлығы pp - немесе CNO - тізбектердің стандарттық термоядролық циклдарына жатпайды.

Сонан соң протон - протондық және CNO - циклдардың барлығы қалған термоядролық процестері қарастыруда, олар каналдардың қайта құруымен өтеді (барлығы 5 осындай реакция бар), мысалы

$$^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + 2p\ .$$

Сонымен бірге келешекте осы барлық процестердің талдауы жеңіл ядролардың потенциалдық кластерлік моделдерін және Паули принціпімен тыйым салынған күйлеріне кейбір кластерлік жүйелерінің Юнг жүйелері бойынша орбиталық күйлерінің классификациясын пайдалануымен бірыңғай негізінде орындалуы ұсынылды.

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, и протекают за счет электромагнитных взаимодействий, что несколько упрощает их рассмотрение с теоретической точки зрения. 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.

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 насчитывает пять двухчастичных по входному каналу процессов, происходящих за счет сильных или электромагнитных взаимодействий, в том числе, три из них относятся к радиационному захвату. Два таких процесса будут рассмотрены в гл.3 и 9. Еще пять реакций этого цикла (всего их 10, как показано на рис.1.4) происходят за счет слабых взаимодействий, а такие процессы рассматриваться нами в данной книге не будут.

Звездный CNO - цикл состоит из 9 подобных реакций (всего 13 процессов, показанных в табл.1.2 ÷ 1.4, т.е. четыре протекают за счет слабых сил) и шесть из них – радиационный захват. Первая из этих реакций $p^{12}C \rightarrow {}^{13}N\gamma$ рассмотрена далее в гл.8, а две последние (см. табл.1.2 ÷ 1.4) приводят к образованию ${}^{17,18}F$, которые не принадлежат к ядрам *p* - оболочки и возможность применения потенциальной кластерной модели (ПКМ), которая была использована во всех дальнейших расчетах, для таких случаев не проверялась. Поэтому в будущем будут рассмотрены только три из оставшихся реакций 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.10.

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, четыре из которых рассмотрены в данной книге, еще четыре будут изучены в дальнейшем, а два, как уже говорилось, по-видимому, не подлежат рассмотрению в рамках ПКМ.

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]

$$p + {}^{3}H \rightarrow {}^{4}He + \gamma$$

или

$${}^{2}H + {}^{4}He \rightarrow {}^{6}Li + \gamma,$$

$${}^{3}H + {}^{4}He \rightarrow {}^{7}Li + \gamma,$$

которые могли иметь место в первичном нуклеосинтезе [3,4] и астрофизические *S* - факторы таких процессов рассмотрены далее в гл.4, а последних двух реакций в гл.9.

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 на легких атомных ядрах, причем, в первую очередь, четырех из них, которые имеют прямое отношение к термоядерным циклам. Полученные результаты будут отражены во втором издание данной книги, которая включает в настоящее время десять реакций радиационного захвата на легких атомных ядрах, т.е. ядрах *p* - оболочки, заканчивающейся ядром ${}^{16}O$.

Всего имеется 16 основных процессов радиационного захвата, которые приводят в конечном состоянии к ядрам *p* - оболочки и, по-видимому, без особых проблем могут быть рассмотрены в рамках ПКМ. К ним относится рассмотренный выше радиационный захват в трех термоядерных циклах, реакции первичного нуклеосинтеза и процессы типа

$$p{}^{6,7}Li \rightarrow {}^{7,8}Be\gamma$$

или

$$p{}^{9}Be \rightarrow {}^{10}B\gamma,$$

рассмотренные далее в гл.5, 6 и 7 и

$p^{10,11}B \rightarrow {}^{11,12}C\gamma$.

Затем будут рассмотрены все остальные термоядерные процессы протон - протонного и CNO - циклов, которые протекают с перестройкой каналов (всего существует 5 таких реакций), например

$^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + 2p$.

Причем анализ всех этих процессов и далее предполагается выполнить на единой основе с использованием потенциальной кластерной модели легких ядер и классификации орбитальных состояний по схемам Юнга, при наличии в некоторых кластерных системах запрещенных принципом Паули состояний.

SHORT CONTENTS

The progress in studies about the Universe is substantially associated with the achievements in the nuclear and elementary particle physics. It turned out that the laws of microcosm allow understanding what is going on in the Universe. This unity of micro- and macrocosm is a remarkable and edifying example of the unity of Nature [2].

Before proceeding to the main results we would like to present a summary of the book. In the first chapter we will consider briefly and simply all the major thermonuclear reactions which may take place in the stars at different stages of their formation and evolution. Then we will expand on the analysis of the main thermonuclear processes involving radiative capture – processes in which two colliding particles fuse together to form one particle and emit γ - quantum. They are mediated by electromagnetic interactions which somewhat simplifies their consideration from the theoretical point of view. Further on, in addition to the properties of bound states of light atomic nuclei participating in thermonuclear reactions, we will consider the principal characteristics, in particular S - factors, of radiative capture of protons and other particles by such nuclei at astrophysical energies.

Now we are going to give an overview of possible reactions in three major thermonuclear cycles for stable stars of the Main Sequence and then indicate which processes will be considered in this book and which ones will be analyzed in the nearest future.

The first cycle is the proton - proton chain, which includes five two - particle processes (according to the input channel) mediated by strong or electromagnetic interactions, three of which belong to radiative capture processes. Two such processes will be considered in the present book and the results will be given in chapters 3 and 9. The other five reactions of this cycle (in total

there are 10 of them as it is shown in fig. 1.4) are mediated by weak interactions and we will not consider them either in this book or in the nearest future.

The stellar CNO - cycle consists of 9 similar reactions (13 in total, see table 1.2 ÷ 1.4, four of which are mediated by weak forces), six of which involve radiative capture. The first of these reactions ($p^{12}C \rightarrow {}^{13}N\gamma$) is considered in chapter 8 and the two last reactions (see table 1.2 ÷ 1.4) lead to a formation of ${}^{17,18}F$ nuclei which are not *p* - shell nuclei and the applicability of the potential cluster model (PCM), which was used for all further calculations, has never been tested for such cases. Therefore, only three of remaining CNO - cycle reactions will be considered in future.

The triple alpha process represents two reactions, one of which involves a two - particle radiative capture, which is analyzed on the basis of the potential cluster model in chapter 10.

As a result, we have 15 basic thermonuclear reactions with two - particle input channels mediated by strong and electromagnetic forces, 10 of which are the radiative capture processes, with 4 being considered in this book, the next 4 to be considered in future and two, seemingly, out of consideration within PCM.

In addition to the abovementioned processes there are some other radiative capture reactions which supposedly took place at the prestellar stage of evolution of the Universe, i.e. within the first seconds of its existence. They include, for instance [1,2]:

$$p + {}^{3}H \rightarrow {}^{4}He + \gamma$$

or

$${}^{2}H + {}^{4}He \rightarrow {}^{6}Li + \gamma\,,$$

$${}^{3}H + {}^{4}He \rightarrow {}^{7}Li + \gamma\,,$$

which could take place during the primordial nucleosynthesis [3,4] and the astrophysical *S* - factors of which are considered in chapters 4 and 9.

In conclusion we would like to note that the general title of

the book “Thermonuclear processes in the Universe” is chosen so as to account for the future expansion of the book. In the nearest future we are planning to finish the consideration of all possible thermonuclear reactions of radiative capture type on light nuclei, and first of all the four reactions directly associated with the thermonuclear cycles. The results obtained will be published in the second edition of the book which presently deals with nine capture reactions.

In total there are 16 basic radiative capture processes, which lead to *p* - shell nuclei and can be considered within PCM, including the primordial nucleosynthesis reactions and reactions of the type

$$p^{6,7}Li \rightarrow {}^{7,8}Be\gamma ,$$

or

$$p^{9}Be \rightarrow {}^{10}B\gamma$$

considered in chapters 5, 6 and 7, and

$$p^{10,11}B \rightarrow {}^{11,12}C\gamma .$$

They are all out of the standard thermonuclear cycles of pp - or CNO - chains.

Then we will consider the remaining thermonuclear processes of proton - proton and CNO cycles which are associated with the rearrangement of channels (in total there are 5 such reactions), for example

$${}^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + 2p .$$

And it is supposed to carry out the analysis of all these processes on the basis of the potential cluster model for light nuclei and classification of orbital states according to Young schemes in case of states forbidden by Pauli principle in some cluster systems.

ВВЕДЕНИЕ
Introduction

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.

Согласно наиболее распространенной точке зрения, звезды, на начальном этапе своего образования, конденсируются под действием гравитационных сил из гигантских газовых молекулярных облаков [3]. Эти газовые облака состоят преимущественно из молекулярного водорода с небольшой примесью дейтерия и гелия, которые образуются в результате первичного нуклеосинтеза на дозвездной стадии развития Вселенной. Звезды формируются в этом гигантском молекулярном облаке из отдельных неоднородностей или зон звездообразования [5], пример такого облака приведен на рис.В1 [6].

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].

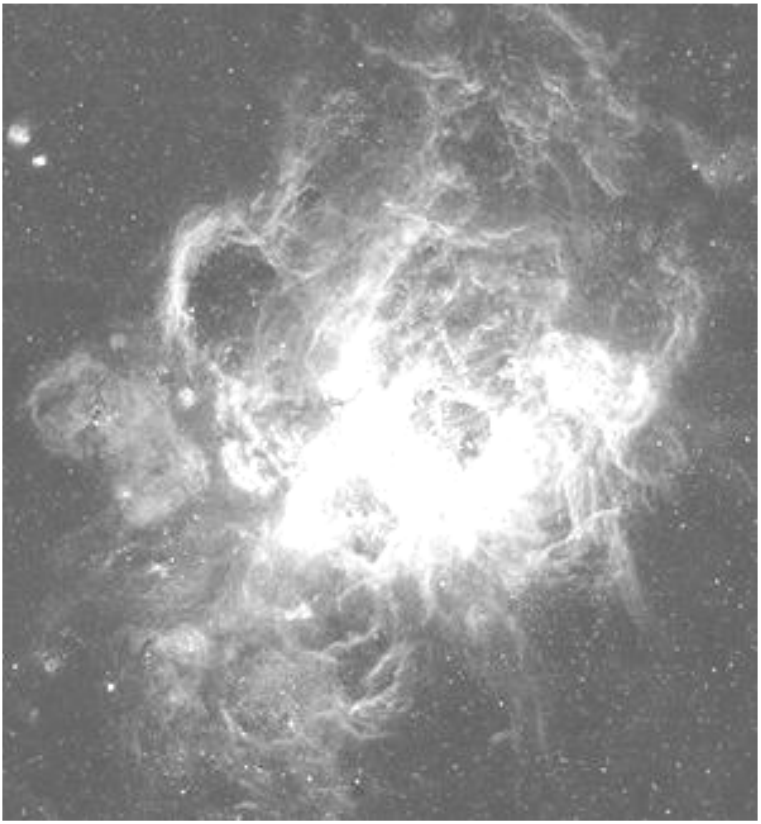

Рис.В1. Звездообразующая туманность в Галактике Треугольника.
(По данным: http://ru.wikipedia.org/wiki/Эмиссионная _туманность_с_рассеянным_скоплением)

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 этап быстрого сжатия. Протозвезда практически непрозрачна для видимого света, но прозрачна для инфракрасного излучения, которое уносит излишки тепла, выделяющегося при сжатии, так что 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. 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 этап медленного сжатия. 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 ионизуются, 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 $\mathfrak{M}_{\odot}$, то нет условий для начала протекания стабильных термоядерных реакций, поддерживающих ее равновесие, и такая протозвезда не сможет превратиться в настоящую звезду, а переходит в состояние, называемое, коричневый карлик, который со временем остывает и может превратиться в планетоподобный объект [6].

Если масса сжимающегося вещества больше 8% от $\mathfrak{M}_{\odot}$, 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 4).

Когда масса наиболее плотной центральной части облака, благодаря аккреции, достигает примерно 0.1 массы Солнца, температура в центре звезды составляет примерно 1 млн. K 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

$$p + p \rightarrow {}^{2}H + e^{+} + \nu_{e}$$

требуют более высокой температуры ~ 10 млн. K, а температура в центре протозвезды всего 1 млн. K. При такой температуре может эффективно протекать только реакция слияния дейтерия

$${}^{2}H + {}^{2}H \rightarrow {}^{3}He + n\ .$$

Дейтерий, также как ${}^{4}He$, образуется на дозвездной ста-

дии эволюции Вселенной [7] 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].

Непрозрачность протозвездного вещества приводит к тому, что в звезде, как предположил Хаяши [5], начинают возникать конвективные потоки газа. Нагретые области газа устремляются от центра звезды к периферии, 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.

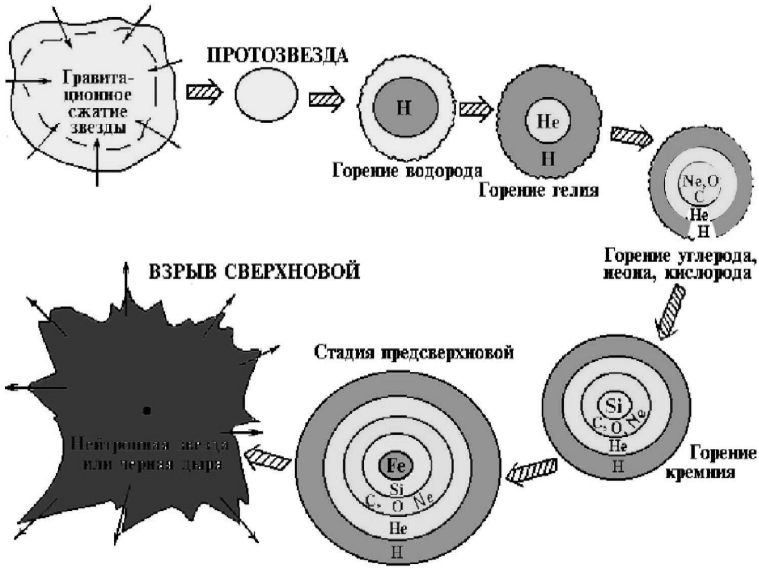

Рис.В2. Основные этапы эволюции массивной звезды с массой $M > 25\ \mathfrak{M}_\odot$ ($\mathfrak{M}_\odot$ – масса Солнца) [2].

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 [5] (см. Приложение 4).

Выше 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 (http://ru.wikipedia.org/wiki/звездная_эволюция) [6]. Такая звезда постепенно переходит в красный гигант, а затем, после сброса планетарной туманности, оставшееся ядро превращается в белый карлик (см. Приложение 4).

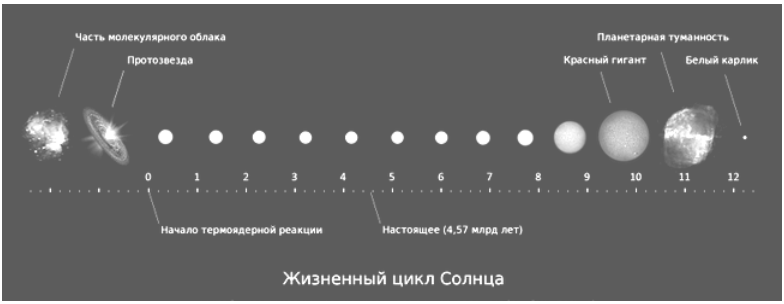

Рис.В3. Этапы развития звезды подобной нашему Солнцу ($M \sim \mathfrak{M}_{\odot}$).

Цифры показывают время существования в миллиардах лет.
(По данным: http://ru.wikipedia.org/wiki/звездная_эволюция)

Таким образом, мы кратко рассмотрели процесс эволюции протозвезды в обычную звезду, стабильное состояние

которой поддерживается благодаря протеканию в ней термоядерных реакций. 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 [5].

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: протон - протонный, CNO и гелиевый цикл и рассмотрим причины их протекания при взаимодействии атомных ядер в звездах различной массы на разной стадии их развития.