

Казахстанские

Космические

Исследования

Дубовиченко С. Б.

# Термоядерные процессы Вселенной

Том 7

Алматы 2011

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

---

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	13
АЛҒЫ СӨЗ .....	16
ПРЕДИСЛОВИЕ .....	18
FOREWORD .....	20
ҚЫСҚАША МАЗМҰНЫ .....	22
КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ .....	26
SHORT CONTENTS .....	30
ВВЕДЕНИЕ .....	34
1. ТЕРМОЯДЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ .....	41
Введение .....	41
1.1 Термоядерные реакции в звездах .....	42
1.2 Протон - протонный цикл .....	47
1.3 Звездный CNO - цикл .....	52
1.4 Тройная гелиевая реакция .....	56
1.5 Другие термоядерные процессы в звездах .....	58
1.6 Зависимость термоядерных реакций от массы звезды .....	61
1.7 Успехи и проблемы ядерной астрофизики .....	65
2. МОДЕЛЬ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА .....	71
Введение .....	71
2.1 Кластерная модель .....	75
2.2 Астрофизические S - факторы .....	79
2.3 Потенциалы и волновые функции .....	83
2.4 Численные математические методы .....	86

2.5 Классификация кластерных состояний.....	87
2.6 Методы фазового анализа .....	90
2.7 Обобщенная матричная задача на собственные значения .....	91
<b>3. АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ S - ФАКТОР РАДИАЦИОННОГО <math>p^2\text{H}</math> ЗАХВАТА .....</b>	<b>96</b>
Введение.....	96
3.1 Потенциалы и фазы рассеяния.....	98
3.2 Астрофизический S - фактор.....	104
3.3 Альтернативный метод вычисления энергии связи .....	111
Заключение.....	129
<b>4. ПРОЦЕСС <math>p^3\text{H}</math> ЗАХВАТА .....</b>	<b>130</b>
Введение.....	130
4.1 Потенциалы и фазы рассеяния.....	131
4.2 Астрофизический S - фактор.....	139
4.3 Вычисление астрофизического S - фактора .....	142
Заклучение.....	167
<b>5. ПРОЦЕСС РАДИАЦИОННОГО <math>p^6\text{Li}</math> ЗАХВАТА .....</b>	<b>168</b>
Введение.....	168
5.1 Дифференциальные сечения.....	169
5.2 Фазовый анализ .....	170
5.3. Классификация кластерных состояний.....	173
5.4 Потенциальное описание фаз рассеяния .....	176
5.5 Астрофизический S - фактор.....	182
Заклучение.....	184
<b>6. S - ФАКТОР РАДИАЦИОННОГО <math>p^7\text{Li}</math> ЗАХВАТА .....</b>	<b>186</b>
Введение.....	186

6.1 Классификация орбитальных состояний.....	187
6.2 Потенциальное описание фаз рассеяния .....	190
6.3 Астрофизический S - фактор.....	195
6.4 Программа расчета фаз упругого рассеяния .....	199
6.5 Программа вычисления S - фактора $p^7\text{Li}$ захвата .....	208
Заклучение.....	229
<b>7. РАДИАЦИОННЫЙ ЗАХВАТ В <math>p^9\text{Be}</math> СИСТЕМЕ.....</b>	<b>230</b>
Введение.....	230
7.1 Классификация орбитальных состояний.....	230
7.2 Потенциальное описание фаз рассеяния .....	232
7.3 Астрофизический S - фактор.....	238
7.4 Программа расчета астрофизического S - фактора.....	240
Заклучение.....	268
<b>8. РАДИАЦИОННЫЙ <math>p^{12}\text{C}</math> ЗАХВАТ .....</b>	<b>270</b>
Введение.....	270
8.1 Дифференциальные сечения.....	270
8.2 Контроль компьютерной программы .....	273
8.3 Фазовый анализ упругого $p^{12}\text{C}$ рассеяния .....	276
8.4 Астрофизический S - фактор.....	279
Заклучение.....	286
<b>9. S - ФАКТОРЫ РАДИАЦИОННОГО ЗАХВАТА В <math>^3\text{He}^4\text{He}</math>, <math>^3\text{H}^4\text{He}</math> И <math>^2\text{H}^4\text{He}</math> СИСТЕМАХ.....</b>	<b>288</b>
Введение.....	288
9.1 Потенциалы и фазы рассеяния.....	289



9.2 Новые варианты потенциалов .....	294
9.3 Результаты вариационных расчетов.....	298
9.4 Астрофизический S - фактор.....	302
9.5. Вариационная двухтельная программа.....	309
Заключение.....	326
<b>10. РЕАКЦИЯ РАДИАЦИОННОГО</b>	
<b><math>^4\text{He}^{12}\text{C}</math> ЗАХВАТА</b> .....	<b>328</b>
Введение.....	328
10.1 Дифференциальные сечения.....	329
10.2 Фазовый анализ .....	330
10.3 Описание фаз рассеяния в потенциальной модели.....	334
10.4 Астрофизический S - фактор.....	339
Заключение.....	343
<b>ҚОРЫТЫНДЫ</b> .....	<b>344</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	<b>348</b>
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>352</b>
<b>АЛҒЫС БІЛДІРУ</b> .....	<b>355</b>
<b>БЛАГОДАРНОСТИ</b> .....	<b>357</b>
<b>ACKNOWLEDGMENTS</b> .....	<b>359</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1</b> .....	<b>361</b>
Методы расчета кулоновских волновых функций и функций Уиттекера .....	361
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2</b> .....	<b>372</b>
Основные астрофизические термины и понятия .....	372
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	<b>384</b>

## 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 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].

Оwing to the modern development of astronomy and astrophysics we have a general understanding of the structure and evolution of the Universe, and these knowledge extends to our understanding of the evolution of the Universe over the last 14 billion light years. The observations of the Universe show regions of very compact concentration of matter and vast empty spaces between them which seem to be "empty". However, all this "empty" space is filled with gas and dust, molecular and atomic matter, and various kinds of radiation, including neutrinos. In addition, modern representations of the Universe include the concepts of 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 clouds of gas and dust is composed of nucleides, i.e. atoms of many 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 in the Universe is made up of several hundred chemical elements and the current level of science allows explaining in general the history of their formation and relative abundance.

The world around us on Earth is also composed of various chemical elements and, as is generally recognized, all these elements forming the Earth, the Sun and the whole solar system were produced in the course of the stellar evolution. Our Earth is



**Дубовиченко  
Сергей  
Борисович**

**Академик  
Международной  
Академии  
Информатизации  
(МАИН РК)**

**Член-корреспондент  
Российской  
Академии  
Естествознания  
(РАЕ РФ)**

*Доктор физико -  
математических наук  
РК и РФ  
( 01.04.16 и 05.13.18)*

*Член Европейского  
Физического Общества*

*Член Нью-Йоркской  
Академии Наук*

*Лауреат премии  
ЛКСМ КазССР*

*Лауреат гранта  
международного фонда  
Дж. Сороса*

*Главный научный  
сотрудник  
Астрофизического  
института  
им. В.Г. Фесенкова  
"НЦКИТ" НКА РК*

*Профессор*

<http://www.dubovichenko.ru>  
[sergey@dubovichenko.ru](mailto:sergey@dubovichenko.ru)  
[dubovichenko@mail.ru](mailto:dubovichenko@mail.ru)  
[dubovichenko@gmail.com](mailto:dubovichenko@gmail.com)