НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

В.А. Тамаров

ЛЕКЦИИ ПО АСТРОФИЗИКЕ

Учебное пособие

Томск
2024

УДК 52:53(075.8)
ББК 22.63я73
Т17

Т17 Тамаров В.А.
Лекции по астрофизике: – Новосибирск: Издательство "Сибпринт", 2024. – 408 с. : ил.
ISBN 978-5-94301-972-2

Рецензент:
главный научный сотрудник Специальной астрофизической обсерватории РАН, доктор физико-математических наук, профессор Клочкова Валентина Григорьевна

Предлагаемая книга является дополнением к лекциям, читаемым автором в течение ряда лет студентам 4-го курса физического факультета Томского госуниверситета. Она содержит материал по современной астрофизике, соответствующий темам, рассматриваемым во время аудиторных занятий, но изложенный несколько глубже и значительно подробнее, чем это удается сделать в аудитории.

УДК 52:53(075.8)
ББК 22.63я73

ISBN 978-5-94301-972-2
© В.А. Тамаров, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие **7**

1. Элементы фотометрии **12**
1.1. Световой поток, сила света, освещенность 14
1.2. Световые единицы 18
1.3. Связь астрономических и физических фотометрических единиц 20
1.4. Системы звездных величин 21
1.5. Абсолютная звездная величина и светимость 23

2. Измерение расстояний в астрономии **25**
2.1. Единицы измерения расстояний.....25
2.2. Способы измерения расстояний 26

3. Законы Кеплера **32**
3.1. Первый закон Кеплера 32
3.2. Второй закон Кеплера 33
3.3. Третий закон Кеплера.....33
3.4. Закон всемирного тяготения.....34
3.5. Законы Кеплера в формулировке Ньютона.....35

4. Механизм излучения **37**
4.1. Излучение атомов и молекул 37
4.2. Атом водорода 44
4.3. Квантовые числа 47
4.4. Правила отбора 51
4.5. Числа населенности 54
4.6. Молекулярные спектры.....54
4.7. Непрерывные спектры.....55
4.8. Излучение абсолютно черного тела 55
4.9. Вынужденное излучение и лазеры 59
4.10. Синхротронное излучение 63
4.11. Лучистый перенос.....63
4.12. Виды температур 67

5. Наблюдения и инструменты **74**
5.1. Наземные наблюдения 74
5.2. Оптические телескопы 77

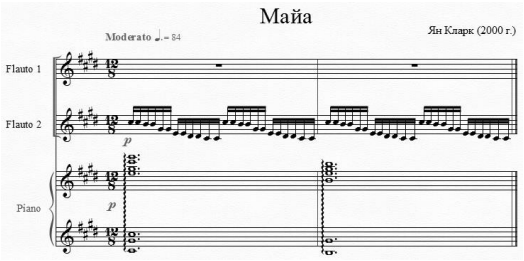
5.2.1. Элементы геометрической оптики 78
5.2.2. Рефракторы 81
5.2.3. Рефлекторы 84
5.2.4. Катадиоптрические телескопы 88
5.2.5. Монтировки телескопов 90
5.2.6. Эволюция размеров оптических телескопов 92
5.2.7. Новые технические решения 96
5.2.8. Оптические телескопы XXI века 99
5.2.9. Космические телескопы 101
5.3. Приемники излучения 103
5.3.1. Фотографическая пластинка 104
5.3.2. Фотокатоды и фотоумножители 106
5.3.3. Фотометры и поляриметры 106
5.3.4. Усилители изображения 108
5.3.5. ПЗС-матрица 109
5.4. Спектрографы 111
5.5. Радиоастрономия 115
5.6. Другие области электромагнитного спектра 127
5.6.1. Гамма-лучевая астрономия 128
5.6.2. Рентгеновская астрономия 135
5.6.3. Ультрафиолетовая астрономия 140
5.6.4. Инфракрасная астрономия 145
5.7. Космические лучи 152
5.8. Нейтринная астрономия 154
5.9. Гравитационно-волновая астрономия 166
6. Звезды 176
6.1. Общие сведения о звездах 176
6.1.1. Спектры звезд 176
6.1.2. Измерение спектров 178
6.1.3. Спектральные классификации 180
6.1.4. Диаграмма Герцшпрунга – Рассела 190
6.1.5. Модели звездных атмосфер 192
6.1.6. Определение фундаментальных звездных параметров 194
6.2. Внутреннее строение звезд 197
6.2.1. Условия равновесия внутри звезды 197
6.2.2. Физическое состояние газа 204

6.2.3. Давление газа и давление излучения 207
6.2.4. Давление вырожденного газа.....208
6.3. Источники звездной энергии 210
6.3.1. Протон – протонная цепочка 212
6.3.2. Углеродно – азотно – кислородный цикл 214
6.3.3. «Горение» гелия 215
6.3.4. Термоядерный синтез элементов тяжелее гелия.....215
6.4. Звездные модели 218
6.5. Солнце.....220
6.5.1. Внутреннее строение 220
6.5.2. Атмосфера.....224
6.5.3. Солнечная активность 229
6.5.4. Исследования Солнца космическими аппаратами.....238
7. Эволюция звезд 240
7.1. Эволюционные временные шкалы.....240
7.2. Сжатие звезд на пути к главной последовательности 243
7.3. Фаза главной последовательности 247
7.4. Фаза гиганта 251
7.5. Финальные стадии эволюции 254
7.6. Сравнение эволюционных моделей с наблюдениями 258
7.7. Происхождение химических элементов 260
8. Двойные звезды 264
8.1. Визуально-двойные звезды.....265
8.2. Астрометрические двойные звезды 267
8.3. Спектроскопические двойные звезды.....268
8.4. Фотометрические двойные звезды.....271
8.5. Эволюция звезд в тесных двойных системах.....277
9. Переменные звезды 283
9.1. Классификация.....285
9.2. Пульсирующие переменные 287
9.3. Эруптивные (вспыхивающие) переменные.....294
10. Компактные звездные остатки 304
10.1. Белые карлики 305

10.2. Нейтронные звезды.....307
10.3. Черные дыры.....316
11. Галактики 325
11.1. Исторический экскурс.....326
11.2. Морфологическая классификация галактик.....328
11.3. Пекулярные галактики.....331
11.4. Состав галактик.....334
11.5. Звездные скопления.....342
11.6. Кинематика галактик.....353
11.7. Наша галактика Млечный Путь.....358
11.8. Системы галактик.....359
12. Вселенная 362
12.1. Модель Фридмана – Леметра.....363
12.2. Уравнение бюджета материи.....370
12.3. Открытие темной материи.....372
12.4. Основные космологические эксперименты.....375
12.5. Инфляционная космология.....384

Литература 393

Предметный указатель 395



ПРЕДИСЛОВИЕ

Директор московского Пушкинского музея Елизавета Станиславовна Лихачёва в интервью газете Томского государственного университета Alma Mater высказала замечательную мысль: «*Искусство и наука – это разные инструменты познания мира, но и то и другое – части культуры*». И это действительно так! В подтверждение можно привести два примера из, казалось бы, совершенно разных областей человеческой деятельности – музыкального искусства и научного исследования окружающего нас физического мира.

В индийской философии есть понятие «майя», что в переводе с санскрита означает иллюзия или видимость. Майя – это некоторая энергия, которая скрывает от нас единство всего сущего и истинную природу вещей, не позволяя нам видеть вещи такими, какие они есть. Попытку рассмотреть скрытую майей сущность средствами музыки сделал в одноименном произведении современный композитор Ян Кларк. И что, как не это же, является главной задачей науки, и, в первую очередь, древнейшей из наук, астрономии!

Астрономия переживает сегодня, без какого-либо преувеличения, период небывало бурного расцвета. Начав в эпоху своего зарождения с наблюдений движения небесных светил, измерения угловых расстояний между «неподвижными» звездами и наивных представлений об устройстве нашего мира, астрономия развилась в серьезнейшую науку. На этом пути она породила свою младшую сестру – физику и во многом

способствовала созданию и развитию математики, необходимой для моделирования наблюдаемых явлений в поисках скрытой от непосредственного восприятия истины.

Современная астрономия включает в себя много различных направлений, но главными среди них являются «три кита», на которых она стоит: *астрометрия*, *небесная механика* и *астрофизика*.

Астрометрия – самая древняя часть астрономии. В ней решаются следующие задачи:

- построение систем небесных координат;
- измерение координат небесных объектов и их собственных движений;
- составление звездных карт и каталогов различных объектов;
- служба времени и т.д.

Методы измерения положений и движения небесных тел непрерывно совершенствуются и становятся все более точными. Если раньше для измерений использовался только невооруженный глаз и различные угломерные инструменты, то после 1609 года для этих целей стал применяться телескоп. Конструкция телескопов непрерывно совершенствуется, их размеры становятся все больше, что позволяет видеть все более слабые объекты и выполнять все более точные измерения. Появились космические телескопы для решения астрометрических задач, такие как Hipparcos и Gaia.

Задачи небесной механики:

- исследование движения небесных тел под действием различных сил;
- определение из наблюдений орбит, по которым они движутся;
- расчет координат, в которых небесное тело может оказаться в будущем (построение *эфемерид*).

Этот раздел астрономии более молодой, чем астрометрия. Ему сейчас около 300 лет. Можно считать его началом установление Кеплером законов планетных движений и появле-

ние закона всемирного тяготения Ньютона. Триумфом небесной механики оказалось открытие «на кончике пера» Нептуна (восьмой планеты Солнечной системы).

Предметом астрофизики является исследование происхождения, строения, химического состава, физических свойств и эволюции отдельных небесных тел, их систем и всей Вселенной в целом. Этот раздел астрономии самый молодой. Его появление стало возможным с открытием и применением к изучению физики звезд спектрального анализа.

Если в начале своего пути астрофизика использовала лишь результаты наблюдений в видимом свете (сравнительно узкой полосе спектра электромагнитных волн), то в настоящее время задействованы практически все диапазоны электромагнитного излучения – от сверхдлинных радиоволн до сверхкоротких гамма-лучей. Превращение астрономии во всеволновую обогатило знания об известных объектах и, что гораздо важнее, привело к открытию новых объектов, позволило зарегистрировать излучение из таких областей, где материя (то есть вещество и излучение) находятся в так называемых экстремальных (предельных) условиях. Этот термин обычно используется, чтобы подчеркнуть, что те или иные условия практически невозможно реализовать в лабораториях на Земле. В этих условиях материя нередко приобретает новые физические свойства.

В качестве примеров экстремальных астрофизических условий можно указать высокие плотности вещества в ранней Вселенной и в недрах нейтронных звезд, сильные гравитационные поля в окрестностях черных дыр, сильные магнитные поля белых карликов и нейтронных звезд. При нынешнем уровне развития земной техники макроскопические свойства материи в экстремальных условиях можно исследовать, только наблюдая астрофизические объекты, в которых эти условия реализуются. В этом смысле можно смело утверждать: современная астрофизика – это передний край науки, и она исследует наиболее фундаментальные явления и процессы, недоступные пока лабораторной физике.

В настоящее время для астрофизических исследований используется не только электромагнитное излучение. Ведутся полноценные наблюдения еще в трех каналах, содержащих информацию об изучаемых объектах и происходящих во Вселенной событиях, таких как: *нейтрино*, *космические лучи* и *гравитационные волны*. Поток информации об изучаемых астрофизических объектах накапливается настолько лавинообразно, что сегодня наше представление о Вселенной сильно отличается от того, что мы знали о ней еще вчера.

По нашему глубокому убеждению, любой образованный человек должен быть знаком с достижениями астрофизики, приоткрывающими тайну, скрытую завесой «майи», о том, как на самом деле устроен наш мир. Для студентов, обучающихся на физических факультетах университетов, этот предмет вообще является обязательным. К сожалению, количества лекционных часов, отведенных для тех, кто не специализируются в области астрофизики, далеко недостаточно даже для поверхностного знакомства с этим необъятным и интереснейшим предметом, а возможности чтения дополнительной литературы крайне ограничены из-за перегруженности учебных программ. К тому же, как показывает опыт, имеющиеся в наличии учебники (например, превосходная книга А.В. Засова и К.А. Постнова «Общая астрофизика») несколько сложны для восприятия среднестатистическим студентом. Поэтому, нам представляется целесообразным собрать в одной книге материал по современной астрофизике, который соответствовал бы лекциям, читаемым на физическом факультете ТГУ, но был бы изложен немного глубже и подробнее, чем это удается сделать во время аудиторных занятий. При этом преследовалась цель изложить необходимый материал, по возможности, просто. Если эта книга будет достаточно понятна студентам со средним уровнем подготовки в физике, и, в то же время, не будет скучной для более продвинутых – автор будет считать свою задачу выполненной.

Включенный в книгу материал разбит на 12 разделов. Первые четыре раздела вспомогательные. Они содержат справоч-

ные сведения, необходимые для понимания терминологии и сути рассматриваемых астрофизических процессов. Пятый раздел посвящен наблюдениям в различных информационных каналах, и используемым для этой цели инструментам. Этот раздел книги наиболее объемный. Его можно рассматривать как подробное введение в круг вопросов, решаемых современной астрофизикой. Разделы 6 – 10 занимают, пожалуй, центральное место в этой книге, и содержат изложение накопленной к настоящему времени суммы знаний о физической природе звезд, источниках их энергии и жизненном пути от рождения до смерти. Заключительные разделы книги 11 и 12 предназначены для ознакомления с миром галактик (основных «кирпичиков», образующих крупномасштабную структуру Вселенной) и с элементами космологии, той части астрофизической науки, которая изучает Вселенную, как целое.

Автор признателен своему давнему студенческому другу В.Е. Панчуку за возможность использовать при описании приемников излучения и спектрографов его материал из совместной книги «Астрономическая спектроскопия». Было бы значительно сложнее довести эту работу до логического завершения, если бы не помощь моих коллег – М.А. Баньщиковой, разработавшей превосходный дизайн обложки, и Т.Ю. Галушиной, оказавшей неоценимое содействие в том, чтобы публикация этой книги состоялась. Им, а также своей дочери И.В. Тамаровой, взявшей на себя нелегкие хлопоты по поиску и взаимодействию с издательством, я приношу свою искреннюю благодарность.