

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ

Факультет физики

Экзамен

«Введение в астрофизику»



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Москва
2020

Содержание

1. Принципы работы телескопов в разных диапазонах спектра. Наблюдения с поверхности Земли.	3
1.1. Оптический диапазон	3
1.1.1. Телескоп-рефрактор	3
1.1.2. Телескоп-рефлектор	3
1.2. Радио-диапазон	4
1.3. Гамма-диапазон	5
1.4. Космические лучи	5
1.5. Гравитационные волны	5
1.6. Детекторы нейтрино	6
2.	8
3.	9
4.	10
5.	11
6. Устойчивость Солнца и звезд. Термоядерные реакции.	12
6.1. Устойчивость Солнца и звезд	12
6.2. Термоядерные реакции	12
6.2.1. Протон-протонный цикл	12
6.2.2. CNO-I-цикл	13
6.3. Синтез	14
7.	15
8.	16
9.	17
10.	18
11.	19
12.	20
13.	21
14.	22
15.	23
16.	24
17.	25
18.	26

19.

27

1. Принципы работы телескопов в разных диапазонах спектра. Наблюдения с поверхности Земли.

Будем рассматривать только наблюдения с Земли, потому что про наблюдения из космоса весь второй билет.

1.1. Оптический диапазон

Телескоп представляет собой трубу (сплошную или каркасную), которая установлена на монтировке (бывает экваториальная и азимутальная, в зависимости от того, по каким осям движется). Визуально имеет объектив (в который свет падает) и окуляр (в который смотрят глазом).

1.1.1. Телескоп-рефрактор

У рефракторов объективом является система линз.

Рефрактор исторически был создан раньше всех. Состоит из двух линз (объектив и окуляр), фокусы которых совмещены. Типичная схема приведена на рисунке 1. Требуется большой длины трубы, из-за чего неудобный.

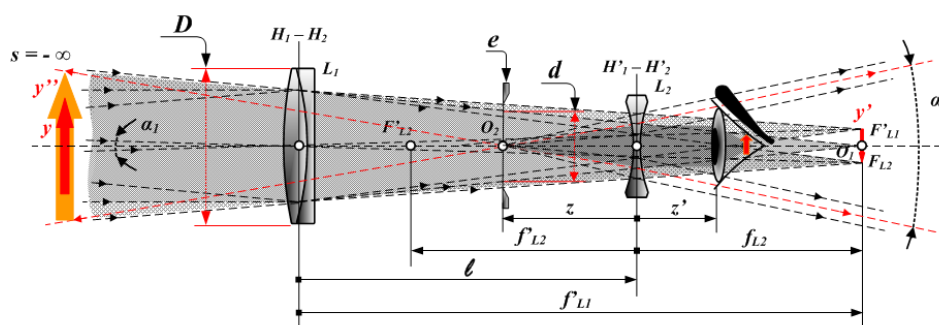


Рис. 1. Схема хода лучей в рефракторе Галилея

1.1.2. Телескоп-рефлектор

У рефлекторов объективом является вогнутое зеркало.

Появился несколько позже чем рефрактор, когда мы научились делать хорошие зеркала (неметаллические, поскольку металлические необходимо было часто шлифовать, поскольку они тускнели). Удобнее рефрактора тем, что большая часть массы сосредоточена "внизу" телескопа, что делает его удобнее в использовании. Типичная схема приведена на рисунке 2.

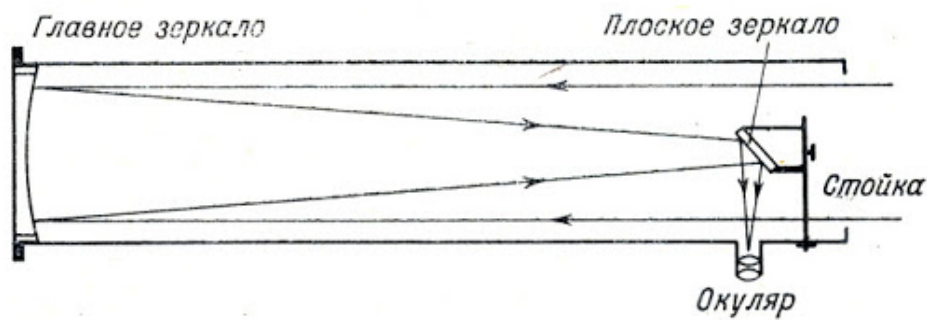


Рис. 2. Схема хода лучей в рефлекторе

Линза массивный объект, поскольку она сплошная, зеркало же работает поверхностью, поэтому оно менее массивное и удобнее. Кроме того, свет ходит туда-сюда, поэтому трубу можно делать короче. Короче сплошные плюсы.

1.2. Радио-диапазон

Радиотелескопы работают антенной, который бывают тарелками (как рефлекторы, т.е. огромная антенна фокусирует излучение на чувствительном приемнике, который далее преобразует его в удобную форму), и рогулками (такие например в Пуцино стоят).

Для телескопов нам важны две характеристики: разрешающая способность и чувствительность. Для чувствительности нам нужна площадь антенны (есть прямая пропорциональность), а для разрешения — максимальный размер антенны. Отсюда сразу понятно, что обычные параболические антенны дадут при фиксированной площади худшее разрешение. Поэтому мы можем сделать дырку в апертуре (но чтобы дырка была больше длины волны), при этом не потеряв в разрешении (а мы часто за ним и гоняемся).

По такому принципу, например, существует телескоп РАТАН-600 (см. рисунок 3).



Рис. 3. РАТАН-600

Кроме того, мы можем взять не один огромный телескоп, а два (или больше) маленьких (это будет называться интерферометрами), но разнести их на большое расстояние друг от друга (например, так работал телескоп горизонта событий, на который получили недавние данные о

черной дыре в M87). Работает из-за того что радиотелескопы работают на большой длине волны (низкой частоте). Мы обрабатываем данные вместе, и получается что у нас огромная база, дающая большое угловое разрешение (но на собирающей способности это выигрыша конечно не дает).

1.3. Гамма-диапазон

Проблема тут в том, что на Земле гамму не померить (не пропускает атмосфера). Но выход есть, можно регистрировать эффект, называемый **излучением Черенкова**, когда влетая в атмосферу Земли, гамма квант очень высокой энергии приводит к появлению вспышки в оптическом диапазоне. Нам нужны большие оптические телескопы для этого. Собрав фотоны мы получаем энергию кванта и направление, откуда он прилетел (с так себе точностью на самом деле).

1.4. Космические лучи

Космические лучи есть потоки частиц (электронов, протонов и более тяжелых ядер, а также их античастиц), распространяющихся в космическом пространстве.

Первичные (космические) заряженные частицы практически не достигают поверхности Земли, поэтому работают лишь косвенные методы наземной регистрации вторичных частиц и излучения. Методы регистрации космических лучей во многом родственны применяемым для исследования гамма-лучей.

При попадании высокоэнергичного протона (или более тяжелого ядра) возникает каскад частиц, который называют **широким атмосферным ливнем**. Влетая в атмосферу, протон сталкивается с молекулами газов, в результате их взаимодействия в первую очередь рождаются нейтральные пионы — так называемые пи-мезоны (также рождаются К-мезоны — каоны, которые быстро распадаются на пионы). Они распадаются, давая рождение фотонам высоких энергий, которые, в свою очередь, рождают электрон-позитронные пары. Электроны и позитроны, взаимодействуя с заряженными частицами, испускают фотоны высоких энергий, кроме того, идет процесс ионизации атомов, что поставляет дополнительные электроны. В результате всех этих процессов возникает так называемый электромагнитный каскад, его фотонную составляющую можно наблюдать с помощью наземных детекторов. Детекторами излучения могут быть как фокусирующие зеркала, так и просто фотоумножители.

В результате столкновения частиц высокой энергии с атмосферными частицами также рождаются заряженные пионы, которые в основном распадаются на мюоны и нейтрино, достигающие поверхности Земли. Детектирование вторичных мюонов с помощью водных черенковских детекторов часто используется для исследования космических лучей.

1.5. Гравитационные волны

Гравитационные волны — это распространяющиеся колебания гравитационного поля. Поскольку общая теория относительности — это геометрическая теория гравитации, то часто говорят, что гравитационные волны — это волны пространства-времени.

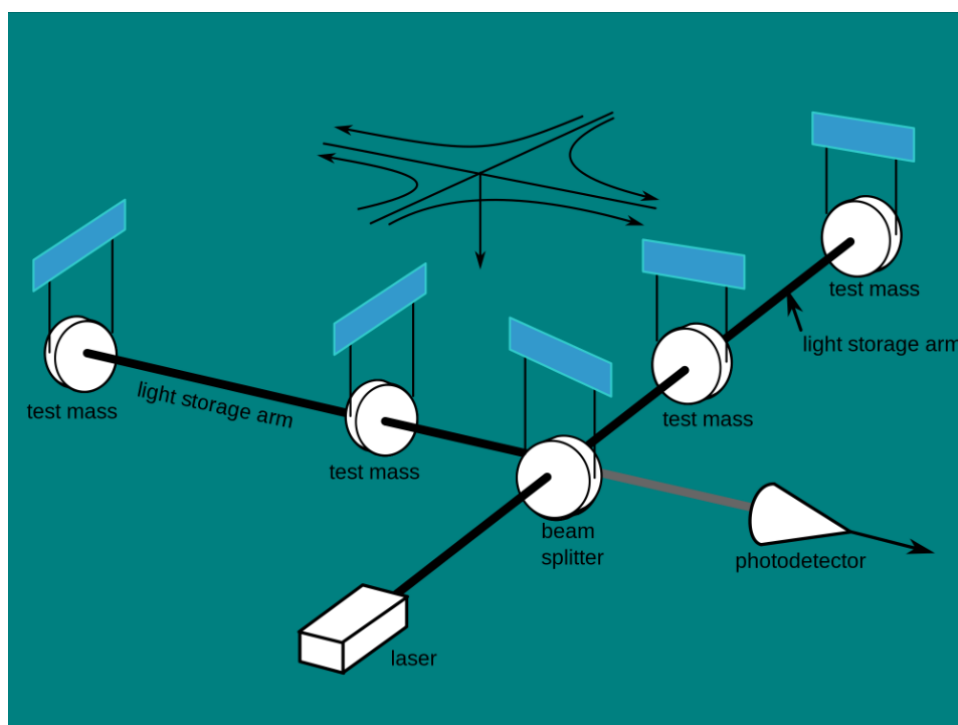


Рис. 4. Пример детектора гравитационных волн (как интерферометр Майкельсона)

Для регистрации гравитационных волн используются лазерные интерферометры, подобные интерферометру Майкельсона (см. рисунок 4). Принцип метода состоит в том, что гравитационная волна вызывает в установке прилив, при этом одно плечо интерферометра будет растягиваться, а другое — сжиматься (меняются расстояния между свободно подвешенными зеркалами, между которыми «бегает» лазерный луч). Этот эффект приведет к изменению интерференционного сигнала на детекторе, и его можно зарегистрировать.

Длина гравитационных волн, как правило, является довольно большой (она порядка размера того, что её излучает; в случае слияния чёрных дыр речь идёт о величинах порядка 100 км и больше). Поэтому для их детектирования в конструкцию интерферометра добавляют дополнительные зеркала (прозрачные на 0.1%), которые как бы «запирают» свет внутри плеч, чтобы он успел «почувствовать» их влияние.

1.6. Детекторы нейтрино

Нейтрино — фундаментальные элементарные частицы, участвующие в слабом взаимодействии. Они очень плохо взаимодействуют с веществом, потому что не имеют электрического заряда, а также не участвуют в сильном ядерном взаимодействии.

Рассмотрим два типа детекторов нейтрино. Принцип действия первого детектора основан на том, что нейтрино, попав в ядро какого-либо атома, превращает это ядро в изотоп другого элемента, причём довольно атипичный. Пример: превращение хлора-37 в аргон-37 в результате бета-распада. Таким образом, для эксперимента берется большой объем хлорсодержащего вещества, а спустя некоторое время из него извлекается аргон-37, количество которого соответствует прошедшим в объеме детектора взаимодействиям нейтрино с хлором. Проблема такого способа регистрации нейтрино в том, что полностью теряется какая-либо информация об их направлении. К счастью, для нейтрино относительно низких энергий поблизости находится один-единственный источник — Солнце.

Данный недостаток компенсируется водными детекторами. В них рабочим телом является вода, заполняющая огромную цистерну. Рассеиваясь на электронах, нейтрино передает им энергию, а электроны, двигаясь быстрее скорости света в воде, испускают черенковское излучение, которое регистрируется фотоумножителями, покрывающими стенки цистерны. Такие детекторы могут установить и направление прихода нейтрино (надо смотреть на частицы, которые идут снизу вверх, т.к. только нейтрино может пройти Землю насквозь), что дает возможность точно определить, что их источник — Солнце или, например, вспышка сверхновой в нашей Галактике.

2.

3.

4.

5.

6. Устойчивость Солнца и звезд. Термоядерные реакции.

6.1. Устойчивость Солнца и звезд

Солнце, как и в целом большая часть звезд, устойчивые объекты по следующей причине. В нем действуют две основные силы, это гравитация, которая стремится его сжать, и силы давления, которые этому противодействуют. Сила давления существует, потому что Солнце, в первую очередь, внутри горячее, идет процесс выделения энергии, и поэтому давление - это просто давление газа плюс давление излучения. Соответственно силы давления уравнивают гравитацию и возникает красивый эффект саморегуляции.

Если под каким-то внешним воздействием Солнце поджалось, значит в центре возросла температура, поскольку вы сжимаете газовый шар, он нагревается. Возросла температура, возросла плотность, пошли термоядерные реакции. Но это хороший реактор, выделяется больше энергии, увеличивается давление и звезда начинает расширяться, она сама регулируется, вырастают силы давления, звезда расширяется, остывает, при этом падает плотность и снова устанавливается равновесие.

Благодаря этому механизму Солнце, как и остальные звезды, очень стабильный объект, находящийся в гидростатическом равновесии, которое очень трудно нарушить.

6.2. Термоядерные реакции

Будем говорить о звездах главной последовательности. Для них в принципе существует два основных цикла, по которым идут термоядерные реакции, это **протон-протонный цикл**, в ходе которого водород превращается в гелий (доминирует в случае звезд, находящихся на главной последовательности и имеющих массу меньше или порядка Солнечной), и **CNO-цикл** (или его простой брат **CNO-I-цикл**), в котором превращение водорода в гелий происходит под воздействием катализаторов: углерода C и азота N.

6.2.1. Протон-протонный цикл

Рассмотрим на примере ppI цепочки, которая самая частая. Все возможные цепочки приведены на рисунке 5.

Цикл состоит из трех стадий. Сперва два протона сливаются и образуют дейтрон, позитрон и электронное нейтрино. После этого дейтрон сливается с протоном и образует ядро ^3He . Наконец, сливаются два ядра гелия-3 и появляется ядро атома гелия-4 с высвобождением двух протонов. Итого:



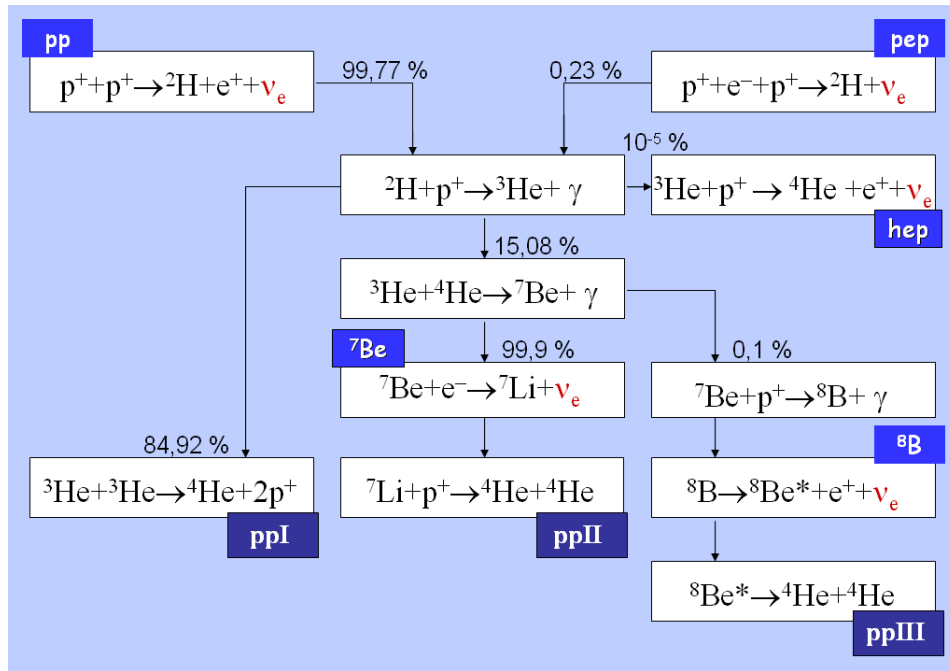


Рис. 5. Три цепочки протон-протонного цикла, а также различные ветви

6.2.2. CNO-I-цикл

Цикл сложный, поэтому рассмотрим на примере CNO-I. Стадии такие:



Картинка 6 для иллюстрации.

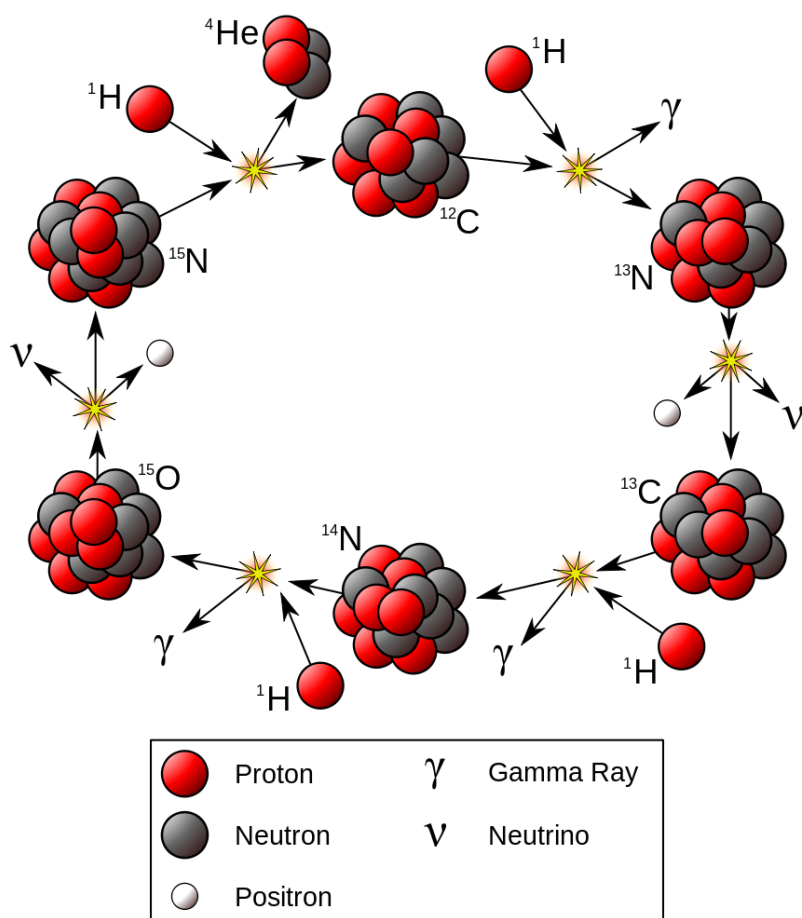


Рис. 6. Цикл CNO-I

Есть прямо вот СВЕЖИЕ данные о том, что Солнце действительно работает по CNO: **First Direct Experimental Evidence of CNO neutrinos** (от 26 июня 2020).

7.

8.

9.

10.

11.

12.

13.

14.

15.

16.

17.

18.

19.