

## Лекция 13б.

- На пути исследования вещества Вселенной. От первых открытий в Солнечной системе до выявления состава и строения звезд и решения проблемы источников звездной энергии.
- История формирования астрофизической картины мира и начало космического обобщения всего земного естествознания.



## *Эволюция терминологии на подступах к изучению физики космоса в новое время.*

По мере развития физики и выхода ее за рамки механики вставали совершенно новые проблемы и перед астрономией, изменялось ее содержание и смысл самих терминов.

Со времен Кеплера, благодаря его "Новой астрономии... или физике неба" (1609г.), в астрономию вошли проблемы физической природы и причин астрономических явлений, а с ними и термин "физическая астрономия". Однако, несмотря на широкий смысл его у Кеплера (впервые попытавшегося объяснить фундаментальные законы неба немеханической причиной - магнетизмом), смысл "физической астрономии" и "физики неба" уже вскоре свелся к "небесной механике", точнее, к гравитационной динамике неба. Под знаменем ее

- Не принятые сигналы из Комоса...
- Впервые реальную информацию о составе и строении других (внеземных) космических тел принесли метеориты, по которым химики и минералоги даже судили одно время о составе Луны (поскольку в первой четверти XIX в. укрепилось и, по крайней мере, до середины 30-х гг. удерживалось представление о них как о лунных вулканических бомбах).
- Но все исследованные метеориты имели тот же химический (элементный) состав, что и земные камни и железо. И хотя они по косвенным признакам и были уже в первой половине XIX в. признаны космическими объектами, но надолго стали предметом изучения не для астрономов (из-за трудности определения их орбит, то есть их космического адреса), а главным образом для химиков и минералогов, которым были далеки проблемы астрономии, за редким исключением. Таким исключением был знаменитый химик Й. Берцелиус.
- Он не только открыл в метеоритах первые космические минералы (троилит – много позднее открытый и на Земле, тэнит, шрейберзит). Одним из первых (если не первым) он сделал обоснованный вывод о вещественном (на уровне химических элементов) единстве наблюдаемой Вселенной, вещество в которой, однако, находится в иных, чем на Земле условиях, что и позволяет отличить метеориты от земных пород и по их химико-минералогическим свойствам, например, по сложным комплексам – минералам.

- Лишь в XX в. были найдены новые (на атомном уровне) тонкие химические отличия метеоритного вещества и появилась новая наука – космохимия – об изотопном составе метеоритов, позволяющая, прежде всего, исследовать внеземную предысторию того или иного метеорита.
- На этом же пути было сделано в дальнейшем и одно из фундаментальных открытий XX века, хотя оцененное далеко не всеми специалистами, как астрономами, так и химиками – в значительное мере из-за крайней дифференциации естествознания в XIX - XX вв. - Речь идет о недостаточном еще понимании глубокой генетической связи метеоритного (то есть астероидного), кометного, пылевого межзвездного вещества со звездами, с наиболее бурным этапом их эволюции – катастрофическими взрывами их как Сверхновых, в результате которых в окружающее пространство поставляется набор тяжелых элементов необходимый для образования планет и пр. и, в конечном счете, для возникновения самой Жизни.

- Эта связь впервые обнаружилась в открытии в метеоритном веществе характерных устойчивых тройных комплексов элементов (Fe – Ni – Co) . Только в наши дни стало ясным (в результате изучения изменения спектра взрыва SN 1987г. в созвездии Золотой Рыбы), что в ходе взрывного процесса в недрах Сверхновой звезды идут ядерные преобразования химических элементов в следующей очередности: **часть Ni переходит в Co и затем в Fe**, которым особенно насыщены и метеориты, и, по меньшей мере, планеты земной группы Солнечной системы. О существовании в космосе подобных тройственных комплексов (хотя и другого состава еще) догадывался уже известный прибалтийский физико-химик Т. Гротгус (1822г.), а более основательно проблему и состав таких комплексов рассмотрел в 1919 г. известный минералог П.Н. Чирвинский , исследователь редкого типа

## *Первый «астрофизический» сигнал из Космоса, принятый астрономами.*

- *Таким сигналом стало открытие периодичности процессов на Солнце (солнечной активности)* (с периодом около 10 лет - Г. Швабе, 1843 г.; более точный период в 11 лет нашел Р. Вольф в 1852 г.) В 1851 - 1852 гг. была открыта связь геомагнитных возмущений с изменением числа солнечных пятен (И. Ламонт, Р. Вольф, Э. Сэбин и А. Готье).
- Напомним, что первым среди астрономов зависимость земных процессов от числа солнечных пятен отметил еще В. Гершель, обнаружив ее по... изменениям цен на пшеницу. Его записка об этом от 31 мая 1804 г., была опубликована И.Э.Боде в его ежегоднике "Jahrbuch" за 1808 г. (стр. 226).



## *Создание физического и химического фундамента современной астрофизики.*

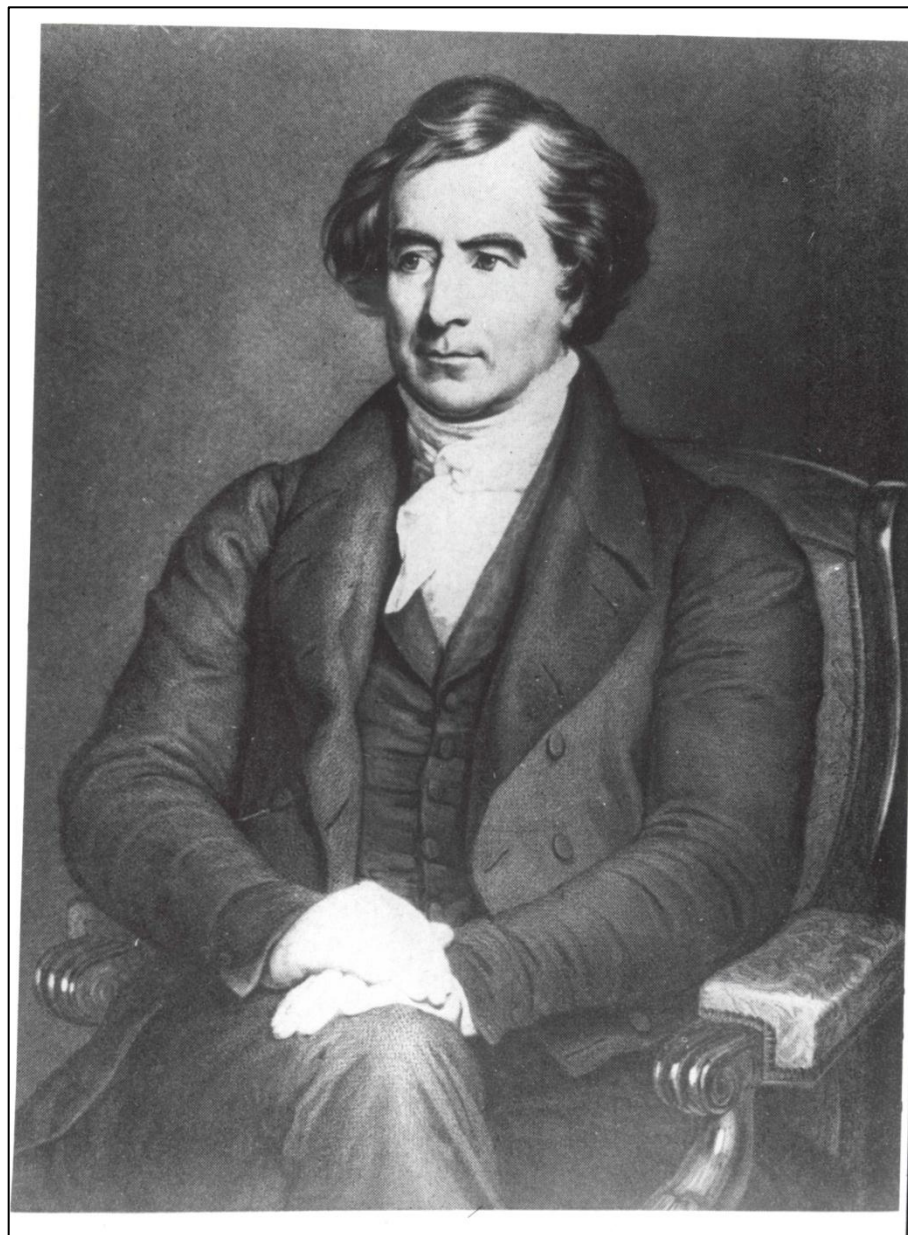
- **Этим фундаментом стали** успехи физической оптики (**развитие астрофотометрии; спектроскопии**; открытие поперечности колебаний в волновой теории света и поляризации света); **успехи термодинамики** (экспериментальное утверждение закона сохранения и превращения энергии).
- Полная (как казалось) победа теории волновой природы света, предложенной еще Гюйгенсом, но признанной лишь в первой четверти XIX в., после **открытия интерференции и поляризации света, неожиданно позволила сделать реальный шаг к непосредственному изучению физической природы небесных тел, прежде всего Солнца, а именно к пониманию агрегатного состояния его светящейся поверхности - фотосферы.**

*Начало инструментальной астрофизики. Первый астрофизический прибор – полярископ Араго (1811 г.). Наблюдательное установление агрегатного состояния вещества солнечной фотосферы и тождественности природы Солнца и звезд.*

- Первым астрофизическим прибором стал не спектроскоп (как принято думать), а **полярископ** – изобретение (1811 г.) выдающегося французского физика и астронома Д. Ф. Ж. Араго (1786 – 1853), сделанное на основе открытой им же хроматической поляризации света (в кристаллах с двойным лучепреломлением).



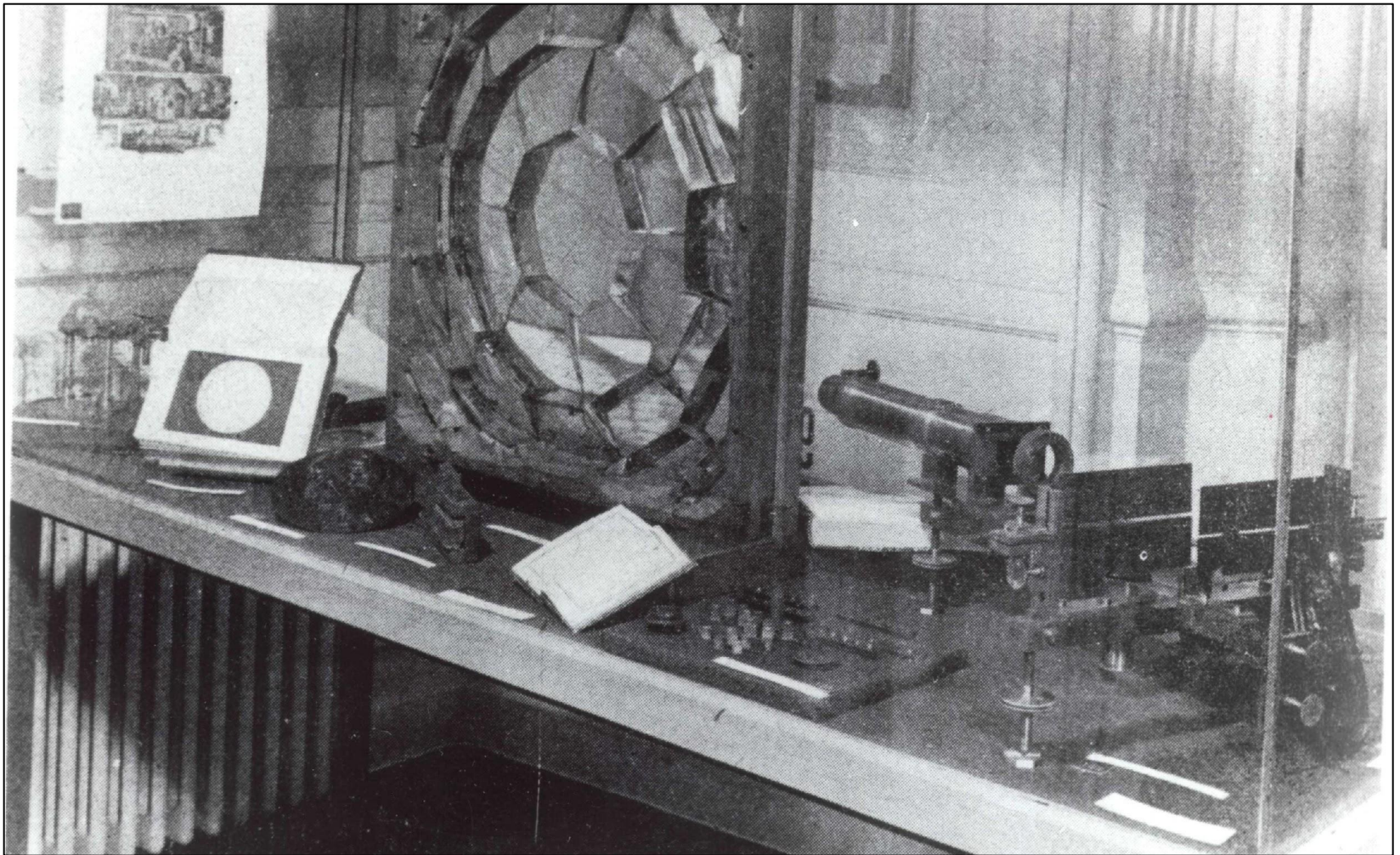
**Доминик Франсуа  
Жан  
Араго (1786 – 1853)**



## Агрегатное состояние солнечной поверхности

- Араго обнаружил, что **солнечная фотосфера** испускает *неполяризованный* свет, а это доказывало (на основании его предыдущих опытов с поляризацией излучения вещества в разных агрегатных состояниях), что фотосфера не твердая раскаленная поверхность, или даже расплав, в котором плавают куски окалины – видимые как черные пятна (как думали до него). Это ни что иное, как ***нагретый самосветящийся газ***. Аналогичными наблюдениями звезд Араго показал их физическое родство с Солнцем.





Витрина в музее Парижской обсерватории: «Оптика XIX века». Справа – полярископ Араго.

- Была поставлена и новая проблема – изучение природы короны, относительно которой еще даже не было уверенности, что она принадлежит Солнцу.
- Под знаком *поляризационных* наблюдений Солнца прошел первый этап развития инструментальной астрофизики в первой половине XIX в.
- Но поляризация оказалась явлением, сложно и неоднозначно связанным с состоянием излучающего вещества, и сама потребовала изучения. Это приглушило в дальнейшем почти на столетие ее использование в приборах, анализирующих излучение небесных тел.
-

## § 6. *Изобретение фотографии и начало развития астрофотографии.*

- Уже на этом первом этапе развития астрофизики решающую роль сыграло начавшееся применение в астрономии незадолго до того изобретенной (1839 г.) фотографии с ее тремя замечательными свойствами по отношению к получаемой информации: *моментальность, интегральность, документальность.*
- Ее изобретение связано с именами: французов - Ж.Н. Ньепса (1765 - 1833) и Л.М.Ж. Дагера (1787 - 1851) и англичанина Г.Ф. Талбота (1800 - 1877. Последнему принадлежит изобретение современного двухступенчатого фотографического процесса.
- Но еще в 1819 г. Джон Гершель открыл закрепляющее действие некоторых растворов и уже в 1839 г. стал получать снимки своим способом. Он же ввел термины - *фотография, негатив и позитив.* (См. О.Д. Докучаева. *Астрономическая фотография. Материалы и методы.* М., 1994, Ч.1) ]
- 
-

- Первые фотографии в астрономии (Луны) были сделаны (через маленькую линзу) самим Дагером, а также любителем астрономии Д. Дрэпером (с 13-см телескопом) в 1839 и 1840 гг., соответственно.
- В 1842 г. сделана первая попытка получить дагерротип Солнца, но лишь в 1845 г. получен его удачный снимок (эксп. 1/60 с).
- В 1844 г. Была получена первая фотография лунного затмения (профессором физики Казанского университета Э.А. Кнорром).
- В 1850 г. американцы В. Бонд и Ф. Уиппл получили первый качественный снимок Луны (с 37-см телескопом) и тогда же сняли впервые звезду (Вега).
- В 1851 г. во время солнечного затмения впервые была успешно сфотографирована корона и протуберанцы немецким фотографом Берковским в Кенигсберге. Это положило конец спорам об их принадлежности Солнцу (правда еще допускалось объяснение короны как эффекта в земной атмосфере. Лишь в 1860 г. новое фотографирование Солнца во время очередного затмения несколькими астрономами окончательно доказало принадлежность Солнцу и короны, и протуберанцев).



- В середине века вошли в фотографию более дешевые и чувствительные мокрый, а затем сухой коллоидный способы. Впервые их использовал в астрономии любитель англичанин В. Деларю в 1852 г. Он же построил первый фотогелиограф. С этих пор, т.е. **с середины XIX в. применение фотографии в астрономии стало систематическим.**
- Для изучения солнечной активности за период до 1872 . Деларю получил около 3 тыс. снимков. П. Жансен в 1874 г. по негативам Солнца открыл грануляцию, а пулковский астроном А.П. Ганский (1870-1908) , с 1905 сотрудник Пулковской обс. , впервые показал неустойчивость отдельных гранул, через 2-5 мин распадающихся и заменяющихся новыми. Он же обнаружил зависимость формы короны от состояния солнечной активности (от числа солнечных пятен).
- В 1858 г. была получена первая фотография кометы (кометы Донати, профессионалом фотографом Ушервудом). В 1892 г. впервые комета была открыта по фотографии (Э. Барнардом, США). В 1863 г. первые спектрограммы звезд Сириуса и Капеллы снял Хеггинс. Фотография быстро входила в астрономическую практику.

## *Предыстория и начало развития астроспектроскопии.*

- Основанием для новых астрофизических открытий стало развитие точной инструментальной оптики, начатое Й. Фраунгофером (1787 - 1826) и на десятки лет вновь выдвинувшее на первый план в астрономии линзовые телескопы - рефракторы (благодаря разработке им научной методики варки оптического стекла с заданными свойствами).
- В первой четверти XIX в. были заложены основы спектроскопии: У. Волластон изобрел щелевой спектроскоп (1802 г.) , впервые получив, со щелью в 1 мм , несколько темных линий поглощения в спектре Солнца . В 1815 г. Фраунгофер , применив щель в 0,5 мм и сильный окуляр, получил первые 576 темных линий, названных *фраунгоферовыми*). Он же первым обнаружил совпадение лабораторной двойной линии в излучении паров Na с положением такой же темной линии в спектре Солнца.
- Но сам автор открытия, погруженный целиком в расчеты свойств оптического стекла, увидел поначалу в этих темных линиях (как и Волластон) лишь границы между различными частями спектра, характеризующие дисперсионные свойства линз из стекла данного типа.



**Йозеф фон Фраунгофер**  
**1787 - 1826**

В 1815 г.  
Фраунгофер  
получил первые 576  
темных линий,  
названных  
*фраунгоферовыми*)



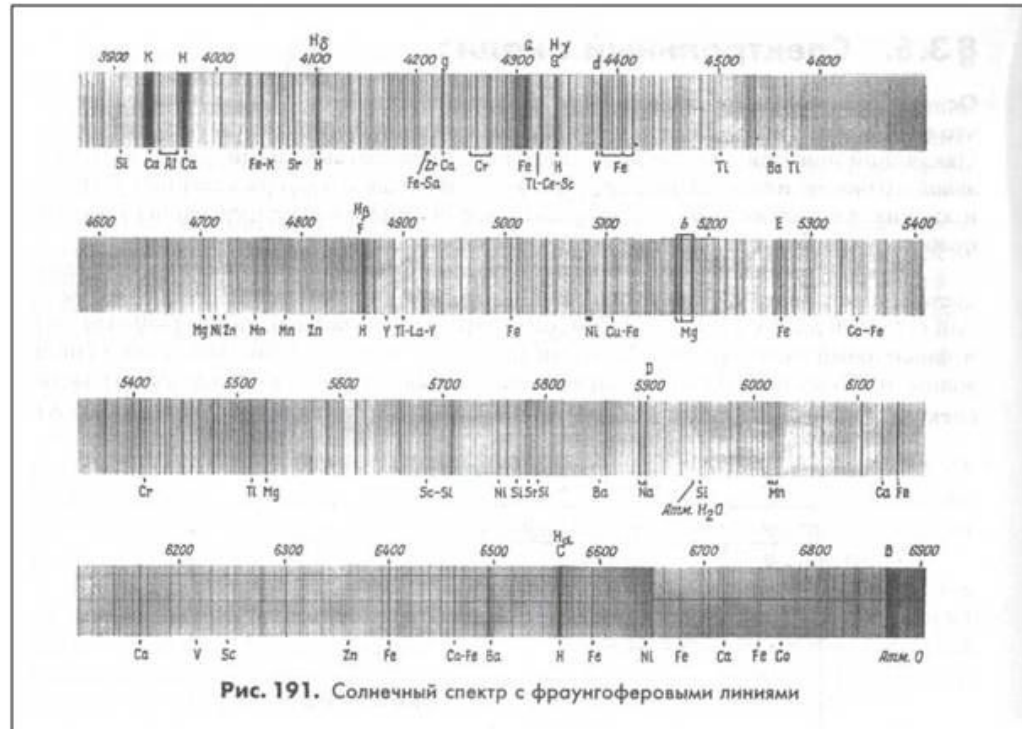


Рис. 191. Солнечный спектр с фраунгоферовыми линиями

фраунгоферовыми линиями в солнечном спектре

- Фундаментальное значение этого открытия для исследования физических свойств звезд и, более того, для выявления изменения этих свойств, то есть для исследования развития, эволюции звезд первым в том же году понял и высоко оценил немецкий физик Э. Хладни, призывавший (в своей статье в «Физических анналах» Гильберта) автора открытия обратить на это внимание.
- Наиболее ранним результатом в зарождавшейся астроспектроскопии стало открытие эффекта Доплера, позволившего по смещению линий в спектре определять направление и скорость движения излучающего тела по лучу зрения (лучевую скорость). Идею метода впервые предложил в 1842 г. австрийский физик Х. Доплер (1803 – 1853), а затем уточнил французский физик И. Физо (сначала для звуковых, затем и для световых волн). Уже в 1868 г. англичанин В. Хёггинс успешно применил принцип Доплера и определил по нему лучевые скорости нескольких звезд.
- Но только в 1900г. А.А. Белопольский в Пулковке с помощью остроумной лабораторной установки из системы вращающихся зеркал окончательно снял еще имевшиеся у некоторых сомнения в применимости принципа Доплера к свету.

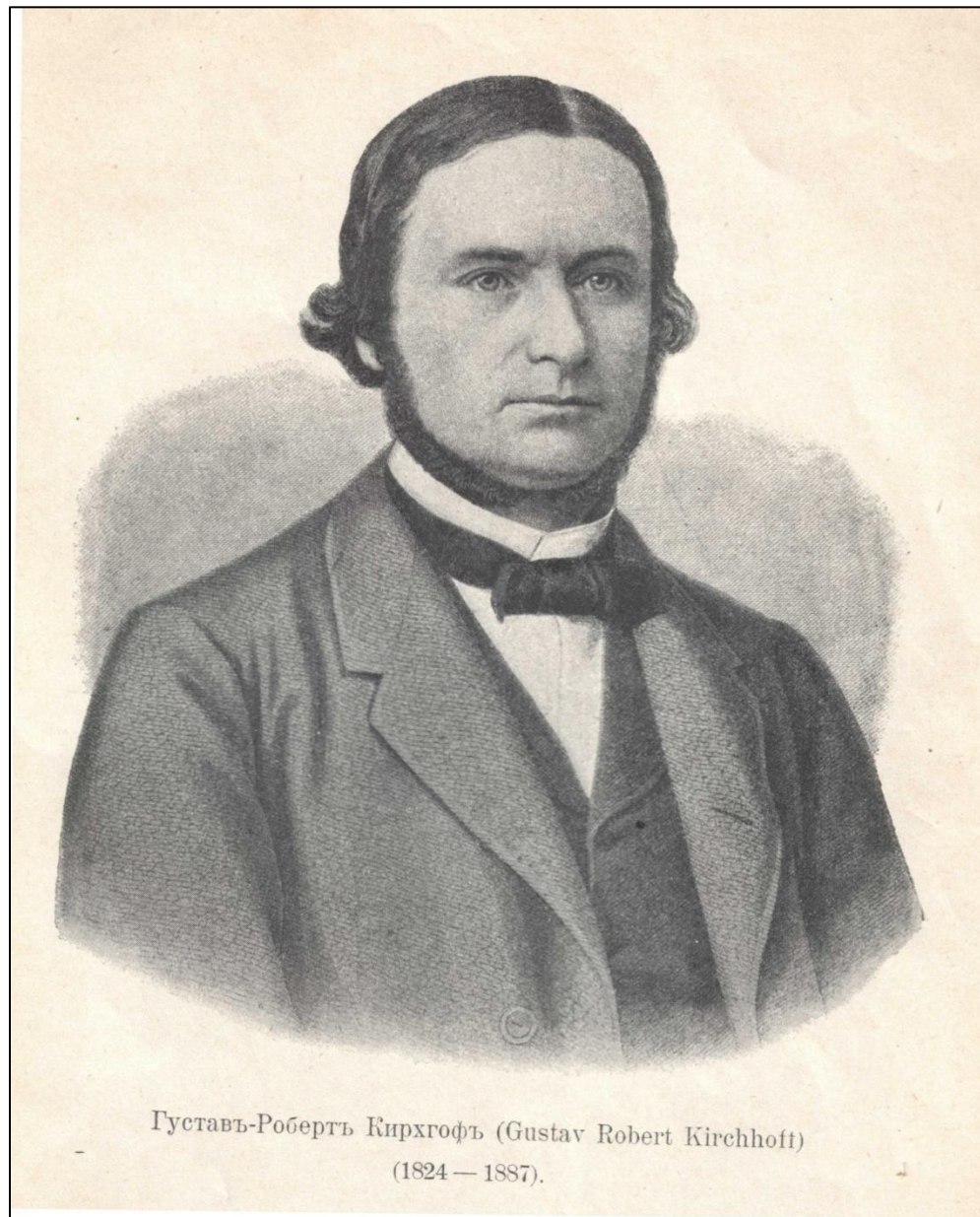
§8. *Изобретение спектрального анализа.*

- Спектральный анализ был введен в 1859 - 1862 гг. немецкими учеными - физиком Г. Кирхгофом (1824 - 1887) и химиком Р. Бунзеном (1811 - 1899).
- В результате уже в начале 60-х гг. был получен ответ на вопрос, еще недавно считавшийся неразрешимым, - о химическом составе звезд.

## *§ 8. Решение методом спектрального анализа первых астрофизических проблем астрономии.*

- Такими проблемами стали изучение агрегатного состояния, температуры и химического состава Солнца и звезд
- **1. Исследования физики Солнца.** Кирхгоф первым высказал обоснованное предположение, что и само тело Солнца, под внешней газовой оболочкой – не твердое холодное, а еще более горячая жидкая масса, излучающая непрерывный спектр (и создающая картину ослепительной поверхности - фотосферы). Поэтому менее горячая газовая атмосфера, поглощая это излучение в линиях, соответствующих химическому составу атмосферы (закон Кирхгофа), создает картину фраунгоферовых линий, иначе - перепись своего химического состава. **Первые исследования Кирхгофа (1861г.) принесли расшифровку около десятка таких линий.** Французский астроном П. Жансен (1824 - 1907) в 1866 г. провел обширные лабораторные исследования спектров различных веществ и отождествил многие линии; **в 1869г. Локьер открыл первый элемент неизвестный на Земле, назвав его Гелий (He).** В 1895 г. шведский химик Клеве обнаружил He и на Земле, в редком минерале (названном "клевеит "). Локьер довел число

**Густав –Роберт  
Кирхгоф  
(1824 - 1887)**



## Открытие слоистости солнечной атмосферы и внеатмосферные наблюдения ее верхних деталей.

- Жансен и Локьер в 1868 г. открыли способ внеатмосферного наблюдения монохроматических деталей – протуберанцев и хромосферы Солнца (с помощью спектроскопа большой разрешающей силы, который, далеко разводя лучи разной длины волны, сильно ослаблял фон, обеспечивая лучшую видимость монохроматических деталей – обычно в красной линии  $H_{\alpha}$  водорода).
- В 1870 г. Ч. Юнг (США) впервые наблюдал (во время затмения) эмиссионный спектр Солнца, то есть линии, "обращенные" из темных в яркие, и т.о. открыл новую область его верхней атмосферы - *обращающий слой*). Локьер назвал его хромосферой ( в нем проявляются монохроматически излучающие в красной линии  $H_{\alpha}$
- детали поверхности Солнца – протуберанцы) и сделал вывод о его более высокой температуре.



## Начало спектральной астрофизики в России.

- В России первая астрофизическая школа, Московская, была создана Ф.А.Бредихиным (1831-1904) на Обсерватории Московского университета (основанной в 1831 г.), директором которой он был с 1873 по 1890гг.
- в Пулкове при сыне В.Я. Струве О.В. Струве начались первые астрофизические исследования, с 1881г. систематические (швед Б.А. Гассельберг).
- В 1885г. в Пулкове установлен, тогда один из самых больших в мире, 30-дюймовый (76 см) рефрактор и в 1889г. построено специальное здание для астрофизической лаборатории. К этому времени сюда из Москвы перешел работать (1888 г.) первый русский астрофизик, ученик Бредихина Аристарх Аполлонович Белопольский (1854-1934) .
- Он возглавил специальный новый астрофизический отдел
- В Пулкове



- Белопольский начал с применения спектральных методов, прежде всего принципа Доплера, для определения лучевых скоростей звезд и различных деталей на поверхности Солнца и планет: уточнил его осевое вращение (по движению факелов), выявил (по лучевым скоростям) неравномерность вращения его атмосферы – различие его скорости на разных солнечных широтах (т.е. открыл т.н. дифференциальное вращение Солнца) .
- А.П. Ганский (1870 -1908)открыл зависимость формы короны от состояния солнечной активности и первым исследовал явление грануляции, открытой за 32г. до него П. Жансеном
- Астрофизические исследования Солнца в XIX в. завершились первой убедительной экспериментальной оценкой в 1895 г. (при огромном разбросе прежних результатов других исследователей) **нижней границы температуры солнечной фотосферы – 3500 °С**. Эти измерения были проведены на Московской университетской обсерватории ее новым директором **В.К. Цераским (1849-1925)** в опыте с расплавлением солнечными лучами всевозможных тугоплавких веществ в фокусе вогнутого метрового металлического зеркала (приобретенного незадолго до того во Франции во время всемирной промышленной выставки московским Политехническим музеем, где оно и хранится до сих пор).



Эксперимент В.К.Цераского по определению температуры поверхности Солнца путем расплавления в фокусе метрового зеркала тугоплавких веществ. Оценил нижнюю границу температуры в 3500 град. по Цельсию. 1895г. Обсерватория ИМУ на Пресне.

## 2. Начало спектральной классификации и массовых измерений лучевых скоростей звезд.

- В начале 60-х гг. В. Хёггинс (1824 - 1910), сравнив лабораторные спектры различных веществ со спектрами звезд и Солнца, окончательно доказал единство их природы.
- Один из основоположников астроспектроскопии А. Секки (1818 - 1878), изучил уже к 1868 г. спектры около 4 тысяч звезд. С именами А. Секки (1863 г.), Г.В. Фогеля (1874 г.) и Н. Локьера (1887 г.) связано создание первых классификаций звездных спектров.
- Белопольский сосредоточился на определении лучевых скоростей звезд (измерил несколько сотен их).

# Открытие нового типа переменных - цефеид

- Но самым значительным результатом А.А.Белопольского стало открытие в 1894 г. периодической изменяемости лучевой скорости у переменной звезды  $\delta$  Цефея и удивительной согласованности с этим изменения ее блеска. Сам Белопольский принял это за эффект в системе затменно-двойной звезды. Иное и правильное объяснение было дано физиками-теоретиками (среди них независимо Н.А. Умовым на защите Белопольским докторской диссертации в Московском университете в 1896 г.) - пульсацией одиночной звезды – ( как выяснилось затем - с достижением максимума блеска при минимуме размеров звезды и максимуме ее температуры) . Так был открыт новый тип переменных, которые стали называть "физическими" переменными, а открытый Белопольским класс по первой из них – цефеидами. Возможность для цефеид по величине периода изменения блеска оценивать прямо пропорционально изменяющуюся светимость звезды, а следовательно и расстояние цефеид – звезд огромной светимости – сверхгигантов сделали их в дальнейшем важнейшим орудием исследования строения звездной и внегалактической Вселенной.

## туманностей.

- Их природа все еще оставалась предметом умозрения.
- **В. Хёггинс первым исследовал спектры туманностей.** Он подтвердил разделение их на два принципиально различных класса, но не на звездные по составу и диффузные, а на "пылевые" (отражающие) и газовые; первые имели типичный звездный спектр с линиями поглощения, то есть, как ему казалось, отражали свет звезд; к ним Хёггинс отнес и все вновь открытые Парсонсом (1845г.) спиральные! Вторые – типично газовый, из отдельных немногих (трех) эмиссионных линий. Интерпретация первых оказалась ошибочной (это были далекие галактики).
- Во втором случае Хёггинс был прав, доказав реальность диффузных эмиссионных именно газовых по составу туманностей (и тем подтвердив давние выводы Гершеля).
- **Более того, Хёггинс при этом открыл две новые линии, не известные на Земле, и, казалось, чуждые земным элементам (третья была отождествлена с водородом).** В результате в астрофизику на долгие годы вошел новый "элемент" – "**небулий**". Лишь в 1927 г. американский астрофизик Боуэн установил, что это дважды ионизованный кислород, излучающий в запрещенных линиях, что становится возможным ввиду крайне низкой плотности газа в туманности .



## Начало исследований физико-химических свойств планет и комет.

- В 60-е гг. Жансен первым начал изучать спектры и по ним химический состав атмосфер планет, а Хеггинс и Донати - спектры комет. Хеггинс в частности обнаружил в них углерод и характерные для комет соединения его с азотом (CN) и водородом (CH) .
- Для спектральных наблюдений на 76-см рефракторе Пулкова Белопольский сконструировал спектрограф-приставку к нему и установил дифференциальный характер (различие скорости на разных широтах) вращения Юпитера, а также подтвердил теоретические выводы Максвелла о «метеоритном» строении колец Сатурна (1895 г.). Он же установил связь типа хвоста кометы с его физическим строением и химическим составом.

- В середине XIX в. появился термин для названия новой науки – астрофизика, предложенный немецким астрономом И. Цёлльнером (1834 - 1882). В ней ему принадлежит разработка основ более точной астрофотометрии (1861 - 1864 г.).

# **История представлений об источниках энергии излучения и эволюции звезд.**

*§ 10. Главное направление - проблема звездной  
эволюции и источника энергии звезд.*

*Новые идеи.*



## *§ 1. Попытки решить проблему источника энергии звезд и звездной эволюции на основе физики XIX в.*

- 1. Последняя попытка возродить ударную гипотезу источника Солнечной энергии (Р. Майер, 1848 г.)
- С открытием (точнее, экспериментальным обоснованием) закона сохранения и превращения энергии новой попыткой решения проблемы с учетом этого закона стала гипотеза немецкого врача и физика (одного из первых открывателей закона, 1845г.) Роберта Майера – о разогреве Солнца за счет падений на него внешних тел - метеоритов (в соч. «К вопросу о динамике неба», 1848 г.). По существу она возрождала идеи Ньютона и Канта о подобной роли падения комет, хотя и несколько увеличивала вероятность события (метеориты выпадают чаще).
- **Но существование Солнца оказывалась бы при этом очень коротким и нестабильным.**

## Идея гравитационного (контракционного) источника звездной энергии (Герман Гельмгольц, Вильям Томсон, 1847г.)

- Во второй половине XIX в. окончательно утвердилось представление о звездах, как о колоссальных газовых шарах, плотных и горячих в своих центральных частях и разреженных на периферии. Видимо, не без влияния звездно-космогонической гипотезы В.Гершеля
- Г.Гельмгольц (1821 – 1894) в 1847г. и В.Томсон (1824 – 1907), в 40-е же гг. XIX в. обосновавшие справедливость закона сохранения и превращения энергии, высказали гипотезу излучения газовой звезды за счет ее гравитационного сжатия (контракционная гипотеза, от лат. contractio – сжимать). Они предположили, что энергия сжатия, превращаясь в теплоту, тут же звездой излучается. В целом, как ожидалось, звезда будет постепенно остывать.
- В связи с этим И. Цёлльнер в 1865 г. высказал мысль, что белые, желтые и красные звезды суть различные этапы "жизни" – охлаждения звезды.

- Развитие контракционной гипотезы (Джонатан Гомер Лейн, 1870г.).
- Но в таком случае Солнце должно было быть ... моложе Земли! (Такого источника энергии хватило бы приблизительно на 10 млн. лет, тогда как геологи в конце XIX в. уже обоснованно оценивали возраст Земли в миллиарды лет).
- В 1870 г. американский физик-теоретик Дж. Г. Лейн (1819 – 1880) показал, что излучающий за счет сжатия шар из *идеального* газа, напротив, будет разогреваться! И лишь перестав быть таковым, по достижении достаточной плотности, он начнет остывать.
- Поскольку начальное состояние "протозвезды" или молодой звезды можно было сравнить с идеальным газом и лишь во второй половине своей жизни она мыслилась как более плотная и остывающая при сжатии, то теория Лейна позволяла продлить сроки жизни звезды с таким источником энергии. Это, казалось, решало проблему.

3. На пути к изучению физических процессов в звездах и их эволюции. **Идея Н. Локьера о разложении – температурной «диссоциации» вещества в недрах звезд, 1873 г.**

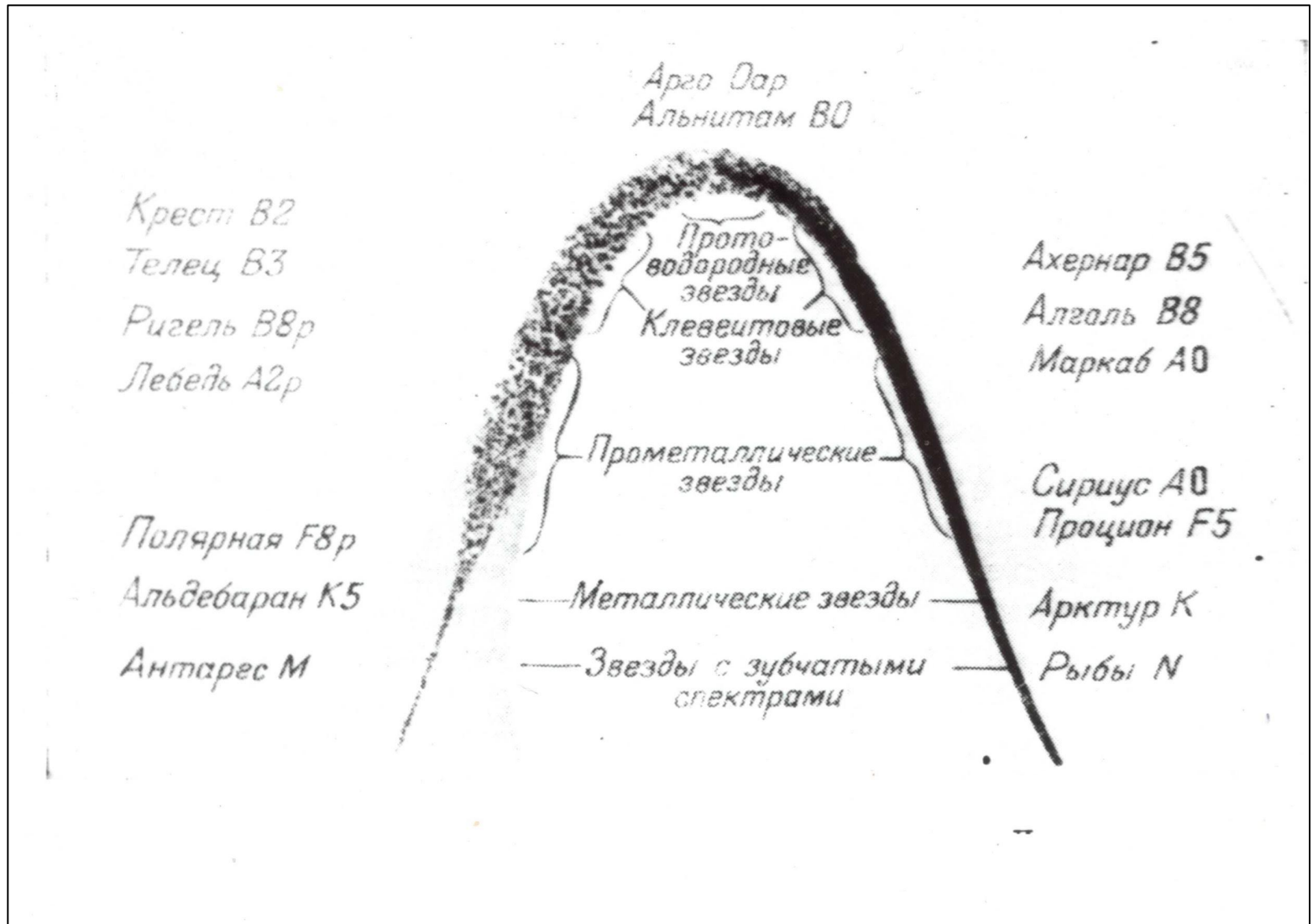
- Норман Локьер обнаружил изменение спектра солнечных пятен в течение 11-летнего цикла солнечной активности и в 1873 г. пришел к своей гениальной идее "небесного разложения элементов" в звездах под действием громадных температур в их недрах.
- Он же сделал вывод, что этот процесс может осуществляться в несколько этапов, и каждый новый этап распада, "упрощения" химического элемента по мере роста температуры должен отразиться в его спектре.
- Хотя сам Локьер называл это "диссоциацией" (других процессов распада вещества физики еще не знали), **его идея предвосхитила, по существу, идею многократной температурной ионизации атомов** в чудовищно раскаленных недрах звезд.

- Эти исследования привели Локьера к фундаментальному обобщению (зародившемуся в глубокой древности): "весьма малое число вполне самостоятельных субстанций сочетается в различных пропорциях и тем дает начало знакомым нам элементам".
- Приведя эти слова, историк астрономии Агнесса Кларк писала в 1902 г., что никакого подтверждения реальности существования таких субстанций нет. – Реальность их была обоснована спустя 9 лет и через 38 лет после высказываний самого Локьера, в модели атома Э. Резерфорда (1911г.).
- Так физика начала сотрудничать с астрофизикой.

## 4. Первая модель эволюционной последовательности звезд как интерпретация изменения их спектра и светимости (Н. Локьер, 1873г.).

- Н. Локьер на основе своей классификации звездных спектров и опираясь на расчеты Лейна, впервые в 1873г. предложил эволюционную гипотезу развития звезд с восходящей и нисходящей ветвями. Звезды проходили у него свой жизненный путь от состояния крайне разреженных разогревающихся шаров из идеального газа – от красных до белых и голубых типа Сириуса в первой, восходящей половине своей жизни, а затем, при достижении достаточного уплотнения (уже не в состоянии идеального газа), по нисходящей, с остыванием – к желтым типа Солнца и, наконец, к состоянию слабых плотных холодных звезд с полосчатым спектром. Таким образом, каждая звезда в своем развитии должна была дважды пройти через каждый спектральный класс, за исключением класса горячих голубых звезд, где обе ветви сходились.

# Эволюционная последовательность звезд , по Локьеру



## Наблюдательное открытие диаграммы спектр – светимость (Э. Герцшпрунг, Г.Н. Рессел, 1905; 1913 гг.)

- **Гипотеза Локьера**, сначала не обратившая на себя внимание астрономов, неожиданно **предстала в совершенно ином свете после наблюдательного открытия** первой **фундаментальной зависимости в мире звезд – диаграммы Герцшпрунга - Рессела**.
- Датский астрофизик- наблюдатель **Эйнар Герцшпрунг** (1873 - 1967) в 1905г., исследуя звезды двух ярких скоплений **Гиады** и **Плеяды** (звезды каждого находятся практически на одном и том же расстоянии от нас), **установил, что звезды в них каждого спектрального класса, кроме голубых, делятся на две резко различающиеся группы по светимостям**. В результате он ввел представление о звездах-"гигантах" и звездах-"карликах".
- Американский астрофизик-теоретик **Генри Норрис Рессел** (1877 - 1957) провел **сравнение** огромного числа **звезд** (с измеренными параллаксами) **по их спектрам** (то есть и цвету) **и светимостям для каждого спектрального класса** и **нашел** весьма четкую **корреляцию** этих параметров, которую выразил графически в виде диаграммы «спектр-светимость».



**Генри Норрис  
Рессел  
(1877 - 1957)**

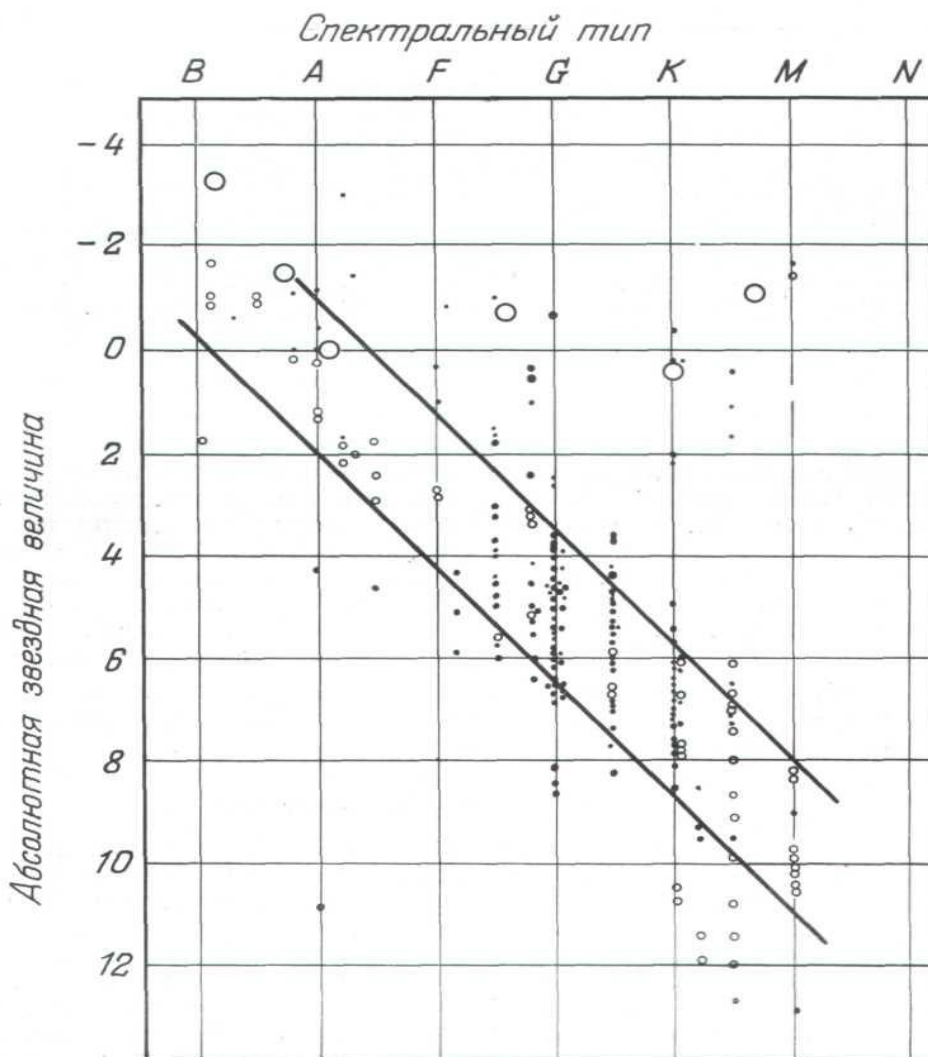


# Структура диаграммы «спектр - светимость»

- На построенной Ресселом диаграмме "спектр (температура, цвет) – светимость (абс.зв.вел.)" практически все звезды выстроились в две широкие полосы. Одна соединила ярчайшие голубые (горячие) звезды с наиболее слабыми красными (холодными), составив "главную последовательность" (термин А. Эддингтона). Другая объединила звезды близкие по их чрезвычайно большим светимостям, но различные по спектру - от красных до голубых и составила таким образом "ветвь гигантов".

**Диаграмма  
зависимости :  
абсолютная зв.вел. -  
спектральный класс  
(по Ресселу).**

Цит. по: Popular. Astron.  
v.XXII, 1914, p. 285.



Р и с. 97. Диаграмма абсолютная звездная величина — спектральный тип, по Г. Ресселу (Popular Astron., XXII, 285, 1914).

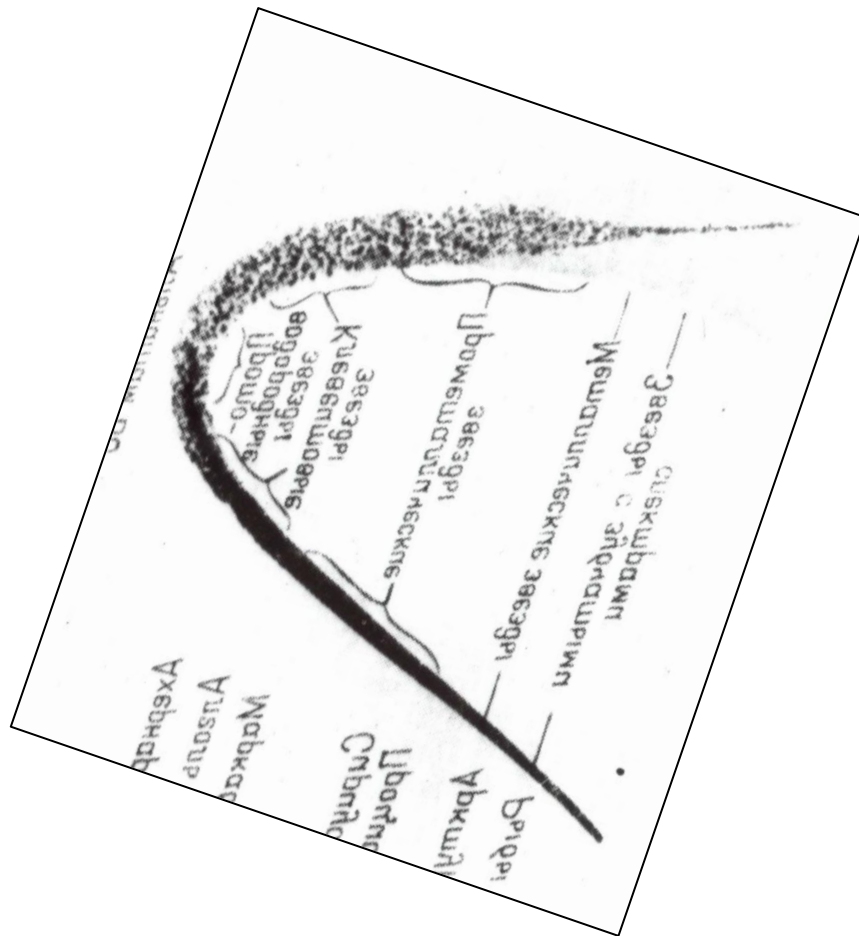
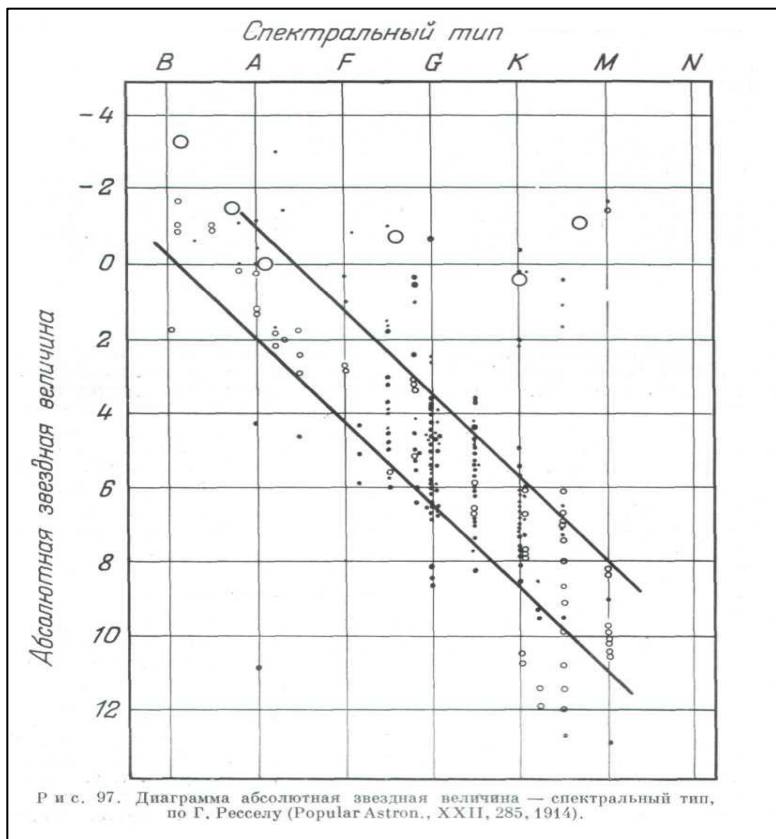


- Диаграмма "спектр - светимость" поразила Рессела замечательным совпадением в ней предсказаний теории Локьера с данными наблюдений.
- Верхняя, горизонтальная ветвь гигантов как бы вела исследователя по первой половине жизненного пути звезды (разогрев).
- Вторая ветвь - "главная последовательность" « (концентрирующая около себя основной массив звездного населения Галактики) - прослеживала, казалось, с предельной очевидностью дальнейший путь развития уже достаточно уплотнившейся звезды, вышедшей из подчинения законам идеального газа и остывающей при продолжающемся сжатии, что и утверждал в своей теории Локьер .

# Сравнение диаграммы Рессела и модели Локьера

## Диаграмма Рессела (1914)

## Путь эволюции звезды , по Локьеру (1873)



- Увы! При всей своей стройности и даже совпадении с наблюдениями (ловушка внешнего сходства!) эта эволюционная теория Рассела, предложенная им в 1913 г., вскоре рухнула под тяжестью новых фактов. Состояние вещества звезд главной последовательности также оказалось близким к идеальному газу!.. То есть и на главной последовательности звезда не могла бы остывать, изменяя свой цвет от голубого к красному. Проблема требовала нового решения.



# Проблема источников энергии, строения и эволюции звезд

на базе новой физической картины мира начала XXв.  
*Возникновение идеи внутриатомного источника энергии.*

- 1.Создание физического фундамента (А.С. Беккерель, П. Кюри, А. Эйнштейн).
- Первое десятилетие XX века стало началом новой эпохи в развитии

астрономии, именно двух ее становившихся главными обширных областей: астрофизики и новой, эволюционной и (впервые!) *наблюдательной* космологии.

Не только накопление наблюдательных сведений с помощью новой техники, но главным образом успехи *фундаментальной физики* сделали возможным качественно новый и вместе с тем строго количественный подход к решению проблемы строения как Вселенной в целом, так и ее главных составляющих (из непосредственно наблюдаемых) , какими до второй половины XX в. считались **звезды**.

- Большую роль в прогрессе астрофизики сыграли успехи термодинамики, теории газов, теории излучения

- Новые горизонты раскрылись перед астрофизикой с рождением в конце XIX в. атомной физики, с открытием таких новых явлений на внутриатомном уровне, как **радиоактивность** (А. Беккерель , 1896 г.).
- Для астрофизики особую роль сыграло последовавшее вскоре открытие Пьером Кюри и его сотрудником А. Лабордом явления ***самопроизвольного выделения*** **тепла радиоактивными элементами (1903 г.)**.

*2. Рождение и первые шаги идеи внутриатомного источника звездной энергии. Джинс, Эддингтон, Перрен, Рассел.*

- Открытие Кюри и Лаборда помогло на первых порах вывести из тупика проблему источников звездной энергии. Это сделал выдающийся английский физик-теоретик **Дж. Х. Джинс**, одним из первых захваченный необъятными перспективами решения физических проблем в Космосе и перешедший целиком в астрофизику. (Приток в астрофизику специалистов-физиков стал характерным для астрофизики XX века.)

**Джеймс Хопвуд Джинс**  
**(1877 - 1946)**



- Джеймс Хопвуд Джинс (1877 - 1946) первым высказал правильную идею *внутриатомной* природы источника энергии звезд.
- Сначала [вскоре после открытия Кюри – Лаборда] он экстраполировал на звездную Вселенную идею излучения за счет *радиоактивного распада* вещества звезды (при этом в излучение должно было переходить около 1/4000 ее массы). Это обеспечивало существование звезды типа Солнца в течение  $10^{11}$  лет.
- Однако подсчеты самого Джинса на основе динамических соображений (по времени релаксации в Галактике, то есть установления в ней равномерного распределения кинетической энергии звезд) указывали на длительность жизни звезд в 100 раз большую ( $10^{13}$  лет).

- В 1904 г. Джинс предположил осуществление в звездах более сильного механизма высвобождения внутриатомной энергии - *аннигиляции*. По его представлениям она могла происходить при встрече электрона и некой положительно заряженной частицы [протон был открыт лишь в 1910-х гг.].
- Это предполагало постепенный *полный переход вещества звезды в излучение* (то есть явно увеличивало время её жизни).
- После установления количественного закона превращения вещества в излучение ( $E=mc^2$ , Эйнштейн, 1906 г.) Джинс подсчитал предельно возможный возраст звезды в этом случае. Возраст Солнца, например, действительно оказывался равным  $10^{13}$  лет!.

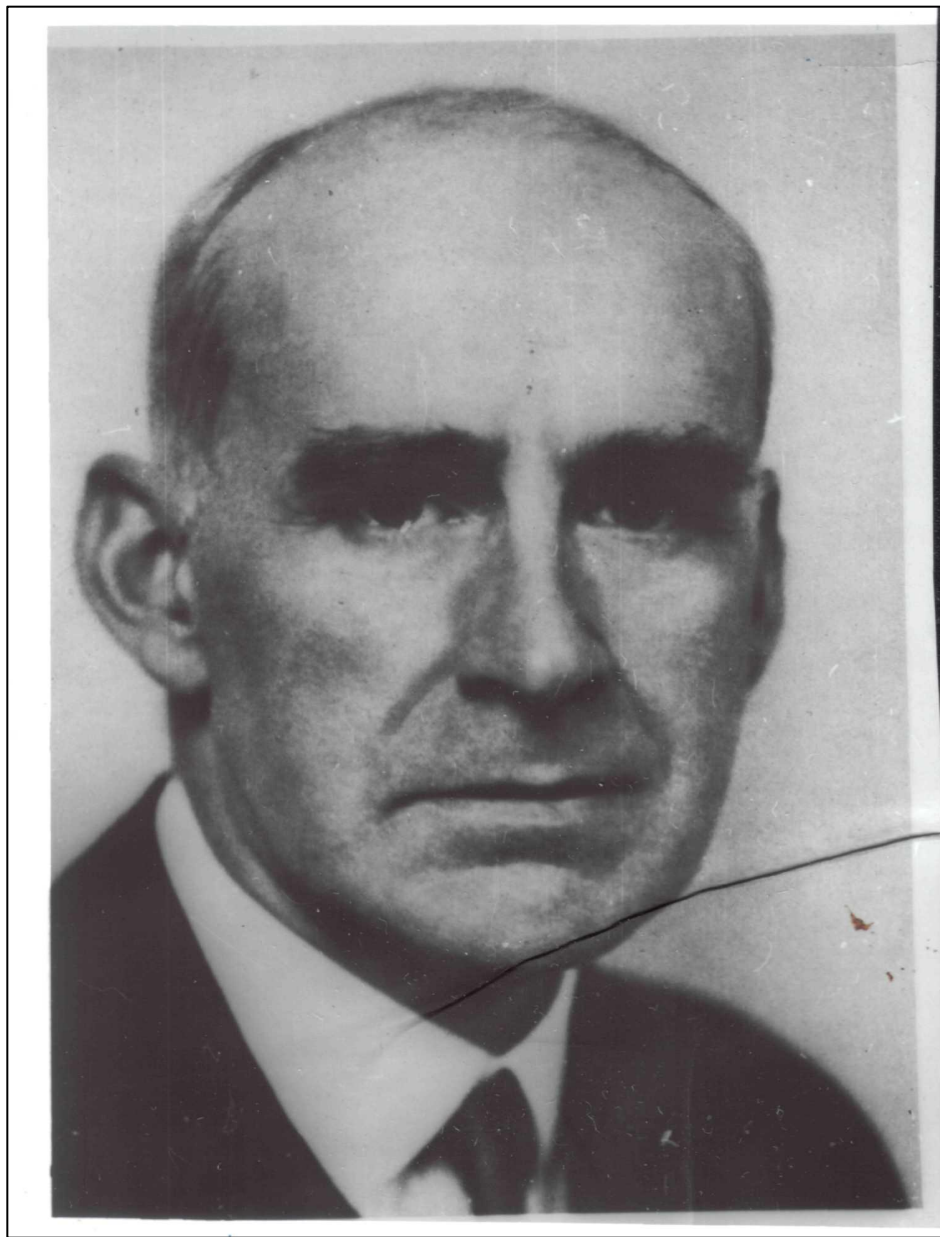
- Предположение о конкретном, аннигиляционном механизме высвобождения звездной энергии в дальнейшем было оставлено.
- Но главная, гениальная идея Джинса - о *внутриатомном* характере ее источника легла в основу всех дальнейших теорий эволюции звезд и в настоящее время стала общепризнанным обоснованным фактом.
- Что касается самого механизма, то уже **в 1920 г. Перрен и Эддингтон предложили** в качестве такового *синтез атомов He из атомов H*, при котором в излучение переходит не все, но достаточно большая доля звездного вещества (**1/130** массы звезды, судя по тому, что атомный вес He именно на такую величину меньше суммарного веса четырех атомов H, при ядерном синтезе которых и получается один атом He).
- Максимальный возраст звезд при этом достигал  $10^{11}$ , что оказалось правильнее оценок Джинса (вошедших в историю астрономии как теория «длинной космологической шкалы» ).
- Вместе с тем этот новый механизм высвобождения внутризвездной энергии вплоть до начала 40-х гг. оставался *гипотезой*. Быть может, поэтому Эддингтон и сам в те годы более реалистичной считал гипотезу Джинса (об аннигиляции).



**Артур Стэнли  
Эддингтон  
(1882 - 1944).**



**Артур Стэнли  
Эддингтон  
(1882 - 1944).**



- В это время созданием теории звездной эволюции занялся и американский астрофизик-теоретик Г.Н. Рассел (правильнее Рассел – Russell H.N.).
- Джинс опирался на свойства **радиоактивности** и в своей "**аннигиляционной**" теории (похоже, еще практически отождествляя их природу) логично утверждал *независимость* звездного источника энергии при аннигиляции ( как и при радиоактивном распаде) *от температуры и вместе с тем полагал, что температура внутри звезд должна достигать миллиардов градусов (!)*. (Вероятно, имея в виду, что для аннигиляции необходима достаточно высокая скорость столкновения аннигилирующих частиц...)

# Рождение идеи критической температуры для включения энергоисточника звезды

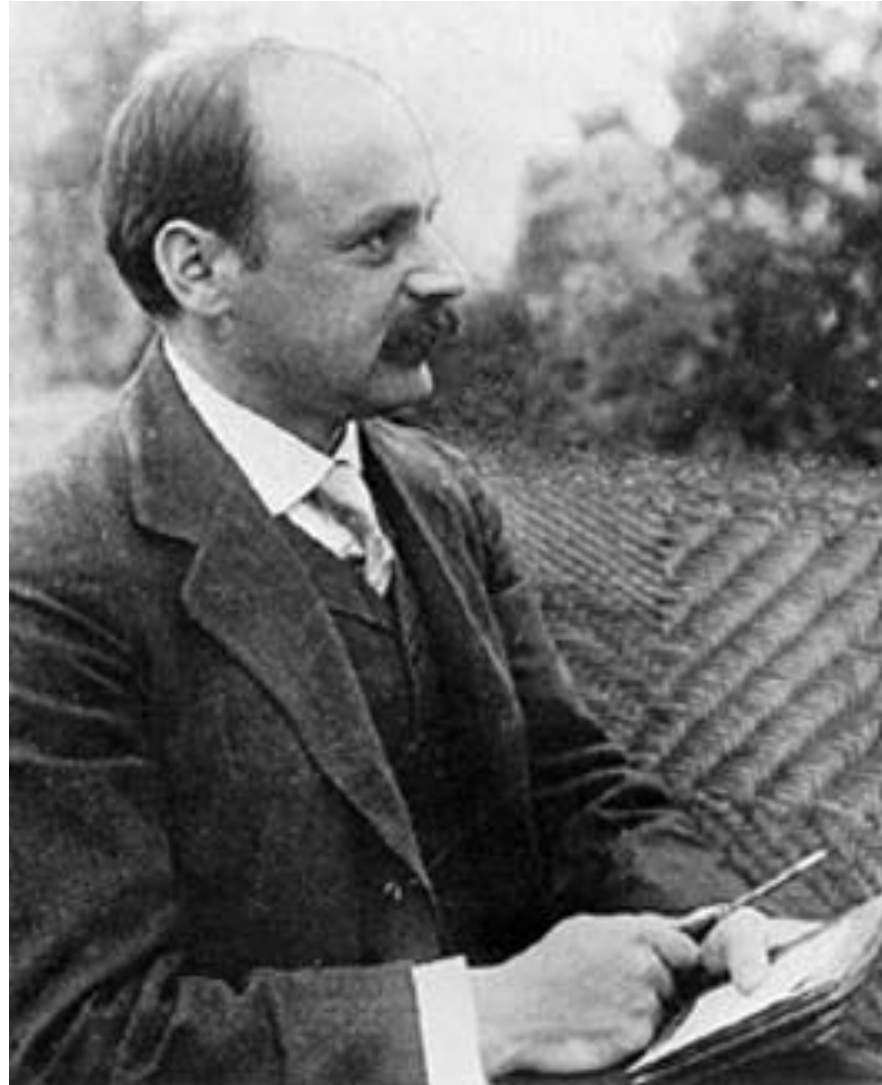
- Напротив, даже принимая в то время идею Джинса об аннигиляционном механизме внутриатомного источника звездной энергии, **Эддингтон и Рессел**, как бы вопреки строгой логике, интуитивно **пришли к выводу о необходимости достижения некоторой определенной, критической температуры для "включения" энергоисточника звезды.**
- Продолжив за Ресселом эволюционное истолкование Г-Р диаграммы, **Эддингтон оценил такую критическую температуру в 32 млн. градусов**, что (быть может, случайно) совпало с действительностью по порядку величины.
- Объяснение подобным гениальным *интуитивным* догадкам (здесь - идее критической температуры!) можно искать, думается, в колоссальной внутренней работе мозга исследователя, тогда как внешне это выглядит как некое внезапное озарение "свыше".

## *Дифференциация проблем в астрофизике.*

### **Первая теория звездных атмосфер. К. Шварцшильд.**

- С самого начала астрофизика поставила проблемы не только состава и строения, но и развития небесных тел.
- Обширность диапазона задач и быстрый прогресс с начала XX в. технической, наблюдательной и теоретической базы для их разрешения вскоре привели к сильной дифференциации конкретных исследований и в самой астрофизике.
- В изучении одиночных звезд сразу выделились две самостоятельные области: **физика звездных атмосфер** и **физика звездных недр**.
- В первом десятилетии XX в. были заложены **основы теории звездных атмосфер**. Главная заслуга в этом принадлежит немецкому астроному и физики **Карлу Шварцшильду** (1873 - 1916), одному из основоположников теоретической астрофизики.
- Опираясь на достижения в новых областях физики, прежде всего термодинамики и теории газов, Шварцшильд распространил на звездные атмосферы и **развил математическую теорию лучистого равновесия**, согласно которой **перенос энергии в атмосфере звезды** осуществляется в основном **излучением**, а ее конвективным переносом (то есть при непосредственном соприкосновении частиц) можно пренебречь. При этом предполагалось выполнение принципа термодинамического равновесия (равенства поглощенной и излученной энергий в каждый момент в каждом элементарном объеме вещества).

**Карл  
Шварцшильд (1873  
– 1916)**



# Первая полная математическая теория внутреннего строения звезд и ее следствия .

А.Эддингтон.

- *Центральные* части звезд еще в течение десятилетия оставались совершенной загадкой. Хотя они также представлялись газом, но в чудовищно сжатом состоянии, а потому, как казалось, недоступном для анализа на основе теории, построенной для идеального газа.
- **Ключ к разгадке опять-таки был найден Джинсом (1917 г.). Он обратил внимание на то, что при чудовищно высоких температурах в недрах звезд вещество должно быть там полностью ионизованным.**
- Таким образом, с точки зрения физики, оно оказывалось почти идеальным "газом" из электронов и положительно заряженных ядер-протонов, а, следовательно, доступным математическому анализу и описанию. (Вспомним классический метод Платона...)



- Остроумная догадка Джинса о состоянии вещества в звездных недрах, термодинамическая теория лучистого равновесия Шварцшильда и уже широко известные тогда результаты виртуозных опытов русского физика **П.Н. Лебедева, подтвердившего реальность предсказанного Максвеллом давления света**, в том числе и на газы (1907 г., опубликовано в 1910 г.) – все это открыло дорогу для формирования математической теории звезды в целом. Первую такую теорию построил в 1916 - 1918 гг. английский астрофизик и физик-теоретик Артур Стэнли Эддингтон (1882 - 1944).
- Главное уравнение его теории связывало температуру ( $T$ ) давление ( $P$ ) и плотность вещества ( $\rho$ ) звезды с расстоянием от ее центра. Его решение давало их распределение в зависимости от глубины слоя под фотосферой. (Недаром сам **Эддингтон называл свою теорию** в духе промышленной эпохи "аналитической буровой машиной".)

- С помощью своей теории Эддингтон рассчитал первую теоретическую модель газовой равновесной (находящейся в лучистом равновесии) излучающей звезды, где силы гравитационного сжатия уравновешиваются силами газового и светового давления.

## *Открытие новой фундаментальной астрофизической зависимости в мире звезд: масса – светимость и установление критической массы (предельной светимости) звезды.*

- **Это привело** его к открытию **новой** (после Г-Р диаграммы) **фундаментальной астрофизической зависимости в мире звезд: масса – светимость**. Эддингтон установил, что светимость звезд растет значительно быстрее массы, и в 1924 г. обосновал это теоретически. Прямым следствием такого открытия было то, что при росте массы звезды должен наступить момент, когда чудовищное световое давление уже не сможет сдерживаться гравитацией и сделает звезду неустойчивой.
- Вывод Эддингтона оказался верен, несмотря на ошибочность его начального допущения (предположения о равном обилии в звезде всех химических элементов) и последовавшую из этого его неверную оценку среднего атомного веса "электронно-ядерного газа" звезды (около 2) . - В действительности, в звездах преобладает водород, поэтому средний атомный вес смеси атомных ядер и электронов = 0,5! К счастью, это оказалось мало влияющим на уравнения.
-

- Эддингтон ввел представление о такой, *критической массе* для нормальной звезды, находящейся в устойчивом состоянии, и о *предельной светимости* ( $L_{\text{эд}}$ ) для устойчивой звезды данной массы ("эддингтонов предел":
  - $$L_{\text{эд}} = [M_{\text{зв}} / M_{\text{Солнца}}] \times 10^{38} \text{ эрг/с,}$$
  - где  $M_{\text{зв.}}$  меньше или равно  $65 M_{\text{Солнца}}$ .
  - Это полностью подтвердилось по крайней мере для звезд "главной последовательности" Г-Р диаграммы, то есть для подавляющей части звездного населения в наблюдаемой Вселенной.
- Но дело оказалось сложнее.  
 Выведенная Эддингтоном зависимость масса-светимость, как оказалось позднее, не выполняется для сверхгигантов и для очень маломассивных звезд с массой менее  $0,08$  солнечной – коричневых карликов)

## *Первые теоретические оценки размеров звезд.*

- На основе своей теории внутреннего строения звезды Эддингтон впервые вычислил **диаметры** некоторых звезд - **красных гигантов (более 1 млрд. км!)**.
- А уже в 1920г. с помощью 20-футового интерферометра, установленного на 100-дюймовом рефлекторе обсерватории Маунт Вилсон, Ф. Пиз и Дж. Андерсон впервые прямыми наблюдениями определили диаметр красного гиганта  $\alpha$  Ori (Бетельгейзе).
- В дальнейшем измерением диаметров еще нескольких звезд с помощью 50-футового интерферометра они полностью подтвердили расчеты Эддингтона.

- *Открытие первых сверхплотных звезд («белых карликов»).*
- В свою очередь, расчет Эддингтона для радиуса и массы слабого спутника Сириуса (Сириус-B) впервые обнаружил его гигантскую плотность (50 000 г/куб. см).
- Так был открыт новый тип белых горячих звезд малой светимости, получивших название "белые карлики".
- Теорию их уже вскоре начал разрабатывать американский физик (опять физик!) У.А. Фаулер.

- *(4) Первая теория цефеид.*
- В 1918 - 1919 гг. Эддингтоном была построена первая теория цефеид как физических переменных, одиночных пульсирующих звезд.
- Эта идея относительно природы переменности таких звезд была впервые высказана и разработана в 1878 – 1883гг. немецким физиком Г.А.Д. Риттером, а в 1896г. ее независимо высказал, как уже упоминалось, московский физик Н.А. Умов на защите диссертации в МГУ А.А. Белопольским, открывшим характерную синхронность (но в противофазе) колебаний лучевых скоростей и блеска у таких звезд.
- Результаты Эддингтона были опубликованы в его книге "Внутреннее строение звезд"(1926).
- В 1941 г. Эддингтон усовершенствовал свою теорию цефеид (объяснил сдвиг по фазе между изменением блеска и лучевой скорости рассеянием энергии в поверхностных слоях звезды).
-



# *Зарождение идеи неустойчивости ядер спиральных туманностей.*

- В связи с развитием теории внутреннего строения звезд, Эддингтон и Джинс первыми в 20-е гг. XX в. привлекли внимание к ядрам спиральных туманностей (которые они считали еще сгустками диффузной материи) как к особым точкам.
- Эддингтон считал, что это неустойчивые тела сверхкритической массы, а Джинс даже допускал, что в этих точках в нашу Вселенную втекает вещество из других, недоступных нам вселенных (в первые десятилетия XX в. получила распространение его гипотеза происхождения звезд как результата сгущения диффузной материи сначала в спиральную туманность).
- С окончательным установлением истинной природы спиралей как далеких галактик (Хаббл, 1924 г.) космогоническая идея Джинса отпала.
- Но идея Эддингтона, а отчасти и экстравагантная идея Джинса (!) неожиданно получили новую жизнь – как объяснение активности и сингулярности ядер галактик наличием в их центрах не подчиняющихся известной физике сингулярных объектов («черных дыр»).

*Утверждение большей скорости эволюционных процессов в звездной Вселенной ("короткой шкалы" в оценках возраста звезд и Галактики. - Б. Бок, В.А. Амбарцумян).*

- В 1934 - 1937 гг. подверглись острой критике оценки возраста Галактики, выведенные Джинсом из динамических соображений ( $10^{13}$  лет).
- Тогда же американский астроном Б. Бок (1906 -1983) и независимо советский астрофизик-теоретик В.А. Амбарцумян (1908 - 1996) показали, на тех же динамических основаниях – из расчета времени "жизни" звездных скоплений, что возраст Галактики на три порядка меньше ( $10^{11}$  ).
- Эта "короткая космологическая шкала времени" в дальнейшем прочно вошла в астрономическую картину мира, подтвержденная исследованиями эволюции и возраста горячих голубых звезд-гигантов.

# **Решение проблемы источников звездной энергии и коренной перелом в представлениях об эволюции звезд. Первая треть XX в.**

Рождение теории термоядерных  
источников звездной энергии и  
новые представления о  
направлении эволюции звезд на Г-Р  
диаграмме

## § 1. Решение проблемы внутризвездных источников энергии.

(30-е годы XX века). Г.Бете, М.Шварцшильд и др. ) и

*судьба прежних идей*

- Идея термоядерного синтеза в недрах звезд (с переходом H в He) долго казалась маловероятной, поскольку требовала для своего осуществления случайной встречи сразу шести элементарных частиц - четырех ядер водорода и двух электронов.
- К концу 30-х гг. были найдены сразу два пути осуществления термоядерного синтеза: открыты протон-протонный и углеродно-азотный циклы ядерных превращений, результатом которых в обоих случаях является переход H в He.
- Первый - в 1938 г. Гансом Бете (1906 - 2005) (США) и независимо Ч. Критчфилдом (Англия) (в звездах с массой меньшей 1,2 массы Солнца). Второй в 1938 – 1939 - Бете и К. Вейцзеккером (Германия). Максимальный возраст звезд при этом достигал  $10^{11}$
- Первый расчет модели равновесной звезды (Солнца) с термоядерным источником энергии провел Мартин Шварцшильд (1941, США ). Он оценил содержание He на Солнце и теоретически вывел наблюдательные следствия – параметры дифференциального вращения Солнца (некогда открытого А.А. Белопольским).
- Таким образом, теория Джинса об аннигиляционном источнике энергии звезд, предложенная в свое время для объяснения особого "долгожительства" звезд ( $10^{13}$ ), ушла в историю как важный, но пройденный этап.

**Ганс Альбрехт  
Бете (1906 – 2005)**



## Об отношении решения проблемы источников звездной энергии к картине мира.

- Хотя в известном смысле результаты здесь остаются теоретическими, **они стали устойчивым элементом современной астрономической картины мира.**
- Возникшие в 80-е гг. XX в. трудности в связи с обнаружением якобы недостаточности потока нейтрино из недр Солнца (по сравнению с ожидавшимся в соответствии с теорией), в последние годы были разрешены, что и было отмечено Нобелевской премией 2002 г.

## Дальнейшая судьба более ранних идей относительно источников звездной энергии.

- Идея выделения энергии за счет *гравитационного сжатия звезды (контракционная стадия)* возродилась в современном описании *стадии протозвезды* - сравнительно кратковременного периода ( $10^5 - 10^6$  лет) сжатия диффузной газопылевой материи и разогрева ее в центральной части (при достаточной массе) до критической температуры порядка  $10^7$  К.
- Затем наступает *основная, ядерная стадия выработки энергии*, за счет чего звезда может излучать в течение  $10^6 - 10^{10}$  лет (для звезд, соответственно, с массами от 30 до  $1 M_{\odot}$ ).
- Наконец, после исчерпания запасов ядерной энергии наступает чисто *тепловое высвечивание энергии* - стадия белого карлика, продолжающаяся в зависимости от массы звезды до  $10^9$  лет.
- Таким образом, *современная картина эволюции звезды представляется как последовательная смена источников ее энергии.*

- Но это еще более интересно с точки зрения истории науки.
- Уже на ранних стадиях научного объяснения источника энергии звезд, то есть объяснения, уже опиравшегося на знание фундаментального физического закона - сохранения энергии, появилась возможность отразить в теории ту или иную грань, стадию, элемент действительного процесса – рождения и эволюции, казалось бы, совершенно недоступного для исследования объекта - звезд.

-



*Возрождение идеи продолжающегося звездообразования (Ф. Уиппл, Г.Н.Рессел,, А.Унзольд, Б. Бок, В.А. Амбарцумян, 1940 -1950 - е гг.).*

- Хотя длинная джинсова шкала эволюции звезд - в десятки миллиардов ( $10^{13}$ ) лет была опровергнута к концу 30- х гг., но ее четвертьвековое господство привело к прочному убеждению, что процесс звездообразования произошел и завершился в весьма отдаленные времена. **Это был существенный элемент АКМ к концу первой половины XX в.**
- Такое представление господствовало до окончательного установления существенной роли межзвездного поглощения (Трюмплер, 1930г. (Первое обоснование наличия межзвездного поглощения было дано В.Я.Струве в 1847г. Оно подкреплялось теорией Джинса о гравитационной неустойчивости и фрагментации диффузного вещества как о начале формирования звезд, - идеи, восходящие к В. Гершелю).
- Казалось, процесс звездообразования завершился – межзвездное пространство было пусто! (Последнее отразилось и на сильно завышенных оценках размеров нашей Галактики у Шепли в 1930г.! – См. ниже.)

- В начале 40-х гг. XX в. американские астрономы Ф. Уиппл и Г. Н. Рессел обратили внимание на то, что голубые звезды-гиганты (по светимости), чрезвычайно расточительно расходующие свою энергию, не могут существовать в таком режиме даже миллиарды ( $10^9$ ) лет (возраст Солнца).
- А. Унзольд в 1944 г. нашел, что время жизни голубых звезд класса O7 должно составлять не более  $1,3 \times 10^7$  лет.
- Тем временем была признана существенная роль газопылевой материи в звездной Вселенной. Это возродило интерес к исследованию распределения ярких звезд по соседству с пылевыми космическими облаками - туманностями (такие исследования в середине XIX в. под влиянием космогонии В.Гершеля усиленно проводил английский астроном Ричард Проктор). Это с неизбежностью вело и к возрождению общей гершельской идеи о предшествовании и влиянии

- В 1946 г. Б. Бок писал: «... мы почти вынуждены допустить вероятность того, что звезды все еще "рождаются" или что, по крайней мере, некоторые сверхгиганты начали существование менее  $5 \times 10^8$  лет назад».
- В.А. Амбарцумян (1908 – 1996) в 1947 г. нашел этому подтверждение: он впервые интерпретировал известные группы О- и В-звезд как реальные пространственные системы, но динамически неустойчивые, распадающиеся (их кинетическая энергия оказывалась больше потенциальной) и следовательно молодые. В этом он увидел прямое доказательство продолжающегося, к тому же группового, звездообразования в Галактике. Амбарцумян назвал такие системы О- и В-ассоциациями.

## Быстрое укрепление идей продолжающегося звездообразования

- В 1948 г. Г.Н. Рессел констатировал уже определенное изменение в общей астрономической картине мира: "Убеждение, что эти расточительные звезды [яркие сверхгиганты] начали свою излучательную карьеру относительно недавно в космическом масштабе времени, широко распространено".
- Б. Стрёмгрен детализировал картину, сделав вывод, что молодые, горячие голубые звезды-гиганты принадлежат населению I типа (плоской подсистеме звезд) в Галактике, тогда как звезды населения II типа (сферической подсистемы) намного старше.
- Проблема продолжающегося и в нашу эпоху звездообразования в настоящее время считается решенной. Главным доказательством здесь служит существование массивных ярких звезд O- и B-классов, возраст которых (при термоядерном источнике их энергии) не может превышать 10 млн ( $10^7$ ) лет.
- Т.о. этот элемент *картины мира* перешел в ранг *достоверных знаний* (при сохраняющемся постулате – ядерного механизма звездной энергии).

## *Смена представлений о направлении эволюции звезд.*

- Новые теории эволюции звезд успешно разрабатывали в 40 -50-е годы Б. Стрёмгрен (Дания, США), Ф.Хойл (Англия), но главным образом М. Шварцшильд (США). Были проведены новые расчеты термоядерных реакций в недрах звезд для выявления изменения в ходе этих реакций состава, состояния и других параметров звезды как проявления этапов ее эволюции.
- Встала проблема новой эволюционной интерпретации Г– Р диаграммы. Существенную роль на пути к решению проблемы сыграло построение диаграмм Герцшпрунга-Рессела для отдельных скоплений звезд. Это было начато американским астрофизиком Л П Койпером (1905 - 1973)

**Джерард Петер  
Койпер (1905 – 1973)**



- 1. Скопления как ключ к разгадке направления эволюции звезды.
- Звезды скопления находятся практически на одном расстоянии от земного наблюдателя, что позволяет по их блеску судить об истинных отношениях светимостей этих звезд.
- Койпер первым построил в 1937 г. сводную Г-Р диаграмму для многих рассеянных скоплений и обратил внимание на резкое различие их между собой. Он сравнил со своими результатами проведенные ранее теоретические расчеты Стрёмгрена и объяснил различие диаграмм различным содержанием H в звездах разных скоплений, что уже могло служить указанием и на разный возраст скоплений. Т.о. звездные скопления стали в дальнейшем главным ключом к открытию направления эволюции звезд, к выявлению их так называемых эволюционных треков.

- Наиболее ценную информацию принесло исследование шаровых скоплений. Первые детальные Г-Р диаграммы для них были построены и изучены в 1952 г. американскими астрофизиками Э. Сэндиджем и М. Шварцшильдом.
- Звезды этих наиболее старых комплексов в Галактике неожиданно связали относительно узким "мостом" ветвь гигантов с главной последовательностью, а иные из них заполнили пробел Герцшпрунга между красными гигантами и красными карликами.
- Появилось отчетливое указание, что *направление эволюции звезд, вопреки всем ожиданиям, в целом "перпендикулярно" главной последовательности!* Этот сенсационный вывод Сэндидж подтвердил в 1954 г., показав, что звезды шаровых скоплений переходят на стадии горения He с главной последовательности в область красных гигантов.



## Об убедительности результатов.

- Новый эффективный метод точной звездной фотометрии - электрофотометрическая трехцветная UVV-система на порядок повысила точность определений истинных (с учетом межзвездного поглощения света) блеска и цвета звезд. Это позволило производить сравнительные исследования их характеристик на огромном и однородном наблюдательном материале.
- Результатами стали: уточнение *относительного возраста рассеянных скоплений* (А. Сэндидж, 1954); уточнение *масс шаровых скоплений* (начиная с 40-х гг., советские астрономы П.Н. Холопов (1922 - 1988), Б. Е. Маркарян (1913-1985), И.М. Копылов (1928 - 2000) и другие).

# К проблеме возраста и эволюции скоплений

- Во второй половине XX в. сформировалась стройная картина образования и развития самих скоплений как группировок генетически связанных звезд.
- В Галактике выделились два класса скоплений: в свете общепринятой ныне "диффузной" звездно-космогонической концепции.
- Один ведет свою родословную от газопылевой плоской составляющей Галактики. Это рассеянные более молодые скопления со звездным населением I-го типа.
- Другой - от диффузной материи сферической составляющей Галактики: шаровые скопления со звездами населения II-го типа, в среднем на несколько порядков более богатые по населенности и в целом более старые образования (звезды в них бедны тяжелыми элементами, «поставляемыми» при взрывах Сверхновых).
- Возрасты рассеянных скоплений оцениваются от миллионов до миллиардов лет, тогда как шаровых – они обычно порядка десятка миллиардов лет. ( Вывод о том, что шаровые скопления наиболее старые из скоплений, напомним, впервые сделал В.

# Открытие «звездных комплексов» и место O- и B-ассоциаций.

- В этой картине получили уточненную интерпретацию и O- и B-ассоциации Амбарцумяна.
- **Х. Шепли** (1885 - 1972) обнаружил существование обширных разреженных группировок горячих голубых звезд без заметной концентрации, но выделяющихся по своим характеристикам как вероятные **области интенсивного звездообразования**. Шепли ввел их как своего рода «созвездия» (constellations), включающие до 500 звезд.
- Эти работы продолжили вслед за ним французские астрономы *Н. Мартин* и *Л. Прево*. Выделенные ими «регионы» частью совпали с «областями Шепли».
- Начавший аналогичные исследования (с 80-х гг. XX в. ) московский астроном **Ю.Н. Ефремов (ГАИШ МГУ)** назвал **аналогичные области "звездными комплексами"**. O- и B-ассоциации рассматриваются как наиболее заметные элементы таких комплексов.

•