

Условное время полета от Земли до других планет Солнечной системы по прямой на 01.04.2014

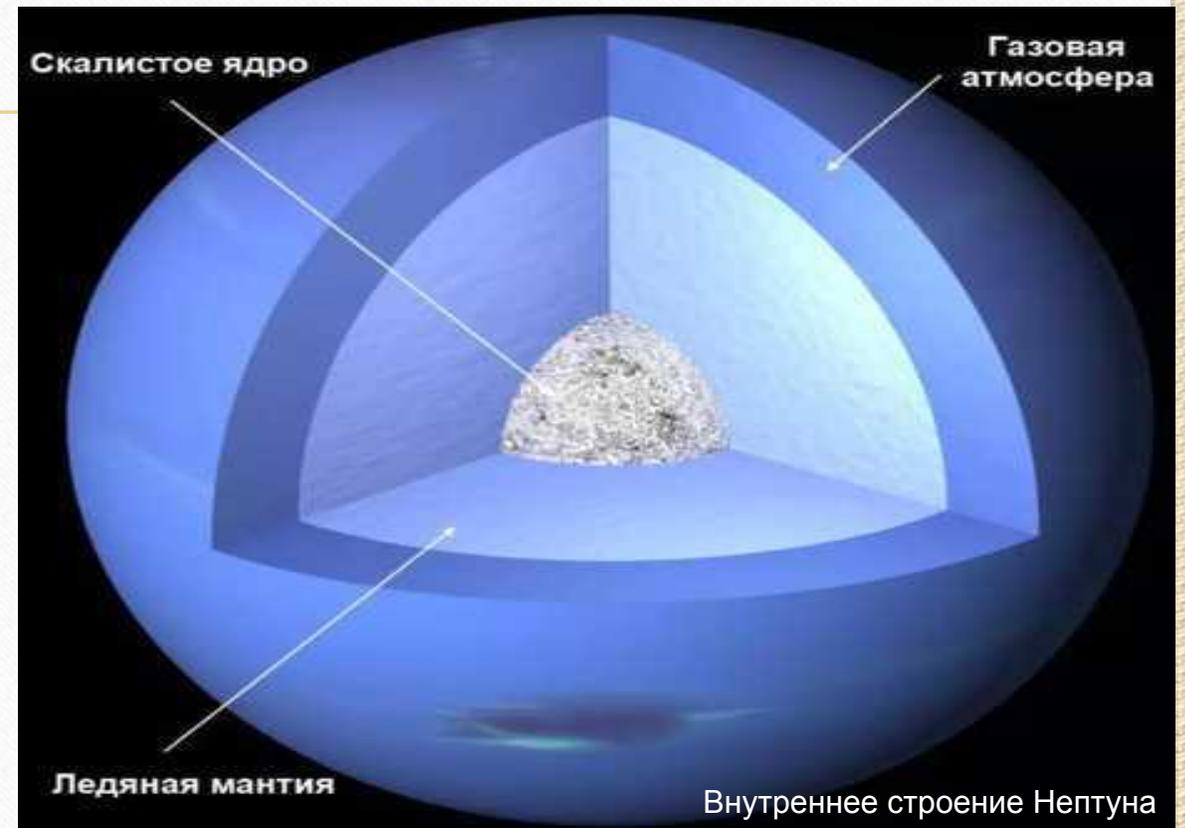


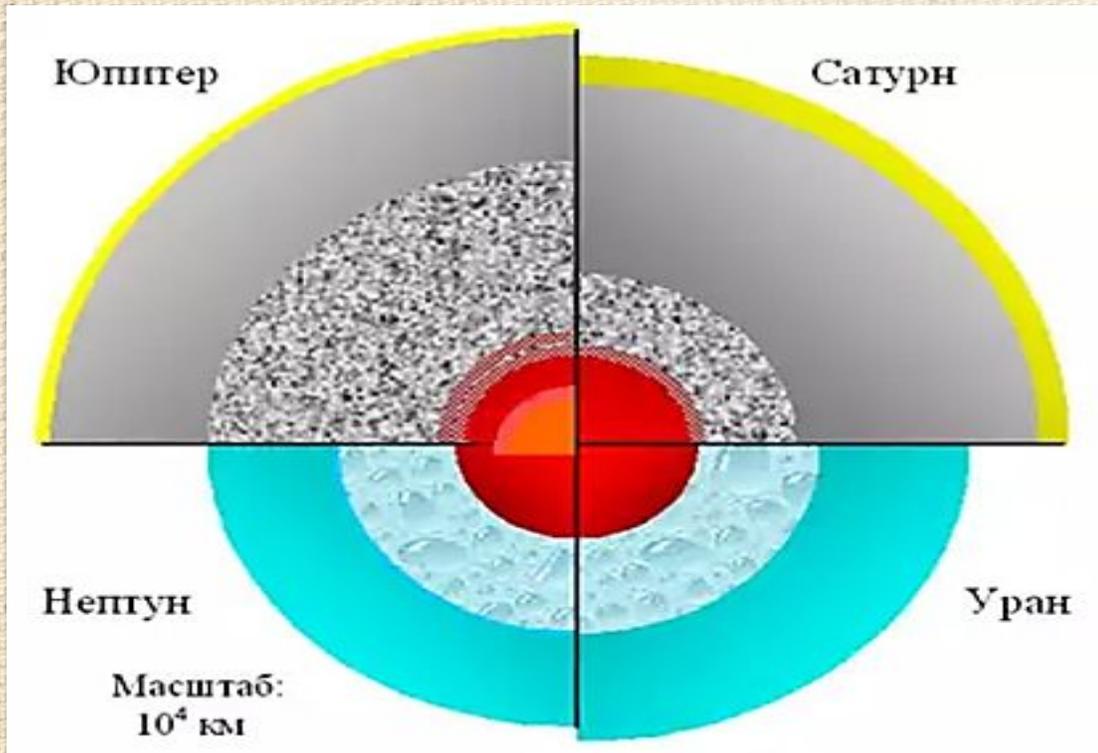
Планеты-гиганты находятся далеко от Солнца, поэтому там очень холодно. Температура в атмосфере Юпитера на уровне облачного слоя около  $-140^{\circ}\text{C}$ , Сатурна – около  $-180^{\circ}\text{C}$ , а на Уране и Нептуне она не превышает  $-210^{\circ}\text{C}$ .

Такая температура установилась на планетах не только за счет энергии, приходящей от Солнца, но и благодаря потоку энергии из их недр.

На Юпитере, Сатурне и Нептуне поток энергии из недр существенно больше потока солнечной энергии, но на Уране он практически отсутствует.

Согласно модели внутреннего строения планет-гигантов температура в центре Юпитера достигает  $30000^{\circ}\text{C}$ , давление – около  $8 \cdot 10^{12}$  Па, а у Нептуна –  $7000^{\circ}\text{C}$  и  $6 \cdot 10^{11}$  Па.



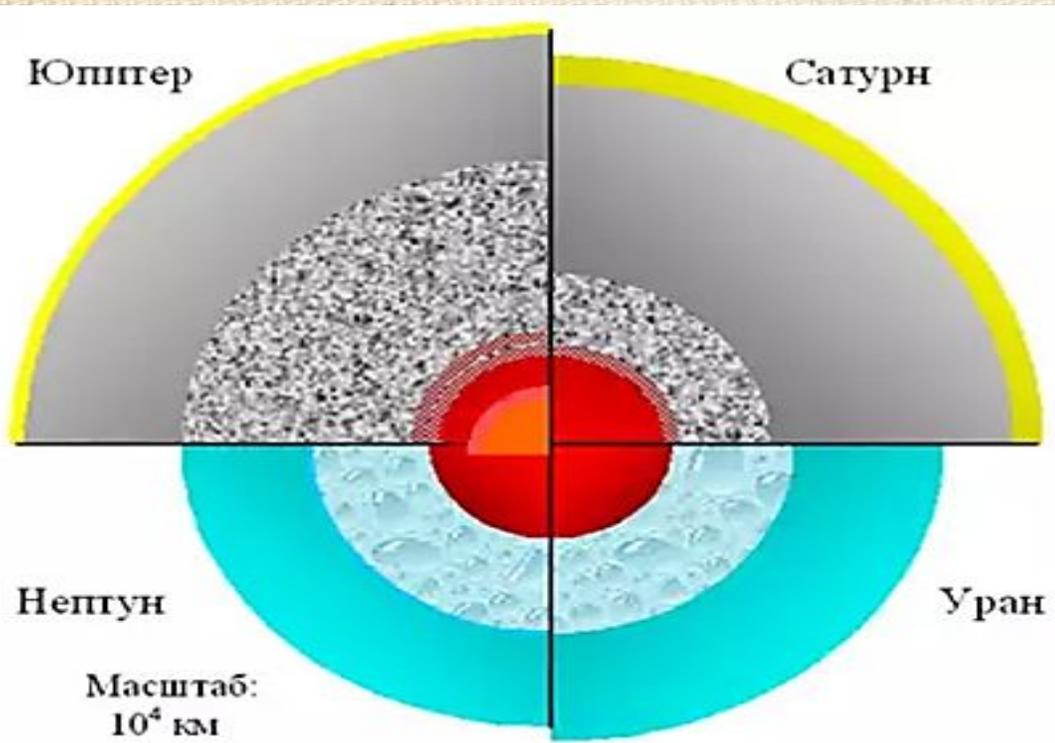


- Внутреннее ядро из тяжелых элементов (Юпитер)
- Внешнее силикатное ядро.
- Оболочка из летучих элементов.
- Оболочка из твердого "металлического" водорода (Юпитер, Сатурн).
- Оболочка из жидкого водорода (Юпитер, Сатурн)
- Ледяная мантия (Уран, Нептун)
- Гидросфера - глобальный водяной океан (Нептун)
- Атмосфера: ■ - Юпитера, Сатурна;  
■ - Урана, Нептуна

Расчеты показывают, что по мере приближения к центру планеты водород вследствие возрастания давления должен переходить из газообразного в **газожидкое состояние** – так называют состояние вещества, при котором сосуществуют его газообразная и жидкая фазы.

Когда при дальнейшем приближении к центру давление в миллионы раз превысит атмосферное давление, существующее на Земле, водород приобретает свойства, характерные для металлов.

В недрах Юпитера **металлический водород** вместе с силикатами и металлами образует ядро, которое по размерам примерно в 1,5 раза, а по массе в 10–15 раз превосходит Землю.



- Внутреннее ядро из тяжелых элементов (Юпитер)
- Внешнее силикатное ядро.
- Оболочка из летучих элементов.
- Оболочка из твердого "металлического" водорода (Юпитер, Сатурн).
- Оболочка из жидкого водорода (Юпитер, Сатурн)
- Ледяная мантия (Уран, Нептун)
- Гидросфера - глобальный водяной океан (Нептун)
- Атмосфера: ■ - Юпитера, Сатурна;  
■ - Урана, Нептуна

Согласно моделям внутреннего строения Урана и Нептуна над ядром такого же состава должна находиться **мантия**, представляющая собою смесь водяного и аммиачно-метанового льдов.

Расчеты показывают, что даже при температуре в несколько тысяч градусов и высоком давлении смесь воды, метана и аммиака может образовывать **твердые льды**.

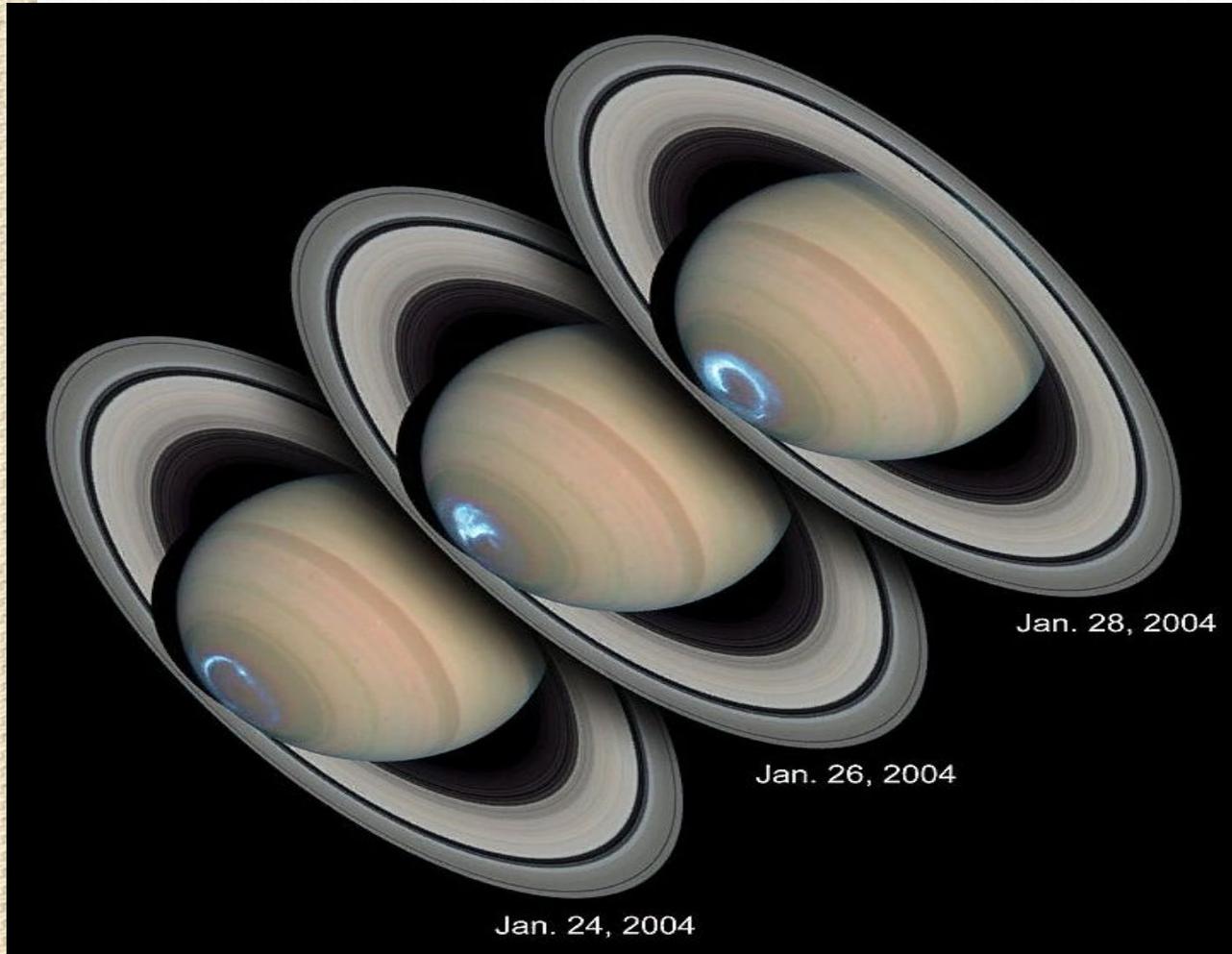
Поэтому эти две планеты иногда называют «ледяными гигантами» в отличие от «горячих гигантов» – Юпитера и Сатурна.

Все планеты-гиганты обладают **магнитным полем**.

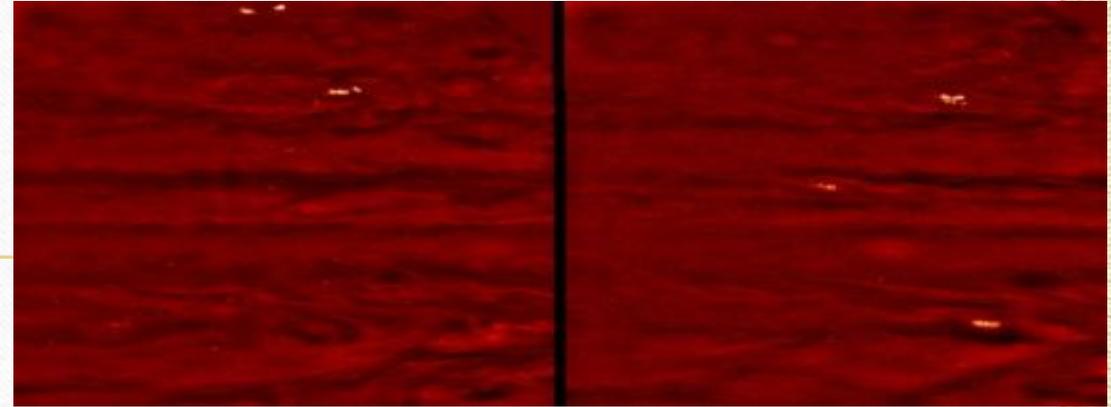
Магнитное поле Юпитера значительно сильнее земного, поэтому его радиационные пояса, подобные земным, значительно их превосходят, а магнитосфера, которая по своим размерам в 10 раз превосходит диаметр Солнца, охватывает четыре крупнейших спутника.



Космические аппараты зарегистрировали в атмосфере Юпитера очень сильные **разряды молний**, а также мощные **полярные сияния** на Юпитере и Сатурне.



Британские астрономы обнаружили в атмосфере Сатурна новый тип полярного сияния, которое образует кольцо вокруг одного из полюсов планеты



Молнии на ночной стороне Юпитера. Изображение получено космическим аппаратом Галилео в 1997 году



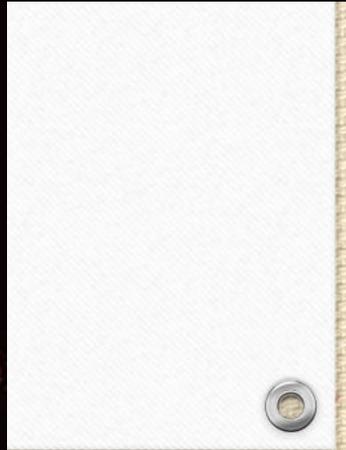
Астрономы при помощи космического телескопа NASA сфотографировали самое сильное полярное сияние на Юпитере

---

# Спутники и кольца планет- ГИГАНТОВ

В условиях, когда водород и гелий на периферии протопланетного облака почти полностью вошли в состав планет-гигантов, их спутники оказались похожими на Луну и планеты земной группы.

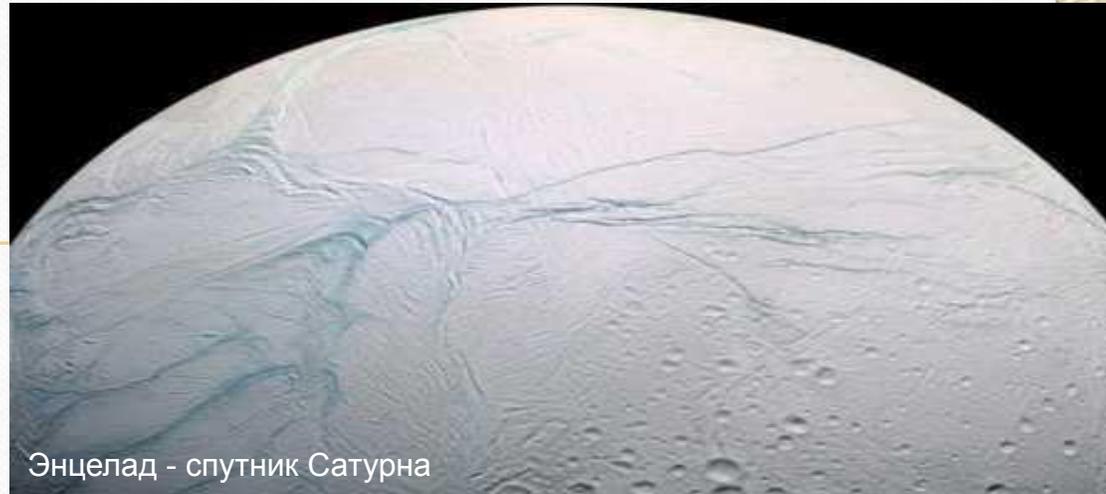
Все эти спутники состоят из тех же веществ, что и планеты земной группы, – силикатов, оксидов и сульфидов металлов и т. д., а также водяного (или водно-аммиачного) льда.



На поверхности многих спутников помимо многочисленных кратеров метеоритного происхождения обнаружены также тектонические разломы и трещины их коры или ледяного покрова.



Каллисто - спутник Юпитера с самым большим числом кратеров

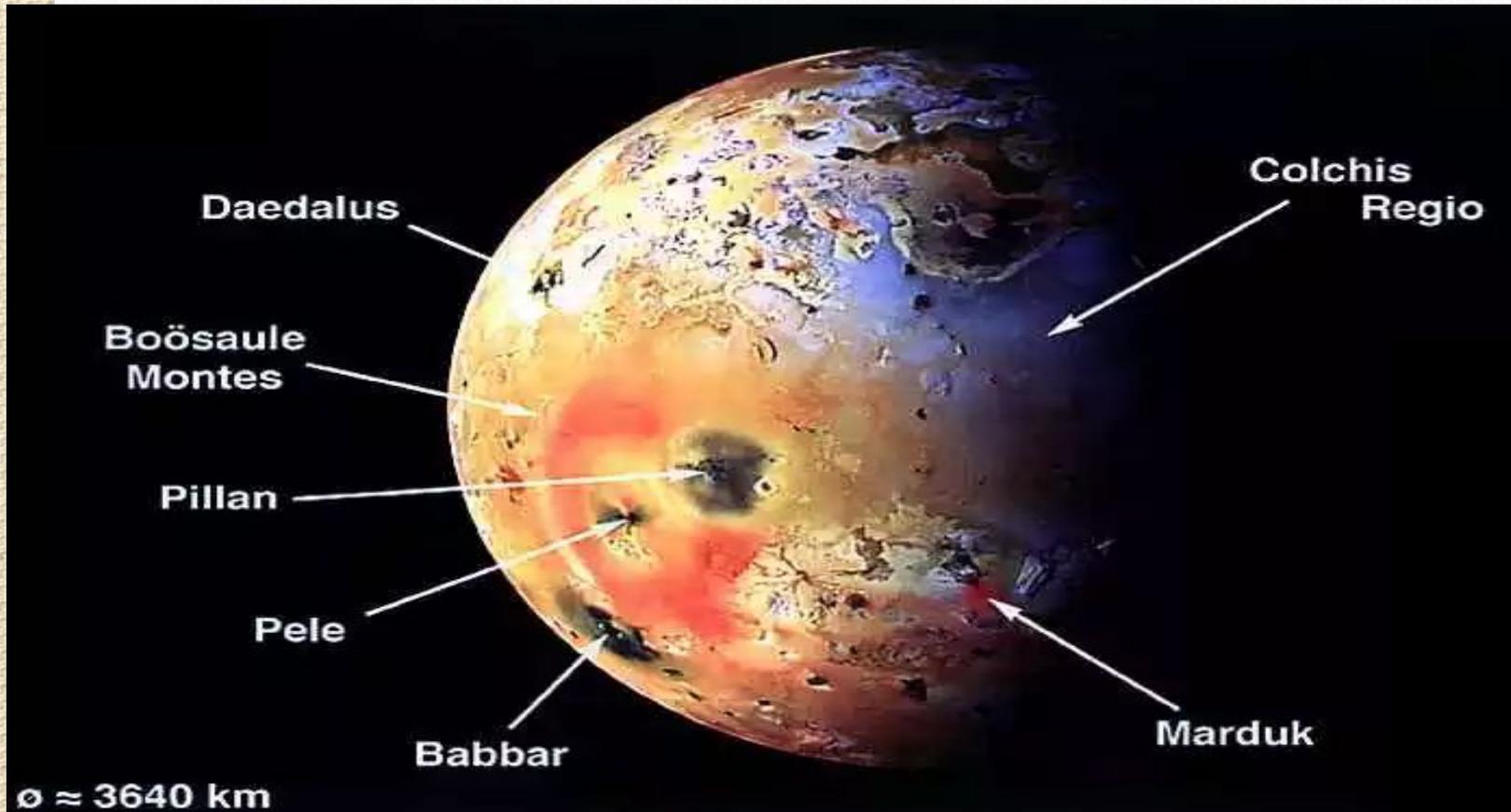


Энцелад - спутник Сатурна



Европа - спутник Юпитера

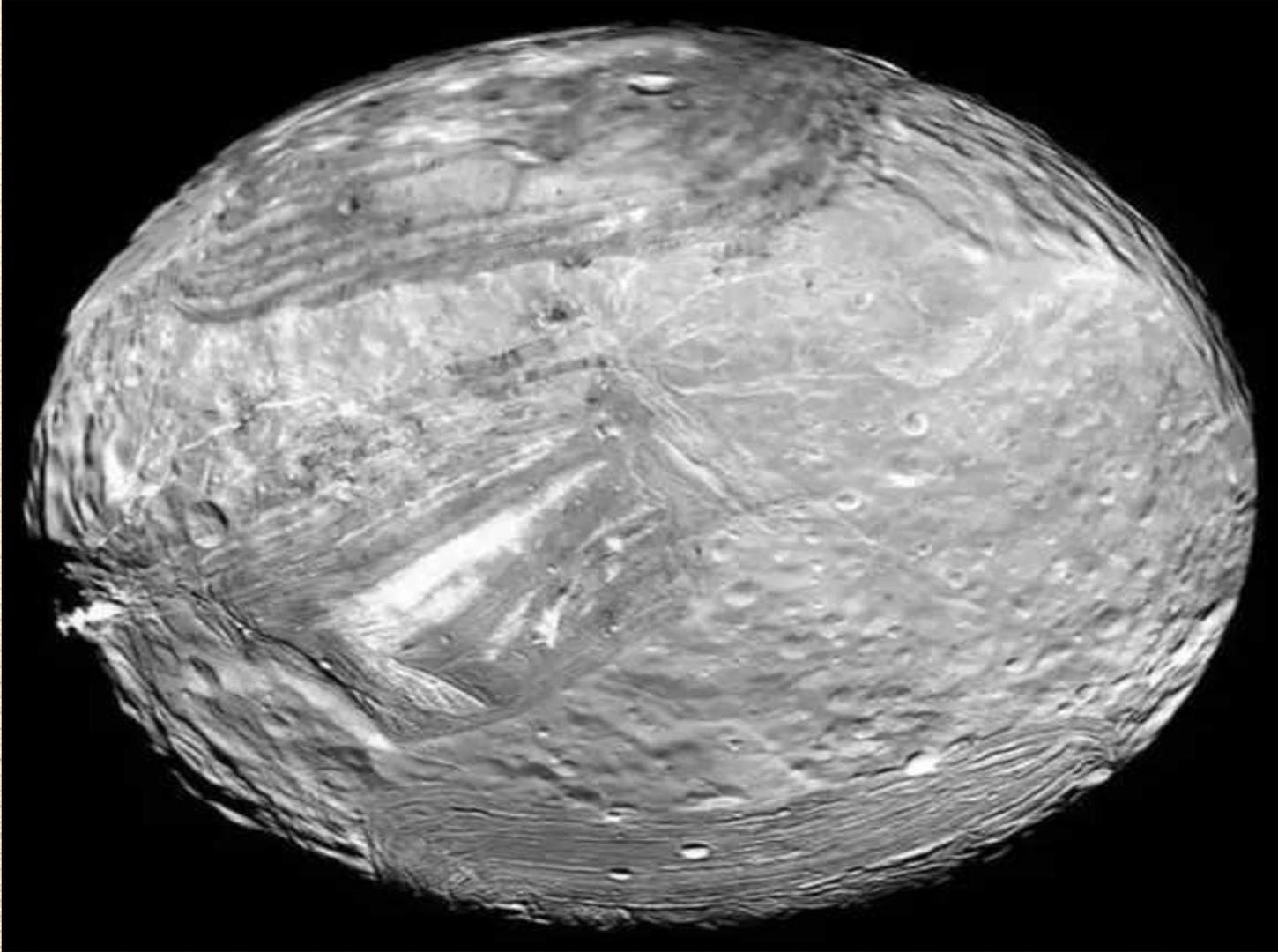
На ближайшем к Юпитеру спутнике **Ио** около десятка действующих вулканов.  
Высота выброса при крупнейшем из этих извержений составила около 300 км.  
Продолжительность большинства извержений превысила четыре месяца.



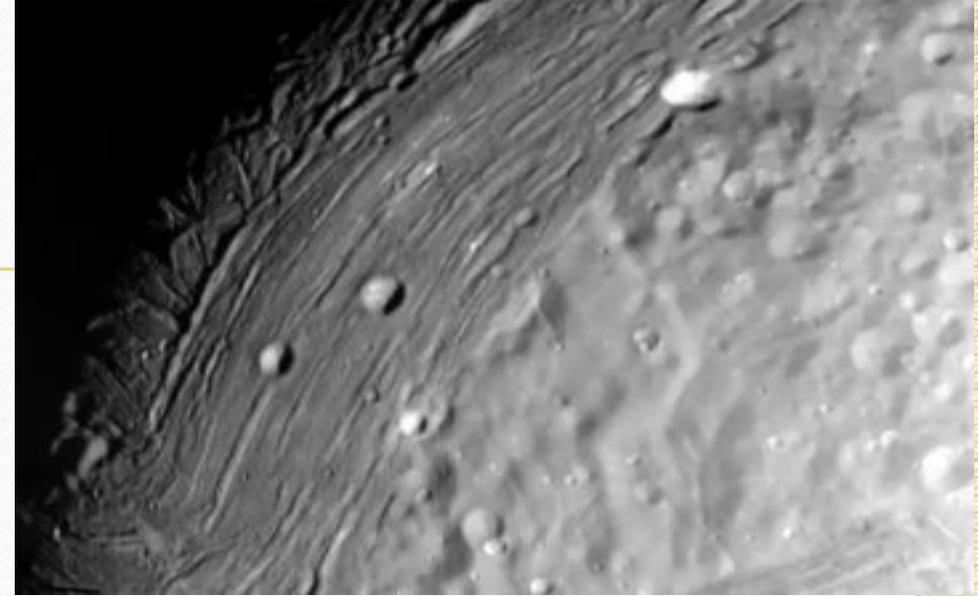
**Ио – наиболее вулканически активный объект среди всех тел планетного типа.**

На спутнике Урана – **Миранде** – видны уникальные структуры поверхности.

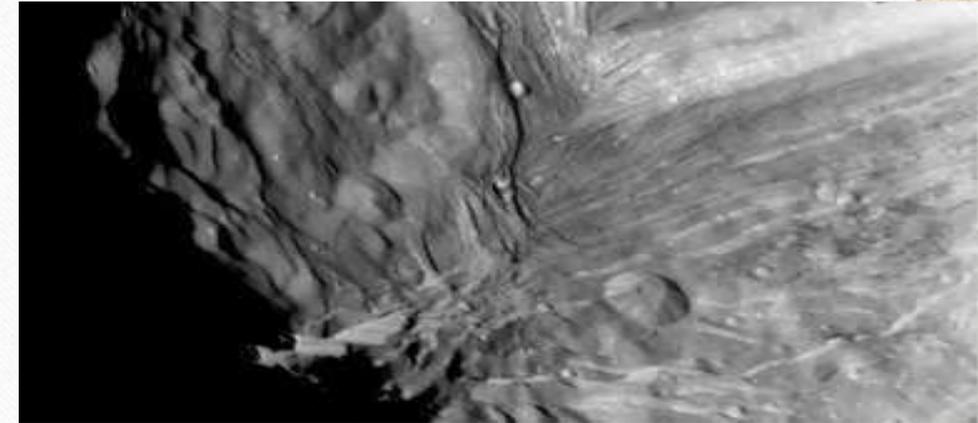
Их возникновение связано, видимо, с мощными ударными процессами, которые могли привести к разрушению спутника.



Миранда – спутник Урана

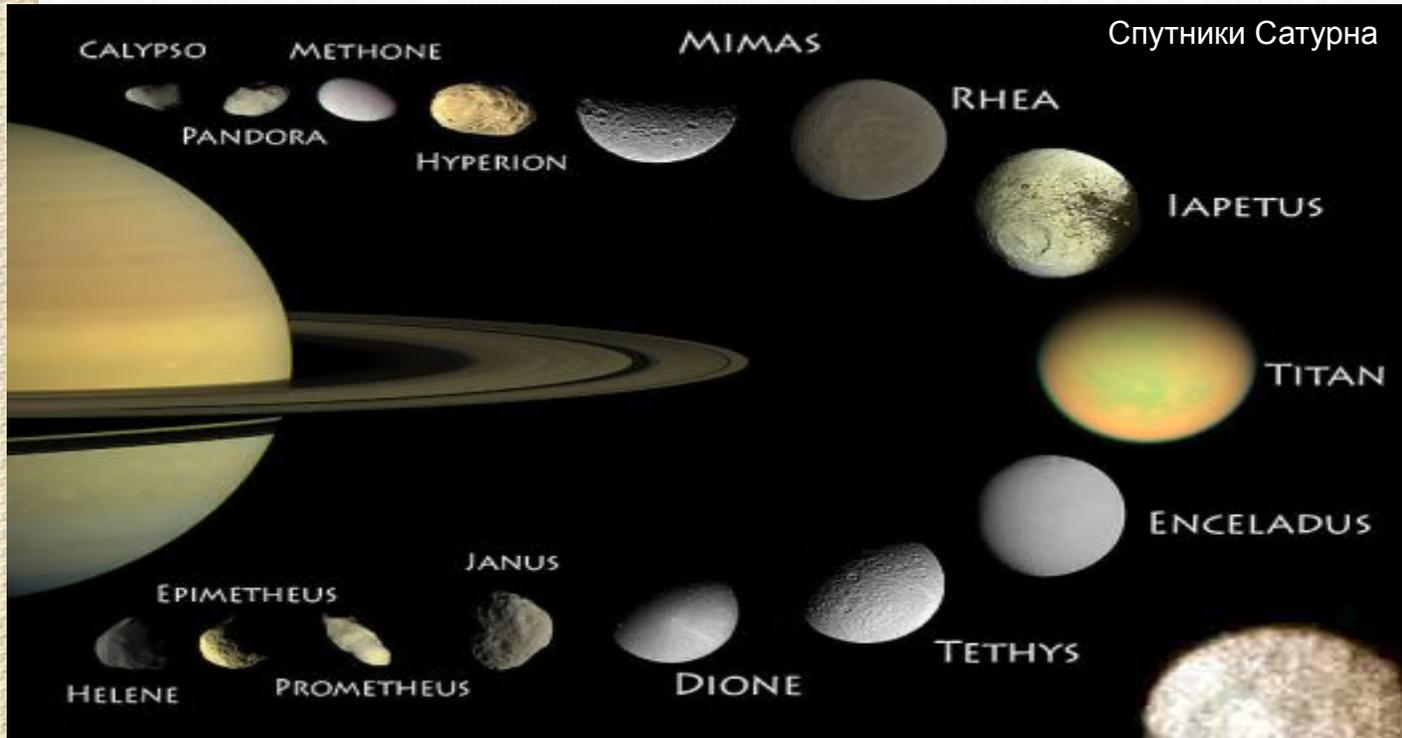


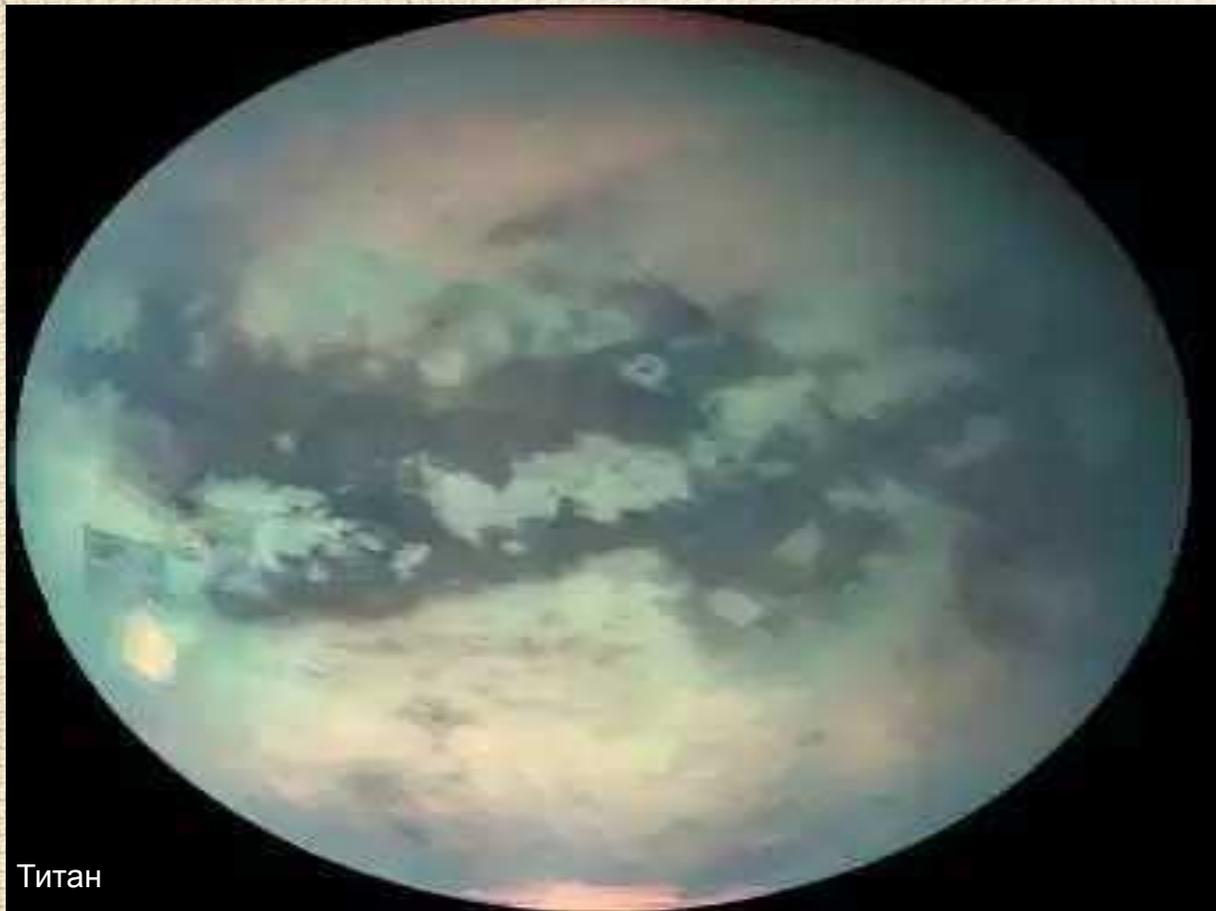
Миранда с расстояния 147 000 км



Снимок Миранды Вояджером 2 (24.01.1986)

Многие спутники планет-гигантов имеют небольшие размеры и неправильную форму.

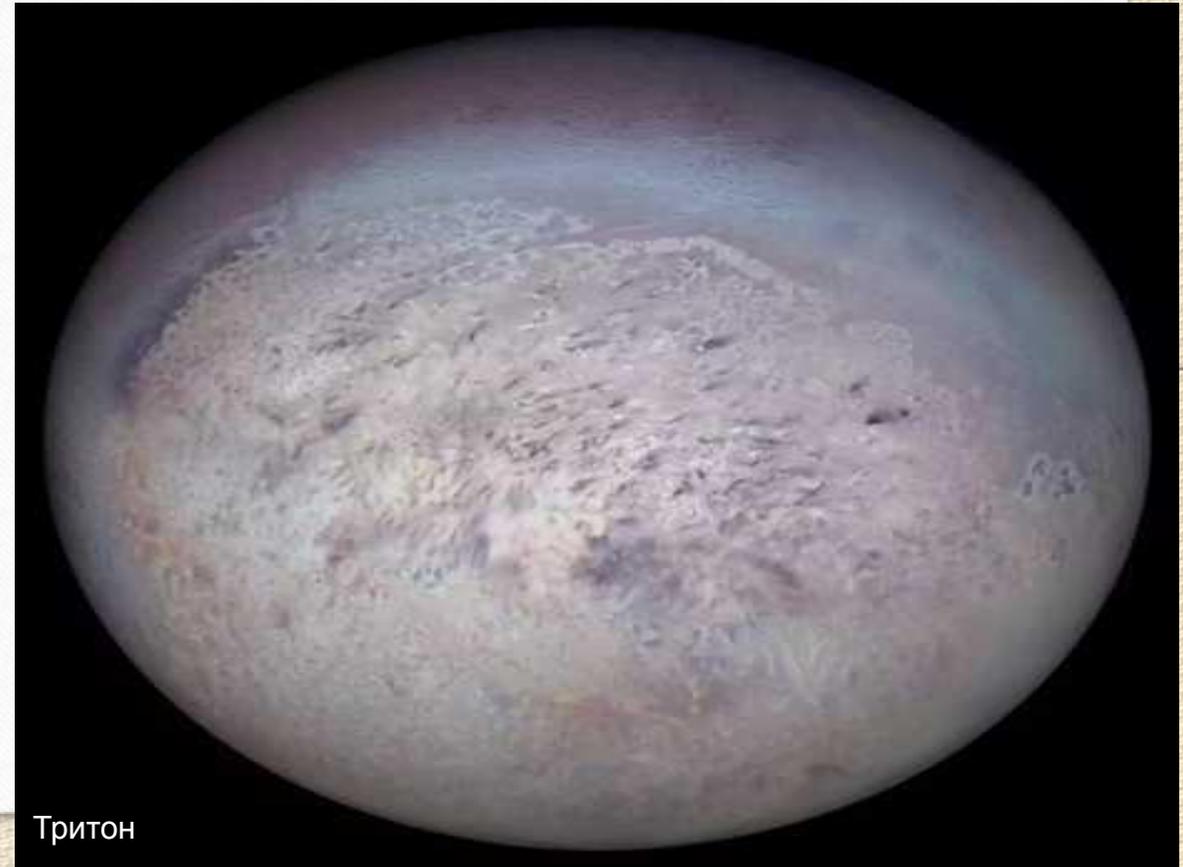




Титан

По плотности и давлению у поверхности атмосфера Титана превосходит земную.

Атмосфера, состоящая в основном из азота, обнаружена у **Титана** (диаметр около 5000 км) — самого большого среди спутников Сатурна — и **Тритона**, который имеет диаметр примерно 2700 км и является наиболее крупным спутником Нептуна.



Тритон

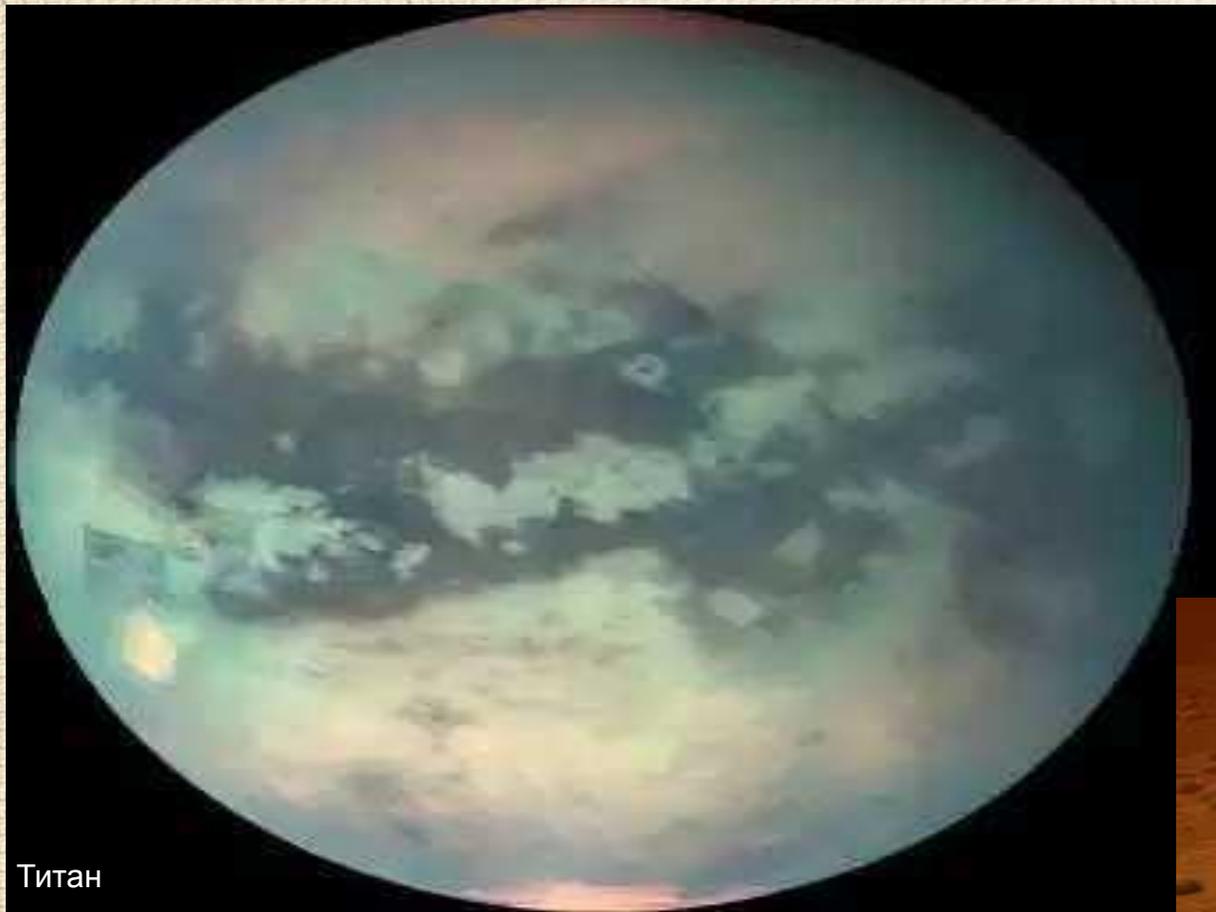


Ганимед

На **Тритоне** и крупнейшем среди спутников Юпитера – **Ганимеде**, диаметр которого превышает 5000 км, замечены ледяные полярные шапки .



Тритон



Титан

Основной компонент атмосферы на Земле и Титане одинаков – азот.

Такой атмосферы пока не обнаружено больше ни на одном другом объекте в Солнечной системе.



Особенно интересные результаты были получены в ходе продолжавшихся несколько лет исследований Титана автоматической станцией «Гюйгенс», совершившей посадку на его поверхность 14 января 2005 года.

На Титане практически полностью отсутствуют метеоритные кратеры.



Зонд на поверхности Титана.  
Художественная концепция НАСА-ЕКА



Поверхность Титана. Художественная концепция (НАСА-ЕСА)

Титан – второе после Земли небесное тело, на поверхности которого обнаружены крупные стабильные резервуары жидкости – озера и моря. Внешне они напоминают водоемы на земном шаре, но заполнены жидким метаном.

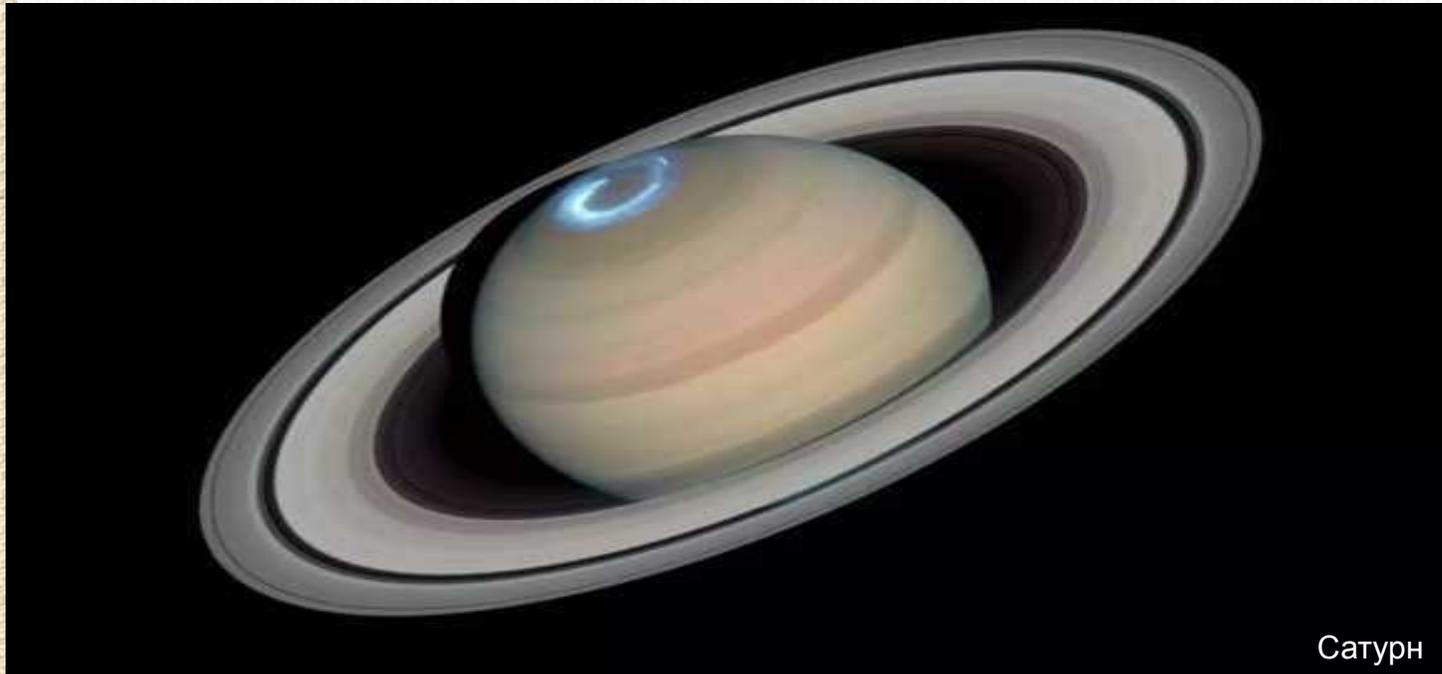
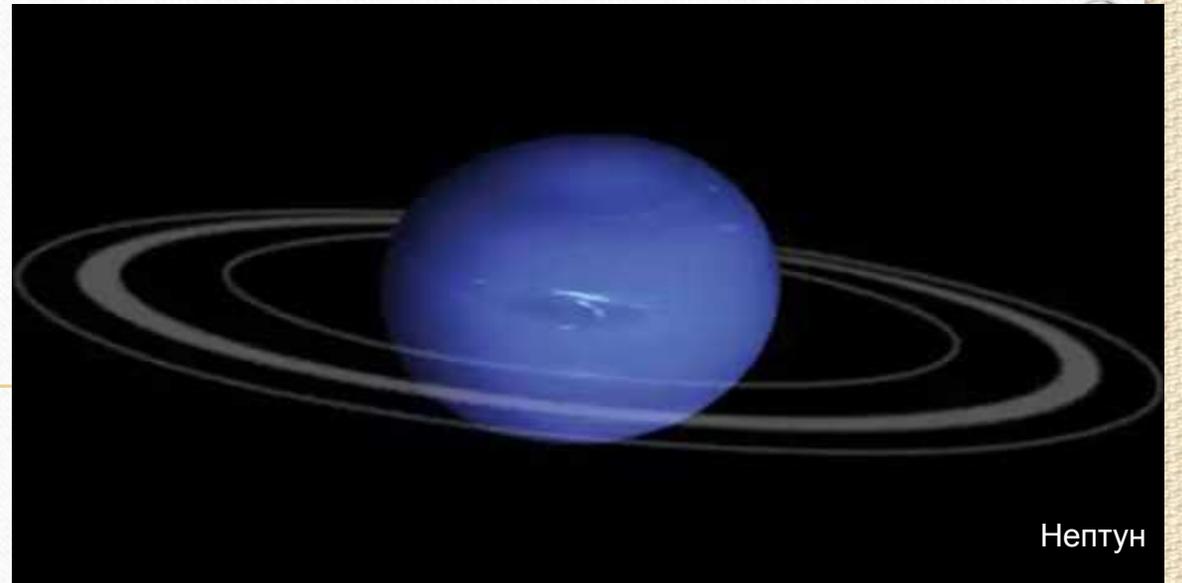


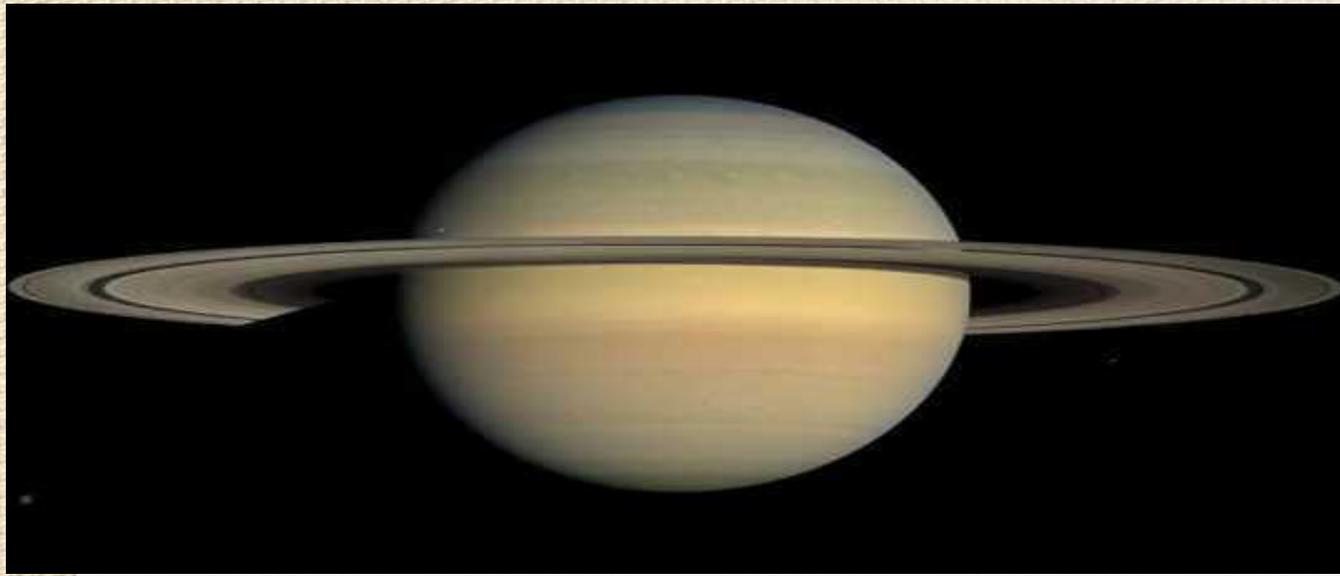
Фотография поверхности Титана, сделанная при спуске зонда "Гюйгенс"



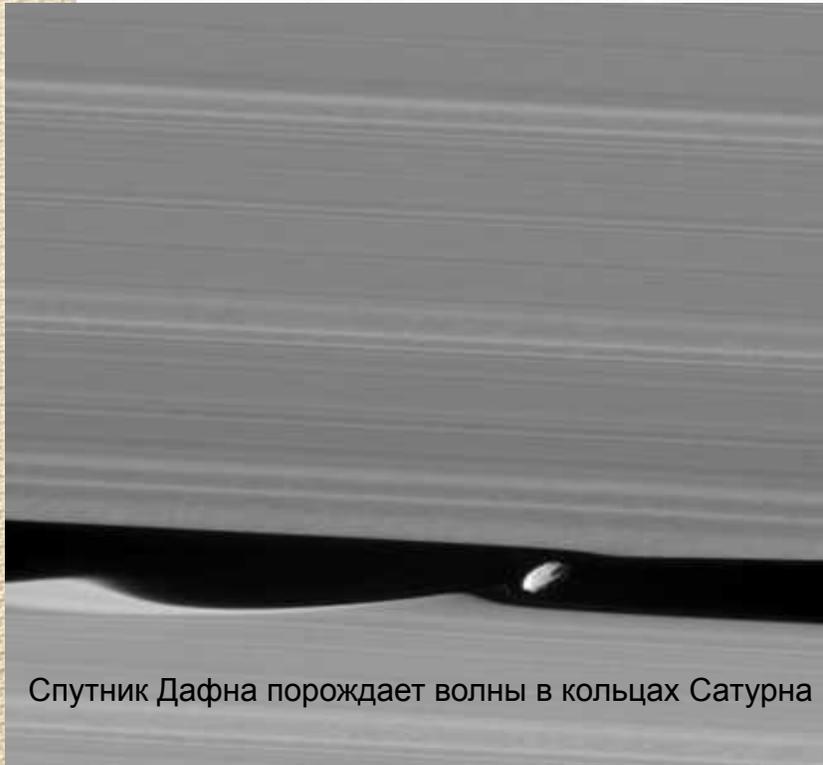
Поверхность Титана. Художественная концепция (НАСА-ЕСА)

Кроме множества спутников, все планеты-гиганты имеют кольца

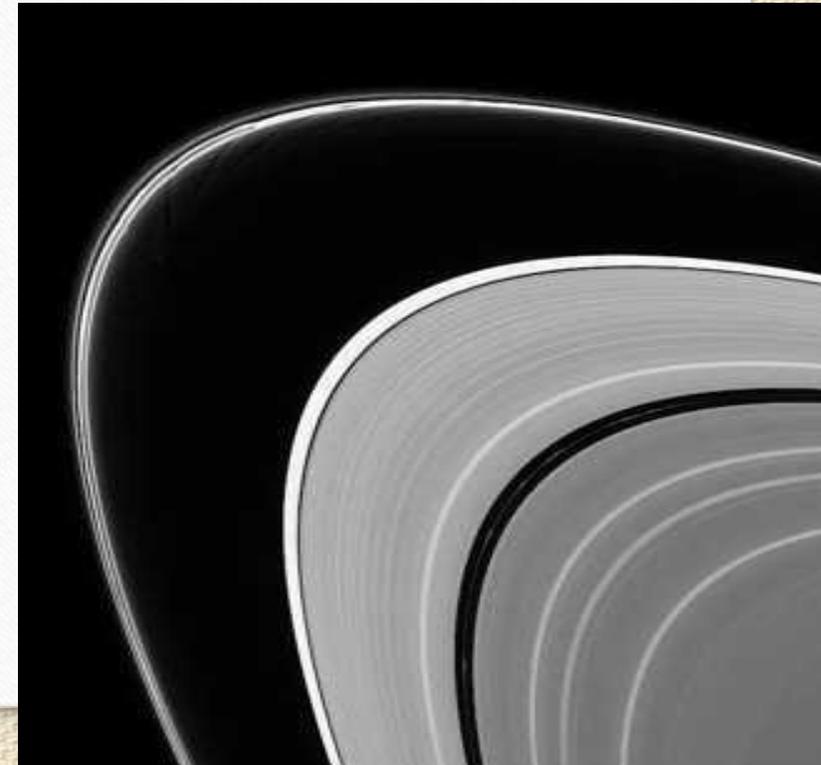
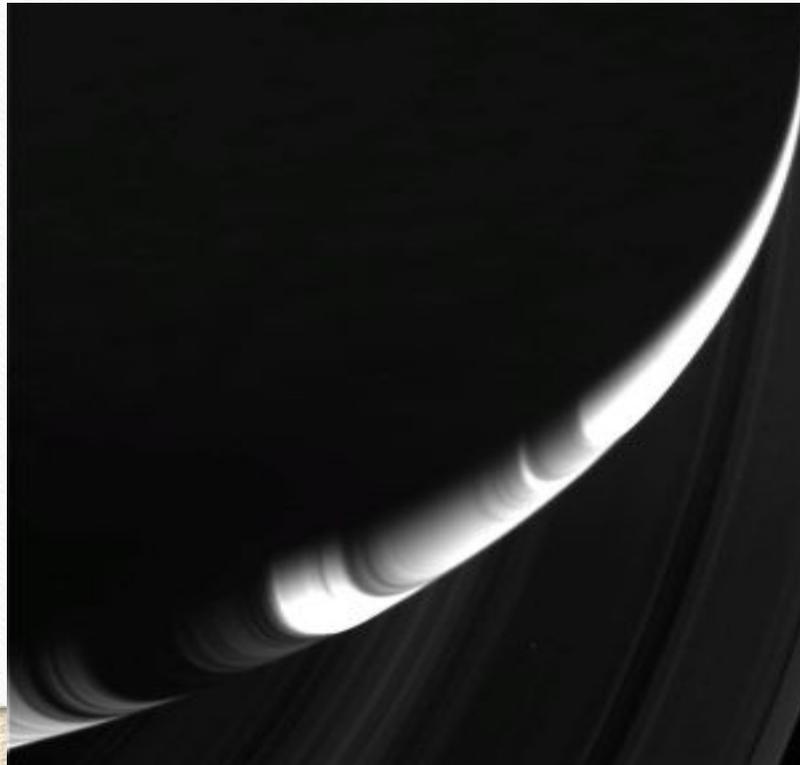




Кольца Сатурна представляют собой скопления небольших по размеру тел, крупных и мелких кусков, которые обращаются вокруг планеты по почти круговым орбитам.



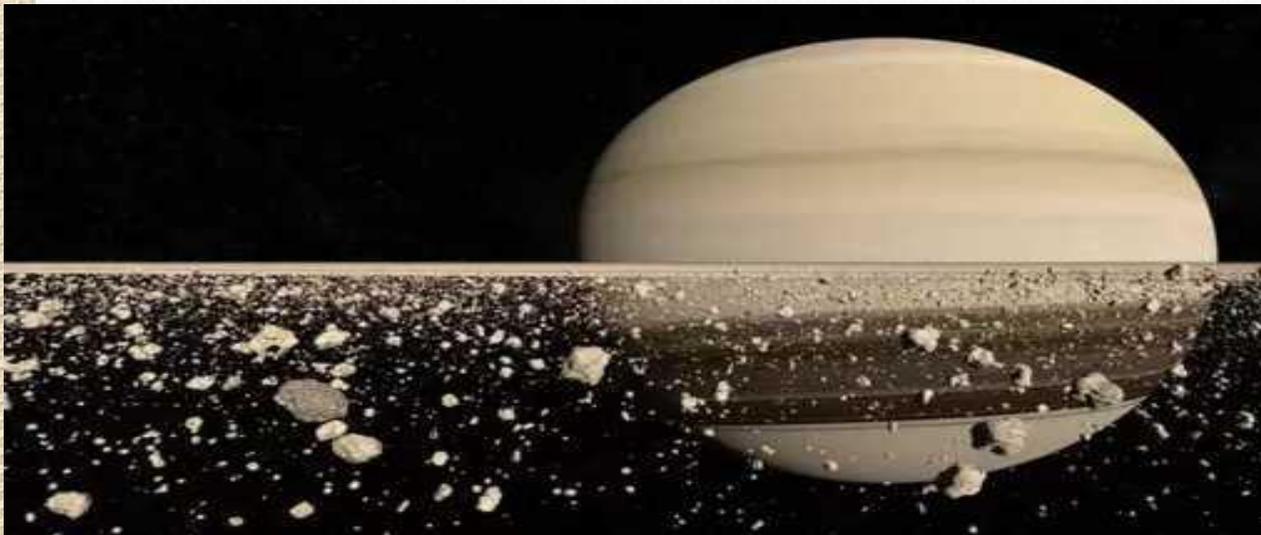
Спутник Дафна порождает волны в кольцах Сатурна





Кольца всех остальных планет-гигантов значительно уступают по размерам и яркости кольцам Сатурна.

На снимках заметно, что в кольцах Нептуна вещество распределено неравномерно и образует отдельные сгущения – **арки**.



Вероятнее всего, кольца планет-гигантов образовались из вещества существовавших прежде спутников, которые затем разрушились под действием приливных сил и при столкновениях между собой.

Таким образом, мы наблюдаем определенный этап эволюционного процесса, который происходит в течение уже нескольких миллиардов лет.

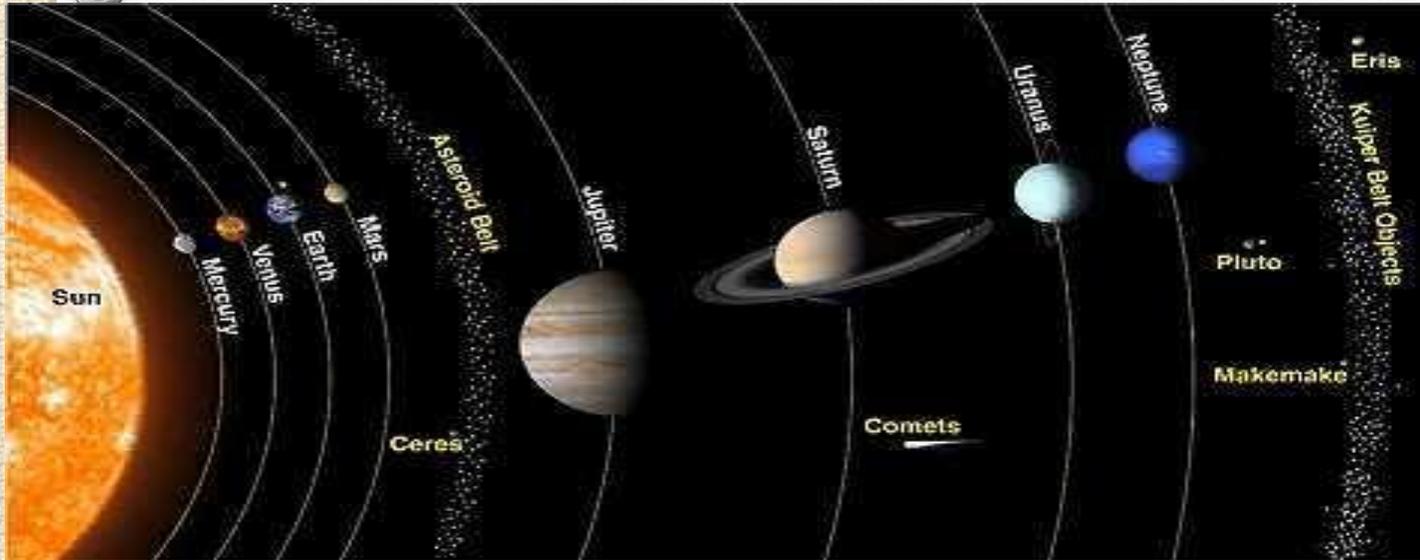
A large meteor streaks across the night sky, leaving a bright, glowing trail of orange and yellow light. Below the meteor, the Earth is visible from space, showing the blue oceans, white clouds, and brownish-green landmasses. The sun is visible on the right side of the frame, creating a bright glow and illuminating the scene.

# МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

---

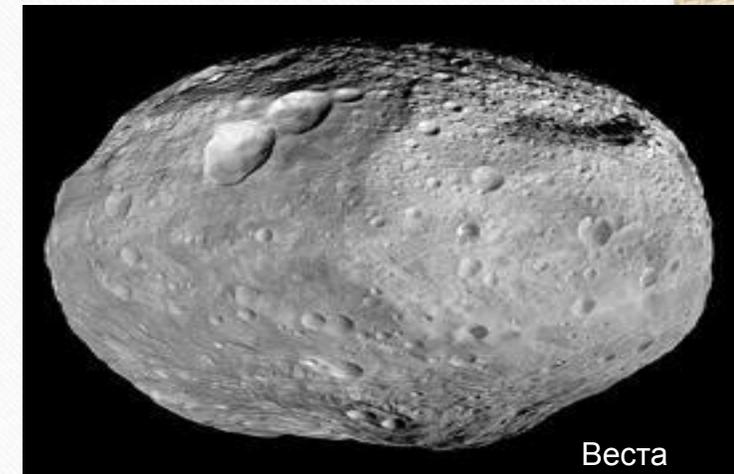
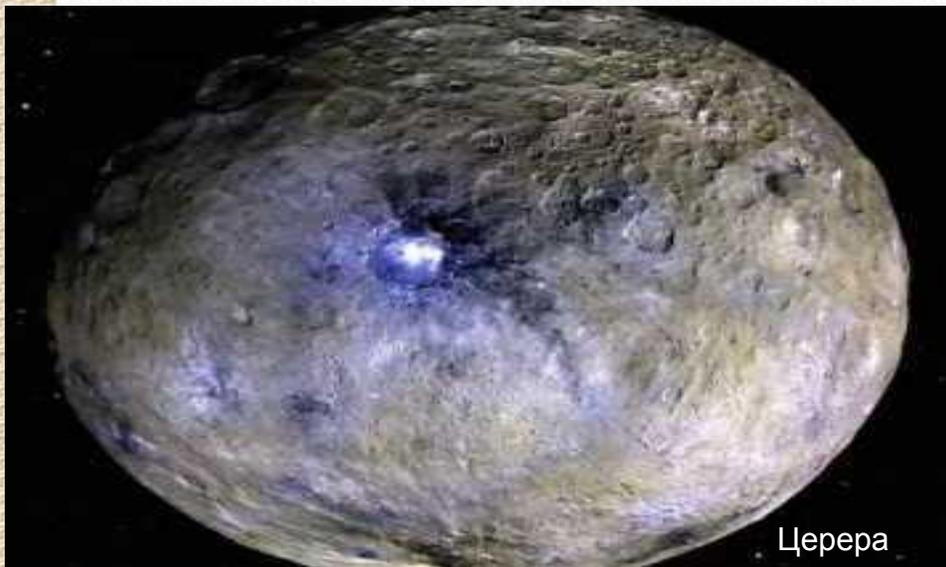
# Астероиды

Малые планеты или **астероиды** (звездоподобные)  
в телескоп видны как светящиеся точки, похожие на звезды.



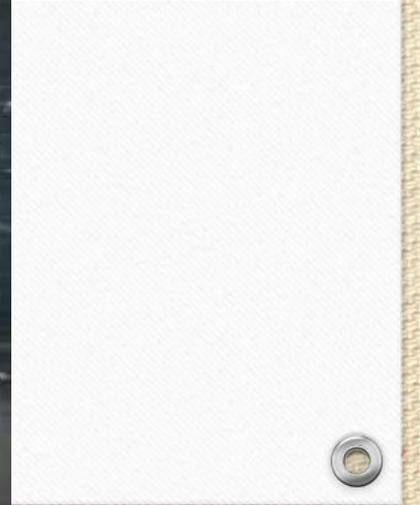
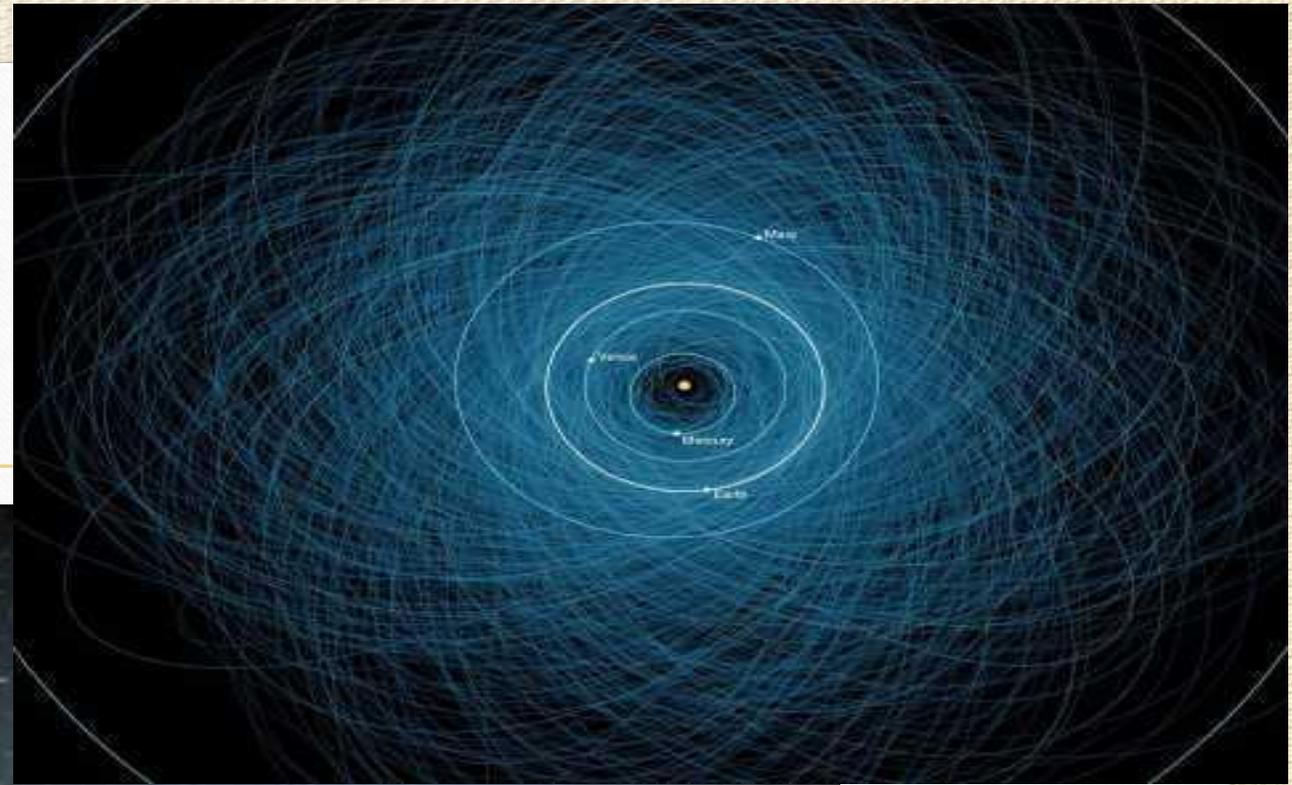
В 1801 г. после длительных поисков в промежутке между орбитами Марса и Юпитера была открыта малая планета, которая по традиции получила имя, взятое из древней мифологии, – **Церера** (диаметр около 1000 км).

Позднее были открыты **Паллада** (550 км) и **Веста** (530 км).



Малые планеты Церера, Паллада, Веста и другие, обнаруженные за последующие два столетия, обращаются в основном между орбитами Марса и Юпитера, образуя так называемый **пояс астероидов**.

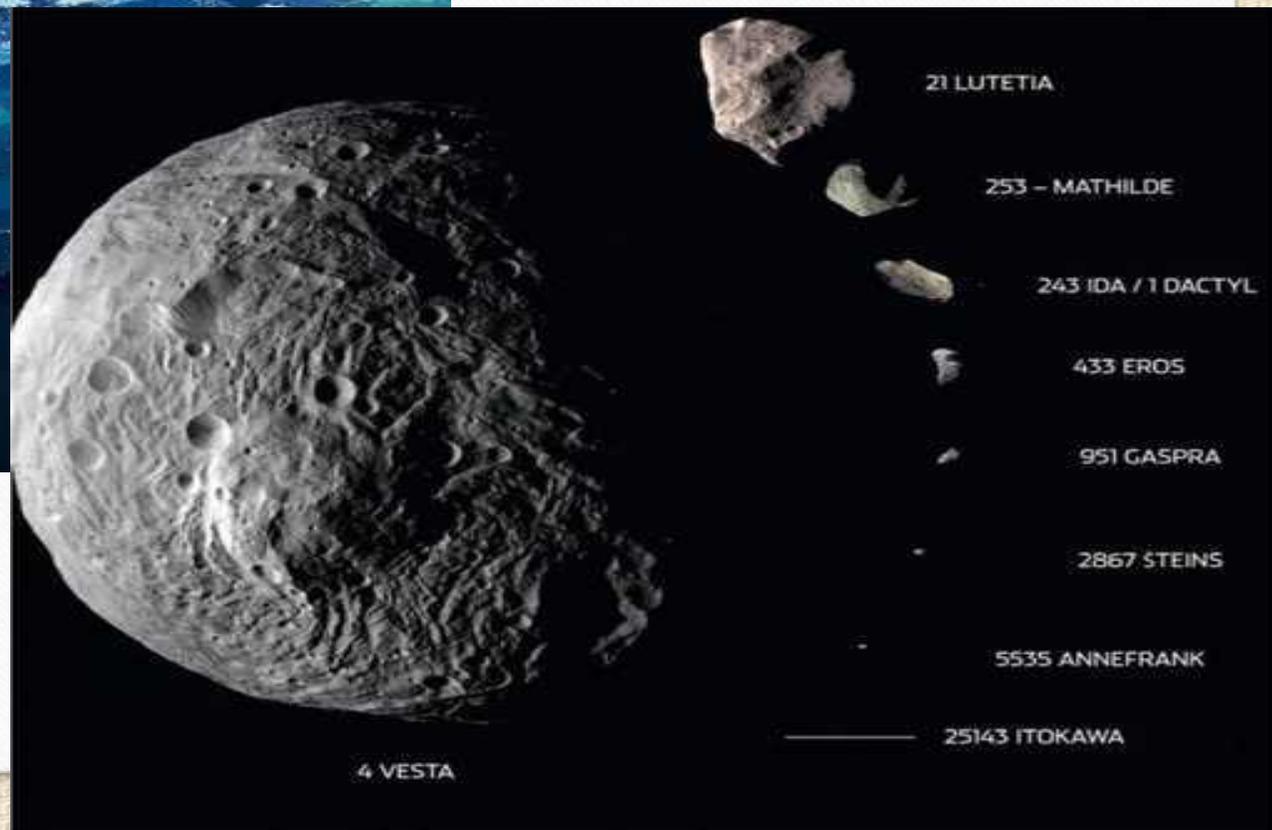
К концу XX в. в поясе астероидов открыто более 100 тыс. объектов.

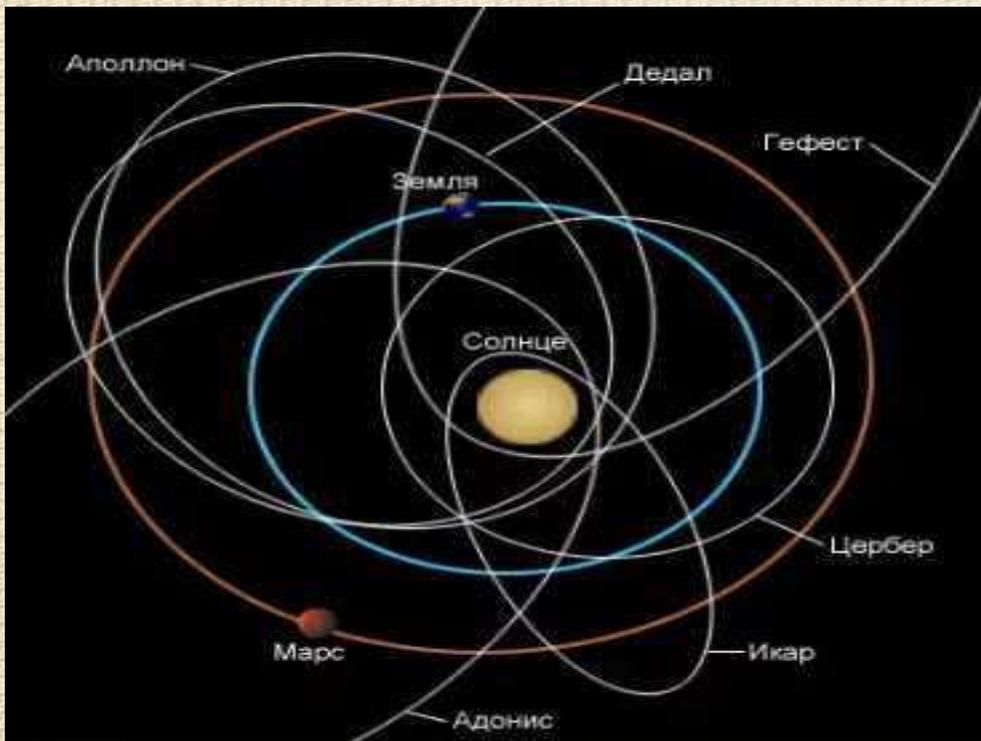




Наиболее крупные астероиды имеют шарообразную форму, а те, размер которых менее 100 км, в большинстве своем – неправильную.

Общая масса всех астероидов составляет не более 1/1000 массы Земли.



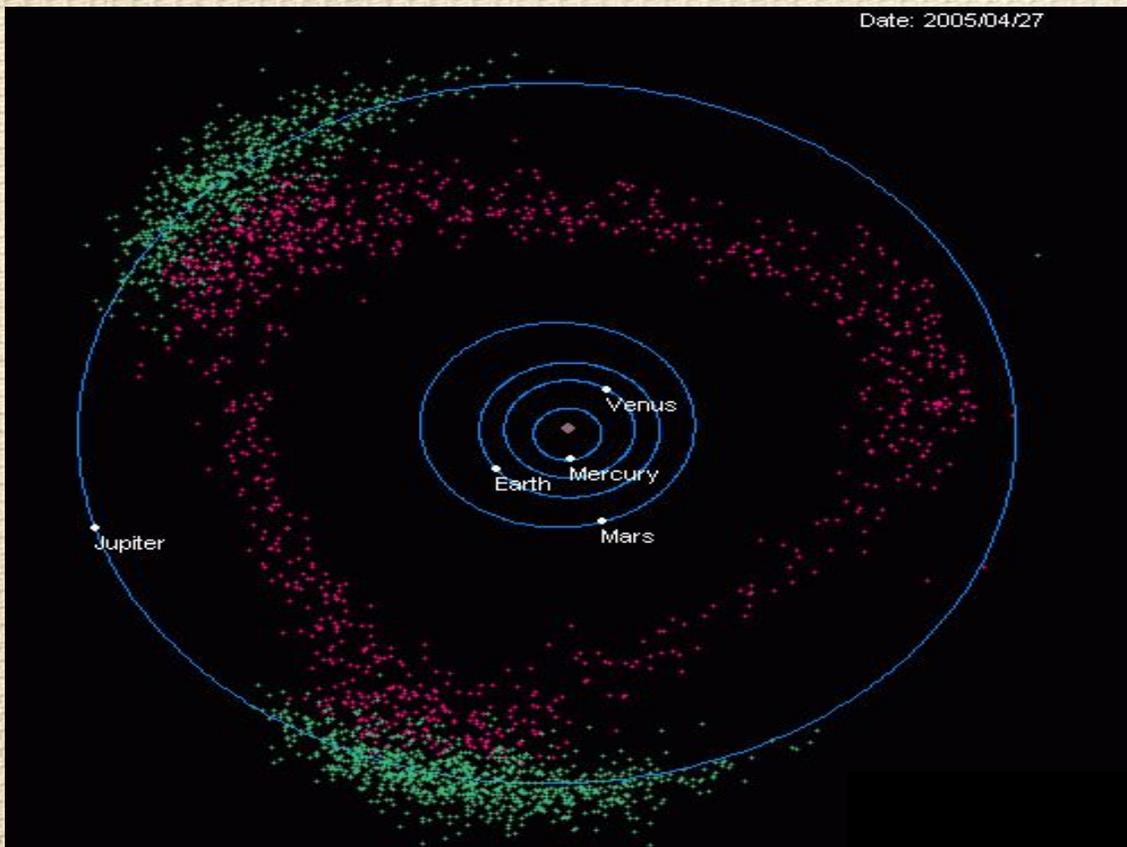


Эксцентриситеты орбит астероидов больше, чем эксцентриситеты орбит больших планет.

Если орбиты астероидов пересекаются с орбитой Земли, то они могут с ней столкнуться.



Кратер в Северной Аризоне (США) возник в результате удара большого астероида примерно 50000 лет назад.

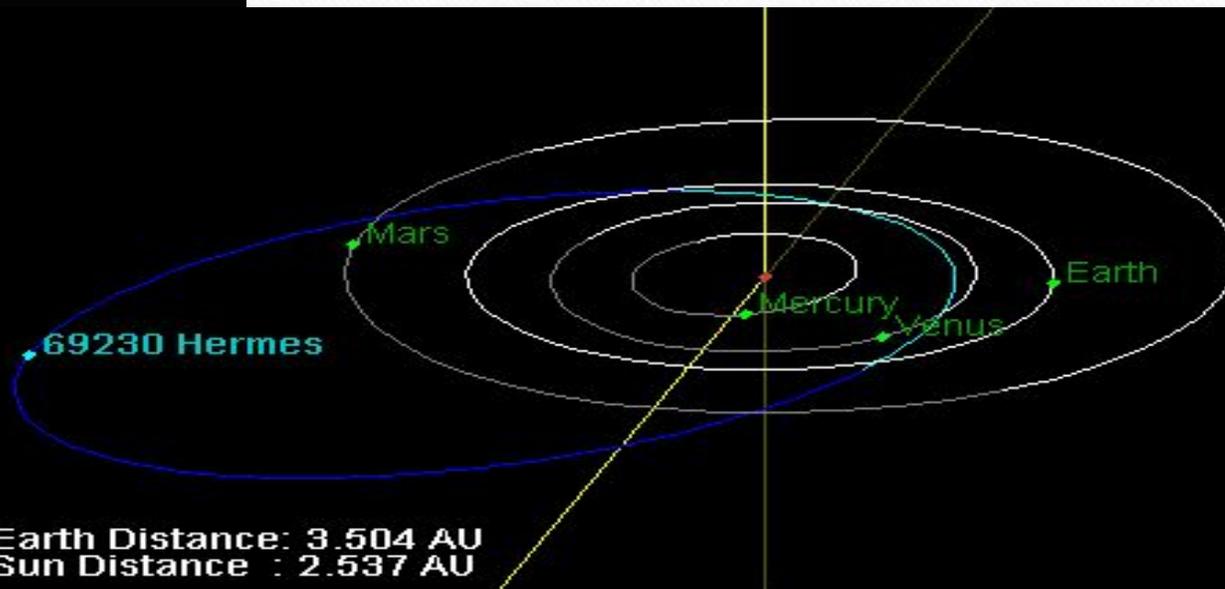


В афелии некоторые из астероидов оказываются ближе к Солнцу, чем Земля, а другие в перигелии – дальше, чем Юпитер и даже Сатурн.

Известно несколько астероидов, которые периодически проходят на расстоянии менее 1 млн км от нашей планеты.

В 1937 г. Гермес отделяло от Земли всего 800 тыс. км.

В 1989 г. астероид диаметром около 300 м прошел от Земли на расстоянии менее 650 000 км.





В окрестностях Земли каждый месяц пролетает несколько тел размером от 5 до 50 м.



К настоящему времени известно более 6000 объектов, периодически сближающихся с Землей.

Из них около 900 имеют размеры более 1 км, в том числе свыше 100 таких объектов считаются потенциально опасными для нашей планеты.



Опасения по поводу возможного столкновения таких тел с Землей значительно усилились после падения на Юпитер кометы Шумейкеров–Леви 9 в июле 1995 г.

Это стимулировало поиски и отслеживание комет и астероидов, которые пересекают орбиту Земли, а также разработку способов, которые позволят избежать столкновения (вплоть до уничтожения этих тел).





Место падения Тунгусского метеорита



Вывал деревьев в районе тунгусского события.  
По материалам экспедиции Л. Кулика, 1927

Падение в 1908 г. Тунгусского метеорита имело катастрофические последствия.

Взрыв было слышно на расстоянии более 1000 километров.

В посёлках и стойбищах в радиусе почти 300 километров ударной волной выбило стёкла.

Подземный толчок, спровоцированный метеоритом, был зафиксирован сейсмографическими станциями даже в Германии.

Взрыв с корнем вырвал вековые деревья на площади в 2,2 тыс. кв. км.

Световое и тепловое излучение, которым он сопровождался, привело к возникновению лесного пожара.

В тот день на огромной территории нашей планеты ночь так и не наступила.

В течение пяти дней на планете бушевали самые настоящие магнитные бури.



Астероид Гаспра (размеры 19×12×11 км)

У астероида Ида (размеры 56×28×28 км) обнаружен спутник (Дактиль) размером около 1,5 км, который, находясь от его центра на расстоянии около 85 км, обращается с периодом примерно 24 ч.

С помощью космических аппаратов впервые удалось с расстояния в несколько десятков тысяч километров получить изображения малых планет.

Породы, составляющие их поверхность, оказались аналогичны тем, которые распространены на Земле и Луне.

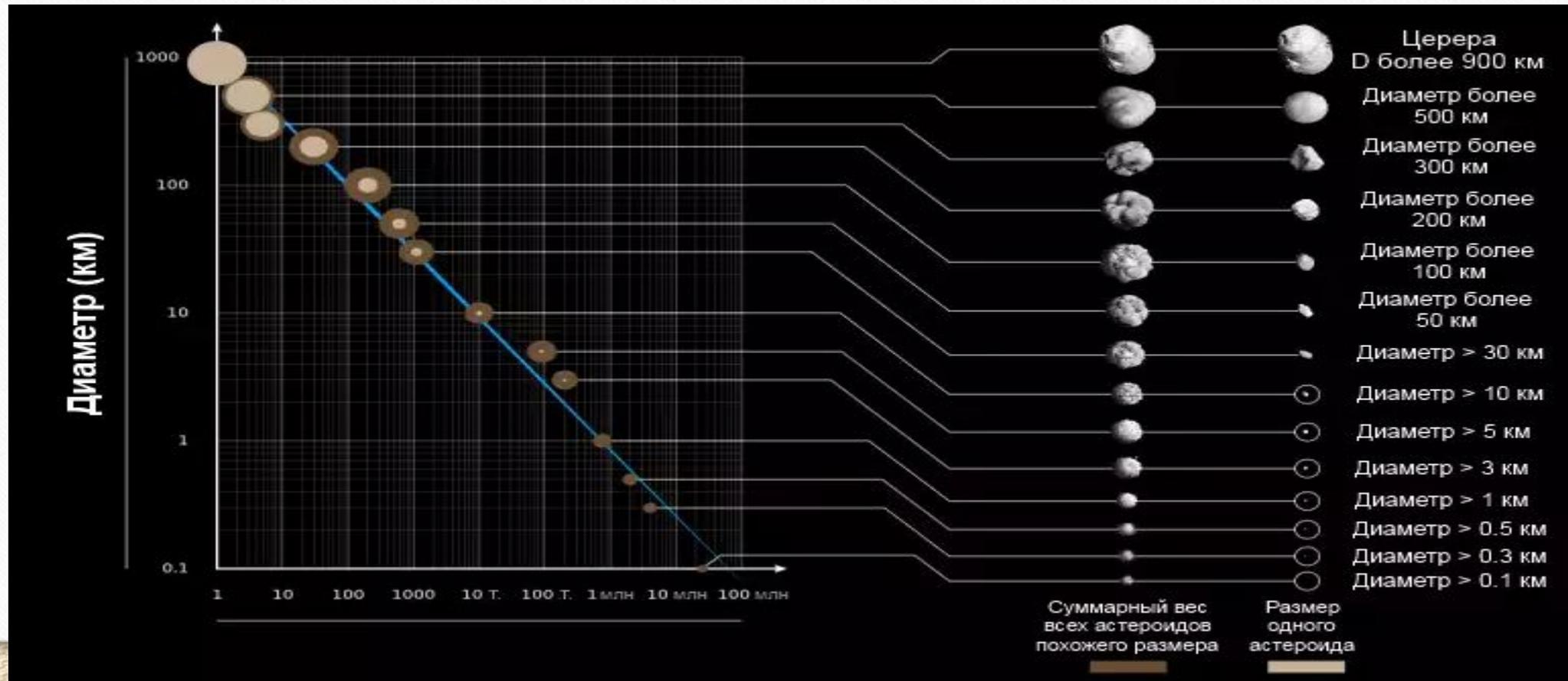
Небольшие астероиды имеют неправильную форму, а их поверхность испещрена кратерами.



Постоянное совершенствование телескопов, а также использование современных приемников излучения (ПЗС- матрицы) способствовало резкому увеличению числа вновь открываемых астероидов.

К концу первого десятилетия XXI века было зарегистрировано более 400 тысяч астероидов, около 180 тысяч из них получили порядковые номера, поскольку для них были надежно вычислены орбиты.

Собственные имена получили почти 15 тысяч астероидов.



---

# Карликовые планеты



В 1930 г. за орбитой Нептуна на расстоянии около 40 а. е. был открыт **Плутон**.

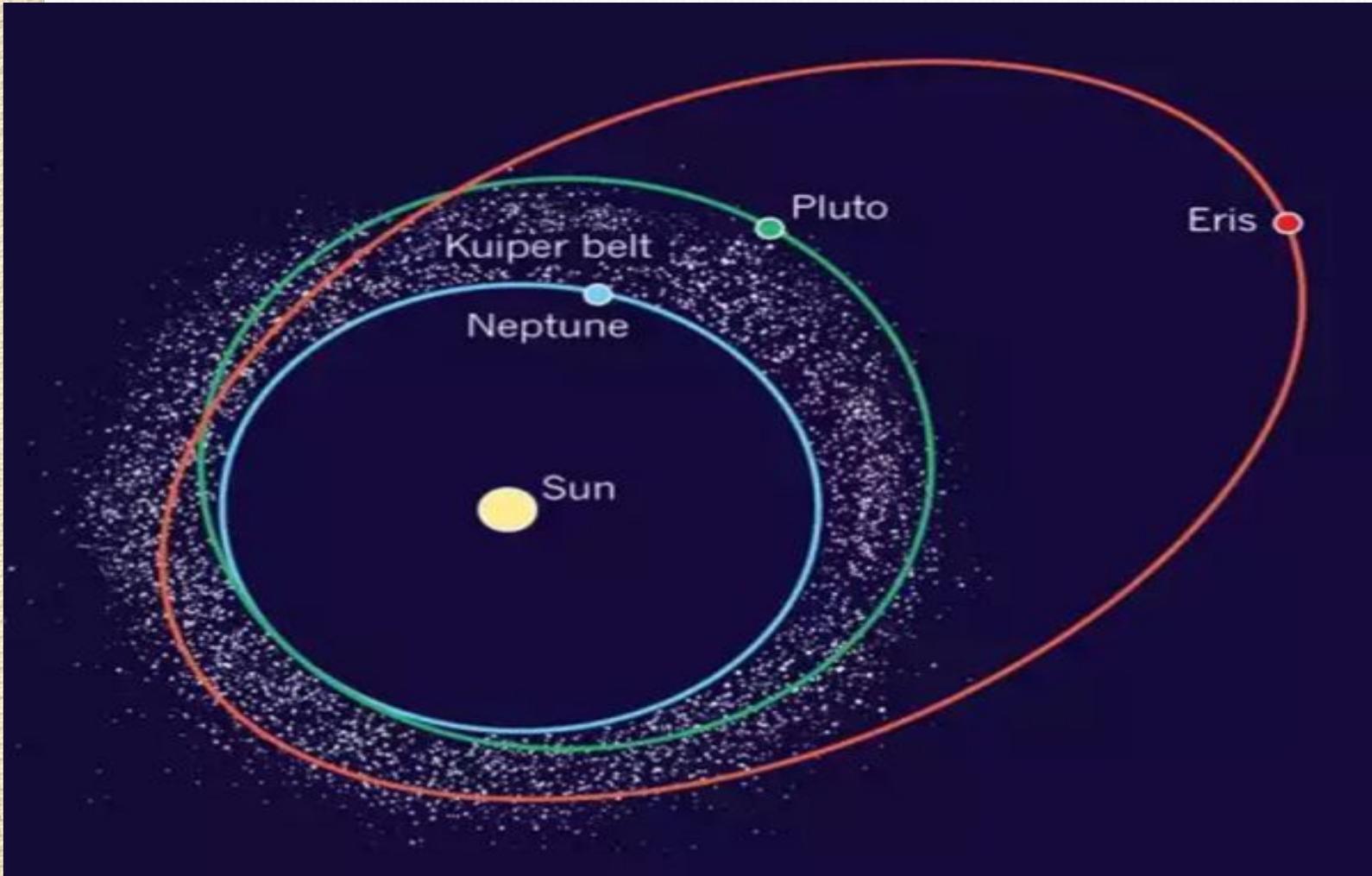
По размерам и массе Плутон меньше Луны, а по плотности существенно отличается от планет обеих групп.

В 1978 г. у него был обнаружен очень крупный спутник **Харон**.

---



Систематические поиски других далеких объектов привели к открытию множества малых тел между орбитами Юпитера и Нептуна.



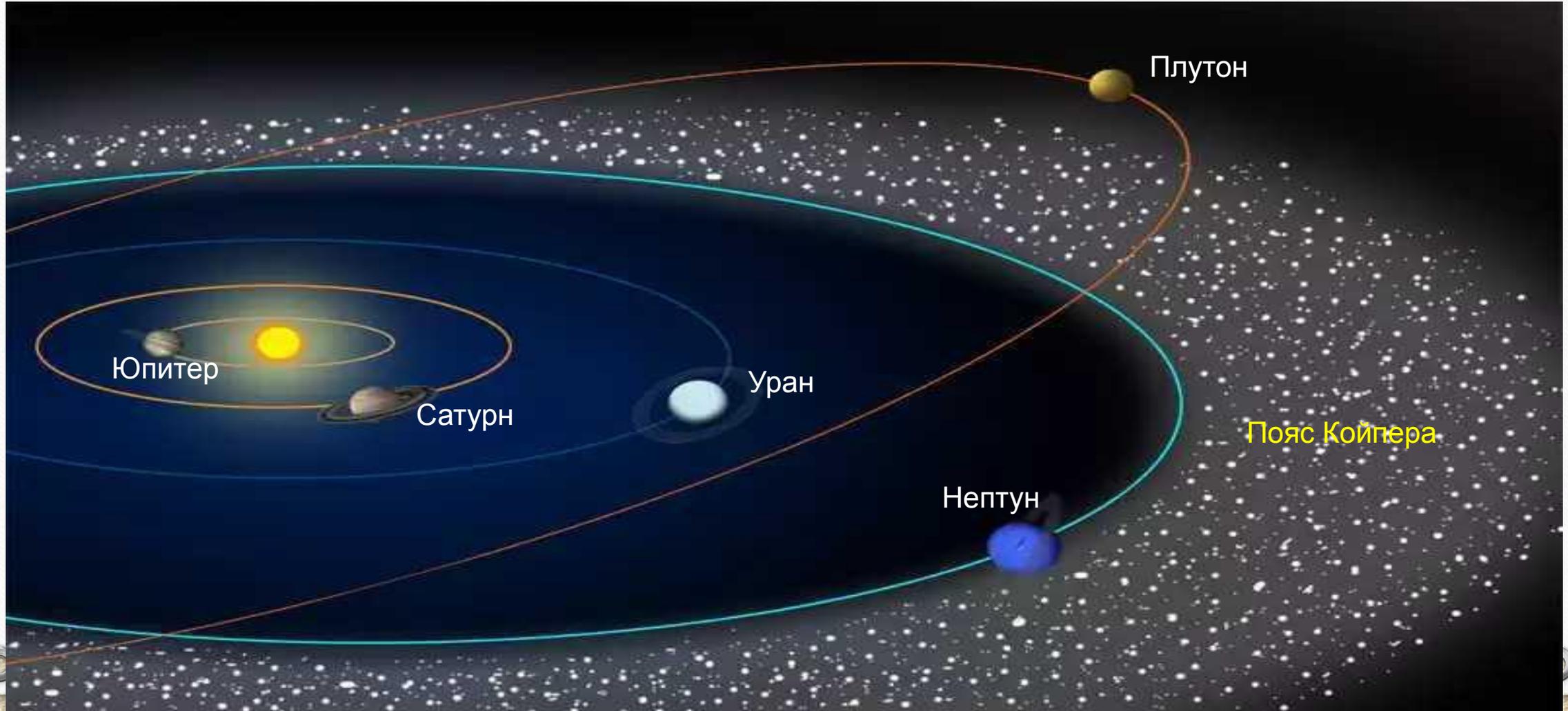
В 1992 г. за орбитой Нептуна был открыт первый объект диаметром около 280 км.

К настоящему времени известно уже около 1500 тел, находящихся в этой части Солнечной системы.

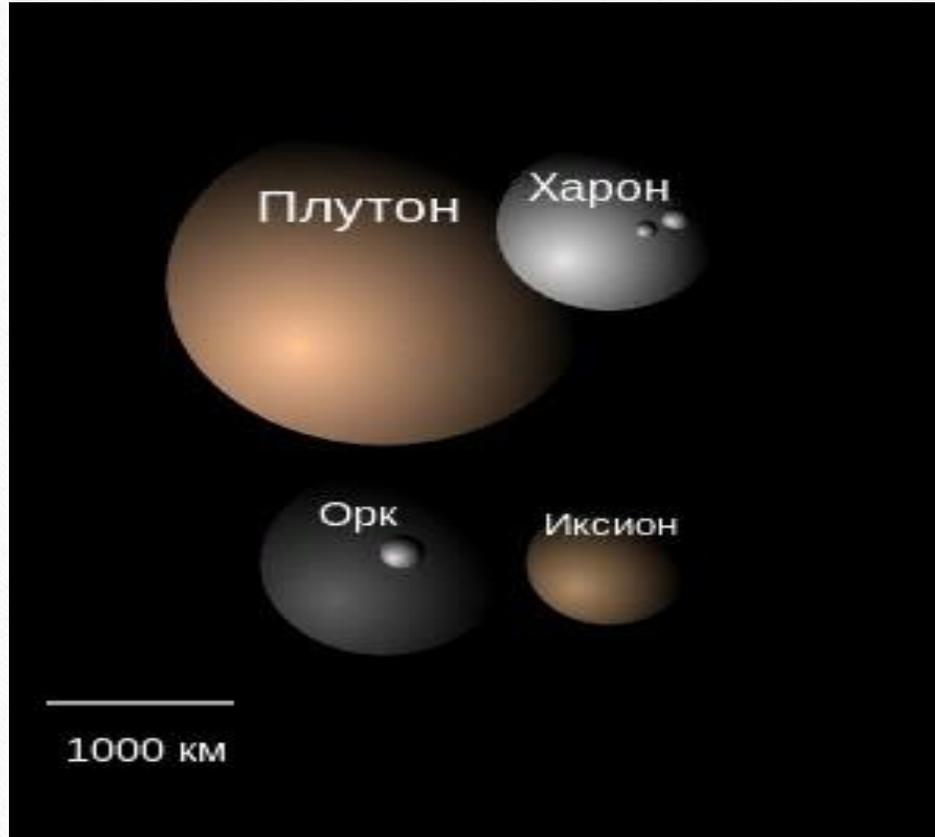
Диаметры большинства из них составляют от 100 до 1000 км.

Некоторые, как и Плутон, имеют спутники.

Подтвердилось высказанное американским астрономом Дж.Койпером в середине прошлого века предположение о существовании за орбитой Нептуна на расстоянии 35-50 а.е. от Солнца еще одного пояса малых тел, которые оказывают влияние на движение Плутона.



24 августа 2006 г. решением XXVI Генеральной ассамблеи Международного астрономического союза (МАС) было принято решение ввести новый класс объектов Солнечной системы – планета-карлик.



Планета-карлик должна удовлетворять следующим условиям:

- обращается вокруг Солнца;
- не является спутником планеты;
- обладает достаточной массой, чтобы сила тяжести превосходила сопротивление вещества, и поэтому тело планеты пребывало в состоянии гидростатического равновесия (а значит, имело форму, близкую к сферической);
- обладает не настолько большой массой, чтобы быть способной расчистить окрестности своей орбиты.

Плутон был «лишен звания» планеты.

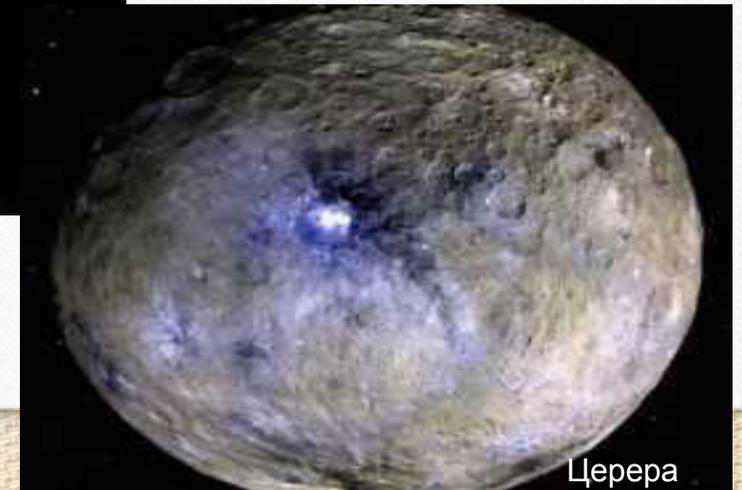


**Плутон** стал прототипом планет-карликов.

Наиболее крупным объектом этого класса стала **Эрида** (диаметр 2400 км).

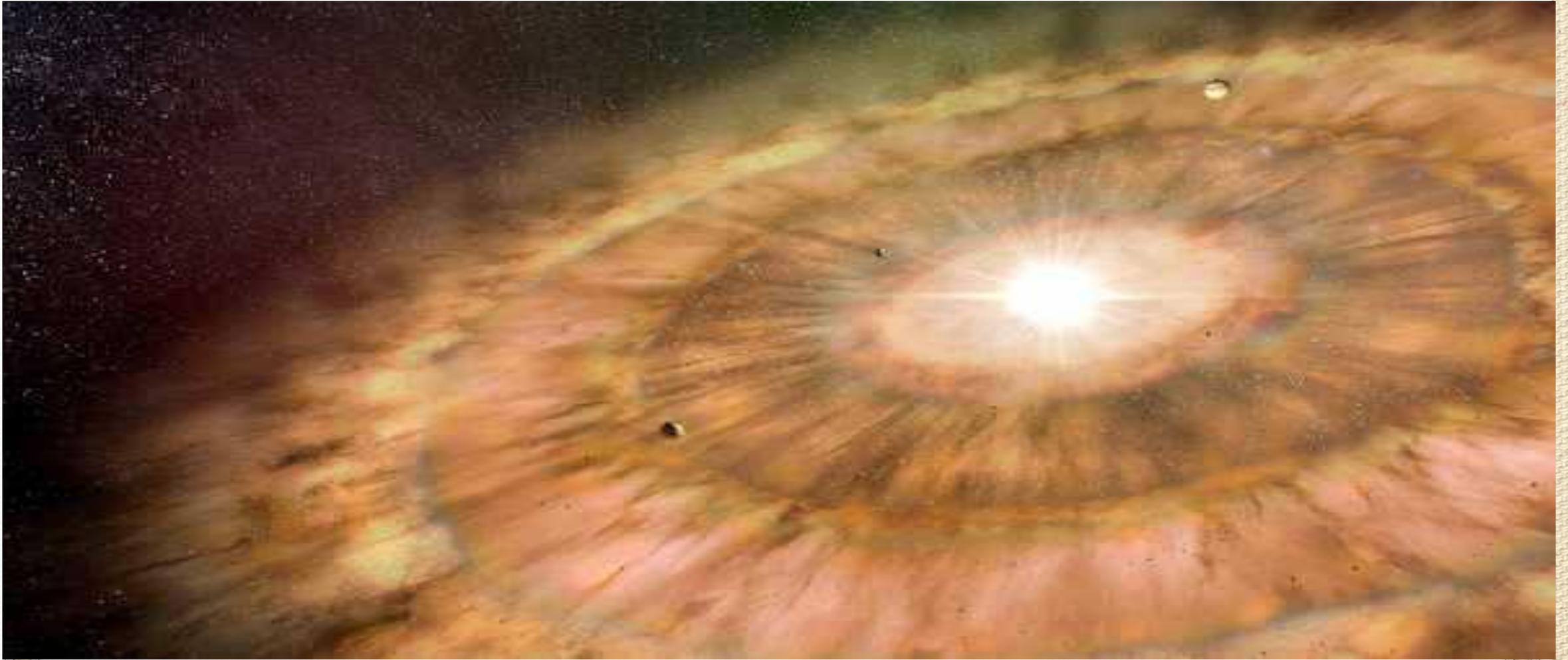
Карликовые планеты – **Хаумеа** и **Макемаке** – также относятся к поясу Койпера.

В число планет-карликов включена **Церера**, которая прежде считалась крупнейшим из астероидов.



Церера

Возможно, пояс Койпера является остатком того самого протопланетного облака, из которого формировалась Солнечная система.



Протопланетное облако при формировании звезды и планет в представлении художника

---

# КОМЕТЫ



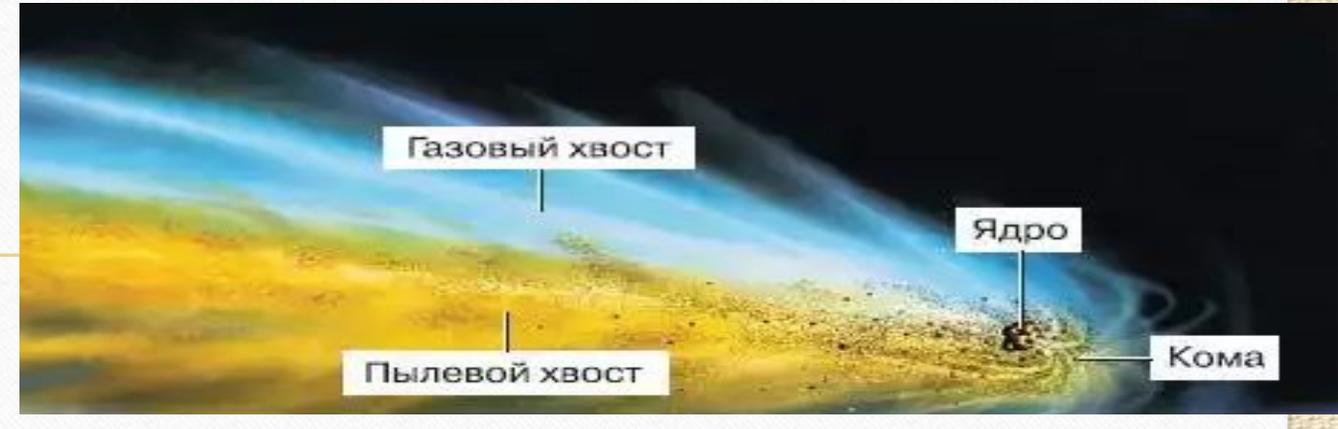
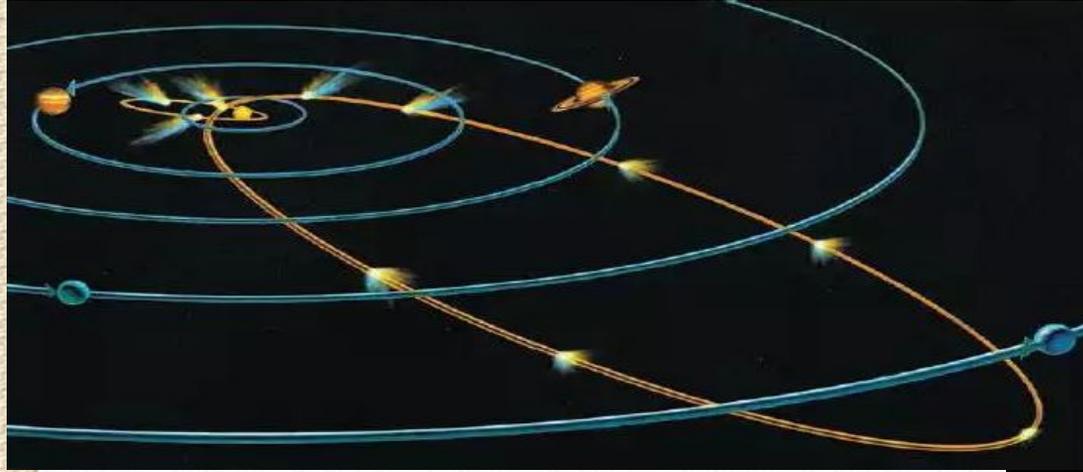
Из-за своего необычного вида (наличие хвоста, который может простирается на несколько созвездий) кометы с древних времен обращали на себя внимание людей, даже далеких от астрономии.

За все время наблюдений было замечено и описано свыше 2000 комет.



Вдали от Солнца кометы имеют вид очень слабых туманных пятен.

По мере приближения к нему у кометы появляется и постепенно увеличивается хвост, направленный в противоположную от Солнца сторону.



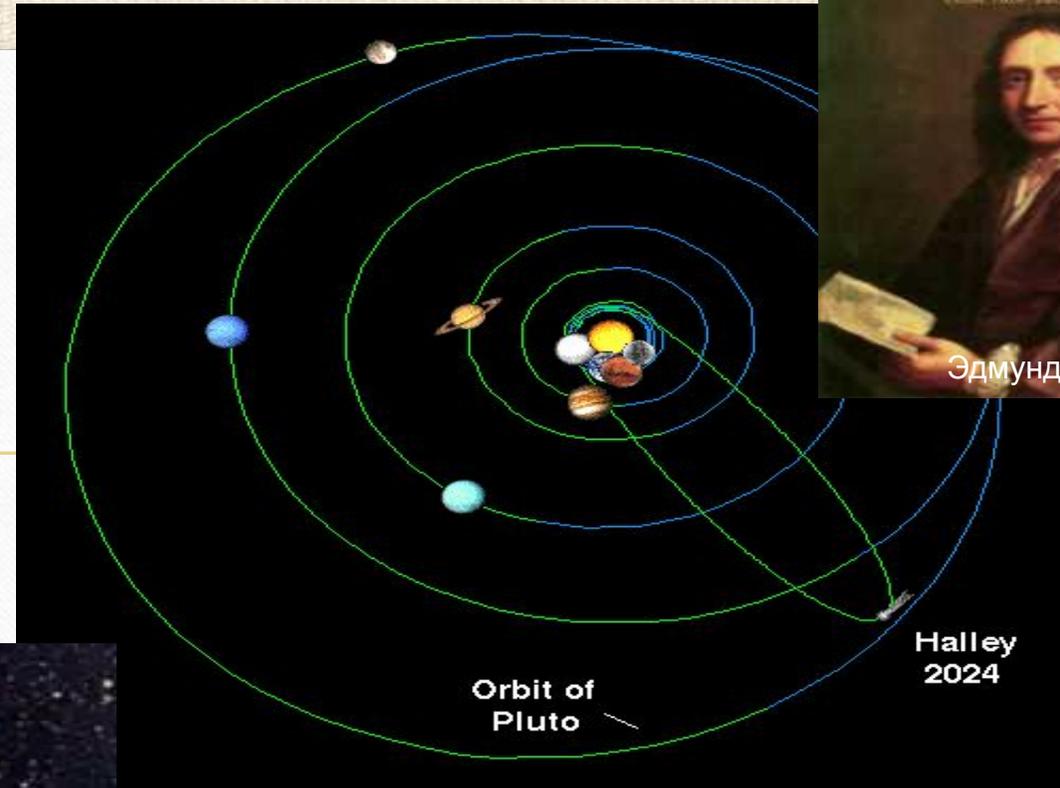
У наиболее ярких комет хорошо заметны все составные части: **голова (кома и ядро)** и **хвост**.

При удалении от Солнца яркость кометы и ее хвост уменьшаются. Она снова превращается в туманное пятно, а затем ослабевает настолько, что становится недоступной для наблюдений.



В 1680 г. **Ньютон**, наблюдая комету, вычислил её орбиту и убедился, что она, подобно планетам, обращается вокруг Солнца.

Английский ученый **Эдмунд Галлей** (1656–1742) вычислил орбиты нескольких комет, появлявшихся ранее, и обнаружил, что орбиты комет, наблюдавшихся в 1531, 1607 и 1682 гг., очень похожи.

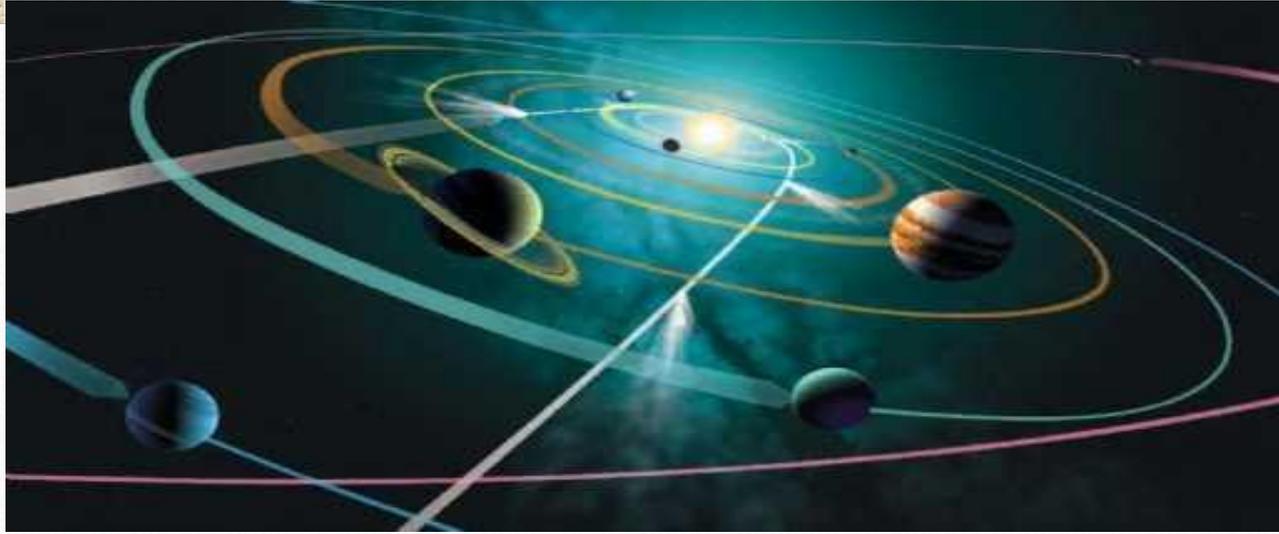


Эдмунд Галлей

Галлей предположил, что это была одна и та же комета, периодически возвращающаяся к Солнцу, и впервые предсказал ее очередное появление.

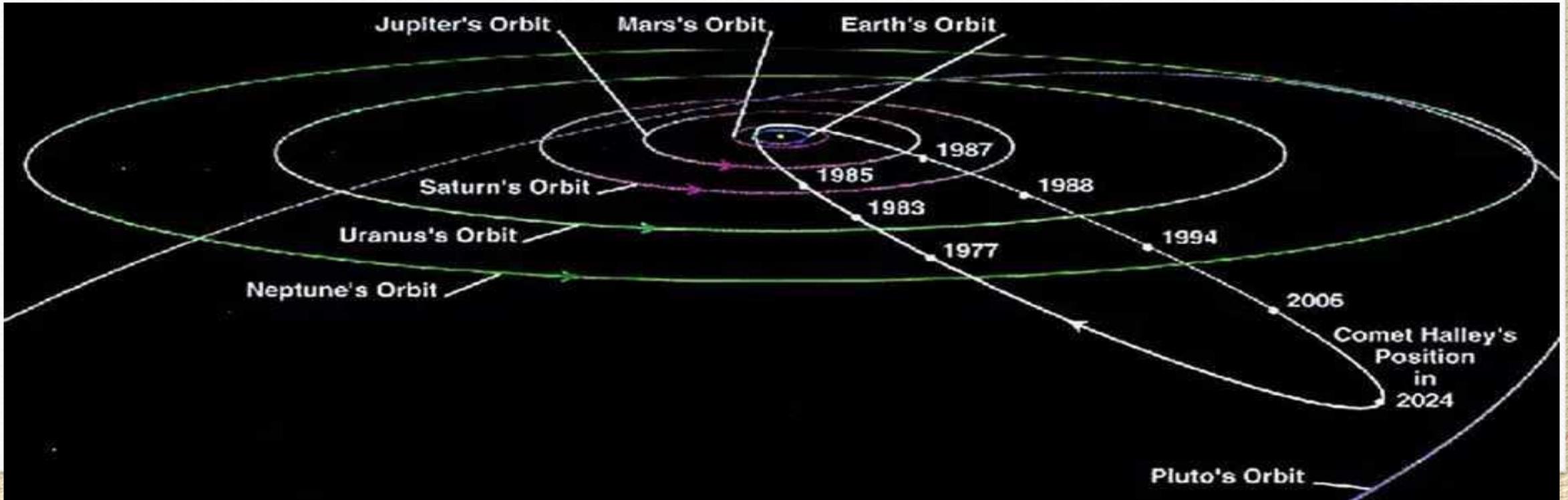
В 1756 г. (уже после смерти ученого) комета действительно появилась и получила название **кометы Галлея**.





Комета Галлея в афелии уходит за орбиту Нептуна, но затем вновь возвращается в окрестности Солнца, имея период обращения около 76 лет.

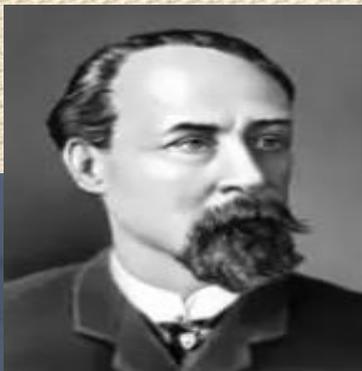
Со времен Ньютона и Галлея вычислены орбиты более чем 700 комет.



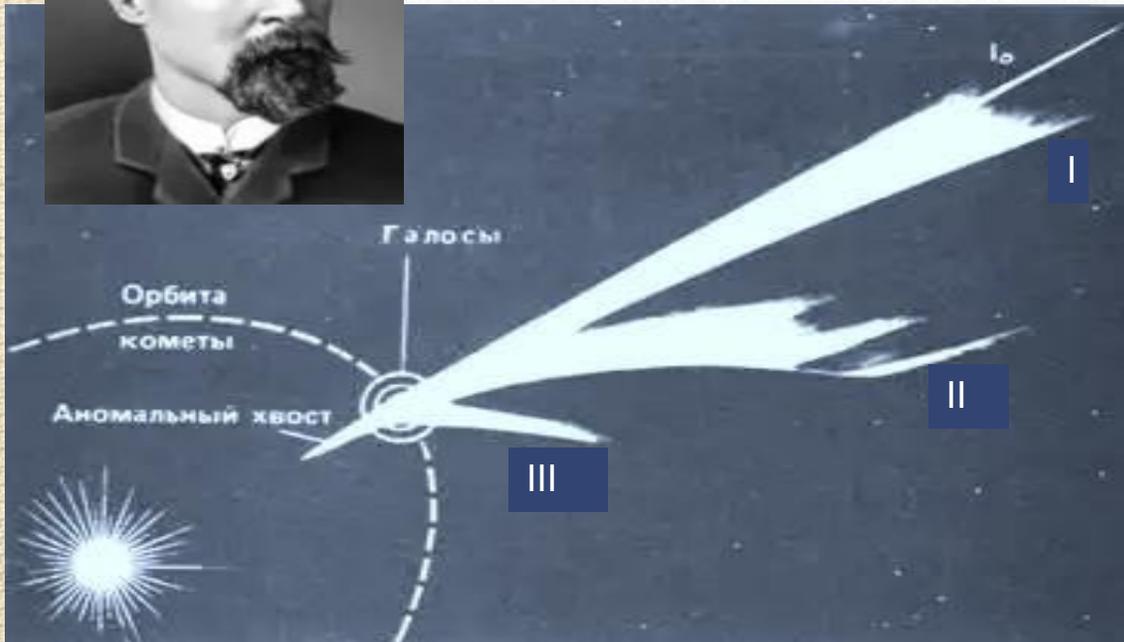
**Короткопериодические кометы** (периоды обращения от трех до десяти лет), двигаясь по вытянутым эллиптическим орбитам, удаляются от Солнца на 5–8 а.е.

**Долгопериодические кометы**, подобные комете Галлея, уходят в афелии за пределы планетной системы.





Иногда у кометы образуется несколько хвостов различной длины и формы.



Их классификация была предложена выдающимся русским ученым **Федором Александровичем Бредихиным** (1831-1904):

**I тип** – длинный хвост, направленный почти прямо от Солнца;

**II тип** – изогнутый и отклоненный от этого направления;

**III тип** – короткий, почти прямой и отклоненный

**Плазменные хвосты I типа** образуют ионы атомов и молекул.

**Пылевые хвосты II типа** составляют непрерывно выделяющиеся из ядра пылинки.

**Пылевые хвосты III типа** образуют вылетевшие из ядра целые облака пылинок.



Комета Хейли–Боппа



Несмотря на внушительные размеры хвоста, который может превышать в длину 100 млн км, и головы, которая по диаметру может превосходить Солнце, практически всё вещество кометы сосредоточено в небольшом ядре.

Ядро кометы Галлея имеет длину всего 14 км, а ширину и толщину вдвое меньше.

Его удалось увидеть только с космических аппаратов.

Оно представляет собой **снежно-ледяную глыбу** с примесью замерзших газов и вкраплением мелких твердых частиц различного химического состава.



Ядро кометы Галлея

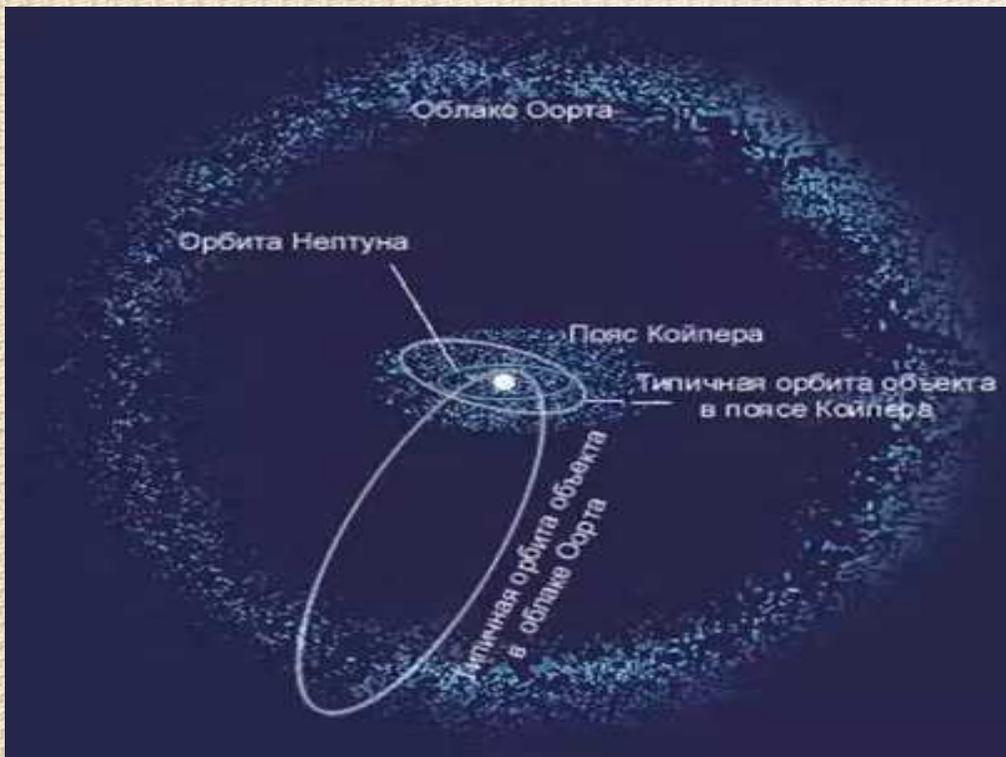


«Джотто»

В 1986 году КА «Вега-2» прошел на расстоянии 8000 км от ядра кометы Галлея, а КА «Джотто» – на расстоянии 600 км.

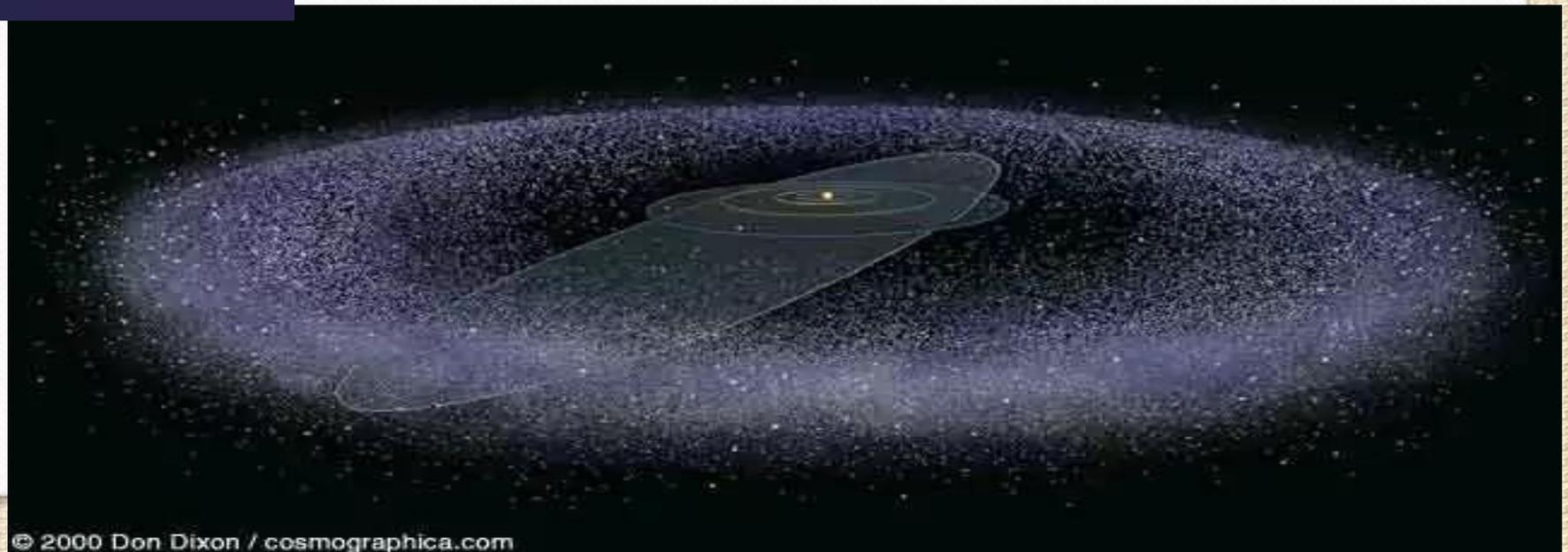


«Вега»



Предполагается, что общее число комет в Солнечной системе превышает десятки миллиардов.

Считается, что Солнечная система окружена одним или даже несколькими облаками комет, которые движутся вокруг Солнца на расстояниях, которые в тысячи и десятки тысяч раз больше, чем расстояние до самой дальней планеты Нептун.



# СОЛНЦЕ, СОСТАВ И ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ



---

# Энергия и температура Солнца

Солнце – центральное тело Солнечной системы –  
является типичным представителем звезд,  
наиболее распространенных во Вселенной тел.

Масса Солнца составляет  $2 \cdot 10^{30}$  кг.

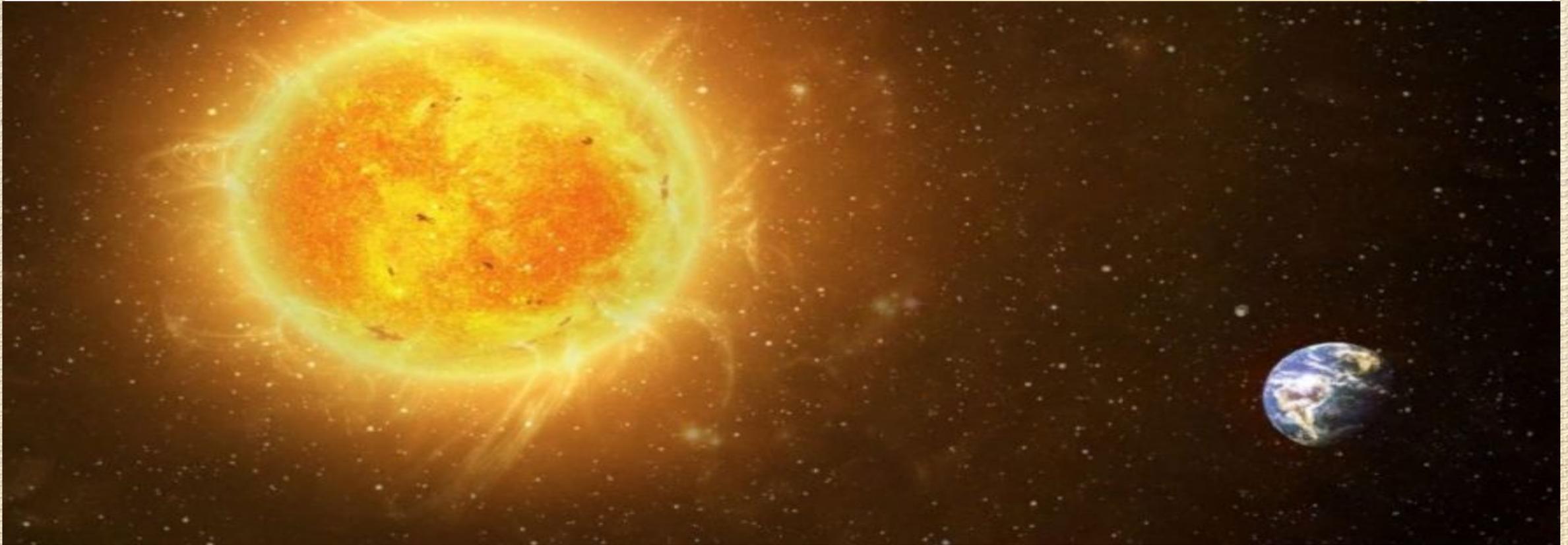


Как и многие другие звезды, Солнце представляет собою огромный шар, который состоит из водородно-гелиевой плазмы и находится в равновесии в поле собственного тяготения.



Солнце излучает в космическое пространство колоссальный по мощности поток излучения, который в значительной мере определяет физические условия на Земле и других планетах, а также в межпланетном пространстве.

Земля получает всего лишь **одну двухмиллиардную долю** солнечного излучения. Однако и этого достаточно, чтобы приводить в движение огромные массы воздуха в земной атмосфере, управлять погодой и климатом на земном шаре.

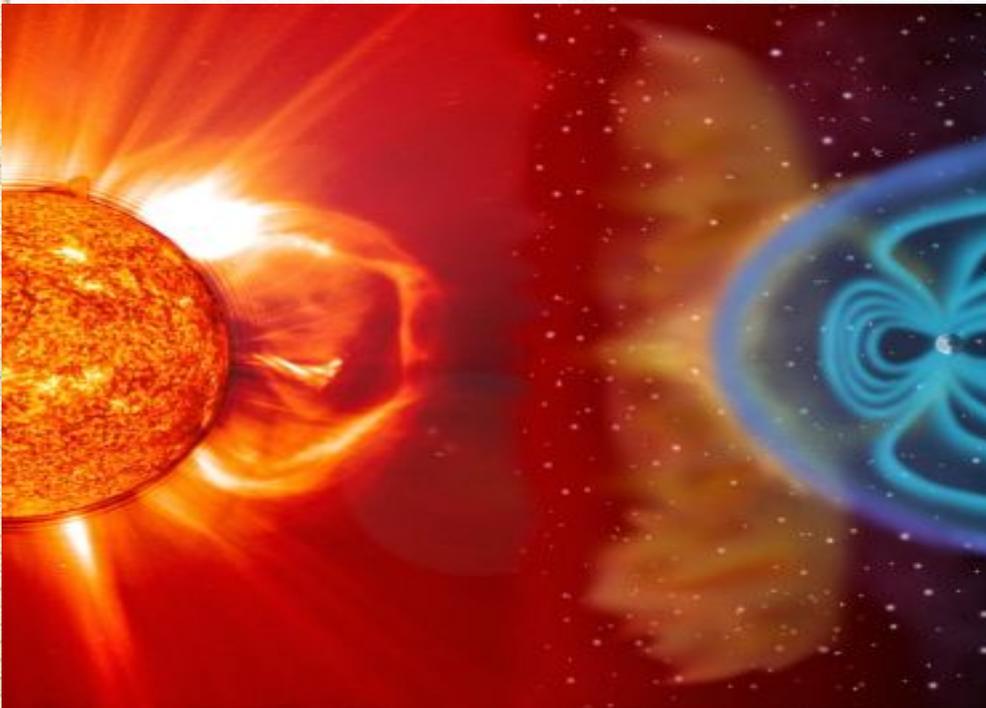




Количество приходящей от Солнца на Землю энергии принято характеризовать **солнечной постоянной**.

**Солнечная постоянная** – поток солнечного излучения, который приходит на поверхность площадью  $1 \text{ м}^2$ , расположенную за пределами атмосферы перпендикулярно солнечным лучам на среднем расстоянии Земли от Солнца (1 а.е.).

---



Солнечная постоянная равна  $1,37 \text{ кВт/м}^2$  .

Умножив солнечную постоянную на площадь поверхности шара, радиус которого 1 а.е., определим полную мощность излучения Солнца, его **светимость**, которая составляет

$$L = 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт.}$$

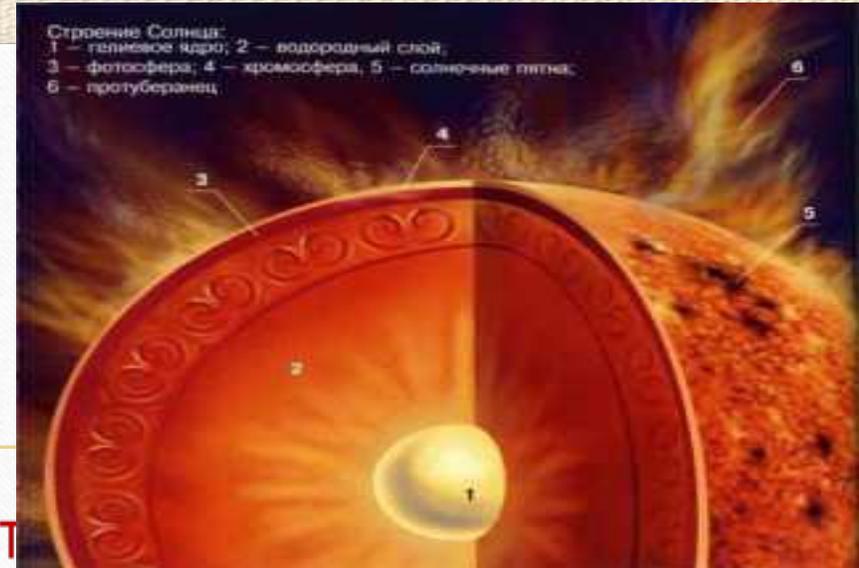
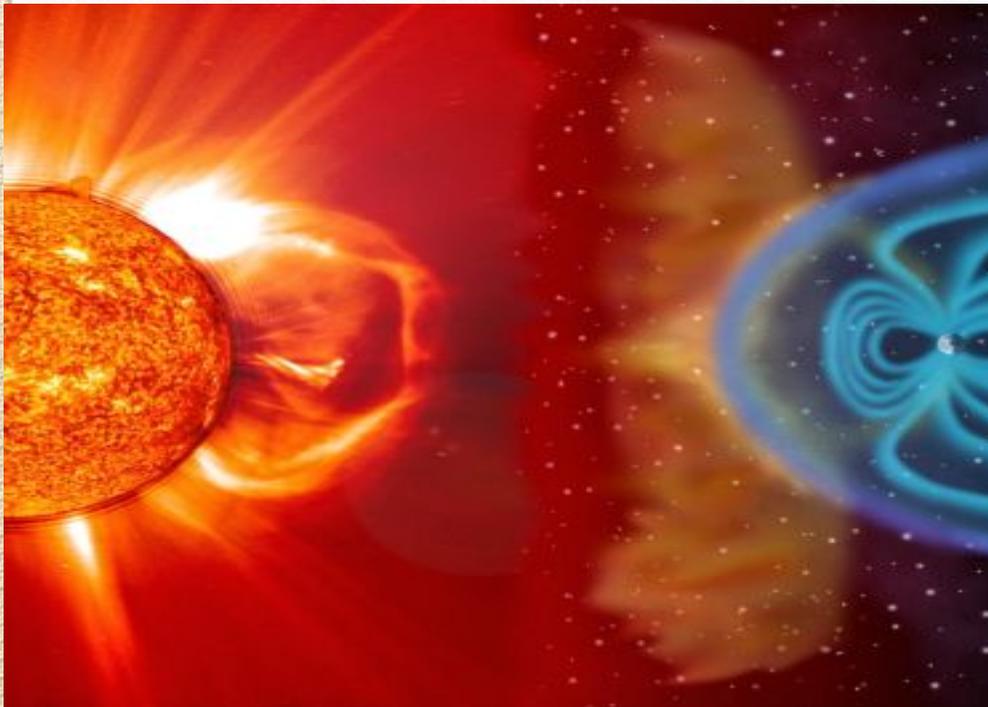
Определим **температуру фотосферы** Солнца.

Энергия, излучаемая нагретым телом с единицы площади, определяется законом Стефана–Больцмана:  $E = \sigma \cdot T^4$ ,  
где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Светимость Солнца:  $L = 4\pi R^2 \cdot E$

или  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ .

Отсюда



Определим **температуру**

Энергия, излучаемая нагретым телом с единицы площади, определяется законом Стефана–Больцмана:  $E = \sigma \cdot T^4$ ,  
где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Светимость Солнца:  $L = 4\pi R^2 \cdot E$

или  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ .

Отсюда

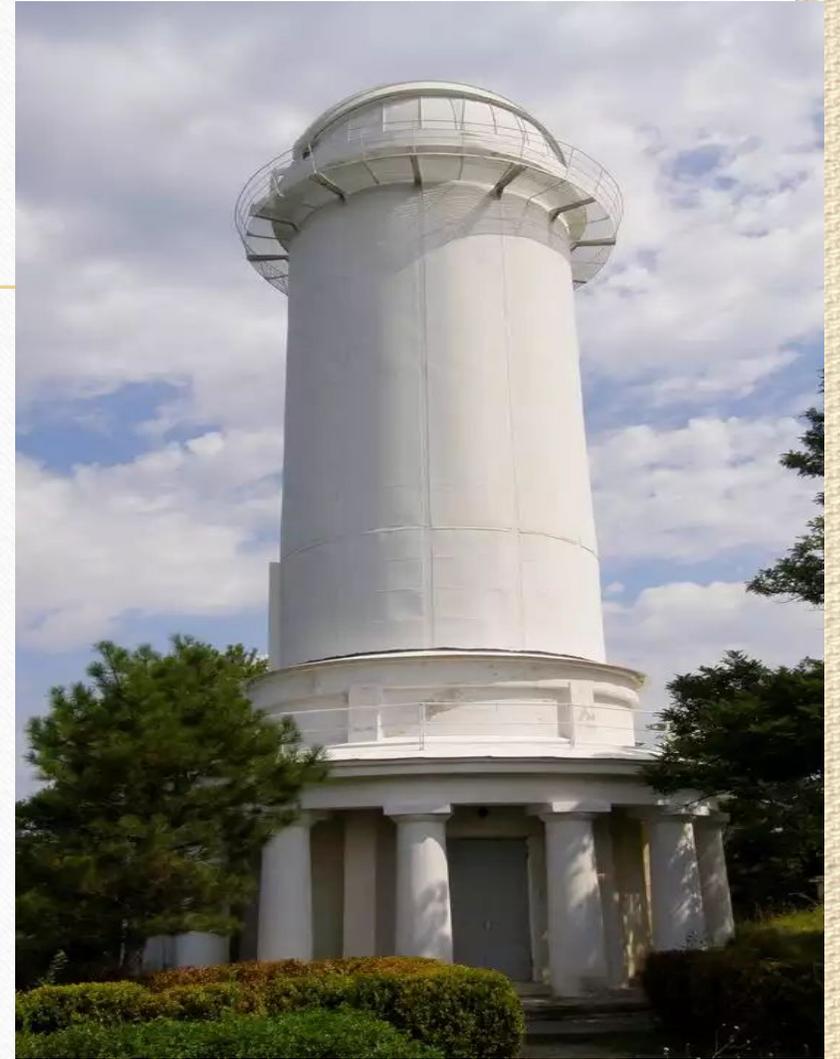
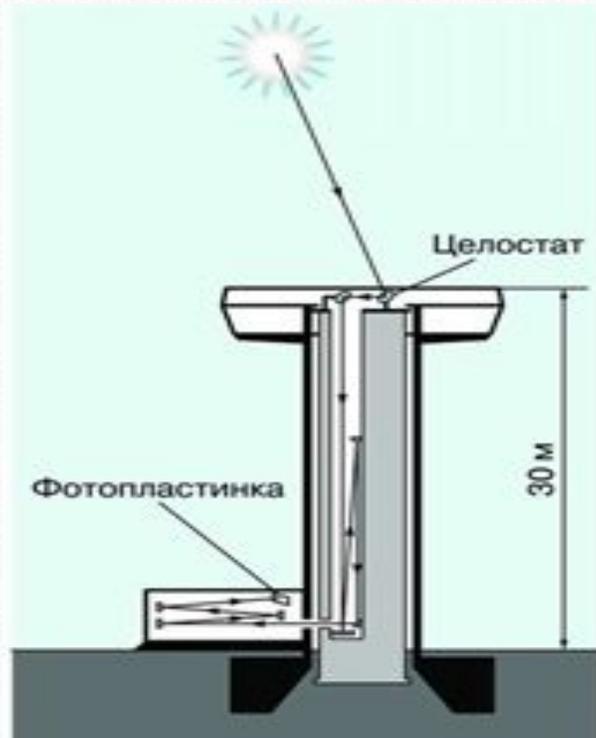


---

# Состав и строение Солнца

Для изучения Солнца используются телескопы особой конструкции – **башенные солнечные телескопы**.

Система зеркал непрерывно поворачивается вслед за Солнцем и направляет его лучи вниз на главное зеркало, а затем они попадают в спектрографы или другие приборы, с помощью которых проводятся исследования Солнца.



Башенный солнечный телескоп Крымской астрофизической обсерватории БСГ-1 (1957 г.)



Солнце в красных лучах излучения водорода

Благодаря большому фокусному расстоянию солнечных телескопов (до 90 м) можно получить изображение Солнца диаметром до 80 см и детально изучать происходящие на нем явления.

Они лучше видны на **спектрогелиограммах** – снимках Солнца, которые сделаны в лучах, соответствующих спектральным линиям водорода, кальция и некоторых других элементов.

---



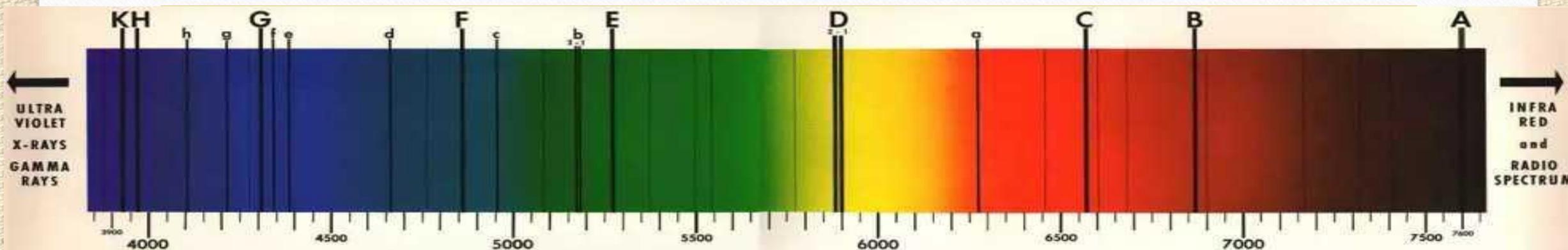
Солнце в ультрафиолетовых лучах



Солнце в рентгеновских лучах

Важнейшую информацию о физических процессах на Солнце дает **спектральный анализ**.

В спектре Солнца **Йозеф Фраунгофер** в 1814 г. обнаружил и описал **линии поглощения**, по которым, как стало ясно почти полвека спустя, можно узнать состав его атмосферы.



Солнечный спектр

В настоящее время в солнечном спектре зарегистрировано более 30000 линий, принадлежащих 72 химическим элементам.

Спектральными методами **гелий** (от греческого «гелиос» – солнечный) Солнце и лишь затем обнаружен на Земле.

был сначала открыт на

### Химический состав Солнца:

- **водород** составляет около 70% солнечной массы,
- **гелий** – более 28%,
- **остальные элементы** – менее 2%. Количество атомов этих элементов в 1000 раз меньше, чем атомов водорода и гелия.

Вещество Солнца сильно **ионизовано**: атомы, потерявшие электроны своих внешних оболочек и ставшие ионами, вместе со свободными электронами образуют **плазму**.



**Средняя плотность** солнечного вещества примерно  $1400 \text{ кг/м}^3$ . Она соизмерима с плотностью воды и в 1000 раз больше плотности воздуха у поверхности Земли.

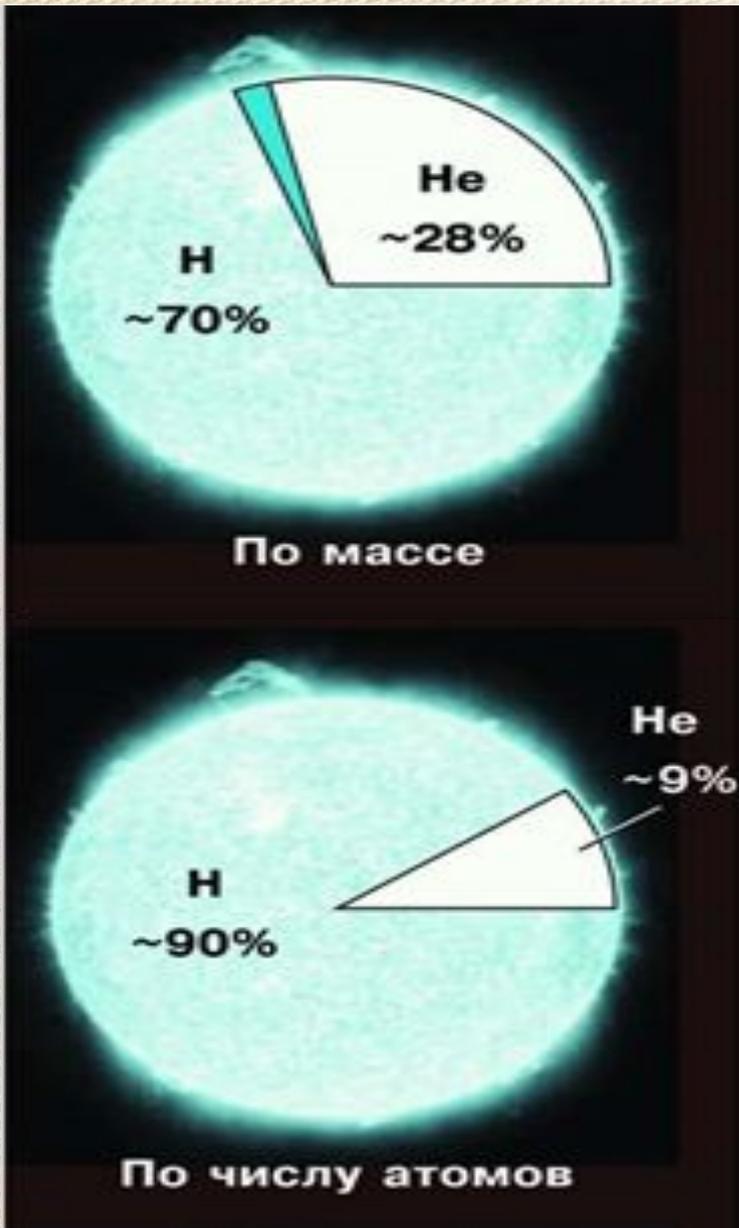
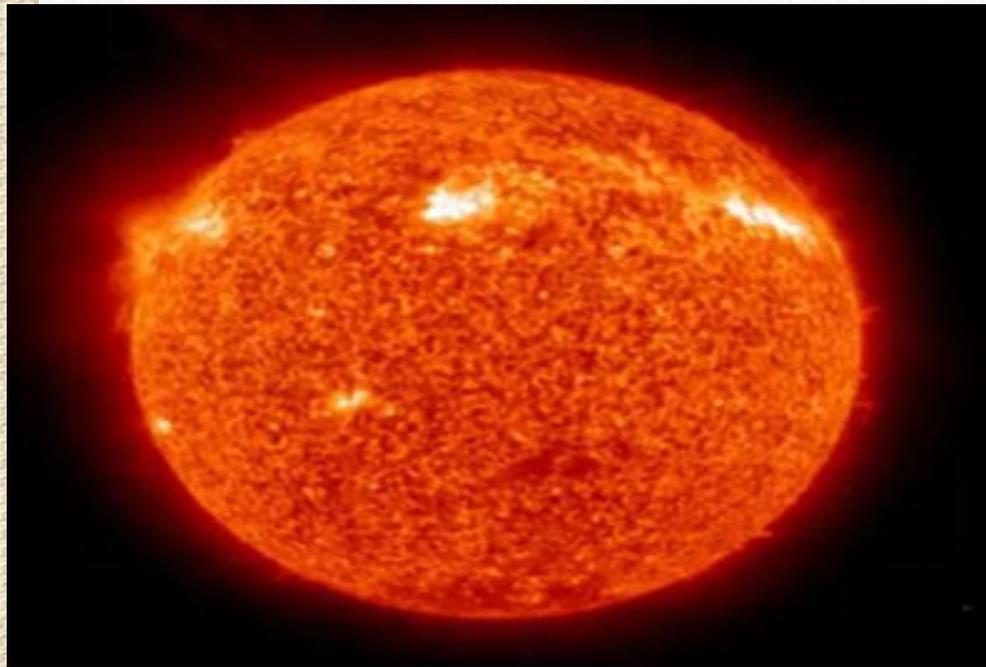


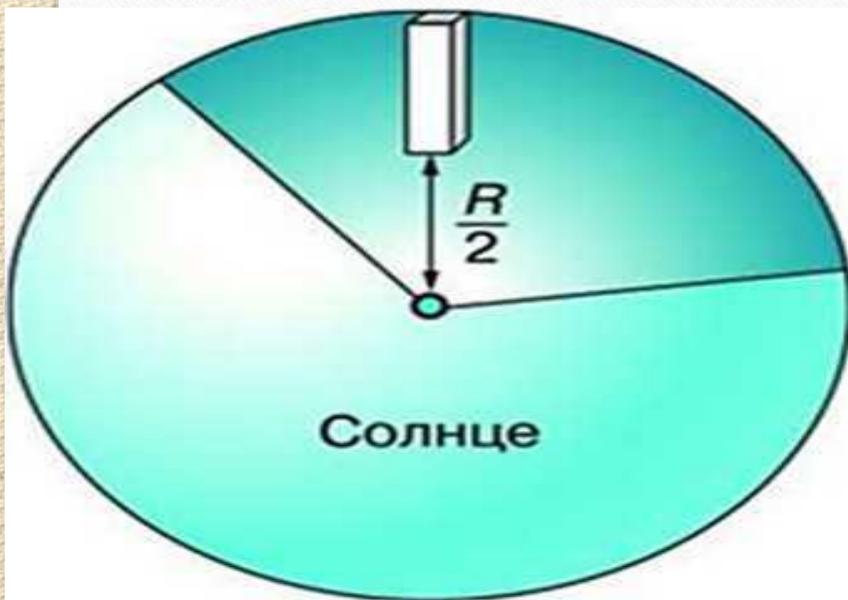
Диаграмма химического состава Солнца



Используя закон всемирного тяготения и газовые законы, можно рассчитать условия внутри Солнца, построить модель «спокойного» Солнца.

Оно находится в равновесии, поскольку в каждом его слое действие сил тяготения, которые стремятся сжать Солнце, уравновешивается действием сил внутреннего давления газа.

Действием гравитационных сил в недрах Солнца создается огромное давление.



Сделаем приближенный расчет величины давления для слоя, лежащего на расстоянии  $R/2$  от центра Солнца.

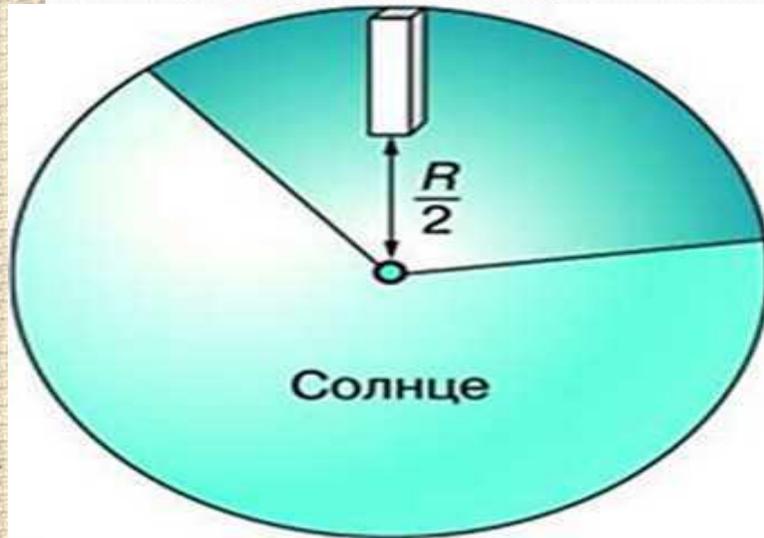
При этом будем считать, что плотность вещества внутри Солнца всюду равна средней.

Сила тяжести на этой глубине определяется массой вещества, заключенной в радиальном столбике, высота которого  $R/2$ , площадь  $S$ , а также ускорением свободного падения на поверхности сферы радиусом  $R/2$ .

Сделаем приближенный **расчет величины давления** для слоя, лежащего на расстоянии  $R/2$  от центра Солнца.

При этом будем считать, что плотность вещества внутри Солнца всюду равна средней.

Сила тяжести на этой глубине определяется массой вещества, заключенной в радиальном столбике, высота которого  $R/2$ , площадь  $S$ , а также ускорением свободного падения на поверхности сферы радиусом  $R/2$ .



— Определим **температуру фотосферы** Солнца.

Энергия, излучаемая нагретым телом с единицы площади, определяется законом Стефана–Больцмана:  $E = \sigma \cdot T^4$ ,  
где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

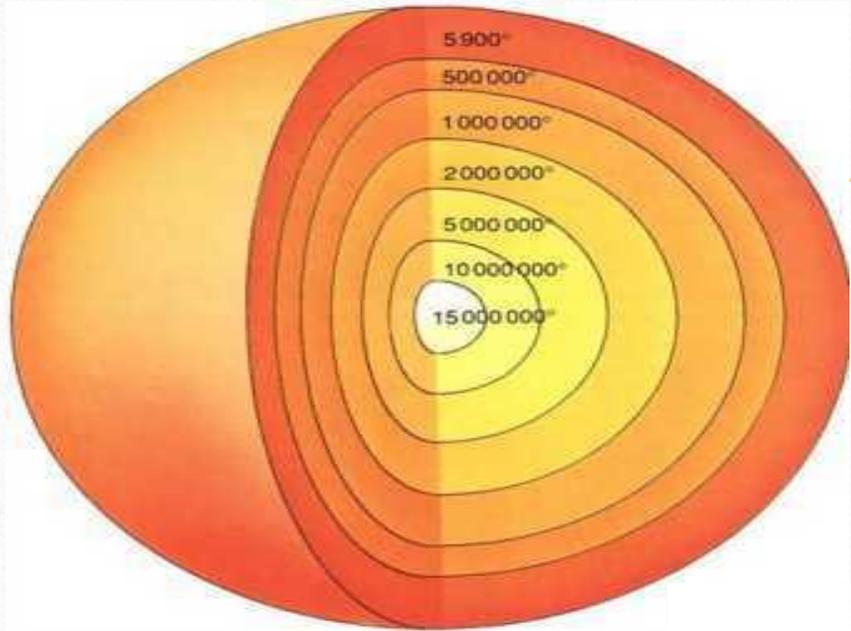
Светимость Солнца:  $L = 4\pi R^2 \cdot E$

или  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ .

Отсюда

Подставив необходимые данные в формулу  $p = mg/S$ , получим, что **давление равно примерно  $6,6 \cdot 10^{13} \text{ Па}$** , т. е.

**в 1 млрд раз превосходит нормальное атмосферное давление.**



Определим **температуру фотосферы** Солнца.

Энергия, излучаемая нагретым телом с единицы площади, определяется законом

Стефана–Больцмана:  $E = \sigma \cdot T^4$ ,

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Светимость Солнца:  $L = 4\pi R^2 \cdot E$

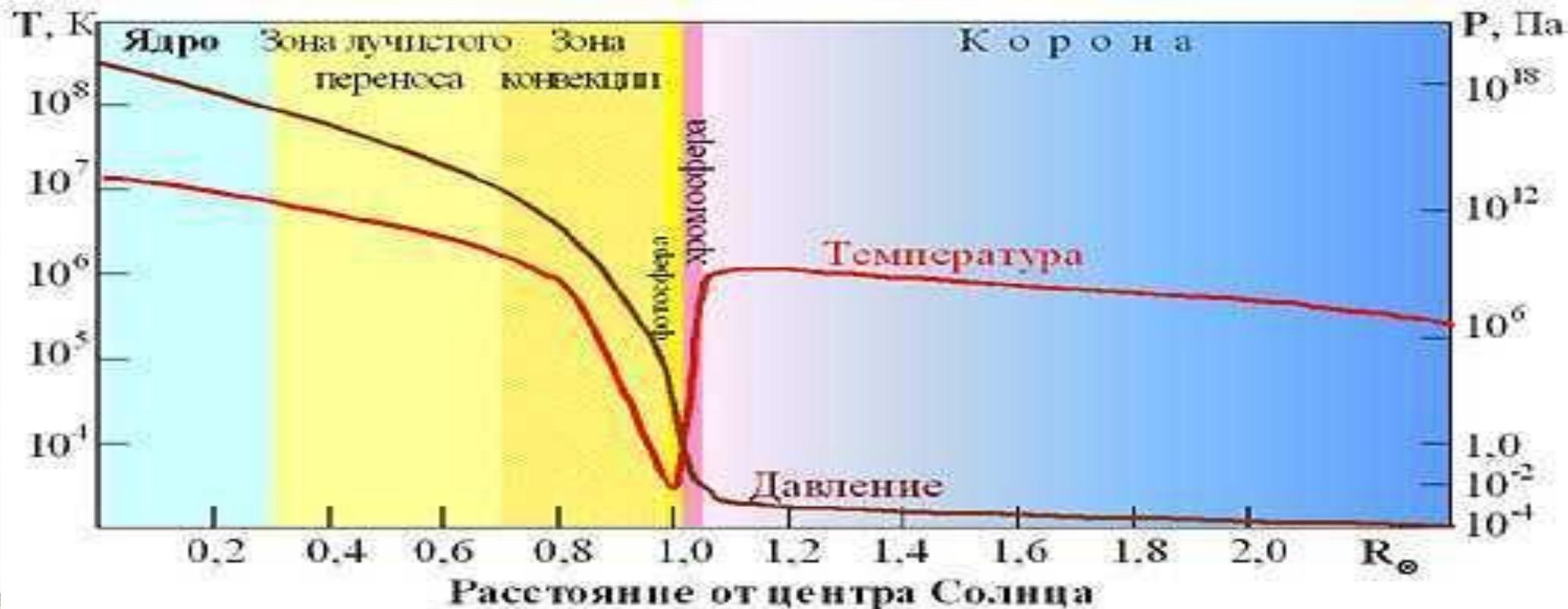
или

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4.$$

Отсюда

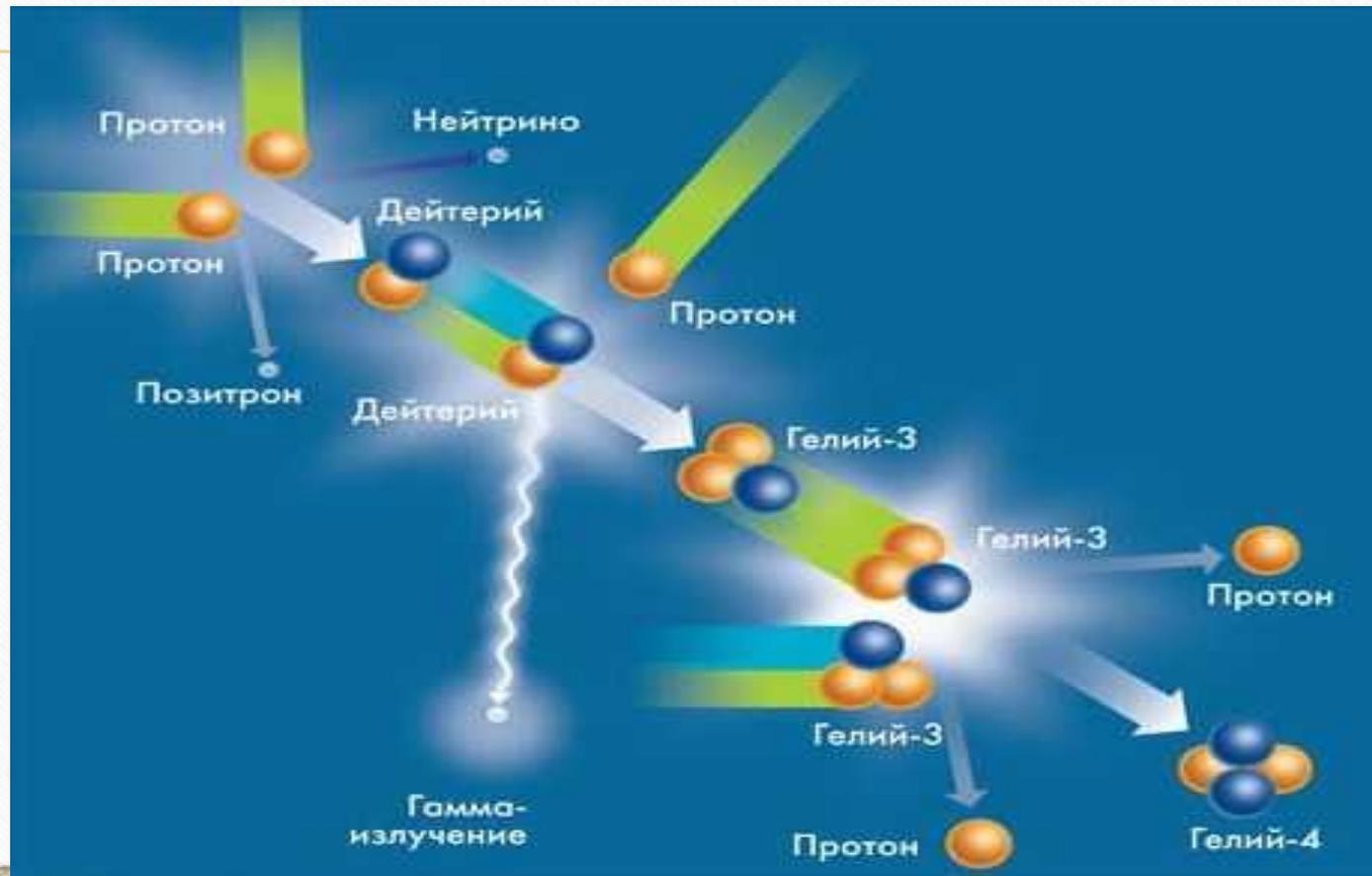
Более точные расчеты, проведенные с учетом изменения плотности с глубиной, дают результаты, лишь незначительно отличающиеся от полученных выше:  $p = 6,1 \cdot 10^{13}$  Па,  $T = 3,4 \cdot 10^6$  К.

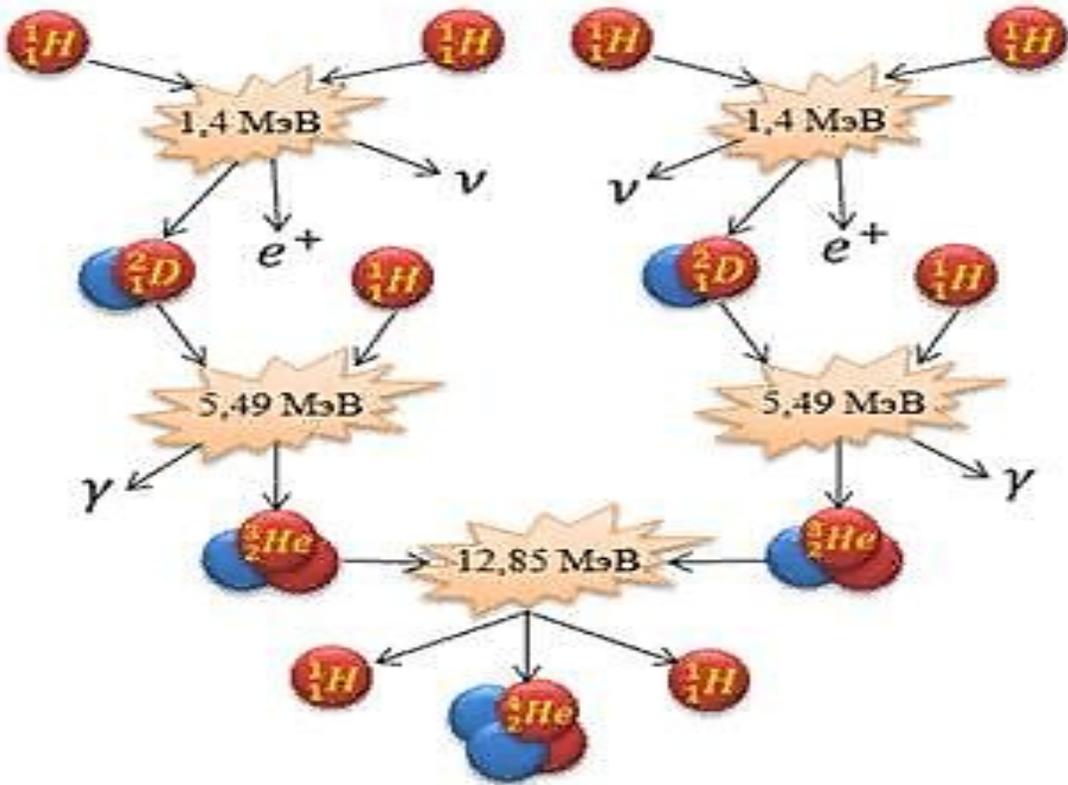
Согласно современным данным, в центре Солнца температура достигает 15 млн К, давление  $2 \cdot 10^{18}$  Па, а плотность вещества значительно превышает плотность твердых тел в земных условиях:  $1,5 \cdot 10^5$  кг/м<sup>3</sup>, т. е. в 13 раз больше плотности свинца.



При высокой температуре в центральной части Солнца протоны, которые преобладают в составе солнечной плазмы, имеют столь большие скорости, что могут преодолеть электростатические силы отталкивания и взаимодействовать между собой.

В результате такого взаимодействия происходит **термоядерная реакция**: четыре протона образуют альфа-частицу (ядро гелия).



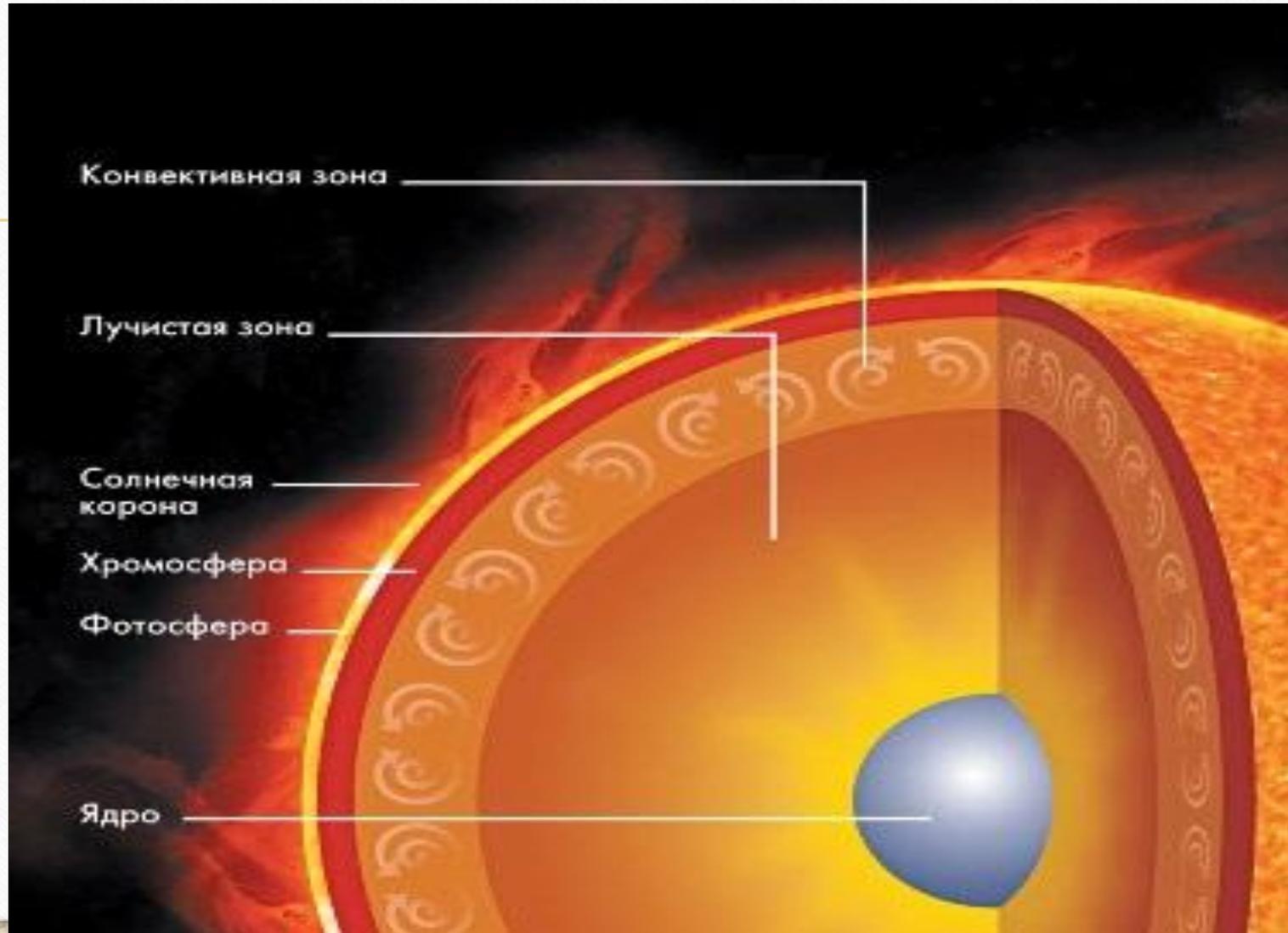


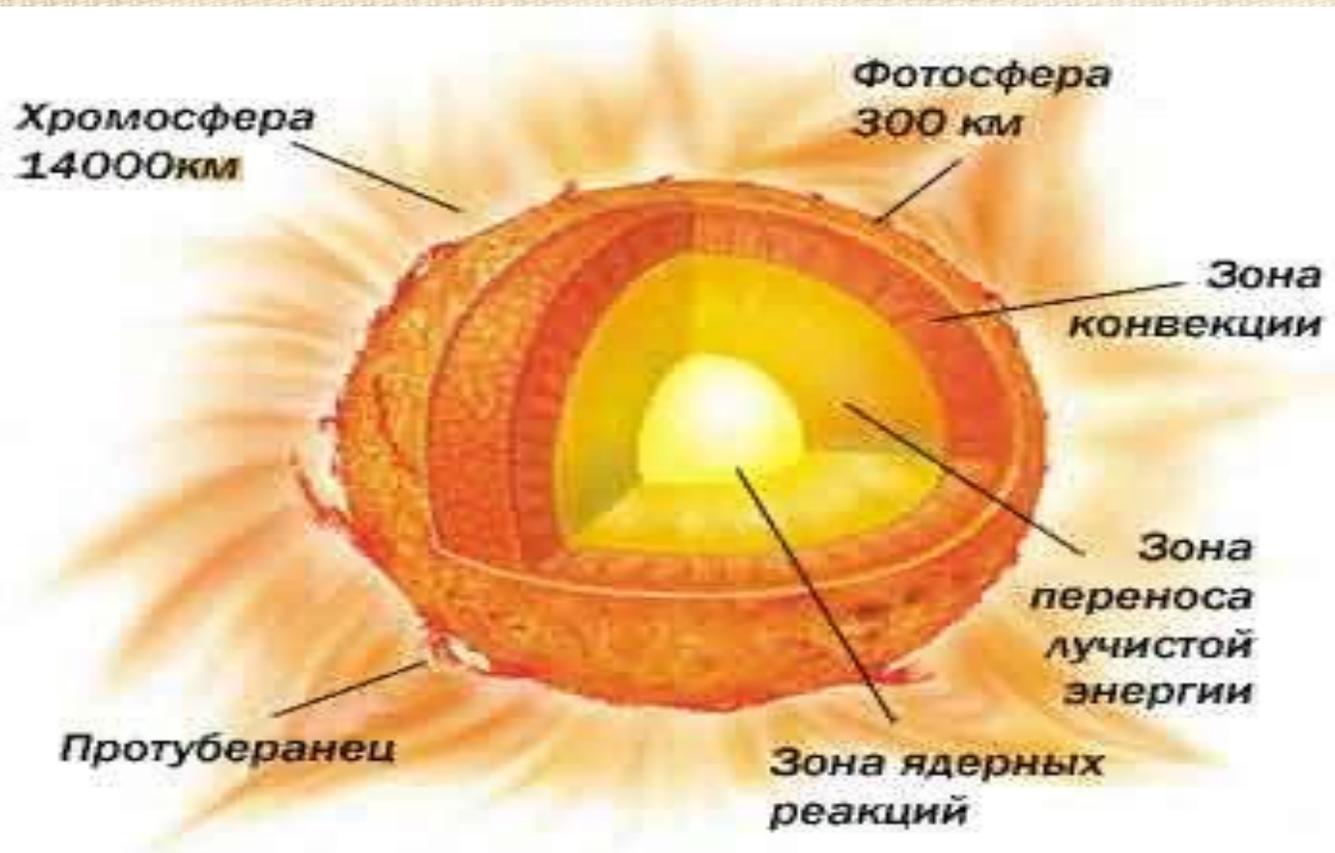
Все три типа нейтрино (электронное, мюонное и таонное) столь слабо взаимодействуют с веществом, что свободно проходят сквозь Солнце и Землю.

Кинетическая энергия, которую приобретают образующиеся в ходе реакции частицы, поддерживает высокую температуру плазмы, и тем самым создаются условия для продолжения термоядерного синтеза.

Энергия гамма-квантов обеспечивает излучение Солнца.

Из недр Солнца наружу энергия передается двумя способами:  
**излучением**, т. е. самими квантами, и **конвекцией**, т. е. веществом.





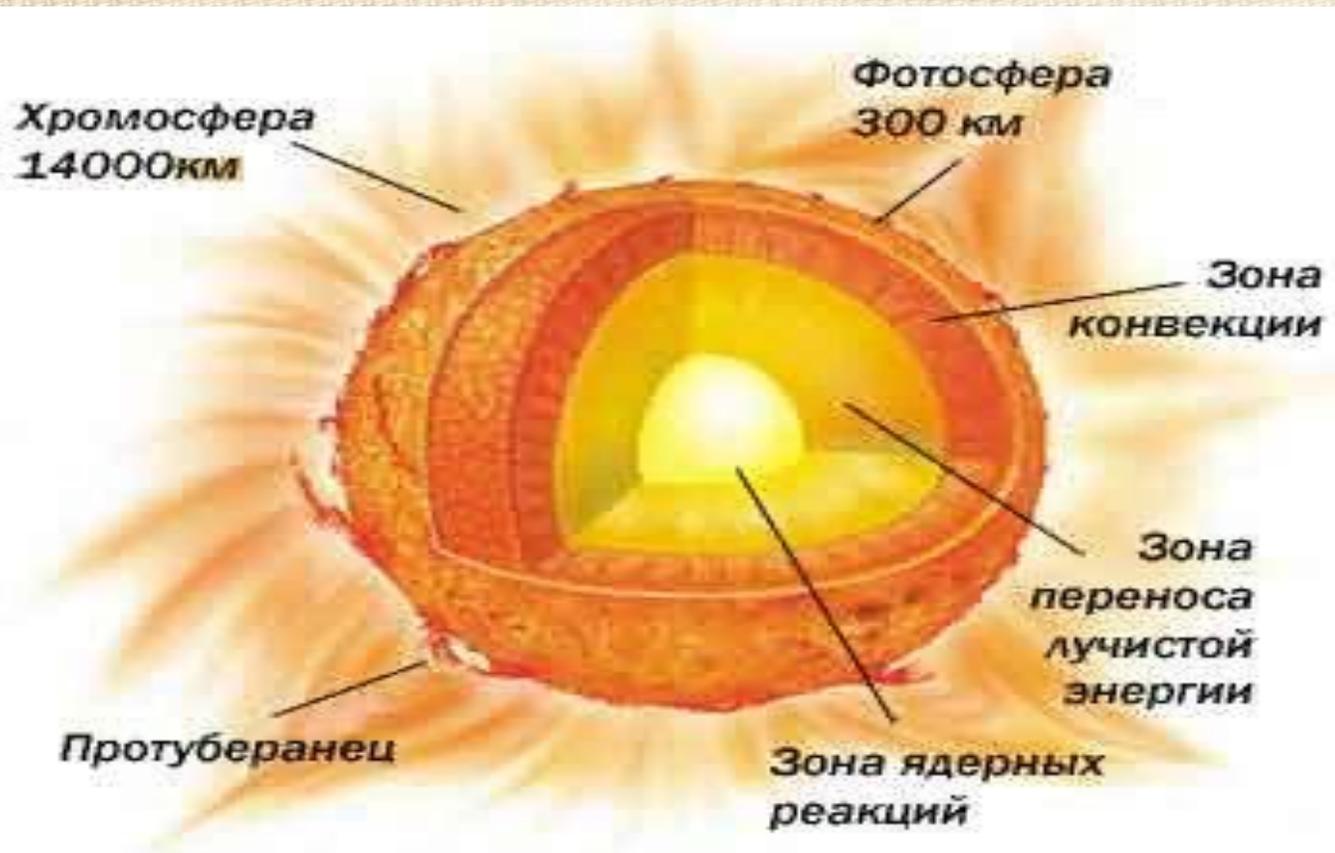
Выделение энергии и ее перенос определяют **внутреннее строение** Солнца:

**ядро** – центральная зона, где при высоком давлении и температуре происходят термоядерные реакции;

**«лучистая» зона**, где энергия передается наружу от слоя к слою в результате последовательного поглощения и излучения квантов;

**наружная конвективная зона**, где энергия от слоя к слою переносится самим веществом в результате перемешивания (конвекции).

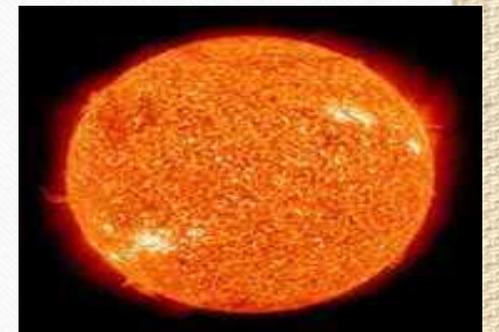
Каждая из этих зон занимает примерно 1/3 солнечного радиуса.



Сразу за конвективной зоной начинается **атмосфера**, которая простирается далеко за пределы видимого диска Солнца.

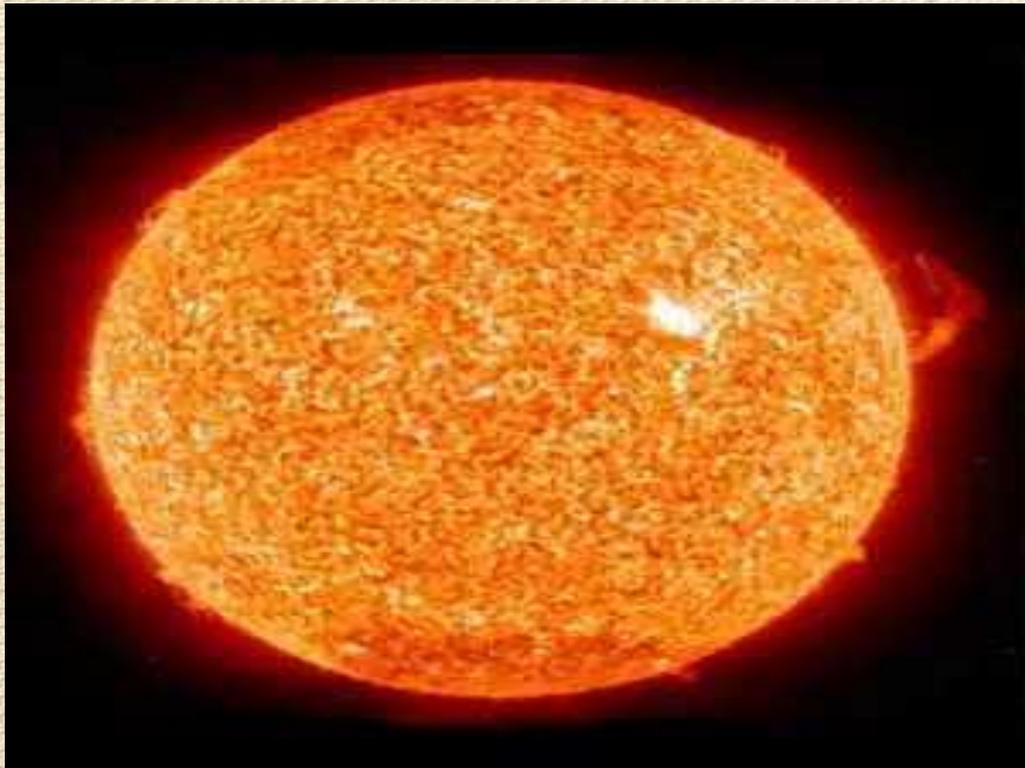
Ее нижний слой – **фотосфера** – воспринимается как поверхность Солнца.

Верхние слои атмосферы непосредственно не видны и могут наблюдаться либо во время полных солнечных затмений, либо из космического пространства, либо при помощи специальных приборов с поверхности Земли.

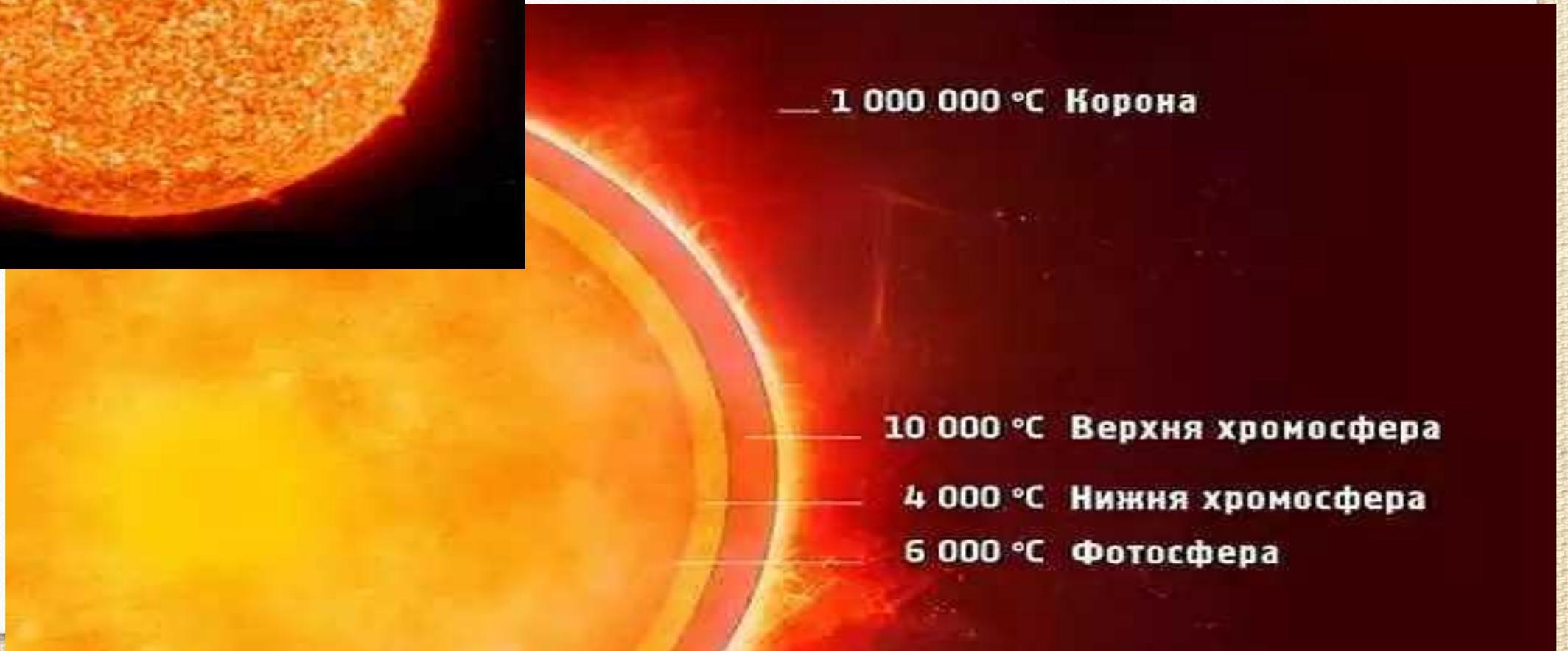


---

# Атмосфера Солнца



**Фотосфера** – самый нижний слой атмосферы Солнца, в котором температура довольно быстро убывает от 8000 до 4000 К.



1 000 000 °C Корона

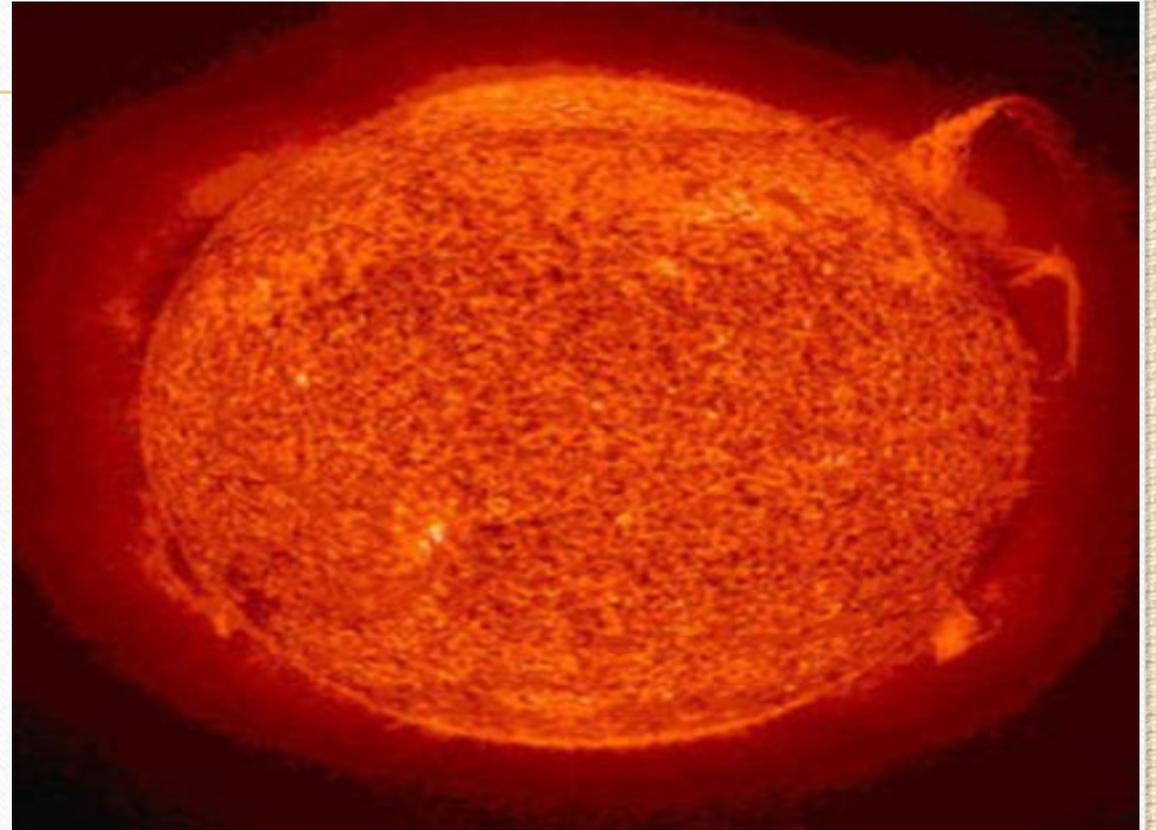
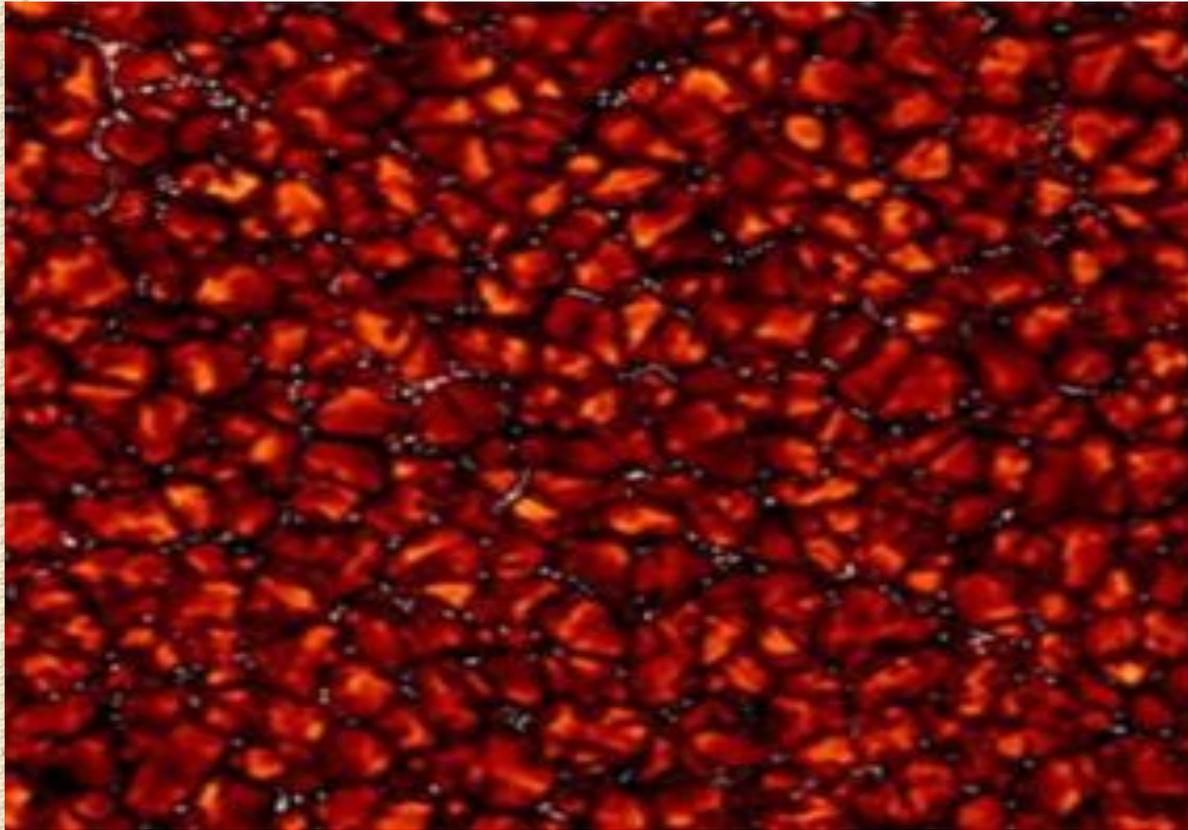
10 000 °C Верхняя хромосфера

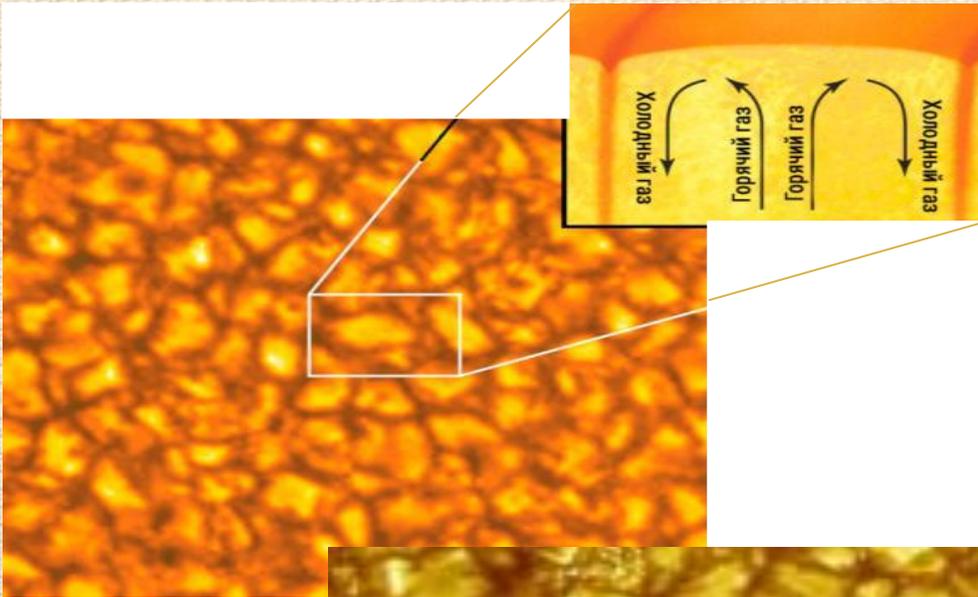
4 000 °C Нижняя хромосфера

6 000 °C Фотосфера

Следствием конвективного движения вещества в верхних слоях Солнца является своеобразный вид фотосферы – **грануляция**.

Фотосфера как бы состоит из отдельных зерен – **гранул**, размеры которых составляют в среднем несколько сотен (до 1000) километров.

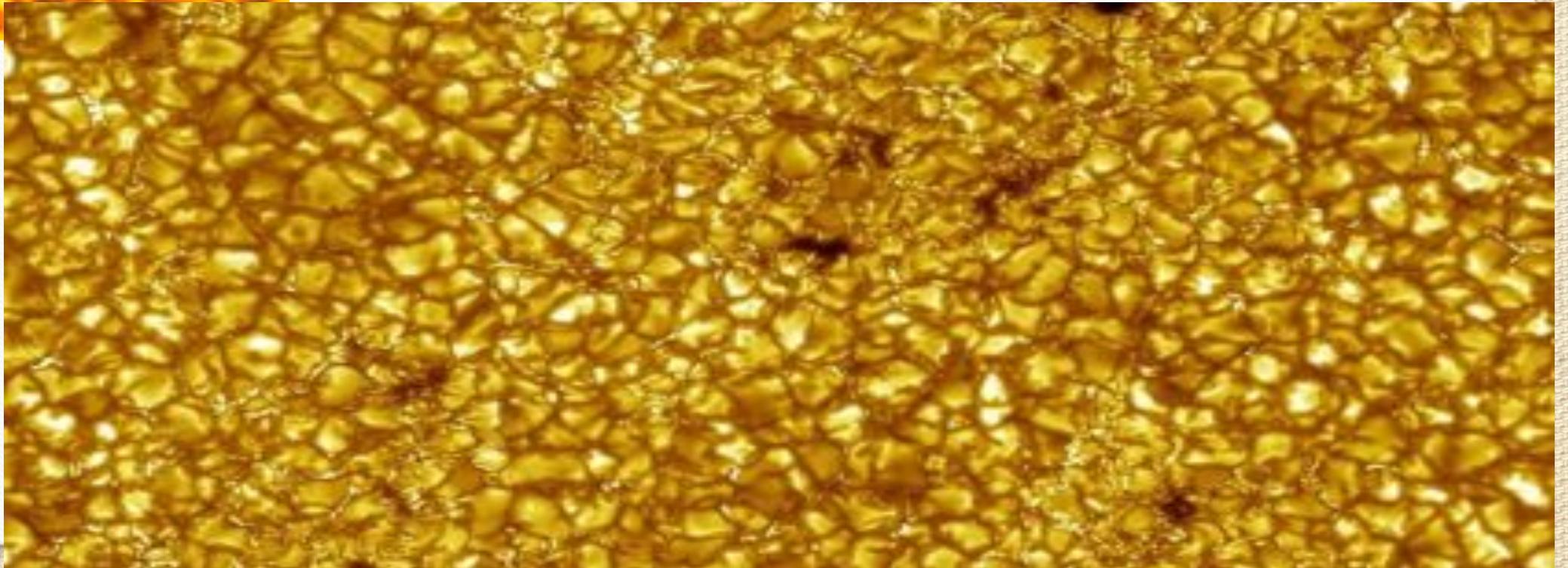




**Гранула** – это поток горячего газа, поднимающийся вверх.

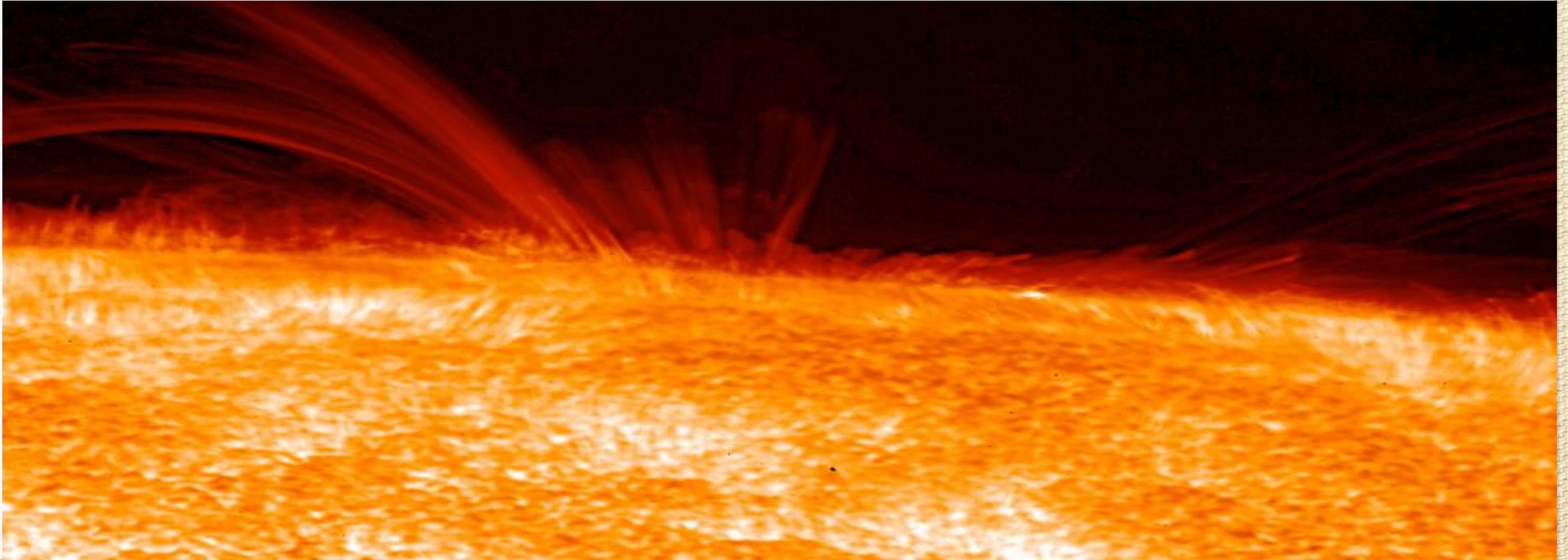
В темных промежутках между гранулами находится более холодный газ, опускающийся вниз.

Каждая гранула существует всего 5–10 мин, затем на ее месте появляется новая, которая отличается от прежней по форме и размерам.



Вещество фотосферы нагревается за счет энергии, поступающей из недр Солнца, а излучение, которое уходит в межпланетное пространство, уносит энергию, поэтому **наружные слои фотосферы охлаждаются**.

В самых верхних слоях фотосферы в условиях минимальной для Солнца температуры оказывается возможным существование нейтральных атомов водорода и даже простейших молекул и радикалов  $H_2$ ,  $OH$ ,  $CH$ .

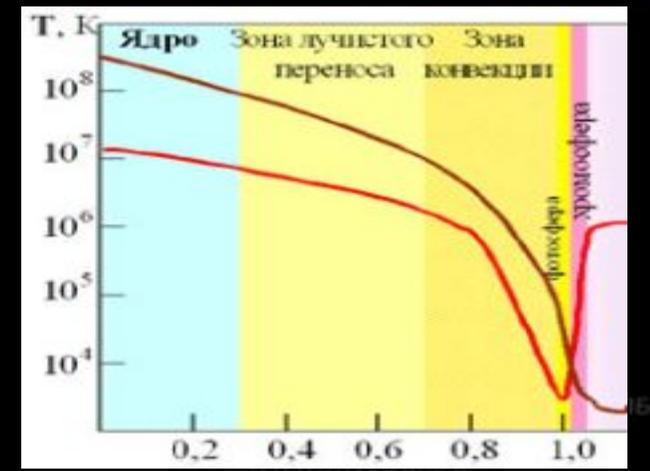
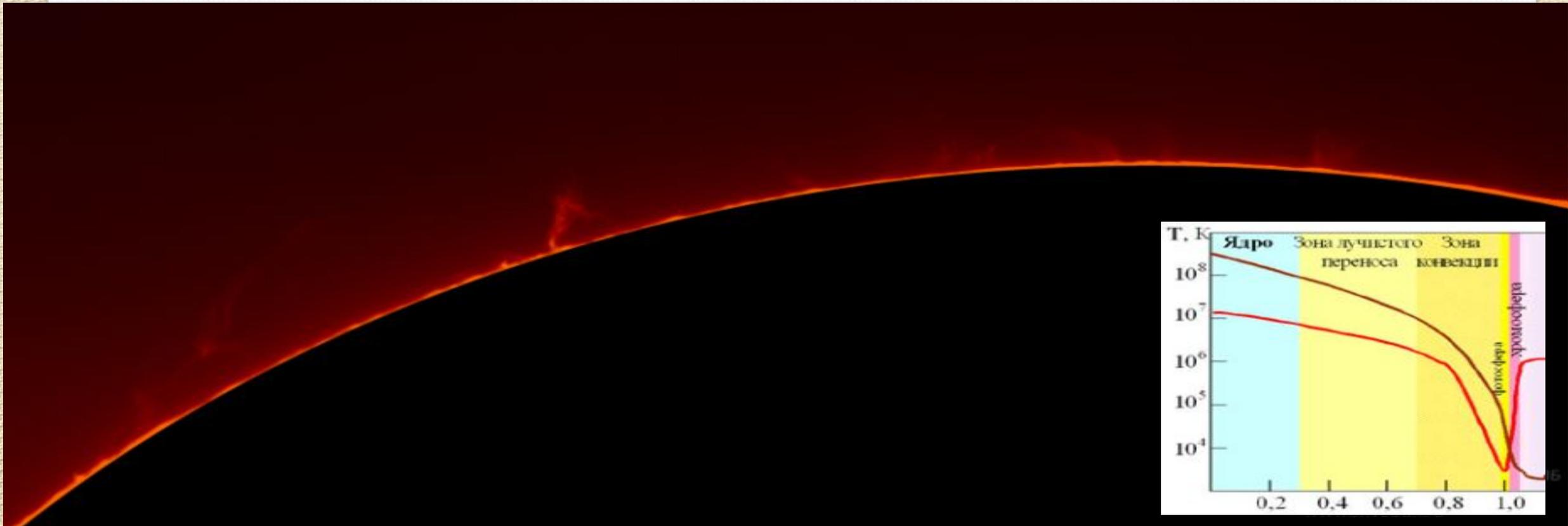


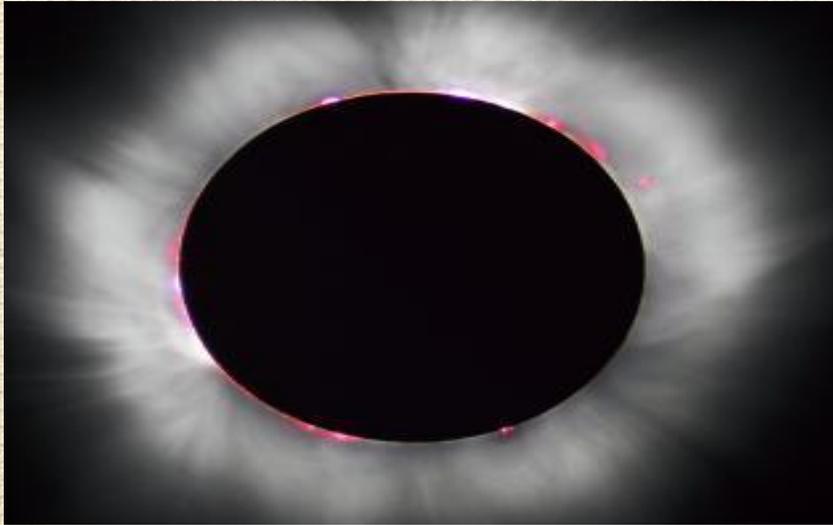


Над фотосферой располагается **хромосфера** («сфера цвета»).

Красновато-фиолетовое кольцо хромосферы можно видеть в те моменты, когда диск Солнца закрыт Луной во время полного солнечного затмения.

В хромосфере вещество имеет температуру в 2–3 раза выше, чем в фотосфере. Здесь, как и внутри Солнца, оно представляет собой плазму, только меньшей плотности.

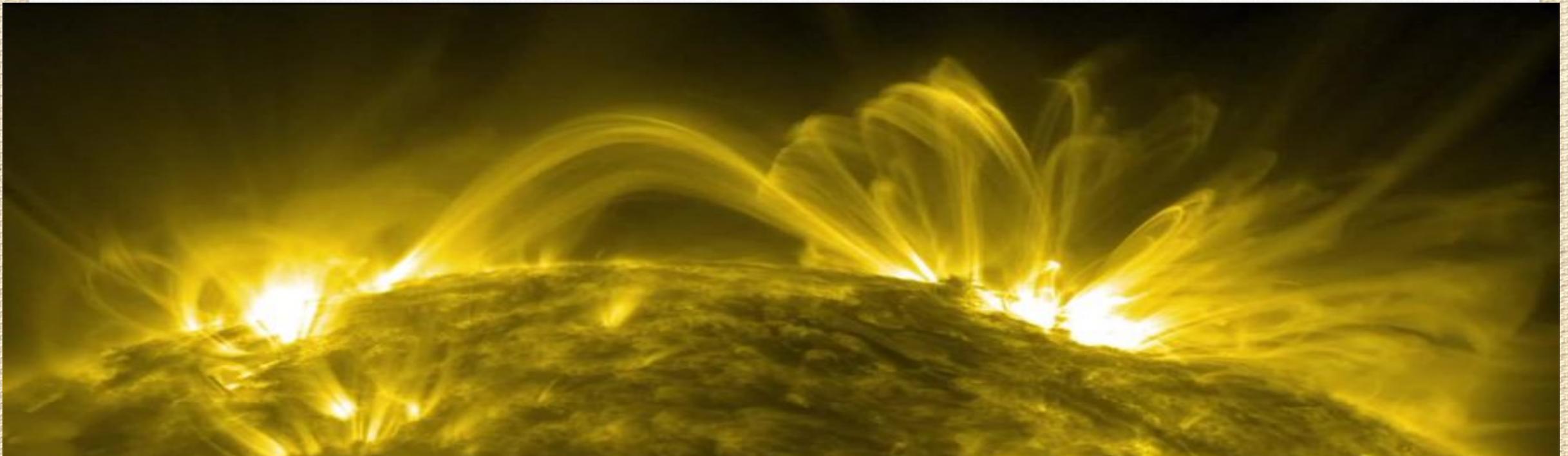




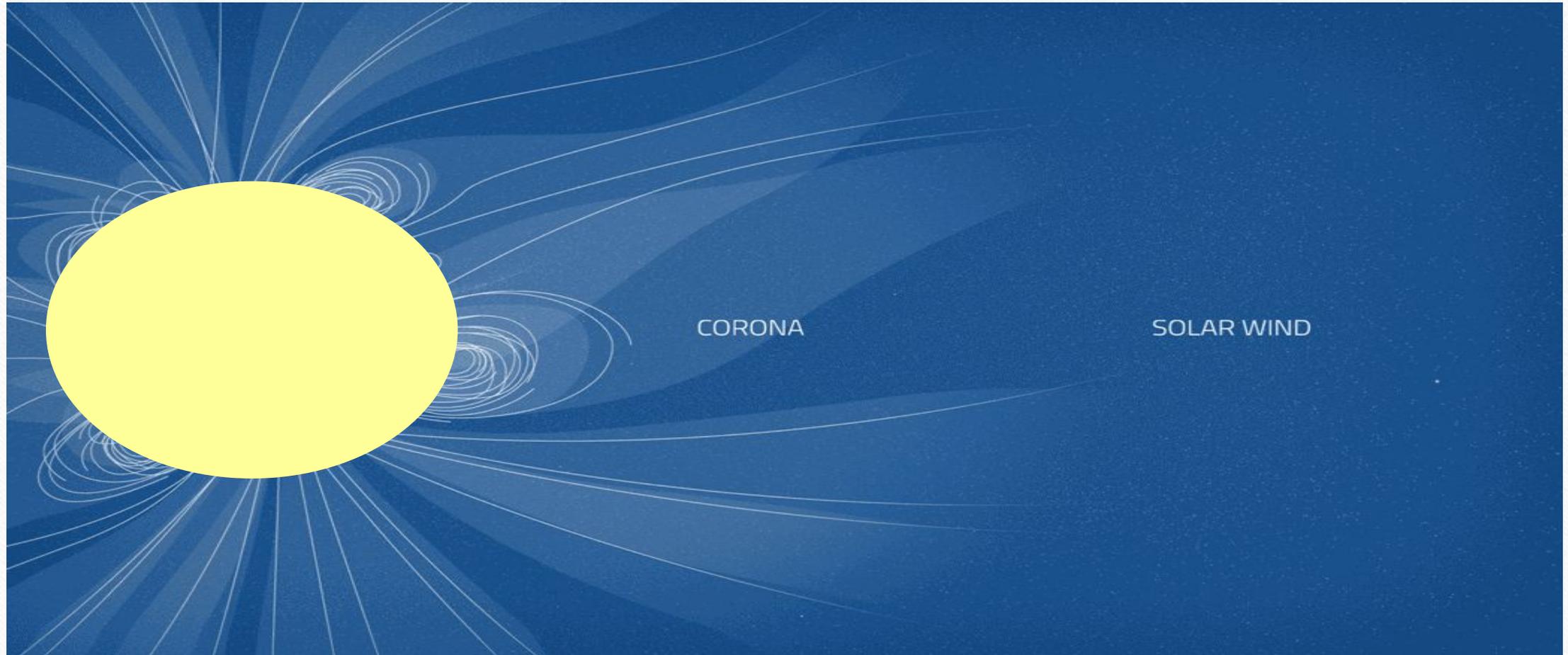
Толщина хромосферы 10–15 тыс. км, а далее на миллионы километров (несколько радиусов Солнца) простирается **солнечная корона**.

**Температура короны** резко возрастает по сравнению с температурой хромосферы и достигает **2 млн К**.

Для короны, которую можно наблюдать во время полных солнечных затмений как жемчужно-серебристое сияние, характерна лучистая структура с множеством сложных деталей – дуг, шлемов и т. д.

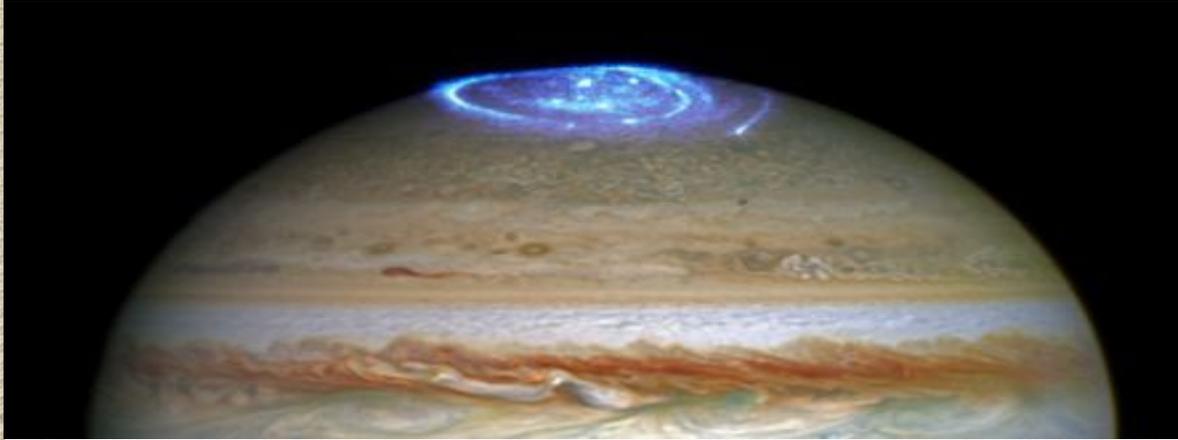


Плотность вещества по мере удаления от Солнца постепенно уменьшается, но потоки плазмы из короны («солнечный ветер») растекаются по всей планетной системе. Скорость этих потоков в окрестностях Земли обычно составляет 400–500 км/с, но у некоторых может достигать 1000 км/с.



Основными составляющими солнечного ветра являются протоны и электроны, значительно меньше альфа-частиц (ядер гелия) и других ионов.

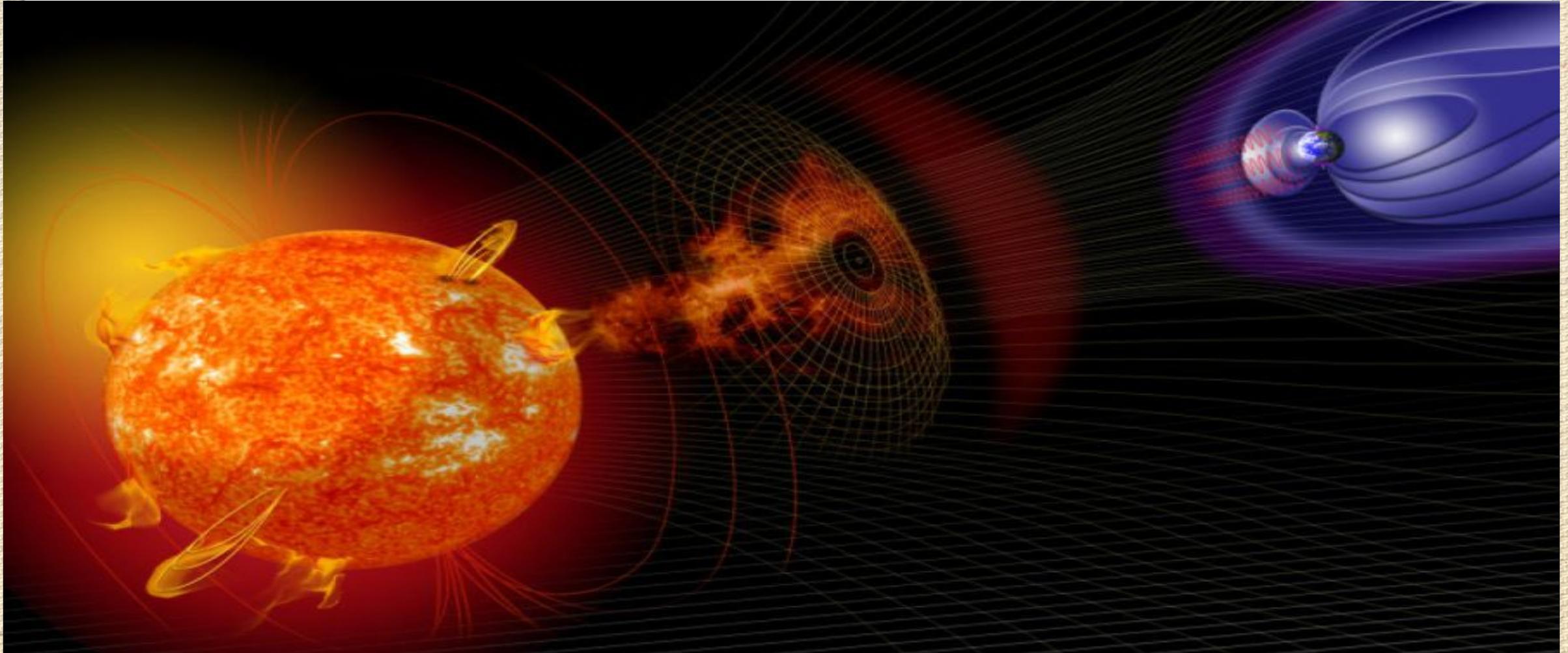
Солнечный ветер порождает не только на Земле, но и на других планетах Солнечной системы, обладающих магнитным полем, такие явления, как **магнитосфера**, **полярные сияния** и **радиационные пояса**.



---

# Солнечная активность

В атмосфере Солнца наблюдаются многообразные проявления **солнечной активности**, характер протекания которых определяется поведением солнечной плазмы в магнитном поле – **пятна, вспышки, протуберанцы, корональные выбросы** и т. п.

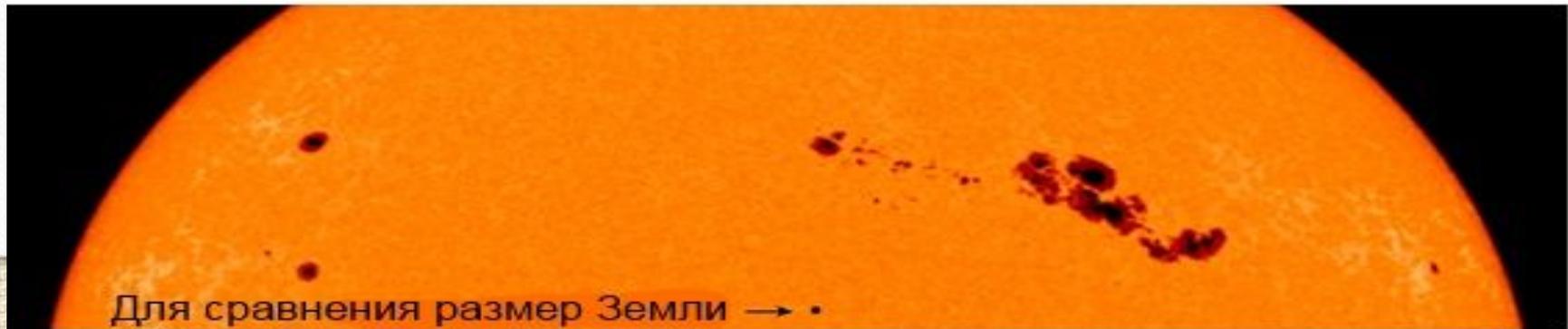
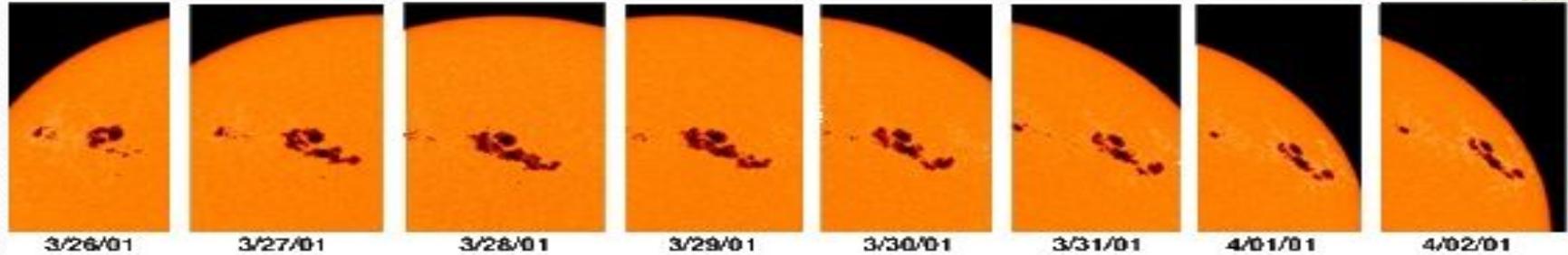
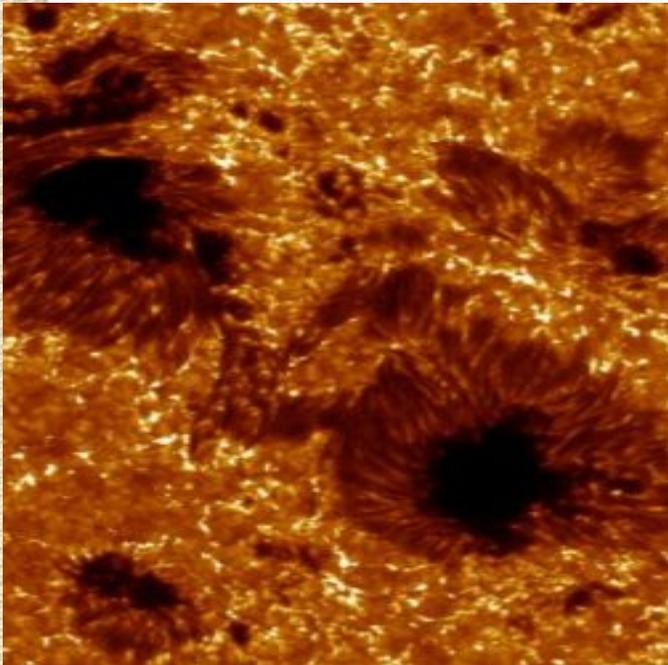


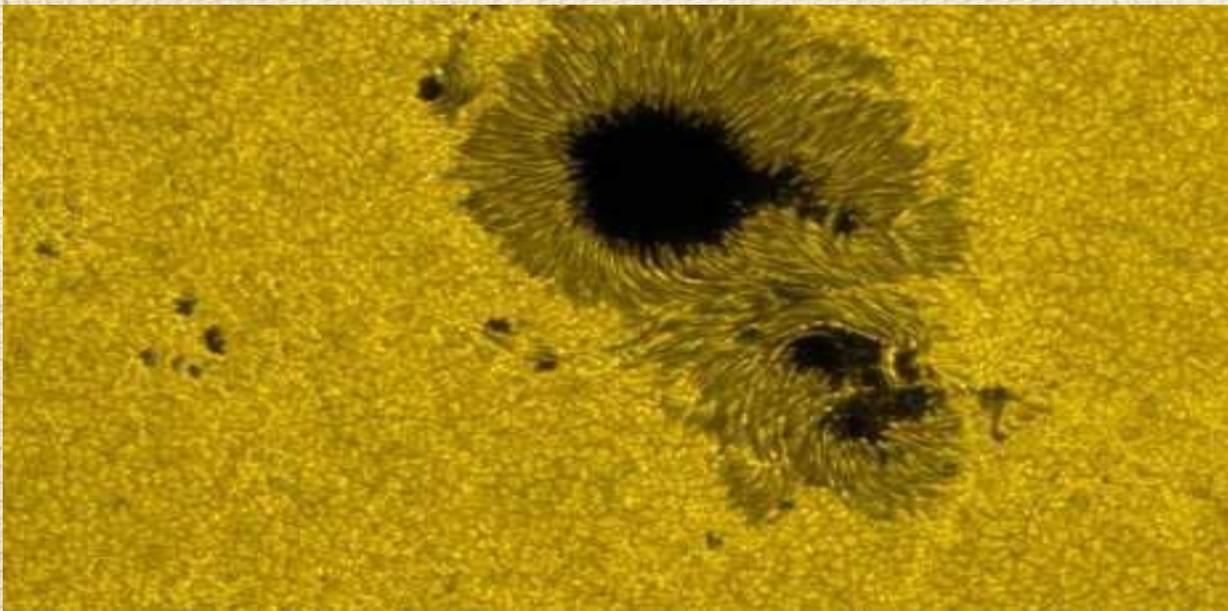


**Солнечные пятна** были открыты в начале XVII в. во время первых наблюдений при помощи телескопа.

По изменению положения пятен на диске Солнца было обнаружено, что оно вращается.

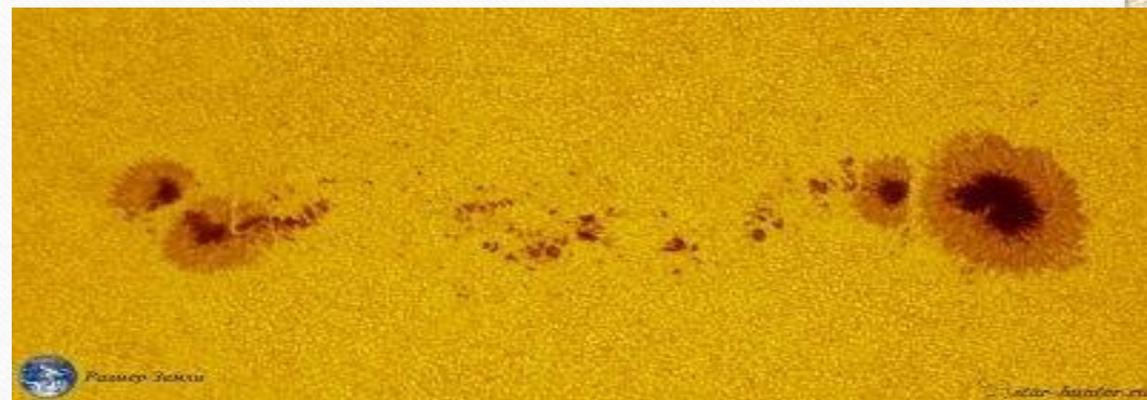
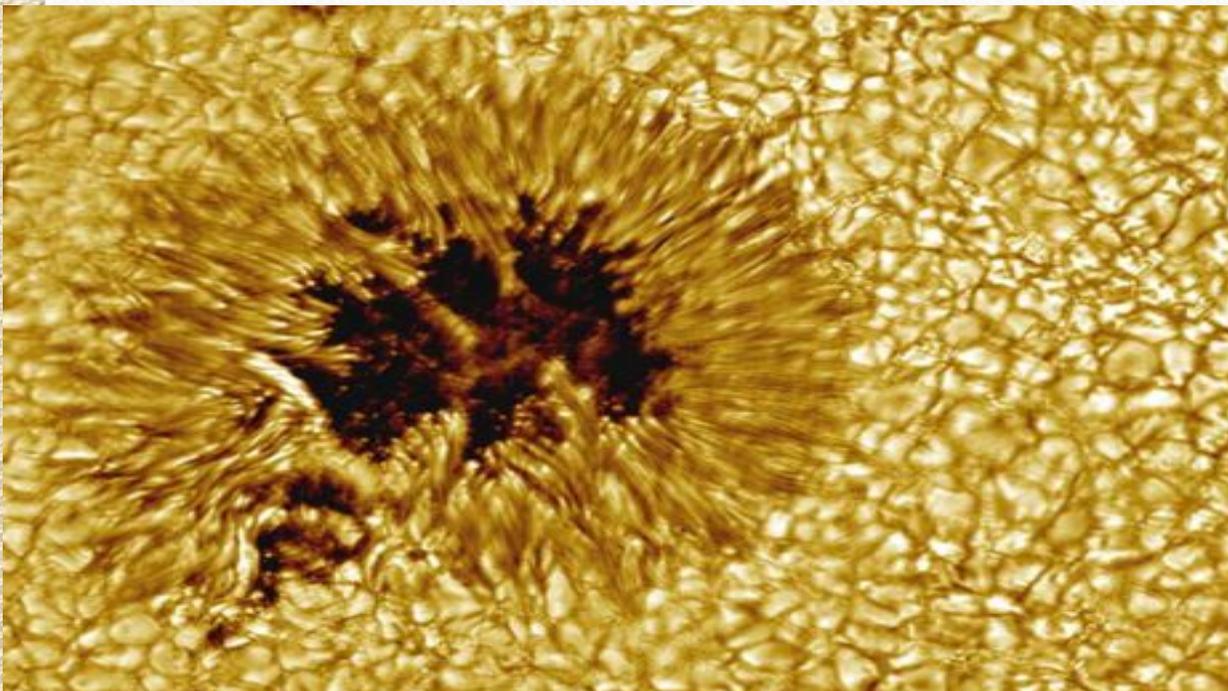
Наблюдения показали, что угловая скорость вращения Солнца убывает от экватора к полюсам, а время полного оборота вокруг оси возрастает с 25 суток (на экваторе) до 30 (вблизи полюсов).





Пятна появляются в тех сравнительно небольших областях фотосферы Солнца, где магнитное поле усиливается в несколько тысяч раз по сравнению с общим фоном.

Сначала пятна наблюдаются как маленькие темные участки диаметром 2000–3000 км.



Большинство из них в течение суток пропадают, однако некоторые увеличиваются в десятки раз.

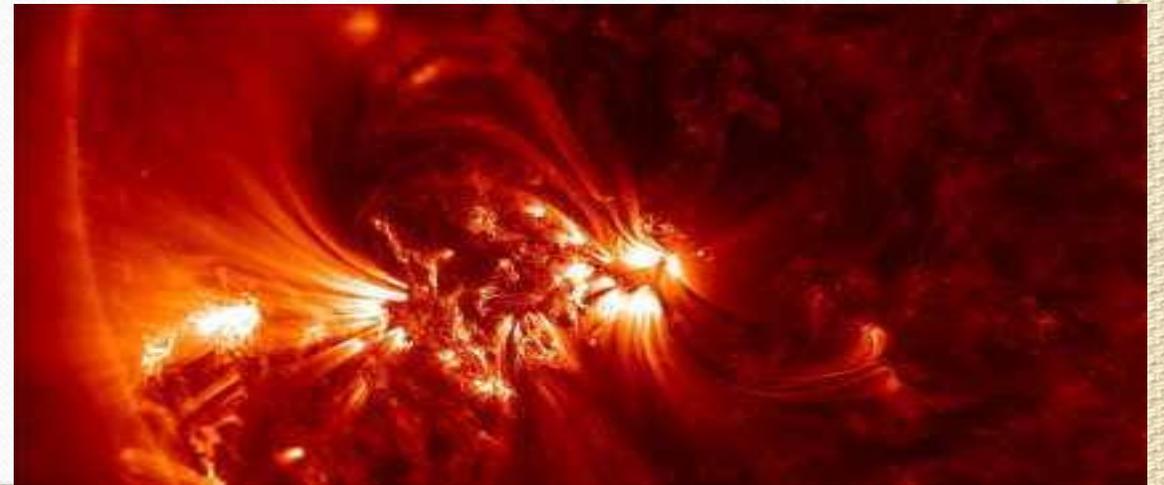
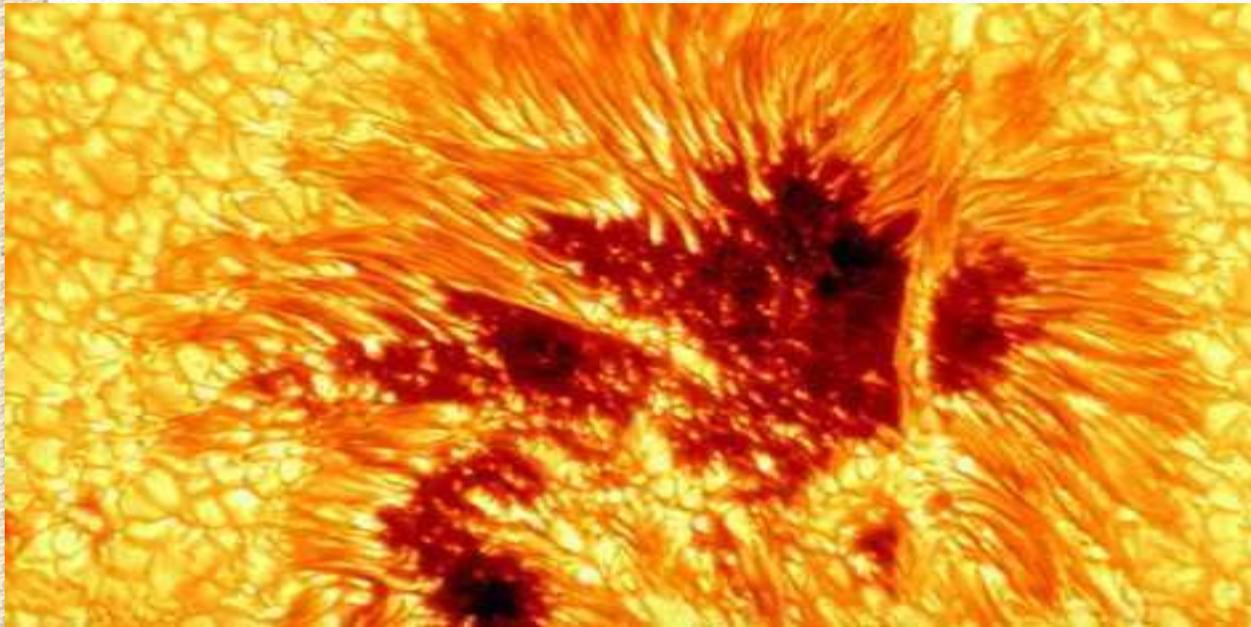
У крупных пятен вокруг наиболее темной центральной части (ее называют **тень**) наблюдается менее темная **полутень**.



В центре пятна температура вещества снижается примерно до 4000 К.

Понижение температуры в районе пятна связано с действием магнитного поля, которое нарушает нормальную конвекцию и препятствует притоку энергии снизу.

Вблизи пятен, где магнитное поле слабее, конвективные движения усиливаются, и появляются хорошо заметные яркие образования – **факелы**.





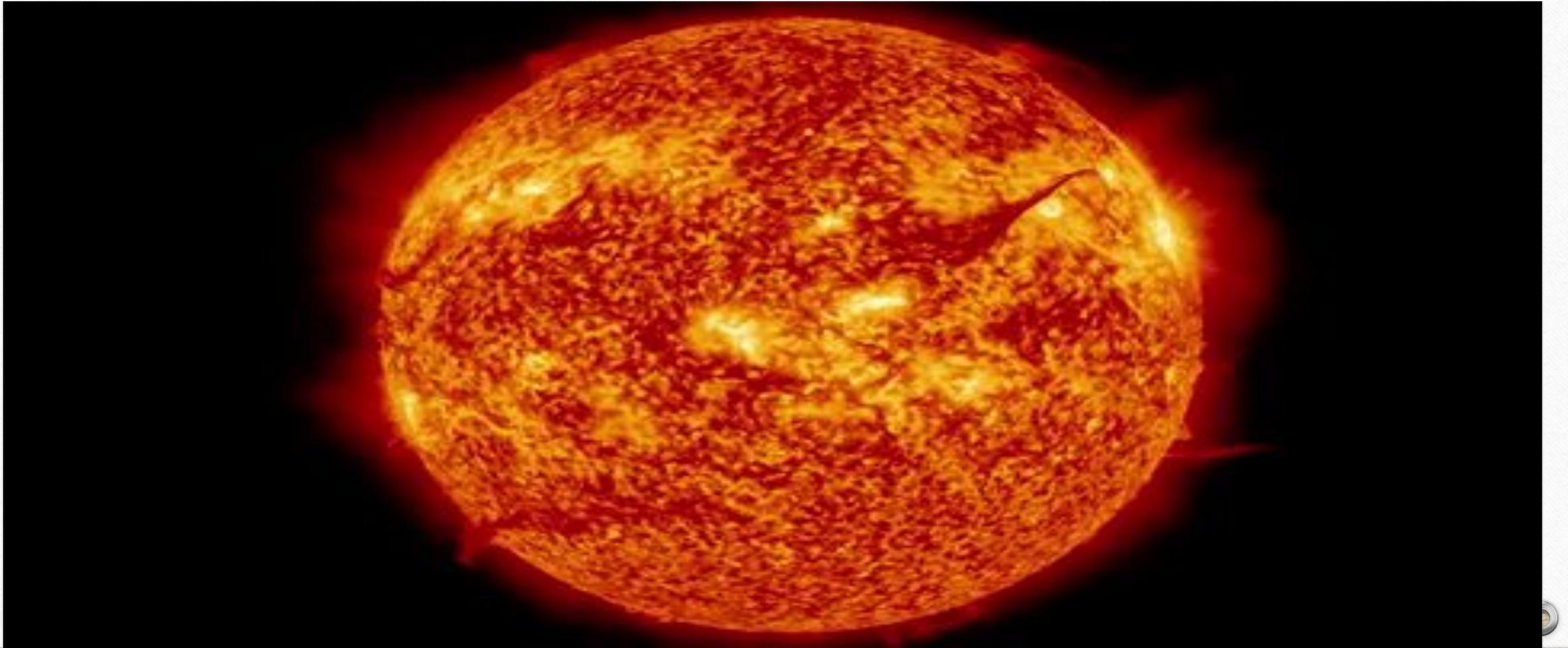
Наиболее крупными по своим масштабам проявлениями солнечной активности являются наблюдаемые в солнечной короне **протуберанцы** – огромные по объему облака газа, масса которых может достигать миллиардов тонн.

Они медленно меняют свою форму и могут существовать в течение нескольких месяцев.



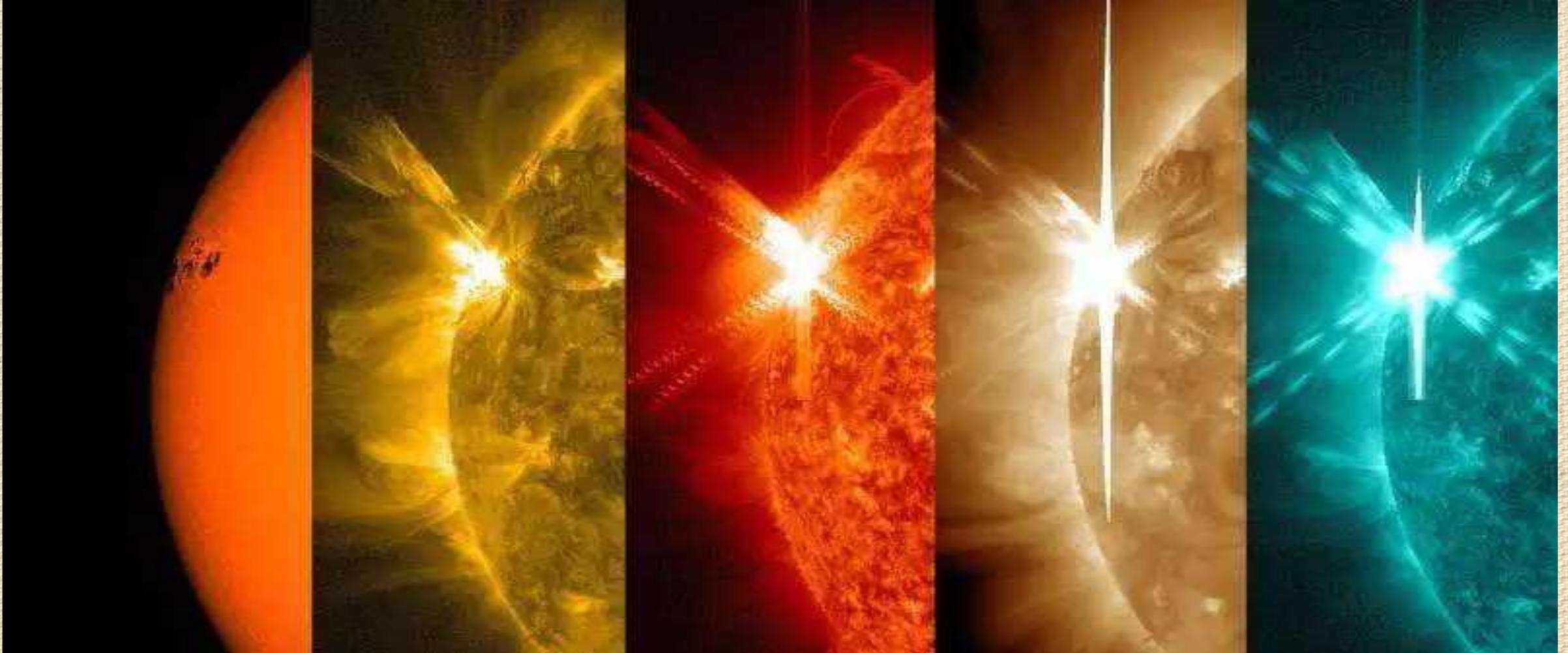
Порой отдельные части протуберанцев быстро устремляются вверх со скоростями порядка нескольких сотен километров в секунду и поднимаются на огромную высоту (до 1 млн км), что превышает радиус Солнца.

Оказалось, что происходит это во время вспышек.



Самыми мощными проявлениями солнечной активности являются **вспышки**, в процессе которых за несколько минут иногда выделяется энергия до  $10^{25}$  Дж (такова энергия примерно миллиарда атомных бомб).

Продолжительность вспышек обычно около часа, а слабые длятся всего несколько минут.





**Вспышка – это взрыв**, вызванный внезапным сжатием солнечной плазмы.

Солнечная плазма в области вспышки может нагреваться до температуры порядка 10 млн К.

Возрастает кинетическая энергия выбросов веществ, движущихся в короне и уходящих в межпланетное пространство со скоростями до 1000 км/с.

Потоки плазмы, обусловленные солнечными вспышками и корональными выбросами, через сутки-двое достигают окрестностей Земли.





Вещество, выбрасываемое из солнечной короны, представляет собой плазму с магнитным полем (так называемые **магнитные облака**).

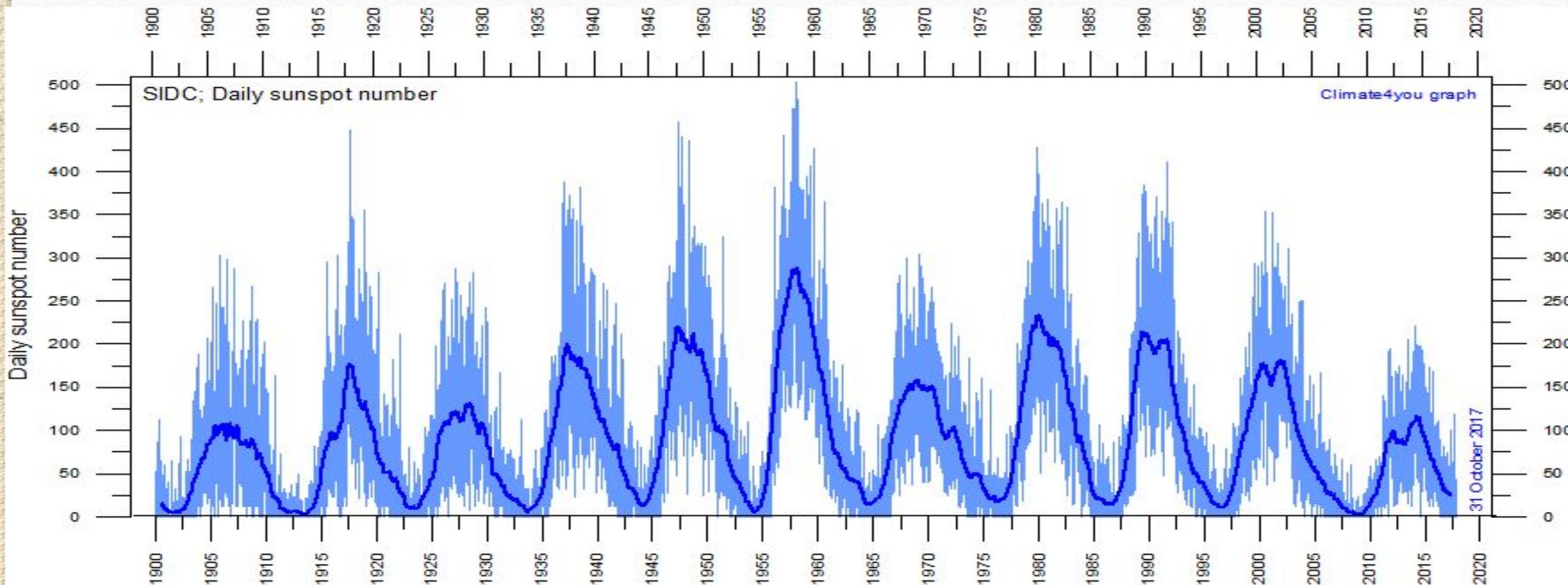
Взаимодействие такого облака с магнитосферой Земли вызывает аномальное возмущение – **магнитную бурю**.

Магнитные бури вызывают **возмущение ионосферы**, что приводит к нарушениям в прохождении радиосигналов, в частности, от навигационных спутников.

Изменение геомагнитного поля приводит к появлению **индуцированных токов** в линиях электропередачи и трубопроводах.



Число пятен и протуберанцев, частота и мощность вспышек на Солнце меняются с определенной, хотя и не очень строгой периодичностью – в среднем этот период составляет примерно 11,2 года.

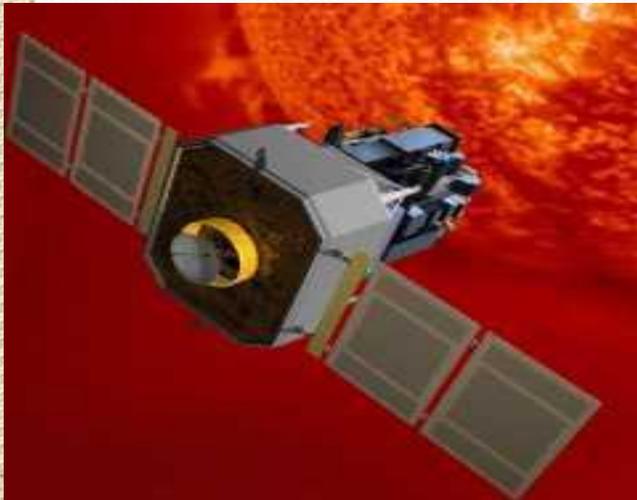


Солнечная активность (количество пятен на Солнце)

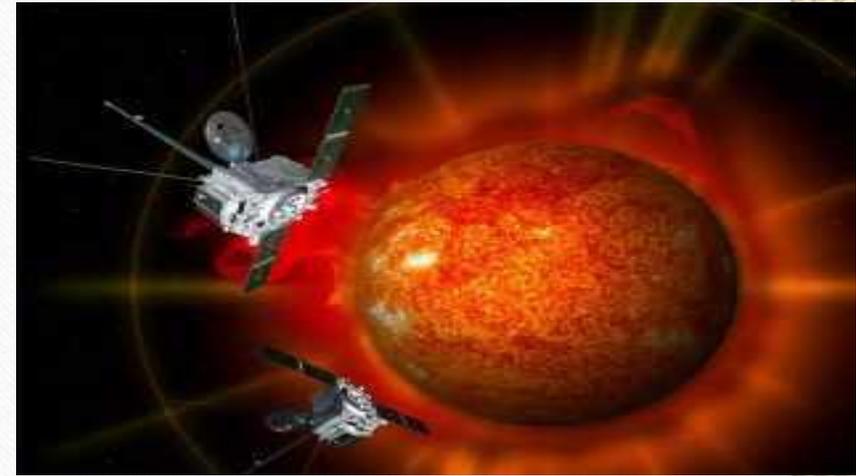
В настоящее время для изучения Солнца используются все средства космической техники.



**Метеоспутники** на геостационарной орбите уже более 30 лет ведут общий мониторинг солнечной активности, измеряя потоки рентгеновского излучения и солнечных космических лучей.



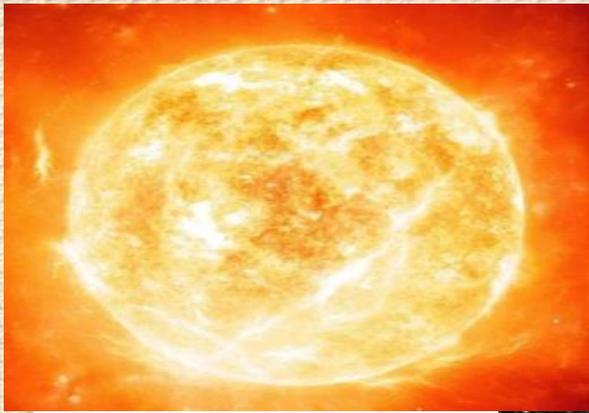
Для мониторинга корональных выбросов массы используется пара **КА СТЕРЕО**.



**КА СОХО** позволяет отслеживать появление пятен, вспышек и корональных выбросов массы и по их местоположению и динамике давать трехдневный прогноз, представляют ли они опасность для Земли.

# РАССТОЯНИЯ ДО ЗВЁЗД





Наше Солнце справедливо называют типичной звездой, но среди огромного многообразия мира звезд есть немало таких, которые значительно отличаются от него по физическим характеристикам.

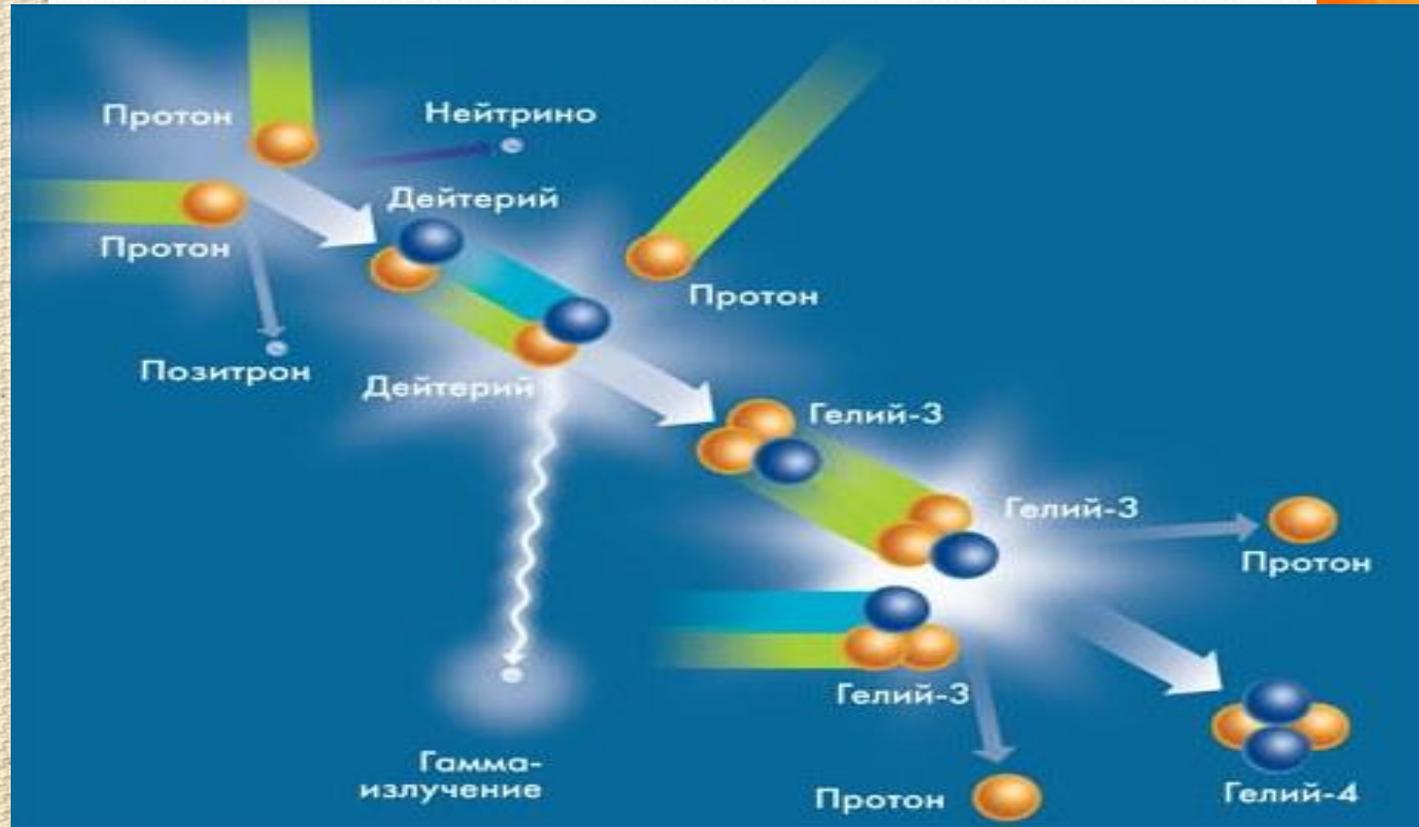
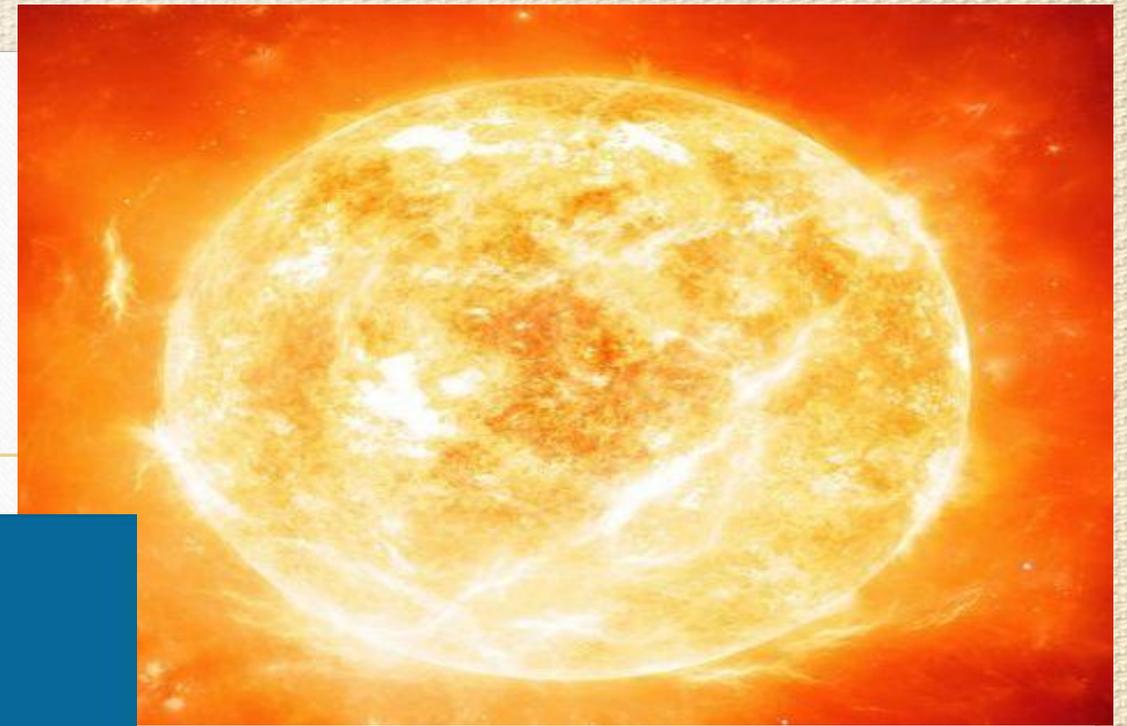


**Звезда** – это пространственно обособленный гравитационно связанный непрозрачный для излучения космический объект, в котором в значительных масштабах происходили, происходят или будут происходить термоядерные реакции превращения водорода в гелий.



Красный шар в центре снимка - звезда V838 Mon, окруженная множеством пылевых облаков.

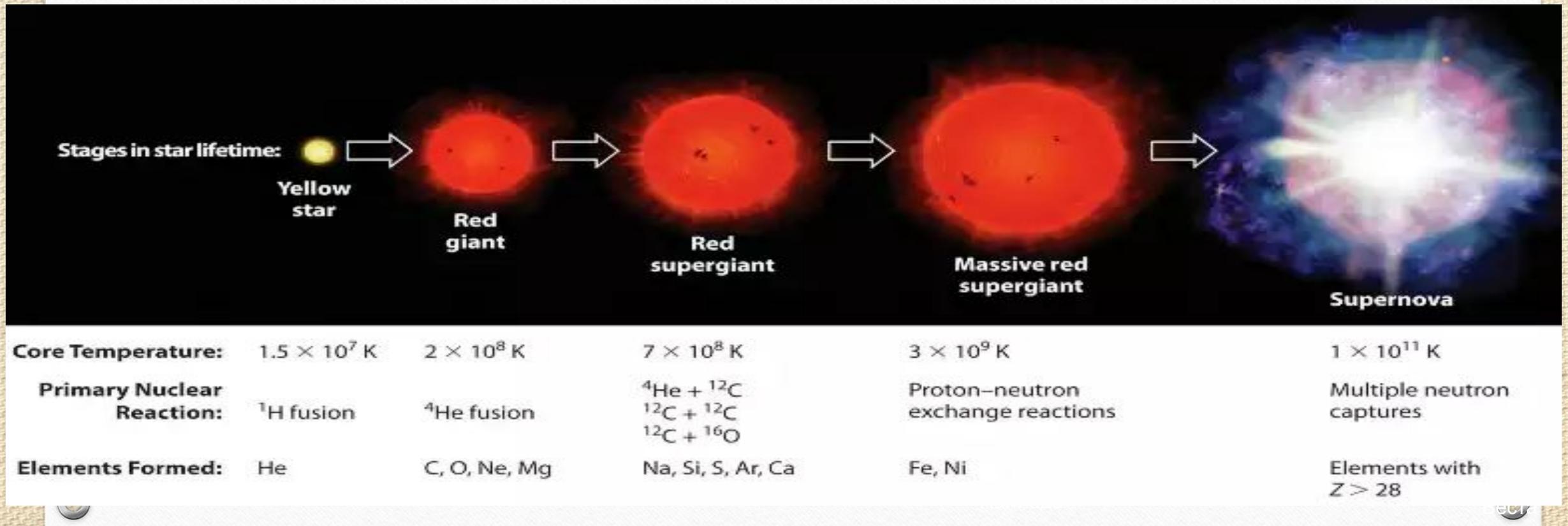
Солнце существует уже несколько миллиардов лет и мало изменилось за это время, поскольку в его недрах все еще происходят термоядерные реакции, в результате которых из четырех протонов (ядер водорода) образуется альфа-частица (ядро гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов).



Более массивные звезды расходуют запасы водорода значительно быстрее (за десятки миллионов лет).

После того как водород израсходован, начинаются реакции между ядрами гелия с образованием устойчивого изотопа углерод-12 и другие реакции, продуктами которых являются кислород и тяжелые элементы (натрий, сера, магний и т. д.).

У наиболее массивных звезд прекращение всех возможных термоядерных реакций сопровождается мощным взрывом, который наблюдается как вспышка **сверхновой звезды**.



Все элементы, которые входят в состав нашей планеты и всего живого на ней, образовались в результате **термоядерных реакций**, происходивших в звездах.

Именно термоядерные реакции являются характерной отличительной особенностью звезд от планет.

**Планета** – это космический объект, в котором за все время его существования не происходят никакие реакции термоядерного синтеза.



---

# Годичный параллакс и расстояния до звезд



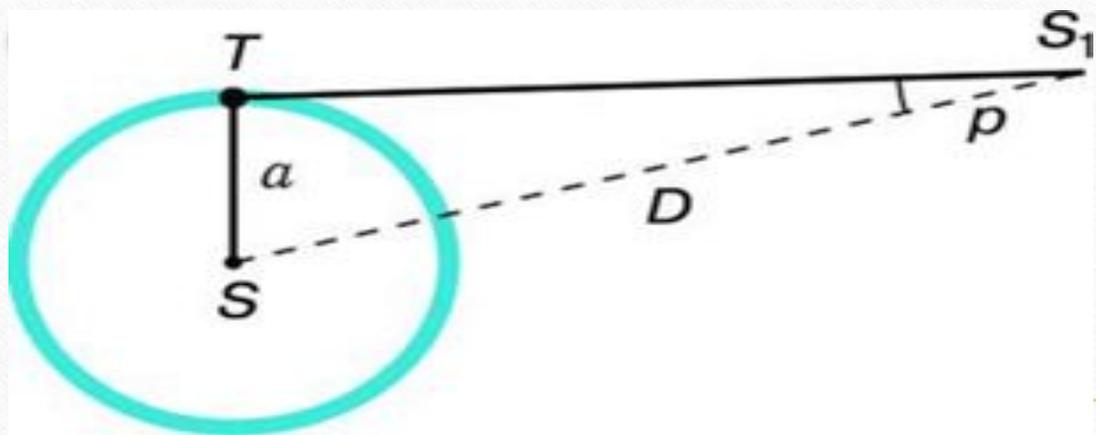
Мысли о том, что звезды – это далекие солнца, высказывались еще в глубокой древности.

Еще Аристотель понимал, что если Земля движется, то, наблюдая положение кой-либо звезды из двух диаметрально противоположных точек земной орбиты, можно заметить, что направление на звезду изменится.

Это кажущееся (параллактическое) смещение звезды  
расстояния до нее:

будет служить мерой

**чем смещение больше, тем ближе к нам расположена звезда.**



Но не только самому Аристотелю, но даже значительно позднее Копернику не удалось обнаружить это смещение.

Только в конце первой половины XIX в., когда телескопы были оборудованы приспособлениями для точных угловых измерений, удалось измерить такое смещение у ближайших звезд.

**Годичным параллаксом звезды  $p$**  называют угол, под которым со звезды можно было бы видеть большую полуось земной орбиты (равную 1 а. е.), перпендикулярную направлению на звезду

Определим **температуру фотосферы Солнца**.

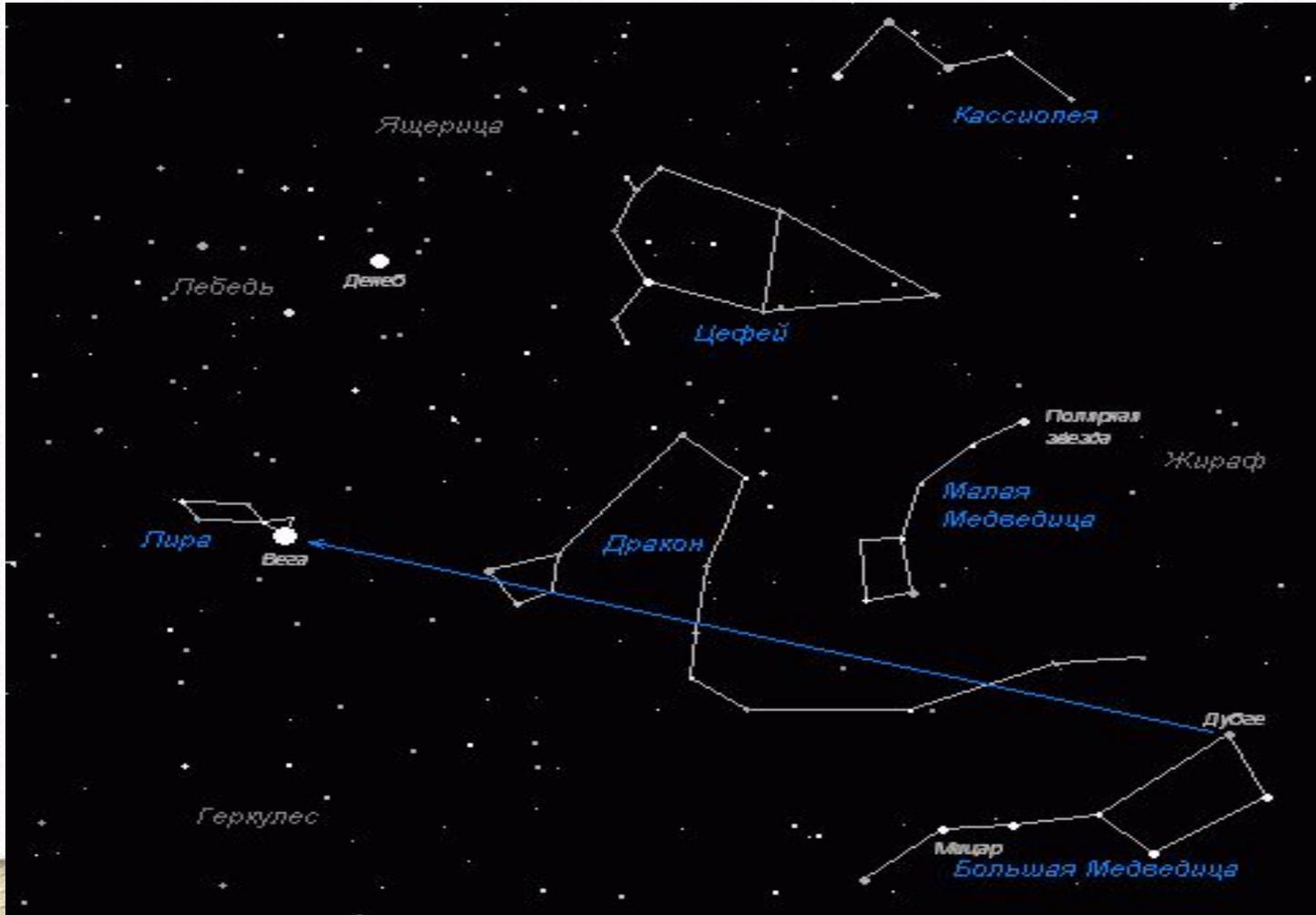
Энергия, излучаемая нагретым телом с единицы площади, определяется законом Стефана–Больцмана:  $E = \sigma \cdot T^4$ ,  
где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>).

Светимость Солнца:  $L = 4\pi R^2 \cdot E$   
или  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ .

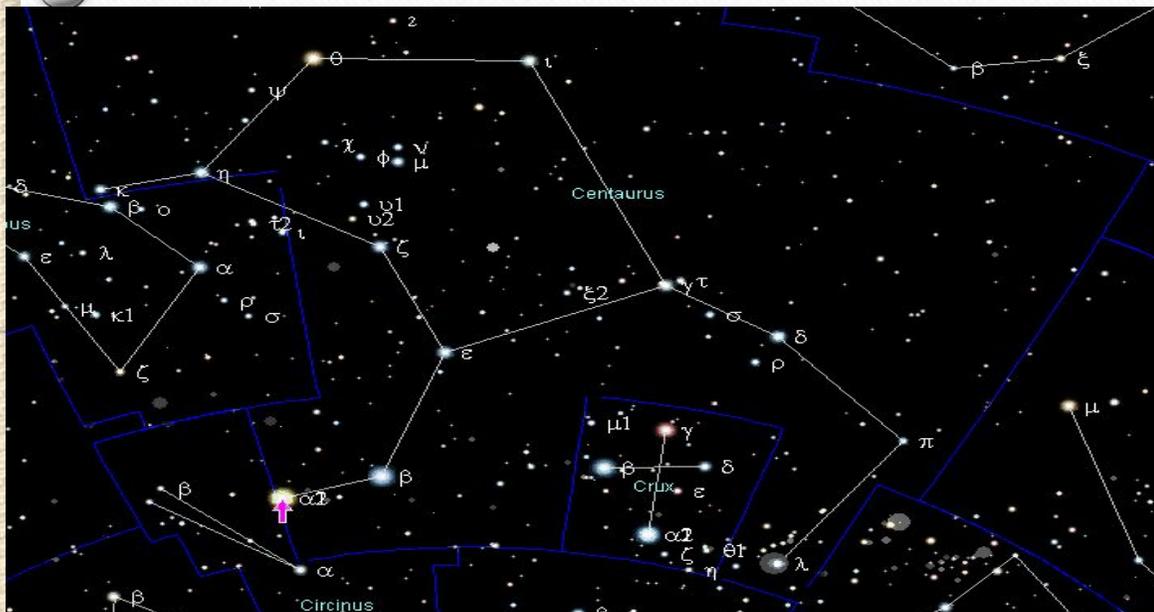
Отсюда

В 1837 г. впервые были осуществлены надежные измерения **годового параллакса**.

Русский астроном Василий Яковлевич Струве (1793–1864) провел эти измерения для ярчайшей звезды Северного полушария **Веги** ( $\alpha$  **Лиры**).



Василий Яковлевич Струве



Почти одновременно в других странах определили параллаксы еще двух звезд, одной из которых была **α Центавра**.

Эта звезда, которая с территории России не видна, оказалась ближайшей к нам.

Даже у нее годичный параллакс составил всего  $0,75''$ .

Под таким углом невооруженному глазу видна проволочка толщиной 1 мм с расстояния 280 м.

Определим **температуру фотосферы Солнца**.

Энергия, излучаемая нагретым телом с единицы площади, определяется законом Стефана–Больцмана:  $E = \sigma \cdot T^4$ ,  
где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Светимость Солнца:

$$L = 4\pi R^2 \cdot E$$

или

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4.$$

Отсюда



**Парсек** – это такое расстояние, на котором параллакс звезд равен 1".

Отсюда и название этой единицы: пар – от слова «параллакс», сек – от слова «секунда».

Расстояние в парсеках равно обратной величине годового параллакса.

Например, поскольку параллакс  $\alpha$  Центавра равен 0,75", расстояние до неё равно 1,3 парсека.

**Световой год** – это такое расстояние, которое свет, распространяясь со скоростью 300 000 км/с, проходит за год.

От ближайшей звезды свет идет до Земли свыше четырех лет, тогда как от Солнца около восьми минут, а от Луны немногим более одной секунды.

$$1 \text{ пк (парсек)} = 3,26 \text{ светового года} = 206\,265 \text{ а.е.} = 3 \cdot 10^{13} \text{ км.}$$



Спутник «Hipparcos»

К настоящему времени с помощью специального спутника «Hipparcos» измерены годовые параллаксы более 118 тыс. звезд с точностью 0,001".

Измерением годового параллакса можно надежно определить расстояния до звезд, удаленных от нас на 1000 пк, или 3000 св. лет.

Расстояние до более далеких звезд определяется другими методами.

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЗВЁЗД



# Видимая и абсолютная звёздные величины. Светимость звёзд

---



Звёзды, находящиеся на одинаковом расстоянии, могут отличаться по видимой яркости (т. е. по блеску).

Звезды имеют различную светимость.

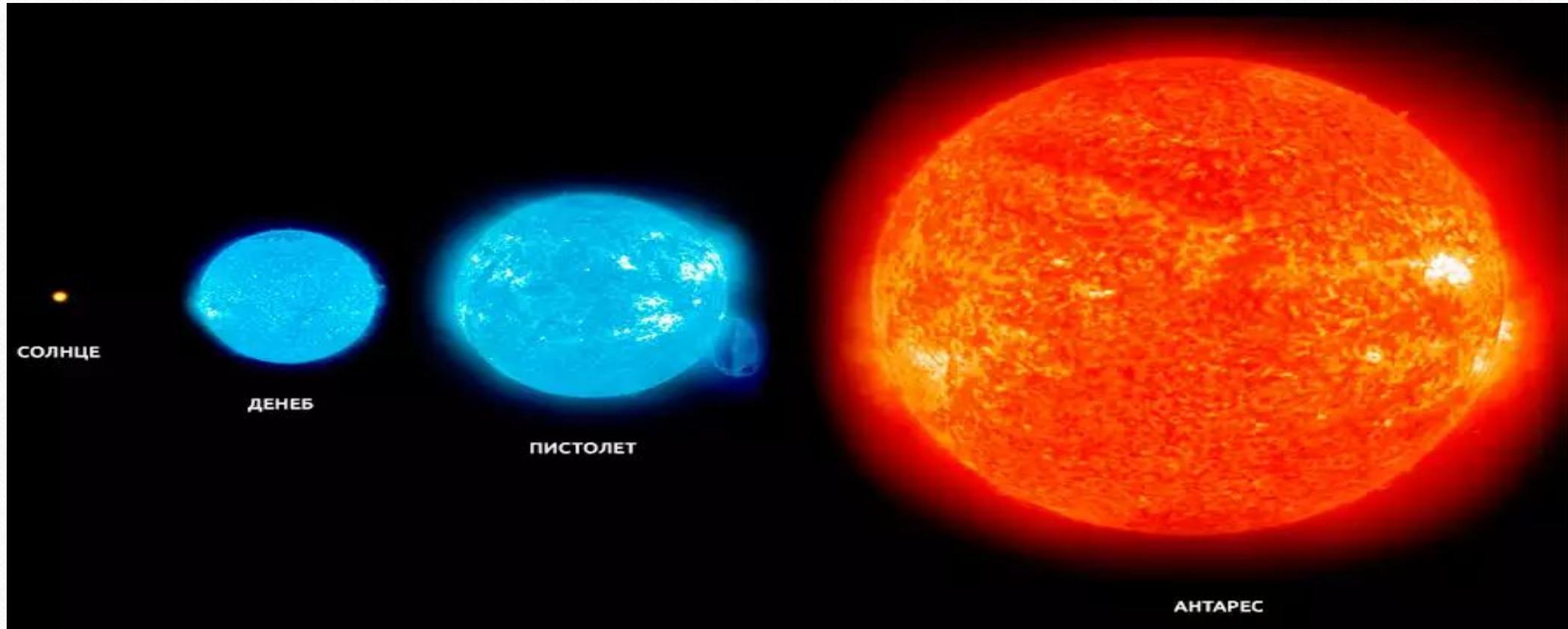
Солнце кажется самым ярким объектом на небе только потому, что оно находится гораздо ближе всех остальных звезд.

**Светимостью** называется полная энергия, излучаемая звездой в единицу времени.

Светимость выражается в абсолютных единицах (ваттах) или в единицах светимости Солнца.

В астрономии принято сравнивать звезды по светимости, рассчитывая их блеск (звездную величину) для одного и того же стандартного расстояния – 10 пк.

Видимая звездная величина, которую имела бы звезда, если бы находилась от нас на расстоянии  $D_0 = 10$  пк, получила название **абсолютной звездной величины  $M$** .



Размеры в космосе обманчивы: Денеб с Земли сияет ярче Антареса, а вот Пистолет - не виден совсем.

Тем не менее, наблюдателю с нашей планеты и Денеб и Антарес кажутся просто незначительными точками, по сравнению с Солнцем. Насколько это неверно можно судить по простому факту: Пистолет выпускает в секунду столько же света, сколько Солнце - за год!

Определим **температуру фотосферы Солнца**.

Энергия, излучаемая нагретым телом с единицы площади, определяется законом

Стефана–Больцмана:  $E = \sigma \cdot T^4$ ,

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Светимость Солнца:  $L = 4\pi R^2 \cdot E$

или  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ .

Отсюда



Абсолютная звездная величина Солнца  $M_{\square} = 5^m$ , т.е. с расстояния 10 пк наше Солнце выглядело бы как звезда пятой звездной величины.

Зная абсолютную звездную величину звезды  $M$ , легко вычислить ее светимость  $L$ .

Считая светимость Солнца  $L_{\odot} = 1$ , получаем:

$$L = 2,512^{5-M},$$

или  $\lg L = 0,4 (5 - M)$ .

По светимости (мощности излучения) звезды значительно отличаются друг от друга: некоторые излучают энергию в несколько миллионов раз больше, чем Солнце, другие – в сотни тысяч раз меньше.



Абсолютные звездные величины звезд на и более высокой светимости (**гигантов** и **сверхгигантов**) достигают  $M = -9^m$ .

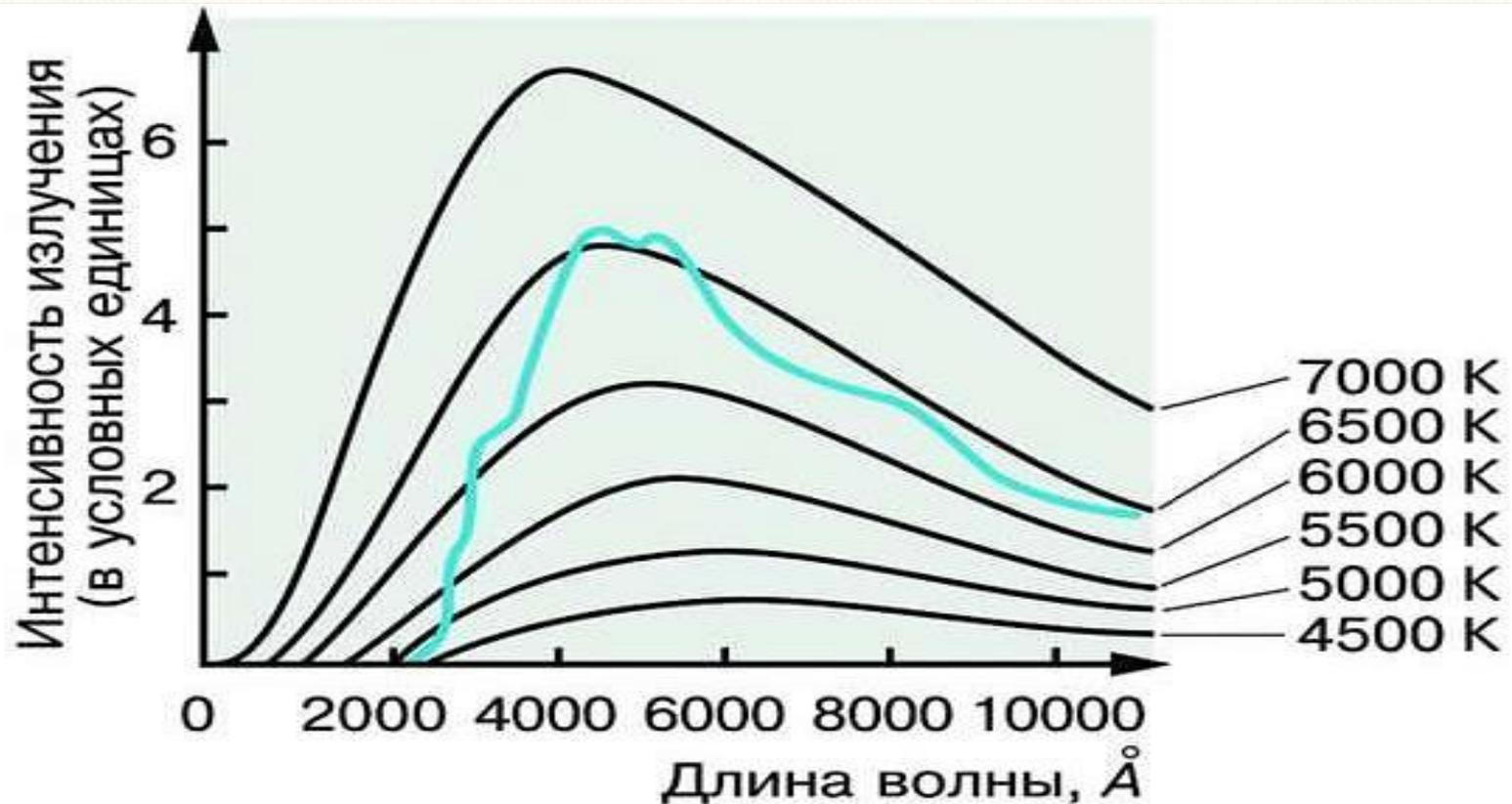
**Звезды-карлики**, обладающие наименьшей светимостью, имеют абсолютную звездную величину  $M = +17^m$ .

---

# Спектры, цвет и температура звёзд

Цвет любого нагретого тела, в частности звезды, зависит от его температуры.

Более полное представление об этой зависимости дает изучение звездных спектров. Для большинства звезд это спектры поглощения, в которых на фоне непрерывного спектра наблюдаются темные линии. Температуру наружных слоев звезды, от которых приходит излучение, определяют по распределению энергии в непрерывном спектре, а также по интенсивности разных спектральных линий.



Распределение энергии в непрерывном спектре Солнца и чёрного тела при различных температурах

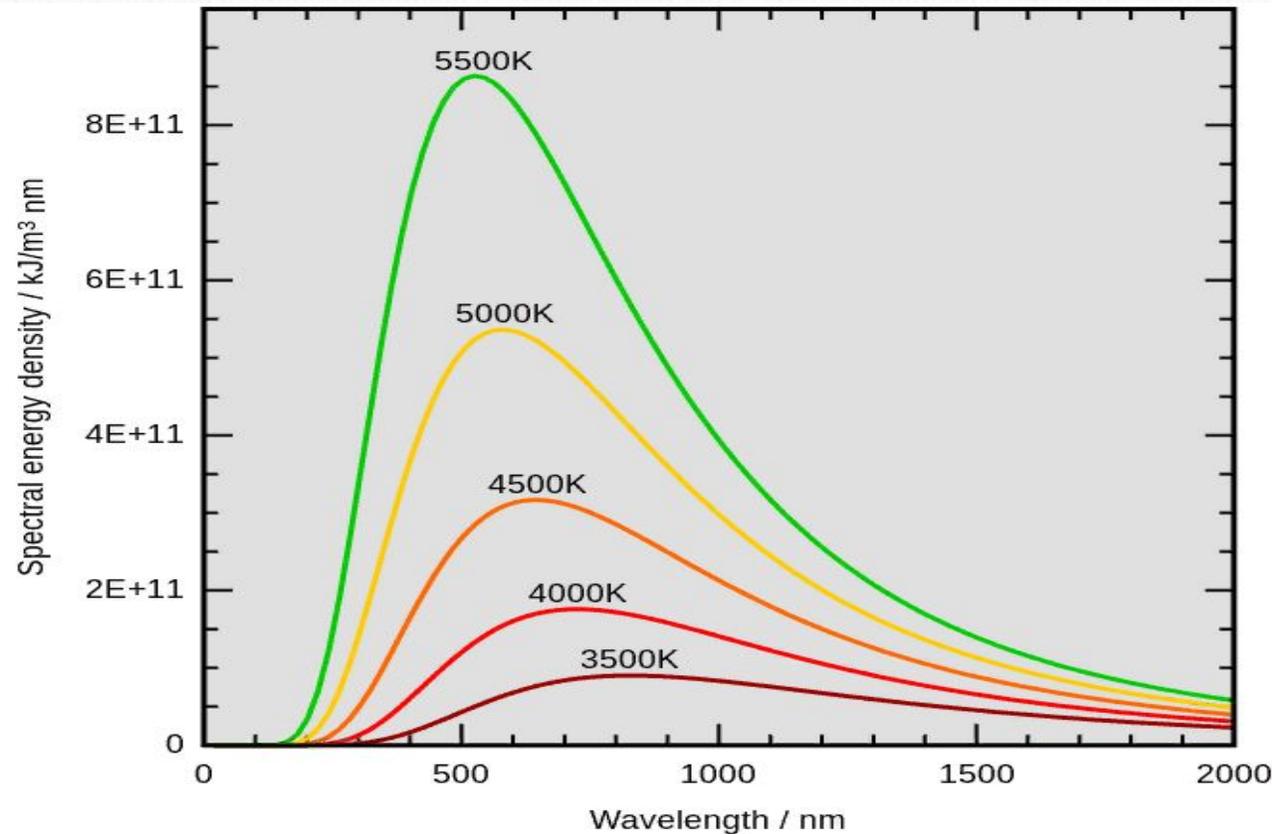
Определим **температуру фотосферы Солнца**.

Энергия, излучаемая нагретым телом с единицы площади, определяется законом Стефана–Больцмана:  $E = \sigma \cdot T^4$ ,  
где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>).

Светимость Солнца:  $L = 4\pi R^2 \cdot E$

или  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ .

Отсюда

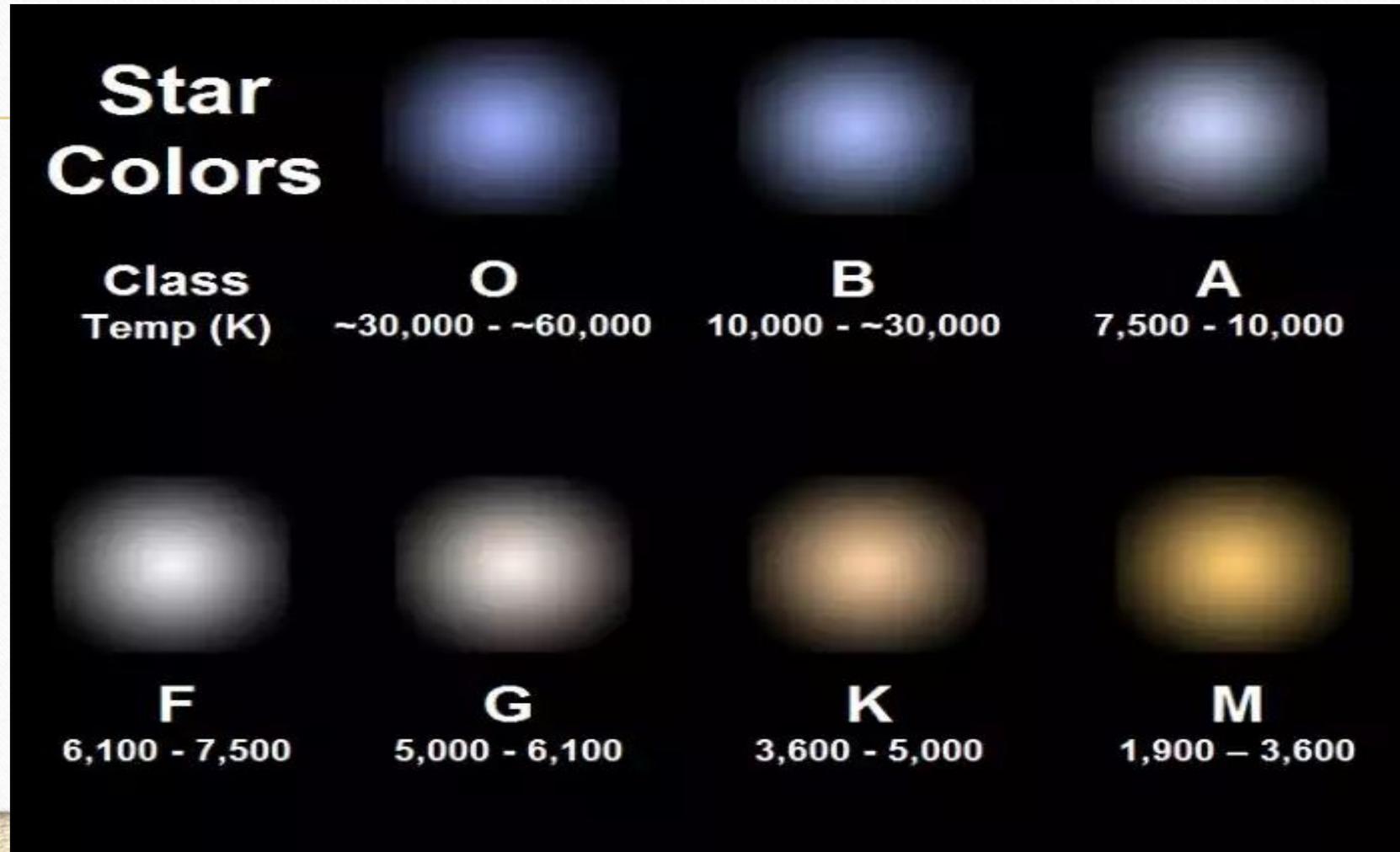


Зависимость мощности излучения чёрного тела от длины волны  
Видимый цвет абсолютно чёрных тел с разной температурой

Температура для различных типов звезд заключена в пределах

от 2500 до 50 000 К.

По ряду характерных особенностей спектров звезды разделены на **спектральные классы**, которые обозначены латинскими буквами и расположены в порядке, соответствующем убыванию температуры: **O**, **B**, **A**, **F**, **G**, **K**, **M**.





Acrux	24,730°C and 27,730°C
Beta Centauri	24,730°C
Spica	22,130°C
Achernar	14,730°C
Rigel	10,730°C
Regulus	10,030°C
Sirius	9,670°C
Canopus	7,080°C
Alpha Centauri	5,520°C and 4,990°C
Capella	4,670°C
Arcturus	4,020°C
Aldebaran	3,640°C
Betelgeuse	3,320°C
Antares	3,230°C

Изменение температуры меняет состояние атомов и молекул в атмосферах звезд, что отражается в их спектрах.

У наиболее холодных (красных) звезд класса **M** с температурой около **3000 K** (Антарес и Бетельгейзе), в спектрах наблюдаются линии поглощения некоторых двухатомных молекул (оксидов титана, циркония и углерода).

В спектрах желтых звезд класса **G** с температурой около **6000 K** (Солнце, Капелла) преобладают линии металлов: железа, натрия, кальция и т. д.

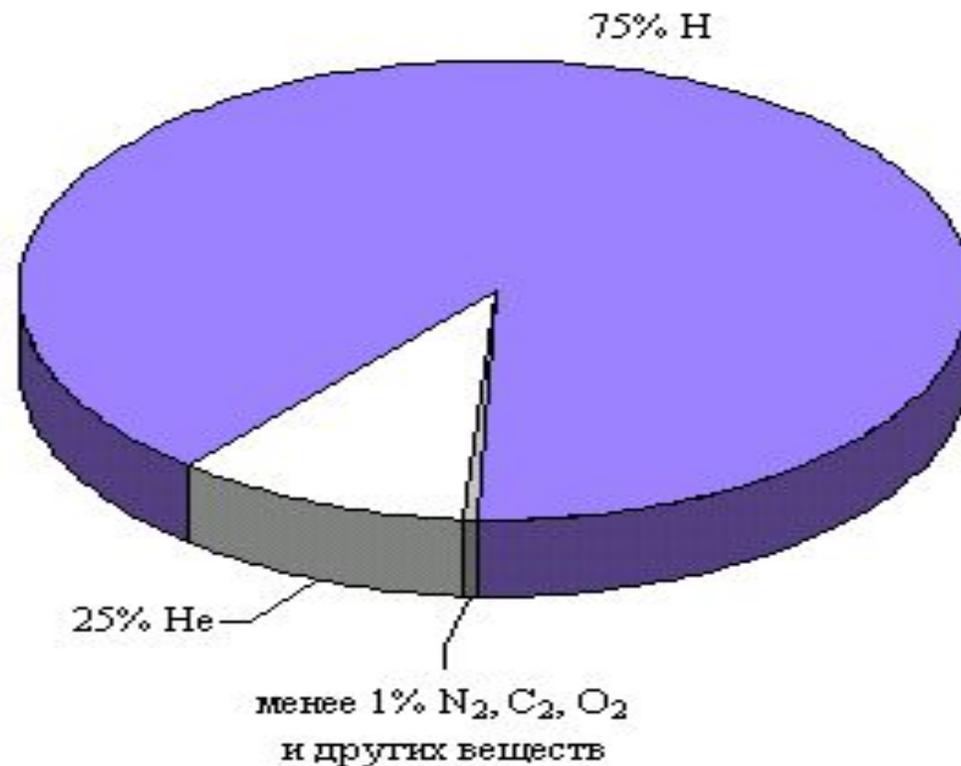
Для спектров белых звезд класса **A** с температурой около **10 000 K** (Вега, Денеб и Сириус), наиболее характерны линии водорода и множество слабых линий ионизованных металлов.

В спектрах наиболее горячих звезд появляются линии нейтрального и ионизованного гелия.

Различия звездных спектров объясняются отнюдь не разнообразием их химического состава, а различием температуры и других физических условий в атмосферах звезд.

Изучение спектров показывает, что преобладают в составе звездных атмосфер (и звезд в целом) **водород** и **гелий**.

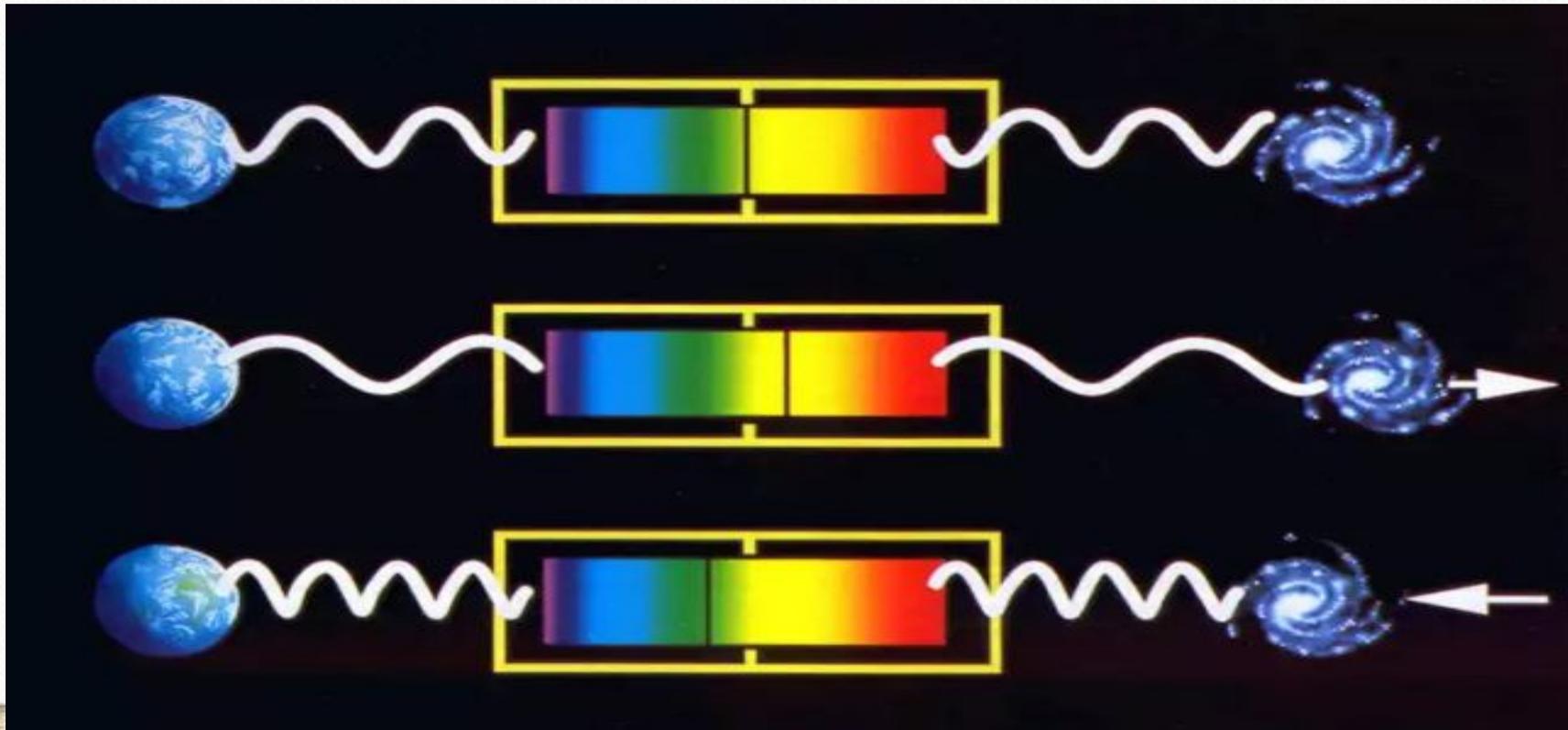
На долю всех остальных химических элементов приходится не более нескольких процентов.



Измерение положения спектральных линий позволяет не только получить информацию о химическом составе звезд, но и определить скорость их движения.

В случае **уменьшения** расстояния между наблюдателем и звездой длина волны уменьшается и соответствующая линия смещается к **сине-фиолетовому** концу спектра.

При **удалении** звезды длина волны излучения увеличивается, а линия смещается в **красную** его часть.



Явление изменения частоты и, соответственно, длины волны излучения, воспринимаемое наблюдателем, вследствие движения источника излучения и/или движения наблюдателя получило название **эффекта Доплера**.



Определим **температуру фотосферы** Солнца.

Энергия, излучаемая нагретым телом с единицы площади, определяется законом Стефана–Больцмана:  $E = \sigma \cdot T^4$ ,  
где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Светимость Солнца:  $L = 4\pi R^2 \cdot E$   
или  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ .

Отсюда

---

# Диаграмма «спектр–светимость»

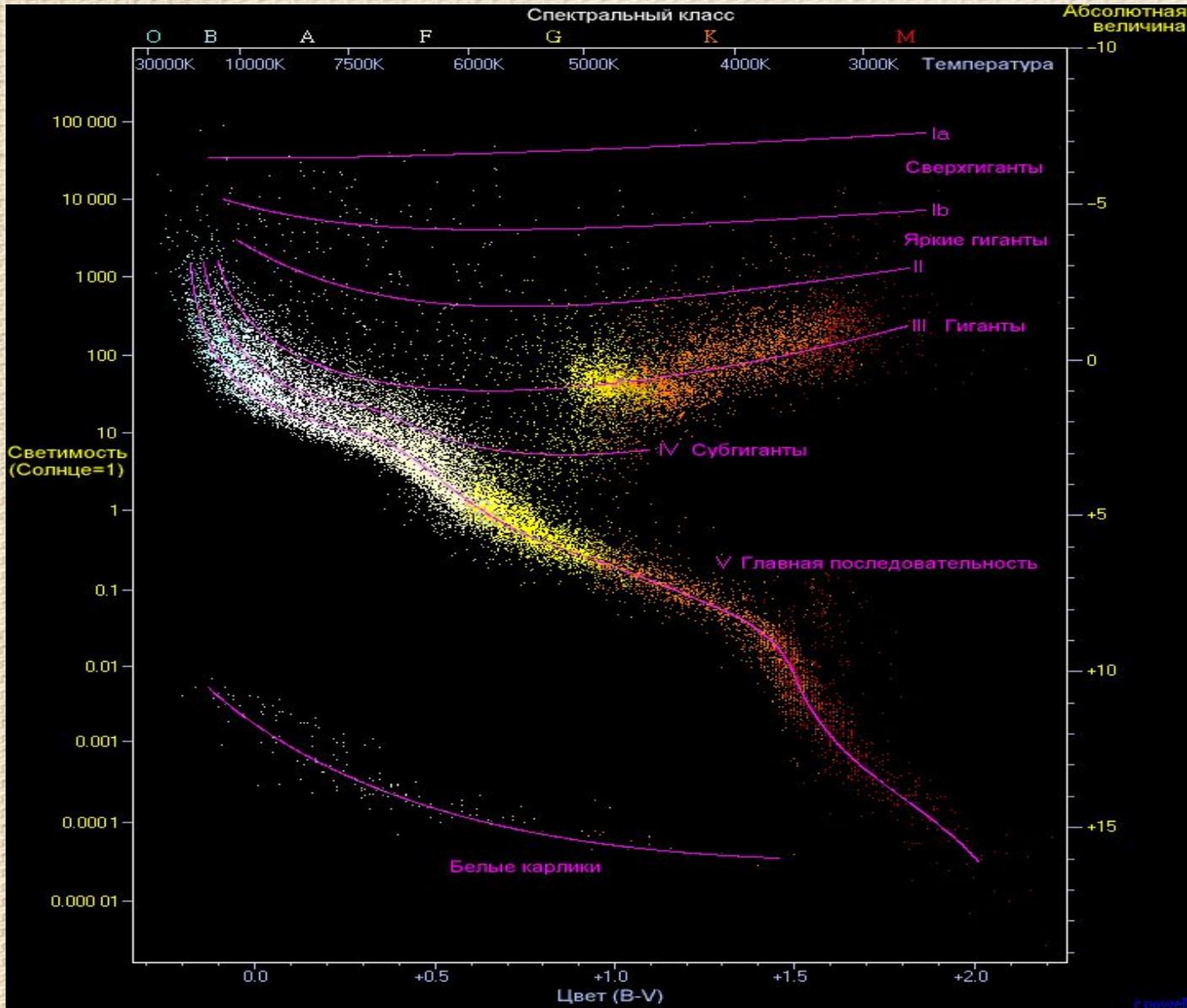


Диаграмма «спектр-светимость»

Полученные данные о светимости и спектрах звезд в начале XX в. были сопоставлены двумя астрономами - Эйнар Герцшпрунгом (Голландия) и Генри Расселлом (США) - и представлены в виде диаграммы, которая получила название «диаграмма Герцшпрунга-Расселла».

Звёзды образуют несколько групп, названных *последовательностями*.

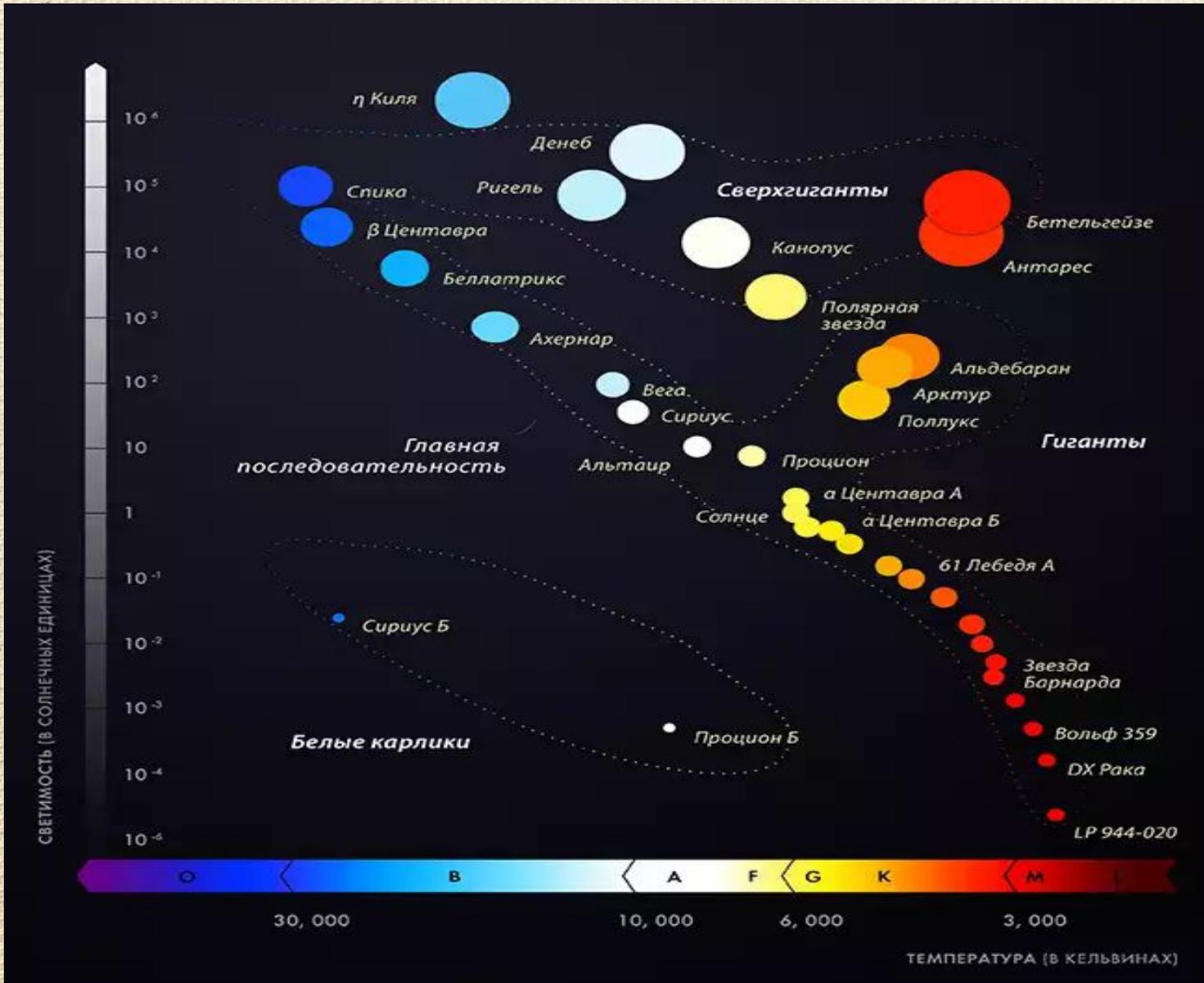


Диаграмма «спектр-светимость»

Наиболее многочисленная (примерно 90% всех звезд) - **главная последовательность**, к числу звезд которой принадлежит наше Солнце.

Самую высокую светимость имеют наиболее горячие звезды, а по мере уменьшения температуры светимость падает.

Красные звезды малой светимости получили название **красных карликов**.

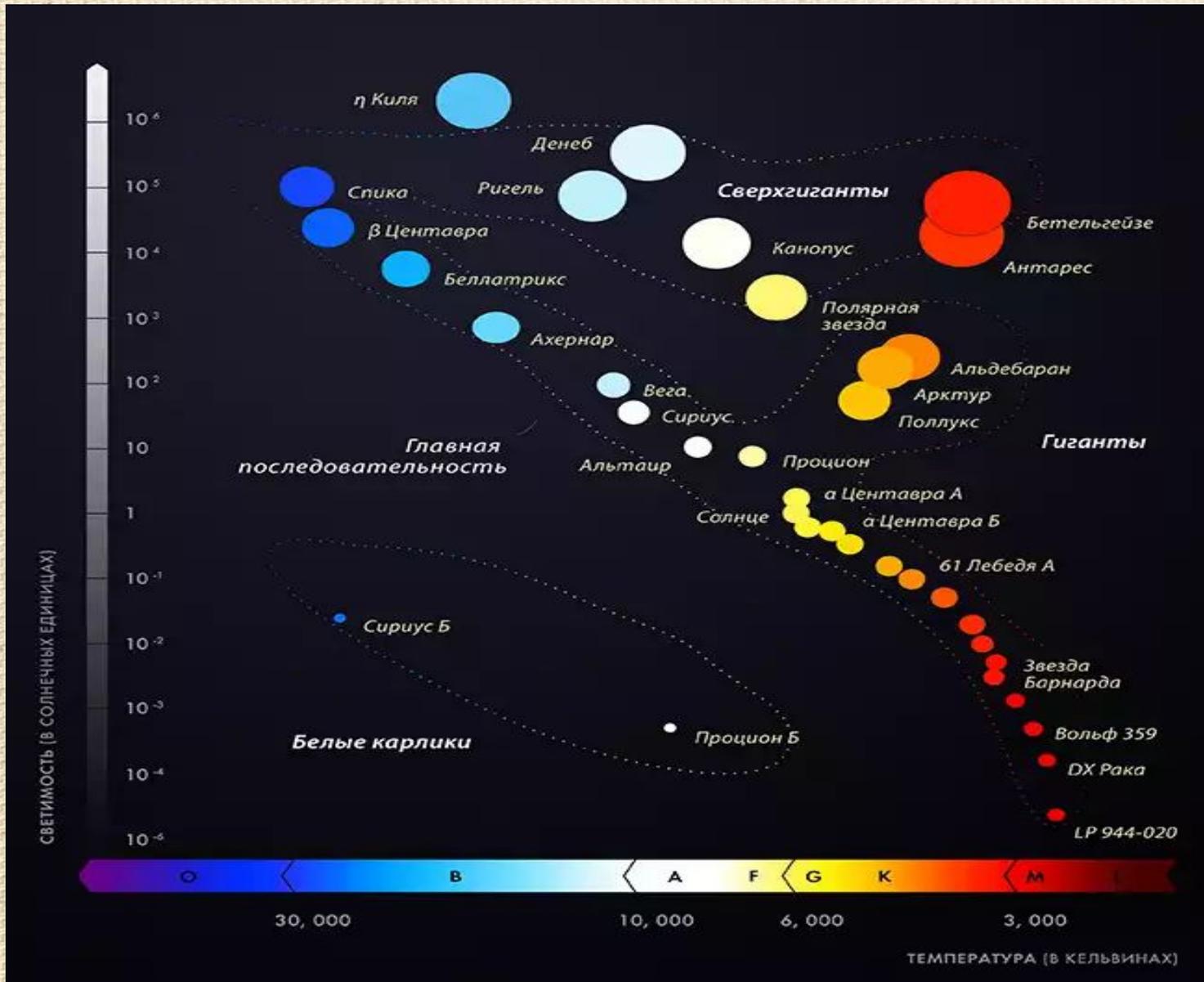
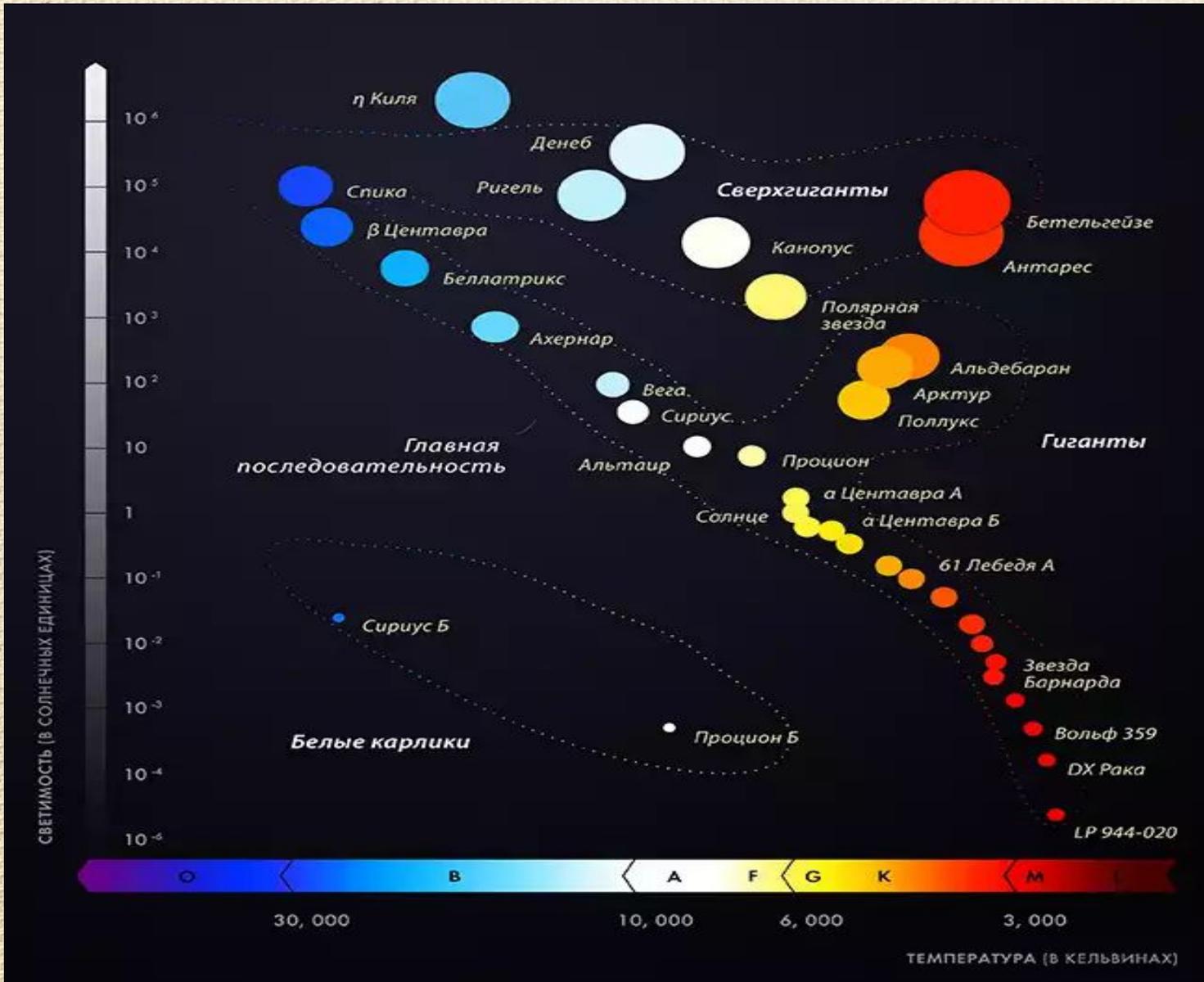


Диаграмма «спектр-светимость»

Помимо звезд, принадлежащих главной последовательности и потому имеющих малую светимость, на диаграмме представлены **звезды высокой светимости**, которая практически не меняется при изменении их температуры.

Такие звезды принадлежат двум последовательностям (**гиганты** и **сверхгиганты**), получившим эти названия вследствие своей светимости, которая значительно превосходит светимость Солнца.



Особое место на диаграмме занимают горячие звезды малой светимости - **белые карлики**.

Диаграмма «спектр-светимость»

## Пример решения задачи

Какова светимость звезды  $\xi$  Скорпиона, если ее звездная величина  $3^m$ , а расстояние до нее 7500 св. лет?

Определим **температуру фотосферы** Солнца.

Энергия, излучаемая нагретым телом с единицы площади, определяется законом

Стефана–Больцмана:  $E = \sigma \cdot T^4$ ,

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>).

Светимость Солнца:  $L = 4\pi R^2 \cdot E$

или  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ .

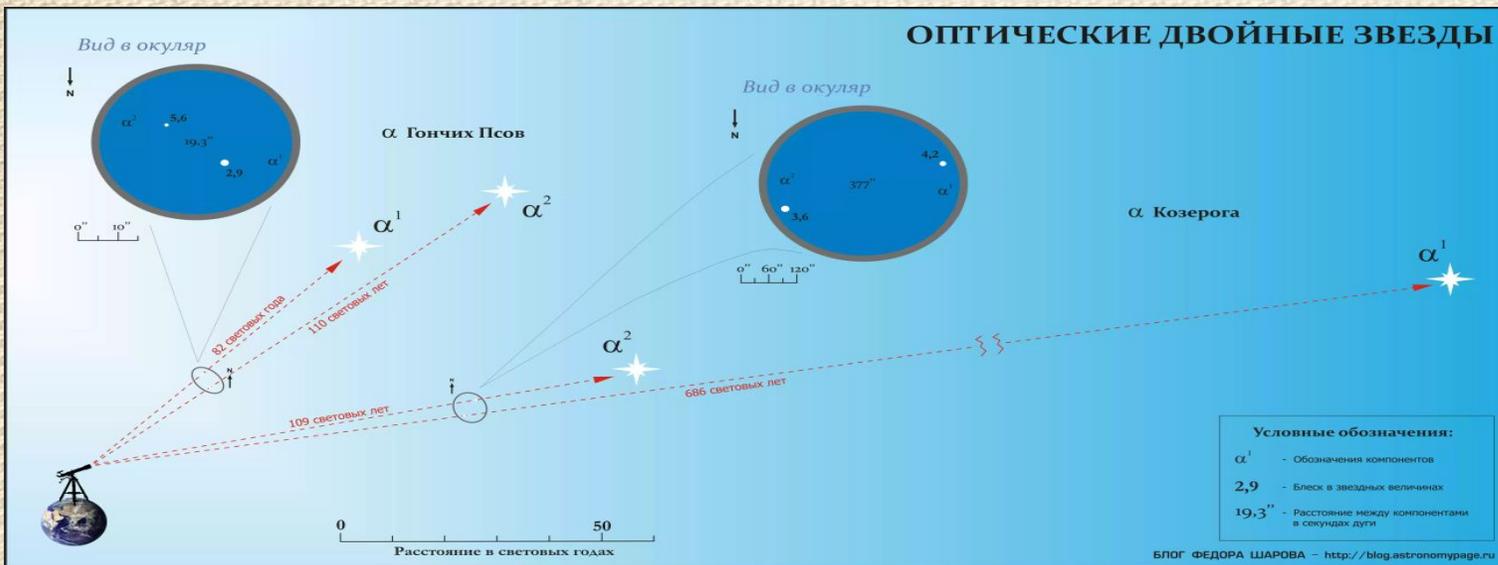
Отсюда

# МАССЫ И РАЗМЕРЫ ЗВЁЗД



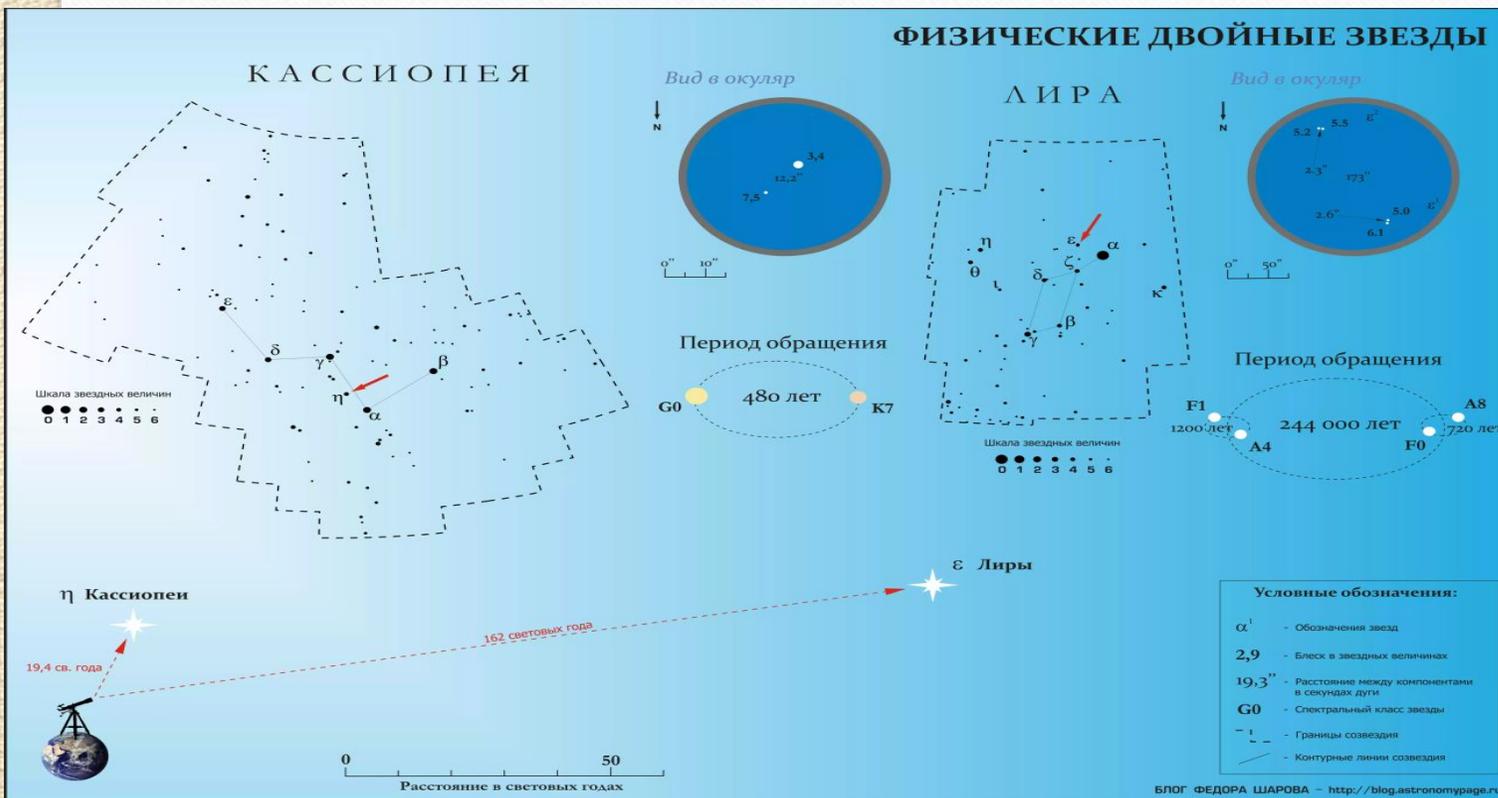
---

**Двойные звёзды.  
Определение массы звёзд**

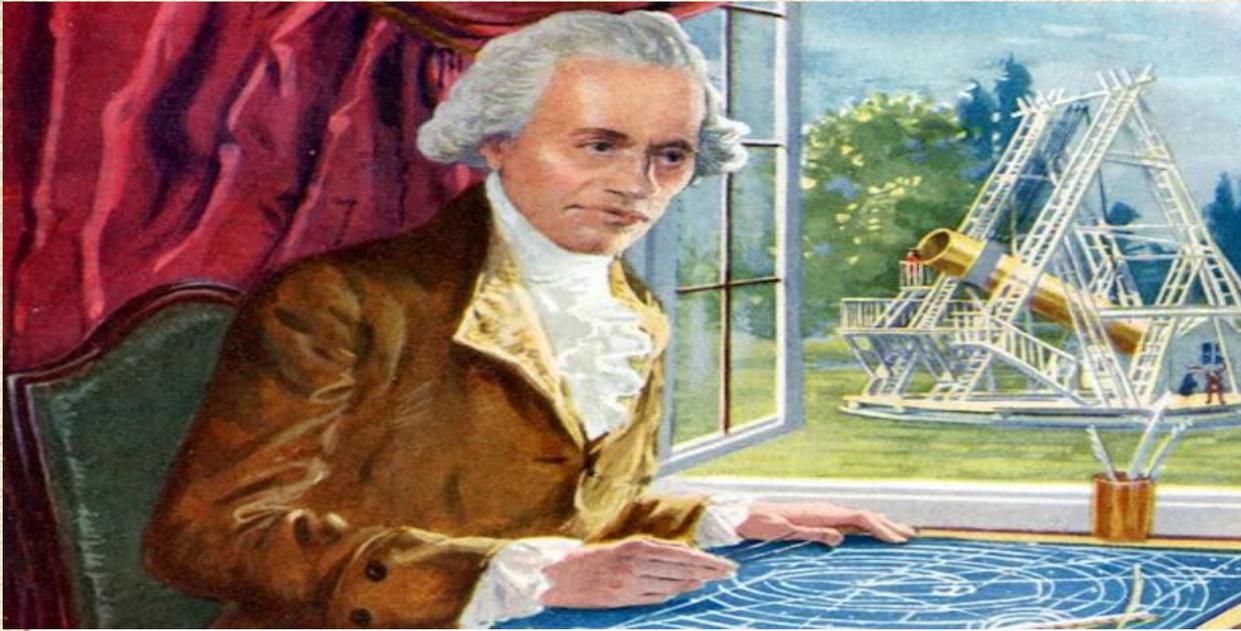


Среди звезд, которые видны на небе рядом, различают **оптические двойные** и **физические двойные** звезды.

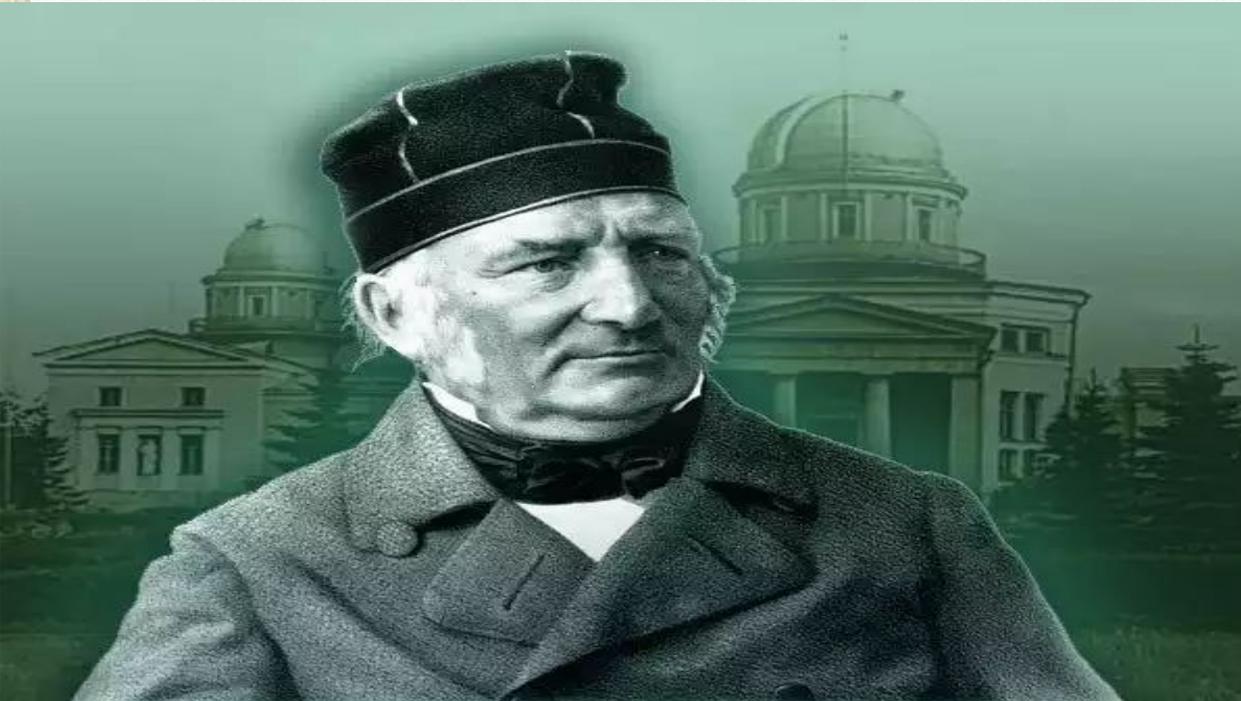
В первом случае такие две звезды хотя и видны вблизи, но находятся в пространстве далеко друг от друга.



Если же в результате наблюдений выясняется, что они образуют единую систему и обращаются вокруг общего центра масс под действием взаимного тяготения, то их называют **физическими двойными** звездами.



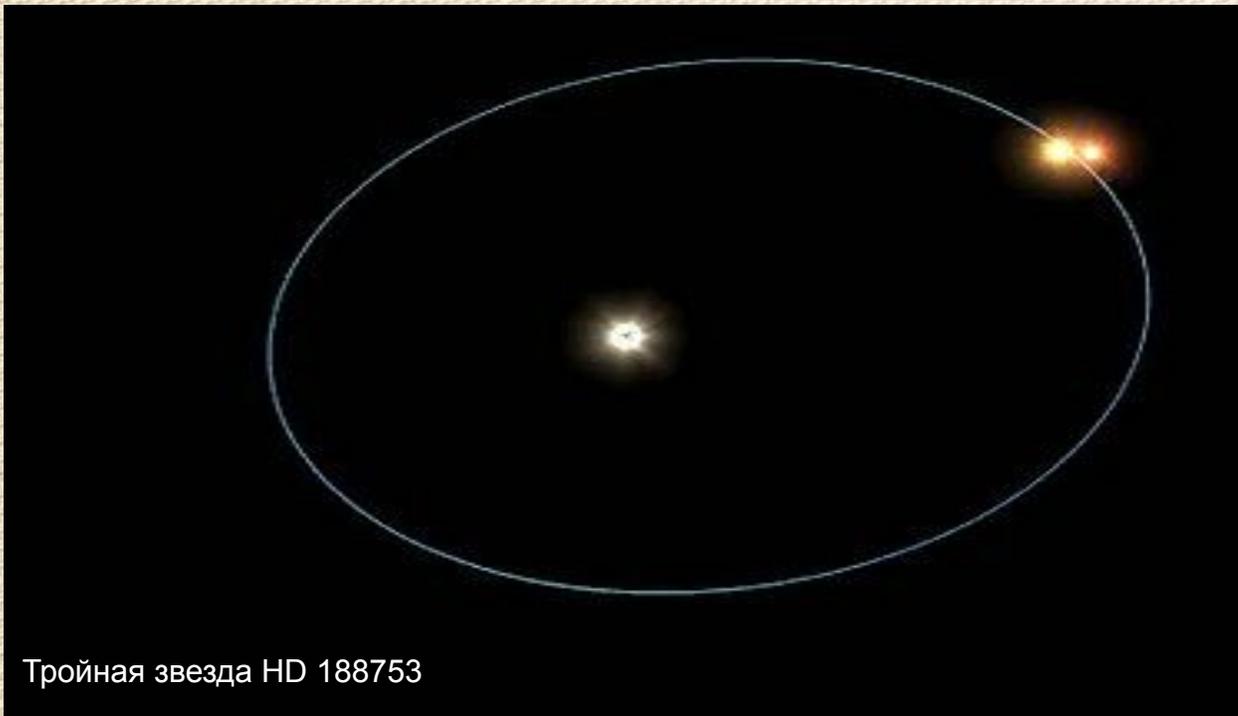
Первым, кто доказал, что **физические двойные звезды** действительно существуют, был известный английский астроном **Вильям Гершель** (1738–1822).



Множество двойных звезд открыл и исследовал **В. Я. Струве**.

В настоящее время известно уже более 70 тыс. этих объектов.

Василий Яковлевич (Фридрих Георг Вильгельм) Струве (1793—1864) выдающийся астроном, член Петербургской академии наук, первый директор Пулковской обсерватории, член-учредитель Русского географического общества



Тройная звезда HD 188753

Когда число звезд в системе, связанной взаимным тяготением, оказывается более двух, то их называют **кратными**.

В настоящее время считается, что большинство звезд (более 70%) образуют системы большей или меньшей кратности.



Сравнительные размеры компонентов системы α Центавра и Солнца

**α Центавра** является тройной звездой, одна из которых расположена ближе всего к нам и получила название **Проксима** (в переводе с греческого – *ближайшая*).

Кастор — кратная звезда, состоящая из шести компонентов

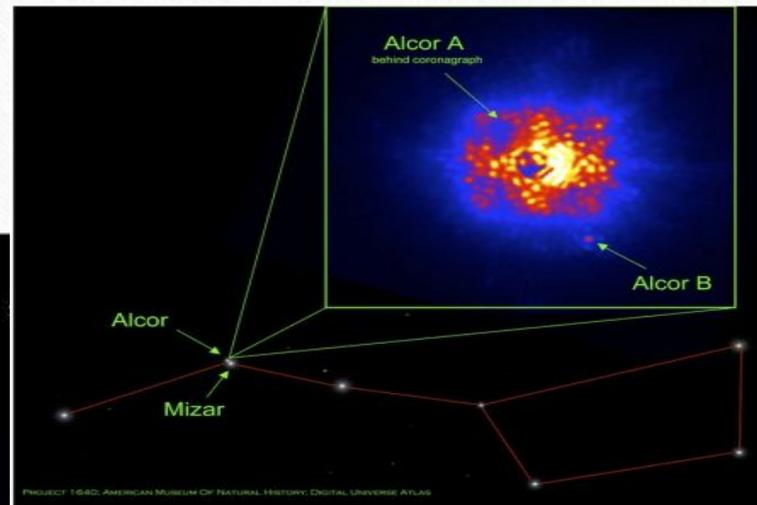
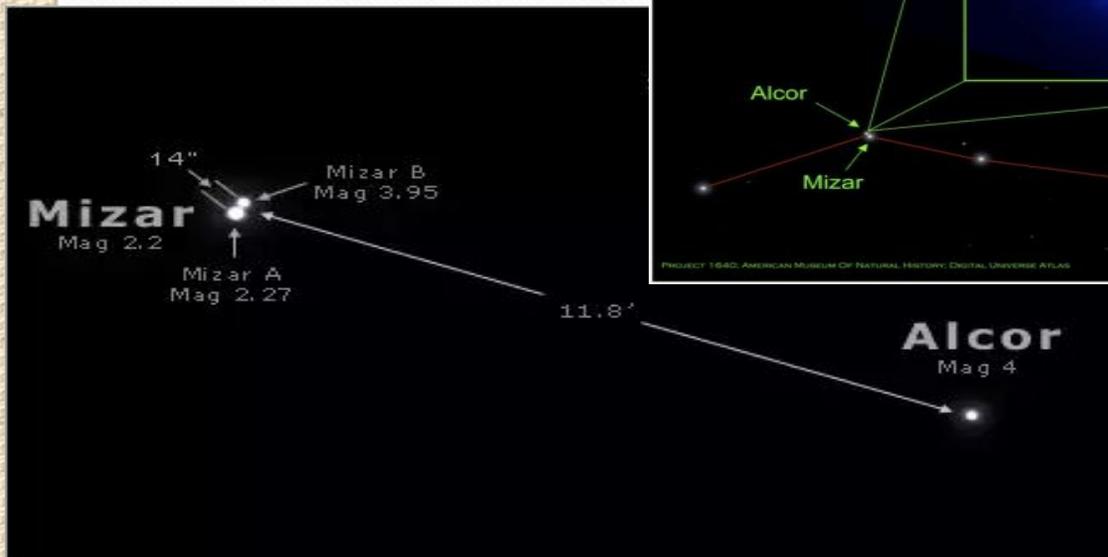


Редким примером двойной звезды, оба компонента которой различимы даже невооруженным глазом, являются **Мицар** и **Алькор** в созвездии Большой Медведицы.

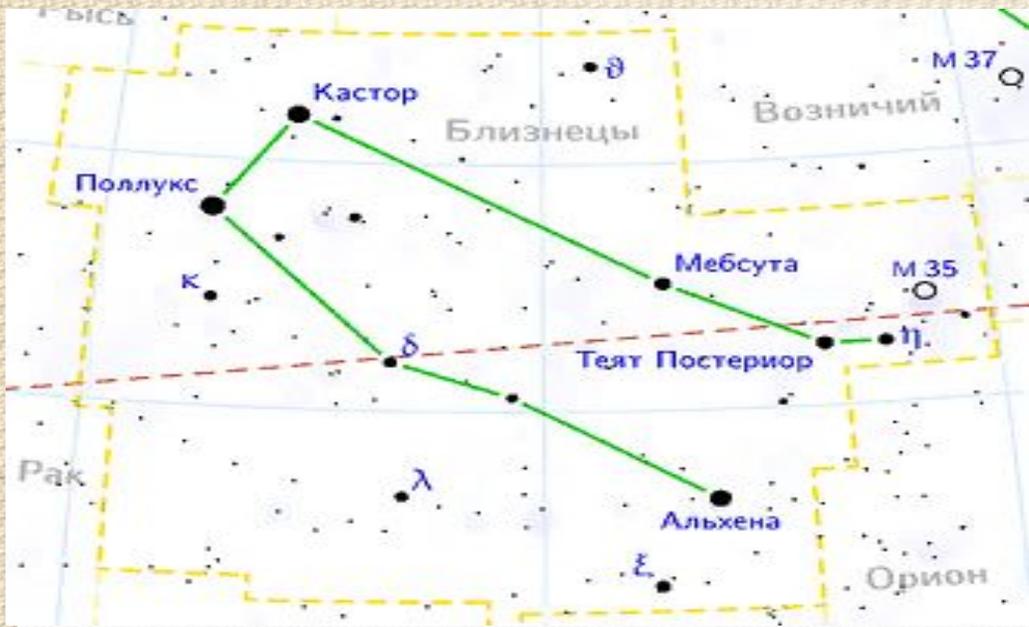
Среди ярчайших звезд также были обнаружены двойные: Сириус, Капелла, Кастор и др.

Более того, оказалось, что во многих случаях каждая из звезд такой пары сама состоит из нескольких звезд.

Так, Мицар и Капелла имеют в своем составе четыре компонента, а Кастор — шесть.



Люди с хорошим зрением видят рядом с Мицаром звезду Алькор. Название в переводе с арабского означает забытая или незначительная. Способность видеть Алькор — традиционный способ проверки зрения.



**Кáстор** – вторая по яркости звезда созвездия Близнецов, одна из ярчайших звёзд неба.

Кастор – первая двойная звезда, у которой ещё Вильям Гершель в 1804 году обнаружил явное орбитальное движение.

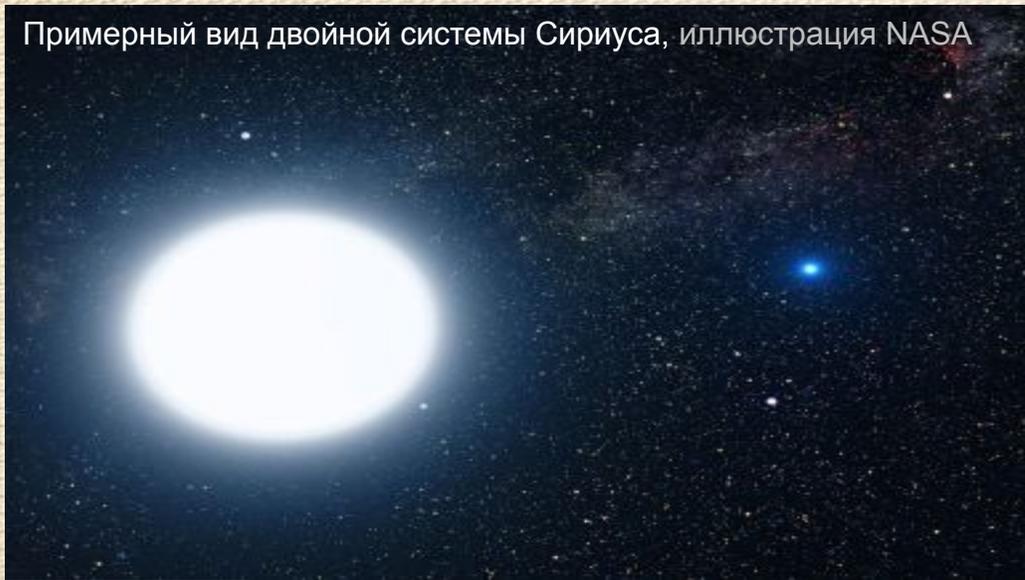
Тусклая переменная звезда 9-й звёздной величины **ΥΥ Близнецов** физически связана с Кастором.

Каждый из компонентов является **спектрально-двойной звездой**.



Кастор — кратная звезда, состоящая из шести компонентов

Примерный вид двойной системы Сириуса, иллюстрация NASA

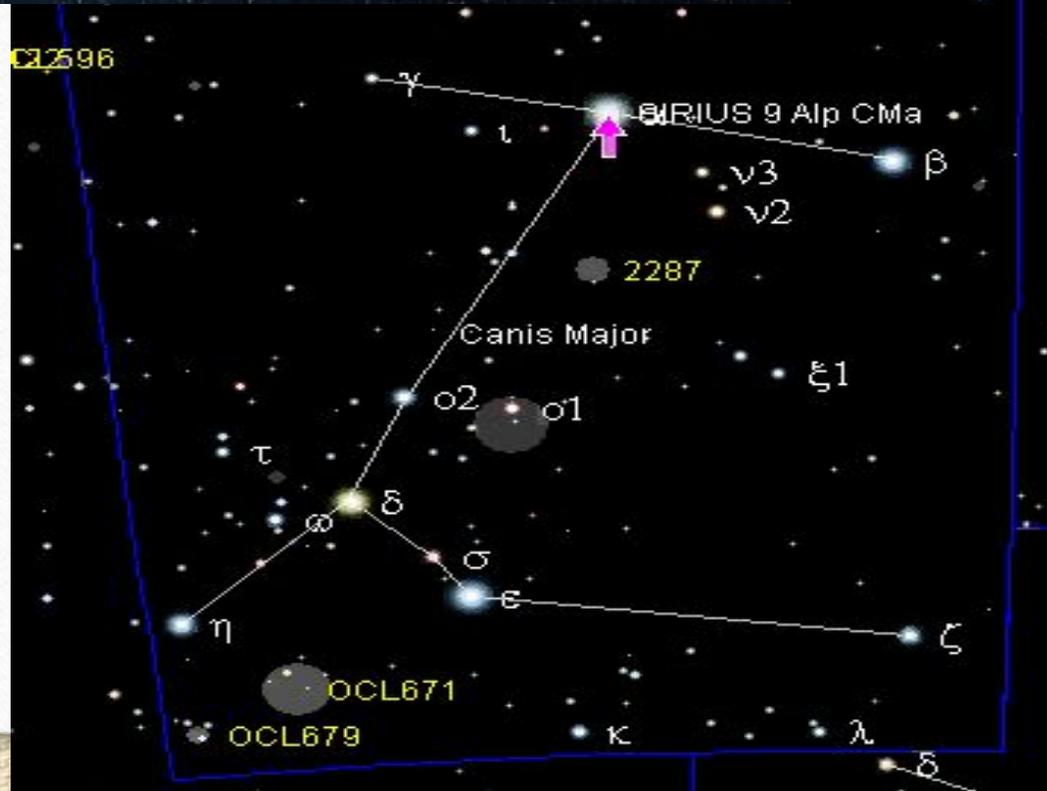


Периоды обращения двойных звезд вокруг общего центра масс обычно бывают от нескольких лет до нескольких десятков лет (в редких случаях превышают 100 лет).

Их орбиты сравнимы по размерам с орбитами планет-гигантов.

Большинство спектрально-двойных звезд имеют периоды обращения порядка нескольких суток, располагаясь друг от друга на расстоянии 5–7 млн км.

Самый короткий из известных периодов составляет всего 2,6 ч.



Сириус — двойная звезда, самая яркая звезда ночного неба, которая входит в созвездие Большого Пса.

Видимая звездная величина Сириуса равна  $-1,46^m$ .

Сириус в 20 раз ярче Солнца и в два раза массивнее его.

Звезда находится примерно в 8,6 световых годах от Солнца и является одной из ближайших к нам звезд.

Определим **температуру фотосферы** Солнца.

Энергия, излучаемая нагретым телом с единицы площади, определяется законом

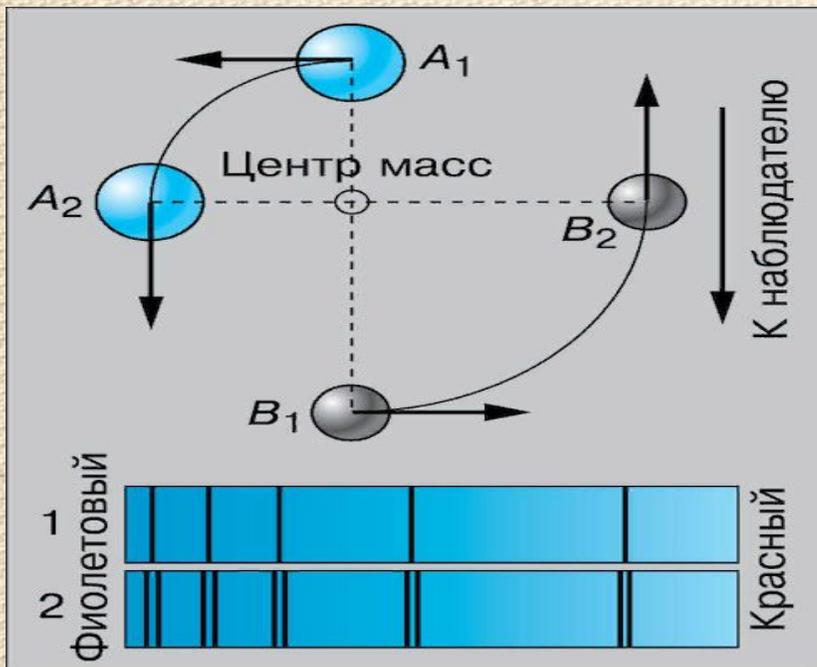
Стефана–Больцмана:  $E = \sigma \cdot T^4$ ,

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Светимость Солнца:  $L = 4\pi R^2 \cdot E$

или  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ .

Отсюда

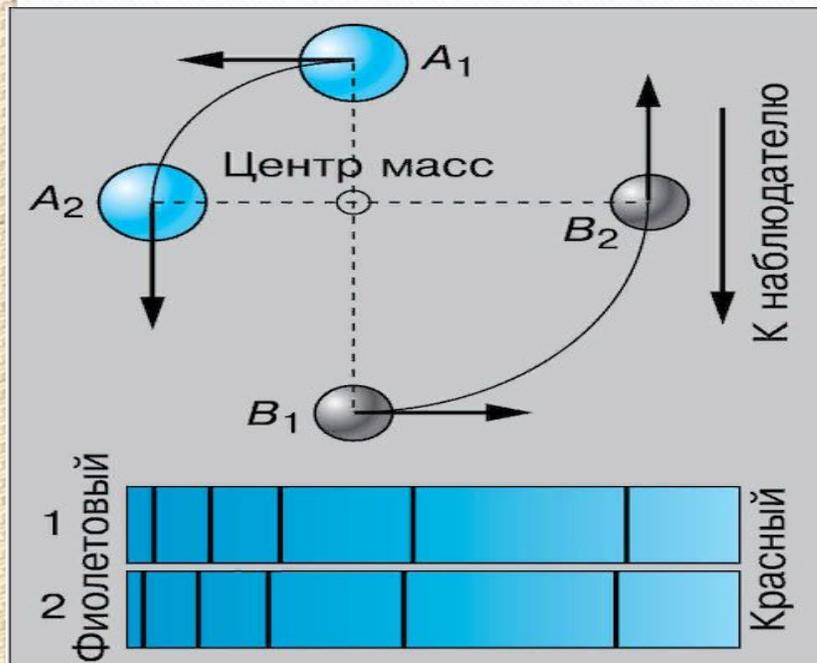


У спектрально-двойных звезд наблюдается **смещение** (или **раздвоение**) **линий в спектре**, которое происходит вследствие эффекта Доплера.

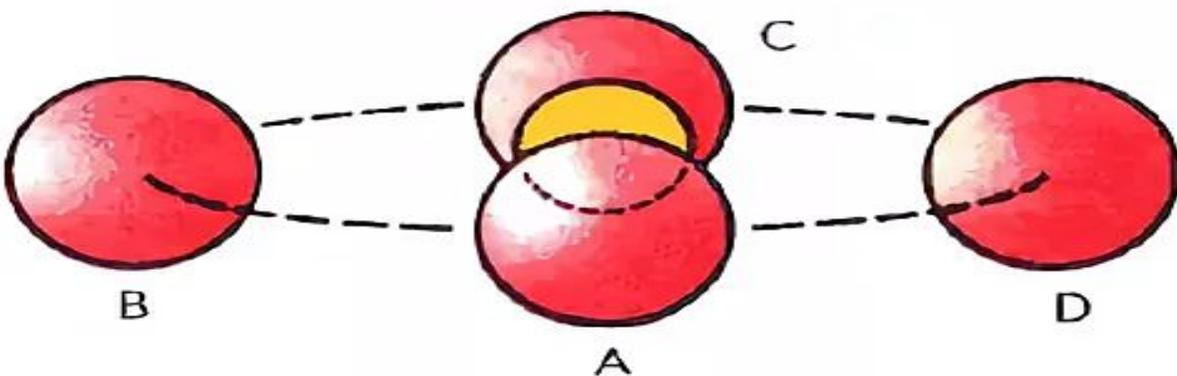
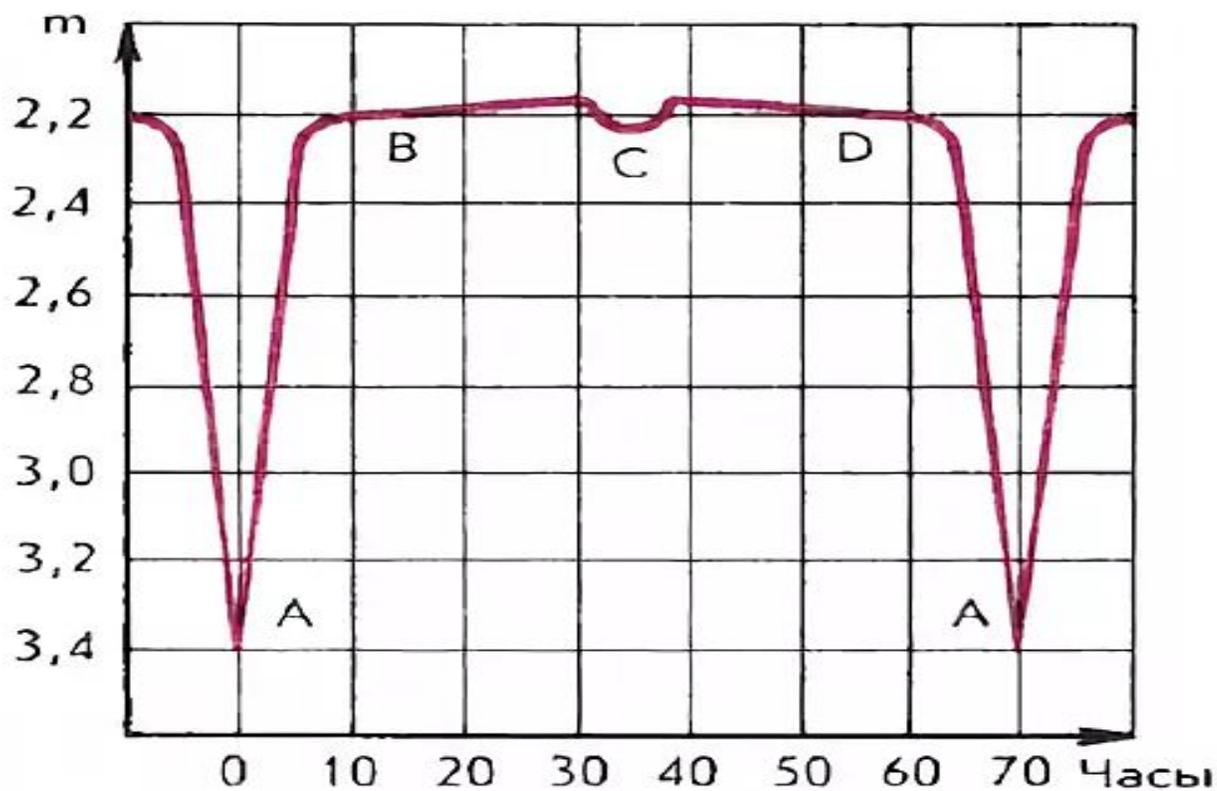
Смещение меняется с периодом, равным периоду обращения пары.

Если яркости и спектры звезд, составляющих пару, сходны, то в спектре наблюдается **периодическое раздвоение линий**.

Если одна из звезд настолько слаба, что ее линии не видны, то будет наблюдаться **периодическое смещение линий более яркой звезды**.



Раздвоение линий в спектре двойной звезды



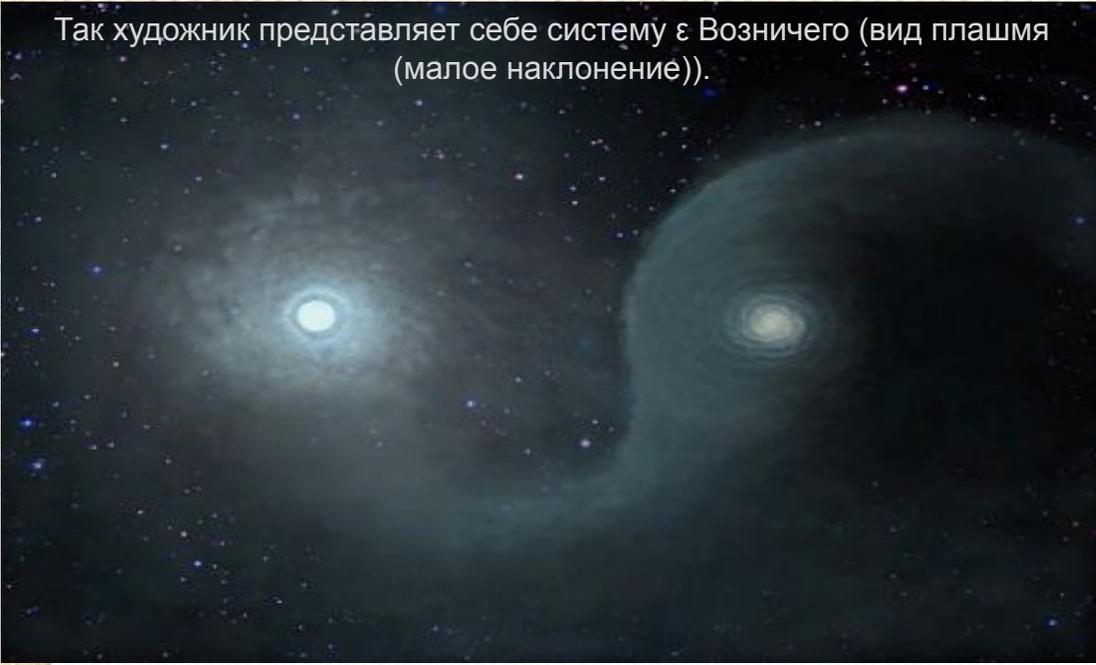
Для наблюдателя, который находится в плоскости орбиты спектрально-двойной звезды, ее компоненты будут поочередно загораживать, «затмевать» друг друга.

Такие звезды называют **затменно-двойными** или алголями – по названию наиболее известной звезды этого типа  $\beta$  Персея.

Ее арабское название «эль гуль» (дьявол) постепенно превратилось в Алголь.

Возможно, что еще древние арабы заметили странное поведение этой звезды: в течение 2 суток 11 часов ее яркость остается постоянной, но затем за 5 часов она ослабевает от 2,3 до 3,5 звездной величины, а за следующие 5 часов ее прежняя яркость восстанавливается.

Так художник представляет себе систему  $\epsilon$  Возничего (вид плашмя (малое наклонение)).



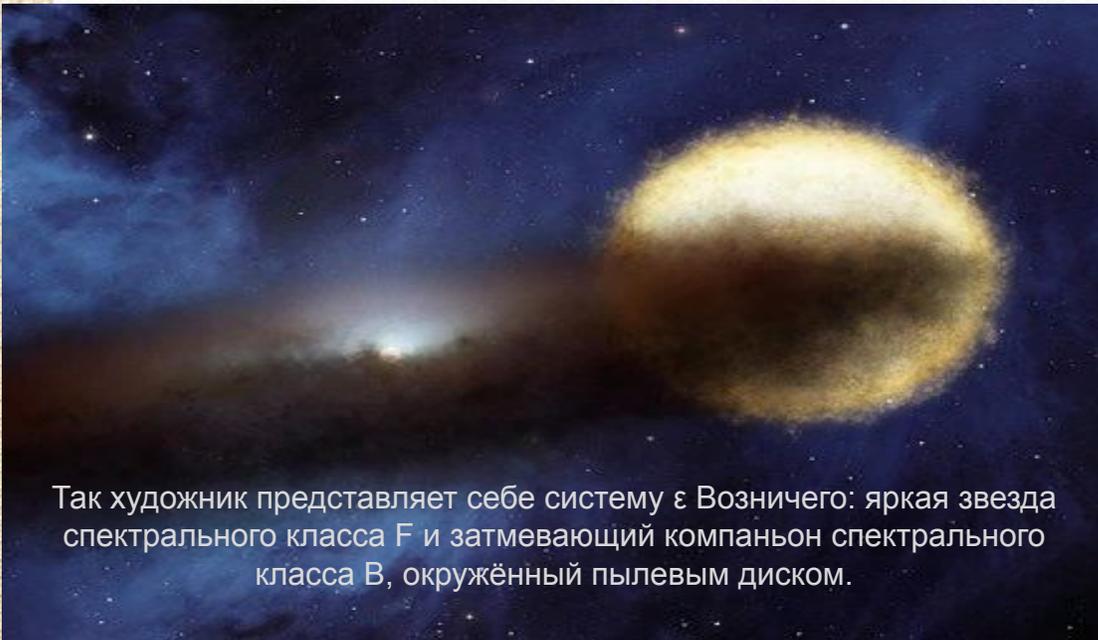
В настоящее время известно более 5 тыс. **затменно-двойных звезд**.

Их изучение позволяет определить не только характеристики орбиты, но также получить некоторые сведения о самих звездах.

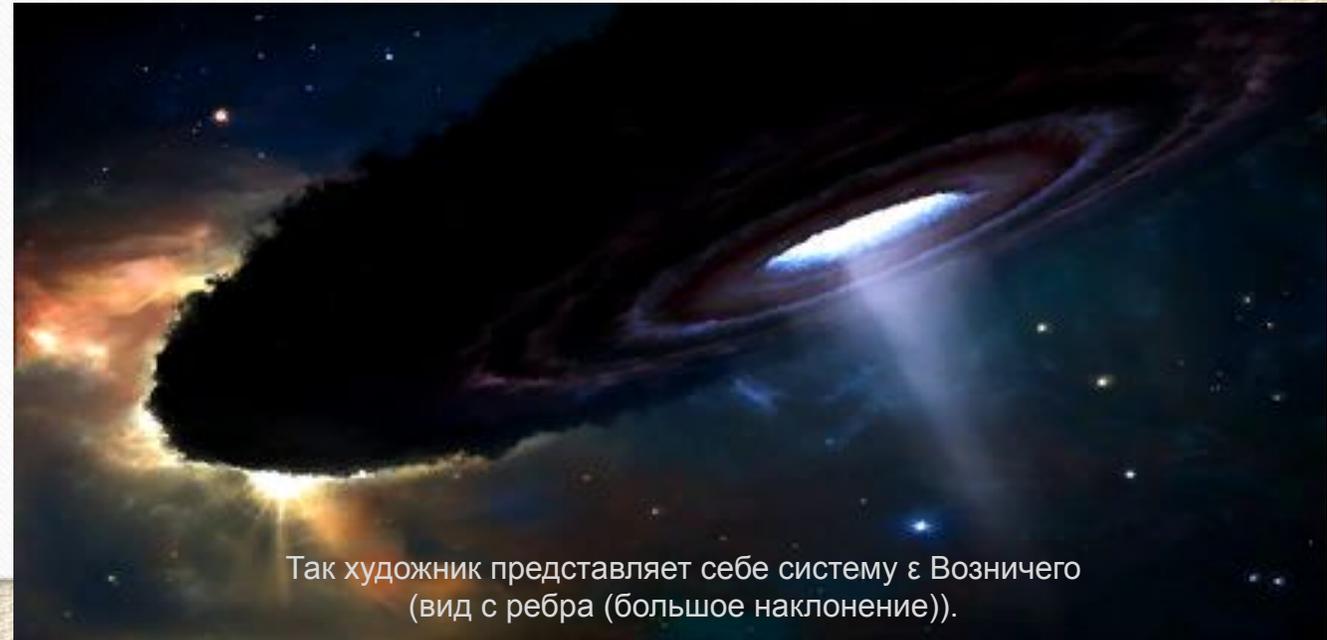
Продолжительность затмения дает возможность судить о размерах звезды.

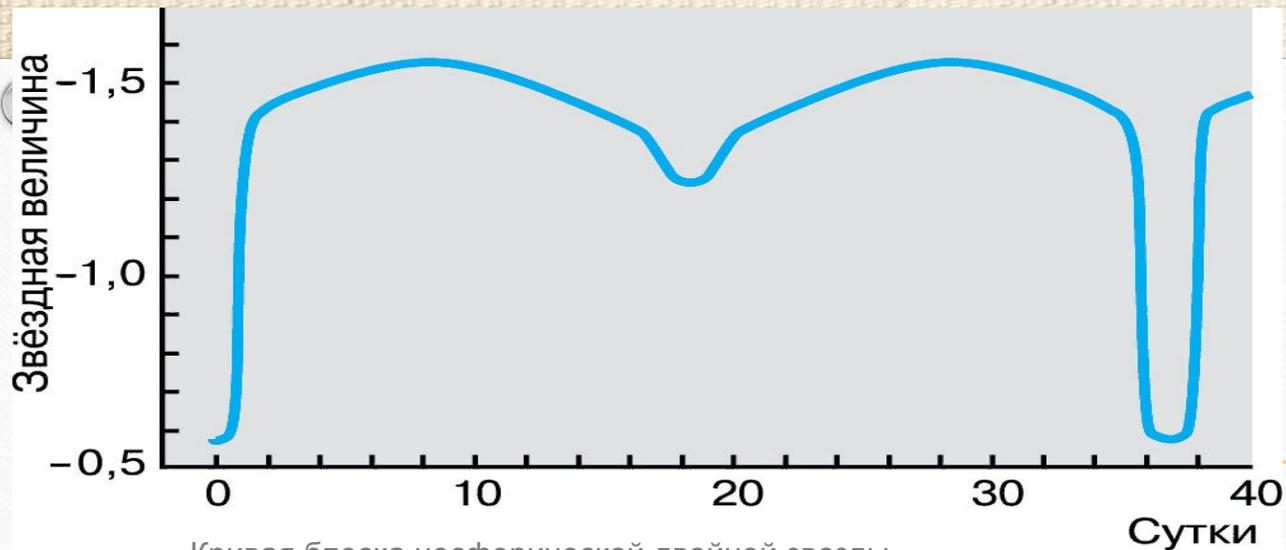
Рекордсменом здесь является  $\epsilon$  **Возничего**, в системе которой при периоде 27 лет затмение продолжается 2 года.

Так художник представляет себе систему  $\epsilon$  Возничего: яркая звезда спектрального класса F и затмевающий компаньон спектрального класса B, окружённый пылевым диском.



Так художник представляет себе систему  $\epsilon$  Возничего (вид с ребра (большое наклонение)).





Кривая блеска несферической двойной звезды

Форма кривой блеска некоторых звезд свидетельствует о том, что их форма существенно отличается от сферической.

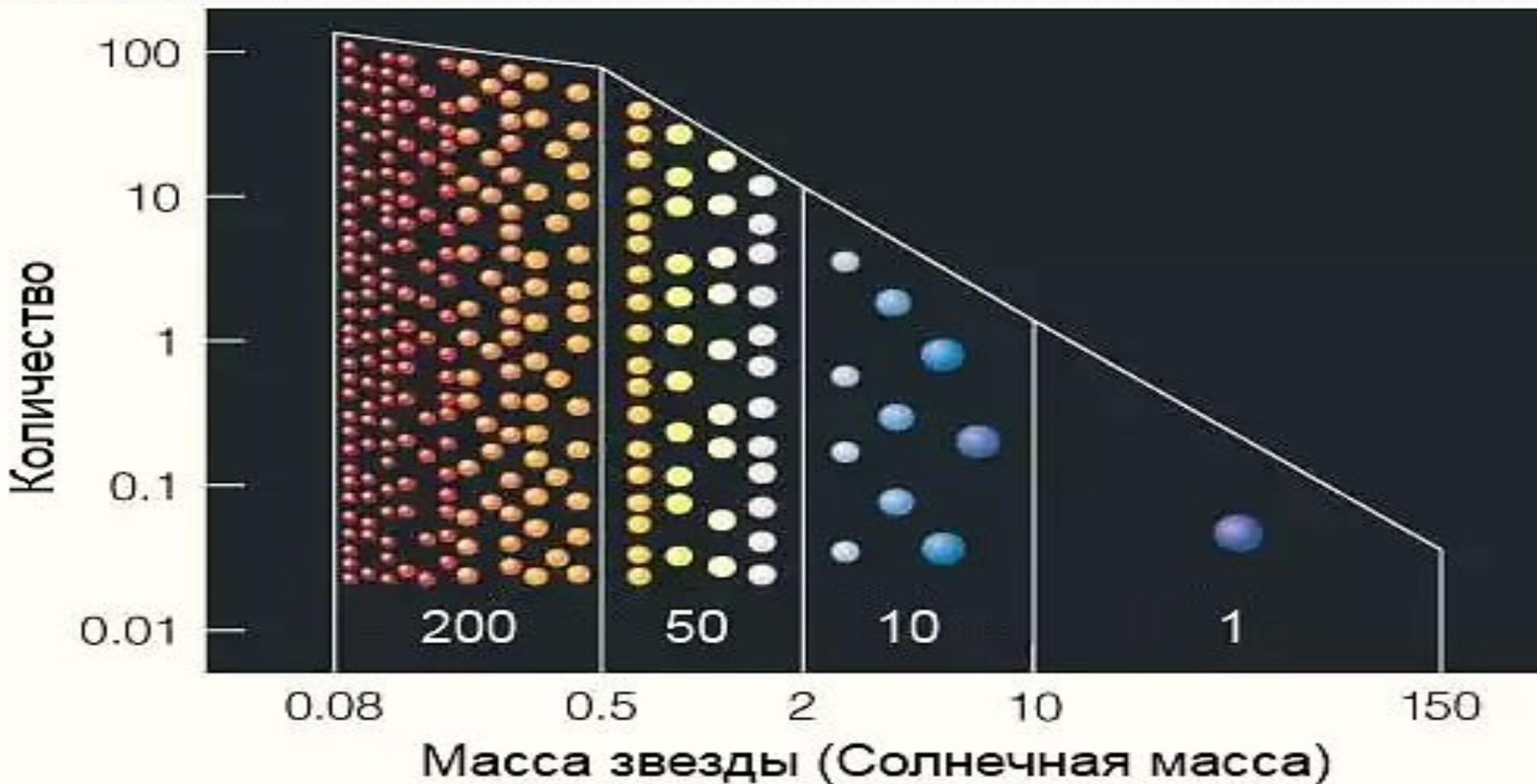


Близкое расположение компонентов приводит к тому, что газы из атмосферы одной звезды перетекают на другую. Иногда эти процессы принимают катастрофический характер, и наблюдается вспышка **новой звезды**.

Определение масс звезд на основе исследований двойных звезд показало, что они заключены в пределах от 0,03 до 60 масс Солнца.

При этом большинство из них имеют массу от 0,3 до 3 масс Солнца.

Очень большие массы встречаются крайне редко.



Методы изучения спектрально-двойных и затменно- переменных звезд в настоящее время используются также для поиска планет, обращающихся вокруг других звезд (экзопланет).

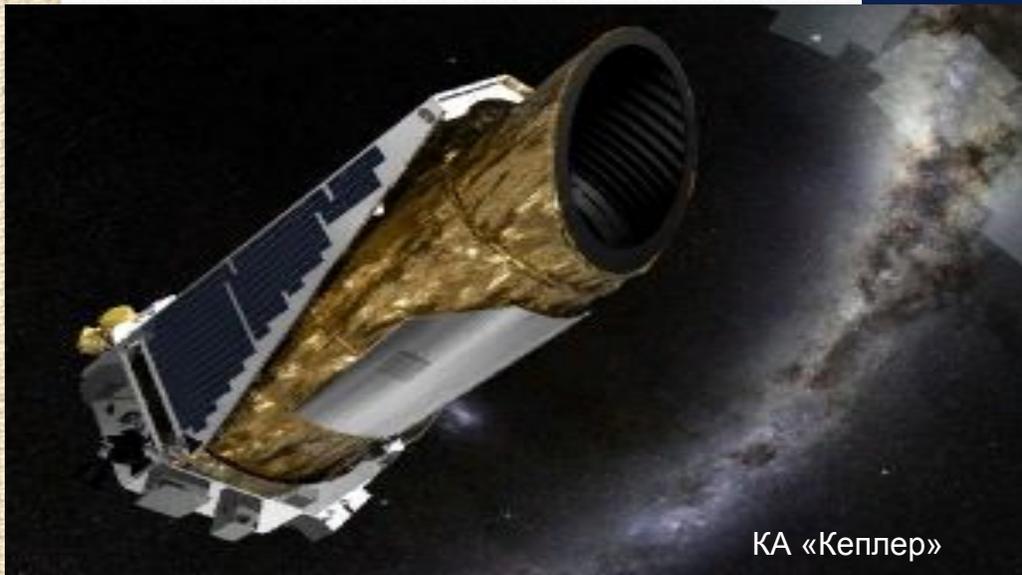
К концу 2009 г. было подтверждено открытие около 400 экзопланет, которые составили 340 планетных систем. В их числе было 42 системы, содержавшие не менее двух планет, а одна – не менее 5. Большинство этих планет оказались газовыми гигантами типа Юпитера и Сатурна.



Усилия ученых направлены на поиски планет, которые по своим размерам и массе похожи на Землю и находятся недалеко от звезд, что обеспечило бы на поверхности планеты условия, необходимые для существования жизни.

С этой целью в 2009 году был запущен КА «Кеплер».

Он мог одновременно наблюдать более чем 100 тыс. звёзд в небольшой области неба между созвездиями Лебеда и Лир.



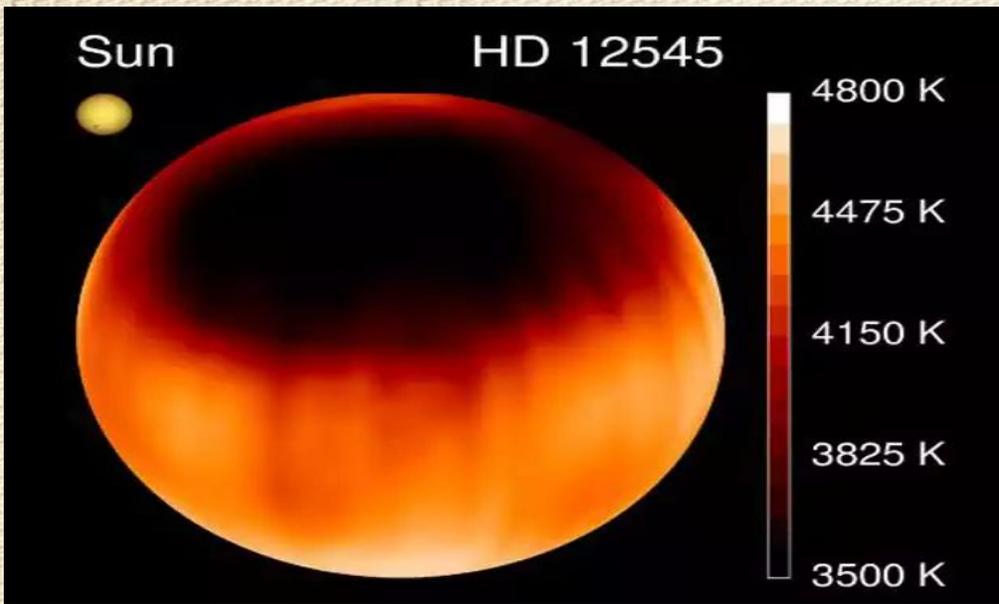
КА «Кеплер»

По состоянию на июль 2015 года подтверждена природа более 1000 планет из около 4700 кандидатов, открытых телескопом.

Среди всех кандидатов 49 % имеют размеры меньше, чем 2 размера Земли.

---

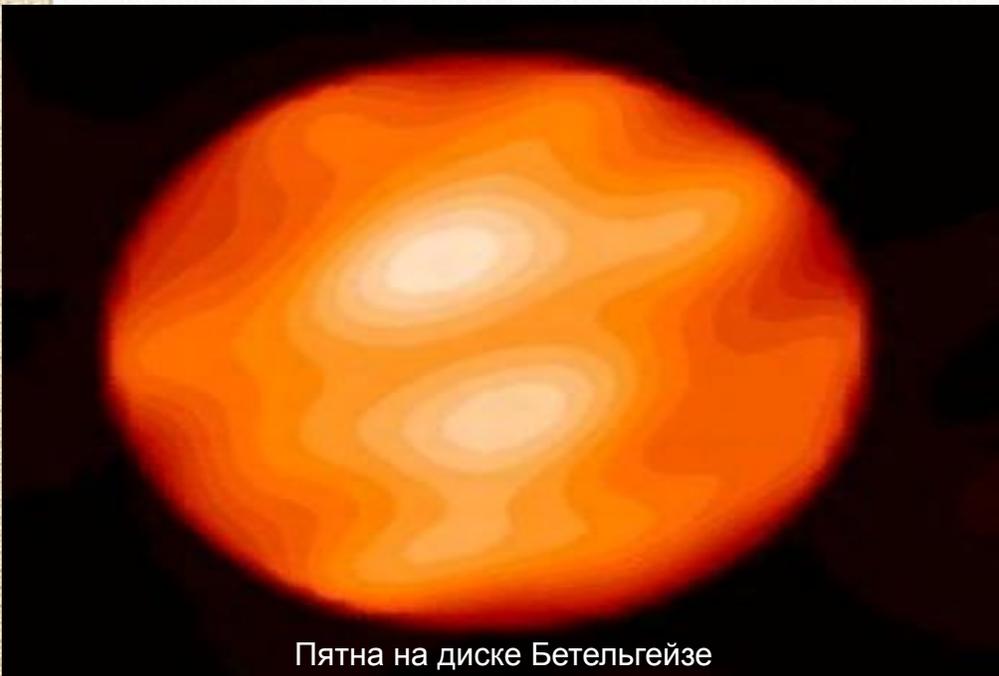
**Размеры звёзд.  
Плотность их вещества**



Гигантское пятно на звезде HD 12545  
в созвездии Треугольника

Звезды расположены так далеко от нас, что за редким исключением они даже в самые мощные телескопы видны как точки.

Лишь в последние годы для некоторых самых крупных из них удалось получить изображение в виде диска, на котором обнаруживаются пятна.



Пятна на диске Бетельгейзе

Бетельгейзе является красным сверхгигантом в созвездии Ориона на расстоянии около 650 световых лет от Земли.

Бетельгейзе - огромная звезда. Если ее поместить в центре нашей Солнечной системы, то она бы простиралась до орбиты Юпитера.

В 600 раз больше, чем наше Солнце, она излучает примерно в 100 000 раз больше энергии.

В возрасте всего несколько миллионов лет Бетельгейзе уже приближается к концу своей жизни и вскоре взорвется как сверхновая. Когда это произойдет, сверхновую можно будет видеть даже днем.

Определим **температуру фотосферы Солнца**.

Энергия, излучаемая нагретым телом с единицы площади, определяется законом Стефана–Больцмана:  $E = \sigma \cdot T^4$ ,  
где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>).

Светимость Солнца:  $L = 4\pi R^2 \cdot E$

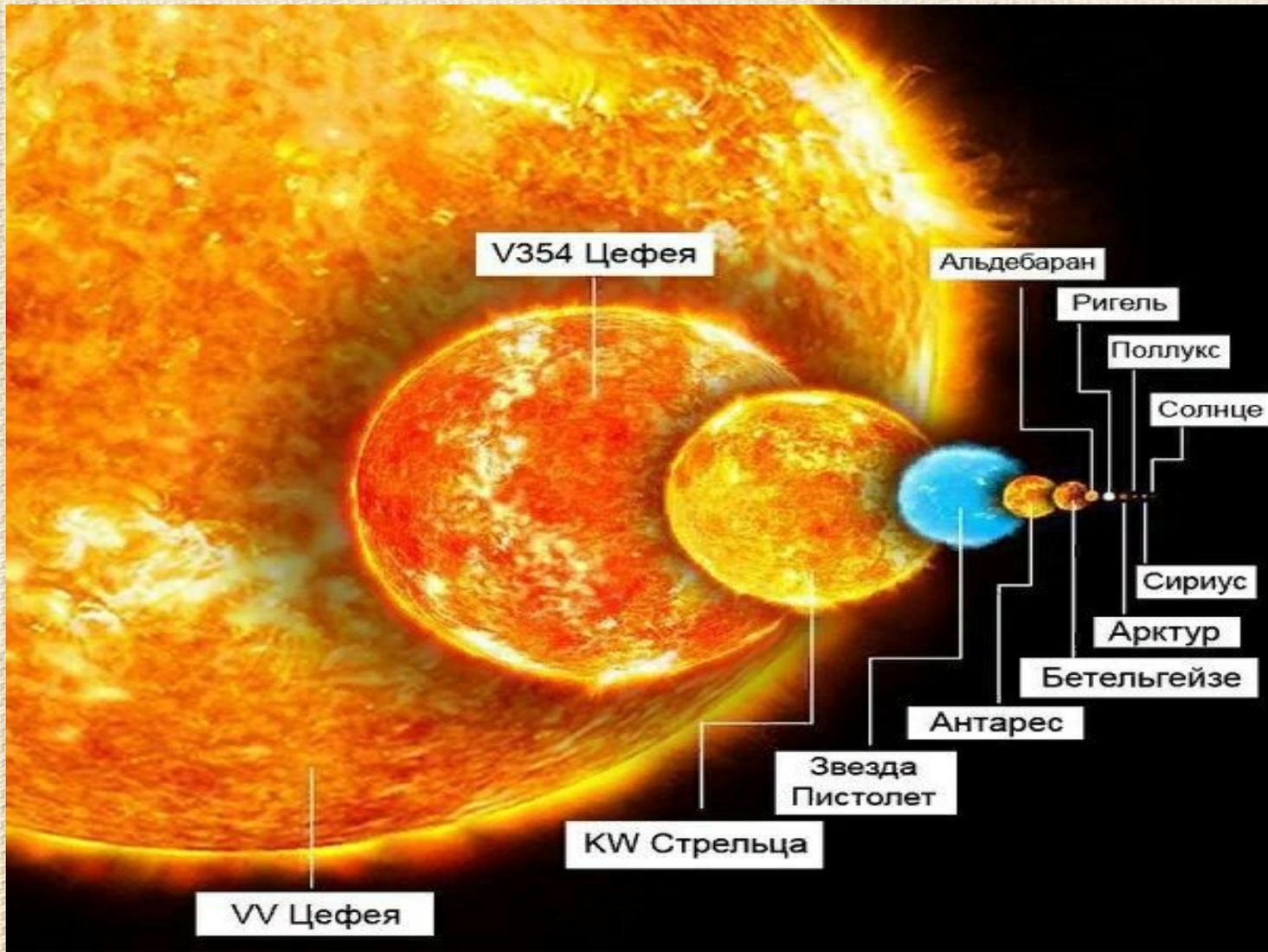
или  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ .

Отсюда

## Солнце и другие звёзды

в масштабе 1:400 000 000 000



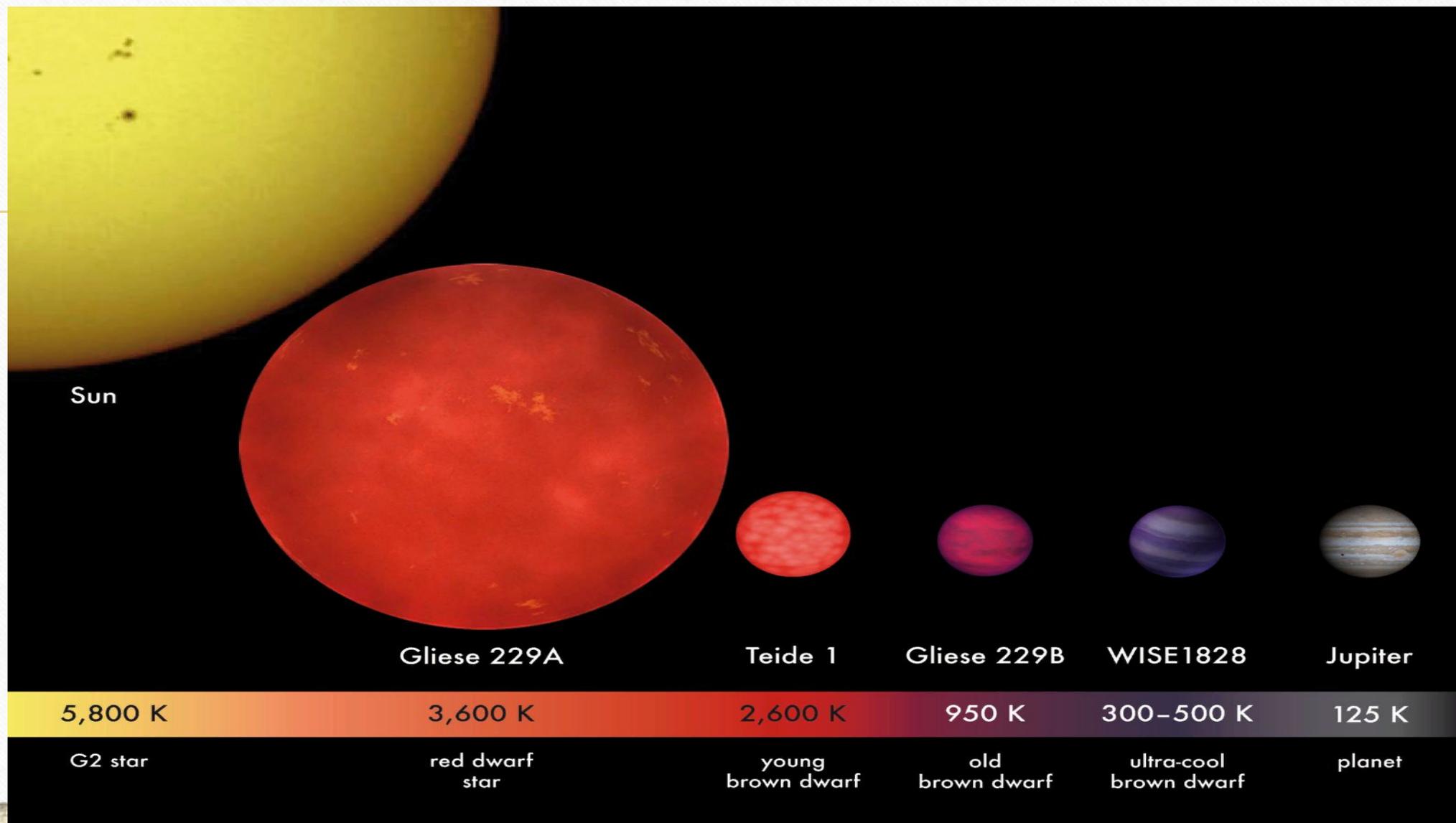


Звезды самой большой светимости (**сверхгиганты**) действительно оказались очень большими. Красные сверхгиганты Антарес и Бетельгейзе в сотни раз больше Солнца по диаметру.

Красный гипергигант VV Цефея А спектрального класса M2 — вторая по размеру в нашей галактике (после гипергиганта VY Большого Пса).

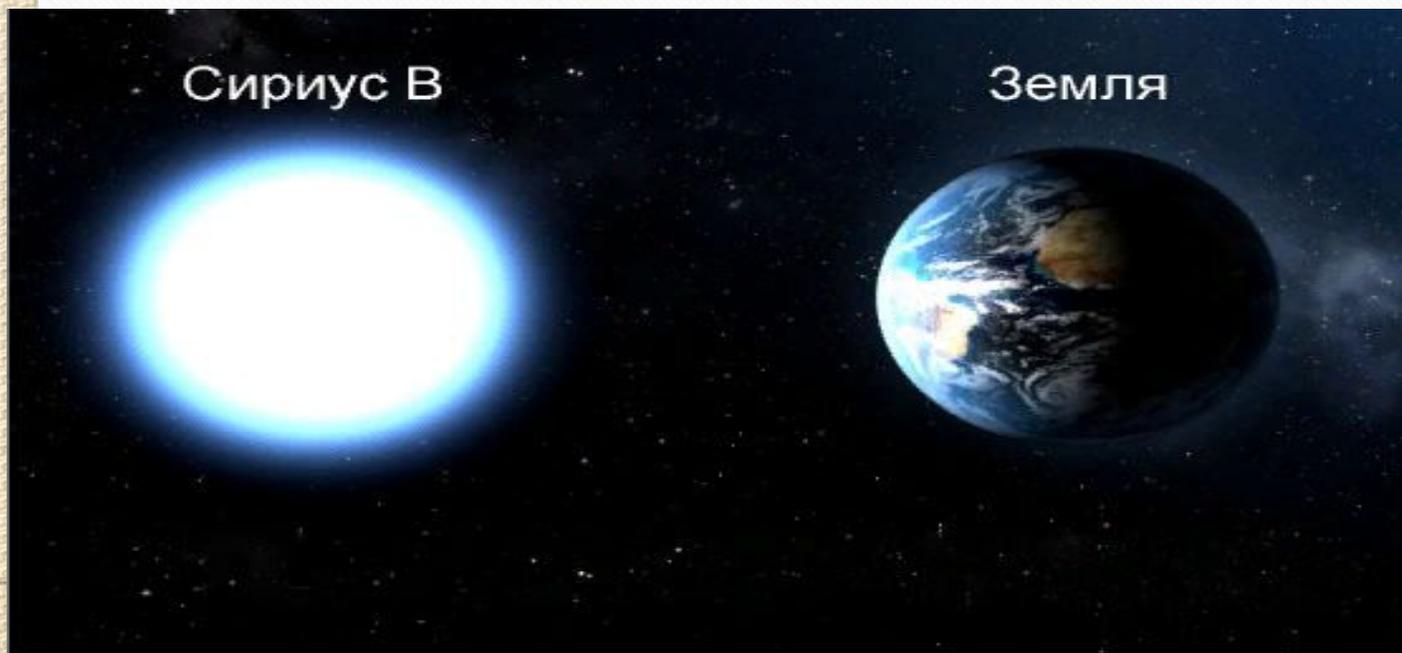
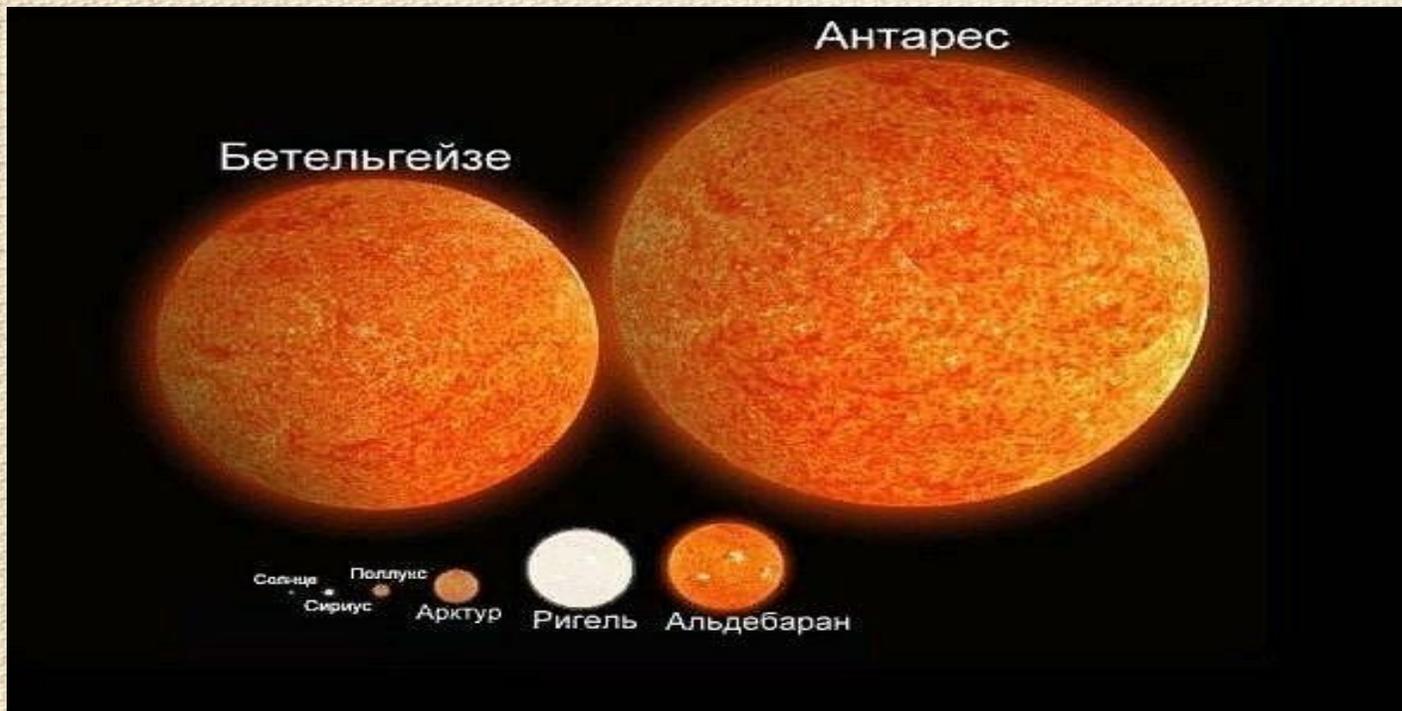
Радиус звезды приблизительно равен 730800000 км или 1050 радиусам Солнца, а светимость — в 275 000—575 000 раз больше.

Диаметр **красных карликов**, относящихся к главной последовательности, в несколько раз меньше солнечного.



Самыми маленькими звездами являются **белые карлики**,  
диаметр которых несколько тысяч километров.





Расчеты **средней плотности** звезд различных типов, проведенные на основе имеющихся данных об их массе и размерах, показывают, что она может значительно отличаться от средней плотности Солнца.

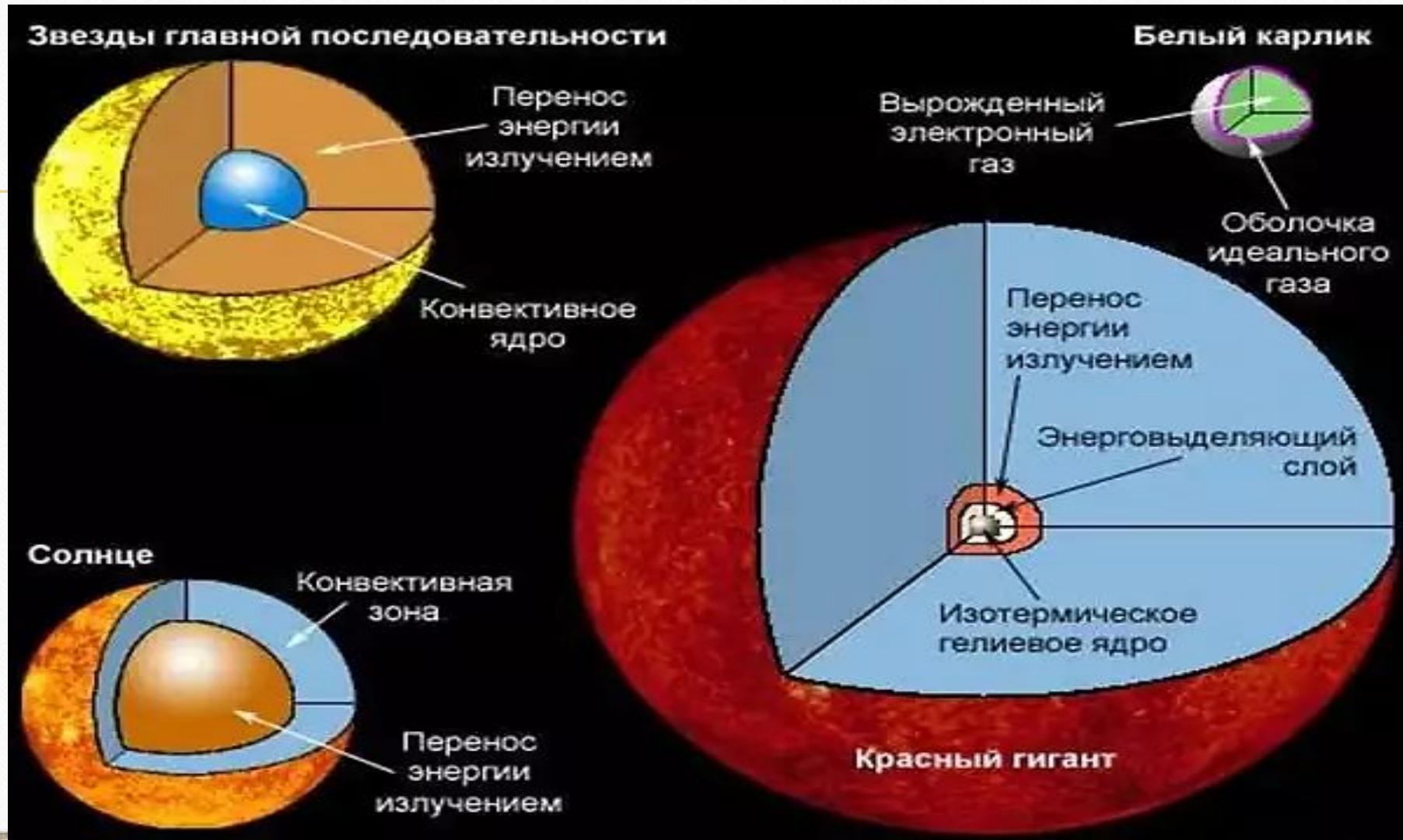
Средняя плотность некоторых сверхгигантов составляет всего  $10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>, что в 1000 раз меньше плотности воздуха при нормальных условиях.

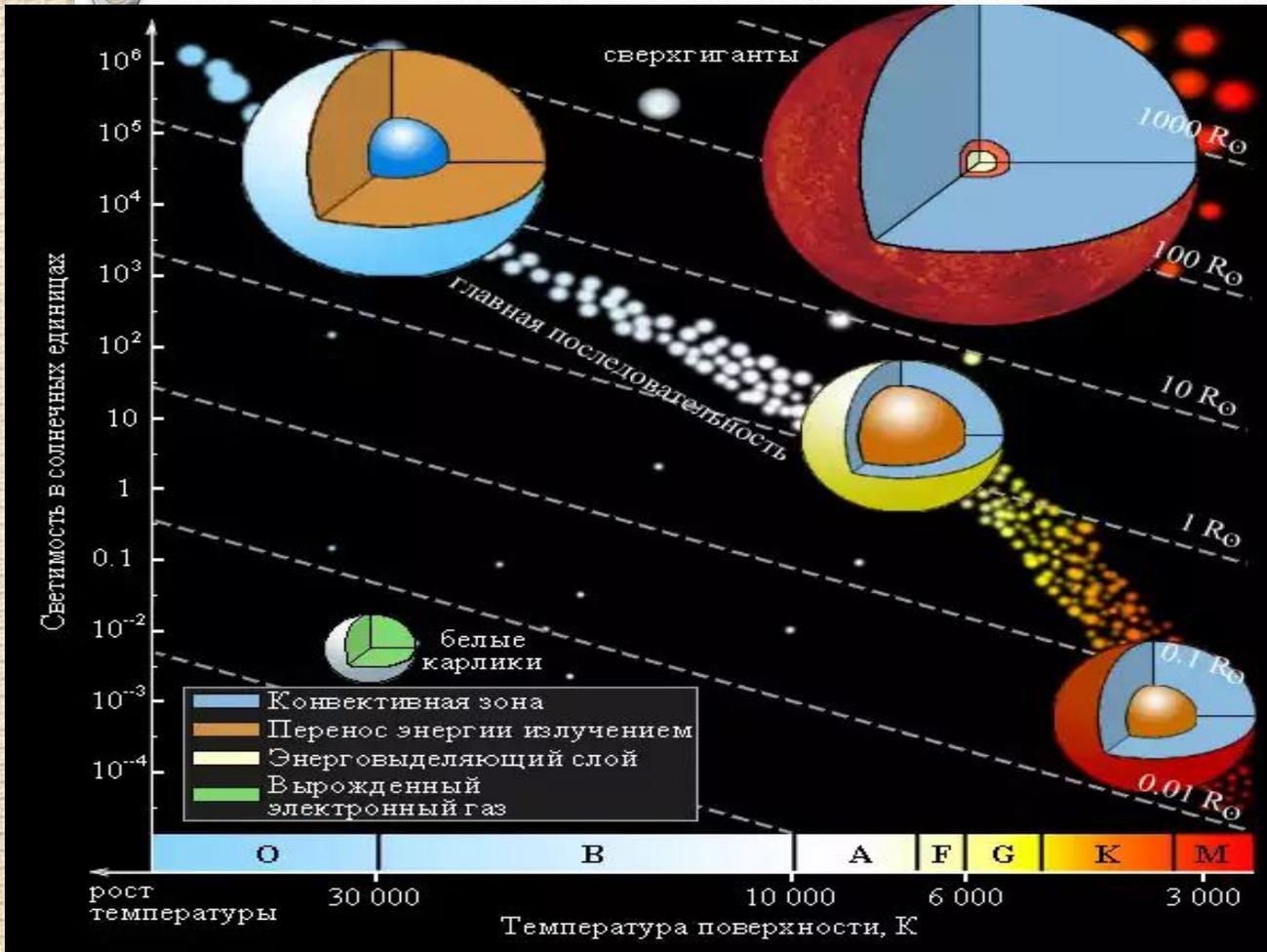
Другой крайностью является плотность белых карликов – около  $10^9$  кг/м<sup>3</sup>.

---

# Модели звёзд

В зависимости от массы и размеров звезды различаются по внутреннему строению, хотя все имеют примерно одинаковый химический состав (95–98% их массы составляют водород и гелий).





**Звезды главной последовательности**, температура которых такая же, как у Солнца, или ниже, похожи на него по внутреннему строению.

Среди множества звезд этого типа есть и такие, которые по многим своим характеристикам являются «двойниками» Солнца. Наиболее яркой из них является  $\beta$  Гончих Псов.

У более горячих звезд главной последовательности внешняя конвективная зона отсутствует. В этих звездах конвекция происходит в ядре протяженностью до  $1/4$  их радиуса, окруженном лучистой оболочкой.