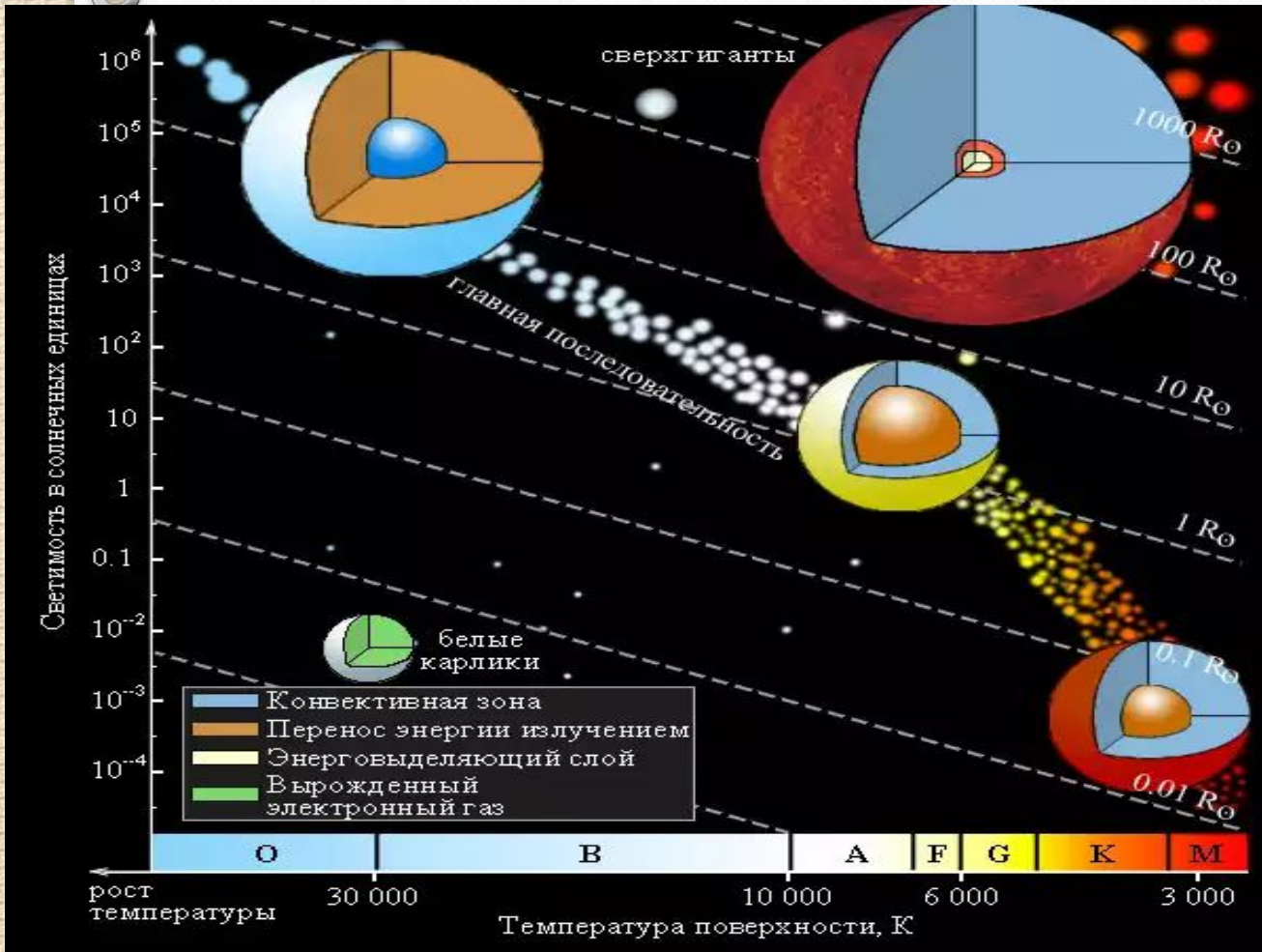


**Гиганты** и **сверхгиганты** имеют очень маленькое ядро (его радиус около 0,001 доли радиуса звезды).

Термоядерные реакции происходят в окружающем его тонком слое; далее на протяжении около 0,1 радиуса звезды происходит передача энергии излучением.

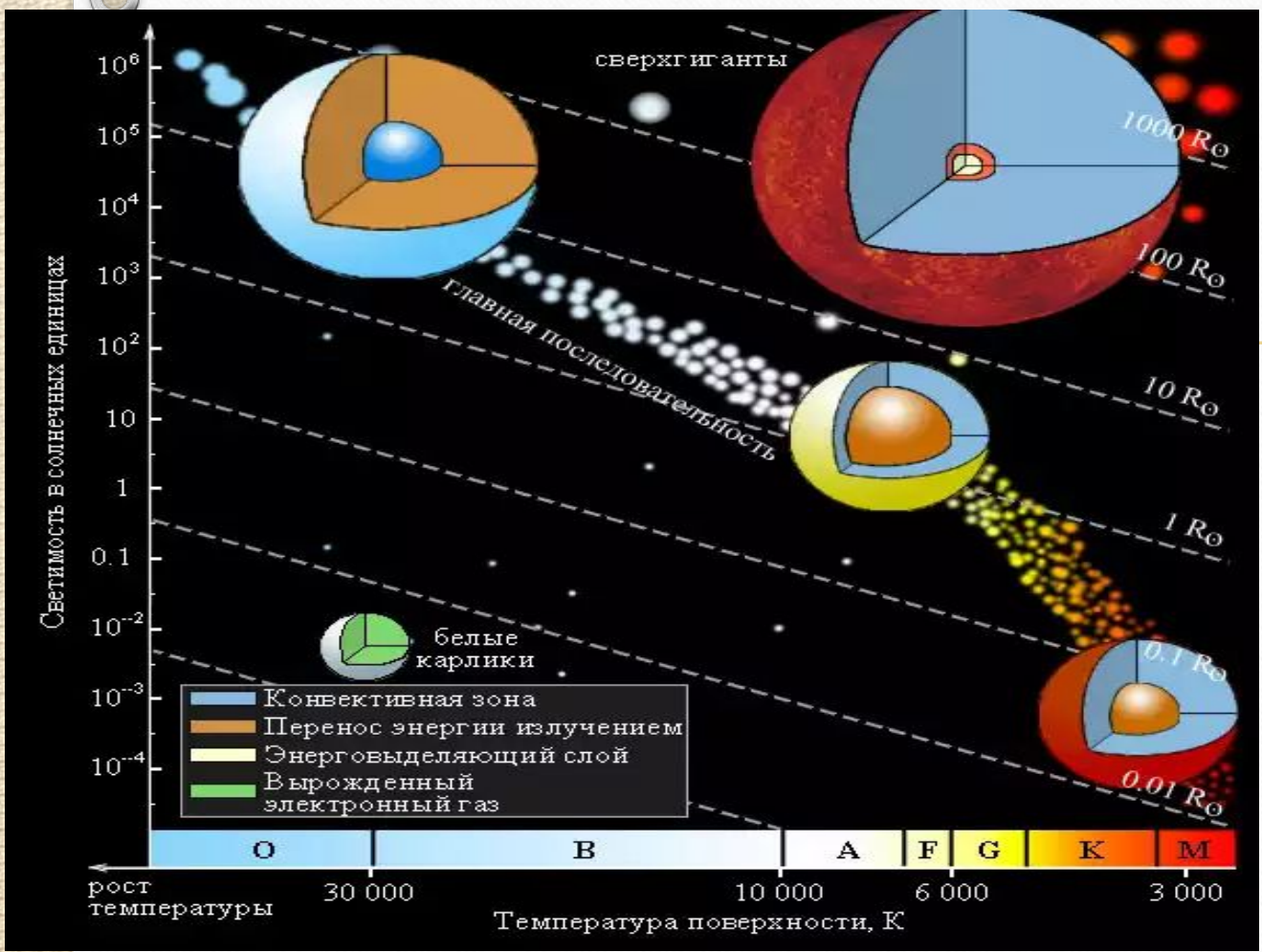
Практически весь остальной объем (9/10 радиуса) составляет протяженная конвективная зона.



**Белые карлики** состоят из вырожденного газа, давление которого определяется лишь его плотностью и не зависит от температуры.

Равновесие такой «экзотической» звезды, масса которой равна солнечной, наступает лишь тогда, когда она сожмется до размеров, примерно равных размерам Земли.

Внутри белого карлика температура достигает 10 млн К и практически не меняется; только в тонкой оболочке из «обычного» вещества она резко падает до 10 000 К.



**Коричневые карлики** обладают слишком малой массой, что не обеспечивает температуры, необходимой для протекания термоядерной реакции превращения водорода в гелий.

Гравитационное сжатие их массы достаточно лишь для того, чтобы достигнутая температура обеспечила в течение короткого (по космическим меркам) времени превращение дейтерия (тяжелого изотопа водорода) в гелий.

Масса коричневых карликов составляет всего лишь 0,01–0,07 массы Солнца. Про них можно сказать, что они еще не звезды, но уже не планеты.

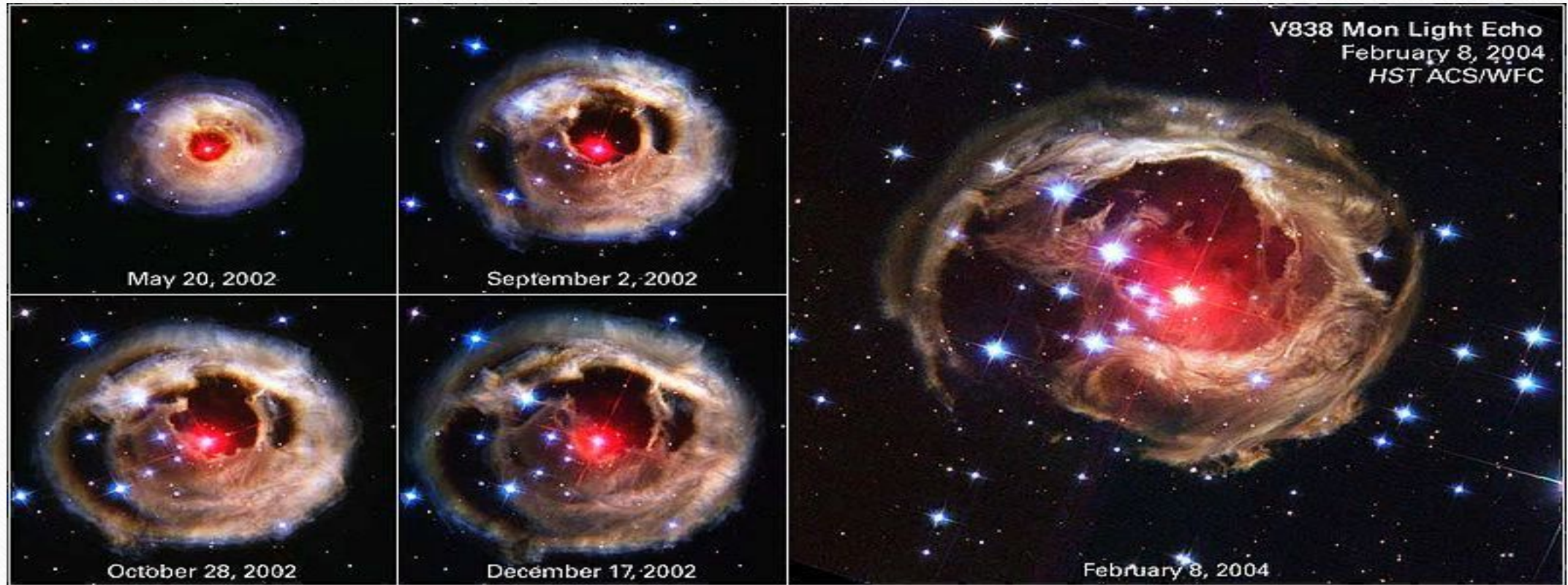
# ПЕРЕМЕННЫЕ И НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЗВЁЗДЫ



---

# Пульсирующие переменные

Важную роль в развитии представлений о физической природе звёзд играют исследования **переменных звёзд**.



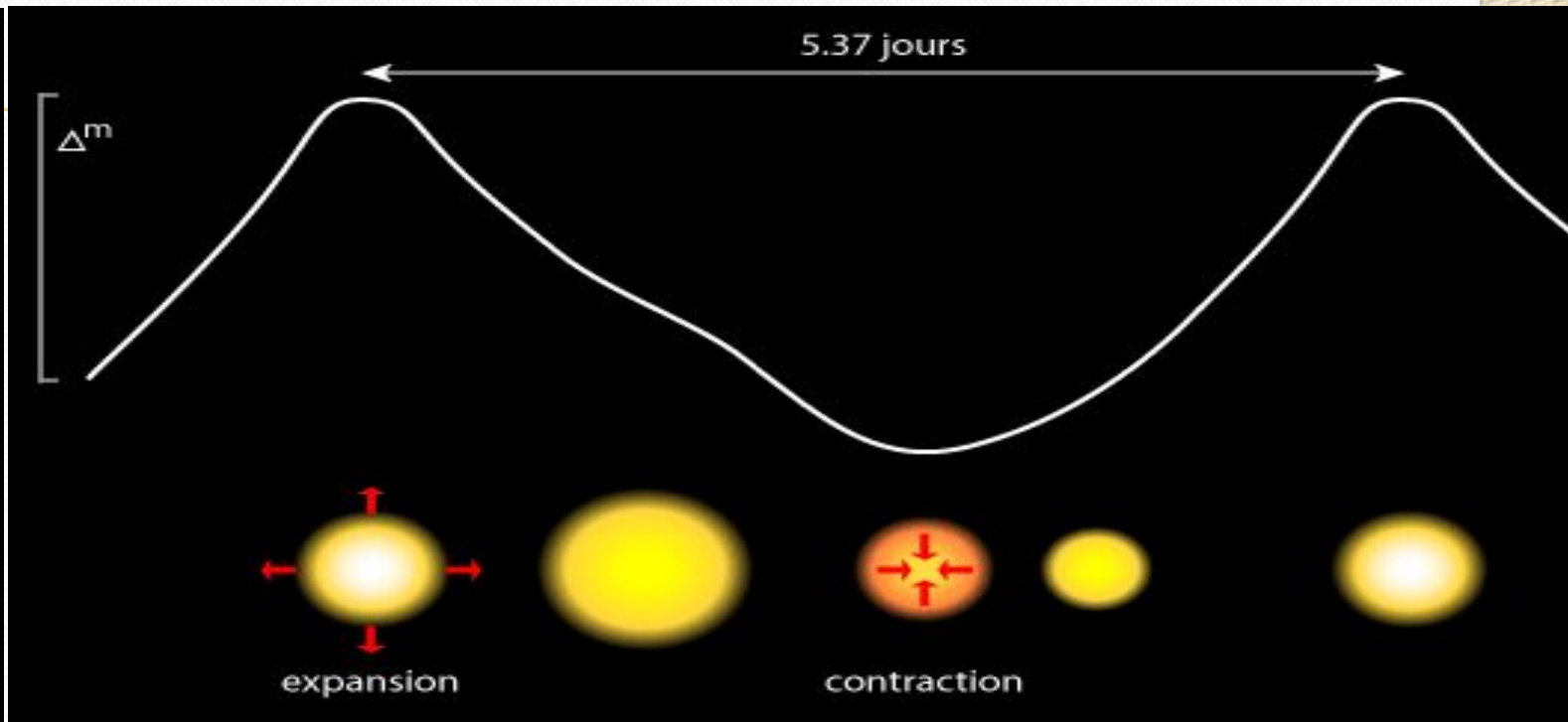
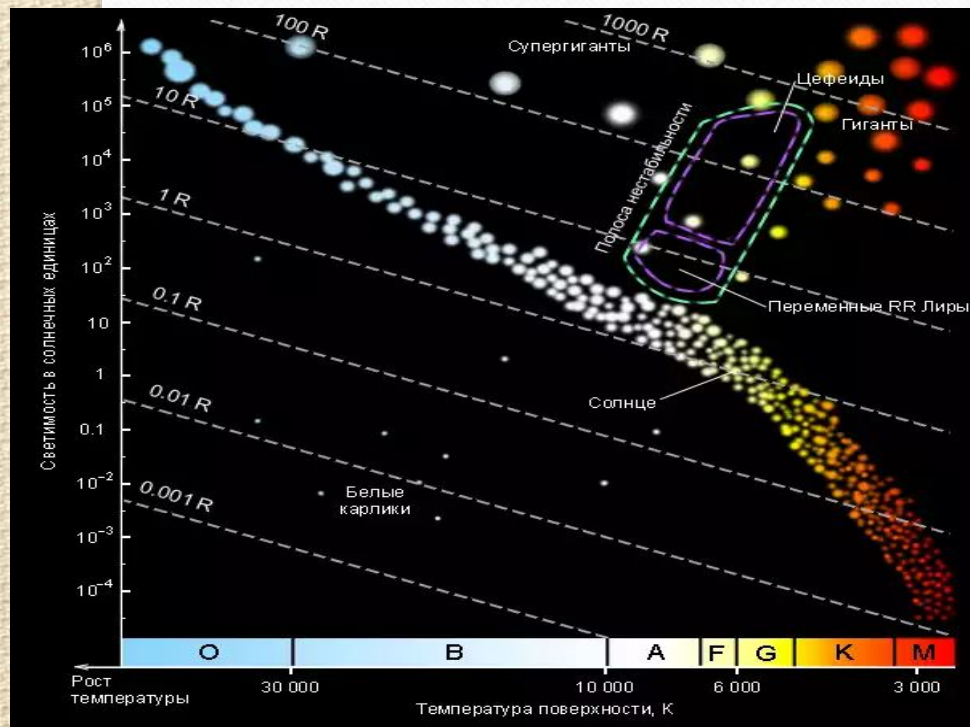
Красная переменная звезда V838 Monocerotis

**Физические переменные звёзды** – это звёзды, у которых светимость меняется в результате различных процессов, происходящих на самой звезде.

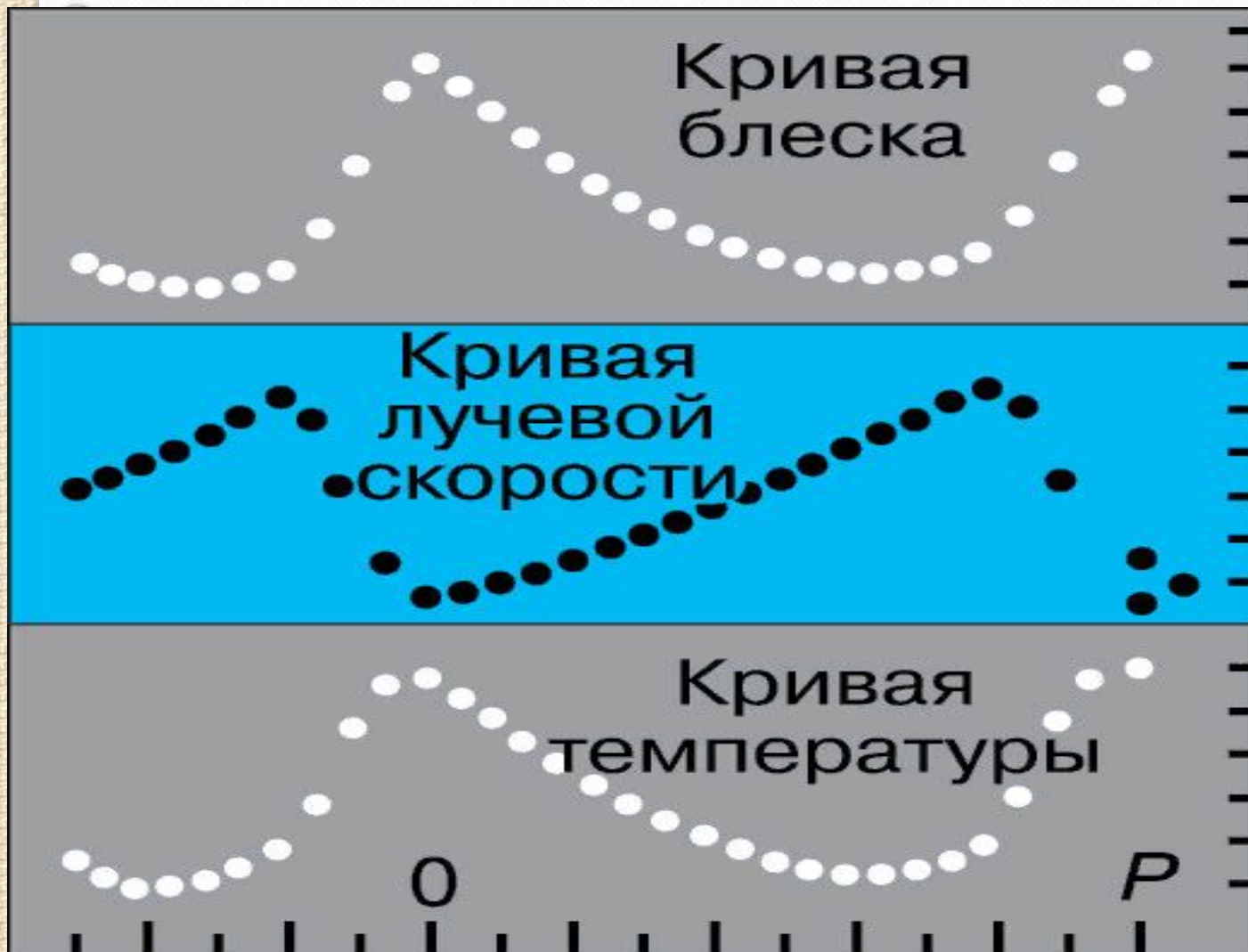
В настоящее время известно несколько десятков тысяч переменных звёзд различных типов.

К числу переменных звёзд со строгой периодичностью принадлежат прежде всего **цефеиды**. Они получили это название потому, что первой среди звёзд этого типа была открыта  **$\delta$  Цефея**.

Эта классическая цефеида меняет свою светимость с периодом 5,37 суток, а амплитуда изменения светимости примерно одна звёздная величина.



Как правило, у цефеид эта амплитуда не превышает 1,5 звёздной величины, зато периоды изменения светимости весьма различны: от десятков минут до нескольких десятков суток, причём этот период у них долгие годы сохраняется постоянным.



Графики изменения светимости, лучевой скорости и температуры цефеид

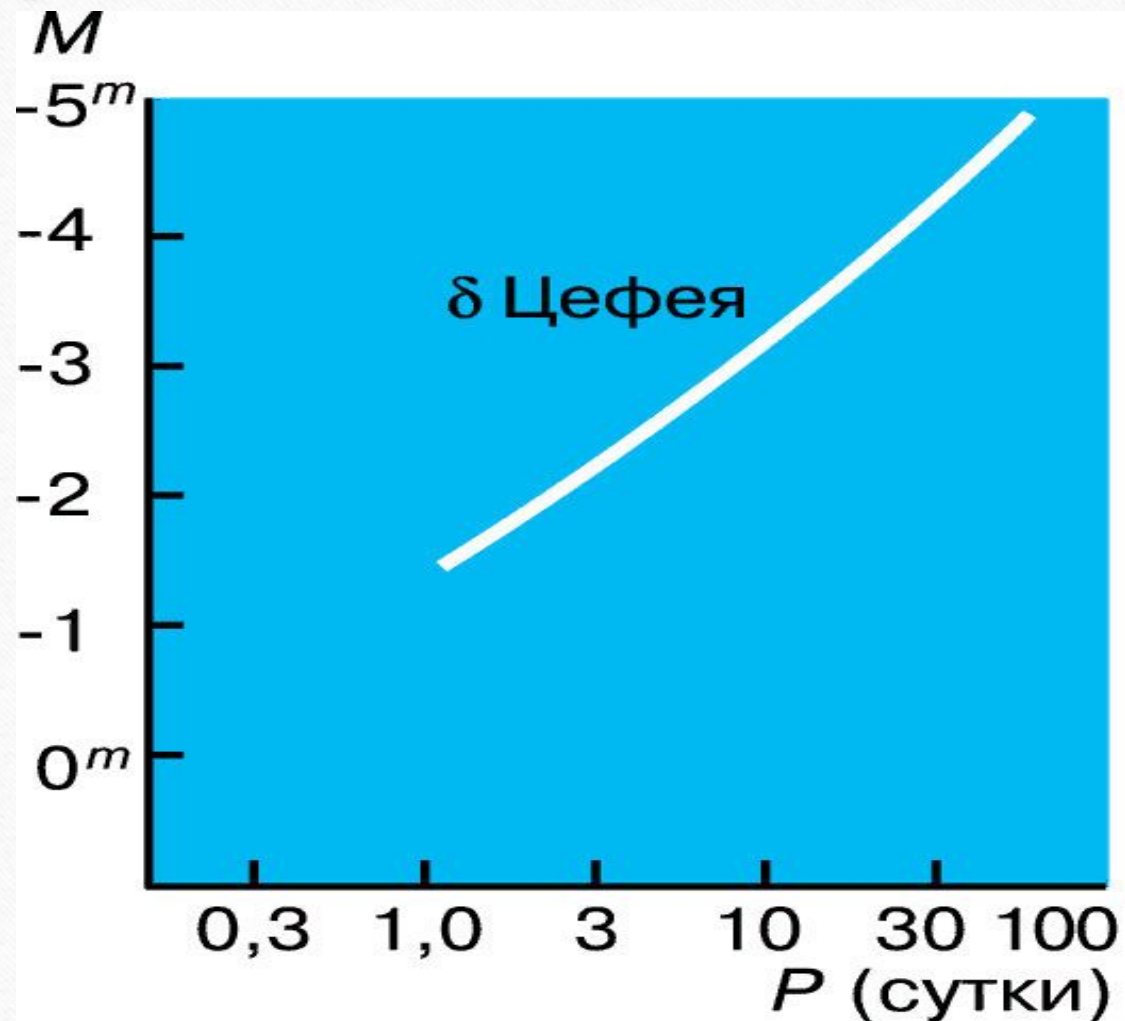
Изучение спектров цефеид показало, что изменение светимости сопровождается изменениями температуры и лучевой скорости.

Эти данные показывают, что причиной всему является **пульсация наружных слоёв звезды**.

Они периодически то расширяются, то сжимаются.

При сжатии звезда нагревается и становится ярче, при расширении её светимость уменьшается.





Зависимость «период — светимость» цефеид

В начале XX в. было замечено: **чем ярче цефеида, тем продолжительнее период изменения её светимости.**

Зависимость «период - светимость», существующая у цефеид, используется для определения расстояний в астрономии.

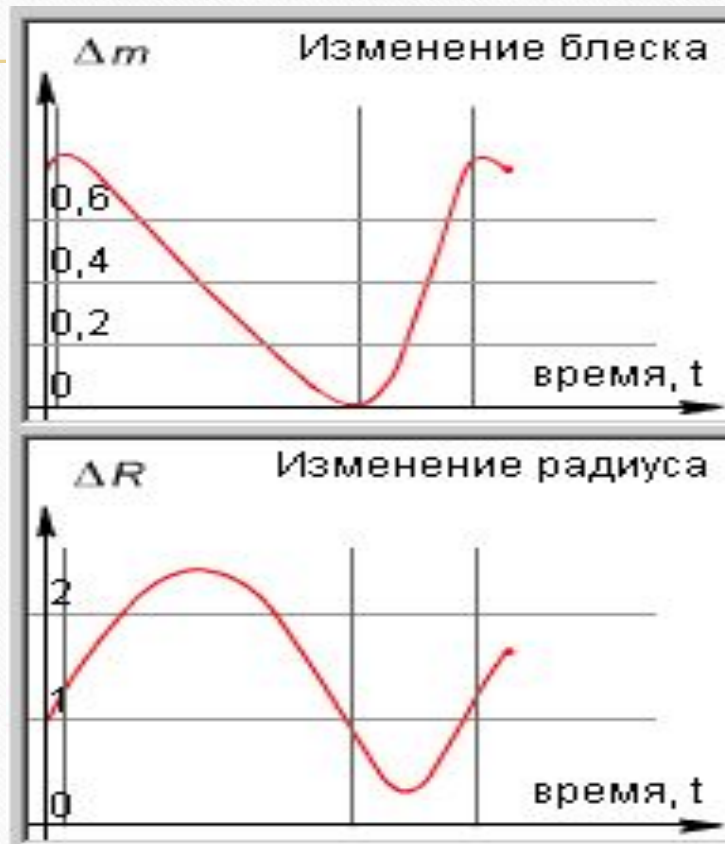
Получив из наблюдений период изменения светимости цефеиды, можно узнать её светимость, вычислить абсолютную звёздную величину  $M$ , а сравнив её с видимой звёздной величиной  $m$ , вычислить расстояние до звезды по формуле:

$$\lg D = 0,2(m - M) + 1.$$

Цефеиды – это звёзды-сверхгиганты, они обладают высокой светимостью.

Светимость цефеиды с периодом 50 суток в 10 тыс. раз больше, чем у Солнца.

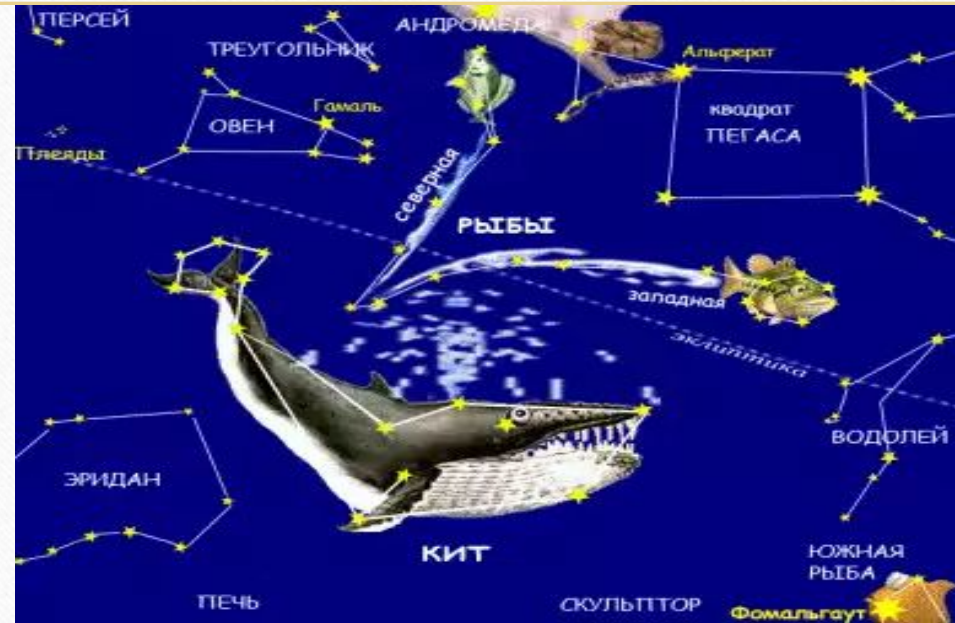
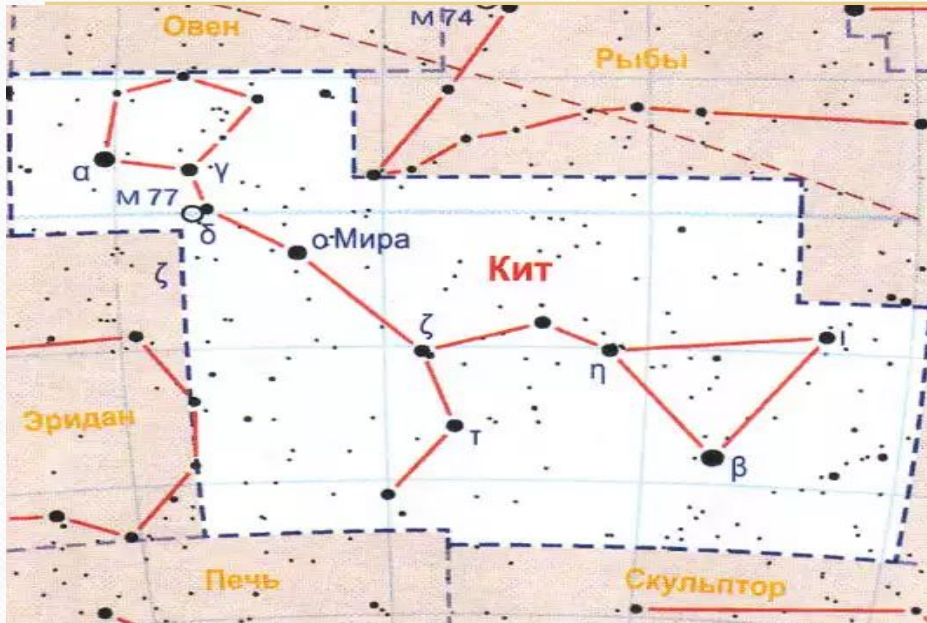
Они заметны даже в других галактиках, поэтому цефеиды, которые можно использовать для определения таких больших расстояний, когда годичный параллакс невозможно измерить, часто называют «маяками Вселенной».



Звёзды, пульсация которых происходит с периодом, большим, чем у цефеид, называются **долгопериодическими**.

Период изменения светимости у них не выдерживается так строго, как у цефеид, и составляет в среднем от нескольких месяцев до полутора лет, а светимость меняется очень значительно – на несколько звёздных величин.

Эти звёзды типа Миры (о Кита) являются красными гигантами с весьма протяжённой и холодной атмосферой.



Первую пульсирующую переменную открыл в 1596 году Фибрициус в созвездии Кита. Она означает «чудесная, удивительная».

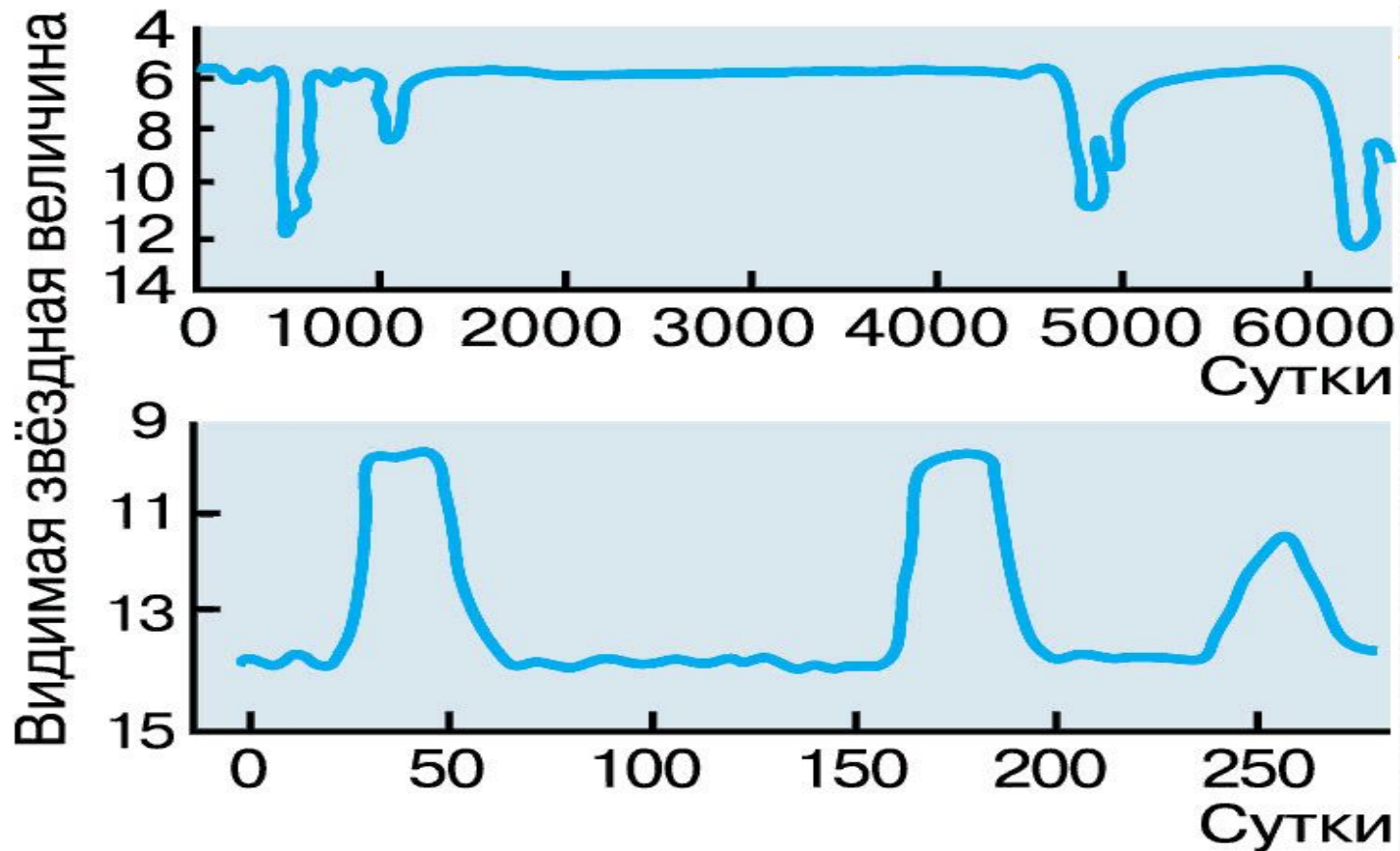
Он назвал ее Мирой, что

В максимуме Миры хорошо видна невооруженным глазом, ее видимая звездная величина  $2^m$ , в период минимума она уменьшается до  $10^m$  и видна только в телескоп.

Средний период переменности Миры - 332 суток.

У некоторых звёзд, светимость которых долгое время оставалась практически постоянной, она вдруг неожиданно падает, а через некоторое время опять восстанавливается на прежнем уровне.

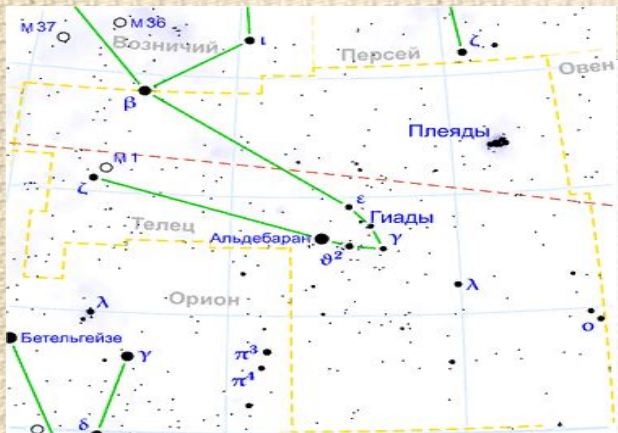
Поскольку в атмосферах таких звёзд наблюдается повышенное содержание углерода, принято считать, что причиной уменьшения светимости является образование гигантских облаков сажи, поглощающих свет.



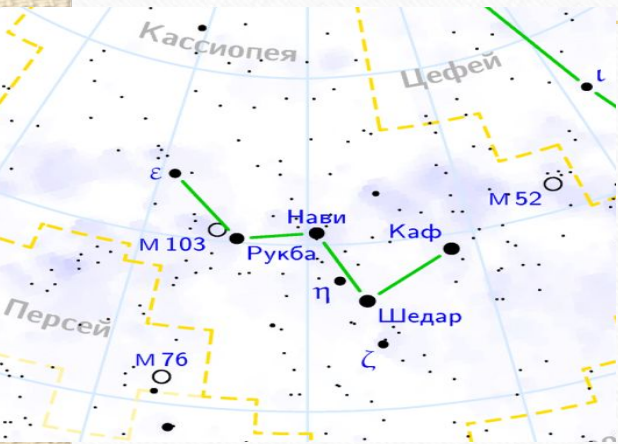
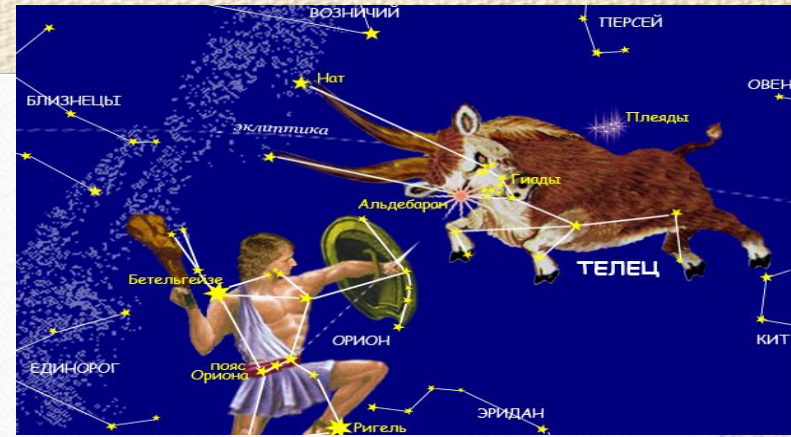
Кривые блеска неправильных переменных звёзд

---

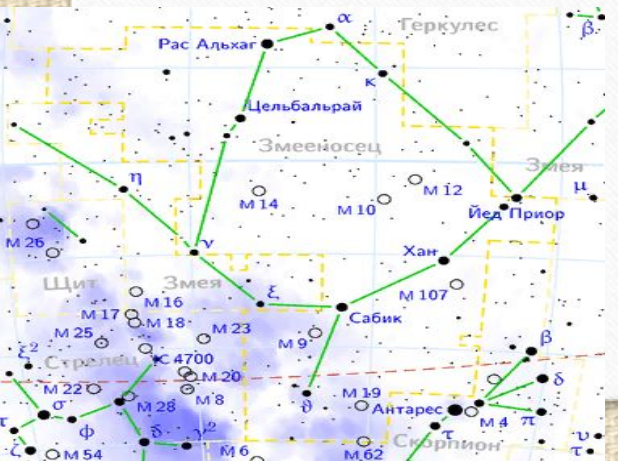
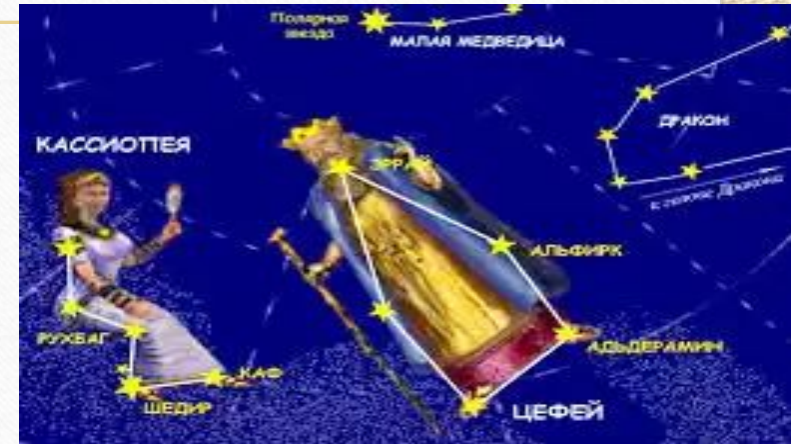
# Новые и сверхновые звёзды



В китайских и японских хрониках сохранились сведения о «звезде-гостье», которая вспыхнула **в созвездии Тельца** в 1054 году и в течение трёх недель была видна днём, а через год совершенно «исчезла».



В 1572 г. учитель Кеплера Тихо Браге наблюдал **в созвездии Кассиопеи** новую звезду, которая была ярче Венеры.



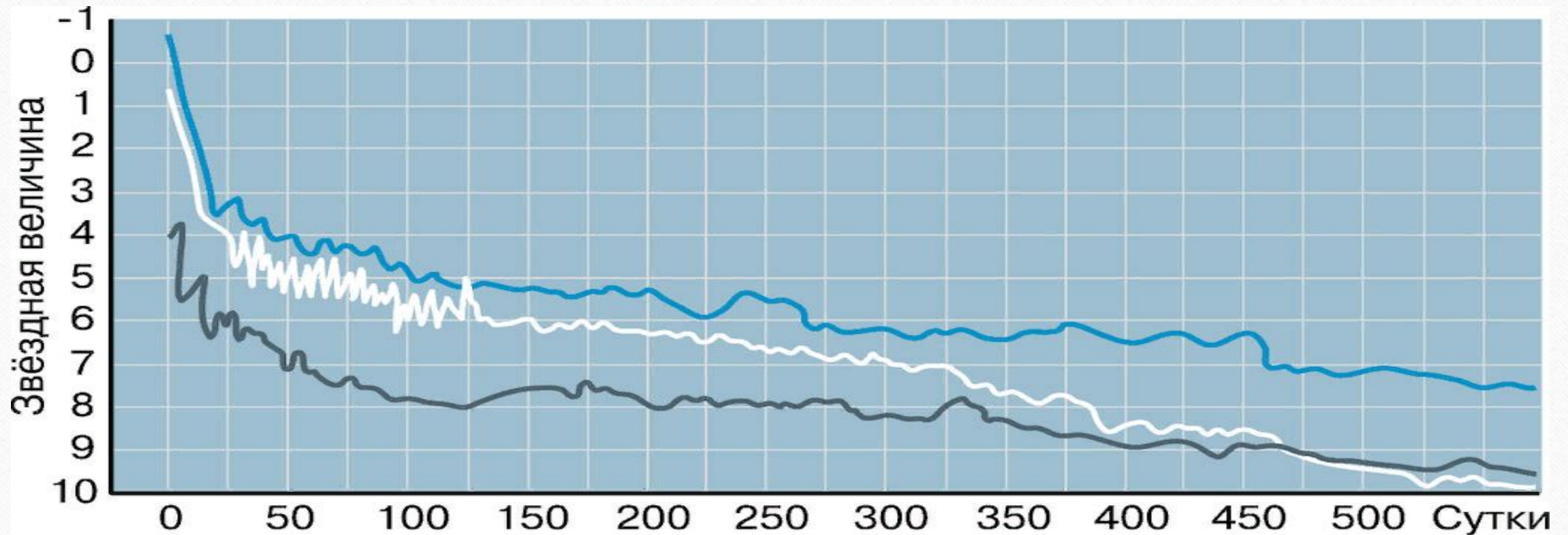
В 1604 г. уже сам Кеплер наблюдал новую звезду **в созвездии Змееносца**.



В настоящее время различают **новые** и **сверхновые** вспыхивающие звёзды.

**У новых звёзд светимость возрастает на 12–13 звёздных величин и выделяется энергия до  $10^{39}$  Дж.**

Звезда приобретает максимальную яркость всего за несколько суток, а ослабление до первоначального значения светимости может длиться годами



Кривые блеска новых звёзд

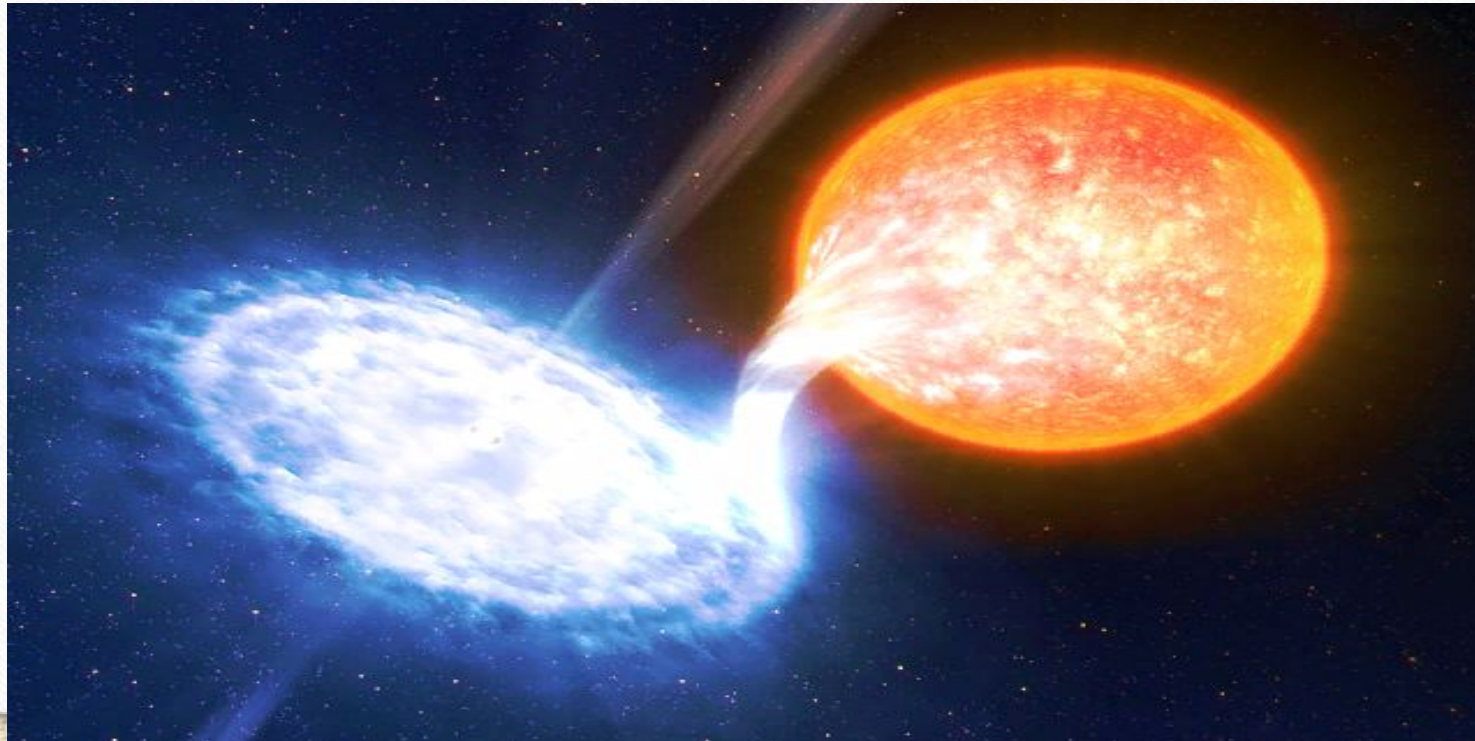
Долгое время причины вспышек новых звёзд оставались непонятными.

В 1954 г. было обнаружено, что одна из новых звёзд (DQ Геркулеса) является двойной с периодом обращения всего 4 ч 39 мин. Один из компонентов – белый карлик, а другой – красная звезда главной последовательности.

Из-за их близкого расположения на белый карлик перетекает газ из атмосферы красного карлика. Создаются условия для начала термоядерных реакций превращения водорода в гелий. Внешние слои звезды, составляющие небольшую часть её массы, расширяются и выбрасываются в космическое пространство.

Их свечение и наблюдается как **вспышка новой звезды**.

---



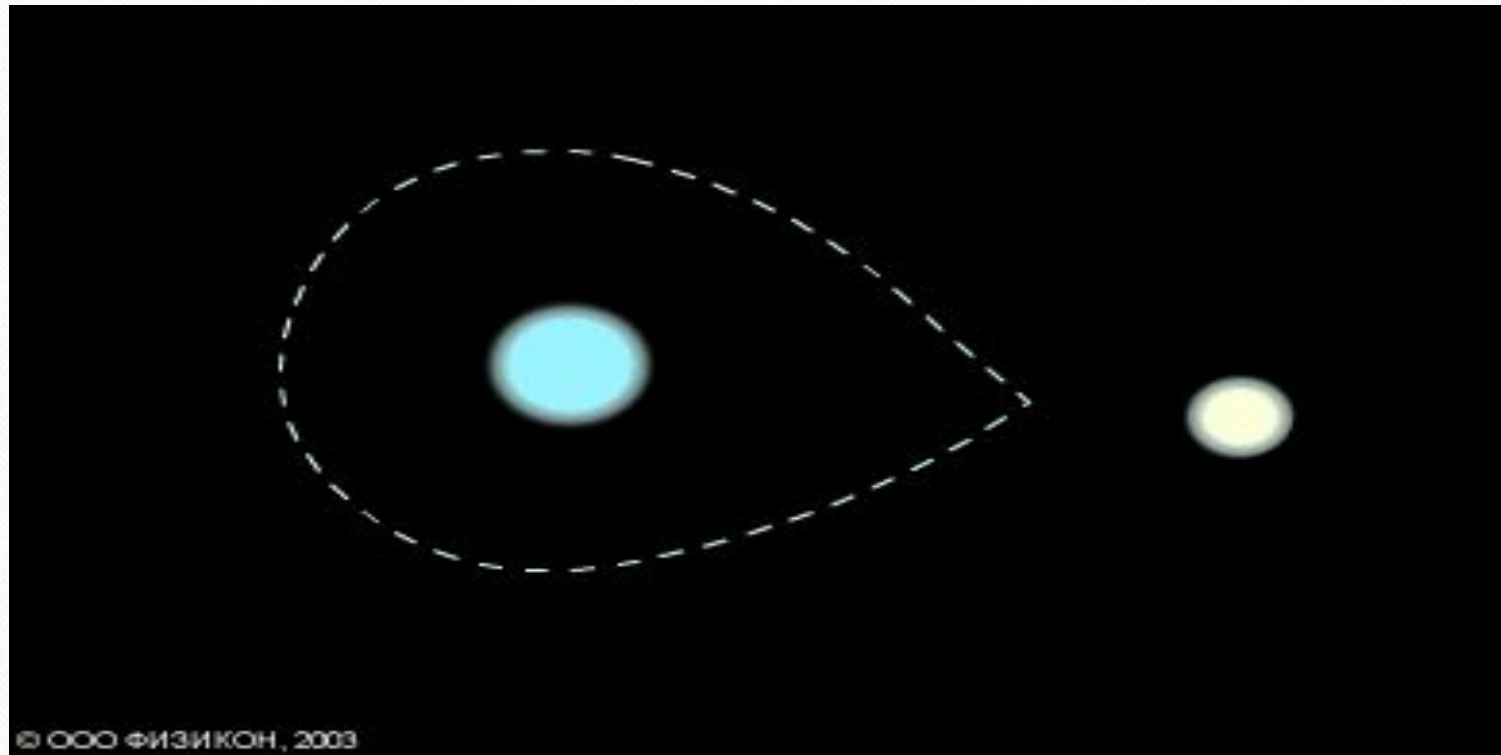


Но в некоторых случаях такой процесс может привести к катастрофе.

Если при перетекании вещества масса белого карлика превысит предельную (примерно 1,4 массы Солнца), то происходит взрыв.

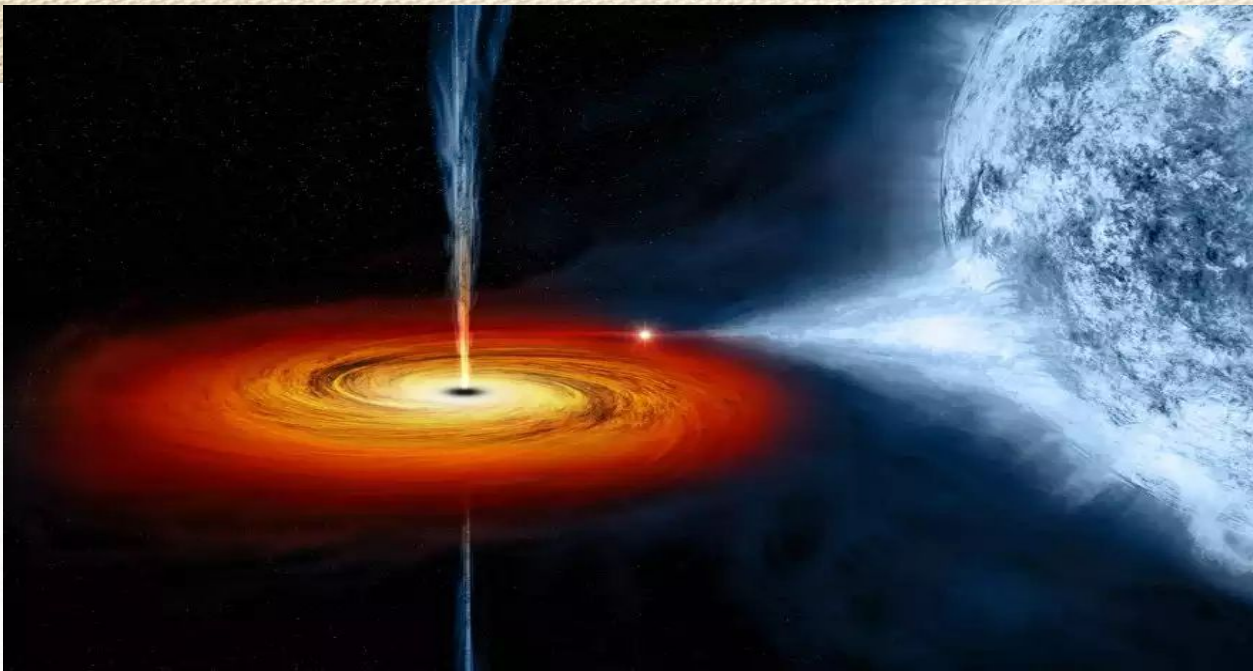
Термоядерные реакции превращения углерода и кислорода в железо и никель, которые идут с огромной скоростью, могут полностью разрушить звезду.

Происходит **вспышка сверхновой**.



В 1967 году в созвездии Лисички группа английских радиоастрономов обнаружила источник необычных радиосигналов: импульсы продолжительностью около 0,3 с повторялись через каждые 1,34 с, причём периодичность импульсов выдерживалась с точностью до  $10^{-10}$  с. Так был открыт первый пульсар, которых в настоящее время известно уже около 500.



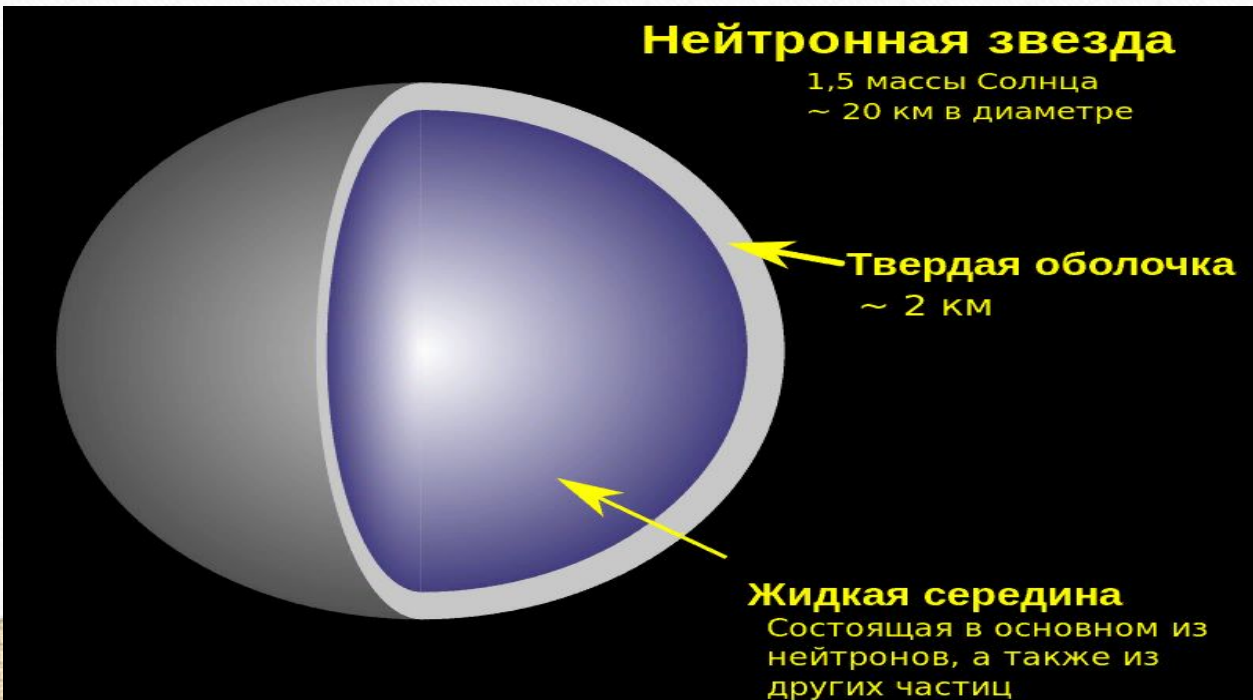


Сразу же после открытия пульсаров было высказано предположение о том, что они являются быстровращающимися **нейтронными звёздами**.

Излучение пульсара, которое испускается в узком конусе, наблюдатель видит лишь в том случае, когда при вращении звезды этот конус направлен на него подобно свету маяка.

Вещество пульсаров состоит из нейтронов, образовавшихся при соединении протонов с электронами, тесно прижатых друг к другу гравитационными силами.

Диаметры таких нейтронных звёзд всего 20–30 км, а плотность близка к ядерной и может превышать  $10^{18}$  кг/м<sup>3</sup>.



### Нейтронная звезда

1,5 массы Солнца  
~ 20 км в диаметре

Твердая оболочка  
~ 2 км

### Жидкая середина

Состоящая в основном из нейтронов, а также из других частиц



Изображение Крабовидной туманности в условных цветах (синий — рентгеновский, красный — оптический диапазон).  
В центре туманности — пульсар

Исследования показали, что **пульсары** являются остатками сверхновых звёзд.

Один из пульсаров был обнаружен в **Крабовидной туманности**, которая наблюдается на месте вспышки сверхновой в 1054 году.

Его излучение в оптическом, радио- и рентгеновском диапазоне излучения меняется с периодом, равным 0,033 с.



Наиболее уникальные объекты, получившие название **чёрных дыр**, должны возникать, согласно теории, на конечной стадии эволюции звёзд, масса которых значительно превышает солнечную.

У объекта такой массы, который сжимается до размеров в несколько километров, поле тяготения оказывается столь сильным, что вторая космическая скорость в его окрестности должна была бы превышать скорость света.



Чёрную дыру не могут покинуть ни частицы, ни даже излучение – она становится невидимой.

## Белые карлики, нейтронные звёзды и чёрные дыры

являются конечными стадиями эволюции звёзд различной массы.

Из вещества, которое было потеряно ими, в последующем могут образовываться **звёзды нового поколения**.



Процесс формирования и развития звёзд рассматривается как один из важнейших процессов эволюции звёздных систем – галактик – и Вселенной в целом.

# НАША ГАЛАКТИКА



---

# Млечный Путь и Галактика

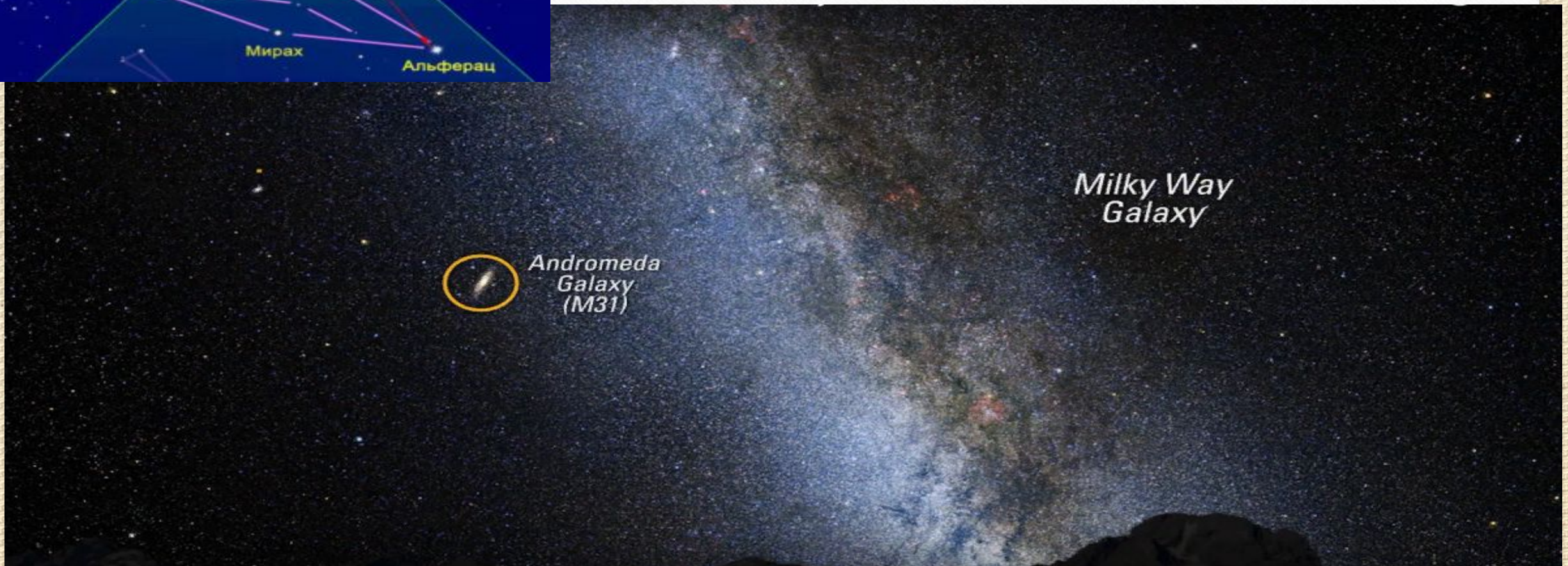


Практически все объекты, которые видят на небе невооружённым глазом жители средних широт Северного полушария Земли, составляют единую систему небесных тел (главным образом звёзд) нашу **Галактику**.





Из числа объектов, видимых невооружённым глазом на средних широтах Северного полушария Земли, в состав Галактики не входит лишь слабо заметное туманное пятно, видимое в созвездии Андромеды и напоминающее по форме пламя свечи, – **туманность Андромеды**.



Характерной деталью звёздного неба является **Млечный Путь**, который простирается через всё небо светлой белесоватой полосой клочковатой формы.

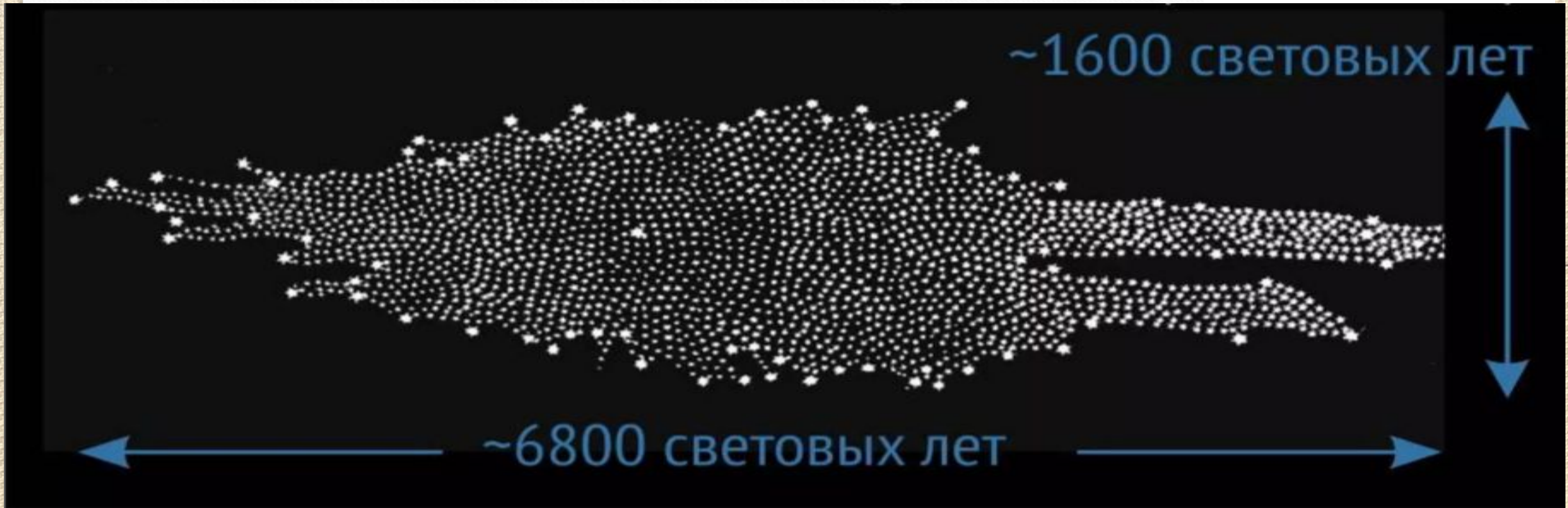
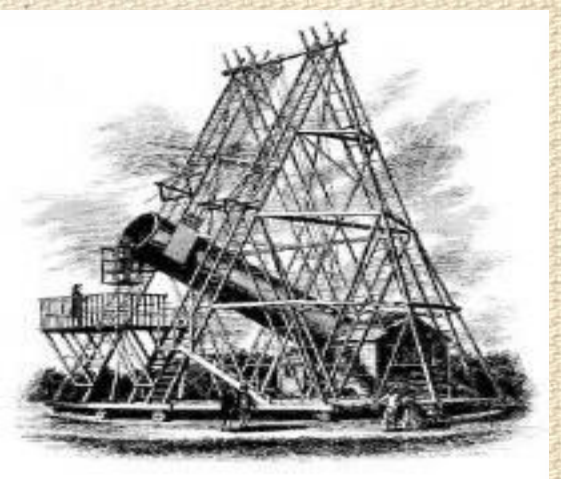
Уже первые наблюдения Млечного Пути с помощью телескопа позволили различить множество слабых звёзд нашей Галактики.





Идея о том, что Вселенная имеет «островную» структуру, неоднократно высказывалась в прошлом.

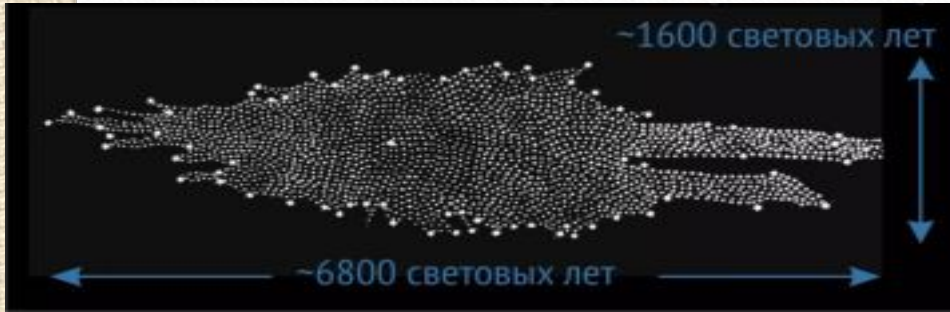
Однако лишь в конце XVIII века **Уильям Гершель** предложил первую модель строения нашей Галактики.



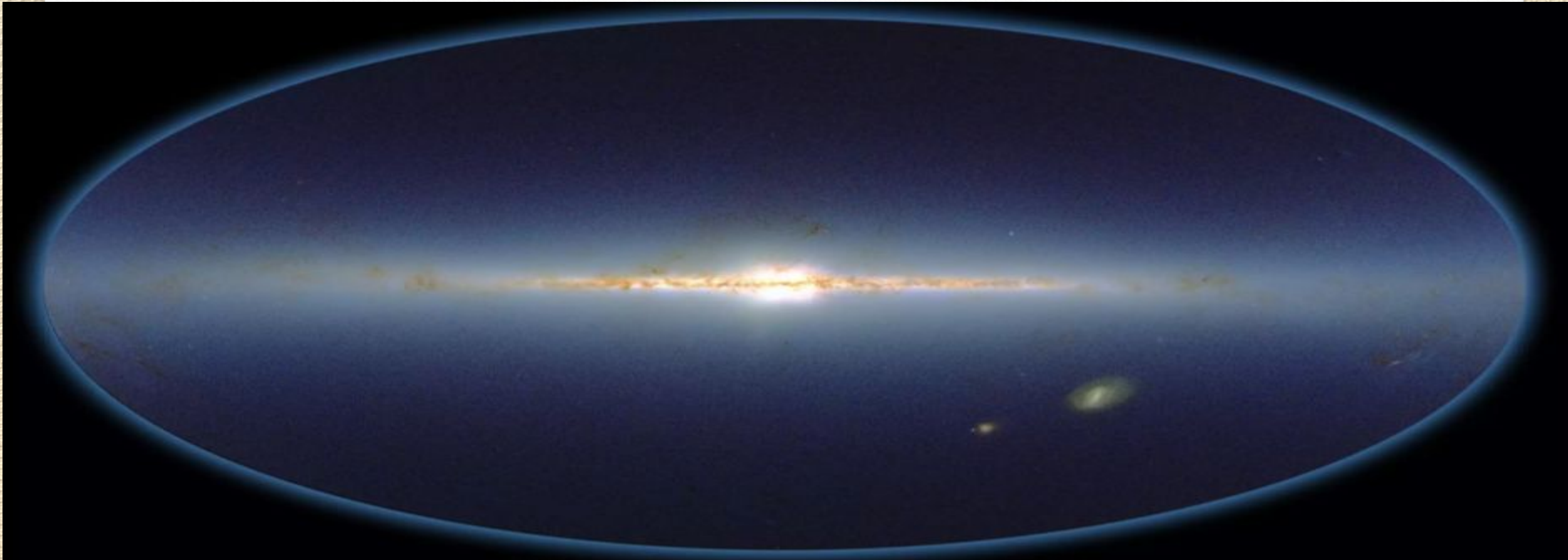
Наша Галактика по представлению Уильяма Гершеля.

Солнце помечено звездочкой чуть левее центра. «Пасть крокодила» появилась из-за того, что темное газопылевое облако в созвездии Стрельца закрывает от нас звезды

На основе подсчётов звёзд в различных участках неба Гершель установил, что их число по мере удаления от Млечного Пути резко убывает.



По его расчётам, слабые звёзды Млечного Пути вместе с остальными, более яркими образуют единую звёздную систему, напоминающую по форме диск конечных размеров, диаметр которого более чем в 4 раза превышает его толщину.

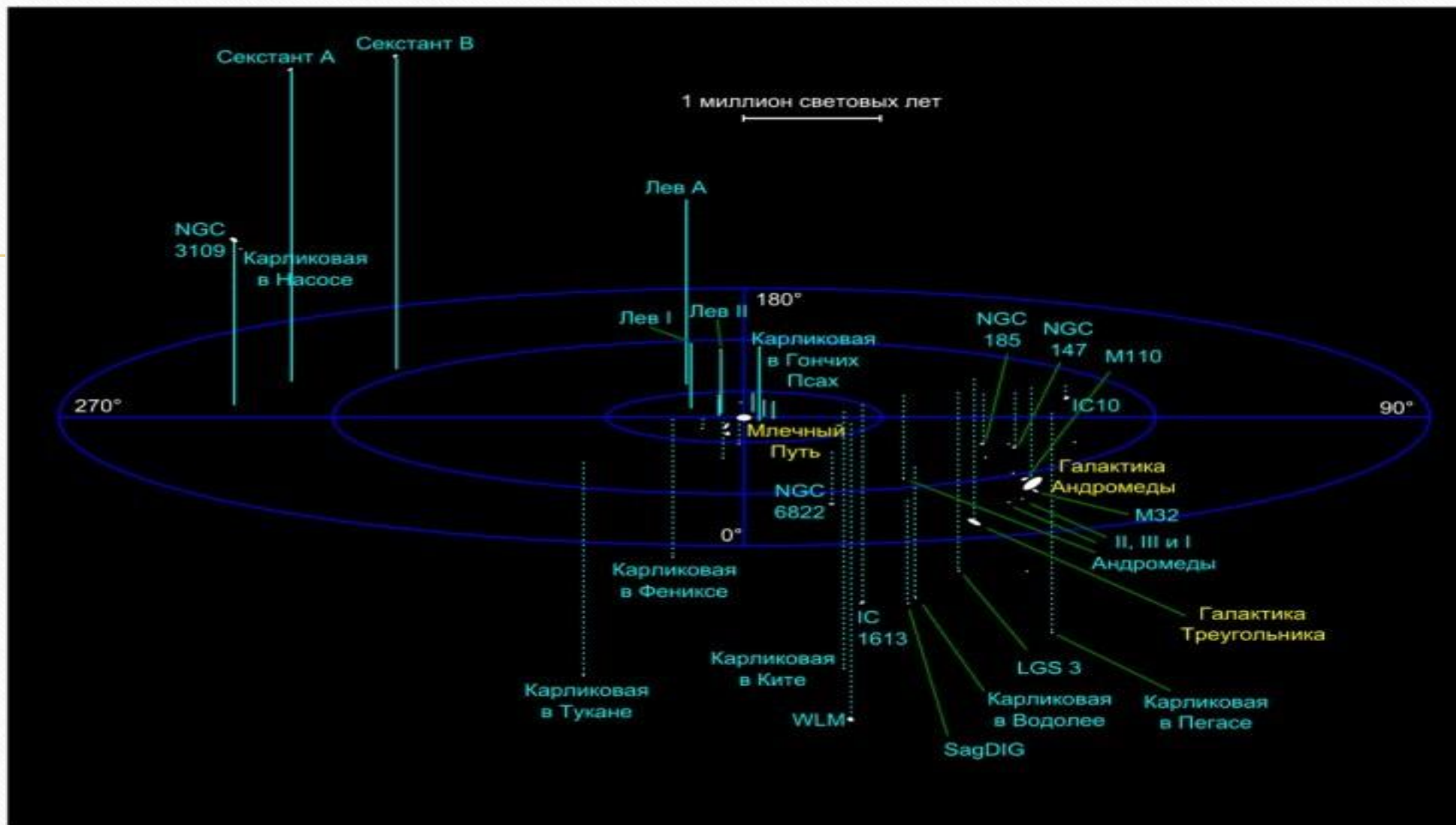


Окончательное «открытие» нашей Галактики связано с обнаружением в 1923 г. в туманности Андромеды нескольких **цефеид**.

Наблюдение цефеид позволило определить расстояние до неё и окончательно убедило учёных, что это не просто туманность, а другая, подобная нашей звёздная система.



Название «галактика» было дано всем туманностям, находящимся за пределами нашей Галактики.



Согласно современным данным, галактика Андромеды находится от нас на расстоянии немногим более 2 млн св. лет.

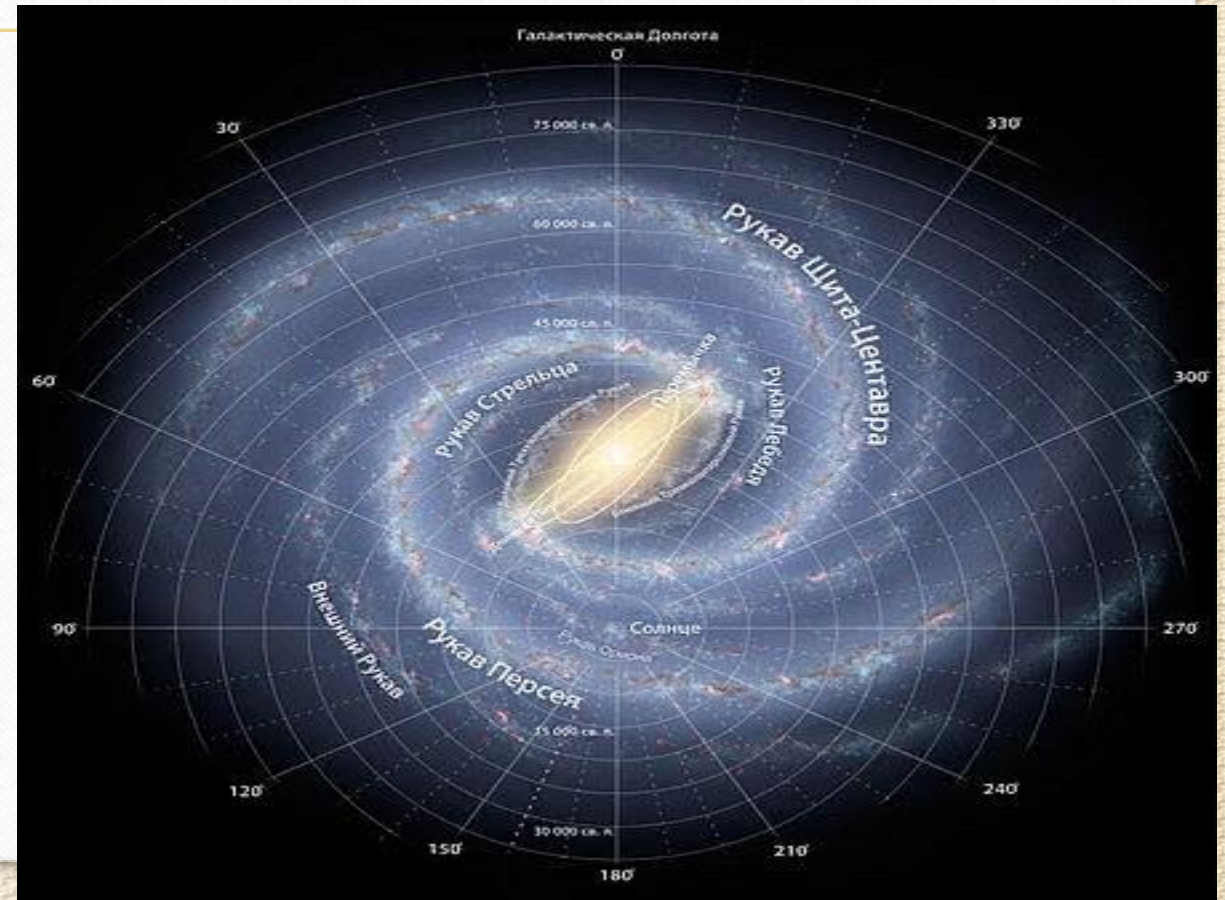
Успехи в исследовании нашей Галактики в значительной степени связаны с изучением туманности Андромеды и других галактик.

Поскольку характеристики и число звёзд, размеры и некоторые другие особенности строения нашей Галактики оказались сходными с данными, полученными для туманности Андромеды, предположили, что Млечный Путь также имеет спиральные рукава.

В последующем целенаправленные исследования подтвердили этот факт.



Галактика Андромеды



Млечный Путь (компьютерная модель)



В структуре Млечного Пути прослеживается **ядро** и окружающие его две системы звёзд: **дискообразная** и почти **сферическая галактическая корона (гало)**.

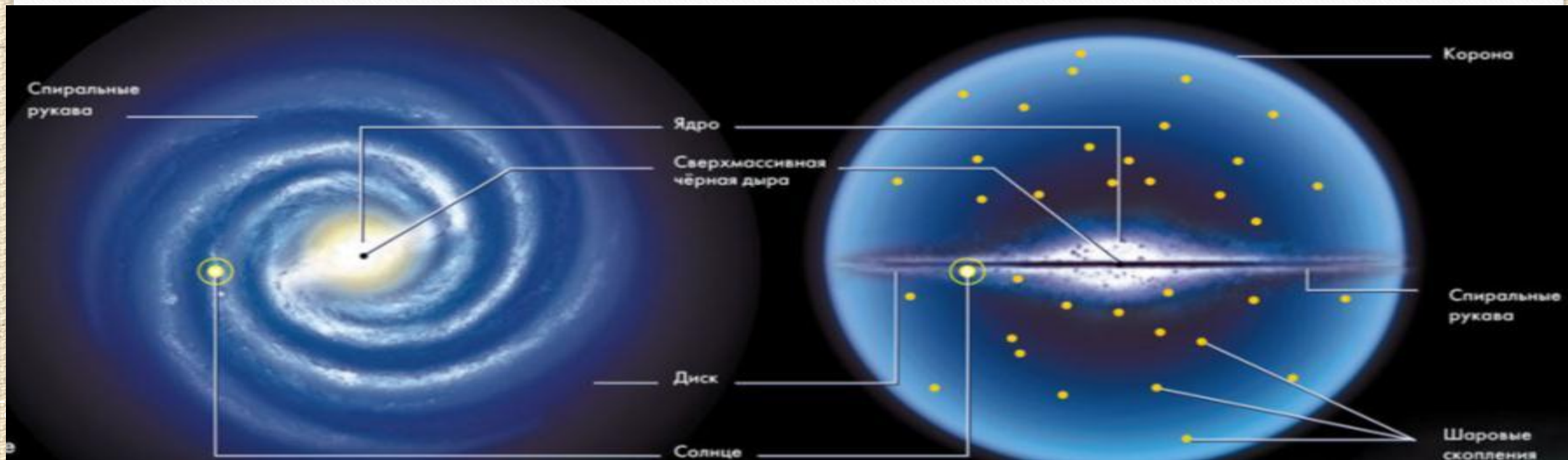
Первая включает значительное число звёзд, концентрация которых возрастает по мере приближения к галактической плоскости.

Менее многочисленные звёзды второй имеют концентрацию к ядру.



Млечный Путь, который образуют звёзды диска, опоясывает небо вдоль большого круга, а это означает, что

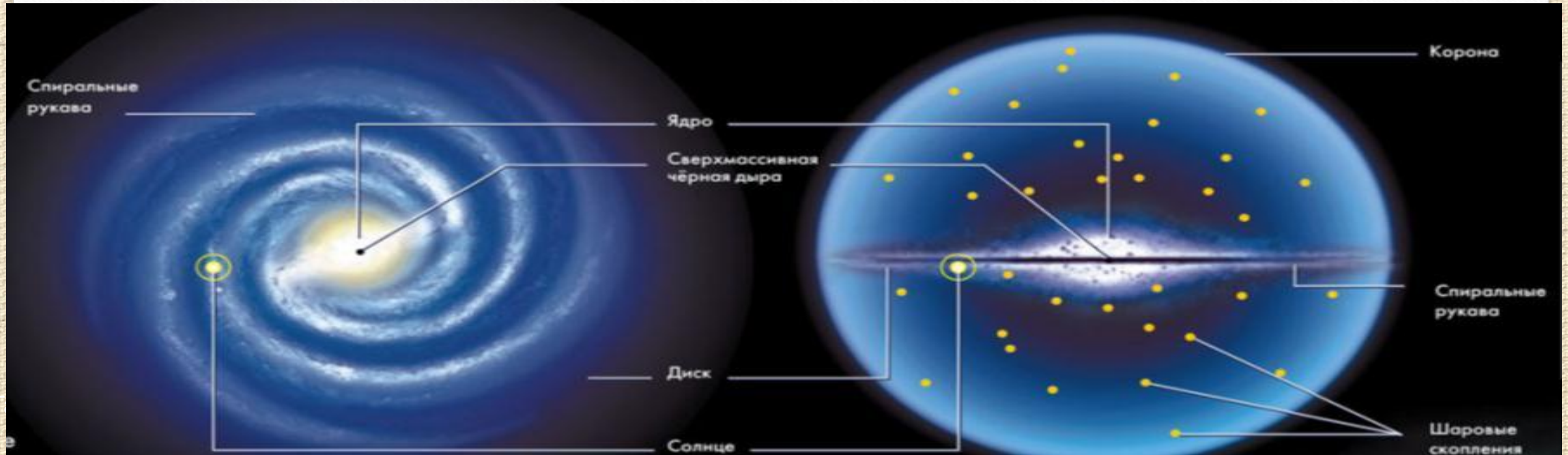
**Солнечная система находится вблизи галактической плоскости.**



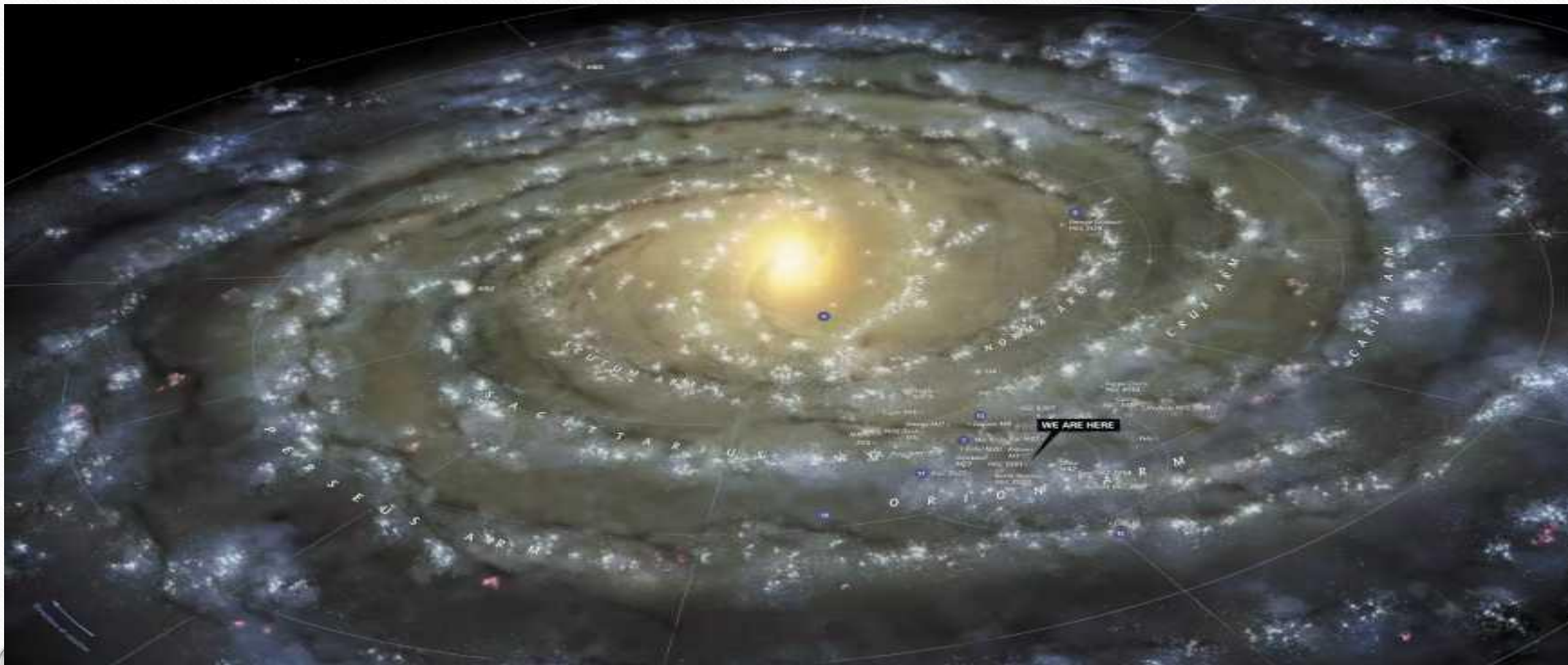
Диаметр нашей Галактики – около 100 тыс. св. лет (30 тыс. пк).

В ней около 200 млрд звёзд.

Они составляют более половины видимого вещества Галактики, а 2% – межзвёздное вещество в виде газа и пыли, при этом пыли примерно в 100 раз меньше, чем газа.



В Галактике сосуществуют как очень старые звёзды,  
возраст которых приблизительно 13 млрд лет,  
так и очень молодые, возраст которых не превышает 100 тыс. лет.



---

# Звёздные скопления и ассоциации

**Звёздное скопление** – группа звёзд, которые расположены близко друг к другу и связаны взаимным тяготением.

Различаются два вида звёздных скоплений: **шаровые** и **рассеянные**.



Шаровое звездное скопление Терзан 5, находится в созвездии Стрельца, на расстоянии 19 000 световых лет от Земли, ровесник Млечного Пути.

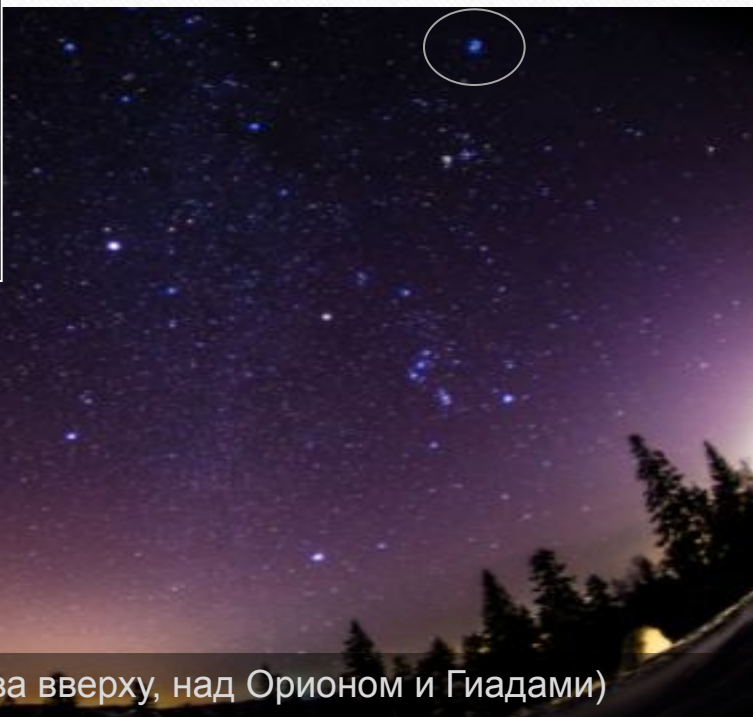


Рассеянное звездное скопление M25, находится на расстоянии 2 000 световых лет от Земли, возраст скопления 90 млн. лет.

В рассеянных скоплениях звёзд относительно немного – от нескольких десятков до нескольких тысяч.

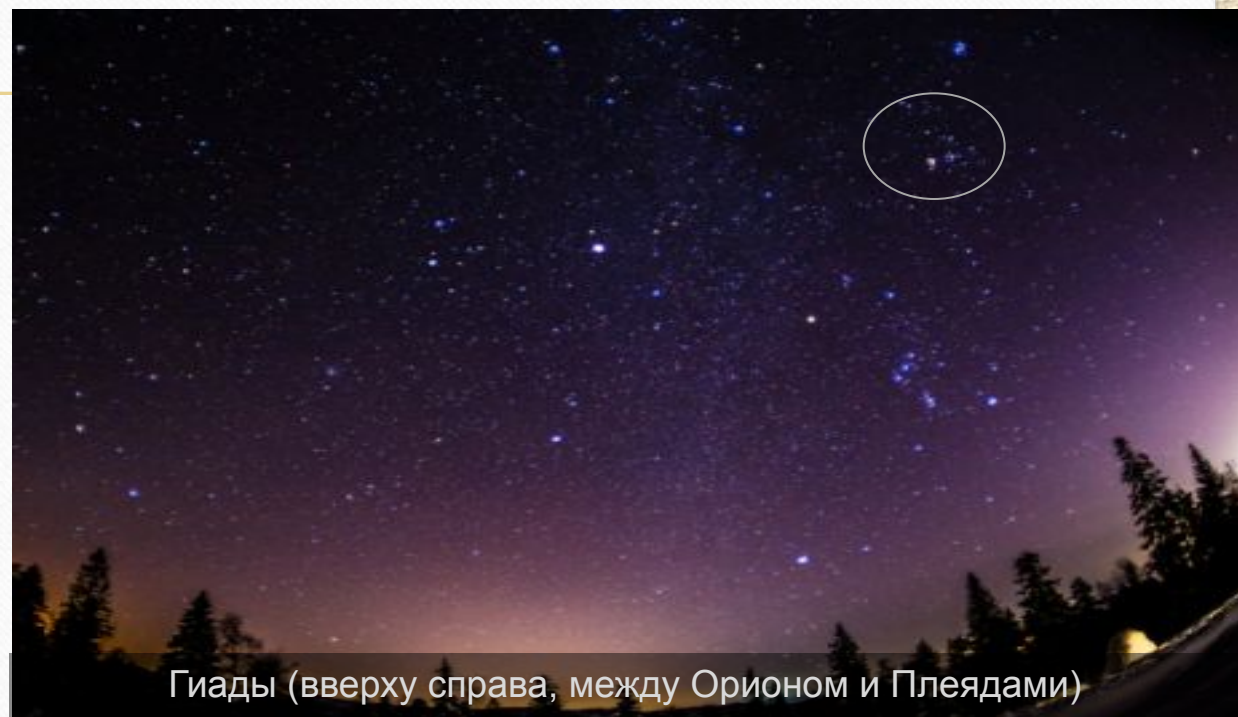
Самым известным рассеянным скоплением являются **Плеяды**, видимые в **созвездии Тельца**.

В созвездии Тельца находится ещё одно скопление – **Гиады** – треугольник из слабых звёзд вблизи яркого **Альдебарана**.



Плеяды (справа сверху, над Орионом и Гиадами)

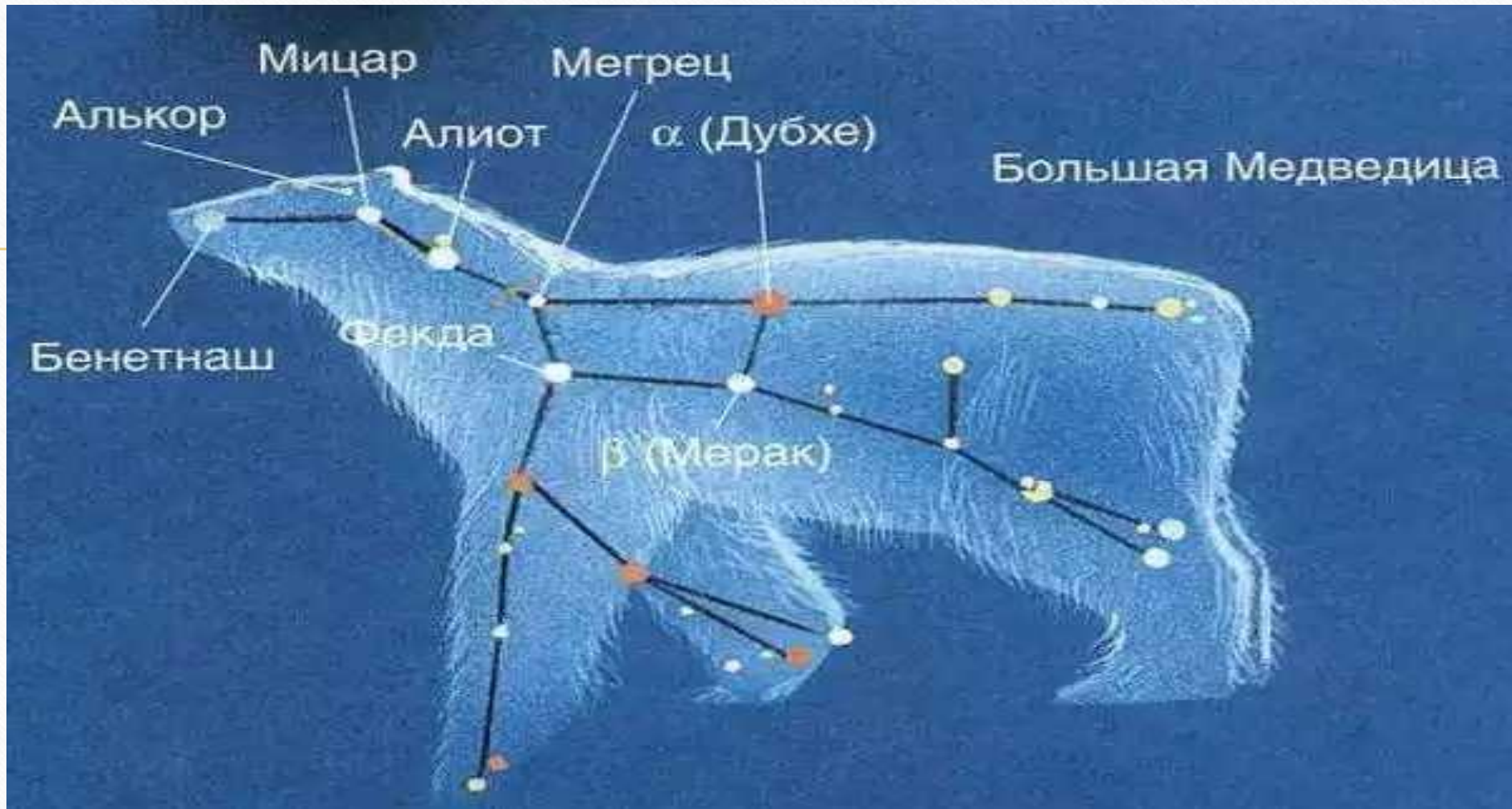
Плеяды (астрономическое обозначение – M45; иногда также используется собственное имя Семь сестёр, старинное русское название – Стожары или Волосожары); одно из ближайших к Земле и одно из наиболее заметных для невооружённого глаза звёздных скоплений.



Гиады (вверху справа, между Орионом и Плеядами)

Гиады — рассеянное звёздное скопление в созвездии Тельца, видимое невооружённым глазом. Ярчайшие звёзды скопления образуют вместе с оранжевым Альдебараном, ярчайшей звездой Тельца, фигуру, похожую на букву «V». Сам Альдебаран в скопление не входит, а только проецируется на Гиады.

Часть звёзд, относящихся к созвездию Большой Медведицы, также составляет рассеянное скопление.



**5 внутренних звёзд Ковша** (кроме крайних  $\alpha$  и  $\eta$ ) принадлежат единой группе в пространстве — **движущемуся скоплению Большой Медведицы**.

Дубхе и Бенетнаш движутся в другую сторону, поэтому форма Ковша существенно меняется примерно за 100000 лет.



Практически все рассеянные скопления видны вблизи Млечного Пути.

Известно около 1200 рассеянных скоплений, но считается, что их в Галактике может быть в несколько десятков раз больше.



Галактический центр Млечного Пути

**Шаровые звёздные** скопления насчитывают в своём составе сотни тысяч и даже миллионы звёзд.

Некоторые скопления, в частности **M13 в созвездии Геркулеса**, можно увидеть невооружённым глазом в особо ясную погоду вдали от крупных городов.



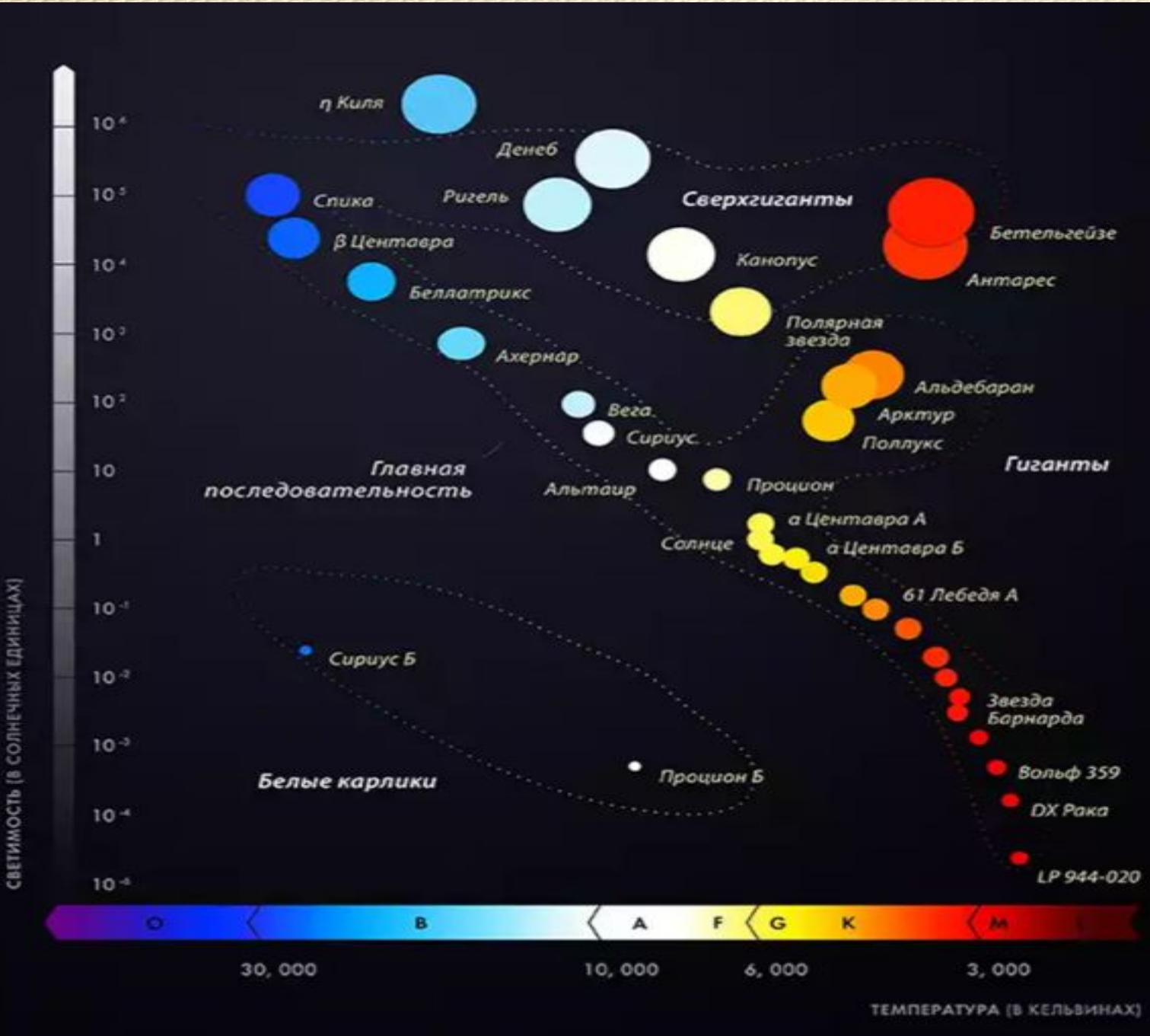
Шаровое скопление северного полушария - M13 в созвездии Геркулеса.

Большая часть шаровых скоплений расположена вблизи центра Галактики,  
а по мере удаления от него их концентрация в пространстве уменьшается.

В Галактике известно около 150 шаровых звёздных скоплений.



Шаровое скопление Паломар 2 в созвездии Возничего



В состав **рассеянных скоплений** входят в основном звёзды, относящиеся (как и Солнце) к **главной последовательности**.



планет и суперпланет, главную последовательность представляют только **красные карлики**.



Для всех звёзд данного звездного скопления **химический состав** и **возраст** можно считать одинаковыми (в первом приближении).

Наблюдаемое различие их свойств определяется только тем, что эволюция звёзд, различных по **массе**, происходит по-разному.



Среди хорошо изученных звёздных скоплений (их около 500) нет ни одного, для которого диаграмма «спектр – светимость» противоречила бы выводам теории звёздной эволюции.



Звезды созвездия Центавра. Слева направо: Алфа и Бета Центавра.  
Мелкие яркие кружочки и точки – это тоже звезды нашей Галактики.

Различия скоплений двух типов объясняются различием возраста звёзд, входящих в их состав, а следовательно, и возраста самих скоплений.

**Возраст** многих **рассеянных скоплений** не более **1–2 млрд лет**.  
**Возраст шаровых скоплений** может достигать **11–13 млрд лет**.



Звездное скопление NGC 6193 (в центре)  
своим мощным излучением приводит к свечению близлежащую туманность Венец (справа).

Группировки молодых звёзд, не связанных гравитационно, получили название **звёздных ассоциаций**.

Возраст некоторых из них не превышает миллиона лет.

**Ассоциации существуют недолго** – всего за 10–20 млн лет они расширяются настолько, что их звёзды уже невозможно выделить среди других звёзд.

видимый свет

инфракрасный диапазон



Трапеция Ориона, центральная часть — **OB-ассоциация молодых звёзд-гигантов** спектральных классов O и B.



Существование в Галактике звёздных скоплений и ассоциаций самого различного возраста свидетельствует о том, что звёзды формируются не в одиночку, а группами, а сам процесс звёздообразования продолжается и в настоящее время.



Шаровое звёздное скопление в созвездии Змееносца.



**МЕЖЗВЁЗДНАЯ СРЕДА  
ГАЛАКТИКИ**

---

# Межзвёздная среда: газ и пыль

Межзвёздное вещество распределено в объёме Галактики неравномерно.

Основная масса газа и пыли сосредоточена в слое небольшой толщины (около 200–300 пк) вблизи плоскости Млечного Пути.

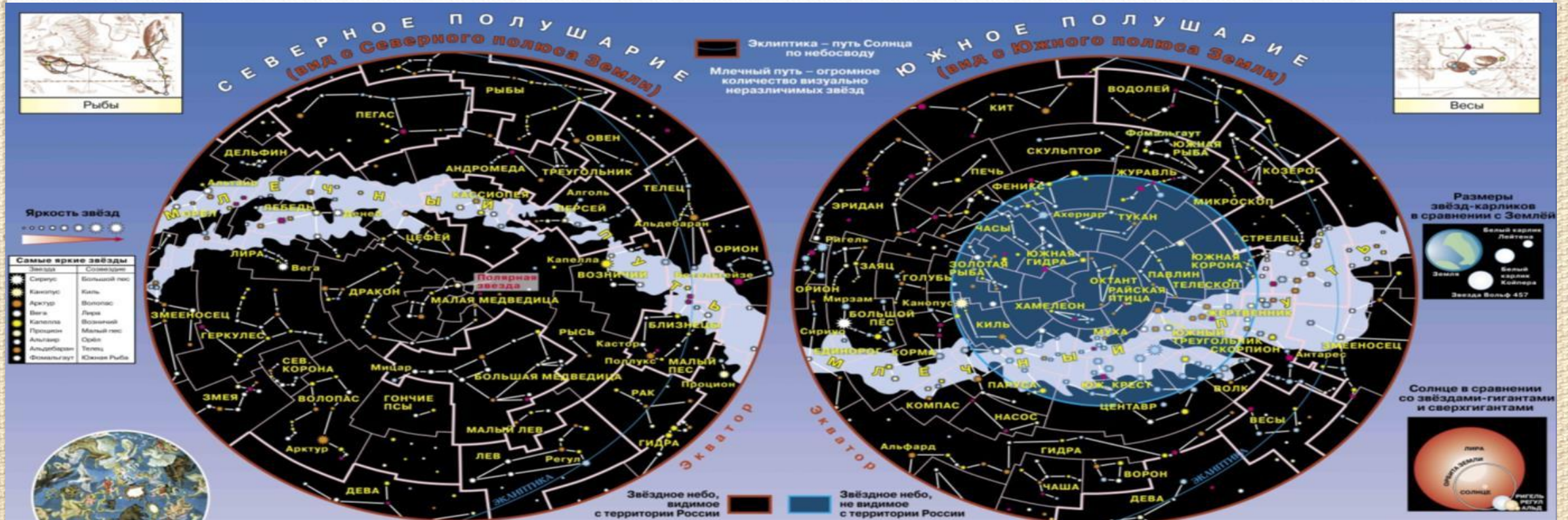
Местами это вещество сгущается в огромные (диаметром сотни световых лет) облака, которые загораживают от нас расположенные за ними звёзды.



Именно такие облака наблюдаются как тёмные промежутки в Млечном Пути, которые долгое время считались областями, где звёзд нет, а потому через них можно заглянуть за пределы Млечного Пути.

Самое большое и близкое к нам облако вызывает хорошо заметное

**раздвоение Млечного Пути**, которое протянулось от созвездия Орла до созвездия Скорпиона. Оно показано на картах звёздного неба.



Свет звёзд рассеивает и поглощает космическая пыль (графит, силикаты, лёд), частицы которой по своим размерам сравнимы с длиной световой волны.

Частицы такого размера сильнее поглощают более коротковолновое излучение в сине-фиолетовой части спектра; в длинноволновой (красной) его части поглощение слабее, поэтому наряду с ослаблением света далёких объектов наблюдается их покраснение.



Межзвёздная среда

Паллада

Вест

В облаках газовая концентрация составляет несколько десятков атомов на  $1 \text{ см}^3$ .

В пространстве между облаками она в 100 раз меньше, чем в облаках.

Масса пыли составляет всего несколько процентов массы межзвёздного вещества, состоящего в основном из молекулярного водорода с небольшими примесями других газов.



Но даже столь малое содержание пыли при тех огромных расстояниях, которые проходит свет от далёких звёзд, вызывает его значительное ослабление.

В среднем ослабление света составляет 1,5 звёздной величины на 1000 пк, а в облаках может достигать 30 звёздных величин.

Сквозь такую завесу излучение в оптическом диапазоне практически не проникает, что лишает нас возможности увидеть ядро Галактики, которое можно изучать, только принимая его инфракрасное и радиоизлучение.

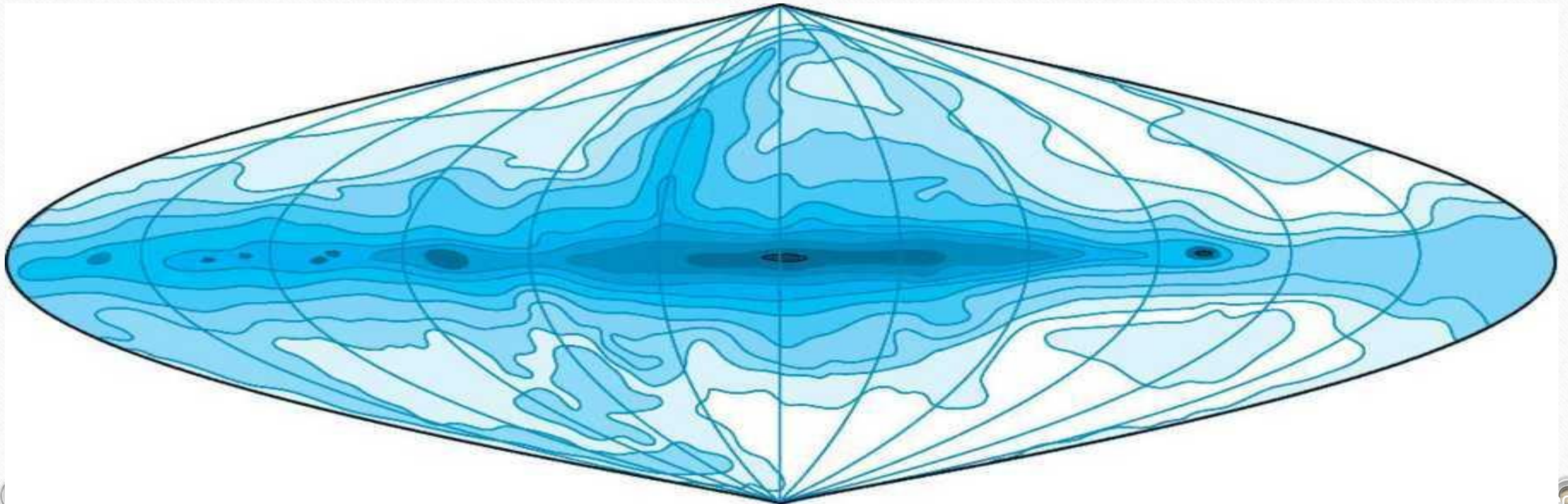


Центр Галактики в инфракрасном свете



Более половины межзвёздного вещества в Галактике составляет нейтральный водород, который не светится сам и не поглощает свет.

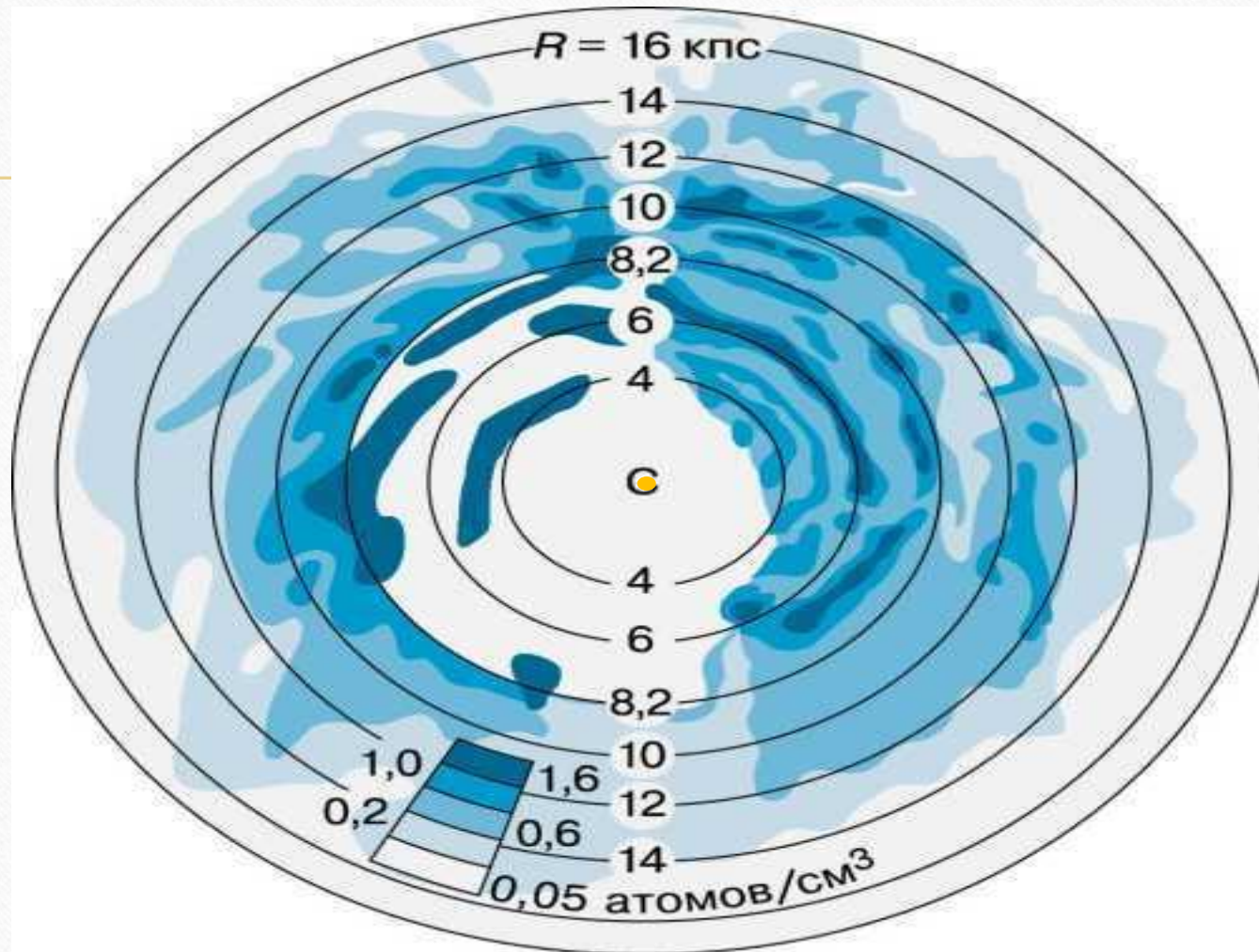
Основной уровень энергии атома водорода имеет два подуровня. При переходе с одного из них на другой происходит испускание кванта с частотой, соответствующей длине волны 21 см. В каждом отдельном атоме такой переход происходит в среднем один раз за 11 млн лет, но **благодаря тому, что водород составляет основную массу вещества Галактики, радиоизлучение на волне 21 см оказывается достаточно интенсивным.**



Распределение интенсивности радиоизлучения по небу

По **радиоизлучению водорода** были выявлены **спиральные ветви**, вдоль которых он сконцентрирован.

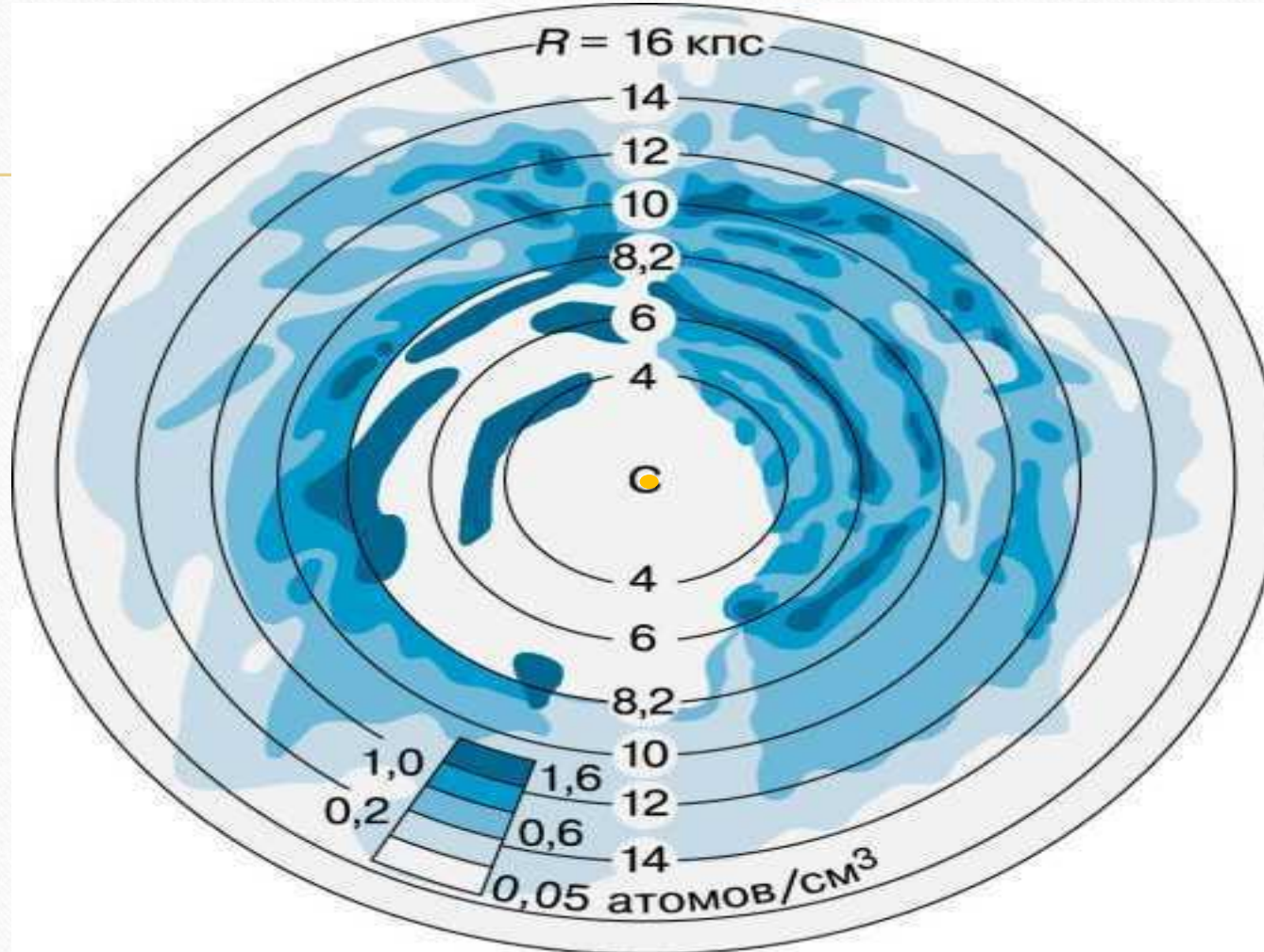
Спиральная структура в галактическом диске прослеживается по другим объектам: **горячим звёздам** классов O и B, а также **светлым туманностям**.



Спиральная структура Галактики по радиоизлучению

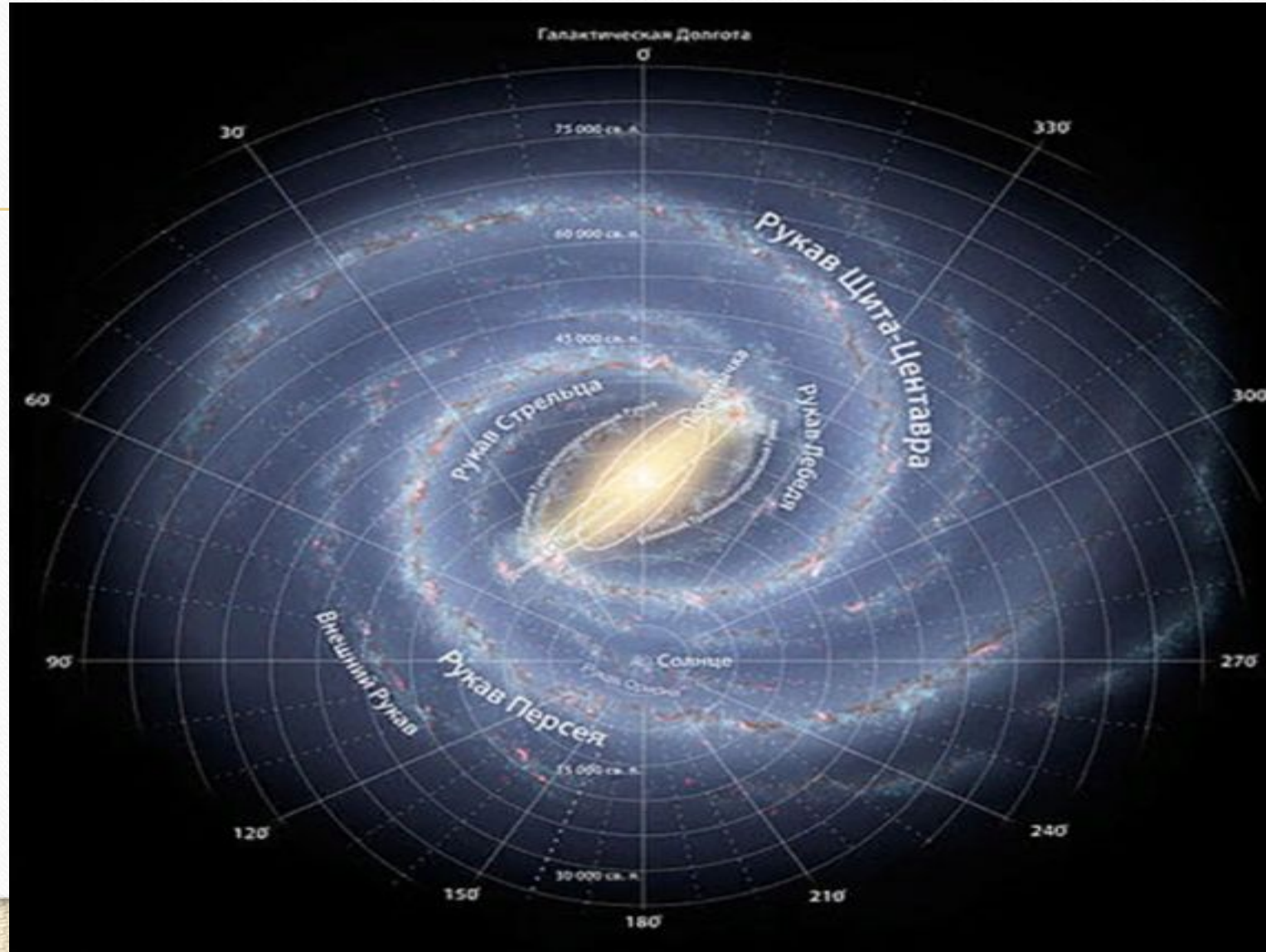
Солнце (С) находится почти посередине между двумя спиральными ветвями, удалёнными от него примерно на 3 тыс. св. лет.

Они названы по имени созвездий, в которых заметны их участки, – **рукав Стрельца** и **рукав Персея**.



Спиральная структура Галактики по радиоизлучению

По современным представлениям, **спиральные ветви являются волнами плотности**, причём движутся они вокруг центра Галактики с постоянной угловой скоростью независимо от звёзд и других объектов.



Физические условия в межзвёздной среде весьма разнообразны, поэтому даже сходные по своей природе и близкие по составу газопылевые облака выглядят по-разному.

Они могут наблюдаться как **тёмные туманности**, например **Конская Голова** в созвездии Ориона.



Если поблизости от облака находится достаточно яркая горячая звезда, то пыль, входящая в его состав, отражает свет этой звезды, и облако выглядит как **светлая туманность**, спектр которой совпадает со спектром звезды.



Эмиссионная туманность Ориона (справа),  
маленькая пылевая туманность M43 (в центре),  
голубая отражательная туманность NGC 1977 (слева)

Очень горячие звёзды (с температурой 20 000–30 000 К), которые обладают значительным ультрафиолетовым излучением, вызывают видимое флуоресцентное свечение газов, входящих в состав облака.

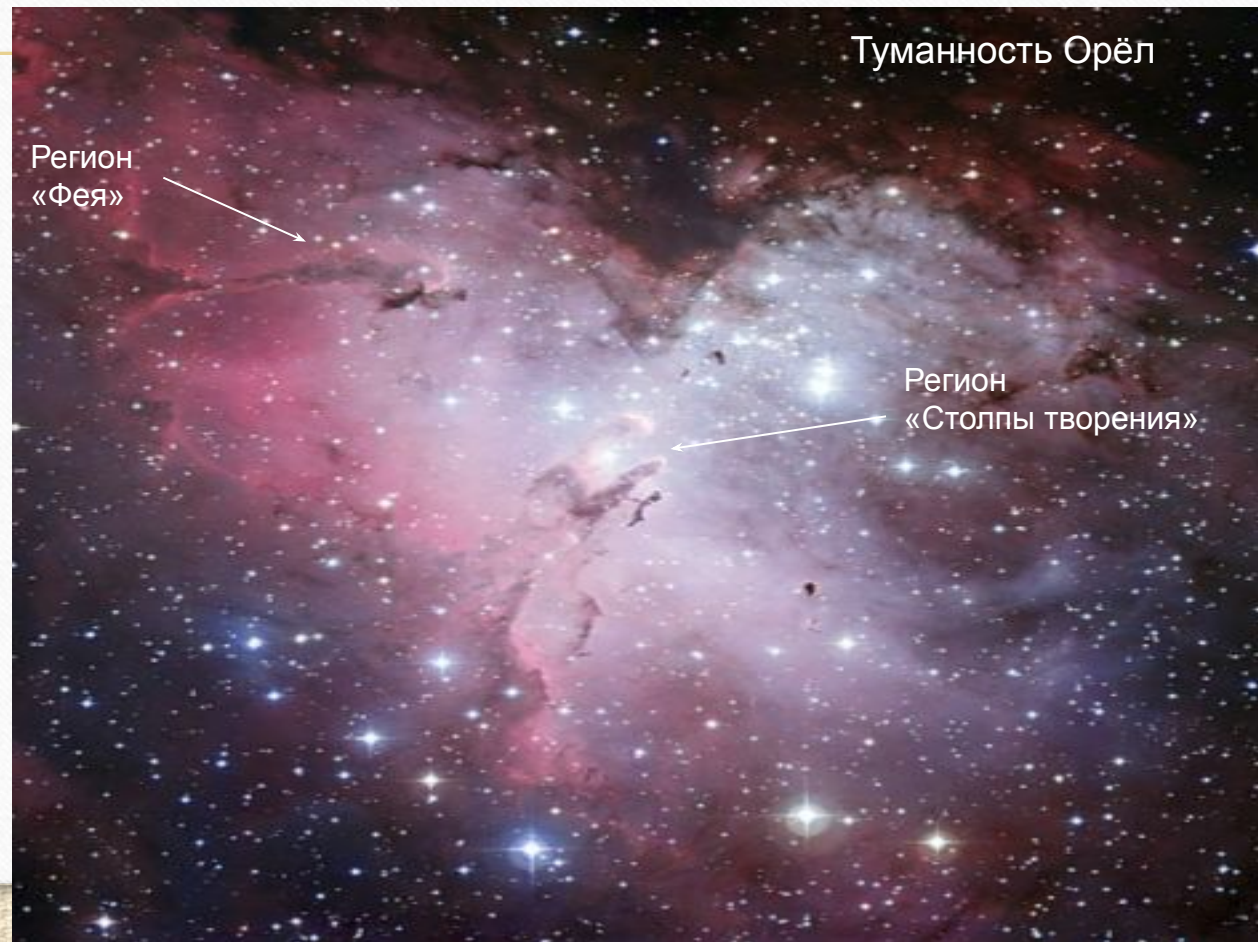
В спектре таких облаков, которые получили название **диффузных газовых туманностей**, наблюдаются яркие линии водорода, кислорода и других элементов.

Типичным объектом является **Большая туманность Ориона**, которую можно видеть в хороший бинокль.

На фоне светлых туманностей нередко бывают видны тёмные пятна и прожилки. Так выглядят наиболее плотные и холодные части межзвёздного вещества, получившие название **молекулярных облаков**.

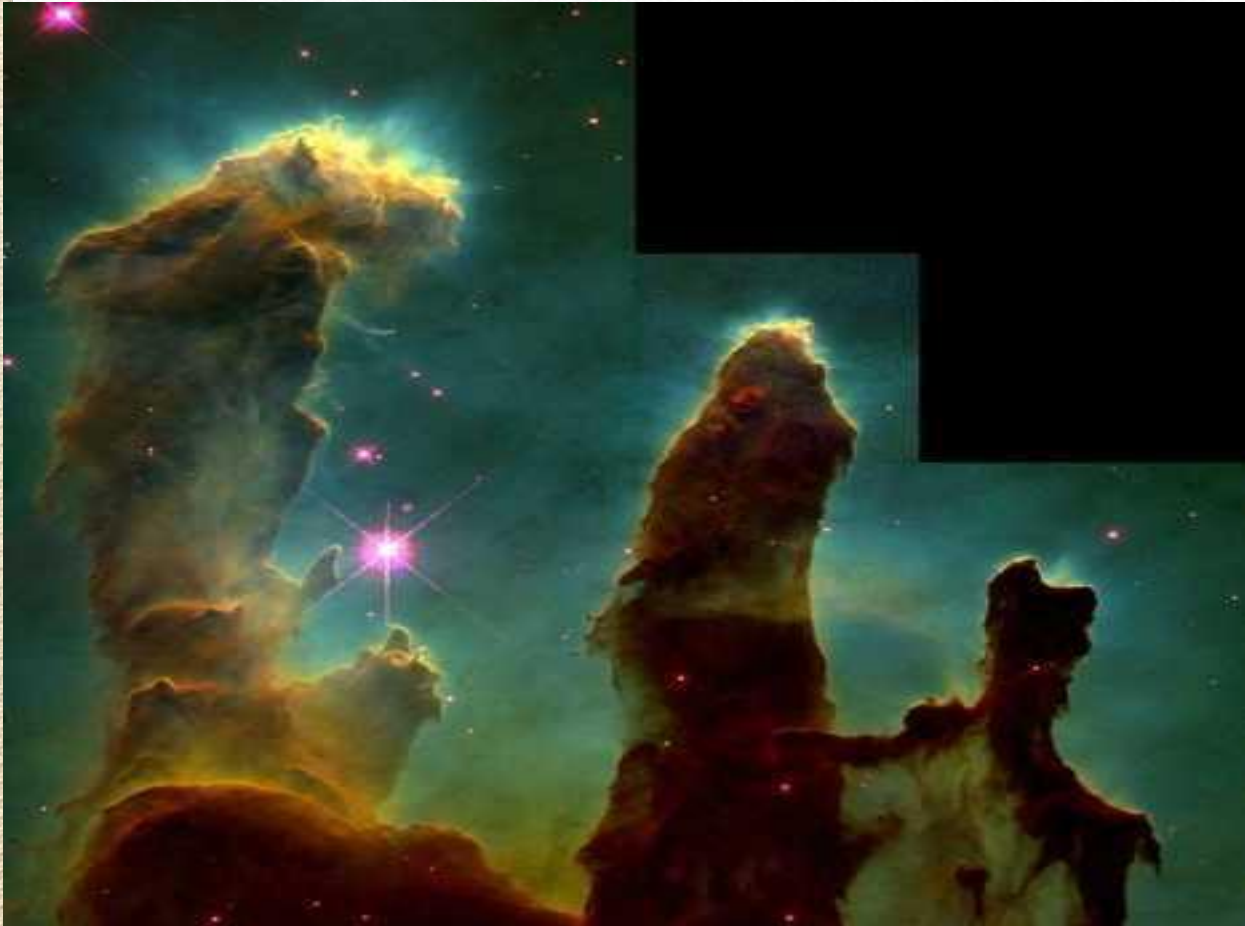
Масса таких облаков может достигать миллиона масс Солнца, а диаметр – 60 пк.

Именно в этих облаках, состоящих в основном из молекулярного водорода и гелия, происходит **образование звёзд**.



Плотность молекулярных облаков в сотни раз больше плотности облаков атомарного водорода, а температура их всего примерно 10 К (–263 °С).

Именно в таких условиях гравитационные силы могут преодолеть газовое давление и вызвать неуправляемое сжатие облака — его **коллапс**.



Этот процесс может повторяться до тех пор, пока не образуются фрагменты, которые вследствие высокой плотности будут непрозрачными для излучения, и вещество не сможет уносить выделяющееся тепло.

Эти зародыши будущих звёзд принято называть **протозвёздами** (от греч. *protos* — первый).

Регион «Столпы творения» туманности Орёл – активная область звездообразования.

Тёмные области в туманности - протозвёзды.



В процессе превращения фрагмента облака в звезду происходит колоссальное изменение физических условий: температура возрастает примерно в 1 млн раз, а плотность увеличивается в  $10^{20}$  раз.

Продолжительность всего процесса по космическим меркам невелика: для такой звезды, как Солнце, она составляет несколько миллионов лет.



Регион «Фея» туманности Орёл

Протозвезда ещё не имеет термоядерных источников энергии, излучая за счёт энергии, выделяющейся при сжатии. На центральную, наиболее плотную часть протозвезды продолжает падать окружающий её газ.

С ростом массы протозвезды растёт температура в её недрах, и когда она достигает нескольких миллионов кельвинов, начинаются термоядерные реакции.

Сжатие прекращается, сила тяжести уравновешена внутренним давлением горячего газа – протозвезда превратилась в звезду.



Этапы формирования звезды

Согласно современным представлениям, рождающиеся звёзды на определённом этапе проходят стадию

**звезды-кокона.**

Протозвёзды и очень молодые звёзды обычно окружены газопылевой оболочкой из того вещества, которое ещё не упало на звезду. Эта оболочка делает невозможным наблюдение рождающейся звезды в оптическом диапазоне.

Однако сама оболочка разогревается излучением звезды до температуры 300-600 К и является источником инфракрасного излучения.



NASA/JPL-Caltech

естр



Излучение звезды нагревает окружающую газовую оболочку и постепенно рассеивает её полностью или частично.

Разлёт остатков облака, разогретых родившимися в нём звёздами, наблюдается в огромном комплексе облаков в **Орионе**.

Очаг звездообразования в Орионе является одним из ближайших к Земле и наиболее заметным



Две другие, самые близкие области звездообразования находятся в тёмных облаках созвездий **Тельца** и **Змееносца**.



Молекулярное облако Ро Змееносца – темная туманность, отдаленная от нас на 460 св. лет.

В отдельных случаях от оболочки-кокона остаются газопылевые диски, частицы которых обращаются вокруг звёзд.

Вероятно, из вещества одного из таких дисков около 5 млрд лет тому назад сформировалась наша Земля и все другие тела Солнечной системы.



Иная форма взаимосвязи звёзд и межзвёздного вещества наблюдается в туманностях, которые образуются на определённых этапах эволюции звёзд.

К их числу относятся **планетарные туманности** - внешние слои звёзд, отделившиеся от них при сжатии ядра и превращении звезды в белого карлика.

Эти оболочки расширяются и в течение нескольких десятков тысяч лет рассеиваются в космическом пространстве.



Туманность NGC 2818 в созвездии Компас

Туманности другого типа образуются при взрывах сверхновых звёзд.

Самая известная из них - **Крабовидная туманность** в созвездии Тельца.

Она появилась как результат вспышки сверхновой в 1054 г. На этом месте в настоящее время внутри туманности наблюдается пульсар.

Оболочка сверхновой расширяется со скоростью свыше 1000 км/с.



Крабовидная туманность в созвездии Тельца



Состав вещества, теряемого звёздами, отличается от первичного состава межзвёздной среды. В процессе термоядерных реакций в недрах звёзд происходит образование многих химических элементов, а во время вспышек сверхновых образуются даже ядра тяжелее железа.

Потерянный звёздами газ с повышенным содержанием тяжёлых химических элементов меняет состав межзвёздного вещества, из которого впоследствии образуются звёзды.

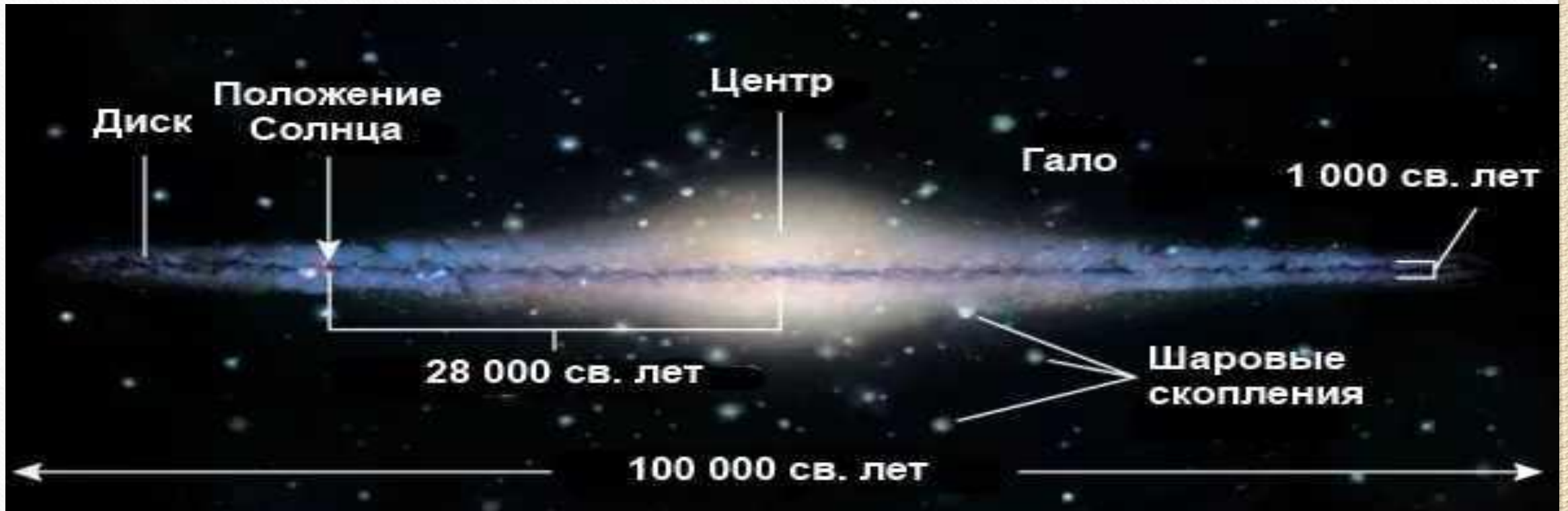


Химический состав звёзд «второго поколения», к числу которых принадлежит, вероятно, и наше Солнце, несколько отличается от состава старых звёзд, образовавшихся ранее.

В настоящее время объекты, имеющие разный возраст, по их распределению в пространстве принято разделять на ряд подсистем, образующих единую звёздную систему - **Галактику**.

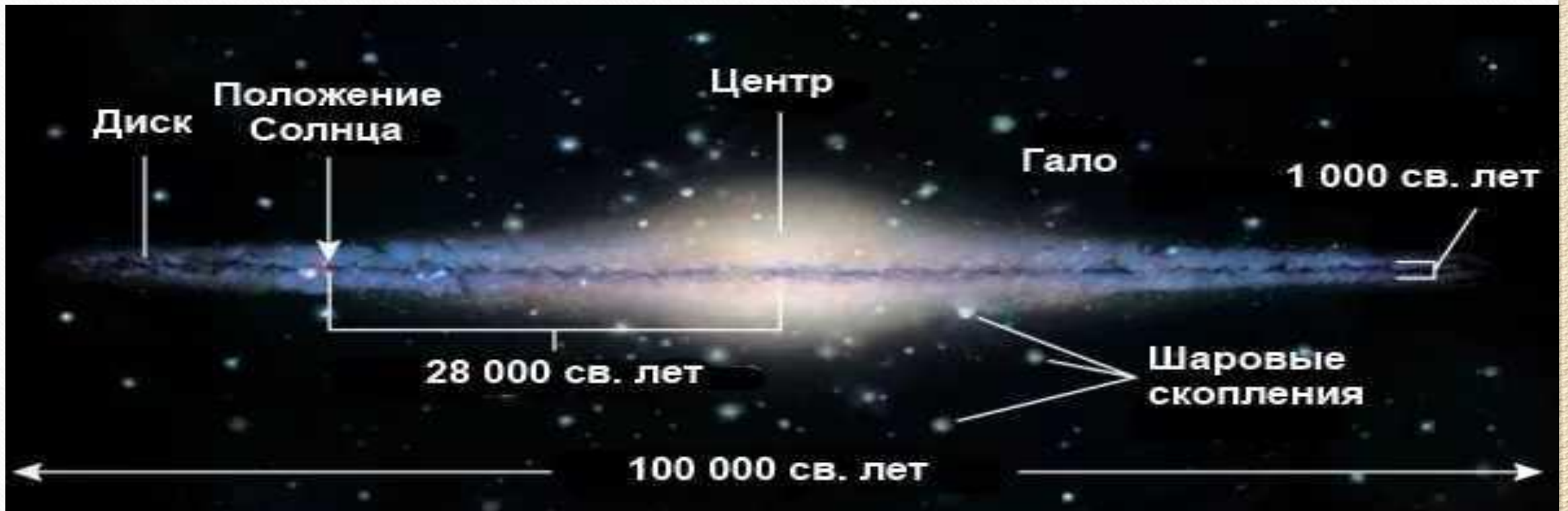
Наиболее чётко выделяются две: **плоская** (диск) и **сферическая** (гало).

Изучение ядра нашей Галактики значительно затруднено, поскольку оно скрыто от нас мощными газопылевыми облаками.



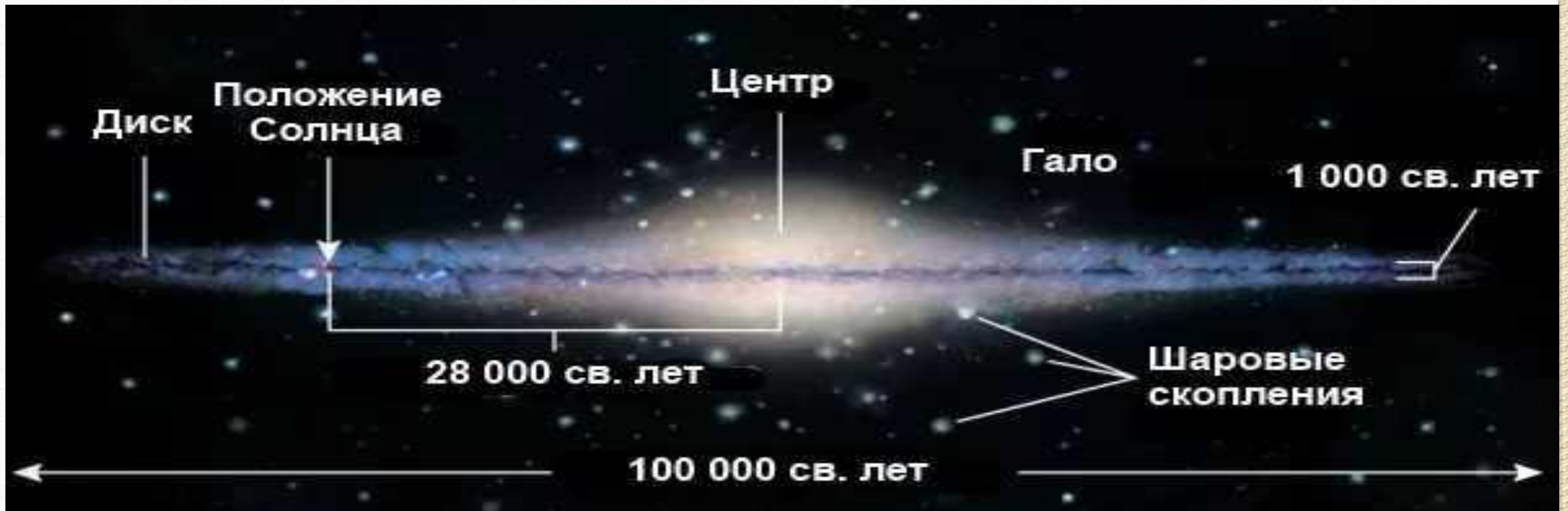
В центральных областях Галактики наблюдается повышенная концентрация звёзд, расстояния между которыми в десятки и сотни раз меньше, чем в окрестностях Солнца.

Так, в самой середине, в области радиусом всего 50 пк, сосредоточены сотни горячих звёзд.



Область размером 10 пк, называемая **ядром Галактики**, является **источником радиоизлучения**, внутри которого находятся красные гиганты и отдельные плотные газовые конденсации размером около 0,1 пк.

Два других радиоисточника находятся дальше от центра Галактики и представляют собой **молекулярные облака**, в которых идёт бурный процесс звездообразования.



По движению звёзд вокруг центра Галактики было установлено, что здесь в области размером немногим более Солнечной системы сосредоточена масса около 4 млн масс Солнца.

Это означает, что здесь находится **сверхмассивная чёрная дыра**.

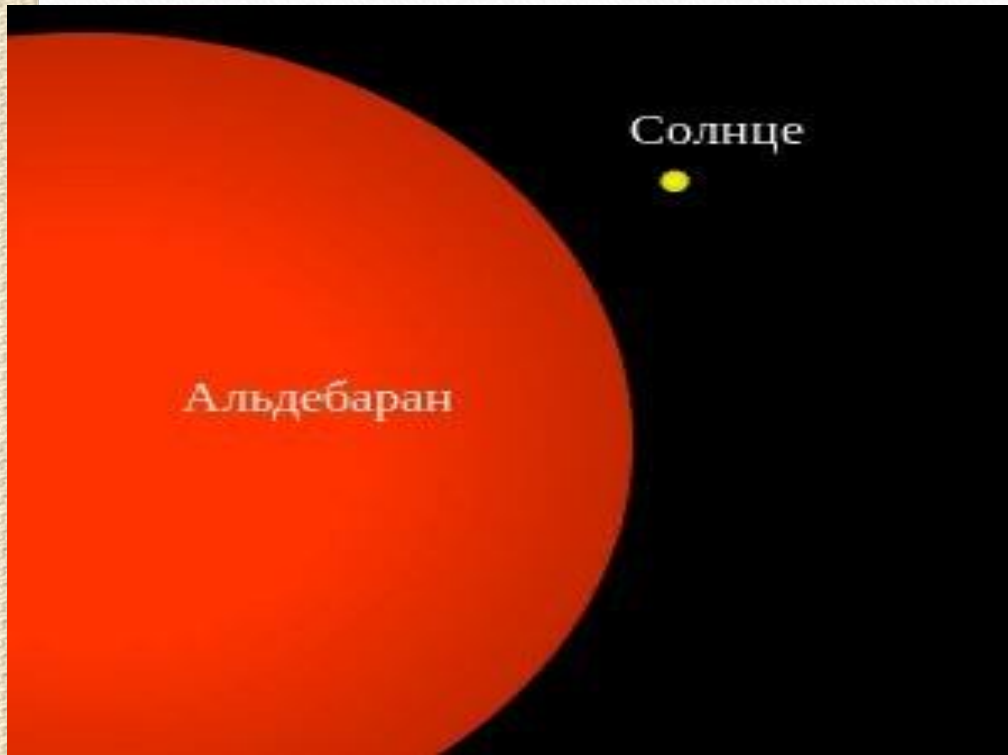


---

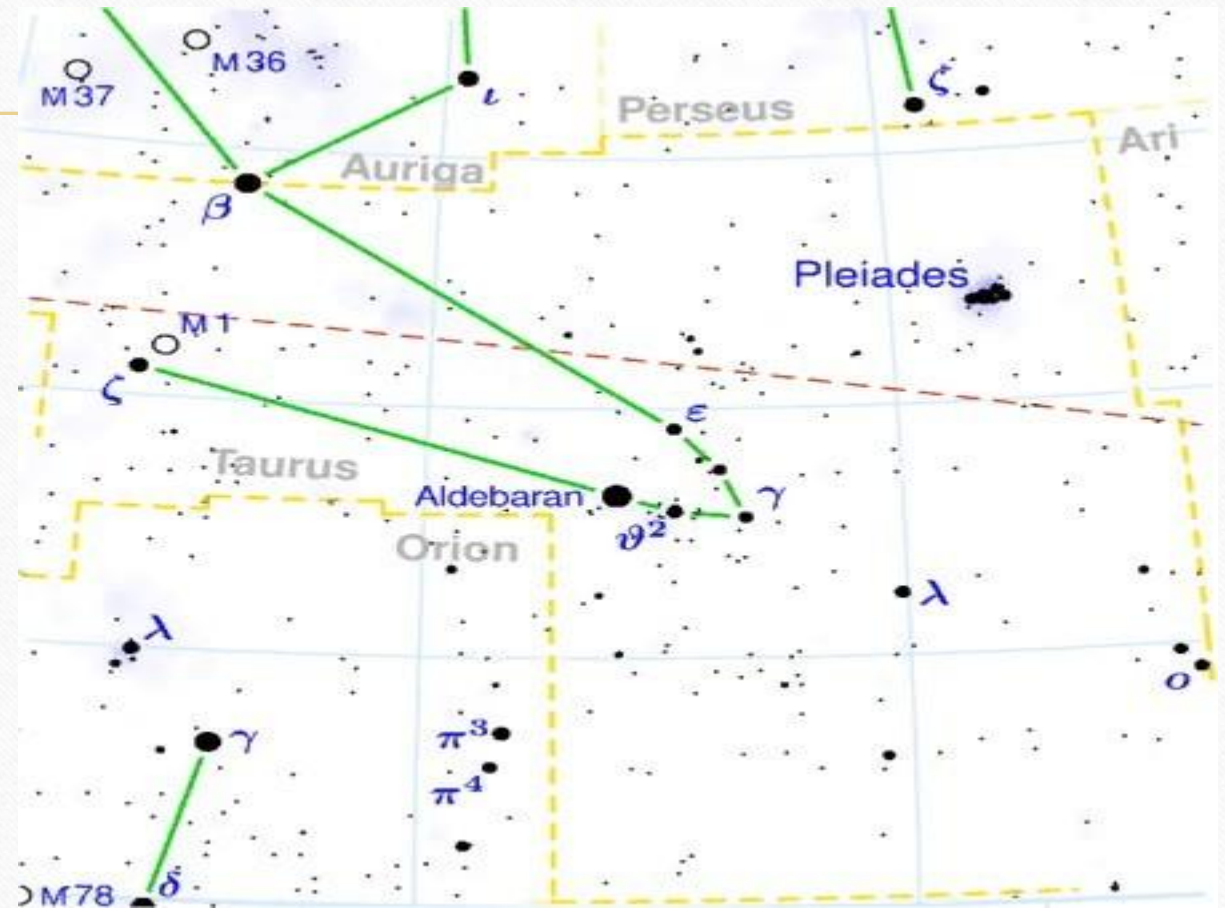
**Движение звёзд в Галактике.  
Её вращение**

Долгое время звёзды считались «неподвижными».

Измеряя взаимное расположение звёзд на небе, астрономы только в начале XVIII в. заметили, что положения некоторых ярких звёзд (Альдебарана, Арктура, Сириуса) относительно соседних слабых звёзд изменились по сравнению с теми, которые были отмечены в древности.

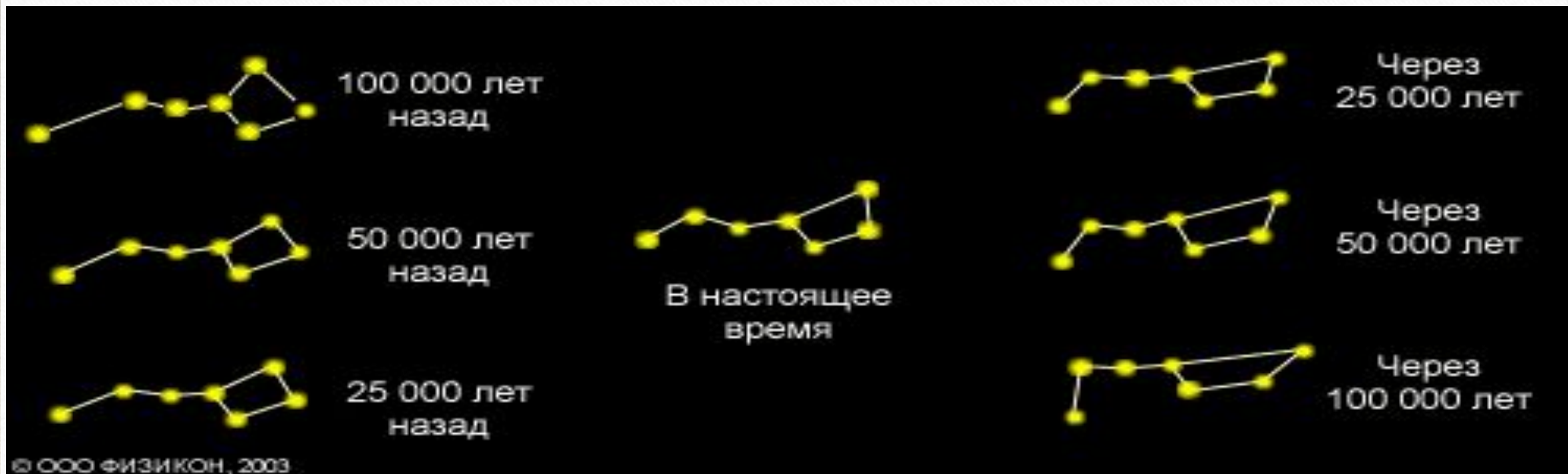


Сравнение размеров Солнца и Альдебарана



**Собственным движением звезды** называется её видимое угловое смещение за год по отношению к слабым далёким звёздам.

Смещение звёзд на небе в течение года невелико. Однако на протяжении десятков тысяч лет собственные движения звёзд существенно сказываются на их положении, вследствие чего меняются привычные очертания созвездий.

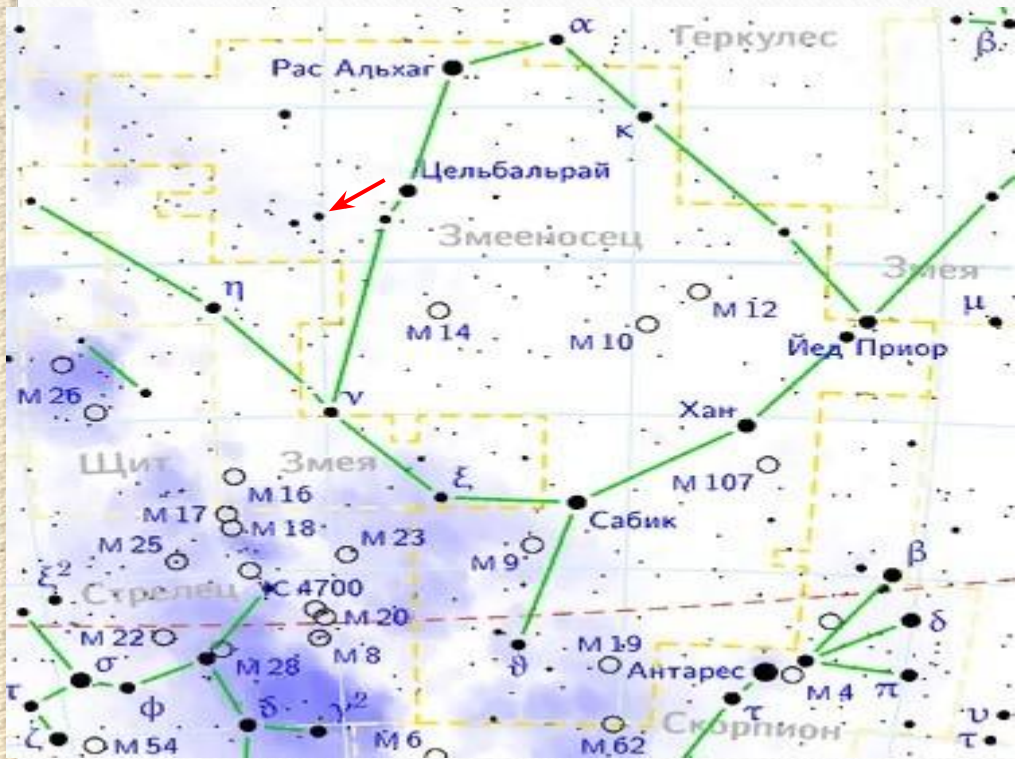


Изменение вида созвездия Большая Медведица на протяжении 100 тыс. лет



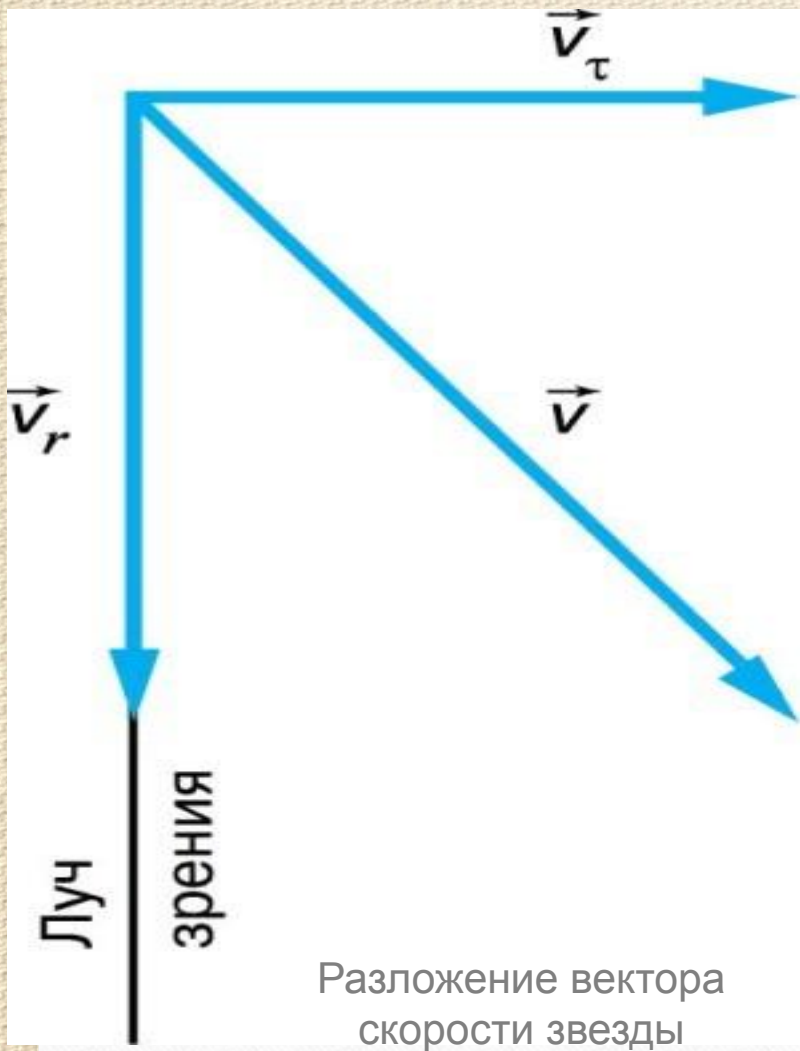
Скорости движения в пространстве у различных звёзд отличаются довольно значительно.

Самая «быстрая» из них, получившая название **«летающая звезда Барнарда»**, за год перемещается по небу на  $10,8''$ . Это означает, что  $0,5^\circ$  – угловой диаметр Солнца и Луны – она проходит менее чем за 200 лет.



Собственное движение звезды Барнарда с 1985 по 2005 с интервалом в 5 лет.

Большинство из 300 тыс. звёзд, собственное движение которых измерено, меняют своё положение значительно медленнее – смещение составляет всего лишь сотые и тысячные доли угловой секунды за год.



**Скорость звезды в пространстве** можно представить как векторную сумму двух компонентов, один из которых направлен по лучу зрения, другой – перпендикулярно ему.

**Скорость по лучу зрения** непосредственно определяется по эффекту Доплера – смещению линий в спектре звезды.

Компонент скорости по направлению, перпендикулярному лучу зрения, можно вычислить только в том случае, если измерить собственное движение звезды и её параллакс, т. е. знать расстояние до неё.

Тогда пространственная скорость звезды будет равна:

Пространственные скорости звёзд относительно Солнца (или Земли) составляют, как правило, десятки километров в секунду.

Изучение собственных движений и лучевых скоростей показало, что **Солнечная система движется относительно ближайших звёзд со скоростью около 20 км/с в направлении созвездия Геркулеса.**

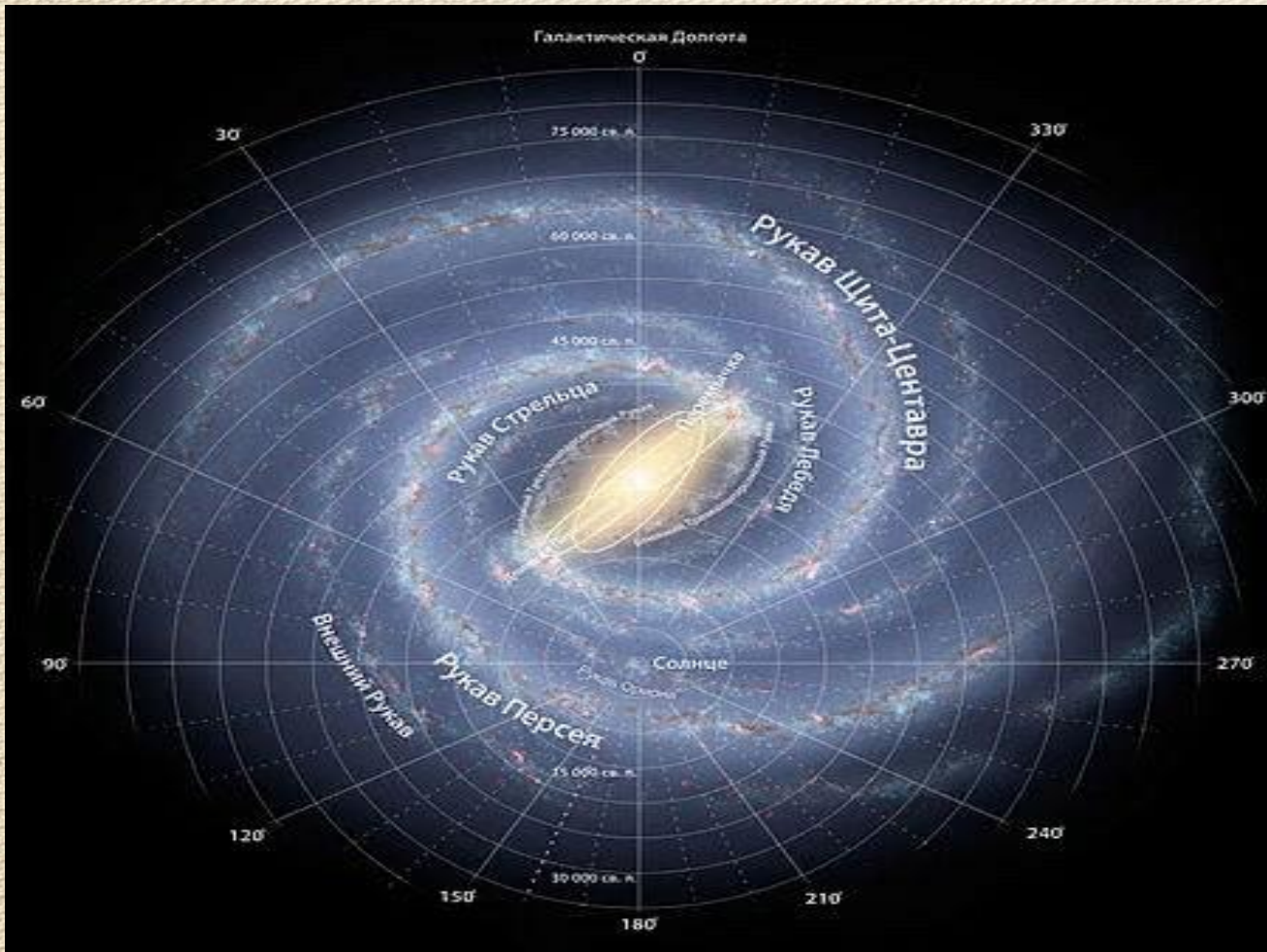
Точка небесной сферы, куда направлена эта скорость, называется **апексом** Солнца.



Солнечный апекс



Солнечный апекс в созвездии Геркулеса

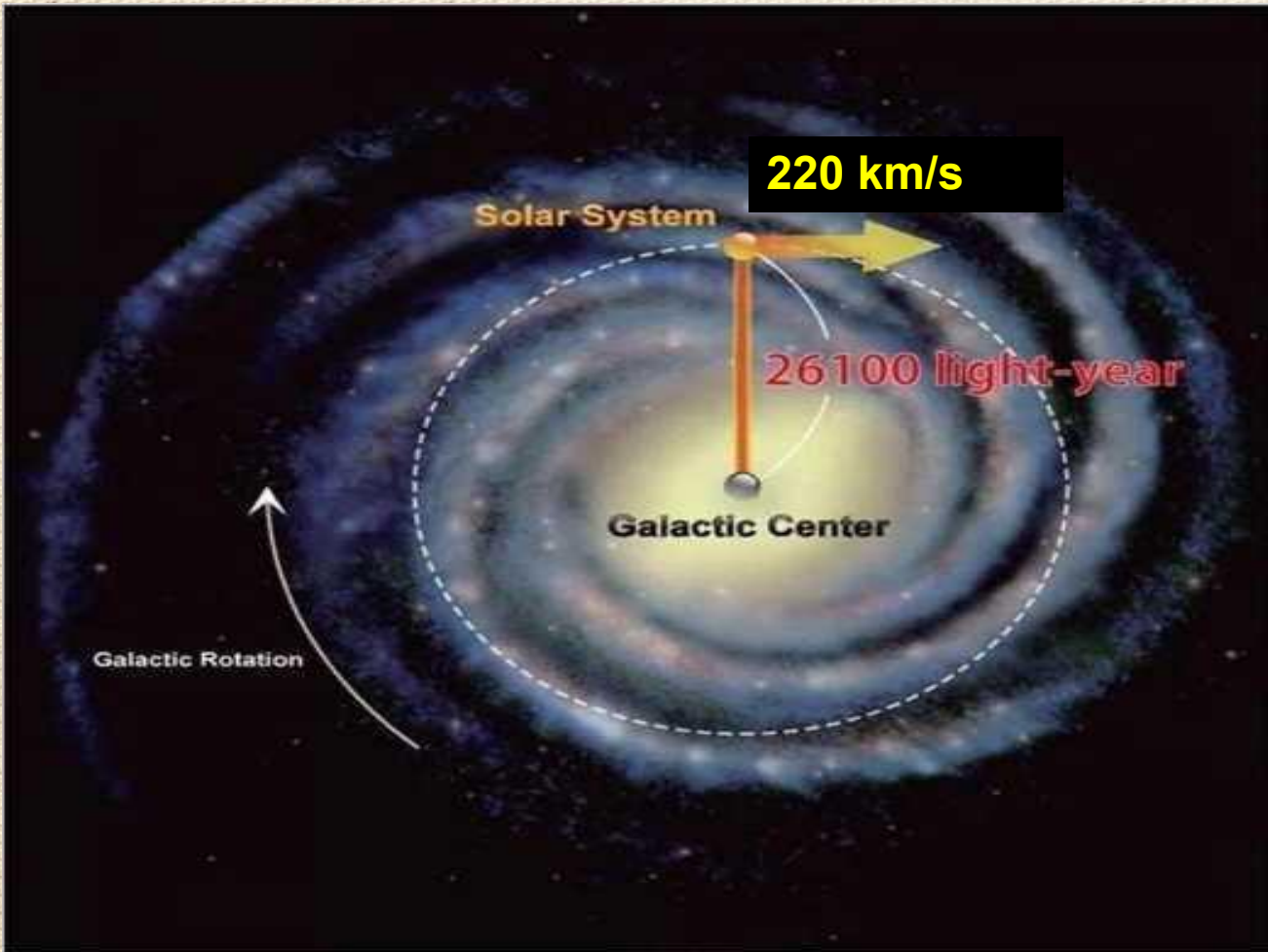


Млечный Путь — галактика, в которой находятся Земля, Солнечная система<sup>[OBJ]</sup> и все отдельные звёзды, видимые невооружённым глазом.

Анализ собственных движений и лучевых скоростей звёзд по всему небу показал, что **звёзды движутся вокруг центра Галактики.**

Это движение звёзд воспринимается как вращение нашей звёздной системы, которое подчиняется определённой закономерности:

**угловая скорость вращения убывает по мере удаления от центра, а линейная возрастает, достигая максимального значения на том расстоянии, на котором находится Солнце, а затем практически остаётся постоянной.**



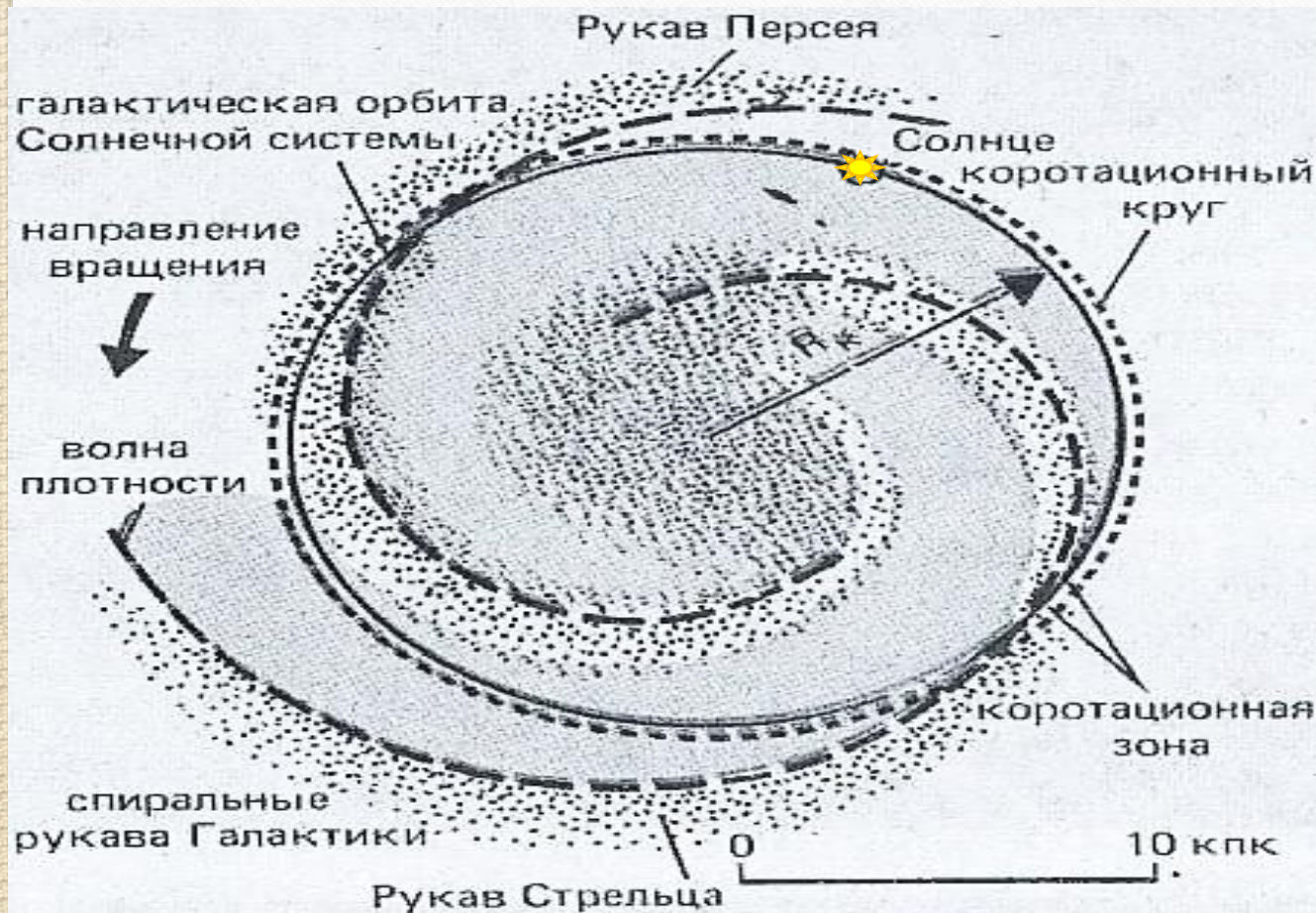
Звёзды, газ и другие объекты, составляющие галактический диск, движутся по орбитам, близким к круговым.

Солнце вместе с близлежащими звёздами обращается вокруг центра Галактики со скоростью около 220 км/с, совершая один оборот примерно за 220 млн лет.

Расстояние от Солнца до центра Галактики составляет 23–28 тыс. св. лет (7–9 тыс. пк).

Скорость обращения Солнца практически совпадает со скоростью, с которой на данном расстоянии от центра Галактики движется волна уплотнения, формирующая спиральные рукава.

Эта область Галактики получила название **коротационной окружности** (от англ. *corotation* – совместное вращение).

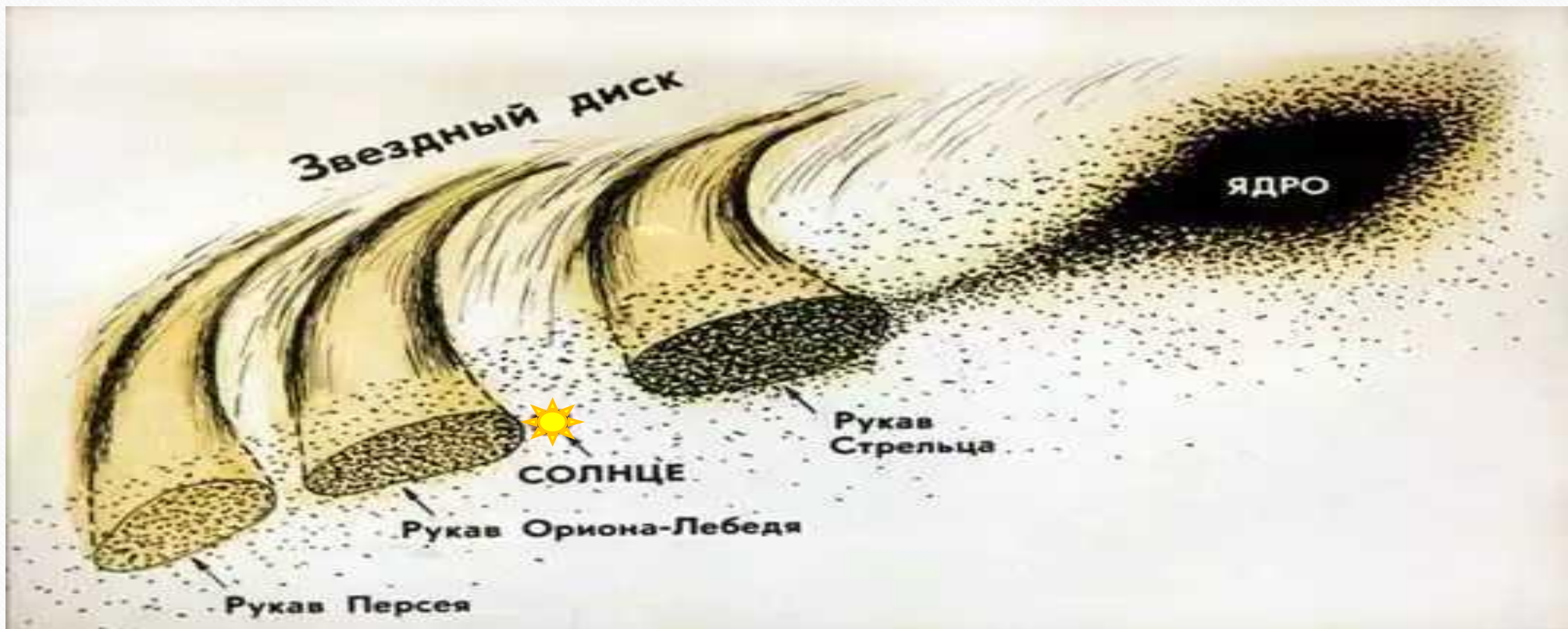


Солнце и другие звёзды находятся в привилегированном положении.

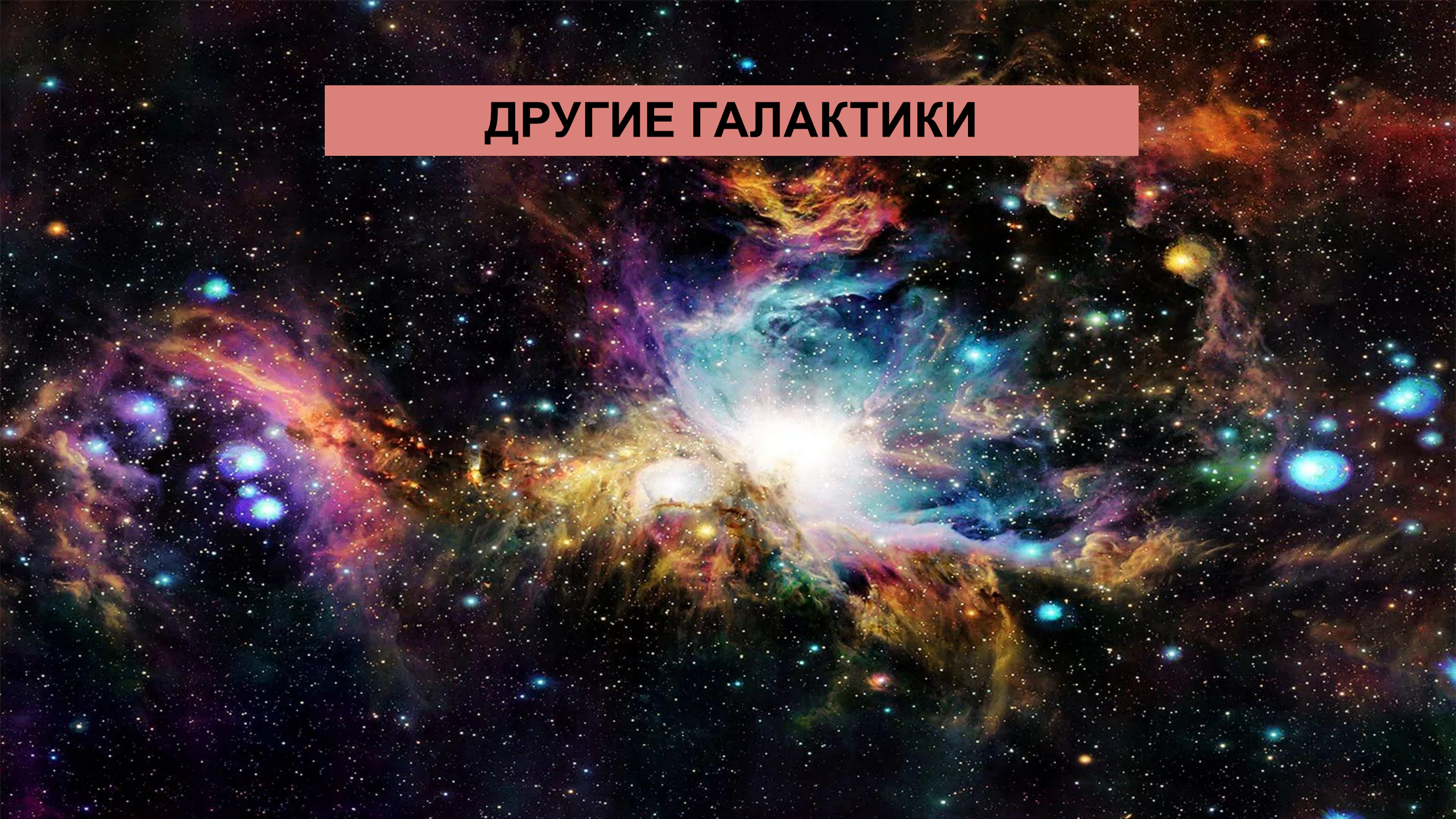
Все остальные звёзды периодически попадают внутрь спиральных рукавов, поскольку их линейные скорости не совпадают со скоростью обращения волны уплотнения вокруг центра Галактики.

Наша планета и вся Солнечная система не испытывают на себе катастрофического влияния тех бурных процессов, которые происходят внутри спиральных рукавов.

Стабильность условий, в которых возникла и миллиарды лет существует Солнечная система, может рассматриваться как один из важнейших факторов, обусловивших происхождение и развитие жизни на Земле.

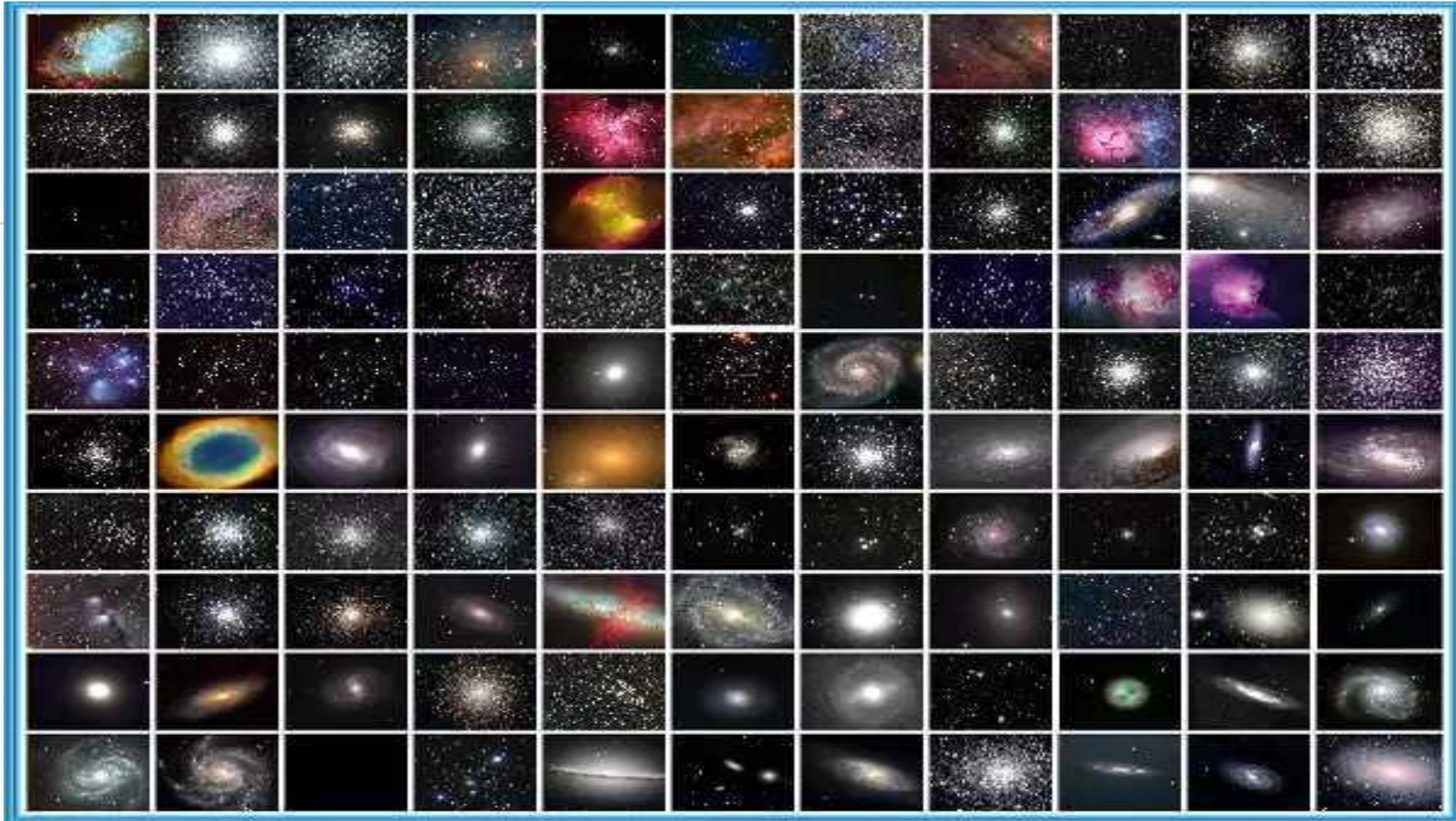


# ДРУГИЕ ГАЛАКТИКИ





Наиболее яркие галактики были включены в каталог, составленный Мессье ещё в XIX в., когда их природа была совершенно неизвестна.



Каталог Мессье

Туманность Андромеды по каталогу Мессье обозначена **M31**.

В «Новый общий каталог» (New General Catalog), который содержит сведения об объектах далёкого космоса, в том числе о более чем 13 тыс. галактик, она включена как **NGC 224**.



Туманность Андромеды



В состав всех галактик входят звёзды, межзвёздный газ и тёмная материя.

Но их относительное содержание в галактиках различного типа существенно отличается.

---

**Квинтет Стефана** — группа из пяти галактик в созвездии Пегаса. Четыре из пяти галактик в Квинтете Стефана находятся в постоянном взаимодействии

Для большинства галактик определить расстояние по наблюдениям цефеид оказывается невозможным.

В этих случаях пользуются другими методами, среди которых наиболее надёжным считается определение расстояния по закону «красного смещения», открытому в 1929 г. американским астрономом Эдвином Хабблом.

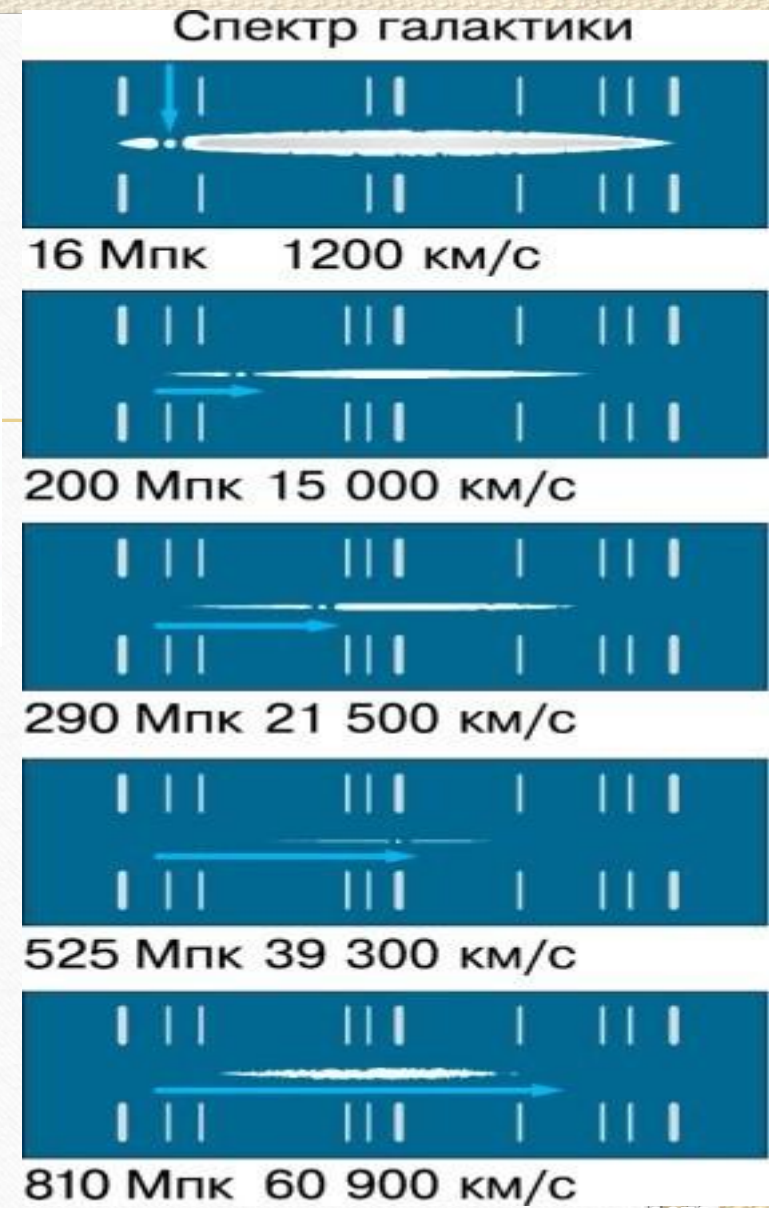


Эдвин Хаббл  
(1889-1953)



Он обнаружил, что в спектрах всех галактик (за исключением туманности Андромеды и других ближайших галактик) линии смещены к красному концу.

Это «красное смещение» означало, что они удаляются от нашей Галактики.



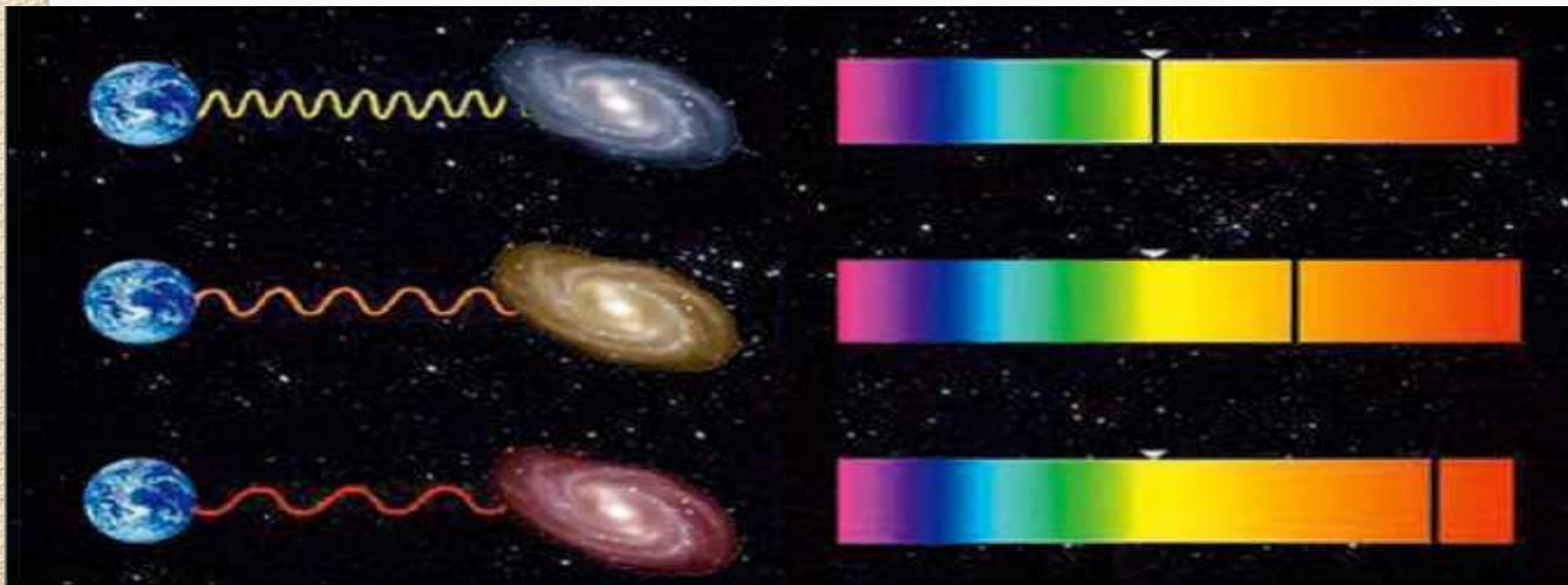
«Красное смещение»  
в спектрах галактик

Сравнив расстояние до галактик со скоростями их удаления, Эдвин Хаббл установил, что между этими величинами существует весьма простая зависимость (**закон Хаббла**):

$$v = HR,$$

где  $v$  — скорость галактики,  $R$  — расстояние до неё, а  $H$  — коэффициент пропорциональности, называемый теперь **постоянной Хаббла**.

По современным данным, величина  $H$  составляет 69 км/(с•Мпк).



Красное смещение в спектрах далёких галактик.

Чем дальше от нас находится галактика, тем быстрее она удаляется.

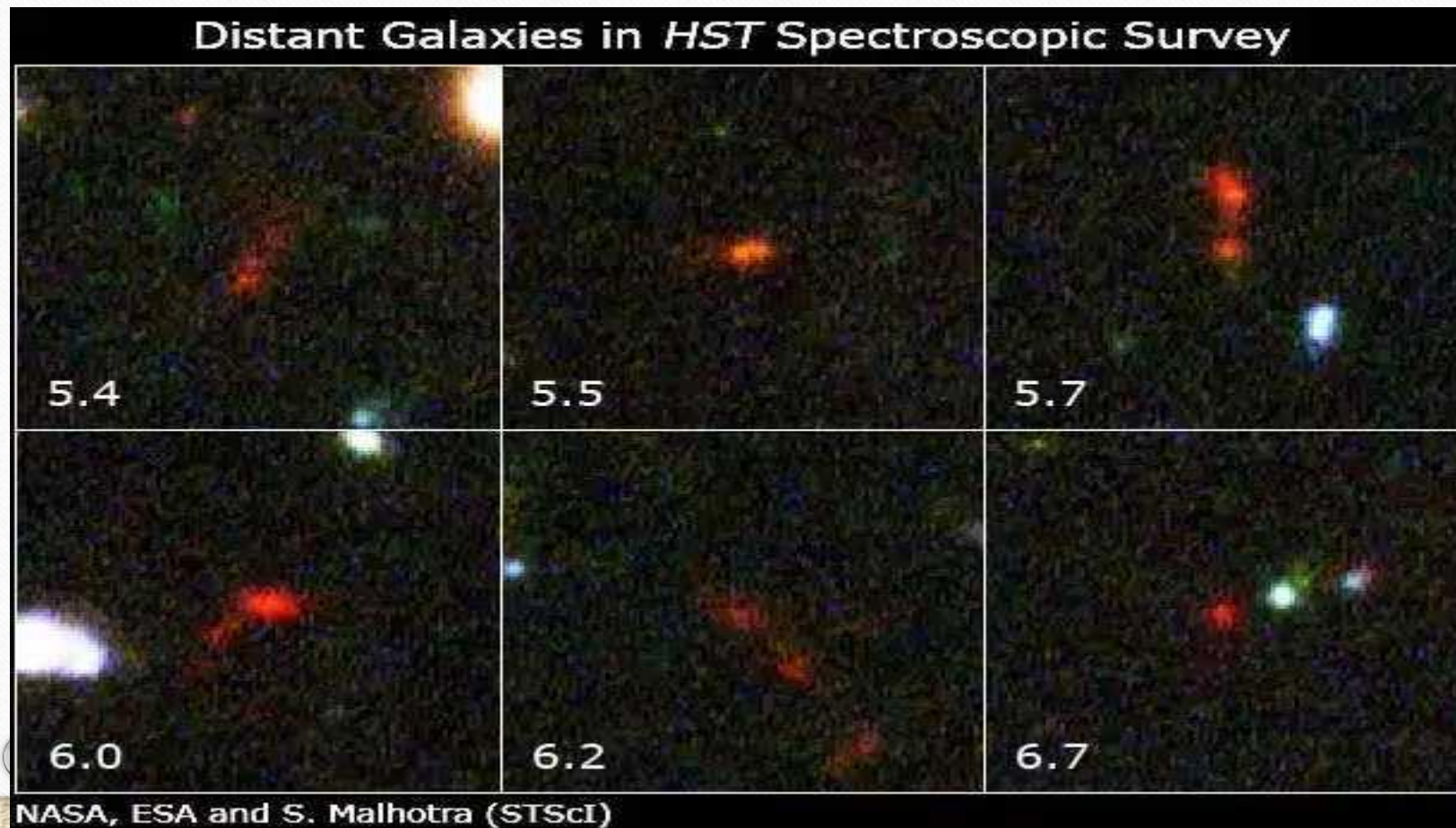
За счёт эффекта Доплера длина волны принятого на Земле её излучения становится тем больше, чем выше её скорость.

Видно, что D-линия натрия смещается из жёлтой области спектра в красную, в область больших длин волн.

**Закон Хаббла** дал возможность определить расстояние до наиболее далёких объектов во Вселенной, когда непригодны все другие способы, применяемые в астрономии.

Определив скорость галактики по смещению линий в её спектре, можно вычислить расстояние до неё по формуле:

$$R = v / H.$$

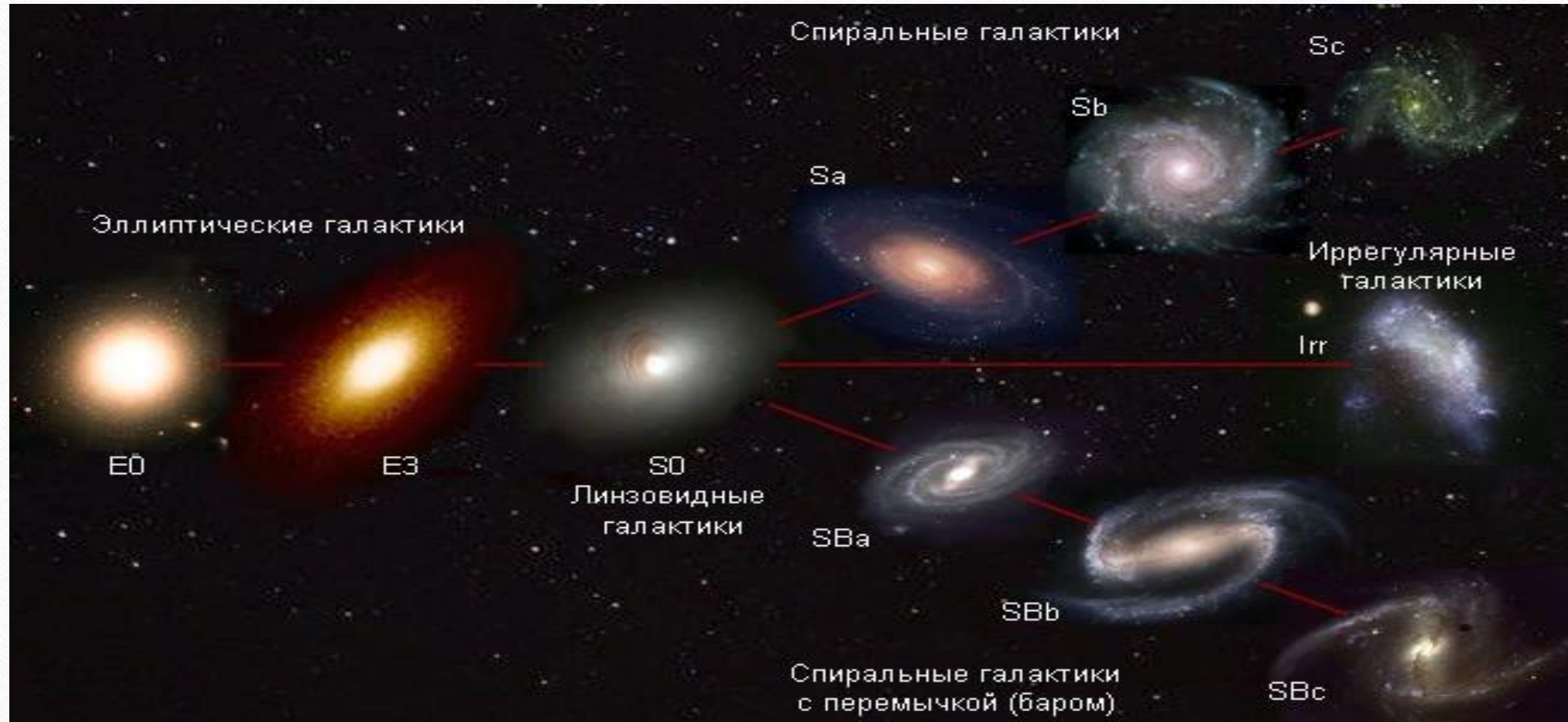


К настоящему времени измерены «красные смещения» и определены расстояния до нескольких миллионов галактик.

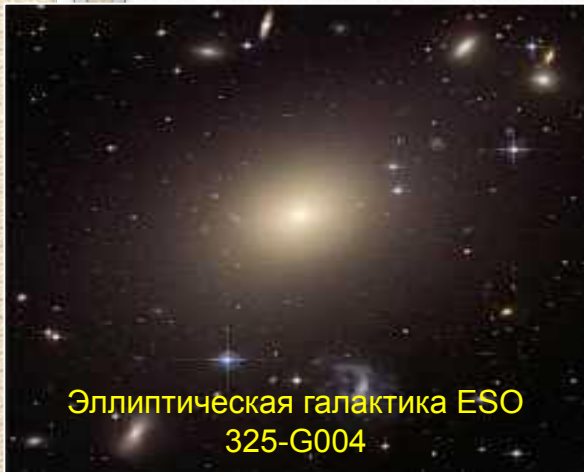
От самых далёких из них свет идёт около 13 млрд лет.

По внешнему виду и структуре галактики весьма разнообразны, однако большинство из них хорошо укладывается в предложенную Хабблом ещё в 1923 г. простую и стройную классификацию.

Все галактики были разбиты на три типа:  
эллиптические - E, спиральные - S и неправильные (иррегулярные) - I.



Форма **эллиптических** галактик различна: от почти круглой до очень сильно сплюснутой.





В **спиральных галактиках** выделены два подтипа:

- **нормальные спирали**, у которых спиральные рукава начинаются непосредственно из центральной области;
- **пересечённые спирали**, у которых рукава выходят не из ядра, а связаны с перемычкой, проходящей через центр галактики.



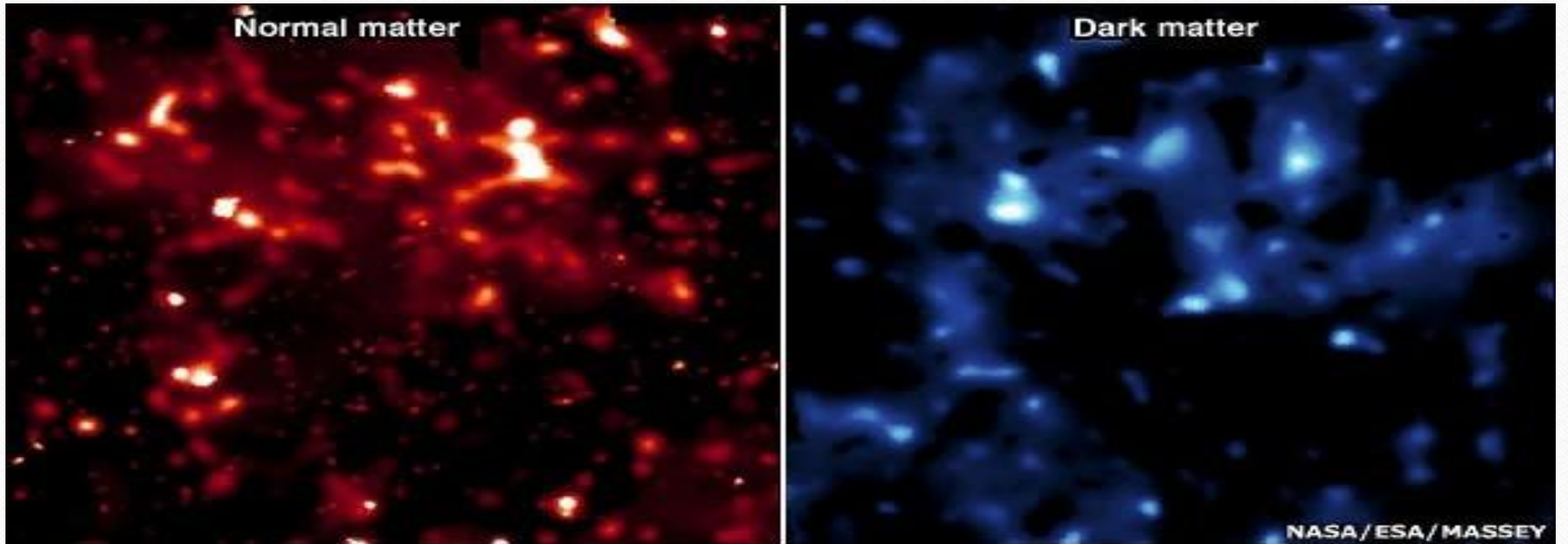
Ближайшими и самыми яркими оказались две **галактики неправильного типа**, которые получили названия **Большое и Малое Магеллановы Облака**.

Они хорошо видны невооружённым глазом в Южном полушарии неподалёку от Млечного Пути. Магеллановы Облака являются спутниками нашей Галактики, расстояние до Большого около 200 тыс. св. лет, до Малого - 170 тыс. св. лет.



Определить точную массу галактик практически невозможно.

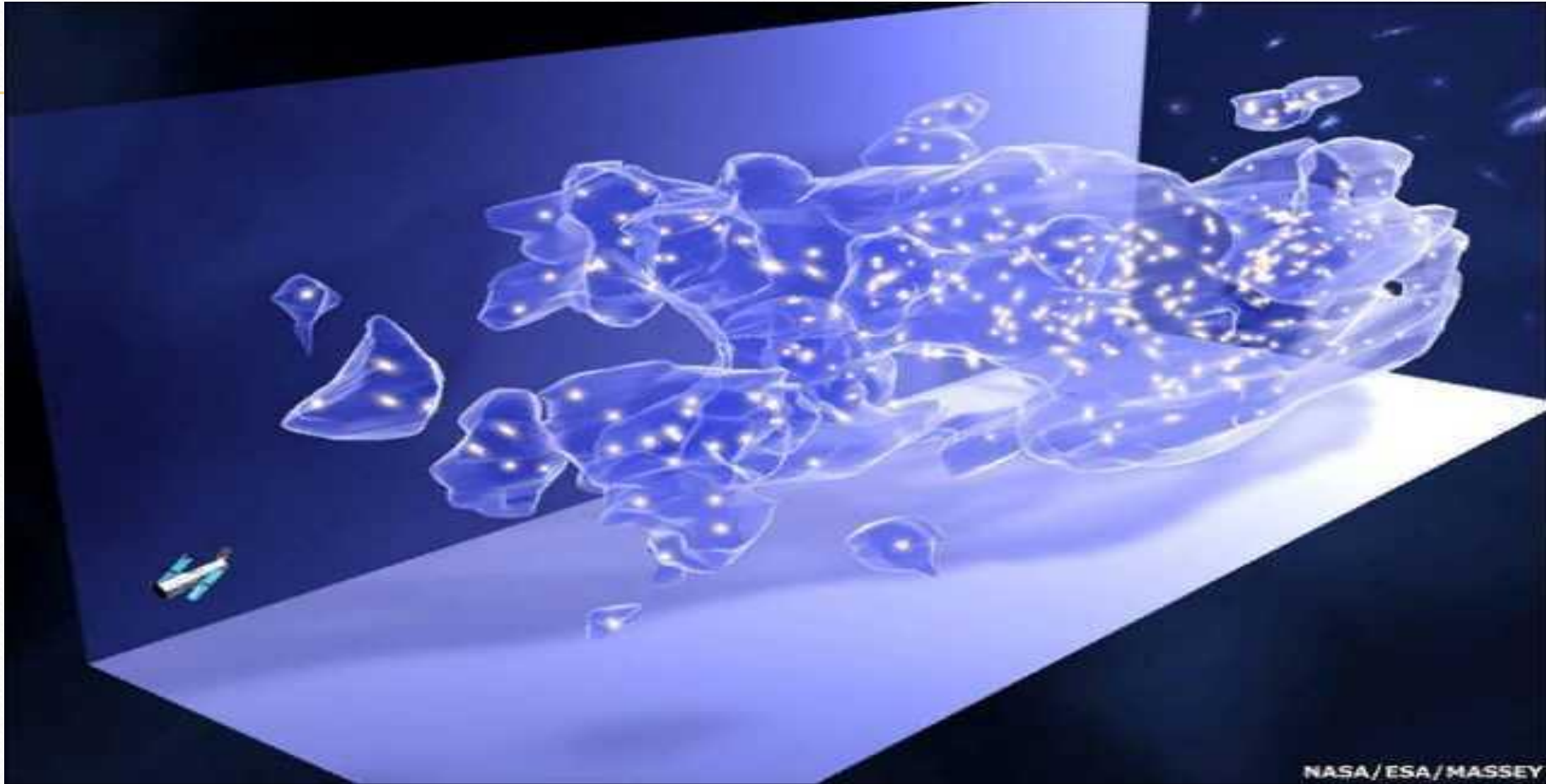
Согласно исследованиям, почти у каждой из галактик (в том числе и у нашей Галактики) обнаружено существование обширных корон из тёмного вещества, так называемой скрытой массы или **тёмной материи**. По расчётам, её масса в несколько раз превышает общую массу всех наблюдаемых объектов галактики



Каждому значительному скоплению галактик соответствует большой сгусток темной материи.

Совместив крупное скопление на левой картинке с соответствующим гало темной материи на правой картинке, мы обнаружим, что они совпадают и что обычная материя словно находится в каркасе из темной материи.

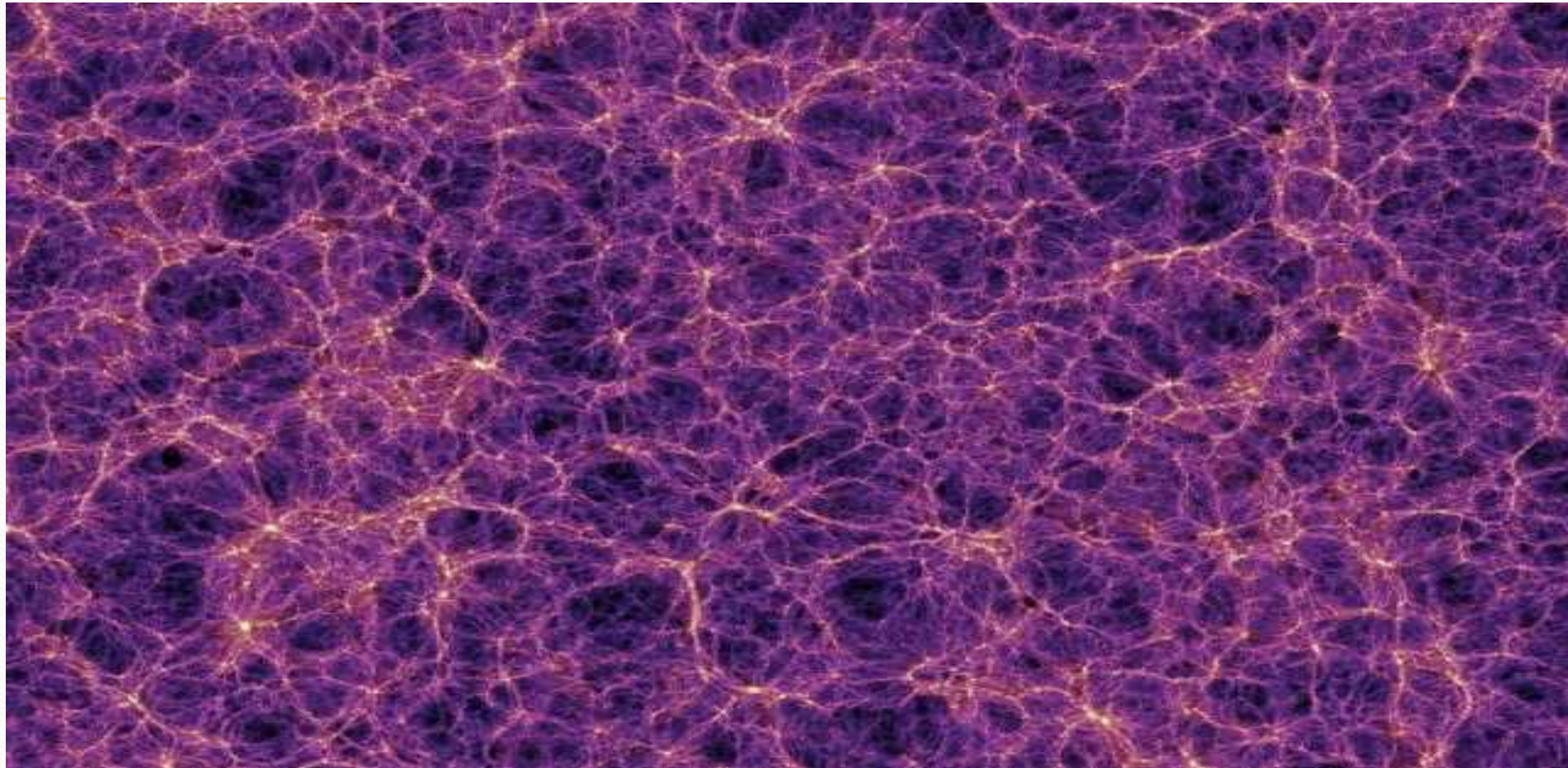
Выяснилось также, что между галактиками в их скоплениях находится газ, разогретый до температуры более 10 млн К. Его полная масса сравнима с суммарной массой всех галактик скопления. Такую массу очень горячего газа гравитационные силы галактик могут удержать лишь в том случае, если в скоплении также существует тёмная материя.



3d карта темной материи, разработанная астрономом Ричардом Мэсси

Установлено, что на роль тёмной материи не подходят ни газ, ни слабосветящиеся звёзды, ни другие объекты, состоящие из обычного вещества (протонов, нейтронов и электронов).

Возможно, тёмная материя состоит из элементарных частиц подобно нейтрино, слабо взаимодействующих с обычным веществом.



Модель космической паутины темной материи

**Спиральные галактики** являются наиболее распространёнными – примерно половина наблюдаемых галактик относится к этому типу.



Спиральная галактика «Вертушка»

Спиральные галактики отличает наличие нескольких **спиральных рукавов**, в которых сосредоточено много **молодых ярких звёзд**, **светящихся газовых туманностей**, а также **холодных газопылевых облаков**.

В спиральных рукавах происходит формирование звёзд из межзвёздного вещества.

По современным представлениям, **спиральные ветви - это волна повышенной плотности звёзд и газа**, которая вращается вокруг центра галактики как твёрдое тело, - угловая скорость постоянна, а линейная увеличивается с увеличением расстояния от оси вращения.



В ветвях нет постоянного состава звёзд и газа, они периодически вступают в область рукава.

Проходя через них, волна уплотнения оказывает значительное влияние на газ - увеличение его плотности в несколько раз стимулирует начало процесса звездообразования.

Спиральная галактика M74 в созвездии Рыб

**Спиральные галактики**, которые мы видим «с ребра», напоминают по внешнему виду чечевицу или диск с утолщением в середине.



Спиральная галактика M102

Это утолщение представляет собой центральную, наиболее плотную часть гало, которое принято называть «**балдж**» (английский синоним русского слова «утолщение»).

Очевидно, так выглядит и наша Галактика.



Вторым по распространённости типом галактик (примерно 25% от их общего числа) являются **эллиптические**.



У эллиптических галактик нет ни диска, ни спиральных ветвей, а имеется только сферическая составляющая, которая состоит преимущественно из старых звёзд красного цвета и почти не содержит холодного газа.

Вероятно, всё межзвёздное вещество ушло на образование этих звёзд.

Эллиптическая галактика ESO 325-G004

**Линзовидные галактики** (тип S0) похожи на спиральные тем, что у них есть и диск, и гало, но они, как и эллиптические, не имеют спиральных ветвей.

Из общего числа галактик примерно 20% относится к этому типу.



Линзовидная галактика NGC 5078

Галактики одного и того же типа значительно отличаются друг от друга по размерам, числу звёзд и другим характеристикам.

Самые маленькие среди них называют **карликовыми**.

Несколько таких карликовых галактик входят в число спутников нашей Галактики



Большинство галактик группируется в скопления, которые делятся на два типа: **правильные** и **неправильные**.

Правильные скопления галактик во многом напоминают шаровые звёздные скопления, для которых характерна сферическая симметрия с сильной концентрацией галактик к центру.



Правильные скопления галактик размером около 4 Мпк, которое наблюдается в созвездии Волосы Вероники, насчитывает несколько десятков тысяч галактик.

Большинство галактик группируется в скопления, которые делятся на два типа: **правильные** и **неправильные**.

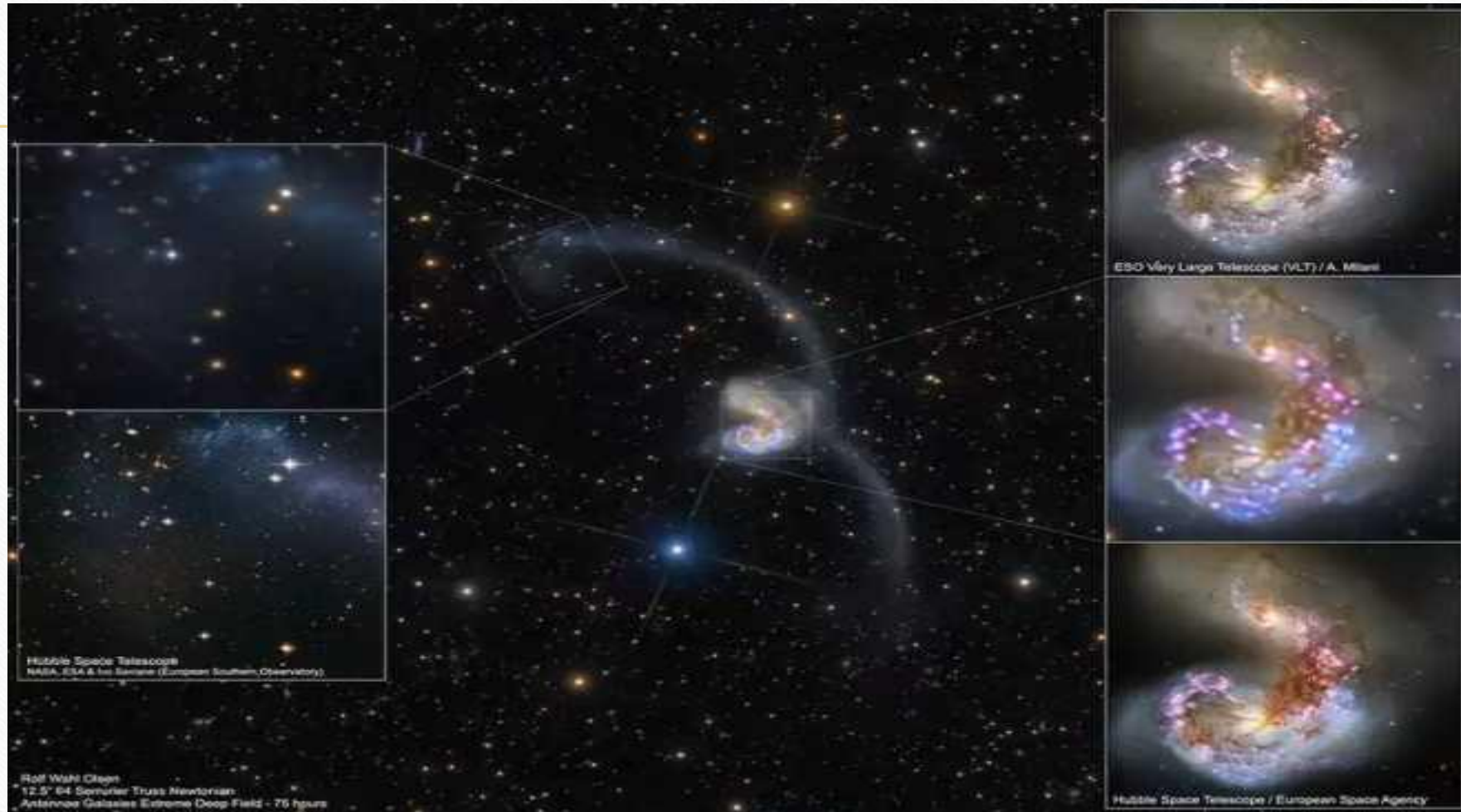
Правильные скопления галактик во многом напоминают шаровые звёздные скопления, для которых характерна сферическая симметрия с сильной концентрацией галактик к центру.



Правильные скопления галактик размером около 4 Мпк, которое наблюдается в созвездии Волосы Вероники, насчитывает несколько десятков тысяч галактик.

Концентрация галактик в скоплениях бывает так велика, что они располагаются очень близко друг к другу. Их гравитационное взаимодействие вызывает значительное изменение формы галактик.

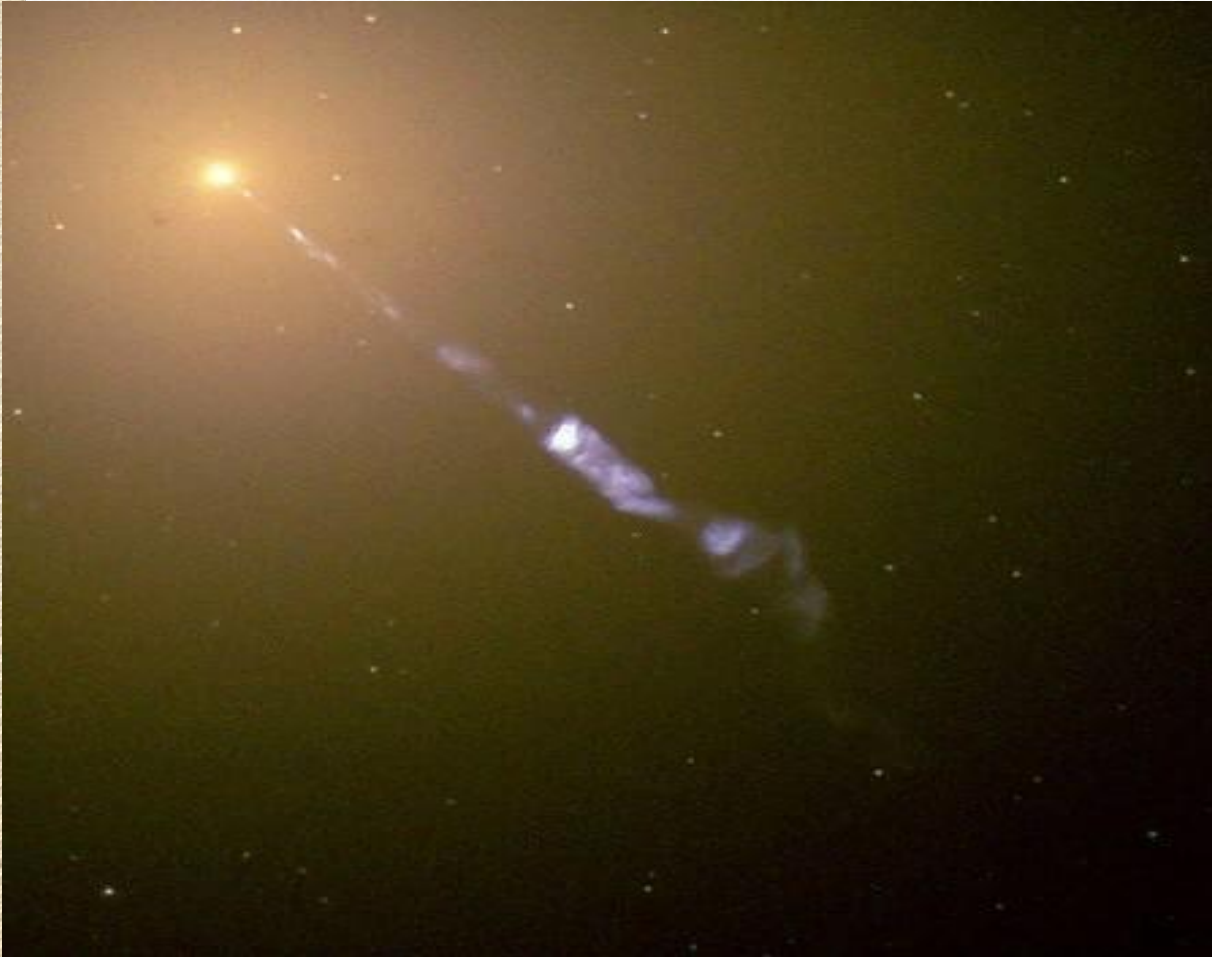
Часто наблюдаются соединяющие их перемычки, которые состоят из звёзд или газа, а также уходящие далеко в сторону протяжённые «хвосты».



Взаимодействующие галактики «Антенны»

Среди взаимодействующих галактик и галактик, имеющих близких спутников, часто наблюдаются **галактики с активными ядрами.**

Небольшое число галактик (около 1%) имеет особенно яркие ядра, в которых происходит колоссальное выделение энергии.



- Проявление активности:
- 1) очень большая мощность излучения (светимость) не только в оптической, но и в рентгеновской или инфракрасной части спектра;
  - 2) в ядре происходит движение газа со скоростями тысячи километров в секунду, что приводит к появлению длинных выбросов - **джетов**;
  - 3) мощные потоки электронов и протонов высокой энергии, идущие из ядра в двух противоположных направлениях, порождают синхротронное радиоизлучение.

Активная гигантская эллиптическая галактика M87. Из центра галактики вырывается релятивистская струя (джет)

Галактики с активными ядрами, являющиеся источниками радиоизлучения большой мощности, называют **радиогалактиками**.



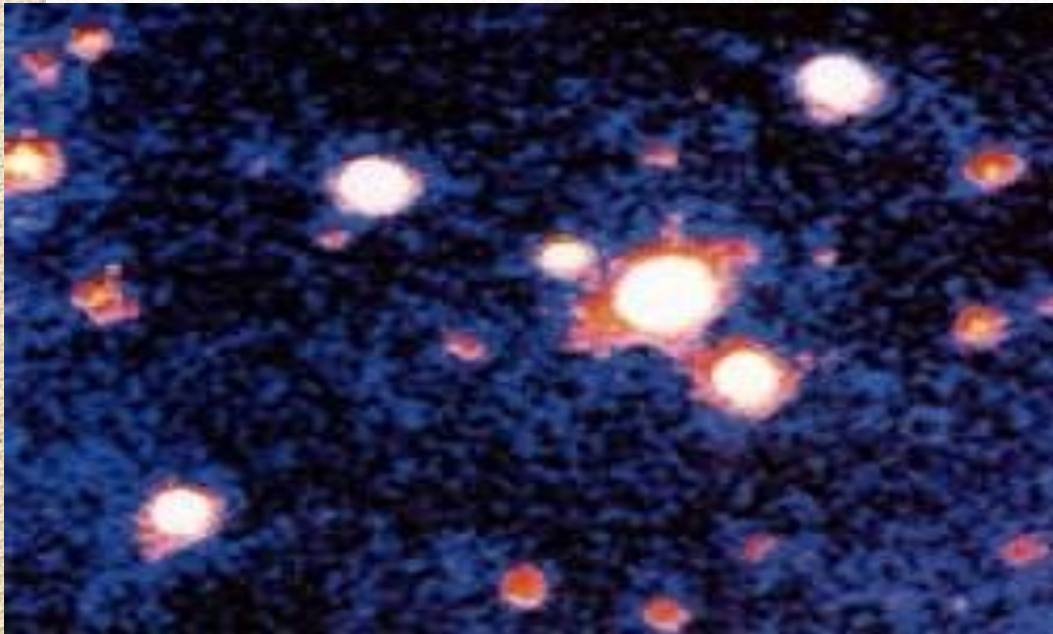
Радиогалактика Кентавр А. Комбинированное изображение (1) и изображения в рентгеновском (2), радио- (3) и оптическом (4) диапазонах.



**Квazarы (квазизвёздные радиоисточники)** - самые мощные из всех известных во Вселенной источники видимого и инфракрасного излучения.

Даже наиболее близкие квазары расположены дальше большинства известных галактик, на расстояниях порядка 1 млрд св. лет. Самые далёкие квазары наблюдаются на расстояниях до 13 млрд св. лет.

Вероятно, квазары представляют собой ядра далёких галактик, проявляющие очень высокую активность.



Квazar 3C275

(самый яркий объект вблизи центра снимка).

Расстояние до него – 7

млрд св. л.



Квazar в представлении художника

Паллада

Вест

Окончательного ответа на вопрос об источниках высокой активности ядер галактик пока нет.

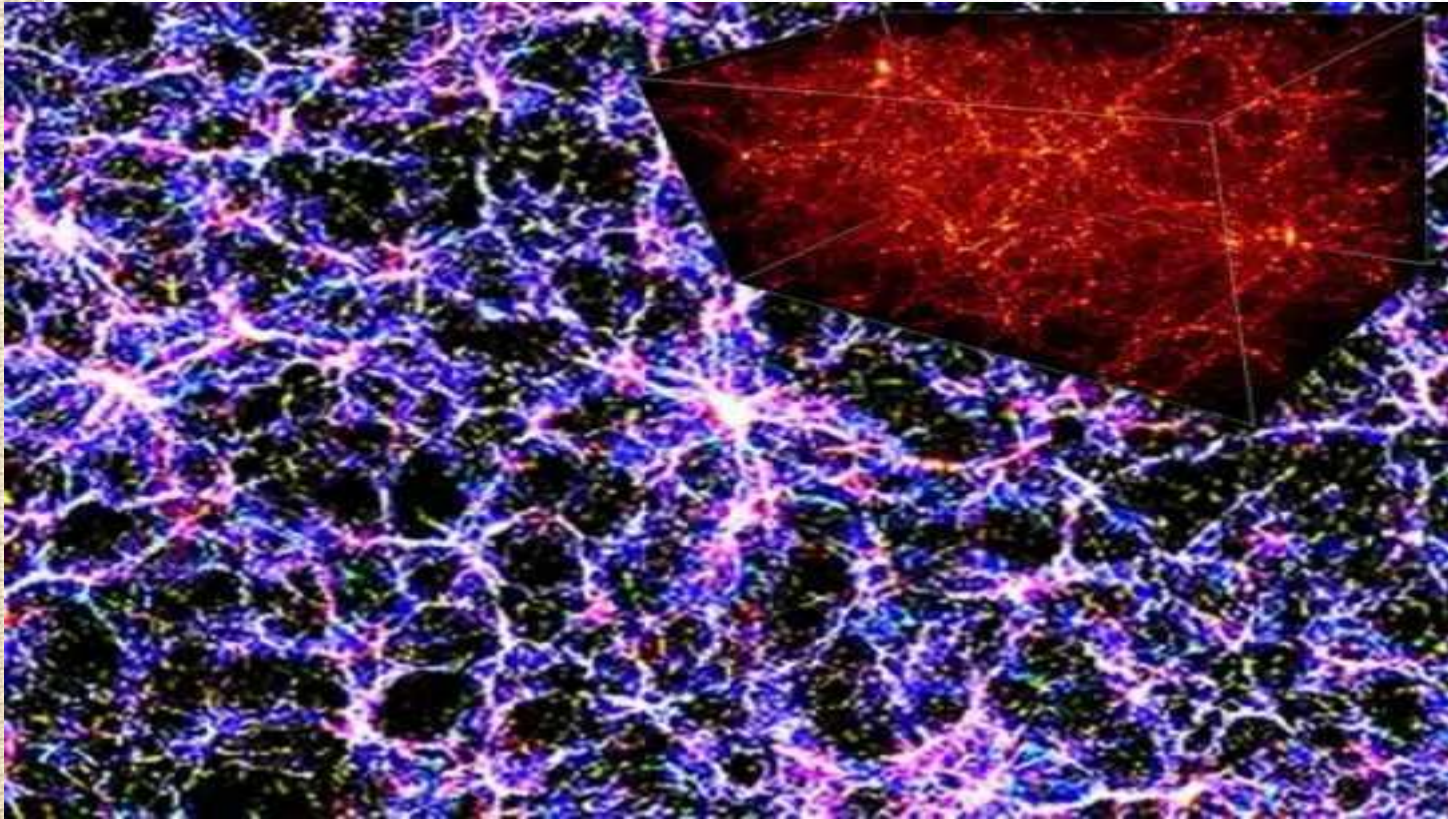
Одной из возможных моделей, описывающих весь наблюдаемый комплекс явлений, считается наличие в ядрах **чёрных дыр** массой в десятки и сотни миллионов масс Солнца.



В результате падения вещества на чёрную дыру должно выделяться огромное количество энергии, преобразуемой в электромагнитное излучение.

Крупнейшие наземные телескопы и космический телескоп «Хаббл» позволяют получить фотографии, на которых можно насчитать многие миллионы галактик.

В их пространственном распределении наблюдается определённая закономерность - ячеисто-сотовая структура.



Скопления и сверхскопления галактик располагаются так, что не заполняют всё пространство, а образуют лишь «стенки», которые отделяют друг от друга гигантские пустоты, в которых галактики практически не встречаются. Размер этих ячеек около 100 Мпк, а стенки имеют толщину всего 3-4 Мпк.

# СОВРЕМЕННАЯ КОСМОЛОГИЯ

The background is a rich, multi-colored space scene. It features a large, bright blue and green nebula in the center, surrounded by various celestial bodies. On the left, there's a large, dark planet with a reddish-orange ring system. In the bottom right corner, a smaller Earth-like planet is visible. The sky is filled with stars, distant galaxies, and streaks of light, creating a sense of depth and vastness. A prominent red rectangular box is centered at the top, containing the title text in a white, serif font.

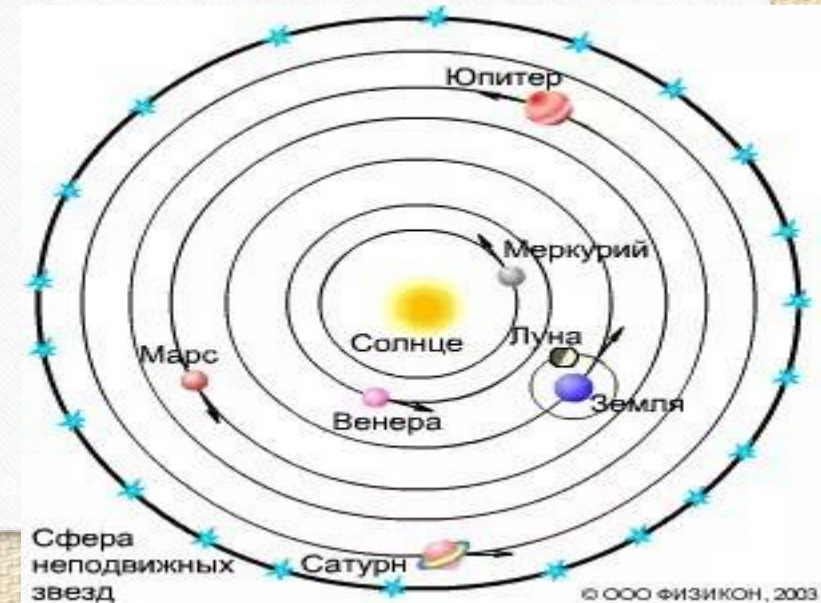
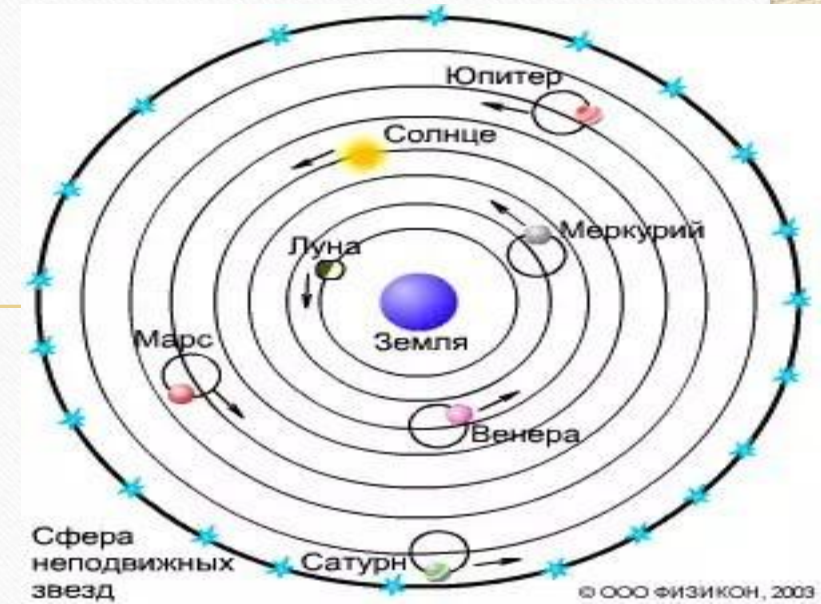
---

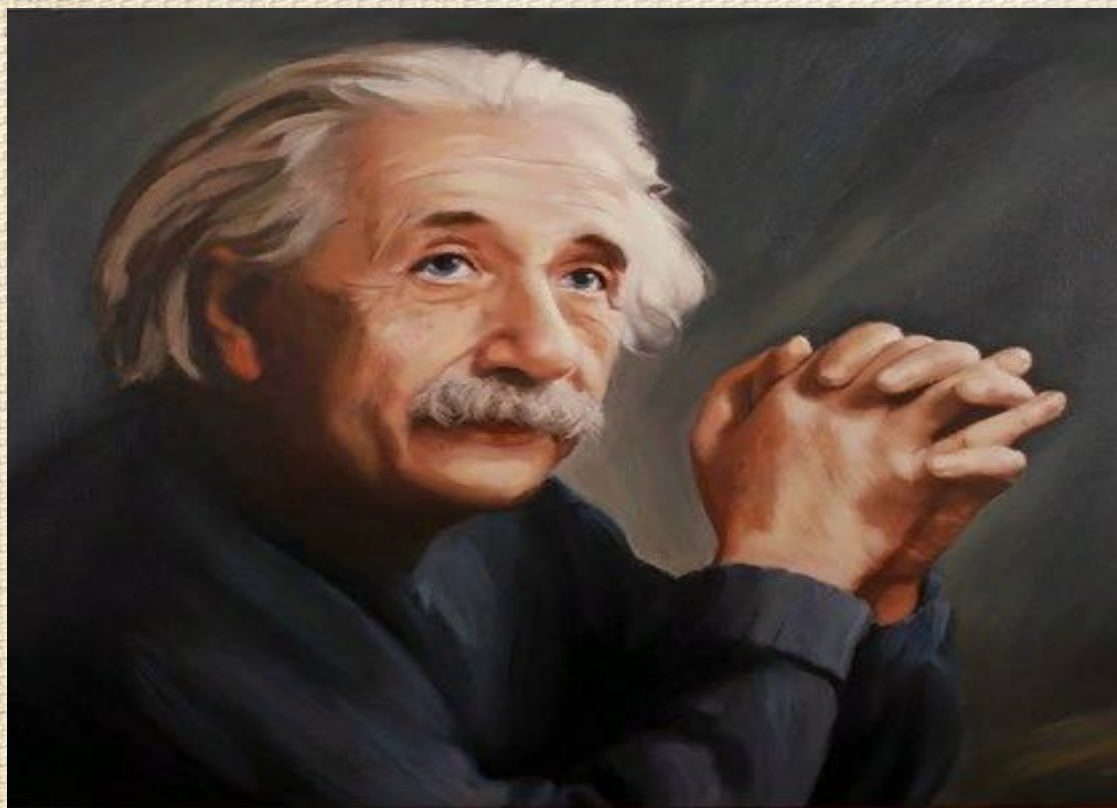
# Космология начала XX века

**Космология** – раздел астрономии, который изучает строение и эволюцию Вселенной в целом, используя при этом методы и достижения физики, математики и философии.

**Геоцентрическая система Аристотеля–Птолемея** стала первой научно обоснованной космологической моделью Вселенной.

Спустя 1500 лет её сменила новая космологическая модель – **гелиоцентрическая система, предложенная Коперником**.





Теоретическим фундаментом современной космологии явилась созданная **Альбертом Эйнштейном** (1879–1955) в начале XX в. общая теория относительности – **релятивистская теория тяготения**.

Наиболее существенным отличием современных космологических моделей, первые из которых были разработаны **Александром Александровичем Фридманом** (1888–1925) на основе теории Эйнштейна, является их **эволюционный характер**.

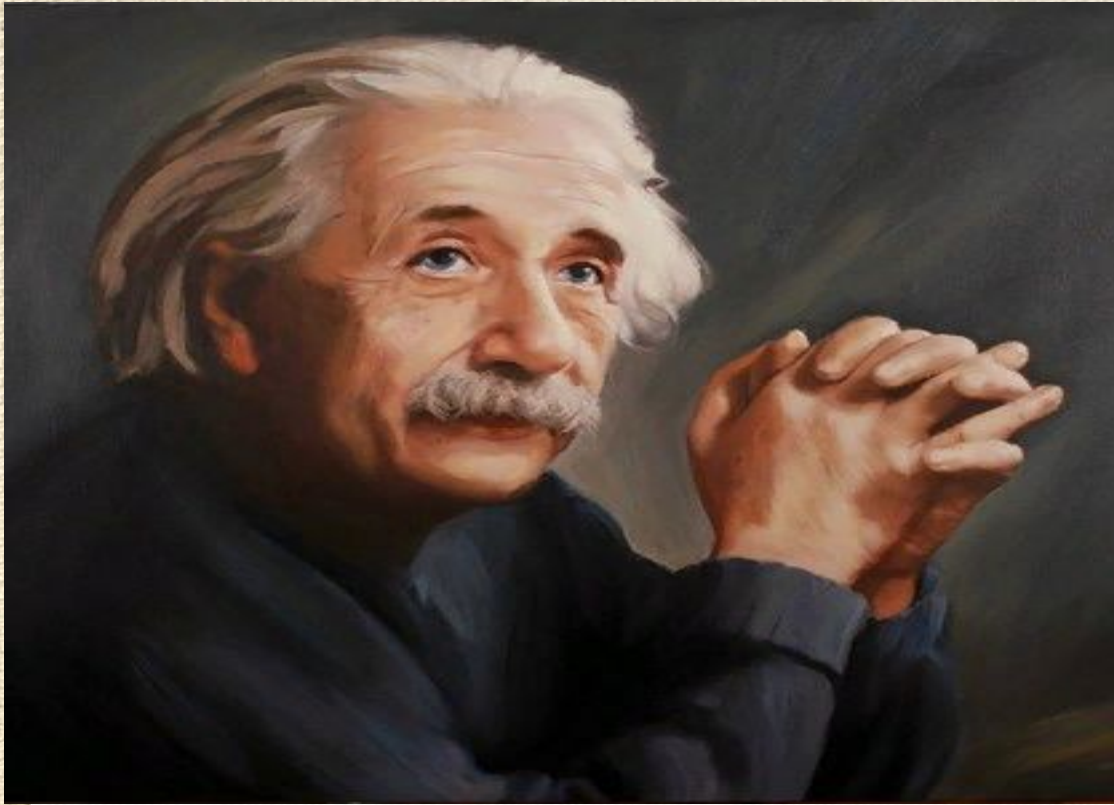
Идея глобальной эволюции Вселенной оказалась столь необычной, что первоначально не была принята даже самим создателем теории относительности, таким выдающимся учёным, как Эйнштейн.

Даже позднее, когда стало очевидно, что все объекты во Вселенной изменяются с течением времени, казалось, что процессы, происходящие в её отдельных составных частях, не меняют облика всей Вселенной.



Портрет А. А. Фридмана  
работы художника М. М. Девятова





Для уравнений теории относительности, применённых ко всей Вселенной, Эйнштейн стал искать решения, описывающие её состояние, не меняющееся со временем.

Для того чтобы уравновесить силы тяготения, он предположил, что кроме них во Вселенной существует сила отталкивания.

Эта сила должна быть универсальной, зависящей только от расстояния между телами и не зависящей от их массы.

Ускорение, которое она будет создавать этим телам, должно быть пропорционально расстоянию:

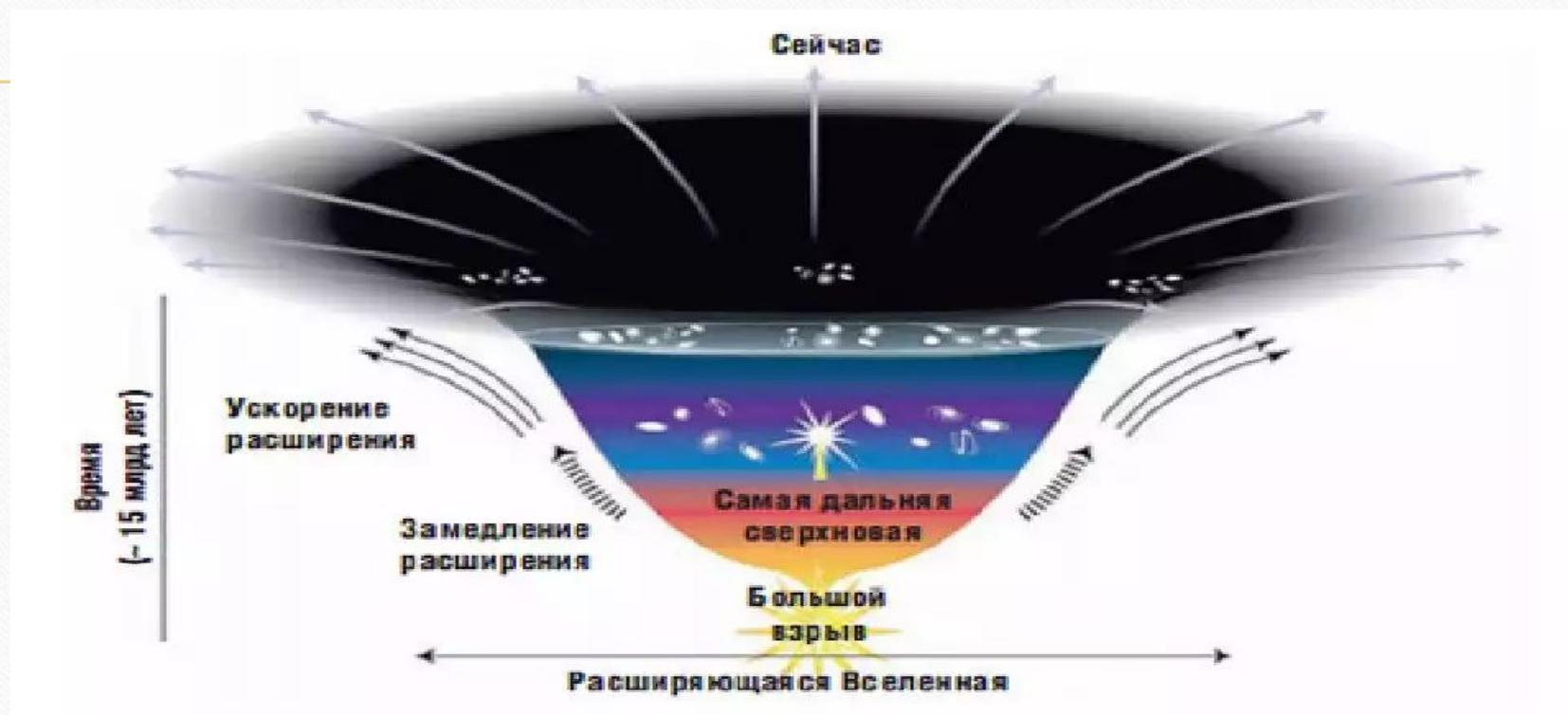
$$a = \text{const} \cdot R.$$

Так в уравнениях появилась обусловленная гипотетическими силами отталкивания космологическая постоянная — *лямбда-член*.



В 1922–1924 годах российский математик Фридман вывел из общей теории относительности Эйнштейна уравнения, которые описывали общее строение и эволюцию Вселенной.

Решения, полученные Фридманом для этих космологических уравнений, означали, что материя в масштабах однородной и изотропной Вселенной не может находиться в покое – **Вселенная должна либо сжиматься, либо расширяться.**

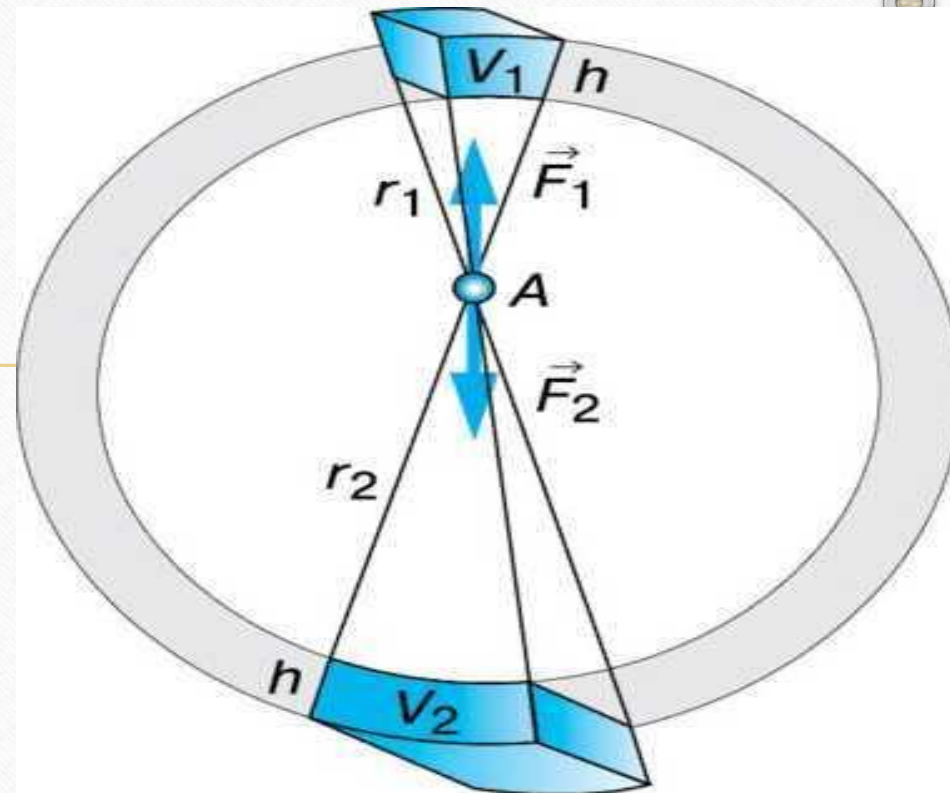


Суть этого вывода, сделанного на основе математически строгого решения уравнений, можно объяснить довольно просто, оперируя только привычными понятиями теории тяготения Ньютона.

Будем исходить из предположения, что в больших масштабах распределение вещества во Вселенной можно считать однородным.

Тогда галактика, которая находится на поверхности шара произвольного радиуса, притягивается к его центру согласно закону всемирного тяготения с силой, прямо пропорциональной массе шара  $M$  и обратно пропорциональной квадрату его радиуса  $R$ .

Все остальные галактики, лежащие вне этого шара, не меняют величины этой силы.



Объяснение нестационарности Вселенной

Для доказательства этого важного утверждения произвольно выделим во Вселенной шаровой слой толщиной  $h$  такого радиуса, чтобы внутри него оказались не только галактика  $A$ , но и весь шар радиусом  $R$ .

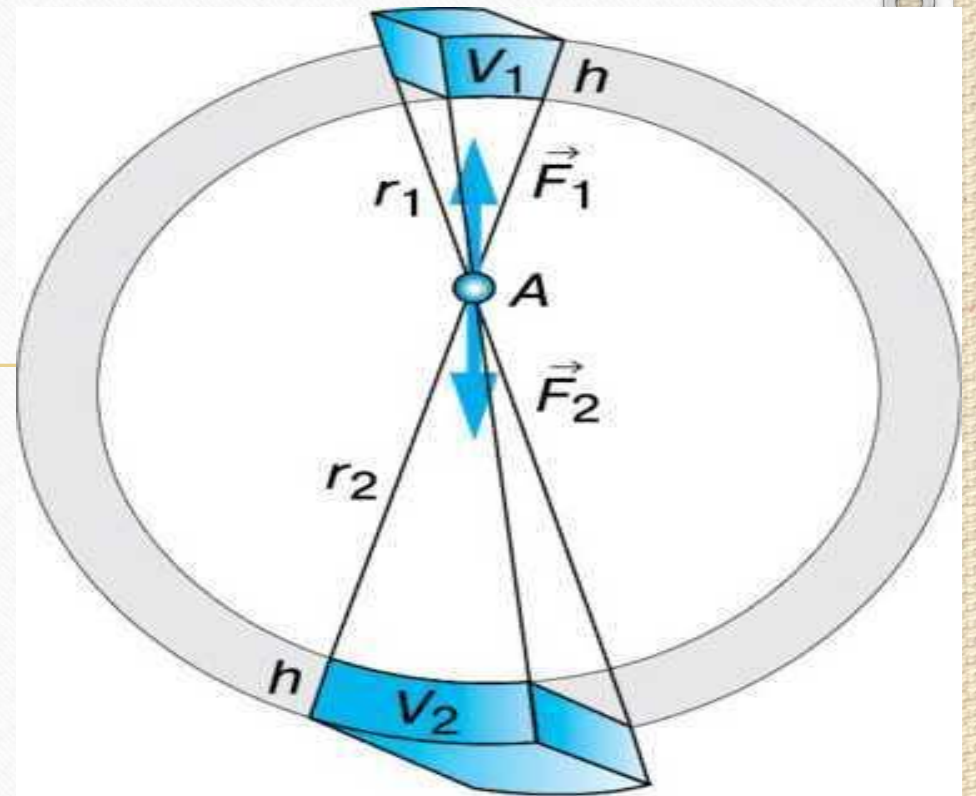
Рассмотрим силы тяготения, действующие на галактику А со стороны тех галактик, которые расположены в этом слое в противоположных от неё направлениях. Эти силы создаются галактиками, расположенными в объёме элементов слоя  $V_1$  и  $V_2$ .

Сравним объём и массу этих элементов. Толщина их одинакова –  $h$ , а площади  $S_1$  и  $S_2$  и объёмы пропорциональны квадратам расстояний от галактики до поверхности слоя –  $r_1$  и  $r_2$ :

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

Так как распределение галактик во Вселенной считается однородным, отношение масс этих элементов будет таким же:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$



Объяснение нестационарности Вселенной

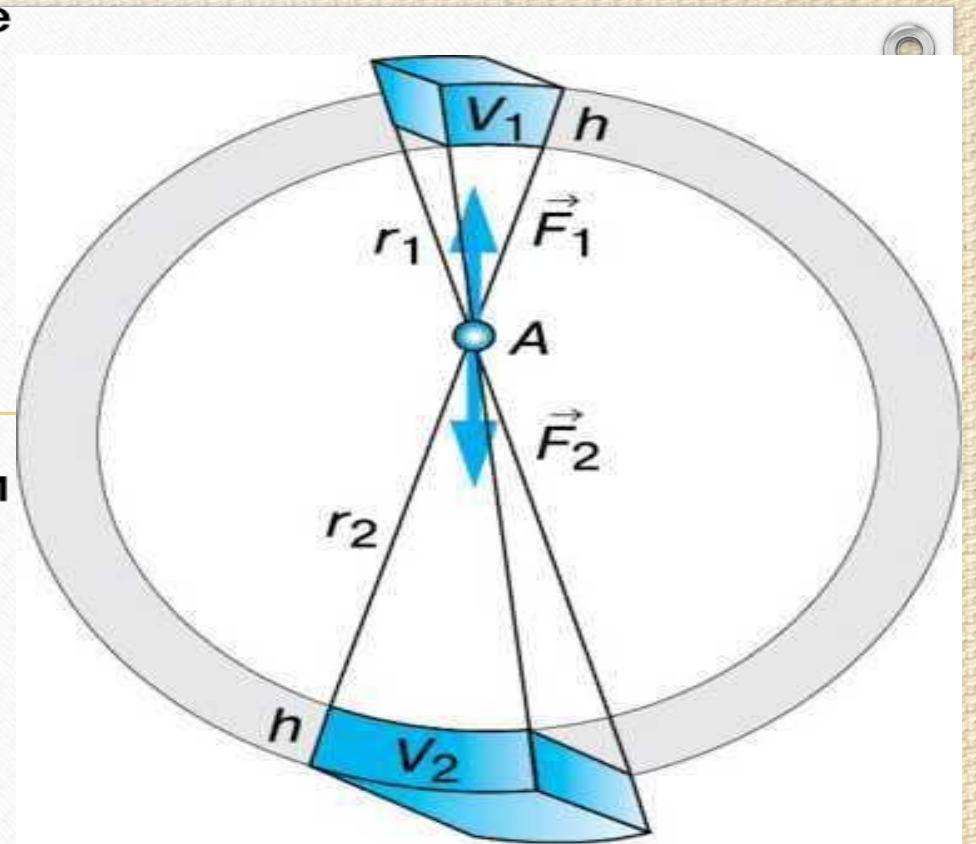
Рассмотрим силы тяготения, действующие на галактику А со стороны тех галактик, которые расположены в этом слое в противоположных от неё направлениях. Эти силы создаются галактиками, расположенными в объёме элементов слоя  $V_1$  и  $V_2$ .

Сравним объём и массу этих элементов. Толщина их одинакова –  $h$ , а площади  $S_1$  и  $S_2$  и объёмы пропорциональны квадратам расстояний от галактики до поверхности слоя –  $r_1$  и  $r_2$ :

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

Так как распределение галактик во Вселенной считается однородным, отношение масс этих элементов будет таким же:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$



Объяснение нестационарности Вселенной

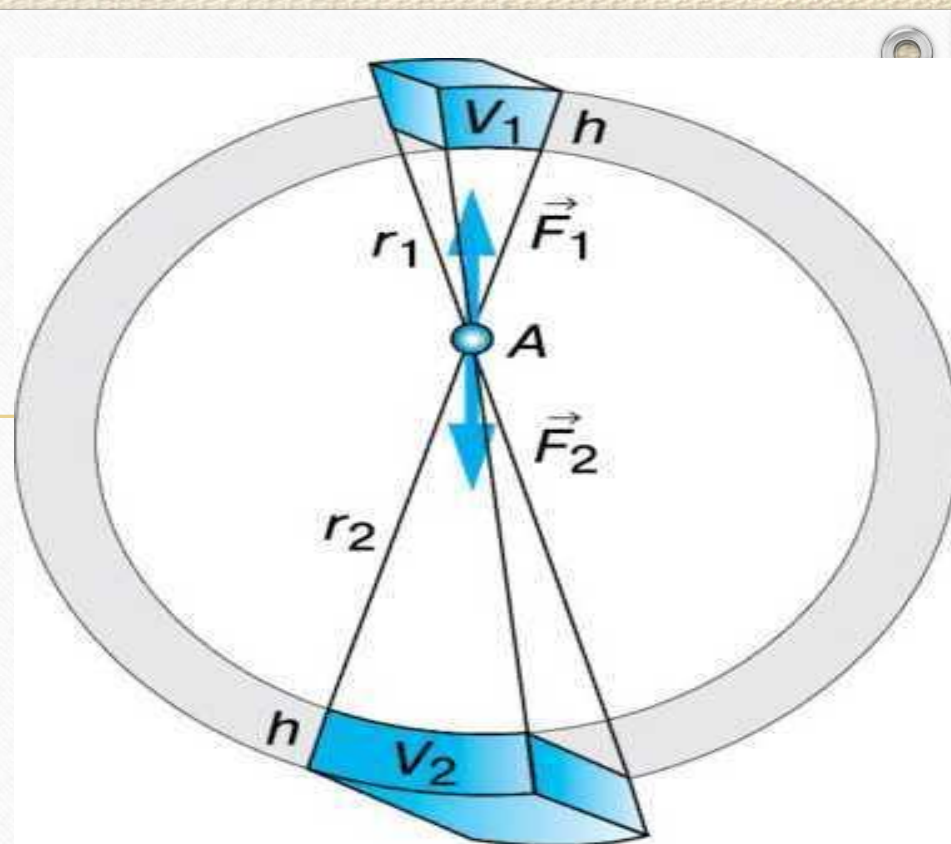
Рассмотрим силы тяготения, действующие на галактику А со стороны тех галактик, которые расположены в этом слое в противоположных от неё направлениях. Эти силы создаются галактиками, расположенными в объёме элементов слоя  $V_1$  и  $V_2$ .

Сравним объём и массу этих элементов. Толщина их одинакова –  $h$ , а площади  $S_1$  и  $S_2$  и объёмы пропорциональны квадратам расстояний от галактики до поверхности слоя –  $r_1$  и  $r_2$ :

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

Так как распределение галактик во Вселенной считается однородным, отношение масс этих элементов будет таким же:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$



Объяснение нестационарности Вселенной

Теоретические выводы Фридмана получили важное наблюдательное подтверждение в открытом Хабблом законе пропорциональности скорости удаления галактик их расстоянию:

$$v = HR.$$

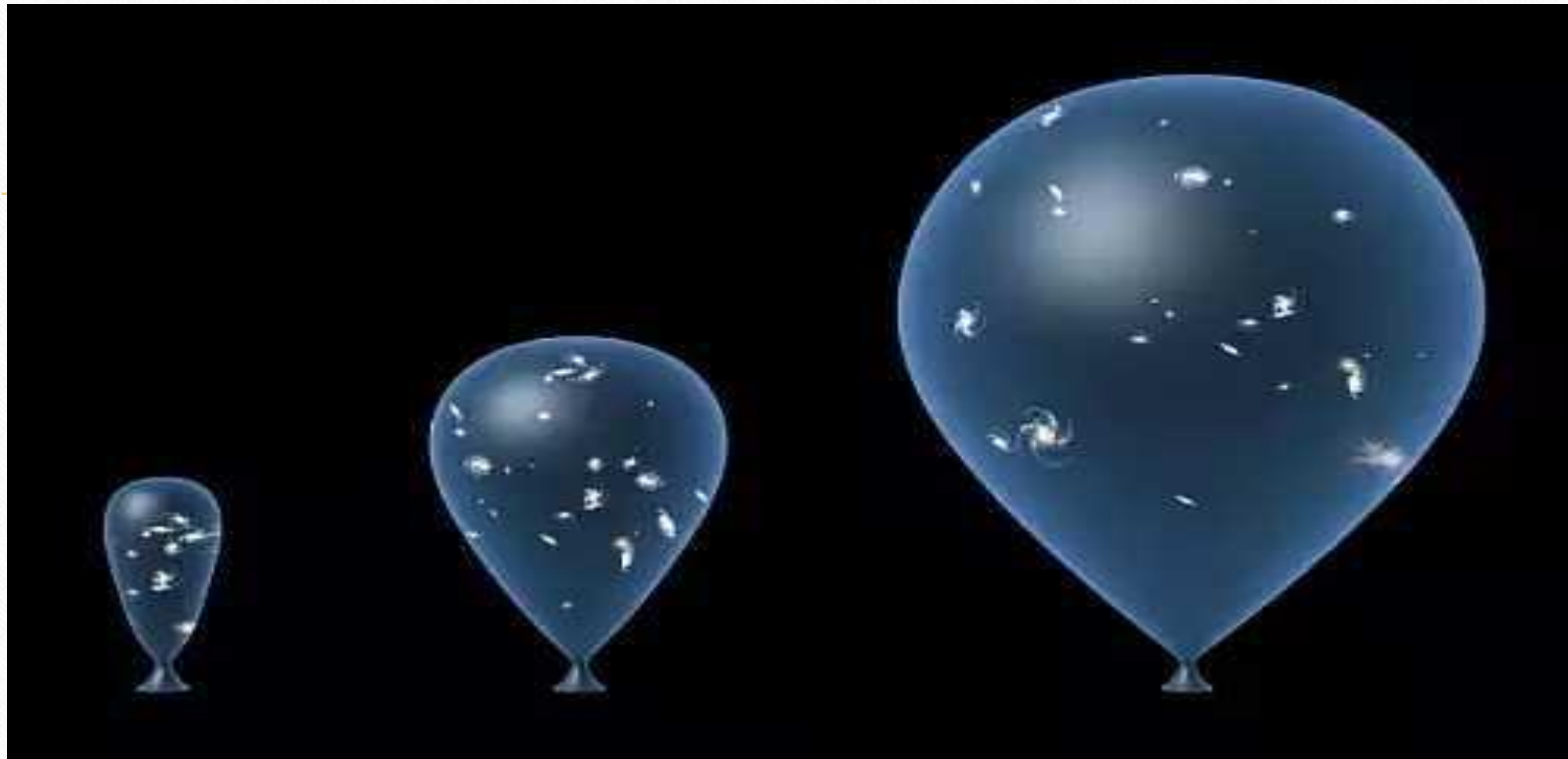
Этот закон не выполняется только для нескольких ближайших галактик, включая туманность Андромеды.



Andromeda  
Galaxy  
(M31)

Milky Way  
Galaxy

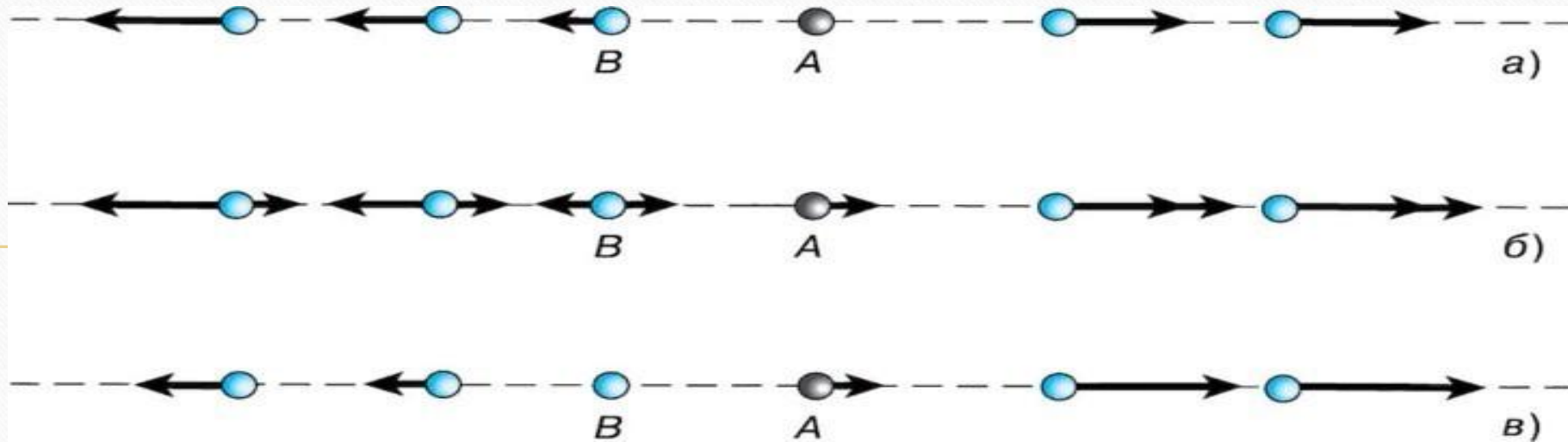
Точно такая же картина «разбегания» галактик будет наблюдаться для любой другой галактики Вселенной.



Разбегание галактик часто иллюстрируют тем, как расходятся точки, нанесенные на поверхность надуваемого воздушного шарика



Выберем в пространстве, занятом галактиками, произвольно направленную прямую, которая проходит через нашу Галактику.



На этой прямой окажется несколько галактик, которые удаляются со скоростями, подчиняющимися закону Хаббла, от нашей Галактики A (рис. а).

Теперь попробуем представить, какую картину разбегания галактик мы увидим, если перенесёмся на галактику B.

Для того чтобы определить скорости всех галактик относительно неё, надо из скоростей, изображённых на рисунке а, вычесть скорость галактики B (рис. б).

Полученная картина, которая представлена на рисунке в, принципиально не отличается от предыдущей: скорости удаления галактик по-прежнему пропорциональны расстояниям.

Рассмотрим силы тяготения, действующие на галактику А со стороны тех галактик, которые расположены в этом слое в противоположных от неё направлениях. Эти силы создаются галактиками, расположенными в объёме элементов слоя  $V_1$  и  $V_2$ .

Сравним объём и массу этих элементов. Толщина их одинакова —  $h$ , а площади  $S_1$  и  $S_2$  и объёмы пропорциональны квадратам расстояний от галактики до поверхности слоя —  $r_1$  и  $r_2$ :

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

Так как распределение галактик во Вселенной считается однородным, отношение масс этих элементов будет таким же:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$



Величина, обратная постоянной Хаббла, даёт примерную оценку времени, которое прошло с момента начала расширения Вселенной — примерно **13,5 млрд лет.**

Открытие Хабблом «красного смещения» и работы Фридмана, показавшего, что Вселенная не может быть стационарной, явились только началом исследований эволюции Вселенной.

Взаимное удаление галактик означает, что в прошлом они были гораздо ближе друг к другу, чем теперь.

В ещё более раннюю эпоху плотность вещества была так велика, что во Вселенной не могло существовать ни галактик, ни звёзд и никаких других наблюдаемых ныне объектов.

Расчёты прошлого, проведённые на основе космологических моделей Фридмана, показывают, что в момент начала расширения Вселенной её вещество должно иметь огромную (бесконечно большую) плотность.



Перед наукой встала задача изучения тех физических процессов, которые происходят в расширяющейся Вселенной на разных этапах её эволюции вплоть до современности, а также тех, которые предстоят во Вселенной в будущем.

---

# Основы современной КОСМОЛОГИИ

В 1948 г. в работах **Георгия Антоновича Гамова** и его сотрудников была выдвинута гипотеза о том, что вещество во Вселенной на начальных стадиях расширения имело не только большую плотность, но и высокую температуру.

---

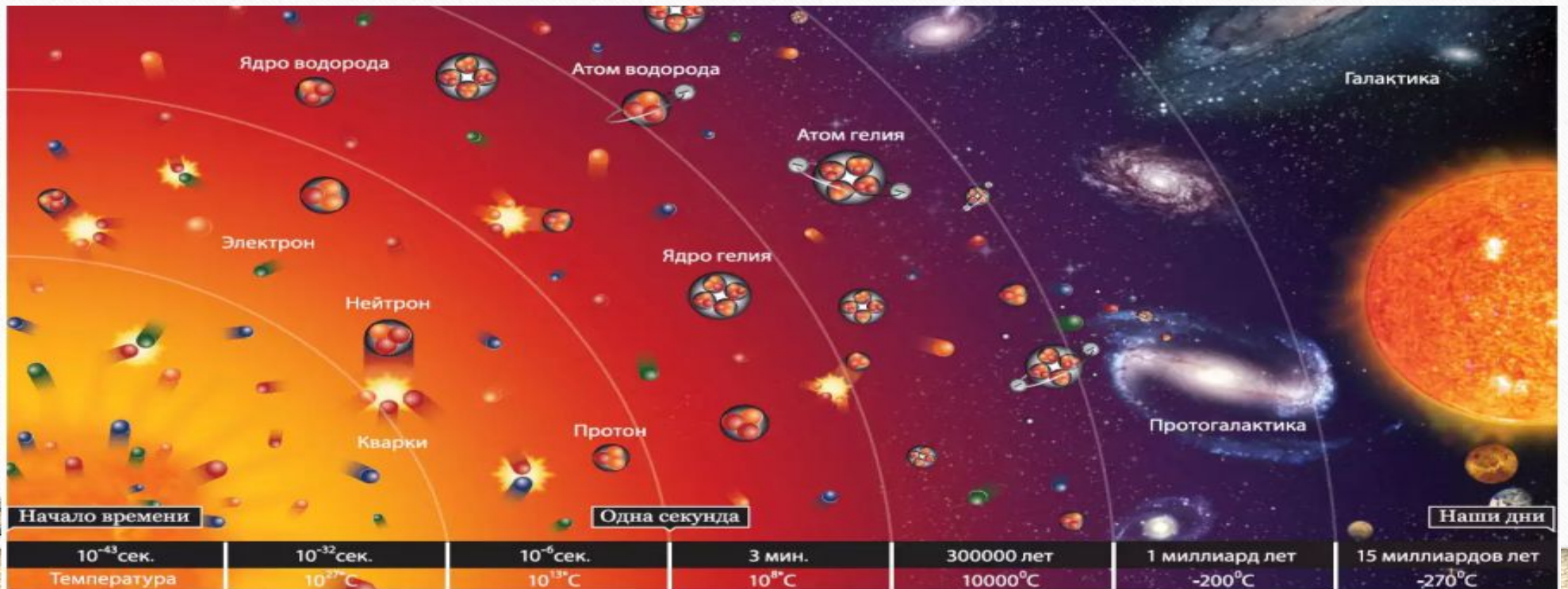


Георгий Антонович Гамов  
(1904 – 1968)

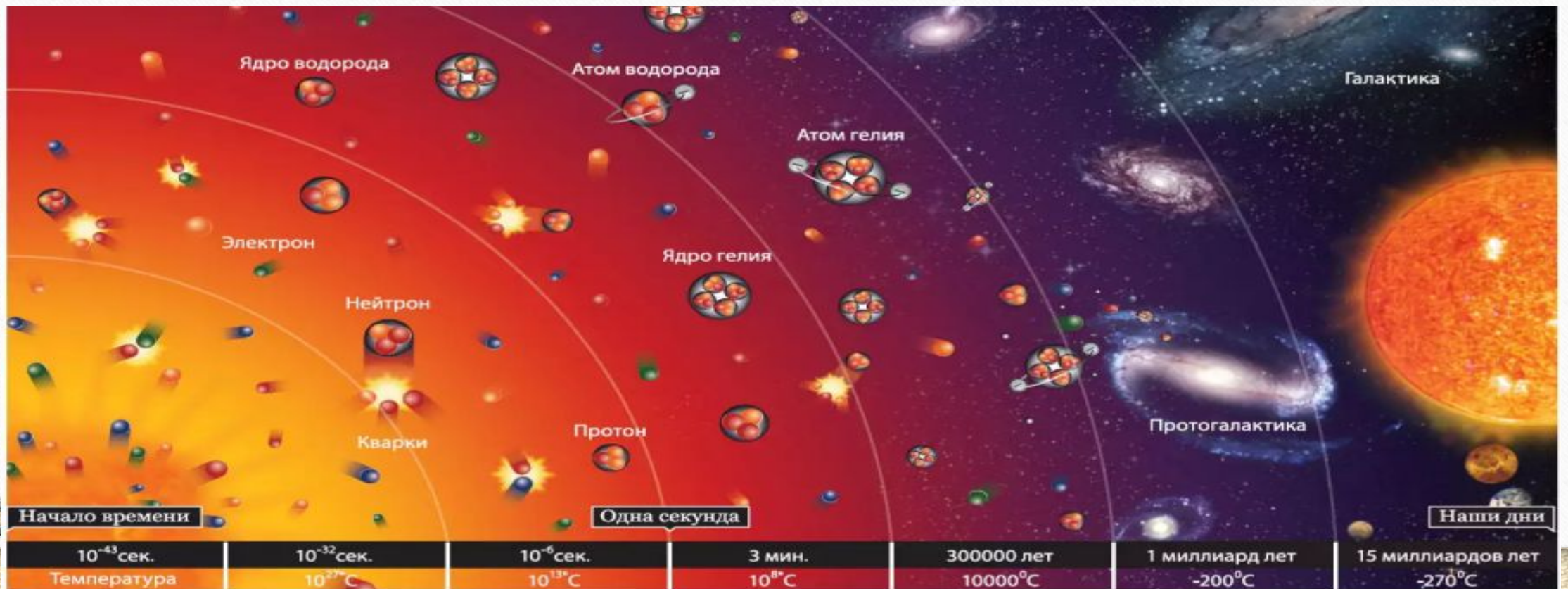
Спустя 0,1 с после начала расширения температура была около  $3 \cdot 10^{10}$  К.

При столь высокой температуре взаимодействие фотонов высокой энергии, которых в горячем веществе было много, приводило к образованию пар всех известных частиц и античастиц: электрон – позитрон, нейтрино – антинейтрино и т.п.

При аннигиляции этих пар снова рождались фотоны, а протоны и нейтроны, взаимодействуя с ними, превращались друг в друга.



При очень высокой температуре сложные атомные ядра существовать не могут – они моментально были бы разрушены окружающими энергичными частицами, поэтому не образуются даже ядра дейтерия, хотя нейтроны и протоны существуют.

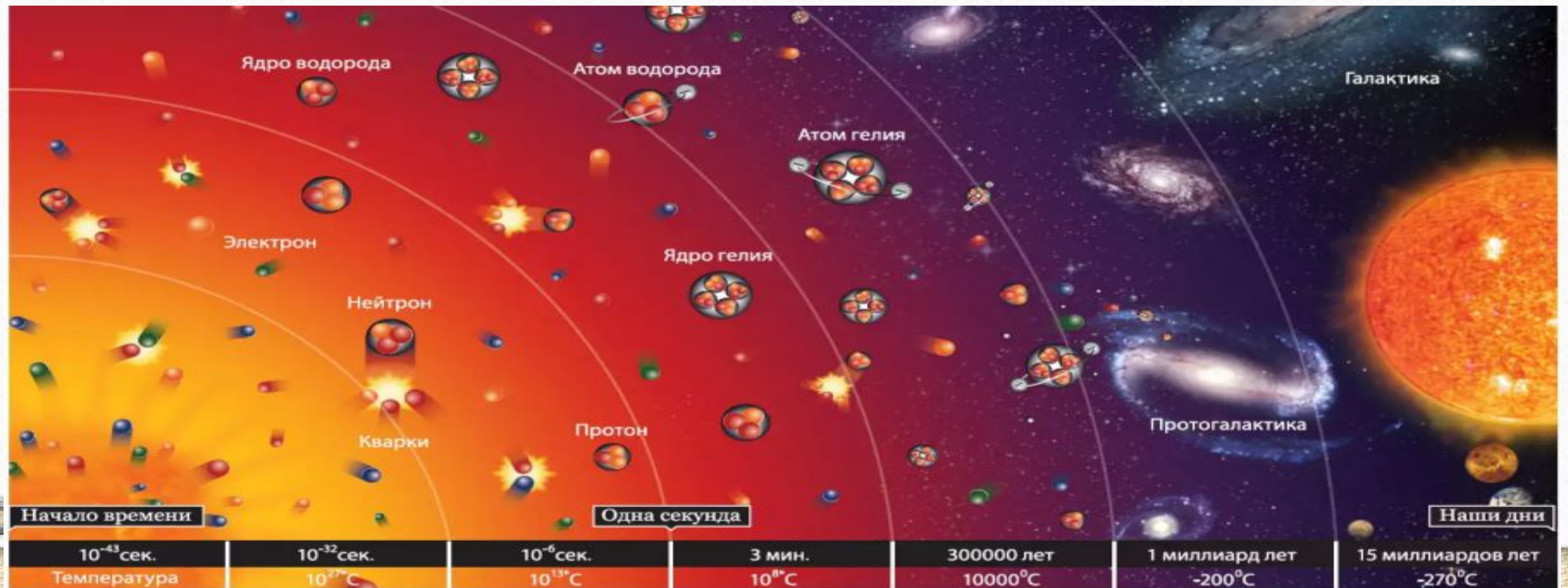


По мере расширения плотность вещества и его температура уменьшаются.

Позднее, когда температура в расширяющейся Вселенной опустится ниже 1 млрд К, станет возможным сохранение некоторого количества ядер дейтерия и, следовательно, образование гелия.

Согласно расчётам, к этому моменту нейтроны составят примерно 15% массы всего вещества. Остальное вещество – протоны (ядра атомов водорода).

Соединение равного количества протонов и нейтронов приведёт к образованию дейтерия, а в процессе следующих ядерных реакций образуются ядра гелия.

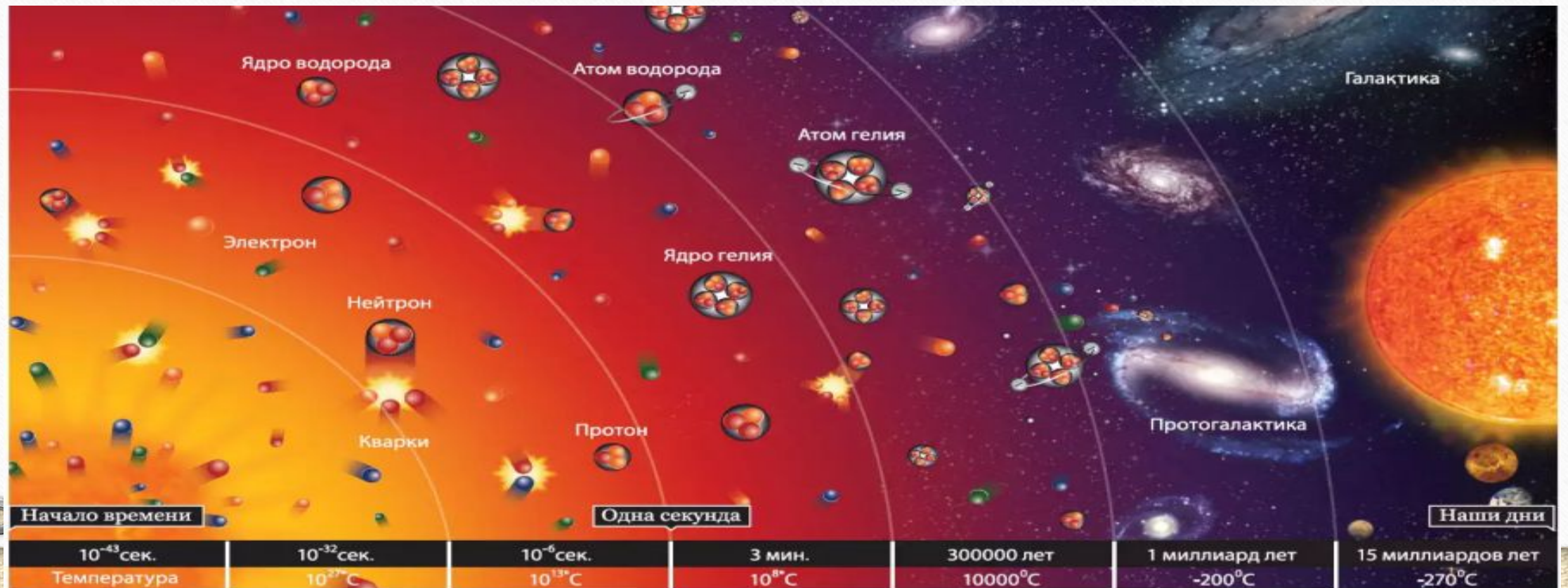




Рассматривая ядерные реакции в горячем веществе в начале космологического расширения, удалось рассчитать, что в процессе этих реакций могли образоваться только водород и гелий.

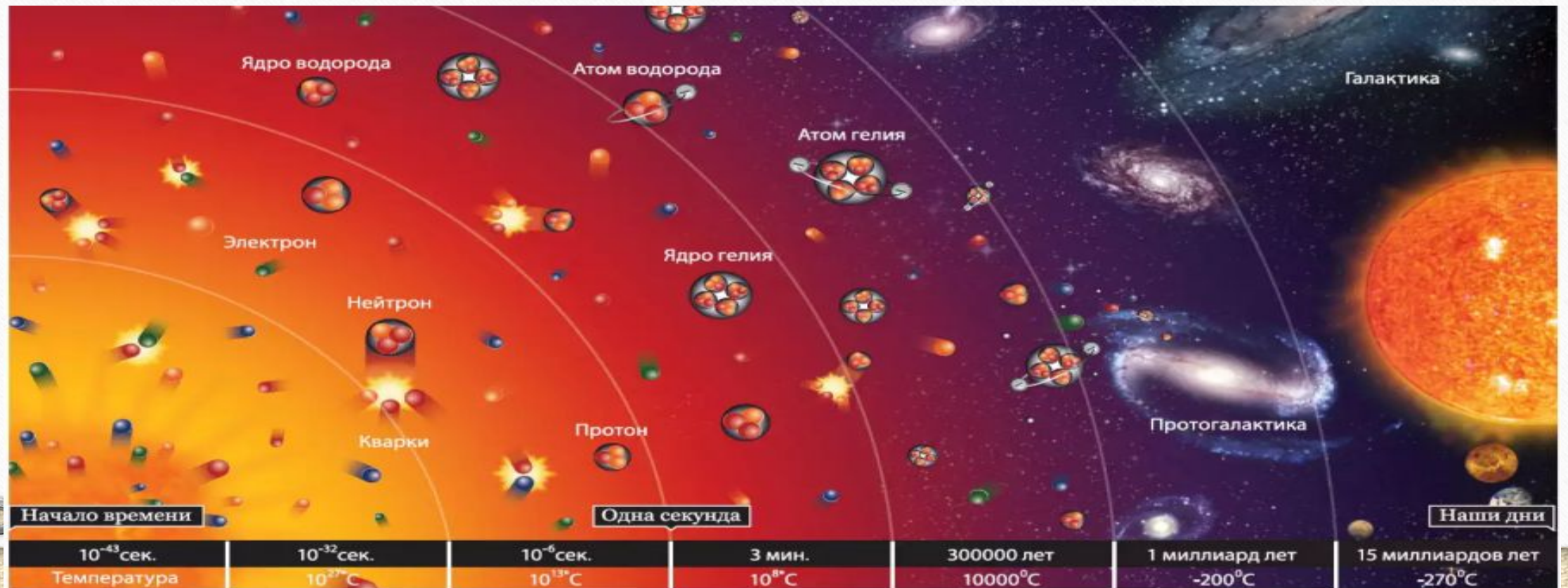
Спустя пять минут после начала расширения, когда температура во Вселенной становится недостаточной для термоядерных реакций, вещество состоит из смеси ядер водорода (70% массы) и ядер гелия (30%).

Таким его состав остаётся до того времени, пока не происходит образование звёзд и галактик



Исследования показали, что содержание гелия в звёздах и межзвёздном веществе действительно составляет около 30% по массе.

Это достаточно хорошо согласуется с выводами теории, которая основана на предположении о «горячей Вселенной».

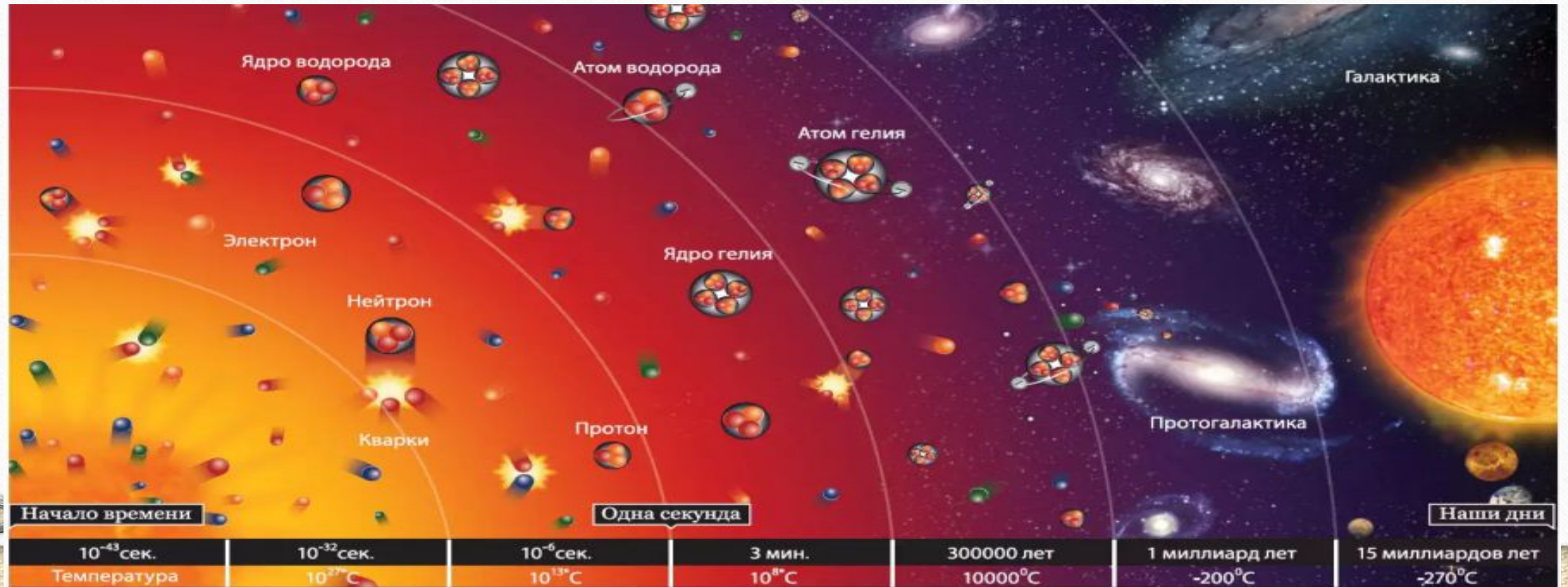


Спустя примерно миллион лет после начала расширения, когда температура снижается до 4000 К, ядра атомов водорода и гелия, захватывая электроны, превращаются в нейтральные атомы.

Эта эпоха явилась важнейшим этапом в эволюции Вселенной.

Во-первых, только с появлением нейтрального вещества становится возможным формирование отдельных небесных тел и их систем.

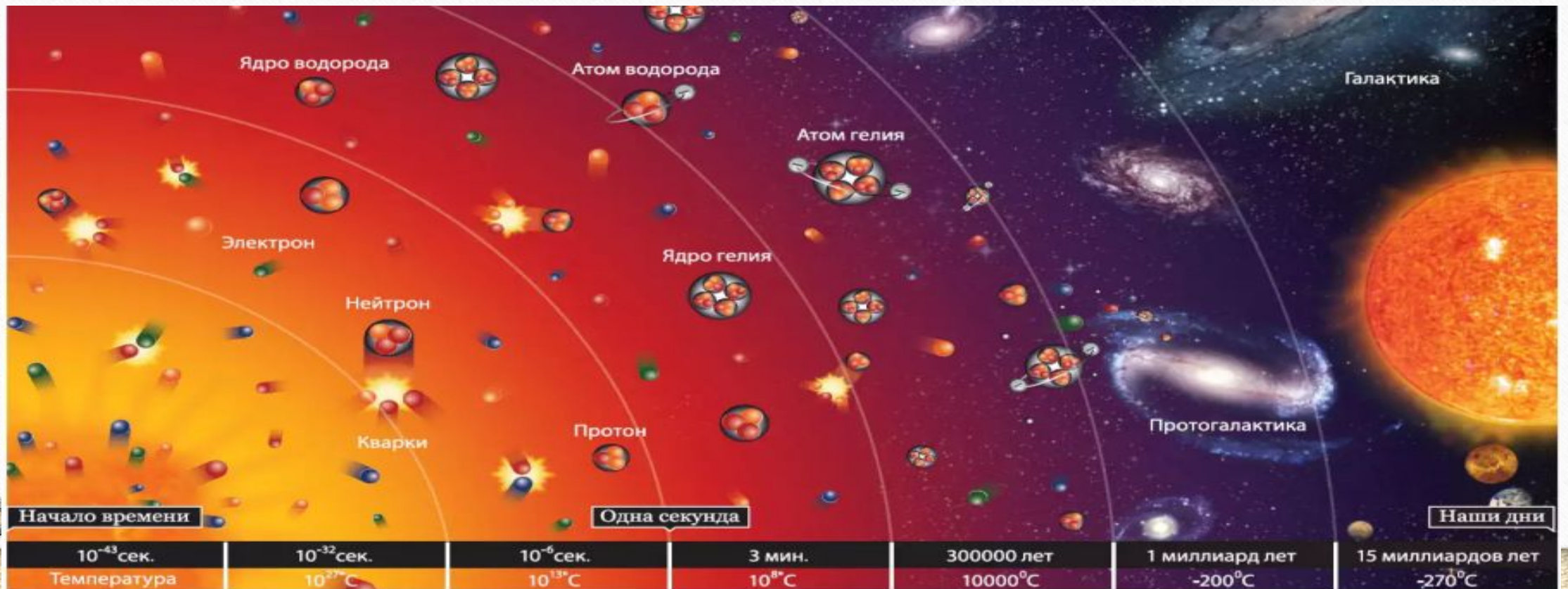
Во-вторых, излучение, которое играло важную роль в процессах, происходивших прежде, практически не взаимодействовало с нейтральным веществом.



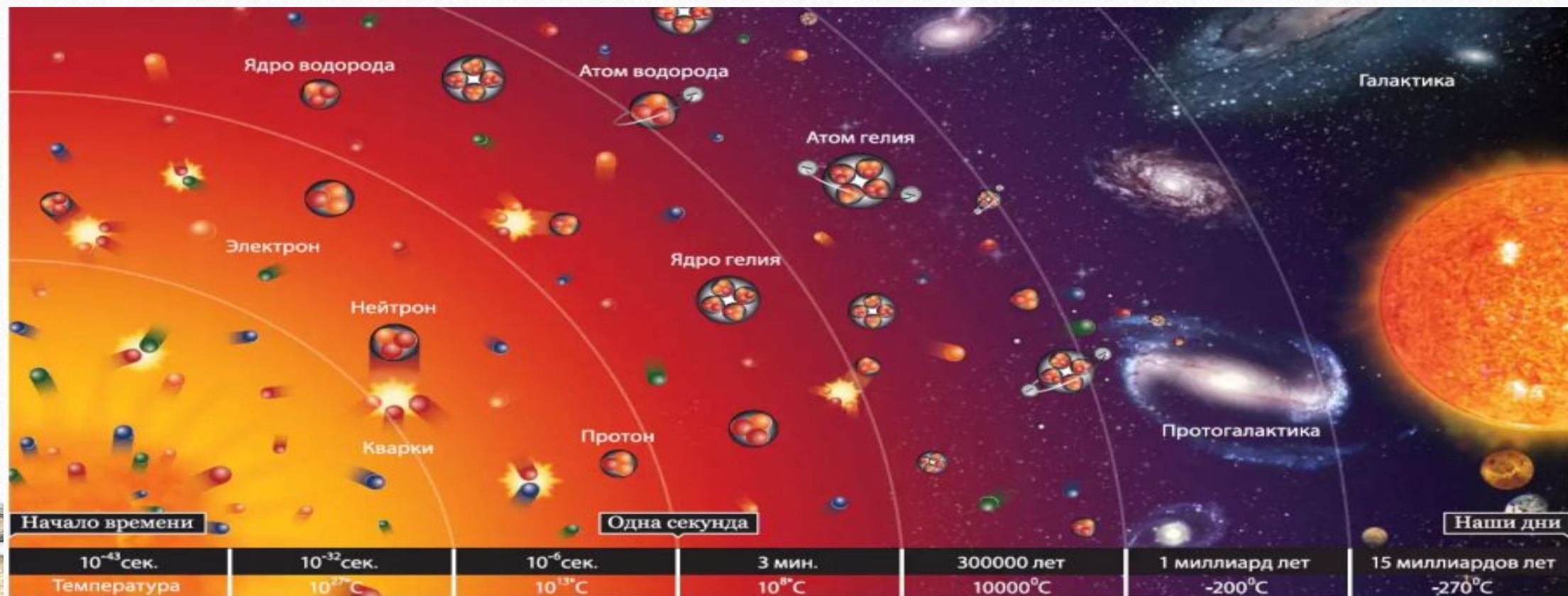
Иначе говоря, теория «горячей Вселенной» предсказывала существование в настоящее время реликтового электромагнитного излучения, оставшегося от того далёкого прошлого, когда вещество во Вселенной было плотным и горячим.

Температура этого излучения, которая в процессе космологического расширения уменьшалась так же, как и температура вещества, должна составлять в нашу эпоху всего несколько кельвинов.

Это излучение, получившее название **реликтового**, было случайно обнаружено на волне 7,35 см американскими инженерами А. Пензиасом и Р. Вильсоном.



- Открытие реликтового излучения явилось одним из важнейших научных открытий XX века, которое подтвердило, что на ранних стадиях расширения Вселенная была горячей. Авторы этого открытия в 1978 г. удостоены Нобелевской премии по физике.



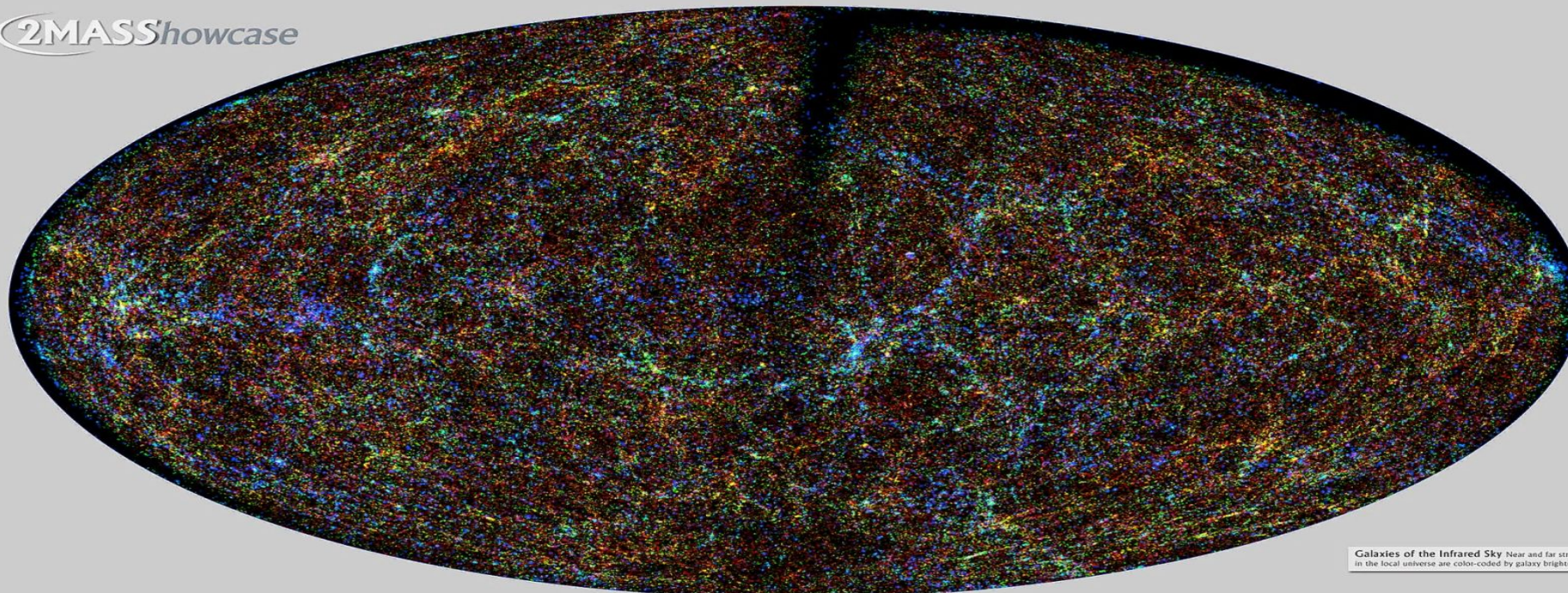
Обнаружение реликтового излучения — очень важное,  
но не единственное достижение космологии за последние десятилетия.

К их числу относится **теоретическое исследование крупномасштабной структуры Вселенной**, проведённое академиком **Я.Б.Зельдовичем** и его учениками.

В процессе эволюции Вселенной флуктуации плотности вещества под действием гравитации должны постепенно превращаться в объекты, напоминающие по своей форме блины.

Наблюдения подтвердили, что именно такие структуры образуют во Вселенной галактики, их скопления и **сверхскопления**.

2MASS Showcase



Galaxies of the Infrared Sky Near and far structures in the local universe are color-coded by galaxy brightness

Two Micron All Sky Survey Image Mosaic: Infrared Processing and Analysis Center/Caltech & University of Massachusetts

**Крупномасштабная структура Вселенной, как она выглядит в инфракрасных лучах с длиной волны 2,2 мкм.**

Яркость галактик показана цветом от синего (самые яркие) до красного (самые тусклые).

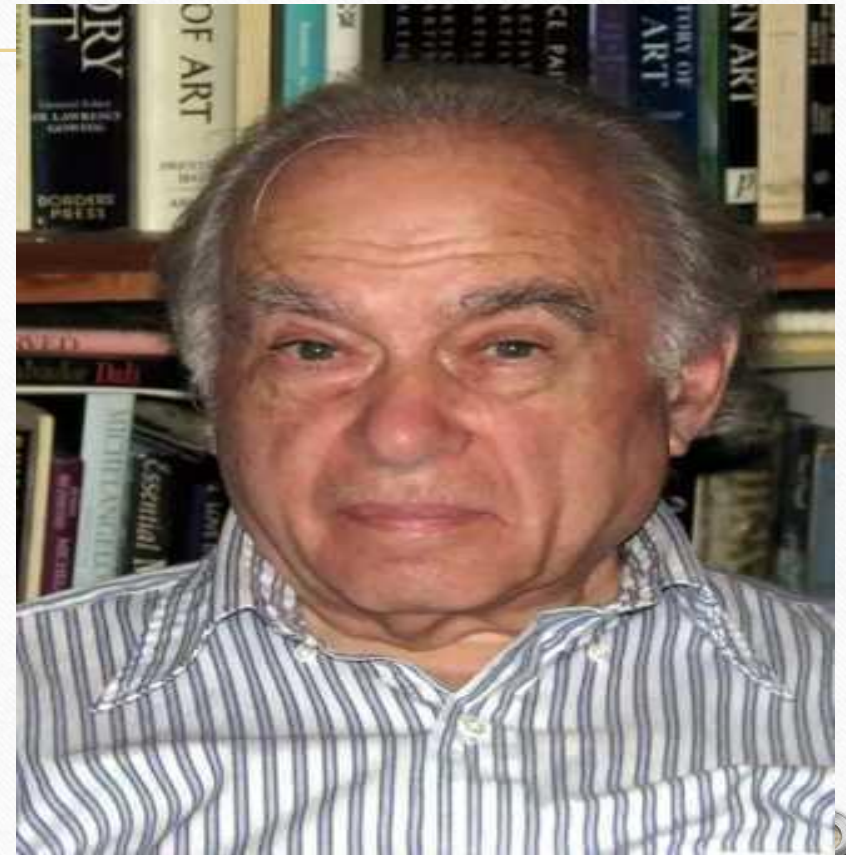
Тёмная полоса по диагонали и краям картины — расположение Млечного Пути, пыль которого мешает наблюдениям

Теория горячей расширяющейся Вселенной, которая опирается на работы А.А.Фридмана и Г.А.Гамова, стала общепризнанной, хотя не смогла дать ответ на два важных вопроса: в чём первопричина взаимного удаления галактик и как в дальнейшем будет происходить расширение Вселенной.

Найти ответы на эти вопросы удалось новому поколению учёных.  
Оба ответа оказались весьма неожиданными.

В 1965 г. российский физик-теоретик **Э. Б. Глинер** выдвинул гипотезу, согласно которой **начальным состоянием Вселенной был вакуум**.

Дальнейшие исследования показали, что для гравитационных сил вакуума характерно не привычное всем притяжение, а отталкивание.



Эраст Борисович Глинер

Чтобы ответить на вопрос, как в дальнейшем будет происходить расширение Вселенной, необходимо было установить зависимость скорости удаления галактики от расстояния до неё.

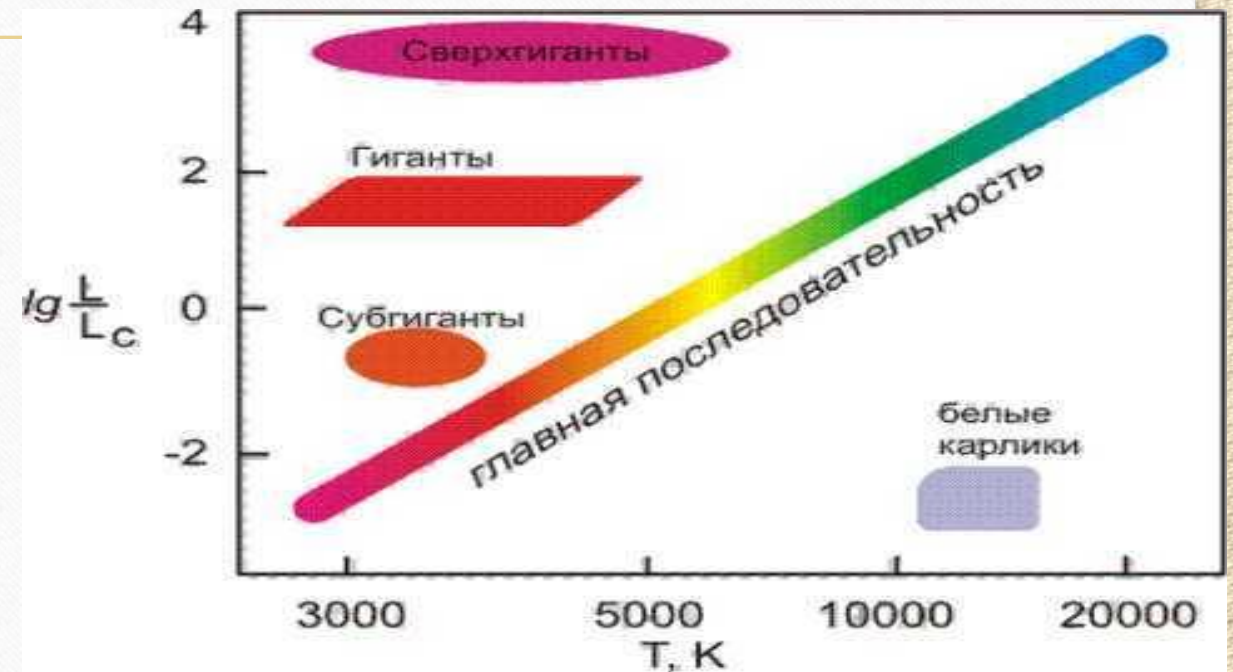
В первом приближении она выражается законом Хаббла:  $v = HR$ .

Чтобы проверить, насколько эта зависимость выполняется для наиболее удалённых объектов, необходимо определить скорость галактики и её расстояние независимо друг от друга.

Для таких огромных расстояний используется **метод фотометрического параллакса**.

Поток фотонов, приходящих от источника излучения и регистрируемых наблюдателем, обратно пропорционален квадрату расстояния до источника.

Если известна мощность излучения (светимость) наблюдаемого объекта, то, измерив поток света, можно вычислить, на каком расстоянии этот объект находится.



Фотометрический способ.

Установлена связь между мощностью излучения звезды (светимостью) — и температурой поверхности (цветом). На диаграмму Герцшпрунга-Рассела наносятся звезды с известным параллаксом, а для других — находят расстояния.



Оказалось, что объектами с известной светимостью являются наиболее яркие сверхновые звёзды, светимость которых в момент вспышки сравнима со светимостью целой галактики – сверхновые типа *Ia*, порождаемые термоядерными взрывами белых карликов.

При наблюдениях этих звёзд независимо измерялись две величины: **«красное смещение» линий в спектре** и **блеск звезды** (освещённость, создаваемая звездой на плоскости, перпендикулярной лучу зрения).

Зная величину светимости сверхновой типа *Ia*, можно вычислить расстояние до каждой из них.

---



TODAY



40 million years  
from now



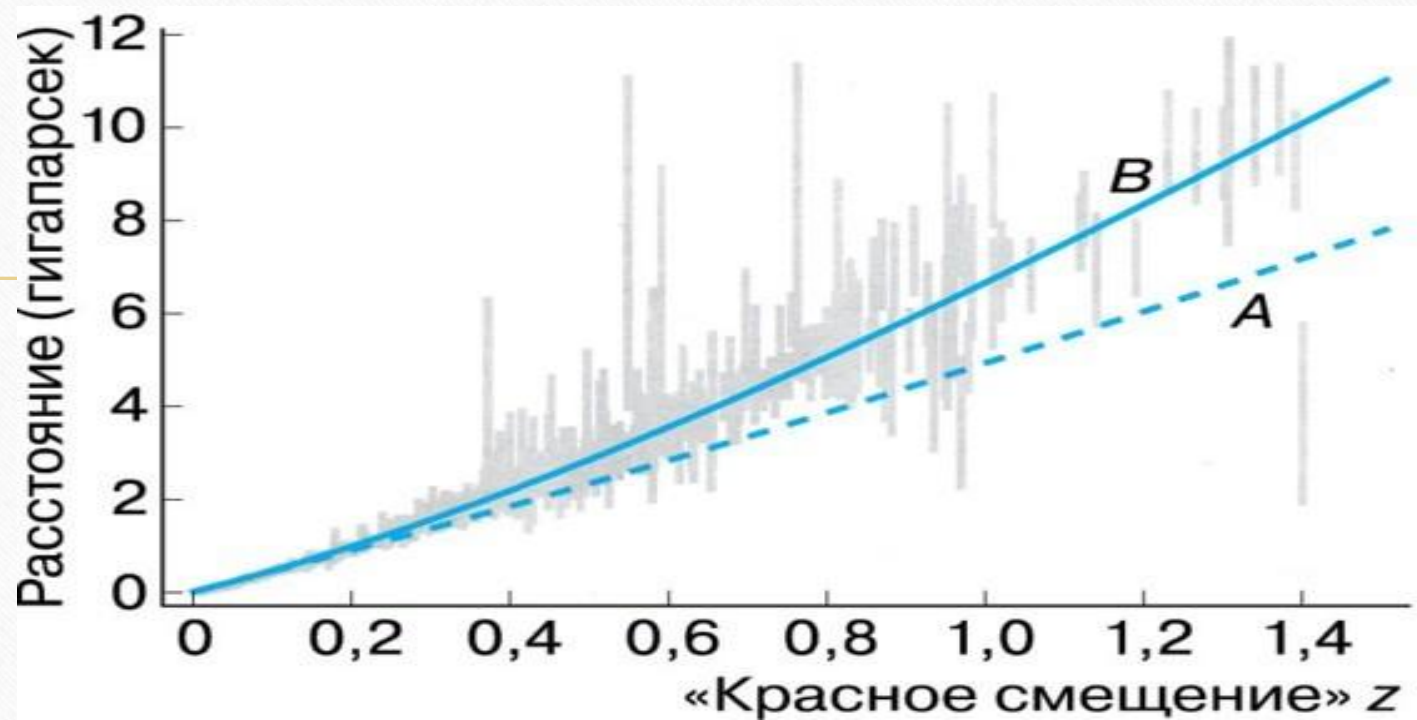
60 million years  
from now



61 million years  
from now

Подтверждена гипотеза о том, что все сверхновые типа *Ia* являются продуктом слияния двух белых карликов

На графике показаны кривые, которые соответствуют двум возможным вариантам зависимости расстояния до звезды от «красного смещения».



Кривая A соответствует известному закону Хаббла.

Кривая B при малых  $z$  практически сливается с кривой A, но при больших значениях  $z$  проходит значительно выше.

Наблюдаемое отклонение существенно превышает ошибки измерения, что и позволило сделать вывод: **Вселенная расширяется с ускорением.**

Это означает, что **расширение Вселенной будет продолжаться неограниченно.**

Учёные пришли к выводу: наблюдаемое ускорение создаёт неизвестный прежде вид материи, который обладает свойством **антигравитации**.

Он получил название **тёмной энергии**.

За это открытие две группы учёных получили Нобелевскую премию по физике за 2011 г.

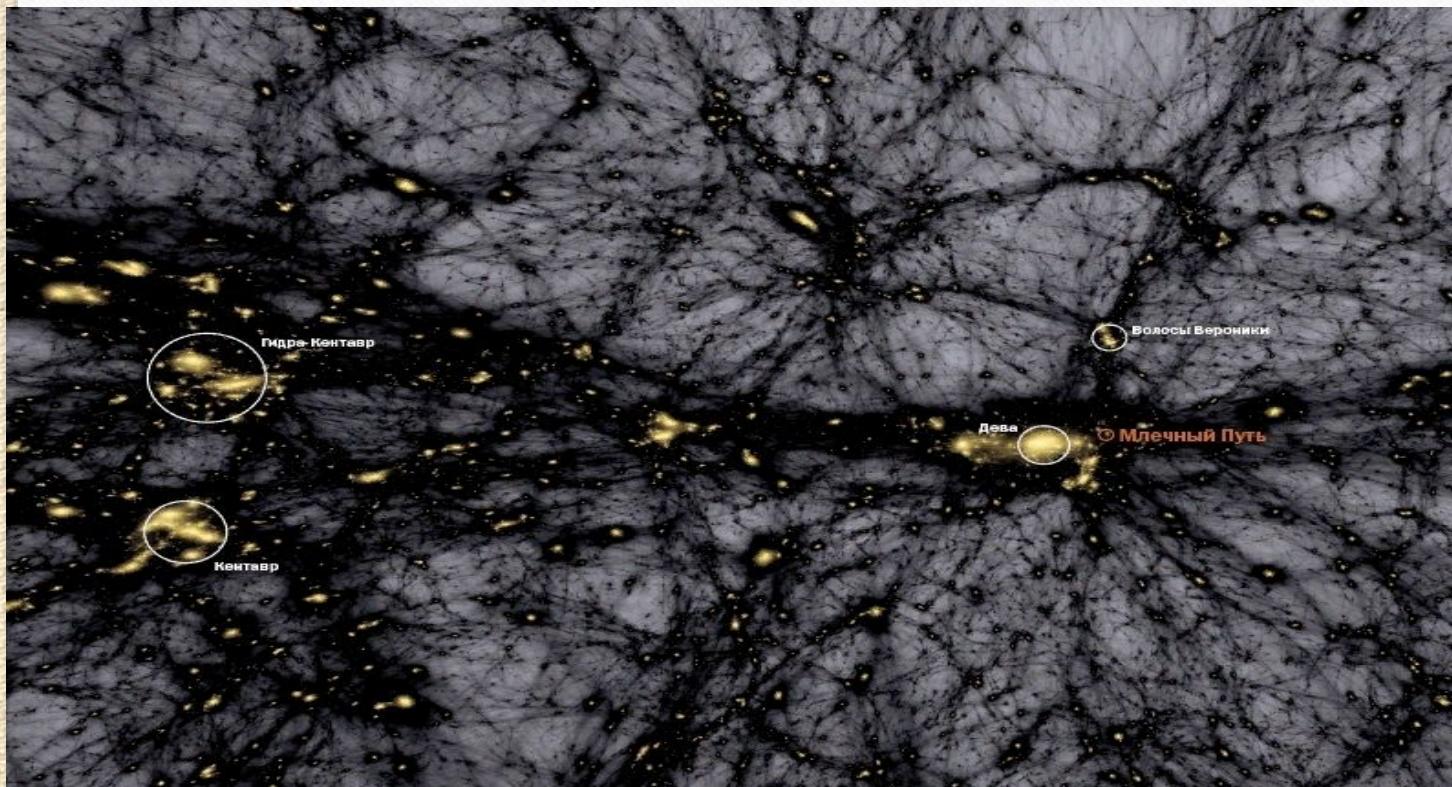


Открытие антигравитации, которое оказалось неожиданным для большинства людей, подтвердило предвидение А.Эйнштейна.

Выяснился глубокий смысл  $\lambda$ -члена в уравнениях общей теории относительности. А.Эйнштейн, по существу, выдвинул гипотезу о наличии во Вселенной материи, которая создаёт не притяжение, а отталкивание.

Дальнейшие исследования позволили выяснить, что по своей природе **тёмная энергия является практически однородной**, в отличие от двух других составляющих Вселенной – «обычной» и тёмной материи, которые распределены в космическом пространстве неоднородно, образуя звёзды, галактики и другие объекты.

Можно считать, что **тёмная энергия – это свойство самого пространства.**



Суперкомпьютер создал изображение на основе данных о гравитационном поле: «паутина» **тёмной материи** с развешанными на ней гроздьями из **галактических скоплений** в местах пересечения гигантских темных нитей.

Одно только созвездие Девы стало пристанищем для тысяч галактик.

Детальный анализ анизотропии реликтового излучения и крупномасштабной структуры Вселенной позволил определить плотность каждого из трёх видов материи.

Было установлено, что **«обычная» материя**, изучению которой человечество посвятило всю предшествующую историю, составляет всего лишь **несколько процентов** массы Вселенной.

Примерно **26%** составляет **тёмная материя**, а **69%**, большая часть массы Вселенной, приходится на долю **тёмной энергии** – нового вида материи, уникальные свойства которой ещё предстоит изучить.

## Роль темных сил в жизни Вселенной

**Большой взрыв**  
13,8 миллиарда лет назад  
Рождение Вселенной из горячего и плотного пузыря размером с атом. За несколько миллисекунд она расширилась с невероятной скоростью.

**Образование темной материи**  
Первые мгновения жизни Вселенной  
В первые секунды произошло образование темной материи. Она тут же начала взаимодействовать с привычной нам барионной материей посредством гравитации, постепенно сближая частицы последней друг с другом.

**Появление первых звезд**  
100 миллионов лет после Большого взрыва  
Водородные облака, образовавшиеся благодаря гравитационному воздействию темной материи, начинают коллапсировать, и в их недрах запускается реакция ядерного синтеза, создающего тяжелые элементы и освещающего Вселенную.

**Расширение замедляется**  
1 миллиард лет после Большого взрыва  
Звезды группируются в галактики, галактики собираются в скопления, при этом структуру Вселенной задает гравитационное поле темной материи. Масса темной материи настолько велика, что ее гравитации удается замедлить расширение Вселенной.

**Проблески темной энергии**  
4–8 млрд лет после Большого взрыва  
Падение скорости расширения Вселенной на протяжении миллиардов лет сменяется ростом. Но почему? Новая загадочная сила (названная темной энергией) начинает соперничать с гравитацией, расталкивая части Вселенной и вновь ускоряя ее расширение.

**Все шире и шире**  
Настоящее время  
Вселенная продолжает расширяться, и нам еще предстоит понять, что ждет ее (и нас с вами) в будущем.

Из чего состоит Вселенная



**Развитие современной космологии в очередной раз  
показало безграничные возможности человеческого  
разума, способного исследовать сложнейшие процессы,  
которые происходят во Вселенной на протяжении  
миллиардов лет.**

**Спасибо за внимание!**