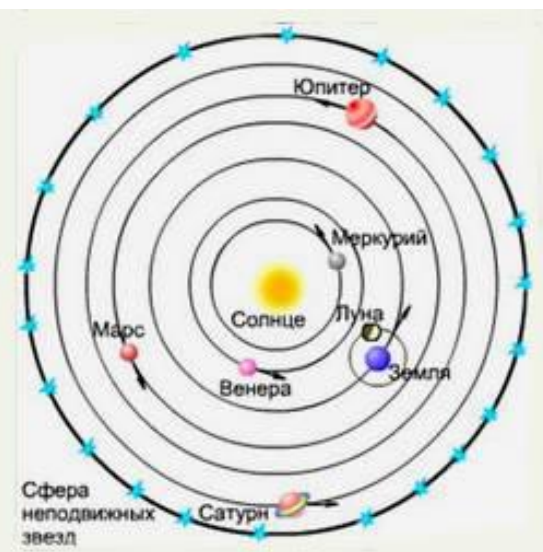
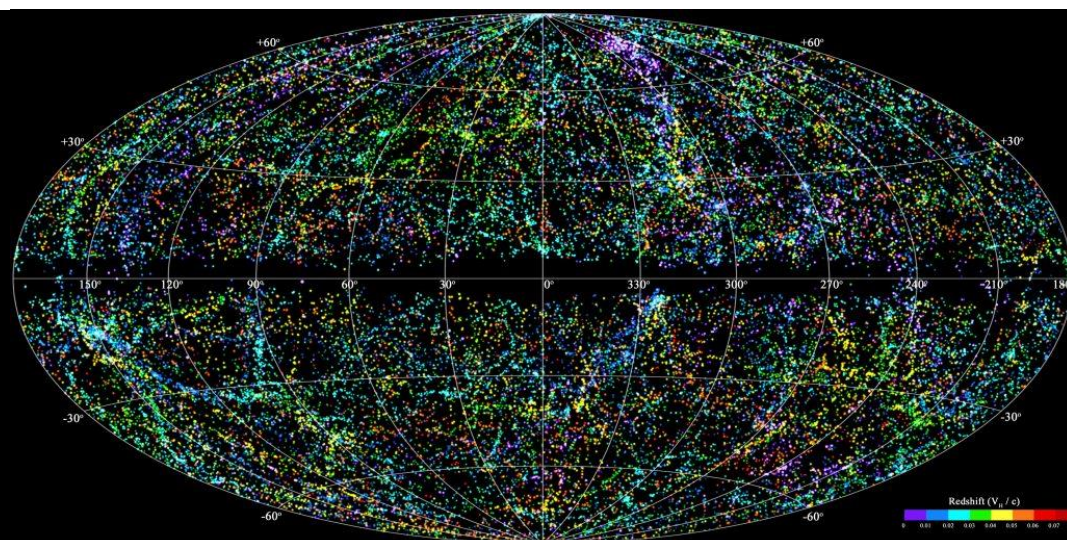
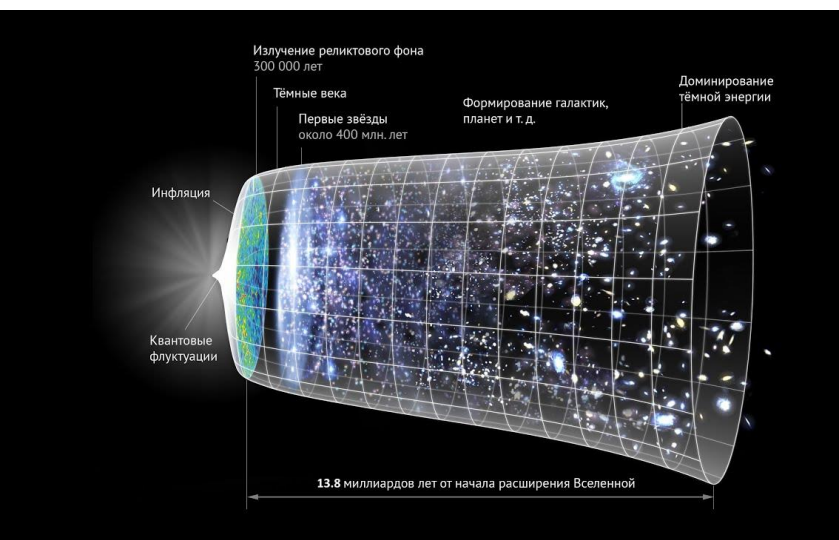
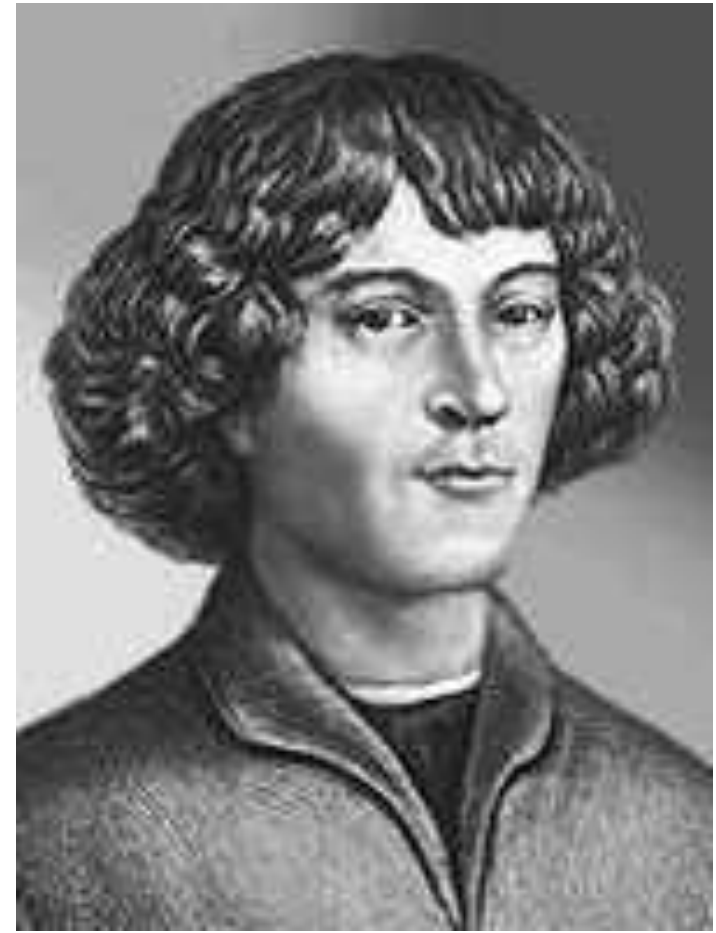




Революции в космологии



В эпоху Возрождения в астрономии произошла первая революция. Она связана с именем великого польского учёного **Николая Коперника**. Он глубоко изучил труд Птолемея и сам много наблюдал движение Солнца и планет. В результате работы, занявшей почти всю его жизнь, Коперник пришёл к выводу, что система мира Птолемея неверна.

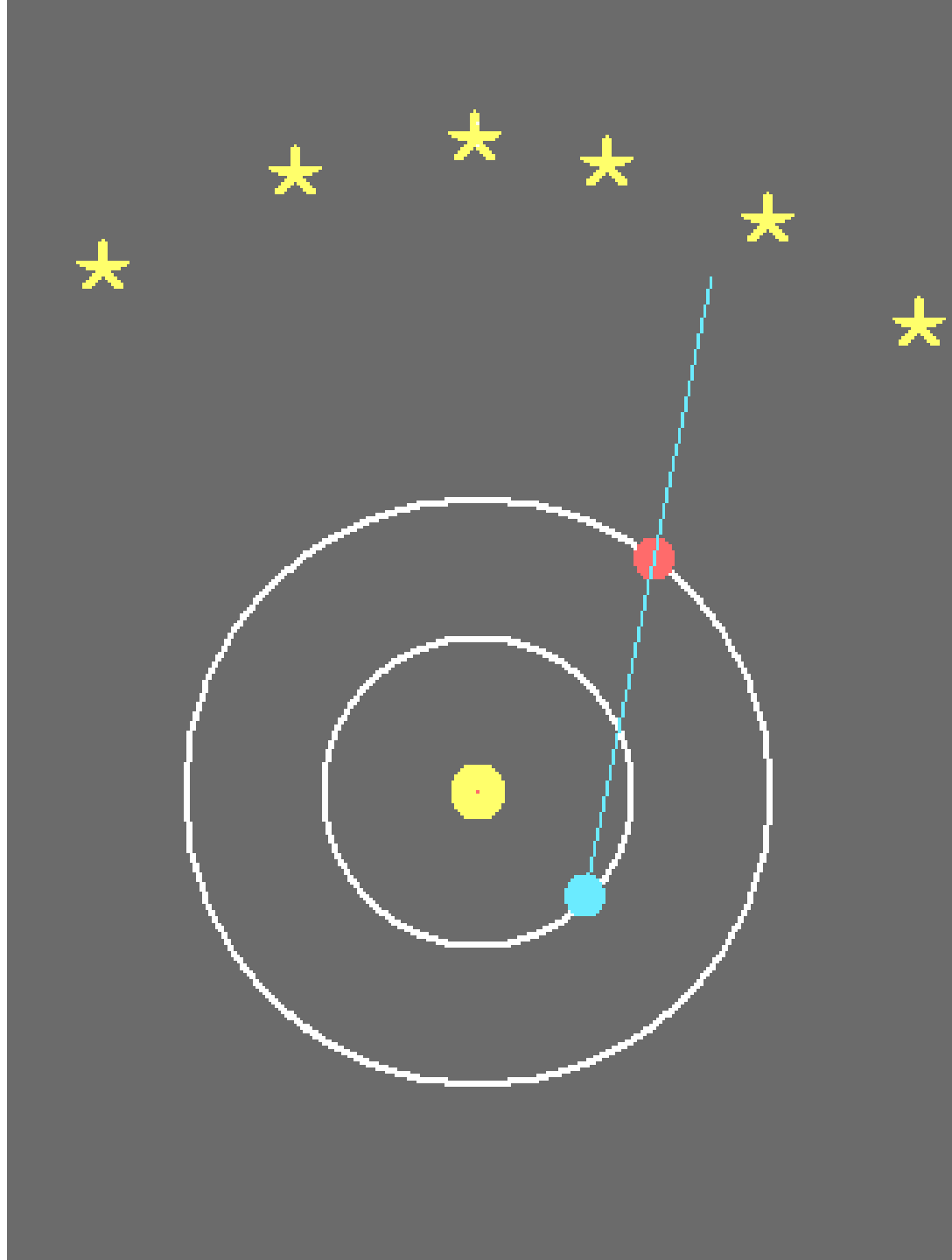


Николай Коперник
(1473–1543)

В центре мира находится Солнце, а не Земля, и вокруг него обращаются все планеты вместе с Землёй.



Объяснение прямого и попятного движения



Гелиоцентрическая система мира, обоснованная, но не доказанная Коперником, получила свое подтверждение и развитие в трудах таких выдающихся ученых, как Галилео Галилей и Иоганн Кеплер.



Галилео Галилей
(1564-1642)



Иоганн Кеплер
(1571-1630)

Итальянский физик и астроном Галилео Галилей, одним из первых направивший телескоп на небо, сделал открытия, подтвердившие учение Коперника.



Телескопы
Галилея



Галилео Галилей
(1564–1642)

В 1633 г. Галилей предстал перед судом инквизиции. Допросы, угроза пыток сломили больного ученого. Он отрекается от своих взглядов и приносит публичное покаяние. Его до конца жизни держали под надзором инквизиции.

Лишь в 1992 году папа Иоанн Павел II объявил решение суда инквизиции ошибочным и реабилитировал Галилея.



Галилей перед судом инквизиции

Основная задача космологии – построение такой *космологической модели*, которая, опираясь на физические теории, объясняла бы всю совокупность наблюдаемых фактов.

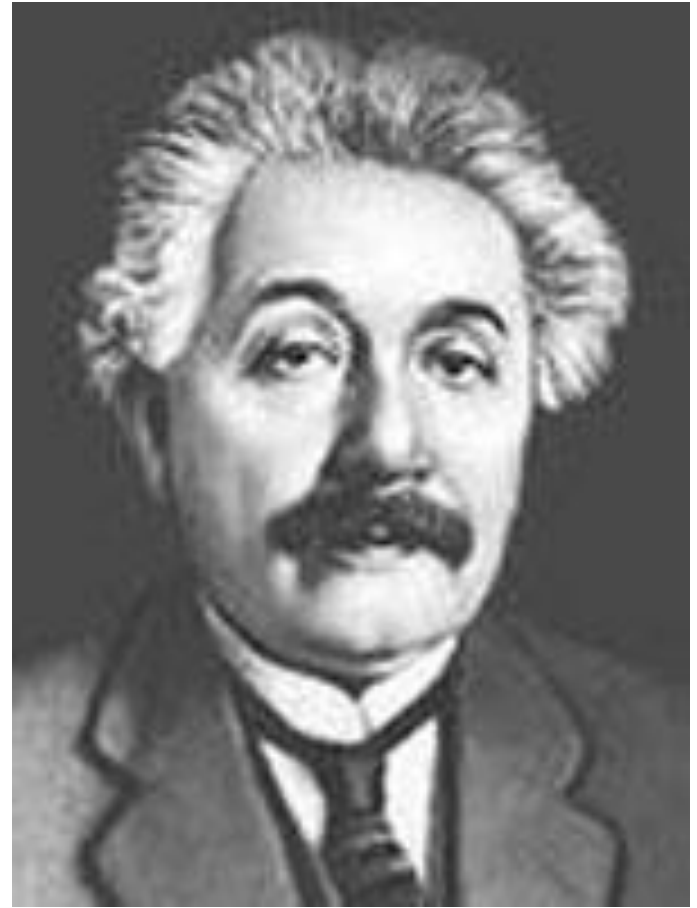
Первая **научная** космологическая модель была построена И. Ньютоном на основе созданной им физической теории – классической механики.



Согласно модели И. Ньютона, Вселенная бесконечна и вечна, заполнена звёздами, вокруг которых вечно обращаются планеты. Бог предоставил материи возможность двигаться согласно законам механики. Пространство, время и материя абсолютны, то есть не зависят друг от друга, пространство представлялось евклидовым — плоским, трехмерным, бесконечным, существующим и без материи (как абсолютная пустота). Физические законы, открытые на Земле, считались абсолютными и универсальными, действующими во всей материальной Вселенной.

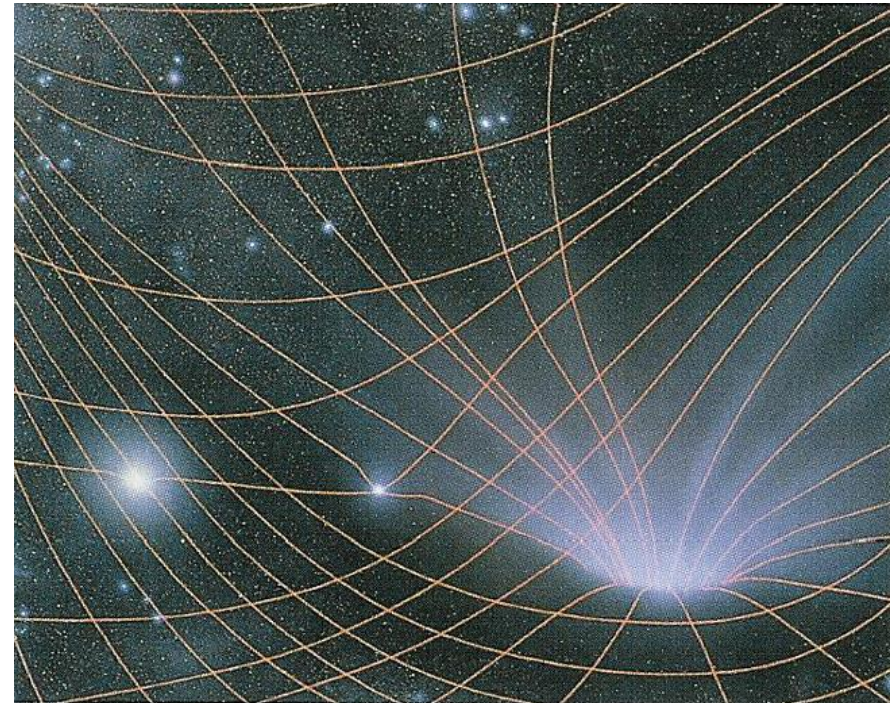
1916 г. – Общая теория
относительности
Альберта Эйнштейна.

В приложении к
космологии уравнения
Эйнштейна приводят к
нестационарной модели
Вселенной: Вселенная
эволюционирует! Не
было
экспериментальных
подтверждений.



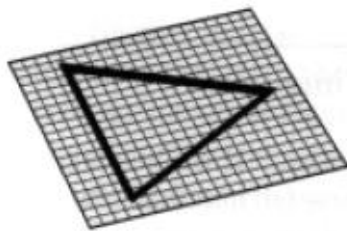
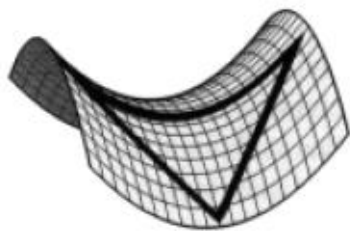
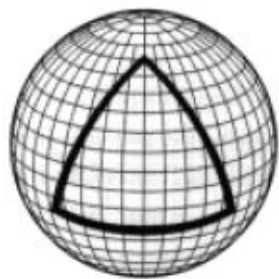
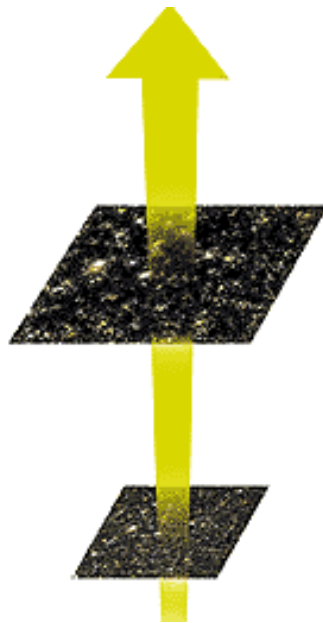
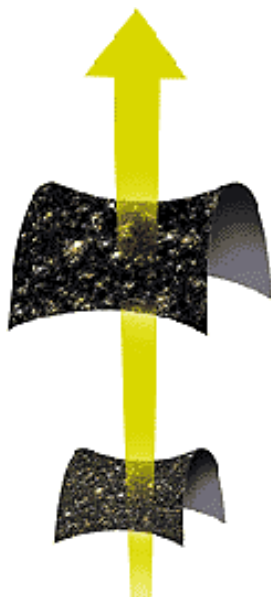
Albert Einstein
1879–1955

Чтобы получить стационарное решение, Эйнштейн ввел космологическую постоянную — Λ -член. Ввел искусственно. Решение получено. Но стало понятно — решение нестабильно. При малых возмущениях Вселенная становится нестабильной..



Александр Фридман – получил
решение уравнений Эйнштейна
(1922 г.).

Критическая плотность ρ_0



Alexander Friedman
1882-1925

Closed Geometry

Open Geometry

Flat Geometry

В 1913-1914 годах американский астроном Весто Слайфер установил:

- Туманность Андромеды и ещё более десятка небесных объектов движутся относительно Солнечной системы с огромными скоростями (порядка 1000 км/с). Это означало, что все они находятся за пределами Галактики.
- Все исследованные туманности, кроме трёх, удалялись от Солнечной системы.



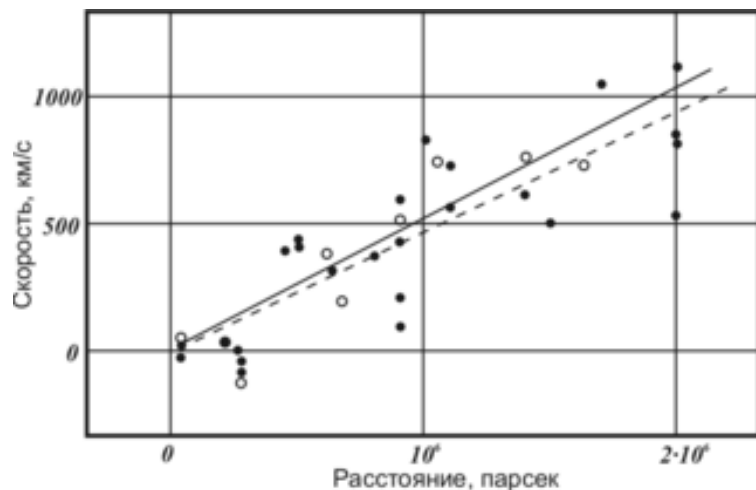
Vesto Melvin Slipher
1875 – 1969



Эдвин Хаббл

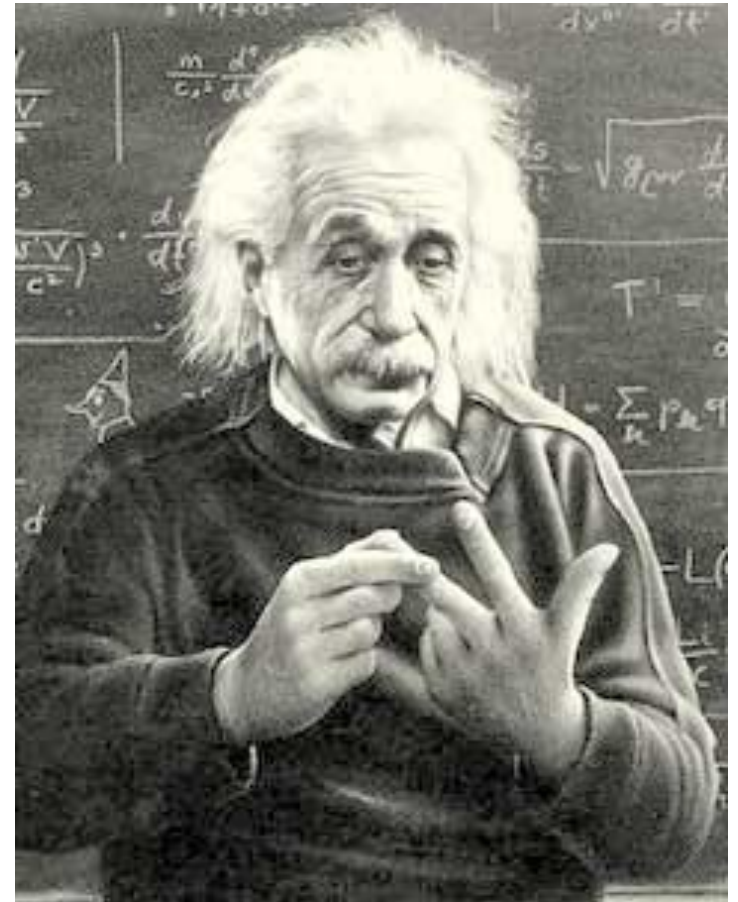
В 1929 году обнаружил зависимость между красным смещением галактик и расстоянием до них – закон Хаббла:

$$v = H r$$



Edwin Hubble
1889 – 1953

Эйнштейн: введение Λ -члена – самая большая ошибка.



Галактики разбегаются →
когда они были «плотно
упакованы»

Вселенная возникла в
результате Большого взрыва
из сверхсжатого состояния.

Реликтовое излучение –
остаток гамма квантов,
которые возникли начиная с
300 000 лет от большого
взрыва (до этого времени
Вселенная непрозрачна).



George Gamov (1904-1968)

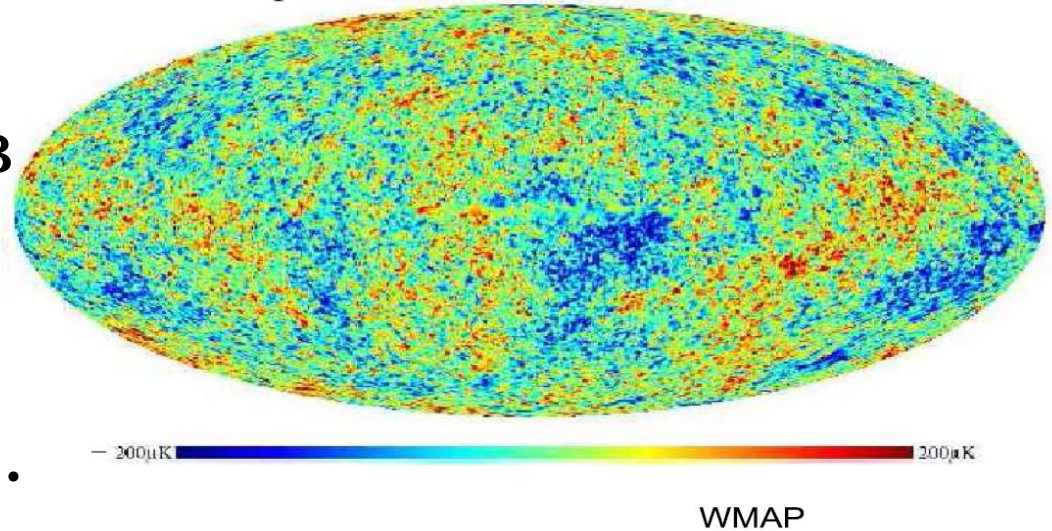
Cosmic Microwave Background



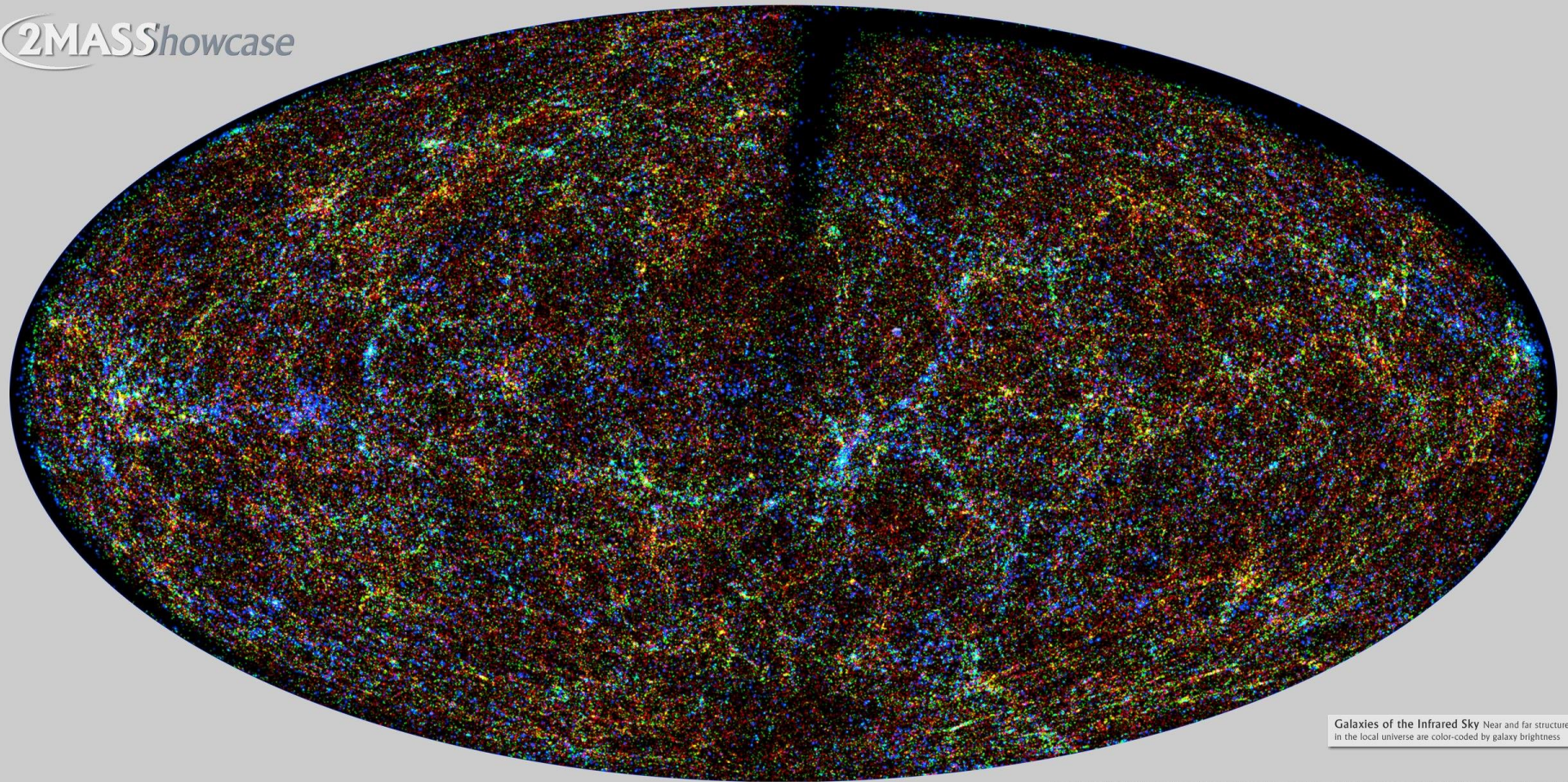
Arno Penzias and Robert Wilson. Their discovery of **the cosmic microwave background** won for them the Nobel Prize in physics in 1978.

Экспериментально
его существование
было подтверждено в
1965 г. $T = 2.725 \text{ K}$
(relict photons now
represent radio waves).

$$T = 2.725^\circ\text{K}, \quad \frac{\delta T}{T} \sim 10^{-5}$$



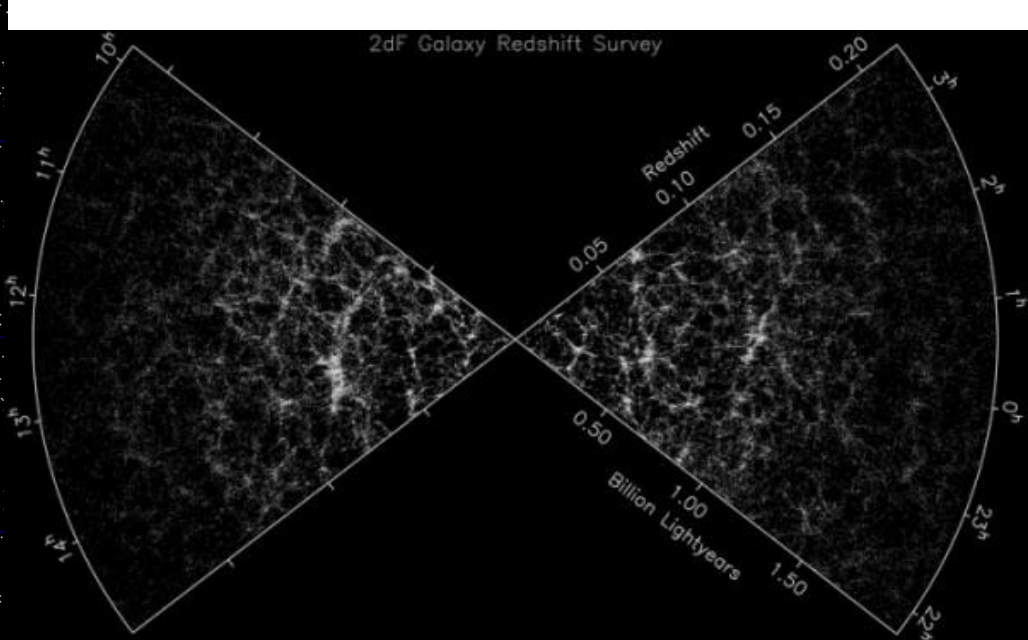
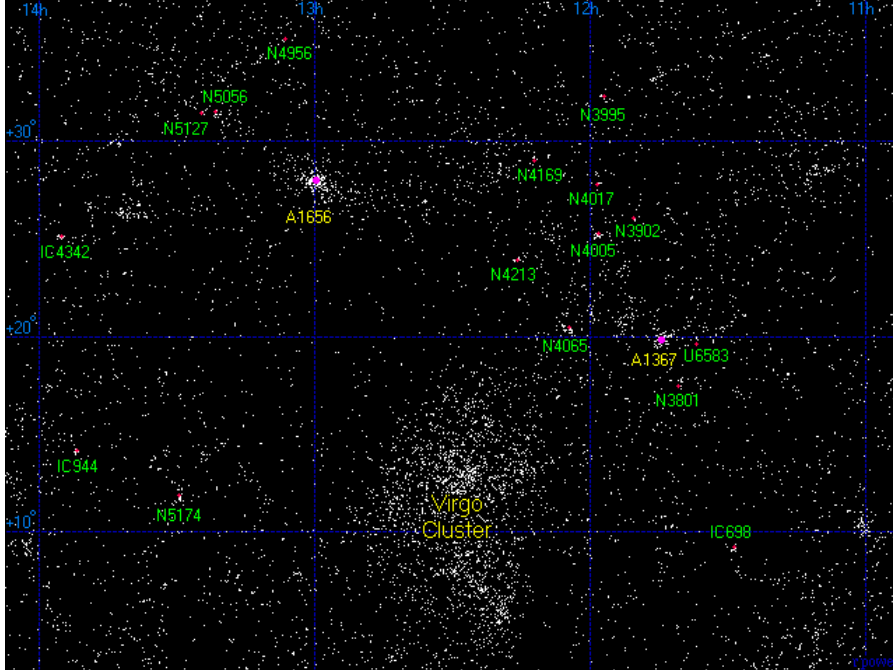
This temperature now is insignificant (below than temperature of fluid helium), in past it was much more. During dilating the Universe cools down. In the past Universe was hot, dense and fast expanding.



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 - так она выглядит в инфракрасных лучах с длиной волны 2,2 мкм — 1 600 000 галактик, зарегистрированных в Extended Source Catalog как результате Two Micron All-Sky Survey. 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.



Если выделить во Вселенной «кубы» с ребром 200 Мпс, в них материя распределена однородно.

?? Как один «куб» узнает о том, как распределена материя в другом «кубе»?

1981 г – первая модель инфляционной Вселенной предложена Аланом Гутом. Дальнейшая разработка - Андрей Линде, Вячеслав Муханов, ...

Модель хаотической инфляции: если на ранних этапах было состояние, когда Вселенная начинает расширяться быстро (по экспоненте), то планковский объем (10^{-35}) расширится до объема современной Вселенной.

в 1998 году две группы астрофизиков - одна в США, а другая в Австралии - почти одновременно обнаружили, что самые далекие сверхновые светят не так ярко, как это ожидалось, исходя из того, что Вселенная заполнена материей, гравитирующей по закону Ньютона, то есть обратно пропорционально квадрату расстояния.

Supernova 1994D, NGC 4526



Это означало, что они расположены от нас дальше, чем должны были бы находиться, если бы Вселенная расширялась в поле обычных гравитационных сил.

Таким образом, с достоверностью 99% можно утверждать, что во Вселенной должна быть еще какая-то дополнительная энергия, способная на космологических расстояниях противостоять гравитационному притяжению материи. Она и есть то, что стали понимать под словами "темная энергия".

Возникновение спиральных рукавов галактик



Попытки классифицировать галактики начались одновременно с обнаружением первых туманностей со спиральным узором лордом Россом в 1845-50 гг. Впрочем, в то время господствовала теория, согласно которой все туманности принадлежат нашей Галактике. То, что ряд туманностей имеет негалактическую природу, было доказано лишь Э.Хабблом в 1924 году. Таким образом, галактики классифицировали также, как и галактические туманности. В ранних фотографических обзорах доминировали спиральные туманности, что позволило выделить их в отдельный класс.

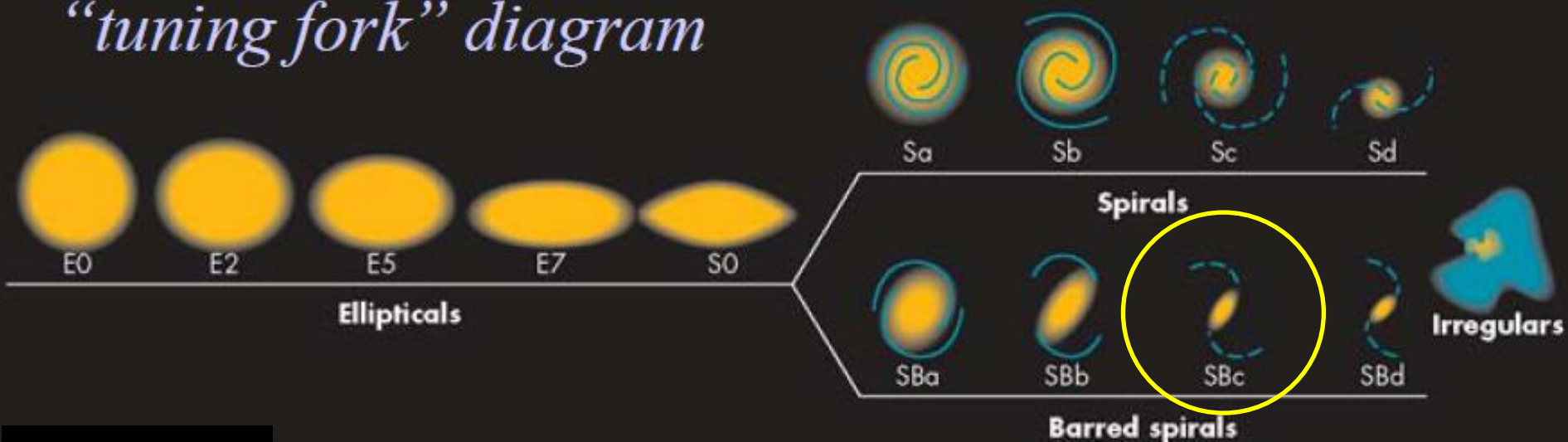
В 1888 году А. Робертс выполнил глубокий обзор неба, в результате которого было обнаружено много эллиптических бесструктурных и очень вытянутых веретенообразных туманностей. В 1918 году Г. Д. Кёртис выделил в отдельную группу спирали с перемычкой и кольцеобразной структурой в отдельную Ф-группу. Кроме того, он интерпретировал веретенообразные туманности как спирали, видимые с ребра.

Последовательность Хаббла — это морфологическая классификация, предложенная Эдвином Хабблом в 1926 году и модифицированная им же в 1936 году, известная под названием Камертон Хаббла, поскольку традиционная иллюстрация этой последовательности имеет сходство с этим инструментом.

В своей классификации Хаббл разделил все галактики на 3 обширных класса, основываясь на их внешнем виде на фотографических пластинках, экспонированных в синем фильтре (В).

Хаббловская схема классификации галактик по форме и морфологическим типам (XX век)

"tuning fork" diagram



Краснее
Мало
газа
Балджи



Голубее
Много
газа
Балджи
слабее

Мир галактик

Диаграмма Хаббла:

XXI век

More information can be found at:
<http://sings.stsci.edu/>

Ellipticals

Irregulars

Unbarred Spirals

Intermediate Spirals

Barred Spirals

Green=IRAC 8 μ m
(aromatic features from dust grains/molecules)
Red=MIPS 24 μ m (warm dust)

Robert Kennicutt, Jr. (Principal Investigator), Daniela Calzetti (Deputy Principle Investigator), Charles Engelbracht (Technical Contact), Lee Armus, George Bendo, Caroline Bot, Brent Buckalew, John Cannon, Daniel Dale, Bruce Draine, Karl Gordon, Albert Grauer, David Hollenbach, Tom Jarrett, Lisa Kewley, Claus Leitherer, Aigen Li, Sangeeta Malhotra, Martin Meyer, John Moustakas, Eric Murphy, Michael Regan, George Rieke, Marcia Rieke, Helene Roussel, Kartik Sheth, J.D. Smith, Michele Thornley, Fabian Walter & George Helou



Эллиптические — имеют форму сфероида или удлинённой сферы. На небе, где мы можем видеть только два из трёх измерений, эти звёздные острова овальные и имеют форму дисков. Их поверхностная яркость уменьшается, по направлению от центра. Чем больше число в классификации эллиптических галактик, тем большую форму эллипса они имеют. Так, например по классификации E0 — идеально круглая, а E7 в форме овала. Эллиптическая шкала варьирует от E0 до E7.



Далее приводится часть лекции
профессора А.С. Расторгуева
«Млечный Путь и другие
галактики»

Примеры эллиптических галактик



Гигантская эллиптическая
галактика (скопление в Деве)

M87

E1

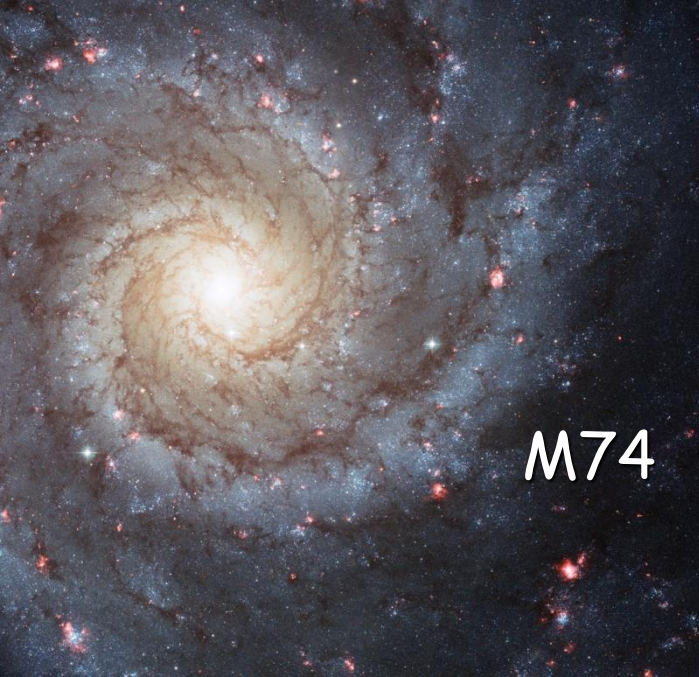
Спиральные состоят из трех основных компонентов: балдж, диск и гало.

Балдж (выпуклость) находится в центре галактики. Она содержит, в основном, старые звезды. Диск состоит из пыли, газа и молодых звезд.

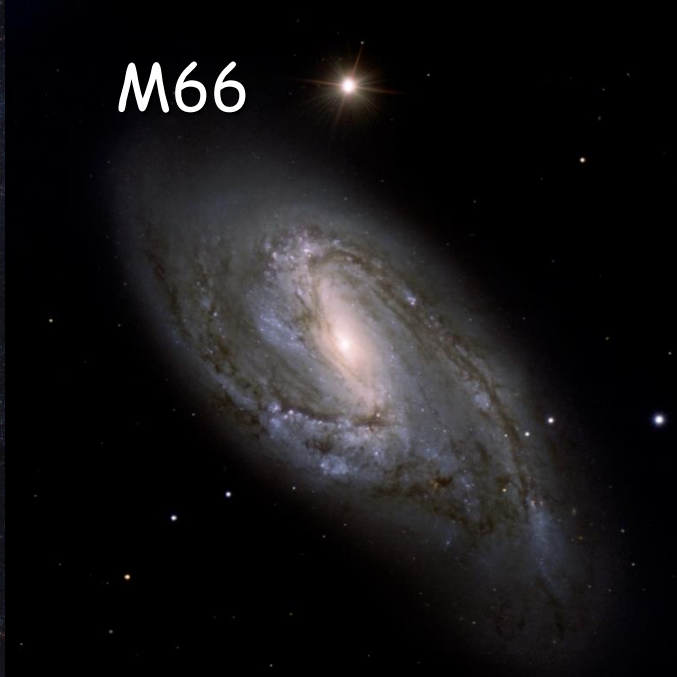
Диск образует ряд структур. Наше Солнце, например, находится в руке

Ориона. Гало — свободные, сферические структуры, расположенные вокруг балджа. Гало содержит старые звездные скопления, известные как шаровые скопления

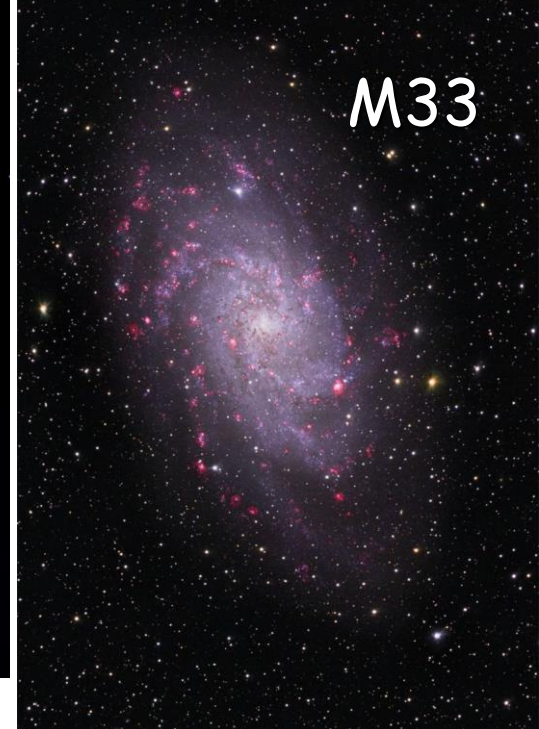




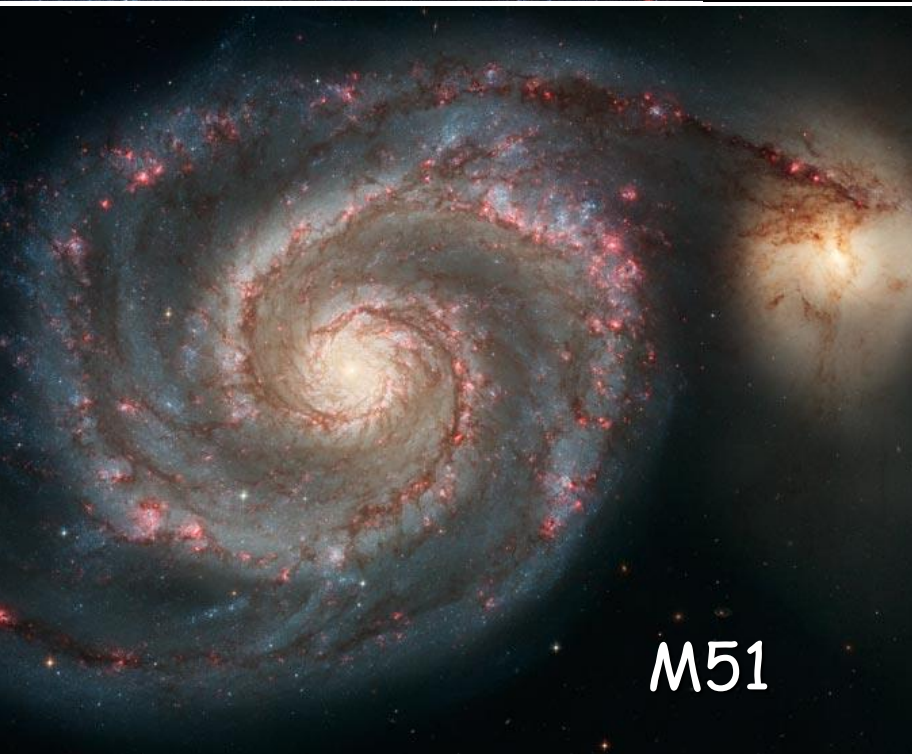
M74



M66



M33



M51



M31

NGC1097

NGC4526

NGC1891

M95

NGC5866

S0 это промежуточный тип между E7 и спиральными Sa.

Они отличаются от эллиптических, поскольку имеют выпуклость и тонкий диск, но отличаются от Sa, потому что они не имеют спиральную структуру. S0 галактики, также известны как линзовидные



Нормальные спиральные галактики (S)



NGC 1201

Type S0



NGC 2841

Type Sb



NGC 2811

Type Sa



NGC 3031 M81

Type Sb



NGC 488

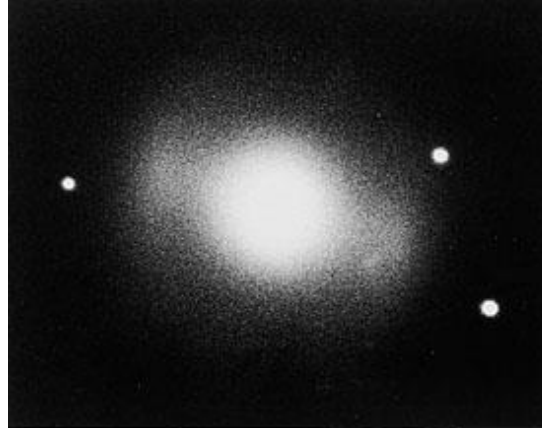
Type Sab



NGC 628 M74

Type Sc

Спиральные галактики с перемычкой ("баром", SB)



NGC 2859

Type SB0



NGC 2523

Type SBb(r)



NGC 175

Type SBab(s)



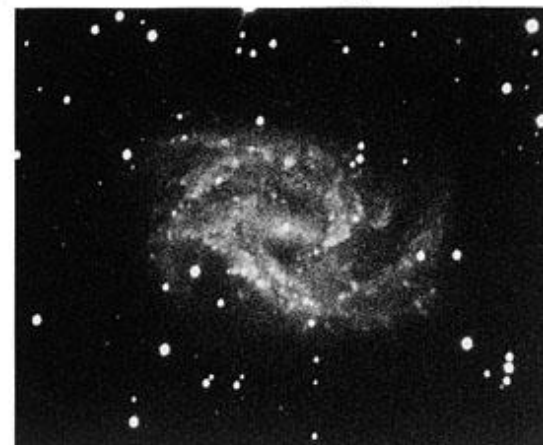
NGC 1073

Type SBc(sr)



NGC 1300

Type SBb(s)



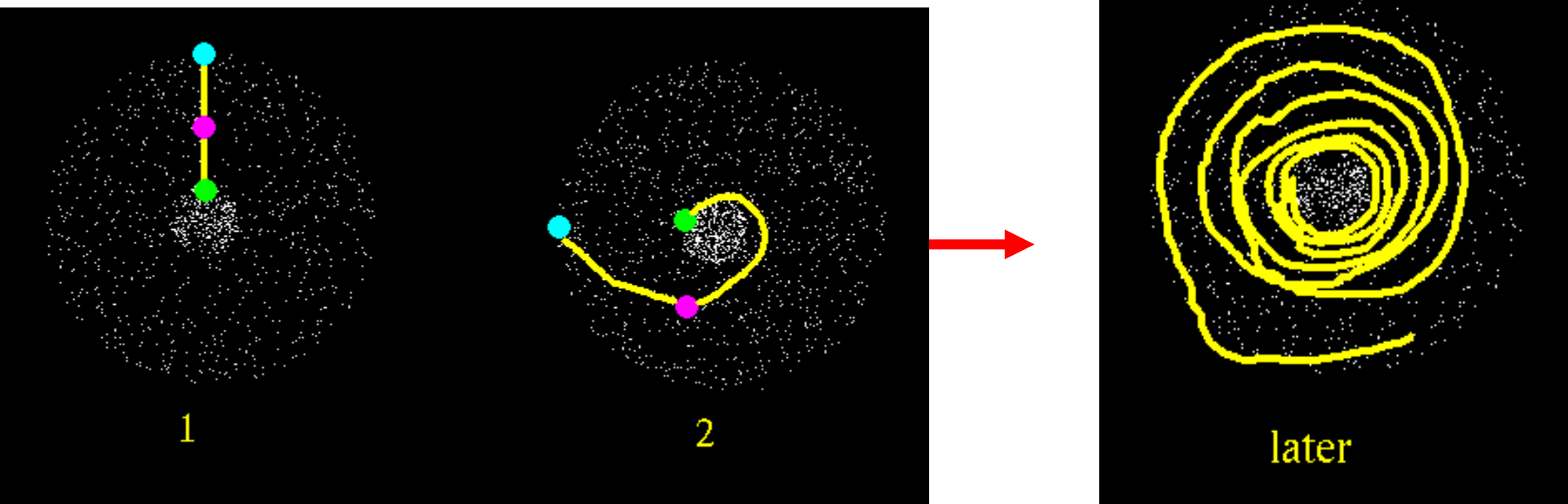
NGC 2525

Type SBc(s)

Природа спирального узора в галактиках

Почти все гигантские дисковые галактики обладают спиральной структурой: долгоживущие ?

Спиральные рукава не могут вращаться с той же скоростью, что и диск, иначе бы они быстро "скрутились" в тугое кольцо:



Угловая скорость вращения диска падает к периферии

- Спиральные рукава – не материальные образования (т.е. не состоят всё время из одних и тех же объектов) !

Альтернатива: твердотельное вращение

В разные моменты времени спиральные рукава включают разные звезды !



Спиральные рукава представляют собой **волны плотности**. Типичная амплитуда волн $\sim 10\%$ от средней плотности

Вращающийся газо-звездный диск обладает упругими свойствами и разрешает распространение волн

Большое число спиральных галактик
означает, что спиральный узор может
быть долгоживущим



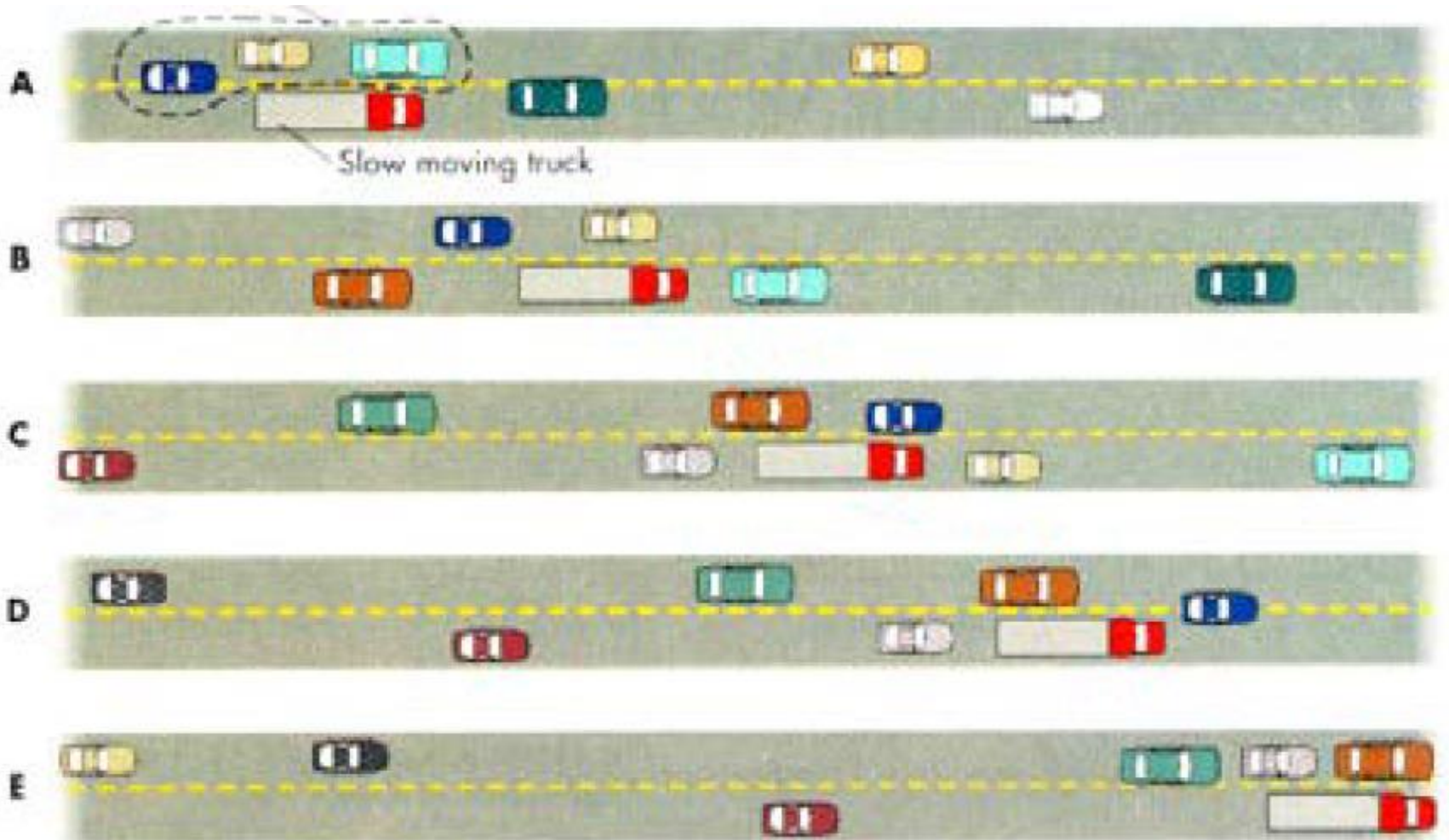
Спиральные волны плотности считаются
"квазистационарными", т.е.

самоподдерживающимися

(Линдблад 1963, Линь и Шу 1964-70)

Простой пример волны плотности

- Медленно едущая фура на автострате стимулирует **волну замедления**:



Типы спирального узора

- "Мелкие волны" - флоккулентный (хаотический) узор небольшой амплитуды
- "Глубокие волны" - "grand design", или глобальный спиральный узор большой амплитуды, "обнимающий" всю галактику



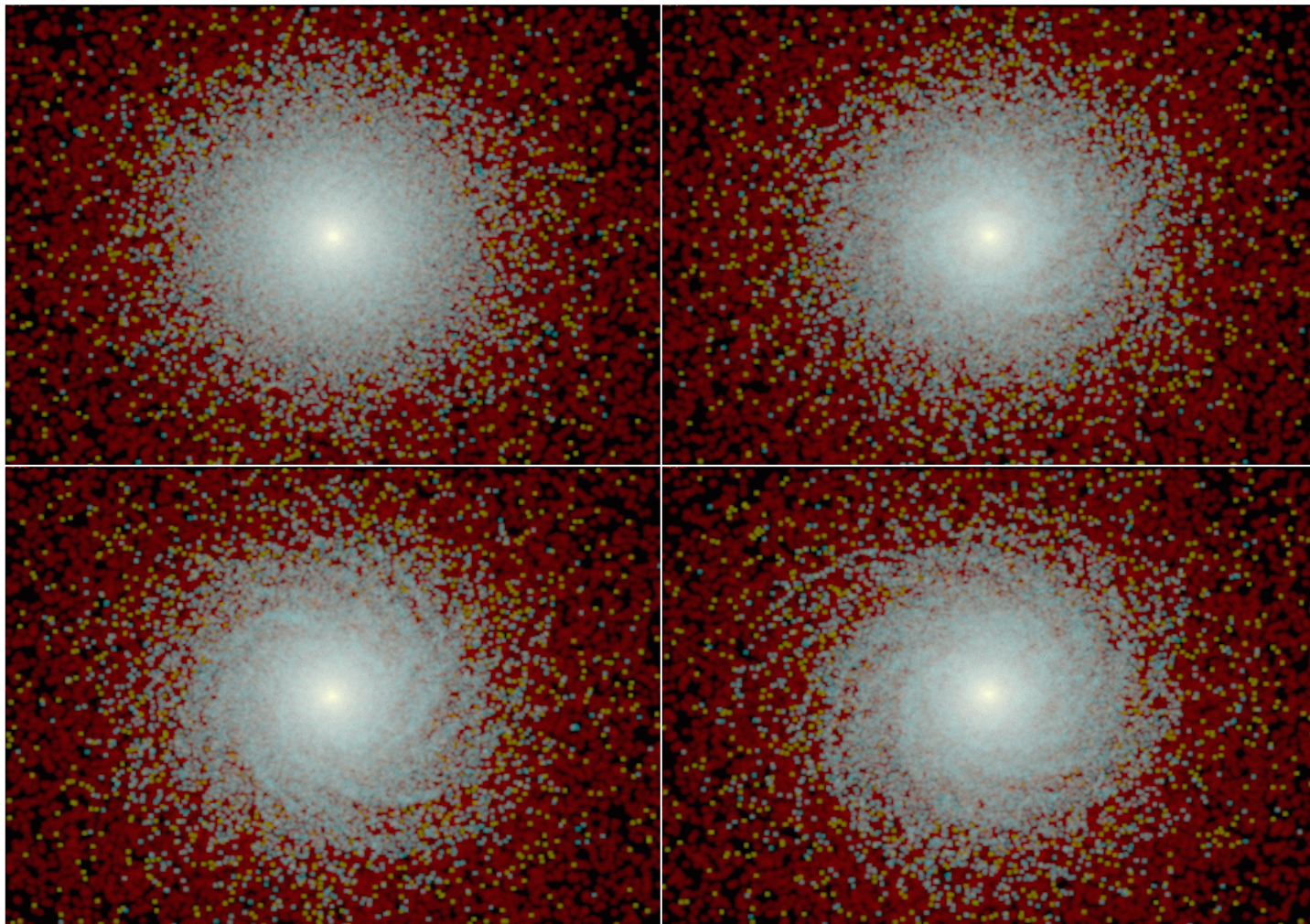
NGC 2841

Sb SA(r)B

**Пример
флоккулентного
спирального узора**

Флоккулентный спиральный узор

Swing amplification (усиление при закрутке) как механизм возникновения флоккулентного спирального узора



(Barnes)

- **Флоккулентный узор:** области звездообразования или флуктуации плотности "растягиваются" дифференциальным вращением галактического диска, усиливая контраст плотности
- Характерное время жизни такого узора невелико (несколько галактических лет), он периодически возникает и рассасывается



Глобальный узор (Grand Design)

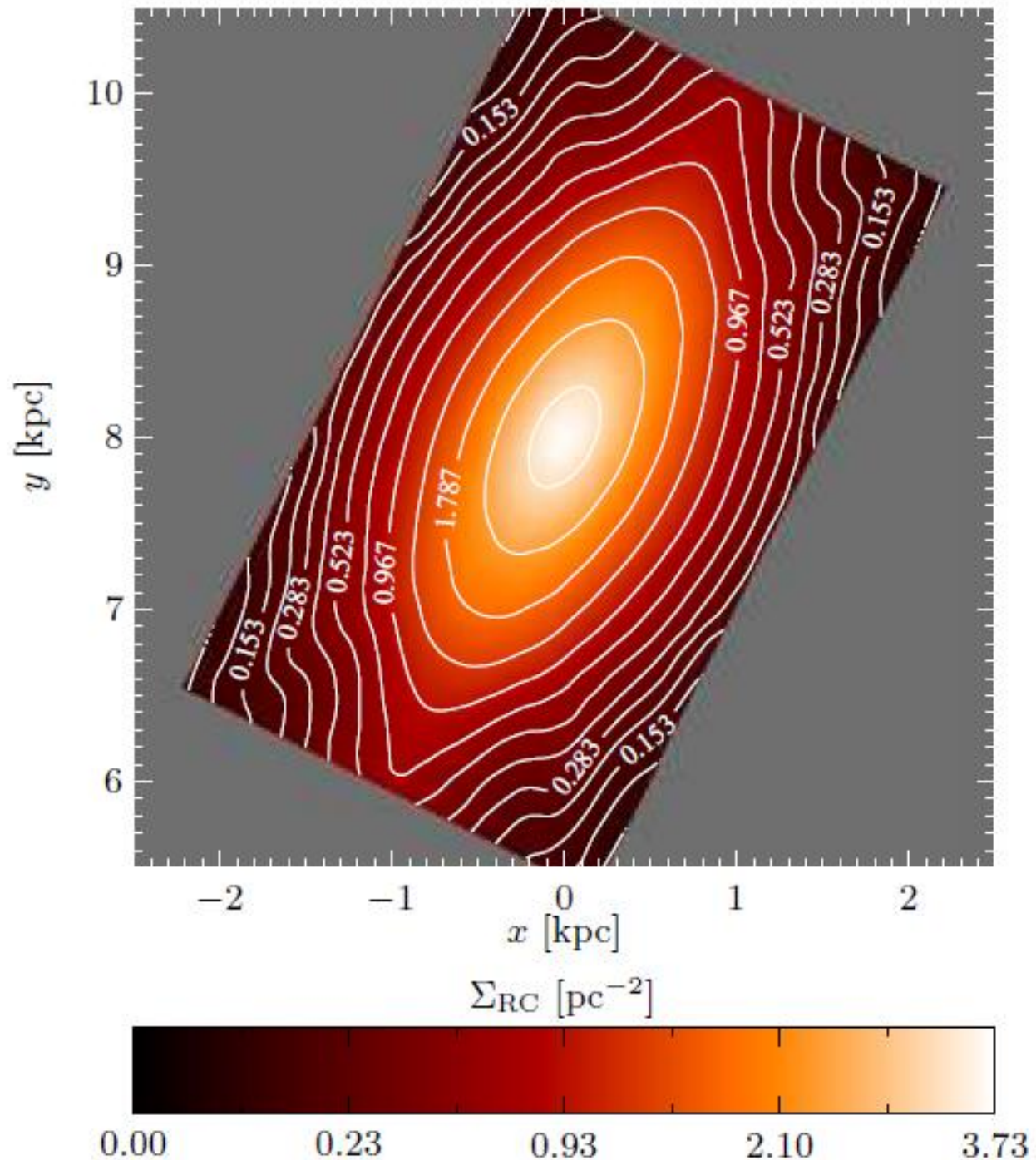
- Возможные механизмы возникновения глобального узора:
 - Влияние окружения (преимущественно двухрукавный **материальный** приливный узор)
 - Асимметричное распределение масс (влияние бара)
 - Развитие гравитационных неустойчивостей

Механизмы поддержания узора не до конца поняты и изучены

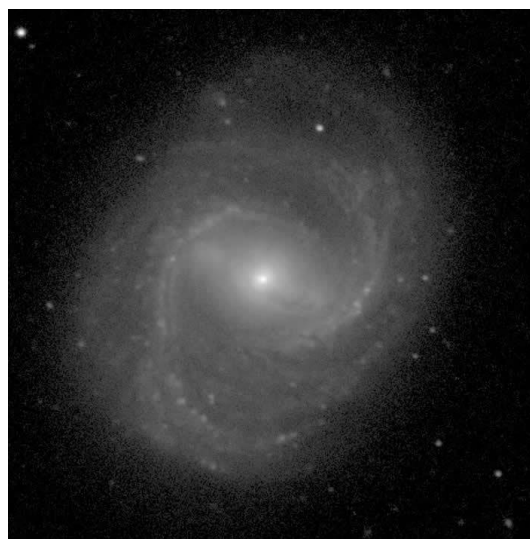
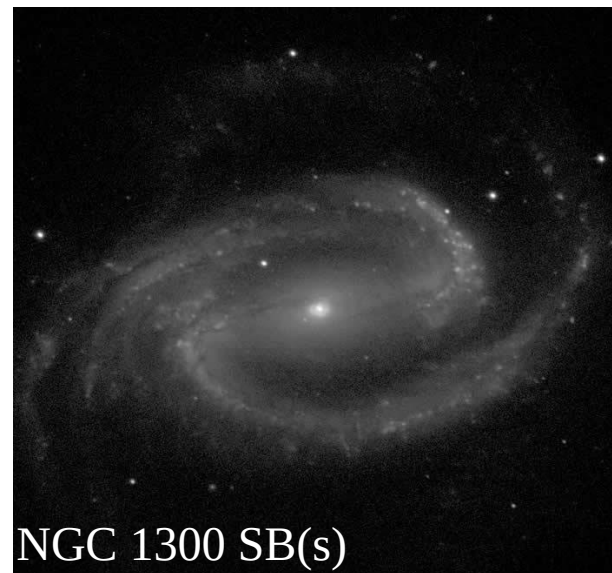
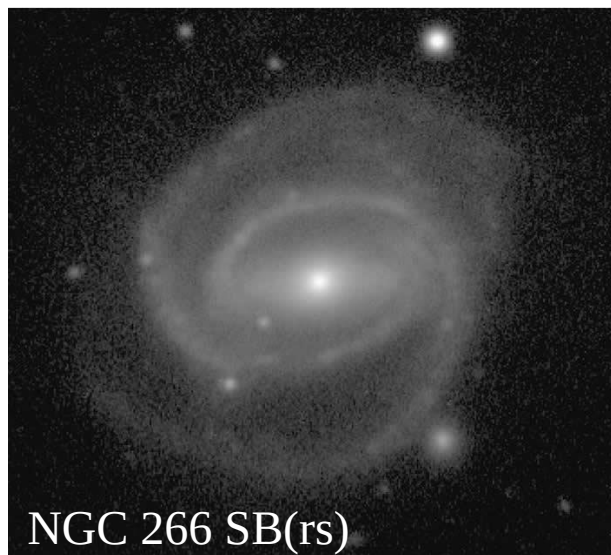
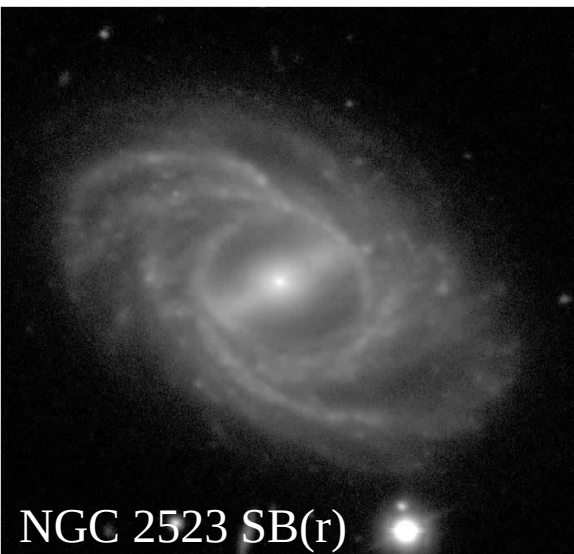


- Связь спиральных рукавов с баром:
- Крупномасштабный бар как **генератор спирального узора**

- Примерно так выглядит бар Млечного Пути, если смотреть на диск «сверху» - со стороны северного полюса Млечного Пути
- Длина бара около 8 кпк
- (Солнце внизу)



Примеры галактик с барами и кольцами



Устойчивость диска и образование баров

Диски галактик относительно тонкие (~200 пк).
Чем больше скорости звезд, тем устойчивее "горячий"
диск по отношению к возмущениям.

Туумре (1964) вывел критерий устойчивости:

Диск устойчив,
если:

$$Q \equiv \frac{\kappa \sigma_r}{3.4 G I(r)} > 1$$

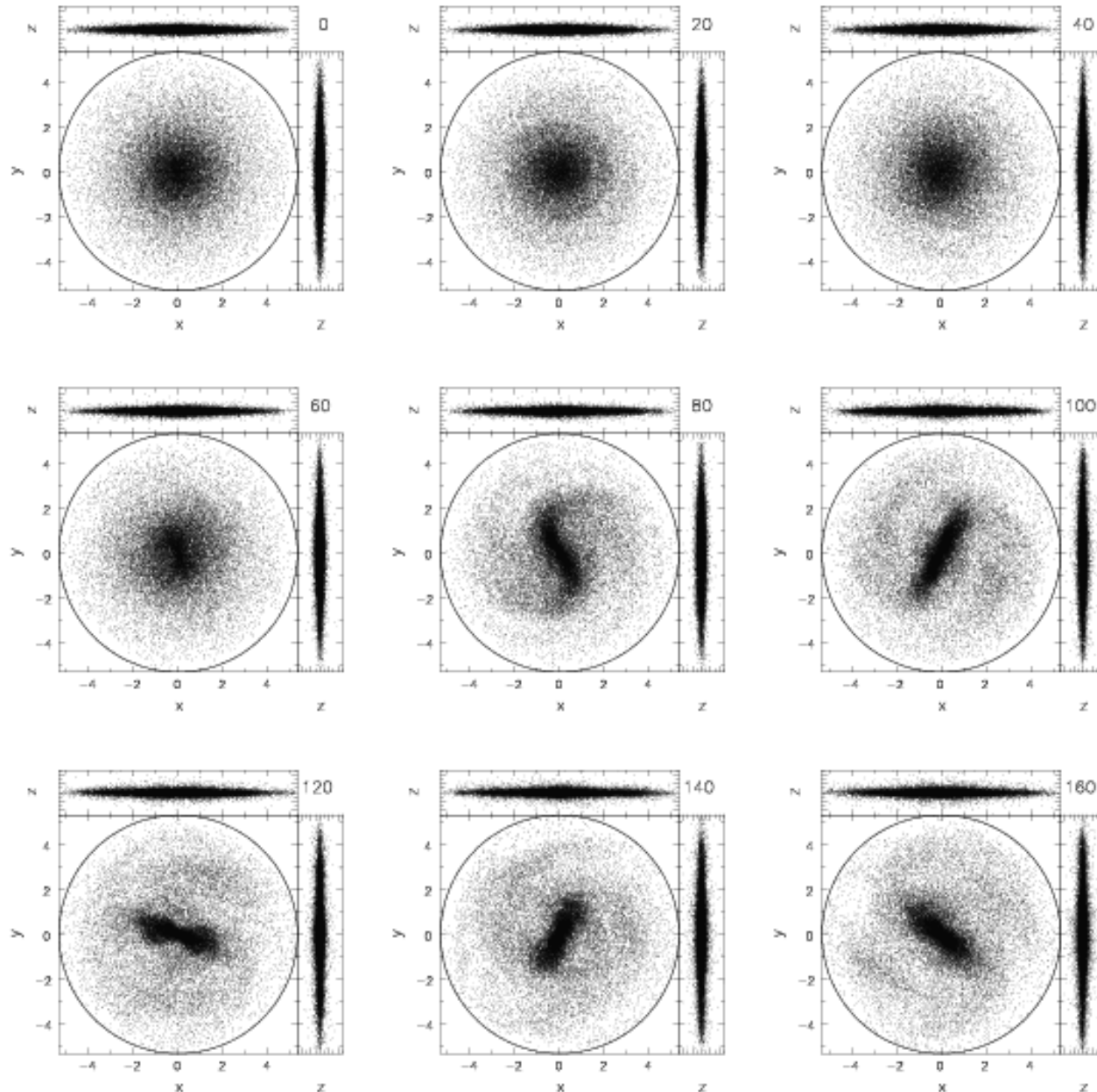
Дисперсия
скоростей

Параметр Q
устойчивости Туумре

Плотность массы

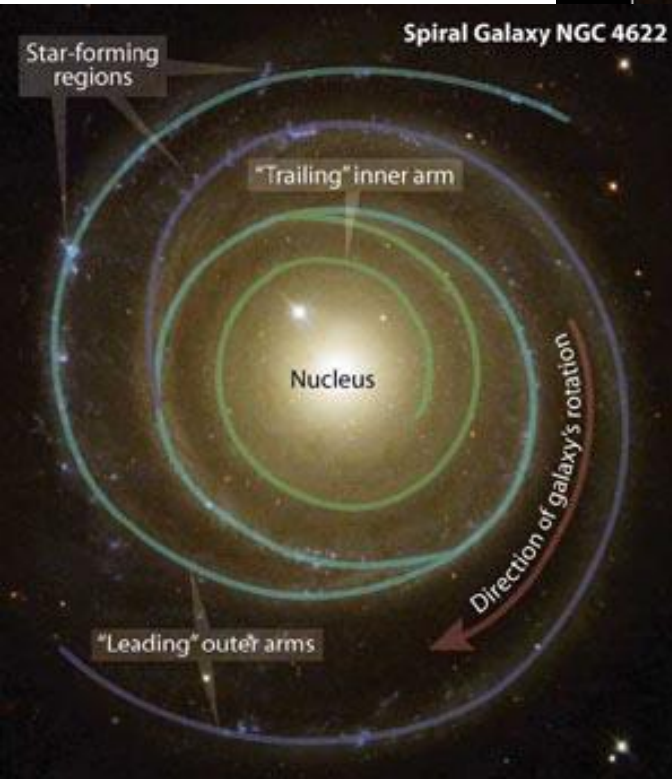


Если $Q < 1$, неустойчивость ведет к образованию временных спиралей и баров в звездных дисках:

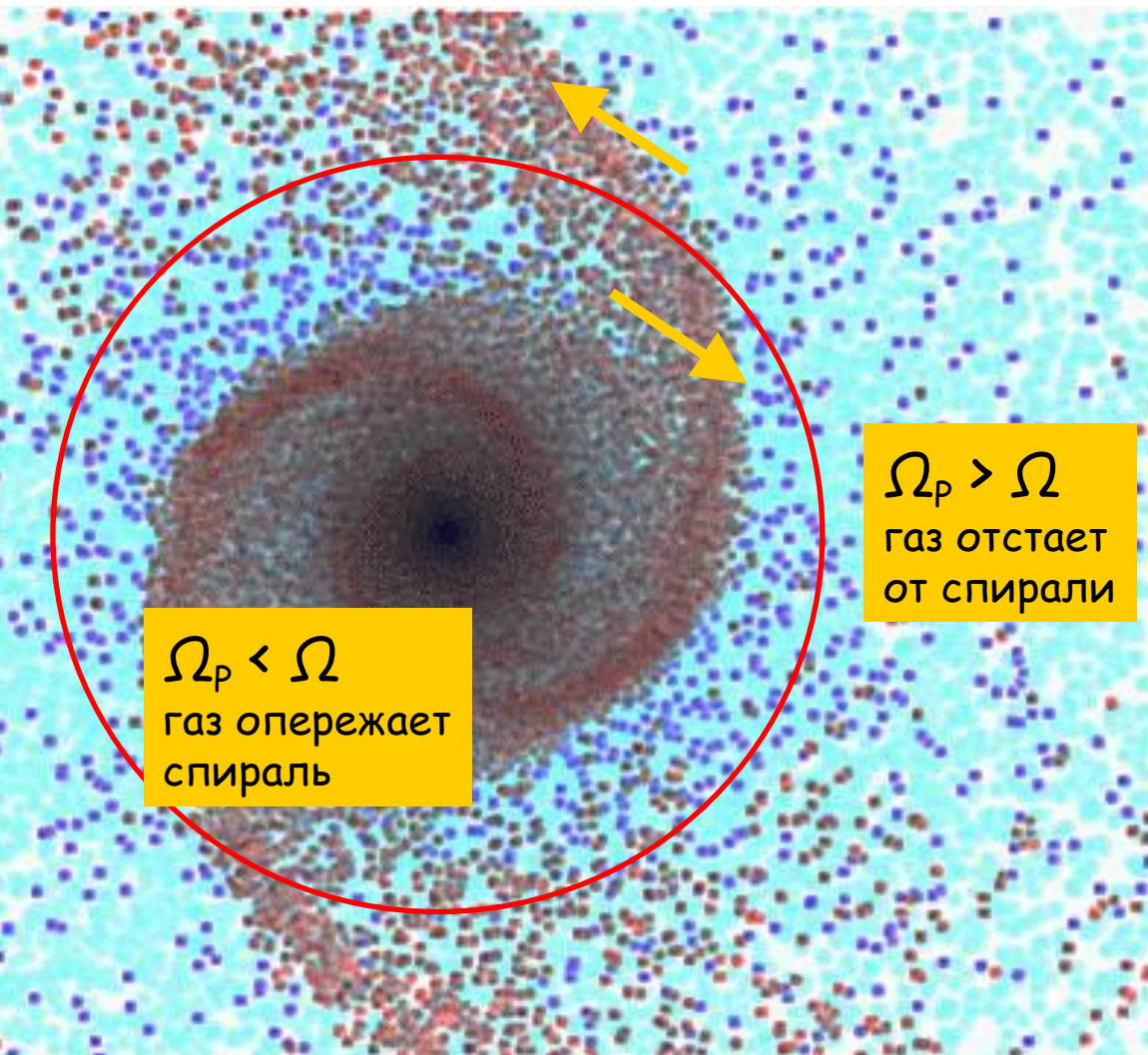


(Sellwood)

NGC4622:
галактика
с двумя
спиральными
узорами

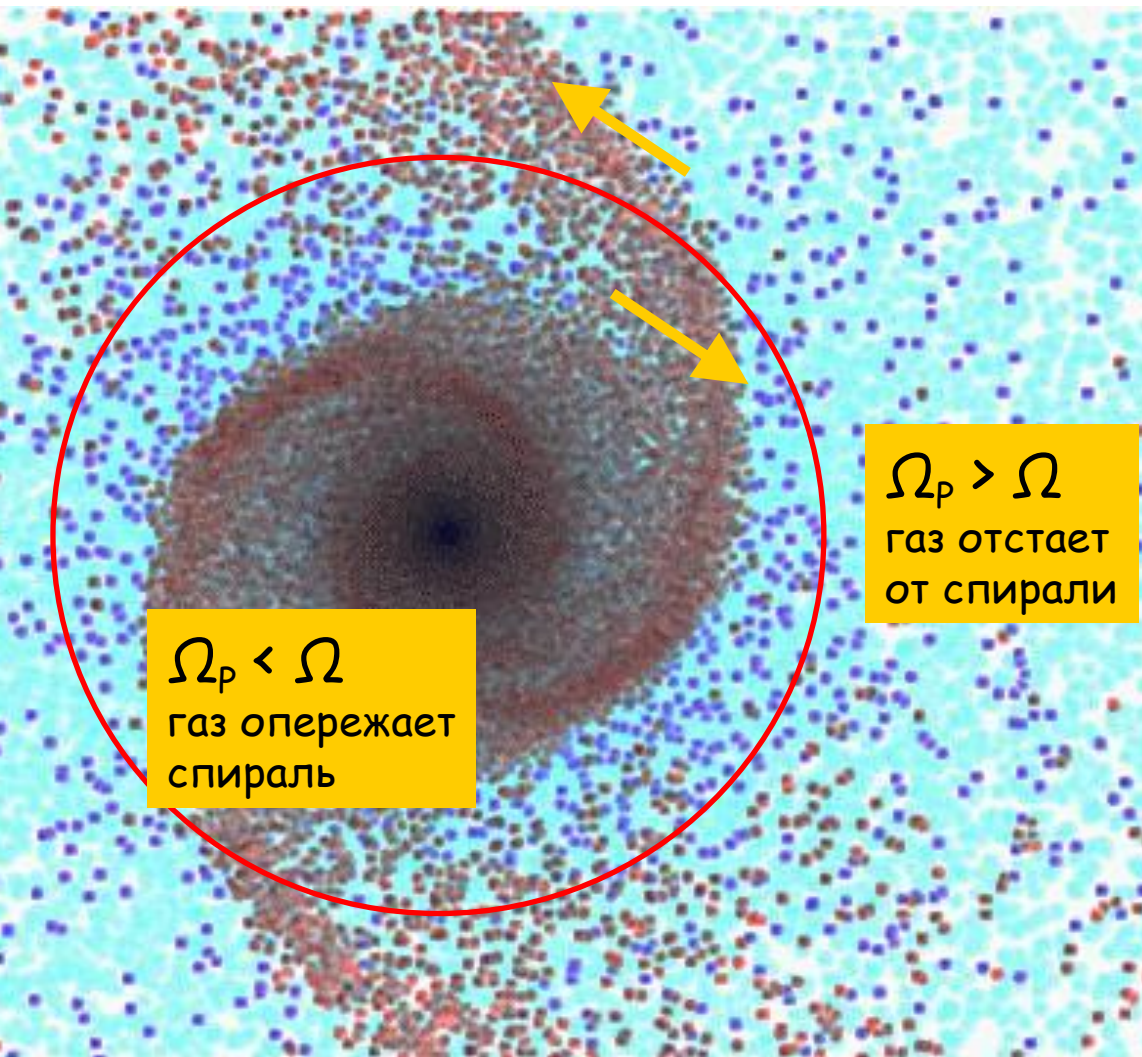


Спиральный узор и звездообразование



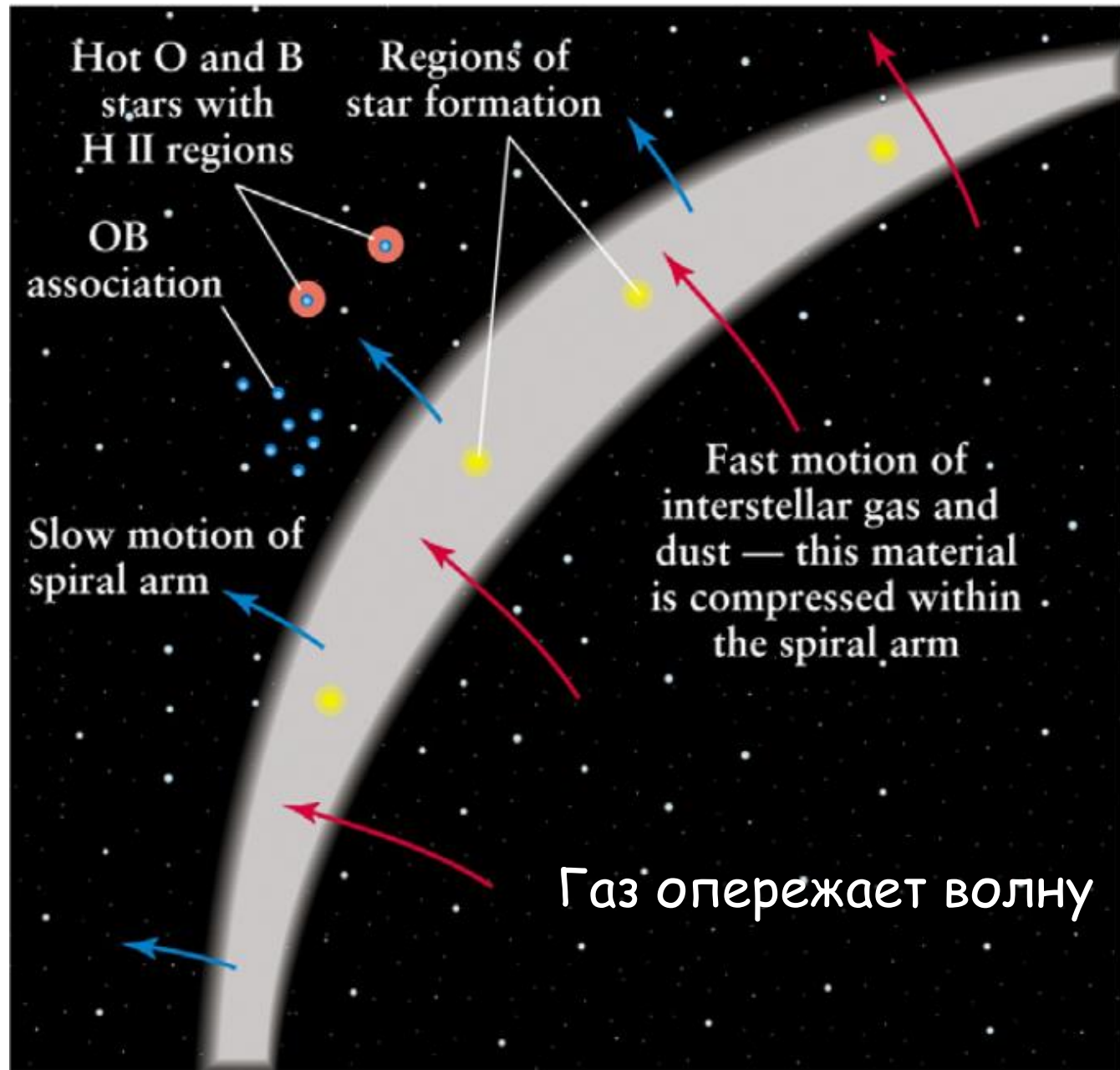
- Узор вращается твердотельно ($\Omega_p = \text{const}$)
- Диск вращается дифференциально (Ω падает с R)
- $\Omega_r = \Omega$ - **коротация** (синхронное вращение)
- Стрелки: скорость газа относительно спирального узора

Спиральный узор и звездообразование



- В месте встречи газа и спиральной ветви может возникнуть ударная волна, уплотнение газа и рождение звезд
- **До коротации:** молодые звезды на **внутренней** кромке рукава
- **После коротации:** молодые звезды на **внешней** кромке рукава

Звездообразование до коротации



Индикаторы темпа звездообразования:

Kennicutt, Ann Rev, 36, 189, 1998

I. Интенсивность континуума в УФ (мешает поглощение)

$$\text{SFR}(M_{\odot} \text{ year}^{-1}) = 1.4 \times 10^{-28} L_{\nu}(\text{ergs s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}).$$

II. Интенсивность эмиссии H α

$$\text{SFR}(M_{\odot} \text{ year}^{-1}) = 7.9 \times 10^{-42} L(\text{H}\alpha) (\text{ergs s}^{-1})$$

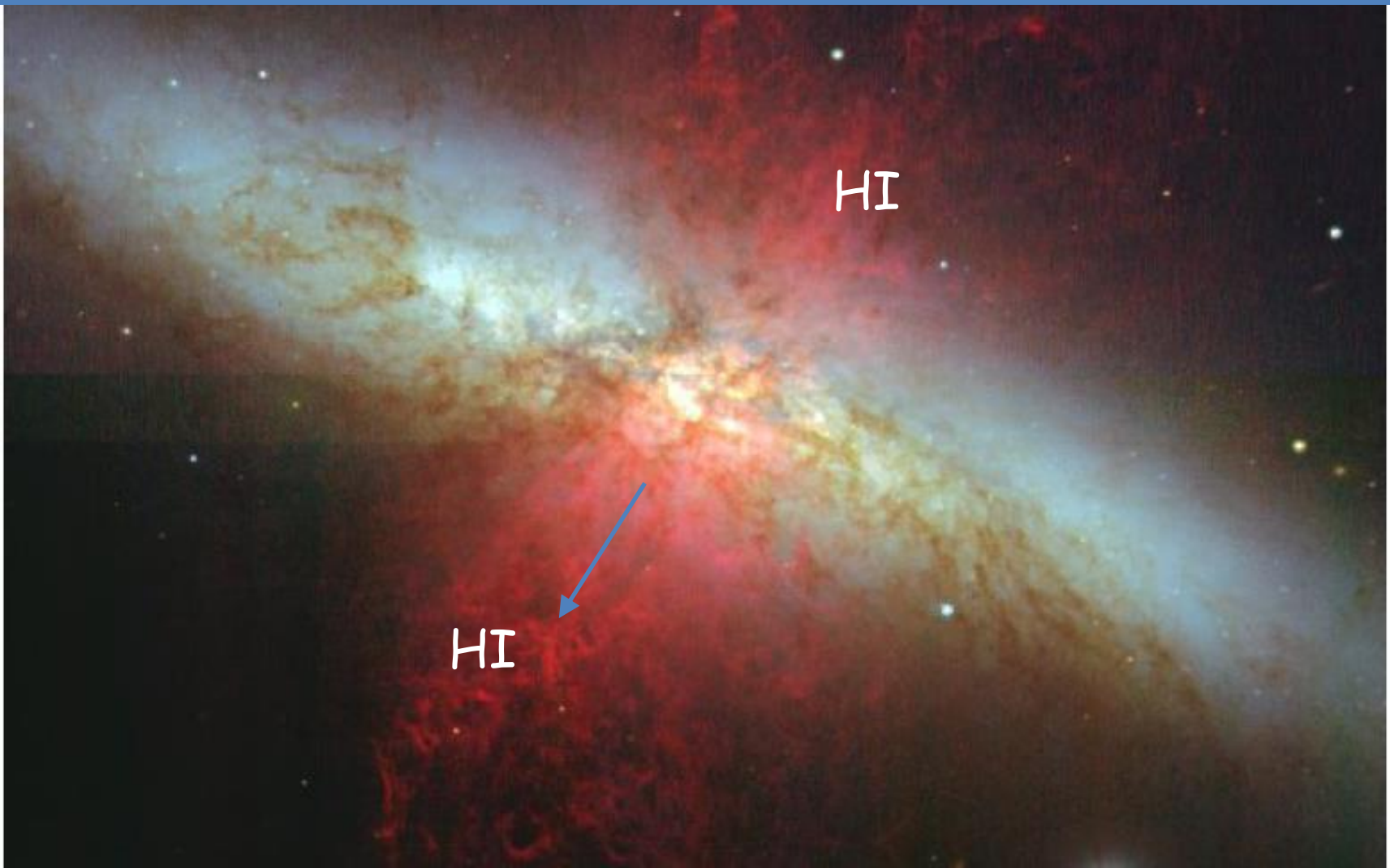
III. Интенсивность эмиссии OII 372.7 nm

$$\text{SFR}(M_{\odot} \text{ year}^{-1}) = (1.4 \pm 0.4) \times 10^{-41} L[\text{OII}] (\text{ergs s}^{-1}),$$

IV. Интенсивность континуума в дальнем ИК

$$\text{SFR}(M_{\odot} \text{ year}^{-1}) = 4.5 \times 10^{-44} L_{\text{FIR}} (\text{ergs s}^{-1}) (\text{starbursts}),$$

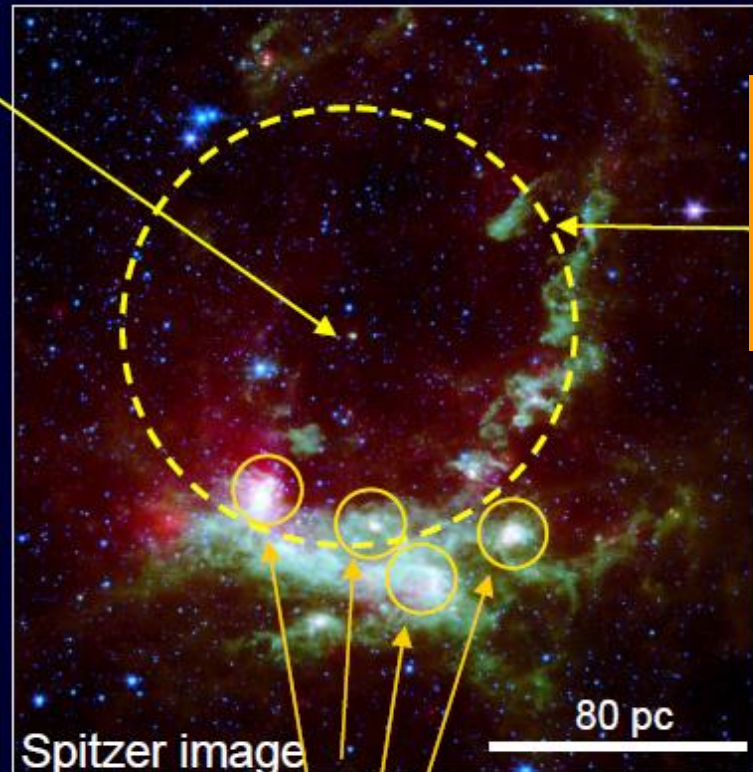
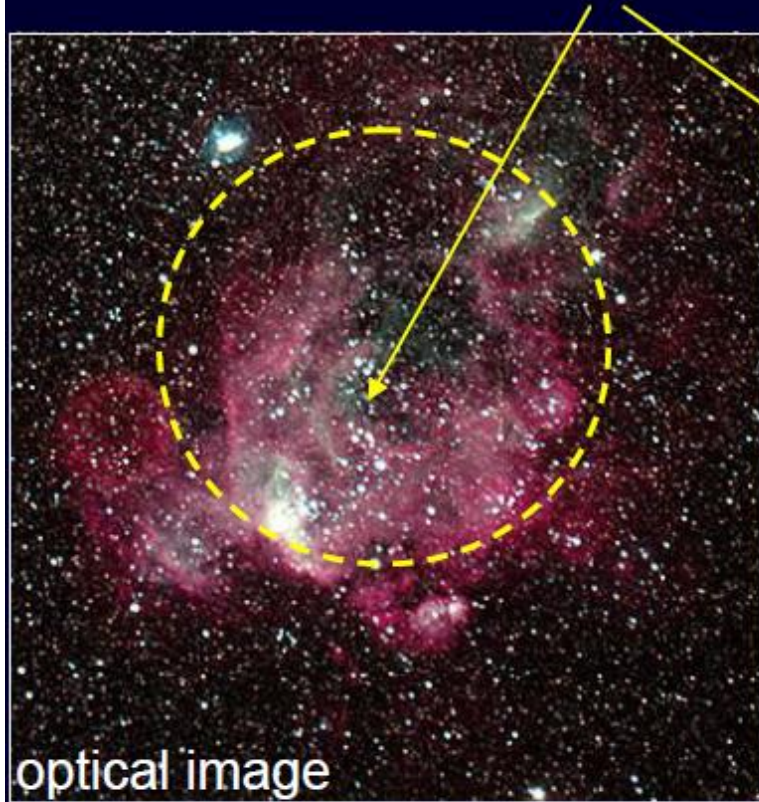
Мощная "вспышка" звездообразования в М82
Выброс нейтрального газа (HI) со скоростью ~ 300 км/с



M 82, a starburst galaxy, white/brown: stellar light and dust, red: hot expanding gas in $H\alpha$ (Subaru telescope)

Hen 206 (LMC)

OB association NGC 2018: age ~ 10 Myr



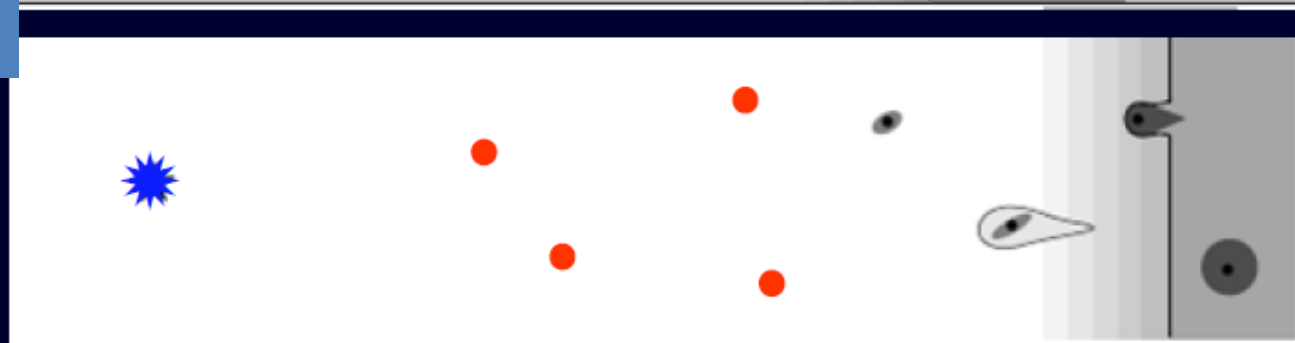
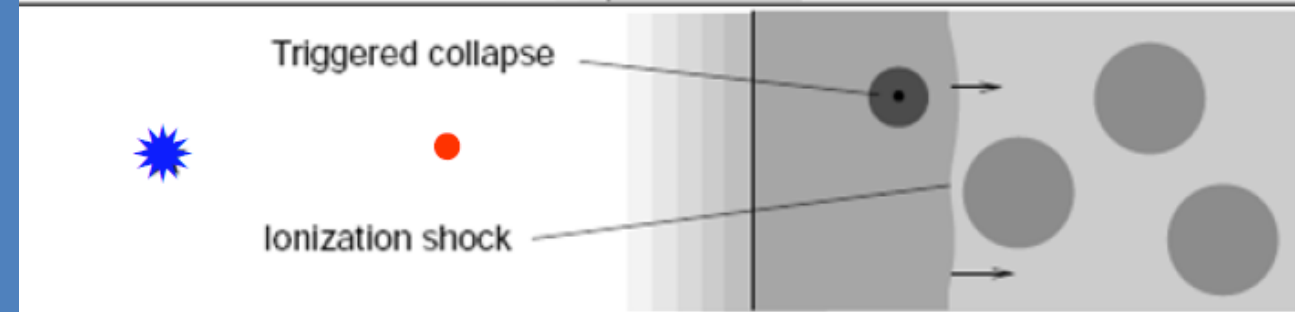
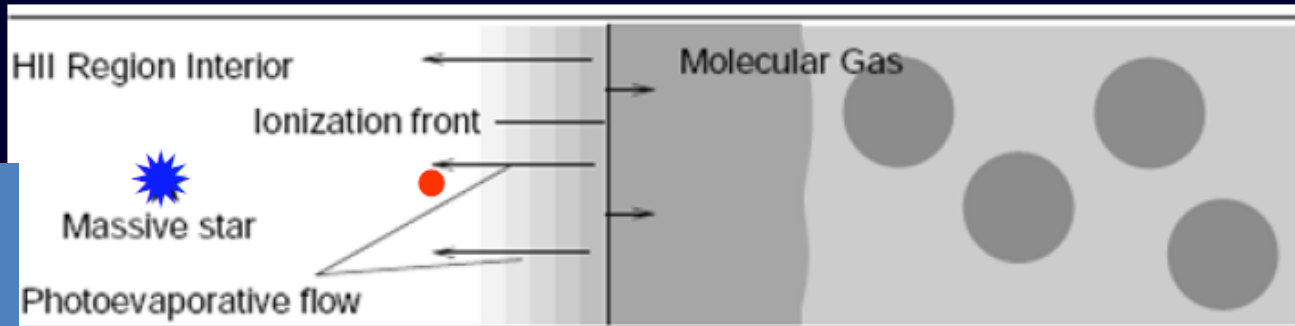
Расширение
оболочки HI
из-за SN II
 ~ 20 км/с

blue: 3.6+4.5 μ m, cyan: 5.8 μ m, green: 8.0 μ m, red: 24 μ m

Пример триггерного
(стимулированного)
звздообразования

Ударная волна
стимулировала
одновременное
звздообразование
в ассоциациях

1)



Не только SN
могут возбуждать
звздообразование,
но и излучение
массивных звезд:

Стимулированное
образование
звезд малой
массы

4)

Ages of

the low-mass stars:

3,

2,

1

Myr

Неправильные не имеют постоянной и симметричной структуры. Они делятся на две группы, IrrI и IrrII. IrrI имеют регионы HII, которые являются областями ионизированного водорода. Также в них много молодых горячих звезд. IrrII содержат большое количество пыли, которая блокирует большую часть света от звезд. Все это делает практически невозможным обнаружить отдельные звезды. Их форма, зачастую, является совершенно неправильной.



Дополнительно можно посмотреть:

- Владимир Сурдин. Галактики и их морфология

https://www.youtube.com/watch?v=DEqSvDN_Bw0&list=PLXjYPjDRKDj4wqL4rceb63nmVsyNK7Y6Y&index=36&t=1s

- Засов А.В. «Наша галактика: взгляд изнутри» https://www.youtube.com/watch?v=EqiBHvl4F_I

Литература

1. Воронцов-Вельяминов, Б.А. Астрономия. Базовый уровень. 11 класс: учебник. / Б. А. Воронцов-Вельяминов, Е. К. Страут. – 5-е изд., пересмотр. – М.: Дрофа, 2018.
2. Засов, А.В. Астрономия: 10-11 классы / А.В. Засов, В.Г. Сурдин. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2019
3. Кондакова, Е.В. Астрономия. Тетрадь-практикум. 10-11 классы: учеб. пособие для общеобразоват. организаций: базовый уровень // Е.В. Кондакова, В.М. Чаругин. – М.: Просвещение, 2018.
4. Левитан, Е.П. Астрономия. 11 класс: учеб. пособие для общеобразоват. организаций: базовый уровень. – М.: Просвещение, 2018.
5. Чаругин, В.М. Астрономия. 10-11 классы: учеб. пособие для общеобразоват. организаций: базовый уровень. – М.: Просвещение, 2018.