



ГАИШ МГУ

**Государственный
астрономический
институт имени
П. К. Штернберга**

175 лет

Цикл лекций

Звезды и галактики

**А. М. Черепашук
Ю. Н. Ефремов
В. М. Липунов
С. А. Ламзин
Н. Н. Самусь
С. Б. Попов
и др.**

Наша родная Галактика

Космический дом, в котором мы живем

Расторгуев Алексей Сергеевич,

**профессор кафедры экспериментальной астрономии
физического факультета МГУ,**

**зав. отделом изучения Галактики и переменных звезд
ГАИШ МГУ**

Содержание лекции:

- Что мешает изучению нашей Галактики и почему мы знаем о ней меньше, чем о других галактиках
- Измерение расстояний как основной способ изучения ее устройства
- Что нас окружает или что мы знаем о близких звездах и звездных скоплениях
- **Спиральный узор Галактики**
- **Галактическое гало – сфероид**
- Масса Галактики
- Орбиты звезд и скоплений
- «Нагрев» галактического диска
- Центр Галактики
- Соседи Млечного Пути
- Проекты, нацеленные на Галактику

1. Что мешает изучению нашей Галактики? Почему мы знаем о ней меньше, чем о других галактиках?

- Млечный Путь – гигантская спиральная галактика, похожая на знаменитую Туманность Андромеды (M31)
- Солнечная система располагается в толще диска, состоящего из звезд, пыли и газа
→ **сильное поглощение света**
- Поглядим на похожие и не похожие галактики



M74

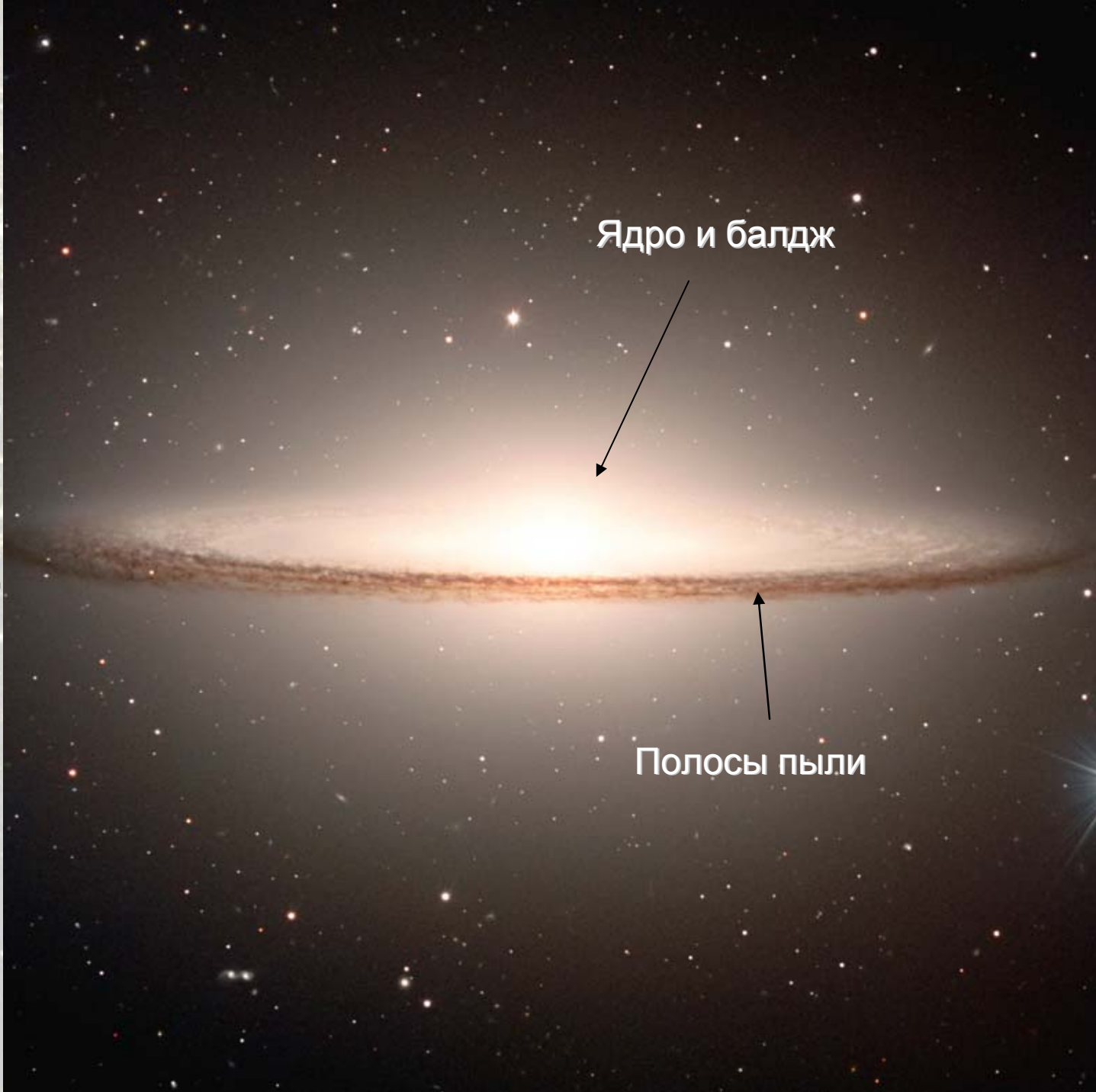


Ближайшая соседка – гигантская спиральная галактика в созвездии Андромеды (M31 = Мессье 31)



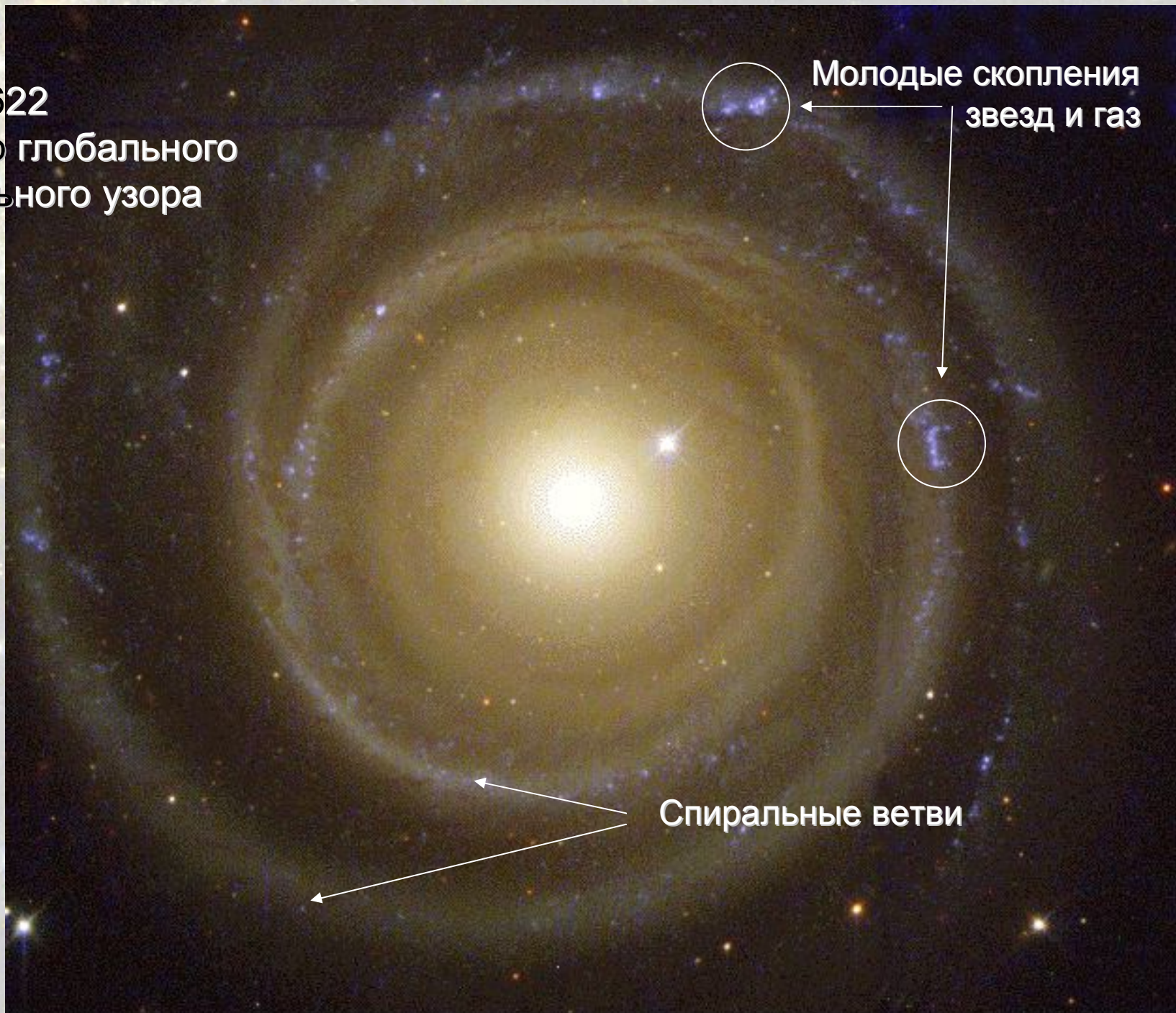
Так почти с
ребра выгля-
дит спираль-
ная галакти-
ка M104
«Сомбреро»

Темные поло-
сы – это пыль,
населяющая
тонкий диск
галактики и
спиральные
ветви

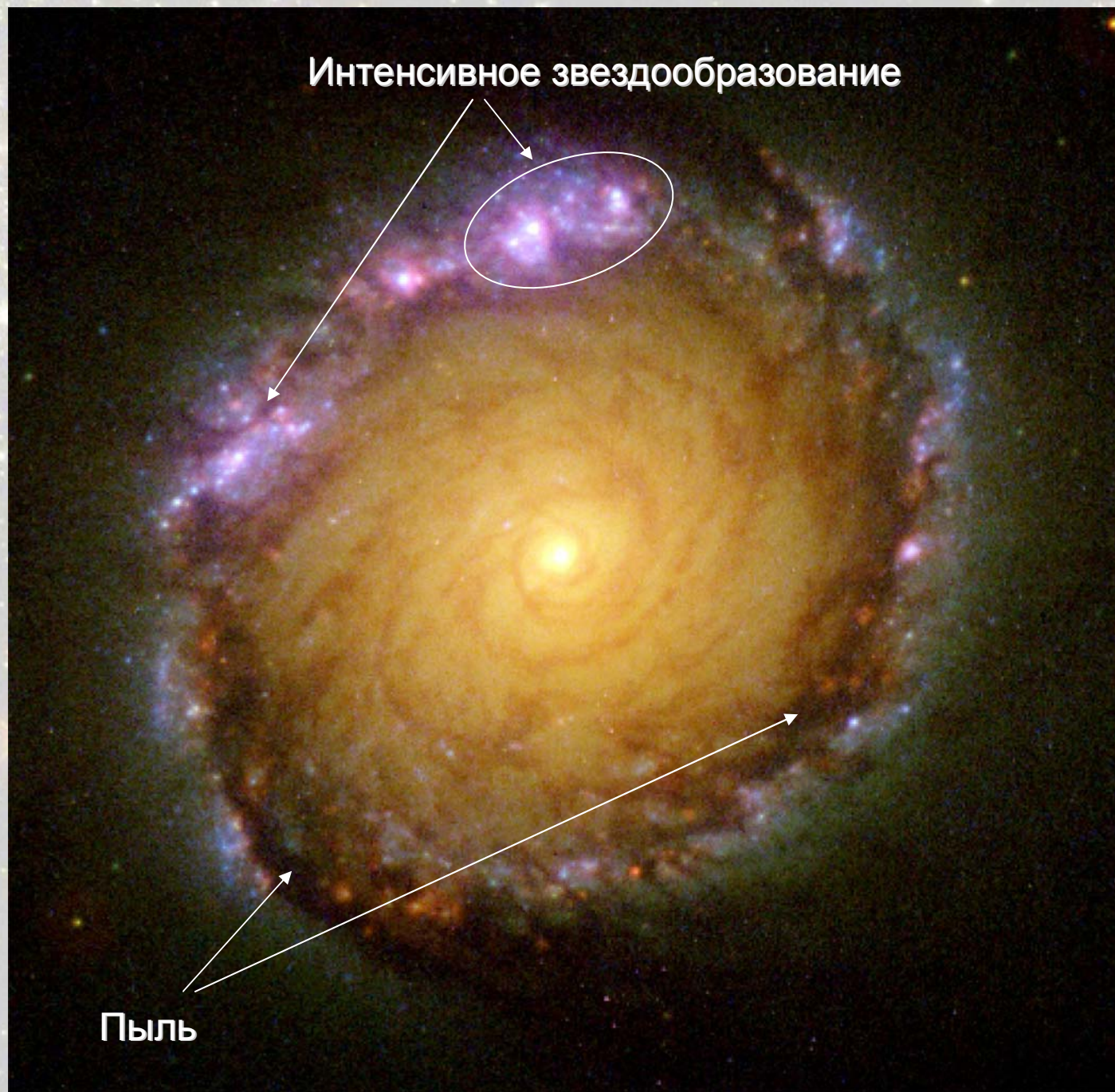


NGC 4622

Пример глобального
спирального узора



Спиральная галактика NGC1512, видимая почти плашмя. Пример фрагментарного спирального узора. На периферии идет рождение звезд.



Галактика NGC 6946



Возможно, так выглядит наш Млечный Путь



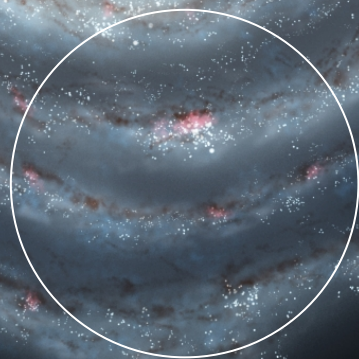
Область вокруг Солнца, доступная
оптическим наблюдениям

или так (журнал GEO):



ИЛИ ВОТ ТАК

Перемычка (бар)



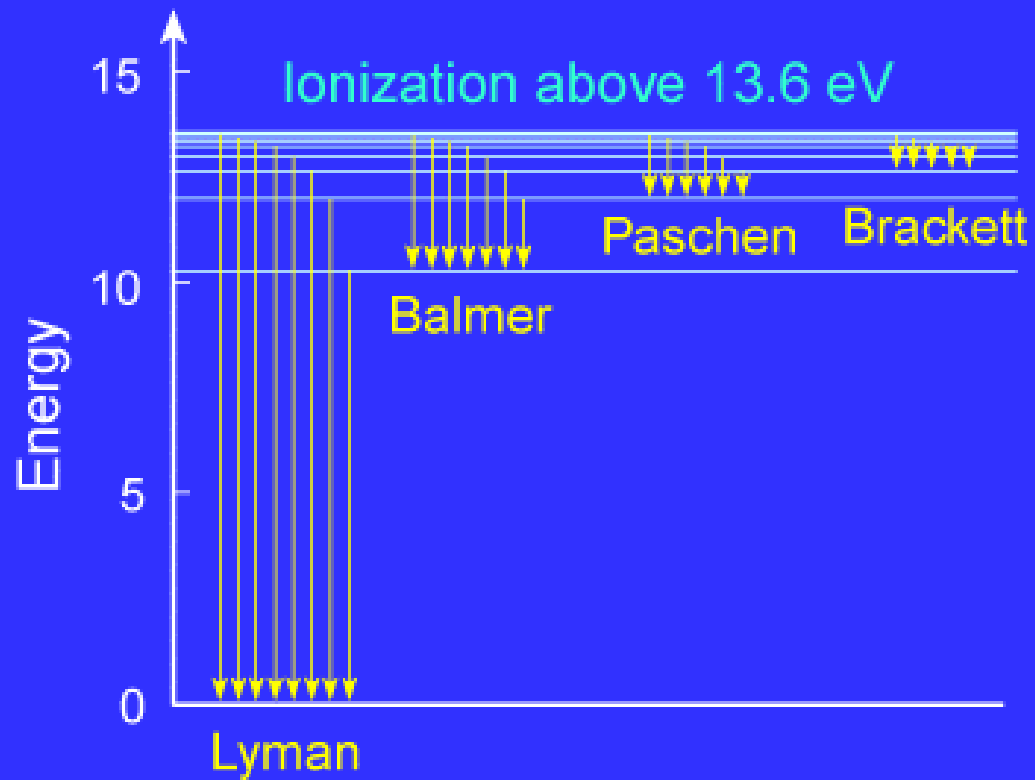


Гигантская эллиптическая галактика М87
в скоплении созвездия
Девы — на нее Млечный
Путь совсем не похож

Яркие точки — не
звезды, а шаровые
звездные скопления

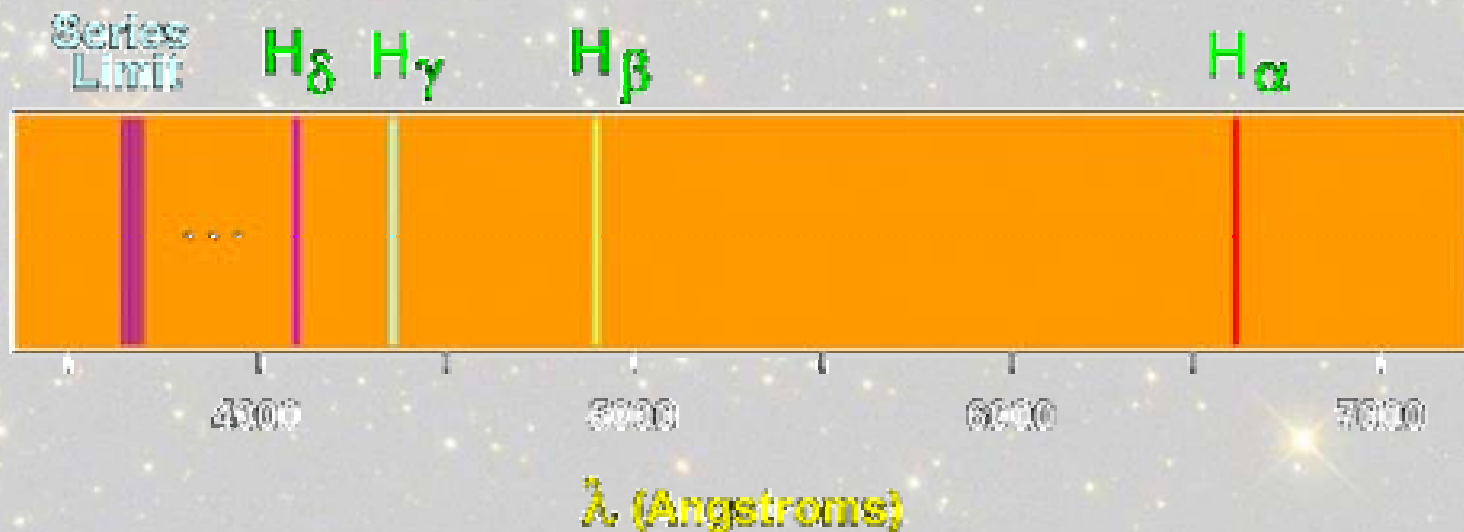
Наша спиральная Галактика

- Спиральный узор прослеживается по молодым объектам (горячим и ярким голубым звездам, звездным скоплениям и ассоциациям, облакам ионизованного водорода), потому что именно в спиральных рукавах идет образование массивных голубых горячих звезд, вызывающих свечение *ионизованного газа*.



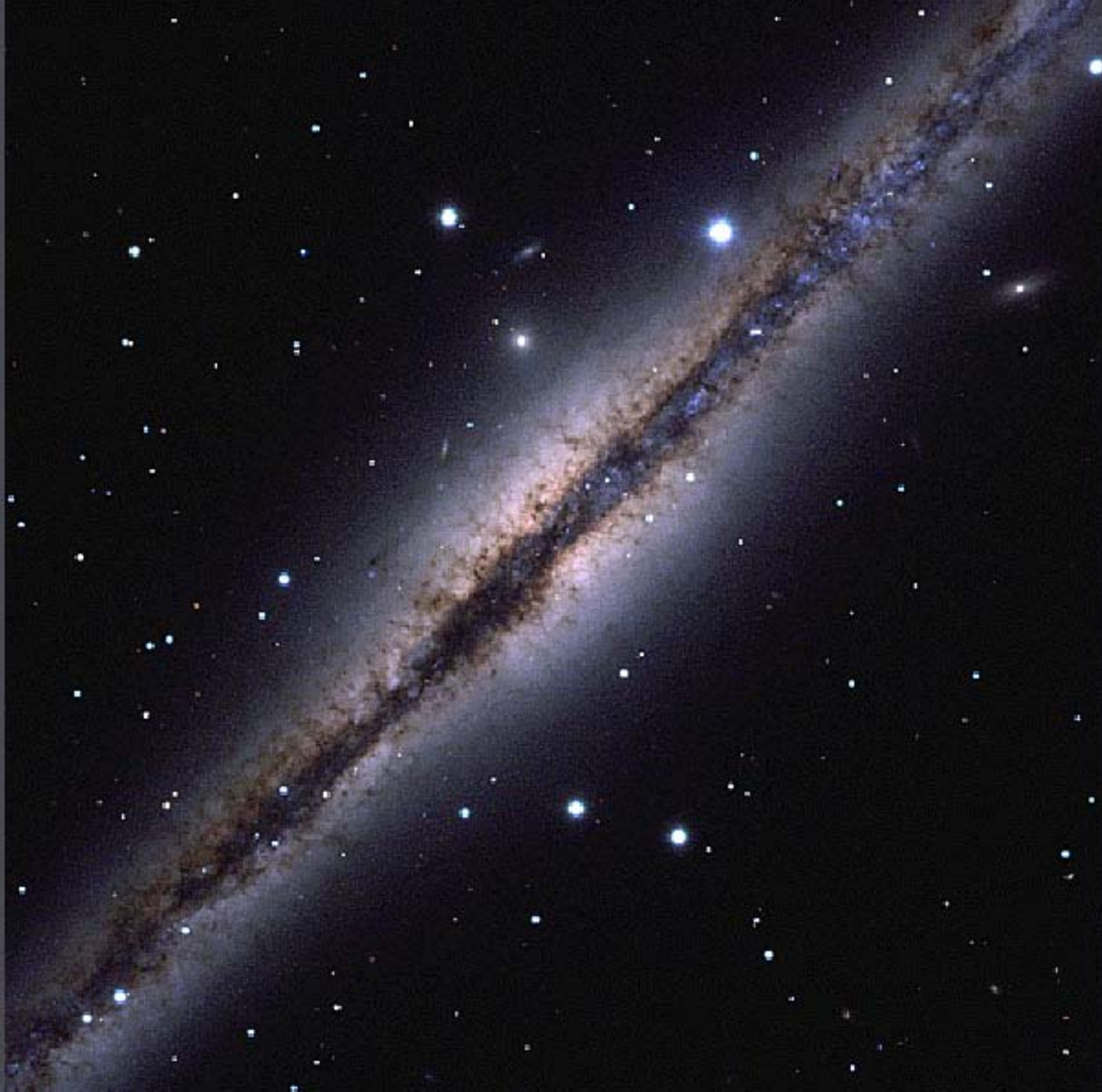
Энергетические
уровни водорода

Красная
линия
 $H\alpha$: $\lambda 6563 \text{ \AA}$



- Они легко различаются на изображениях других спиральных галактик (кроме видимых с ребра), но в Млечном Пути из-за поглощения света распределение молодых звезд сильно искажено и не позволяет однозначно судить о виде спирального узора нашей Галактики
- Почему? – Потому что мы смотрим на мир из самой толщи газо-пылевого галактического диска. Вот пример:

NGC
891



Примеры спиральных галактик, видимых с ребра

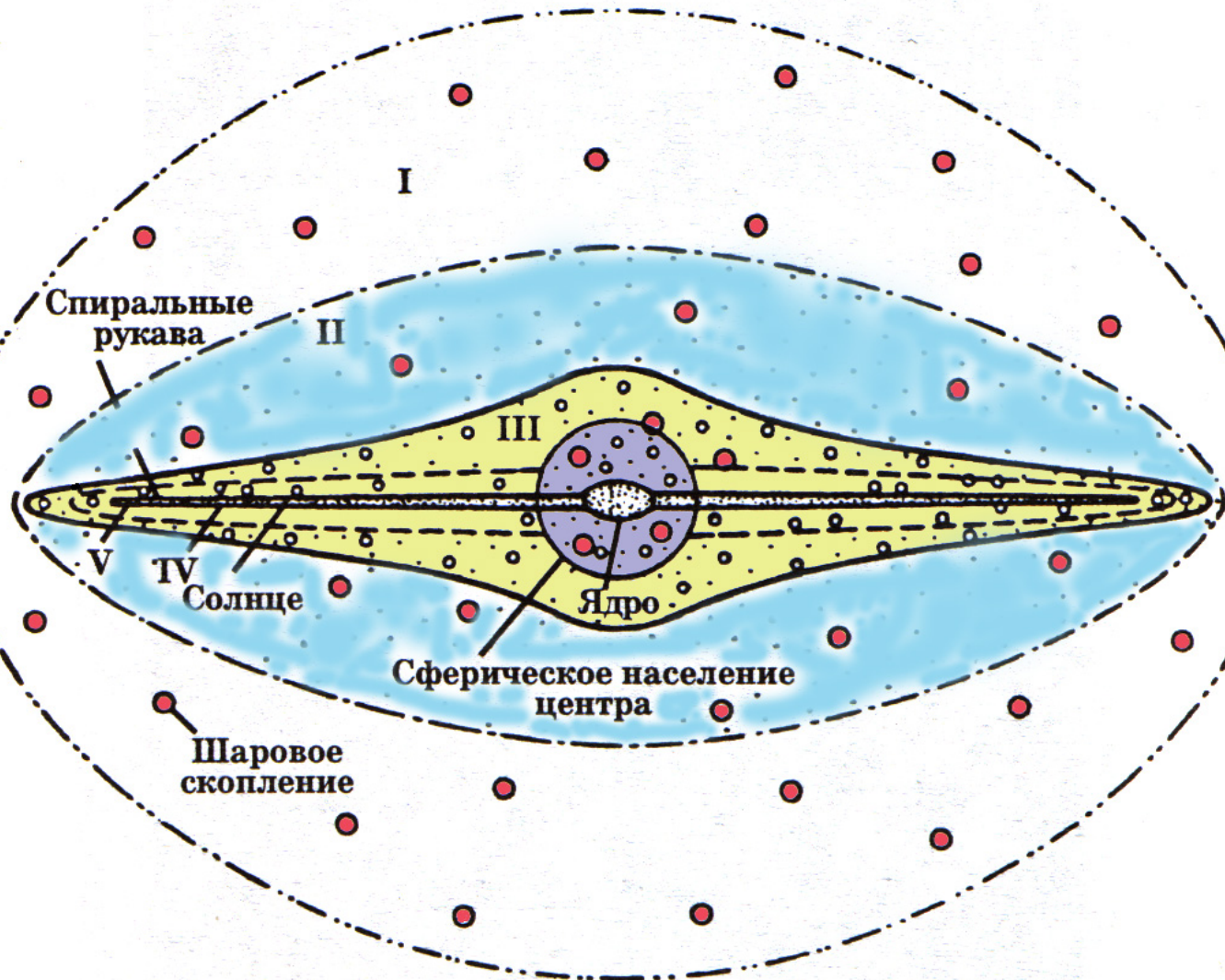


Пыль сконцентрирована в относительно тонком диске

Задача, сравнимая по сложности с
оптическим изучением нашей Галактики:

- Представим себе, что мы пытаемся познакомиться с незнакомым городом, глядя на него из окна гостиницы, когда на улице туман...
- Так устроены спиральные галактики ➔

Строение типичной спиральной галактики

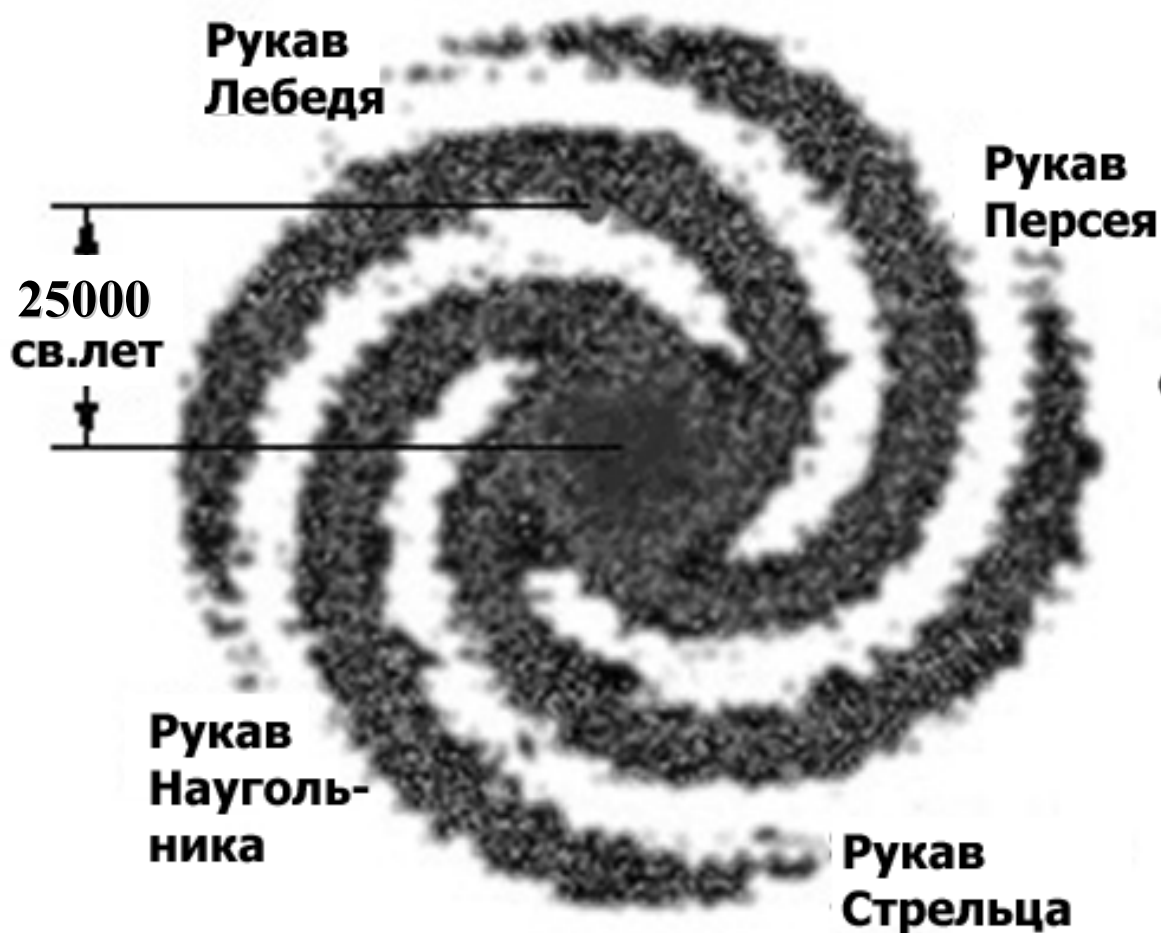


- I – гало
- II – сфероид
- III – «толстый диск»
- IV – звездный диск
- V – газ и пыль

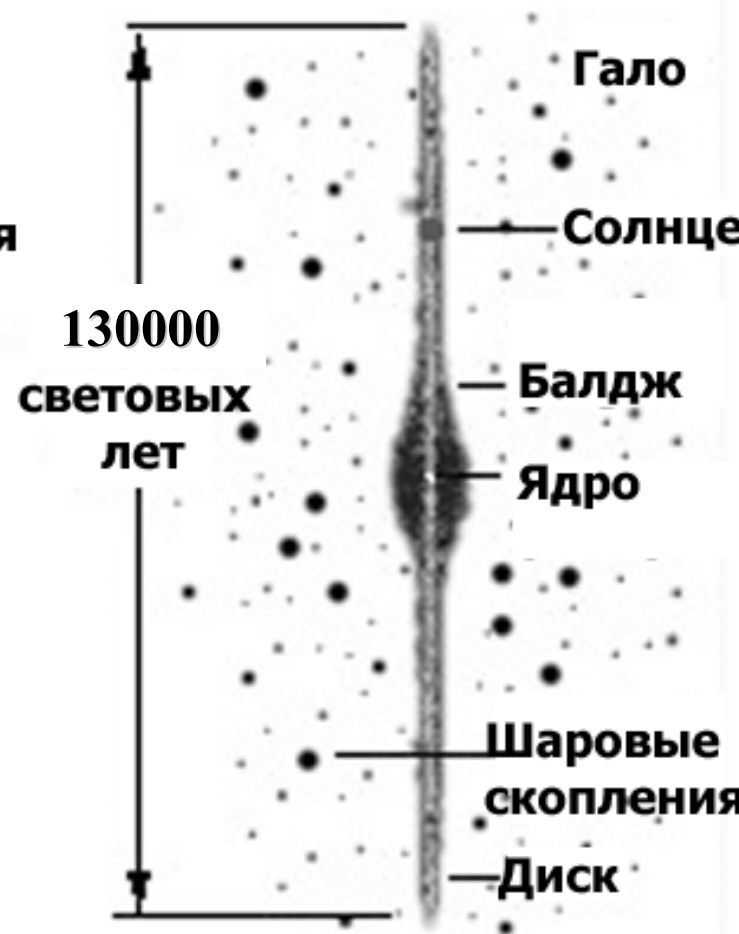
Расстояние от Солнца до центра
Галактики 7.5 ± 0.3 кпк (24500 св. лет)

Так - условно - можно представить себе устройство
Млечного Пути:

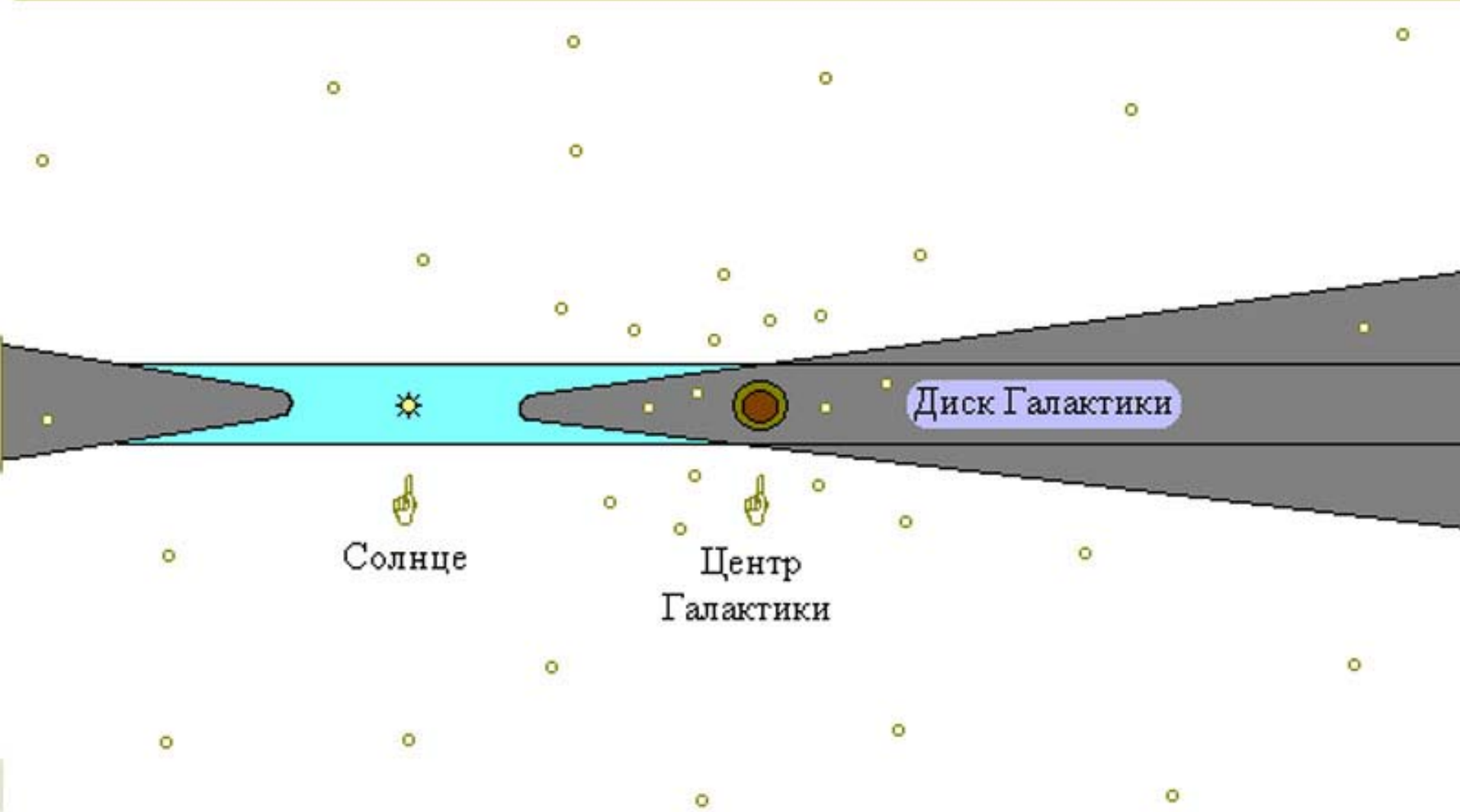
Вид сверху



Вид сбоку



- Пыль сосредоточена в тонком диске средней толщиной порядка 100 пк ≈ 330 световых лет (при диаметре диска порядка 130 тыс. световых лет). **Солнце находится в самой толще газопылевого слоя Галактики.**
- Пыль сильно ослабляет свет звезд: на пути в 1000 пк в среднем на **1.5 зв. вел., т.е. в 4 раза**
- **Ослабление $\approx 2.512^{a \times r}$** , где $a \approx 1.5$ зв.вел./кпк
- На расстоянии 5 кпк — в 100 раз
- Поглощение в направлении на центр Галактики достигает **20 – 30 зв. вел., т.е. свет ослабляется как минимум в 100 млн. раз (!!!)**



Поэтому круг радиусом 5 кпк -
Область Галактики, доступная наблюдениям
в оптическом диапазоне спектра
Это малая часть диска и бОльшая часть гало

- Поглощение света зависит от длины волны: короткие волны (синий свет) поглощаются значительно сильнее длинных (красного света), как и в земной атмосфере.
- Закон поглощения в оптике и инфракрасном диапазоне (от 0.25 до 5 микрон) : $a(\lambda) \sim \lambda^{-1.85}$
- Поглощение в ИК (2.2 μ) в 10 раз меньше, чем в оптике.
- Поглощение света сопровождается *покраснением* — перераспределением энергии

Зависимость удельного поглощения от длины волны

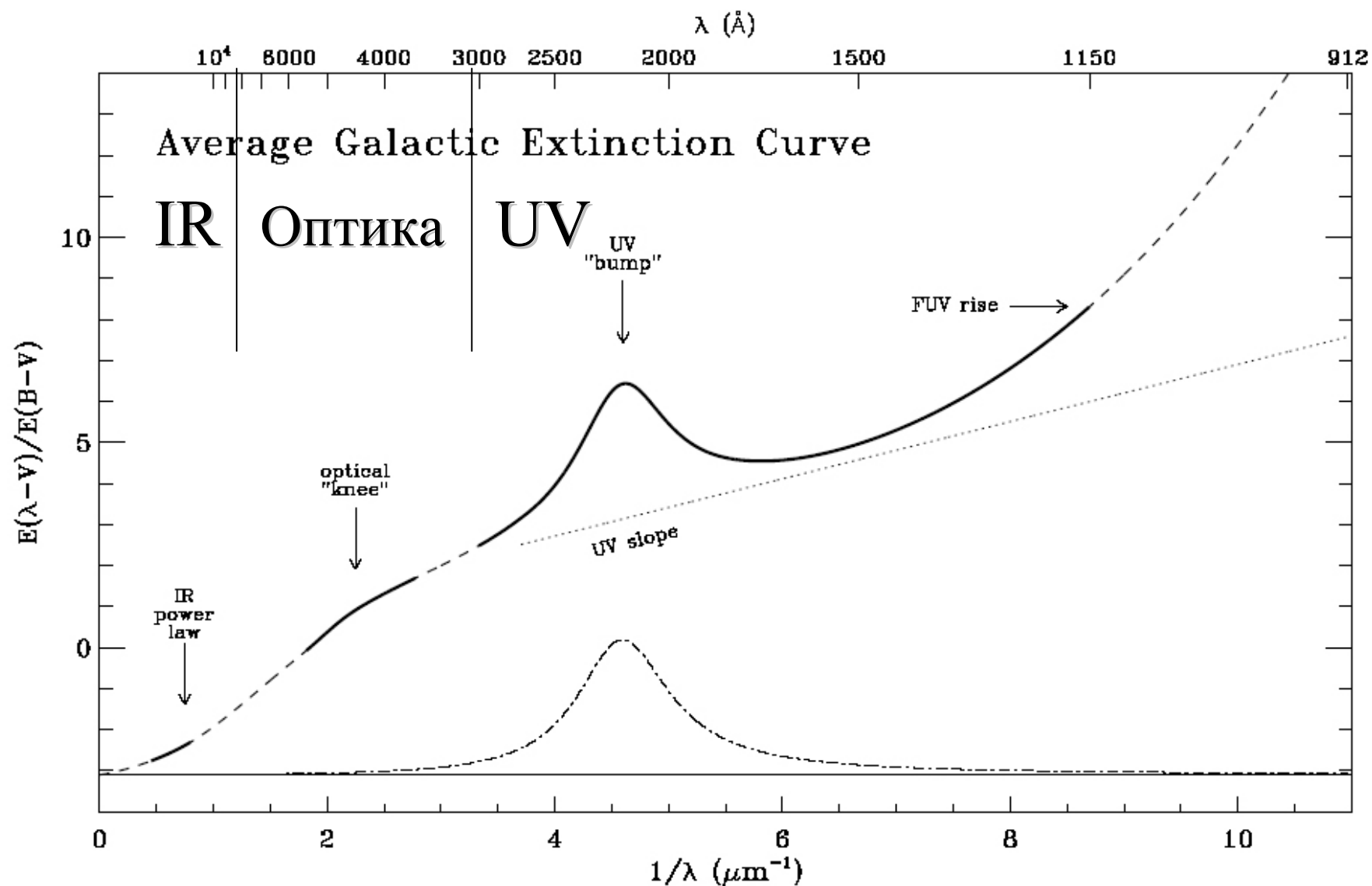
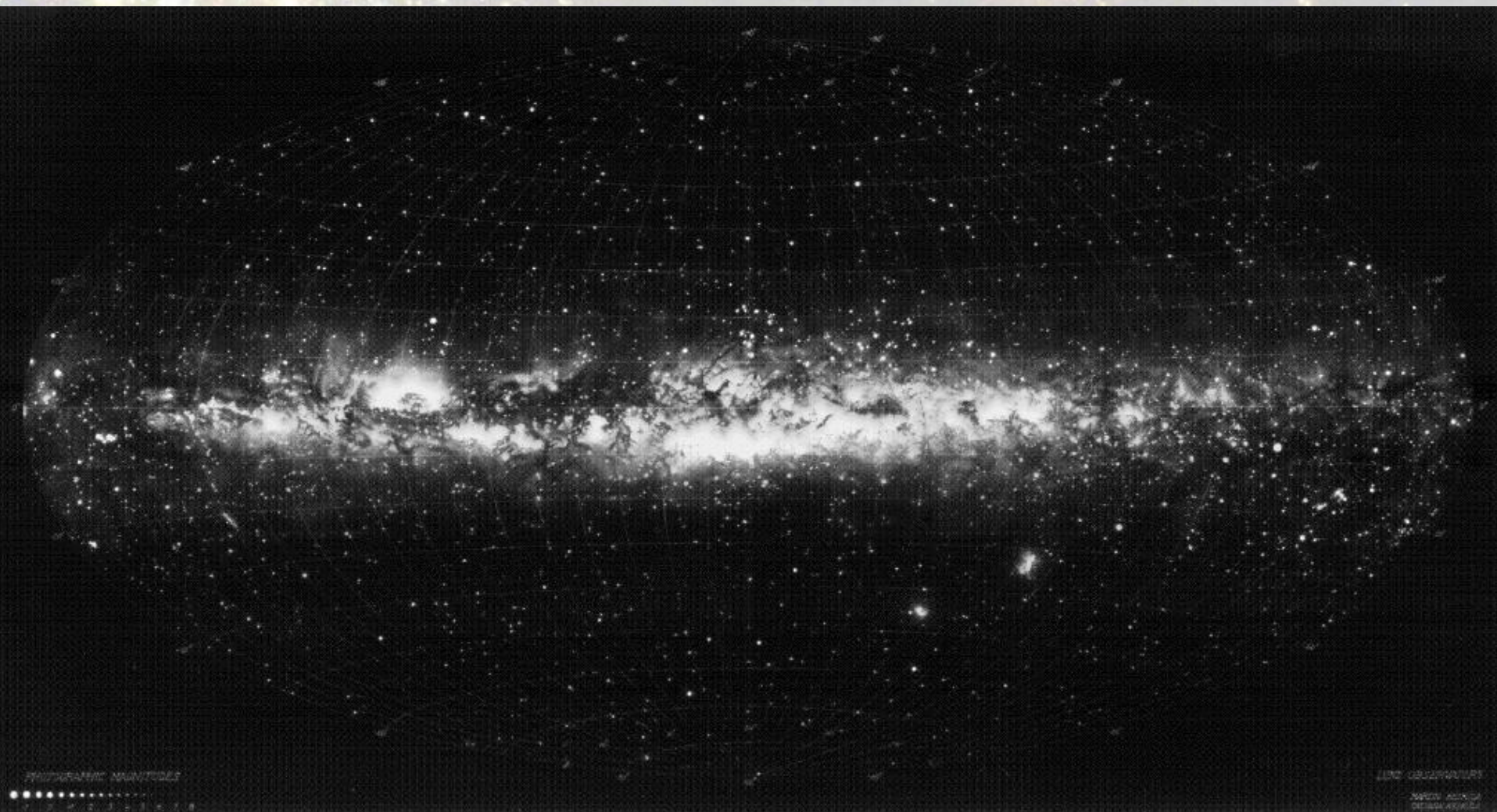


Fig. 2.— The average Milky Way extinction curve, corresponding to the case $R_V = 3.1$, as computed by Fitzpatrick 1999. See the discussion in §2.

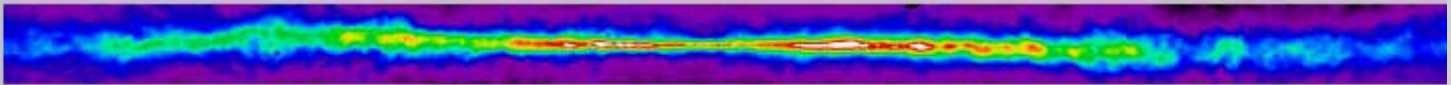
В оптике Млечный Путь выглядит широкой
светящейся полосой, изрезанной клочковатыми
пылевыми облаками



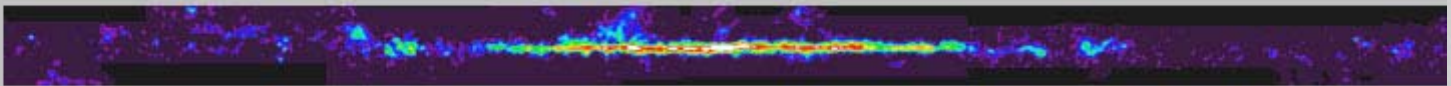
А вот так в других диапазонах:

Радио

21 см
HI



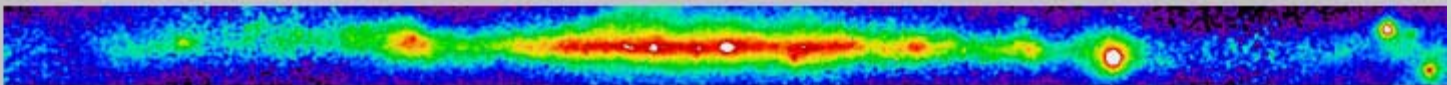
(CO)
H₂



IRAS
ИК



EGRET
Гамма

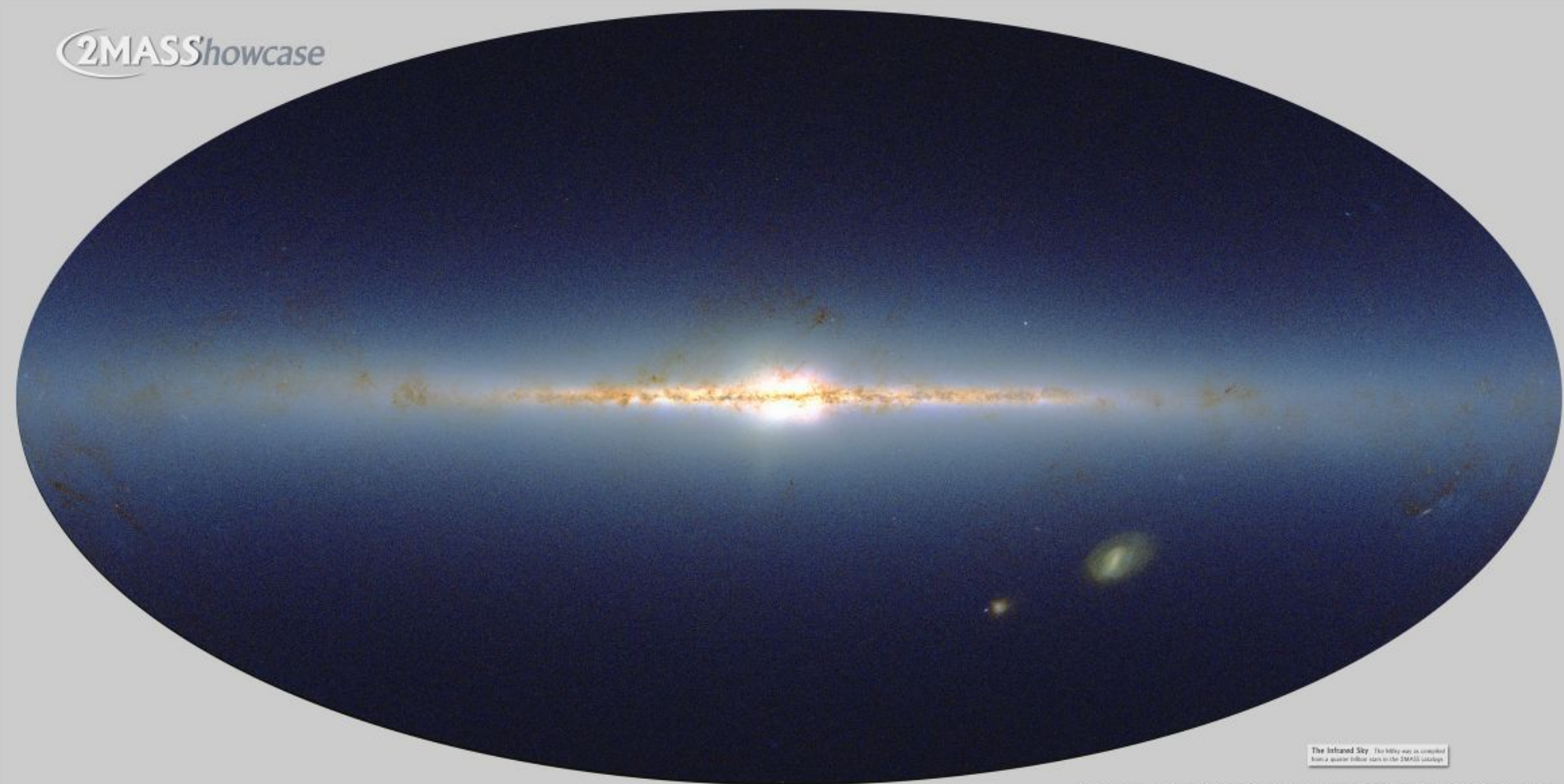


COBE
ИК
близкий



В ИК диапазоне (1.1–2.2 μ) хорошо видна центральная область, и Млечный Путь напоминает другие галактики, видимые с ребра

2MASSshowcase



The Infrared Sky - This image was compiled from a quarter billion stars in the 2MASS catalogs.

- Поглощение – разное в разных направлениях – и покраснение искажают картину распределения объектов в Галактике
- Это главная причина, по которой строение диска Млечного Пути известно намного хуже, чем дисков других спиральных галактик

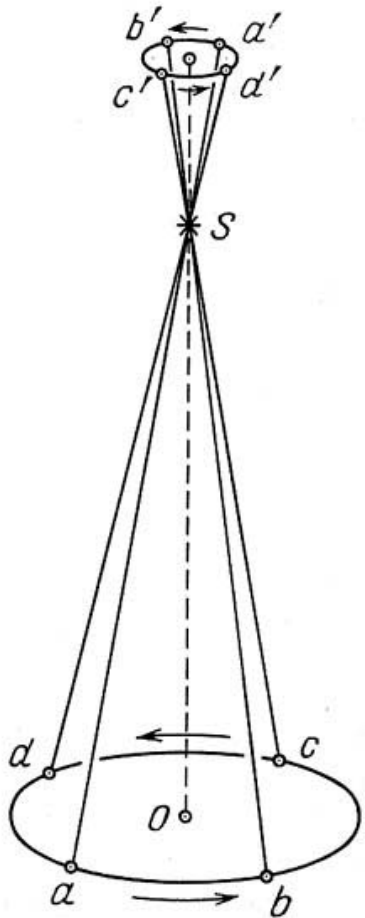
2. Измерение расстояний как основной способ изучения строения Млечного Пути

- Изучение строения Галактики – и Вселенной вообще - базируется на умении определять расстояния.
- ***Единицы расстояния: $1 \text{ кпк} = 1000 \text{ пк} = 3260 \text{ св. лет.}$***

• Основные методы:

- тригонометрический, или триангуляция в космических масштабах; применяется в основном для близких объектов — **первичный, базовый метод, лежащий в основе всех определений расстояния;**
- фотометрический, сравнение с блеском известного объекта - «стандартной свечи»:
 $R \text{ (кпк)} = 10^{0.2(m-M-10-A)}$, где A — поглощение, m и M — видимый и абсолютный блеск звезды

При движении Земли по орбите вокруг Солнца близкие звезды описывают крошечные *параллактические эллипсы*, размер которых обратно пропорционален расстоянию.
Для расстояния 1 кпк размер эллипса $0.001''$ ($\sim 8 \times 10^{-10}$ окружности)
Измерение сверхмалых углов — очень сложная техническая задача

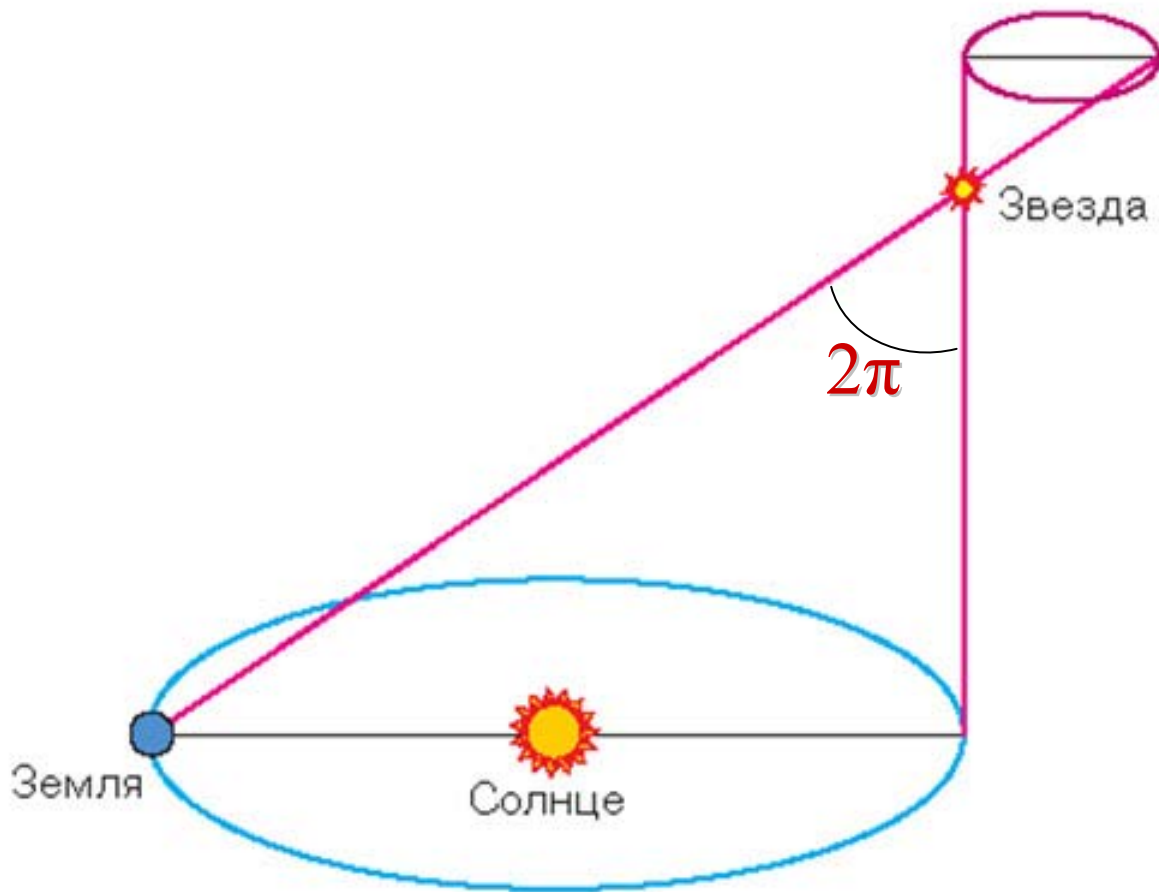


H
I
P
P
A
R
C
O
S

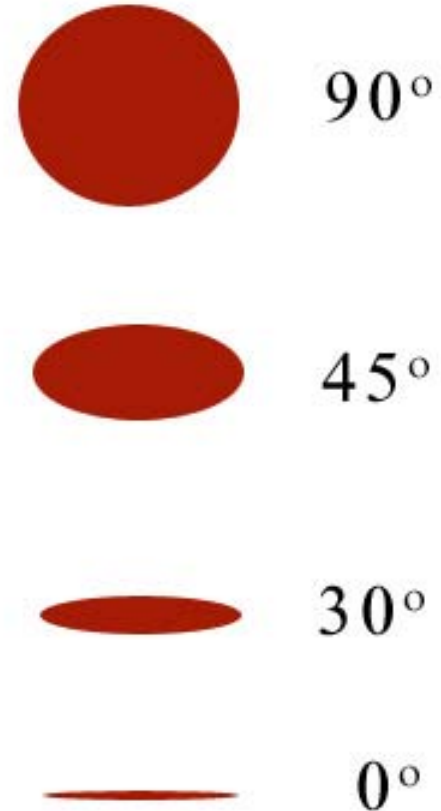


Космический
аппарат
HIPPARCOS,
в 1989-1992 г.
измеривший
почти 120000
параллакс

Тригонометрический параллакс π



Формы эллипсов
зависят от эклиптической
широты β



Большая ось эллипса зависит от расстояния до звезды

Шкала расстояний – отдельная серьезная проблема.

Этапы построения шкалы расстояний:

- Тригонометрические параллаксы близких звезд и звездных скоплений



- «Стандартные свечи» - светимости цефеид и RR-Лирид в рассеянных и шаровых скоплениях



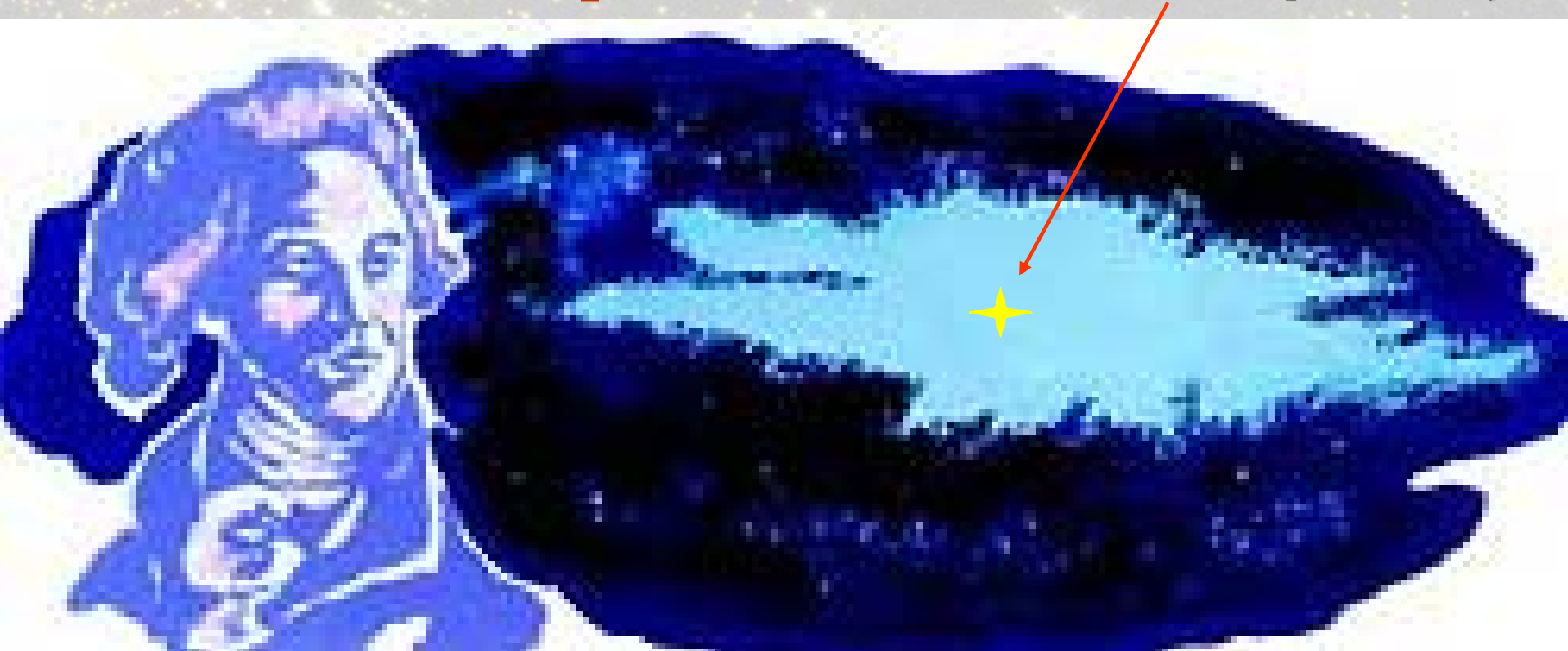
- Фотометрические расстояния галактик, содержащих цефеиды, RR-Лириды.

Определение светимостей Сверхновых звезд.



- Фотометрические расстояния далеких галактик, измеренные по Сверхновым

- Лучший способ изучения строения Галактики – подсчеты числа звезд известного блеска в разных направлениях от Солнца (метод «черпков», впервые примененный Вильямом Гершелем еще в XVIII веке).
- **«Галактика» Гершеля:** Солнце почти в центре – почему?



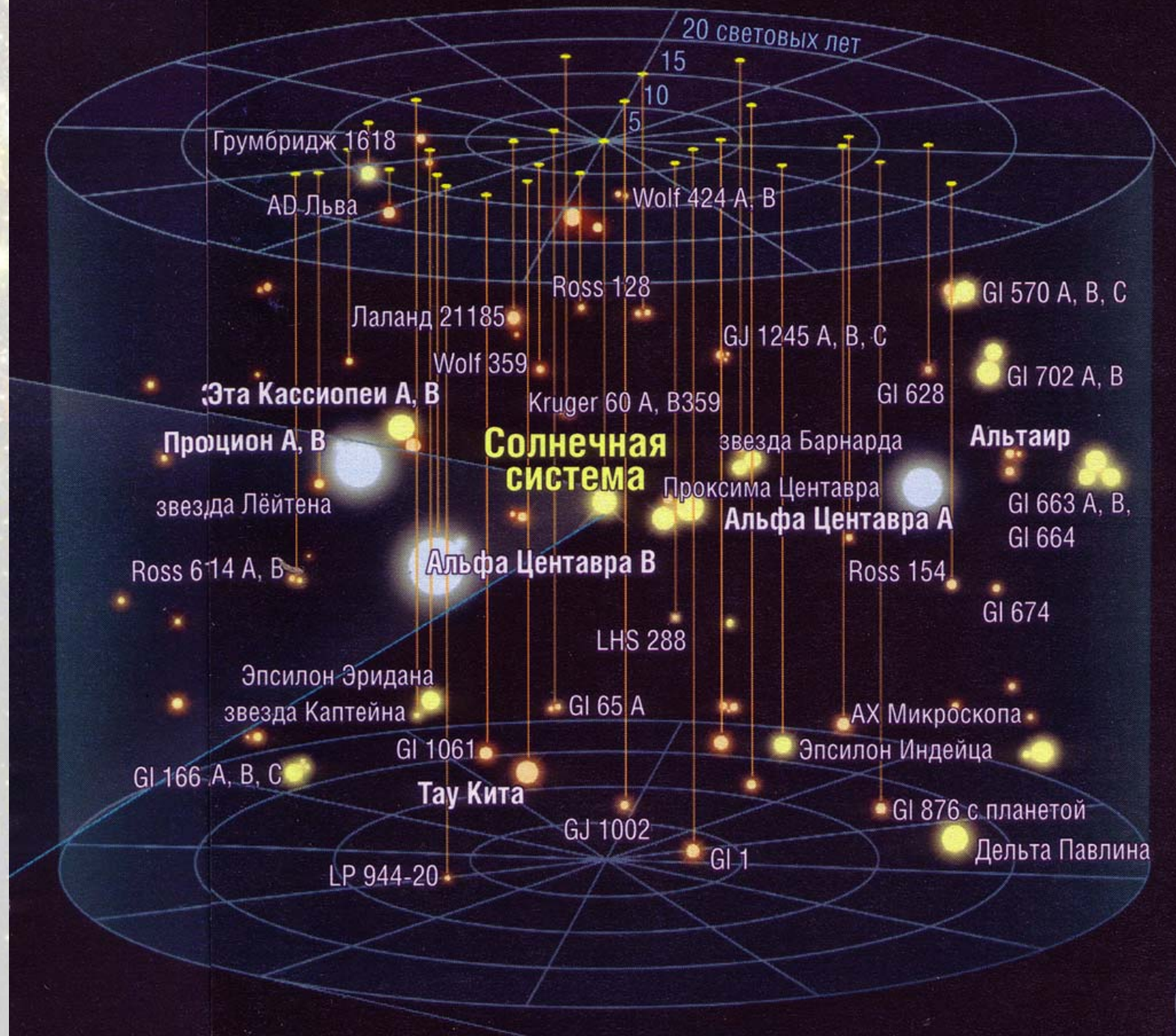
3. Что нас окружает или что мы знаем о близких звездах и звездных скоплениях

- Несмотря на более чем 150-летнюю историю определения расстояний до звезд и успехи космических экспериментов, до сих пор надежные тригонометрические расстояния известны примерно для 30000 звезд вплоть до расстояний около 100 пк.
- Светимости именно этих звезд теперь уточнены и могут использоваться в качестве «стандартных свечей».

Население диска Млечного Пути: **звезды второго поколения**

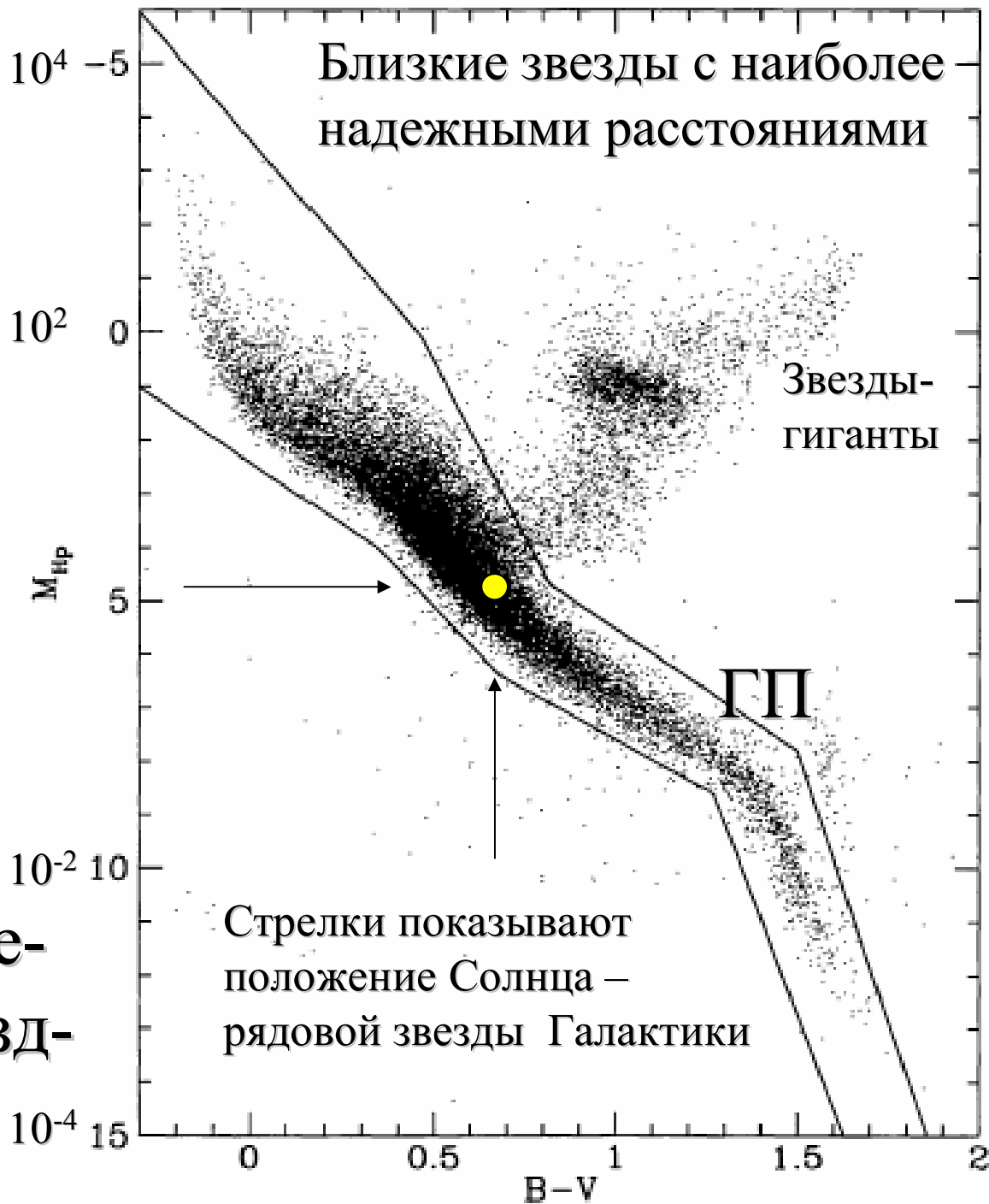
- Звезды: от самых молодых (1 млн. лет) до самых старых (8-10 млрд. лет)
- Рассеянные звездные скопления и ассоциации
- Газ (атомарный, молекулярный, ионизованный)
- Пыль

- Подавляющее большинство близких звезд — 99.8% — объекты диска Галактики
- Большая их часть — звезды-карлики
- Звезды - ближайшие соседи Солнца (трехмерная карта) →



Светимость в солн. ед.

**Диаграмма
Герцшпрунга-
Рассела (ГР)**
для близких звезд
показывает боль-
шое разнообра-
зие светимостей
и звездных масс
ГП — главная после-
довательность звезд-
карликов



За счет чего светят звезды

- Запас звездного «горючего» (водорода) $\propto M$
- Выделяемая энергия $\propto M^3$
- Следовательно, время жизни уменьшается с массой M
- Время жизни Солнца на ГП ~ 10 млрд. лет
- Время жизни ярких голубых звезд ~ 10 млн. лет

-
- Следовательно, среди близких звезд довольно много молодых

- Солнечная система находится неподалеку от центра пояса Голда - местного молодого **звездного комплекса** размером около 1 кпк и возрастом ~ 60 млн. лет, которому принадлежат все яркие голубые звезды, видимые на небесной сфере.

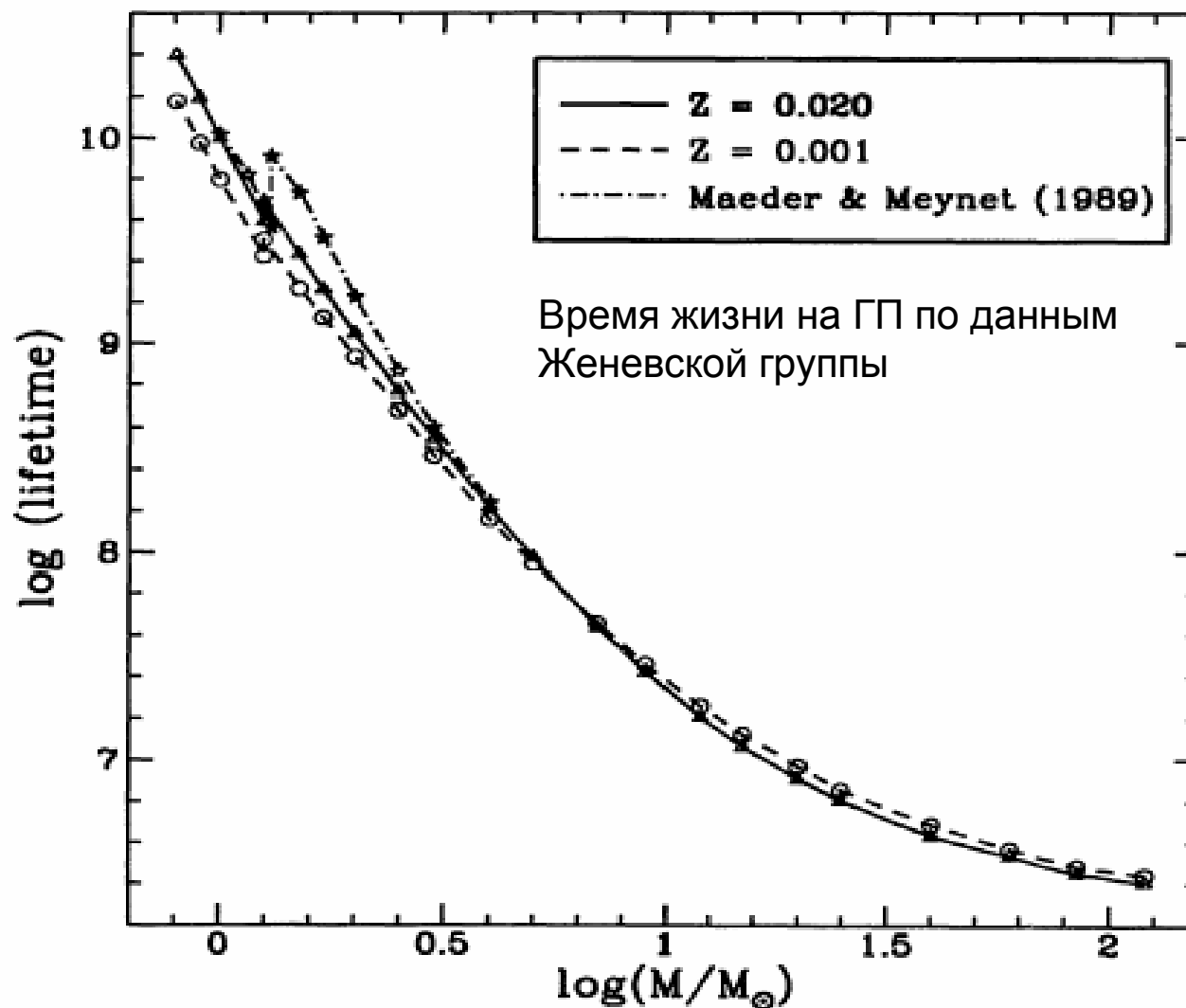
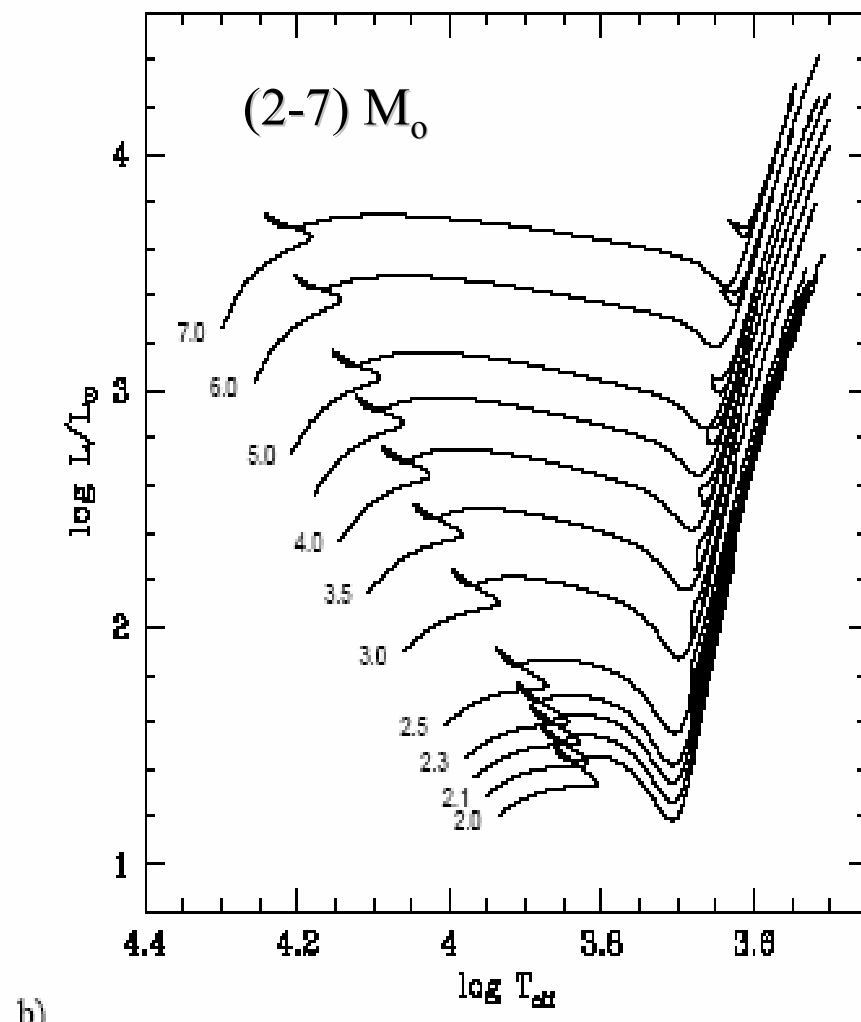
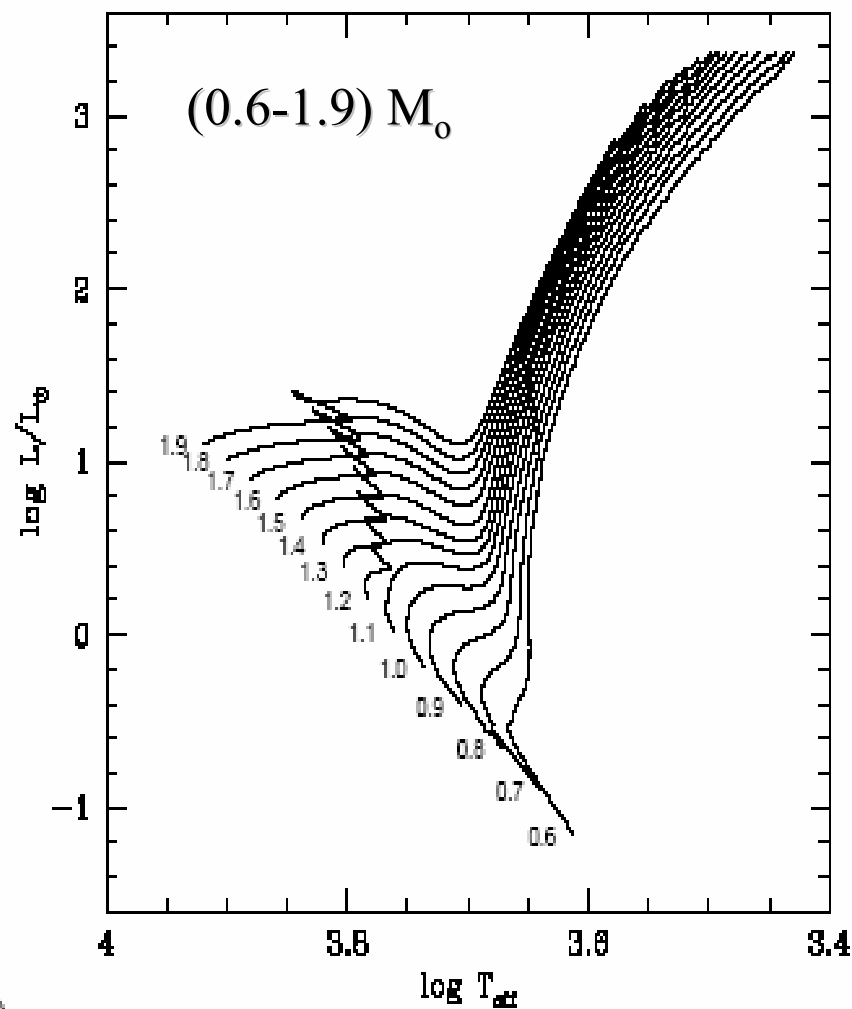


Fig. 4. The logarithm of the lifetimes in years for the H-burning phase are represented in function of the logarithm of the initial masses expressed in solar units, for the two sets of models at $Z = 0.020$ and $Z = 0.001$ computed by Schaller et al. (1992) and for the set of models computed by Maeder & Meynet (1989). The lifetimes for the models with and without overshooting are shown for the $1.25 M_{\odot}$, in the case of Schaller's models, and for the $1.3 M_{\odot}$ model in the case of Maeder & Meynet's models

Примеры эволюционных треков звезд от начальной Главной последовательности



- Массивные звезды эволюционируют быстрее звезд малой массы
- Соединив точки треков звезд разной массы, соответствующие одному возрасту звезд, мы получим так наз. **теоретическую изохрону**, или последовательность единого возраста
- Звезды — члены рассеянного скопления — лежат вблизи изохроны

- **Рассеянные звездные скопления** – гравитационно связанные группы звезд ($d \sim 1 - 10$ пк), системы с отрицательной полной энергией. Основная роль принадлежит самогравитации. Устойчивы при движении в Галактике по отношению к внешнему гравитационному полю.
- **Звездные ассоциации** – обширные ($d \sim 100$ пк) группы крайне молодых звезд, возникших из одного молекулярного облака, но, в отличие от скоплений, гравитационно не связанные. Они расширяются.

Чем интересны звездные скопления?

Несколько слов про них.

- *Определить возраст одиночной звезды практически невозможно, в то время как:*
- - Звезды в скоплениях образовались одновременно и имеют почти одинаковый возраст, который легко определяется по эволюционным трекам и изохронам
- - Их химический состав практически одинаков
- - Звезды находятся на одинаковом расстоянии
- - Следовательно, их видимые различия связаны с различием их масс и стадий эволюции

- Рассеянные скопления – лучший инструмент для изучения строения и эволюции звезд
- Изучая рассеянные звездные скопления – их пространственное распределение и возрасты – мы погружаемся в историю процесса рождения звезд в Галактике и можем прояснить строение диска Млечного Пути

Примеры рассеянных звездных скоплений

Самые известные:

Плеяды = M45,
100 млн. лет, 120 пк



Альдебаран



Гиады = NGC1647 →
~650 млн. лет, 46 пк

$\chi+h$ Per (двойное) =
NGC869/884,
~7 млн. лет, ~2.3 кпк



- Самые старые скопления:

NGC2682 (M67) 4 млрд. лет
➔

NGC2243 6 млрд. лет
Melotte 66 6 млрд. лет
NGC2420 ~10 млрд. лет

NGC188 ~10 млрд. лет
➔



Рассеянное скопление М 6 в Скорпионе

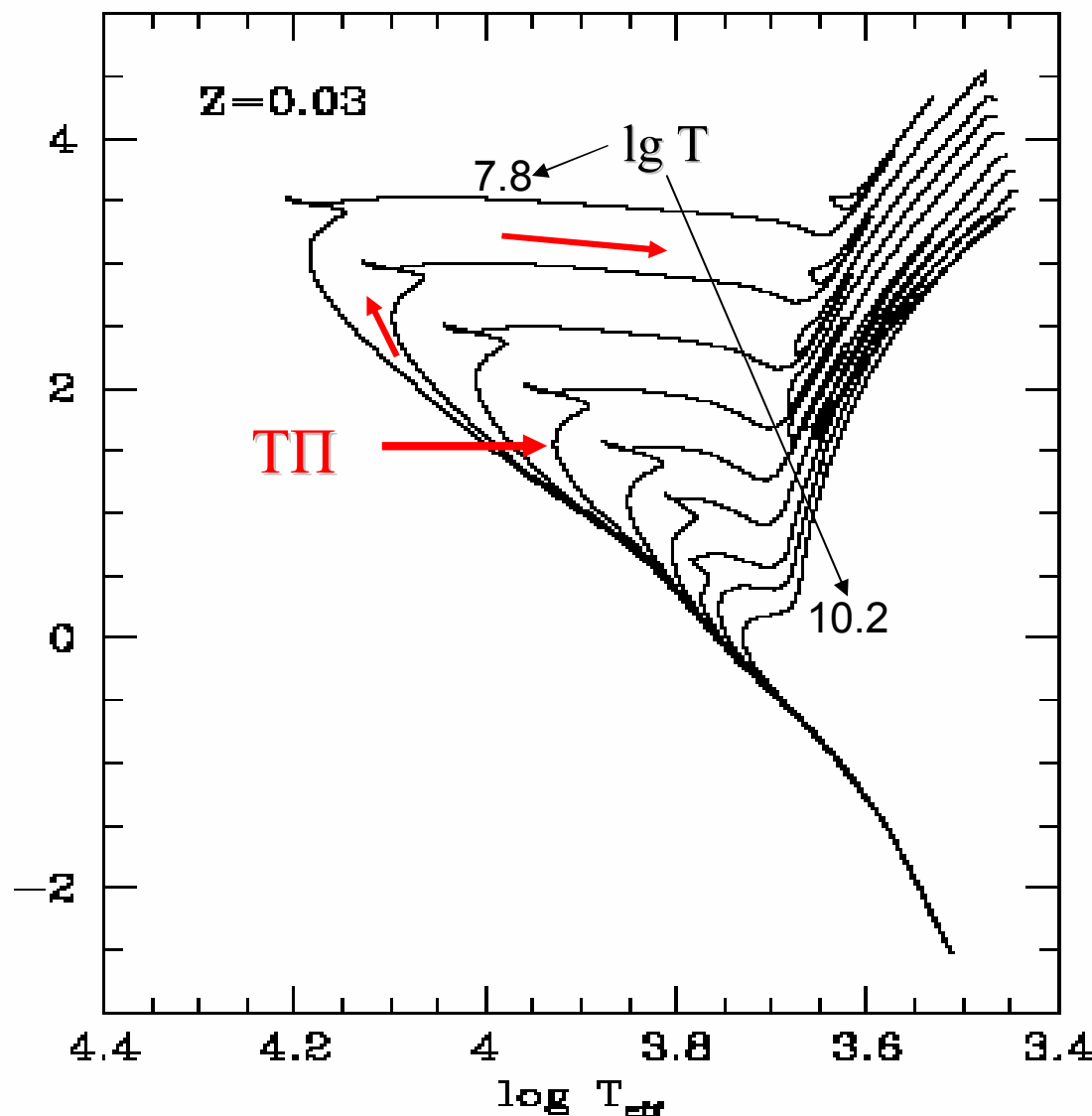
Видно
свечение
газа, воз-
буждаемого
горячими
звездами



- Приведем самые общие характеристики рассеянных скоплений в окрестности Солнца:
- Возраст < 10 млрд. лет
- Высота над плоскостью Млечного Пути $|z| < 1$ кпк
- Число звезд: от ~ 10 до ~ 5000
- Диаметр $\sim 2 - 10$ пк
- Общее число РЗС:
 - известно ~ 1700 в пределах ~ 5 кпк от Солнца;
 - полное число скоплений в диске Галактики оценивается в $\sim 20000-30000$ (!)

- Основная проблема - РЗС в общей массе еще плохо изучены; в первую очередь - нужны новые фотометрические данные для построения диаграмм ГР и оценки возрастов и расстояний
- Ведутся (в основном в России) работы по открытию новых скоплений, в т.ч. по массовым каталогам (2MASS, UCAC2, SDSS...)
- Как определяются возрасты РЗС →

Теоретический вид диаграмм Герцшпрунга-Рассела для рассеянных скоплений разного возраста T

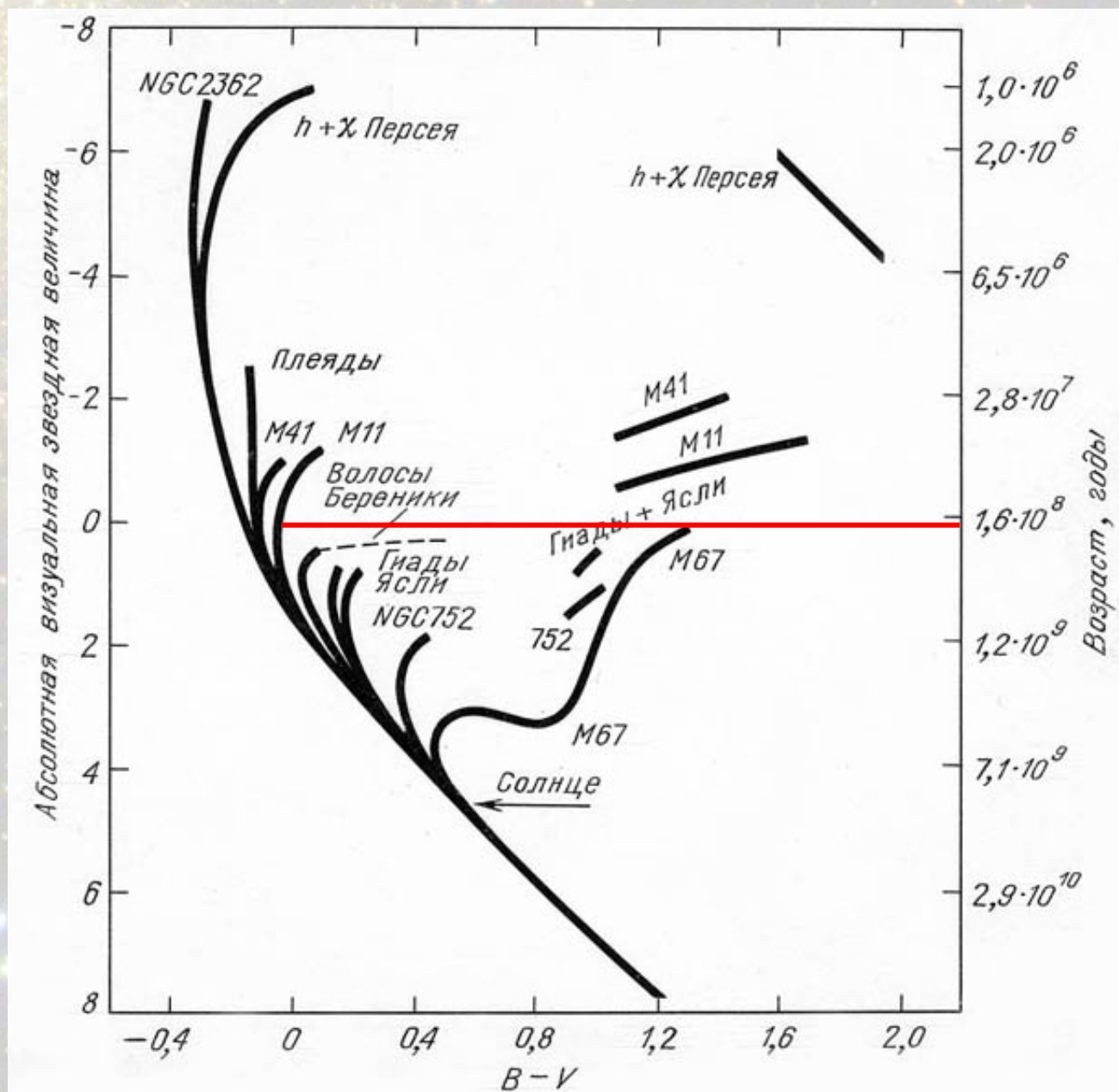


Нижняя огибающая – начальная главная последовательность (НГП)

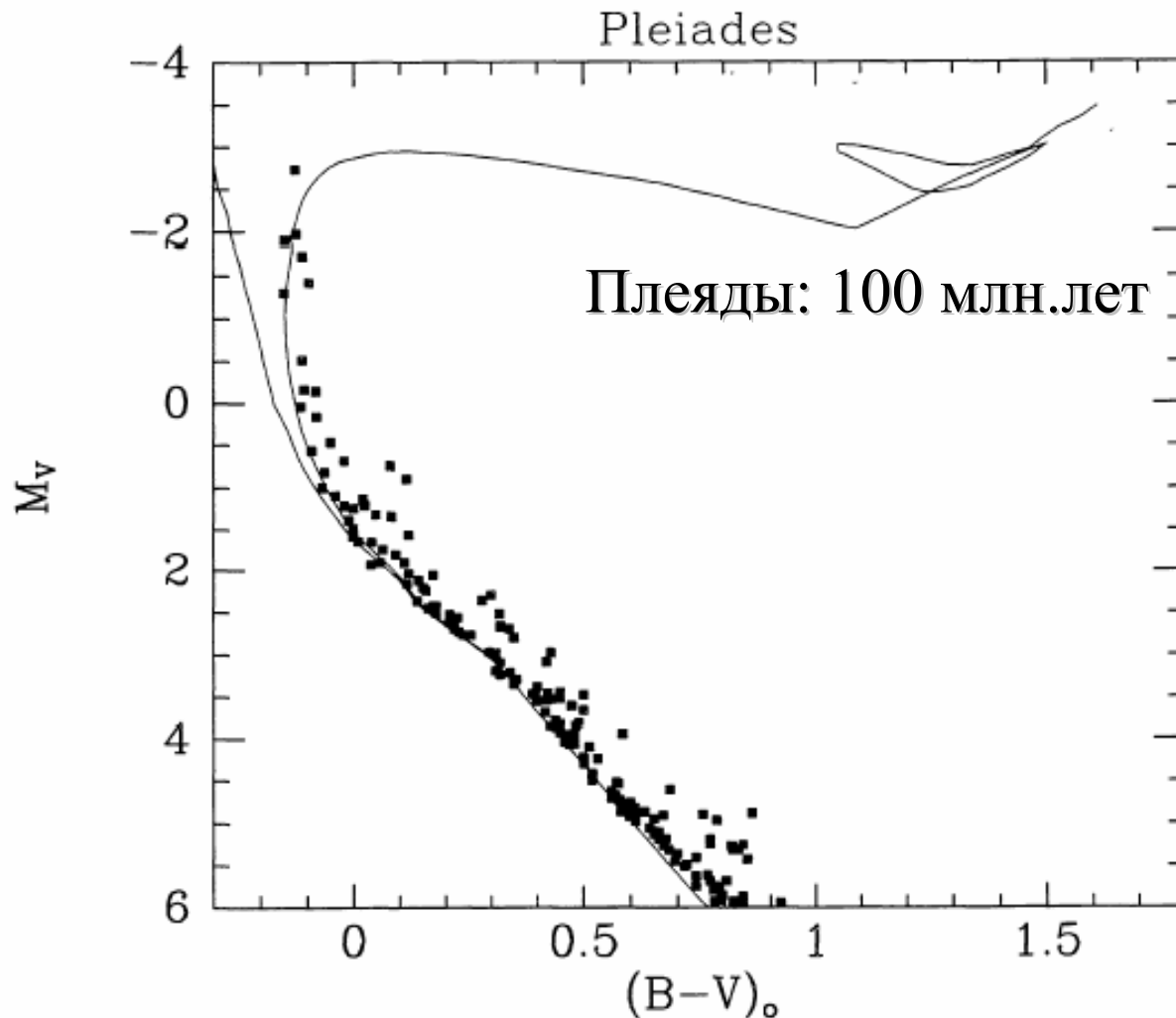
Светимость звезд в точке поворота (ТП) служит индикатором возраста скопления

Минимальная масса на ГП - $0.15M_{\odot}$

Комбинированная диаграмма ГР для скоплений



Основной метод определения возраста и расстояния скопления - совмещение с теоретической изохроной



Сравнение видимых звездных величин с абсолютными дает

$$\Delta V = (V - M_V)_0 + R_V \cdot E(B - V)$$

Сдвиг: 

Заметим: совмещение с нижней огибающей ГП

Fig. 20. Same as in Fig. 9 for the Pleiades, $m - M = 5.60$, $E(B - V) = 0.04$, $\log \text{age} = 8.00$

То же, для старого рассеянного скопления
с возрастом около 10 млрд. лет

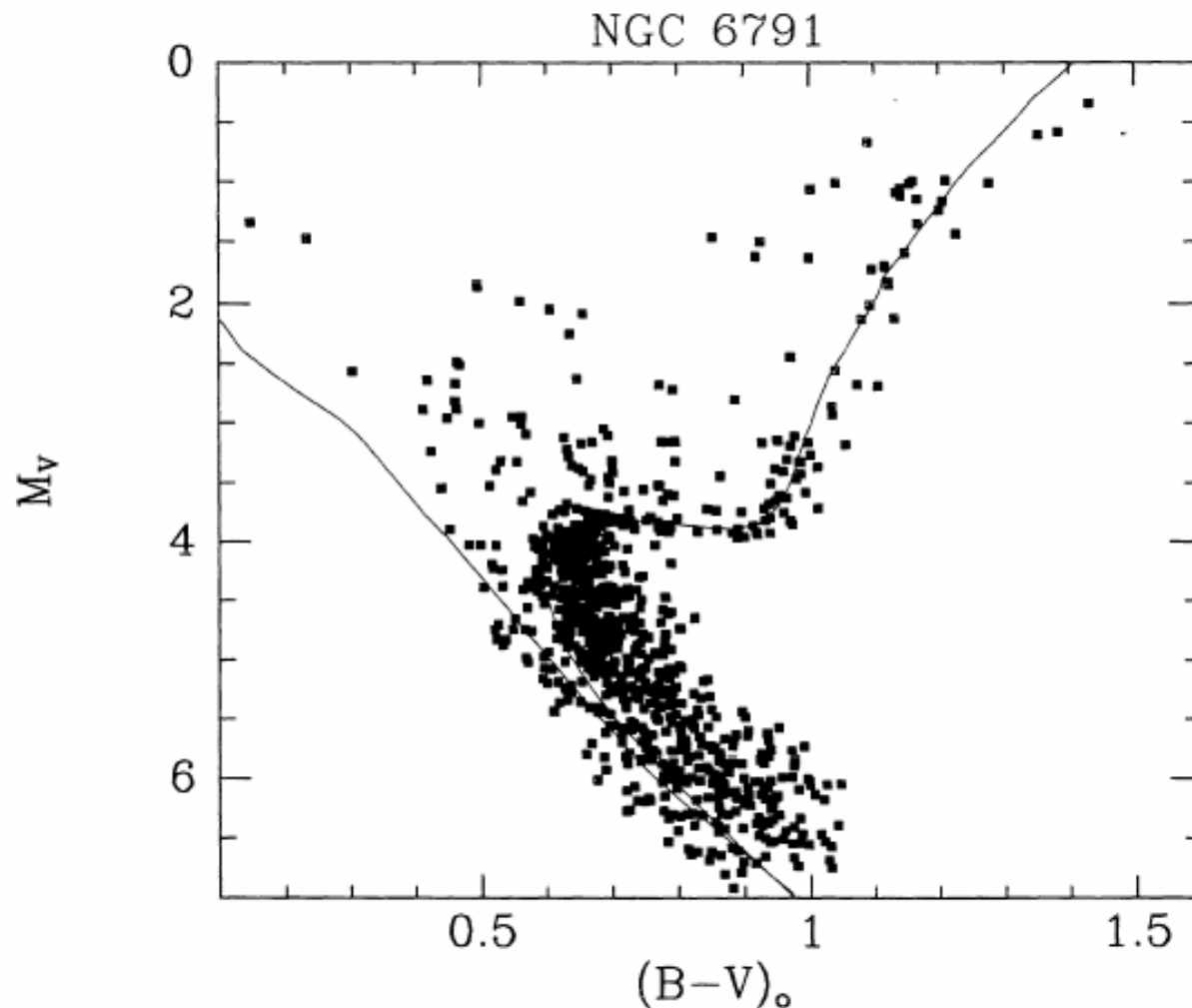


Fig. 38. Same as in Fig. 36 for NGC 6791, $m - M = 13.55$, $E(B - V) = 0.21$, $\log age = 9.95$. The star membership to this cluster is not well defined from only the photometric analysis, which explains the poor definition of the main sequence limits

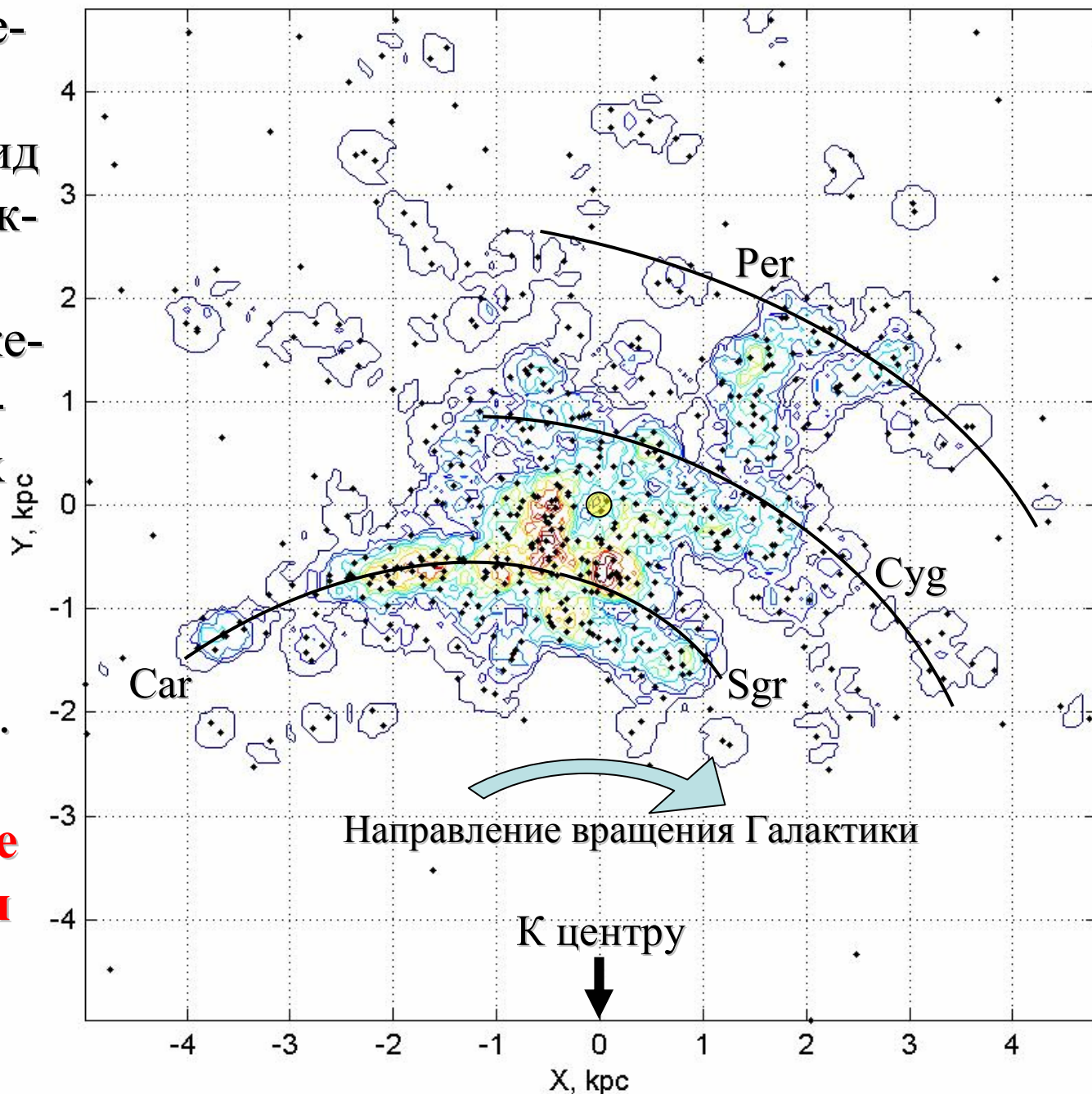
4. Спиральный узор Галактики

- Умея определять расстояния до скоплений и молодых звезд, можно попытаться восстановить картину распределения *молодых объектов*, которые, как и в других галактиках, должны трассировать спиральный узор:

Показано распределение рассеянных скоплений и цефеид на плоскости Галактики и нанесены возможные положения отрезков локальных спиральных рукавов:

Киля-Стрельца, Лебедя-Ориона, Персея-Кассиопеи.

Солнце – в центре области размером 10 x 10 кпк.



- Концентрация к отрезкам рукавов едва заметна – увы!
- Совершенно очевидно, что **ТОЛЬКО** по пространственному распределению объектов невозможно понять характер глобальной спиральной структуры нашего Млечного Пути.
- Неизвестно даже число спиральных рукавов: 2? 4? Больше?
- **Дополнительно привлекают данные о распределении и скоростях газа**

Газ и пыль в диске Млечного Пути

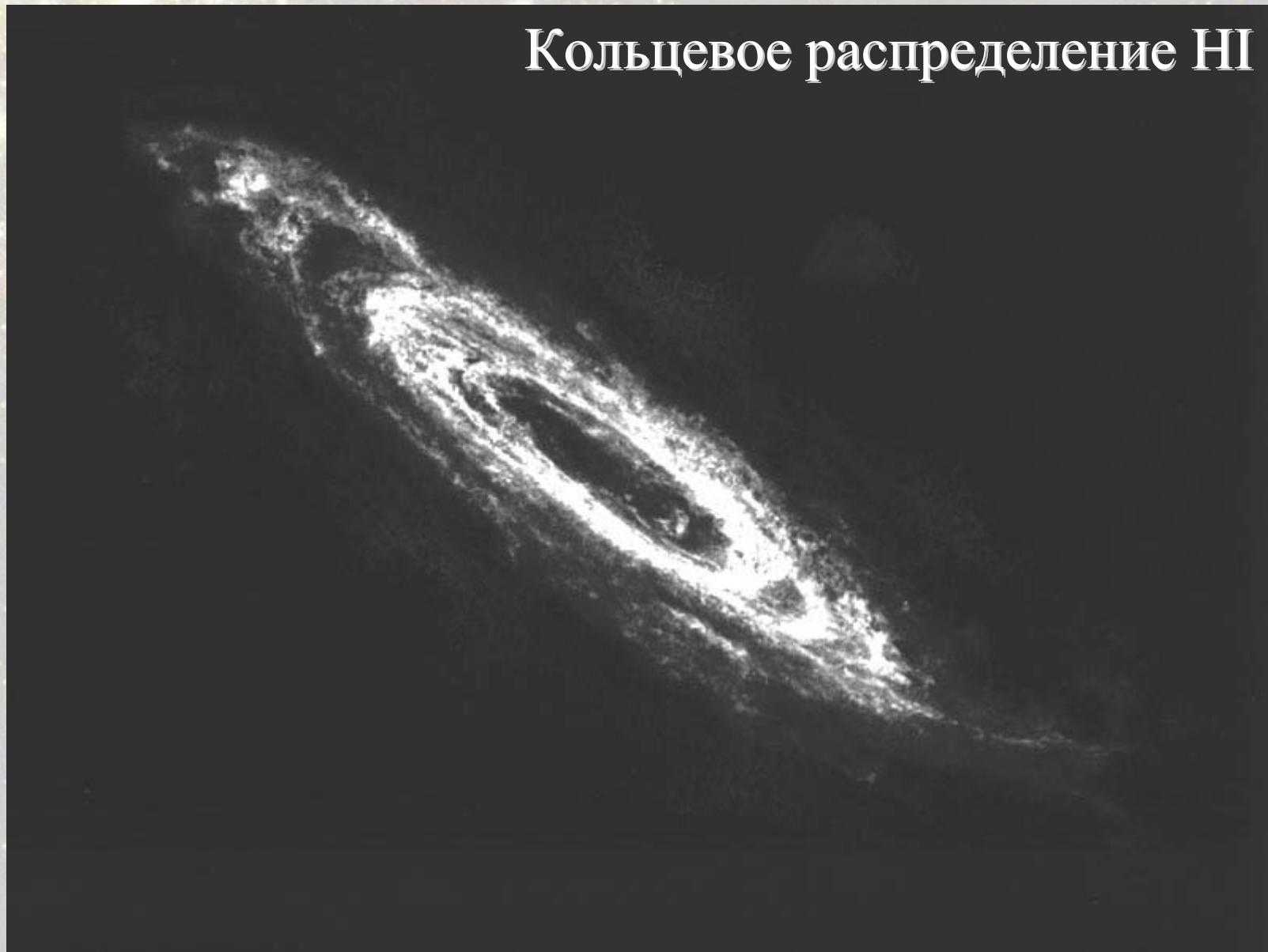
- До 10% диска по массе составляют газ и пыль.
- Газ в основном состоит из водорода
 - атомарного HI (H^0)
 - молекулярного (H_2)
 - ионизованного HII (H^+)

Атомарный газ

- Атомарный (нейтральный) водород HI (H^0) излучает на длине радиоволны 21 см (1420 МГц), и диск Галактики почти прозрачен для этого излучения, т.е. **МЫ ВИДИМ ЕГО НАСКВОЗЬ**

Так выглядит М31 на длине волны 21 см

Кольцевое распределение HI



Слева: распределение пространственной плотности нейтрального водорода в Галактике — тоже широкое кольцо

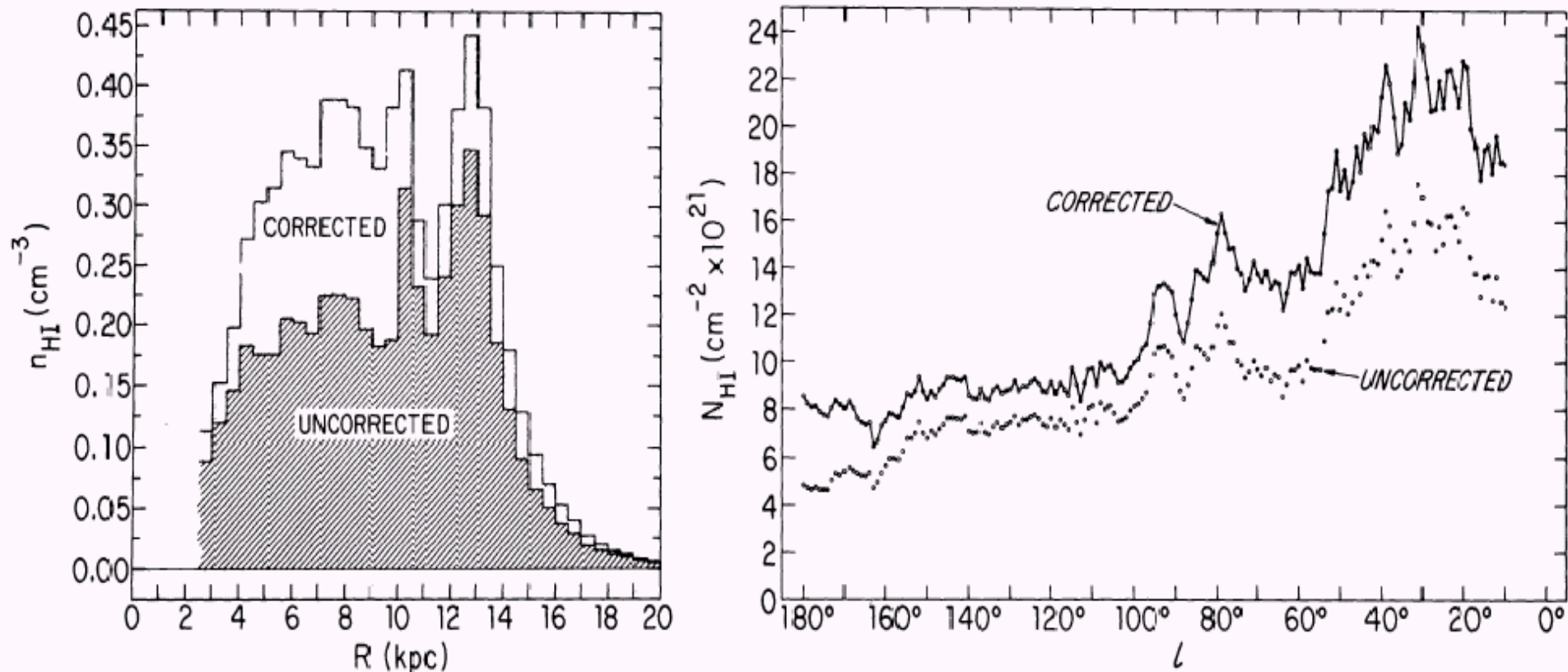
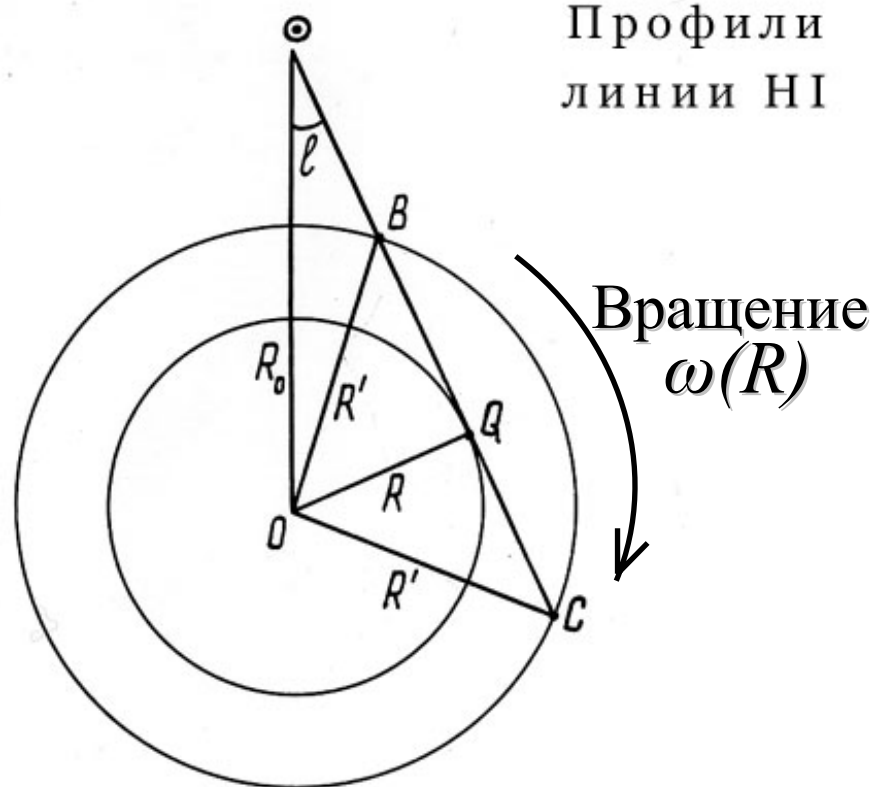


Figure 6 Large-scale distribution of H I volume and column densities in the Galaxy. The densities labeled “corrected” contain an adjustment for optical-depth effects determined from the controlled conditions inherent in model-fitting. The correction is based on a one-phase gas; the relative correction, although not its amplitude, would be similar for a multiphase gas. The values refer to the latitudes of maximum $\int T_A dV$ of the lower panel in Figure 3. Substantial densities of H I exist at $R > 10$ kpc and at $l > 90^\circ$, contrary to the situation pertaining for the other constituents of the galactic disk considered here.

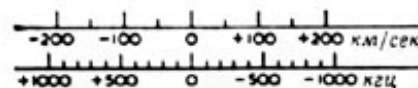
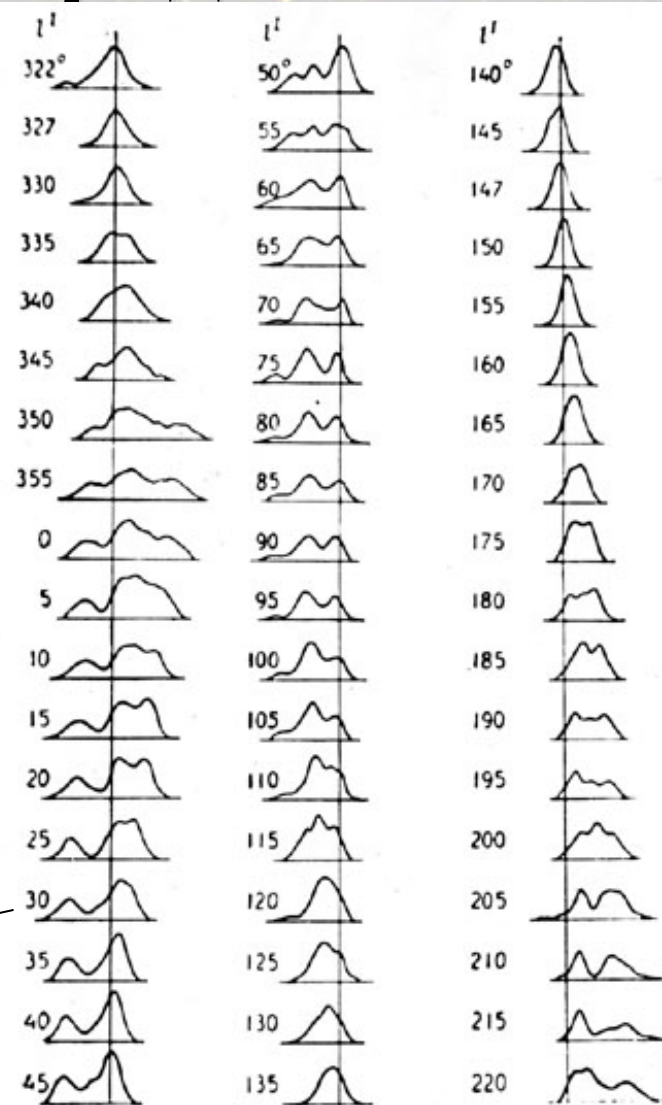
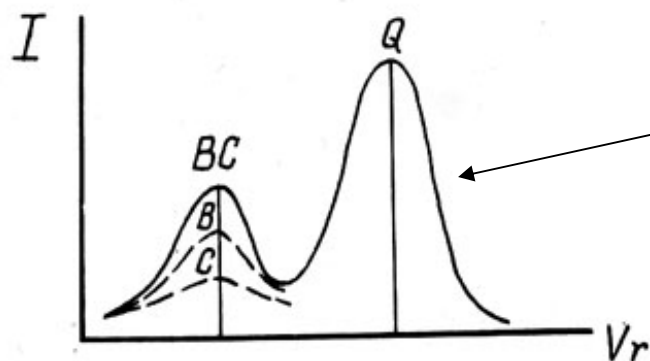
- Прозрачность на длине волны 21 см →
HI - хорошее средство изучения его
структуры и динамики
- Радиолинии отличаются сложным
профилем общей шириной до 200 км/с
- **Допплеровское уширение:**
 - 1 км/с — тепловое движение атомов
 - 5 км/с — хаотическое движение облаков
 - до 200 км/с — дифференциальное вращение
Галактики $\omega(R)$ (в центре — быстрее)

Примеры профиля радиолиний

Профили
линии НI



Вращение
 $\omega(R)$



- Скорость вращения v убывает с расстоянием →
- Облака В и С вращаются медленнее Q
- По наибольшей скорости (Q) можно определить скорость вращения Галактики на разных галактических долготах l (т.е для разных расстояний от центра) →
 - 1) определяется кривая вращения Млечного Пути**
- Интенсивность профиля линии зависит от плотности атомарного (нейтрального) водорода →
 - 2) находим распределение атомарного газа в диске**

Карта яркостной температуры (плотности) (Burton)

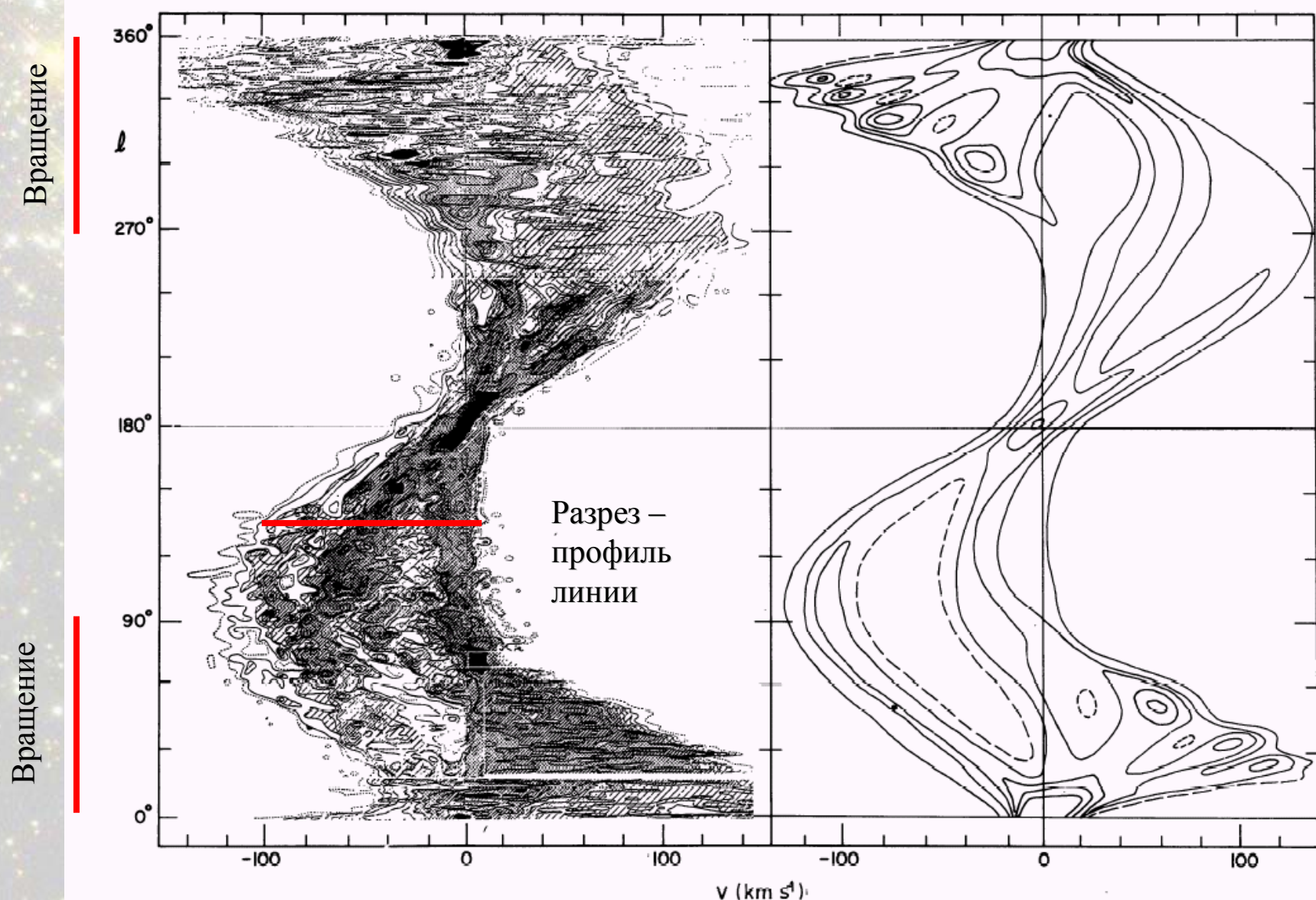


Fig. 1. Observed $T_b(l, V)$ diagram compiled by Lindblad (1967) (l) and $\tau(l, V)$ diagram generated by Yuan's (1970) model (r). The model begins 4 kpc from the center; hence the $\tau(l, V)$ diagram cuts off at $V = 282.5 \sin l \text{ km s}^{-1}$ for $l < 22^\circ$ and $l > 338^\circ$

Кривая вращения по нейтральному водороду:

$$V(R) = V_{max}(R_0 \sin I) \text{ (Burton, 1976)}$$

Скорость
вращения

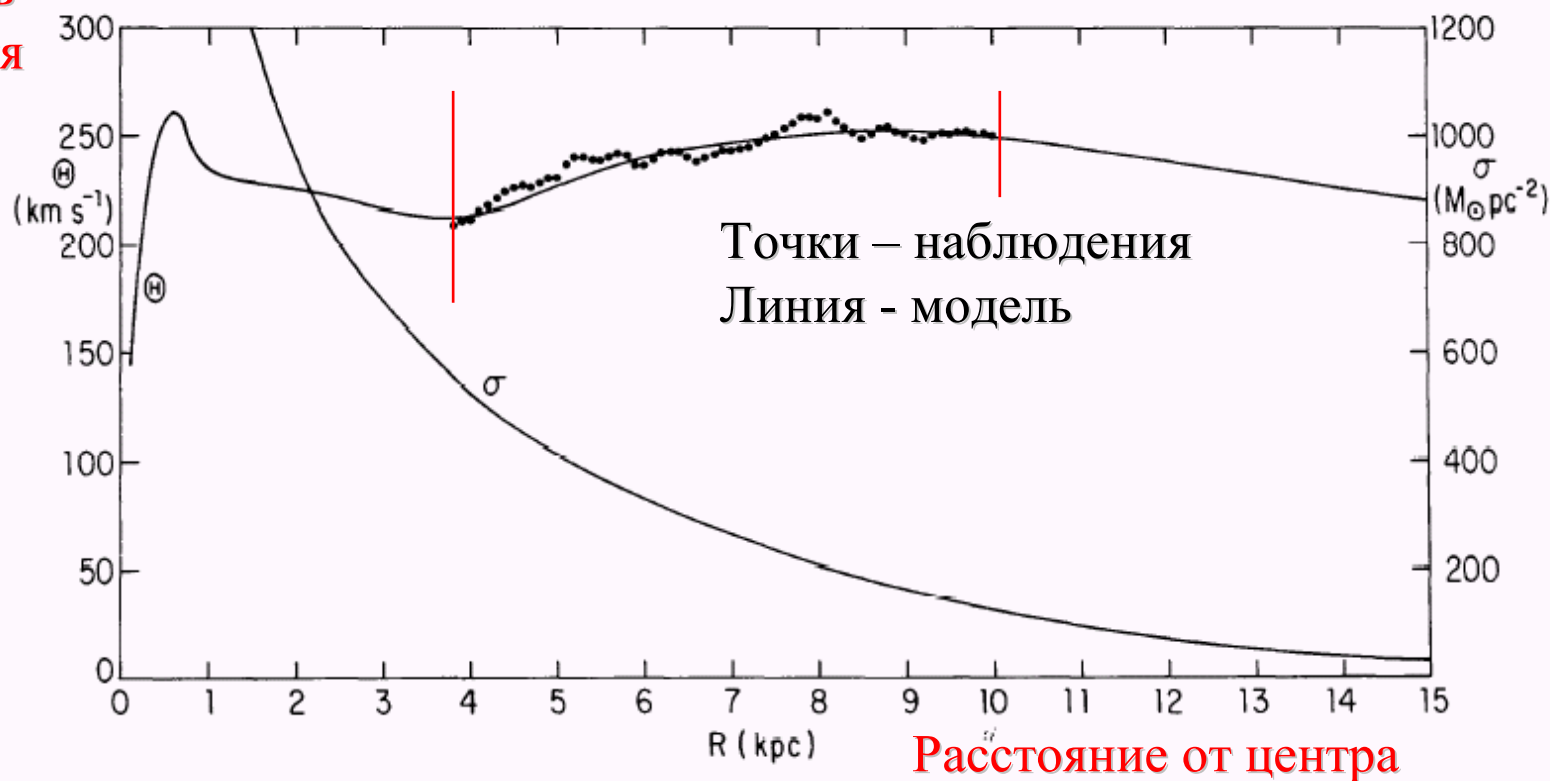


Figure 2 Variation with distance from the galactic center of the linear velocity of differential rotation, $\Theta(R)$, according to Simonson & Mader (1973) at $R < 5$ kpc and according to Schmidt (1965) at $R > 5$ kpc, and of the corresponding total galactic mass surface density, $\sigma(R)$, according to Innanen (1973). The dots show the rotational velocities found from H I observations of the subcentral-point region by Shane & Bieger-Smith (1966).

Так выглядит распределение нейтрального водорода в проекции на галактическую плоскость.

При известной фантазии можно увидеть фрагменты спирального узора...

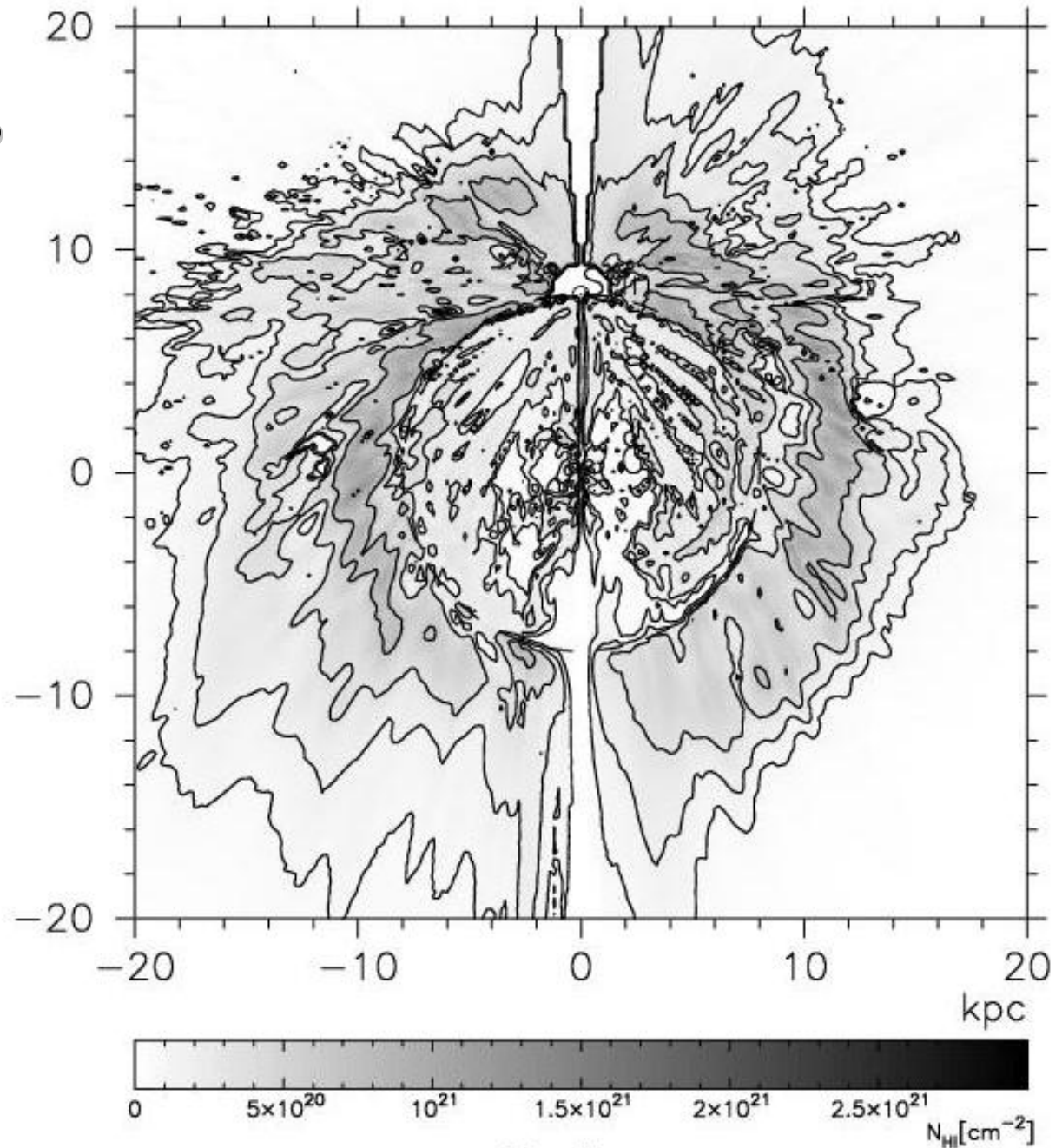
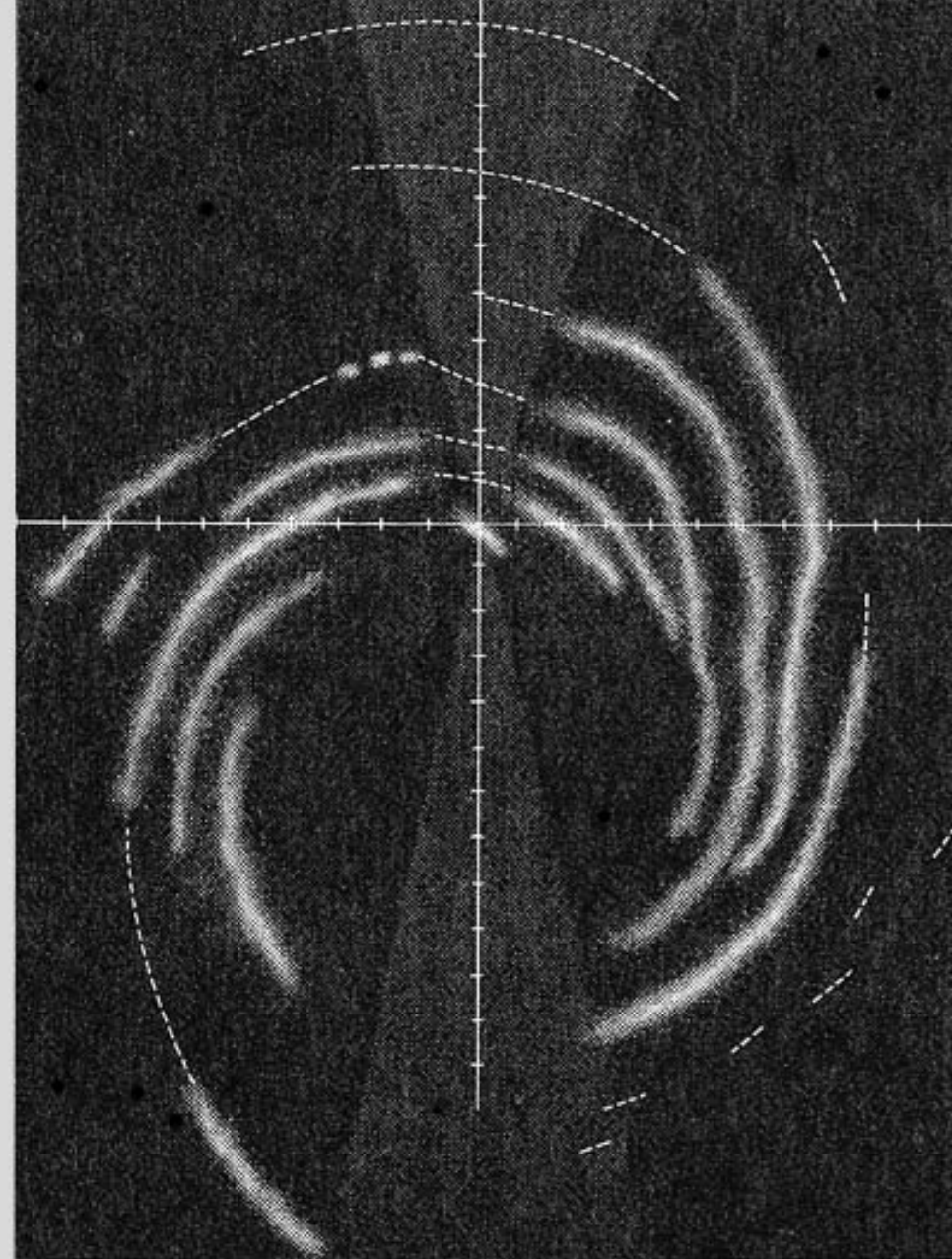


Fig 5



Gart Westerhout (1956)

Спиральные ветви Галактики
по наблюдениям в 21 см

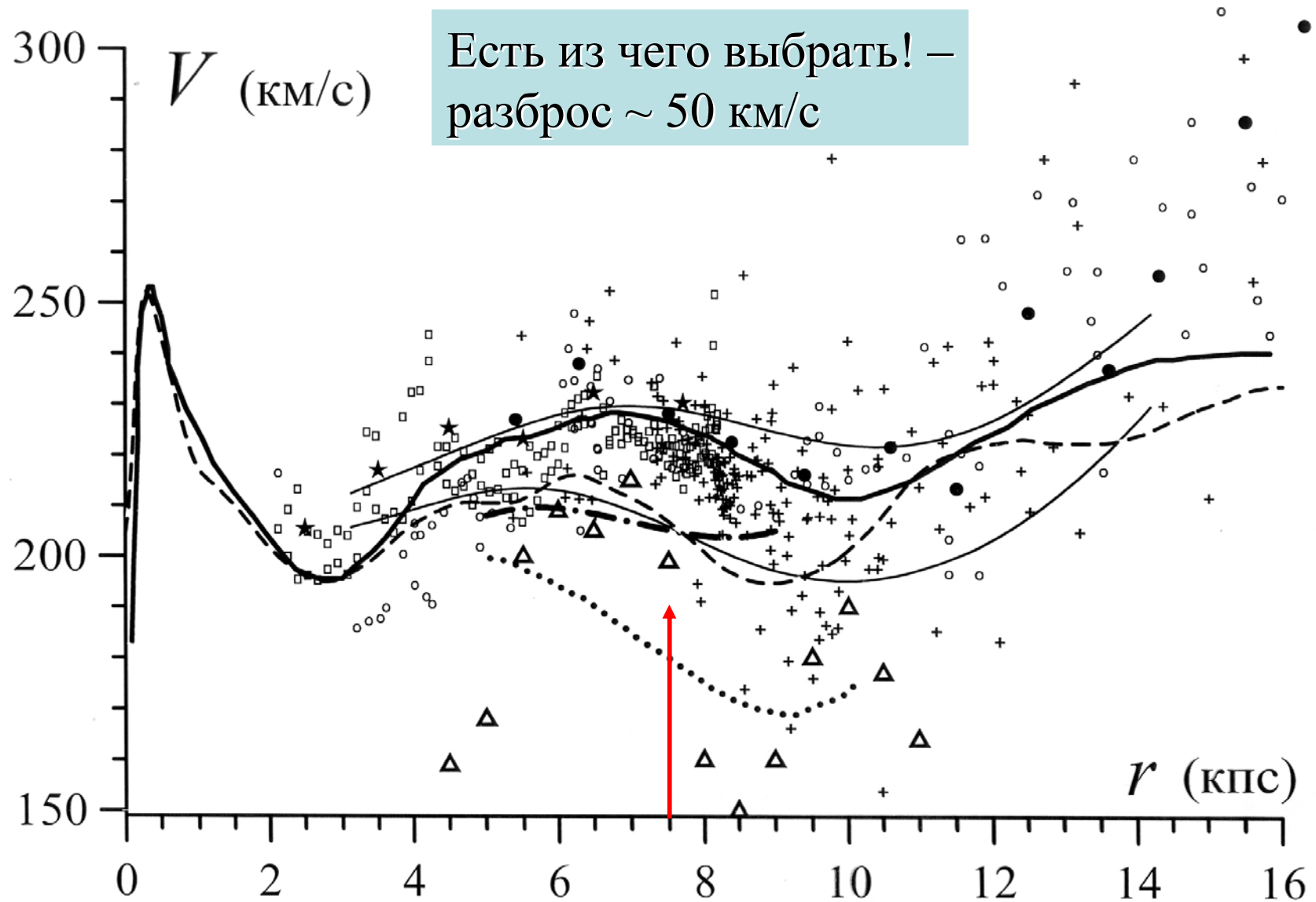


Gerrit Verschuur (1976)

Восстановлено по кривой вращения и профилям линии 21 см

- Надо иметь в виду, что карта распределения водорода *в большой степени условна*, т.к. за Солнечным кругом ($R > 7.5$ кпк) расстояния для газа определяются по кривой вращения, ход которой недостаточно надежно установлен.
- **Кинематический метод определения расстояний:** подбирается такое расстояние, чтобы наблюдаемая скорость объекта согласовалась со скоростью, вытекающей из кривой вращения.
- **Кривые вращения ненадежны! Убедимся в ЭТОМ** 

Кривые вращения для нашей Галактики (построенные по разным объектам)



Размеры Галактики

- Диаметр газового диска — $40 \text{ кпк} \approx 130$ тыс. св. лет.
- Толщина газового диска : от 200 пк в центральной области до 4 кпк на периферии.

- Газовый диск заметно искривлен на расстояниях более 12 кпк — отклонение от плоскости достигает 6 кпк (!)
- С причинами не все ясно (Приливное влияние? Изгибная неустойчивость?)

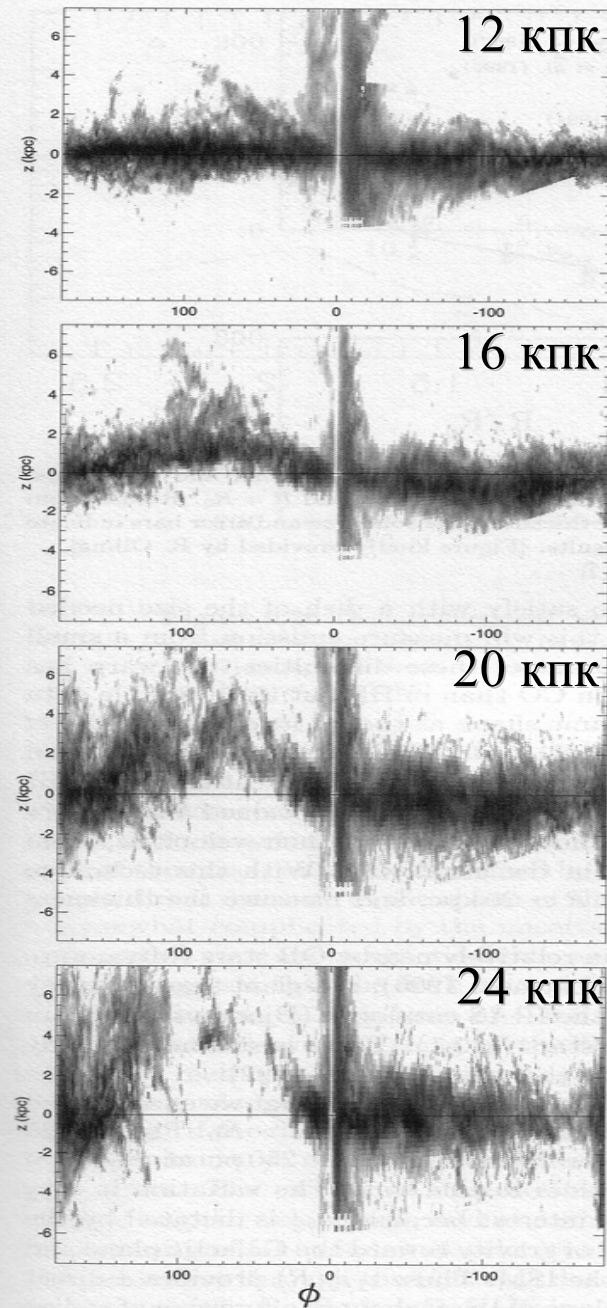


Figure 9.24 In each panel the grayscale shows the HI density on a cylinder of radius R with the Galactic center on the cylinder's axis. The horizontal and vertical coordinates are cylindrical polar coordinates ϕ and z , respectively, with the Sun at $(R, \phi, z) = (R_0, 0, 0)$ and ϕ increasing in the direction of Galactic rotation. Hence, the northern data are at $\phi > 0$. From top to bottom R takes the values 12, 16, 20 and 24 kpc. [From data published in Burton (1985), Hartmann & Burton (1997) and Kerr *et al.* (1986) courtesy of T. Voskes and B. Burton]

Это характерно не только для нашей Галактики

Galaxy ESO 510-G13

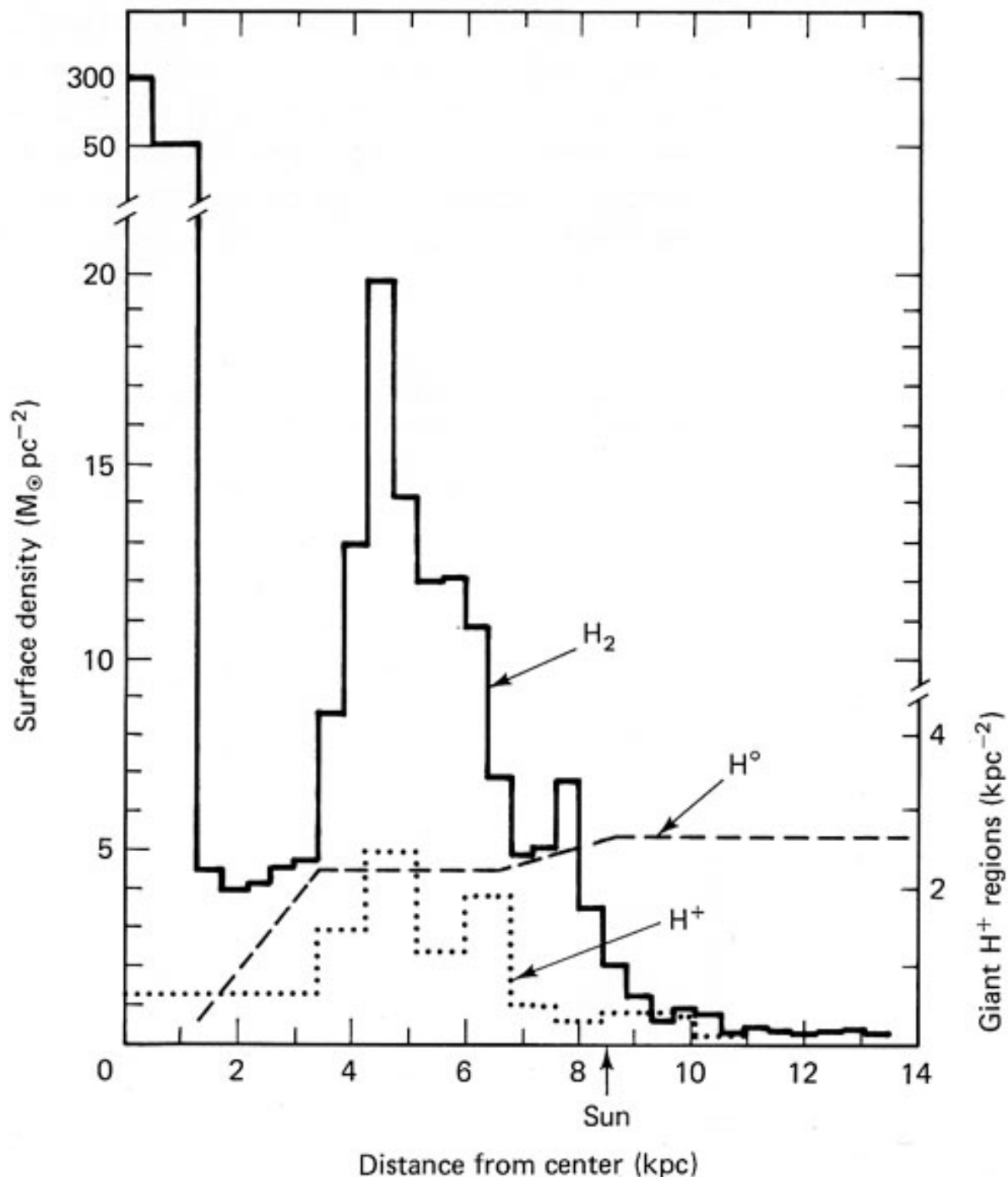


Hubble
Heritage

Ионизованный и молекулярный газ

- Ионизованный водород HII излучает в оптической линии H_α ($\lambda 6563\text{\AA}$)
- Расстояния до облаков ионизованного водорода определяются как кинематическим методом (не очень надежно), так и — если удастся — по горячим звездам, возбуждающим их свечение.

- Молекулярный водород (H_2) наблюдают по излучению других молекул-примесей (CO и др.) в миллиметровом радиодиапазоне.
- Расстояния до молекулярных облаков оцениваются обычно кинематическим методом и не очень надежны.



Распределение
поверхностной
плотности
молекулярного,
нейтрального и
ионизованного
водорода
в диске
Галактики

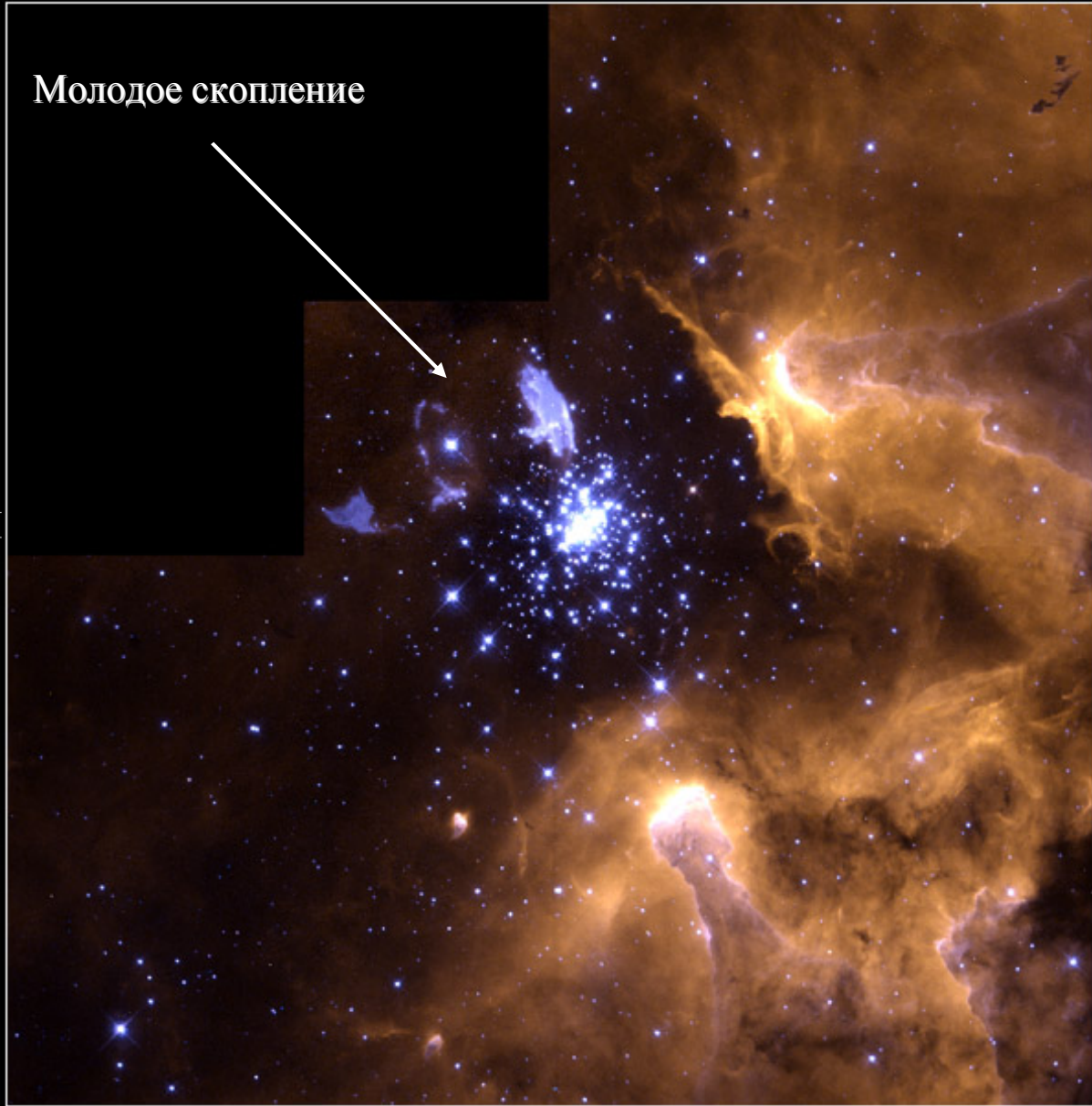
Фазы газовой среды на примере туманности



- В самой толще слоя атомарного водорода, где температура составляет 10-100К, располагаются холодные и плотные молекулярные облака (МО, ГМО) с массой, достигающей 100 тыс. солнечных.
- Именно там идет рождение звезд и скоплений.
- Горячие массивные звезды возбуждают водород, ионизуют его и заставляют светиться.
- Давление излучения и звездный ветер стимулируют дальнейшее звездообразование.
- Тот же результат производят ударные волны, в том числе в спиральных рукавах.

Молодые скопления
давлением излучения
и звездным ветром
«выметают» газ и
формируют каверны,
на «стенках» которых
могут рождаться звезды

Молодое скопление

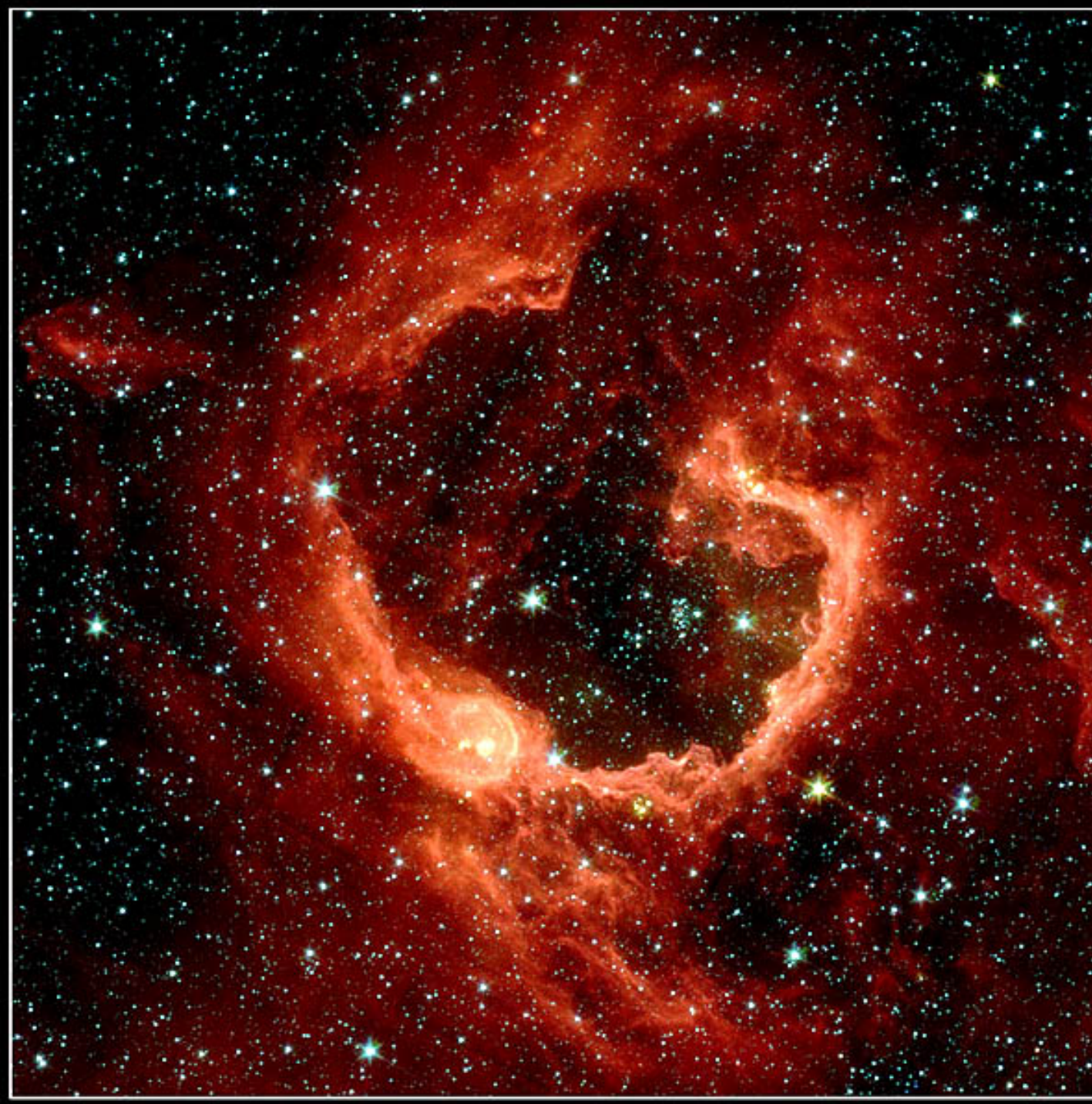


NGC 3603

HST • WFPC2

PRC99-20 • STScI OPO • June 1, 1999

Wolfgang Brandner (JPL/IPAC), Eva K. Grebel (Univ. Washington),
You-Hua Chu (Univ. Illinois, Urbana-Champaign) and NASA

A deep-space image showing a large, irregularly shaped nebula with a reddish-orange glow. The nebula has a complex, filamentary structure with several bright, yellowish-white stars embedded within it. The background is a dense field of smaller, distant stars.

*Взаимодействие
массивных
звезд с МЗС
приводит к
формированию
гигантских
пузырей и
оболочек HII*

*Не исключено,
что в них
формируется
следующее
поколение
звезд*

Star-Forming "Bubble" RCW 79

Spitzer Space Telescope • IRAC

NASA / JPL-Caltech /

E. Churchwell (University of Wisconsin-Madison)

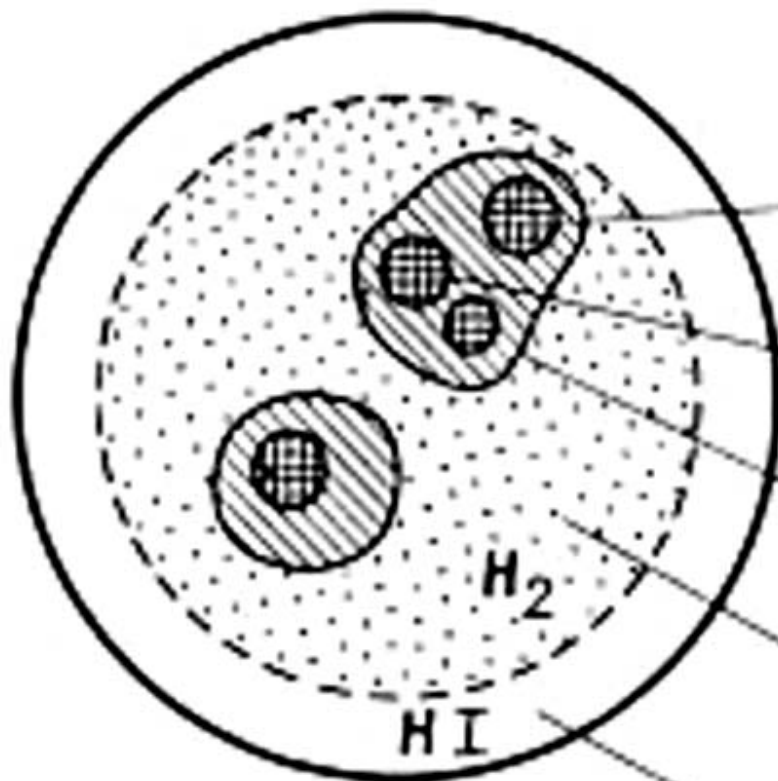


Star-Birth Clouds • M16

HST • WFPC2

PRC95-44b • ST ScI OPO • November 2, 1995
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

Строение молекулярного облака



Структурная
единица

Малые
уплотнения

Мелкомасштабные
конденсации

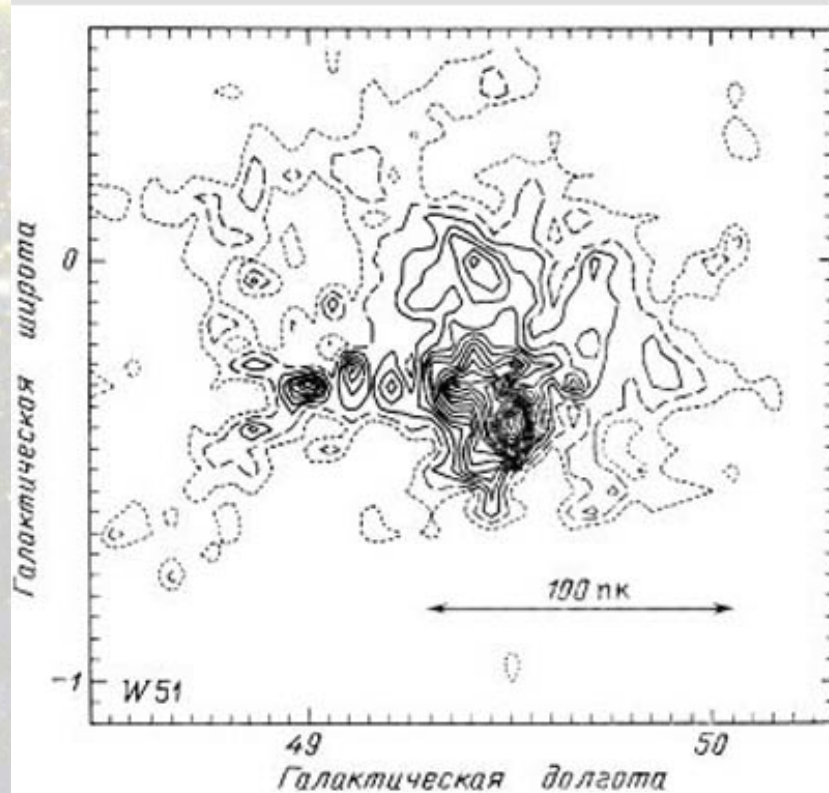
Крупномасштабные
конденсации

Диффузная
оболочка

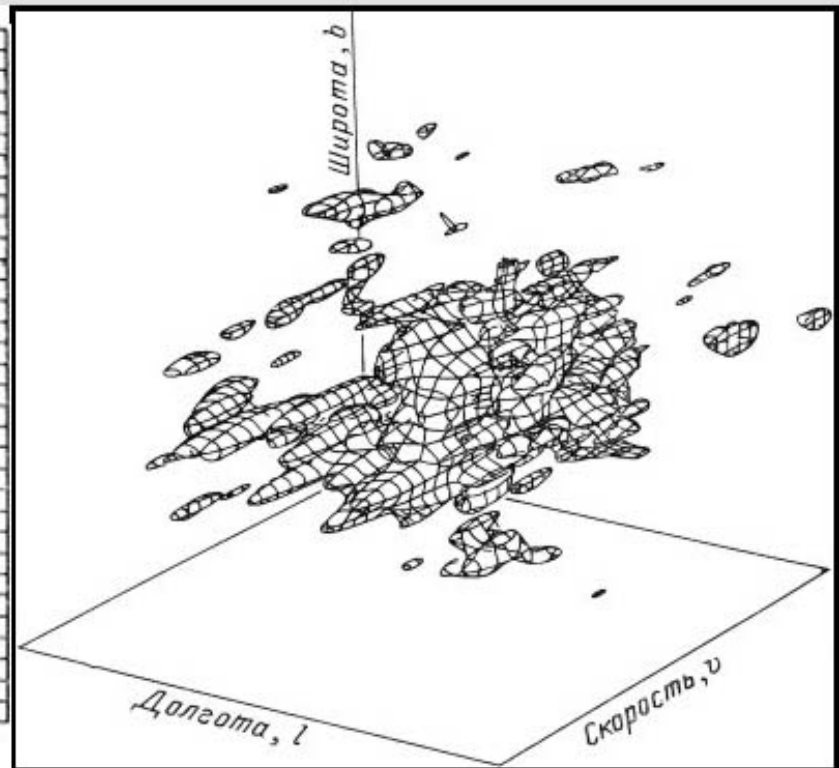
Теплая шуба
из атомарного
водорода

Сложная (фрактальная) структура молекулярных облаков

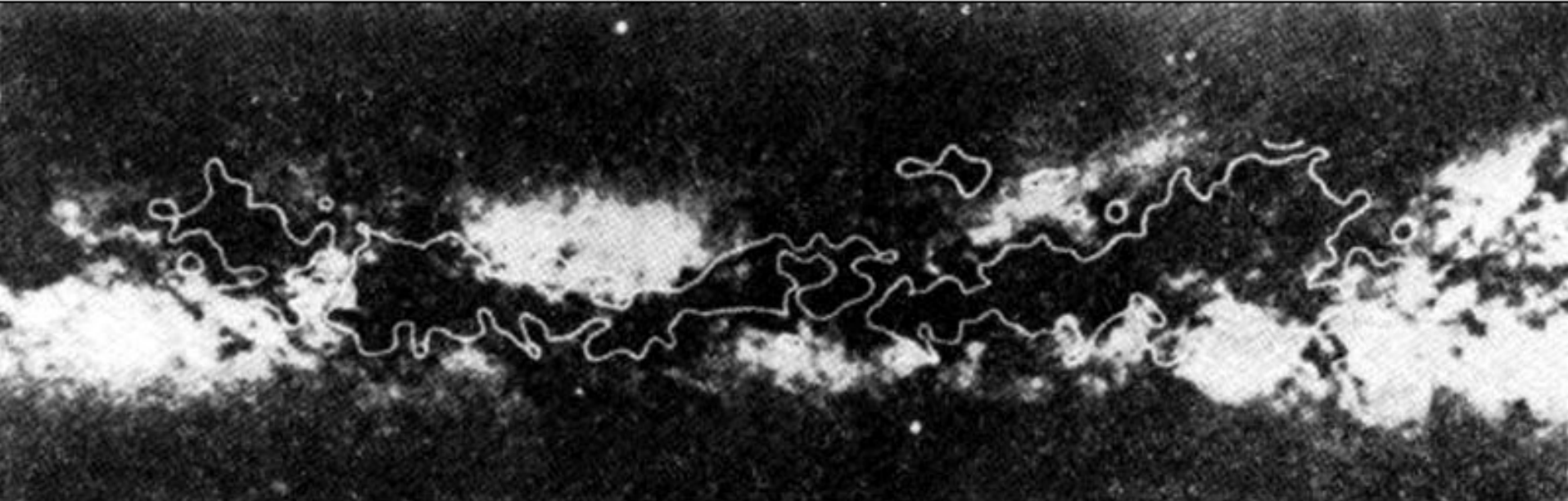
Радиокарта (в линии CO) области звездообразования W 51



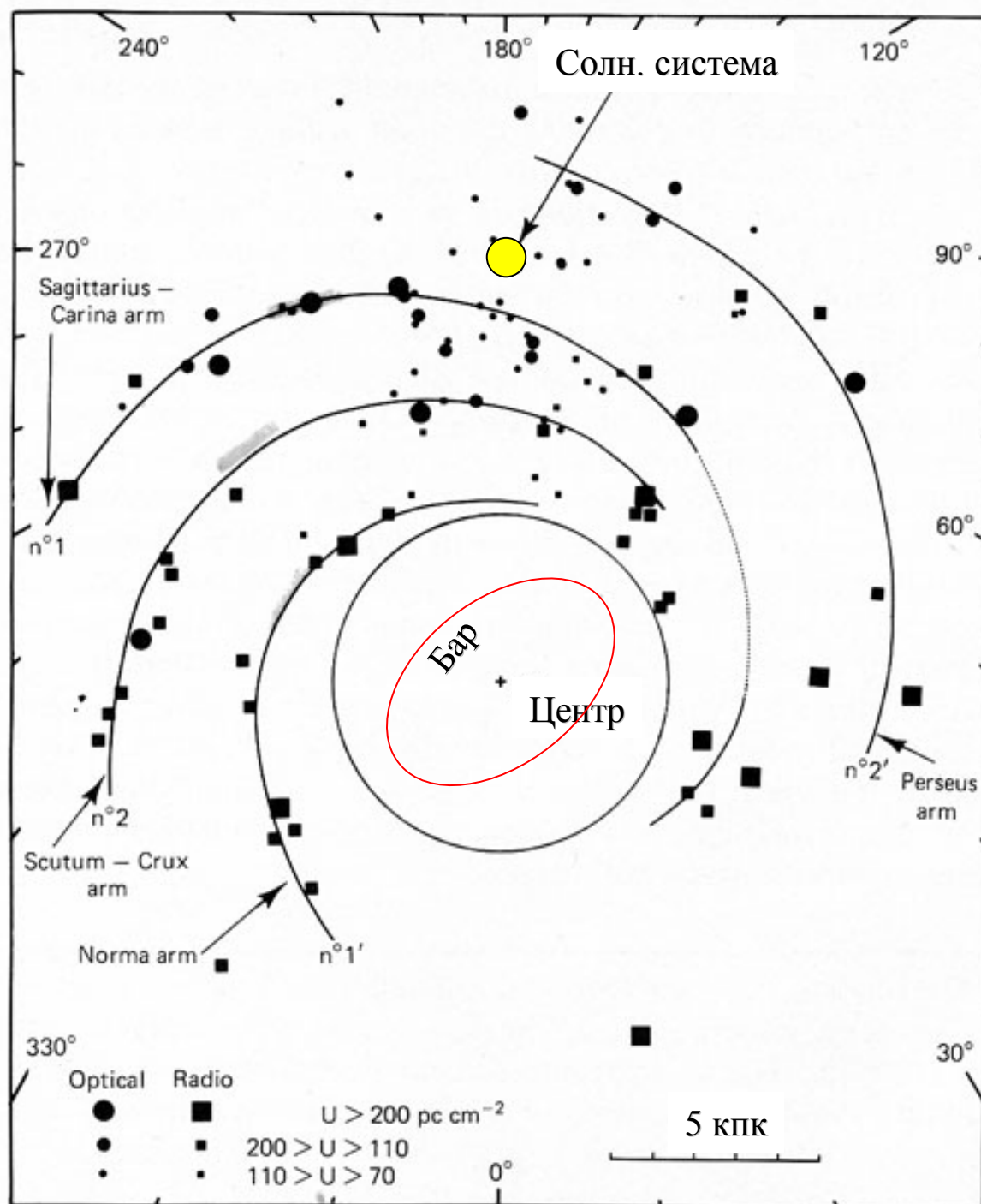
Двумерная карта в проекции на небесную сферу.
Линии - радиоизофоты.



Квазитрехмерное изображение, третья координата - лучевая скорость. Граница облаков - поверхность равной яркостной температуры $T = 4\text{ K}$.



Молекулярные облака в Лебеде, Лисичке, Стреле, Орле и Щите (вверху) совпадают с темными областями Млечного Пути (внизу)



Спиральная структура
нашей Галактики
по оптическим и радио
наблюдениям зон НII

Данных для области
внутри 4 кпк нет

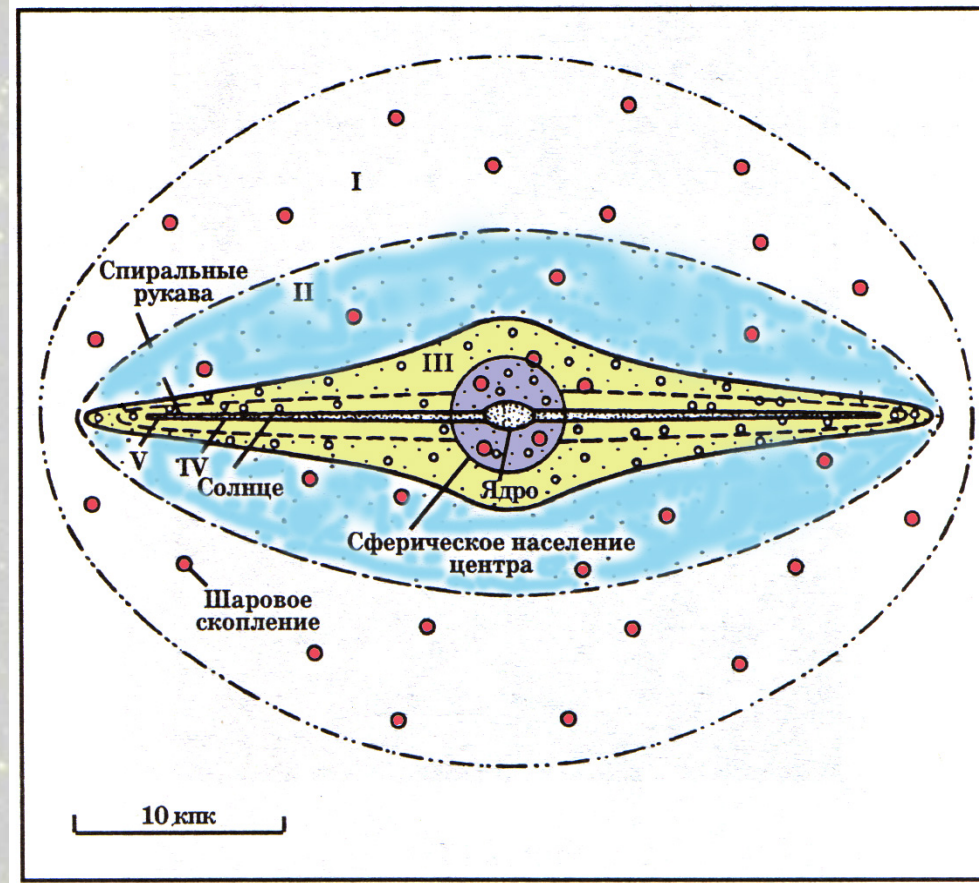
Солнце расположено
между рукавами
Персея и Киля-Стрельца

Gejrgelin Y.M., Gejrgelin Y.P.
Obs. de Marseilles

- Картина красивая, но... ошибка в определении расстояний достигает ~ 1 кпк, и это делает позиционирование объектов, отслеживающих спиральные рукава, весьма сомнительным.
- Характер спиральной структуры Млечного Пути до сих пор остается не до конца понятным — это одна из важных задач астрономии.

5. Галактическое гало (сфероид)

- Гало почти сферической формы населено объектами *первого поколения* возрастом $\sim 10\text{-}15$ млрд. лет и с 10-200-кратным дефицитом химических элементов тяжелее гелия («металлов»)
- Это субкарлики (звезды с дефицитом «металлов»), красные гиганты, переменные звезды типа RR Лиры, а также шаровые звездные скопления.



- Шаровые звездные скопления, как и рассеянные – самогравитирующие звездные системы, но с массой от 10000 до 1 млн. солнечных и размерами от 10 до 100 пк.
- Переменные типа RR Лиры – «стандартные свечи» со светимостью около 40 солнечных, легко различимые в других близких галактиках.
- Объекты гало показывают сильную концентрацию к галактическому центру.

В Млечном Пути
известно всего 150
шаровых
скоплений, тогда
как в гигантских
эллиптических
галактиках их число
может достигать
десятков тысяч.

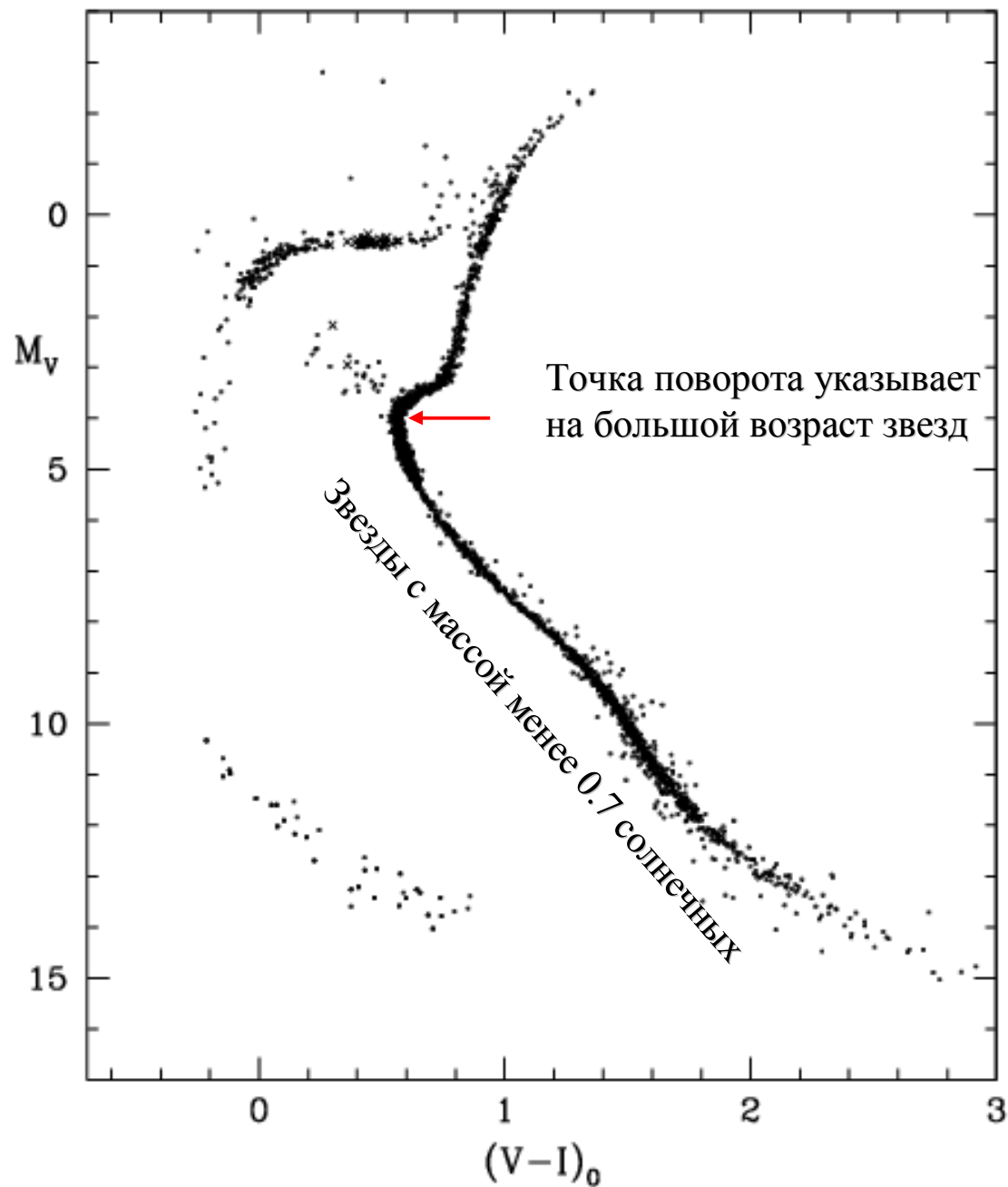
Ярчайшие шаровые
скопления в
миллион раз ярче
Солнца и очень
эффектны →

47 Tuc



© Anglo-Australian Observatory

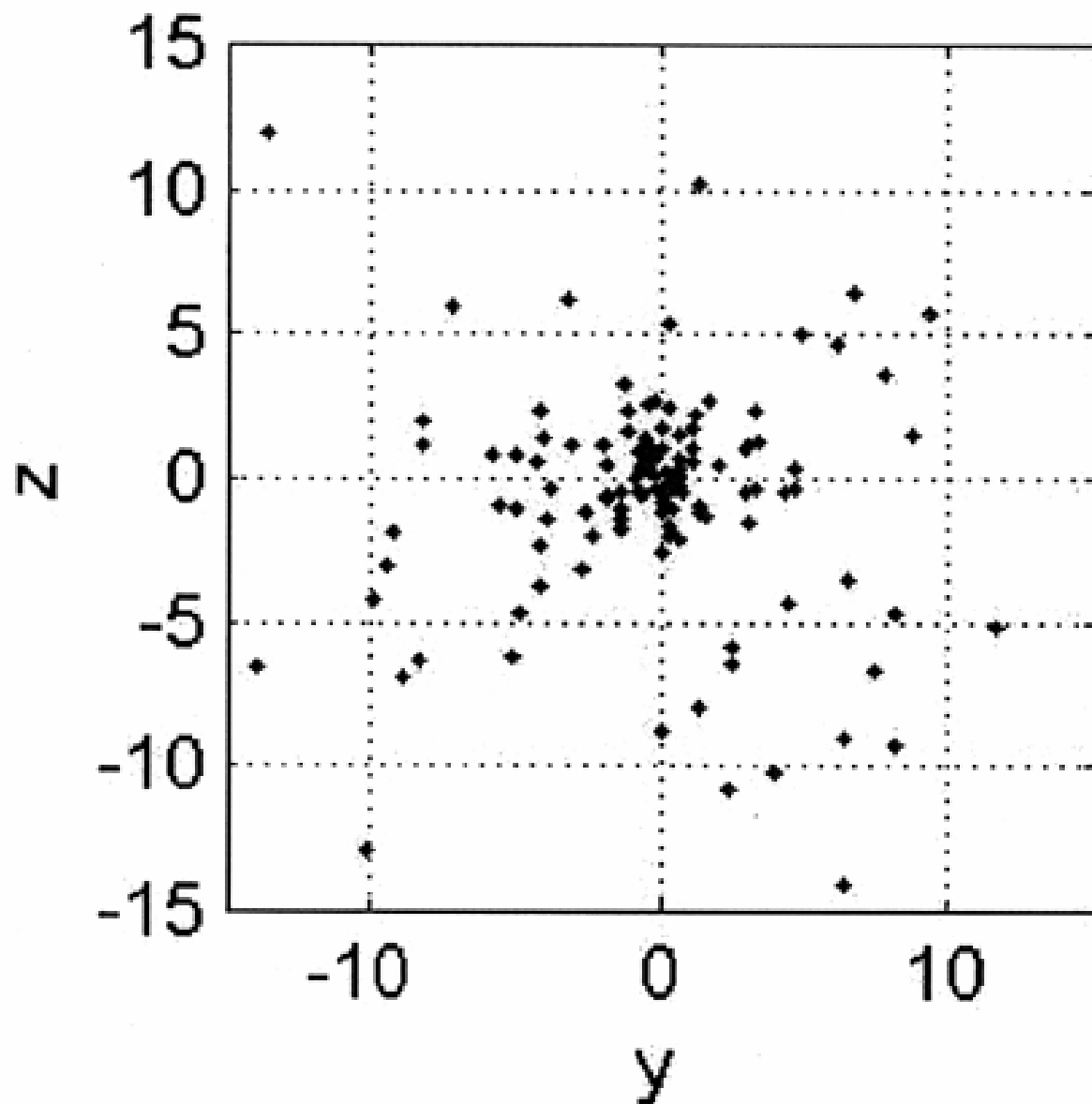
Шаровые
скопления —
старейшие
жители
Галактики



Типичная диаграмма ГР для ШЗС

Распределение шаровых скоплений в Галактике

Самые далекие скопления удалены от центра на ~ 100 кпк

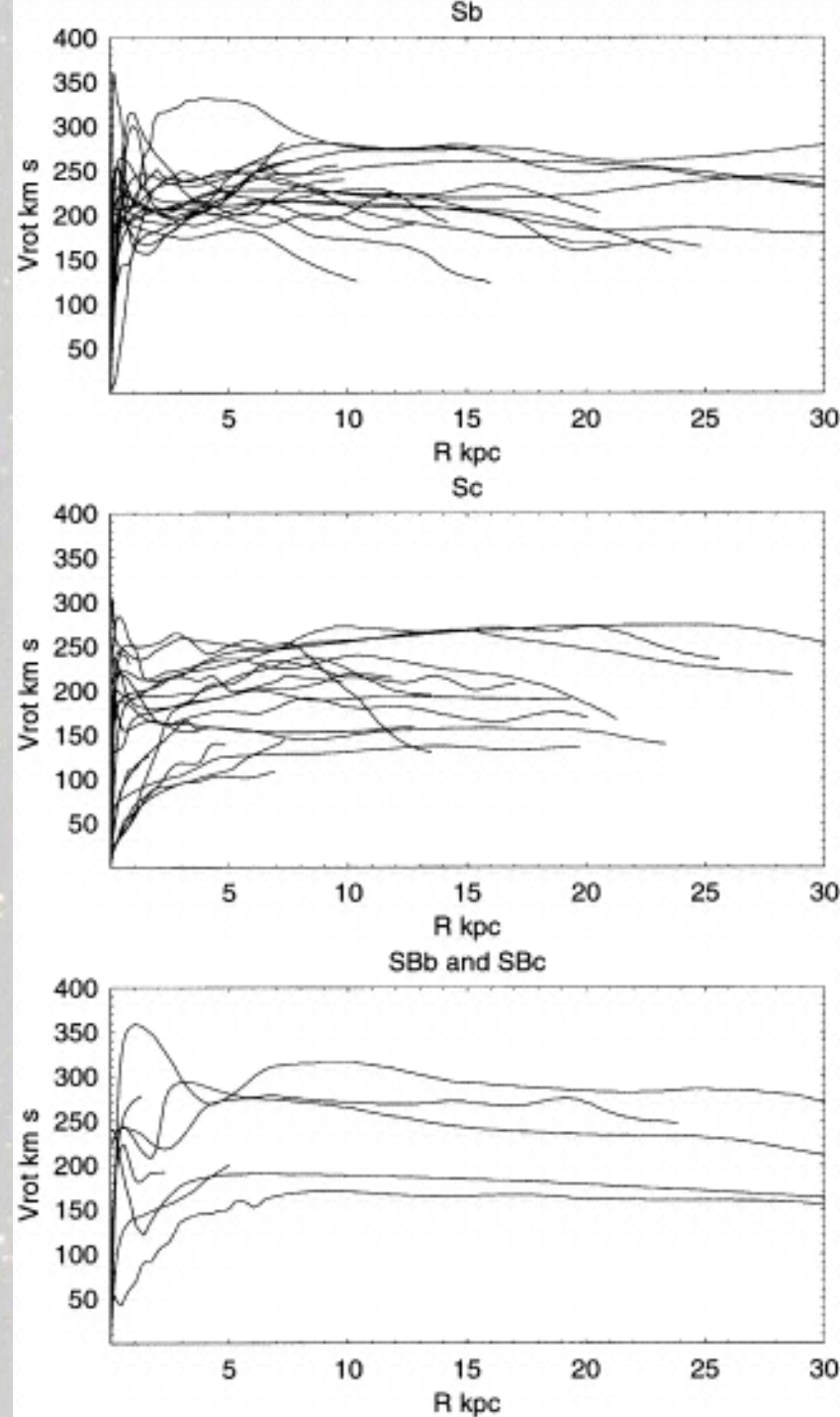


6. Масса Галактики

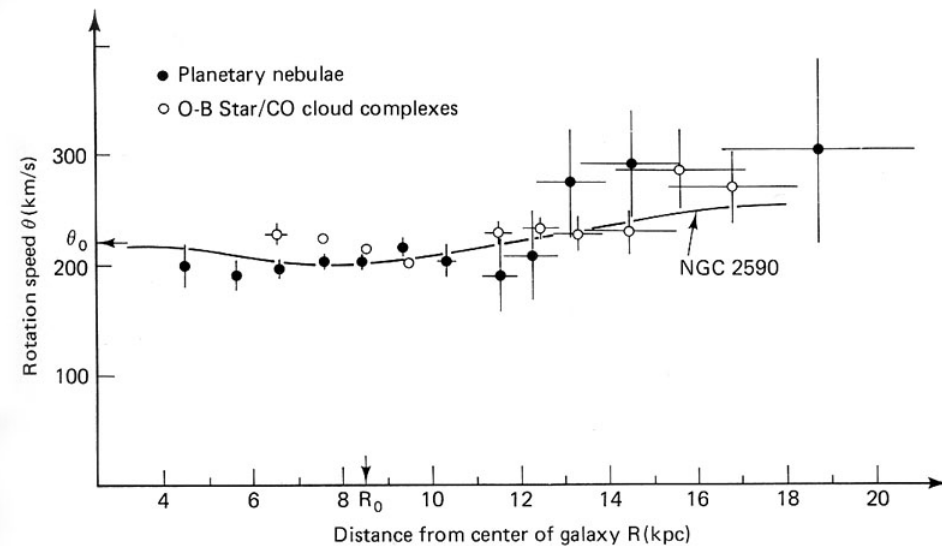
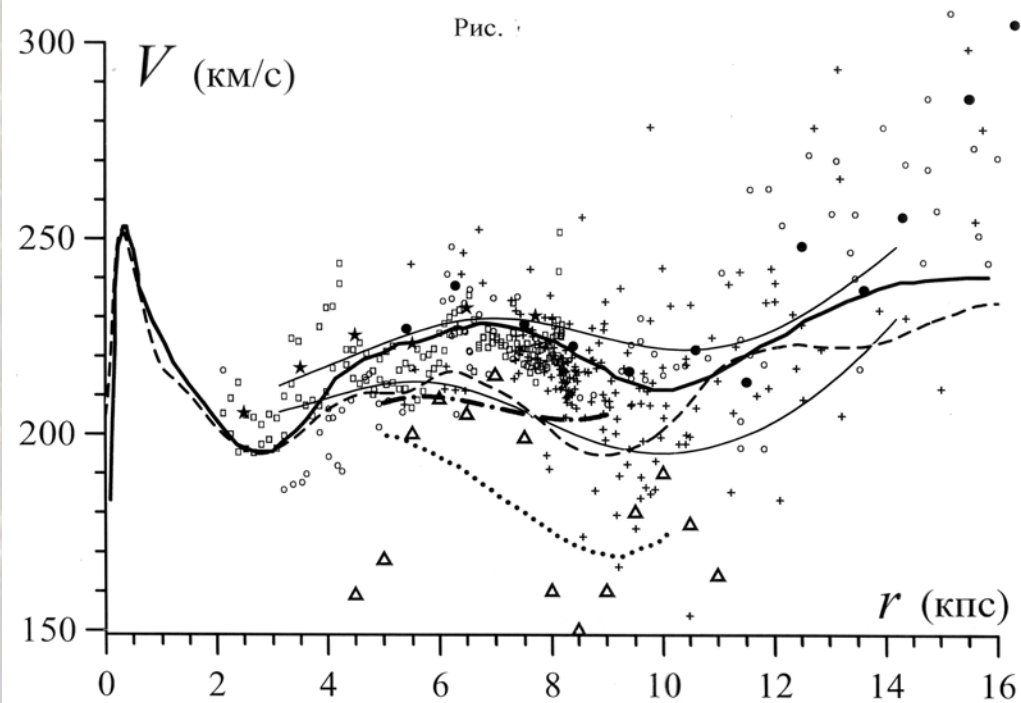
- Скорость вращения диска – 250 км/с →
масса в пределах 10 кпк ~ 120 млрд. солнечных
- Вклад в эту массу:
 - диска ~ 80-90%
 - гало ~ 10-20%
- Какова масса в пределах 50-100 кпк? – Нужна надежная кривая вращения или данные о максимальных скоростях звезд. Если скорость вращения не уменьшается с расстоянием, то полная масса может достичь 1000 млрд. солн.

- Проблема «скрытой массы» известна с 20-х годов XX века: требовалось объяснить расхождение между большими скоростями галактик в скоплениях и недостаточной массой светящегося вещества в них.
- Важная проблема: где сосредоточена скрытая материя («темная материя») в галактиках и их скоплениях?

- Многие спиральные галактики обладают «плоскими» кривыми вращения, простирающимися до расстояний порядка 30-50 кпк.
- Это свидетельство в пользу значительной скрытой массы.
- Как с этим обстоит дело в нашей Галактике?



- Ее кривая вращения пока ненадежна →
- В окрестностях Солнца значительной скрытой массы, безусловно, нет.



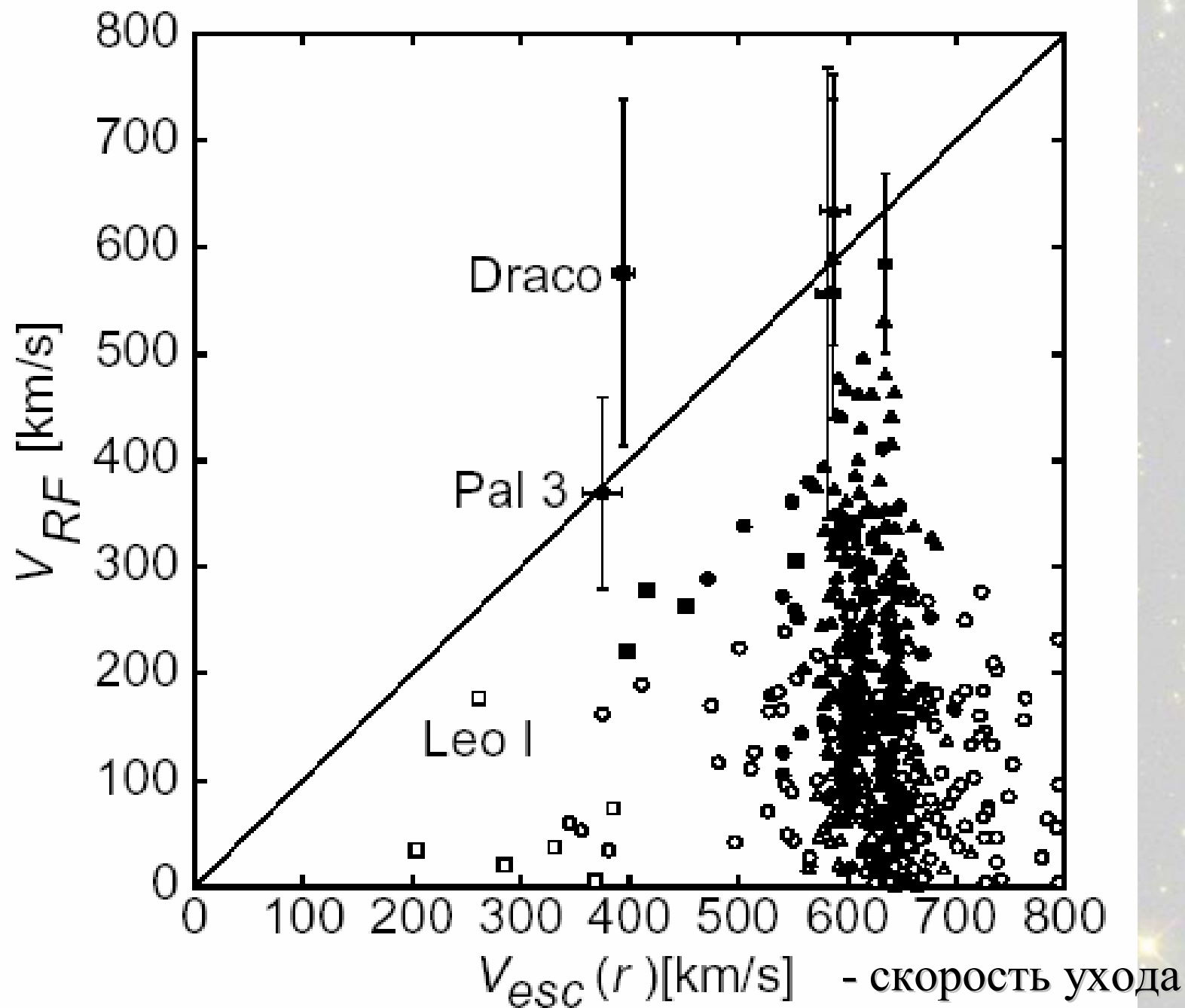
Кривая вращения Галактики в области $R > 4$ кпк по данным о молодых звездных комплексах и планетарных туманностях

← Есть намеки на плоскую кривую вращения

Дополнительная информация о скрытой массе на больших расстояниях от центра Галактики

- По скоростям движения 11 карликовых галактик, 137 шаровых скоплений и 413 отдельных звезд горизонтальной ветви получены такие ограничения на полную массу Галактики:
- -- основной вклад в ограничения на массу дают карликовые галактики Draco, Leo I и далекое шаровое скопление Pal3
- -- нижняя оценка массы $\sim (1.8-2.5) \times 10^{12} M_{\odot}$ в пределах расстояния до Leo I (270 кпк)
 - в пределах расстояния до БМО (~ 50 кпк) нижняя оценка массы $\sim 5.5 \times 10^{11} M_{\odot}$ практически не зависит от допущений

Наблюдаемая скорость



Поиск объектов скрытой массы

- Эксперименты OGLE по гравитационному микролинзированию (БМО, ММО, балдж Галактики).

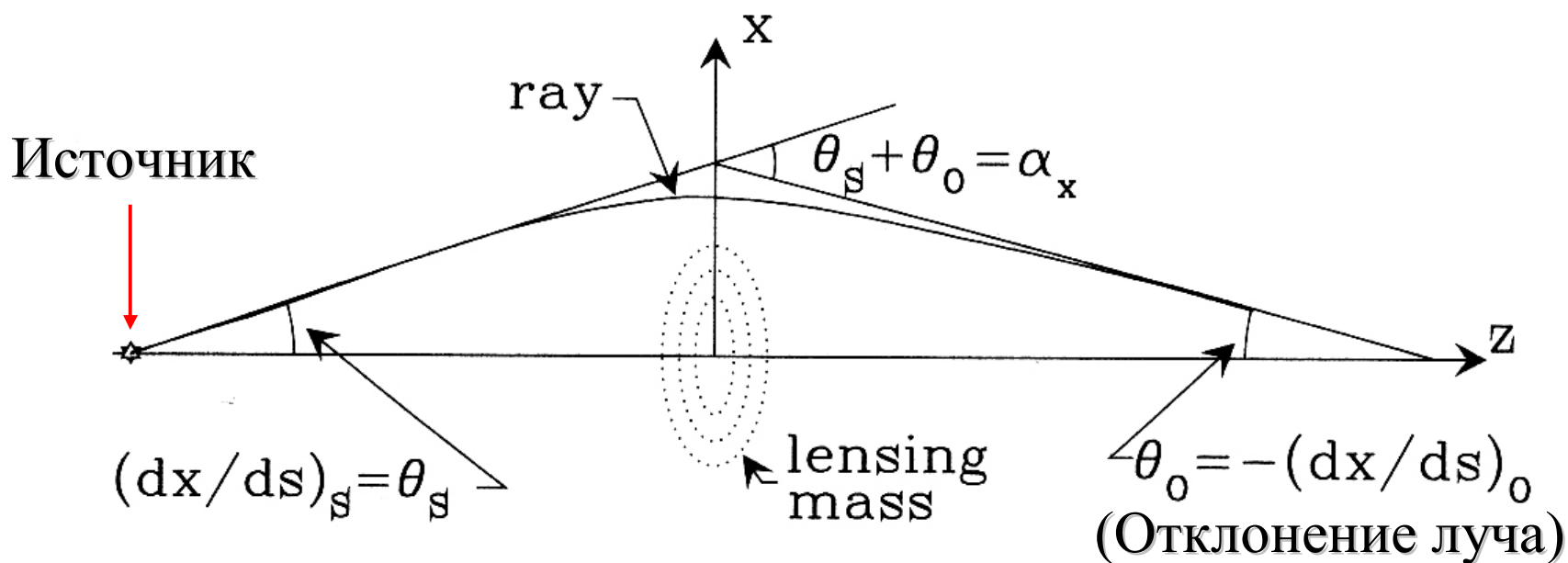
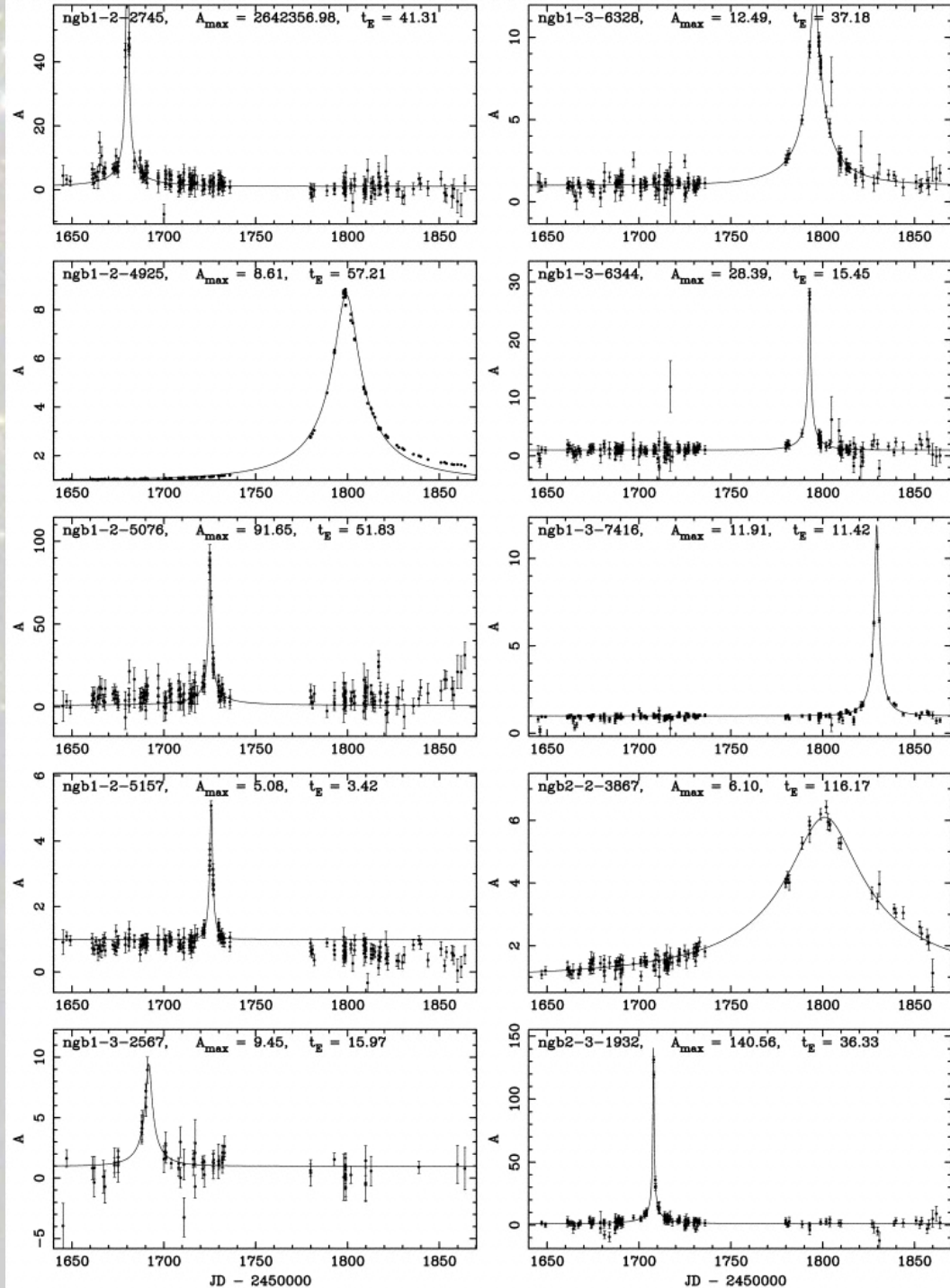


Figure A.1 The projection onto the xz -plane of a light ray that is gravitationally deflected en route from source (at left) to observer (at right).

Если звезда и линза движутся друг относительно друга, изображение на некоторое время ярчает.

Ведется мониторинг областей неба и поиск «событий» - симметричных кривых усиления блеска.

Найдены десятки случаев в направлении на БМО, ММО и балдж Галактики.



7. Орбиты звезд и скоплений

- Объекты диска и объекты гало различаются не только пространственным распределением, но и характером пространственных движений:
 - звезды диска движутся почти **по круговым орбитам** со скоростью $\sim 200\text{--}250$ км/с и периодом обращения около 230 млн. лет («галактический год»);
 - звезды гало движутся преимущественно **по сильно вытянутым орбитам** с перигалактическим расстоянием около 1 кпк, со средними скоростями порядка 200 км/с и периодами более 200 млн лет.

Фазовая траектория на плоскости $x - y$
у, килопарсек Фрагмент орбиты за 450 млн. лет



Проекция на сопутствующую меридиональную плоскость



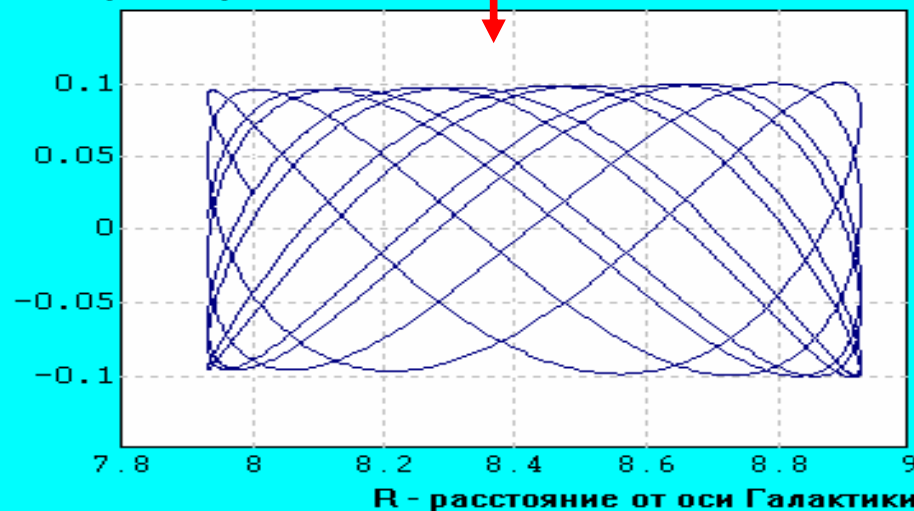
Орбита «ящичного» типа.

• **Траектория Солнца в простейшей модели Галактики.**

← Проекция на плоскость симметрии Галактики.

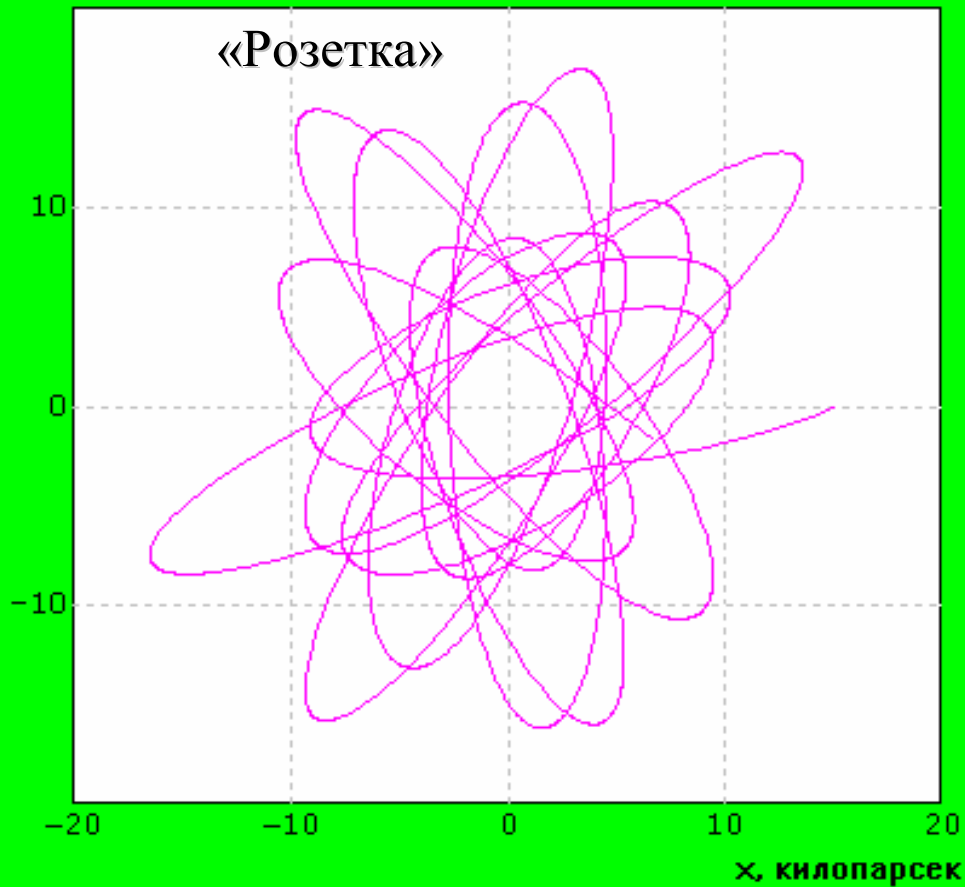
Период вертикальных колебаний – около 75 млн. лет

Фазовая траектория на плоскости $R - z$
 z - верт. коорд.



Фазовая траектория на плоскости $x - y$

y , килопарсек

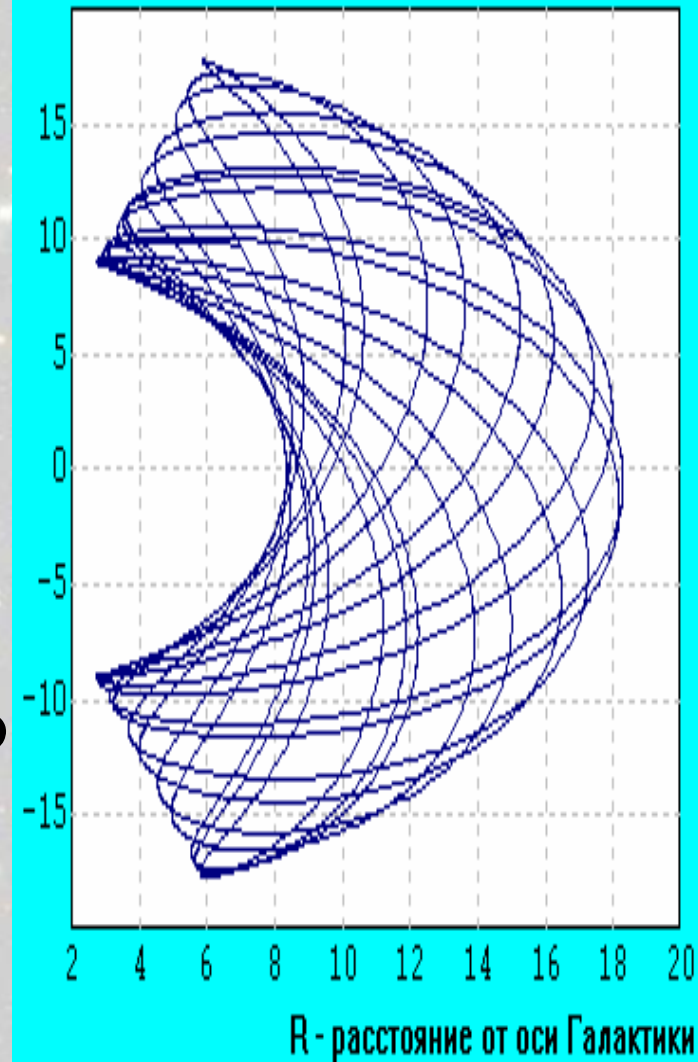


- Витки орбиты типичного шарового скопления за 5 млрд. лет.
- Орбита «оболочечного» типа



Фазовая траектория на плоскости $R - z$

z - верт. коорд.

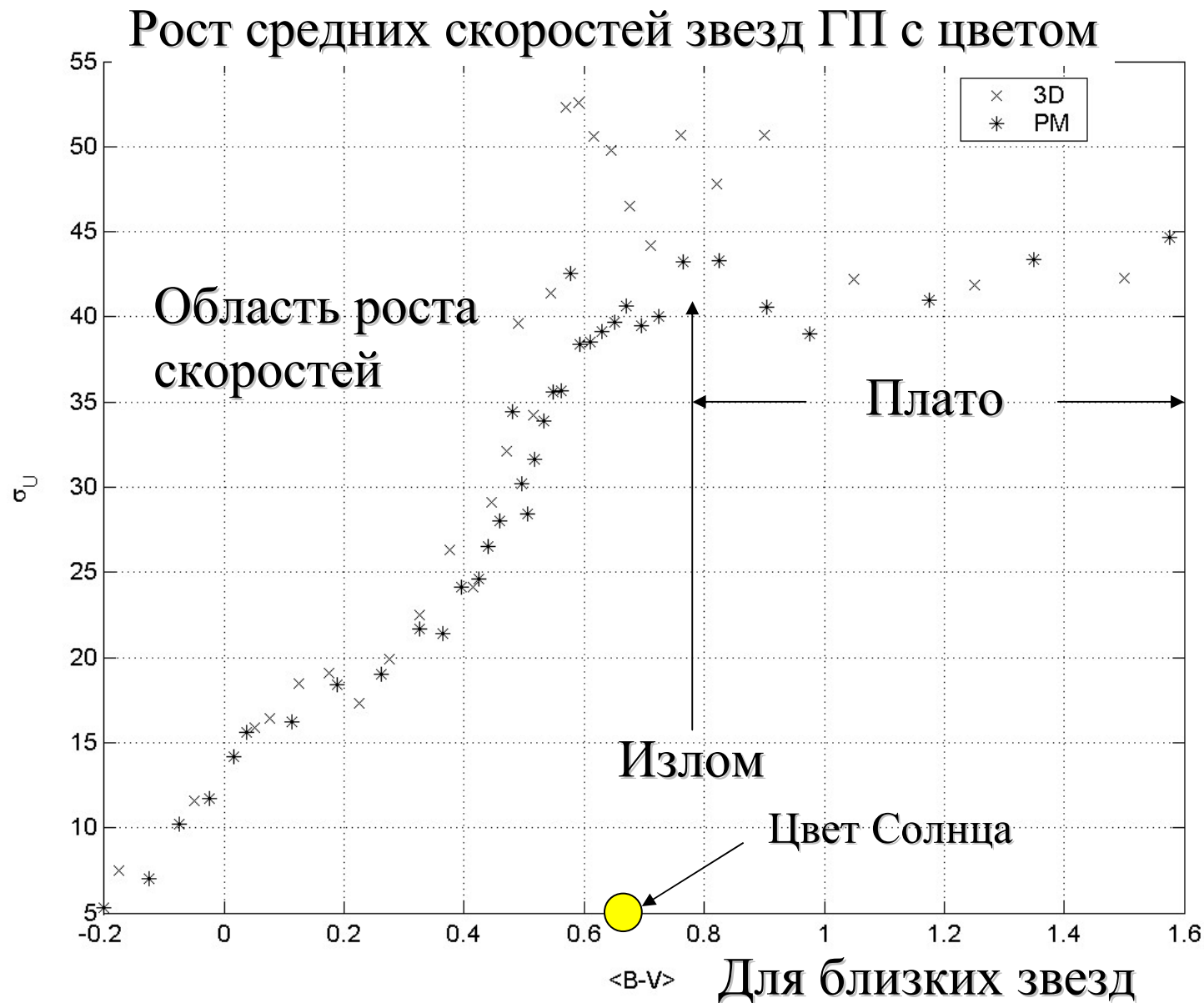


Имеет ли для нас значение галактический год?

- Диск совершает один оборот примерно за 230 млн. лет.
- Спиральный узор – волна плотности – вращается твердотельно, т.е. с одинаковой угловой скоростью. Разность этих угловых скоростей – частота, с которой Солнце встречает спиральные рукава.
- В спиральных рукавах повышена плотность объектов, связанных с образованием звезд, в т.ч. пыли, планетозималей, кометных ядер и т.д.

- Высказывались идеи о том, что в эпохи пересечения Солнцем спиральных рукавов возрастает опасность кометных бомбардировок, приводящих к массовой гибели живых организмов и геологическим катаклизмам.
- Идея нуждается в изучении, однако, главное состоит в том, что скорость вращения спирального узора непосредственно из наблюдений не определяется и сейчас пока не известна.
- Есть идея, что Солнце располагается в области синхронного вращения диска и спирального узора — «коротации» — и очень редко встречает спиральный узор.

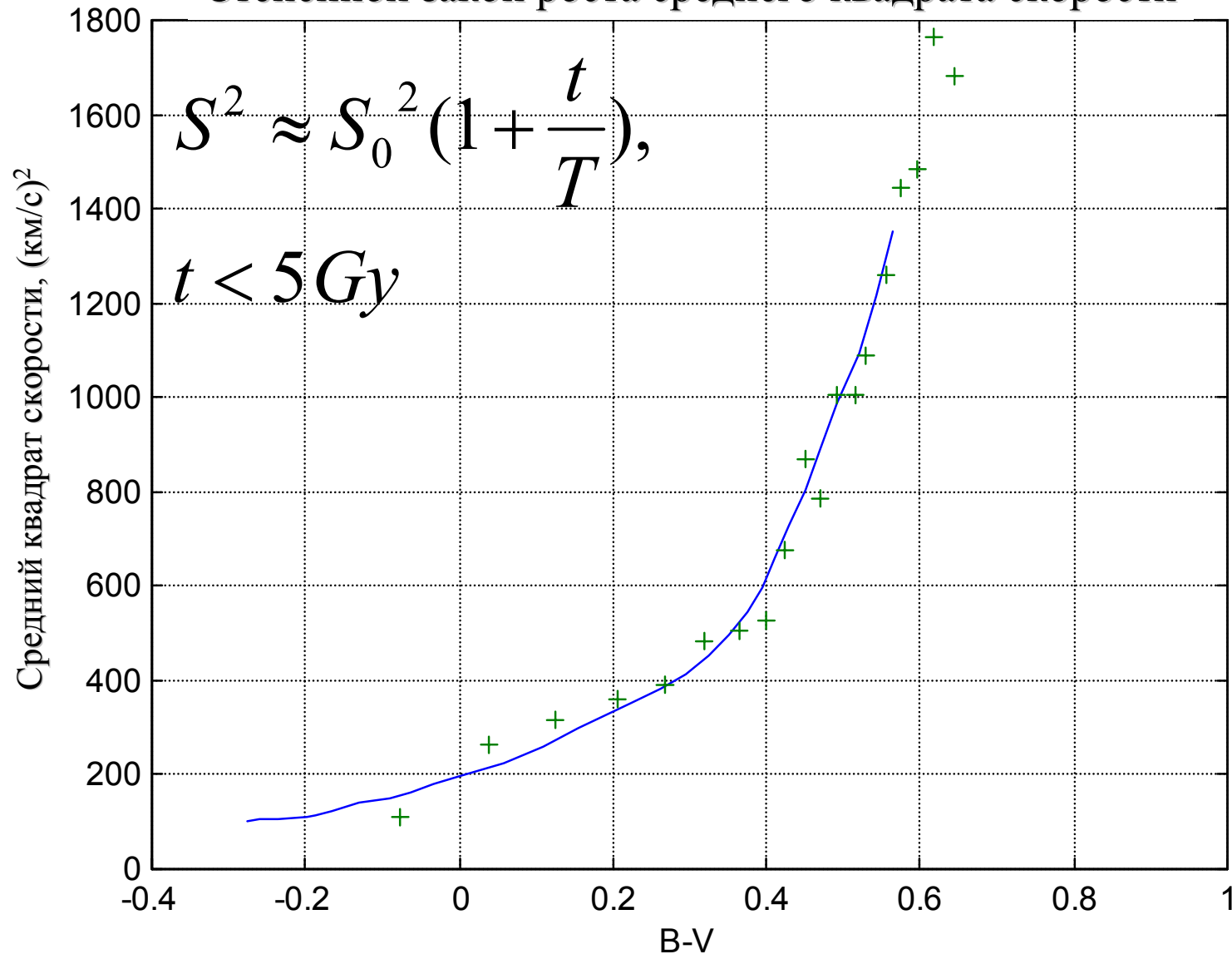
8. «Нагрев» галактического диска



- Вдоль главной последовательности систематически меняется **средний возраст звезд**:
- Самые молодые звезды данного цвета имеют очень малый возраст
- Самые старые звезды данного цвета имеют возраст, равный времени жизни на ГП (вспомним, что оно растет по мере перехода от голубых звезд к красным)
- В итоге средний возраст близок к половине времени жизни на ГП, в то время как
- на плато средний возраст равен половине возраста диска Галактики, т.е. он уже не меняется с цветом звезд

Очень быстрый нагрев: $T \sim 200$ млн. лет

Степенной закон роста среднего квадрата скорости



- Процесс быстрого «нагрева» охватывает все звезды галактического диска.
- Где мощный источник энергии «нагрева»?
Рассматриваются различные варианты:
 - Рассеяние на ГМО
 - Рассеяние на регулярных волнах плотности
 - Рассеяние на объектах «темного гало»
(высокоскоростные облака HI, сверхмассивные черные дыры)
 - Эффекты падения спутников на диск Галактики
 - Коллективные явления, связанные с развитием Джинсовской и изгибной неустойчивости

- Каждый из механизмов обеспечивает высокую эффективность нагрева, но относительная роль и детали процессов до сих пор остаются предметом дискуссии

9. Центр Галактики

- Добраться до центра Галактики можно только в инфракрасных лучах, где поглощение $\sim 3\text{-}4$ зв.вел.
- Использование телескопов с адаптивной оптикой (3.6-м NTT, 4 x 8-м VLT, Чили; 10-м Keck, США) и космических телескопов HST и Spitzer впервые позволило с высоким угловым разрешением ($\sim 0.01''$) в оптическом и инфракрасном диапазонах изучить область центра Галактики, где раньше был известен всего один мощный рентгеновский и радиоисточник SgrA

Широкие окрестности центра Галактики в созвездии Стрельца (~ 900 св. лет)



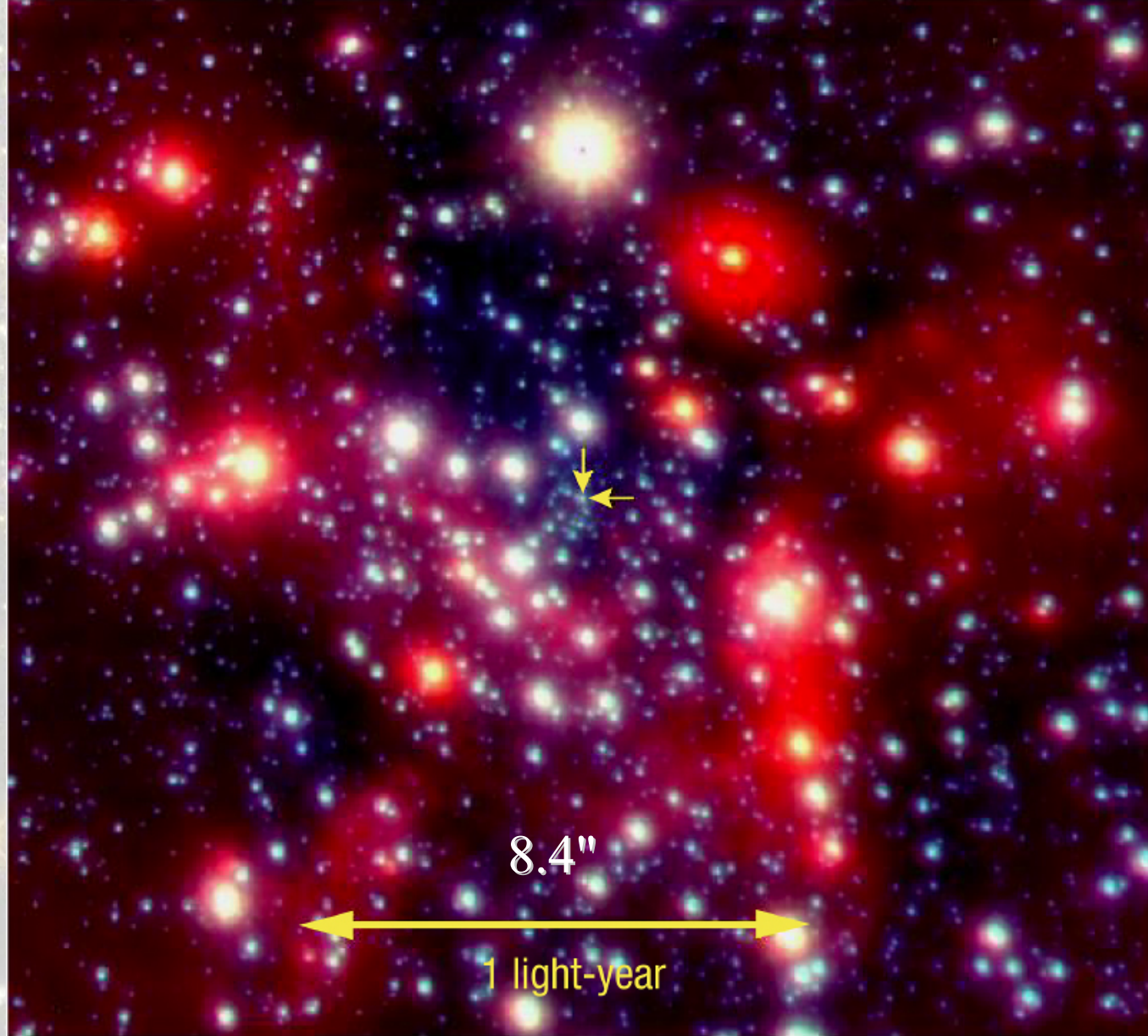
Galactic centre, "Spitzer" 2005, 80 pc

260 св. лет



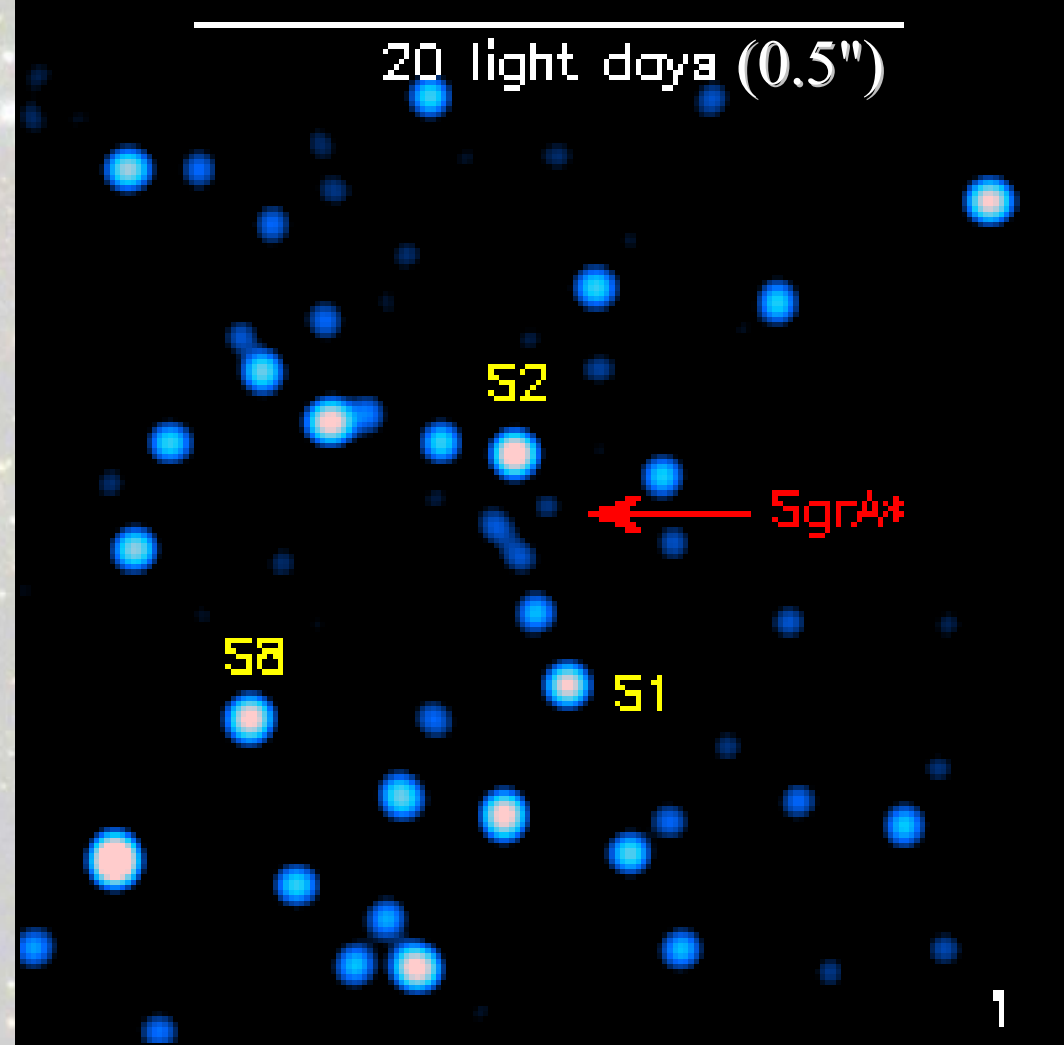
Изображение
с 8-м телескопа
VLT (Чили)

Мониторинг
проводился с
1992 г.



The Centre of the Milky Way
(VLT YEPUN + NACO)

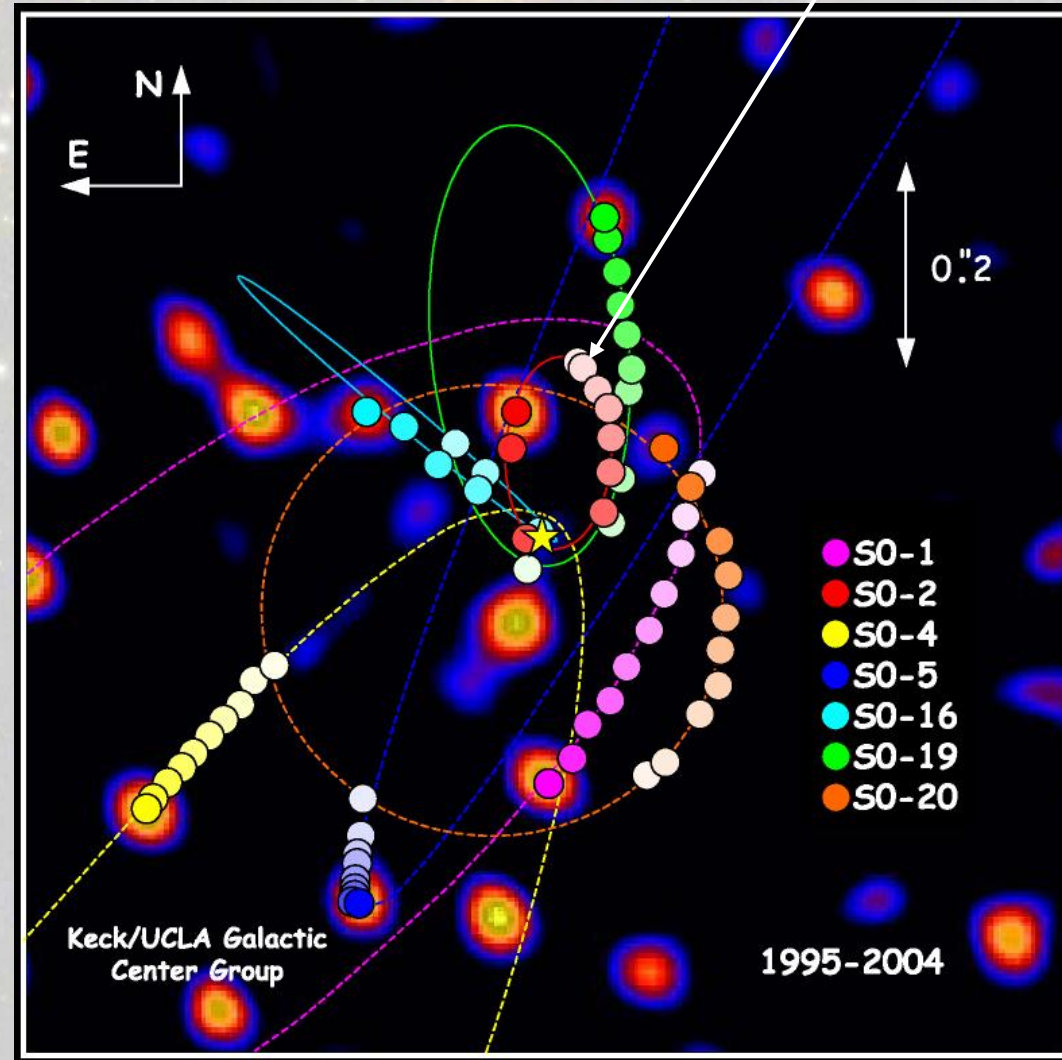
- Центральные $0.5''$ в окрестности источника SgrA
- Измерялись видимые смещения звезд и их лучевые скорости в ИК диапазоне (2.2μ), связанные с орбитальным движением



- Орбиты 7 звезд по наблюдениям с 10-м телескопом Кек в 1995-2004 г.
- Звезда S0-2 описала почти полный эллипс.

Движение по эллипсу –
признак центрального
силового поля – точеч-
ной массы

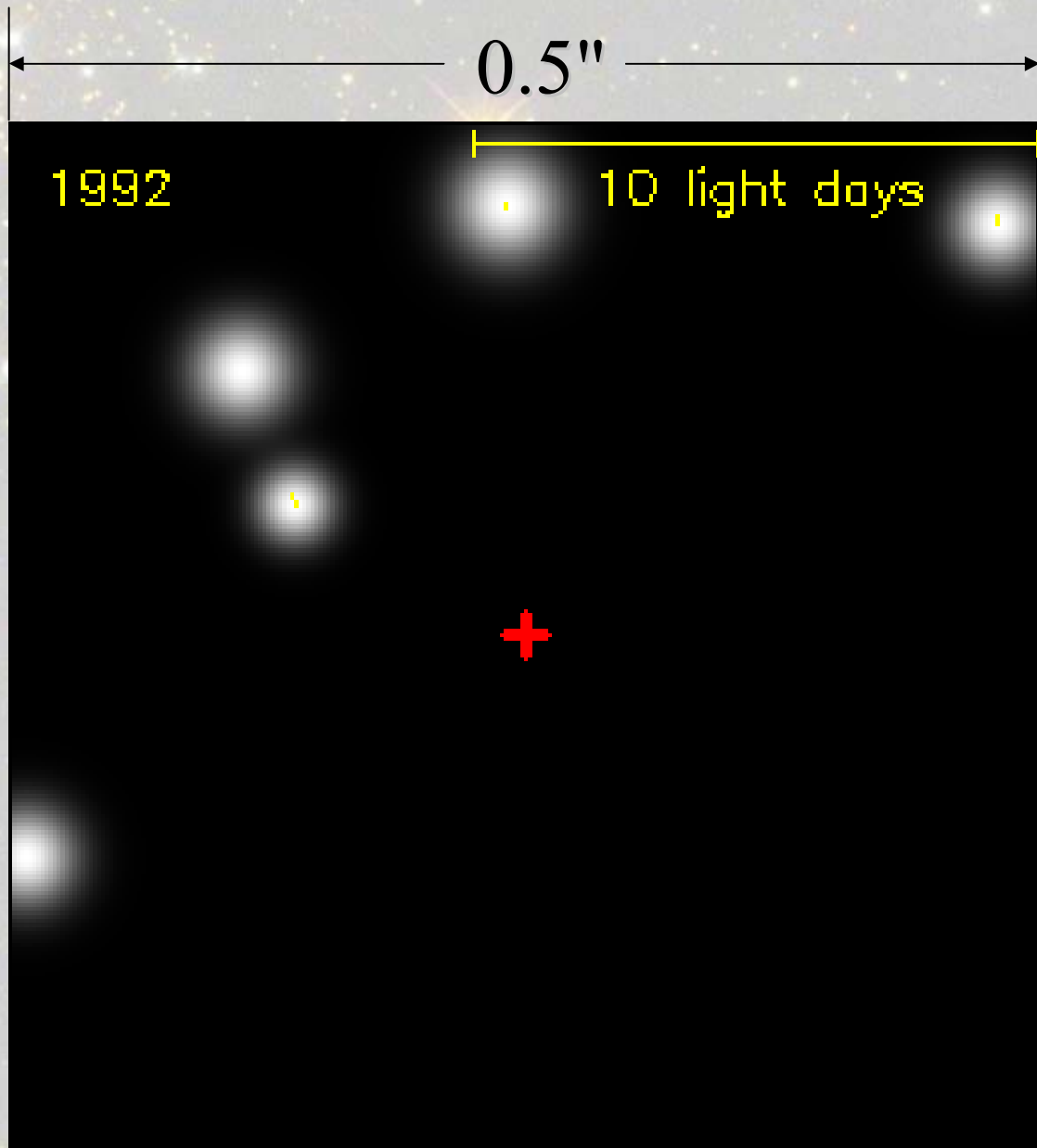
Скорости достигают
1500 км/с



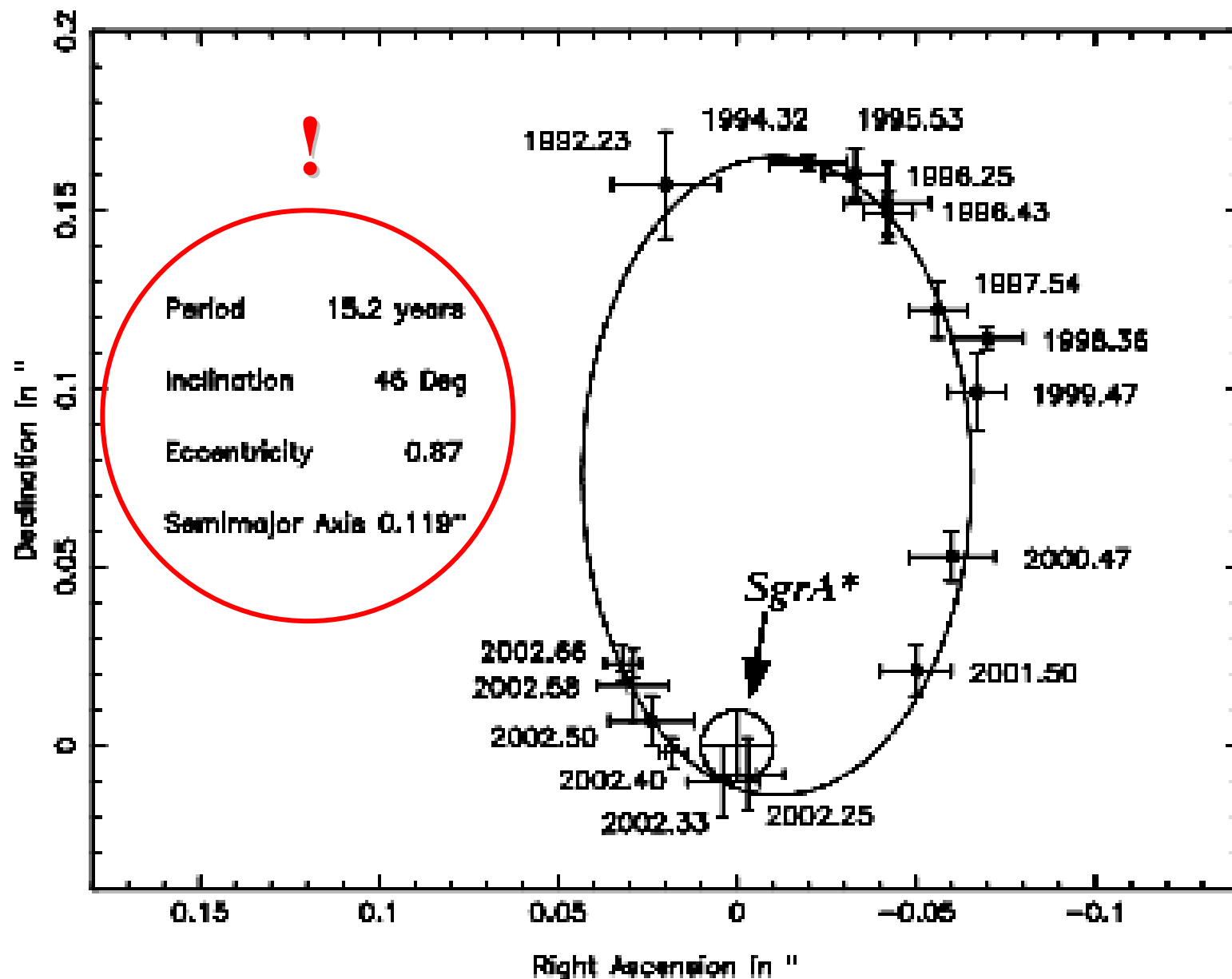
Анимация движения S0-2

В 2007 г. S0-2 завершит полный оборот.

S0-16 движется по сильно вытянутой орбите.



Орбита объекта S0-2 с указанием ошибок измерений



Почему сверхмассивная черная дыра?

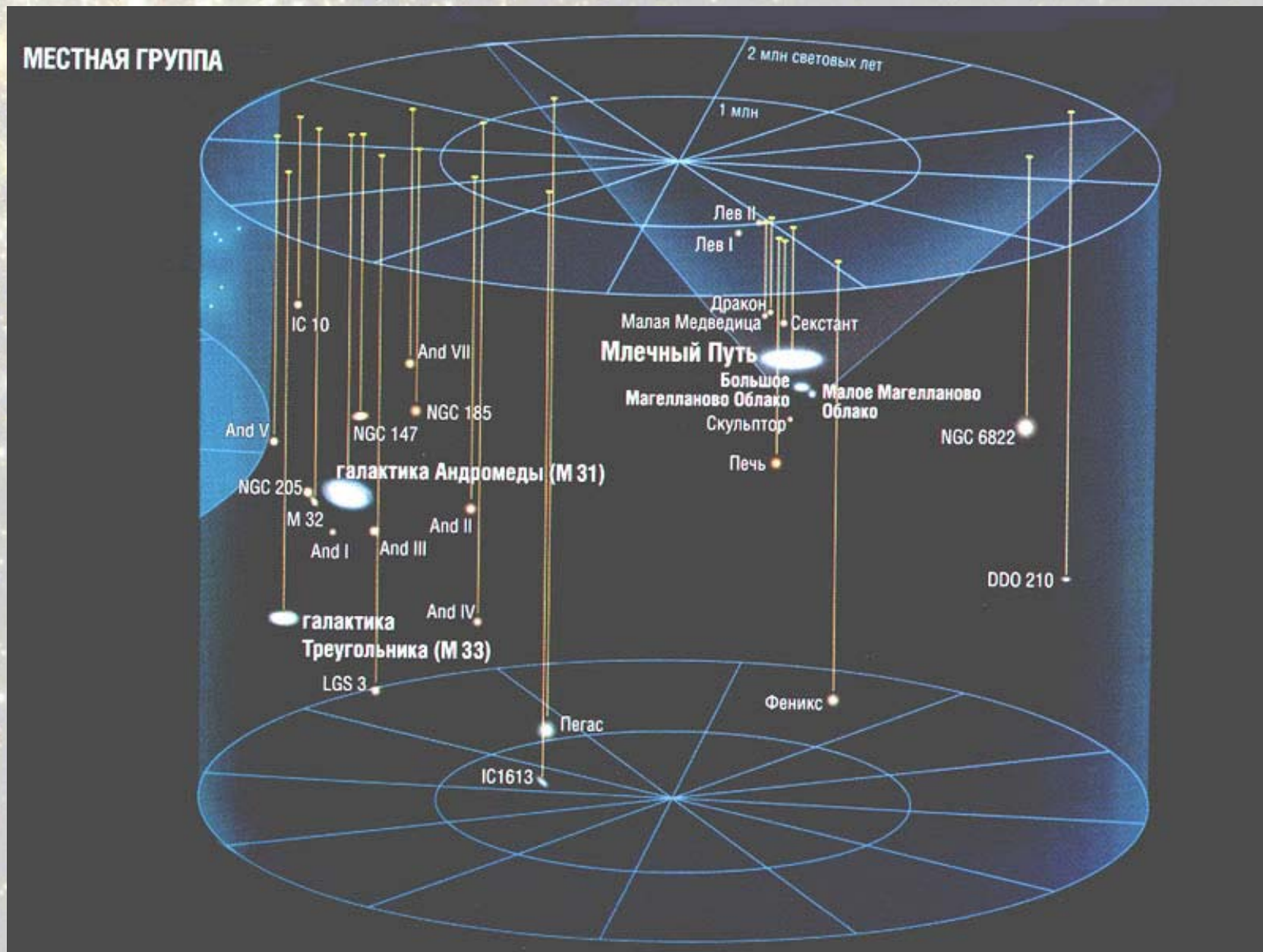
- Кеплеровское движение по эллиптической орбите
- Минимальное расстояние от тяготеющего центра равно $117 \text{ а.е.} \approx 15.6 \text{ св. часа}$
- По 3-му закону Кеплера масса оценивается в **(3.7 ± 0.4) млн. солнечных масс**
- Тяготеющая масса почти не проявляет себя в оптике и ИК
- Столь большая масса в столь малом объеме — это может быть **только сверхмассивная черная дыра**

- Попутно **ВПЕРВЫЕ** непосредственно и надежно вычисляется расстояние до центра Галактики – **7.5 ± 0.3 кпк**
- Дискуссия о расстоянии до центра Галактики, длившаяся более 100 лет, наконец, закончена?

Наша Галактика – не исключение!

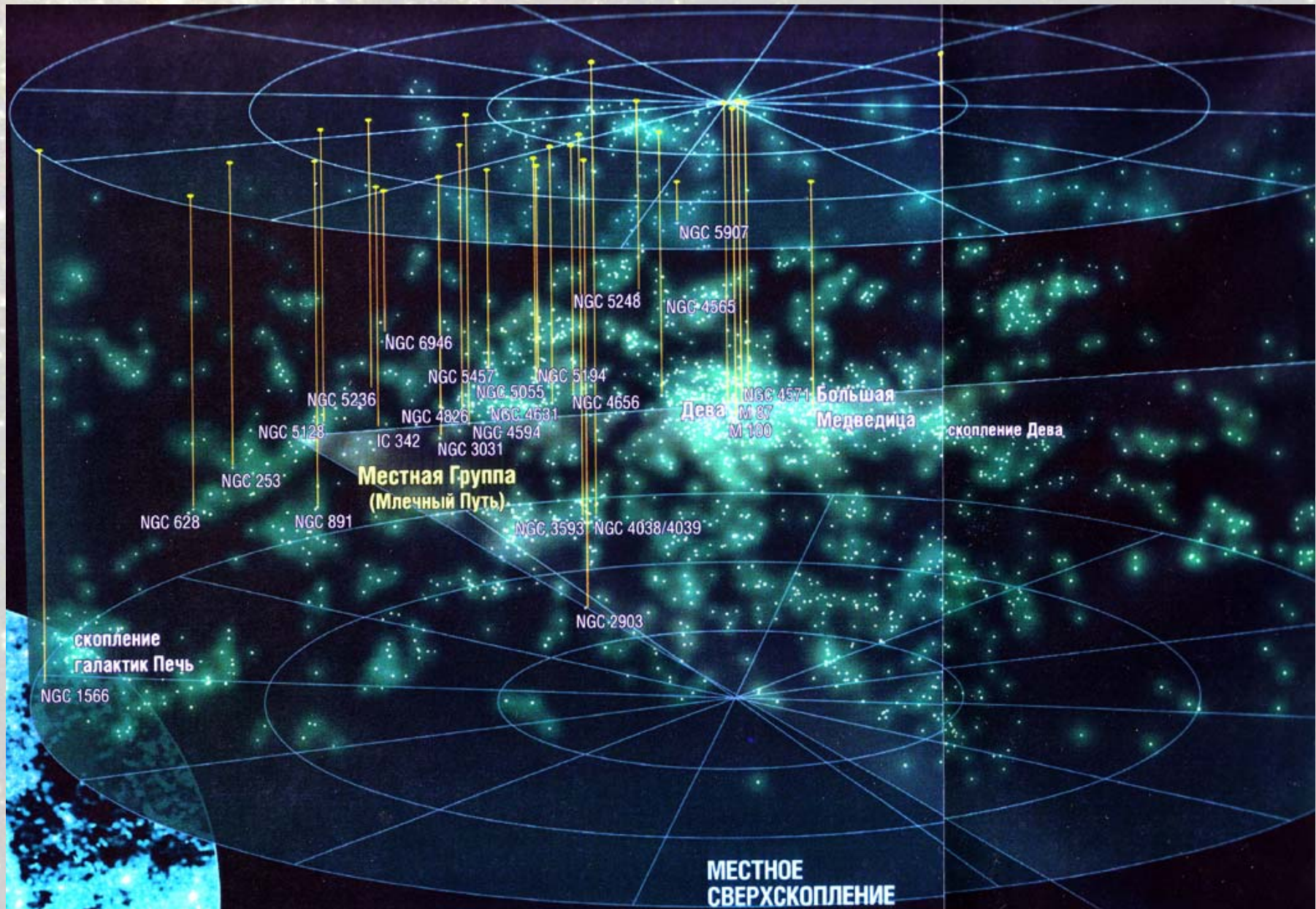
- По высоким скоростям объектов (порядка 1000 км/с) в центрах ~ 100 галактик – спиральных и эллиптических – тоже найдены сверхмассивные черные дыры, в некоторых случаях (M87, NGC3115, NGC4594, NGC4649, NGC4374, IC1459) по массе превышающие МИЛЛИАРД солнечных.
- Массивные черные дыры есть в M31 и – даже! – в M32 (спутнике Туманности Андромеды); их массы больше массы «нашей» черной дыры.
- *Были ли когда-то все эти галактики квазарами?*

10. Соседи Млечного Пути



- Местная Группа включает почти 50 галактик, большинство которых – карлики: эллиптические и неправильные
- Самые крупные из спутников М31: М33 («Треугольник»), М32 и NGC205;
из спутников Галактики - Большое и Малое Магеллановы Облака.

Местная Группа является частью Местного Сверхскопления (с центром в скоплении в Деве)



11. Проекты, нацеленные на Галактику

- Наиболее перспективный из них – GAIA: первоначально это было сокращение для **Global Astrometric Interferometer for Astrophysics**, хотя принципы измерений изменились
- Предусматриваются высокоточные позиционные, фотометрические, спектральные наблюдения почти МИЛЛИАРДА звезд по всему небу
- Каждая звезда будет наблюдаться в среднем 150 раз

- **Приемник:** массив из 170 ПЗС-матриц общими размерами $\sim 85 \times 60$ см (!)
- Точность позиционных (астрометрических) измерений достигнет практического предела, ограничиваемого вариациями метрики пространства-времени (ОТО) ~ 4 μ сек дуги

GAIA : ход лучей в телескопе

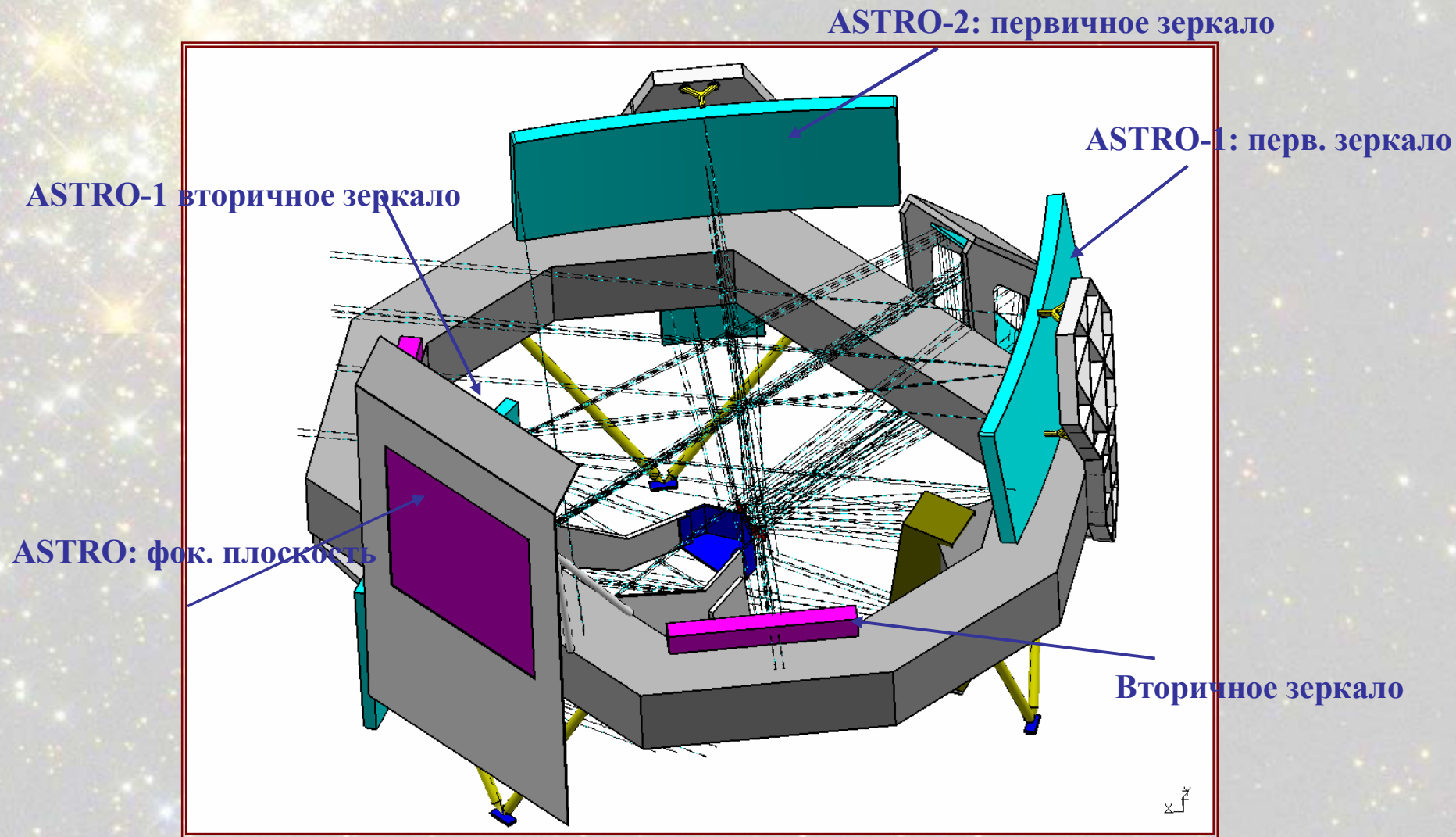
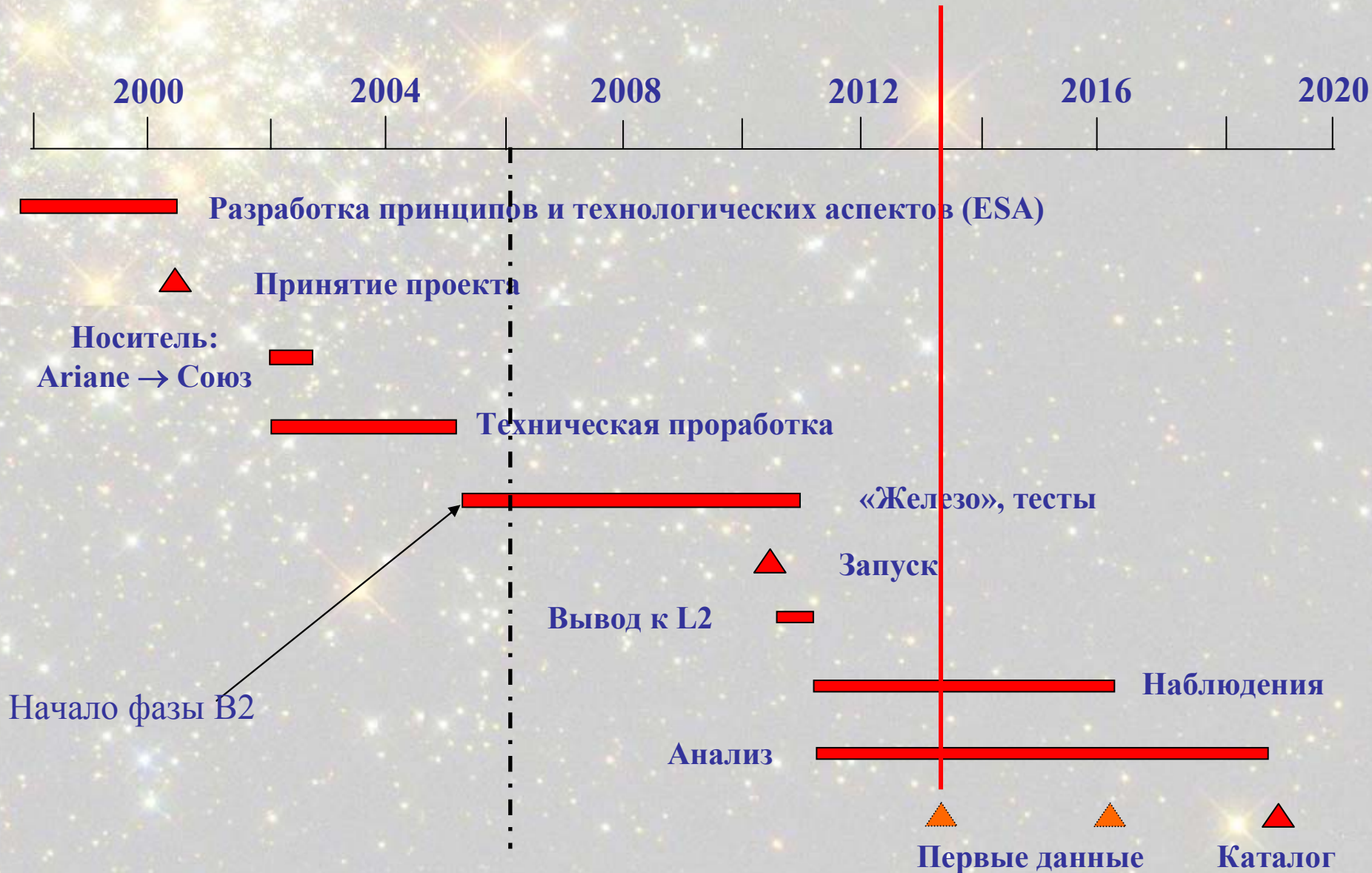


График работ по проекту GAIA

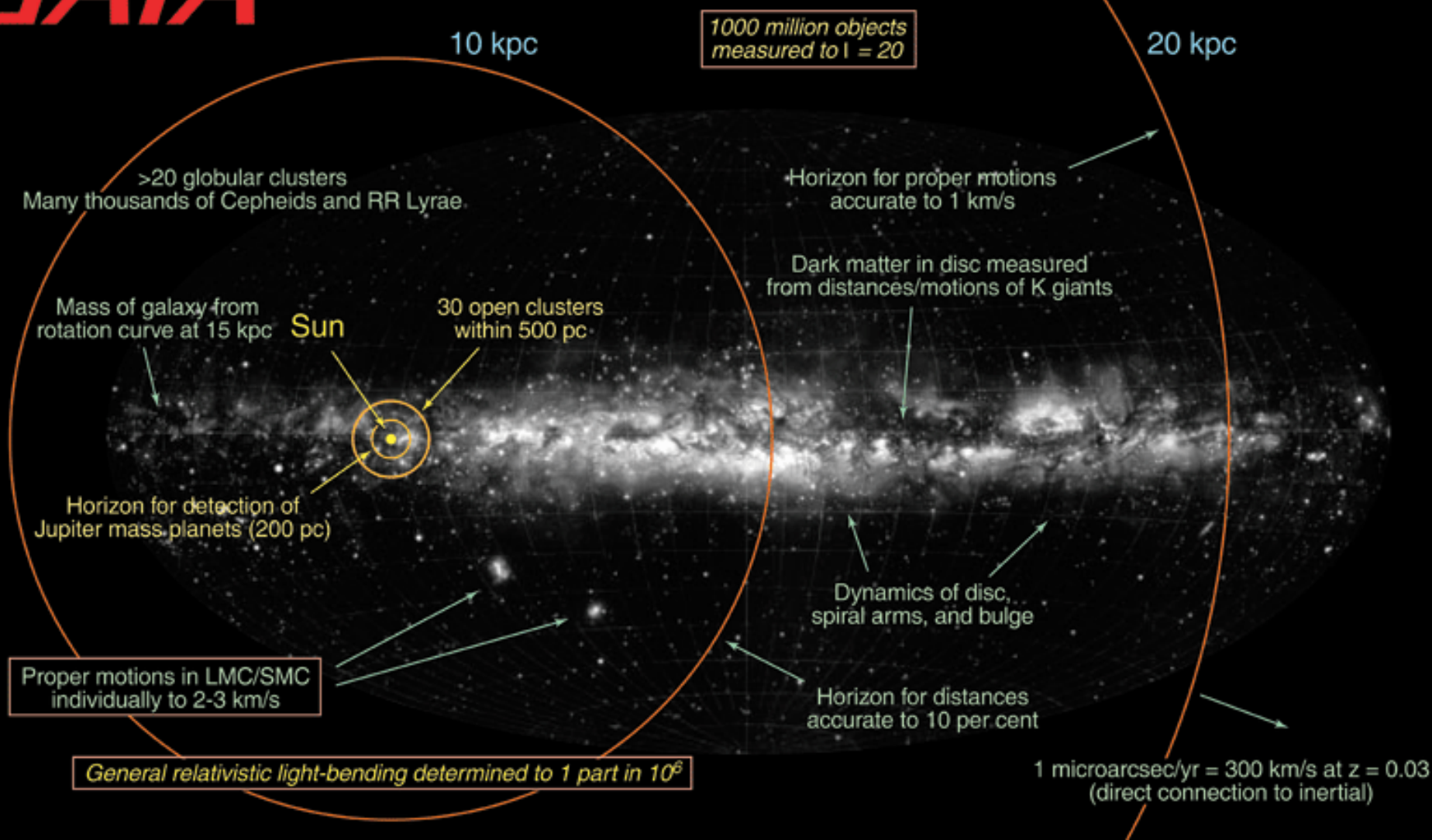


Сравнение с миссией HIPPARCOS

	HIPPARCOS	GAIA
Предел по блеску	12	20 mag
Полнота	7.3 – 9.0	~20 mag
Ярчайшие звезды	~0	~3-7 mag
Число объектов	120 000	26 million to V = 15 250 million to V = 18 1000 million to V = 20
Макс. эффект.расст.	1 кpc	1 Mpc
Квазары	Нет	$\sim 5 \times 10^5$
Галактики	Нет	$10^6 - 10^7$
Точность астром.	~1 milliarcsec	4 μ arcsec at V = 10 10-15 μ arcsec at V = 15 200-300 μ arcsec at V = 20
ВВР	2-colour (B and V)	5-colour to V = 20
МВР	Нет	11-colour to V = 20
Лучевые скорости	Нет	1-10 km/s to V = 16-17
Набл. программа	Входной каталог	Полнота и несмещ.

- Будет создана 3-мерная карта Галактики вплоть до расстояния ~ 10 кпк

GAIA



- Проект принесет революционные открытия, важные как для изучения нашей Галактики, так и для астрономии вообще