

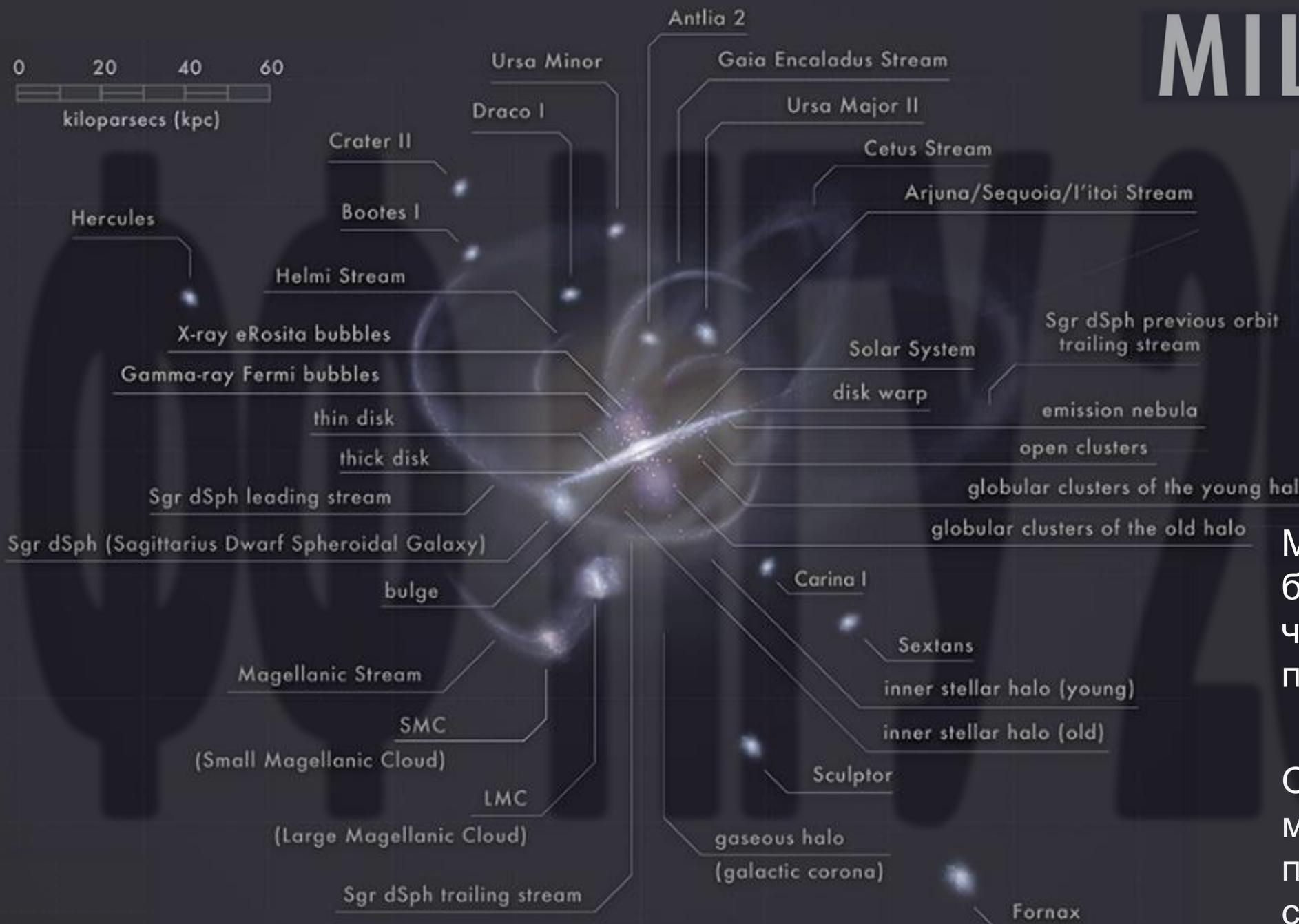
**ALL THE  
GALAXIES  
FAR FAR AWAY**

**Лекция 13**

**Внегалактическая астрономия**

**ФФ НГУ, 2024**

# MILKY WAY



type . . . . . barred spiral galaxy Sbc  
 disk size . . . . . ~ 185 kly  
 stars . . . . . 100-400 billion  
 mass . . . . . 1.5 trillion  $M_{\odot}$   
 rotation period . . . . . 220-360 Myr  
 star formation rate . . . . . ~ 2.5 /yr  
 known satellite galaxies . . . . . 59

Млечный Путь – гораздо более сложная динамическая структура, чем представлялось ранее.

Огромный объем информации об эволюции МП поступает из измерений спутника GAIA.

# Туманности: каталог Шарля Мессье

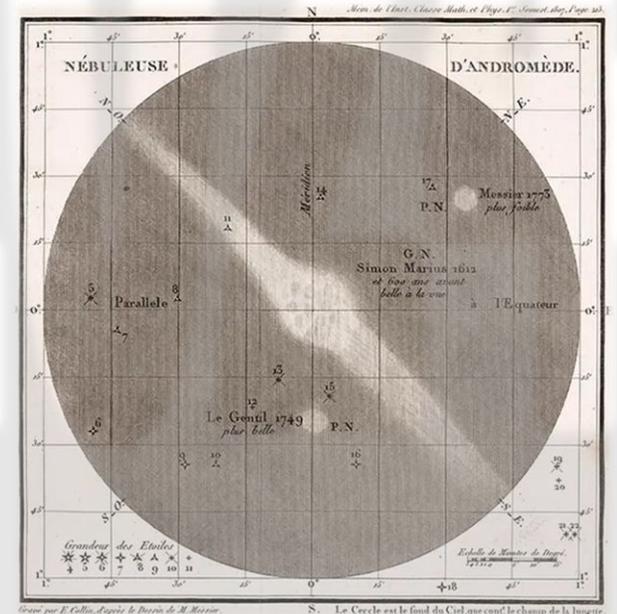
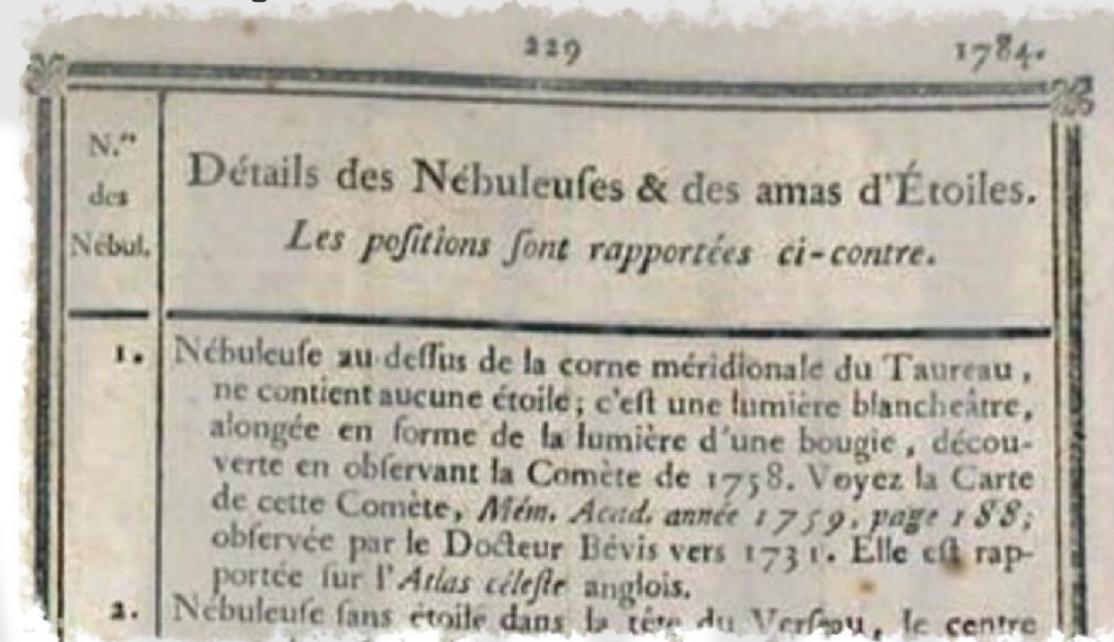
В 1774 – 1781 гг. французский астроном Шарль Мессье опубликовал первый каталог туманных объектов, которые можно было перепутать с кометами.



Charles Messier  
1730 – 1813

Среди 103 (110) объектов каталога присутствуют объекты различных типов – рассеянные и шаровые скопления, планетарные и диффузные туманности, остатки сверхновых... Кроме того в нем оказалось около 40 галактик.

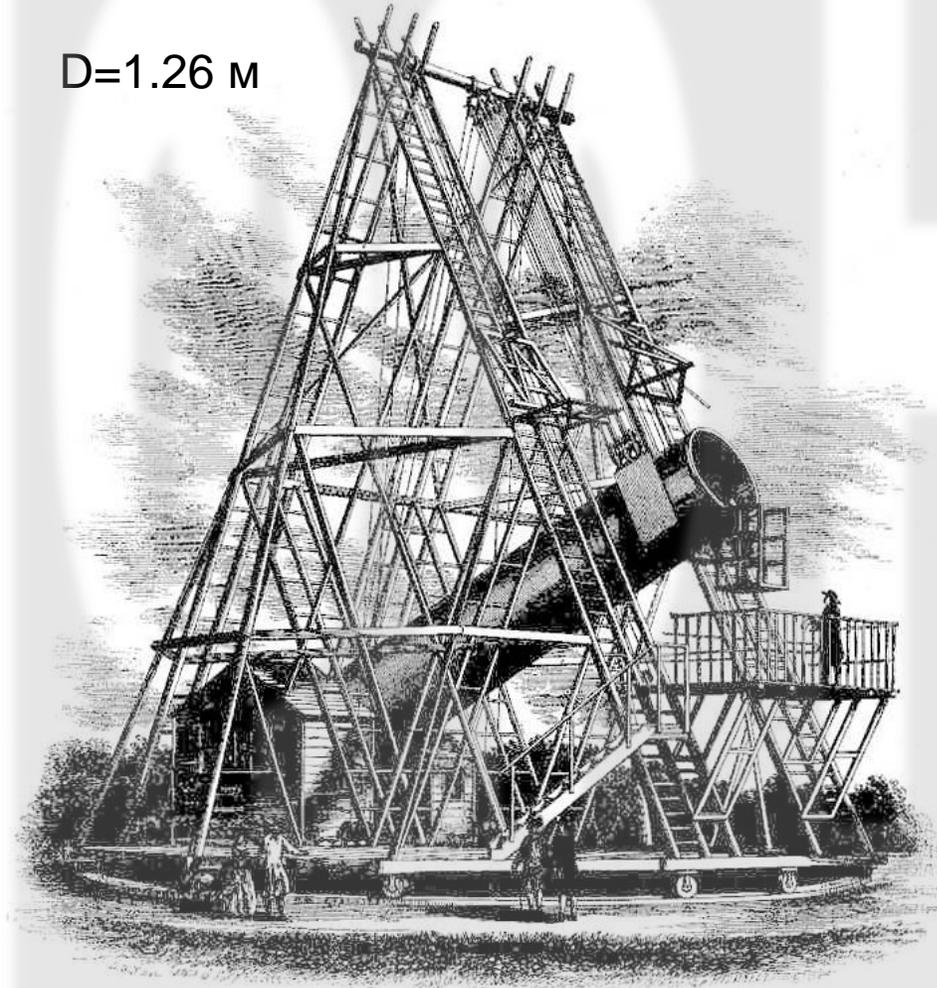
Обозначения из каталога Мессье часто пользуются до сих пор, например М1 – Крабовидная туманность.



# Туманности: каталог Уильяма Гершеля и NGC

В 1786 – 1802 годах Уильям Гершель опубликовал каталог *Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars*, содержащий уже 2500 объектов (в основном северного неба).

D=1.26 м



В 1864 его сын Джон Гершель добавил объекты южного *General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars* (GC), общее число объектов превысило 5000.



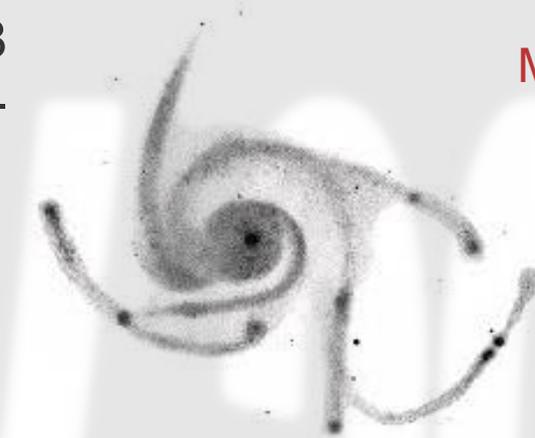
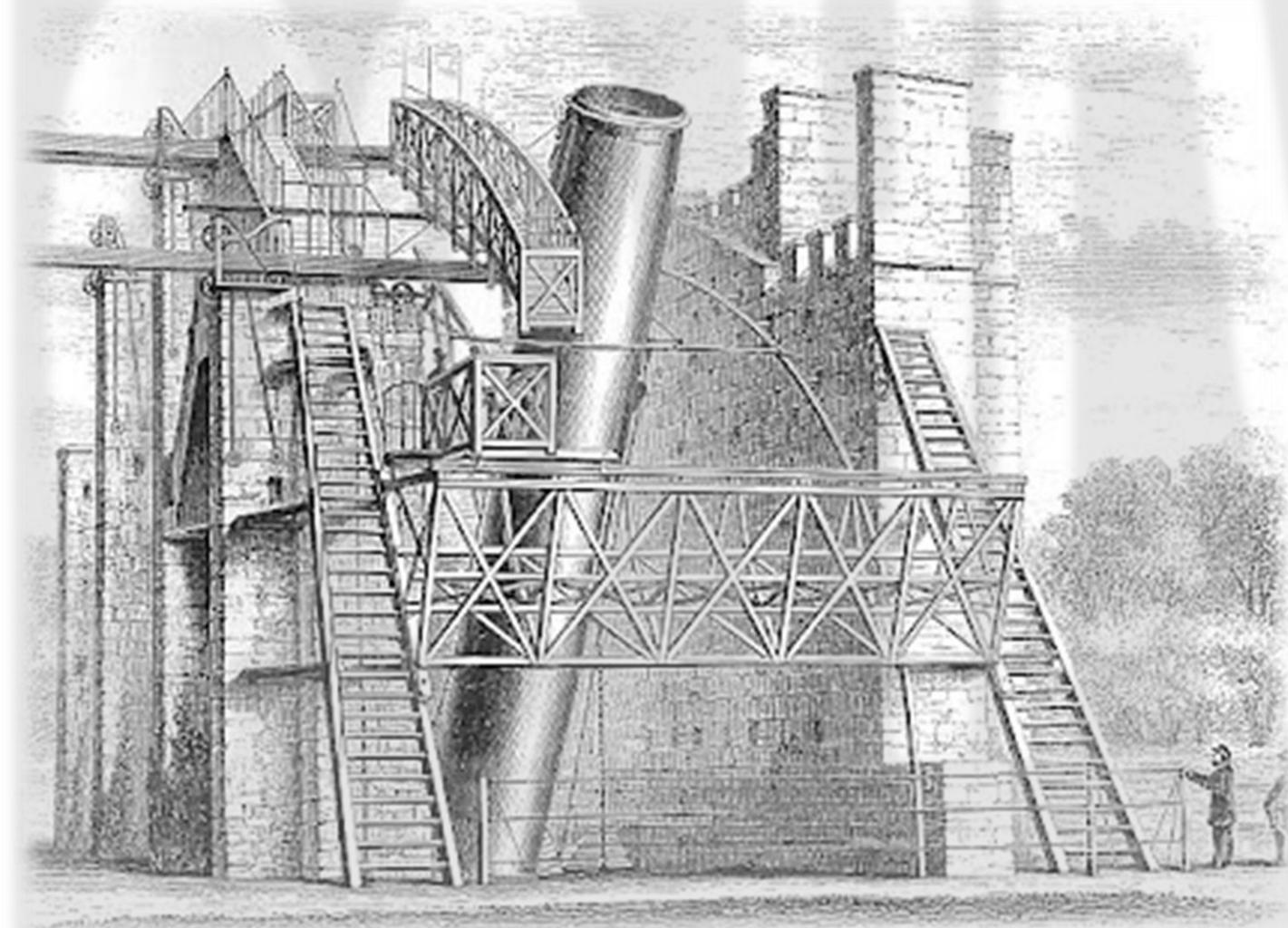
William Herschel  
1738 – 1822

В 1878 Джон Дрейер составил на его основе *New General Catalogue* (NGC), в котором содержится 7840 объектов, плюс еще 5386 объектов в двух дополнениях *Index Catalogue* (IC).

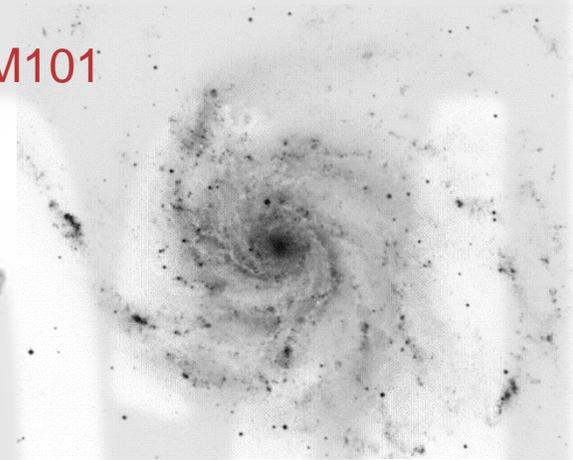
Каталогом Дрейера пользуются до сих пор, обозначая объекты, например, NGC 224, он же M31, он же Туманность Андромеды.

# Туманности: спиральная структура

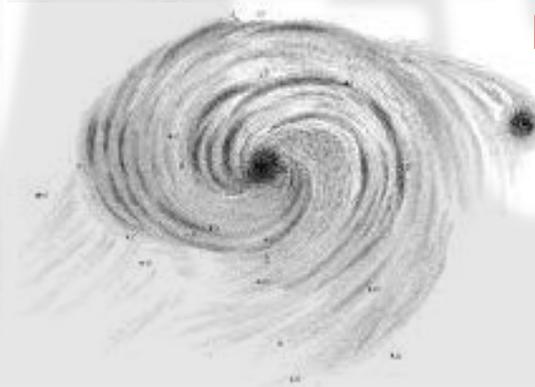
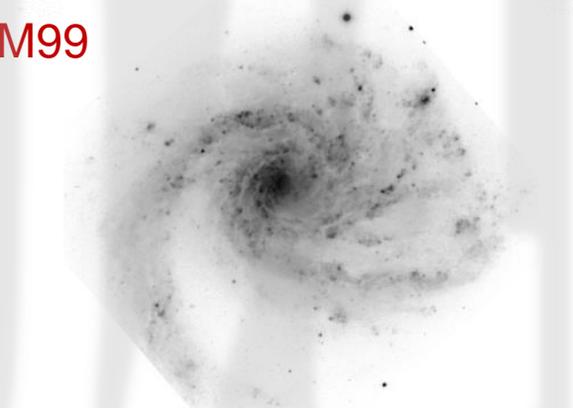
В 1845 году Уильям Парсонс (лорд Росс) построил 1.8 метровый телескоп рефлектор который позволил рассмотреть спиральную структуру некоторых туманностей.



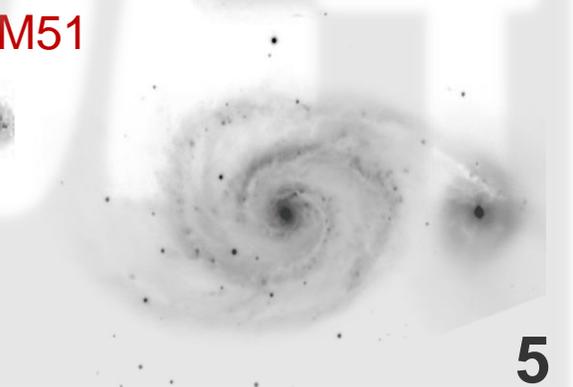
M101



M99



M51

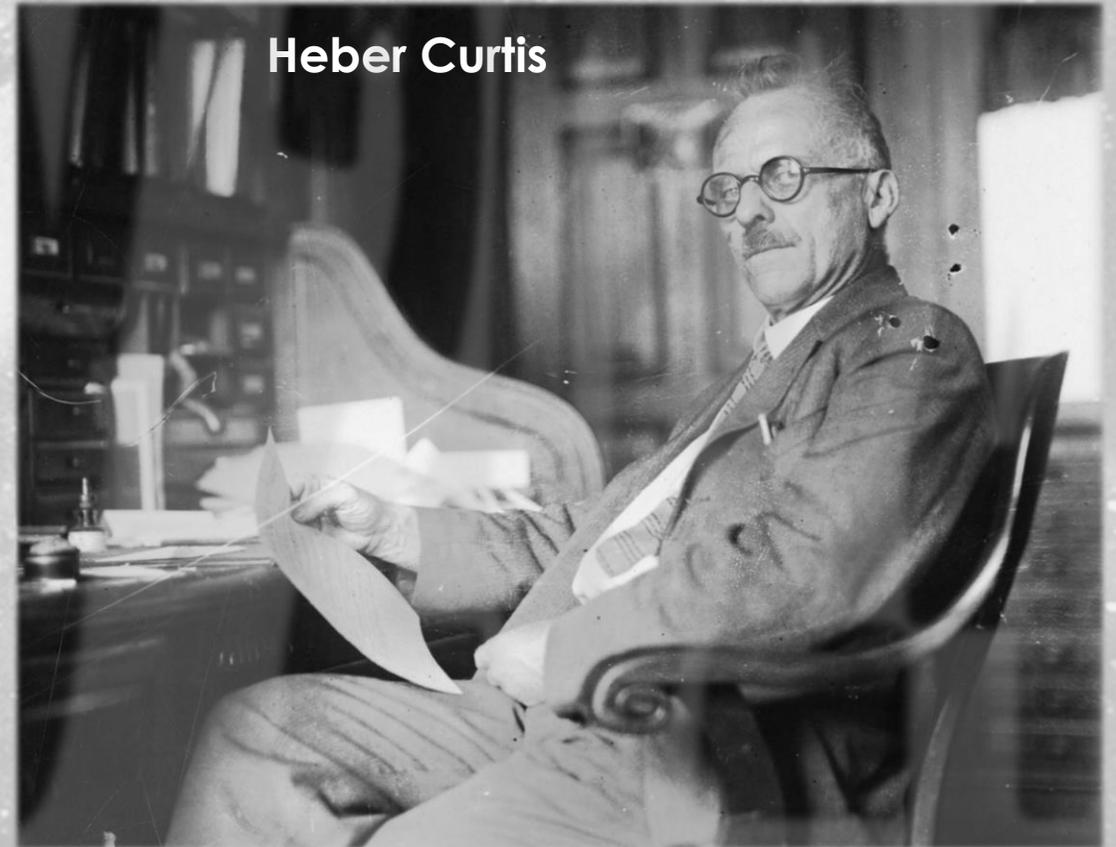
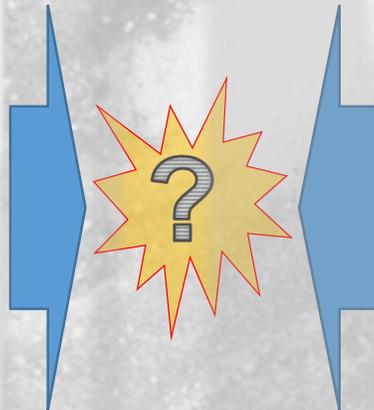
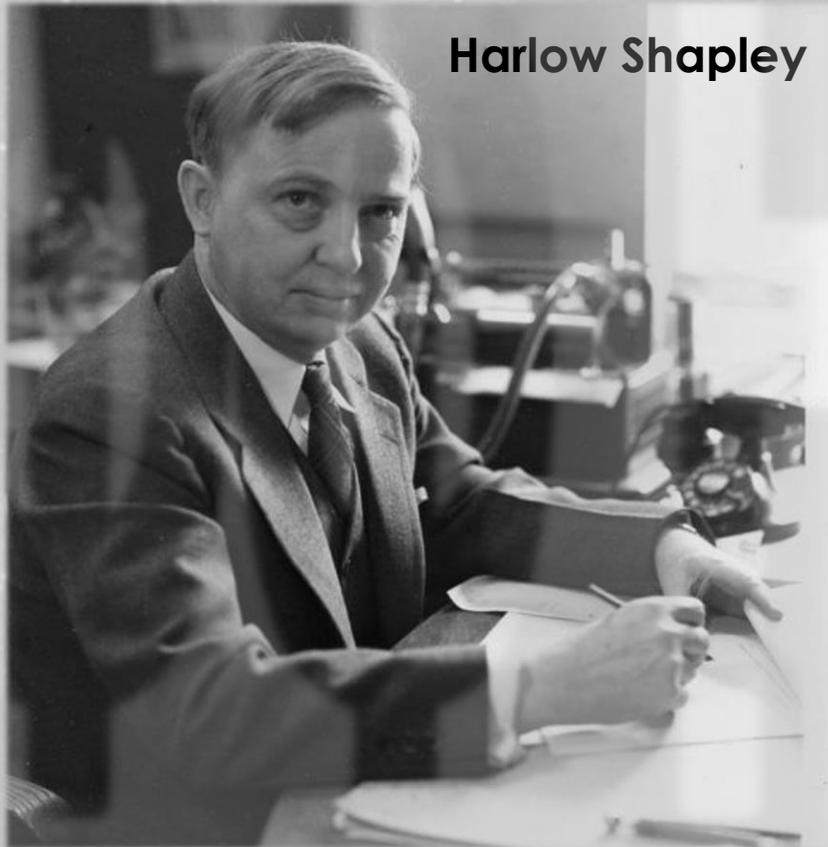


# The Great Debate

26 апреля 1920 года в Академии наук в Вашингтоне состоялись публичные дебаты между Харлоу Шепли и Гебером Кертисом по вопросу о природе туманностей.

«Туманности находятся внутри нашей Галактики»

«Туманности – гигантские звездные системы»



Неточности были в аргументации обеих сторон, однако в целом прав оказался Гербер Кертис. Однозначный ответ дали наблюдения Эдвина Хаббла уже в 1923 году.

# Расстояние до «туманностей»

В 1922 году Эрнст Эпик предложил оригинальный метод определения расстояний, который показал, что М31 находится далеко за пределами нашей Галактики.

Закон Ньютона для круговой орбиты

Земли вокруг Солнца

$$\frac{V_3^2}{r_{\text{а.е.}}} = \frac{GM_{\odot}}{r_{\text{а.е.}}^2}$$

звезды вокруг центра галактики

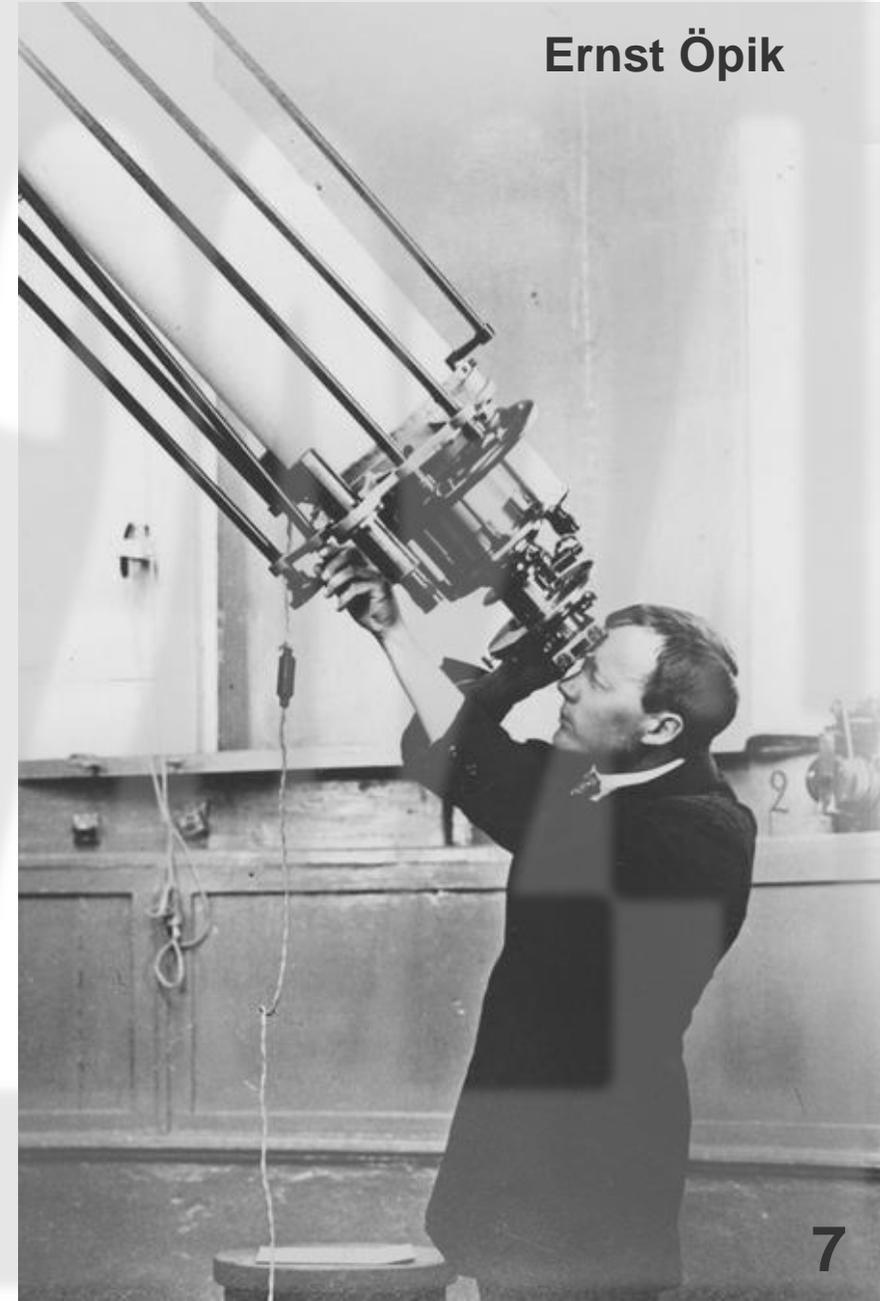
$$\frac{V_*^2}{r_*} = \frac{GM_{\Gamma}}{r_*^2}$$

Их отношение:

$$\left(\frac{V_*}{V_3}\right)^2 = \frac{M_{\Gamma}}{r_*} \quad (1)$$

Где масса галактики теперь измеряется в  $M_{\odot}$ , а радиус орбиты звезды вокруг ее центра – в а.е.

Ernst Öpik



# Расстояние до «туманностей»

Аналогично для плотности потоков излучения:

от Солнца на Земле

$$f_{\odot} = \frac{L_{\odot}}{4\pi r_{\text{a.e.}}^2}$$

Их отношение:

$$\frac{f_{\Gamma}}{f_{\odot}} = \frac{L_{\Gamma}}{d_{\Gamma}^2}$$

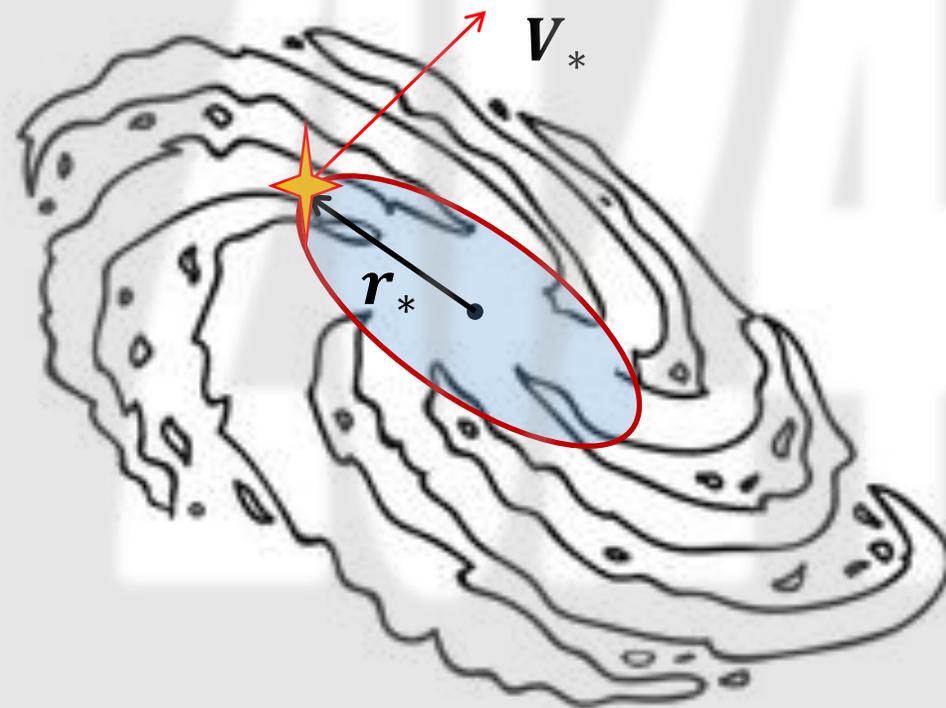
Где светимость галактики теперь измеряется в  $L_{\odot}$ , а расстояние до галактики – в а.е. С другой стороны:

$$2.5 \lg \left( \frac{f_{\Gamma}}{f_{\odot}} \right) = m_{\odot} - m_{\Gamma}$$

$$10^{\frac{m_{\odot} - m_{\Gamma}}{2.5}} = \frac{L_{\Gamma}}{d_{\Gamma}^2} \quad (2)$$

от части галактики внутри орбиты звезды

$$f_{\Gamma} = \frac{L_{\Gamma}}{4\pi d_{\Gamma}^2}$$



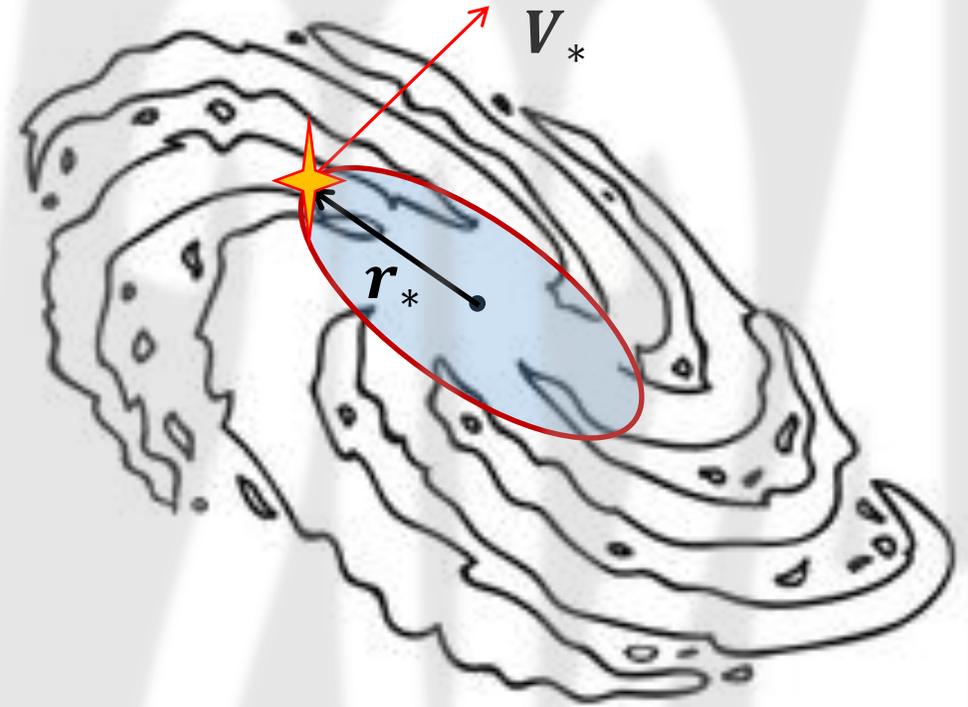
# Расстояние до «туманностей»

Так как  $r_* = d_\Gamma \theta_*$ , где  $\theta_*$  – видимый угловой размер орбиты звезды в галактике, тогда:

$$d_\Gamma^2 = 10^{\frac{m_\Gamma - m_\odot}{2.5}} L_\Gamma \frac{M_\Gamma}{M_\odot} = 10^{\frac{m_\Gamma - m_\odot}{2.5}} \frac{L_\Gamma}{M_\Gamma} r_* \left( \frac{V_*}{V_3} \right)^2$$

$$d_\Gamma = 10^{\frac{m_\Gamma - m_\odot}{2.5}} E_\Gamma \theta_* \left( \frac{V_*}{V_3} \right)^2$$

где  $E_\Gamma = \frac{L_\Gamma}{M_\Gamma}$  – удельная светимость



# Расстояние до «туманностей»

Так как для Солнца и Земли:

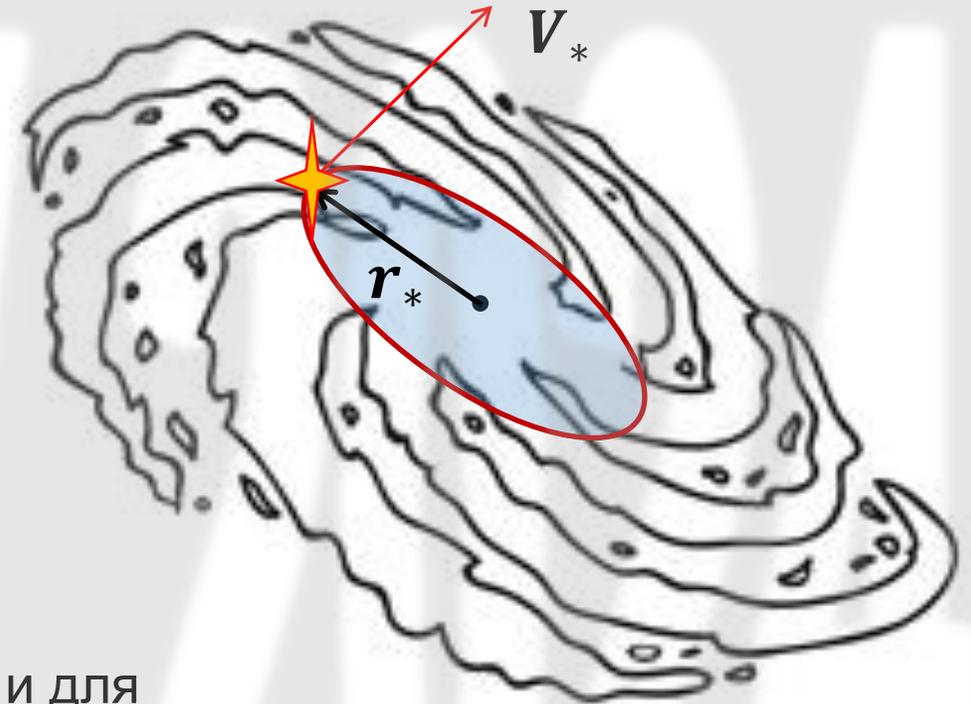
$$m_{\odot} = -26.6 \quad \text{и} \quad V_3 = 30 \text{ км/с}$$

а для М31 при  $\theta = 150''$

$$m_{\Gamma} = 6.1 \quad \text{и} \quad V_* = 157 \text{ км/с}$$

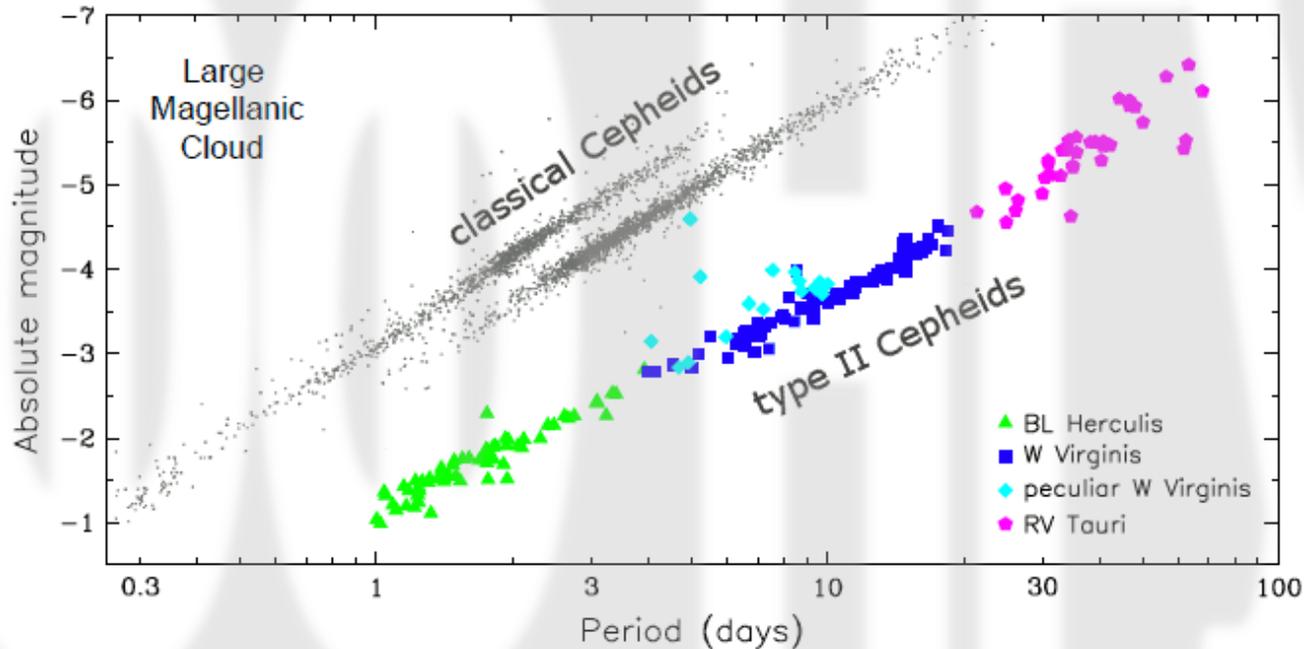
И принимая, что удельная светимость для М31 такая же как и для Млечного Пути  $E_{\Gamma} \approx 0.38$  (самое слабое место рассуждений), получаем:

$$d_{\text{М31}} \approx 450 \text{ кпк}$$

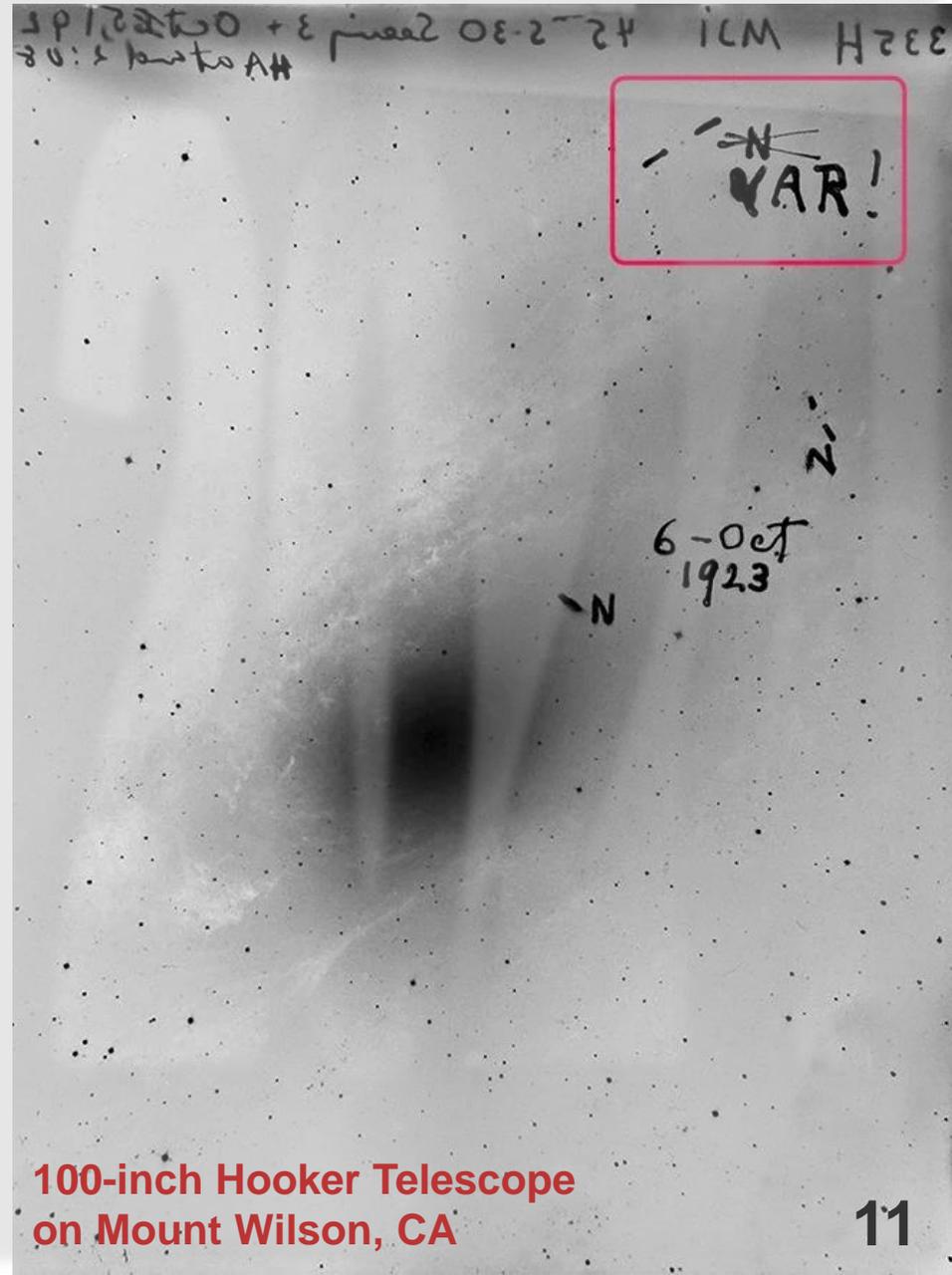


# Первое измерение расстояния до М31

При изучении звезд Малого Магелланового Облака, Генриетта Левитт (из команды Пиккеринга) обнаружила, что видимая звездная величина некоторого типа переменных звезд связана с периодом колебания.



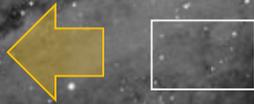
Главный результат был получен в 1922-23 г. Эдвином Хабблом. С помощью нового 2.5-метрового телескопа ему удалось обнаружить цефеиды в нескольких близких туманностях, начиная с М31 – Туманности Андромеды. Это дало возможность определить расстояние до этих объектов.



100-inch Hooker Telescope  
on Mount Wilson, CA

# Наблюдательный пример: Цефеида Хаббла

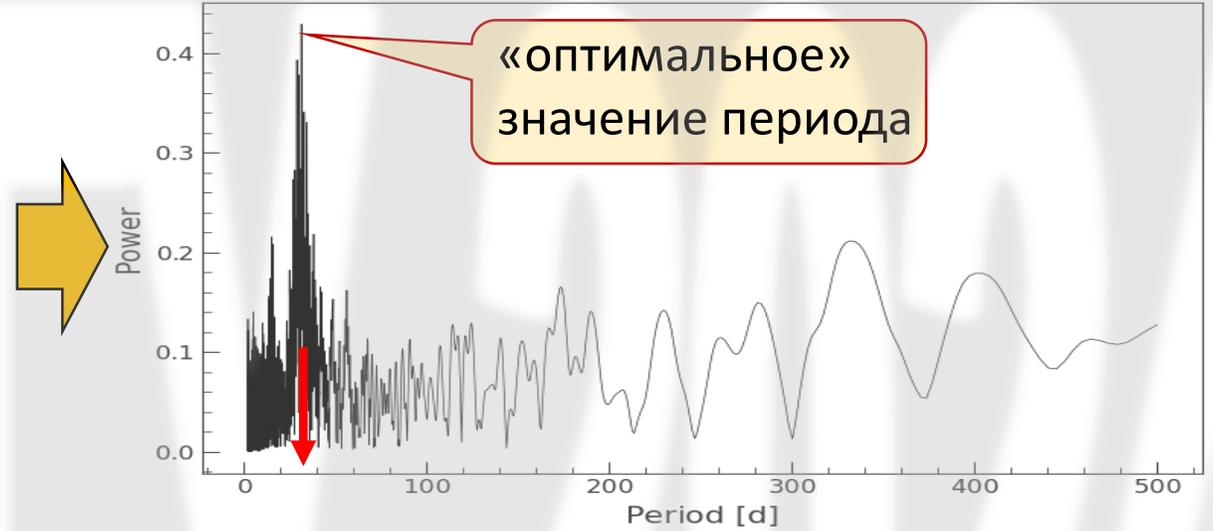
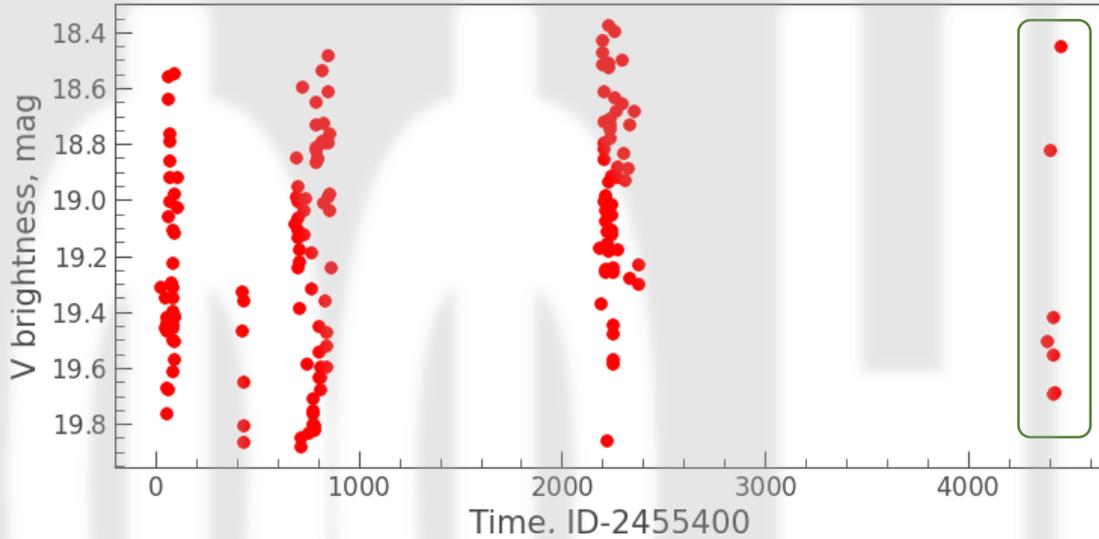
M31-V1 



Время интегрирования около 1.5 часов

# Наблюдательный пример: определение периода

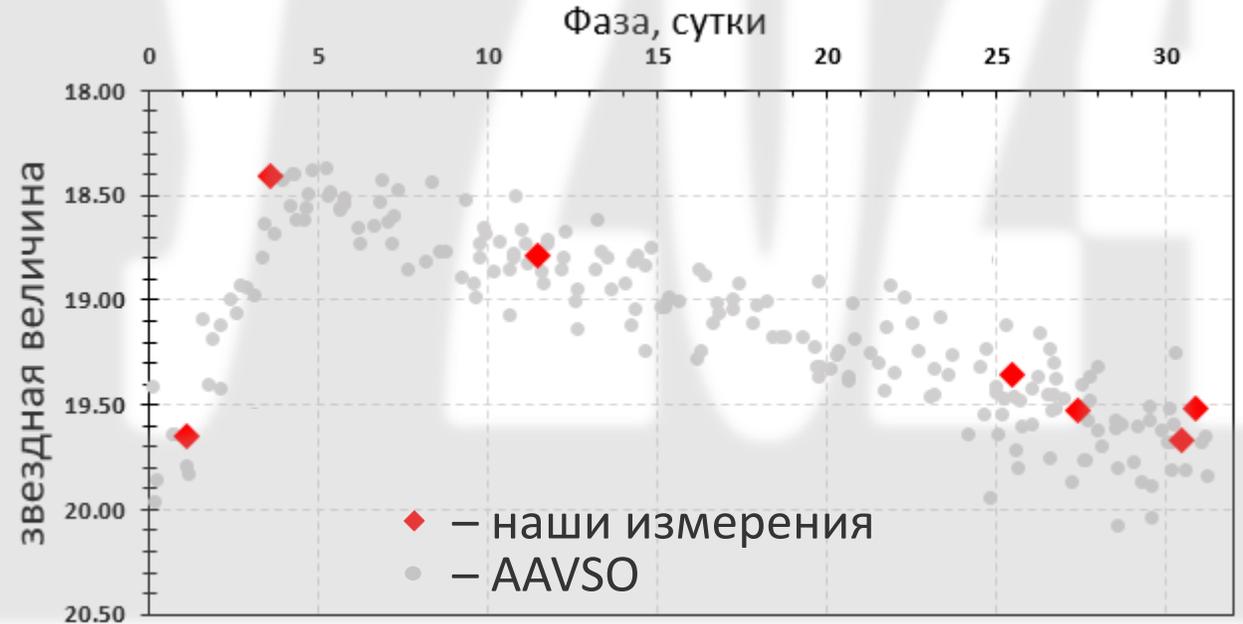
Анализ фотометрических временных рядов с пакетом **Lightkurve** для Python:



$T = 31.402$  суток

Фаза =  $t_k \bmod(T)$

то есть из прошедшего времени  $t_k$   
вычитаем целое число периодов  $T$ .



# Наблюдательный пример: определение расстояния

Измеренные параметры для «цефеиды Хаббла» M31-M1:

$$P = 31.402 \pm 0.005 \text{ суток} \quad m_V = 19.08 \pm 0.10$$

Соотношение период-абсолютная звездная величина для классических цефеид:

$$M_V = -2.76(\lg P - 1) - 4.16 = -5.532$$

L. Ferrarese et al.  
ApJ 464:568, 1996

$$d = 10^{\frac{5+m_V-M_V}{5}} = 836 \pm 43 \text{ кпс}$$



$$A_V = 0.228$$

поправка на межзвездное поглощение

E. Schlafly, D. Finkbeiner ApJ 737:103, 2011



$$d = 10^{\frac{5+m_V-M_V-A_V}{5}} = 753 \pm 42 \text{ кпк}$$

Эдвин Хаббл получил расстояние 275 кпк  
из-за неправильной калибровки цефеид.

# Современные измерения

Измерения с помощью телескопа  
им. Хаббла (55 цефеид):

$$d = 761 \pm 11 \text{ кпк}$$

arXiv:2107.08029

# Система Андромеды



Аналогично Млечному Пути галактика в Андромеде имеет несколько десятков карликовых галактик спутников.

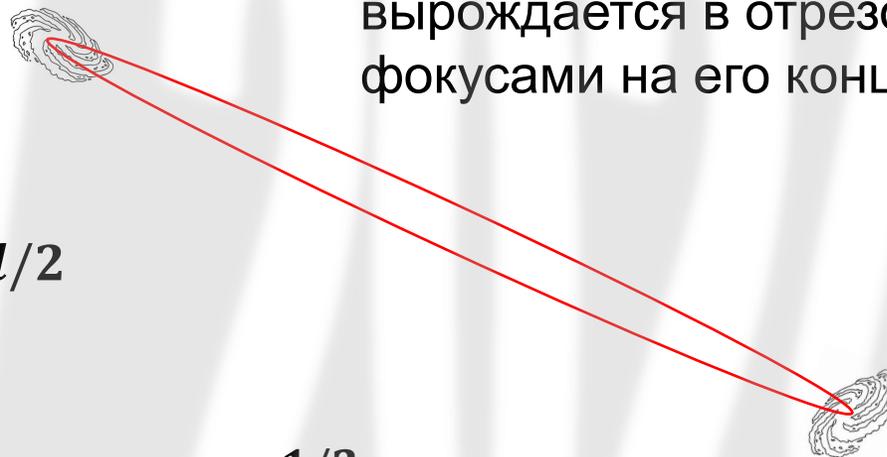
Млечный Путь и Туманность Андромеды сближаются со скоростью  $\sim 100$  км/с.

# Вычислительный пример

Согласно современным измерениям, Млечный Путь и Туманность Андромеды сближаются со скоростью около 110 км/с. Предполагая лобовое столкновение, оцените, когда это произойдет.

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{G(M_{\text{МП}} + M_{\text{ТА}})} a^3$$

При  $e \rightarrow 1$ , эллипс вырождается в отрезок с фокусами на его концах



Предполагая, что  $M_{\text{МП}} \approx M_{\text{ТА}} \approx 10^{12} M_{\odot}$ ,  $t_{\text{ст}} = P/2$ ,  $a = d/2$  и пренебрегая начальной скоростью, получаем:

$$t_{\text{ст}} \approx \frac{1}{2} \left[ \frac{4\pi^2 d^3}{2GM} \right]^{1/2} \approx \frac{1}{2} \left[ \frac{10 \times (0.75 \times 10^6 \times 3 \times 10^{16})^3}{4 \times 6.7 \times 10^{-11} \times 10^{12} \times 2 \times 10^{30}} \right]^{1/2} \approx 7 \text{ Глет}$$

Более аккуратные оценки дают значения от 2 до 4 Глет.

Самостоятельно: убедиться, что МП и ТА образуют гравитационно связанную систему.





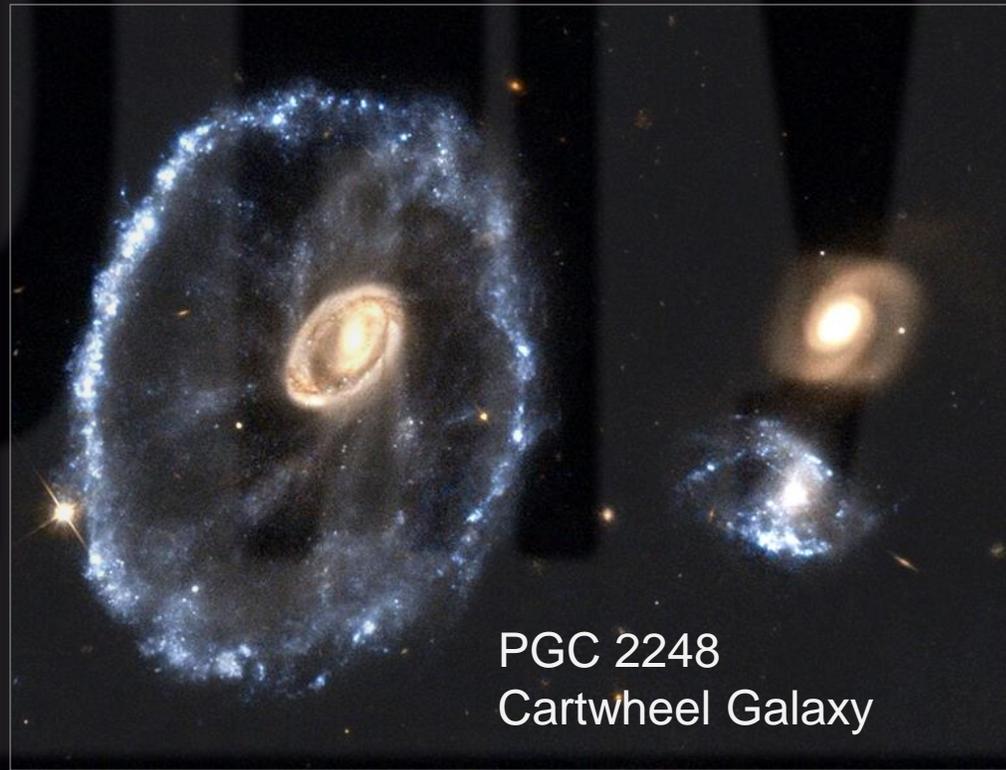
# Взаимодействие галактик

При «столкновении» галактик, реального столкновения звезд практически не происходит (размер звезд ничтожно мал по сравнению с межзвездным расстоянием). Вместо этого сталкивающиеся галактики – протяженные объекты – испытывают **динамическое трение**, обусловленное гравитационным взаимодействием.

Кинетическая энергия движения галактик как целое диссипирует в «тепловое» движение отдельных звезд. В результате (теорема вириала) происходит «раздувание» галактик. При лобовом столкновении могут образовываться отдельные пекулярные структуры.

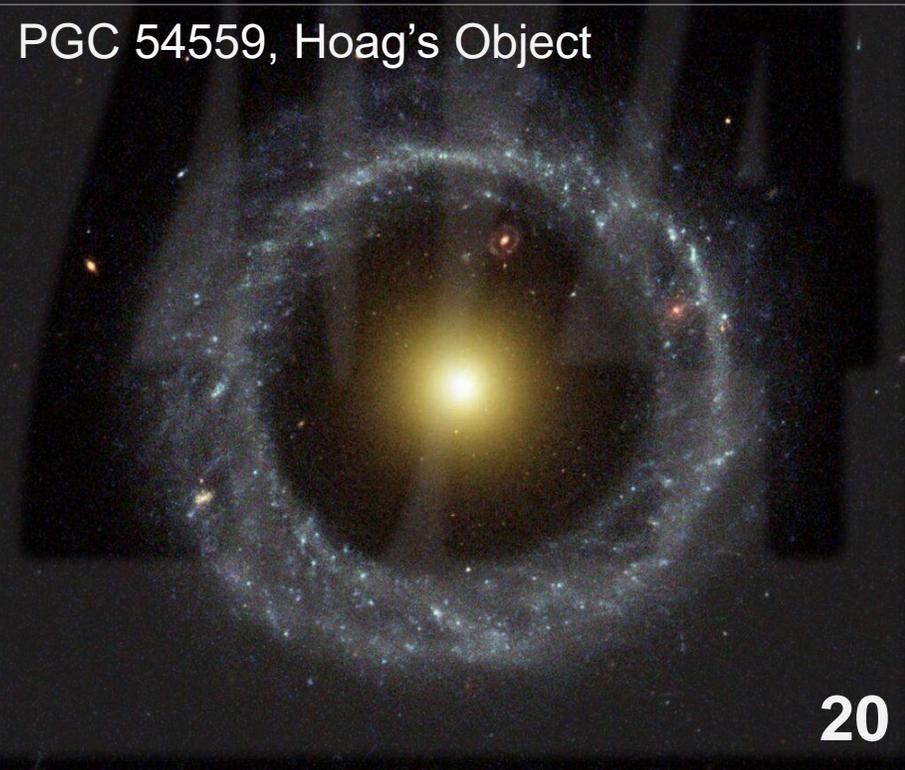
Карл Цвики, 1941 г.

*"...one of the most complicated structures awaiting its explanation on the basis of stellar dynamics."*



PGC 2248  
Cartwheel Galaxy

PGC 54559, Hoag's Object

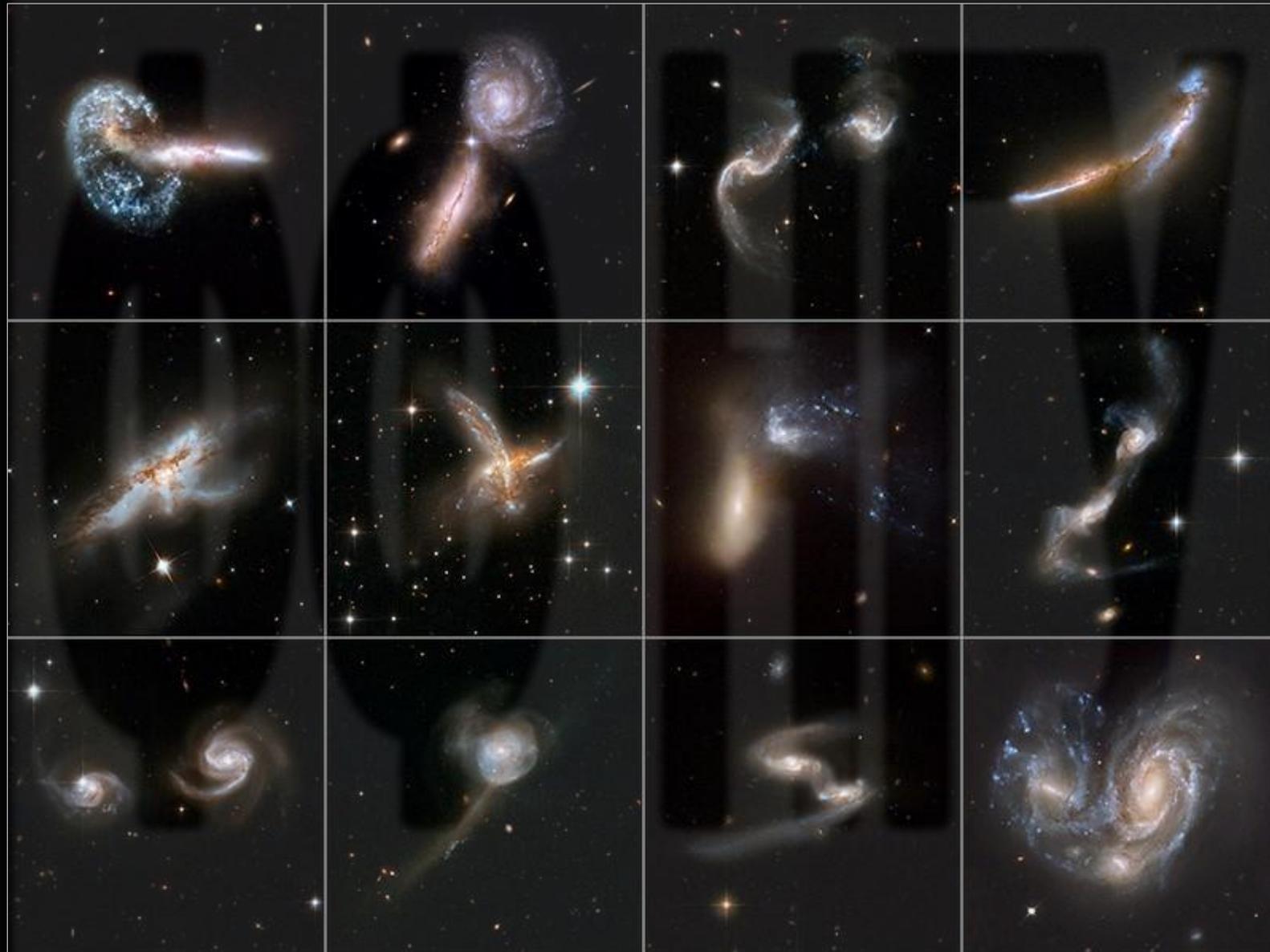


# Взаимодействие галактик



След из ионизированного водорода указывает на возможный объект, с которым произошло столкновение.

# Взаимодействие галактик



Слияния и поглощение по всей видимости играют важнейшую роль в эволюции галактик, приводя и образованию все более массивных объектов.

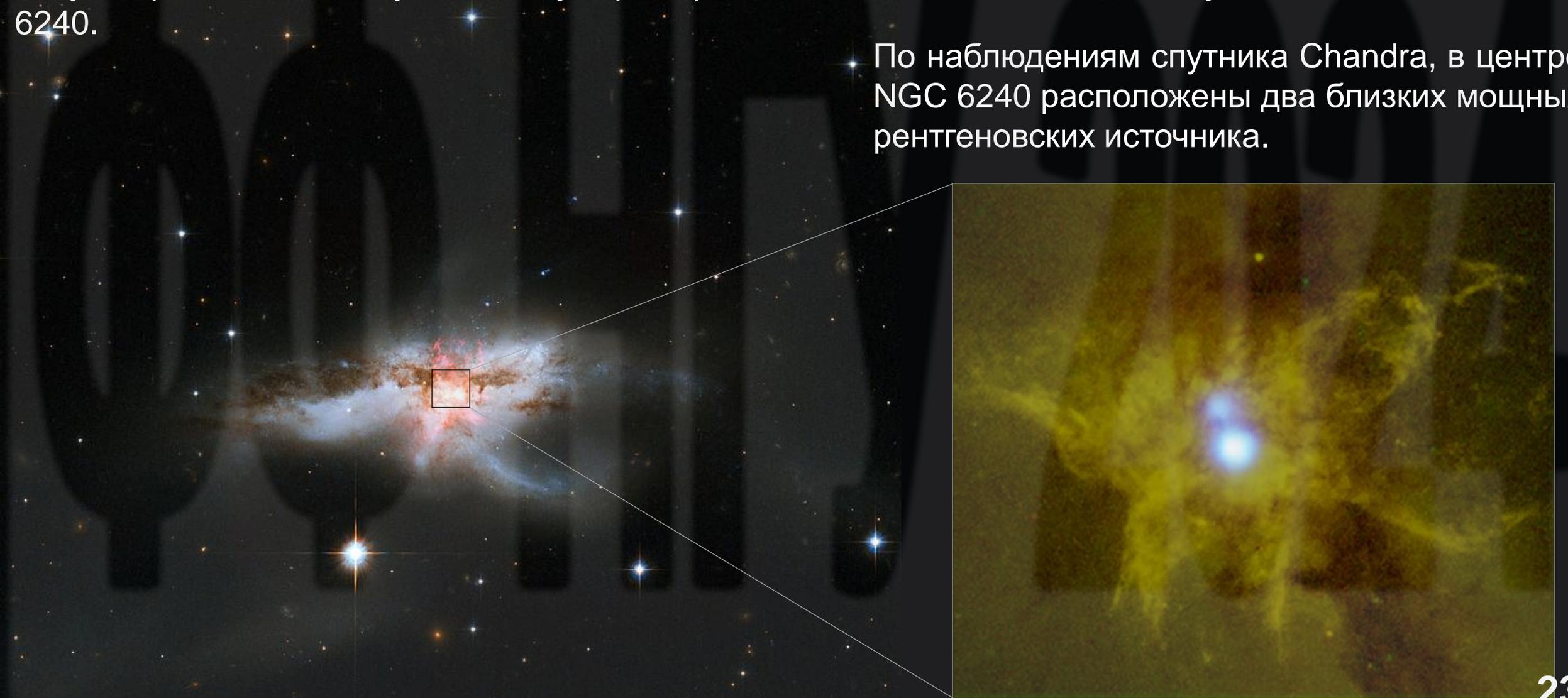
Наблюдения телескопа им. Хаббла показывают, что интенсивность взаимодействия галактик в ранние эпохи была существенно выше.

Наличие множества (десятков) карликовых галактик-спутников у Млечного Пути и М31 подтверждает эту гипотезу.

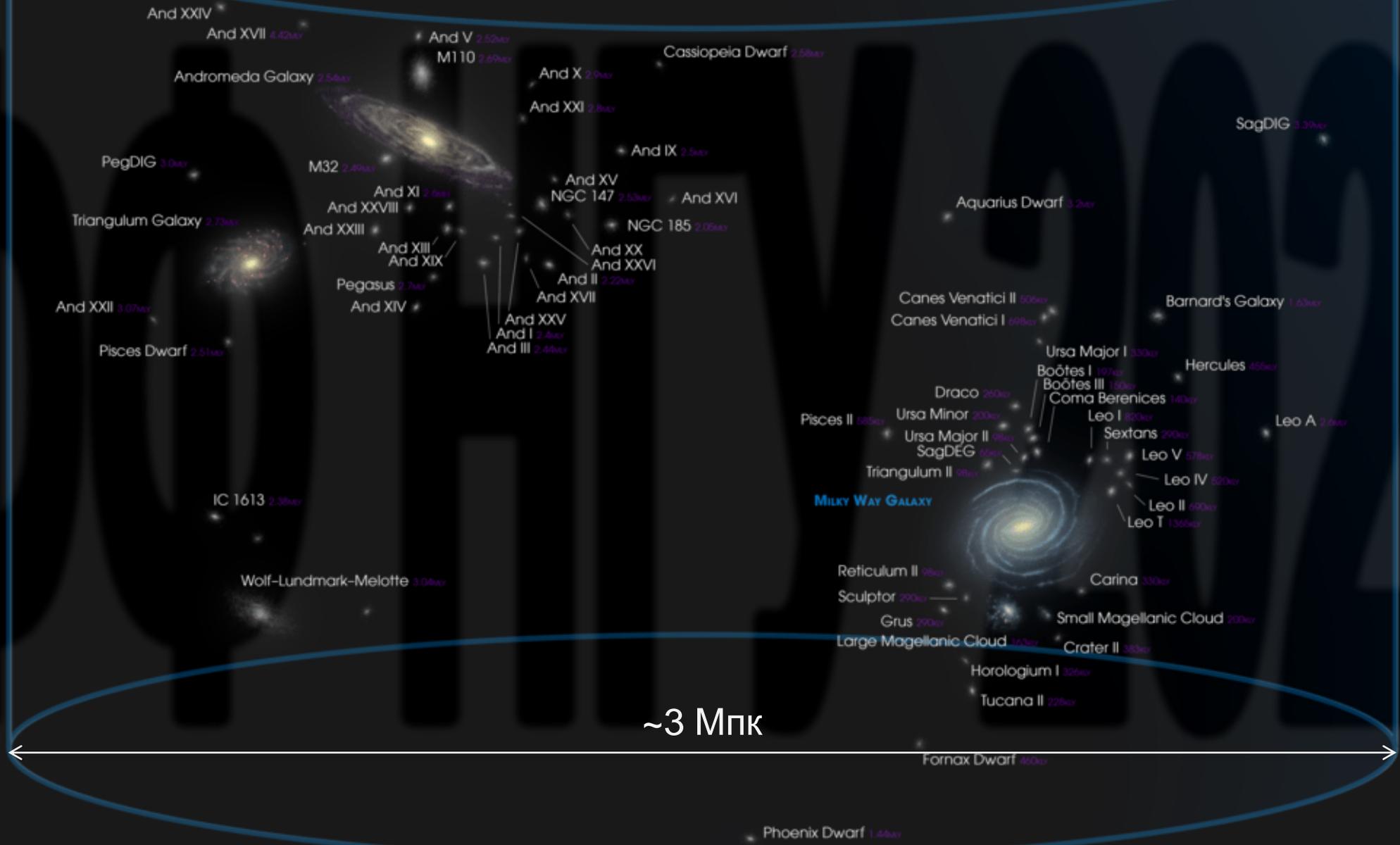
# Двойные сверхмассивные ЧД

Естественно ожидать, что при столкновении двух массивных галактик их центральные черные дыры могут образовать двойную систему. Примером такой системы, по-видимому, является объект NGC 6240.

По наблюдениям спутника Chandra, в центре NGC 6240 расположены два близких мощных рентгеновских источника.

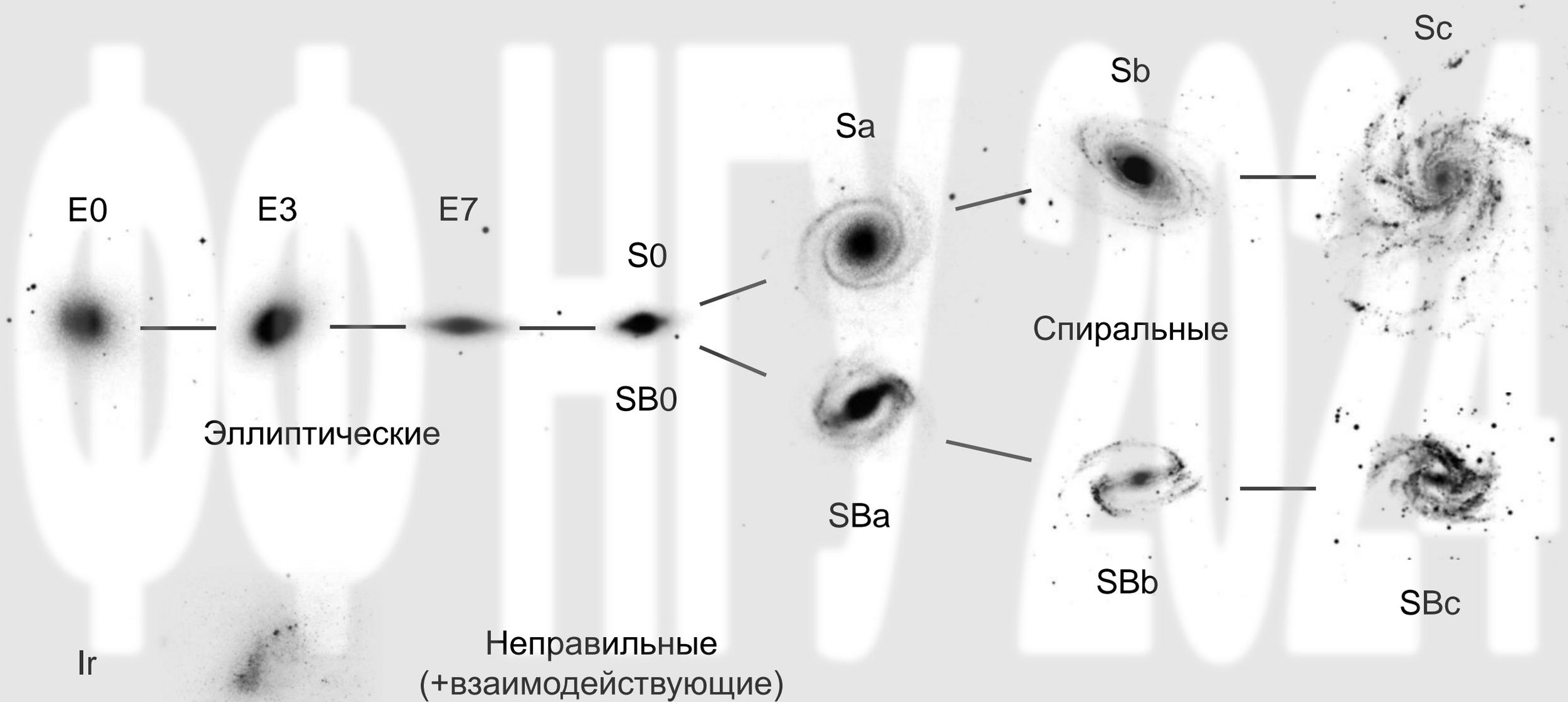


# Местная группа

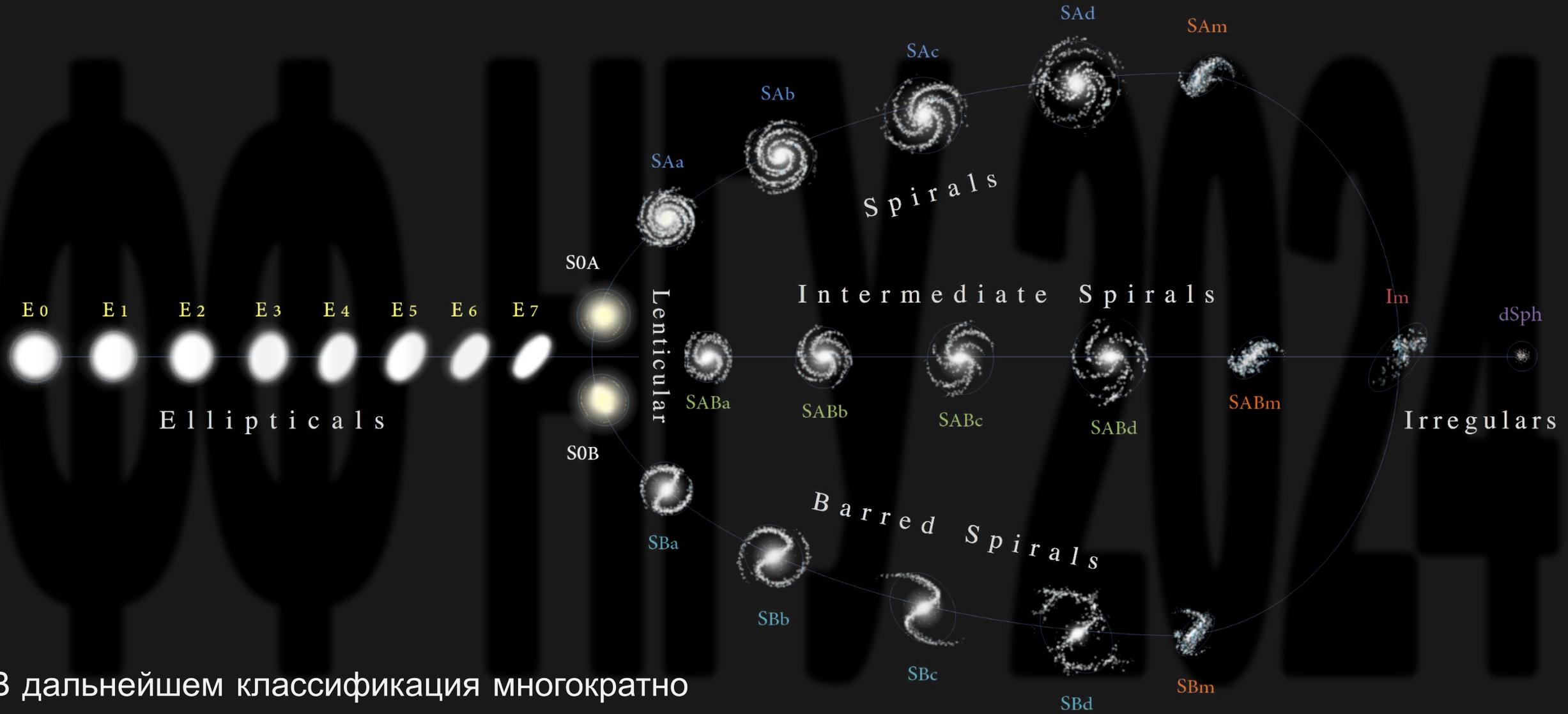


~3 Мпк

# Классификация галактик по Хаббл



# HUBBLE-DE VAUCOULEURS DIAGRAM



В дальнейшем классификация многократно изменялась и усложнялась.

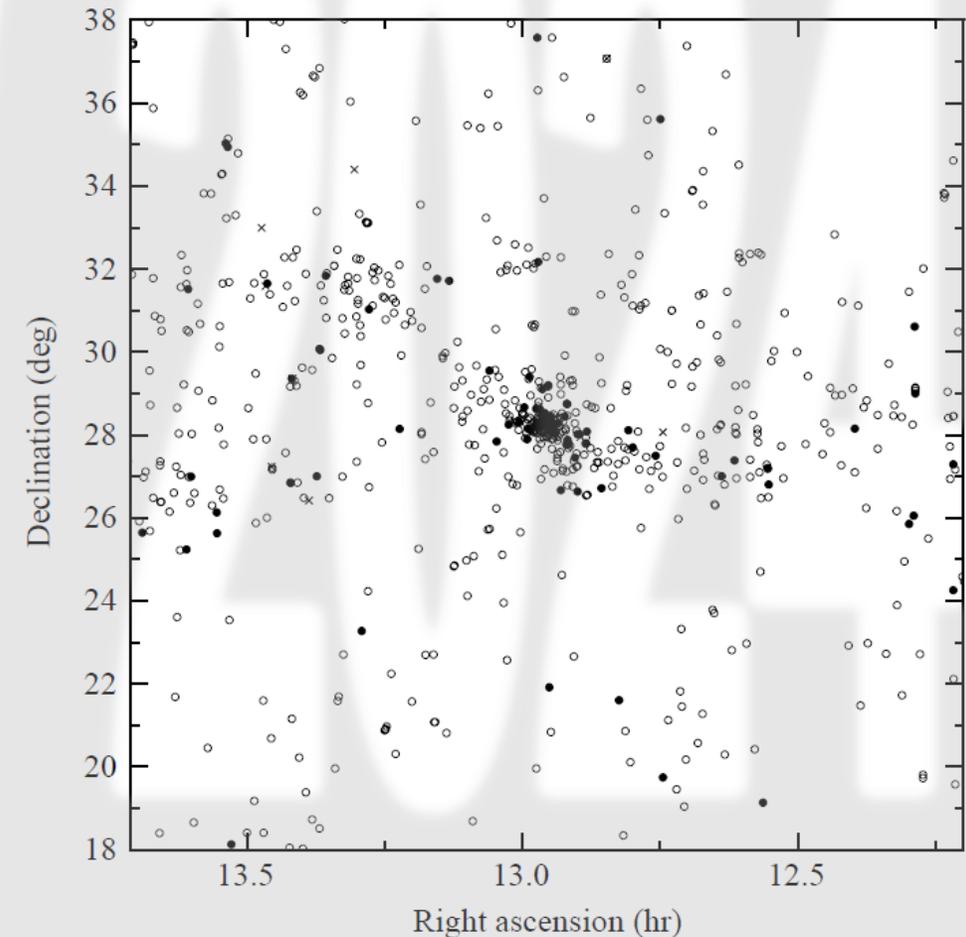
# Образование и эволюция галактик

Э. Хаббл полагал, что его классификация отражает эволюцию галактик от бесформенных эллиптических к образованию спиральной структуры. По этой причине эллиптические галактики иногда до сих пор называют галактиками «раннего» типа, а спиральные – «позднего» типа.

Современные наблюдения показывают, что это не так. Массы эллиптических галактик варьируются в очень широких пределах – от карликовых, с массами  $\sim 10^8 M_{\odot}$ , до гигантских, с массой до  $10^{14} M_{\odot}$ , в то время как массы спиральных галактик лежат в сравнительно узком диапазоне от  $10^9 - 10^{12} M_{\odot}$ .

В скоплениях галактик эллиптические галактики имеют тенденцию группироваться ближе к более плотному центру, а спиральные – на периферии.

Моделирование показывает, что скорее (по крайней мере некоторые) эллиптические галактики могли образоваться в результате слияния двух или более спиральных галактик. Однако полной ясности в этом вопросе еще нет.



# Лестница расстояний

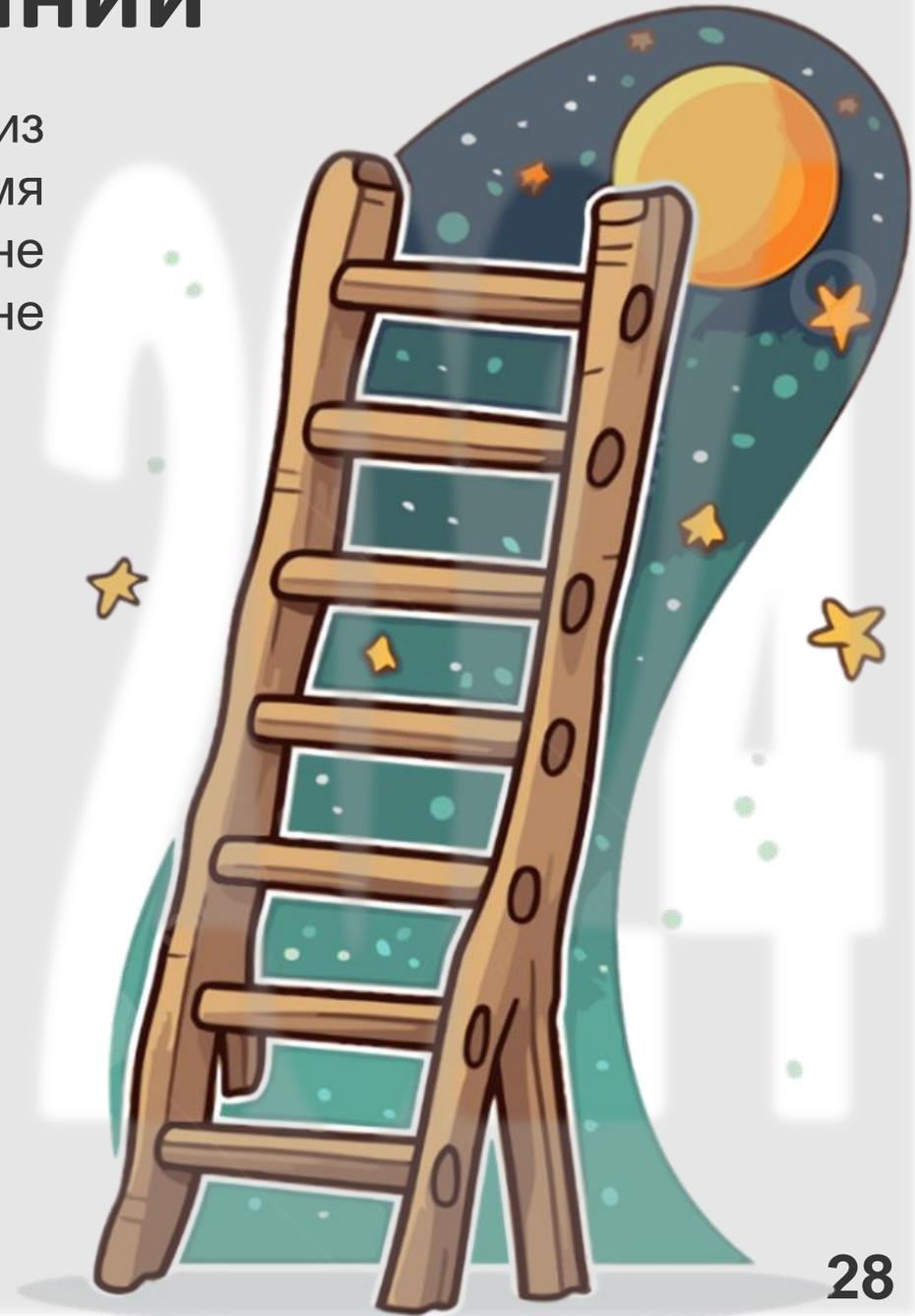
Измерение расстояний в астрономии является одной из важнейших и сложнейших задач. В настоящее время разработано множество (десятки) методик ни одна из которых не является универсальной – неприменима на всем диапазоне расстояний.

Важной особенностью различных методик является то, что диапазоны расстояний на которых они могут использоваться перекрываются.

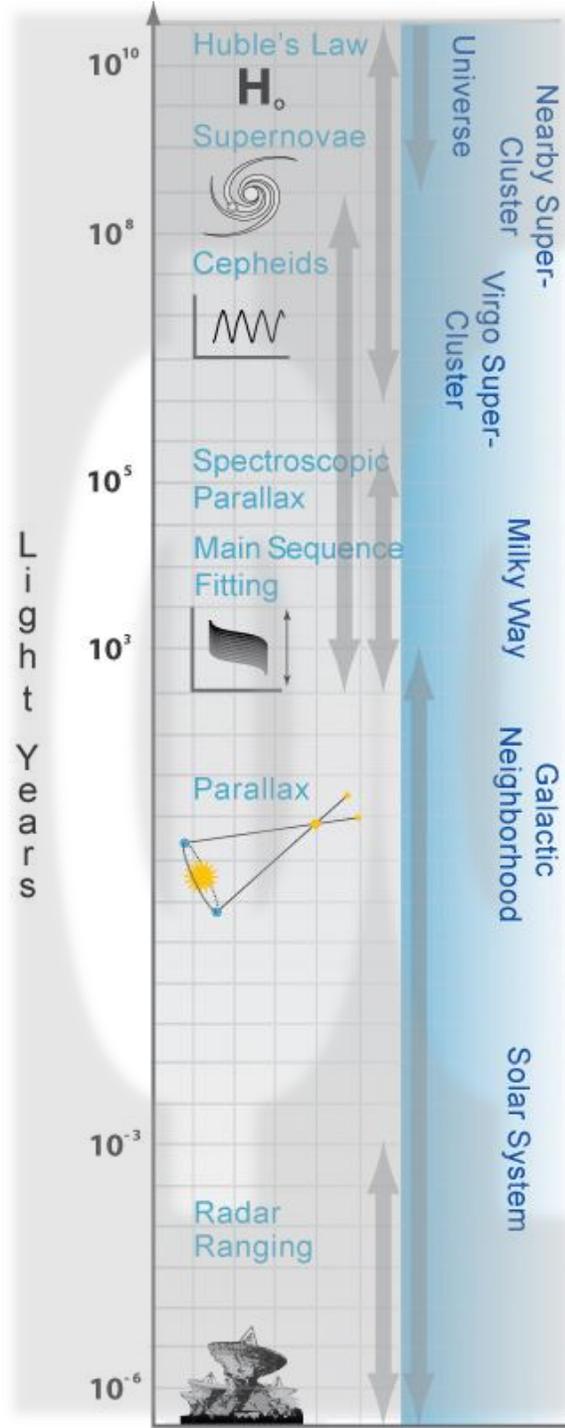
Это позволяет «состыковать» (взаимно прокалибровать) различные методы в области их перекрытия, и продлить диапазон измеримых расстояний на следующую ступеньку.

Так формируется «лестница расстояний» – набор методик измерения расстояний всё больших масштабов.

Погрешности, присущие нижней ступени, переходят на следующую – точность и надежность измерений падает.



# Лестница расстояний



Красное смещение: космологические расстояния, предельные расстояния.



Сверхновые типа Ia: космологические расстояния, ~Гпк



Переменные звезды (цефеиды, RR Lyr), для которых существует связь между периодом пульсаций и светимостью: ближайшие галактики, ~20 Мпк.



Диаграмма цвет-звездная величина для скоплений: в пределах Млечного Пути. Применим для отдельных звезд, при условии, что из независимых данных известно, что звезда принадлежит главной последовательности.



Почти прямое измерение методом годовичного параллакса: галактические окрестности СС, ~несколько кпк.



Прямое измерение методом радиозондирования: внутренняя часть СС. Суточный параллакс – в пределах СС.

# Скопления галактик



# Скопление галактик в Деве

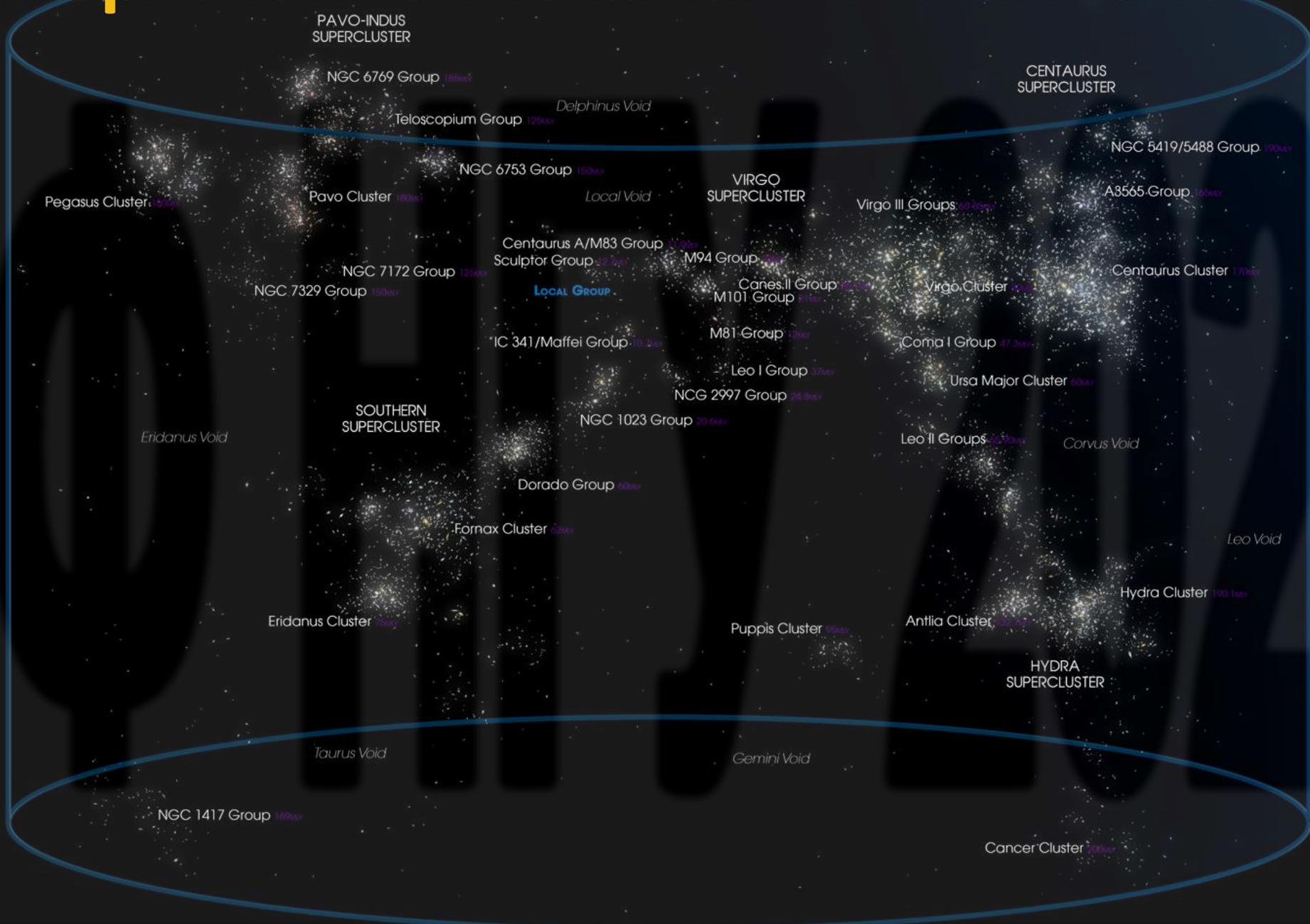
Несколько сотен крупных галактик и ~2000 карликовых

← ~8°; 10 св. Млет →

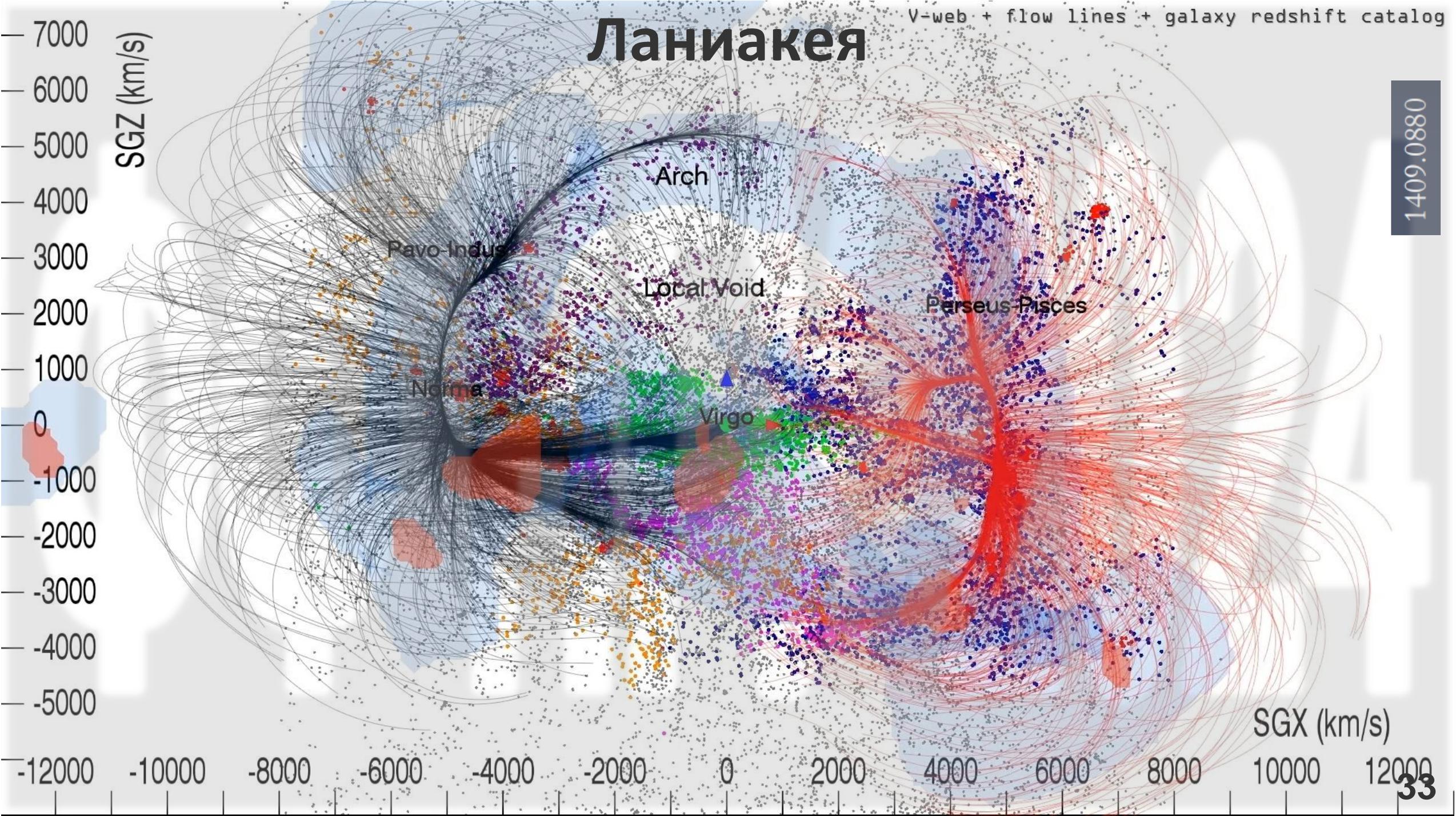
Rogelio Bernal Andreo  
DeepSkyColors.com

# Сверхскопление галактик Ланиакея

LANIAKEA



# Ланиакея



1409.0880

# LOCAL SUPERCLUSTERS

## Сверхскопления галактик



# Красное смещение

В 1910-х годах Весто Слайфер, проводя спектрометрические наблюдения спиральных туманностей, обнаружил, что спектры большинства из них «смещены» в красную область.



Vesto Slipher  
1875 – 1969

additional nebula N.G.C. 1700 has been observed by Pease, who found a large receding velocity but gave no numerical estimate.

## RADIAL VELOCITIES OF SPIRAL NEBULAE

+ indicates receding, - approaching

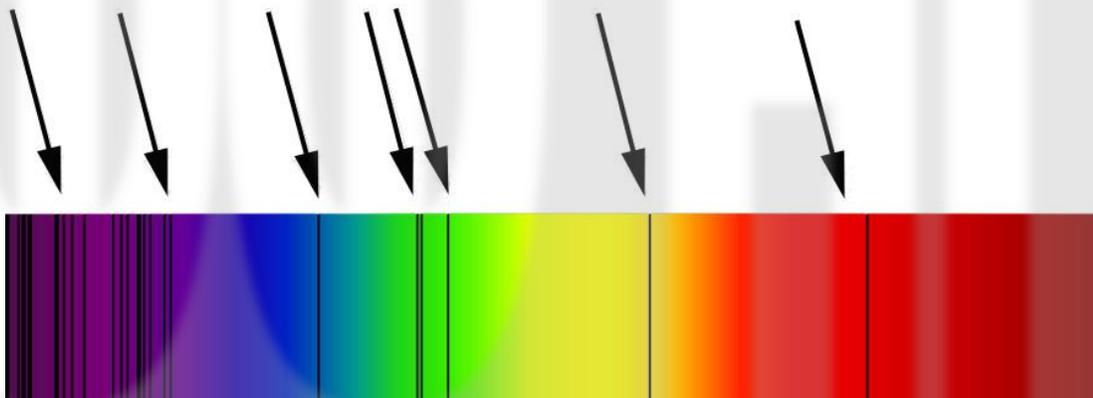
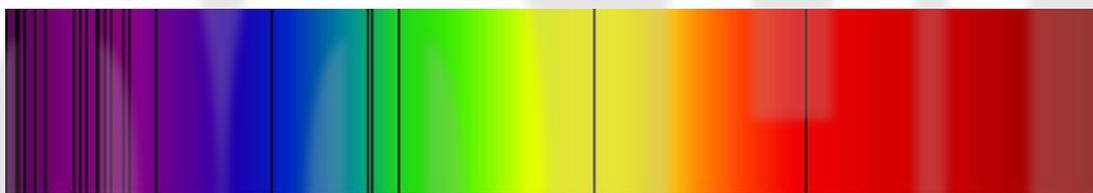
N. G. C.	R. A. h m	Dec. ° '	Rad. Vel. km. per sec.	N. G. C.	R. A. h m	Dec. ° '	Rad. Vel. km. per sec.
221	0 38	+40 26	- 300	4151*	12 6	+39 51	+ 980
224*	0 38	+40 50	- 300	4214	12 12	+36 46	+ 300
278†	0 47	+47 7	+ 650	4258	12 15	+47 45	+ 500
404	1 5	+35 17	- 25	4382†	12 21	+18 38	+ 500
584†	1 27	- 7 17	+1800	4449	12 24	+44 32	+ 200
598*	1 29	+30 15	- 260	4472	12 25	+ 8 27	+ 850
936	2 24	- 1 31	+1300	4486†	12 27	+12 50	+ 800
1023	2 35	+38 43	+ 300	4526	12 30	+ 8 9	+ 580
1068*	2 39	- 0 21	+1120	4565†	12 32	+26 26	+1100
2683	8 48	+33 43	+ 400	4594*	12 36	-11 11	+1100
2841†	9 16	+51 19	+ 600	4649	12 40	+12 0	+1090
3031	9 49	+69 27	- 30	4736	12 47	+41 33	+ 290
3034	9 49	+70 5	+ 290	4826	12 53	+22 7	+ 150
3115†	10 1	- 7 20	+ 600	5005	13 7	+37 29	+ 900
3368	10 42	+12 14	+ 940	5055	13 12	+42 37	+ 450
3379*	10 43	+13 9	+ 780	5194	13 26	+47 36	+ 270
3489†	10 56	+14 20	+ 600	5195†	13 27	+47 41	+ 240
3521	11 2	+ 0 24	+ 730	5236†	13 32	-29 27	+ 500
3623	11 15	+13 32	+ 800	5866	15 4	+56 4	+ 650
3627	11 16	+13 26	+ 650	7331	22 33	+33 23	+ 500
4111†	12 3	+43 31	+ 800				

The great preponderance of positive (receding) velocities is very striking; but the lack of observations of southern nebulae is unfortunate, and forbids a final conclusion. From the above it may be seen a preponderance

# Красное смещение

При удалении источника линии в его спектре смещаются в красную сторону, то есть их длина волны увеличивается:

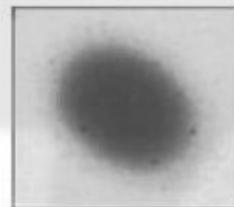
Излученный спектр



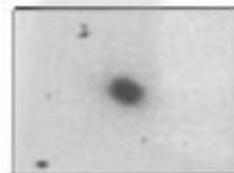
Принятый спектр

При приближении, смещение происходит в синюю сторону.

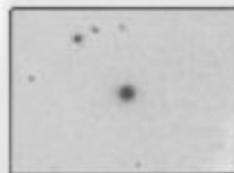
Cluster nebula in



Virgo



Ursa Major



Corona Borealis



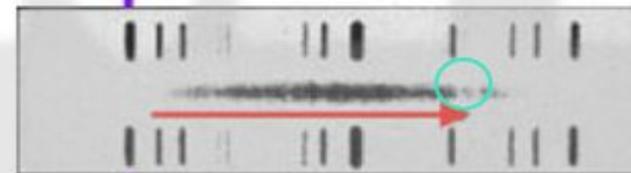
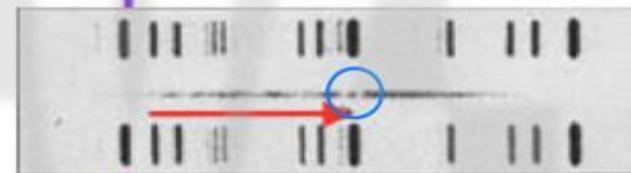
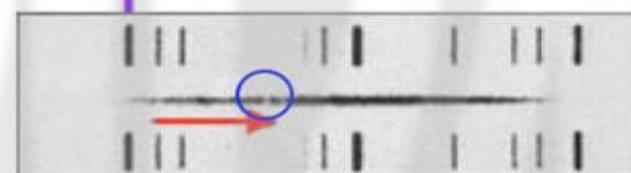
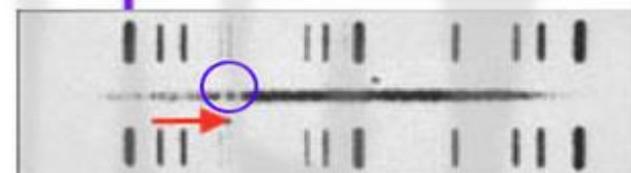
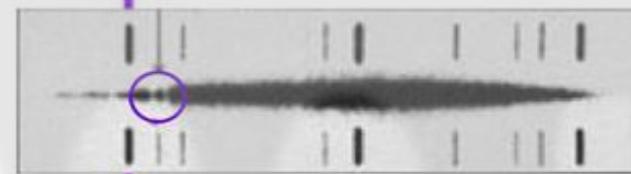
Boötes



Hydra

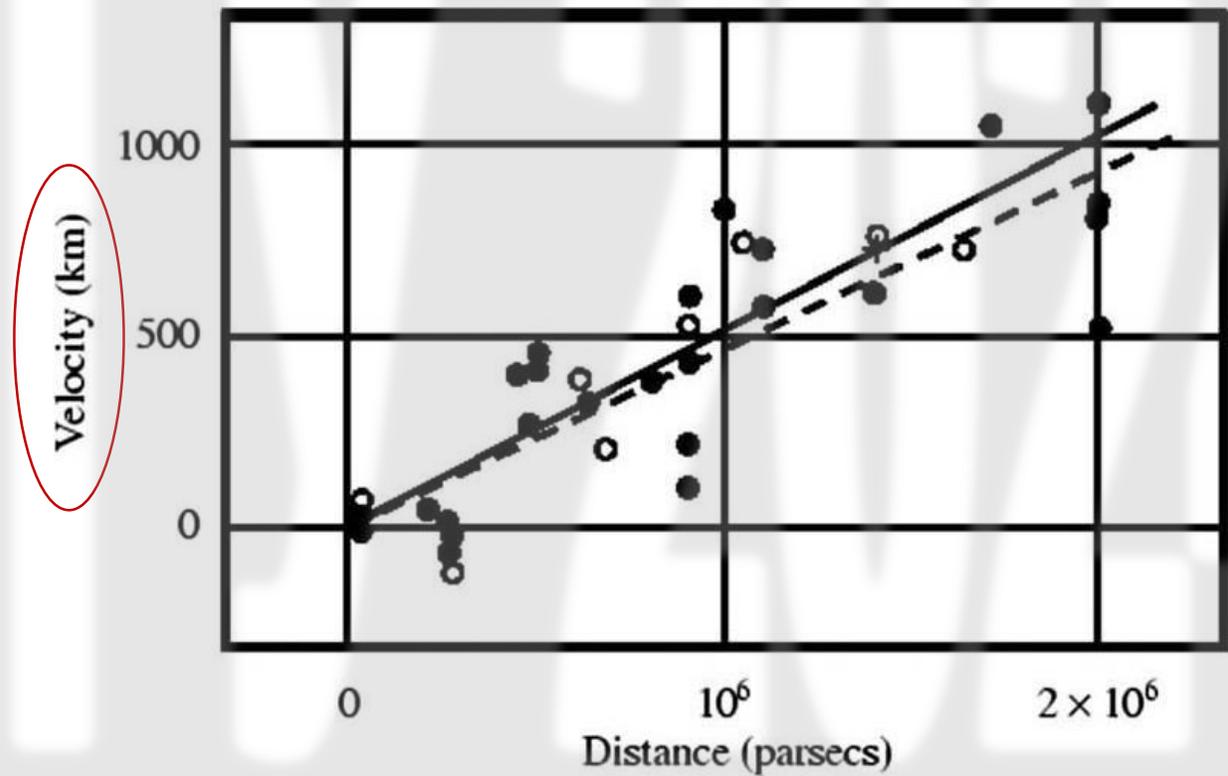
Redshifts

H+K



# Закон Хаббла

Кнут Лундмарк (1924) Георг Леметр (1927) и Эдвин Хаббл (1929) независимо обнаружили связь между скоростью удаления галактик с расстоянием до них – закон Хаббла.



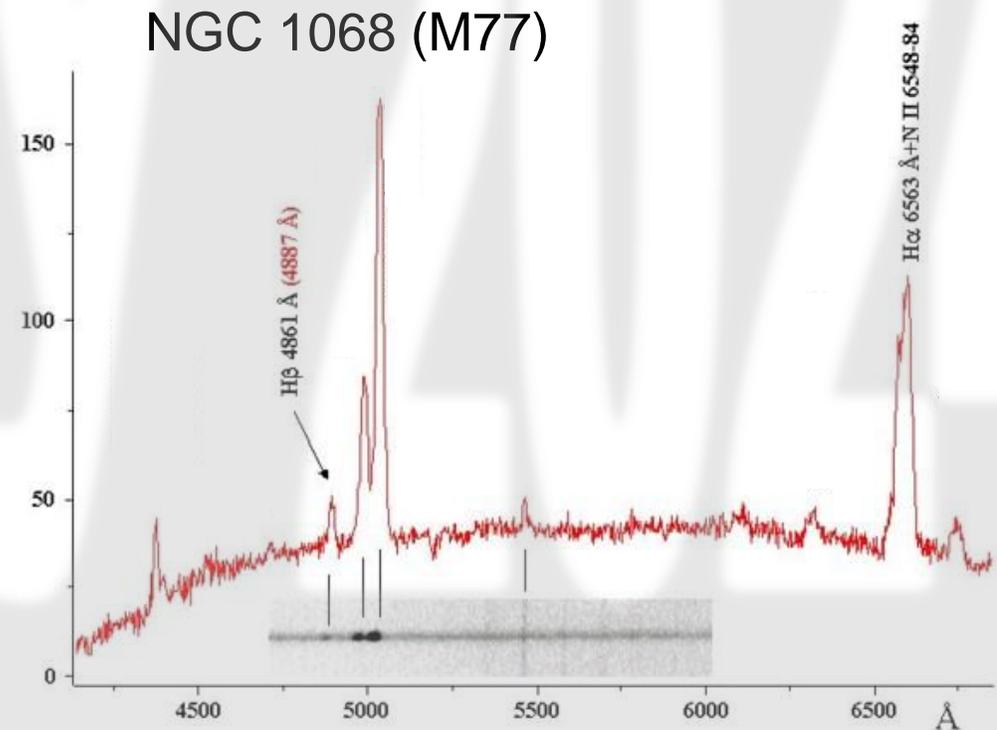
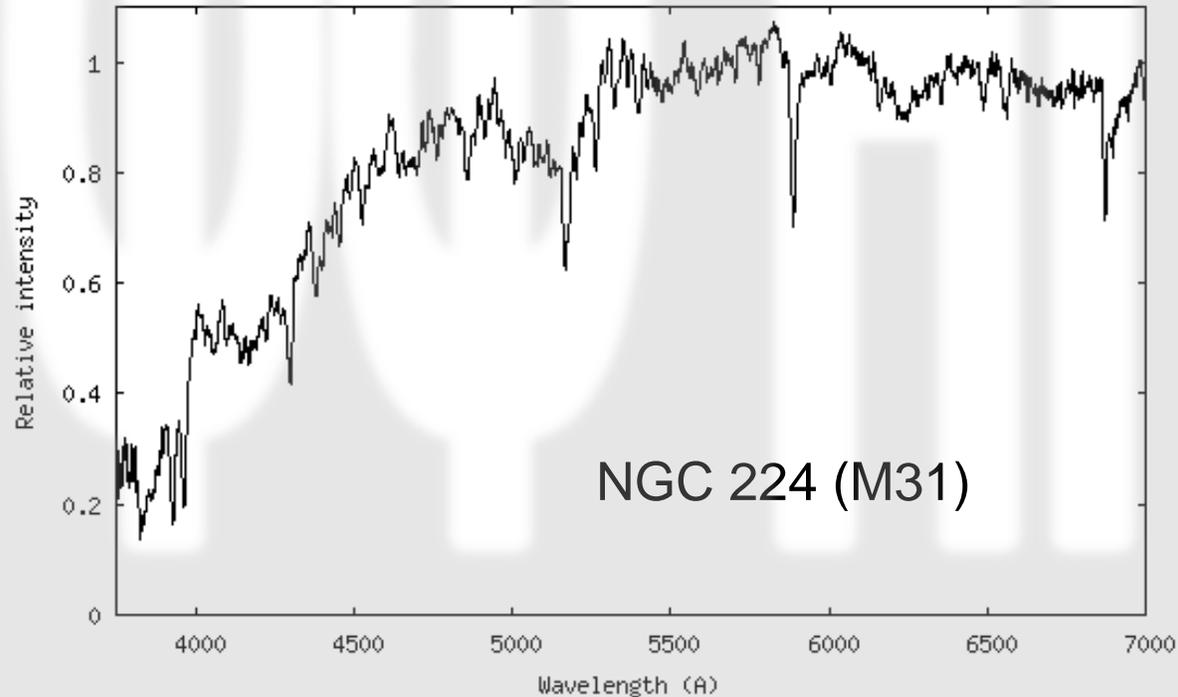
$$H_0 \approx 500 \frac{\text{км}}{\text{с} \cdot \text{Мпс}}$$

$$v = H_0 d$$

# Галактики с активным ядром (AGN)

В 1908 году Весто Слайфер, при спектральных исследованиях спиральных туманностей, обнаружил, что в спектре NGC1068 (M77) наблюдаются яркие линии излучения (вместо обычных линий поглощения).

В 1940-ых Карл Сейферт предпринял систематический поиск и изучение подобных объектов, и обнаружил, что их общей характеристикой является наличие яркого компактного ядра.



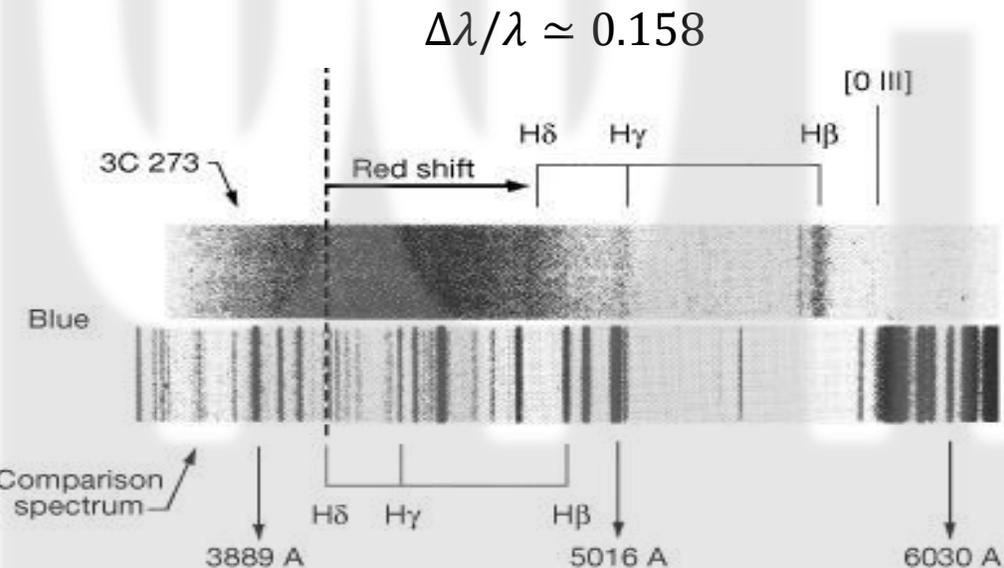
# Квazarы

Quasars – Quasi Stellar Radio Sources

С 1950-ых годов, с развитием радиоастрономии стали обнаруживать мощные компактные источники радиоизлучения,

В 1963 году впервые удалось отождествить один из таких источников 3C48 с его оптическим изображением, а чуть позже – источник 3C273, самый яркий объект такого типа.

С 5-метровым телескопом удалось получить спектр этого объекта, в котором обнаружались эмиссионные линии, не поддающихся идентификации.



Maarten Schmidt  
1929 – 2022

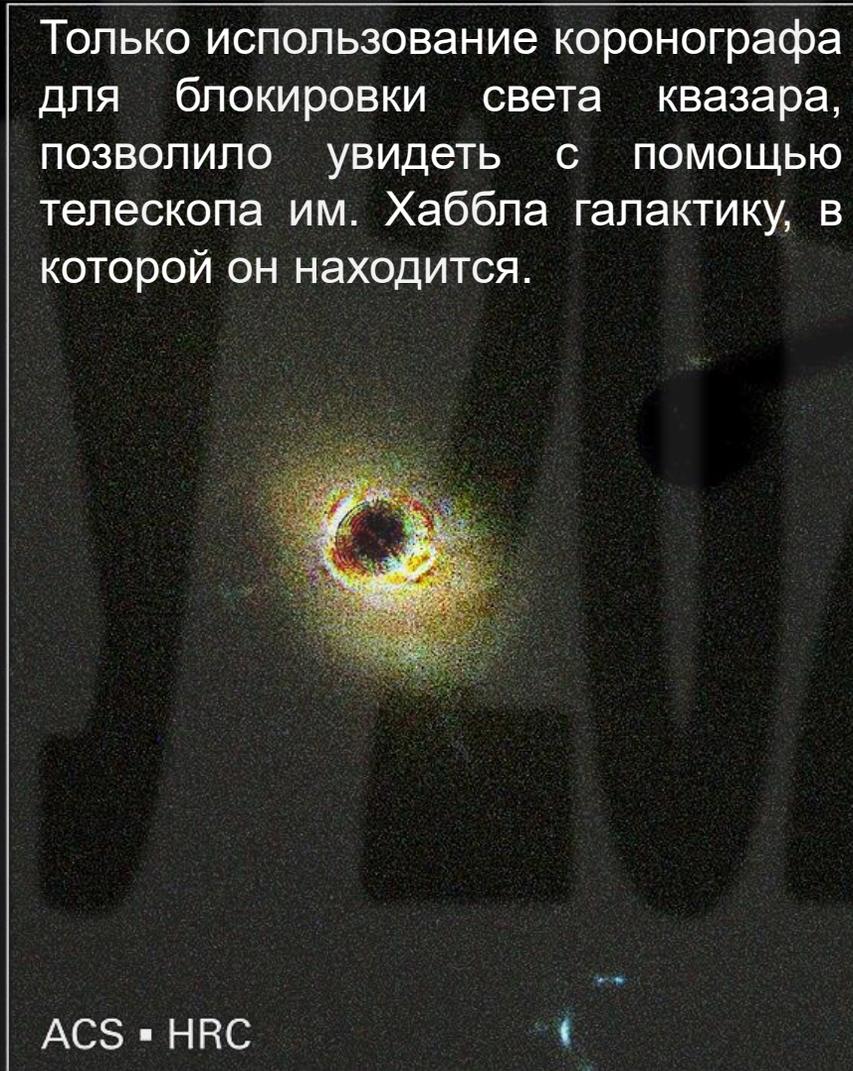
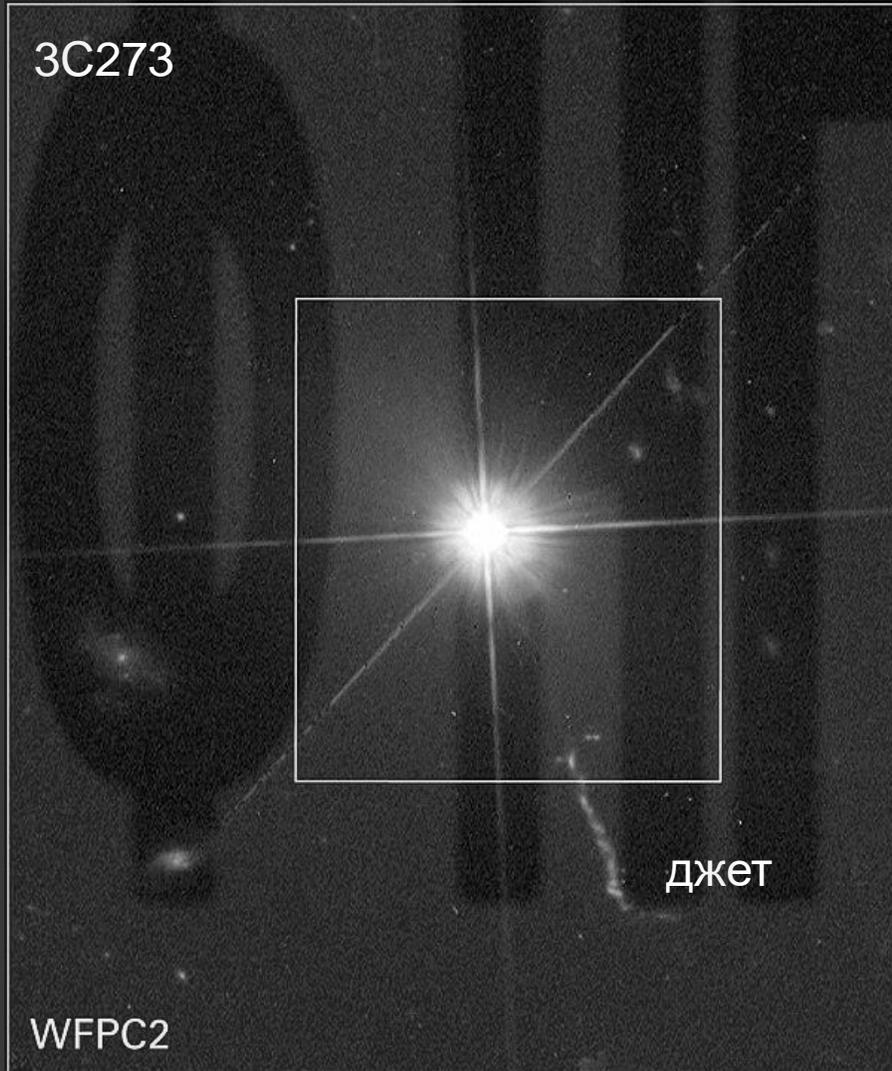
Мартин Шмидт первым догадался, что наблюдаемые линии принадлежат водороду, но сильно сдвинуты в красную сторону.

Это означало, что скорость удаления объекта  $\sim 47000$  км/с, что согласно закону Хаббла соответствовало очень большому расстоянию (в случае 3C273 2.4 млрд св. лет).

Значит это чрезвычайно мощные, но при этом очень компактные источники.

# Квезары

3C273 – самый яркий ( $m=12.9$ ) квазар в оптическом диапазоне. Джет квазара составляет угол всего  $6^\circ$  от направления на Солнечную систему.

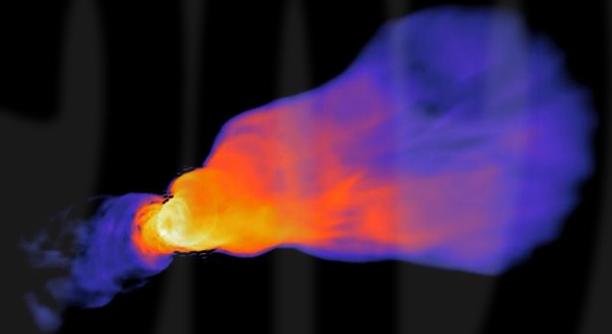


# Квазары

$$M_{BH} \simeq 10^7 \div 10^9 M_{\odot}$$

$$L_{QSO} \simeq 10^{35} \div 10^{40} \text{ Вт} = 10^8 \div 10^{13} L_{\odot}$$

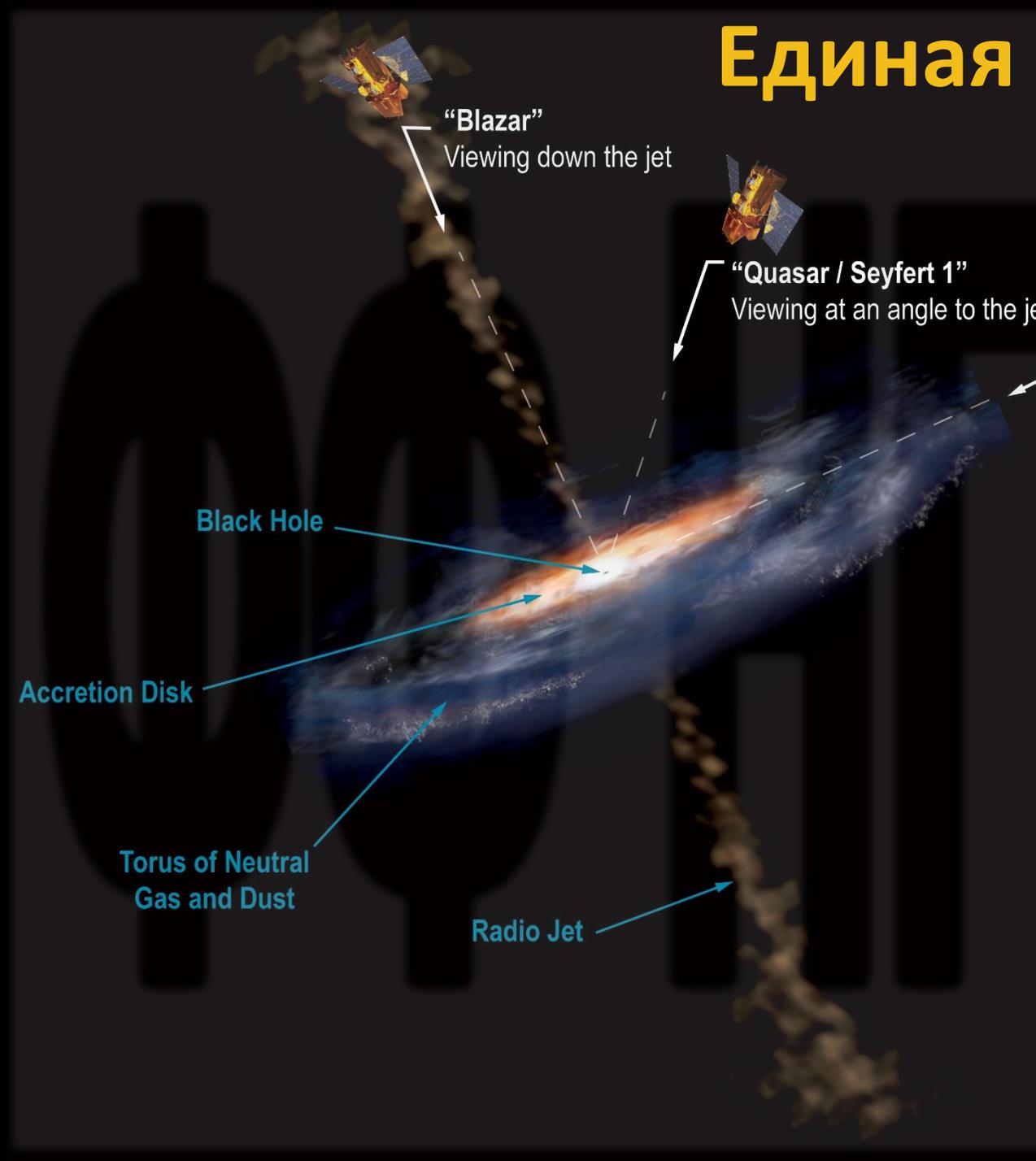
Джеты достигают несколько кпк



Сверхмассивные черные дыры в центрах галактик, на которые течет много вещества, образуя аккреционный диск.

При этом выделяется энергия, а также с огромной скоростью в виде струй выбрасывается газ.

# Единая модель



"Blazar"  
Viewing down the jet

"Quasar / Seyfert 1"  
Viewing at an angle to the jet

"Radio Galaxy / Seyfert 2"  
Viewing at 90° from the jet

Black Hole

Accretion Disk

Torus of Neutral  
Gas and Dust

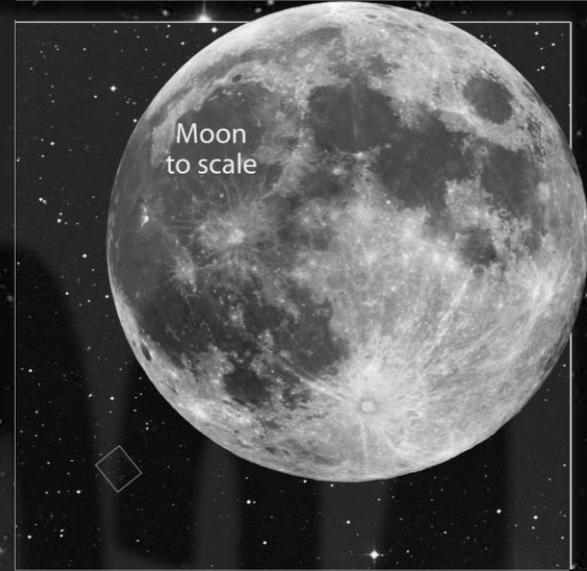
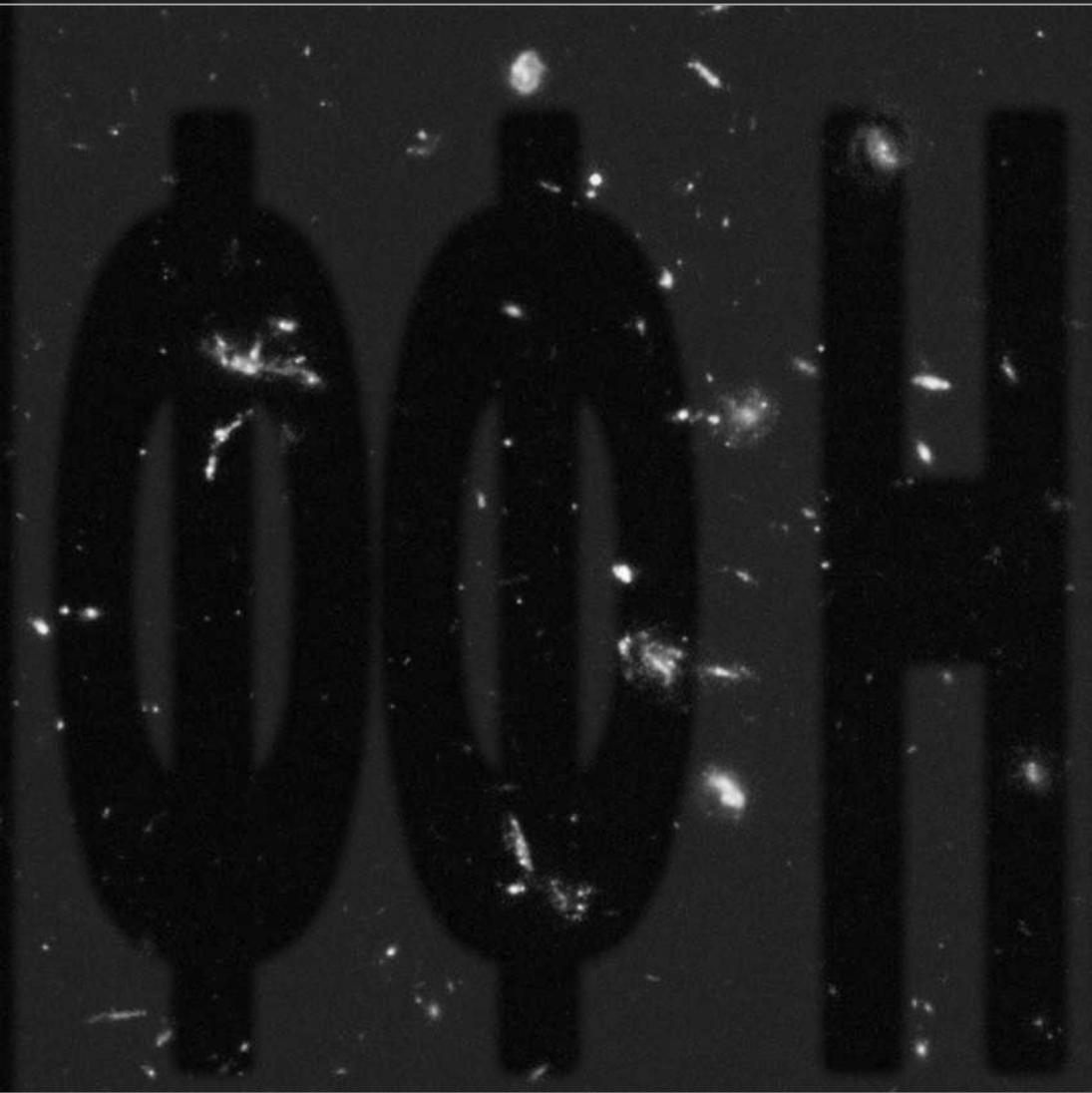
Radio Jet

В рамках единой модели свойства различных активных галактик

- ✓ Сейфертовские галактики
- ✓ Радио галактики
- ✓ Квазары
- ✓ Блазары

объясняются свойствами тора вокруг черной дыры и его ориентацией относительно наблюдателя.

# Ультра-глубокое поле Хаббла



Около 10000 галактик в поле зрения 3.4'!  
(~100 раз меньше площади видимого диска Луны)