

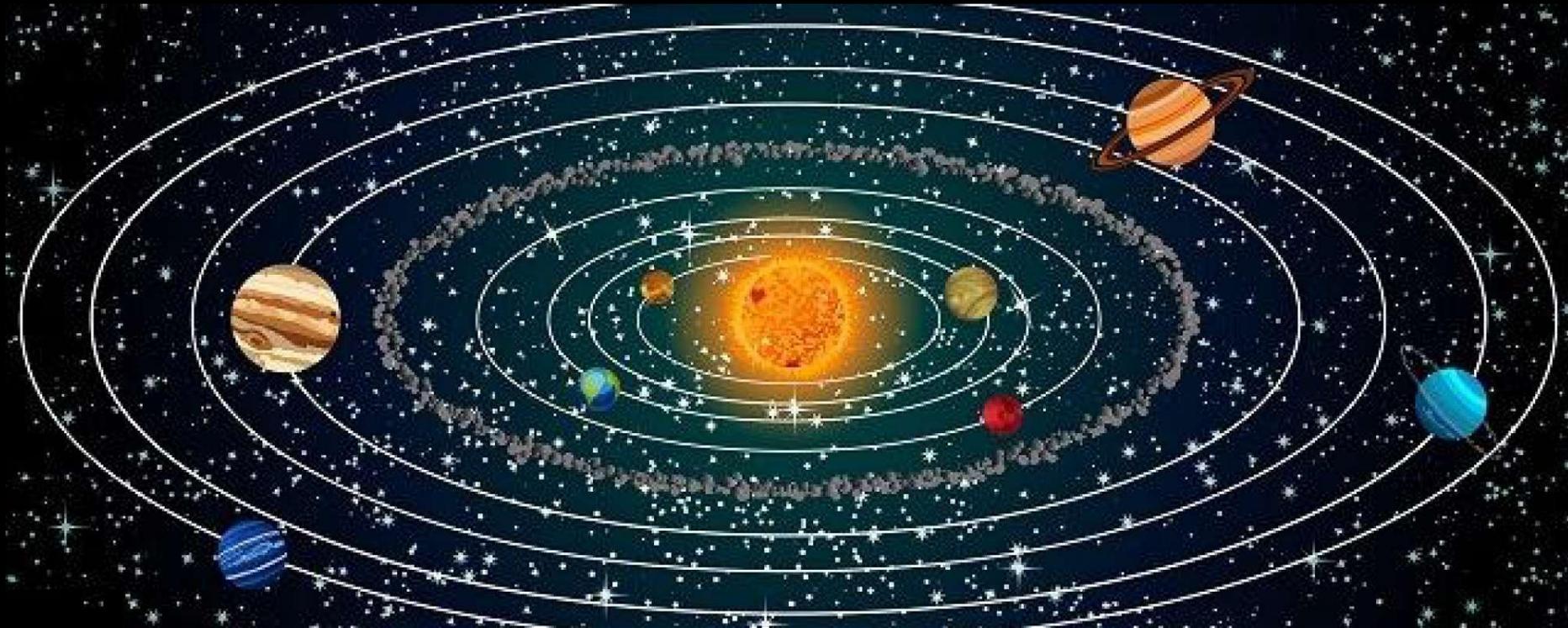
Физика космоса

Занятие 1.

Астрофизические проявления тёмной материи

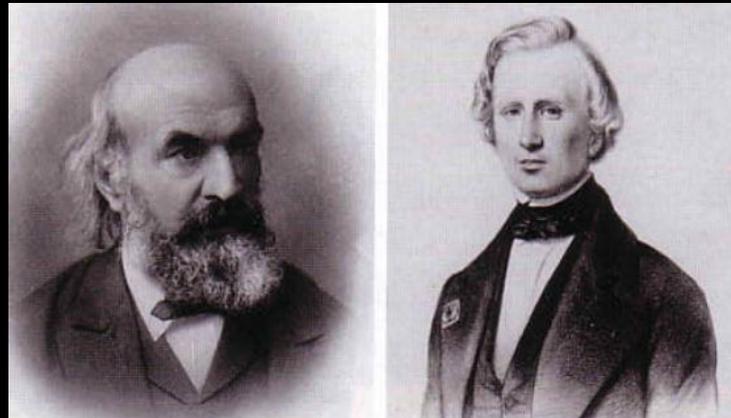
Начало 19 века

- Астрономия – самая точная наука.
- В объяснении движения небесных тел не осталось никаких проблем
- Кроме одной Уран непредсказуемо меняет свою скорость и положение на небе.



Решение загадки

- В 1846 году с невидимым объектом столкнулись астрономы У. Леверье и Дж. Адамс, изучая аномалию в движении планеты Уран.
- Леверье вычислил положение новой планеты и отправил письмо немецкому астроному Дж. Галле, который в этот же день обнаружил планету в телескоп.
- Подобное объяснение Леверье прецессии орбиты Меркурия оказалось неверным (планета Вулкан) и было связано с ОТО.



У. Леверье

Д. Адамс

Что мы назовем темной материей?

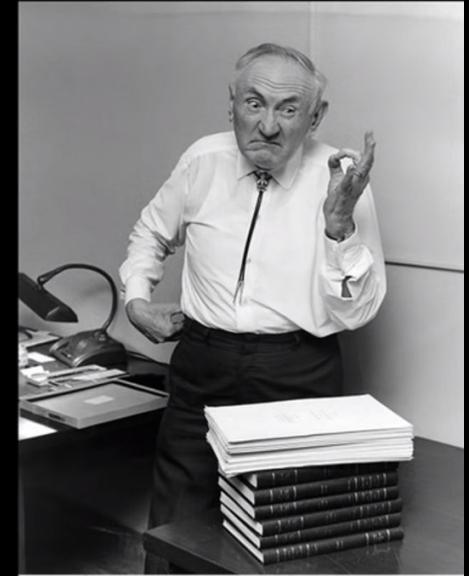


Масса/светимость по Шварцшильду

Objects	Distance (in kpc)	Luminosity (in sol. lum.)	Mass (in sol. mass)	Mass/Lum. f
Solar Neighborhood	—	—	—	4
Triangulum Nebula, M33	480	1.4×10^9	5×10^9	4
Large Magellanic Cloud	44	1.2×10^9	2×10^9	2
Andromeda Nebula	460	9×10^9	1.4×10^{11}	16
Globular Cluster, M92	11	1.7×10^5	$< 8 \times 10^5$	< 5
Elliptical Galaxy, NGC 3115	2100	9×10^8	9×10^{10}	100
Elliptical Galaxy, M32	460	1.1×10^8	2.5×10^{10}	200
Average S in Double Gal.	—	1.3×10^9	7×10^{10}	50
Average E in Double Gal.	—	8×10^8	2.6×10^{11}	300
Average in Coma Cluster	25000	5×10^8	4×10^{11}	800

Фриц Цвикки и теорема о вириале

- В 1931 году Эдвин Хаббл и Милтон Хумалсон опубликовали большой каталог красных смещений галактик, принадлежащих различным скоплениям.
- В 1933 году Фриц Цвикки обнаружил, что 8 галактик в скоплении Волосы Вероники (Coma Cluster) имеют разброс в движении видимых скоростей до 2000 км/с.
- Этот факт был замечен и самим Хабблом, но Цвикки сделал следующий шаг и применил теорему о вириале для определения массы скопления (около 20 лет назад заимствованная из термодинамики теорема о вириале уже применялась в астрономии Пуанкаре).





ПОЧЕМУ ГАЛАКТИКИ НЕРАВНОМЕРНО
РАСПРЕДЕЛЕНЫ В ПРОСТРАНСТВЕ?

Coma Cluster
HST ACS

F475W B
F814W I

50,000 light-years 15.3 kpc 5'

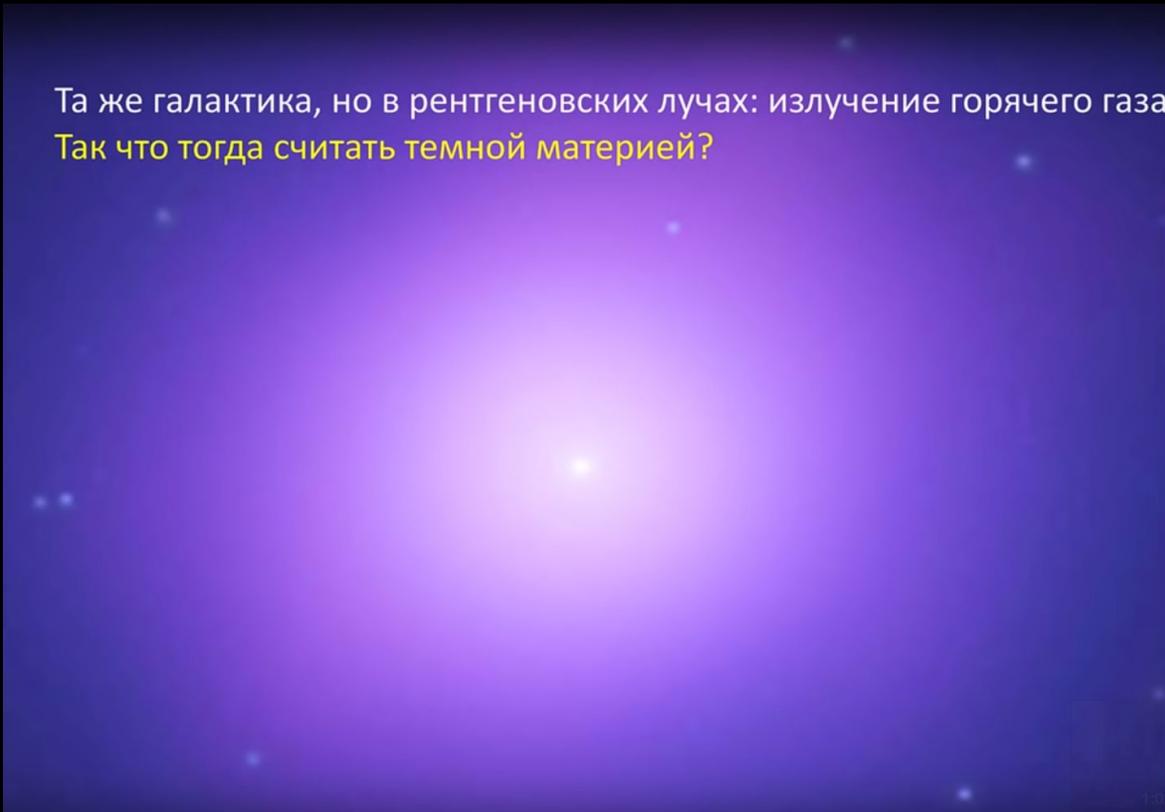
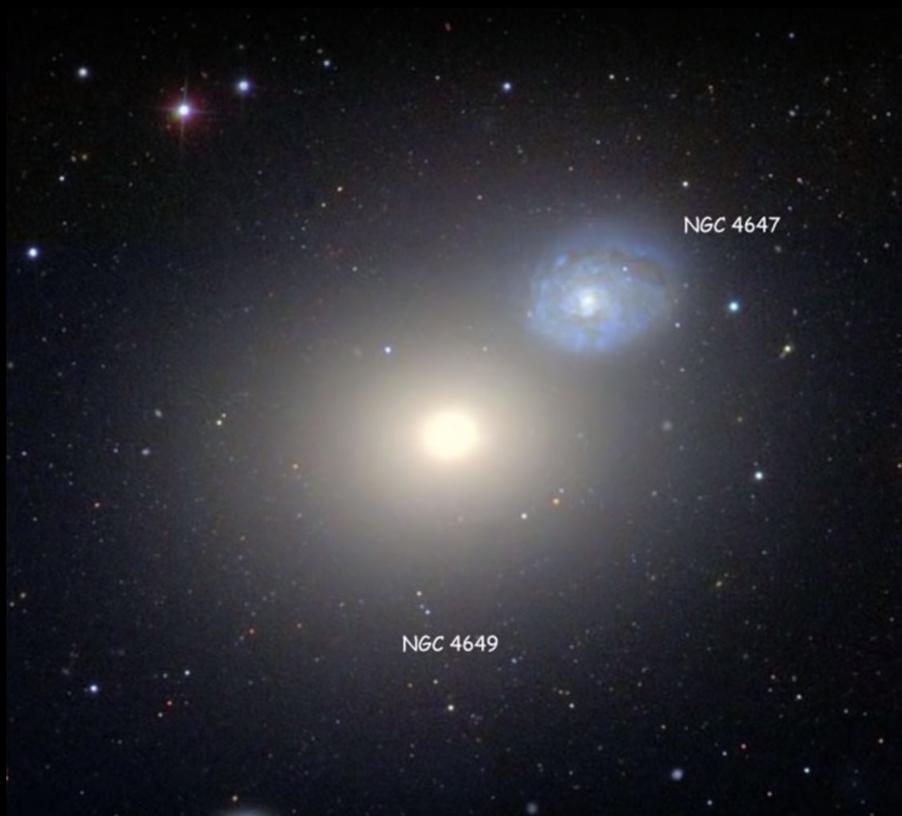


Массы в галактиках не удержат скопление от безудержного расширения

Расчёты Цвикки

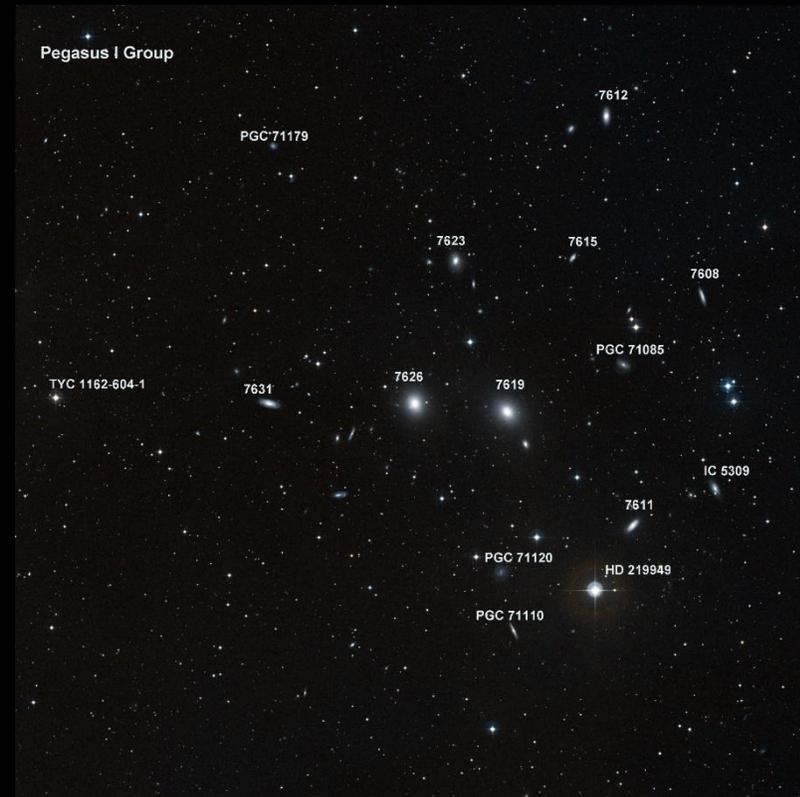
- Цвикки начал с того, что оценил общую массу скопления как произведение числа наблюдаемых галактик (800) и средней массы галактики, которую он принял за 10^9 масс Солнца (согласно Э. Хабблу).
- Затем он принял оценку физического размера системы, которая, по его мнению, составляла около 10^6 световых лет, чтобы определить потенциальную энергию системы.
- Это позволило вычислить среднюю кинетическую энергию и, наконец, дисперсию скорости.
- Ф. Цвикки обнаружил, что при таких условиях дисперсия скорости должна составлять 80 км/с. В отличие от наблюдаемой средней скорости разброс по линии прямой видимости составлял примерно 1000 км/с.

Межзвёздный газ в галактиках



Первые оценки массы межгалактического вещества

- Герберт Руд, расчёты которого позже подтвердил Саймон Уайт, изучал процесс эволюции скоплений галактик и пришёл к выводу, что масса, ответственная за высокое отношение массы к светимости, может быть найдена в межгалактическом пространстве, а не в самих галактиках.
- В 1961 году Арно Пензиас провёл поиск свободного водорода в скоплении Pegasus I и установил верхний предел его количества в одну десятую от его вириальной массы.



Вклад межгалактического газа

- В 1967 году Невиль Вульф предложил, что газ может быть ионизирован, и использовал радио, видимое и рентгеновское излучение для его наблюдения.
- В 1971 г. астрофизик Дж. Микинс провёл анализ проведённых наблюдений и ограничил количество горячего межгалактического газа на уровне менее 2% от количества, необходимого для гравитационного связывания галактик в скопления.
- Ученые исключили возможность полного объяснения недостающей массы в скоплениях галактик межгалактическим газом.
- Началась эпоха идей о более или менее экзотических возможностях объяснения скрытой массы, в том числе при помощи массивных коллапсирующих объектов, карликовых звезд и т.п.
- Однако впереди были измерения содержания элементов в первичном межгалактическом веществе

Первые измерения скорости вращения галактик

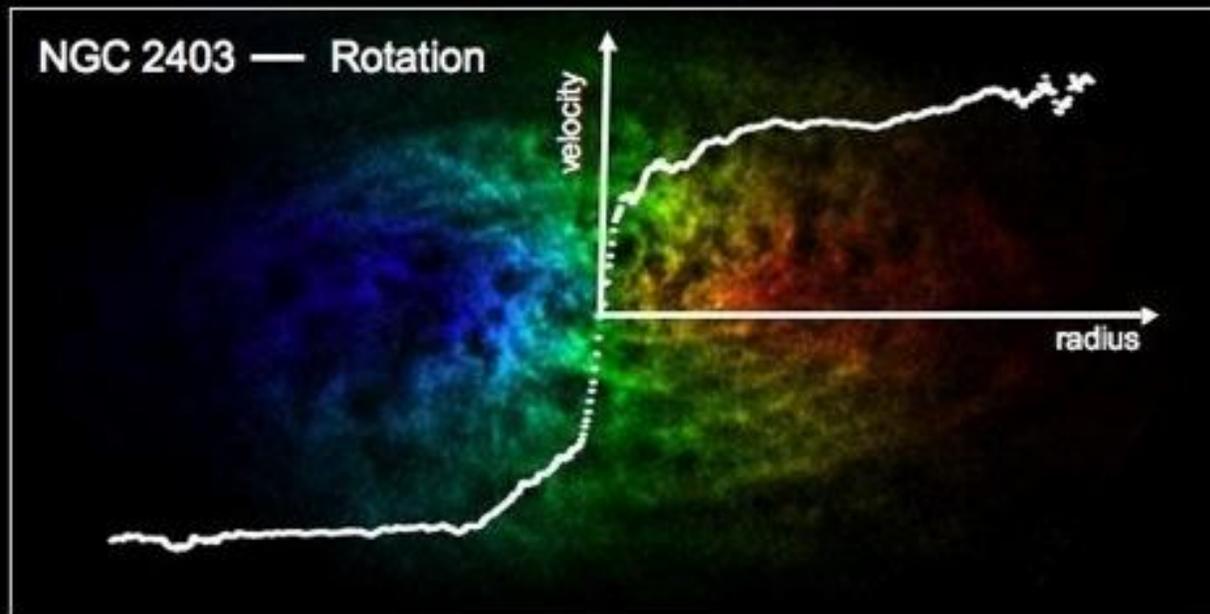
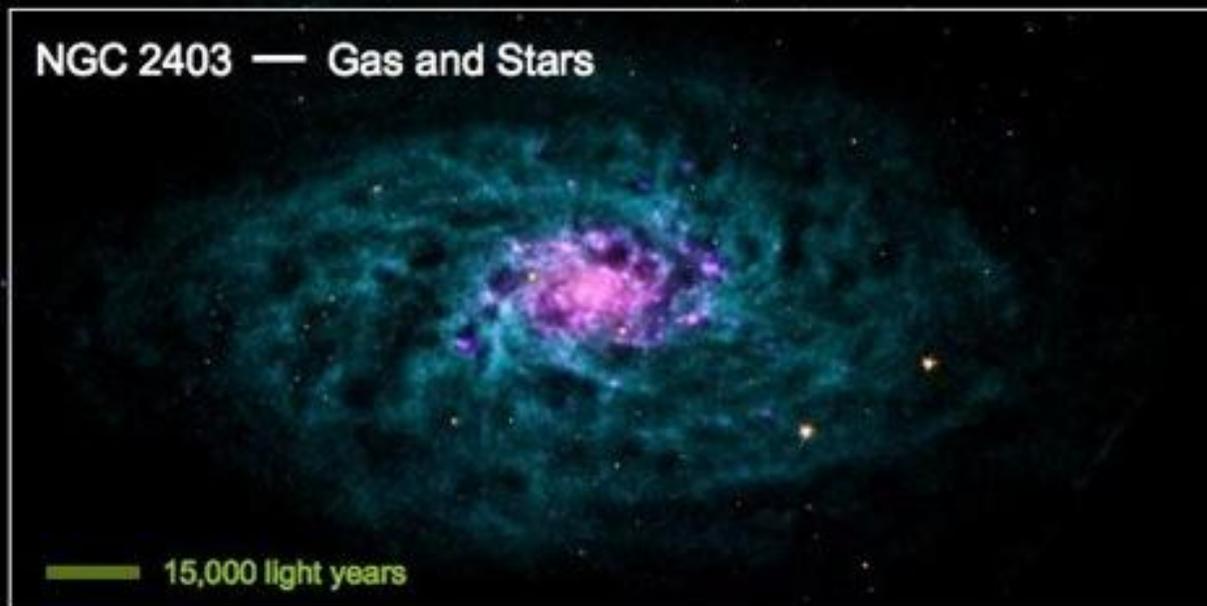
- Дальнейший прогресс в изучении ТМ был сделан при помощи измерения и анализа Кривых вращения галактик - то есть измерения скорости вращения звёзд и газа как функцию расстояния от центра.
Такой анализ позволяет сделать вывод о распределении масс галактиках как функцию r .
- В 1914 году, за десять лет до того, как Хаббл убедительно продемонстрировал, что Андромеда (М31) является отдельной галактикой, Макс Вольф и Весто Слайфер обратили на неё внимание, выдвинули такую идею и по смещению спектральных линий сделали вывод о вращении галактики Андромеда.
- В 1917 году в обсерватории Вильсона Фрэнсис Пиз измерил вращение центральной области Андромеды обнаружив, что он вращается с приблизительно постоянной угловой скоростью.
- Другие учёные использовали вычисленные скорости для определения массы Андромеды и отношения массы-светимости, получив значения, напоминающие измерения для окрестностей Солнечной системы.

Скрытая масса в галактиках

- В работе, опубликованной в 1930 году, Кнут Лундмарк сделал оценки отношения $M-L$ для пяти галактик по похожей методике.
- Первый результат дал невероятный результат: от 100 для M81 и до 6 для M33 – значительно больше, чем окрестности Солнца.
- Позднее расчёты были исправлены на возможное поглощение света в межгалактической и межзвёздной среде, получив для всех галактик значения $M/L \sim 6-7$
- Астрономы уже в то время открыли возможность того, что большое количество темной материи может присутствовать в Галактиках в форме «потухших звезд, темных облаков, метеоров, комет и т. д.», как пишет Лундмарк в 1930 году.

Скорость вращения — индикатор
полной массы галактики в
пределах данного радиуса.

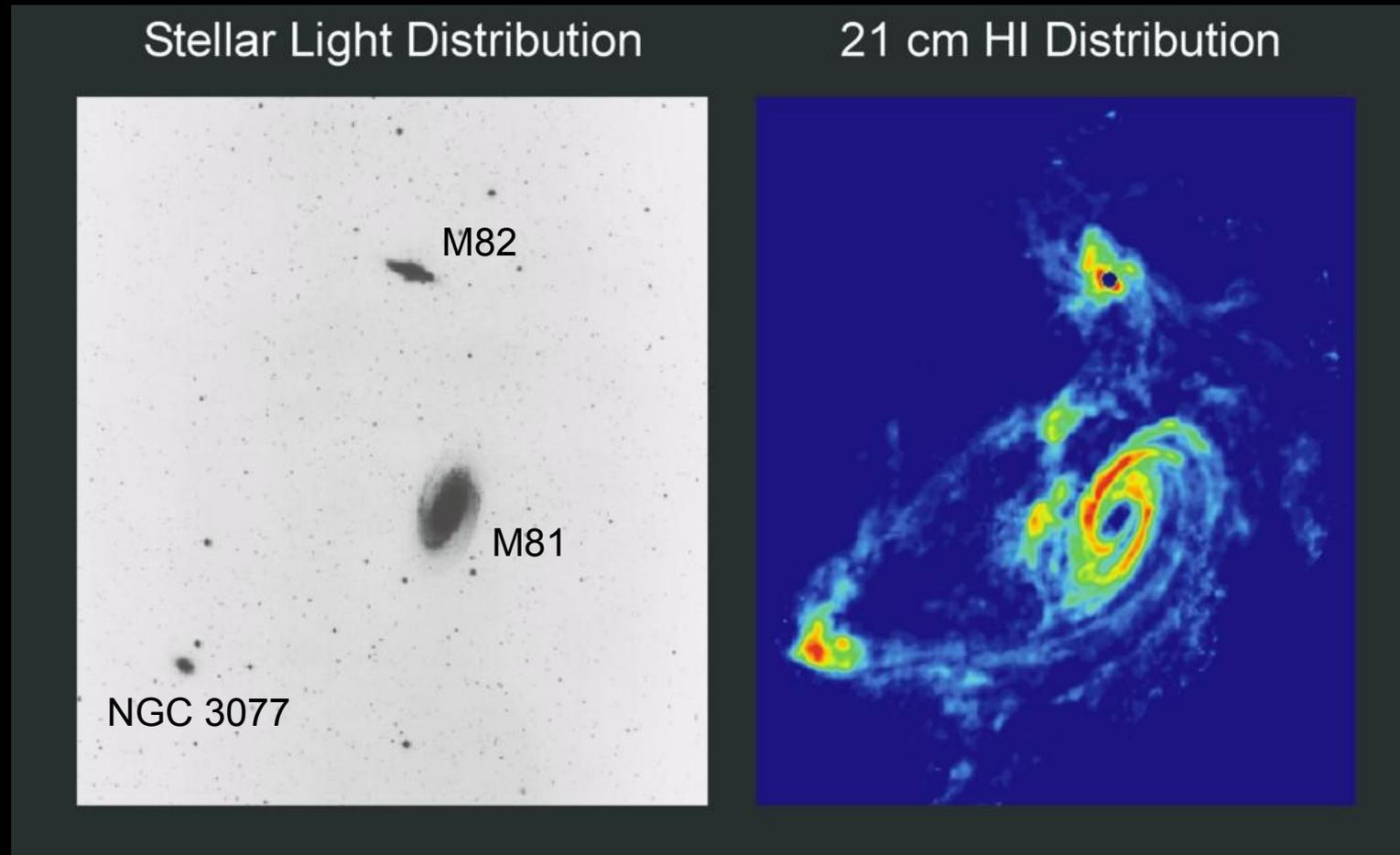
Светимость галактики — индикатор
массы видимых компонент (звезды
+газ)



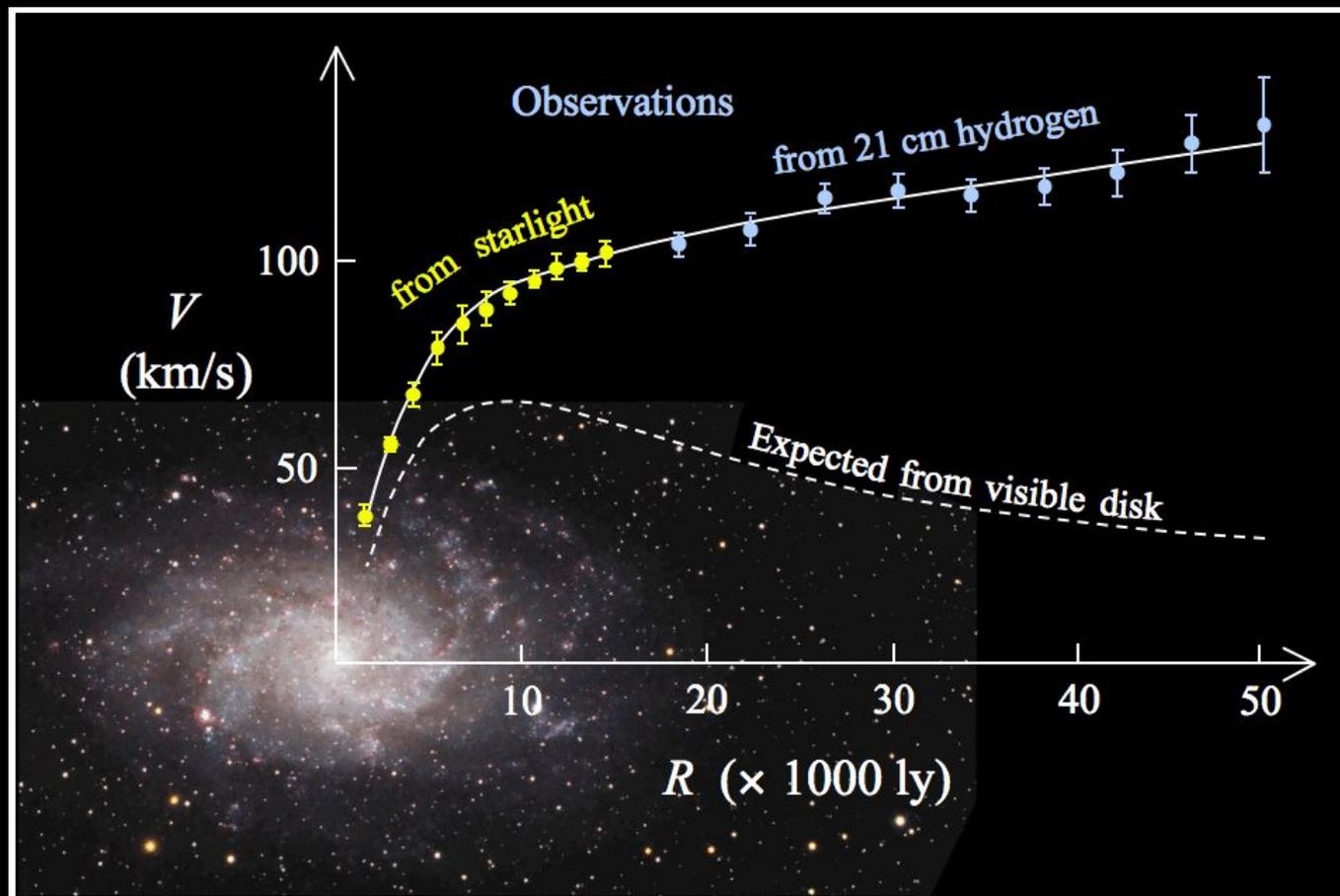
Наблюдение в линии 21 см

- После окончания 2-ой мировой войны военные радиолокаторы стали использоваться для радиоастрономических наблюдений и приоритет в исследованиях взяли голландские учёные.
- 7.5-метровые параболические радары, используемые для слежения за самолетами на длинах волн 54 см и оставленные немцами после поражения на оккупированных до этого землях Голландии, были использованы Яном Оортом в радиоастрономии.
- Он перестроил радары для наблюдений на линии 21 см, в которой мог светить газ за пределами галактик по предсказаниям ученика Оорта – Хендрика ван де Хюлста.
- В 1951 году учёные из Гарварда обнаружили линию 21 см. Ван де Хюлст посещал Гарвард, как и Ф. Дж. Керр из лаборатории радиофизики в Сиднее.
- Голландские и австралийские группы вскоре смогли подтвердить обнаружение учёных США. Доклады американских и голландских групп появились в одном выпуске журнала Nature вместе с подтверждающей телеграммой от австралийской группы.
- Этот успех стимулировал развитие радиоастрономии и оказал очень сильное влияние на астрофизику и космологию.

Приливное взаимодействие в группе галактик M81



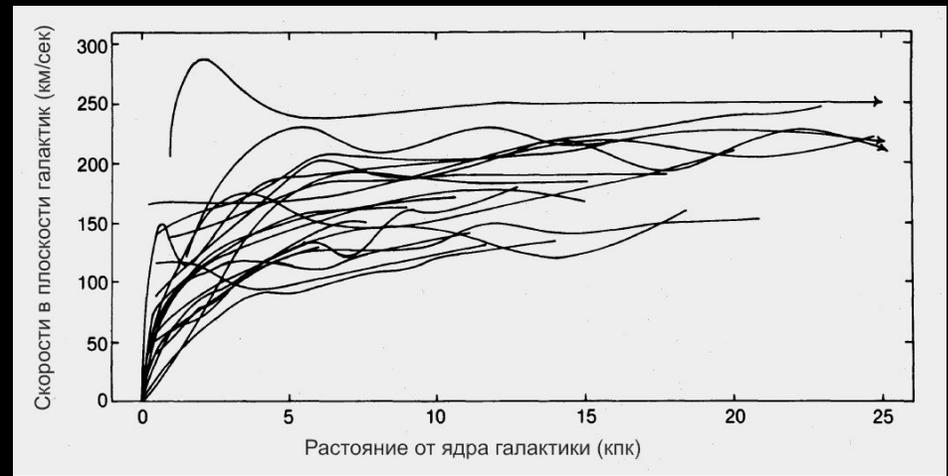
Совместные наблюдения МЗЗ оптика + радио (21 см)



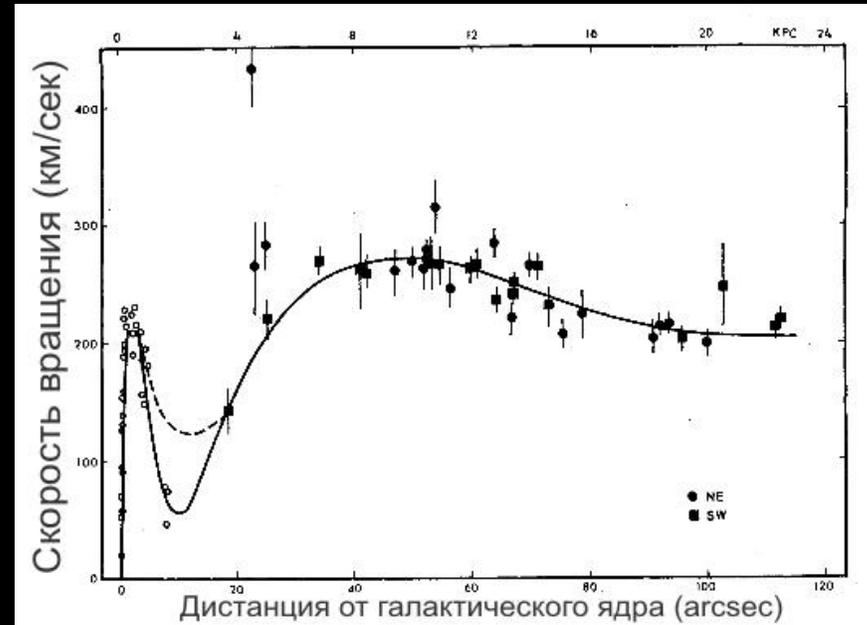




Вера Рубин (1983):
«Неизбежен вывод о том, что вещество в галактиках не так сильно концентрируются к центру, как яркость. Поэтому по распределению яркости в галактиках нельзя судить о распределении массы в них.»

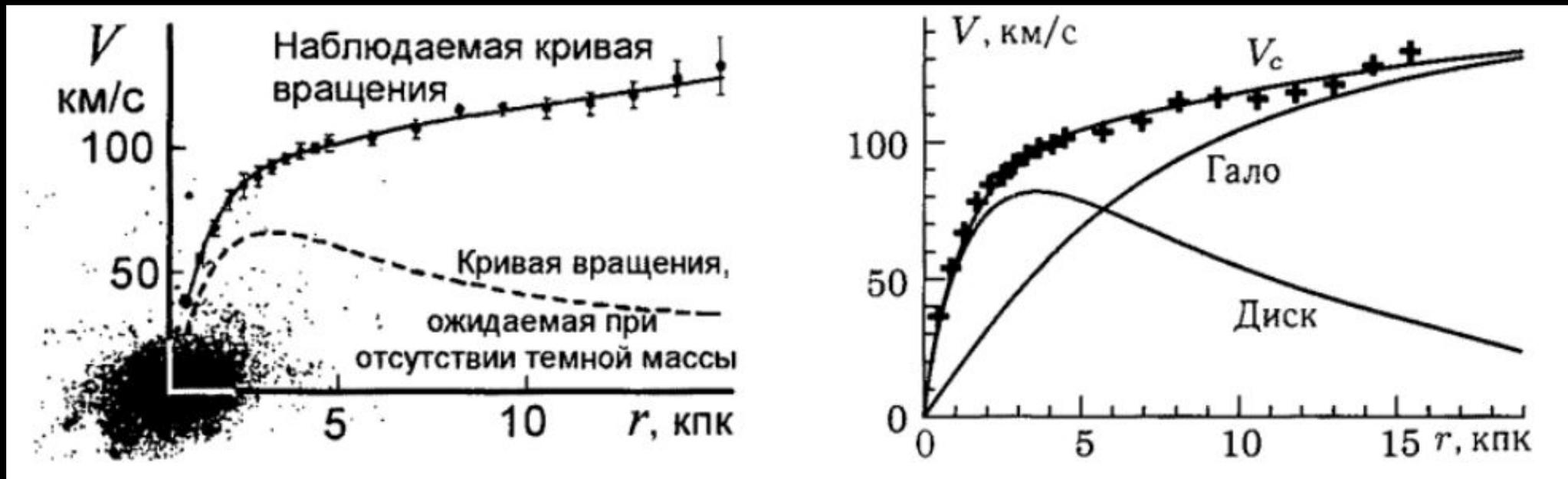


Набор 21 кривой вращения галактик типа Sc (Vera Rubin, «Astrophysical Journal», 1980)



Кривая вращения Галактики Андромеды. Видно, что кривая вращения становится плоской на угловом расстоянии около 100 угловых минут от ядра галактики

Кривые вращения галактического газа с ростом



Кривая вращения М33. Показано также изображение галактики, видимый диск которой простирает до ~ 7 кпк.

Результаты декомпозиции кривой вращения М33 в модели максимального диска. Круговая скорость V_c определяется вкладом от диска и гало.

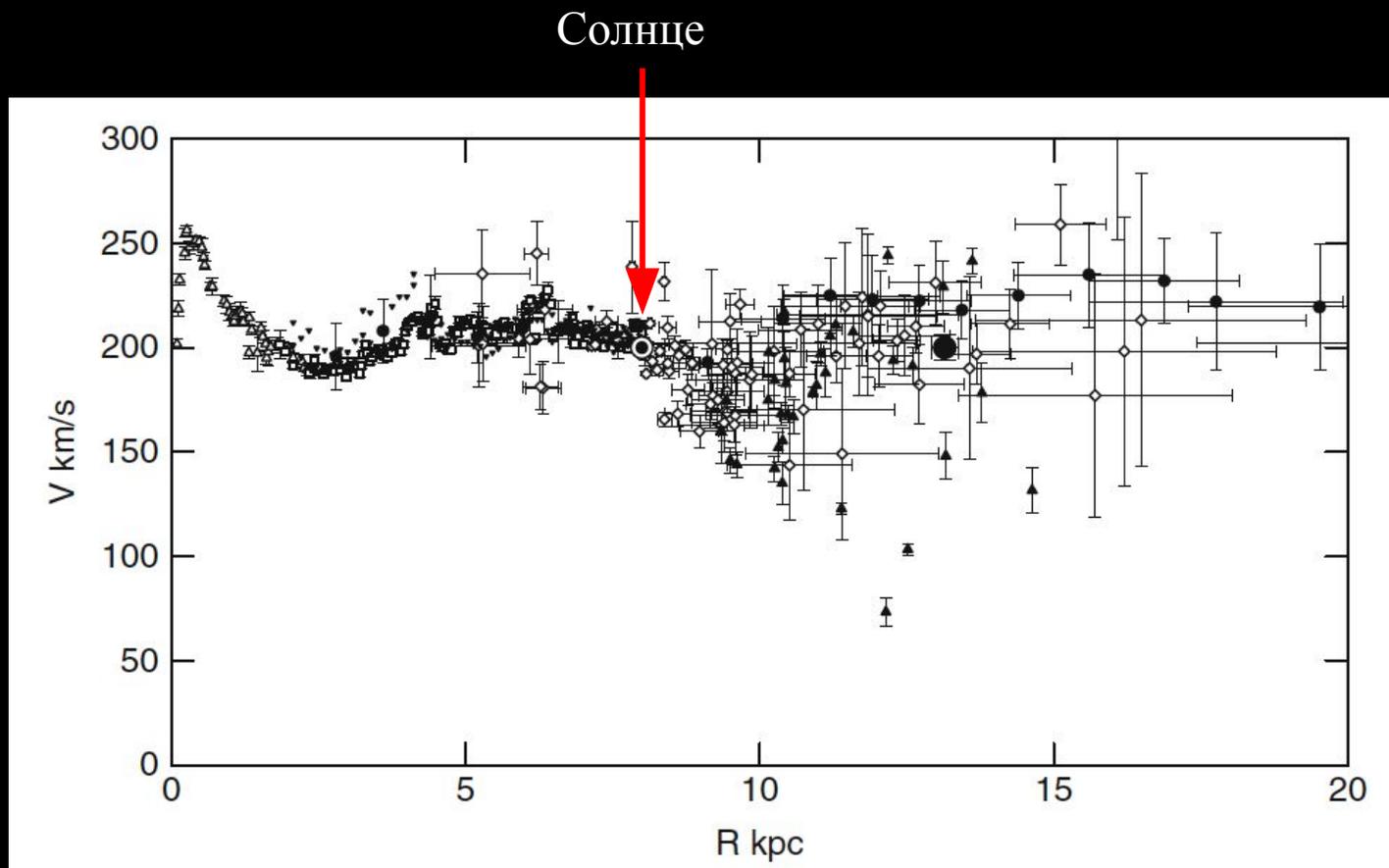
В пределах оптического радиуса на долю ТМ приходится 35% суммарной массы.

В сфере радиусом 20 кпк гало абсолютно доминирует: на его долю приходится 92% всей массы.

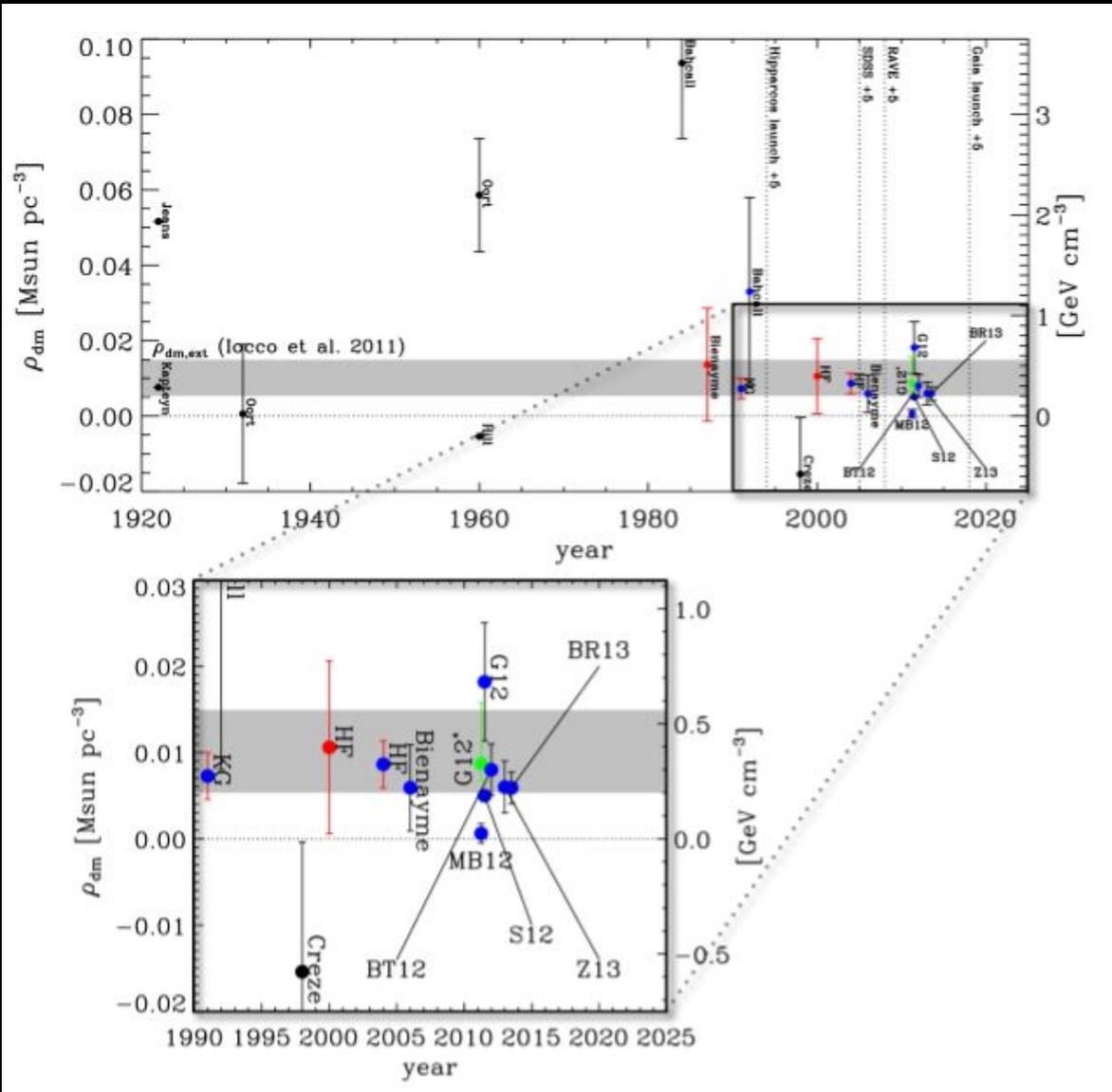
Максимум скоростей достигается на периферии звёздного диска или далеко за ним.

Шкала гало значительно больше экспоненциальной шкалы диска: $L_\sigma = 1.7$ кпк, $a = 6$ кпк.

Кривая вращения Млечного пути



Измерение локальной плотности ТМ

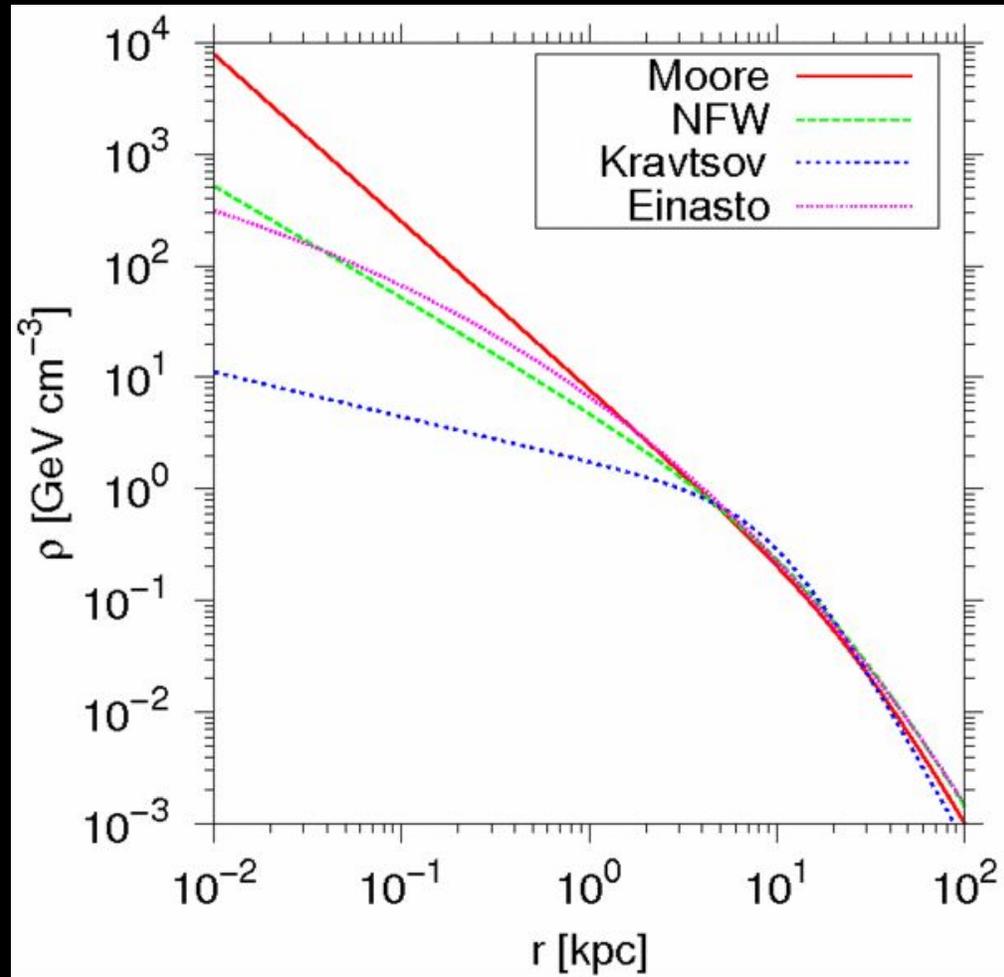


Данные о средней плотности скрытого вещества в галактике, полученные на основе:

- наблюдения близких звёзд
- кривой вращения Галактики

Результат сильно зависит от гипотезы о распределении ТМ в гало.

Радиальные профили гало тёмной материи



В каких галактиках темной материи больше всего?

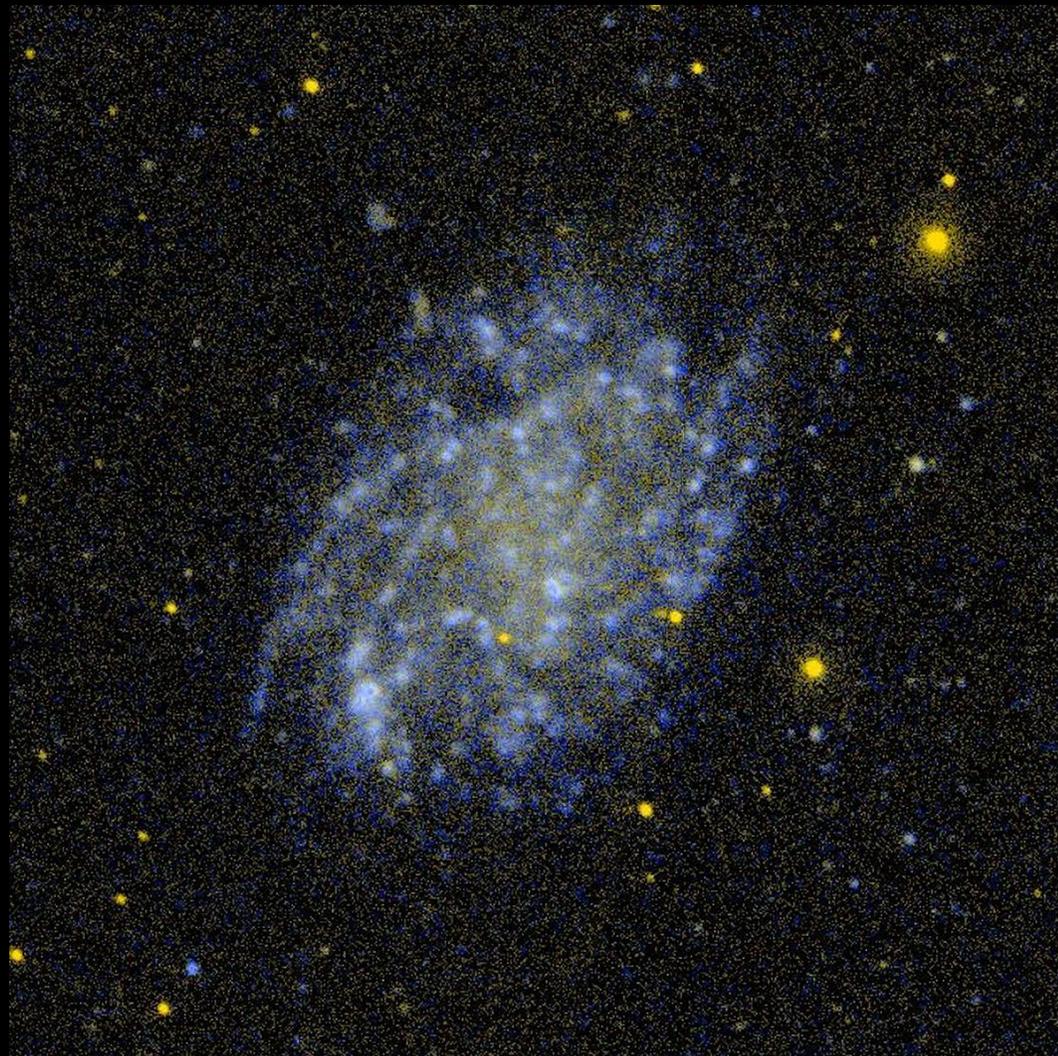
- 1. Карликовые галактики
- 2. Галактики низкой поверхностной яркости (LSB)
- 3. Галактики-призраки

Карликовая Галактика

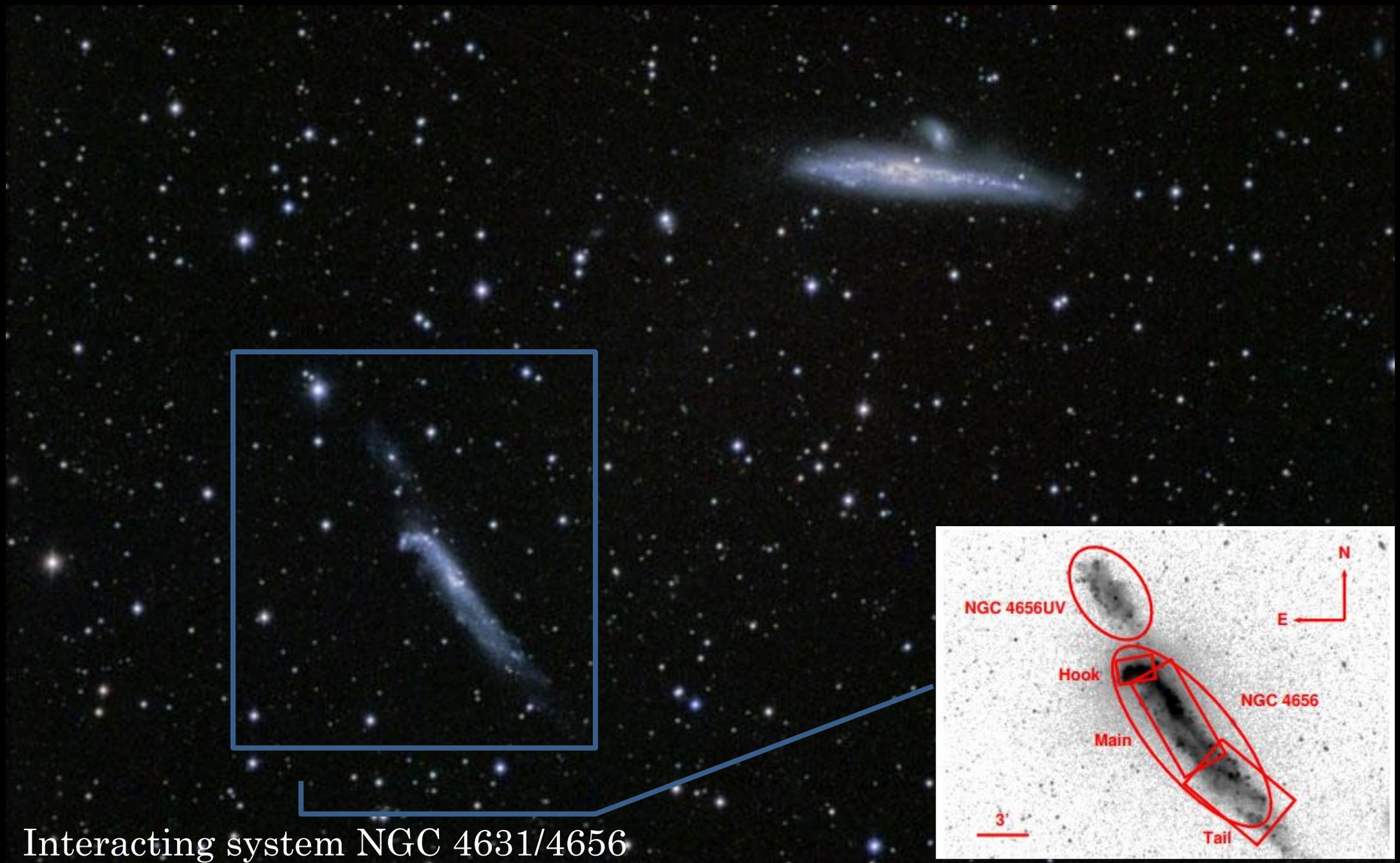


PGC 6830 (Very Large Telescope)

Галактика низкой поверхностной яркости



Изображение спиральной галактики NGC 45, полученное GALEX

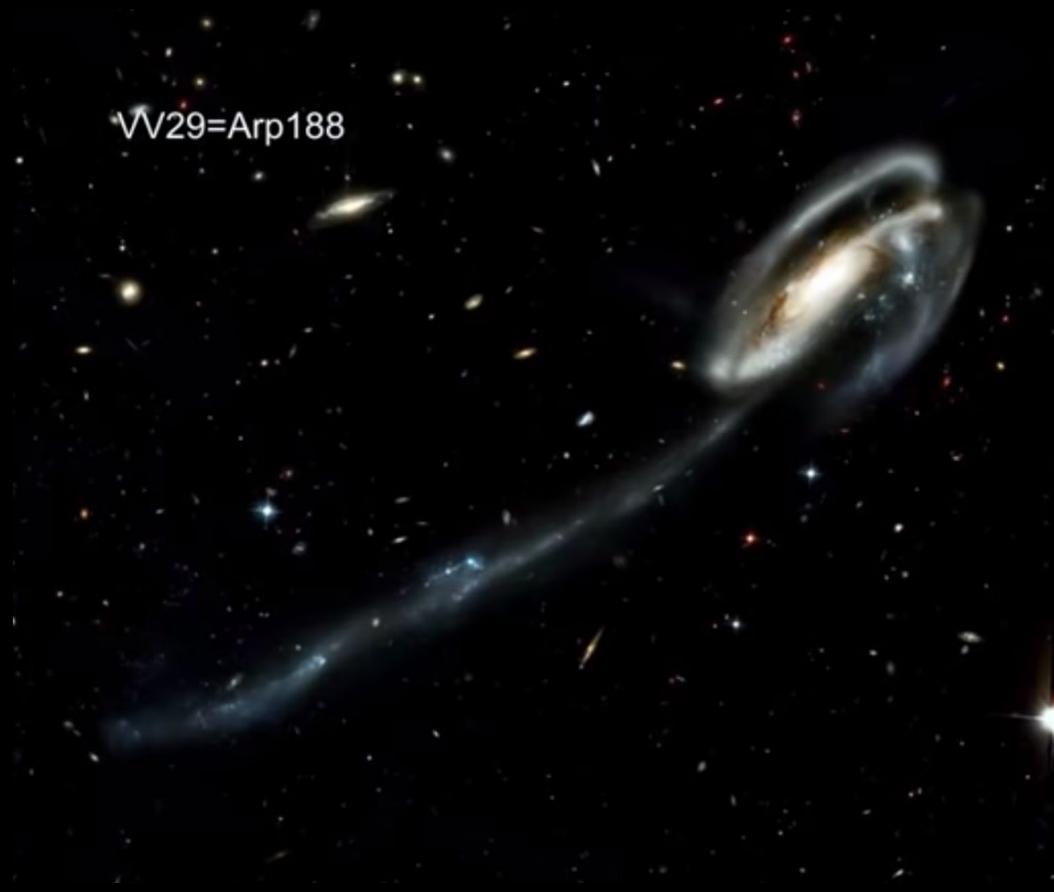


Interacting system NGC 4631/4656

Галактики-призраки



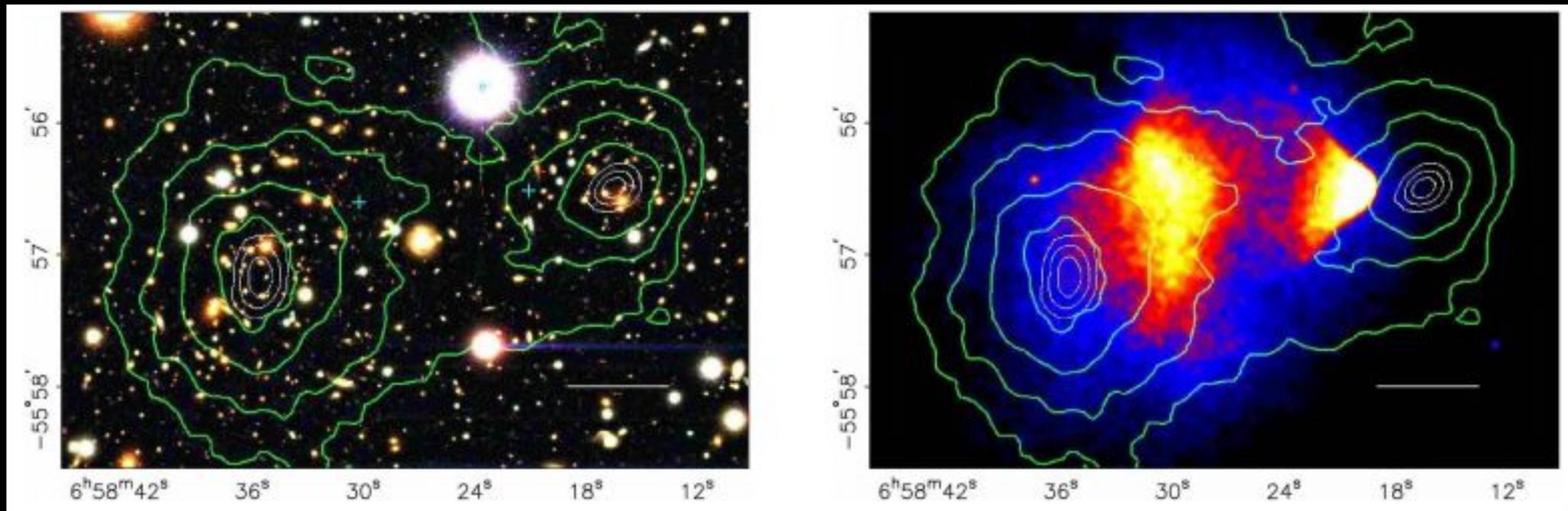
Галактики-призраки



Причины возникновения таких галактик

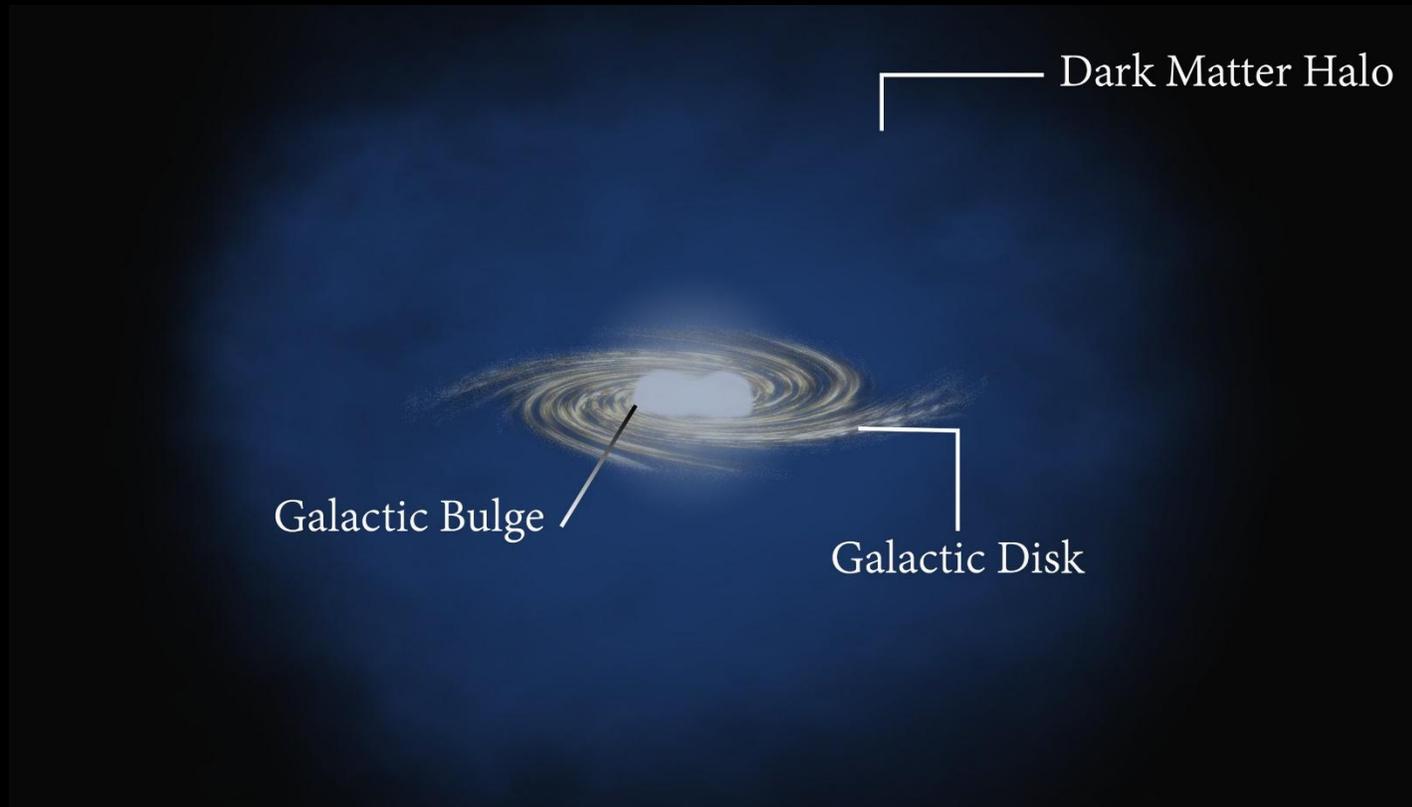
- Отсутствие барионного вещества в области формирования галактик из тёмной материи.
- Доминирование тёмной материи, не позволившее создать неоднородности барионного вещества внутри галактик для формирования звёзд.
- Потеря барионного вещества вследствие каких-то процессов, например, столкновения галактик.

Скопление Пуля



Современная космологическая модель галактики — тёмное гало

По мере накопления наблюдательного материала стало ясно, что результат столкновения галактик и их сегодняшний внешний вид сильно зависят от внутренних свойств — массы, светимости, типов населяющих галактику звезд, количества газа и пыли.



Задача

К каким кривым вращения приводят профили

- Наварро-Фрэнка-Уайта

$$\rho(R) \propto \frac{1}{(R + r_s)^2}$$

- Бюркерт

$$\rho(R) \propto \frac{1}{(R^2 + r_0^2)(R + r_0)}$$

Какой из них воспроизводит плоскую кривую вращения?

Решение

$$v(R) = \sqrt{\frac{GM(R)}{R}}$$

$$M(R) = 4\pi \int_0^R \rho(r)r^2 dr \propto \int_0^{\frac{R}{r_s}} \frac{x dx}{(1+x)^2} = \ln\left(1 + \frac{R}{r_s}\right) - \frac{R}{R+r_s}$$

$$v(R) \propto \sqrt{\frac{\ln\left(1 + \frac{R}{r_s}\right)}{R} - \frac{1}{R+r_s}}$$

$$v(R) \propto \sqrt{\frac{1}{R} \ln \left[\left(1 + \left(\frac{R}{r_0}\right)^2\right) \left(1 + \frac{R}{r_0}\right)^2 \right] - \frac{2 \operatorname{arctg} \left(\frac{R}{r_0}\right)}{R}}$$