

Д.В. Фурсаев
Университет «Дубна»

Что мы знаем (и не знаем) о Вселенной

Наблюдения за Вселенной

Оптические телескопы

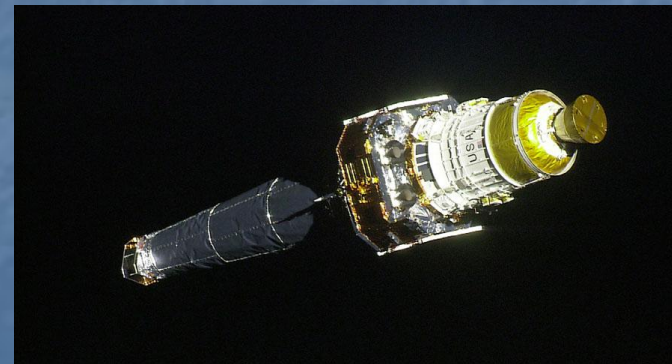
Радиотелескопы

Рентгеновские телескопы

Гамма-спектрометры

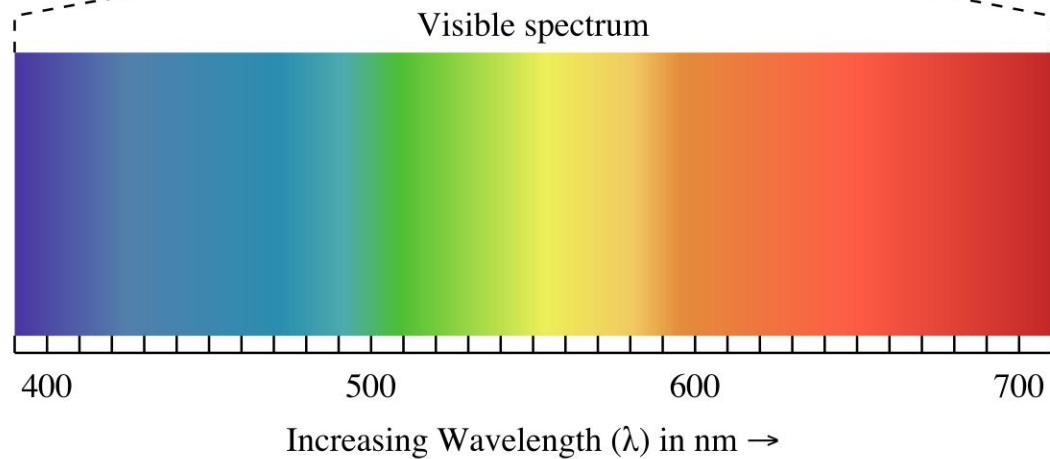
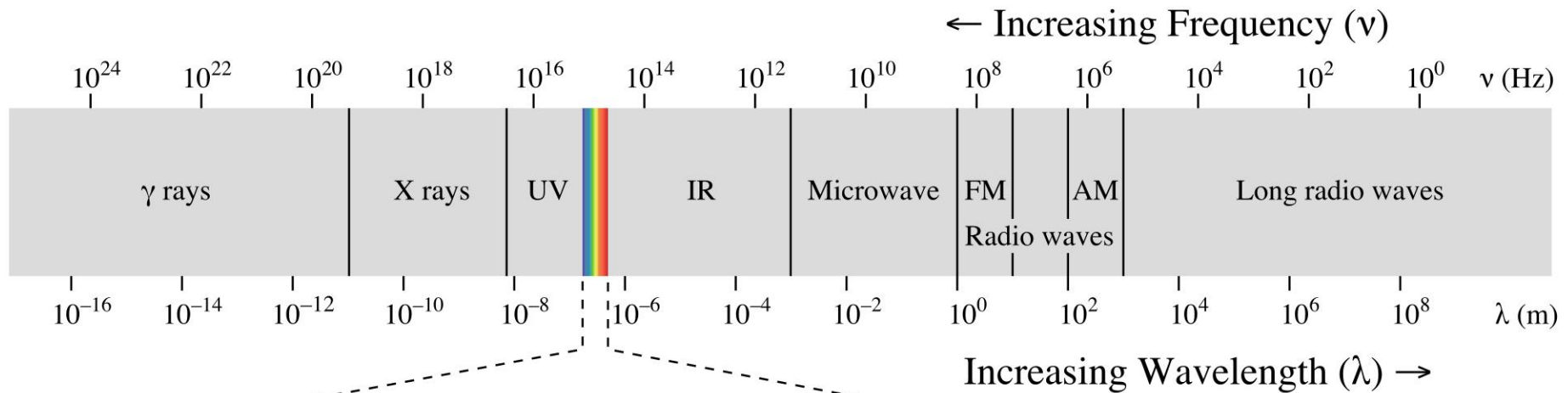


Hubble telescope



Chandra telescope

Электромагнитный спектр



Диапазоны электромагнитного излучения

Название диапазона	Длины волн, λ	Частоты, ν	Источники
Радиоволны	От более 10 км-до 10 м — 1 мм	менее 30 кГц- 30 МГц — 300 ГГц	Атмосферные и <u>магнитосферные</u> явления. Радиосвязь.
Инфракрасное излучение	1 мм — 780 нм	300 ГГц — 429 ТГц	Излучение молекул и атомов при тепловых и электрических воздействиях.
Видимое (оптическое) излучение	780—380 нм	429 ТГц — 750 ТГц	
Ультрафиолетовое	380 — 10 нм	$7,5 \cdot 10^{14}$ Гц — $3 \cdot 10^{16}$ Гц	Солнечные лучи
Рентгеновские	10 нм — 5 пм	$3 \cdot 10^{16}$ — $6 \cdot 10^{19}$ Гц	Синхротронное излучение (релятивистских заряженных частиц в ускорителях)
Гамма	менее 5 пм	более $6 \cdot 10^{19}$ Гц	Ядерные и космические процессы, радиоактивный распад.

Обсерватория Джемини (Gemini)



Обсерватория Джемини - является примером самого крупного оптического прибора. Это два телескопа-близнеца диаметром 8 метров. Телескопы расположенные в высоко в горах Чили (южная полусфера Земли) и на Гавайях (северная полусфера).

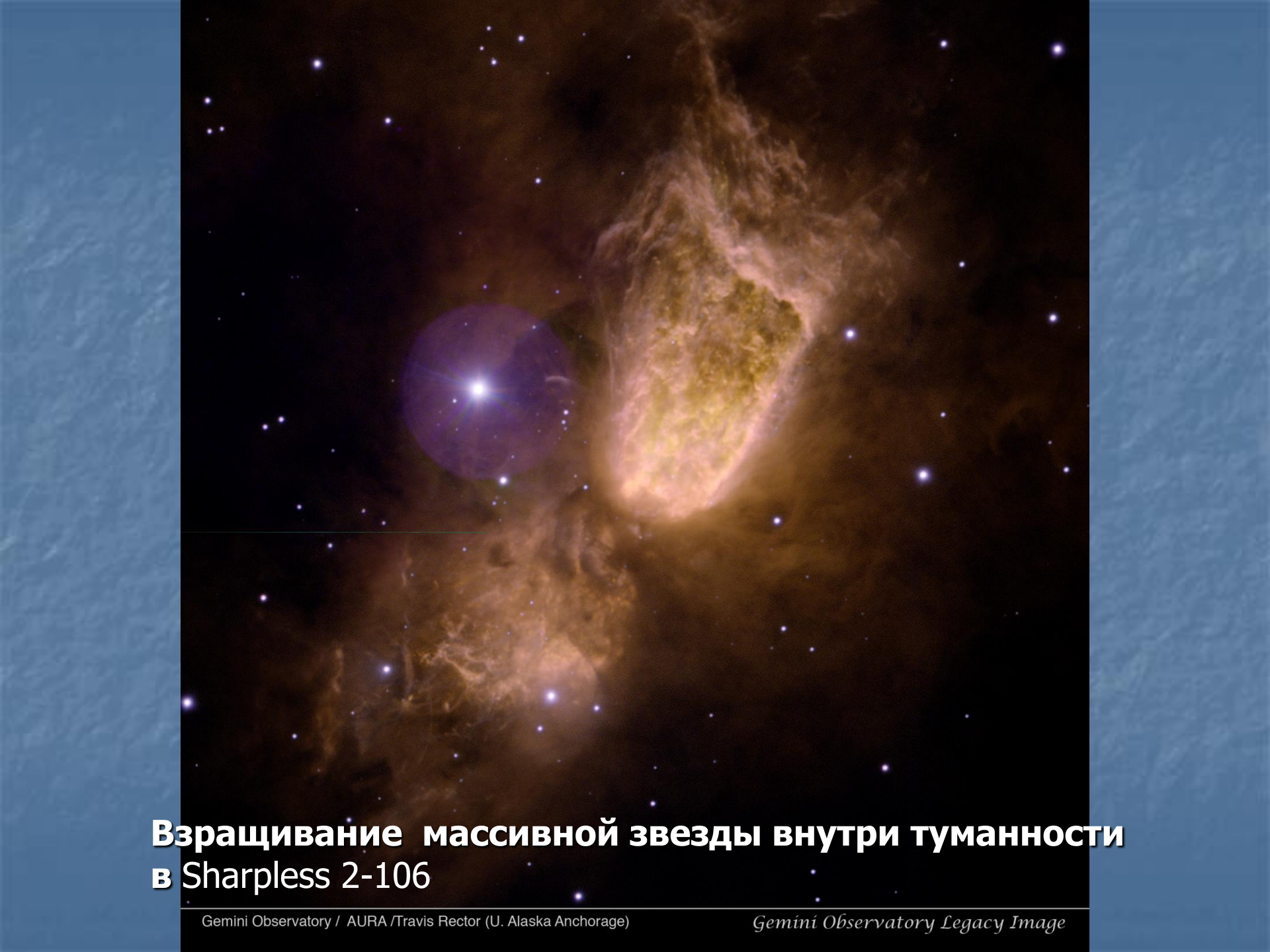
Несколько снимков , сделанных Джемини...



Gemini Observatory/ AURA / Julia I. Arias and Rodolfo H. Barbá Departamento de Física/ Universidad de La Serena (Chile)/ ICATE-CONICET (Argentina)

Gemini Observatory Legacy Image

Туманность в галактике M8 Lagoon

The image shows a large, glowing nebula with a complex, filamentary structure. A bright, white star is visible within the nebula, surrounded by a dense, yellowish-green cloud of gas and dust. The background is dark, with several other stars visible. The image is framed by a blue border.

**Вращивание массивной звезды внутри туманности
в Sharpless 2-106**

Танцующие галактики NGC 6872 & IC 4970

(через 5 млрд. лет может произойти столкновение Млечного Пути и Туманности Андромеды)

Оптический телескоп Хаббл (запущен в 1990 г.)



Несколько снимков , сделанных Хабблом...



Марс

Несколько снимков , сделанных Хабблом...



Сатурн

Несколько снимков , сделанных Хабблом...



Gas Pillars in the Eagle Nebula (M16)

Несколько снимков , сделанных Хабблом...



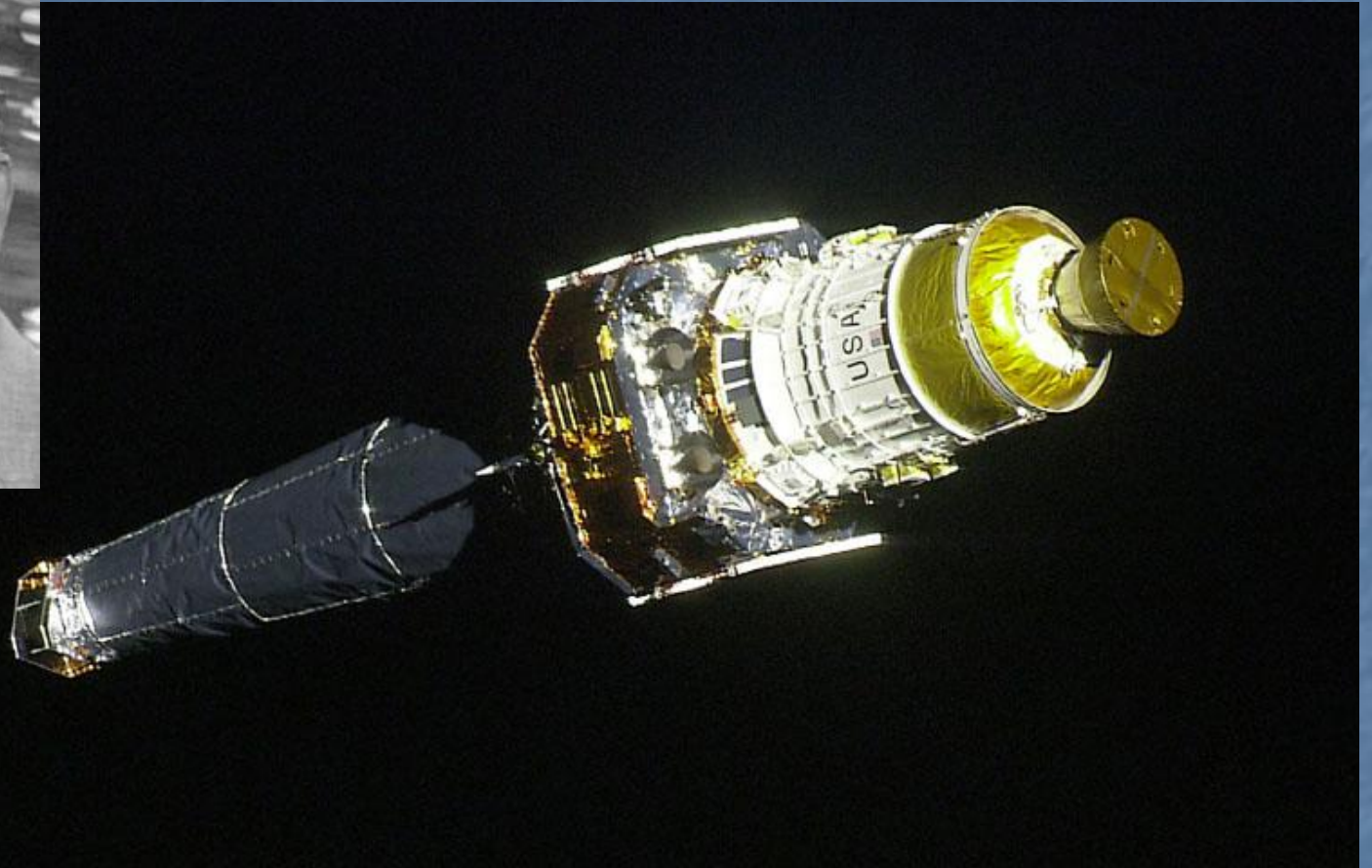
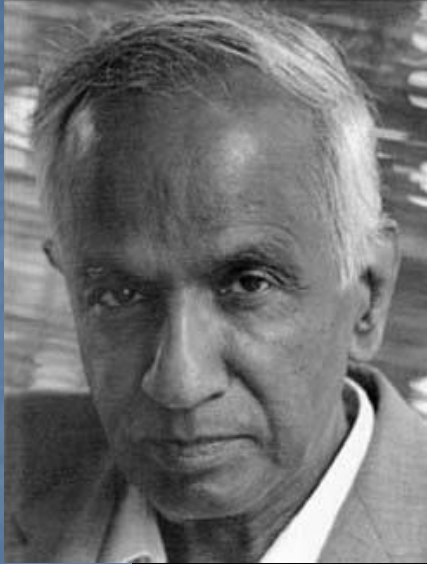
Star Cluster NGC 2074 in the Large Magellanic Cloud

Несколько снимков , сделанных Хабблом...

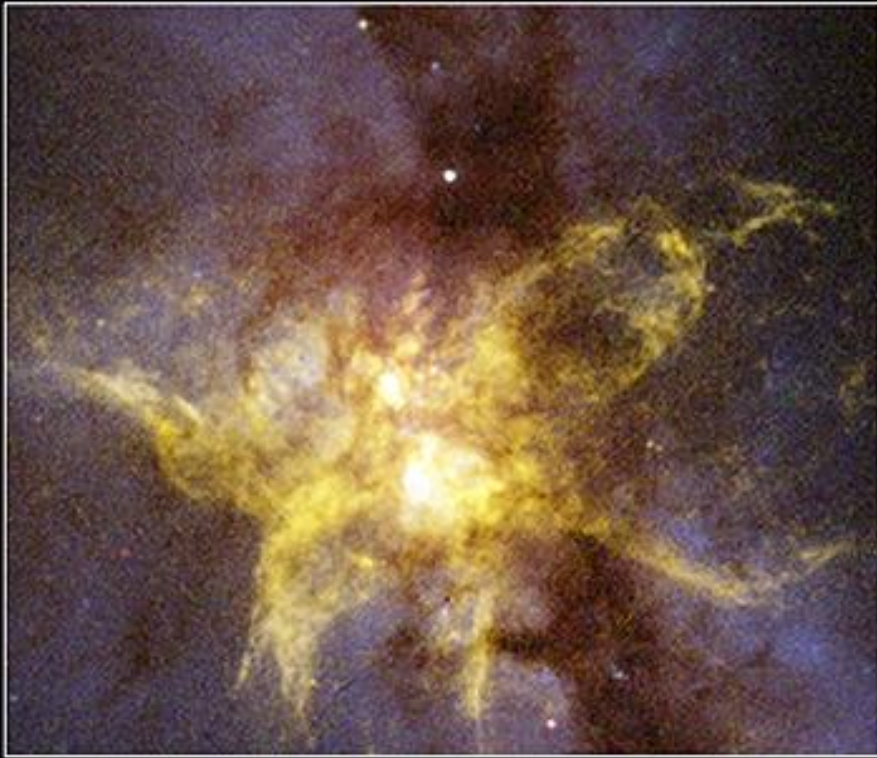


Spiral Galaxy in the Hubble Ultra Deep Field

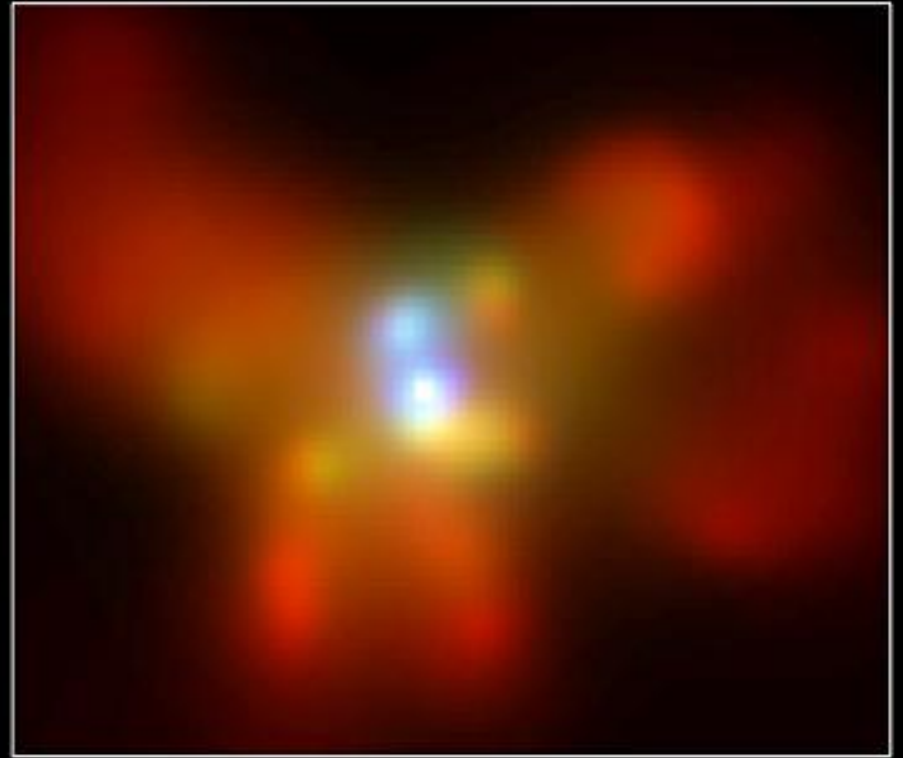
Рентгеновский телескоп "Chandra"



Выведен на орбиту командой Space Shuttle
Columbia 23 июля, 1999 г.
(назван в честь С. Чандрасекара (1910-1995))



HUBBLE OPTICAL



CHANDRA X-RAY

Сверхмассивная черная дыра в центре галактики NGC 6240

<http://www.gemini.edu/>

<http://hubblesite.org/>

Что мы знаем о нашей Галактике (Млечный Путь)?



- диаметр – 120 000 свет. лет
 - толщина - 6 500 свет. лет
- (световой год – около 10 000 млрд. км)

Другие факты

- Количество звезд – 100 млрд.
- Расстояние от Земли до Солнца – 8,31 св. минуты или около 150 млн. км
- Ближайшая к Земле звезда (помимо Солнца) – Альфа Центавра (4,3 свет. года)
- Ближайшая к Земле черная дыра (1600 свет. лет)
- Расстояние от Земли до центра Галактики (30 000 свет. лет)

Quiz

Вопрос:

**Сколько времени потребуется ракете, чтобы долететь от Земли до ближайшей звезды?
до центра нашей галактики?**

Пусть первую половину пути ракета летит с ускорением g (своб. падения), а вторую половину тормозится с тем же темпом.

Ответ:

**до центра Млечного пути – около 20 лет
до Альфа-Центавры – около 3 лет**

Что мы знаем о нашей Вселенной?

“Размер” видимой Вселенной 14 млрд свет. лет

Возраст Вселенной – 14 млрд. лет

Количество галактик – 100 млрд.

Среднее количество звезд в галактике -100 млрд.

Однородность на масштабах - 100 Мега (100 миллионов) парсек

1 парсек = 3,26 свет. лет

Ключевые факты

- Вселенная однородна и изотропна на масштабах 100 миллионов парсек, это масштаб в 1000 раз больше чем размер галактики
- Вселенная расширяется и расширяется с ускорением
- Вселенная наполнена реликтовым излучением (CMBR) с температурой 2.7 К

Вселенная Фридмана

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi G T_{\mu\nu} \quad \text{-Уравнения Эйнштейна}$$

G - постоянная Ньютона

$T_{\mu\nu}$ -ТЭИ вещества

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t)dl^2 \quad \text{-метрика}$$

$$dl^2 = \frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2(\sin^2\theta d\varphi^2 + d\theta^2) \quad \text{-пространственная часть}$$

$k = 0$ -плоскость

$k = 1$ -3-сфера

$k = -1$ -Пространство Лобачевского

Уравнения Фрийдмана (1922-1924)

$$H^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

- Одно из ур. Эйнштейна

$$H = \frac{\dot{a}}{a}$$

- Параметр Хаббла

ρ

- плотность энергии

p

- давление

$$p = w\rho$$

- уравнение состояния

$$\dot{\rho} + 3(p + \rho)H = 0$$

- "закон сохранения"

$$w = 0 \quad a(t) \sim t^{2/3}$$

- для пылевидной вселенной

$$w = \frac{1}{3} \quad a(t) \sim t^{1/2}$$

- для вселенной с излучением

Большой Взрыв – первоначальная сингулярность

Параметр красного смещения – мера удаленности

- Все масштабы растут пропорционально масштабному фактору
- длина волны фотонов растет пропорционально масштабному фактору

$$z = \frac{\lambda_o}{\lambda_e} - 1 = \frac{a(t_o)}{a(t_e)} - 1 \quad \text{- Фактор красного смещения}$$

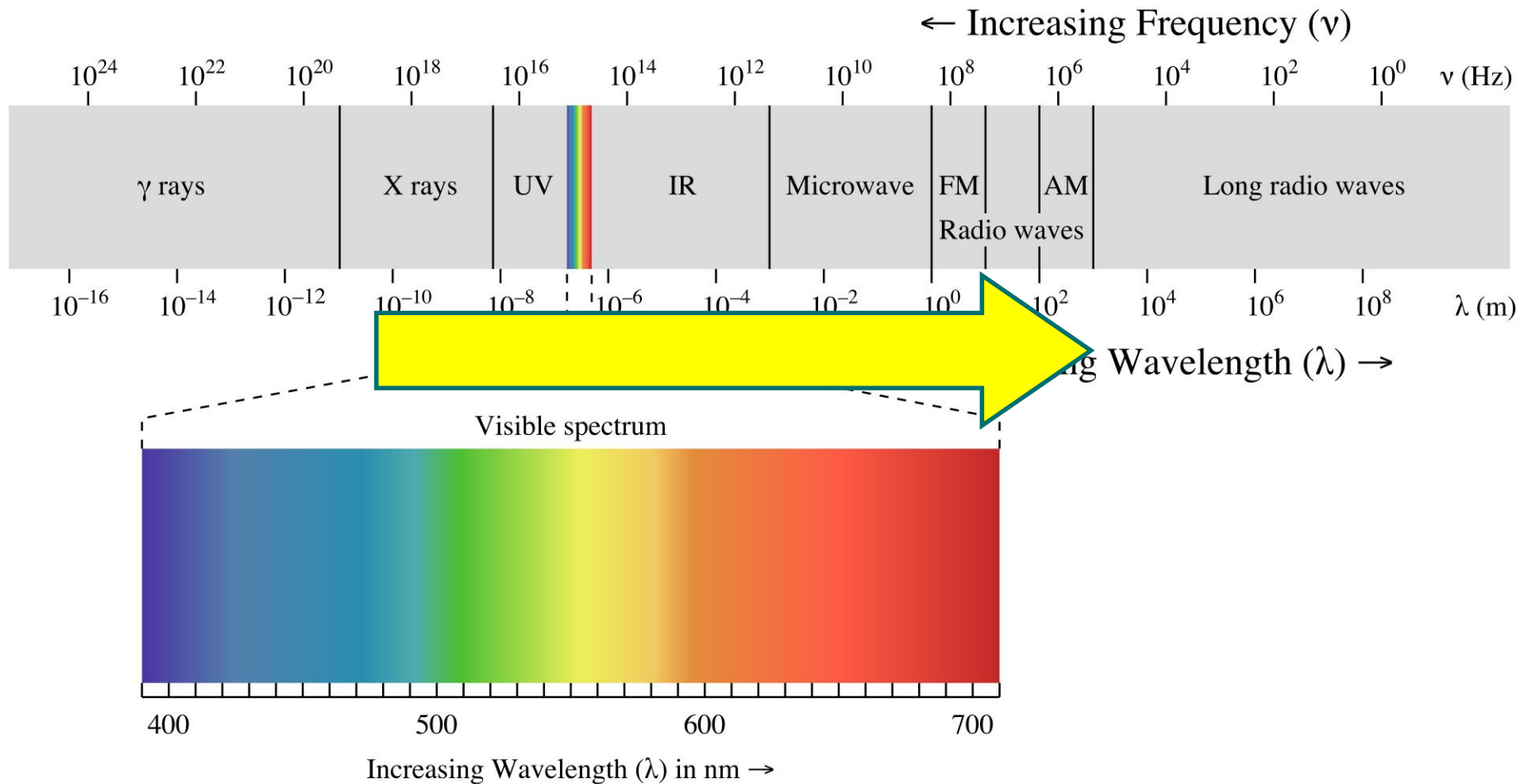
t_o момент наблюдения

t_e момент испускания

λ_o Длина волны в момент наблюдения

λ_e Длина волны в момент испускания

Направление сдвига спектральных линий при расширении



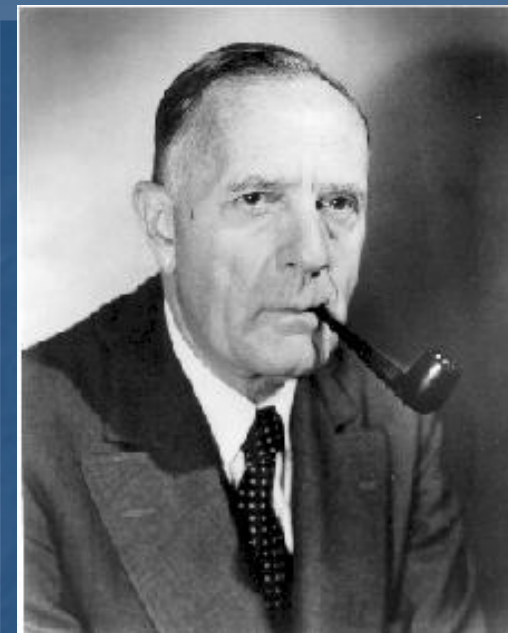
Закон Хаббла (1929 г.)

Галактики разбегаются друг от друга со скоростью

$$V = H R$$

$H = 71$ (км/с)/Мпк –
постоянная Хаббла

R – расстояние



**Эдвин Хаббл
(1889-1953)**

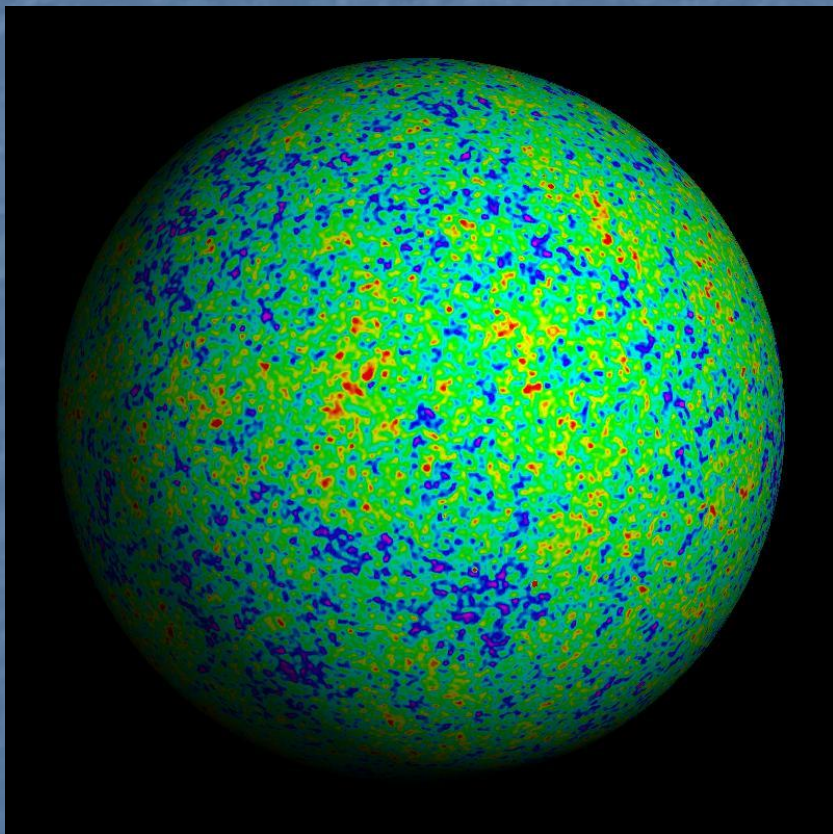
Закон справедлив для близких объектов с $z \ll 1$

Следствия

- Расширение Вселенной указывает, что когда-то она была очень плотной и горячей
- По мере остывания во Вселенной происходили фазовые переходы
- При температуре порядка 1000 градусов произошла рекомбинация ионизированной плазмы, вещество стало прозрачным для излучения (“реликтовые фотоны” CMBR)
- Температура реликтового фона падала по мере расширения (уменьшилась примерно в 1000 раз)

Микроволновой фон

(открыт Пензиасом и Вильсоном в 1965 г.)



Температура излучения
2,7 К

**Для физиков важны
неоднородности фона!**

«Фотоснимок» Вселенной в момент ее «молодости»
(когда ей было около 300 тысяч лет)

COBE - Нобелевская премия

3 октября 2006 г. по решению Шведской Королевской академии наук Нобелевская премия по физике за 2006 г. была присуждена совместно **Джону К. Мазеру** (John C. Mather) (Годдардовский центр космических полетов Национального агентства по авионавигации и исследованию космического пространства (NASA), Гринбелт, Мэриленд, США) и **Джорджу Ф. Смуту** (George F. Smoot) (Калифорнийский университет, Беркли, Калифорния, США) за *открытие ими чернотельной формы спектра и анизотропии космического микроволнового фонового излучения.*



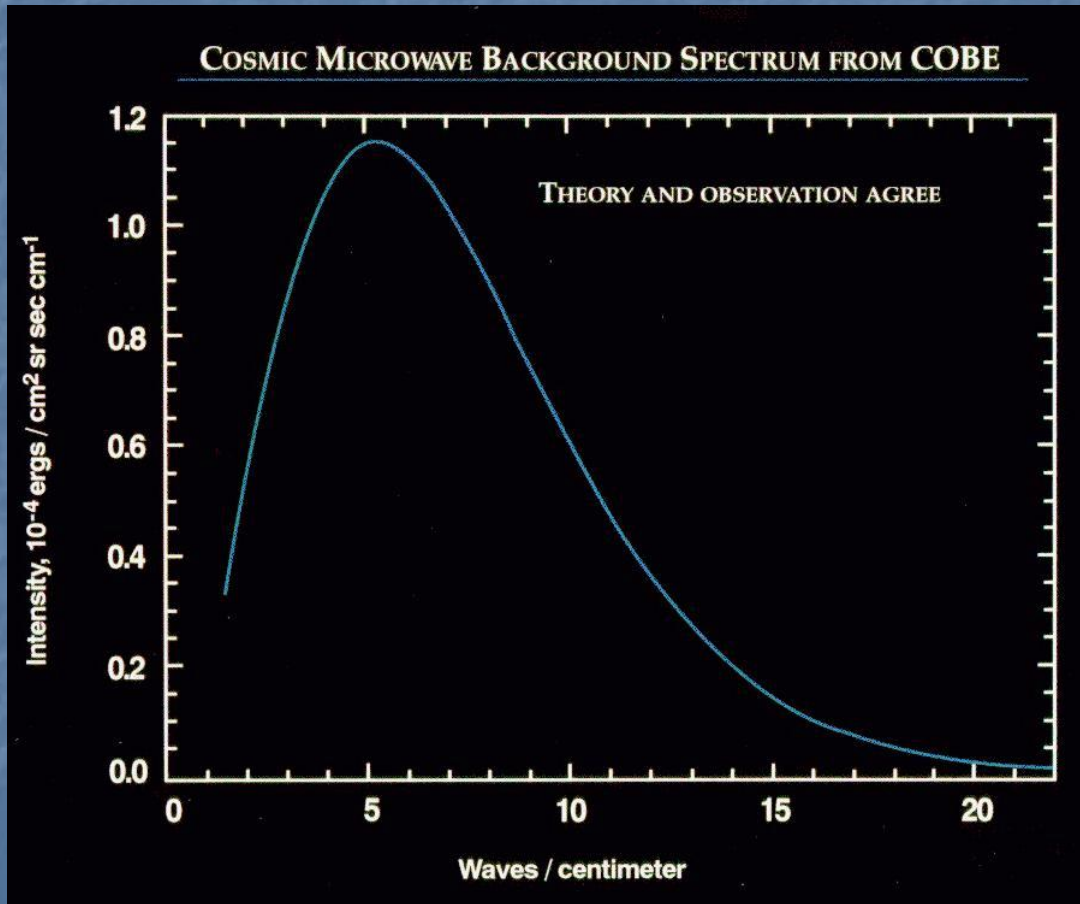
Джон К. Мазер



Джордж Ф. Смут

COBE-COsmic Background Explorer (1989)

Основной результат COBE

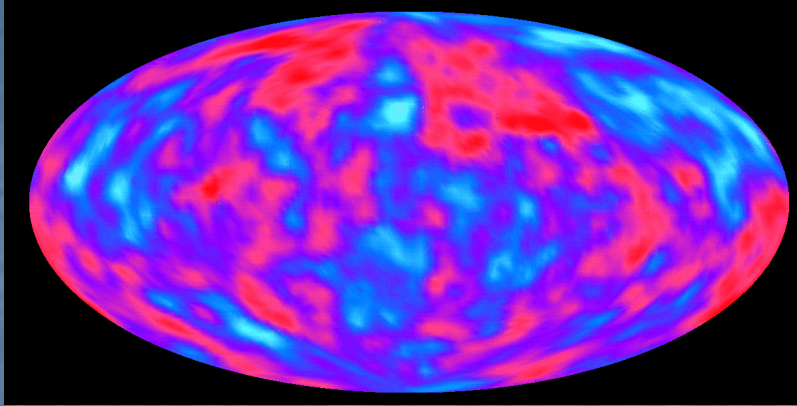


Спектр СМВР является планковским при температуре 2,7 К (радиодиапазон)

Важно, что температура является слегка неоднородной

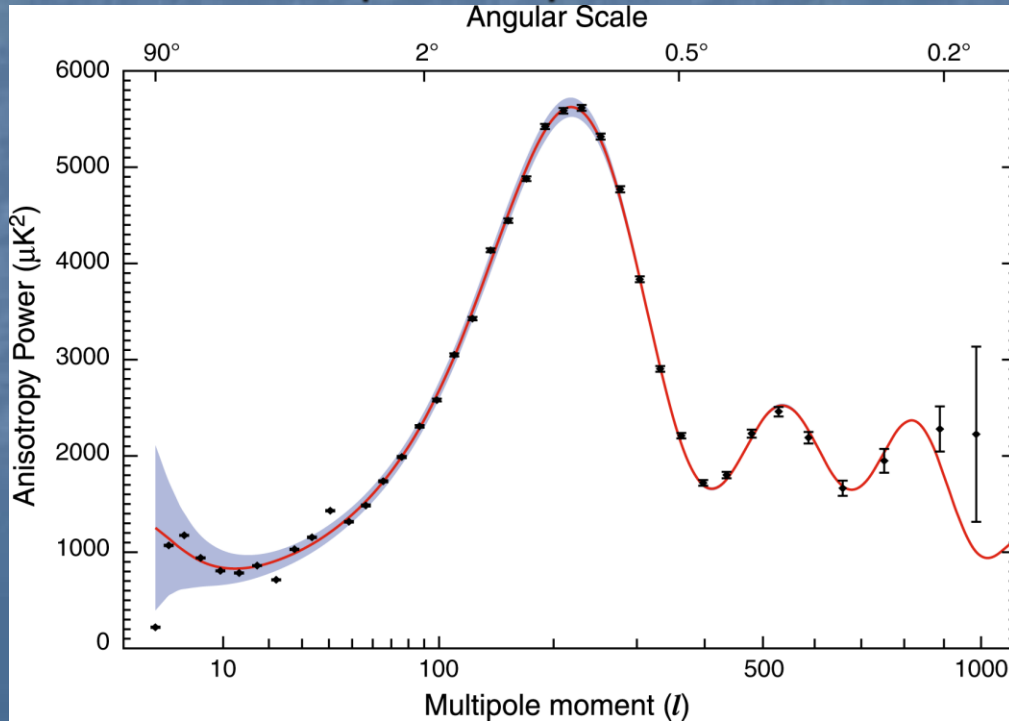
$$\frac{\delta T}{T} \sim 10^{-5}$$

Флуктуации температуры реликтового фона



Данные спутника
WMAP (2001)
Wilkinson Microwave
Anisotropy Probe

The power spectrum



Угловой размер типичной
неоднородности 1 градус
(эквивалентно $l=200$)

Анализ СМВР указывает на плоскую Вселенную ($k=0$)!

Это означает, что плотность вещества во Вселенной

$$\rho = \rho_{crit} = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

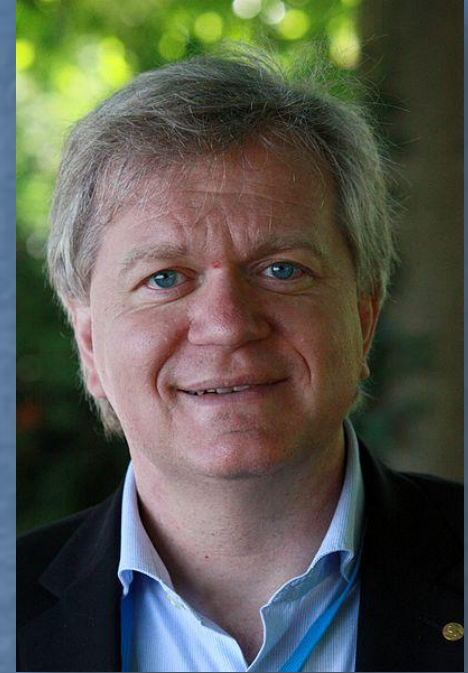
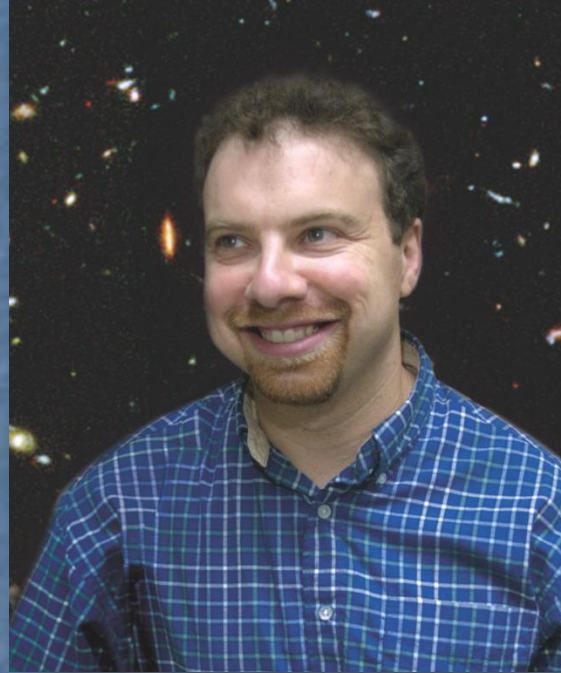
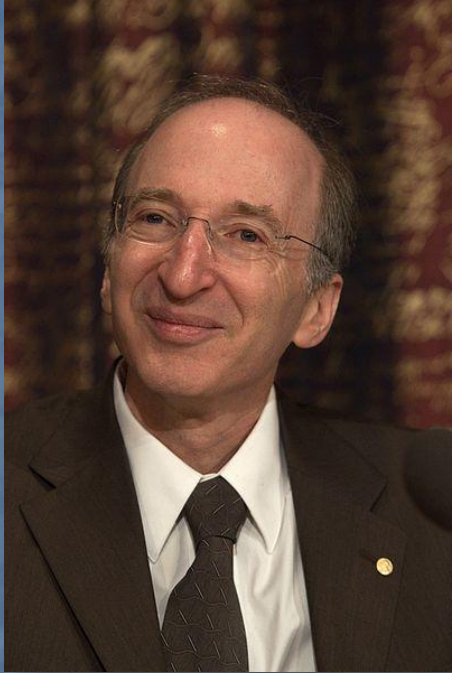
Зная параметр Хаббла, это дает следующую величину:

$$0.8 \cdot 10^{-25} \text{ г /куб. метр}$$

(масса протона $1.6 \cdot 10^{-24}$ г)

За пределами закона Хаббла

Нобелевская премия по физике за 2011 год



С. Перельмуттер,

А. Рис,

Б. Шмидт

«За открытие ускоренного расширения Вселенной»

Фотометрическое расстояние

$$D_L = \left(\frac{L}{4\pi F} \right)^{1/2}$$

L - светимость (энергия, испускаемая в единицу времени)

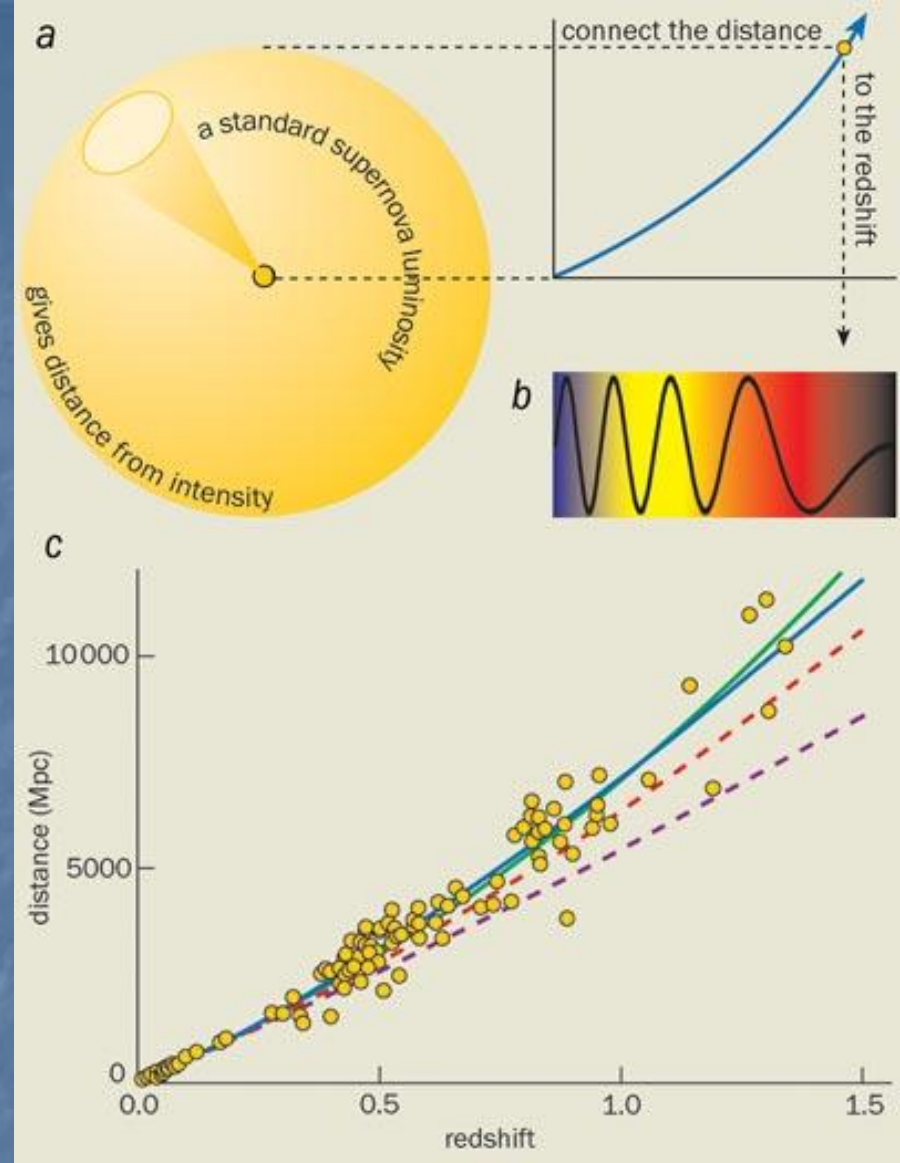
F - яркость (то, что измеряется в наблюдениях)

$$D_L(z) = (z + 1) \int_0^z \frac{dz'}{\tilde{H}(z')}$$

$$\tilde{H}(z) = H(t)$$

$$z = \frac{a(t_o)}{a(t)} - 1 \quad \text{Красное смещение}$$

Можно извлечь информацию о масштабном факторе, если известны светимости и фотометрические расстояния разных объектов



Quiz

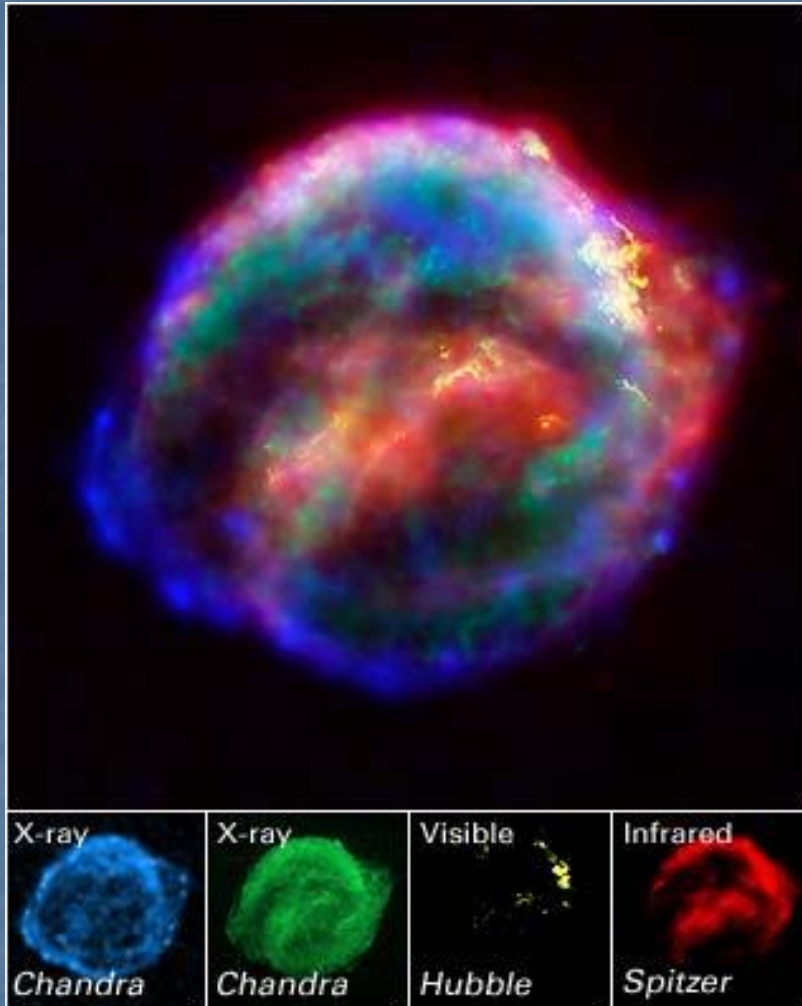
вопрос:

Фотометрическое расстояние каких объектов может быть измерено достоверно?

ответ:

В качестве "стандартных свечей" (объектов с известной светимостью) используются сверхновые

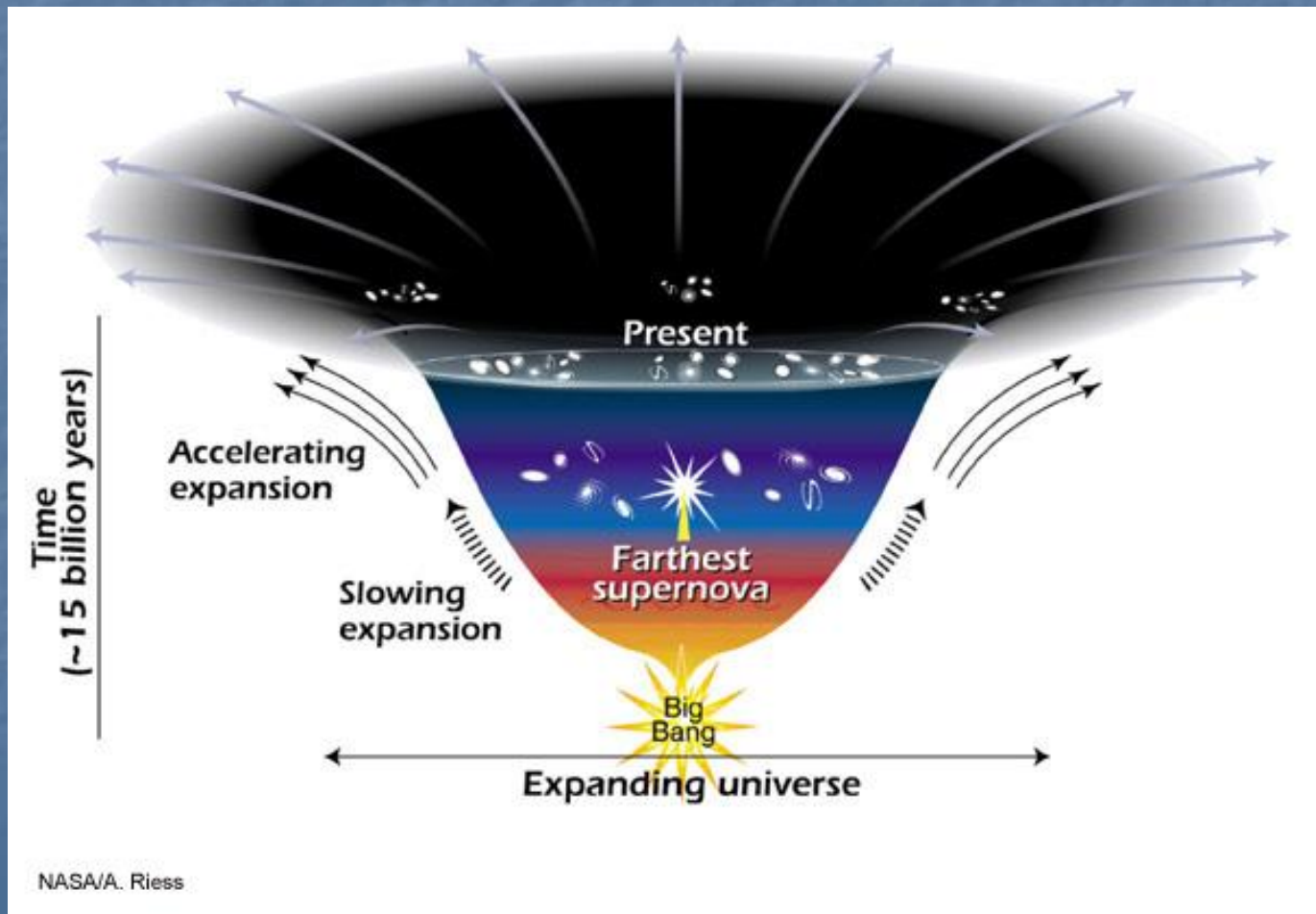
Взрывы сверхновых



красное смещение
 $z=1$ - для далеких
сверхновых

**Остатки от вспышки сверхновой в нашей галактике,
которую наблюдал Кеплер**

Вселенная расширяется с ускорением (антигравитация)



Ускорение = положительная вторая производная масштабного фактора

$$\ddot{a} > 0$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) = -\frac{4\pi G}{3}(1 + 3w)\rho$$

$$w < -\frac{1}{3}$$

Для определения высших производных необходима информация об удаленных объектах (для которых нарушается закон Хаббла)

Из чего состоит Вселенная?

$$\rho = \rho_{\Lambda} + \rho_M$$

ρ_{Λ} - Плотность загадочного вещества "темной энергии", обеспечивающего ускорение

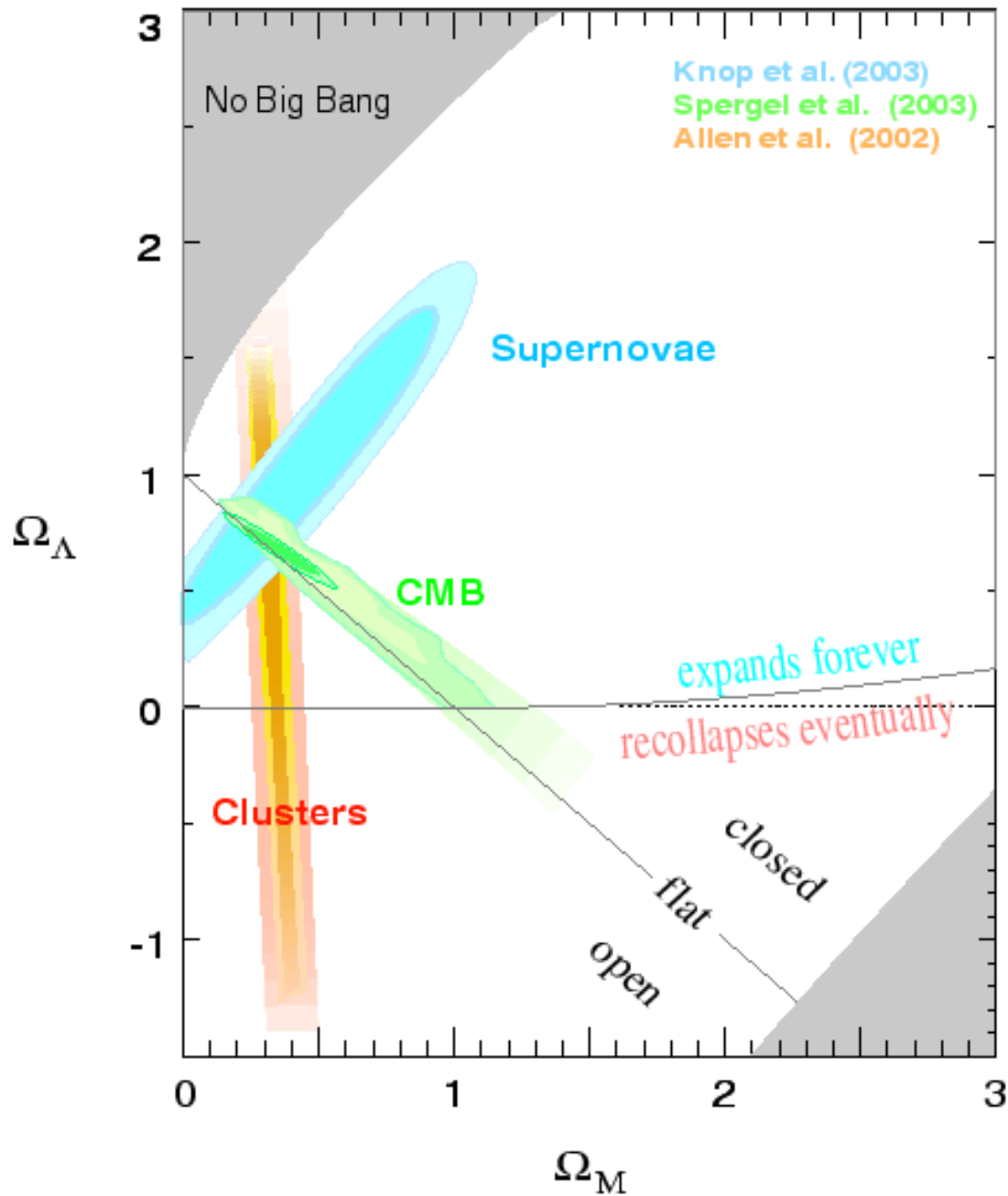
ρ_M - плотность материи с обычным уровнем состояния

$$\Omega_{\Lambda} = \frac{\rho_{\Lambda}}{\rho_{crit}} = \frac{\rho_{\Lambda}}{\rho} \quad \text{Каковы пропорции двух форм материи?}$$

$$\Omega_M = \frac{\rho_M}{\rho_{crit}} = \frac{\rho_M}{\rho}$$

$$\Omega_{\Lambda} + \Omega_M = 1$$

Supernova Cosmology Project



$$\Omega_\Lambda \approx 0.7$$

$$\Omega_M \approx 0.3$$

Загадка Вселенной:

Только 5 % вещества Вселенной состоит из известных форм материи:

0,03 % - тяжелые элементы (вещество планет)

0,5% - звезды

0,3 % - нейтрино

4 % - свободный водород и гелий

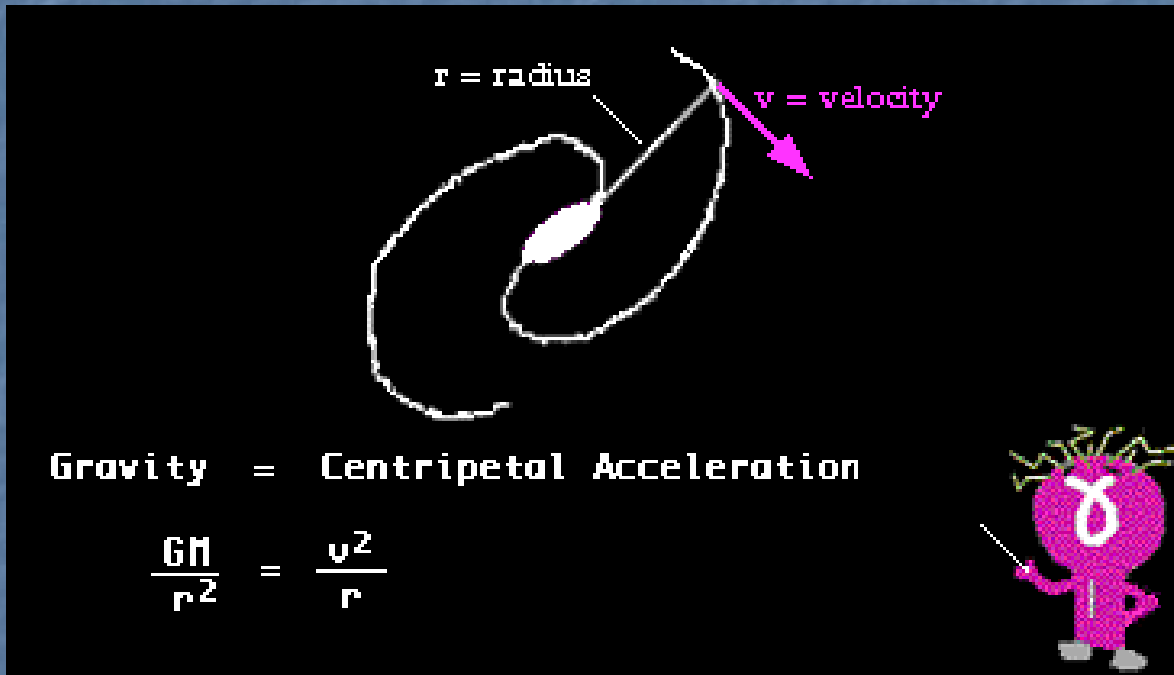
Остальная часть Ω_M непосредственно не детектируется (темная материя или скрытая масса)

Как узнать о существовании «другой» материи?

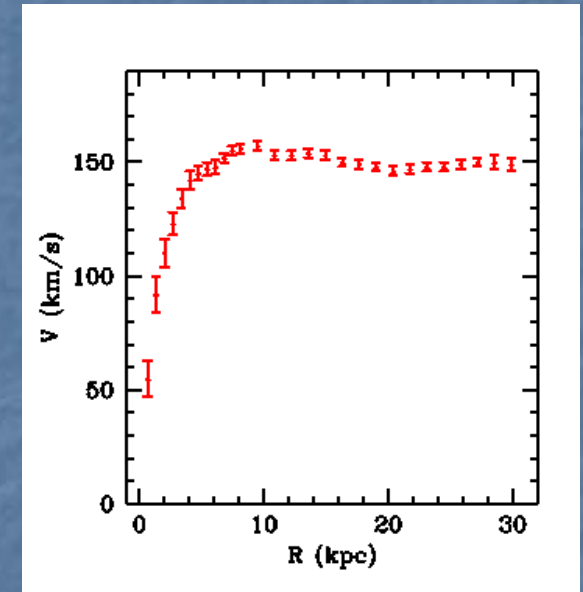
- кривые вращения галактик
- гравитационные линзы
- наблюдение за изменением скорости разбегания далеких сверхновых

кривые вращения галактик

(для справки: скорость вращения Солнечной системы относительно центра нашей галактики 250 км/с)



скорость должна убывать при удалении от центра галактики



наблюдения дают другую зависимость

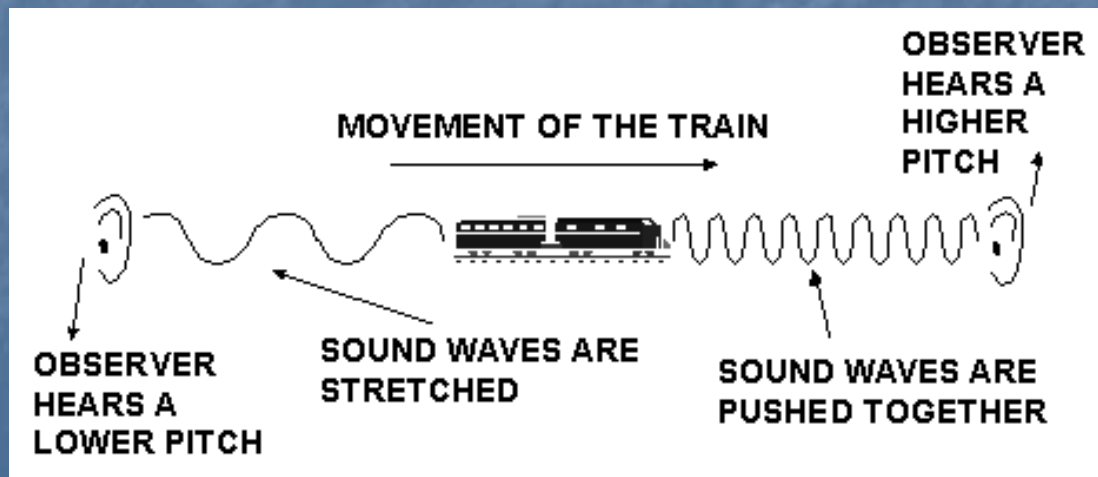
Quiz

Вопрос

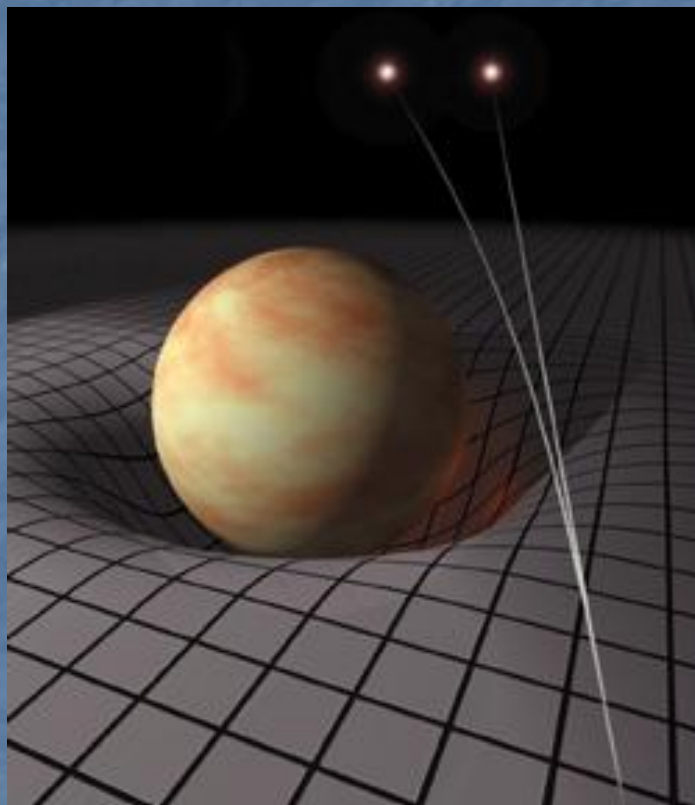
Как измеряются скорости вращения галактик?

Ответ

По эффекту Доплера



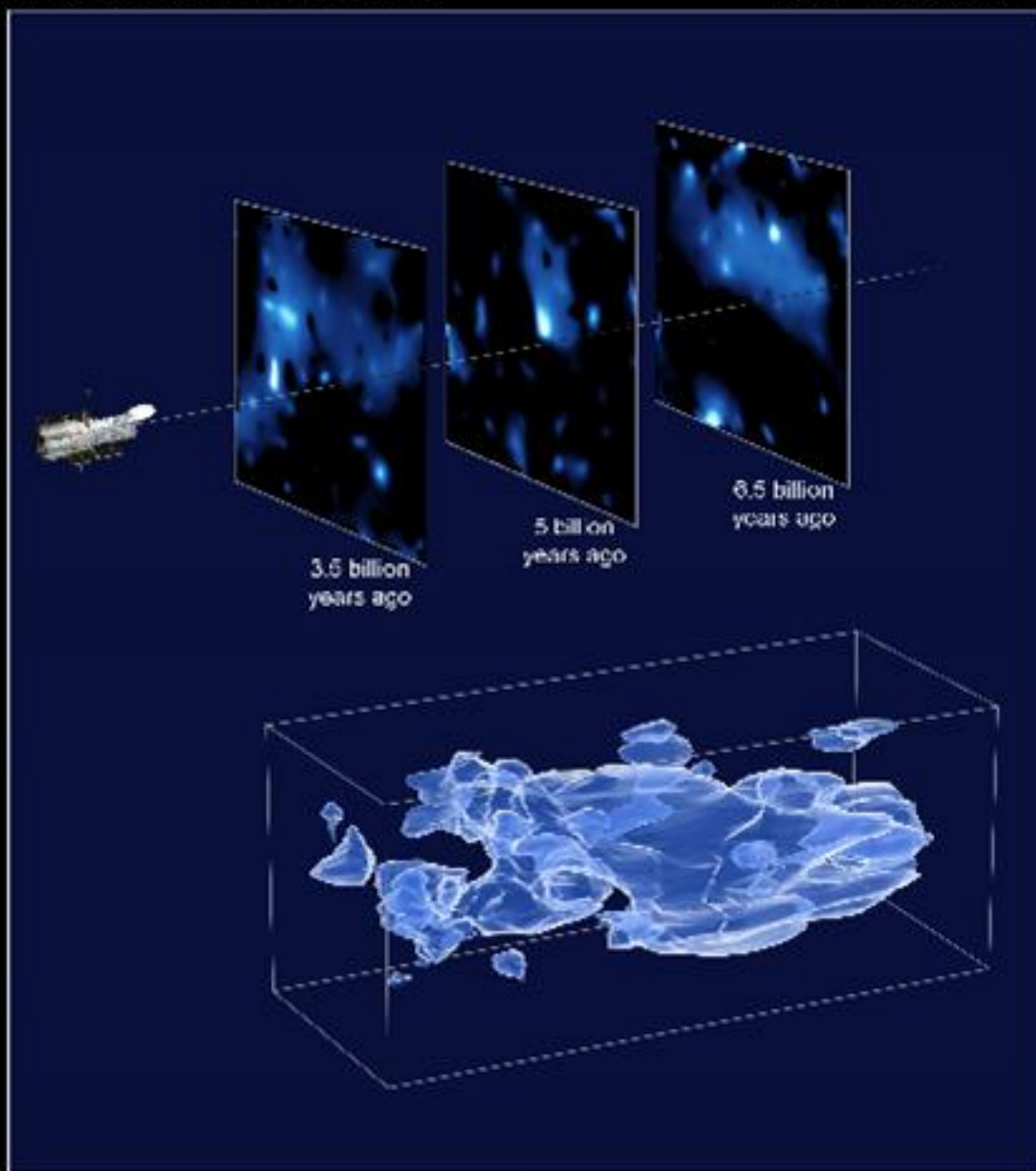
Гравитационные линзы



гравитационное поле искажает траектории
лучей света

Distribution of Dark Matter

HST - ACS/WFC



Эффекты гравитационных линз



25% вещества Вселенной сконцентрировано в галактиках и галактических кластерах в форме невидимой материи

Эту форму вещества назвали
«темной материей»

Что это может быть?

Массивные компактные объекты (черные дыры, карлики?)

Новые стабильные нейтральные частицы, слабо взаимодействующие с кварками, лептонами, фотонами...?

Новая физика на ускорителях нового поколения?

Темная энергия

равномерно «разлита» по всей Вселенной
дает 70% плотности вещества

Космологическая постоянная (отрицательное давление)?

Квинтэссенция (новое поле или пятая сущность)?

Указание на то, что теория Эйнштейна на больших расстояниях должна быть модифицирована?

Энергия вакуума (уравнение состояния $w=-1$)

$$E_{vac} = \frac{1}{2} \sum_{bosons} \hbar w_{bosons} - \frac{1}{2} \sum_{fermions} \hbar w_{fermions}$$

w частоты «нулевых» колебаний

$$\frac{E_{vac}}{V} \sim \Lambda^4 \quad - \text{Лидирующий вклад}$$

Λ - параметр «ультрафиолетового обрезания» - должен быть связан с каким-то физическим масштабом

В чем проблема?

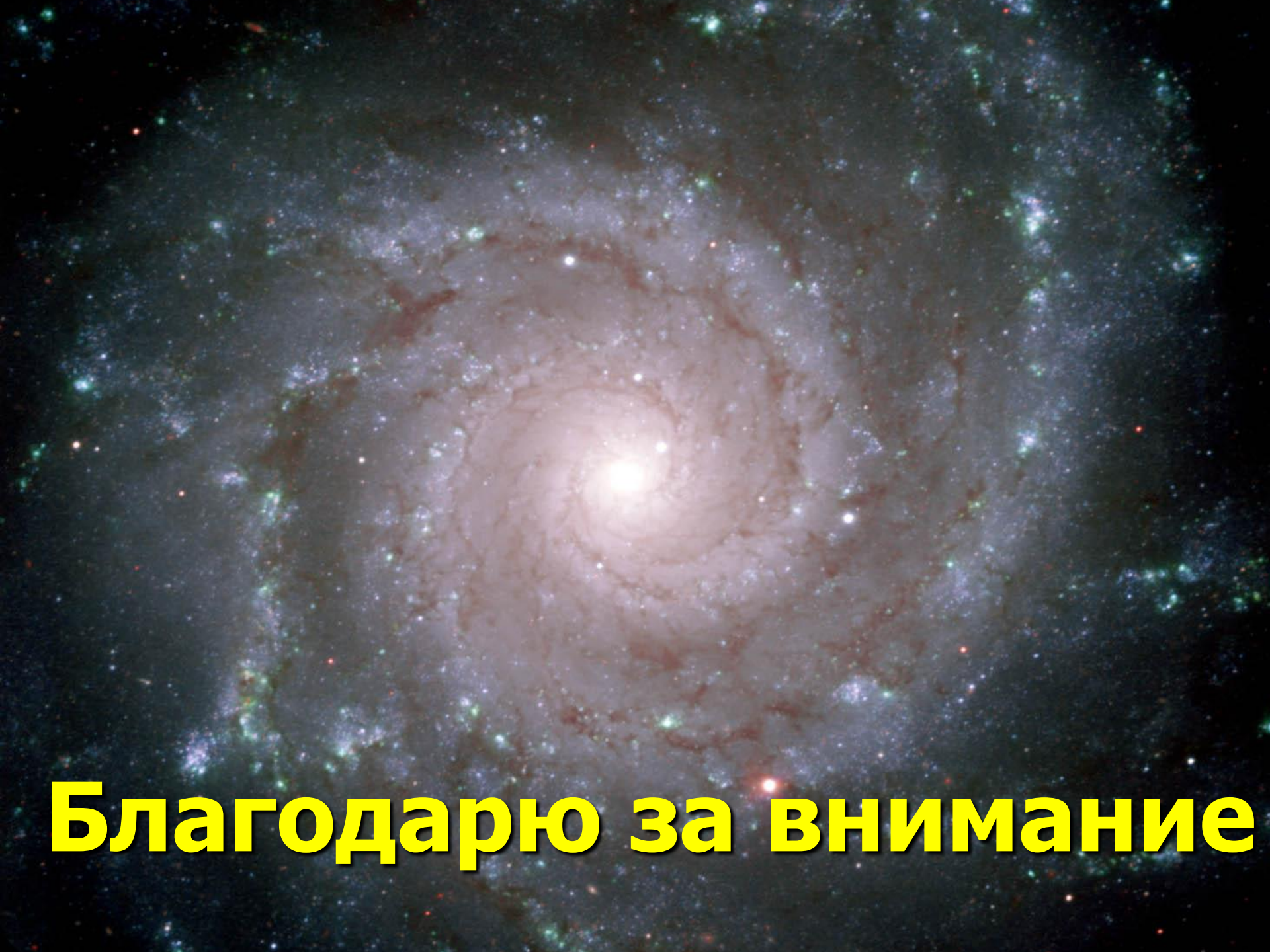
$\Lambda_{QG} \sim m_{Planck} = 10^{19} \text{ Gev}$ - масштаб квантовой гравитации

$\Lambda_{SUSY} > 1000 \text{ Gev}$ - суперсимметрия ?

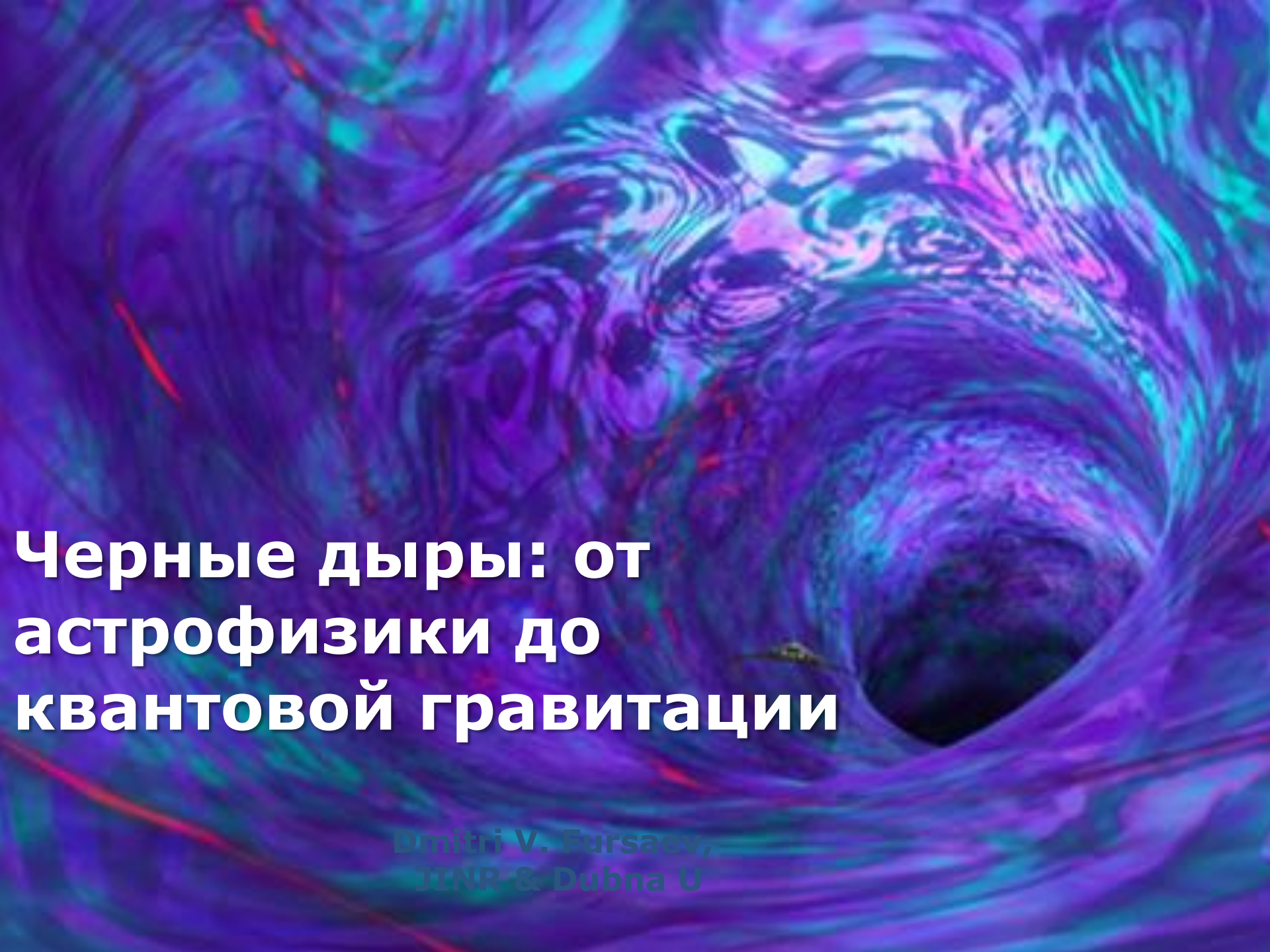
$\Lambda_{EW} \sim m_Z = 100 \text{ Gev}$ - электрослабые взаимодействия?

$$\Lambda_{DE} = \left(\frac{3H^2}{8\pi G} \right)^{1/4} \sim 10^{-35} m_{Planck} \sim 10^{-18} m_Z$$

-космологический масштаб (шкала темной энергии)



Благодарю за внимание



Черные дыры: от астрофизики до квантовой гравитации

Dmitri V. Fursaev,
JINR & Dubna U



Карл Шварцшильд (1873-1916)

$$ds^2 = -B(r)dt^2 + \frac{dr^2}{B(r)} + r^2(\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2) \quad (1916 \text{ г.})$$

- гравитационный радиус

$$B(r) = 1 - \frac{r_g}{r}, \quad r_g = 2MG$$

~ 1cm Земля

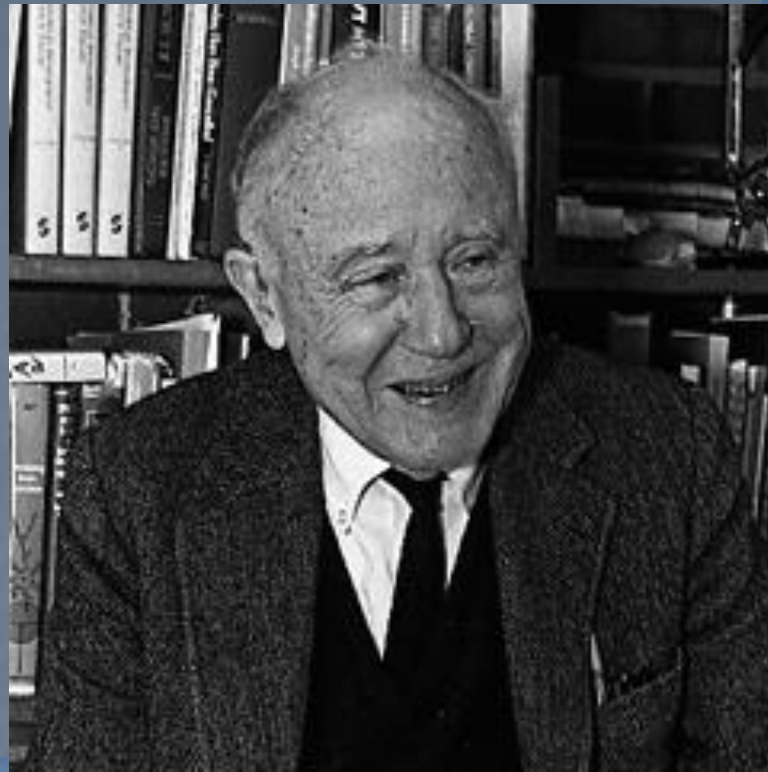
~ 1km Солнце

~



Рой Керр (р. 1934)

В 1963 г. Керр открыл решение уравнений Эйнштейна, описывающее вращающуюся черную дыру (именно такие черные дыры наблюдаются)



Джон А. Уиллер (1911-2008)

Термин «черная дыра» был придуман в 1968 г. Дж. Уиллером

до этого использовались другие обозначения, например, «frozen stars» или «black stars», как в первых сериях «Star Trek»



Образование черных дыр



**Р. Оппенгеймер
(1904 - 1967)**

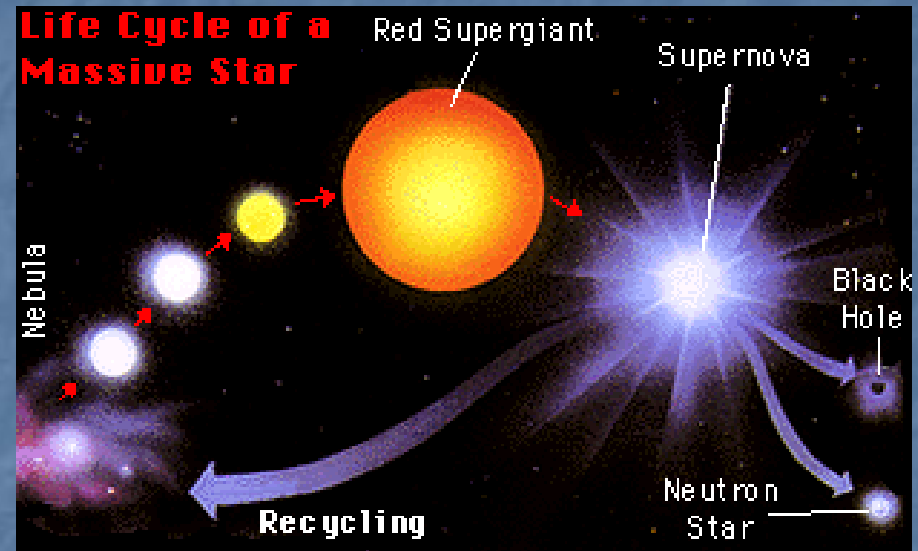
**Г. Волкофф
(1914 - 2000)**

Г. Снайдер

«...Когда все термоядерные источники энергии исчерпаны, достаточно массивная звезда сколлапсирует.» (1939)

объект с массой больше чем 3 массы Солнца может быть только черной дырой

белые карлики – конечная стадия эволюции таких звезд как Солнце (имеют размер около тысячи км); нейтронные звезды образуются, если масса превышает чандрасекаровский предел (1,4 массы Солнца, размер около 10 км)



Типы черных дыр

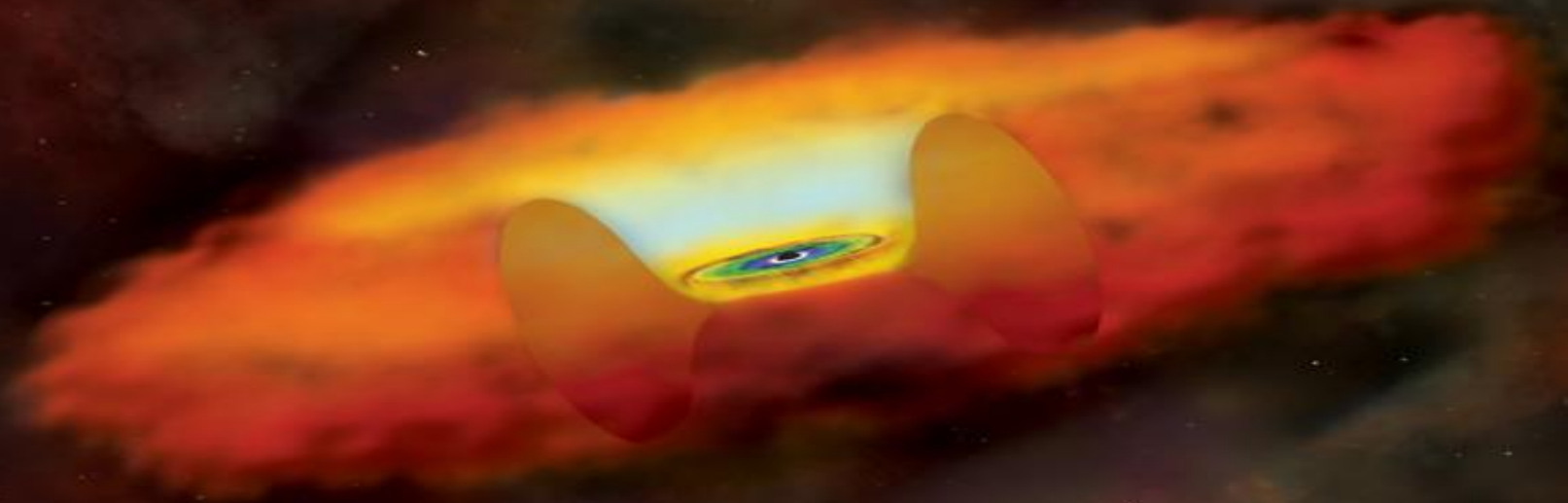
черные дыры звездной массы (в несколько раз массивнее Солнца);

сверхмассивные черные дыры (в миллион и даже в миллиард раз массивнее Солнца)

возможно, существуют черные дыры промежуточной массы

в ранней вселенной из-за неоднородностей плотности вещества могли образовываться первичные черные дыры с малой массой

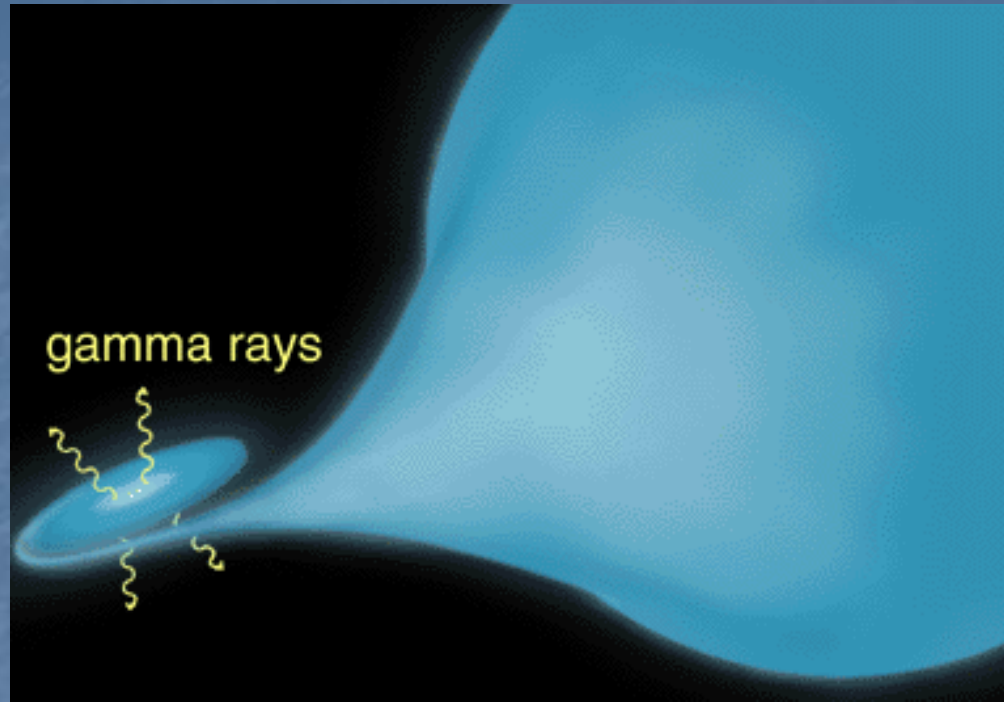
О наличии черной дыры можно судить по поведению вещества вокруг нее





“Струя”, выходящая из центра галактики M87 и состоящая из электронов и других элементарных частиц, движущихся со скоростью близкой к скорости света, как считается, образуется за счет сверхмассивной черной дыры с массой порядка 10^9 массы Солнца

Черные дыры - мощные источники рентгеновского излучения



Вещество, падающее на ч.д., разогревается за счет внутреннего трения до температуры 10^7 и выше

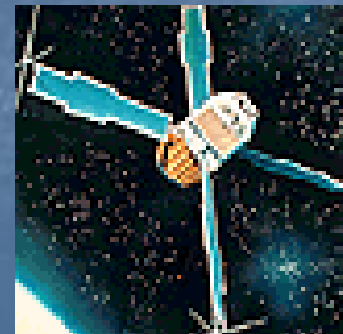
Типичная светимость - 10^3 - 10^5 солнечной (для ч.д. звездной массы) и до 10^{14} для сверхмассивных ч.д.

Рентгеновская астрономия

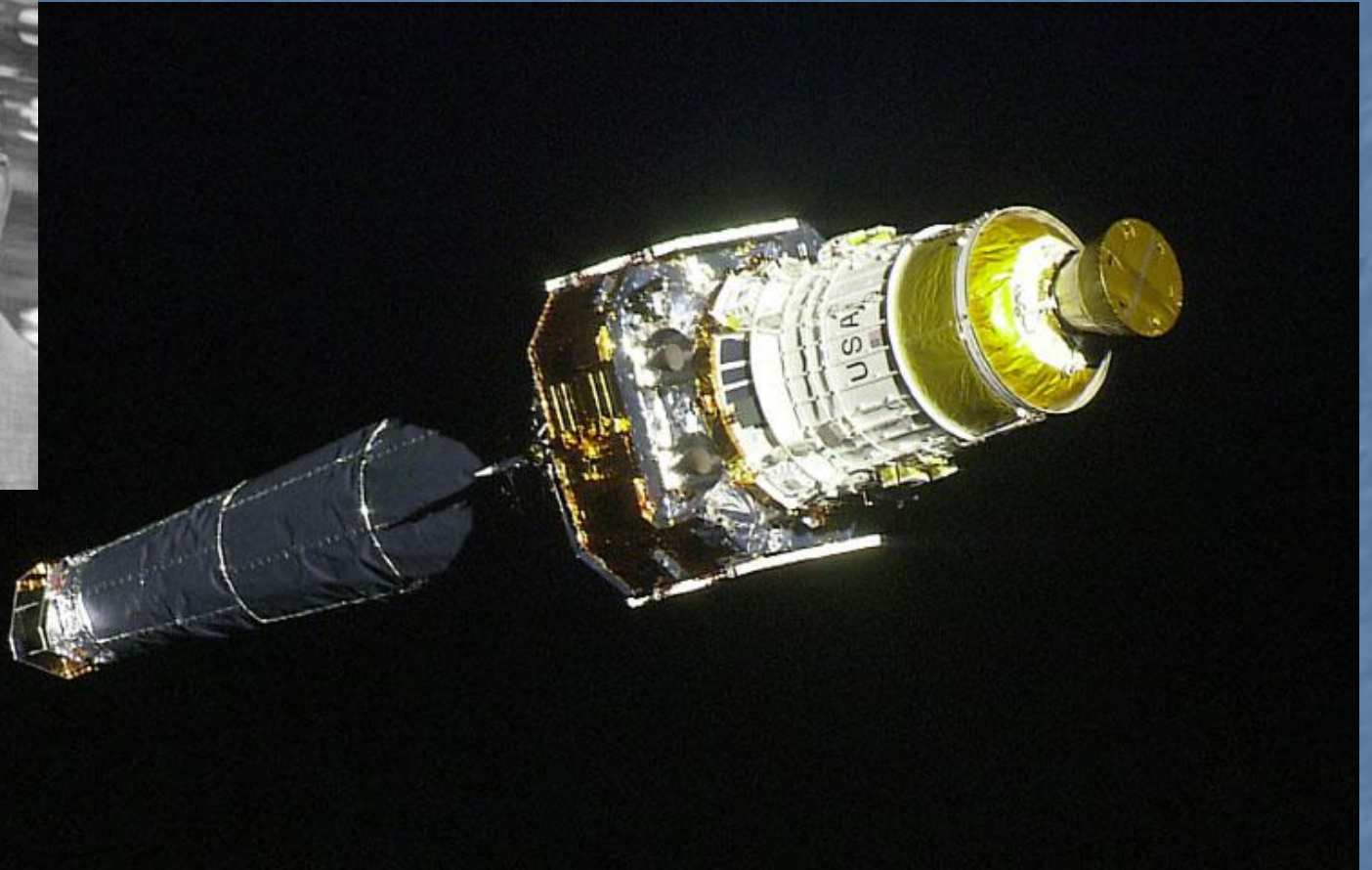
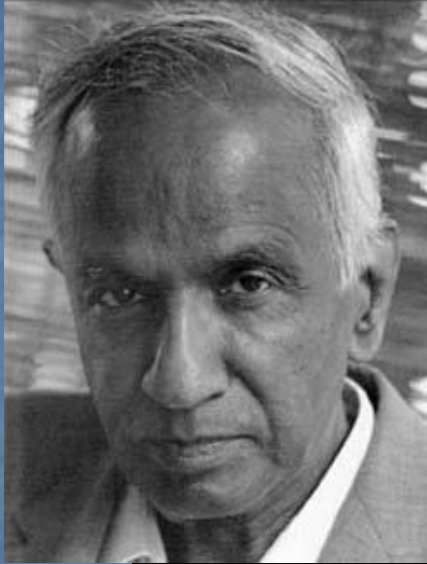


Р. Джаккони (Riccardo Giacconi)
– один из лауреатов
Нобелевской премии за 2002 г. «за
пионерский вклад в астрофизику,
который привел к открытию
космических источников
рентгеновского излучения»

**Первый рентгеновский телескоп
SAS-1(Uhuru) был запущен в 1970 г.
и именно он нашел первое
доказательство существования
черных дыр**



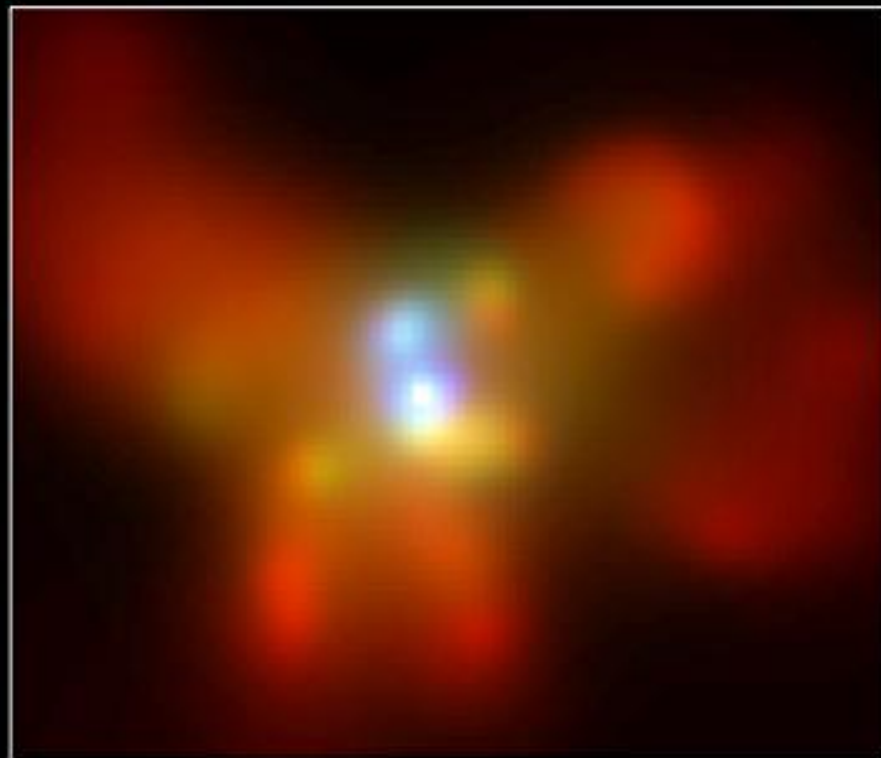
Рентгеновский телескоп "Chandra"



Выведен на орбиту командой Space Shuttle Columbia 23 июля, 1999 г.
(назван в честь С. Чандрасекара (1910-1995))

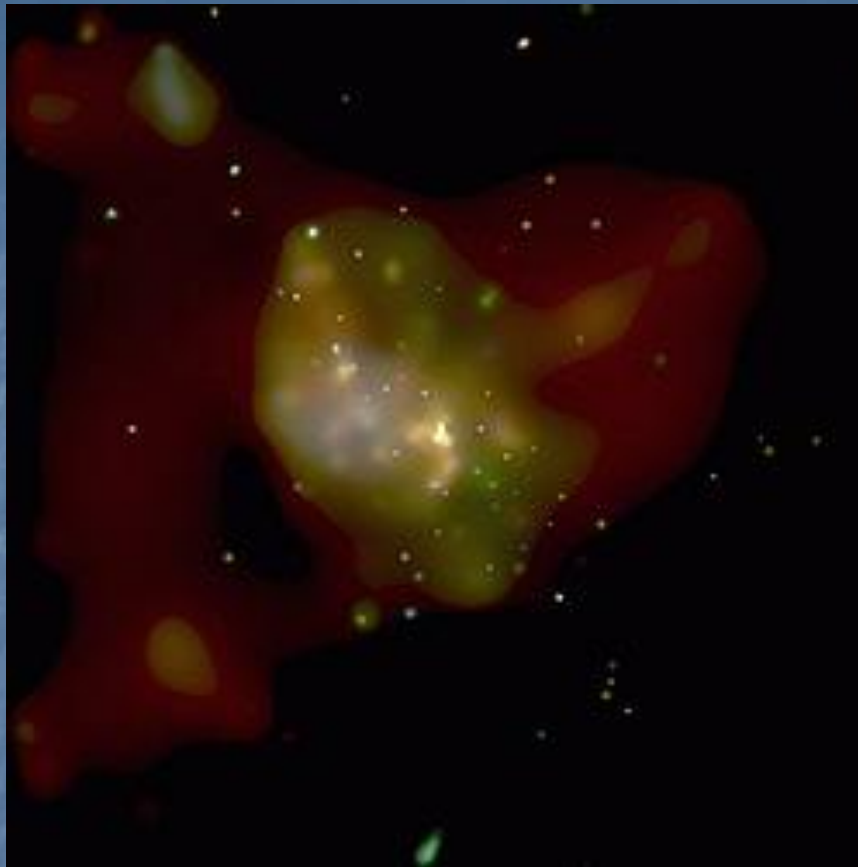


HUBBLE OPTICAL



CHANDRA X-RAY

Сверхмассивная черная дыра в центре галактики NGC 6240



Центральная область нашей галактики.
Яркая точка отвечает сверхмассивной черной дыре
в центре Млечного пути (с массой около $2 \cdot 10^6$ масс
Солнца).

Черные дыры и квантовая гравитация



$$T_H = \frac{h\kappa}{2\pi c} \quad \text{-температура Хокинга}$$

κ - поверхностная гравитация
горизонта

$$T_H \sim 10^{-6} \frac{M_\odot}{M} K$$

Steven Hawking (1942)

черные дыры испаряются за счет квантовых эффектов, излучая частицы с планковским спектром, отвечающим температуре T_H

термодинамика черных дыр

$$\delta M = T_H \delta S^{BH} + \Omega_H \delta J + \Phi_H \delta Q$$

M - масса черной дыры

$$T_H = \frac{\hbar \kappa}{2\pi c} \quad - \text{температура Хокинга}$$

$$S^{BH} = \frac{c^3}{4G\hbar} A \quad - \text{энтропия Бекенштейна-Хокинга}$$

A - площадь поверхности горизонта

J - угловой момент

Q - электрический заряд

J.Wheeler: любое возмущение черной дыры ведет к тому, что черная дыра переходит в новое стационарное состояние, которое характеризуется лишь тремя параметрами M, J, Q (независимо от того, какими свойствами обладало поглощенное черной дырой вещество).

Проблема со вторым началом термодинамики

J. Bekenstein: черные дыры обладают внутренней энтропией, пропорциональной площади поверхности горизонта A

$$S^{BH} = \frac{c^3}{4Gh} A$$

Фундаментальная проблема: найти микроскопическое обоснование S^{BH}

решение проблемы - в квантовой теории гравитации

Quiz

Вопрос:

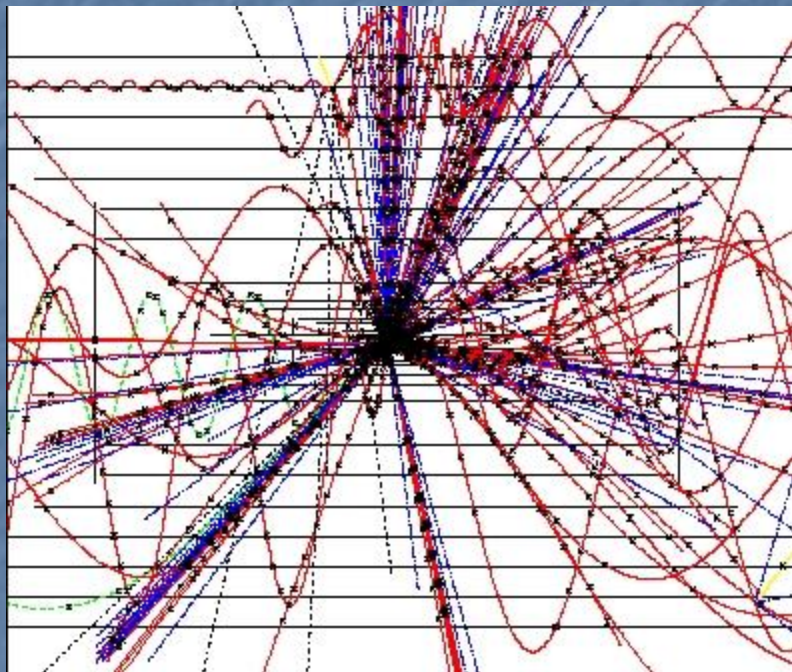
Какую энергию должен иметь ускоритель, чтобы при столкновении частиц образовалась микроскопическая черная дыра?

Используйте соотношение неопределенности (из квантовой механики) и определение гравитационного радиуса.

Ответ:

планковская энергия

«фабрика» черных дыр?



LHC

Для планковского масштаба 1TeV черные дыры с массой 5TeV будут рождаться со скоростью 1 ч.д. в сек.

Компьютерное моделирование распада мини черной дыры. «Струи» кварков и глюонов образуются за счет эффекта Хокинга квантового испарения черной дыры.

Спасибо за внимание