Е. А. Васильев

Тёмная материя и тёмная энергия во Вселенной

13 марта 2008, АКИН

Свидетельства в пользу существования тёмной материи

- Кривые вращения галактик
- Динамические массы скоплений галактик, гравитационное линзирование
- Крупномасштабная структура Вселенной

Кривые вращения галактик

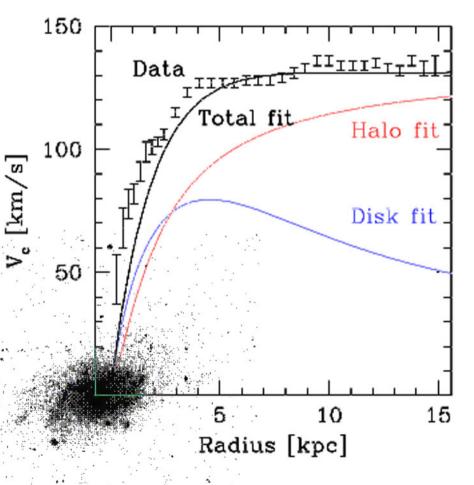
Масса в пределах радиуса $r \iff$ скорость орбитального вращения:

$$\frac{v^2}{r} = \frac{GM_{in}(r)}{r^2}$$

Кеплеровская область: $v \propto r^{-1/2}$.

Измерения:

плоские кривые вращения $v \approx \text{const.}$

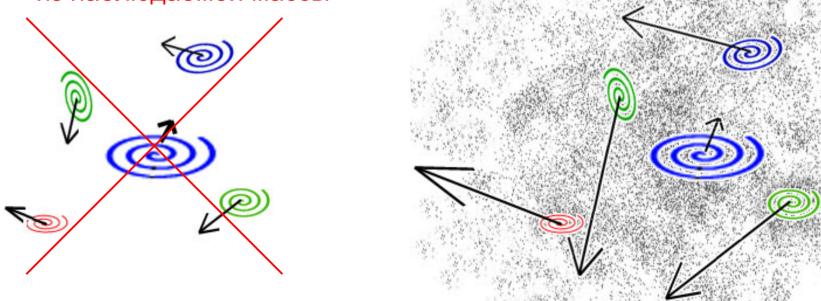


Скорости галактик в скоплениях

Теорема вириала: $2E_{kin} + E_{pot} = 0$.

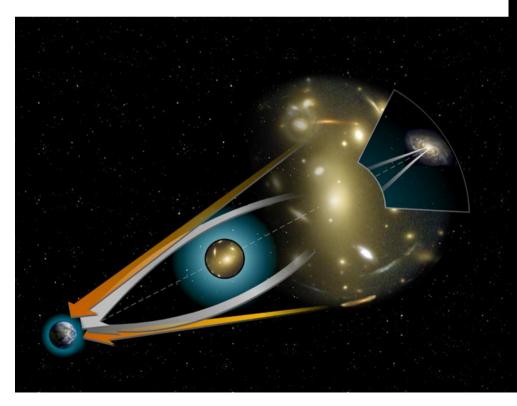
$$E_{kin} = \frac{M\langle v^2 \rangle}{2} \; ; \qquad E_{pot} = \frac{GM^2}{\langle r \rangle} \implies M = \frac{\langle v^2 \rangle \langle r \rangle}{G} \; .$$

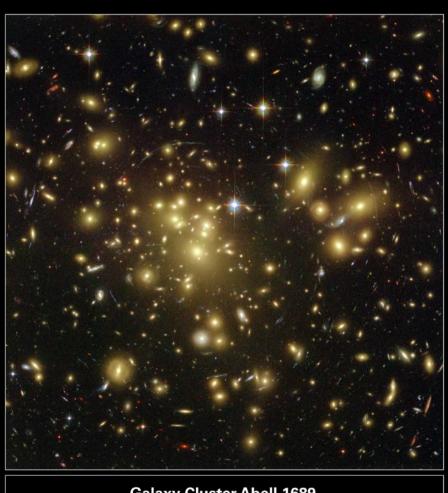
Проблема: средние скорости гораздо больше, чем ожидается из наблюдаемой массы



Гравитационное линзирование

Наблюдения далёких галактик сквозь линзирующие их скопления галактик позволяют оценить массу скопления-линзы





Galaxy Cluster Abell 1689

Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

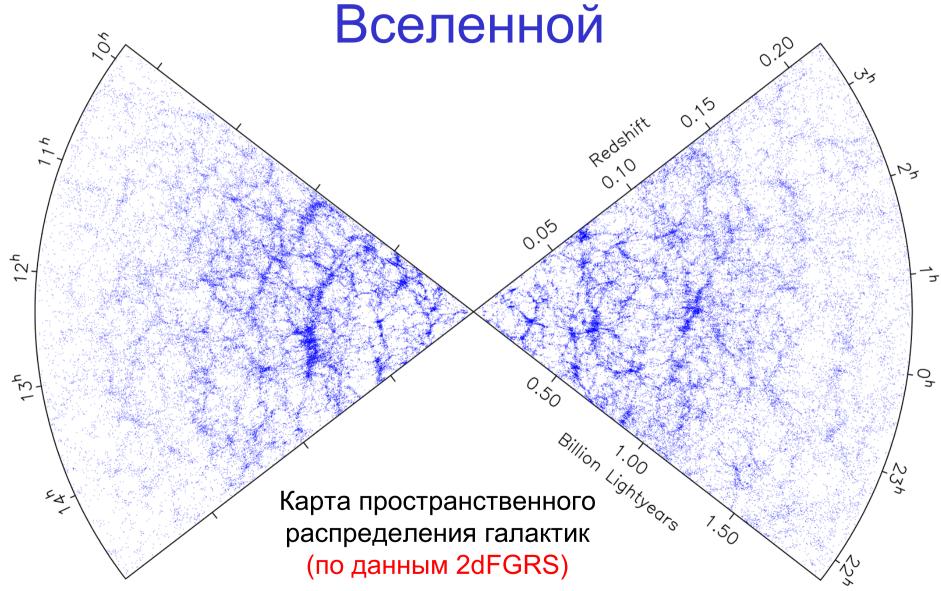
NASA, N. Benitez (JHU), T. Broadhurst (The Hebrew University), H. Ford (JHU), M. Clampin(STScI), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO/Lick Observatory), the ACS Science Team and ESA STScI-PRC03-01a

Bullet Cluster: «прямое свидетельство» в пользу тёмной материи



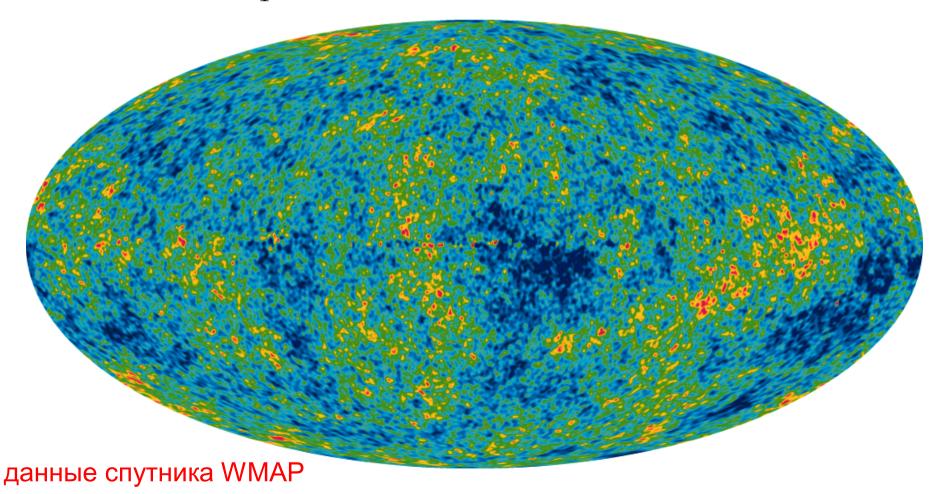
Красным – наблюдения рентгеновского излучения горячего межгалактического газа; синим – рассчитанное распределение тёмной материи, сопутствующей галактикам.

Крупномасштабная структура

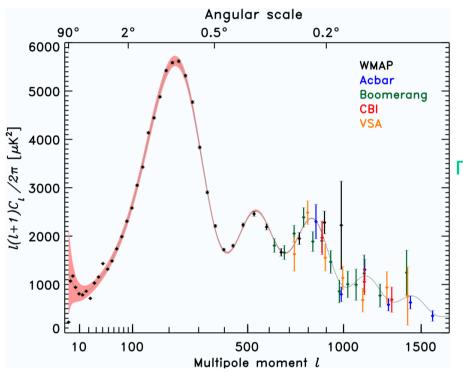


Карта интенсивности реликтового излучения

Снимок Вселенной в возрасте 300 000 лет, Т=3000 °K



Спектр мощности реликтового излучения



Разложение по сферическим гармоникам:

$$\Delta T(\theta, \phi) = \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=-l}^{l} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi) ; \quad C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_{m} |a_{lm}|^2$$

Спектр мощности $c_l \equiv l(l+1)C_l/2\pi$.

Допплеровские пики – эхо акустических колебаний в плазме до рекомбинации

первый пик

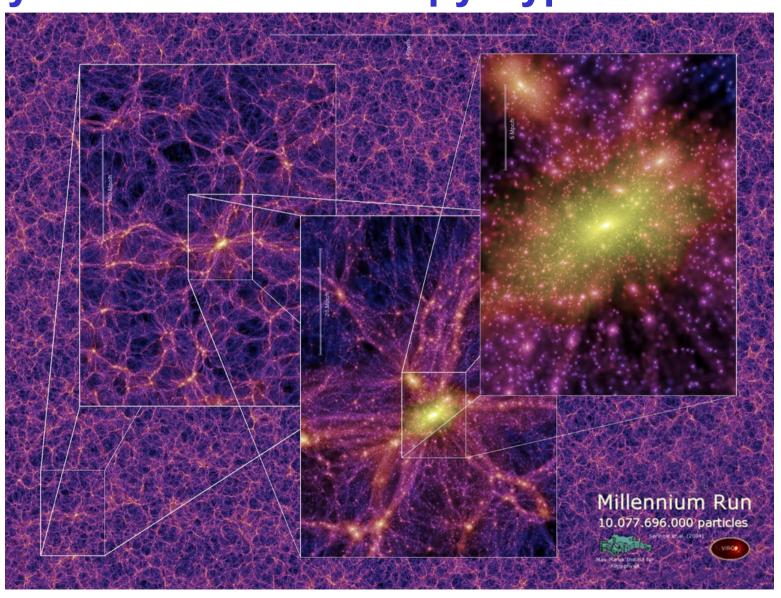
$$\theta = \frac{\lambda}{L}(1+z) \sim \frac{t_{rec} z_{rec}}{t_0} \sim 2^{\circ}$$
,

номер мультиполя $l = 2\pi/\theta \sim 200$.

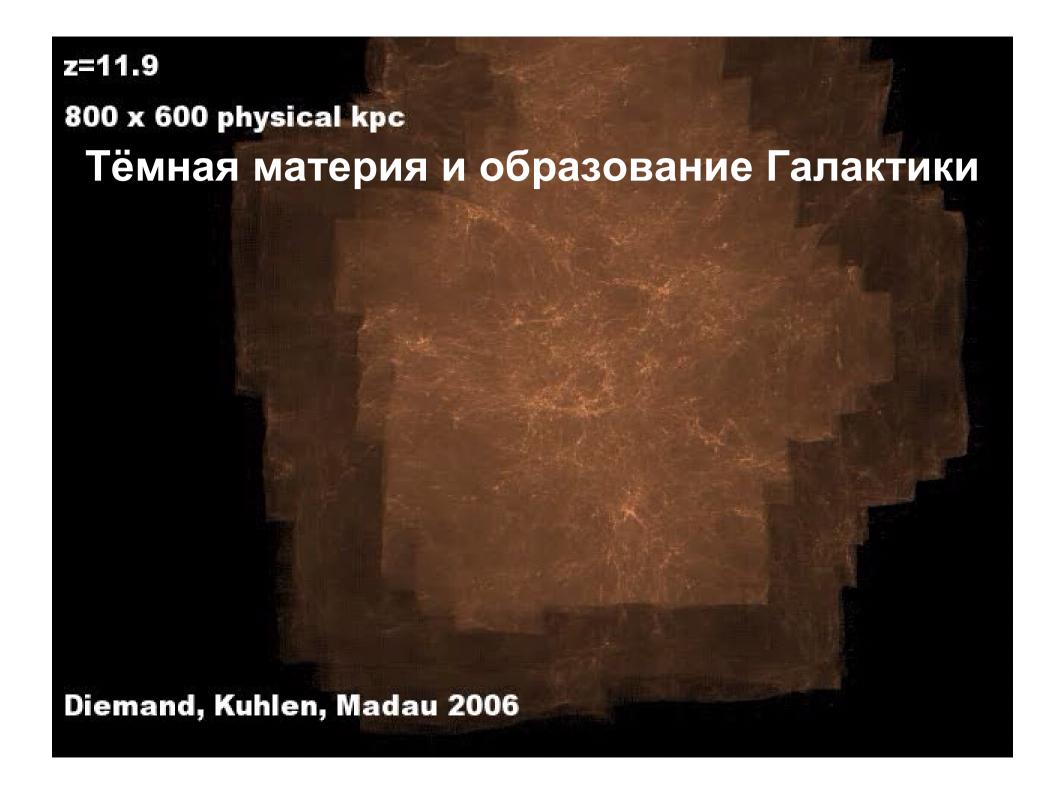
Информация из СМВ

- Полная кривизна пространства: Ω_{total} = 1 (Вселенная плоская!)
- Доля барионной материи $\Omega_{\rm bar} \sim 0.04$
- Доля тёмной материи $\Omega_{\rm DM} \sim 0.24$
- Остальное тёмная энергия ~ 72%

Тёмная материя и образование крупномасштабной структуры Вселенной



z = 20.0 Тёмная материя и образование крупномасштабной структуры Вселенной



Природа тёмной материи

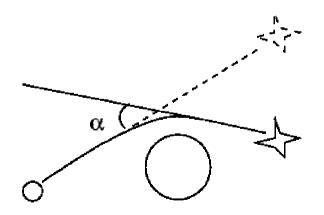
- Изменение Ньютоновского закона тяготения?
- Межгалактический газ?
- Массивные компактные объекты?
- Новые, ещё не открытые элементарные частицы?

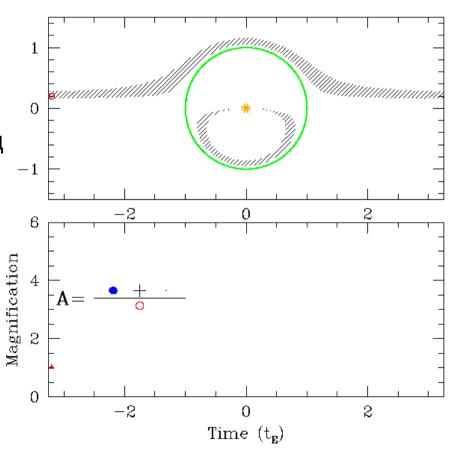
Массивные компактные объекты

MACHO – Massive Compact Halo Objects

- Карликовые звёзды
- Планеты типа Юпитера
- Нейтронные звёзды, первичные чёрные дыры и т.д

Гравитационное микролинзирование:





Наблюдаемое количество компактных объектов слишком мало.

Новые элементарные частицы

- Не участвуют в электромагнитном взаимодействии
- Стабильны
- «Холодные» (нерелятивистские)

Наиболее вероятные кандидаты:

нейтралино — наиболее лёгкие стабильные частицы— суперсимметричные партнёры калибровочных и Хиггсовских бозонов

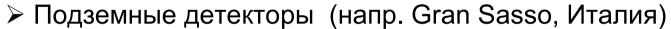
масса
$$M_{\chi} \sim 100 - 1000 \; {\rm GeV}$$

Способы детектирования тёмной материи

• Прямые поиски

Ускорители (напр. LHC в CERN, Швейцария)

$$p + p \rightarrow \chi + \overline{\chi} + \dots$$
, $E = 7 + 7$ ТэВ

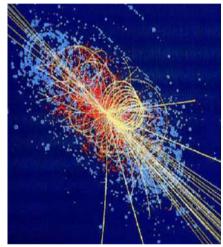


— рассеяние частиц в веществе детектора

Сложности:

малое сечение рассеяния

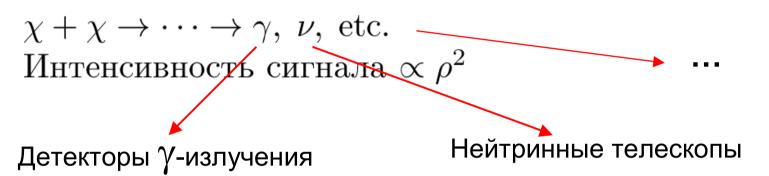
фон: естественная радиоактивность, космические лучи





Способы детектирования тёмной материи

• Косвенное обнаружение – продукты аннигиляции



Космические обсерватории



Наземные атмосферные черенковские телескопы



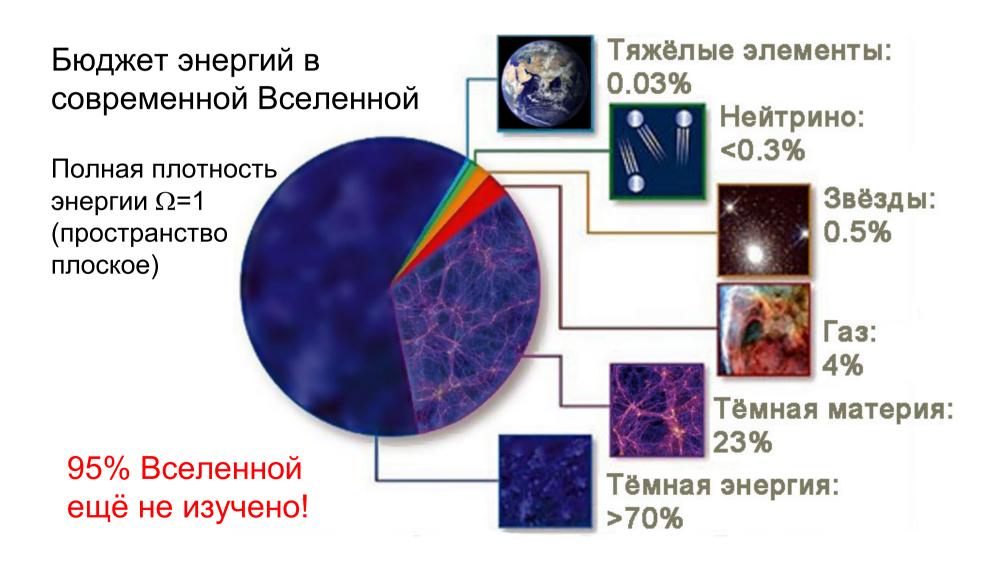
Баксанская обсерватория

Байкальский нейтринный телескоп

Ice Cube (Антарктида)

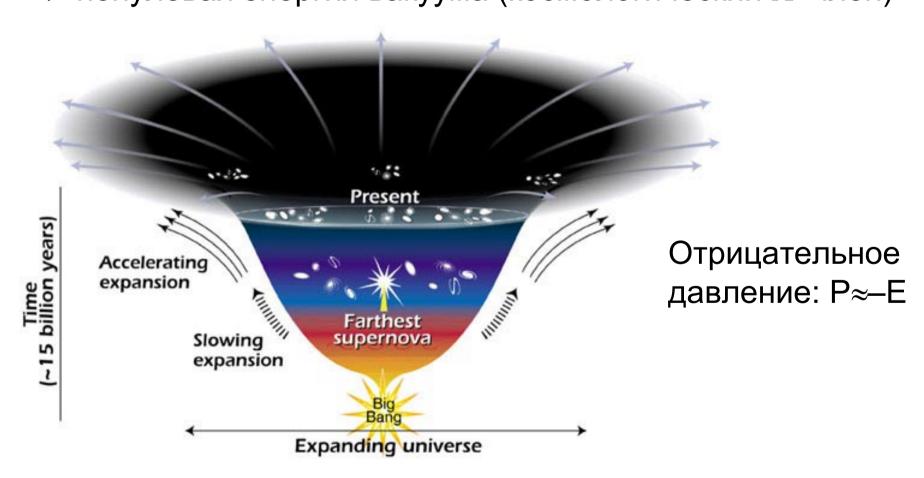
. . .

Тёмная материя и тёмная энергия в космологии

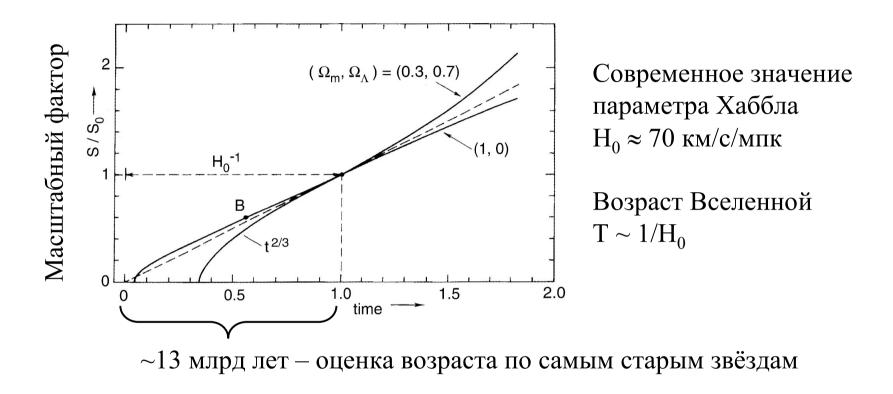


Роль тёмной энергии в космологии

Вселенная в настоящее время расширяется с ускорением ⇒ ненулевая энергия вакуума (космологический *∧*–член)



Роль тёмной энергии в космологии



Без тёмной энергии возраст Вселенной был бы слишком мал

Но если бы тёмной энергии было слишком много, то галактики просто не успели бы образоваться! (проблема совпадения $\Omega_{\Lambda} \sim \Omega_{\rm m}$)

Тёмная материя vs. тёмная энергия

- Состоит из элементарных частиц
- Уравнение состояния:
 P=0
- Образует гравитационно связанные объекты
- Вероятно, будет экспериментально обнаружена в ближайшее время
- Похожа на барионную материю!

- Скалярное поле?
 Энергия вакуума?
- Уравнение состояния:
 Р=–Е
- Разлита однородно по пространству
- Нет сложившегося понимания, что это.
 Многочисленные теории.
 Эксперимент пока невозможен
- 33333

Современное состояние науки

Космологические данные о тёмной материи и тёмной энергии – свидетельство неполноты наших знаний о физике микромира

Главные открытия впереди!

