

Темная материя: модели, поиск, ограничения

И. Ткачев

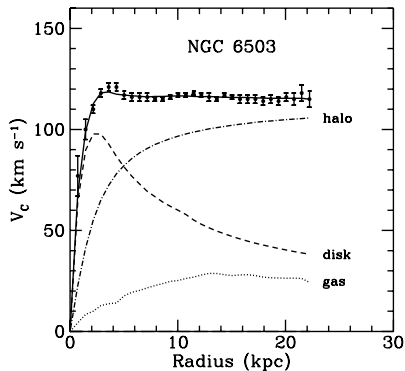
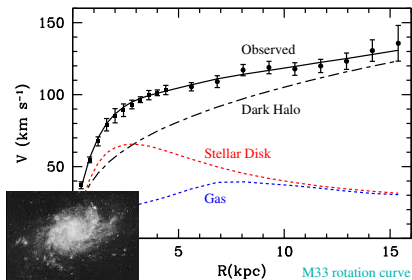
ИЯИ

Марковские чтения, 13 мая 2010

План:

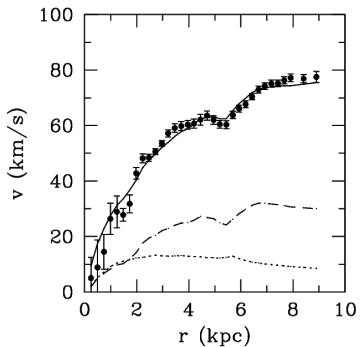
- Введение
- Структура Галактического гало
 - Модель сферической аккреции
 - Универсальные свойства гало от карликов до скоплений
- Темная материя в теории частиц. Кандидаты, ограничения и сигналы.

Темная материя в галактиках

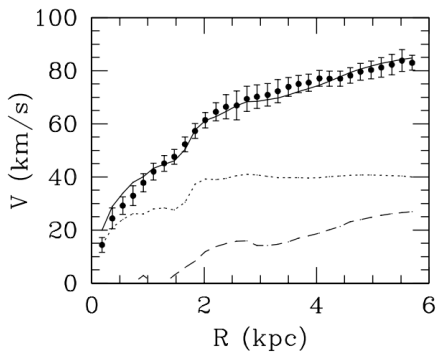


Ньютоновская гравитация:

$$v_{\text{rot}} = \sqrt{\frac{G M(r)}{r}}$$



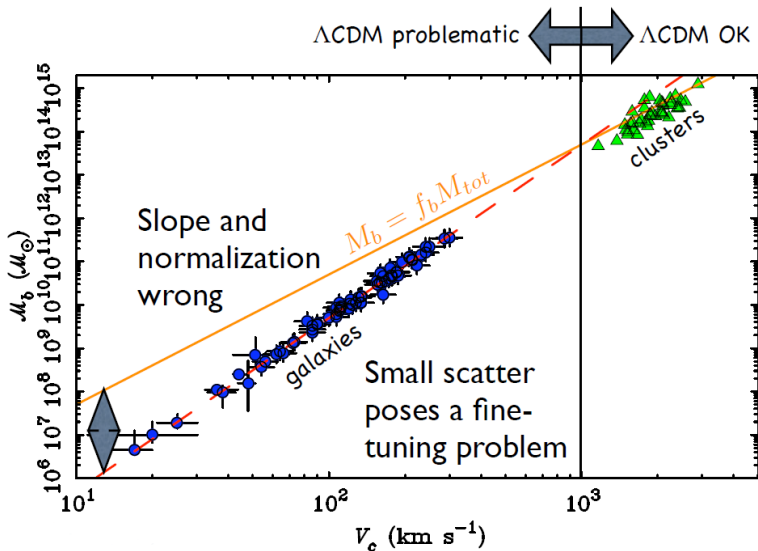
NGC 1560



UGC 7524

Модифицированная гравитация?

Соотношение Талли - Фишера

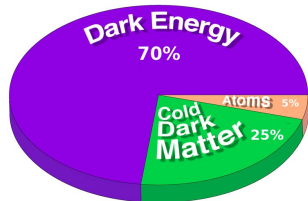
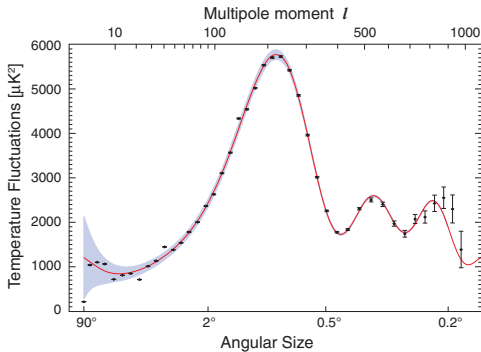


McGaugh, 2009

Скрытая масса проявляет себя на всех космологических масштабах:

- Плоские кривые вращения в галактиках
- Гравитационный потенциал удерживающий галактики и горячий газ в скоплениях
- Гравитационные линзы в скоплениях
- Образование крупномасштабной структуры из первичных возмущений
- Характерный спектр флуктуаций реликтового излучения
- . . .

Состав вещества во Вселенной



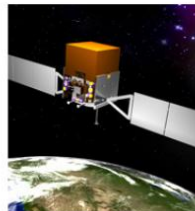
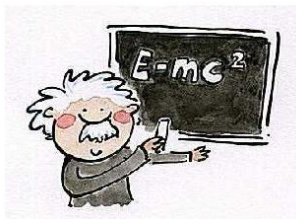
Небарионная темная материя существует.

(Единственная альтернатива - модификация гравитации.)

Стратегия поиска



DM



В ряде случаев темная материя может быть надежно идентифицирована только в комплексной программе поиска

И для прямого, и для косвенного поиска темной материи необходимо детальное понимание устройства Галактического гало.

Нужны:

- Профиль плотности
- Ожидаемые скорости частиц в нашей окрестности
- Оценка мелкомасштабной структуры

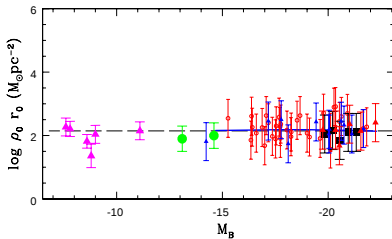
- Ожидаемый поток γ

$$F_{DM} = \frac{\Gamma \Omega_{fov}}{8\pi} \int_{los} dr \rho_{DM}(r)$$

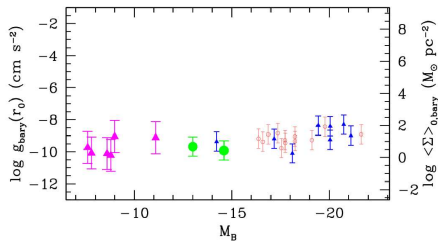
- Интеграл $S \propto \rho_* r_*$
- S слабо зависит от выбора профиля плотности темной материи
- $S \approx \text{const}$, от карликовых галактик до скоплений галактик

Boyarsky et. al., 2006

Постоянная поверхностная плотность?



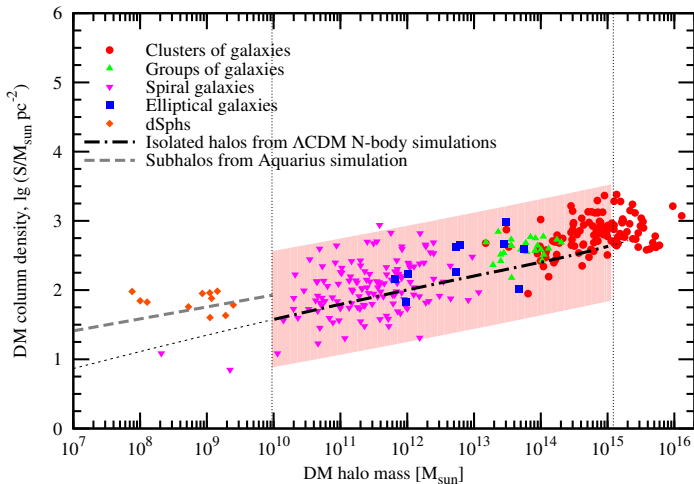
Donato et al., 2009



Gentile et al., Nature'09

Еще один аргумент в пользу MOND?

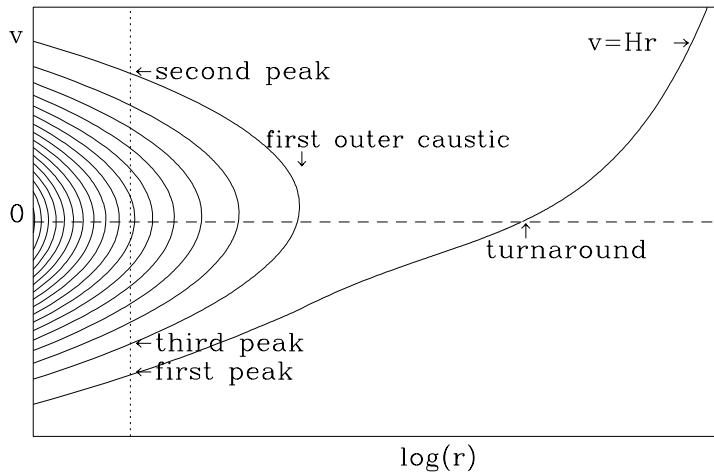
Scaling of DM column density



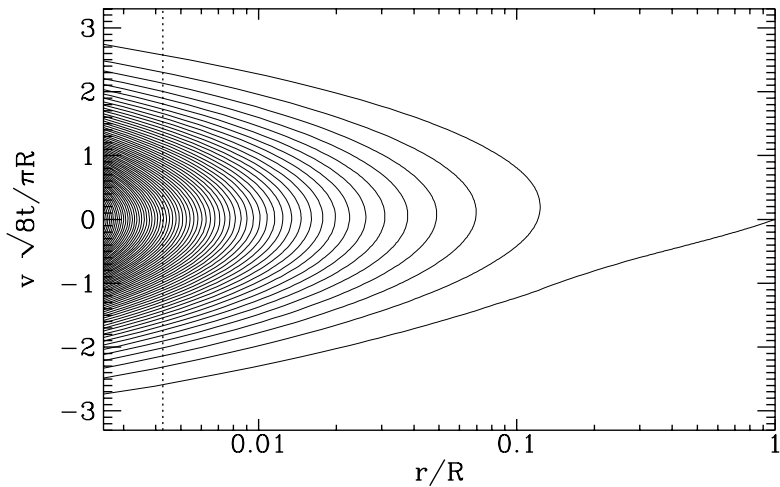
$$S \propto M_{\text{halo}}^{0.2}$$

Boyardsky et al., 2009

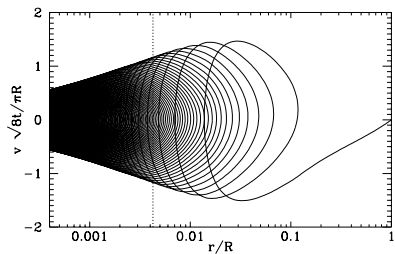
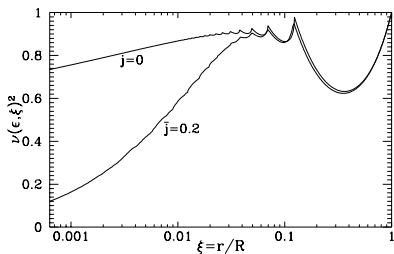
Модель аккреции



Модель аккреции



Sikivie, Yun Wang & I.T., 1996



$\rho \propto r^{-2}$ между внешней и внутренней каустиками

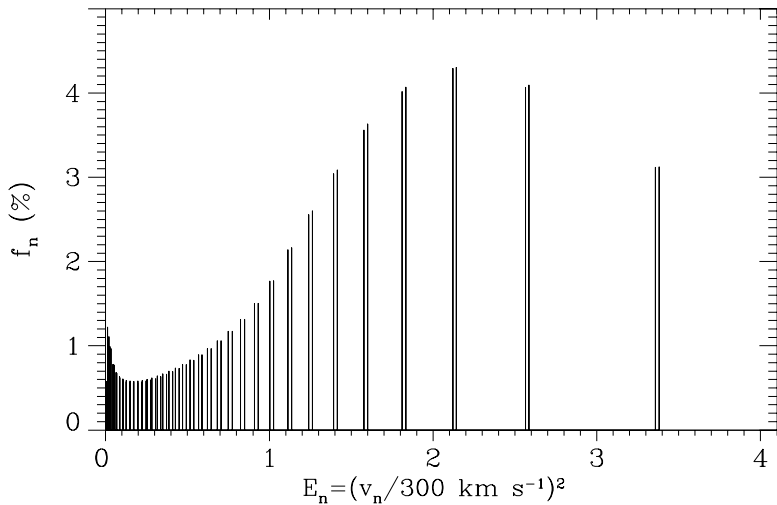
$\rho \propto r^{-\gamma}$ при меньших r , где

$$\gamma = \frac{9\epsilon}{3\epsilon + 1}$$

$\gamma \approx 1.1$ для $\epsilon = 0.2$

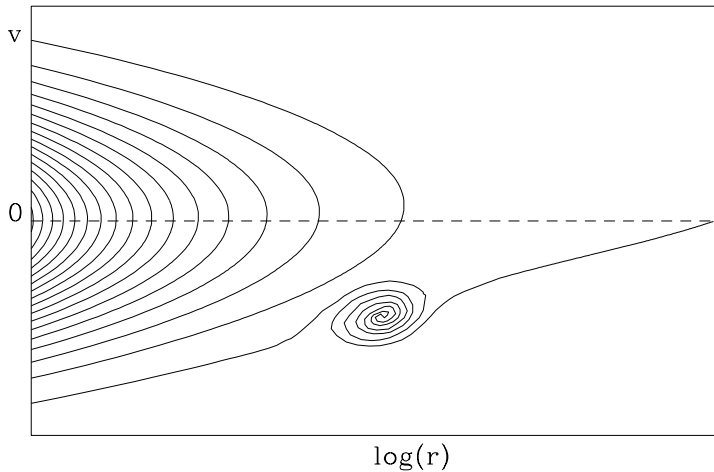
Sikivie, Yun Wang & I.T., 1996

Модель аккреции

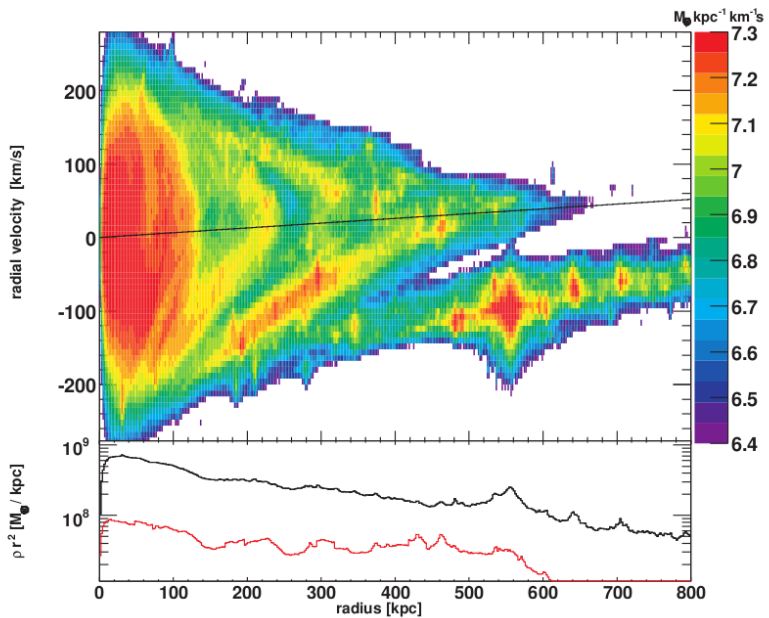


Sikivie, Yun Wang & I.T., 1996

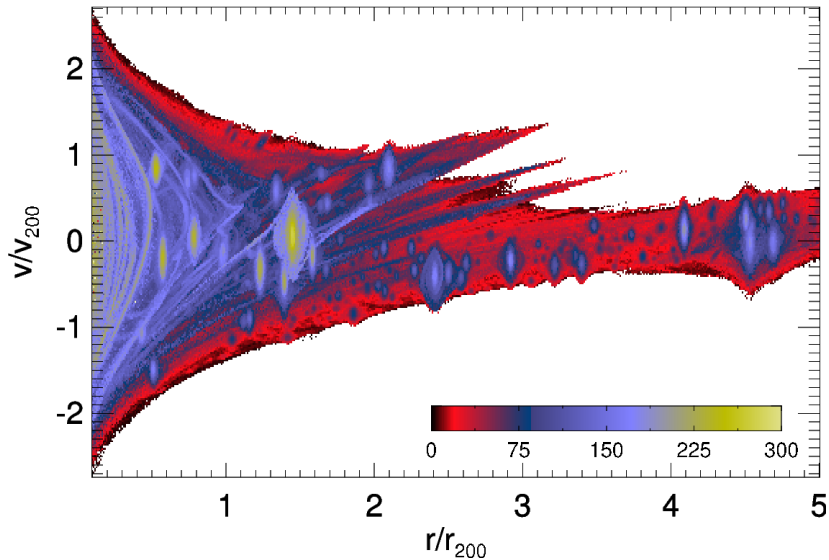
Модель аккреции



Sikivie, Yun Wang & I.T., 1996



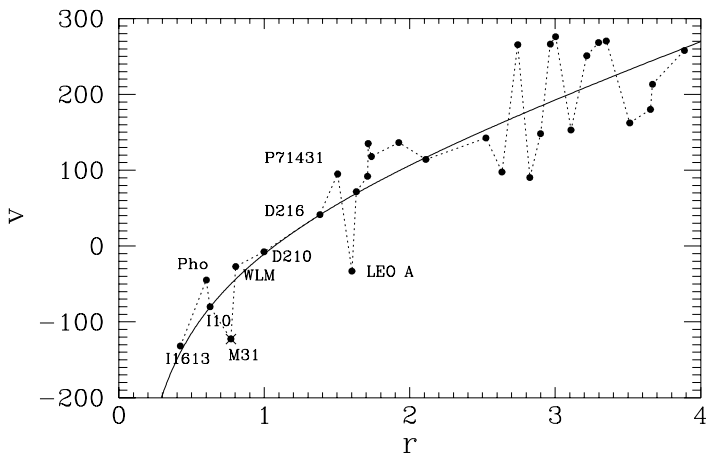
Diemand and Kuhlen, 2008



Vogelsberger and White, 2010

Модель аккреции

$$R_{\text{ta}} \propto (Gt^2 M)^{1/3}$$



$$R_{\text{ta}} = 1.07 \pm 0.14 \text{ Mpc}, \quad h = 0.71 \pm 0.5$$

G. Steigman & I. T., 1998

DM column density in infall model

Качественное объяснение

- Автомоделность

$$S \propto \rho_* r_* \propto \rho_{\text{ta}} R_{\text{ta}}$$

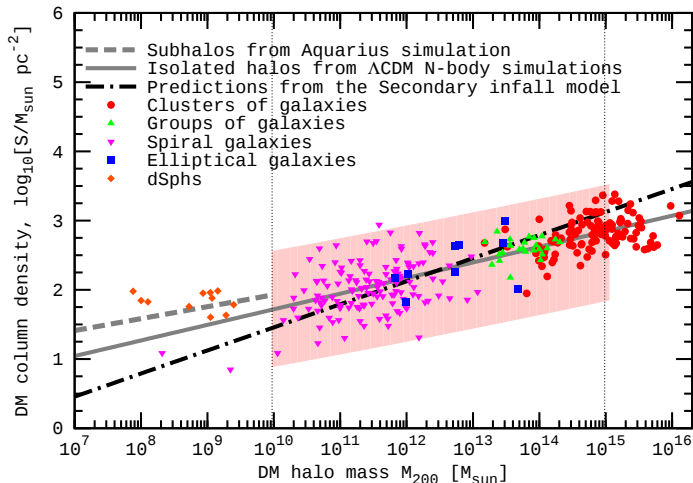
- Модель аккреции

$$R_{\text{ta}} \propto (Gt^2 M)^{1/3}$$

- Если есть отклонения от автомоделности, то $S \propto c(M) \cdot M^{1/3}$
- В численном моделировании $c \equiv r_*/R_{\text{ta}}$ слабо зависит от массы, $c \propto M^{-0.1}$
- Поэтому

$$S \propto \frac{M^{0.23}}{t^{4/3}}$$

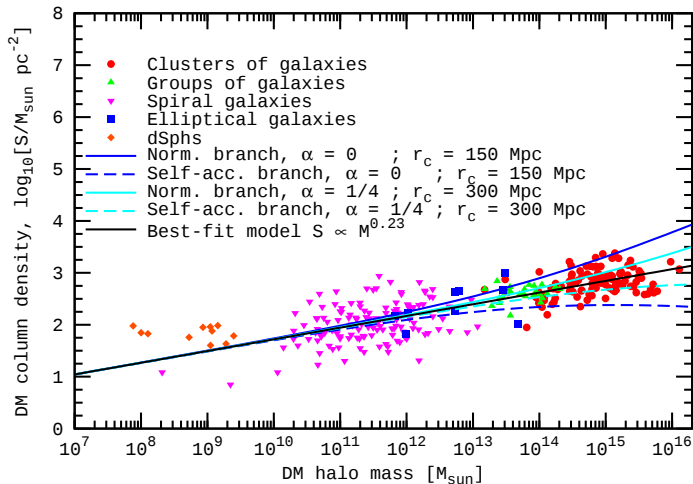
Scaling of DM column density



Модель аккреции $S \propto M_{\text{halo}}^{1/3-0.1}$, фит $S \propto M_{\text{halo}}^{0.2}$

Boyardsky et al., 2009

Ограничения на модифицированную гравитацию



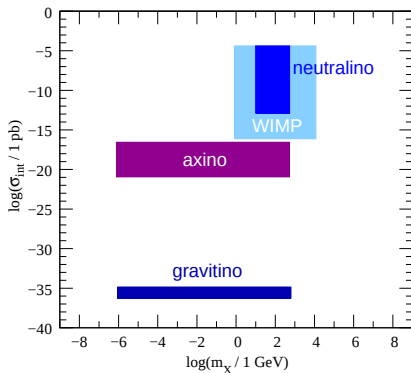
Boyarsky & Ruchayskiy, 2010

Скрытое вещество в моделях физики частиц

- Ограничимся рассмотрением моделей, в которых скрытое вещество появляется автоматически, как результат решения какой-то другой, независимой проблемы.
- Скрытое вещество должно быть холодным (или теплым). Должен существовать естественный механизм производства такого вещества в ранней Вселенной с $\Omega_{\text{DM}} \approx 0.25$.

	кандидат	масса
▶	Гравитон	10^{-21} eV
▶	Аксион	10^{-5} eV
▶	Стерильное нейтрино	10 keV
▶	Зеркальное вещество	1 GeV
▶	WIMP	100 GeV
▶	WIMPZILLA	10^{13} GeV

Weakly Interacting Massive Particles (WIMP)

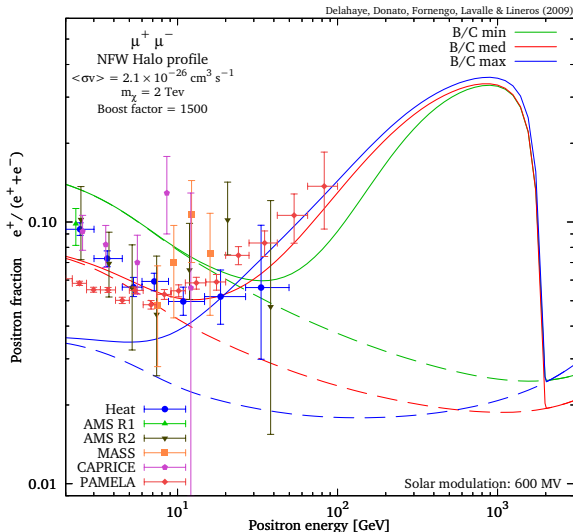


- Обычно этот термин используют по отношению к стабильным нейтральным частицам, возникающим в рамках супер-симметричных теорий.
- Обычно этот термин используют по отношению к термальным реликтовым частицам.
- Наиболее популярный кандидат - **н्यूтралино**, смесь 4 частиц - суперпартнеров калибровочных и хиггсовских бозонов: бино, вино, хиггсино.

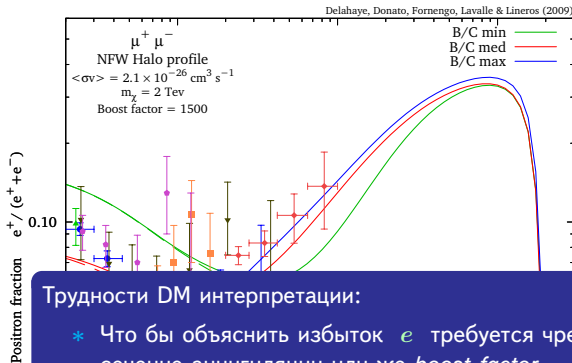
В гало Галактики (или в недрах Солнца, Земли) WIMP может аннигилировать в:

- 2γ
Орбитальные обсерватории EGRET, Fermi, ...
Черенковские телескопы.
- e^+e^-
HEAT, AMS, PAMELA, ATIC, ...
- $\bar{\nu}\nu$
Нейтринные телескопы.

Сигнал от темной материи ...



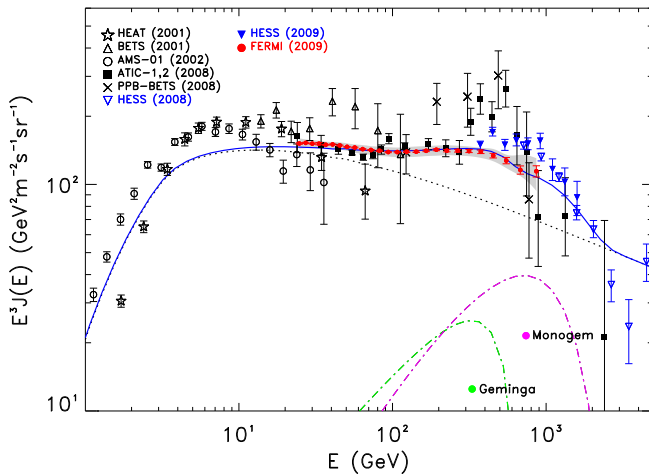
Сигнал от темной материи ... или много шума из ничего?



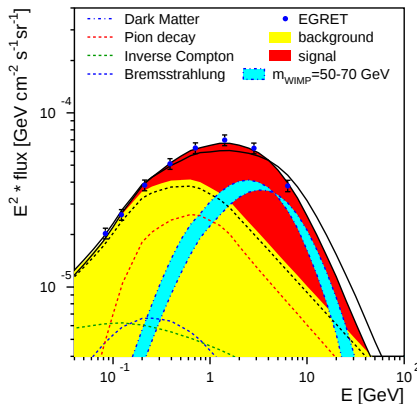
Трудности DM интерпретации:

- * Что бы объяснить избыток e требуется чрезмерно большое сечение аннигиляции или же *boost factor*
- * Boost могли бы дать сгущения DM на малых масштабах. Но
 - * требуемый большой boost маловероятен
 - * будет проблема с избытком γ и/или анти- p
- * Избыток e вполне можно объяснить астрофизическими моделями (пульсары, сверхновые)

Вклад пульсаров



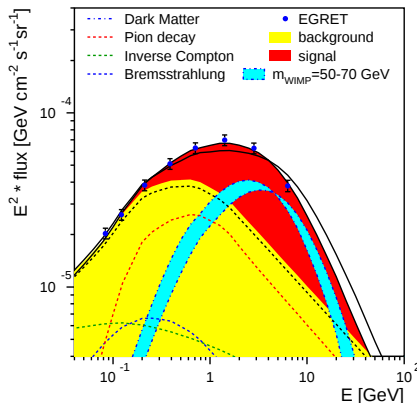
Интерпретация данных EGRET: аннигиляция DM в γ



de Boer et al (2005)

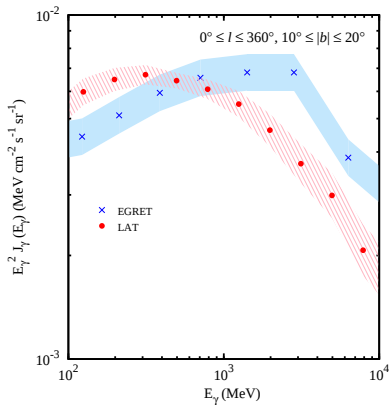
Аннигиляция в γ

Интерпретация данных EGRET:
аннигиляция DM в γ



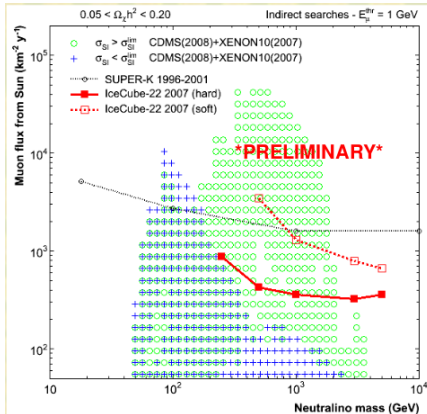
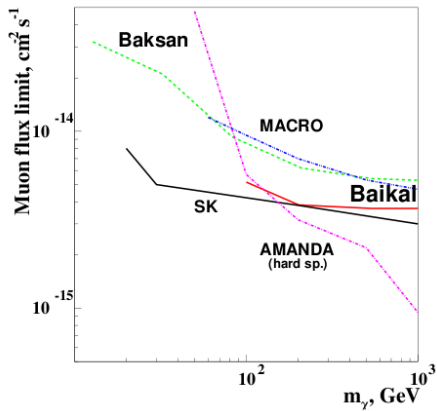
de Boer et al (2005)

Данные EGRET и Fermi-LAT

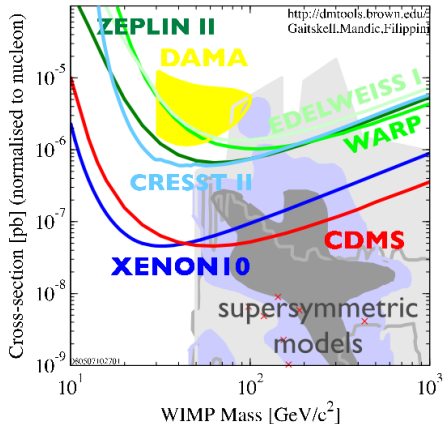


Fermi-LAT collaboration (2009)

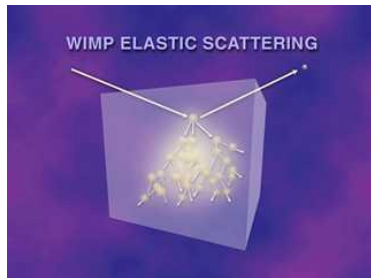
Ограничения нейтринных телескопов



Поиски темной материи в подземных лабораториях

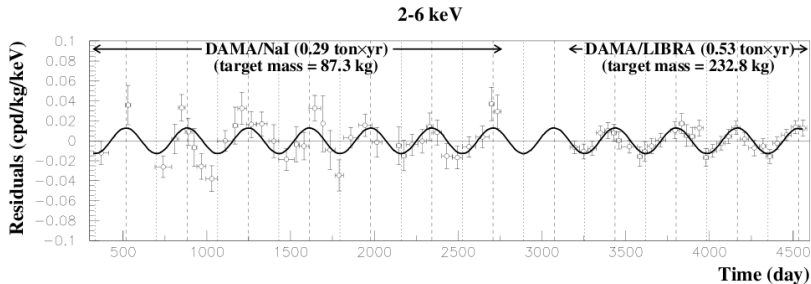


Ожидается 1 событие в день на
10 кг вещества детектора



Все на глубине 1 км

DAMA (Gran Sasso)



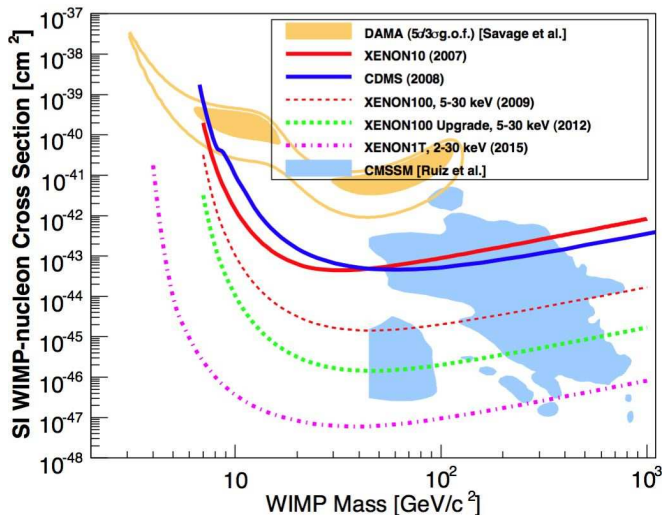
Значимость 8σ

Период 365 дней

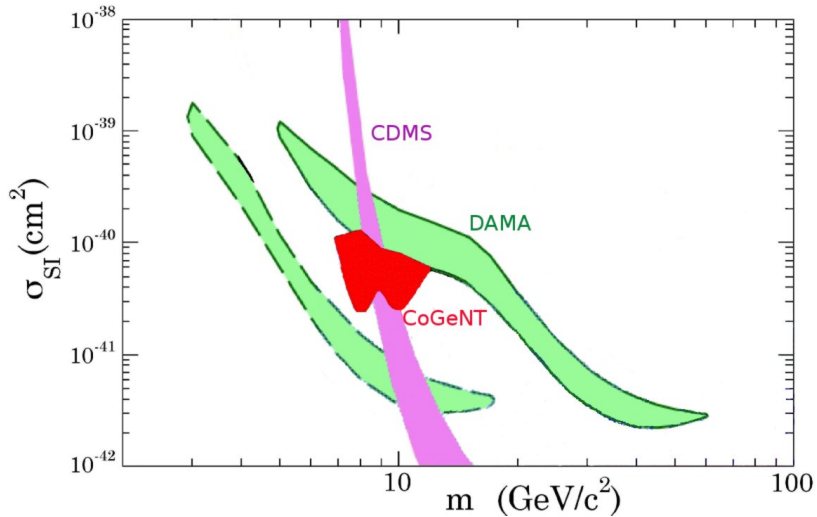
Максимум 2 июня

Поиск темной материи в подземных лабораториях

Статус и перспективы



Сигнал?



CoGeNT Collaboration, 2010

- Какая модель лучше или на худой конец менее спекулятивна ?
- На такой вопрос нет ответа. Но мы можем надеяться, что Природа добра к нам и ответ будет найден экспериментально.

	кандидат	масса
▶	Гравитон	10^{-21} eV
▶	Аксион	10^{-5} eV
▶	Стерильное нейтрино	10 keV
▶	Зеркальное вещество	1 GeV
▶	WIMP	100 GeV
▶	WIMPZILLA	10^{13} GeV

Гравитоны как скрытое вещество

Загадочное соотношение $\Omega_m \sim \Omega_{DM} \sim \Omega_\Lambda$ мотивирует поиски модифицированной гравитации. В таких моделях вообще говоря появляются массивные гравитоны. Последовательная теория массивной гравитации построена и требует нарушения лоренц-симметрии.

Rubakov (04), Dubovsky (04)

Законы тяготения не меняются, но тензорные возмущения приобретают массу.

Тензорные моды возбуждаются во время инфляции

$$\ddot{u}_k + \left[k^2 - \frac{\ddot{a}}{a} \right] u_k = 0$$

Starobinsky (79)

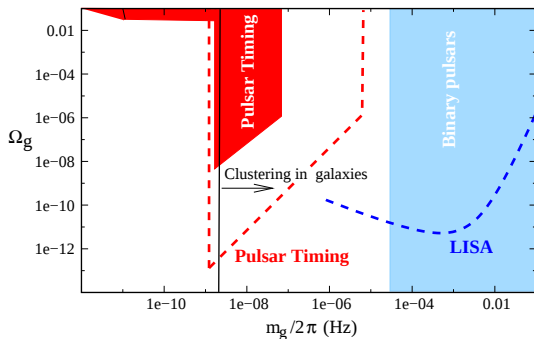
Rubakov, Sazhin & Veryaskin (82)

и ведут себя как холодное скрытое вещество при $H(t) < m_g$

$$\Omega_g \sim 10^4 \left(\frac{m_g}{10^{-5} \text{Hz}} \right) \left(\frac{H_i}{\Lambda} \right)^4$$

Dubovsky, Tinyakov, & I.T. (2004)

Гравитоны как скрытое вещество



Такое темное вещество
произведет
монохроматический
сигнал в детекторах
гравитационных волн

$$\frac{F_i}{M} = \frac{1}{2} \ddot{h}_{ij} x^j$$

Закрашенные области параметров (массы гравитона и вклад в Ω)
исключены наблюдениями.

Dubovsky, Tinyakov, & I.T. (2004)

Лагранжиан КХД нарушает CP

$$\mathcal{L}_{CP} = -\frac{\alpha_s}{2\pi} \bar{\theta} \vec{E}_{\text{color}} \cdot \vec{B}_{\text{color}}$$

Как следствие у нейтрона должен возникать электрический дипольный момент

$$\frac{d_n}{e \text{ cm}} \approx 10^{-16} \bar{\theta} < 10^{-25}$$

$$\bar{\theta} < 10^{-9}$$

Почему $\bar{\theta}$ так мала?

CP проблема

Лагранжиан КХД нарушает CP

$$\mathcal{L}_{CP} = -\frac{\alpha_s}{2\pi} \bar{\theta} \vec{E}_{color} \cdot \vec{B}_{color}$$

Как следствие у нейтрона должен возникать электрический дипольный момент

$$\frac{d_n}{e \text{ cm}} \approx 10^{-16} \bar{\theta} < 10^{-25}$$

$$\bar{\theta} < 10^{-9}$$

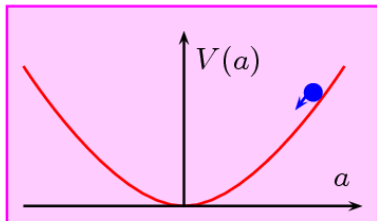
Почему $\bar{\theta}$ так мала?

CP проблема

Решение

Peccei+Quinn, Weinberg, Wilczek (1977)

$$\bar{\theta} \Rightarrow \frac{a(x)}{f_a}$$



$$\bar{\theta} = 0$$

Лагранжиан КХД нарушает CP

$$\mathcal{L}_{CP} = -\frac{\alpha_s}{2\pi} \bar{\theta} \vec{E}_{\text{color}} \cdot \vec{B}_{\text{color}}$$

Как следствие у нейтрона должен возникать электрический дипольный момент

$$\frac{d_n}{e \text{ cm}} \approx 10^{-16} \bar{\theta} < 10^{-25}$$

$$\bar{\theta} < 10^{-9}$$

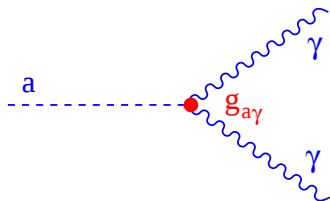
Почему $\bar{\theta}$ так мала?

CP проблема

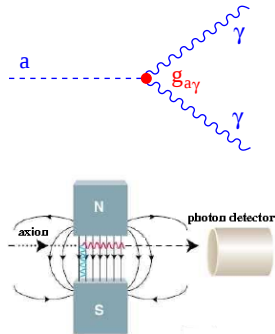
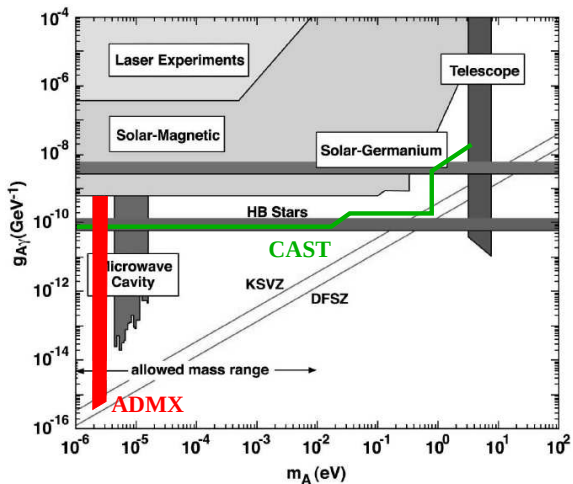
Связь аксиона с фотонами

$$g_{a\gamma} a \vec{E} \cdot \vec{B}$$

$$g_{a\gamma} = \frac{\alpha}{\pi} \frac{O(1)}{f_a}$$



Ограничения на параметры аксиона



Sikivie (83)

ADMX Collaboration (2009)

CAST Collaboration (2009)

Стерильные нейтрино

После минимального расширения Стандартной Модели с включением правых нейтрино N_j , $j = 1, 2, 3$

$$\mathcal{L}_{\nu\text{MSM}} = \mathcal{L}_{\text{MSM}} + i\bar{N}_j \partial_\mu \gamma^\mu N_j - \left(\bar{L}_\alpha M_{\alpha j}^D N_j + \frac{M_j}{2} \bar{N}_j^c N_j + \text{h.c.} \right)$$

появляется возможность объяснения ряда наблюдательных фактов:

Asaka & Shaposhnikov (05)

- Ненулевой массы нейтрино и осцилляций

- Скрытого вещества

Dodelson & Widrow (94)

Asaka, Blanchet & Shaposhnikov (2005)

- Барионной асимметрии Вселенной

Akhmedov, Rubakov & Smirnov (98)

Asaka & Shaposhnikov (05)

Стерильные нейтрино

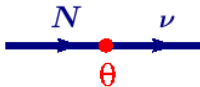
После минимального расширения Стандартной Модели с включением правых нейтрино N_j , $j = 1, 2, 3$

$$\mathcal{L}_{\nu\text{MSM}} = \mathcal{L}_{\text{MSM}} + i\bar{N}_j \partial_\mu \gamma^\mu N_j - \left(\bar{L}_\alpha M_{\alpha j}^D N_j + \frac{M_j}{2} \bar{N}_j^c N_j + \text{h.c.} \right)$$

появляется возможность объяснения ряда наблюдательных фактов:

Важный параметр - смешивание активных и стерильных нейтрино

$$\theta^2 = \frac{1}{M_1^2} \sum_{\alpha=e\mu\tau} |M_{1\alpha}^D|^2$$



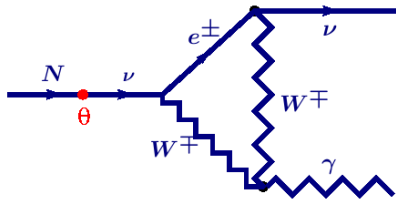
Свечение темной материи

- Энергия фотона:

$$E_\gamma = \frac{M_1}{2}$$

- Ширина:

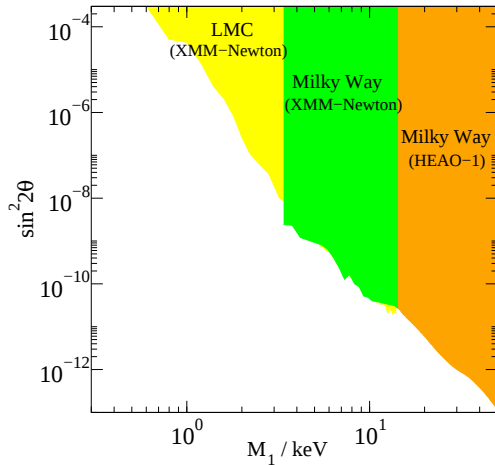
$$\Gamma = \frac{9\alpha_{\text{EM}} G_F^2}{256\pi^4} \theta^2 M_1^5$$



Скрытое вещество не будет абсолютно темным, если состоит из стерильных нейтрино.

Dolgov & Hansen (2000)

Ограничения на параметры стерильных нейтрино

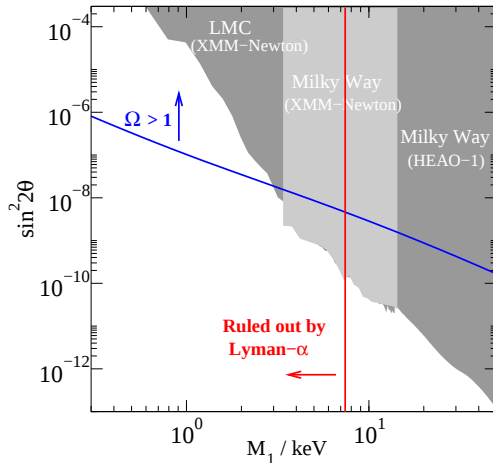


Ограничения из свечения в
рентгеновском диапазоне

Оптимальные объекты для поиска линии распада
- карликовые галактики

Boyarsky, Neronov, Ruchayskiy, Shaposhnikov & I. T. (2006)

Ограничения на параметры стерильных нейтрино



← $\Omega_{\nu_s} > 1$ в осцилляциях
активных нейтрино в
стерильные.

Asaka, Laine & Shaposhnikov (06)

В распадах инфлатона
правильное значение Ω_{ν_s}
получается независимо от θ

Shaposhnikov & I.T. (06)

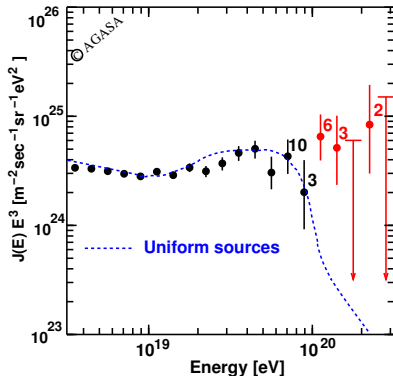
Ограничения из Ly_α

Seljak et al (06); Viel et al (06)

◀ back

Сверхтяжелое скрытое вещество

WIMPZILLA



События с энергией превышающей предел Грейзена-Зацепина-Кузьмина можно объяснить распадами сверхтяжелых частиц с

$$m_{\text{SH}} \sim 10^{13} \text{ ГэВ}$$

Kuzmin & Rubakov (1997)

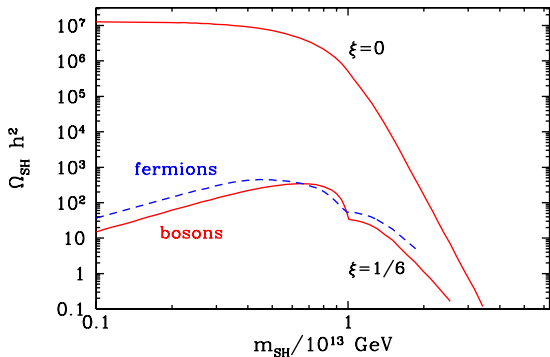
Berezinsky, Kachelriess & Vilenkin (1997)

Гравитационное рождение

Плотность числа рожденных
конформных частиц

$$n \sim m_{\text{sh}}^3$$

(фермионы или скаляры
с $\xi = \frac{1}{6}$, где $\mathcal{L} = \frac{1}{2}\xi R\varphi^2$)



Допустимый вклад в плотность

Chung, Kolb & Riotto (1998)

Kuzmin & I.T. (1998)