

Путешествие в
микромир
с физиком-теоретиком

Тёмная материя:
Энергетический баланс
Вселенной

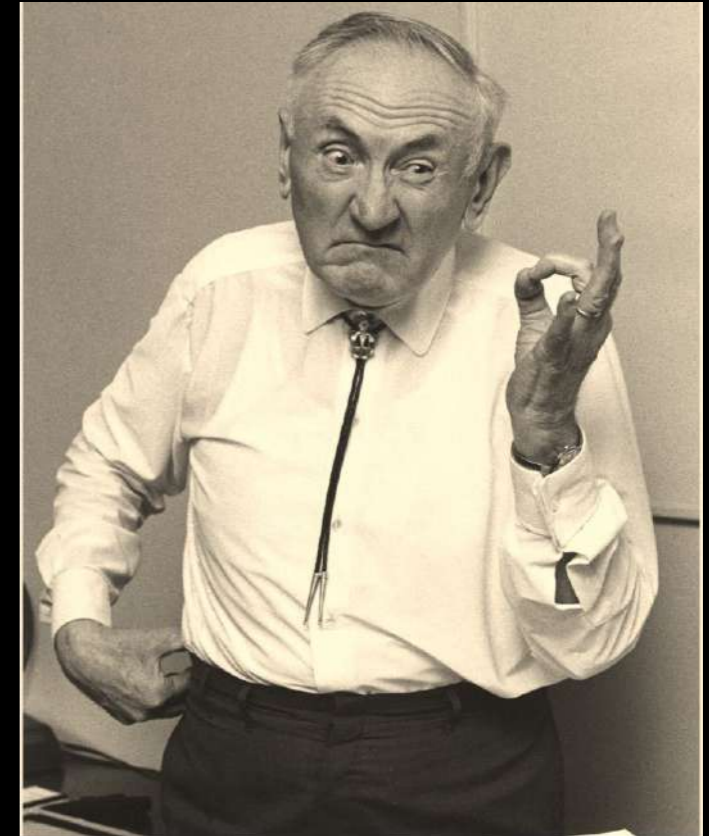
Три вопроса

- Что такое темная материя, и из чего она могла бы состоять?
- Какую роль играет темная материя в энергетическом балансе Вселенной?
- Как ученые ищут проявления темной материи в космосе, под землёй и на Большом адронном коллайдере?

Гравитационные свидетельства существования темной материи

FRITZ ZWICKY

- Swiss Astrophysicist
- Helped to invent Schmidt Telescope
- Helped to discover neutron stars
- Virial theorem of unseen matter: today known as “dark matter”
- Supernovae as yardstick for deep space measurements



Впервые ввел термины

- **Сверхновая и нейтронные звёзды**
- **Тёмная материя (скрытая масса)**
- **Гравитационные линзы**

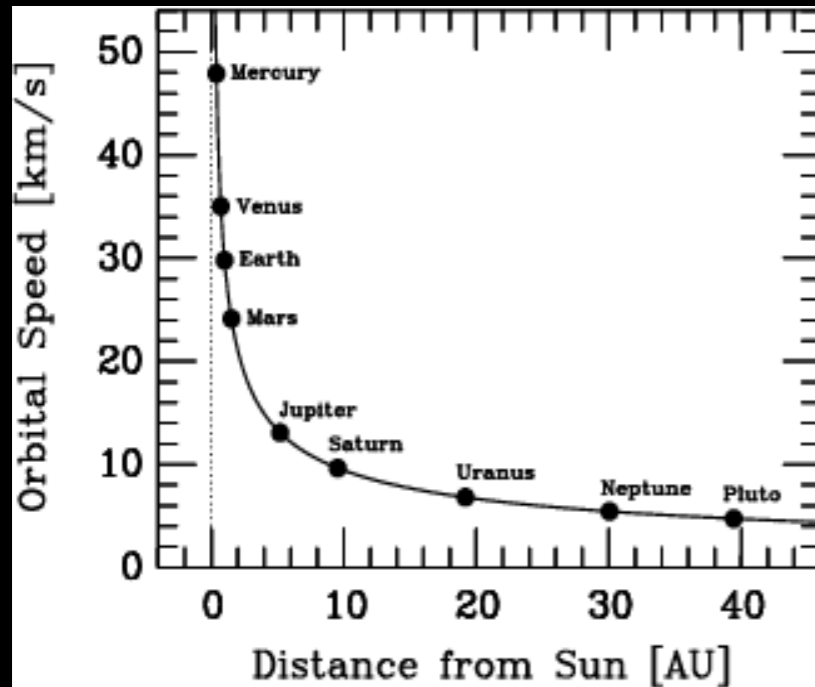
Галактический кластер Кома (1934г.)

Ротационные кривые звёзд

центробежная сила

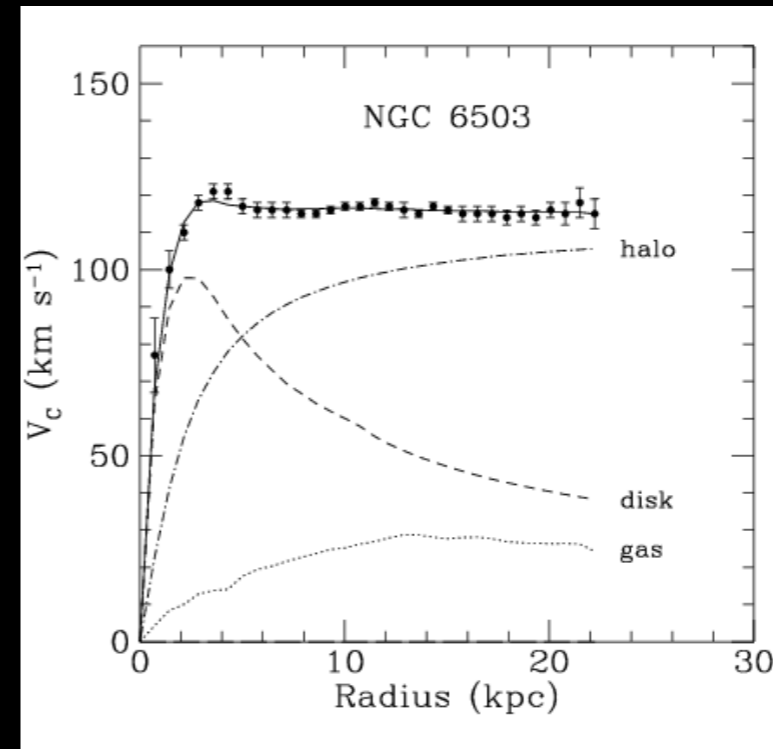
$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2}$$

гравитация



Плотность
тёмной
материи в
солнечной
системе
пренебреж
имо мала

Солнечная система

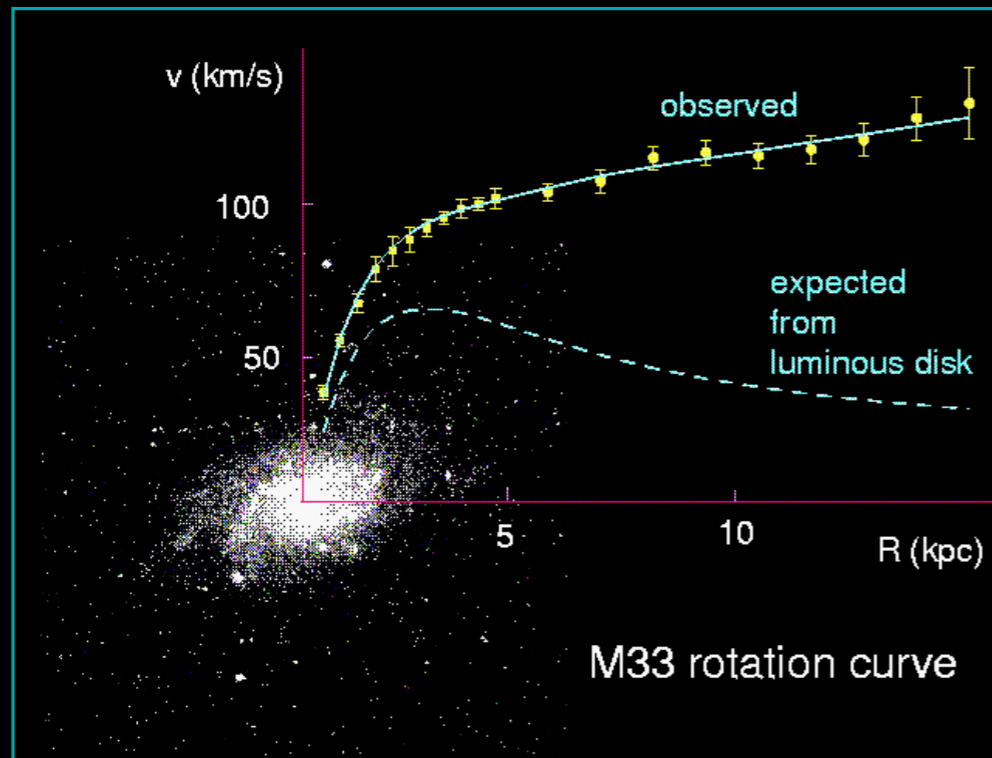


Тёмная
материя
сосредоточе
на на
галактически
х масштабах

Галактика

- В настоящее время известны тысячи ротационных кривых и все они свидетельствуют в пользу существования массы в гало галактики десятикратно превышающей массу звёзд в диске

Тёмная материя в галактике

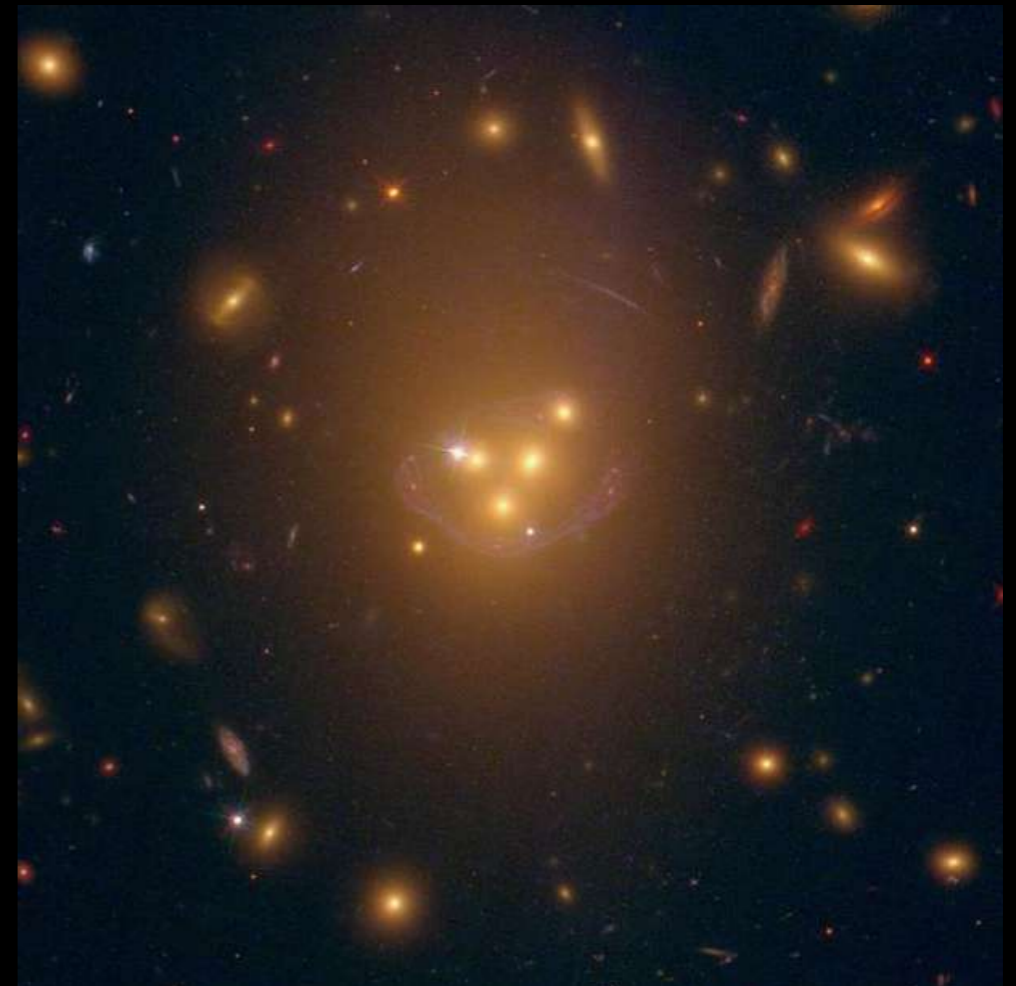
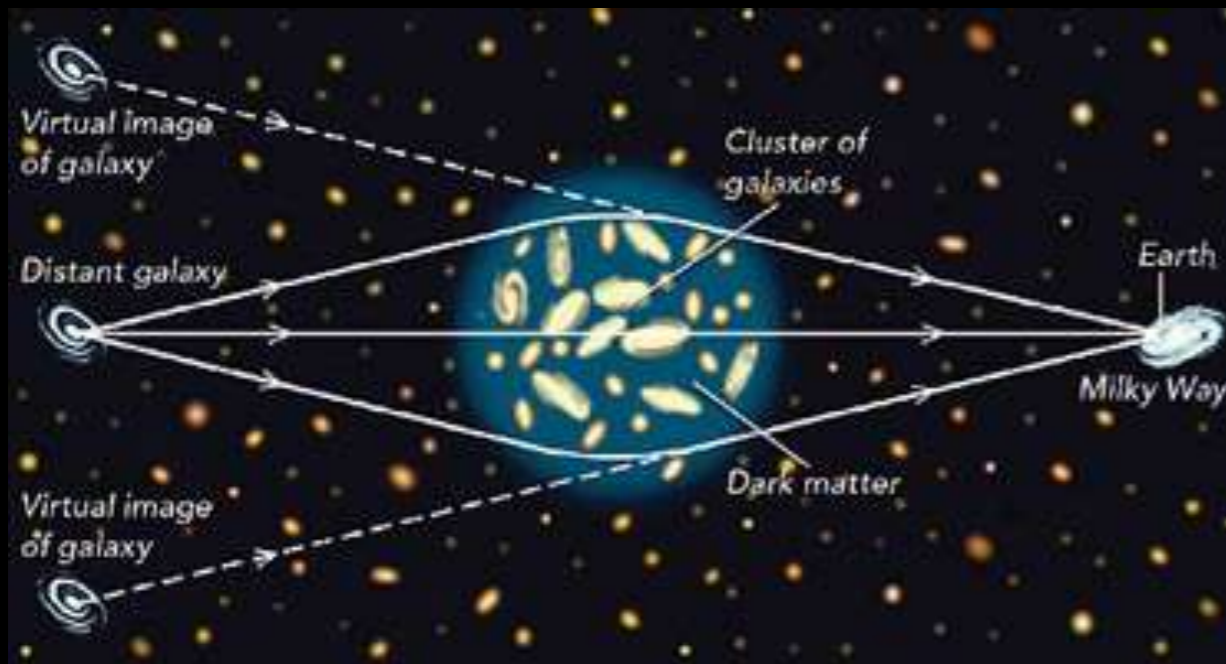


- Плоские ротационные кривые спиральных галактик являются прямым свидетельством наличия большого количества тёмной материи

- Спиральные галактики состоят из центрального ядра и очень тонкого диска и окружены приблизительно сферическим гало из тёмной материи. Скорость движения частиц гало ~ 300 км/сек



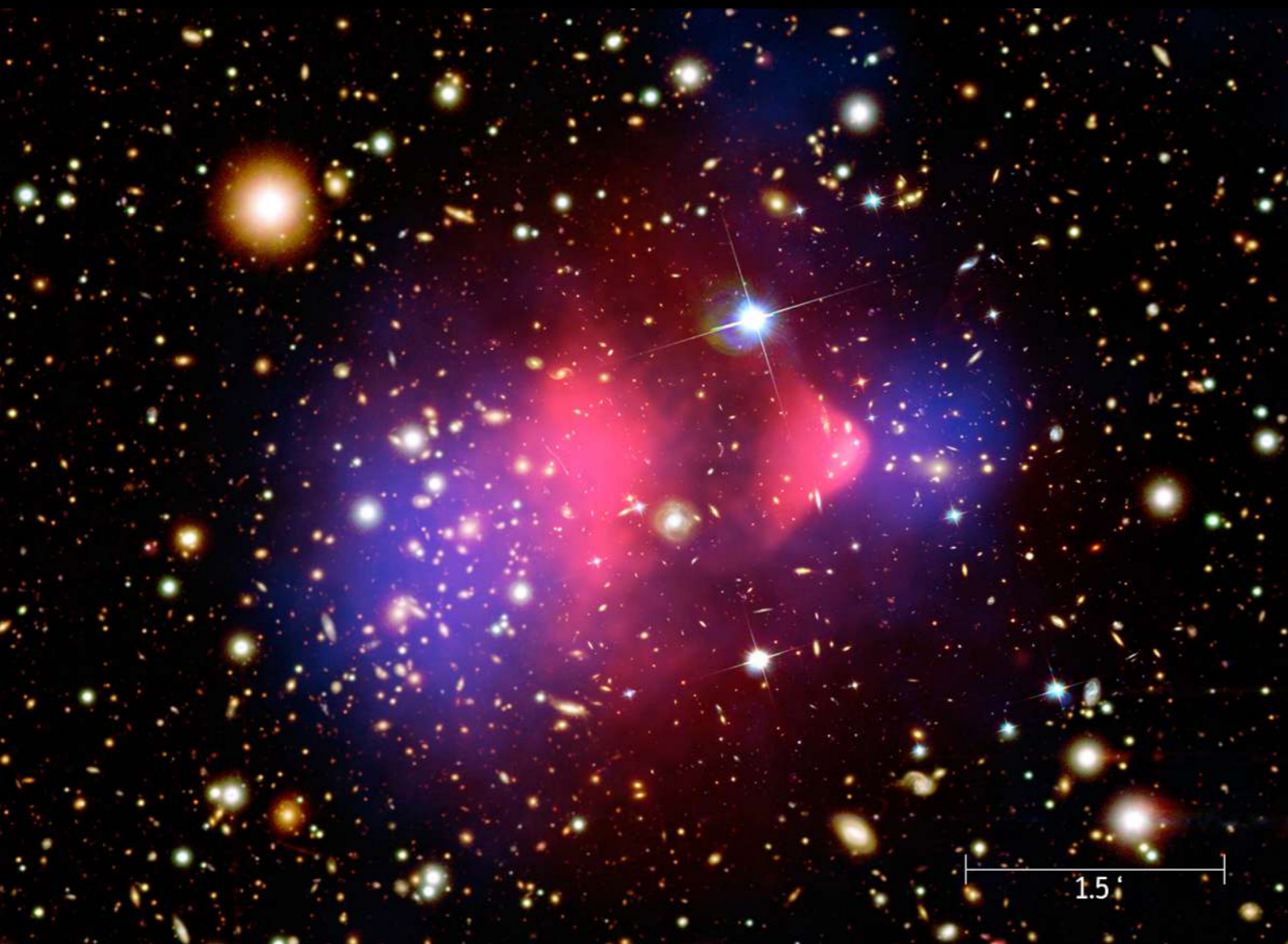
Гравитационные линзы



Следствие ОТО: отклонение света в гравитационном поле

Образования виртуального изображения удалённой галактики за счёт отклонения световых лучей тёмной материей находящейся между галактикой и наблюдателем

Наблюдение темной материи

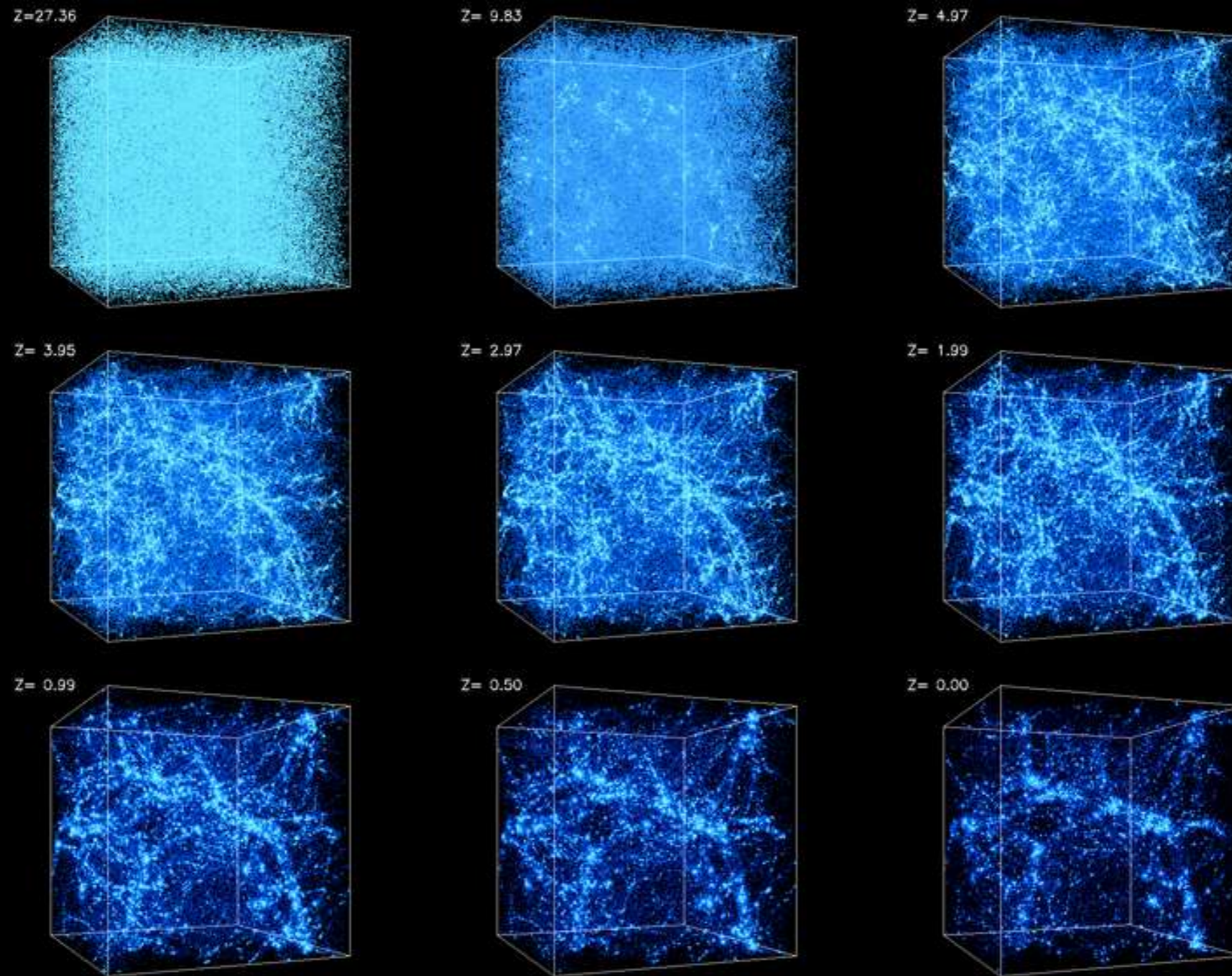


Bullet кластер: Распределение масс реконструированных из сильного и слабого гравитационного линзирования показано синим, рентгеновское излучение горячего газа, наблюдаемое телескопом Чандра показаны красным цветом.

Самое прямое наблюдательное доказательство исходит от Bullet кластера. В большинстве регионов темная и видимая материи находятся вместе из-за их гравитационного притяжения. В Bullet кластере они разошлись из-за прошлых столкновений между двумя небольшими кластерами. Электромагнитные взаимодействия между частицами газа привело к концентрации газа вблизи места соударения.

Рентгеновские наблюдения показывают, что большую часть светящейся материи сконцентрирована в центре кластера. Гравитационное линзирование показывает, что темная материя находится за пределами центрального региона. В отличие от галактических кривых вращения, эти доказательства не зависят от деталей Ньютонской гравитации, напрямую поддерживая гипотезу темной материи.

Образование крупномасштабных структур во Вселенной



Сначала происходит образование структур из тёмной материи, а потом в гравитационном потенциале образованным тёмной материей происходит концентрация обычной материи

Космологические проявления тёмной материи

Кривизна Вселенной

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

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_{crit}}$$

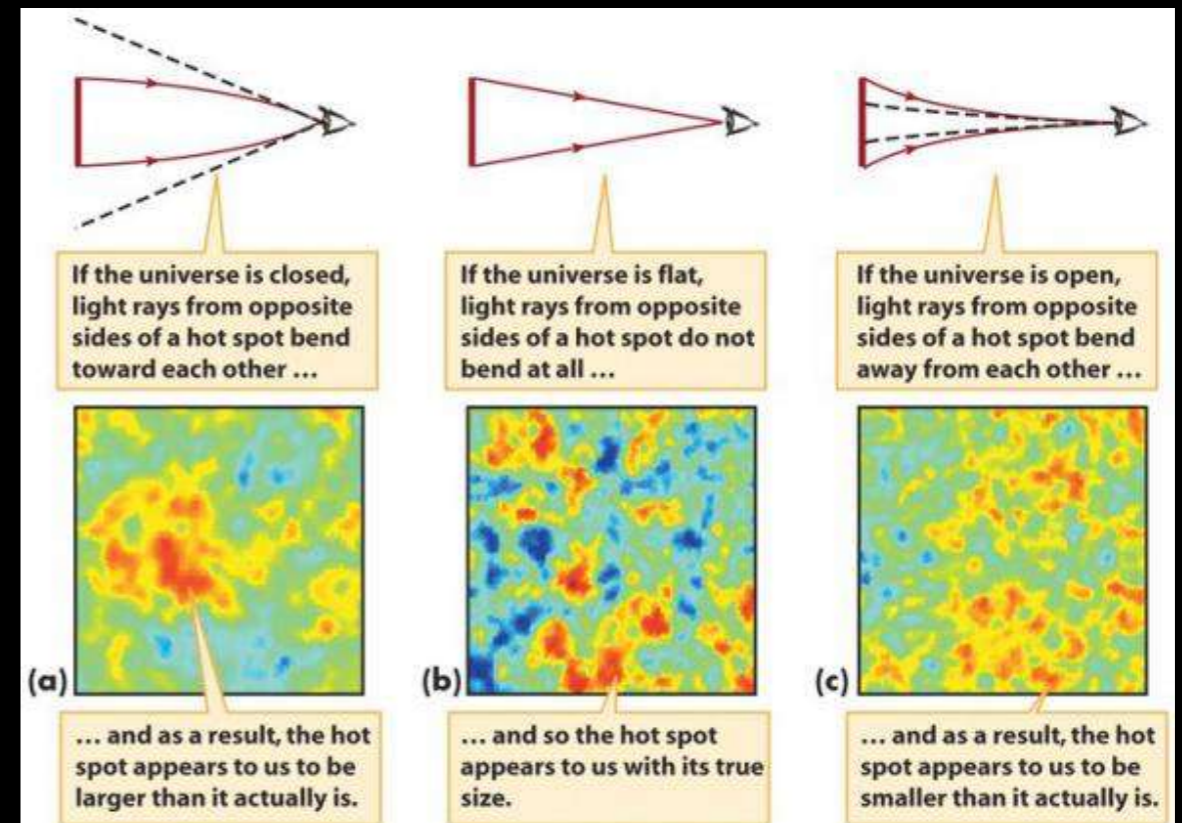
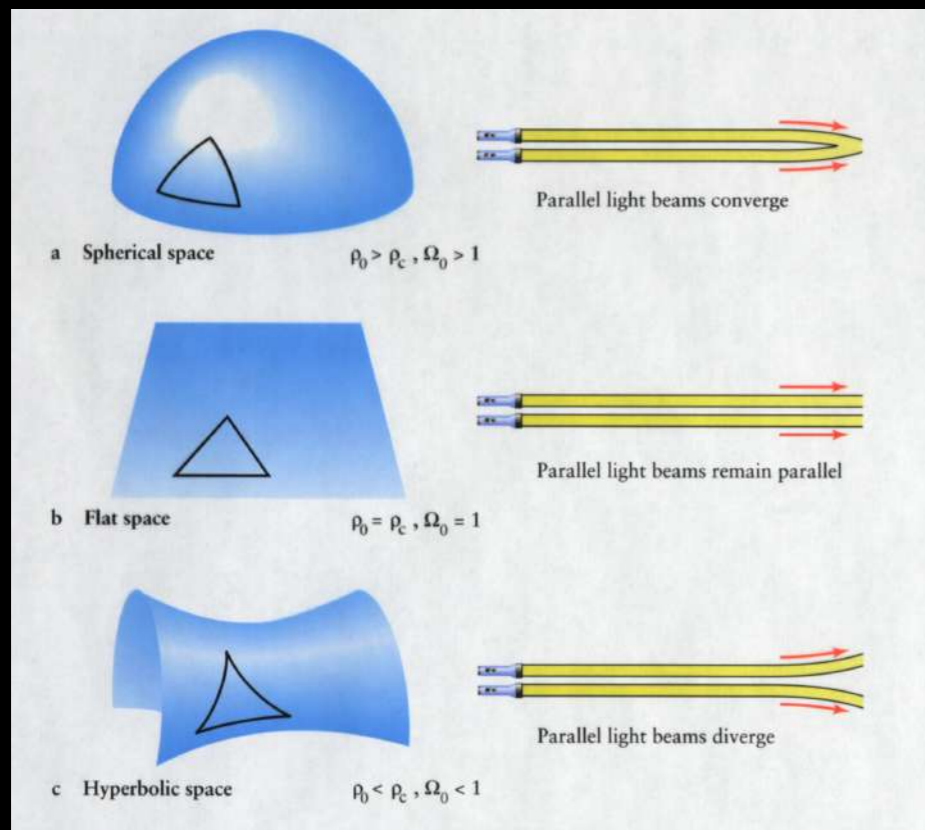
$$\Omega = \Omega_M + \Omega_\Lambda$$

H-постоянная Хаббла

$$\rho_{crit} = 1.05 \cdot 10^{-5} \text{ GeV}/\text{cm}^3$$

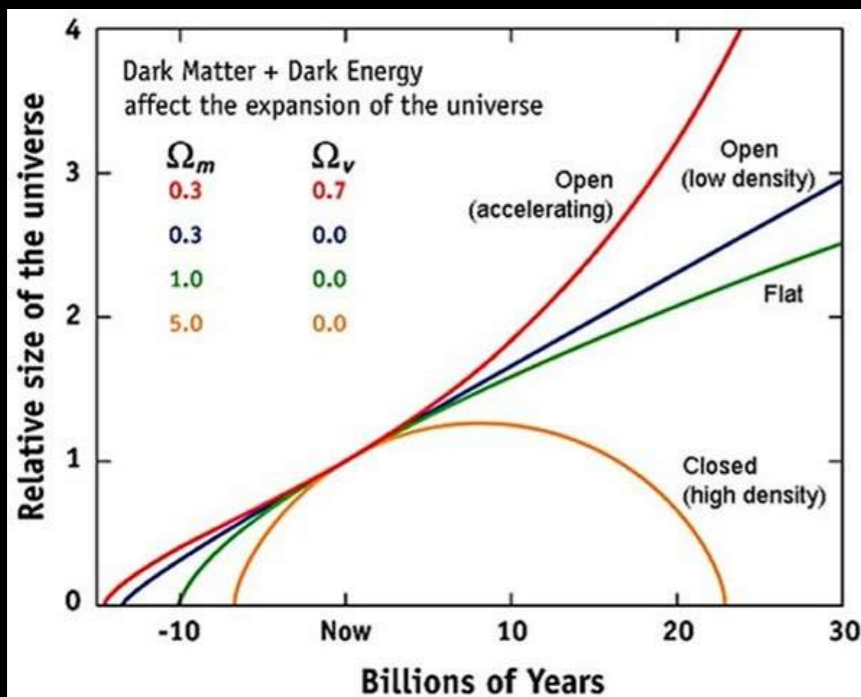
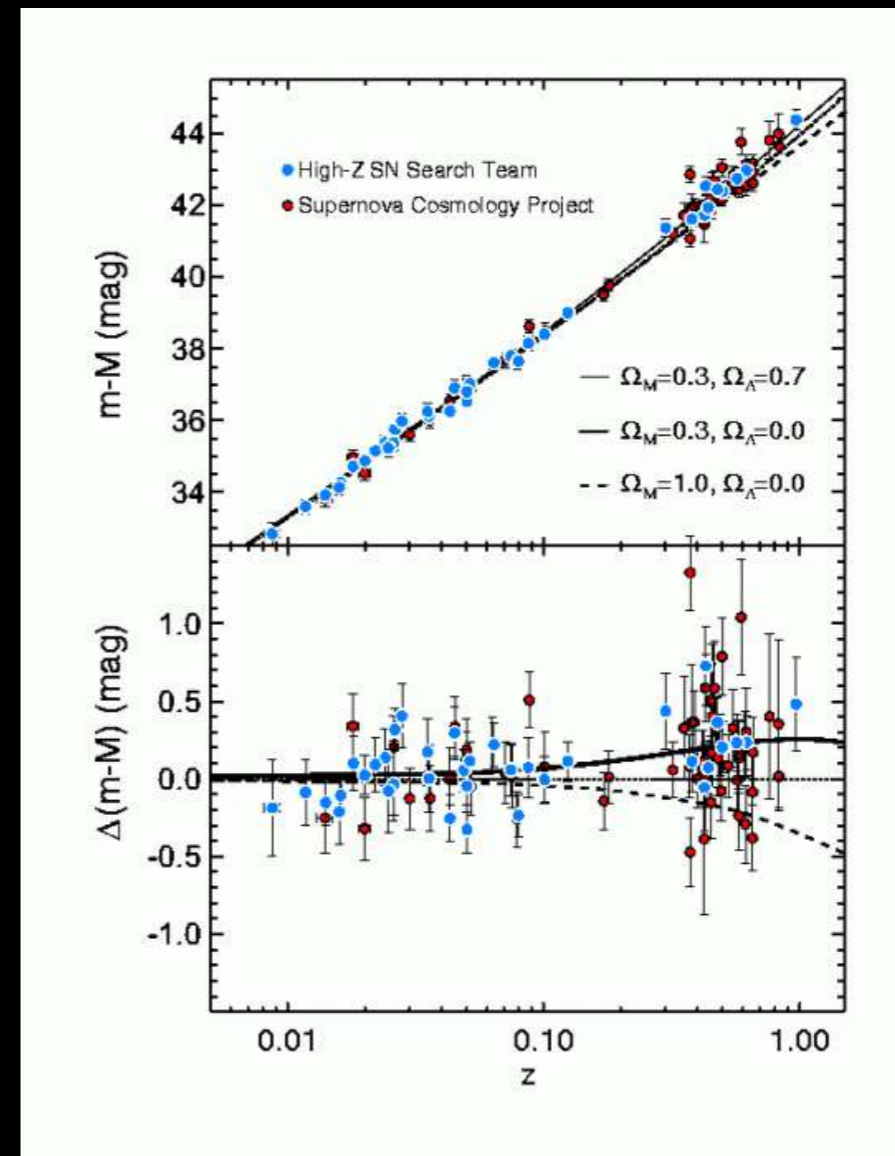
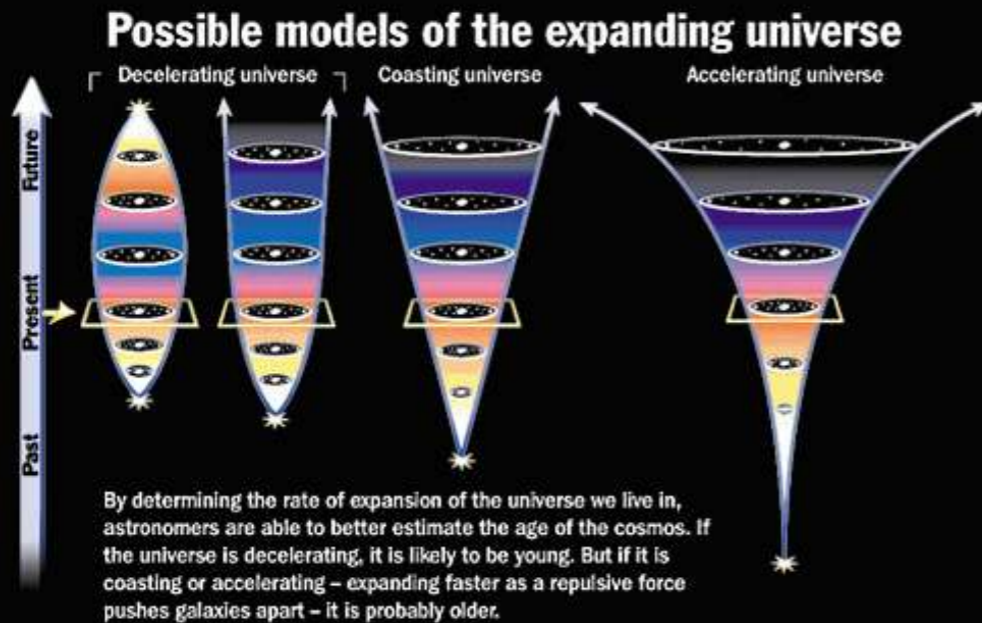
G-постоянная всемирного тяготения

$$\Omega = 1.02 \pm 0.02$$

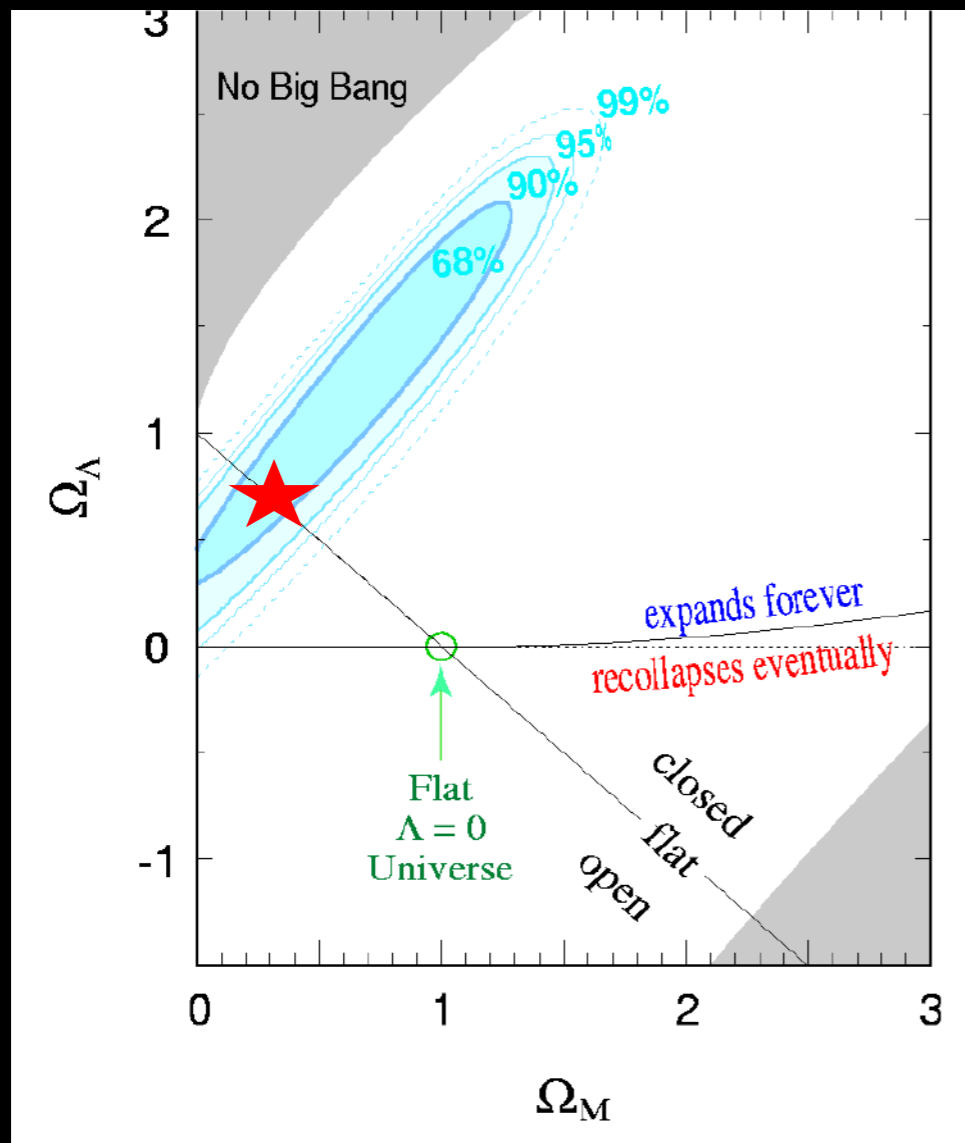


Космологические проявления тёмной материи

Ускоренное расширение Вселенной



Космологические проявления тёмной материи



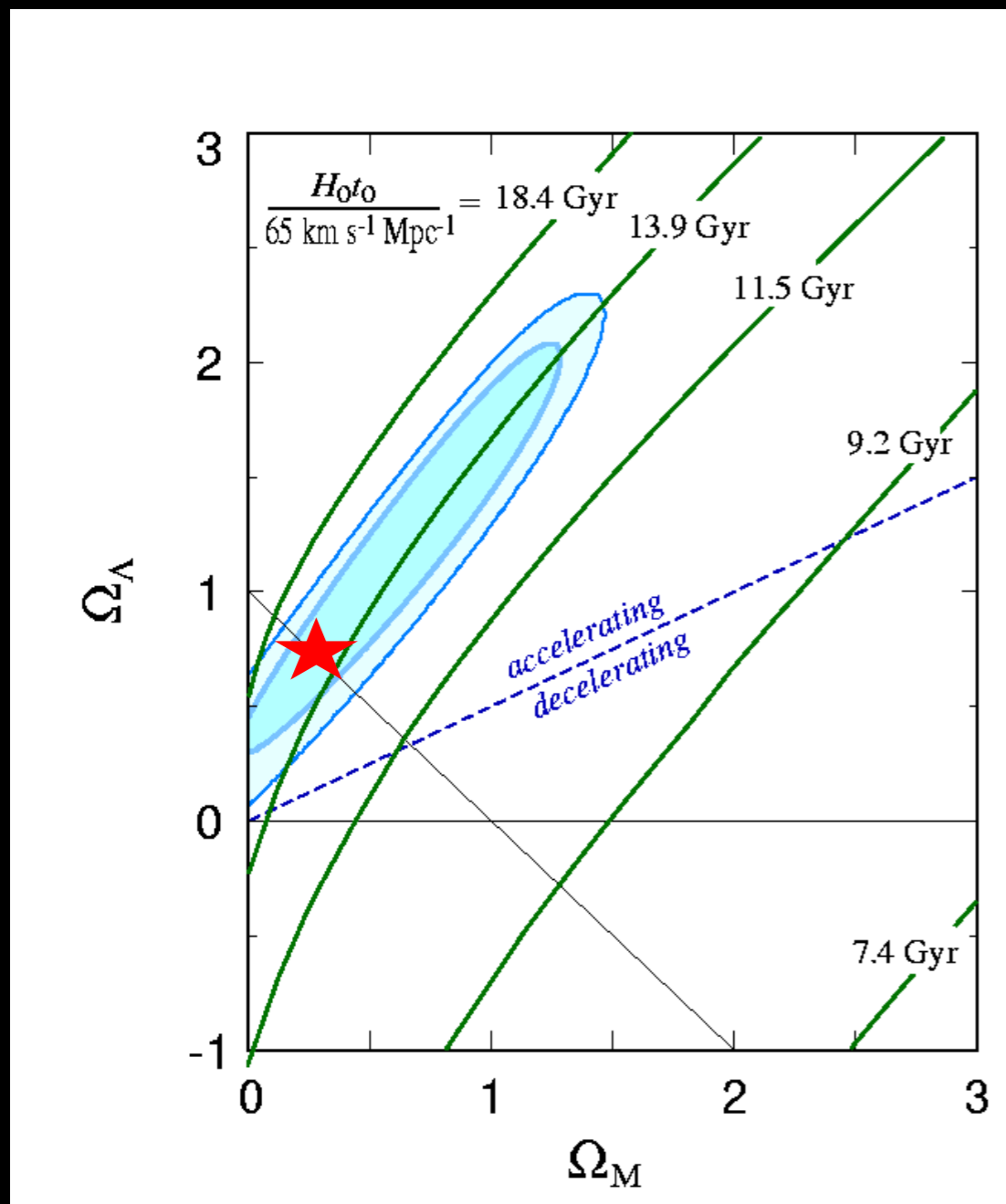
Наилучший фит данных
по СВЕРХНОВЫМ С
вероятностью 68%-99%
В ПЛОСКОСТИ

$$\Omega_\Lambda, \Omega_M$$

$$\Omega_M = 0.28 \quad \begin{matrix} +0.09 & +0.05 \\ -0.08 & -0.04 \end{matrix}$$

$$\Omega_\Lambda = 0.72 \quad \begin{matrix} +0.08 & +0.04 \\ -0.09 & -0.05 \end{matrix}$$

Космологические проявления тёмной материи



Изохронные кривые
возраста Вселенной
в плоскости

$$\Omega_\Lambda, \Omega_M$$

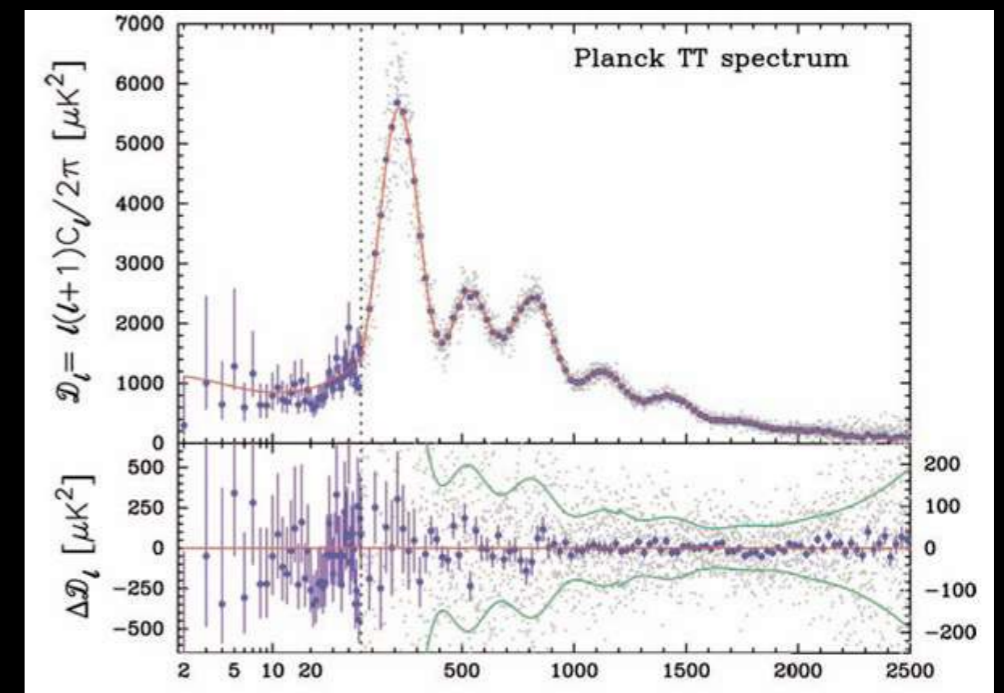
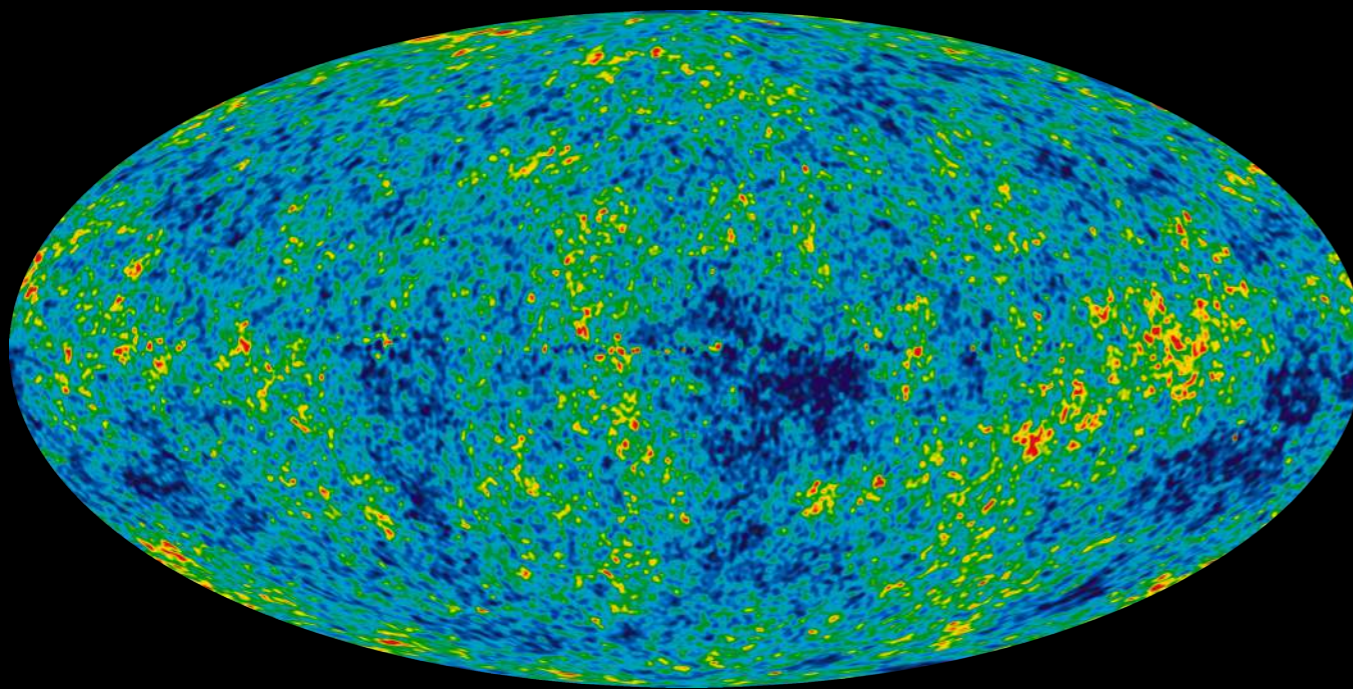
Наилучший фит даёт для времени
жизни Вселенной

$$14.4^{+1.4}_{-1.1} (0.65 h^{-1}) \text{ Gyr}$$

Реликтовое микроволновое излучение

Реликтовое излучение $T \approx 2.7\text{K}^\circ$

Разложение по угловым гармоникам



Температурные флуктуации микроволнового фона

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



$$\Omega_{UsualMatter} = 4.9\%$$

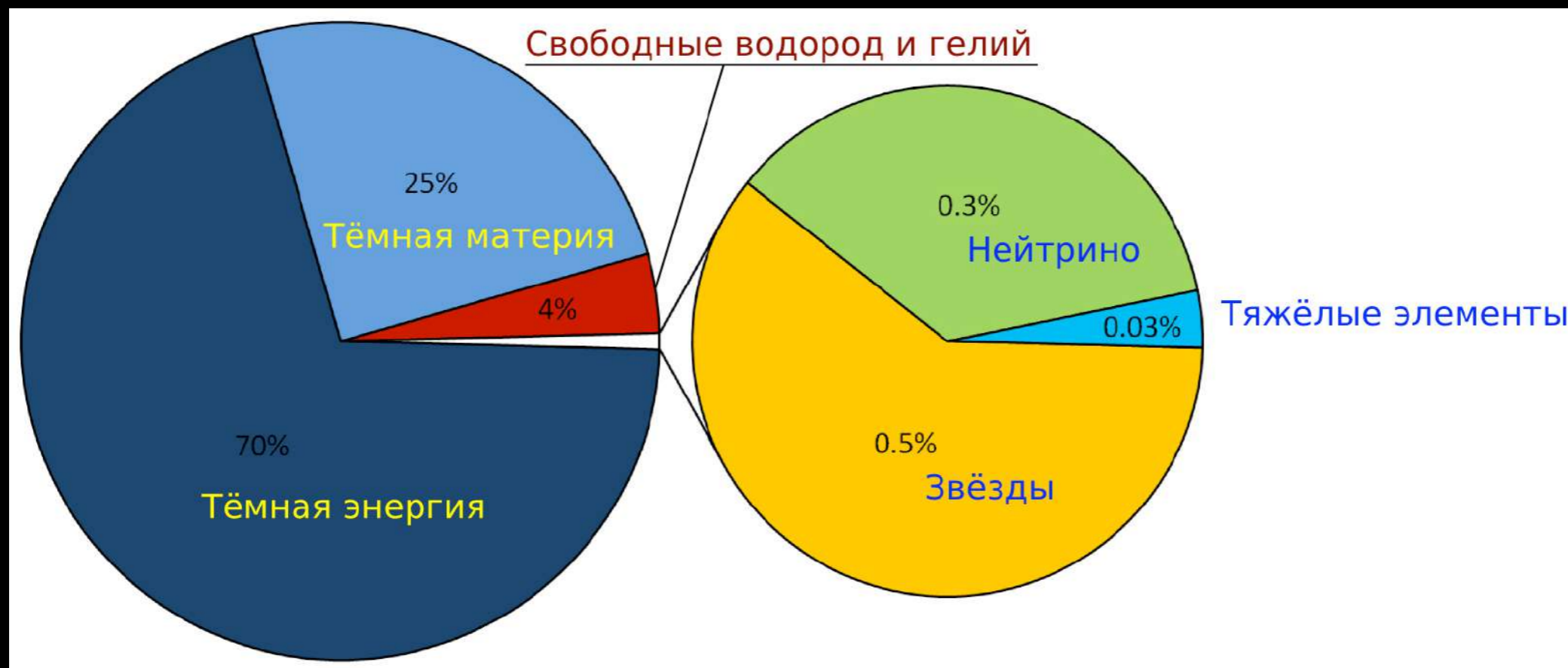
$$\Omega_{DarkMatter} = 26.8\%$$

$$\Omega_{DarkEnergy} = 68.3\%$$

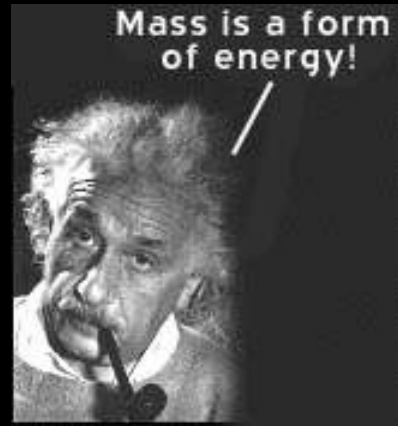
$$\Omega = 1.02 \pm 0.02$$

Энергетический баланс Вселенной

- Температурные флуктуации микроволнового фона
- Взрывы сверхновых



Наше знание касается лишь малой части Вселенной, однако возможно нам известны 99% (50%) элементарных частиц



Общая теория Относительности и Тёмная энергия

$$\begin{array}{c}
 R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^2}T_{\mu\nu} \quad \rightarrow \quad R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + g_{\mu\nu}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^2}T_{\mu\nu} \\
 \uparrow \quad \quad \quad \uparrow \quad \quad \quad \uparrow \quad \quad \quad \uparrow \\
 \text{тензор Риччи} \quad \quad \quad \text{тензор энергии-импульса материи} \quad \quad \quad \text{Космологическая постоянная} \\
 \text{скалярная кривизна}
 \end{array}$$

Космологическая постоянная есть вакуумная энергия = Λ^4

Приводит к антигравитации, что порождает ускоренное расширение Вселенной

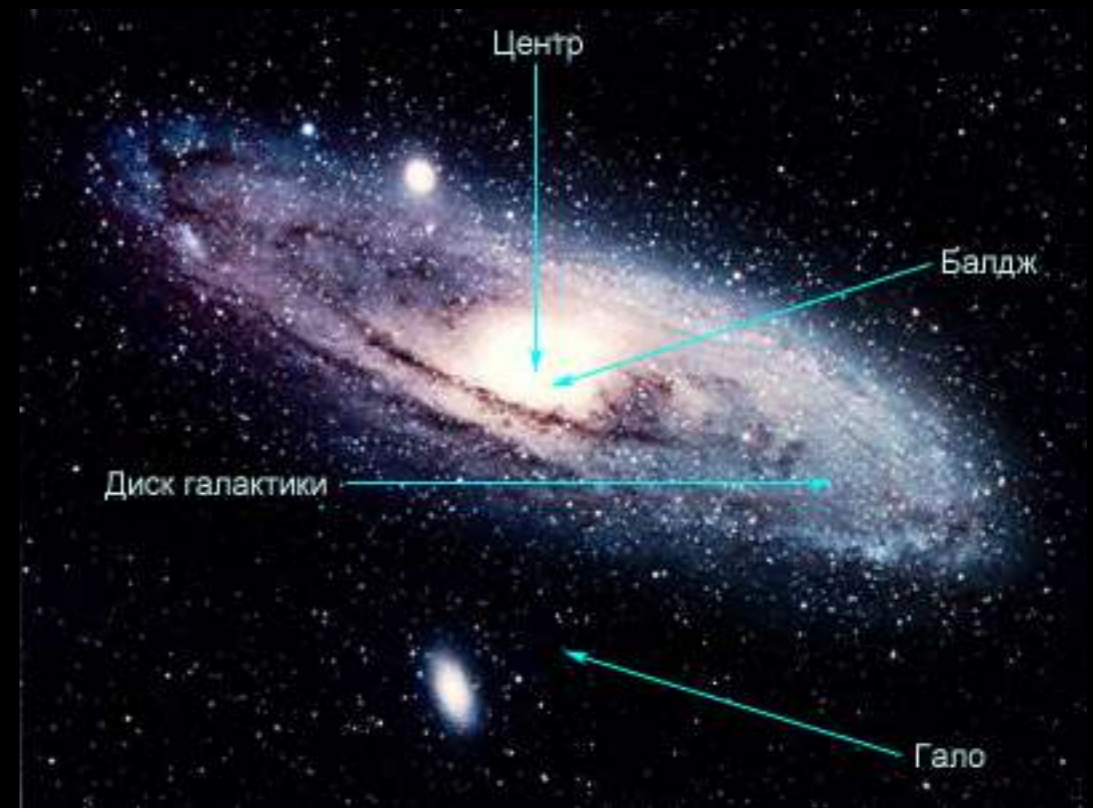
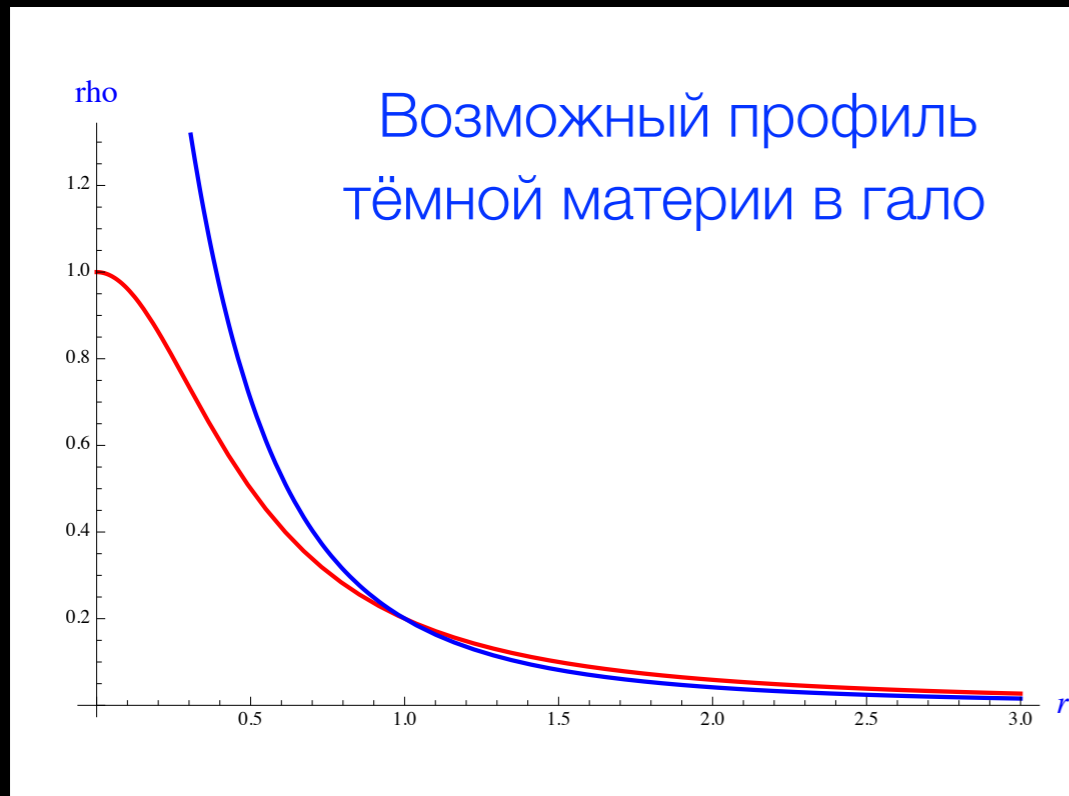
Чтобы получить ~ 70 % вклада в энергетический баланс Вселенной Λ должна быть порядка 10^{-3} эв.

«Естественное» значение космологической постоянной $\sim M_{\text{Planck}}$ привело бы к вакуумной энергии в 10^{123} раз большей

?!

Тёмная материя в гало Галактики

Спиральная галактика

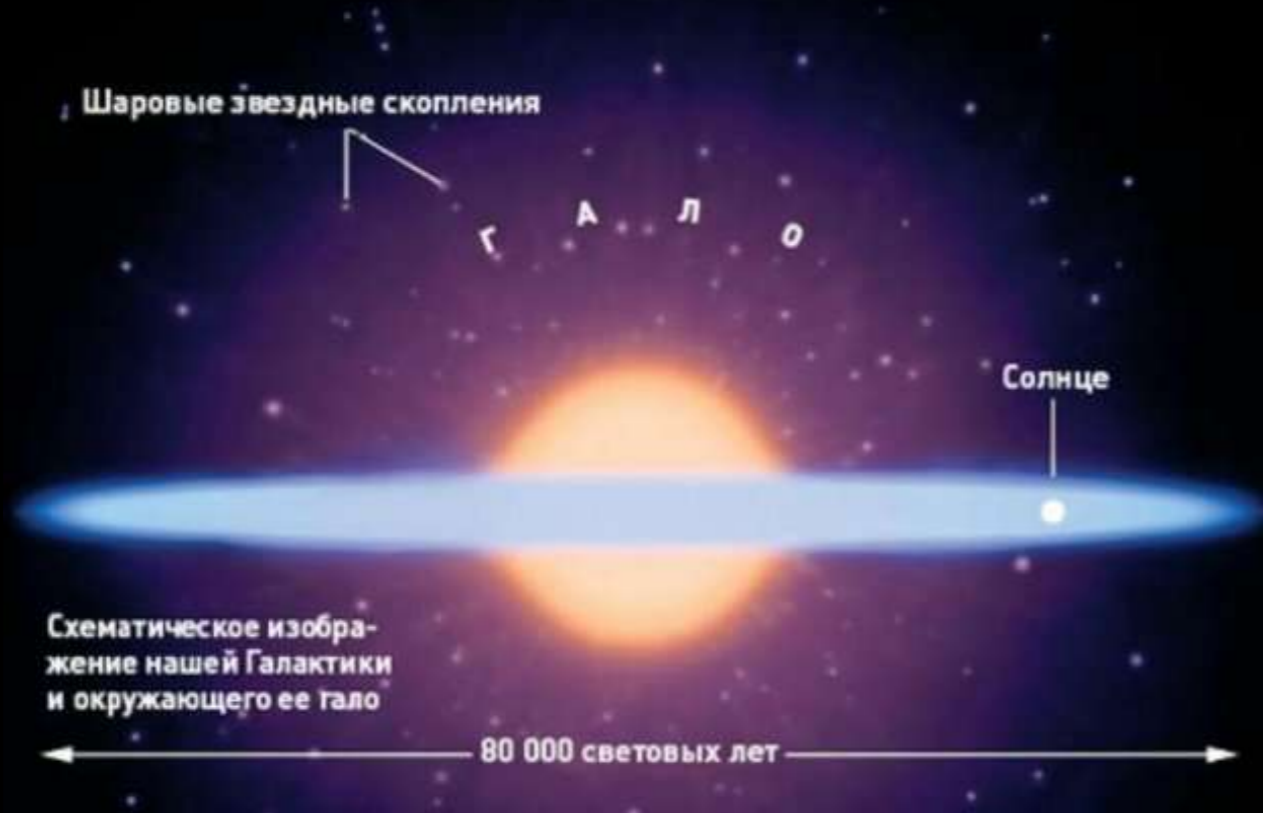


Размер гало в несколько раз превышает видимый размер галактики

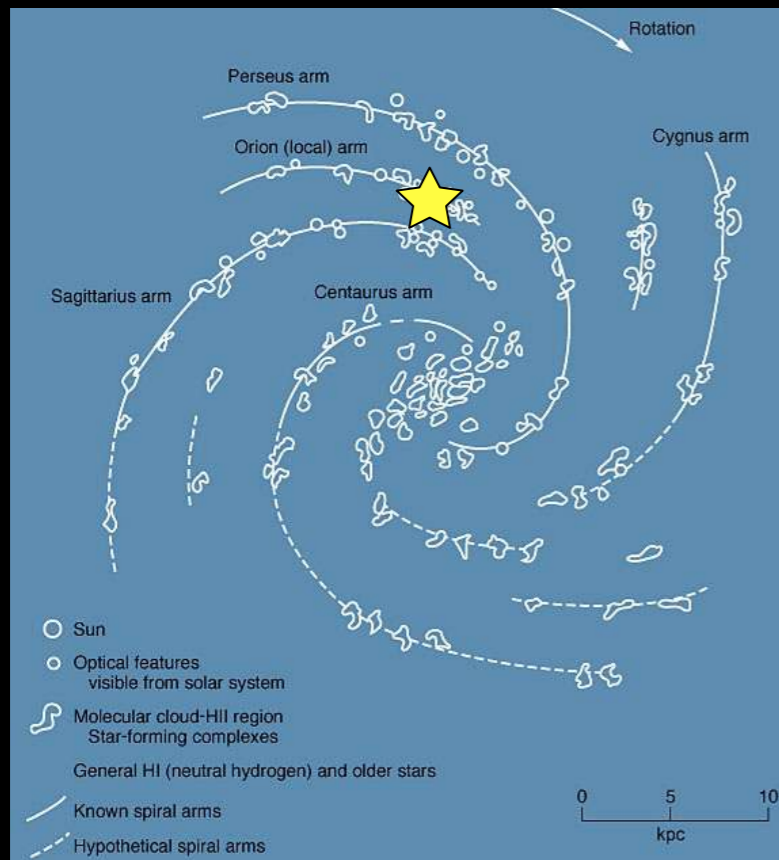
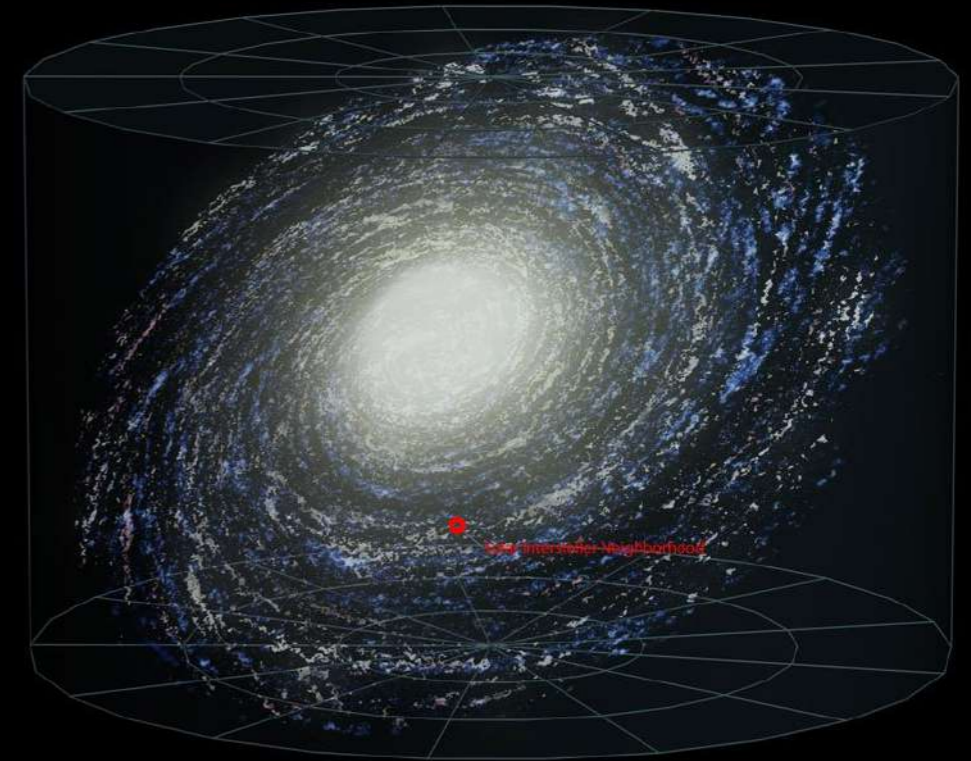
Гало предположительно состоит из частиц движущихся с большими (горячая тёмная материя) или малыми (холодная тёмная материя) скоростями. Они гравитационно заперты в пределах Галактики и не могут потерять энергию на излучение. Образование крупномасштабных структур свидетельствует в пользу холодной тёмной материи $v \sim 300$ км/сек

Млечный путь

Видимая часть



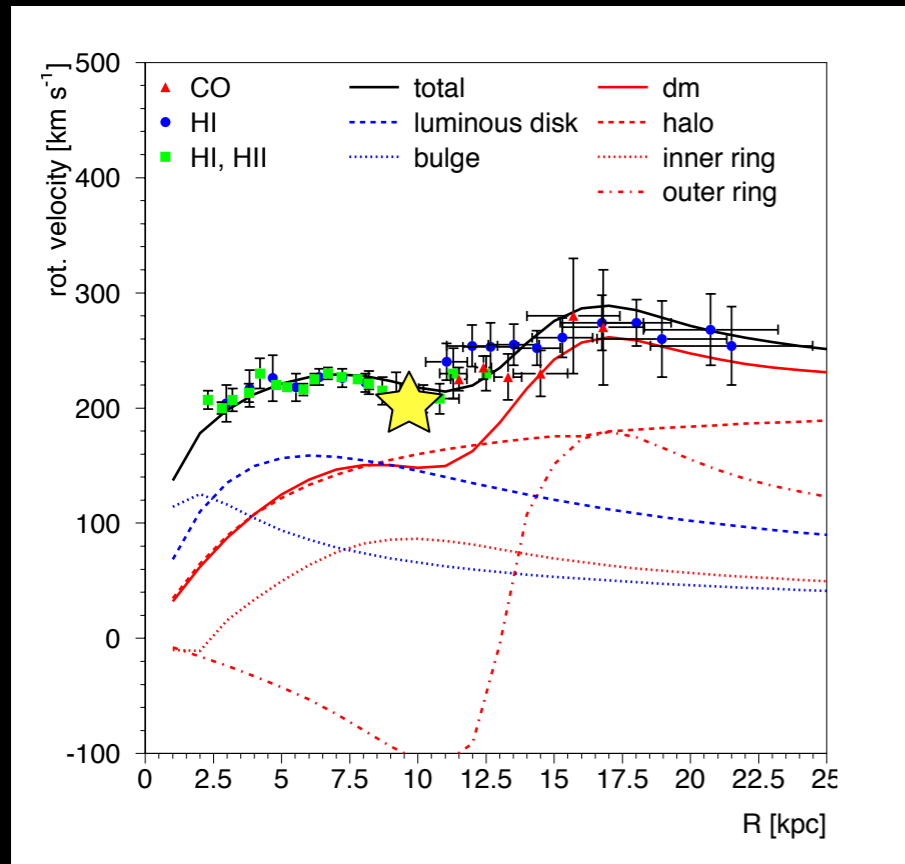
Milky Way Galaxy



Спиральные рукава

Млечный путь - типичная спиральная галактика, представляет собой диск размером около 20 кПс, с центральным сферическим ядром размером около 2 кПс. Солнце расположено в спиральном рукаве Орион на расстоянии ~ 8 кПс от центра

Млечный путь

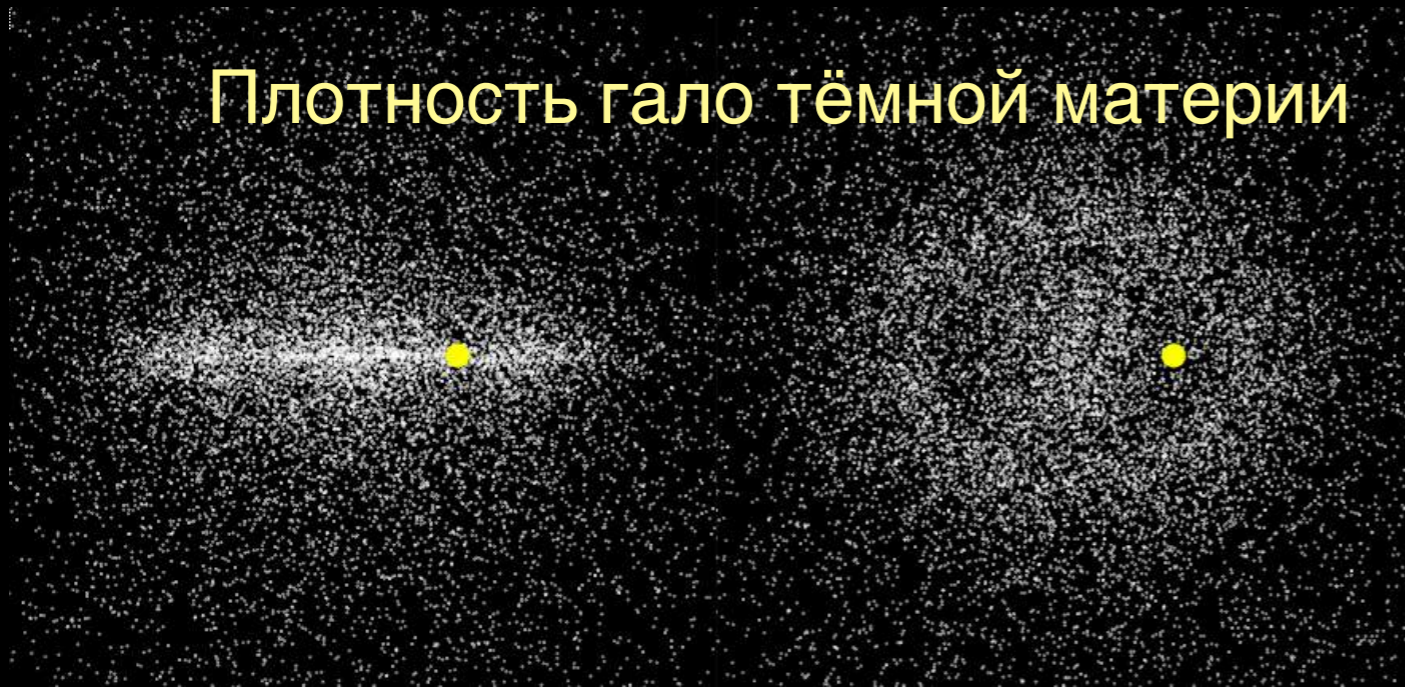


- Скорость вращения Земли вокруг Солнца - 30 км/сек
- Скорость вращения Солнца вокруг центра Галактики - 220 км/сек
- Скорость за счёт притяжения видимой материи - 175 км/сек
- Плотность ТМ в районе Солнца - 0.3 ГэВ/см^3

Сталкивающиеся спиральные галактики Арп 271

Кривая вращения звёзд

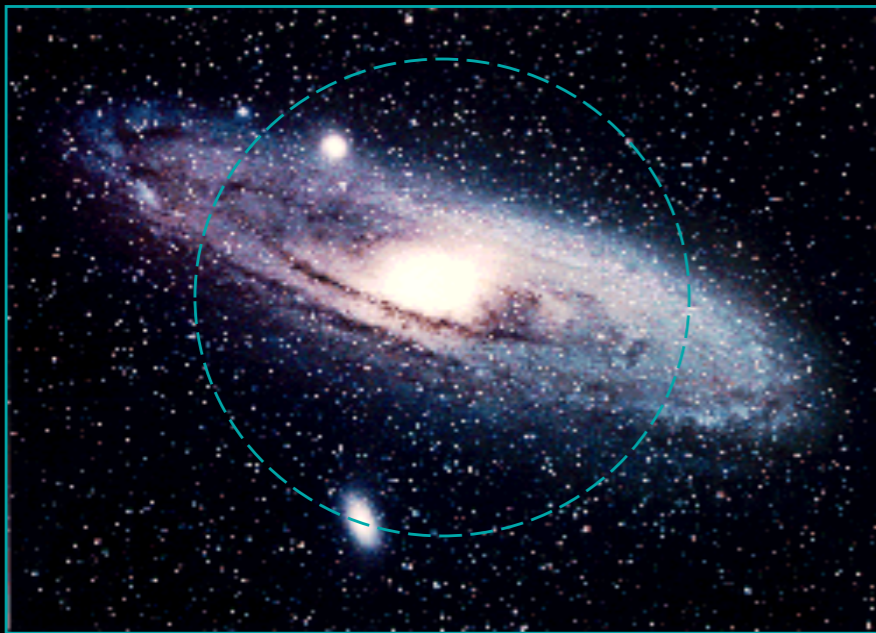
Плотность гало тёмной материи



Вид сбоку

Вид сверху





Что есть тёмная материя?

Тёмная материя сделана из:

● Макро объектов - ✓

MACHOs

● Новых нейтральных

частиц

Возможные кандидаты в MACHOs

- Нормальные звёзды - **нет**, иначе мы бы видели яркий свет
- Горячий газ - **нет**, ибо он бы светился
- Выгоревшие остатки звёзд - **кажется невозможным**, ибо они бы возникли из скоплений обычных звёзд, которые не наблюдается в гало
- Нейтронные звёзды - **нет**, так как они возникают из взрывов сверхновых, что приводит к выбросу тяжёлых элементов
- Белые карлики (звёзды с массой недостаточной для того, чтобы достичь фазы сверхновых) - **возможны** в молодых галактиках, **но** возникновение белых карликов сопровождается образованием большого количества гелия, что не наблюдается
- Коричневые карлики (звёзды в десять раз меньше Солнца) - **возможны**, **но** пока нет свидетельств о том, что их имеется такое количество, чтобы получить нужное количество тёмной материи в нашей галактике
- Первичные чёрные дыры образовавшиеся в ранней Вселенной - **возможны**, **но** нет достаточных оснований полагать, что их имеется в нужном количестве

Что есть тёмная материя?



- Частицы ТМ не участвуют в сильных взаимодействиях и не испускают свет.
- В силу этого они не могут образовывать компактных объектов

Тёмная материя сделана из:

☉ Макро объектов - MACHOs

☉ Новых нейтральных частиц ✓

- Частица тёмной материи должна быть нейтральной, стабильной, слабо и/или гравитационно взаимодействующей
- В последнем случае их называют WIMPs - weakly interacting massive particles
- WIMPs допускают детектирование методами физики частиц
 - В Стандартной модели нет такой частицы (за исключением возможно тяжёлого правого нейтрино)

Стандартная Модель



Частицы

		Three Generations of Matter (Fermions)				
		I	II	III		
mass→		3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0	125.7 GeV
charge→		$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin→		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
name→		u up	c charm	t top	γ photon	H Higgs
Quarks	mass→	6 MeV	95 MeV	4.2 GeV	0	0
	charge→	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0
	spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	2
		d down	s strange	b bottom	g gluon	G Graviton
Leptons	mass→	<2 eV	<0.19 MeV	<18.2 MeV	90.2 GeV	
	charge→	0	0	0	0	
	spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z^0 weak force	
		0.511 MeV	106 MeV	1.78 GeV	80.4 GeV	
		-1	-1	-1	± 1	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		e electron	μ muon	τ tau	W^\pm weak force	

Bosons (Forces)

Силы
Электромагнитные
Сильные
Слабые

Хиггс
Гравитация

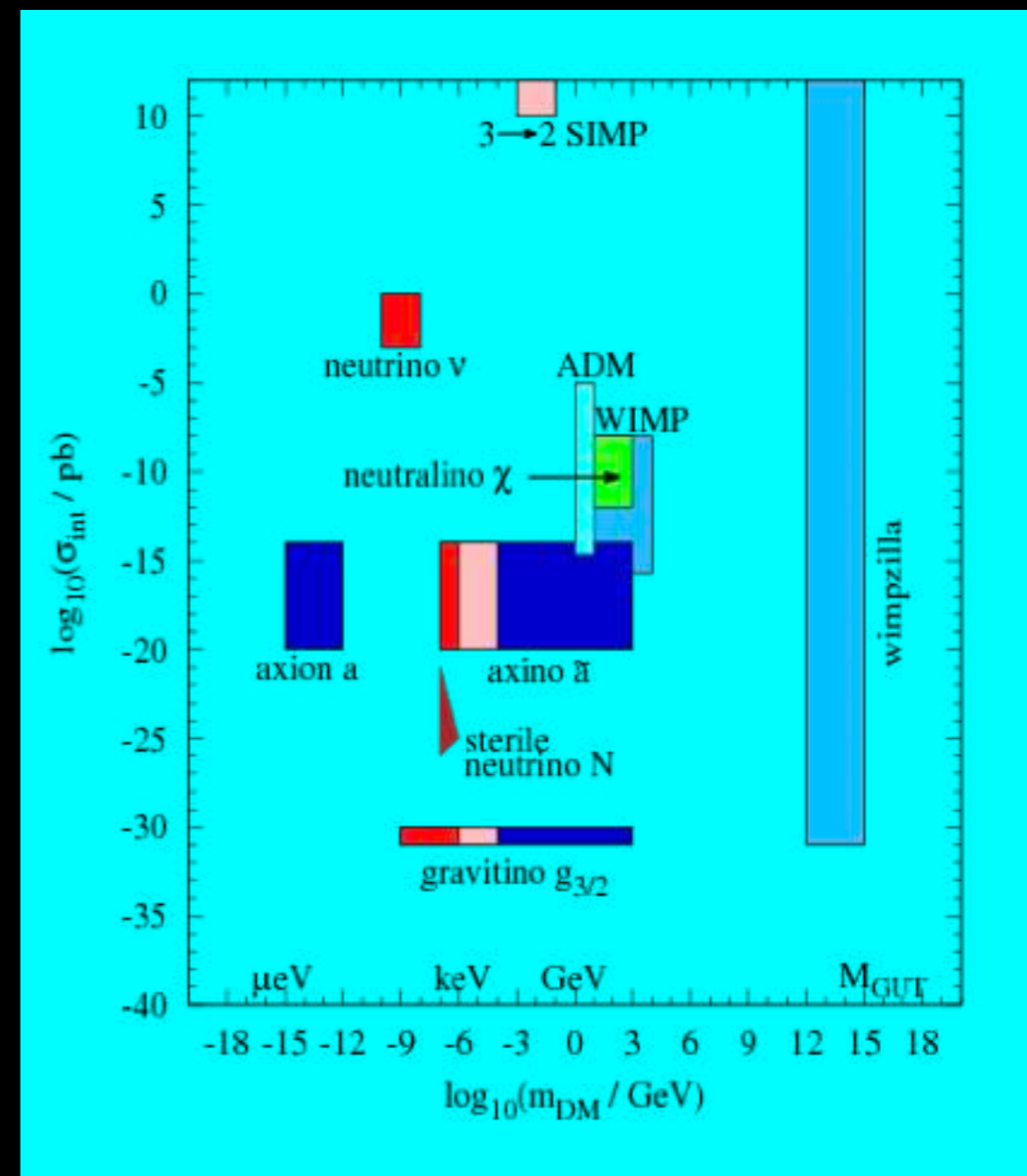
Кандидаты на роль частиц тёмной материи и новая физика

	I	II	III		
mass→	3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0	125.7 GeV
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
name→	u up	c charm	t top	γ photon	H Higgs
Quarks					
mass→	6 MeV	95 MeV	4.2 GeV	0	0
charge→	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	2
name→	d down	s strange	b bottom	g gluon	G Graviton
Leptons					
mass→	<2 eV	<0.19 MeV	<18.2 MeV	90.2 GeV	0
charge→	0	0	0	0	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1
name→	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force	
Leptons					
mass→	0.511 MeV	106 MeV	1.78 GeV	80.4 GeV	
charge→	-1	-1	-1	-1	
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
name→	e electron	μ muon	τ tau	W weak force	
Bosons (Forces)					

- Правые тяжёлые нейтрино - возможно существуют в природе, если нейтрино является античастицей самой себе - единственная частица из Стандартной модели
- Суперсимметричные частицы (нейтралино, снейтрино) - если суперсимметрия существует в природе
- Аксион (аксино) - гипотетические лёгкие очень слабо взаимодействующие частицы, ответственные за CP нарушение
- Гравитино - партнёр гравитона в супергравитации
- Тяжёлый фотон
- Лёгкий новый почти стерильный хиггсовский бозон
-

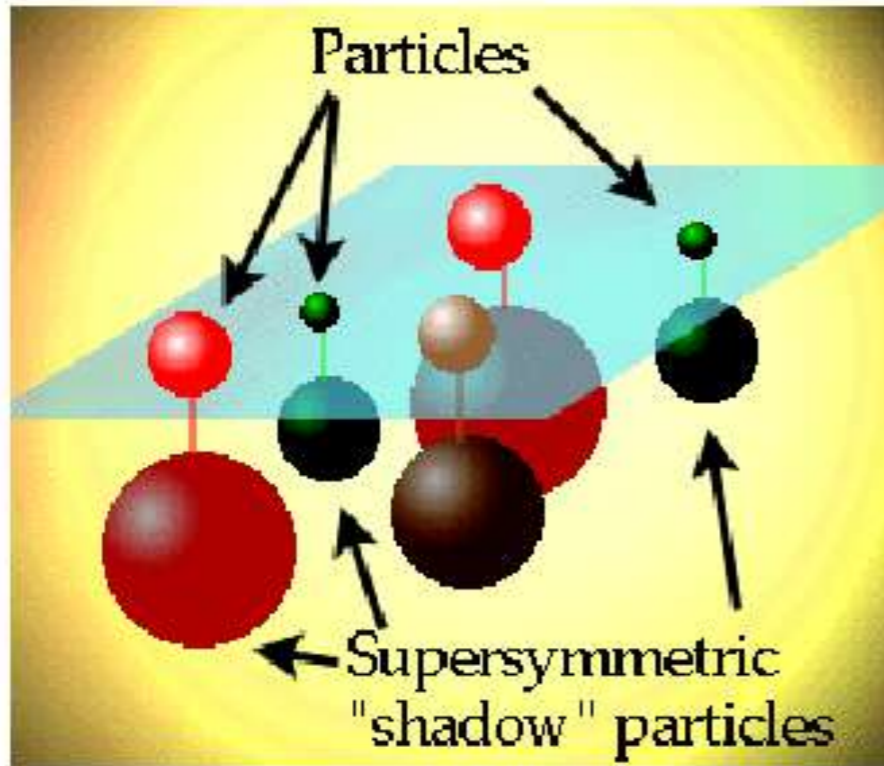


Можно ли зарегистрировать частицу темной материи?



Если это WIMP, то её можно обнаружить средствами физики элементарных частиц. Если это лишь гравитационно взаимодействующая частица, то обнаружение сильно затруднено.

Суперсимметрия



- Новый вид симметрии между частицами с целым спином – **бозонами** и частицами с полуцелым спином - **фермионами**
- Каждая частица имеет тяжёлого партнёра отличающегося лишь значением спина на 1/2

- «суперпартнёры» тяжелее обычных частиц и потому пока не рождаются на ускорителях
- Теория супергравитации включает в себя все известные частицы и взаимодействия

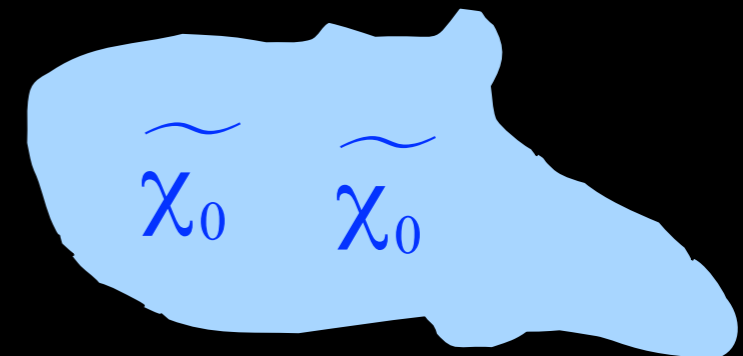
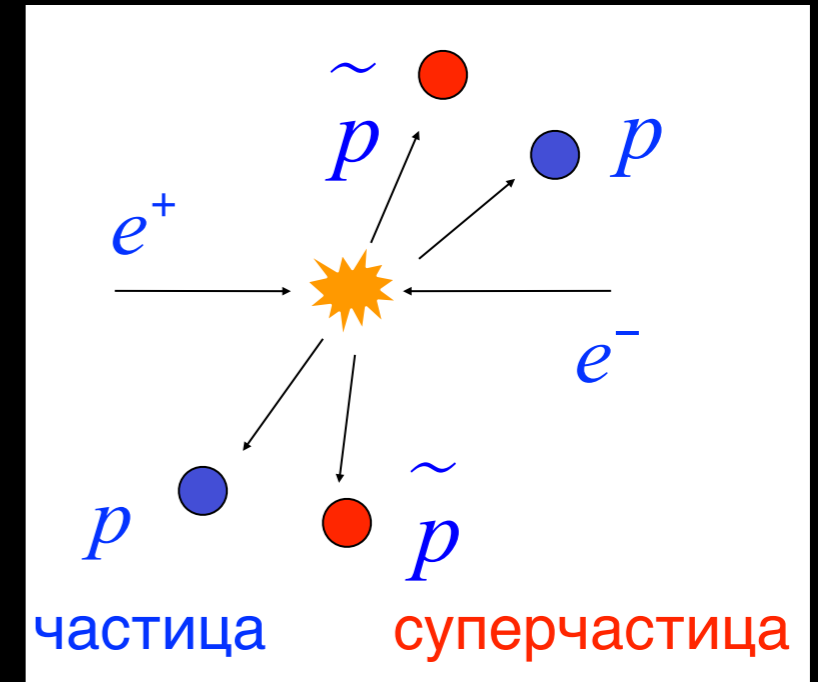
кварк	$q \rightarrow \tilde{q}$	скварк
лептон	$l \rightarrow \tilde{l}$	слептон
W-бозон	$W \rightarrow \tilde{W}$	ВИНО
Z-бозон	$Z \rightarrow \tilde{Z}$	ЗИНО
глюон	$g \rightarrow \tilde{g}$	глюино
фотон	$\gamma \rightarrow \tilde{\gamma}$	фотино
Хиггс	$H \rightarrow \tilde{H}$	Хиггсино
гравитон	$G \rightarrow \tilde{G}$	гравитин
Н		О

Суперсимметричная тёмная материя

- Суперчастицы рождаются парами
- Легчайшая суперчастица - стабильна



- Легчайшая суперчастица должна быть нейтральна - наилучший кандидат есть нейтралино (фотино или хиггсино)
- Она могла бы выжить со времени Большого взрыва и образовать Тёмную материю во Вселенной



$$\tilde{\chi}_0 = N_{11}\tilde{\gamma} + N_{12}\tilde{Z} + N_{13}\tilde{H}_1^0 + N_{14}\tilde{H}_2^0$$

фотино
зино
ХИГГСИНО
ХИГГСИНО

нейтралино - тяжёлая (~ 100 масс протона), нейтральная, стабильная слабо взаимодействующая частица

Детектирование тёмной материи



Прямое детектирование



Нет убедительного свидетельства
Надежда на скорые новые результаты



Косвенное детектирование

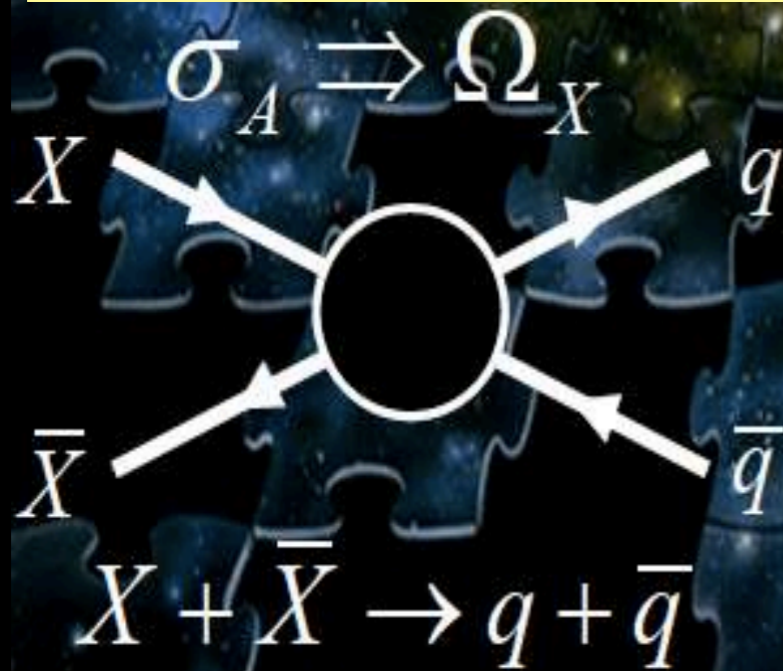
- EGRET -> GLAST
Diffuse Gamma Rays
- HEAT, AMS01 -> PAMELA
Positrons in Cosmic Rays
- BESS -> AMS02
Antiprotons in Cosmic Rays



Поиски аннигиляции тёмной материи

Поиск частиц тёмной материи

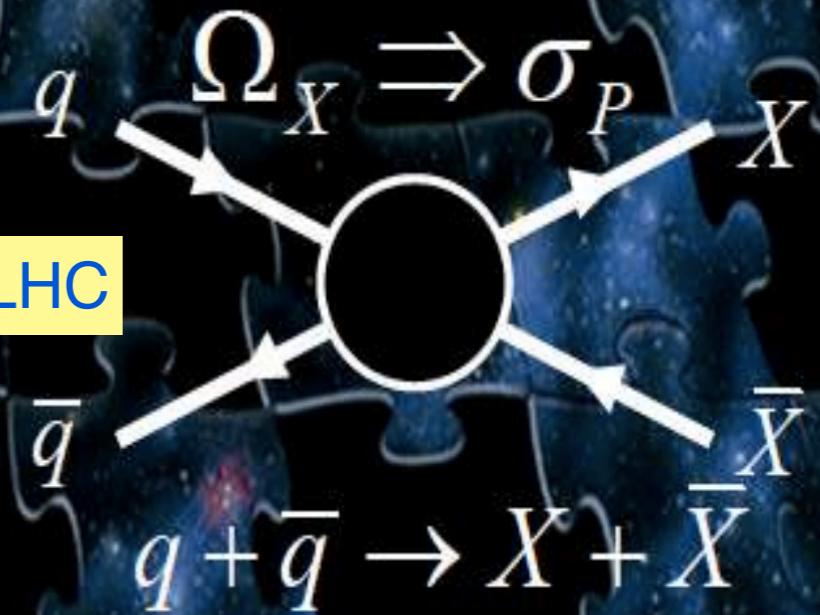
Аннигиляция -> новая компонента в космических лучах



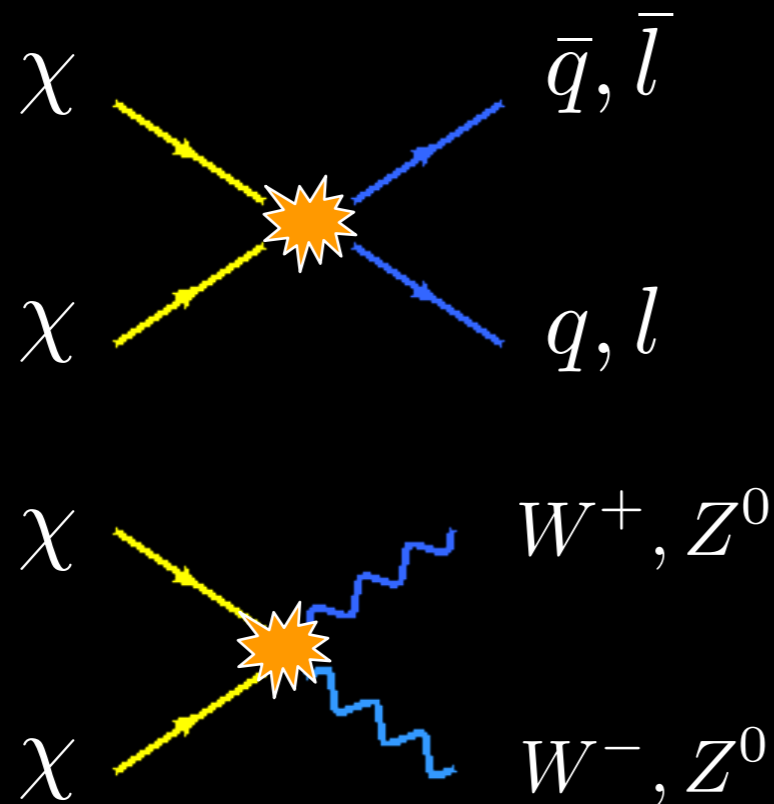
Прямое взаимодействие с веществом



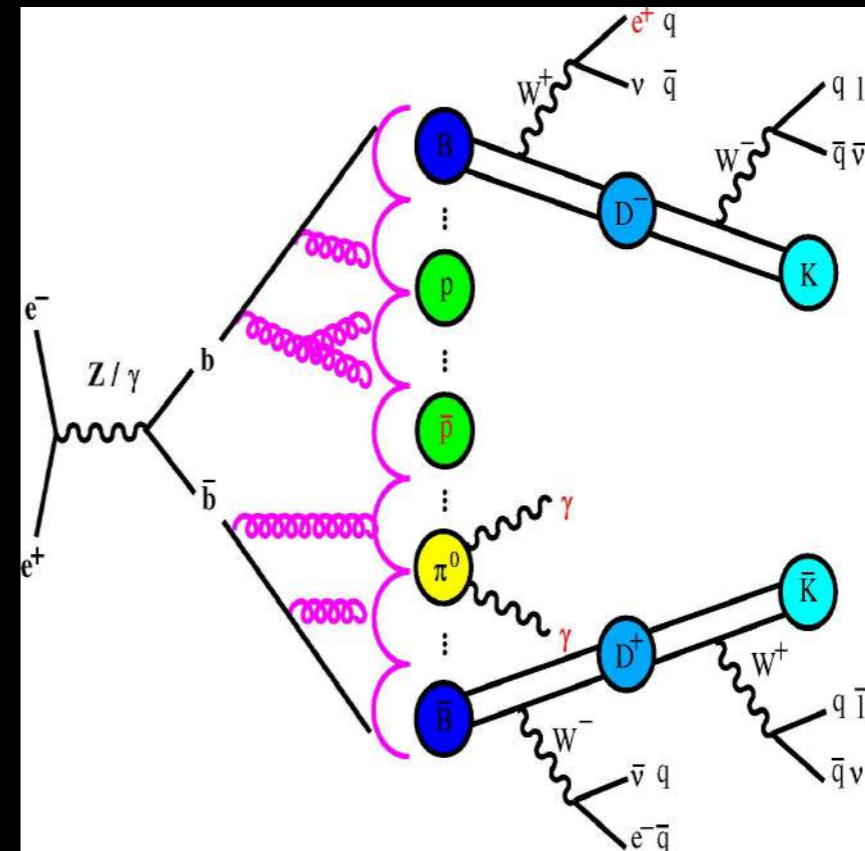
Рождение на LHC



Аннигиляция тёмной материи в гало Галактики



Рождённые кварки, лептоны и промежуточные векторные бозоны, хорошо изученные в процессах на коллайдерах. В конечном счёте образуются фотоны, электроны, позитроны, протоны и антипротоны

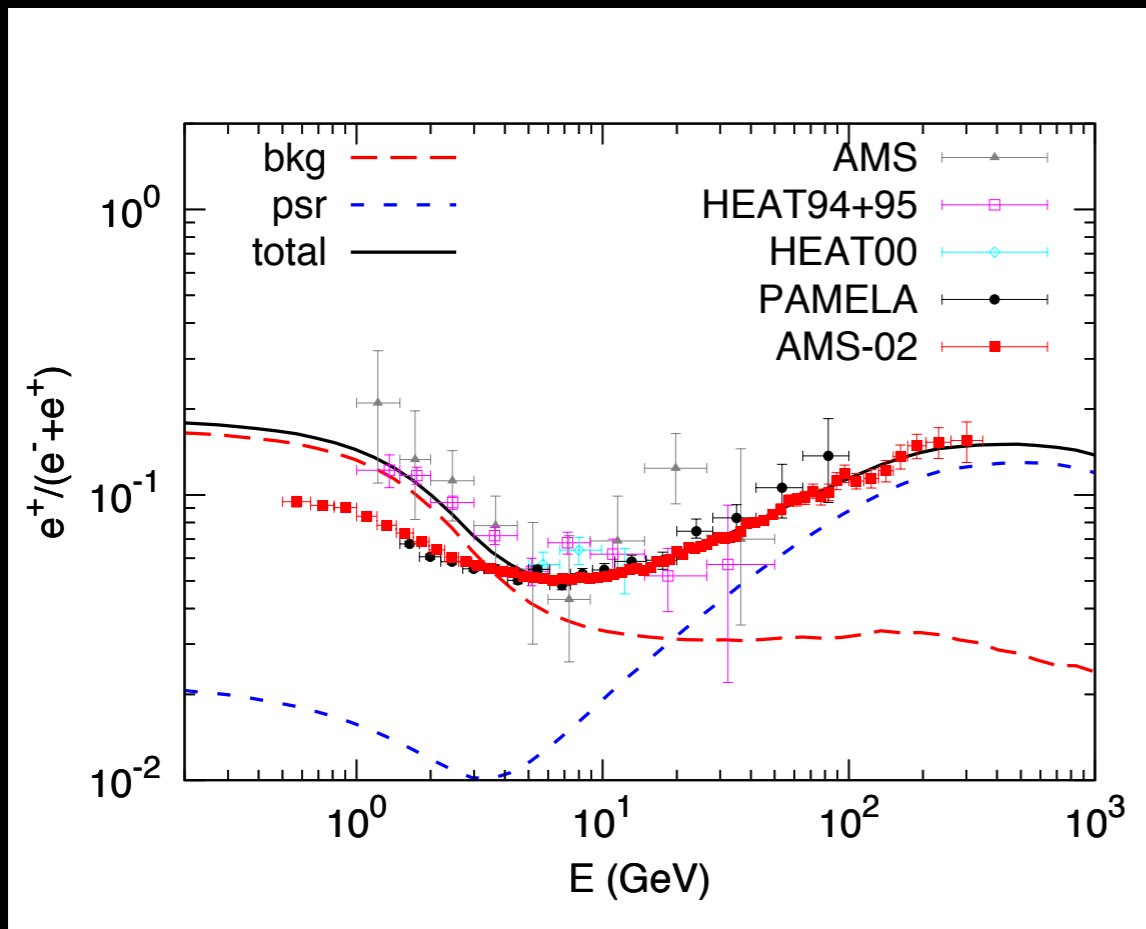


Сигнал тёмной материи можно увидеть как дополнительные позитроны, антипротоны или рассеянные фотоны в спектрах космических лучей с энергией равной массе частиц тёмной материи

Поиск WIMP`ов

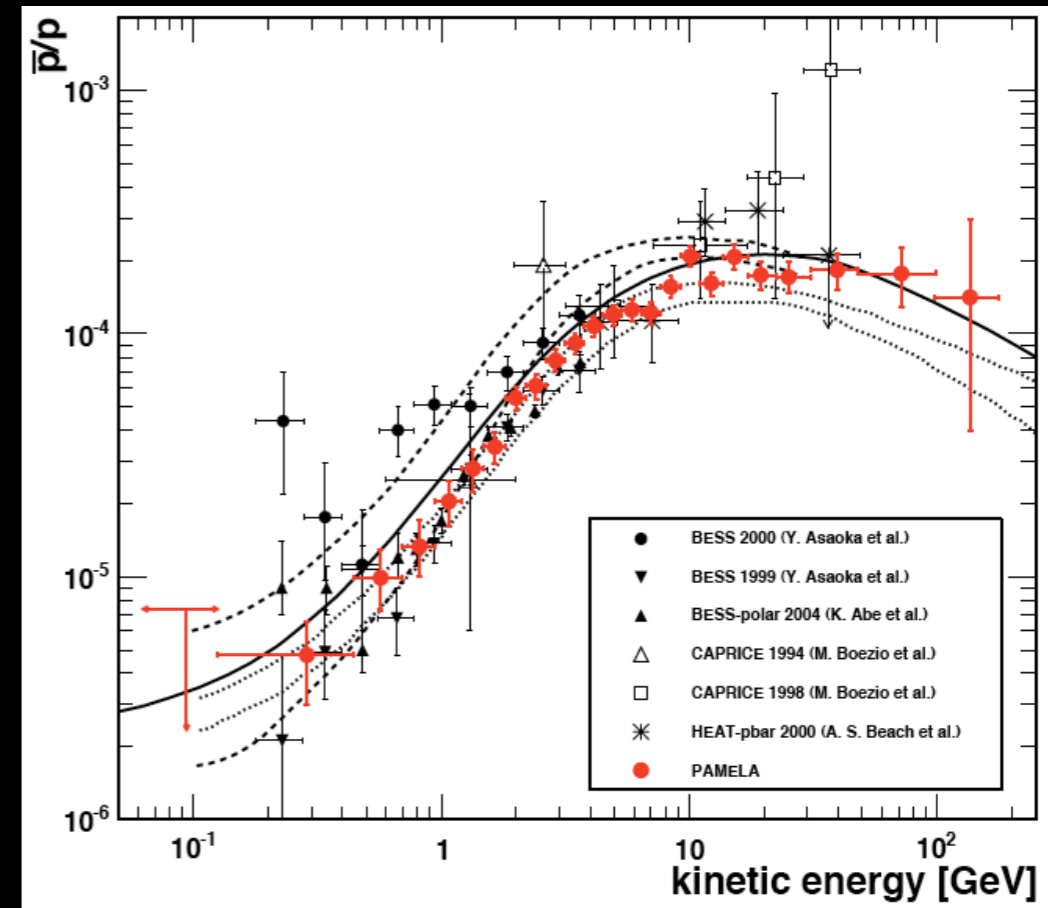
WIMP - Weakly Interactive Massive Particle

Аннигиляция ТМ в гало галактики



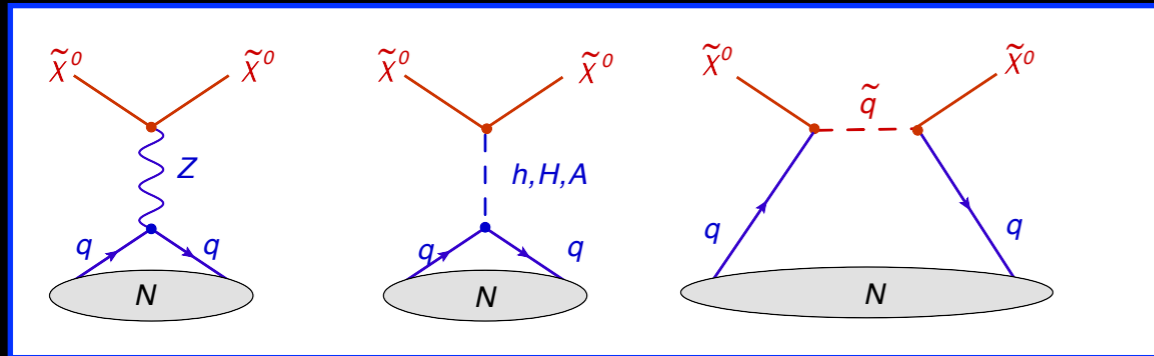
Позитроны в космических лучах

В спектре космических лучей нет превышения над фоном

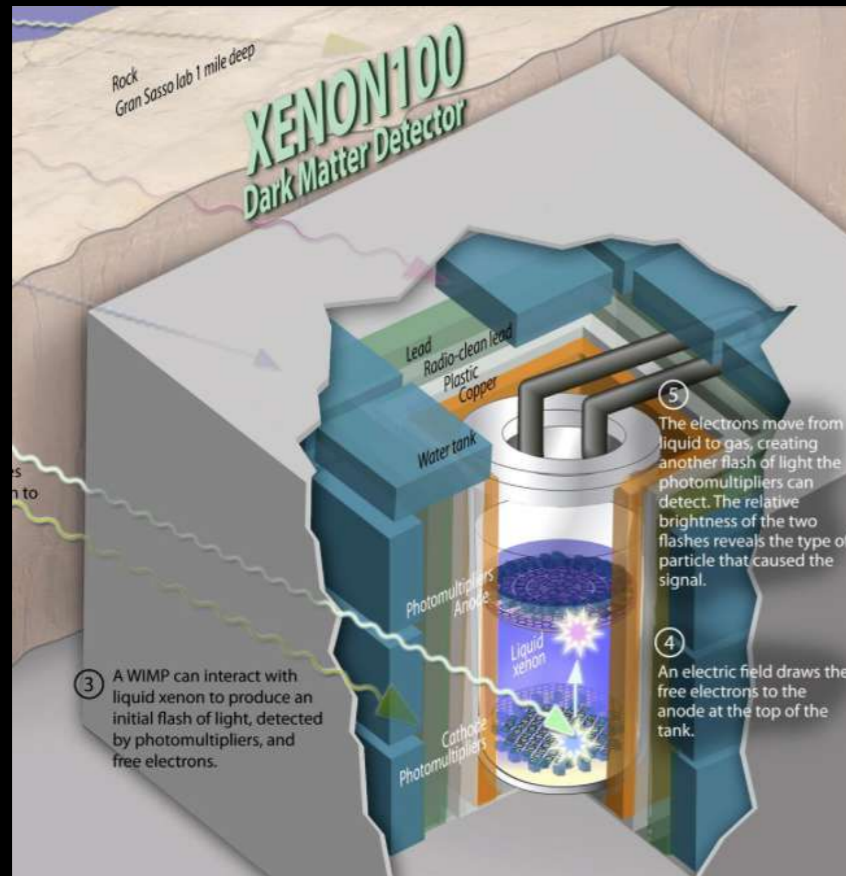
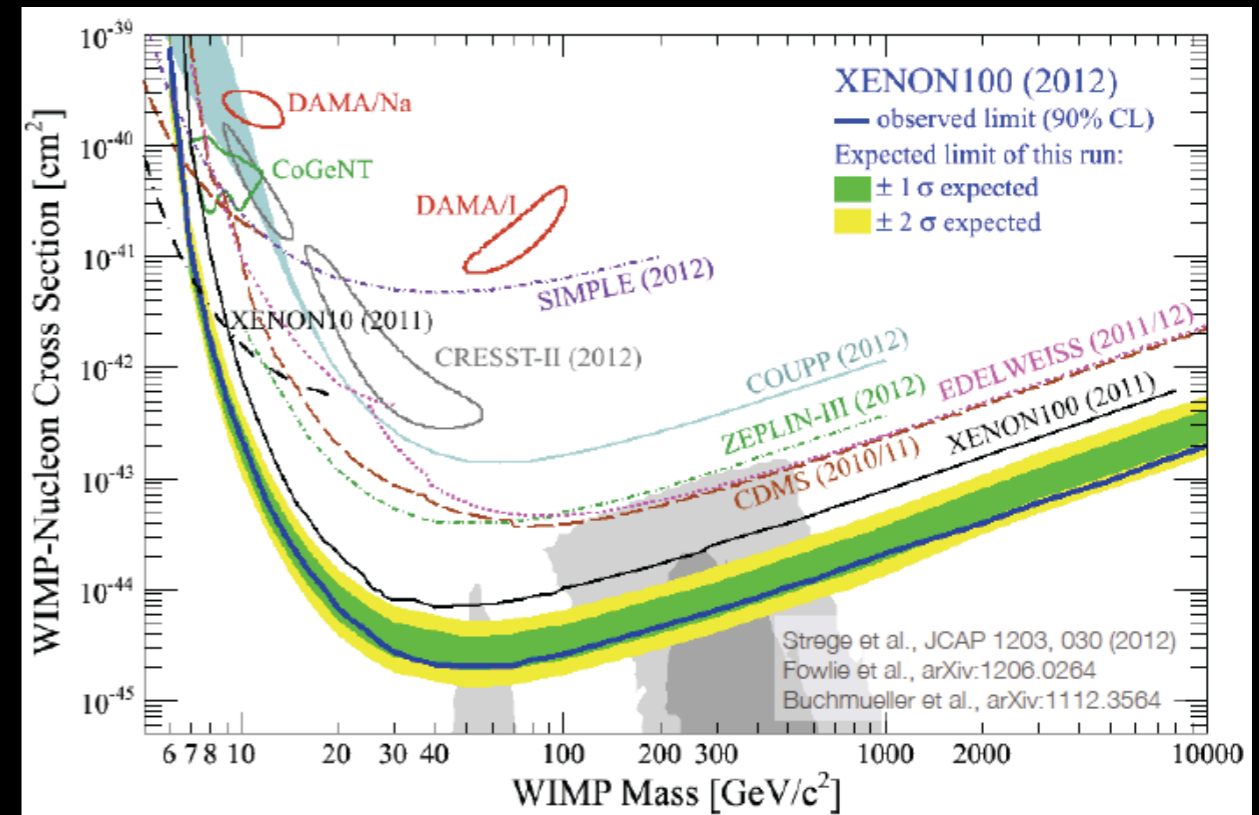


Антипротоны в космических лучах

Поиск WIMP`ов



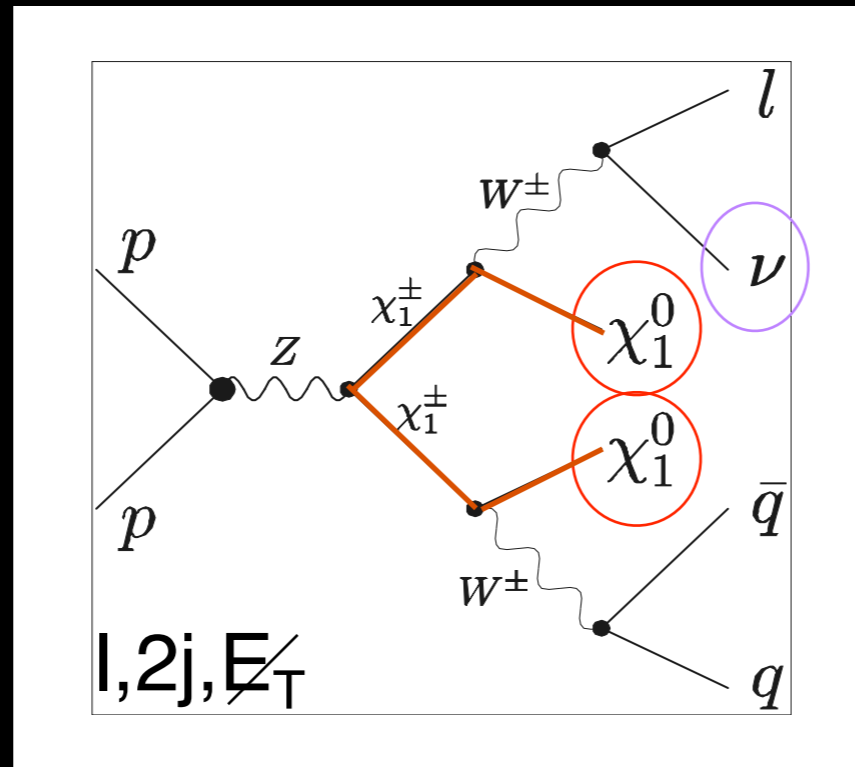
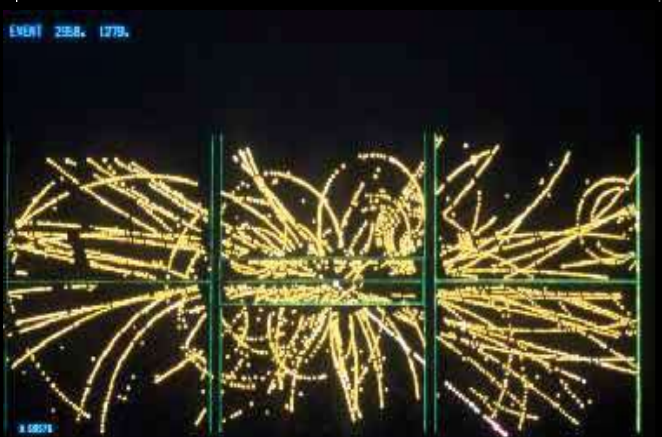
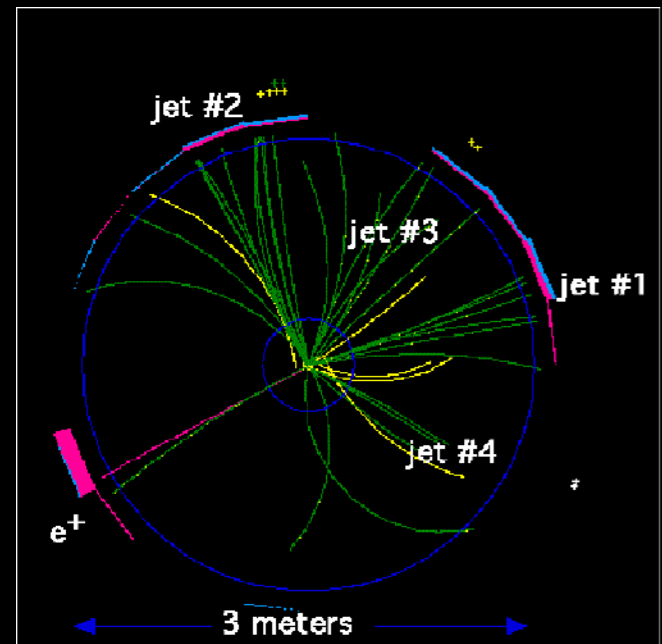
Взаимодействие ТМ с веществом



Получено ограничение на массу и сечение взаимодействия частиц ТМ с веществом

Как в спектре космических лучей, так и в реакции взаимодействия с веществом - нет превышения над фоном

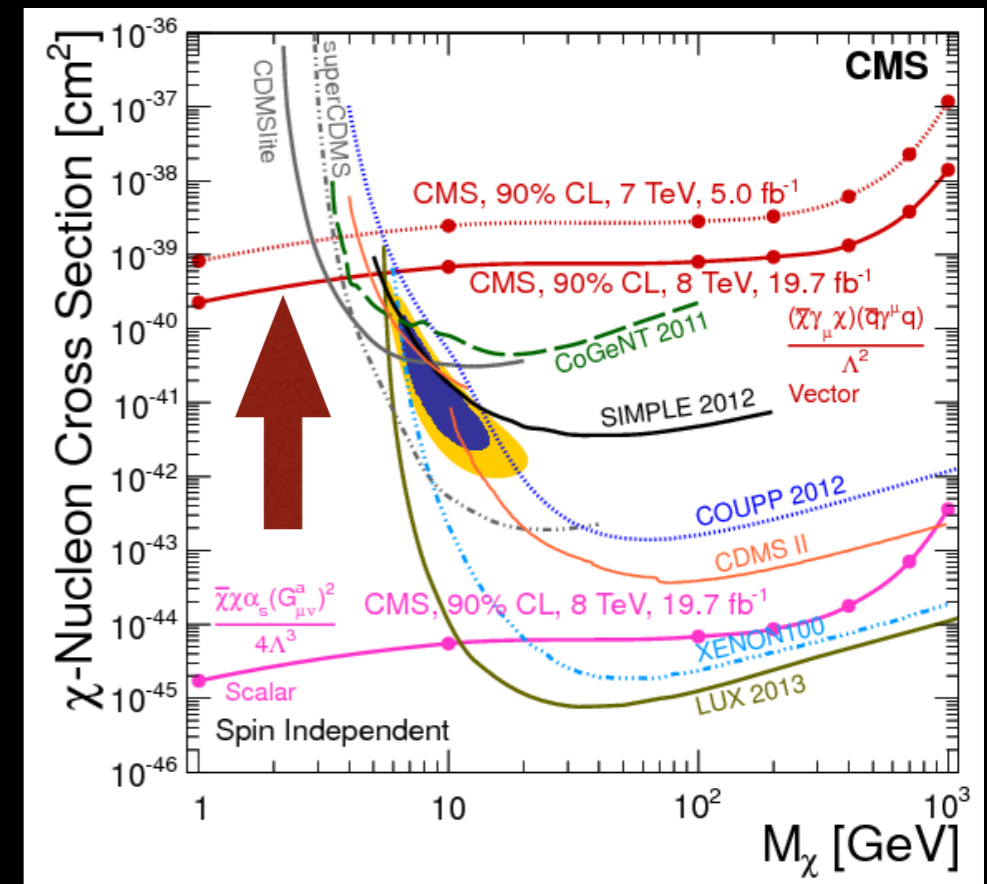
Поиски частиц тёмной материи на коллайдере



Сигналом рождения частиц ТМ является недостающая энергия и импульс

Пока получены лишь ограничения на массу и сечение взаимодействия

Процесс рождения суперпартнёров χ^\pm с последующим распадом на нейтралينو χ^0



Каков же итог?

- Тёмная материя - загадка, которую предстоит разрешить
- Это может быть всего лишь одна частица, а может быть новый скрытый сектор Вселенной
- Если нам повезёт и это WIMP, то ответ может быть найден очень скоро
- Загадка тёмной энергии концептуально гораздо сложнее
- Решение этих проблем лежит на стыке физики элементарных частиц, астрофизики и космологии