

# *Поиск частиц тёмной материи*

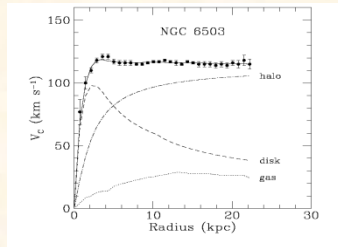
*Ю.Г.Нарышкин*

# План доклада

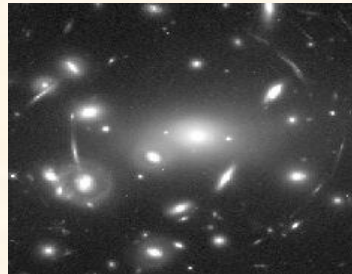
- *Свидетельства существования “темной материи”*
- *Немного теории*
- *Эксперименты по поиску “темной материи”*
  - прямые*
  - косвенные*
  - коллайдерные*

# Свидетельства существования “темной материи”

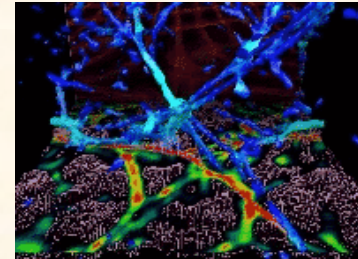
Rotation curves of galaxies



Lensing



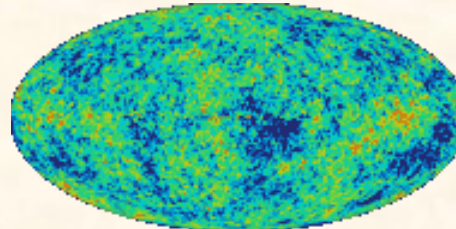
Large Scale Structure



Hot clusters



CMB

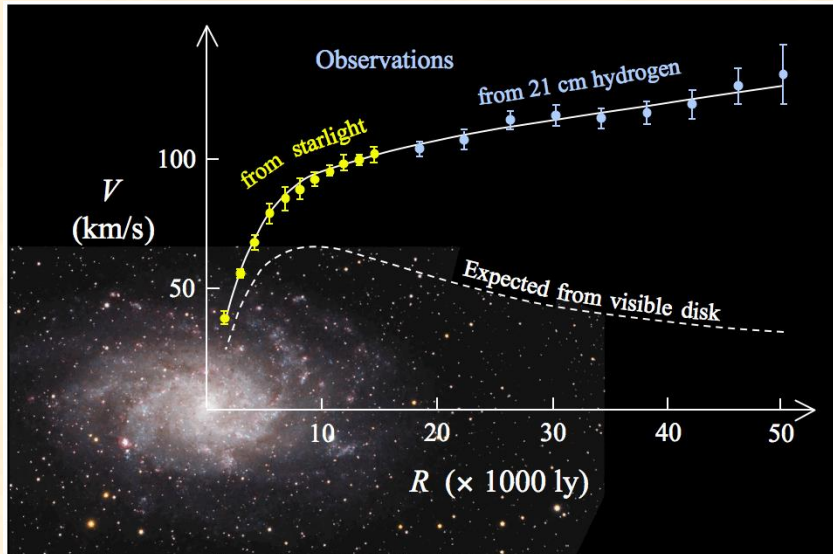


AND  
MANY  
MORE ...

Bertone, Hooper & Silk, [hep-ph/0404175](http://arxiv.org/abs/hep-ph/0404175). Bergstrom, [hep-ph/0002126](http://arxiv.org/abs/hep-ph/0002126). Jungman et al, [hep-ph/9506380](http://arxiv.org/abs/hep-ph/9506380)

# Скорости вращения галактик

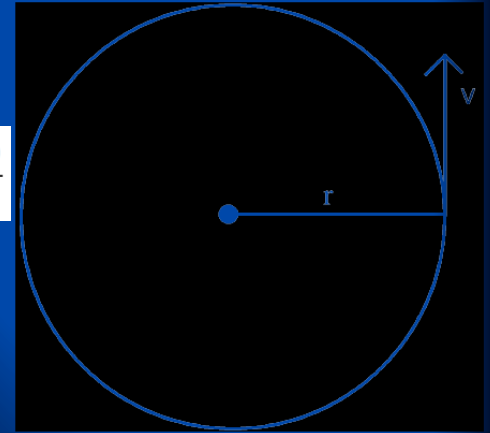
M33



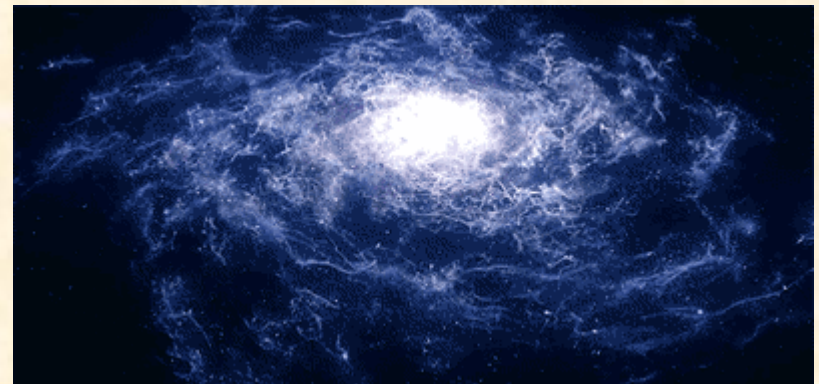
Speed is determined by Mass

$$v^2(r) = \frac{G_N M(r)}{r}$$

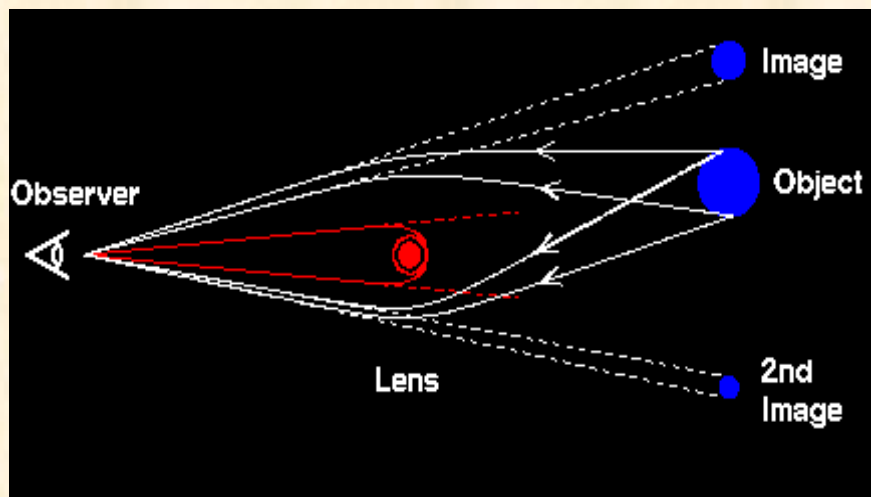
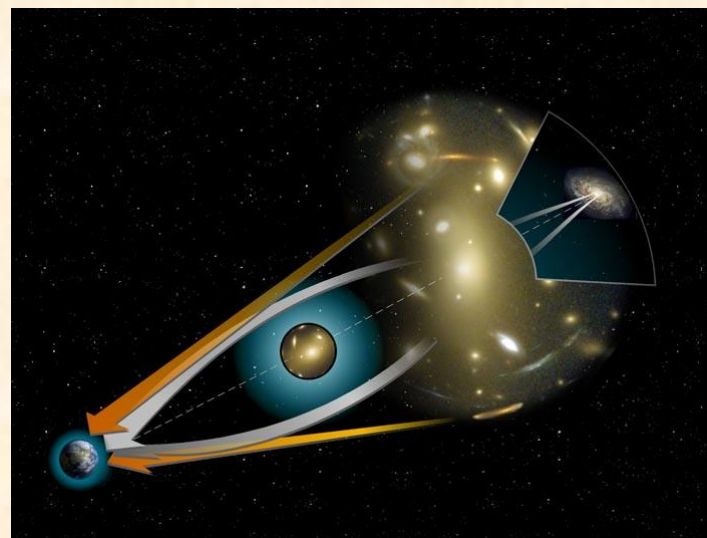
The speed at distance  $r$  from the center of the galaxy is determined by the mass interior to that radius. Larger mass causes faster orbits.



*Радиальная скорость звезд не зависит от удаления от центра галактики. Это может означать, что галактика на всём своём протяжении содержит значительную массу невидимого вещества.*



# “Гравитационное линзирование”



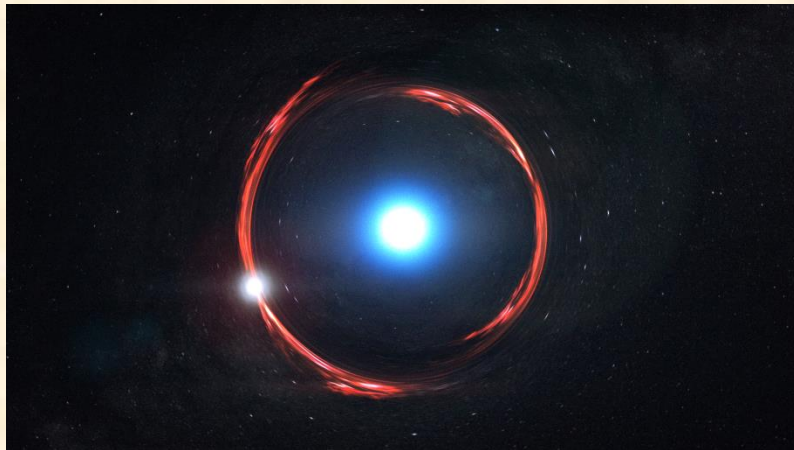
*Массы галактик недостаточно,  
для объяснения эффекта  
гравитационного линзирования*



# Сильное “Гравитационное линзирование”

Abell 1689

Сильное гравитационное линзирование вызывающее легко различимые искажения, такие как эйнштейновское кольцо, дуги и размноженные изображения.



SDP.81



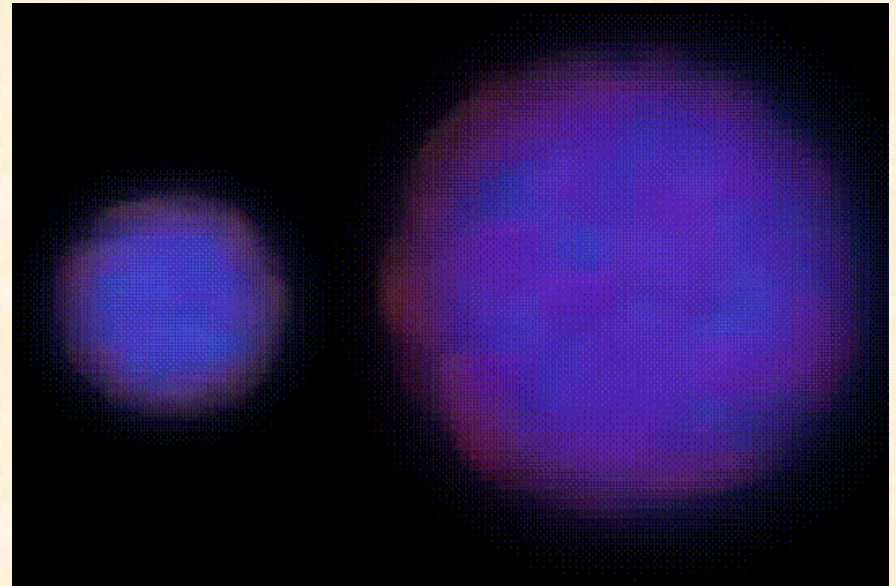
# Слабое “Гравитационное линзирование”



## Bullet Cluster

2006 r. analysis of mass distribution  
in the region of passing through  
galaxy clusters (1E0657-558) (\*)

Two galaxy clusters colliding.  
The pink shows the x-ray emissions.  
Blue shows unseen mass as  
measured with weak gravitational  
lensing techniques. (малые  
искажения в изображении объекта,  
который находится позади линзы .





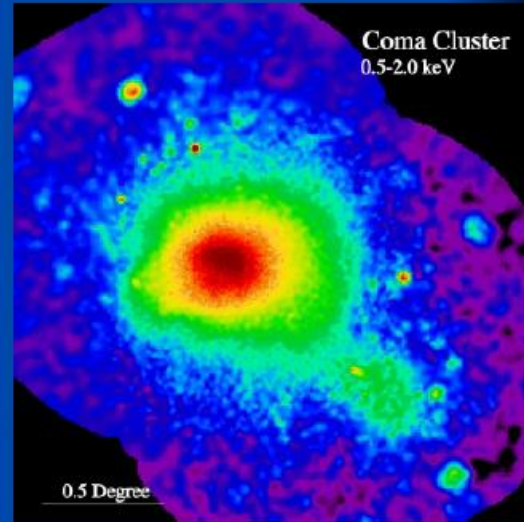
# Горячий газ в кластерах

## Hot Gas in Clusters: The Coma Cluster

Without dark matter, the hot gas would evaporate.



Optical Image

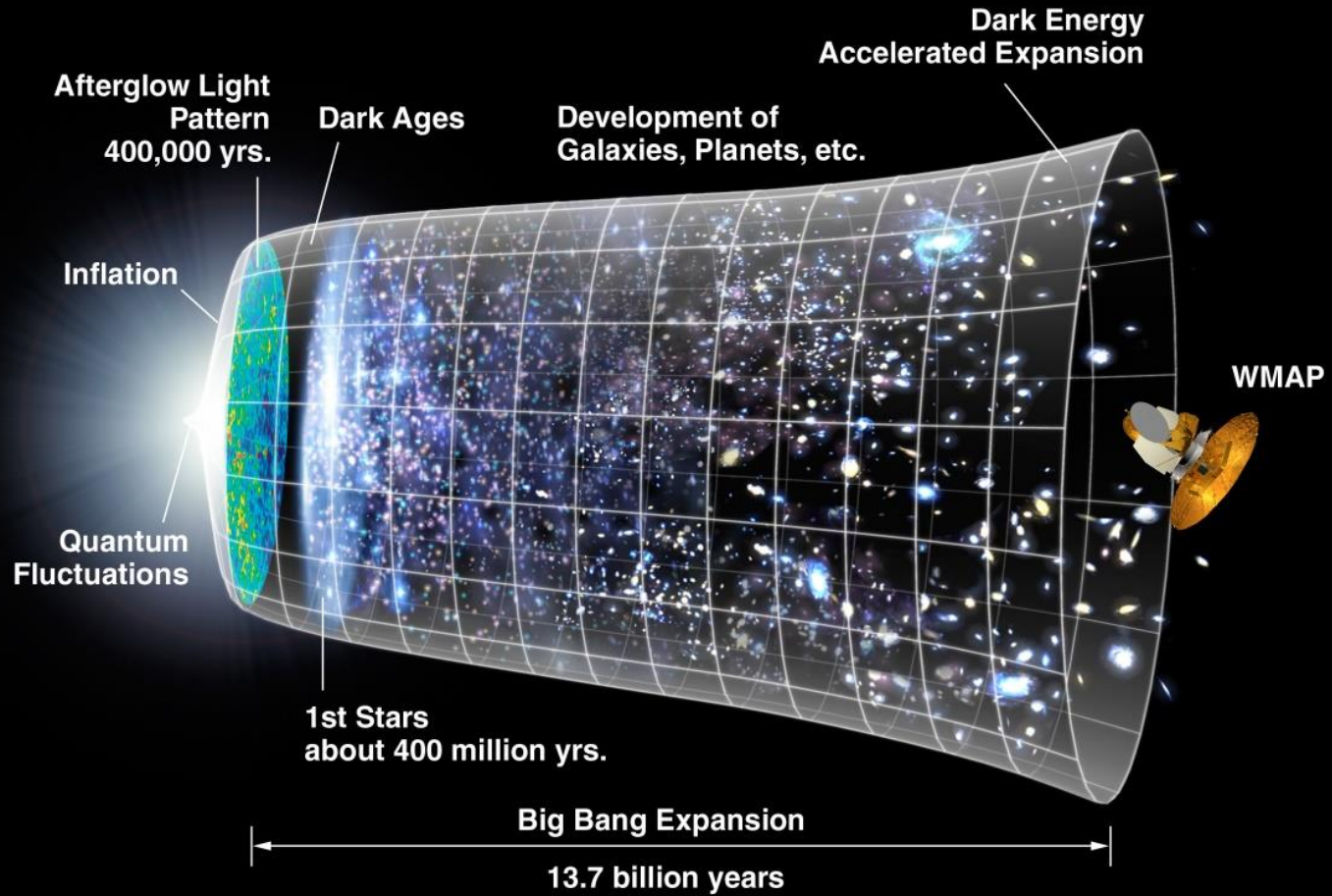


X-ray Image from the ROSAT satellite

**Для удержания атмосфер “горячего газа” больших эллиптических галактик массы звезд и газа не достаточно, чтобы произвести нужную силу притяжения для. Эллиптические галактики должны содержать в 5 раз больше массы (в виде темной материи), чем та масса, которую дают все звезды и газ.**

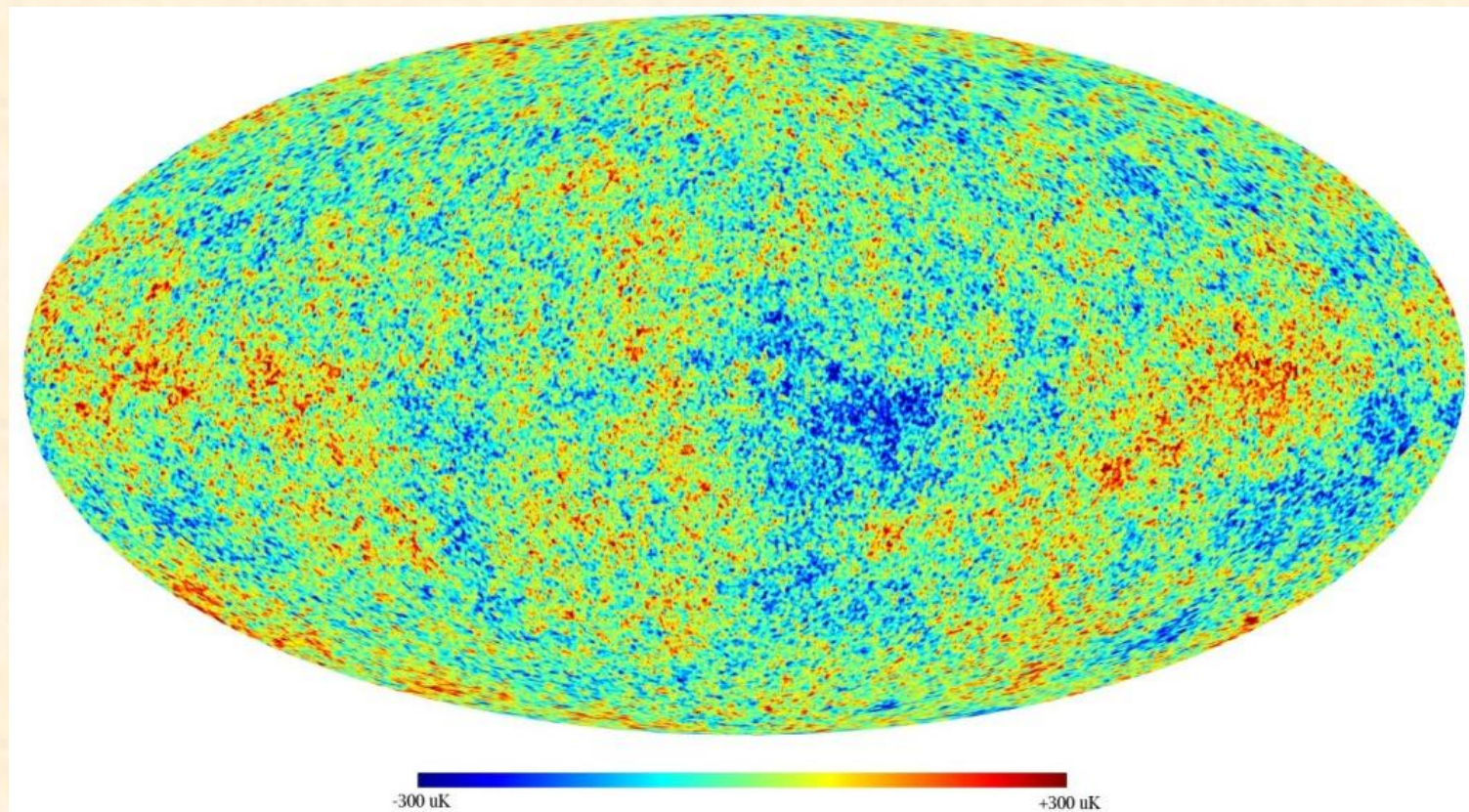


# Эволюция вселенной



# Флуктуации реликтового излучения

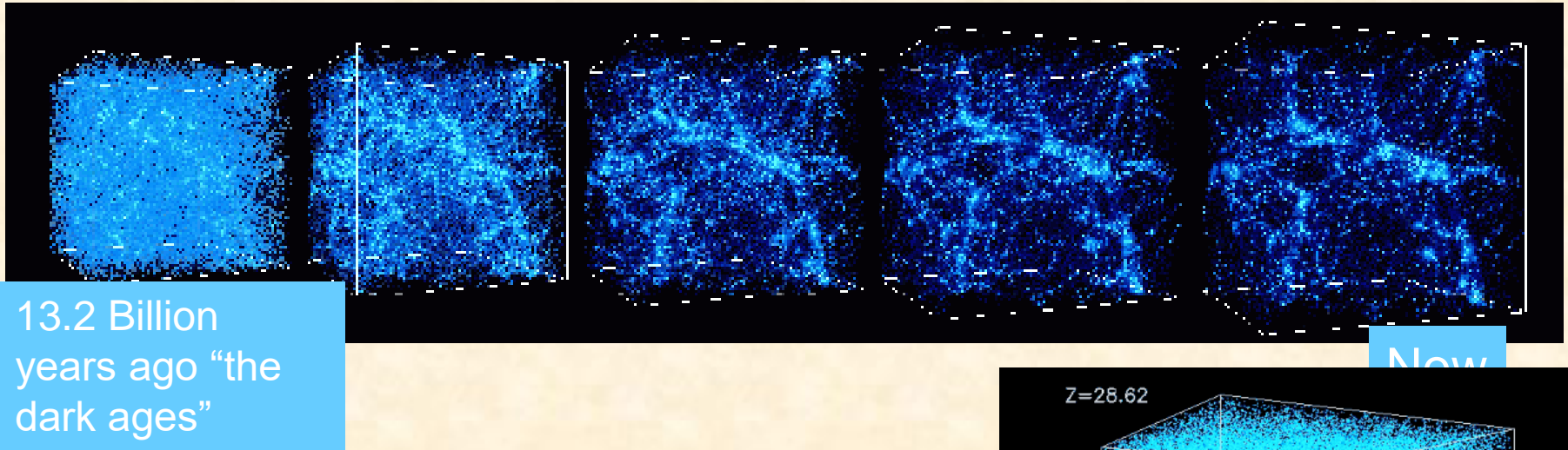
Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)



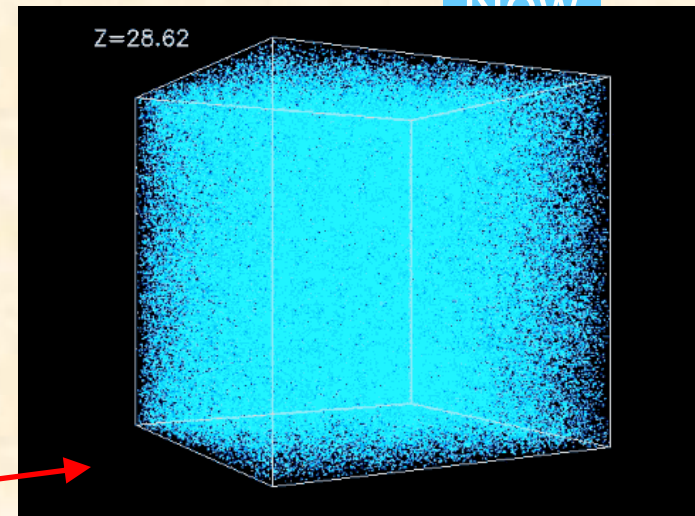
**Реликтовое излучение (возникшее в эпоху первичной рекомбинации водорода) было изотропным. В результате наблюдений были обнаружены небольшие вариации. Результаты наблюдений согласуются с современной космологической моделью  $\Lambda$ CDM**



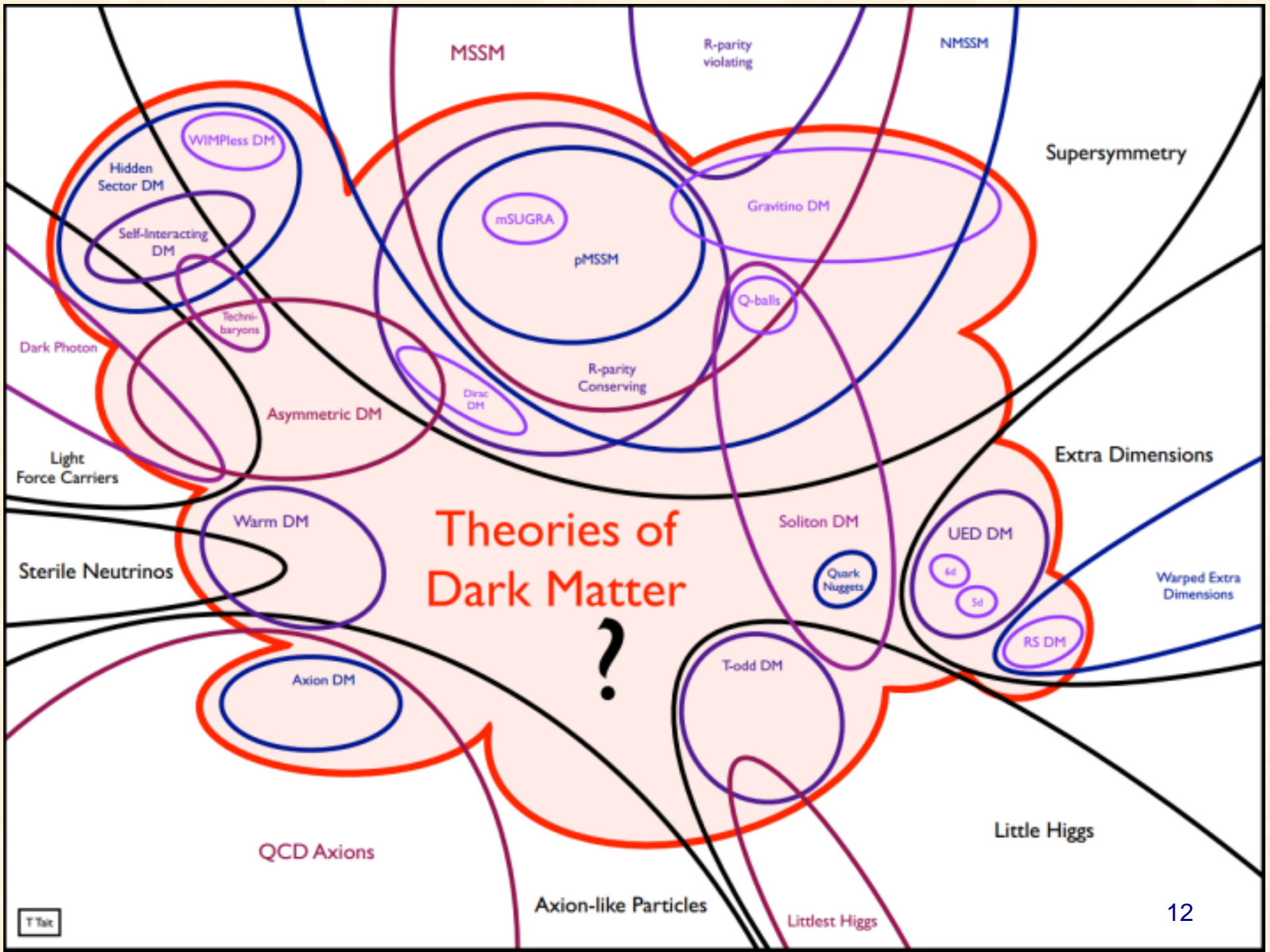
# Large scale structure



Тёмная материя влияет на формирования структуры. Она как и обычная материя, образует сгустки, но при этом не взаимодействует через столкновения с обычной материей, ни с излучением – её присутствие изменяет размер и количество малых галактик, больших галактик, и то, как они кластеризуются.



Каждая точка представляет собой частицу темной материи. С учетом гравитации и темной энергии через 13,2 миллиарда лет спустя наблюдаются сгустки темной материи, которые соответствуют распределению звезд, галактик, скоплений галактик видимых сегодня. Число и расположение сгустков определяется начальной температурой, силой тяжести, общей массой и скоростью расширения Вселенной.





# *Барионная темная материя*

- Состоит из барионов (протонов и нейтронов), которые составляют звезды и планеты и слабо взаимодействует электромагнитным образом (по какой-то причине). Кандидаты (**MACHOS: MAssive Compact Halo Objects**): **тёмные галактические гало, коричневые карлики, нейтронные звёзды, чёрные дыры, белые карлики и массивные планеты.**
- Если вся тёмная материя представлена барионами, **то соотношение концентраций лёгких элементов после первичного нуклеосинтеза, наблюдаемое в самых старых астрономических объектах, должно быть другим, резко отличающимся от наблюдаемого.**
- **Эксперименты по поиску гравитационного линзирования** света звёзд нашей Галактики показывают, что **достаточной концентрации крупных гравитирующих объектов** типа планет или чёрных дыр для объяснения массы гало нашей Галактики **не наблюдается.**
- Т.о. принимая во внимание результаты наблюдений и теоретические аргументы можно утверждать, **что темная материя не является барионной!**

Death of stellar baryonic dark matter candidates  
(Fields, Freese, and Graff, astro-ph/0007444)

# Небарионная темная материя

В отличие от барионной материи, небарионная не способствуют формированию элементов в ранней Вселенной, и поэтому проявляется только через свои гравитационные эффекты. Кроме того частицы темной материи могут аннигилировать, с рождением  $\gamma$ -квантов и нейтрино.

- **Аксионы** - нейтральные псевдоскалярные частицы.. Космологические данные ограничивают массу аксиона на уровне не менее  $10^{-5}$  эВ.
- **WIMP (Weakly Interacting Massive Particles)**
- **Тяжёлые нейтрино** (стерильными), то есть не проявляющимися в слабых взаимодействиях в обычных условиях. Теоретические модели предсказывают массу в очень широком диапазоне. Из феноменологии для следует диапазон масс приблизительно  $10^{-1}$  -  $10^4$  эВ, Стерильные нейтрино вполне могут составлять существенную часть тёмной материи.
- **Суперсимметричные частицы (LSP)** Не принимает участия в электромагнитном и сильном взаимодействиях. В качестве LSP-частицы могут выступать нейтралино, фотино, гравитино, хиггсино (суперпартнёры фотона, гравитона и бозона Хиггса соответственно, с массой порядка 10 ГэВ).
- **Нейтралино** (нейтральная) участвует в слабом и гравитационном взаимодействиях, масса 30-5000 ГэВ
- ....

# Проблема “тёмной материи”

Таким образом, существует достаточно факторов, указывающих на существование “темной материи”:

- Кривые вращения космических объектов
- Гравитационное линзирование
- Горячий газ в кластерах
- Bullet cluster
- Реликтовое излучение
- .....

## Свойства DM:

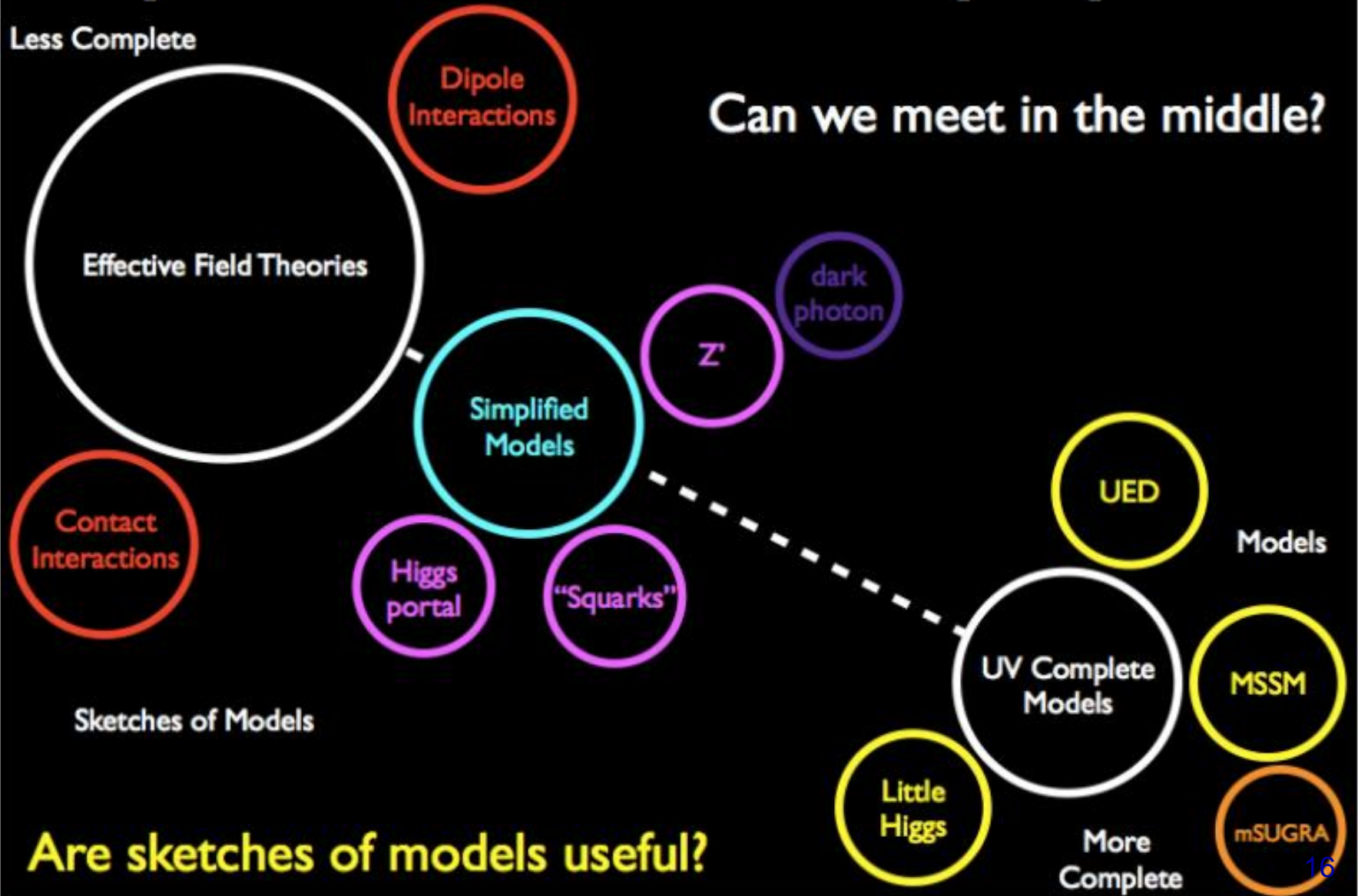
- взаимодействует гравитационно
- стабильная
- она действительно “темная” (т.е. константы для других взаимодействий с частицами стандартной модели малы или равны нулю)
- холодная
- небарионная



# Spectrum of Theory Space

Less Complete

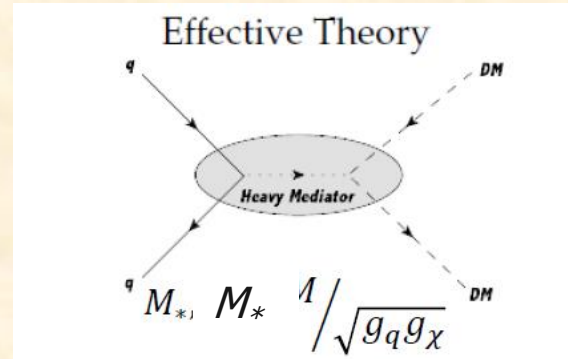
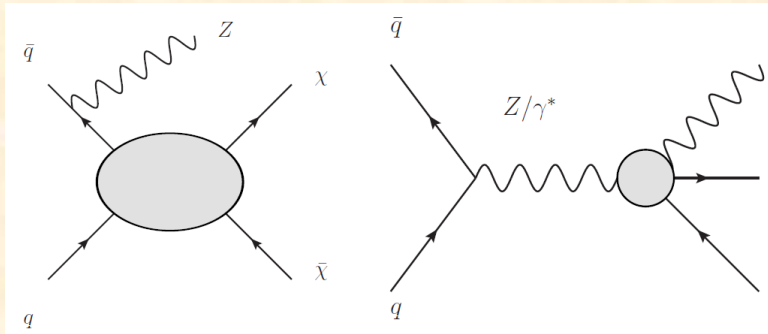
Can we meet in the middle?



Are sketches of models useful?



# EFT: Effective Field Theory



arXiv:1008.1783

Name	Operator	Coefficient
D1	$\bar{\chi}\chi\bar{q}q$	$m_q/M_*^3$
D4	$\bar{\chi}\gamma^5\chi\bar{q}\gamma^5q$	$m_q/M_*^3$
D5	$\bar{\chi}\gamma^\mu\chi\bar{q}\gamma_\mu q$	$1/M_*^2$
D8	$\bar{\chi}\gamma^\mu\gamma^5\chi\bar{q}\gamma_\mu\gamma^5q$	$1/M_*^2$

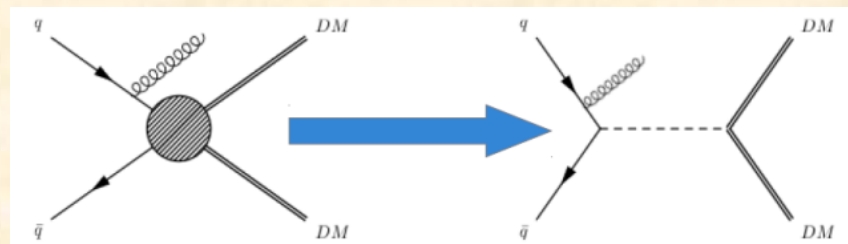
Частицы темной материи описываются как дираковские фермионы

Теория содержит 2 параметра  $M_*$ ,  $m_\chi$

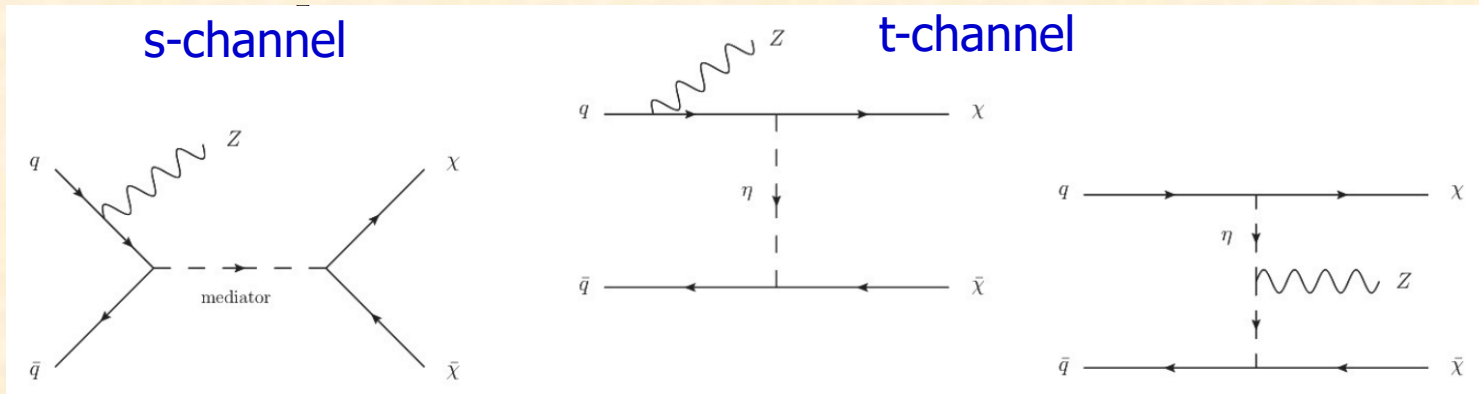
Где  $M_*$  – характеризует силу взаимодействия и является функцией массы промежуточной частицы  $M$  и констант взаимодействия  $g_q$  и  $g_\chi$

Важное условие:  $M \gg Q_{tr}$ , где  $Q_{tr}$  переданный импульс

Run I  $\rightarrow$  Run II: EFT  $\rightarrow$  Simplified models



# Simplified models



Медиаторы:

для s - канала: vector, axial,  
scalar, pseudoscalar  
для t - канала: colored scalar mediator.

Теория содержит 5 параметров:

WIMP mass:  $m_\chi$

Mediator mass:  $M$

Mediator width:  $\Gamma$

Coupling between the mediator and the WIMP:  $g_\chi$

Coupling between the mediator and the SM particle:  $g_q$

## Рекомендации DM форума:

$m_\chi$ (GeV)	$m_{\text{med}}$ (GeV)										
1	10	20	50	100	200	300	500	700	1000	2000	10000
10	10	15	50	100		300	500				10000
30	10			100		300	500	700			
50	10		50	95	200	300	500	700			10000
100				100		300	500	700			
150	10				200	295	500		1000		10000
500	10						500		995	2000	10000
1000	10								1000	1995	10000

black = recommended, bold = requested/simulated initially, red = requested/simulated later to improve limit

Моделирование проводилось с использованием MadGraph

Константы связи:

S-channel, vector and axial-vector case:  $g_\chi = 1.0$ ,  $g_q = 0.25$

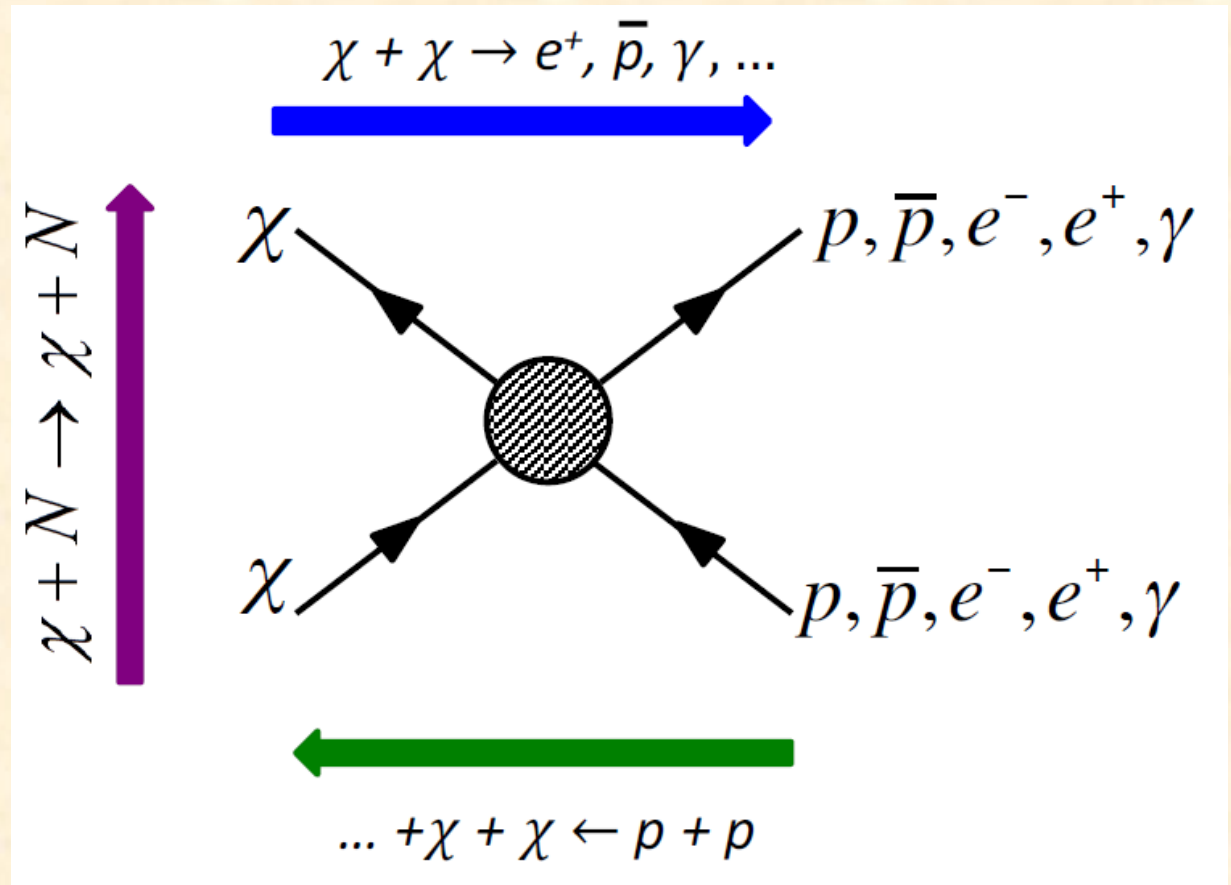
S-channel, scalar and pseudoscalar case:  $g_\chi = g_q = 1.0$

T-channel, coloured scalar case:  $g_\chi = g_q = 3.0$

# Эксперименты по поиску DM

Косвенный поиск: аннигиляция WIMP  
Эксперименты: PAMELLA, AMS ...

Прямой поиск:  
Взаимодействие  
WIMP с ядрами  
(упругое и неупругое,  
изучение взаимодей-  
ствия частиц темной  
материи с электро-  
нами и ядрами атомов )  
Эксперименты: DAMA,  
COGENT/LIBRA08,  
XENON, LUX  
...

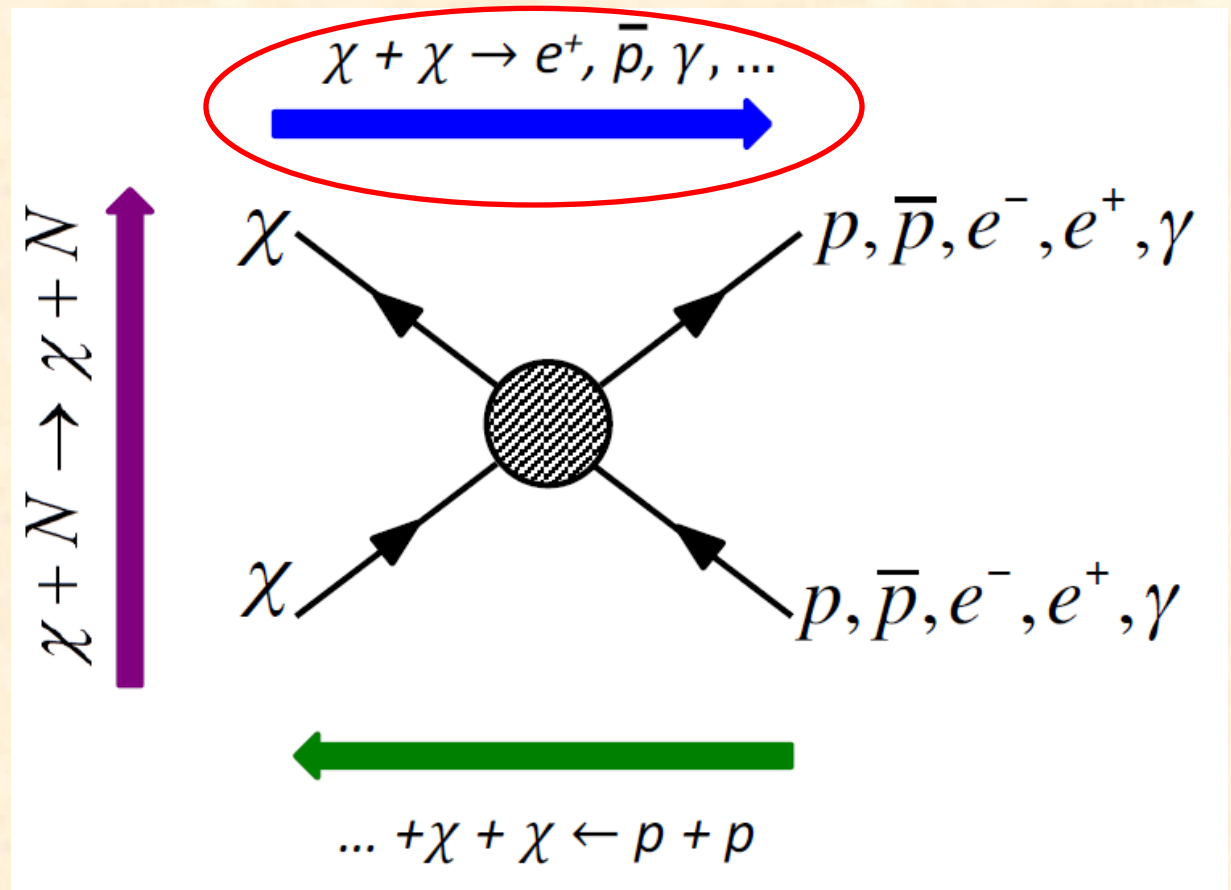


Поиск на ускорителях:  
LHC: ATLAS, CMS,  
Tevatron: CDF, D0

# Эксперименты по поиску DM

Косвенный поиск: аннигиляция WIMP  
Эксперименты: PAMELLA, AMS ...

Прямой поиск:  
Взаимодействие  
WIMP с ядрами  
(упругое и неупругое,  
изучение взаимодей-  
ствия частиц темной  
материи с электро-  
нами и ядрами атомов )  
Эксперименты: DAMA,  
COGENT/LIBRA08,  
XENON, LUX  
...



Поиск на ускорителях:  
LHC: ATLAS, CMS,  
Tevatron: CDF, D0



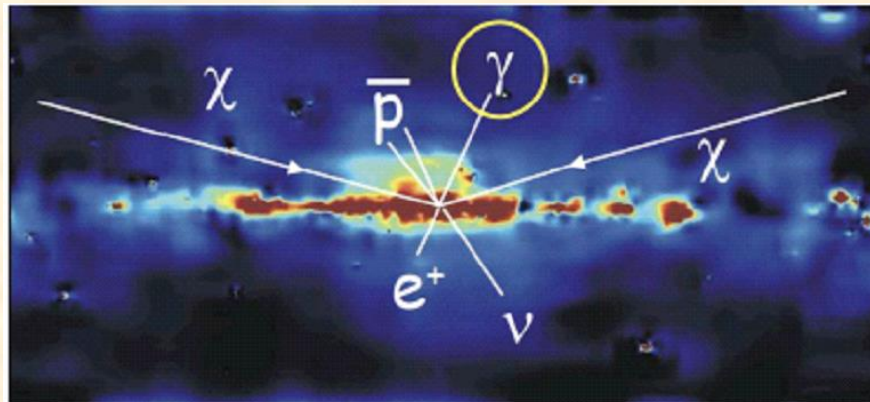
# Косвенные эксперименты поиску тёмной материи

AMS, Pamela - Измерение доли античастиц в космических лучах.

WMAP, PLANCK - Изучение реликтового излучения.

FERMI-LAT - Изучение  $\gamma$ -излучения от разных объектов галактики

AMANDA, IceCube, ANTARES - Нейтринные обсерватории. Поиск продуктов аннигиляции частиц темной материи в массивных объектах (например Солнце, центр галактики)



# AMS 2

talk by S.Ting 8.12.2016



- Поиск антиматерии
- Поиск “темной материи”
- Измерение доли античастиц в космических лучах
- ...



**Dark Matter:  $\chi$**

Collision of Cosmic Rays with the Interstellar Media will produce  $e^+, \bar{p}...$

$p, He + ISM \rightarrow e^+, \bar{p} + ...$

**Dark Matter ( $\chi$ ) annihilations**  $\chi + \chi \rightarrow e^+, \bar{p} + ...$

**The excess of  $e^+, \bar{p}$  from Dark Matter ( $\chi$ ) annihilations can be measured by AMS**

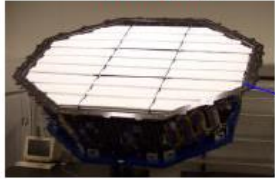
M. Turner and F. Wilczek, Phys. Rev. D42 (1990) 1001; J. Ellis 26<sup>th</sup> ICRC (1999)

С ростом энергии количество античастиц должно уменьшаться, если позитроны (антипротоны) являются продуктами аннигиляции частиц “темной материи” то при определенной энергии может быть увеличение количества античастиц.

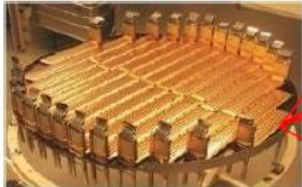
# AMS 2 детектор

## AMS: A TeV precision, multipurpose, magnetic spectrometer

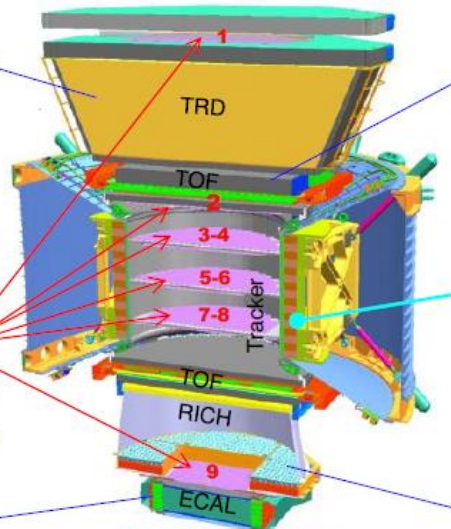
Transition Radiation Detector  
(TRD)  
Identify  $e^+$ ,  $e^-$



Silicon Tracker  
Z, P or R=P/Z



Electromagnetic Calorimeter  
(ECAL)  
E of  $e^+$ ,  $e^-$

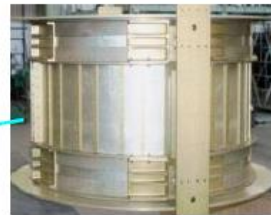


Z and P, E or R are  
measured independently by Tracker,  
ECAL, TOF and RICH

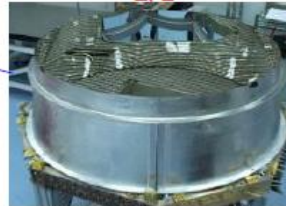
Time of Flight  
(TOF)  
Z, E



Magnet  
 $\pm Z$



Ring Imaging Cherenkov  
(RICH)  
Z, E



**8 layers of silicon tracker (STD):** position with 10 mm,  $\gamma$  ray measurement up to  $\sim 300$  GeV by tracking  $e^-e^+$  pair

**Time of flight (TOF) hodoscopes:** 4 planes of scintillators: time of flight with  $\sim 120$  ps resolution

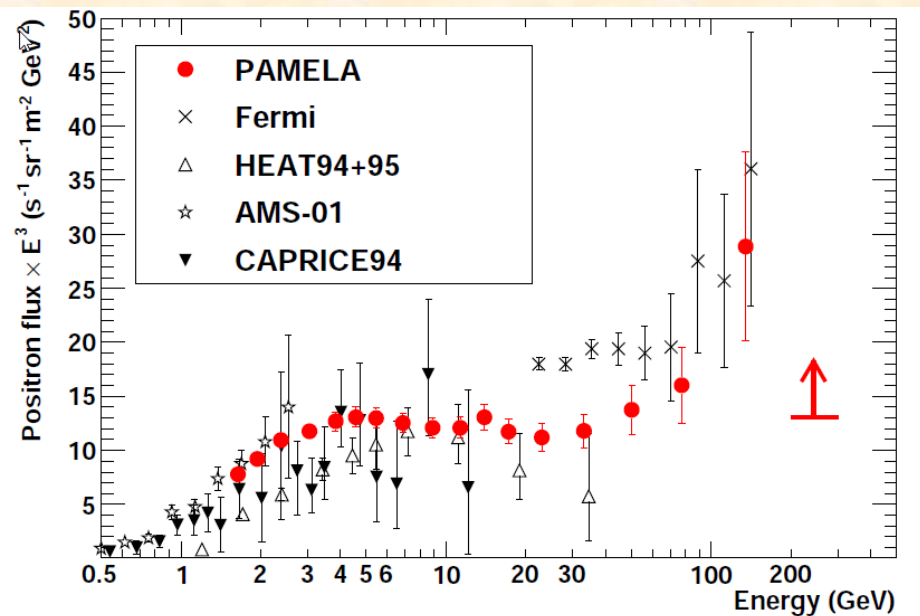
**RICH:** silica aerogel and photomultipliers

**EM calorimeter:** lead and scintillating fibers interlayered 3% energy resolution for  $e^-$ ,  $e^+$  and  $g$  at 100 GeV, hadron rejection factor of  $10^4$  in 1.5 GeV – 1 TeV

**Transition radiation detector (TRD):** fiber fleece with Xe/CO<sub>2</sub> straw tubes, hadron rejection factor of  $10^2$ - $10^3$  in 1.5-300 GeV range

# AMS 2: positron flux

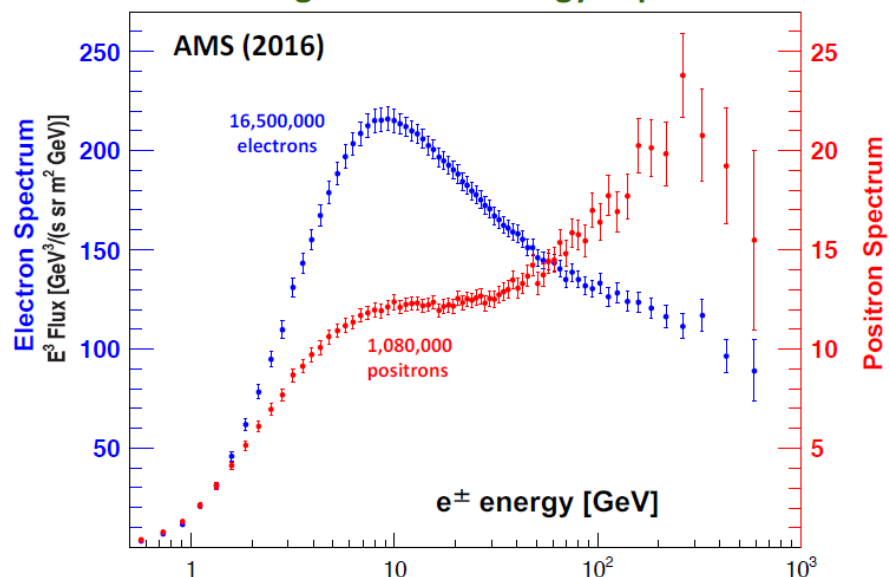
Before AMS2



AMS2

Physics Result 1: The Electron and Positron fluxes

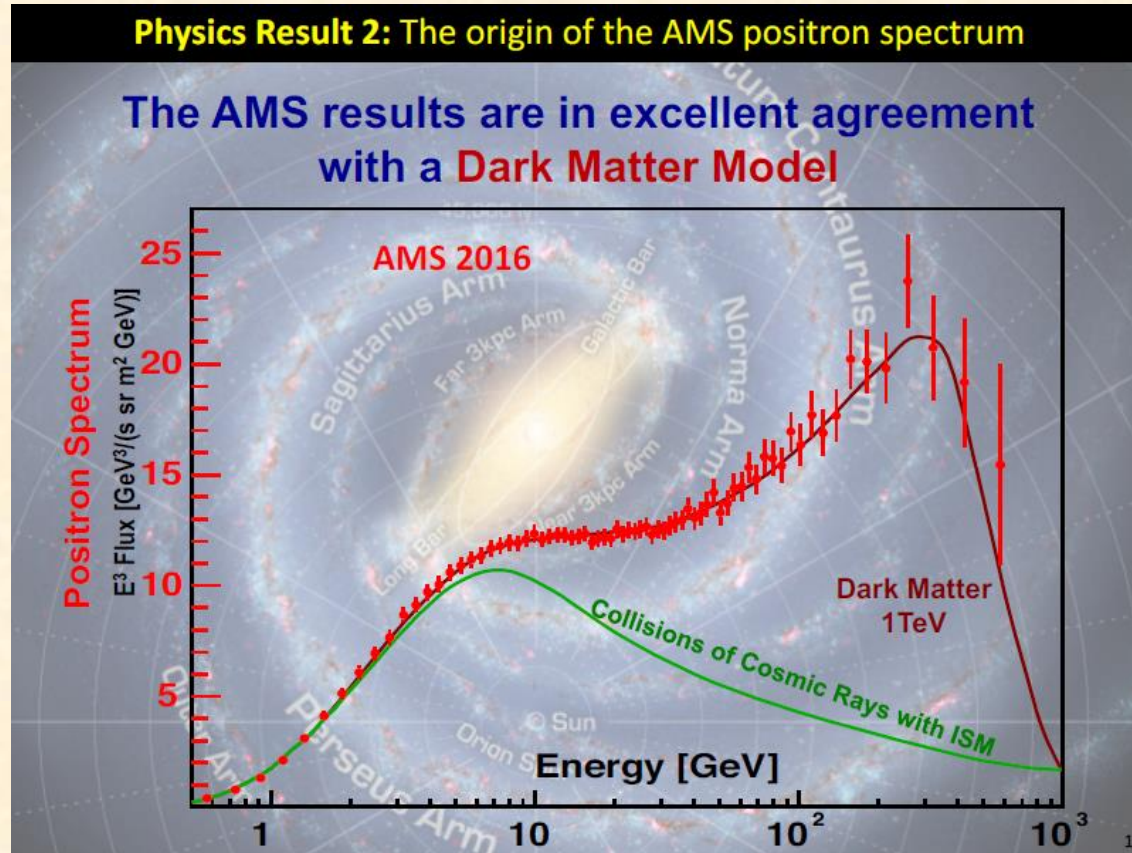
The electron flux and the positron flux are different in their magnitude and energy dependence



Форма спектра позитронов и электронов различна, чего не должно быть при взаимодействии космических лучей с межзвездной средой.

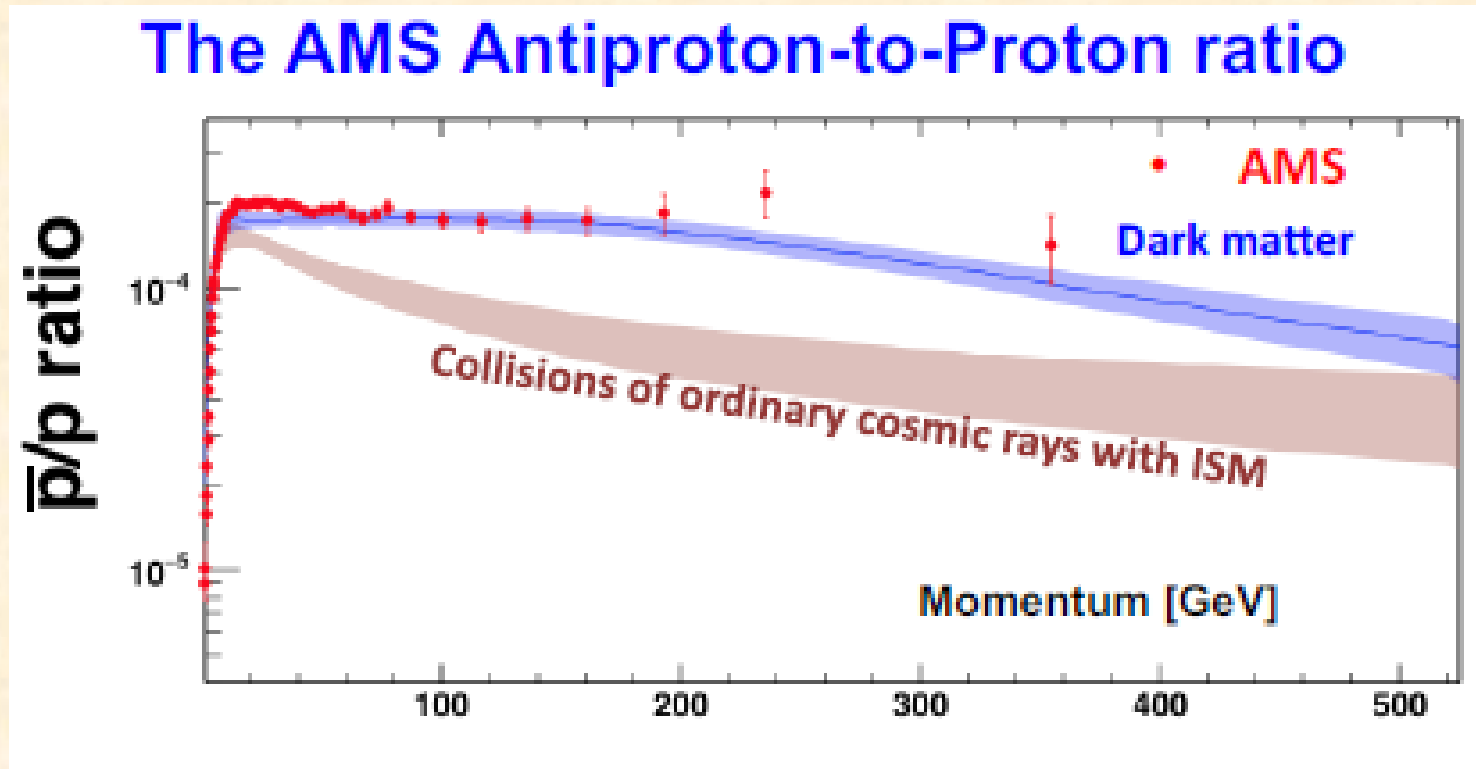


# AMS 2: positron flux



В результате аннигиляции частиц темной материи образуются дополнительные позитроны.

# AMS 2: p-bar/p ratio

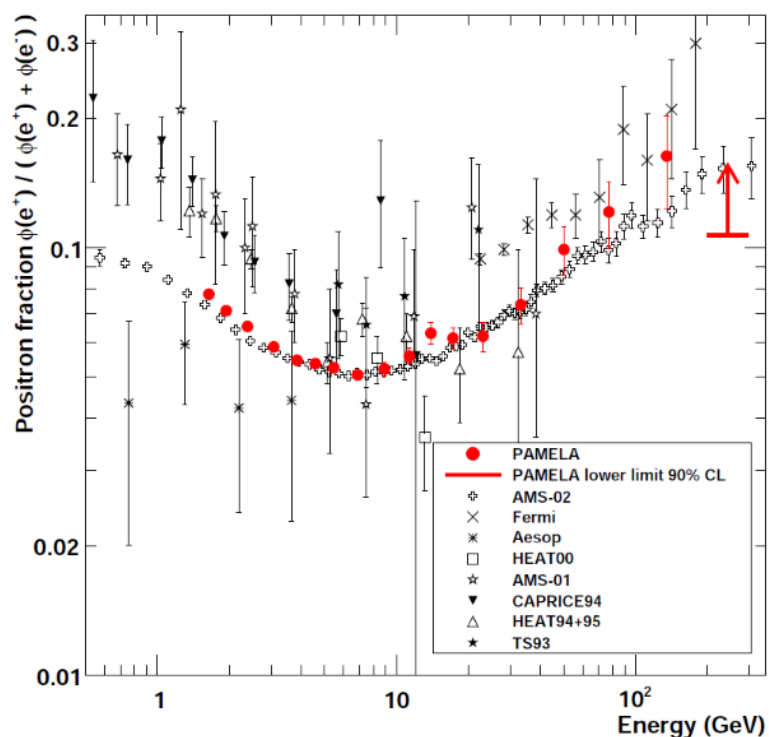


Отношение антипротонов к протонам отличается от астрофизических расчетов и не может быть объяснено излучением от пульсаров. Измерения можно объяснить наличием темной материи.

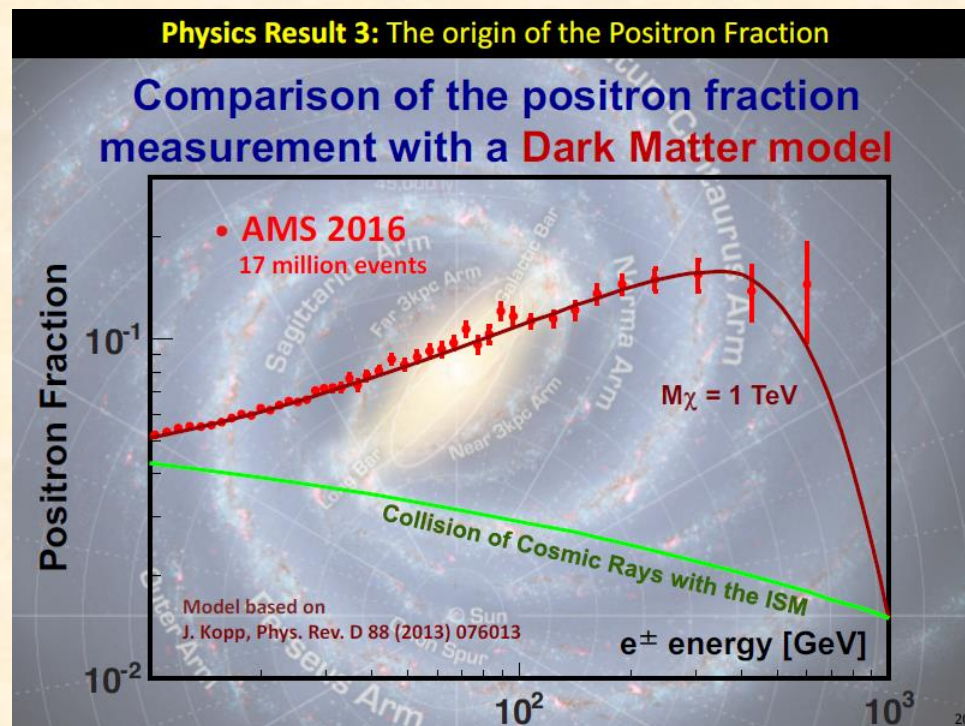
# AMS 2: positron fraction

$$e^+ / (e^+ + e^-)$$

Before AMS2

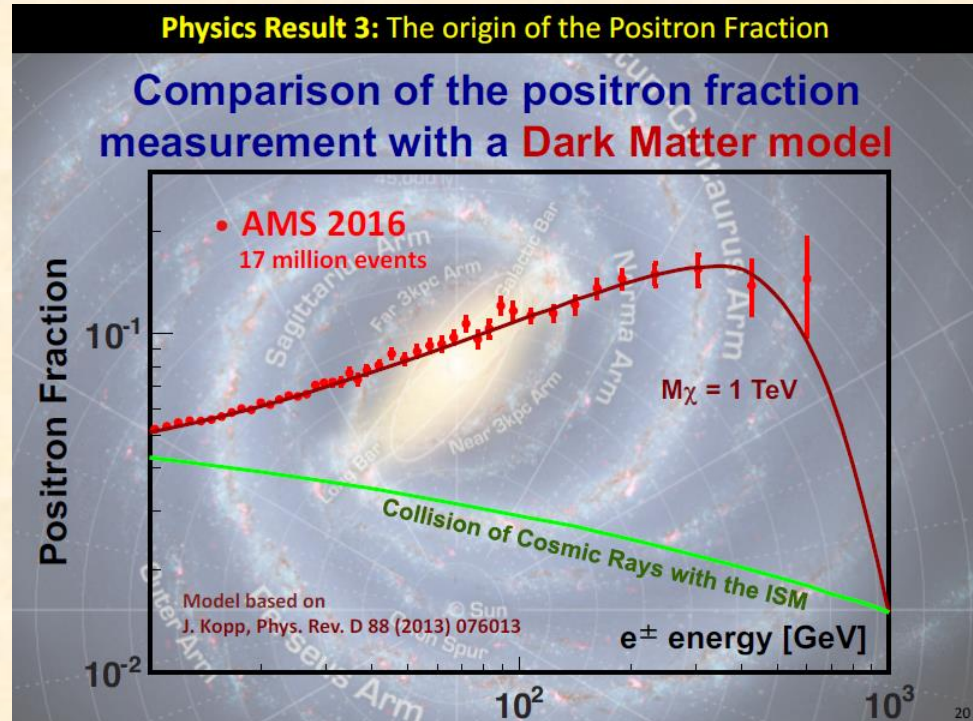
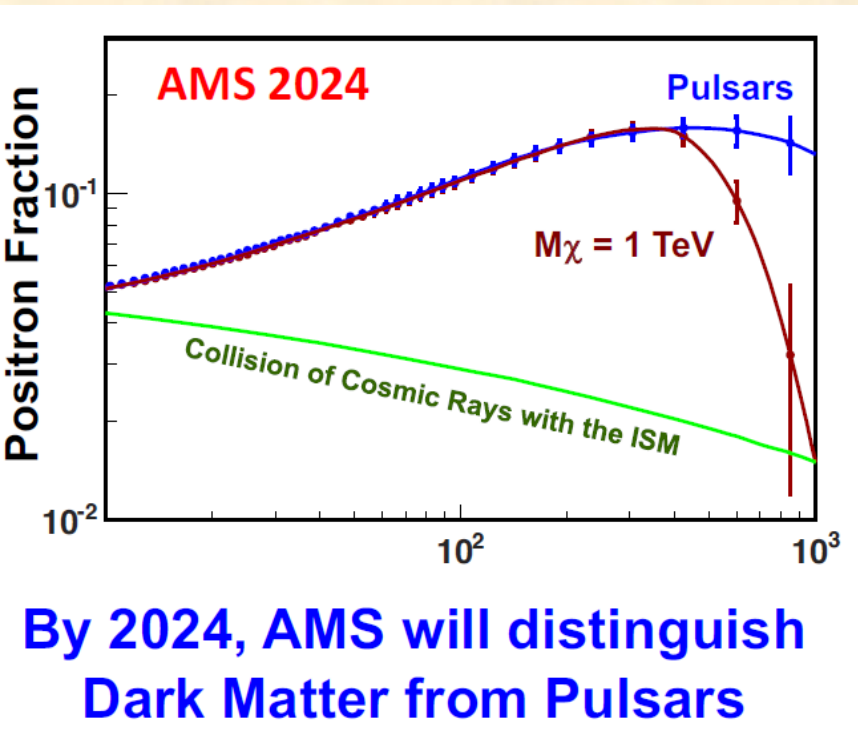


AMS2



Относительный вклад позитронов так же хорошо согласуется с модельными расчетами, указывающими на наличие темной материи

# AMS 2: positron fraction

$$e^+ / (e^+ + e^-)$$


Существующие отклонения можно объяснить вкладом излучения от пульсаров, но экспериментально это можно проверить только к 2024 году.

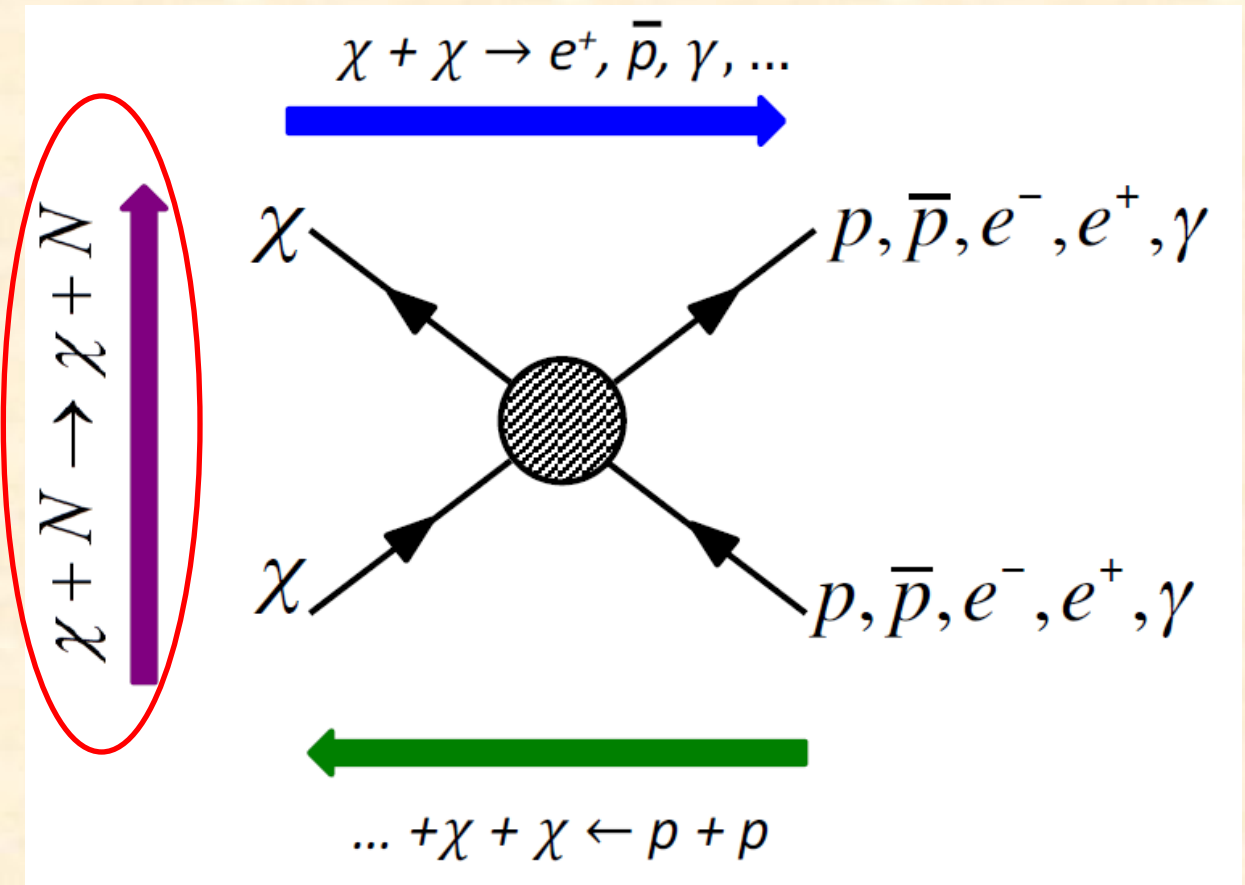


Данные эксперимента AMS2 не исключают существование темной материи но для окончательного подтверждения ее существования необходимы дополнительные данные, которые будут получены к 2024 году

# Эксперименты по поиску DM

Косвенный поиск: аннигиляция WIMP  
Эксперименты: PAMELLA, AMS ...

Прямой поиск:  
Взаимодействие  
WIMP с ядрами  
(упругое и неупругое,  
изучение взаимодей-  
ствия частиц темной  
материи с электро-  
нами и ядрами атомов )  
Эксперименты: DAMA,  
COGENT/LIBRA08,  
XENON, LUX  
...



Поиск на ускорителях:  
LHC: ATLAS, CMS,  
Tevatron: CDF, D0

# *Прямые эксперименты по поиску "тёмной материи"*

CDMS, CRESST, CoGeNT, EDELWEISS ...

Cryogenic crystal detectors

DEAP, DarkSide, WARP, ZEPLIN, XENON, LUX ...

Noble gas scintillators

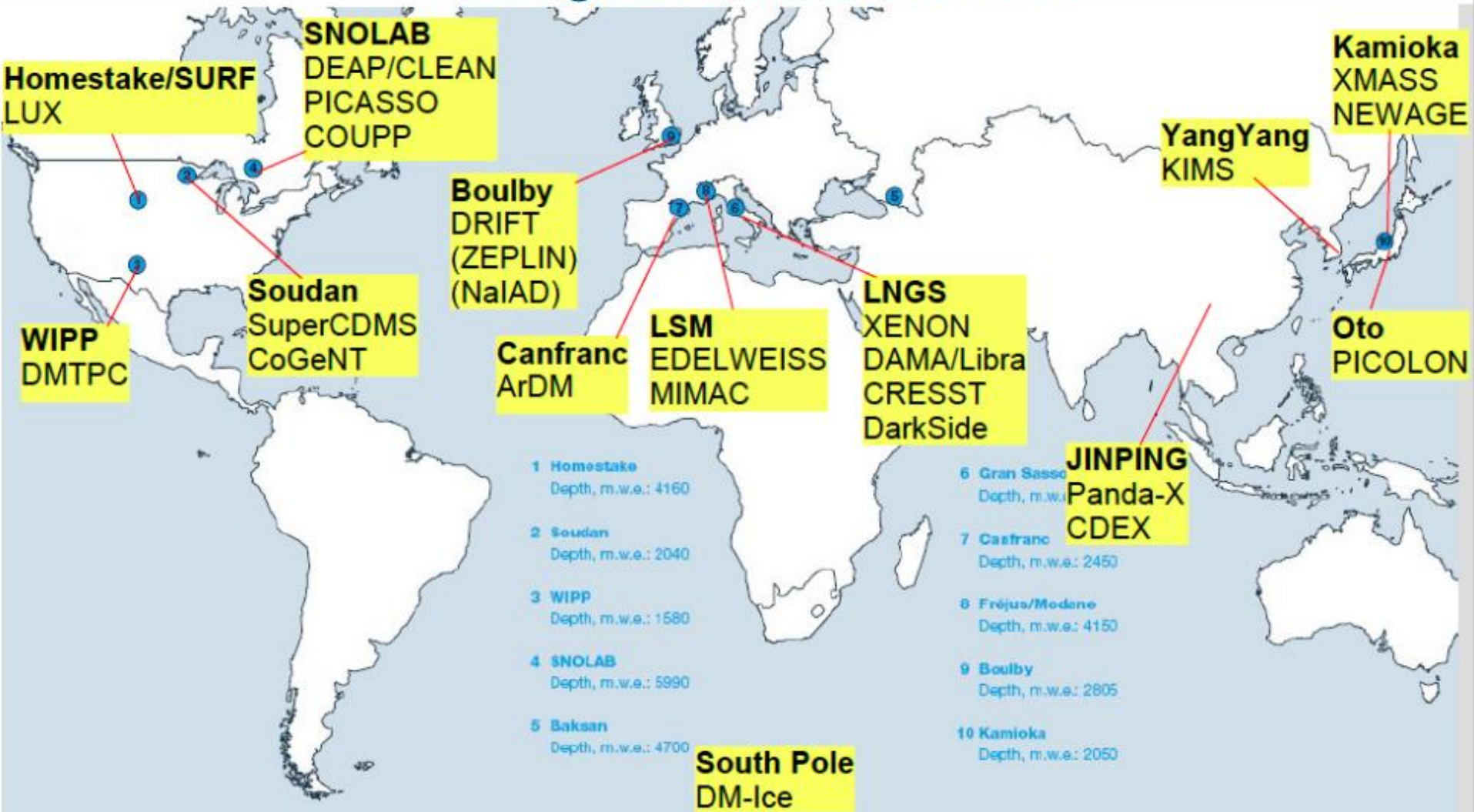
DM-ICE, IceCube, DAMA/LIBRA ...

Crystal scintillators

PICASSO, SIMPLE ...

Bubble chambers

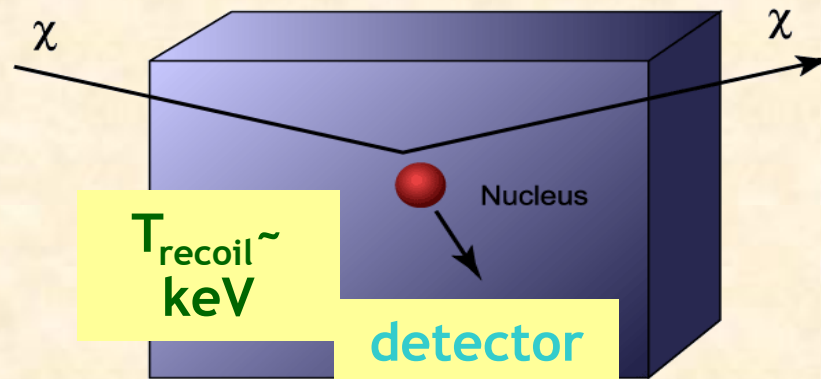
# Underground laboratories





# Прямое детектирование

- WIMP взаимодействуют с ядрами мишени в процессе упругого и неупругого рассеяния в детекторах



→ **scalar interactions** (WIMPs couples to nuclear mass; from the scalar and vector part of L)

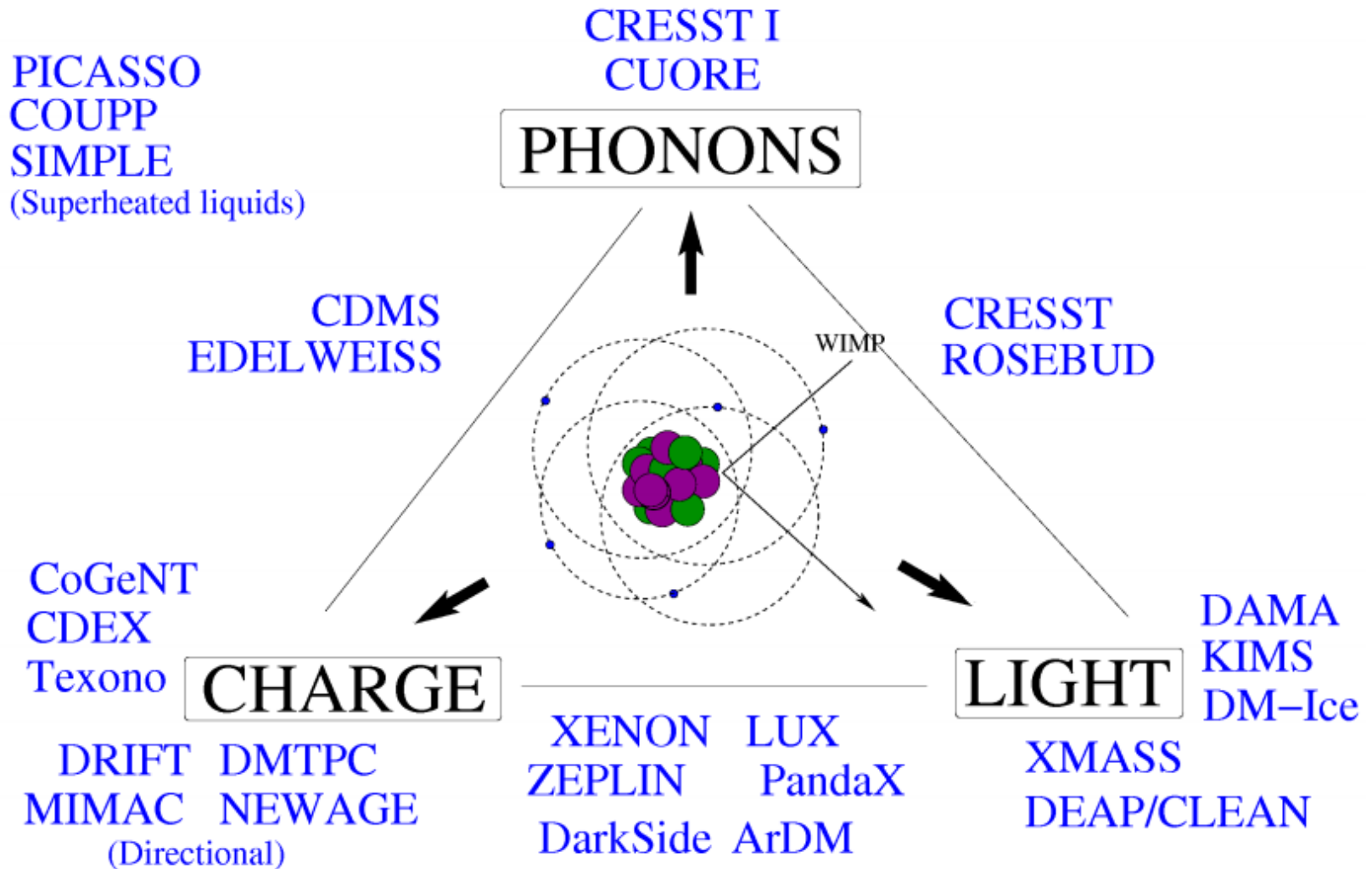
$$\sigma_{SI} = \frac{m_N^2}{4\pi(m_\chi + m_N)^2} \left[ Zf_p + (A - Z)f_n \right]^2 \quad f_{p,n} = \text{effective couplings to } p, n$$

→ **spin-spin interactions** (WIMPs couples to nuclear spin  $J_N$ , from the axial part of L)

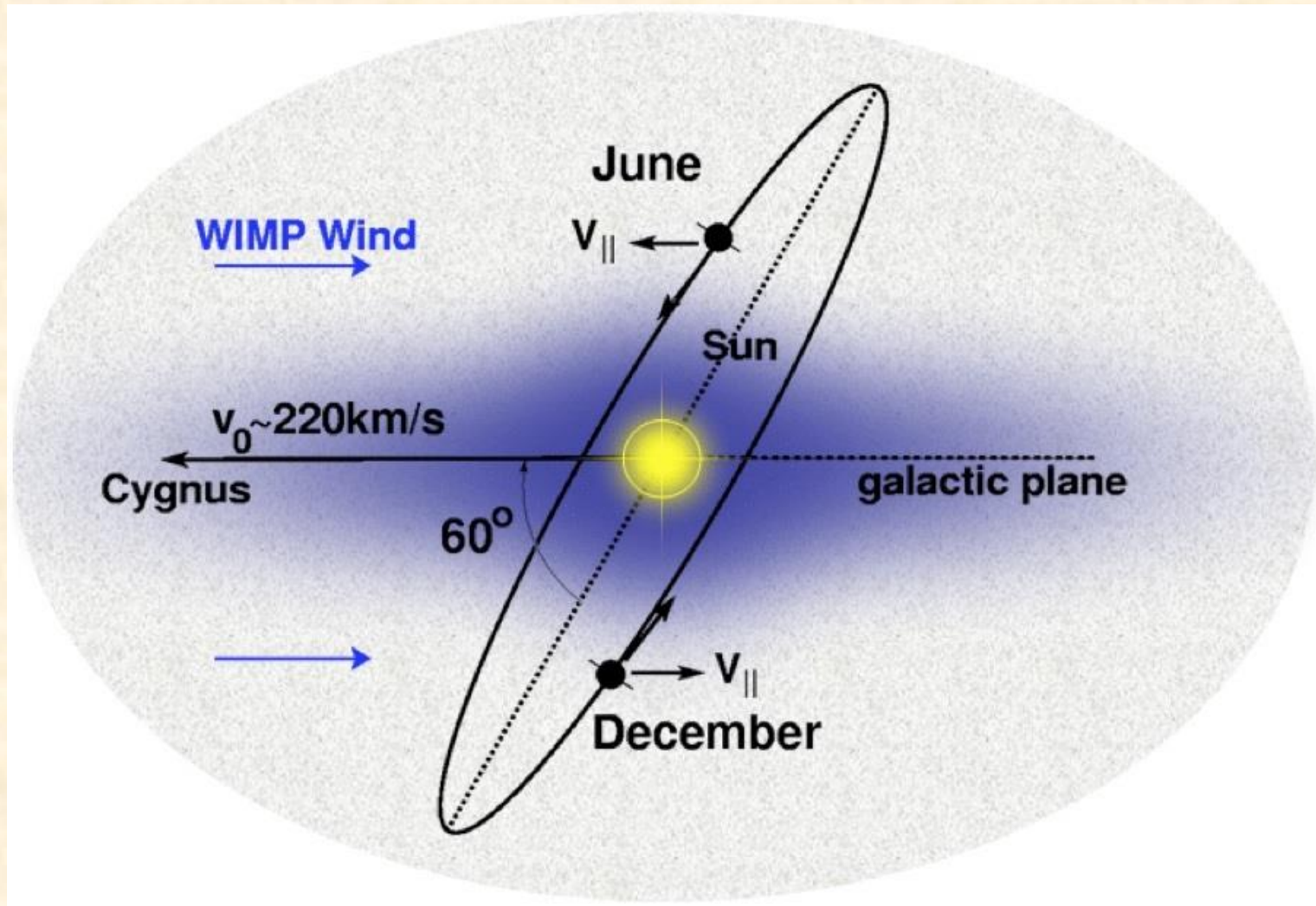
$$\sigma_{SD} = \frac{32}{\pi} G_F^2 \frac{m_\chi^2 m_N^2}{(m_\chi + m_N)^2} \frac{J_N + 1}{J_N} \left( a_p \langle S_p \rangle + a_n \langle S_n \rangle \right)^2$$

$\langle S_{p,n} \rangle$  = expectation values of the spin content of the p, n in the target nucleus  
 $a_{p,n}$  = effective couplings to p, n

# Direct detection experiments



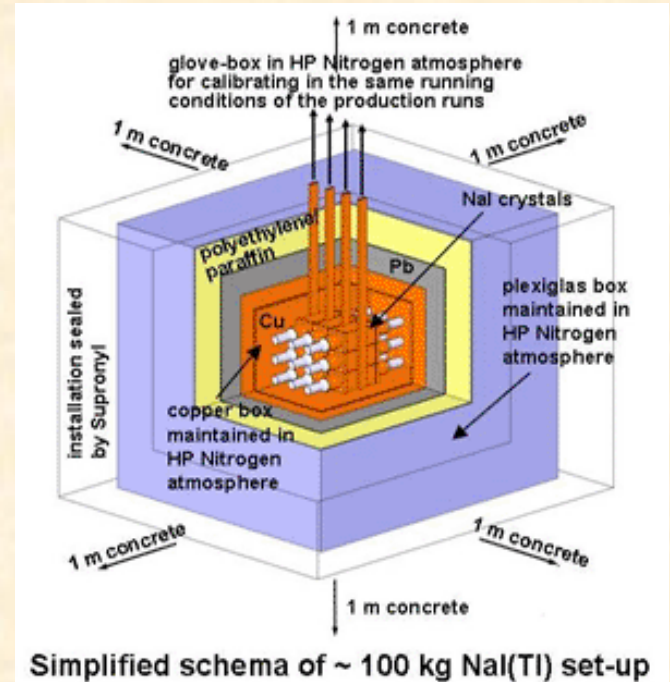
# Прямое детектирование



Ежегодная модуляция скорости счета и анализ спектров ядер отдачи

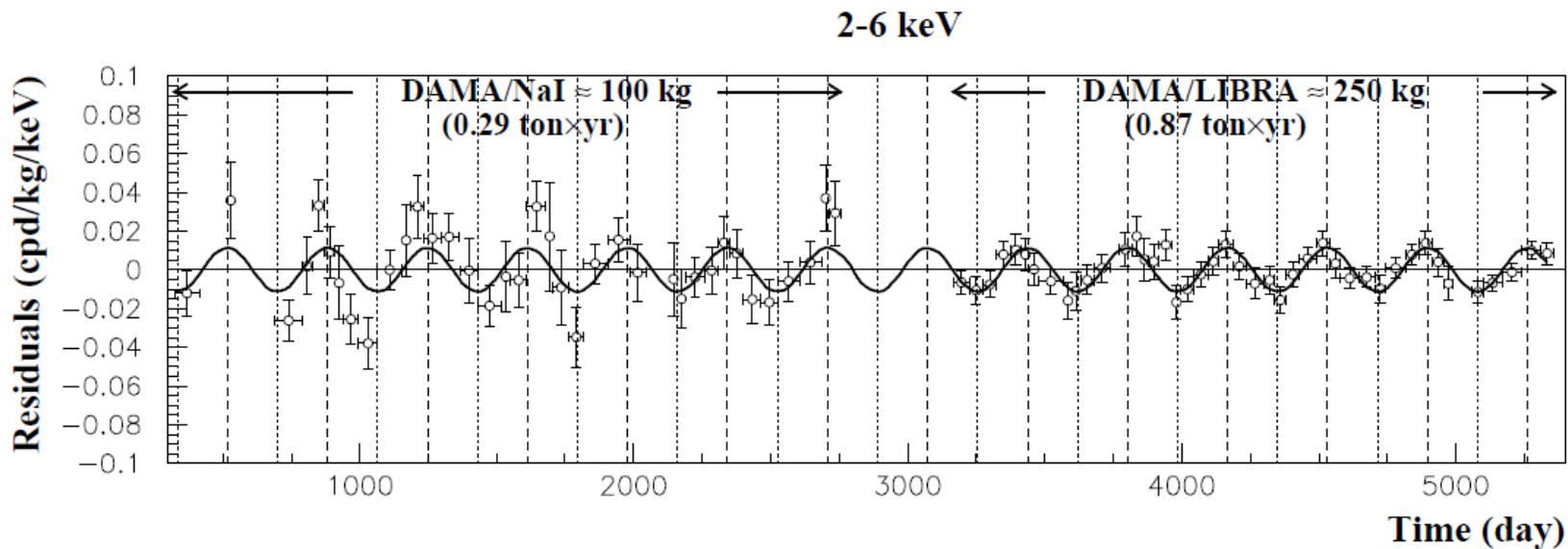
# DAMA/LIBRA

- 25 NaI легированных таллием кристаллов 5x5 см
- Датчики размещены внутри герметичной медной коробке продуваемой азотом высокой чистоты для уменьшения естественного фона коробка меди окружена низкофоновой многотонной защитой, и дополнительно, окружена, 1 м бетона, изготовленные из материала породы Гран-Сассо.
- изучаются взаимодействия частиц темной материи с электронами или атомными ядрами.
- Вследствие орбитального и суточного движения детектора вместе с Землёй темп счёта детектора будет испытывать годовые и суточные вариации.
- Максимальный темп счёта ожидается, когда проекция орбитальной скорости Земли на скорость движения Солнца относительно центра Галактики (и вимпов) максимальна.





# DAMA/LIBRA

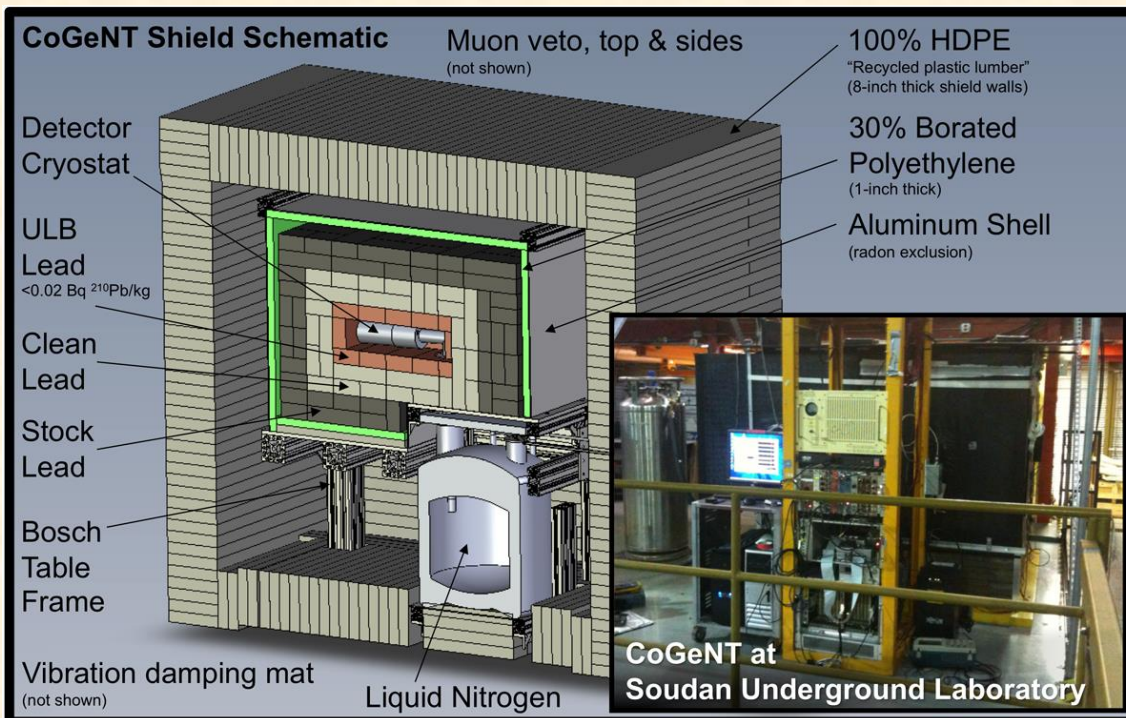


Показана только переменная часть сигнала, оставшаяся после вычета постоянного фона. Сплошной линией показана синусоидальная функция с периодом ровно 1 год и максимумами, приходящимися на 2 июня

**Вариации скорости счета на уровне  $9.3\sigma$**

# CoGeNT

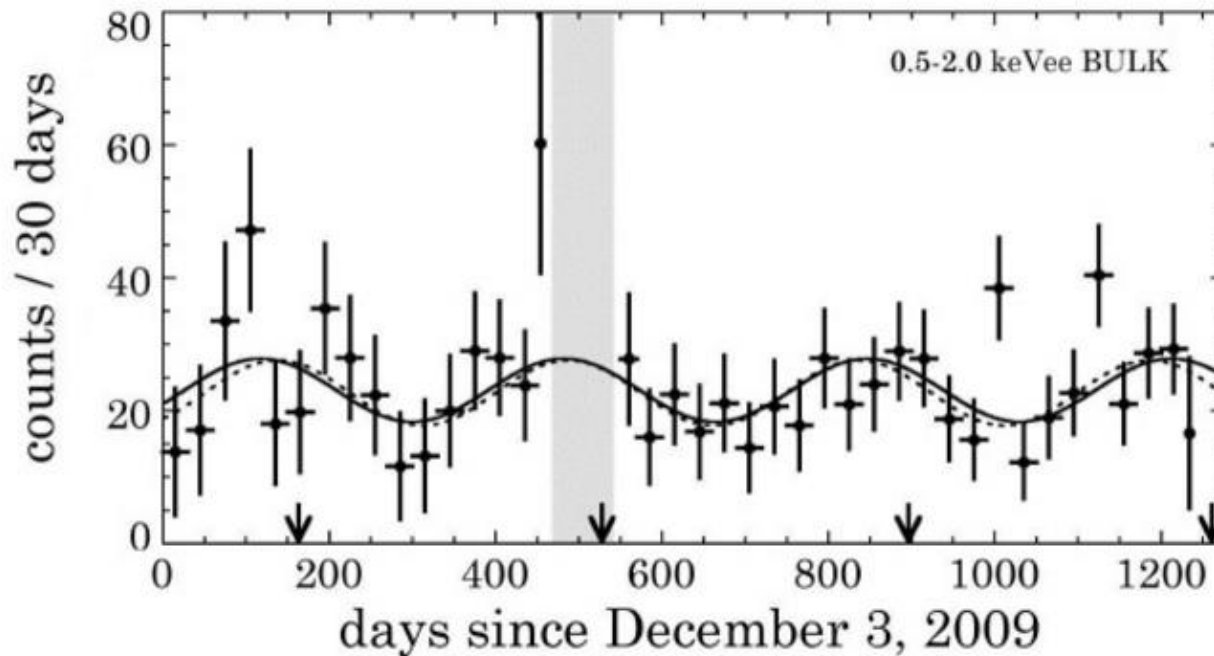
- CoGeNT experiment (COHERENT GERMANIUM NEUTRINO TECHNOLOGY) uses p-type point-contact (PPC) germanium detectors.



The CoGeNT Experiment uses a single, 440-gram, high-purity germanium crystal cooled to liquid nitrogen temperatures in its measurements.

The CoGeNT detector has an advantage of an very low energy threshold ( $\sim 0.5 \text{ keV}$ ) which allows it to search for nuclear recoil events due to dark matter particles of relatively low mass ( $> 5 \text{ GeV}/c^2$ ).

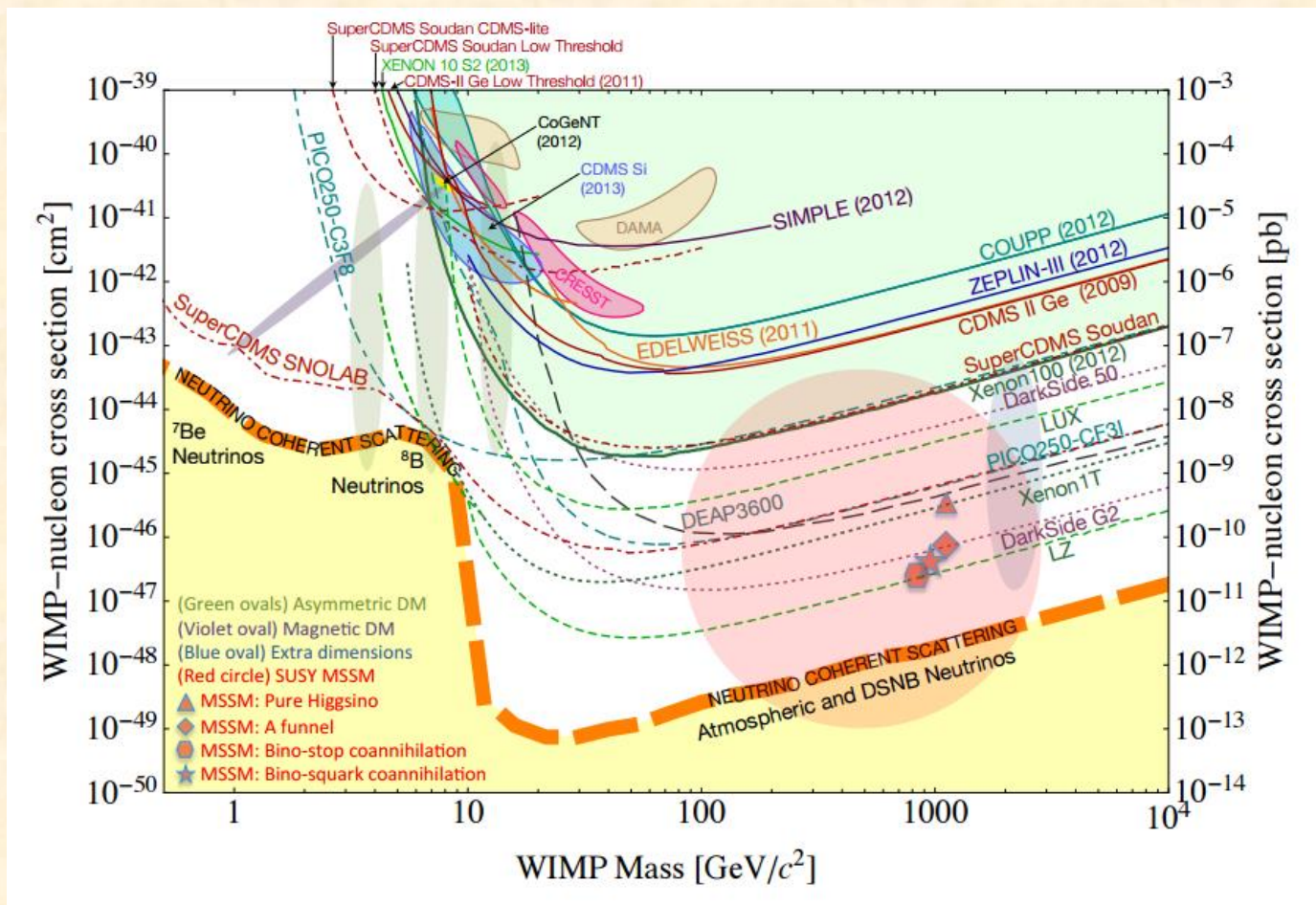
# CoGent



Количество событий в данных CoGent, отвечающих энергосигналу 0,5–2 кэВ в объеме детектора. Показана статистика за всё время работы с момента запуска эксперимента в декабре 2009 года. Серая полоса — вынужденный простой эксперимента из-за пожара в шахте. В данных прослеживается **сезонная модуляция** с периодом около одного года, показанная волнистой **линией**. **Вертикальные стрелки** отмечают **моменты максимумов** статистики в эксперименте **DAMA/Libra**. (**Сезонная модуляция обнаруженная CoGent равна  $2.2\sigma$** )



# Прямое детектирование: результаты



**Figure 26.** A compilation of WIMP-nucleon spin-independent cross section limits (solid curves), hints for WIMP signals (shaded closed contours) and projections (dot and dot-dashed curves) for US-led direct detection experiments that are expected to operate over the next decade. Also shown is an approximate band where coherent scattering of  $^8\text{B}$  solar neutrinos, atmospheric neutrinos and diffuse supernova neutrinos with nuclei will begin to limit the sensitivity of direct detection experiments to WIMPs. Finally, a suite of theoretical model predictions is indicated by the shaded regions, with model references included.

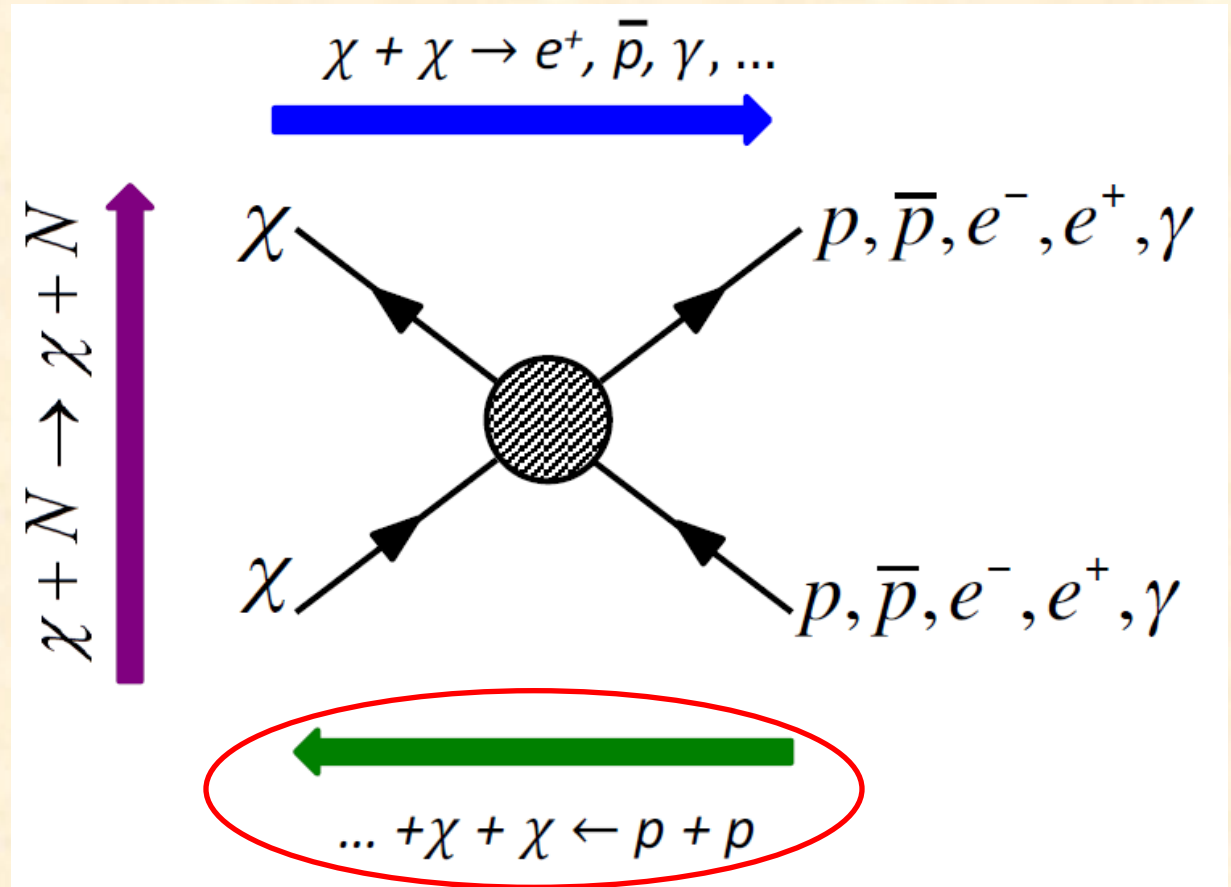


Годичные модуляции, полученные в эксперименте DAMA/LIBRA (и подтвержденные экспериментом CoGent на маленькой статистике) могут свидетельствовать о взаимодействии WIMP с частицами SM но для окончательных выводов необходимо подтверждение этих результатов другими экспериментами

# Эксперименты по поиску DM

Косвенный поиск: аннигиляция WIMP  
Эксперименты: PAMELLA, AMS ...

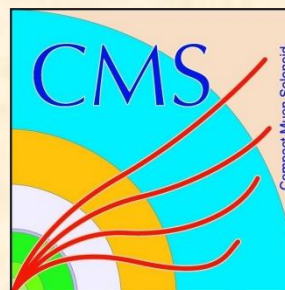
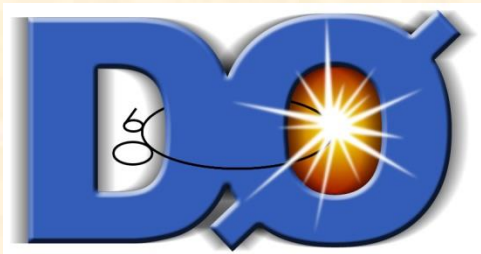
Прямой поиск:  
Взаимодействие  
WIMP с ядрами  
(упругое и неупругое,  
изучение взаимодей-  
ствия частиц темной  
материи с электро-  
нами и ядрами атомов )  
Эксперименты: DAMA,  
COGENT/LIBRA08,  
XENON, LUX  
...



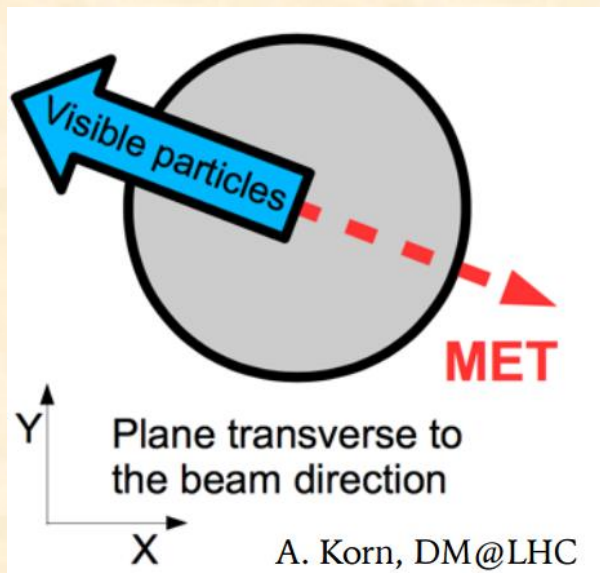
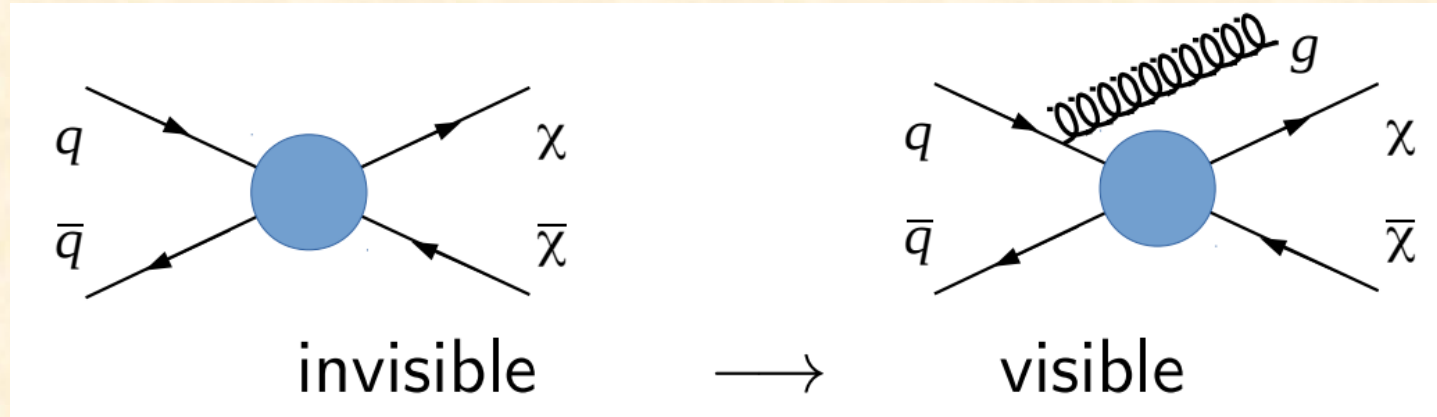
Поиск на ускорителях:  
LHC: ATLAS, CMS,  
Tevatron: CDF, D0

# *Эксперименты по поиску "тёмной материи" на коллайдерах*

ATLAS, CMS, D0, CDF



# DM: поиск на коллайдерах: Mono-X



- *DM particles are not detected*
- *Imbalance of transverse momentum "missing energy" MET+X : X =  $\gamma$ , Z, W, jet ...*
- *Background -> MC and/or data driven*
- *MC signal simulation*
- *Setting limits for cross section (comparison with the Direct measurements) and for mediator and DM particle masses*



# DM: поиск на коллайдерах

➤ *Mono-X* :  $pp \rightarrow E_{\text{miss}}^{\text{T}} + X$ ,

where  $X = \text{jet}, \gamma, W/Z (\rightarrow \text{lep/jets}),$   
t/b or H

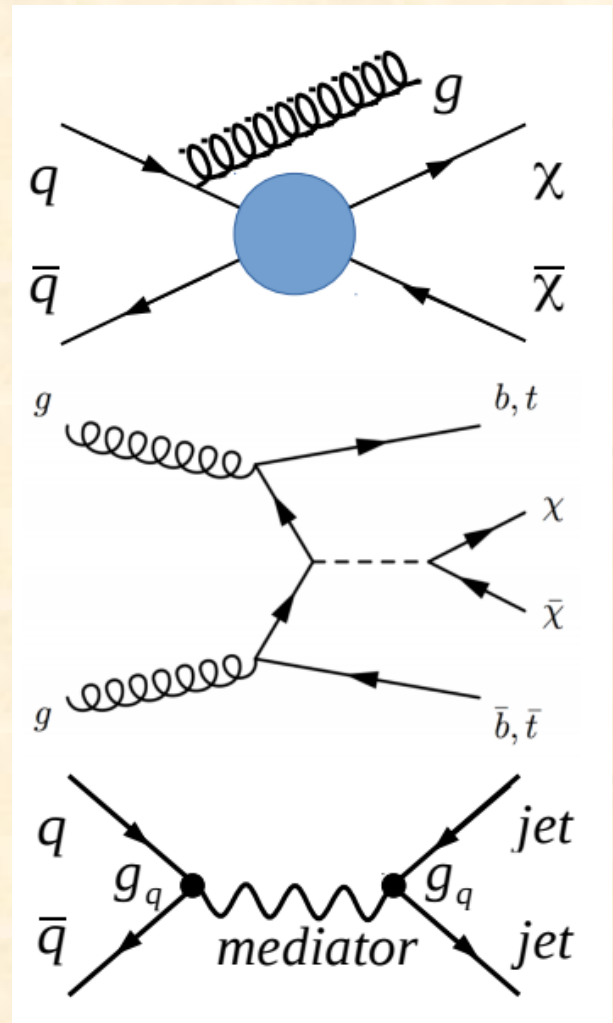


➤ *Associative production* ( $E_{\text{miss}}^{\text{T}} + X$ ),

three searches: hadronic, semi-leptonic  
and di-leptonic decays of the t/b quarks



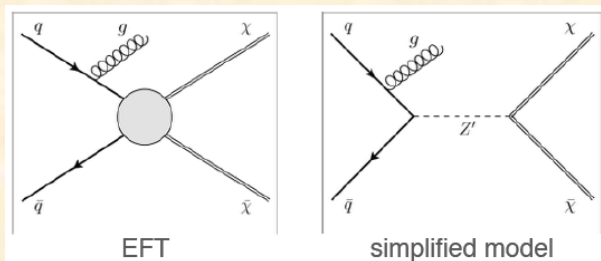
➤ *Search for dark mediator (dijet resonance)*



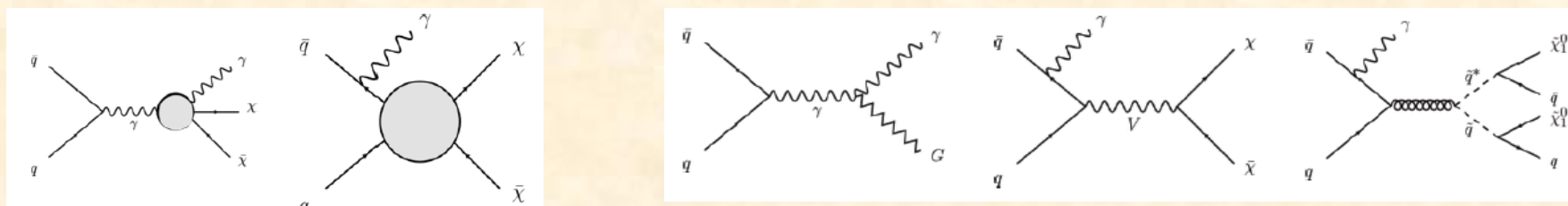
Ищем отклонения от предсказаний стандартной модели!

# DM: поиск на коллайдерах Mono-X

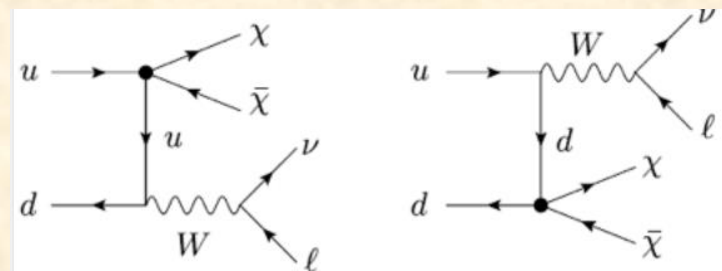
- *Mono-jet:*



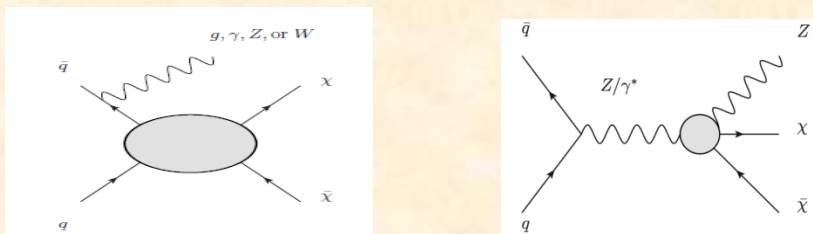
- *Mono-photon:*



- *Mono-W (leptonic/hadronic)*



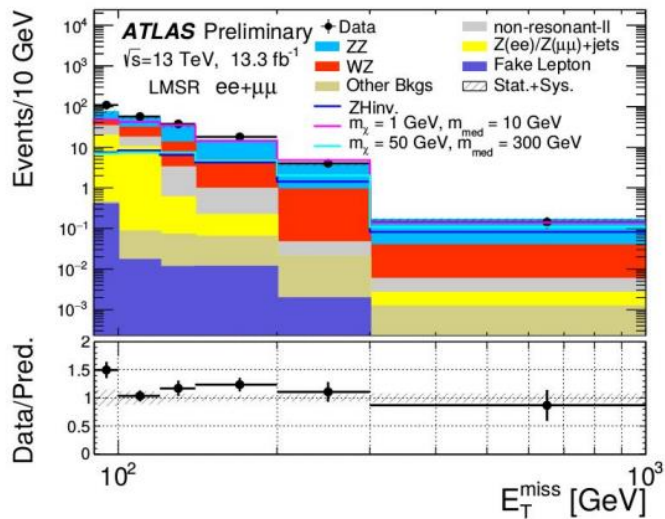
- *Mono-Z (leptonic/hadronic)*



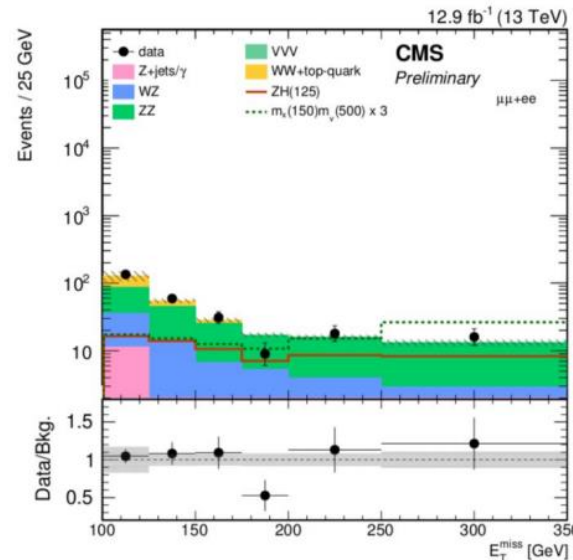
# ATLAS & CMS results for mono-Z, Run II

ATLAS ↓

CMS ↓

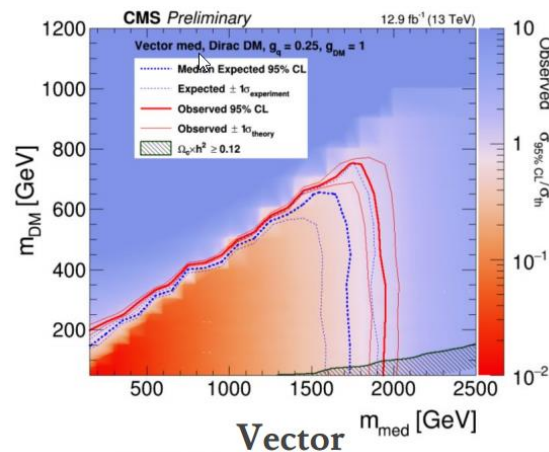
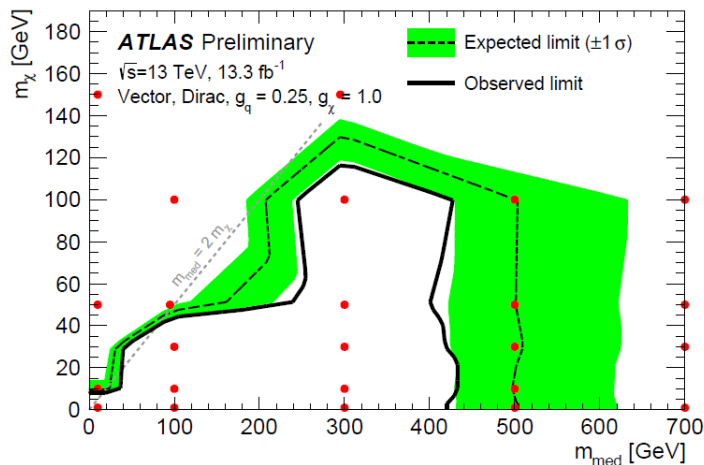


ATLAS-CONF-2016-056



CMS PAS EXO-16-038

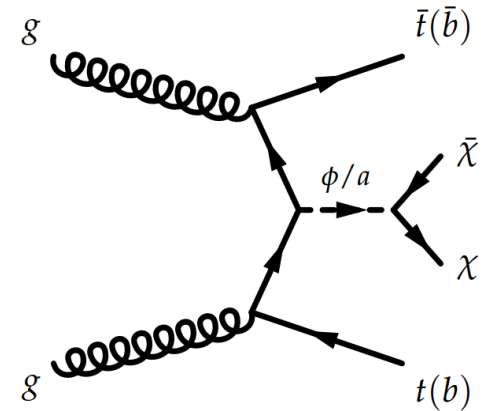
Распределение по недостающей энергии  $E_T^{miss}$   
 Нет отклонений от предсказаний стандартной модели



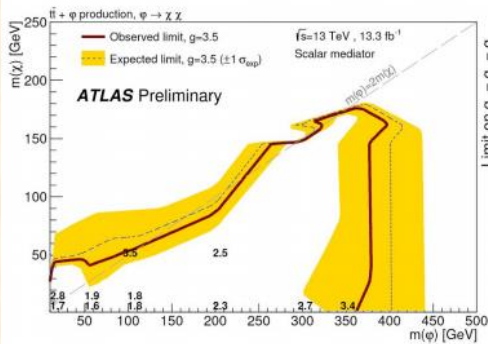
Полученные пределы на массу медиатора и частицы темной материи

# ATLAS Results for associative production Run II

- Select events with b-jets plus  $E_T^{miss}$
- Simplified models with scalar and pseudo scalar mediator used for analysis
- Background dominated by top pairs
- Hadronic, semi-leptonic and di-leptonic decay under study
- Limits obtained for DM and mediator masses

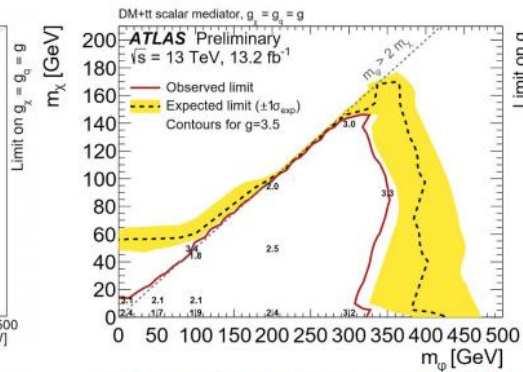


Fully hadronic  
(0 leptons)



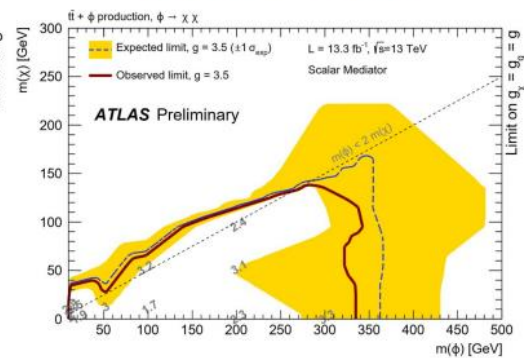
[ATLAS-CONF-2016-077](#)

Semi-leptonic  
(1 lepton + jets)



[ATLAS-CONF-2016-050](#)

Fully leptonic  
(2 leptons + jets)



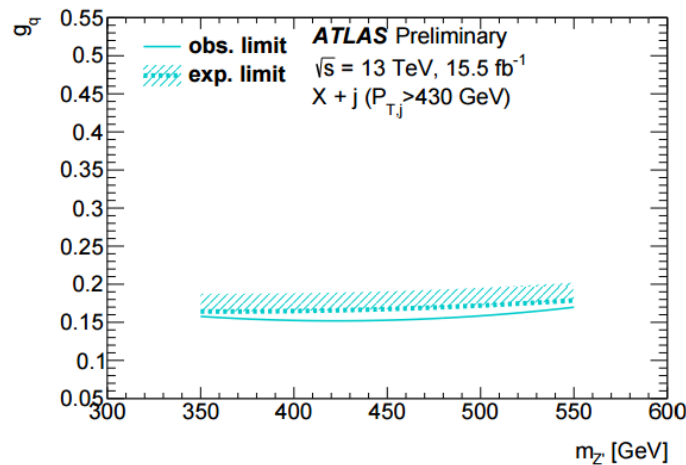
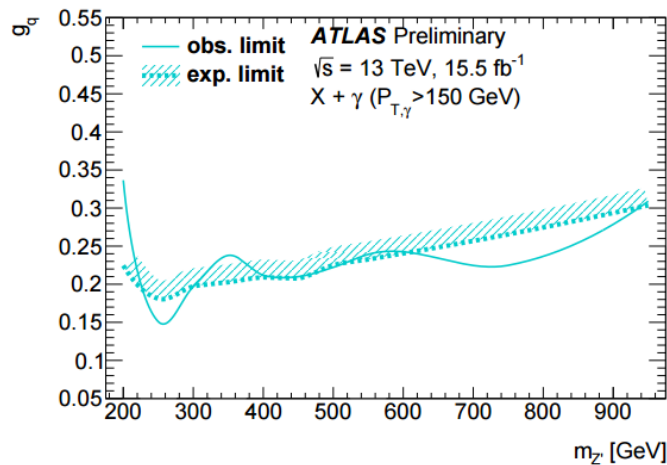
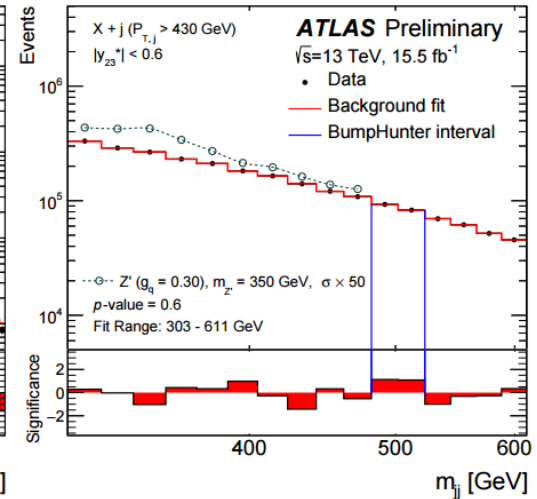
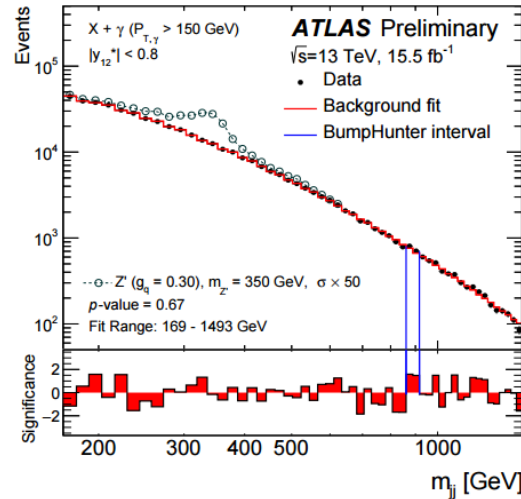
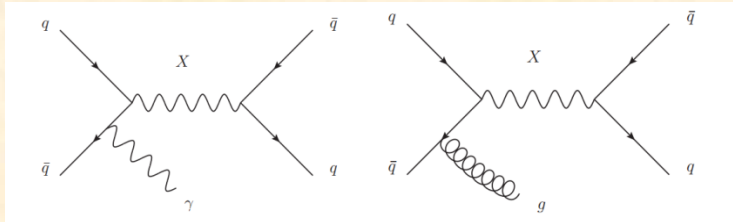
[ATLAS-CONF-2016-076](#)

Associate production of bottom quarks also studied in [ATLAS-CONF-2016-086](#)

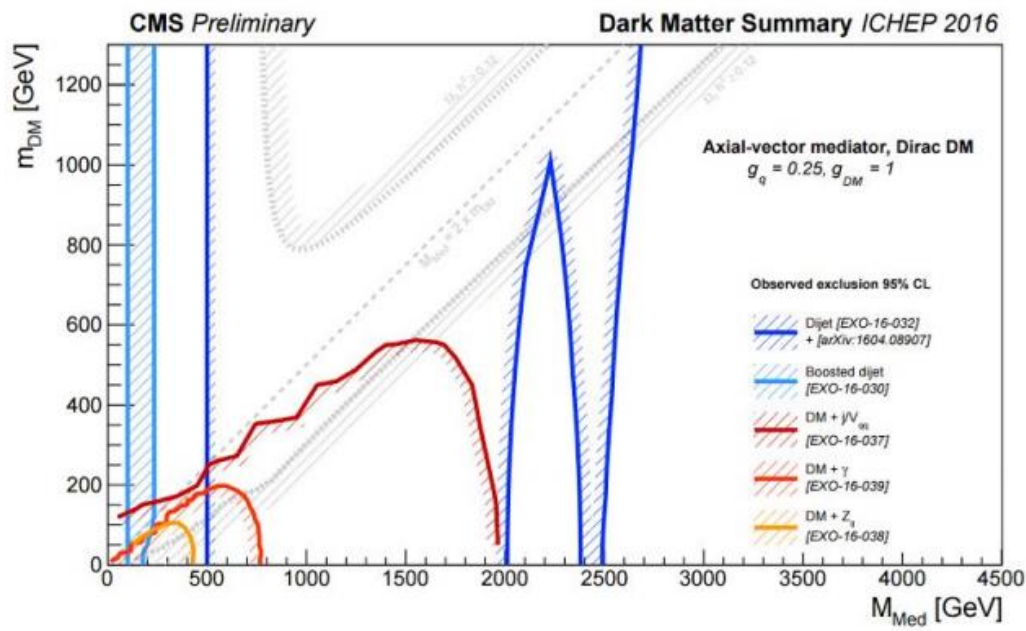
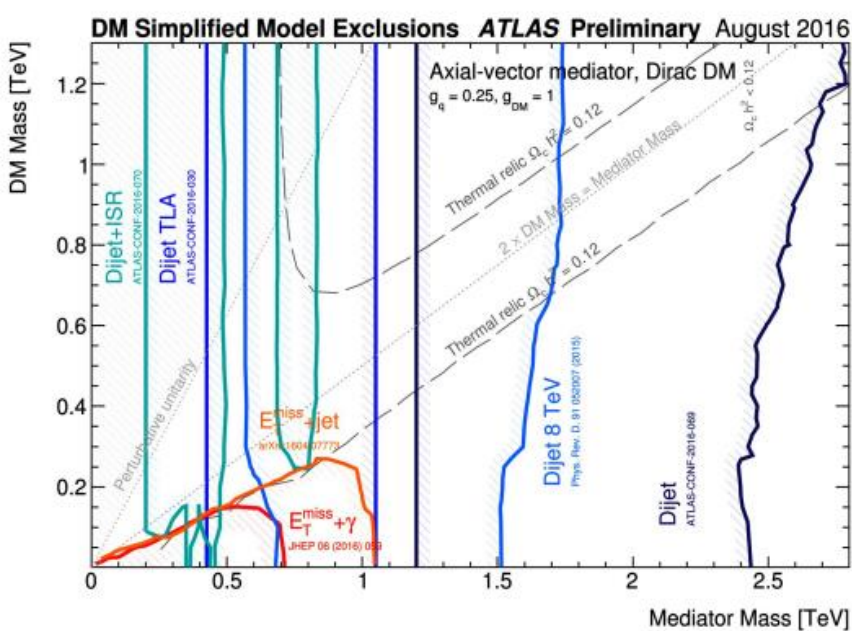


# ATLAS Results for dijets analysis Run II

Look for dark mediator decaying into quarks  
→ dijet resonances

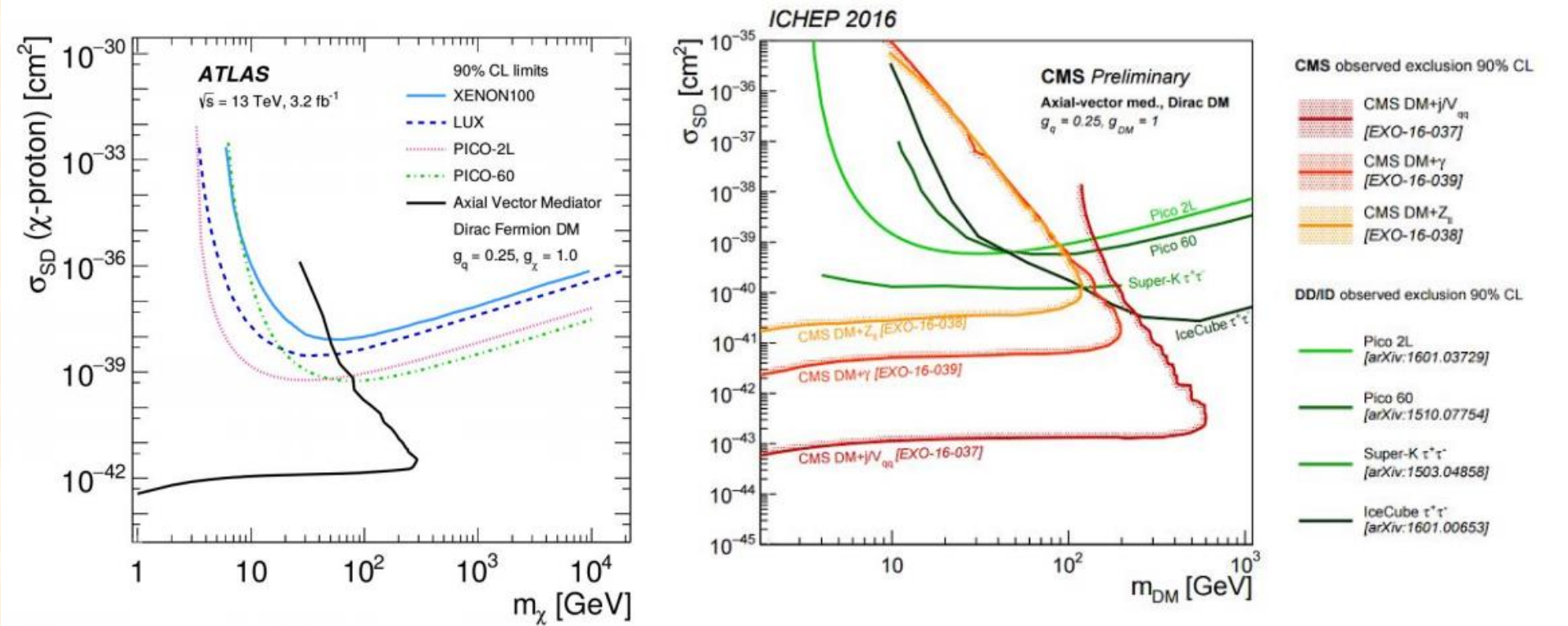


# ATLAS & CMS results summary for the 2015-2016 (partly)



Regions in a dark matter mass–mediator mass plane excluded at 95% CL by a selection of dark matter searches, for one possible interaction between the Standard Model and dark matter with axial-vector mediator described in [arXiv:1507.00966](https://arxiv.org/abs/1507.00966) (ALTAS). A dotted curve indicates the kinematic threshold where the mediator can decay on-shell into dark matter.

# Comparison with Direct & Indirect Detection Constraints



[Phys. Rev. D 94, 032005 \(2016\)](#)

Положительные результаты, полученные в экспериментах AMS2, DAMA/LIBRA, CoGent требуют дополнительных подтверждений

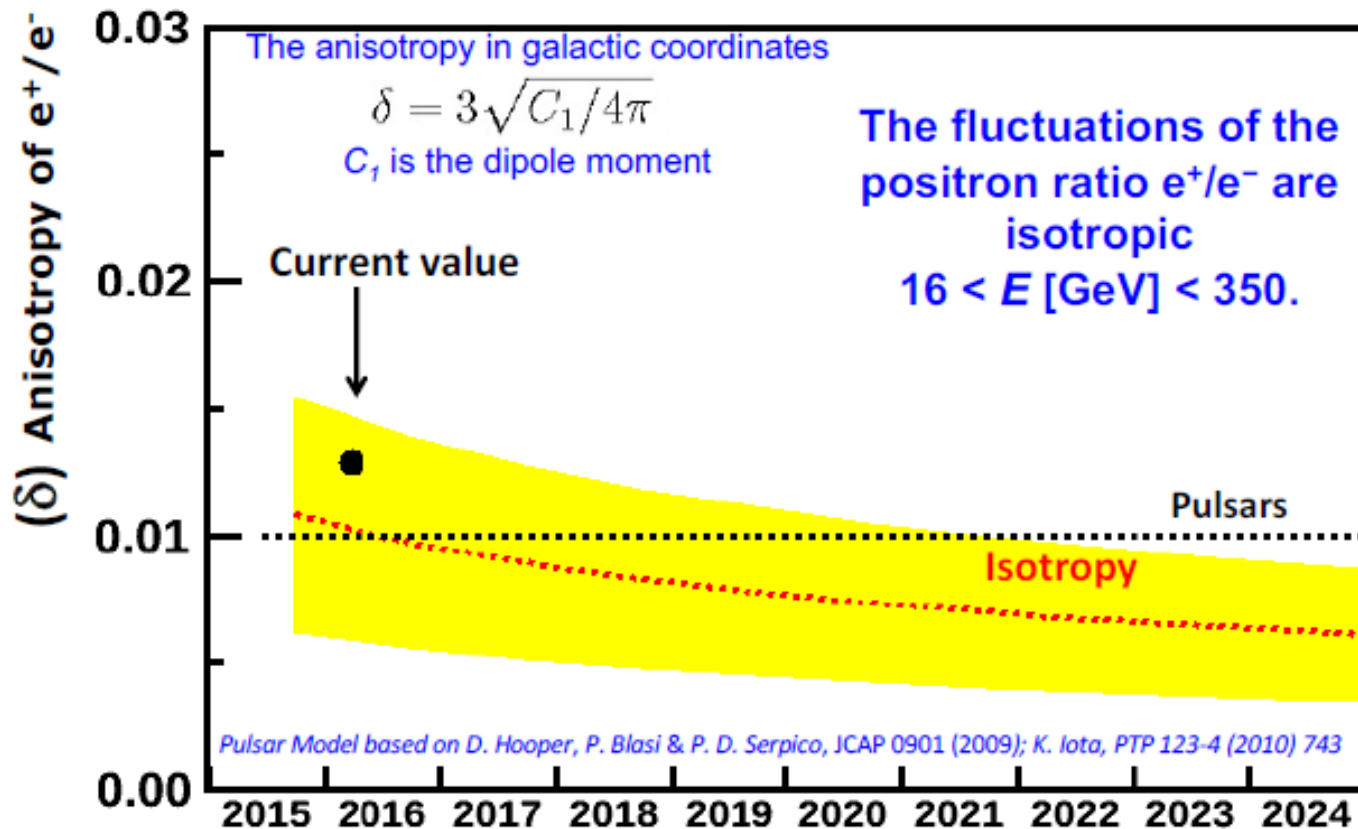
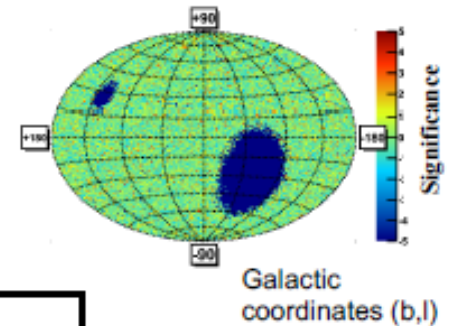
**Поиски темной материи  
продолжаются!**



# ***Backup***

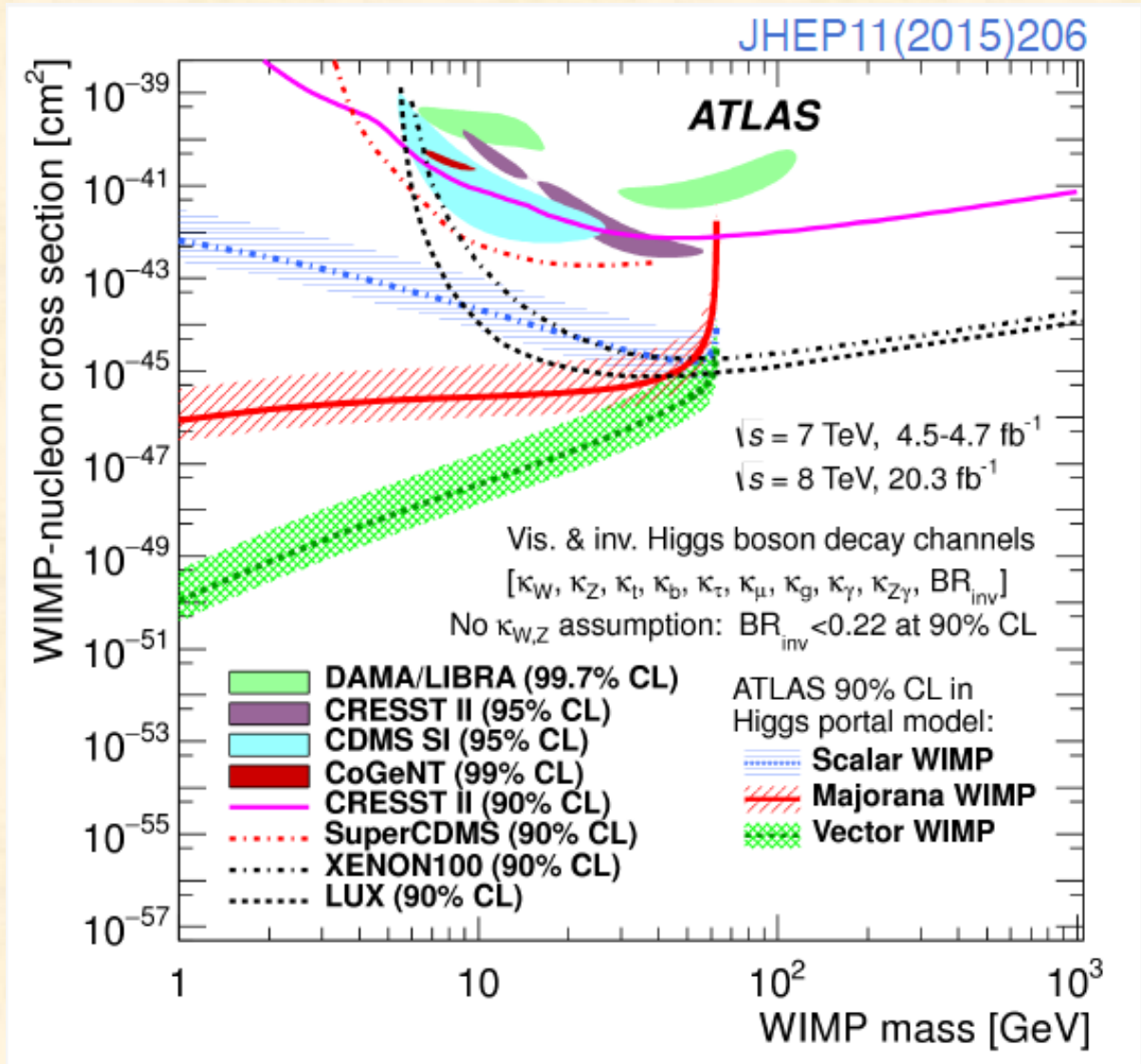
## Physics Result 4: Measurement of anisotropy

Astrophysical point sources like pulsars will imprint a higher level of anisotropy on the arrival directions of energetic positrons than a smooth dark matter halo.

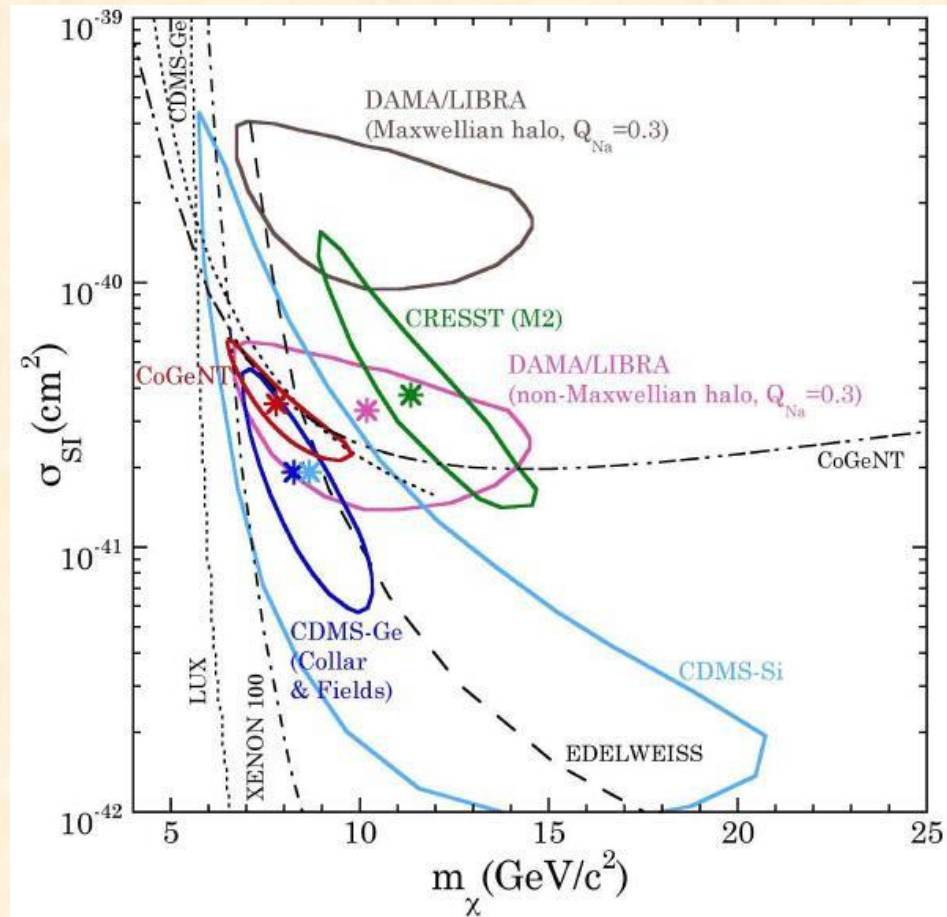


**Data taking to 2024 will allow to explore anisotropies of 1%**

# ATLAS results from Run I



# Прямое детектирование: результаты



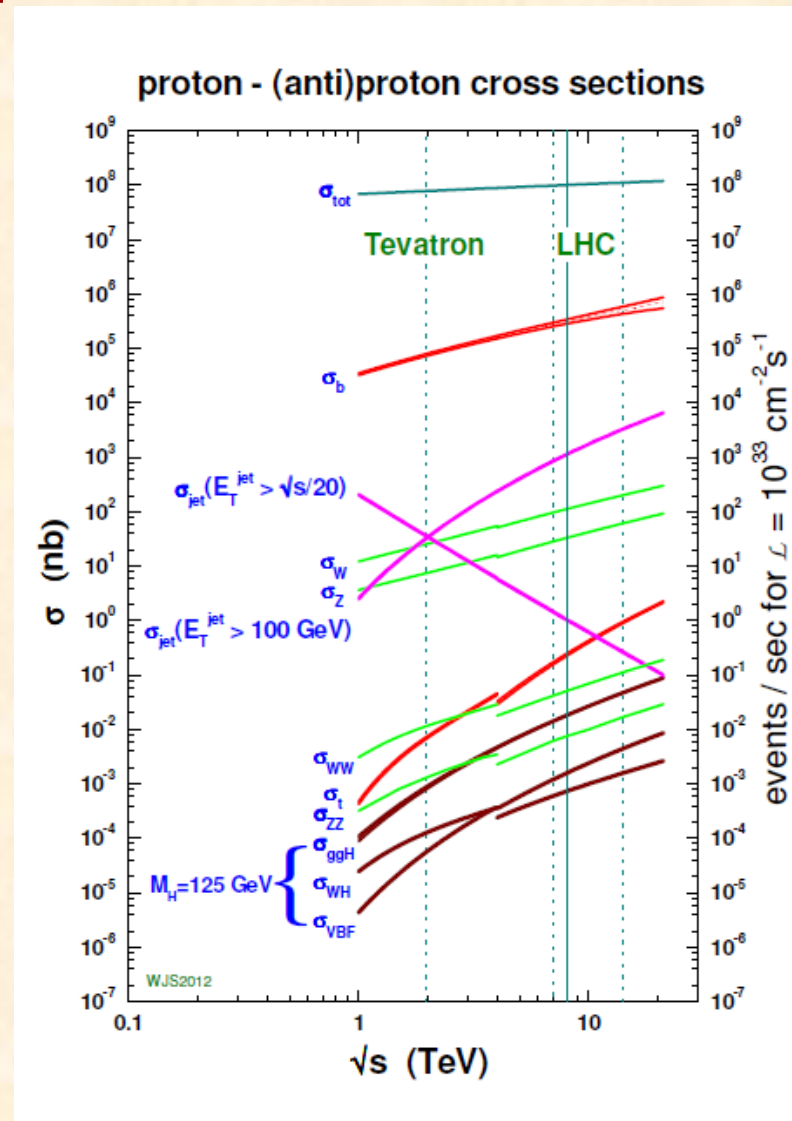
Области параметров массы и сечения взаимодействия частиц темной материи, на которые указывают четыре эксперимента с положительными результатами. В рамках определенных моделей распределения частиц темной материи три результата удастся согласовать друг с другом. Но, эти значения попадают в область, закрытую экспериментами XENON100 и LUX.



# Фоновые процессы: моно-Z канал

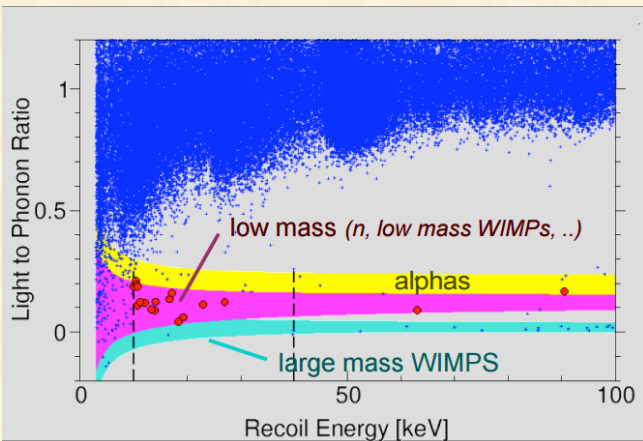
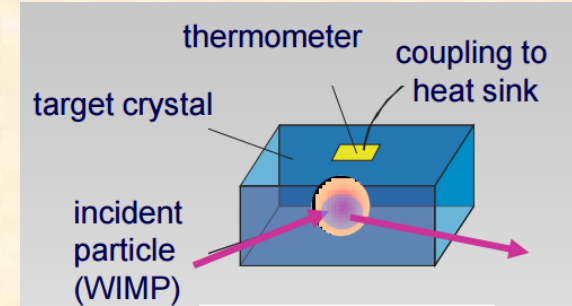
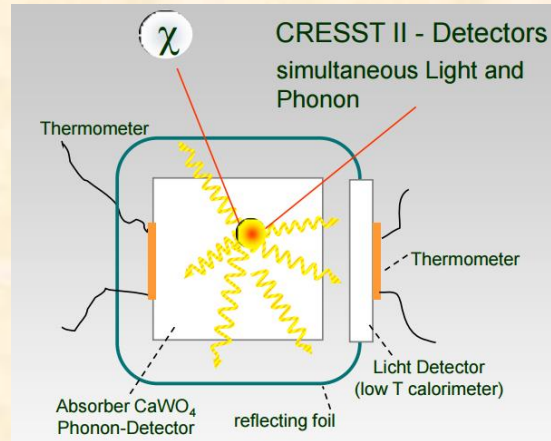
- $ZZ$  (MC based)
- $WZ$  (MC based)
- $WW$  (data driven:  $e\mu$  control region)
- $Z$ +jets (data driven: ABCD method)
- $W$ +jets, multijets (data driven: like sign method and fake factor method)
- $t\bar{t}$  (data driven,  $e\mu$  control region)
- $SM$  higgs (MC based)

Правильный учет фоновых процессов является фундаментом данного анализа !!!

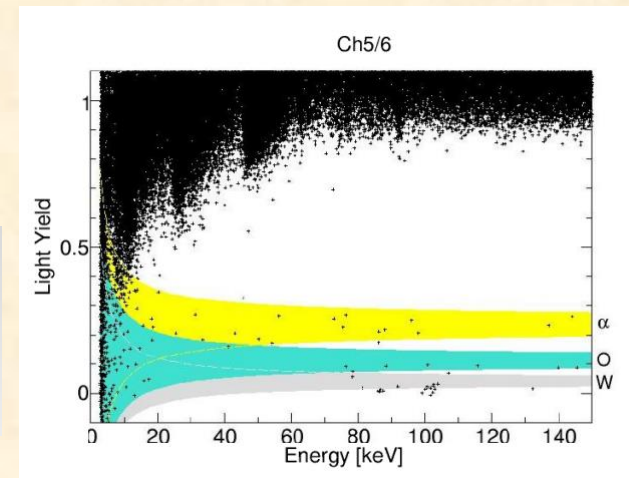


# CRESST

Cryogenic Rare Events Search with Superconducting Thermometer (Gran Sasso)  
Elastic scattering of DM with nuclei of CaWO<sub>4</sub> crystals.



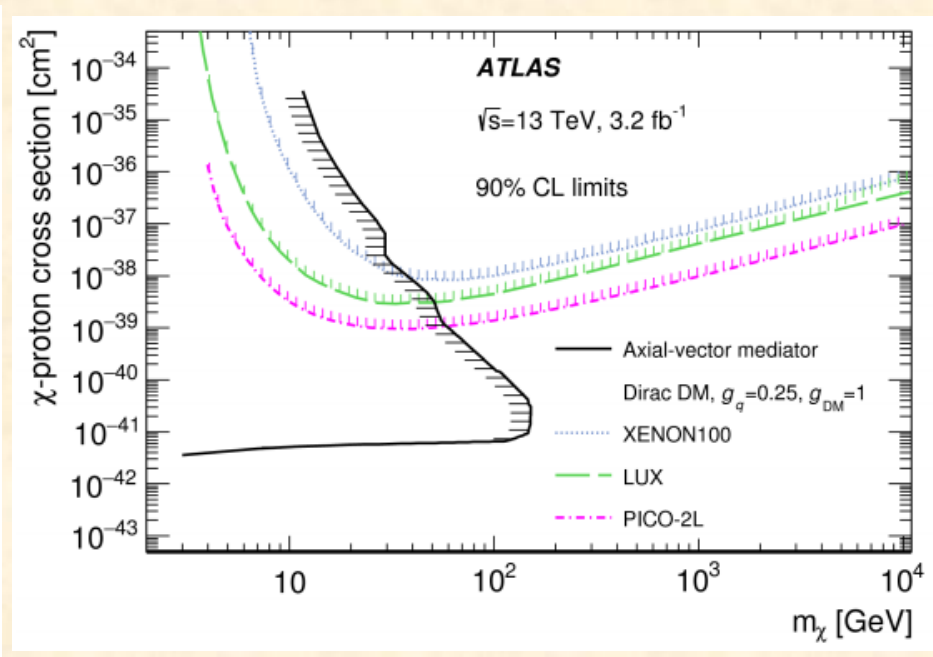
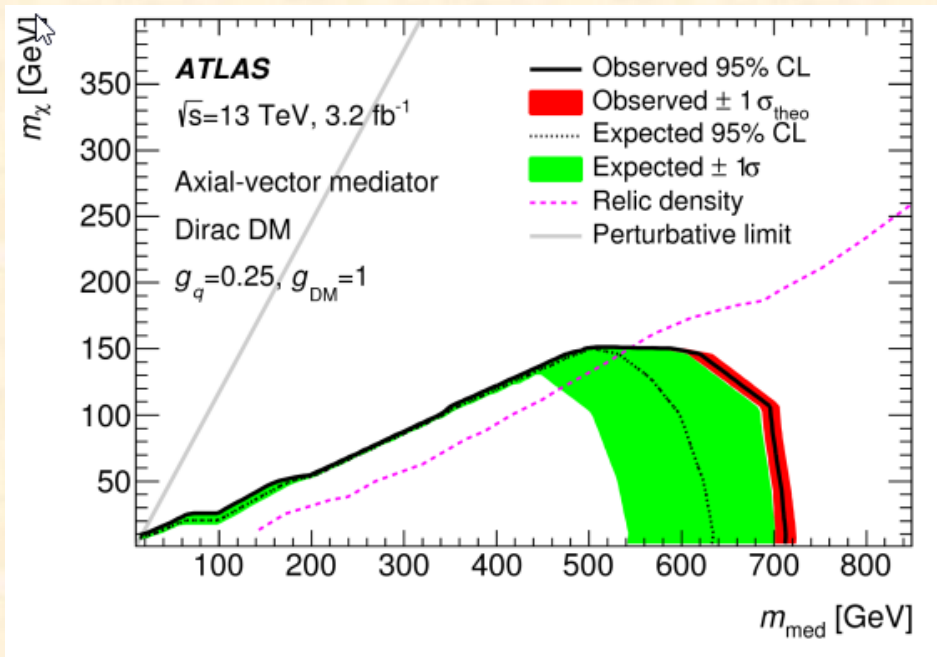
**67 events in nuclear recoil acceptance region**  
too many to be explained by known backgrounds



# Барионная асимметрия Вселенной

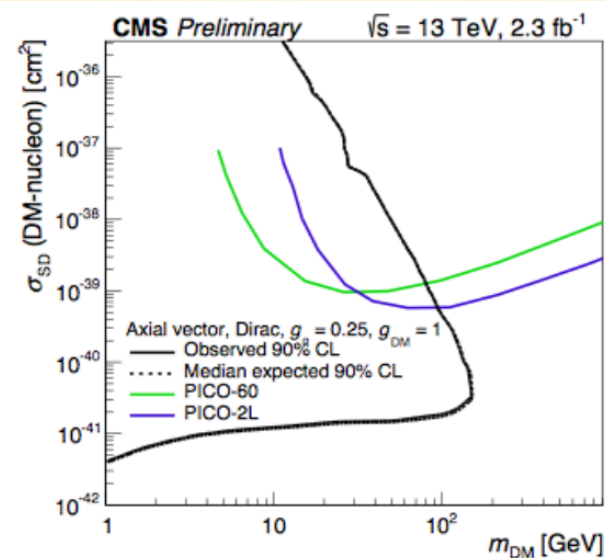
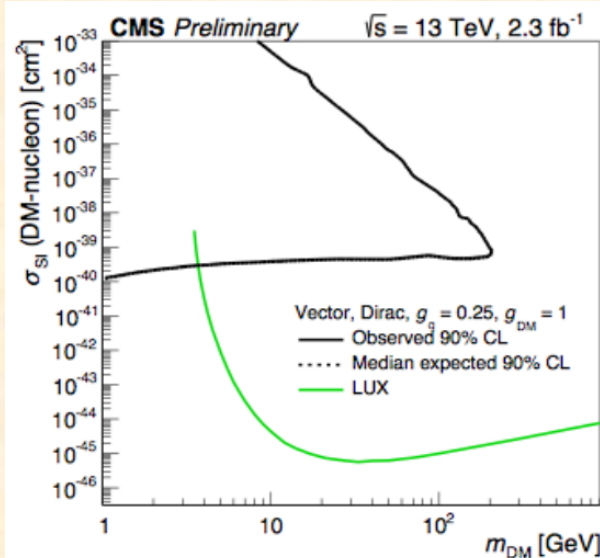
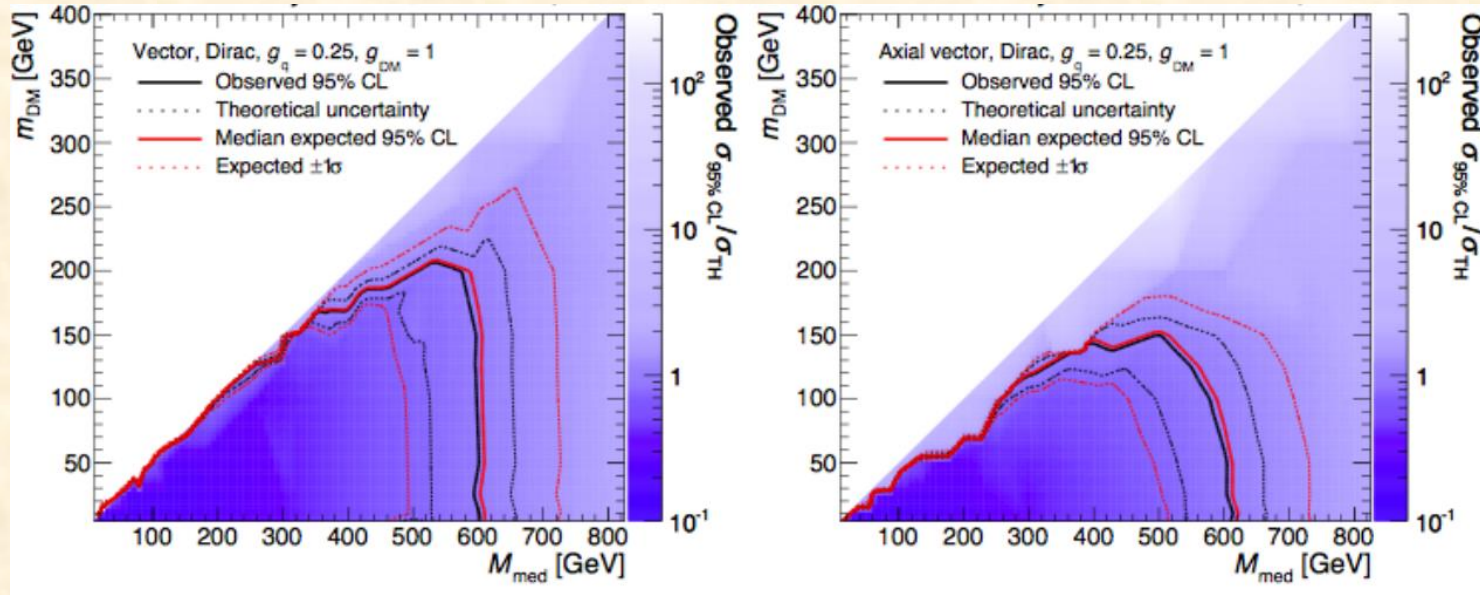
- Изначальные условия расширения Вселенной уже были несимметричными,
- BSM: в некоторых реакциях возможно более сильное нарушение CP-инвариантности по сравнению с её нарушением в Стандартной модели. В этих теориях предполагается, что изначально количество барионной и антибарионной материи было одинаково.
- макроскопическое разделение областей локализации вещества и антивещества (что представляется маловероятным),
- поглощение антивещества чёрными дырами, способными отделить его от вещества при условии нарушения CP-инвариантности.
- В 2010 году была выдвинута гипотеза, что барионная асимметрия связана с наличием тёмной материи. Согласно сделанному предположению носителем отрицательного барионного заряда являются частицы тёмной материи, не доступные для непосредственного наблюдения в земных экспериментах, но проявляющиеся через гравитационное взаимодействие на масштабах галактик

# ATLAS results for mono-photon, 13 TeV, 3.2 fb<sup>-1</sup>

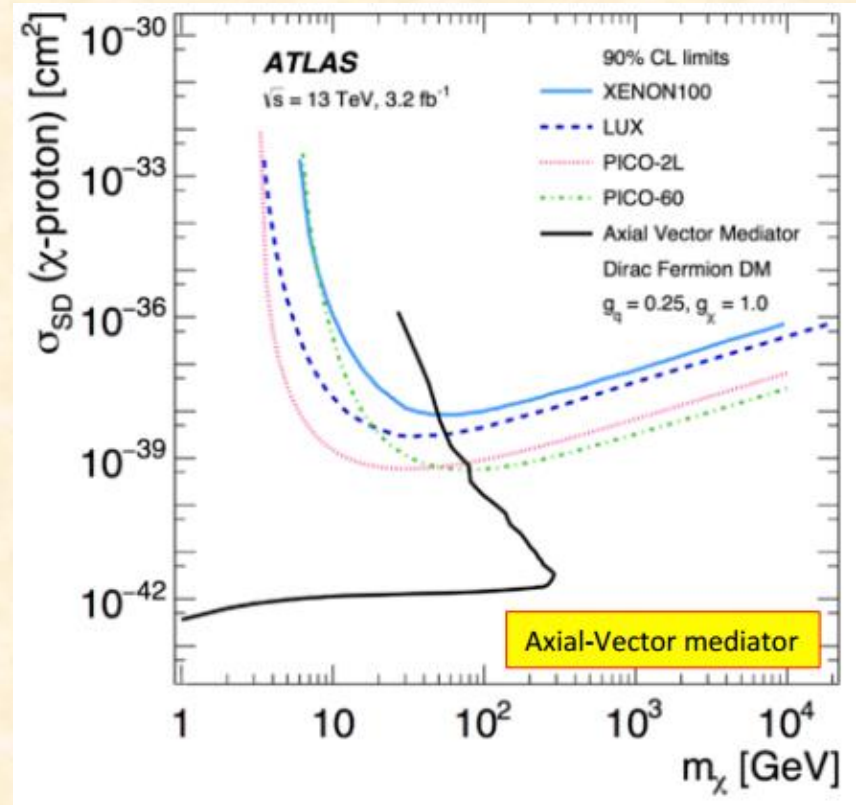
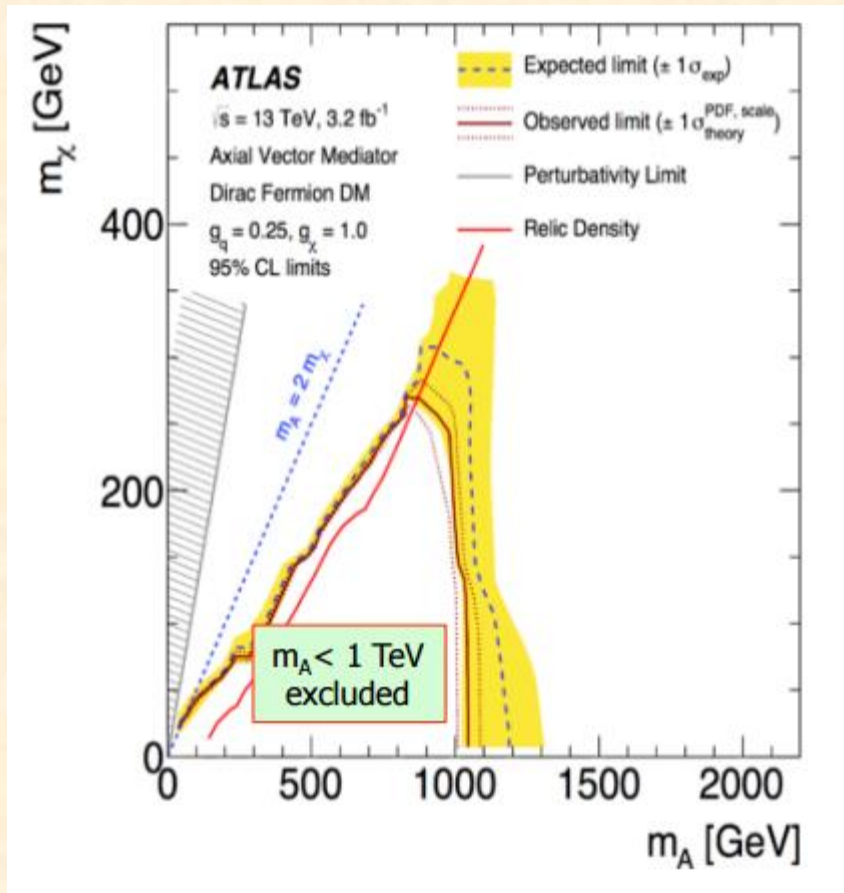




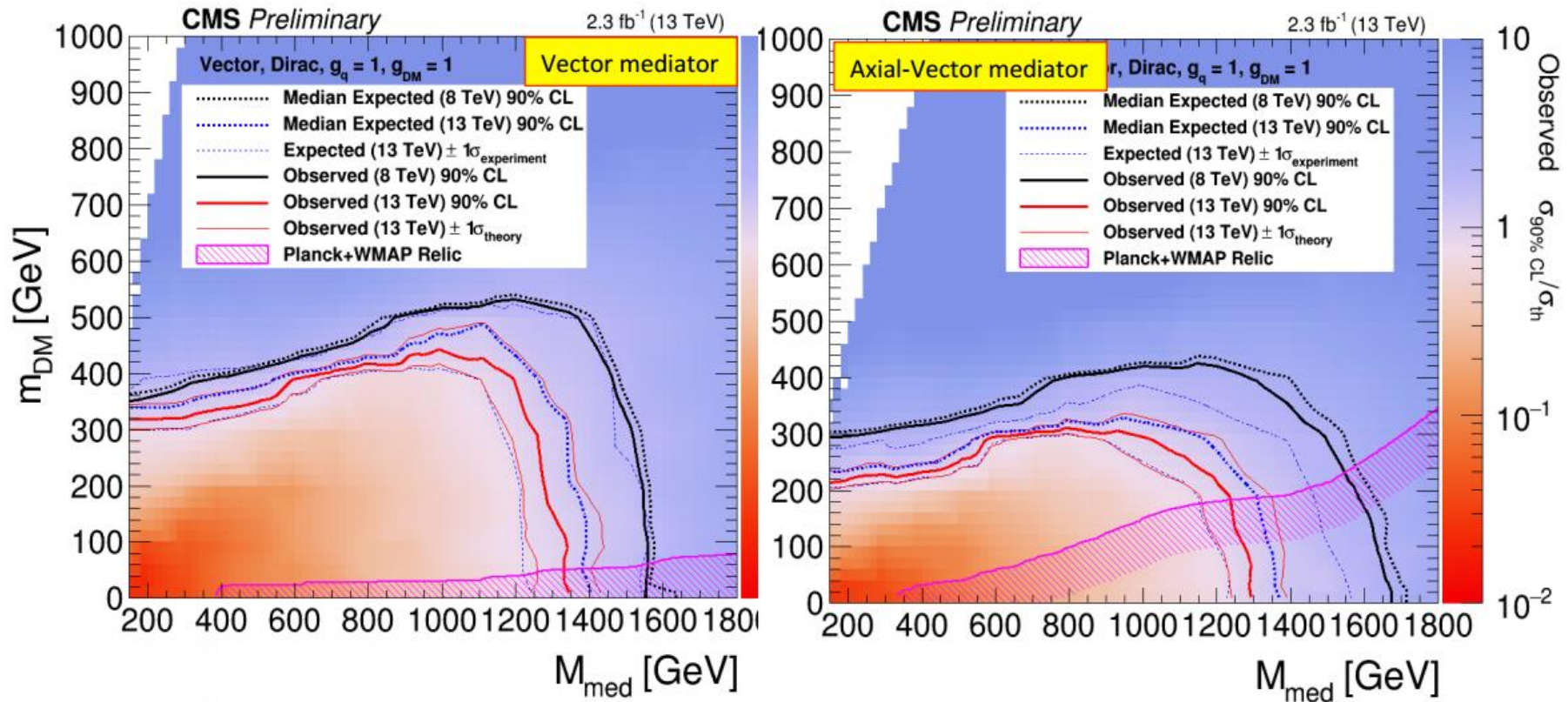
# CMS results for mono-photon, 13 TeV, 2.3 fb<sup>-1</sup>



# ATLAS results for mono-jet, 13 TeV, 3.2 fb<sup>-1</sup>

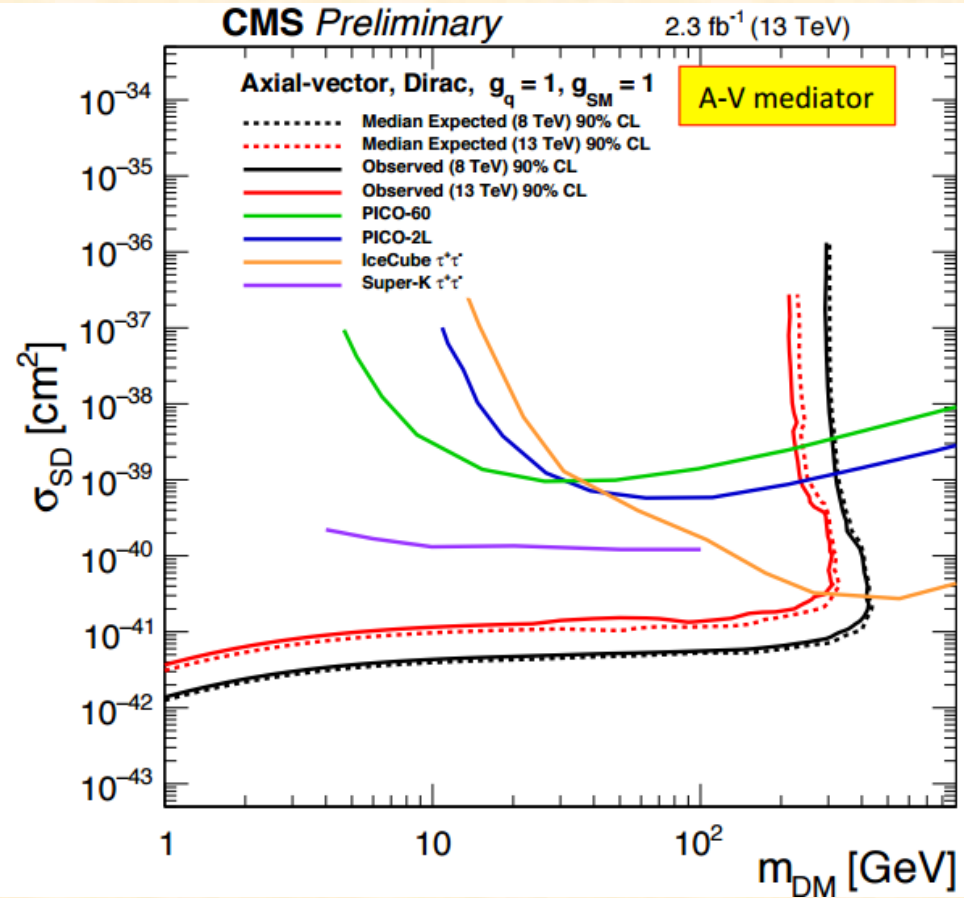
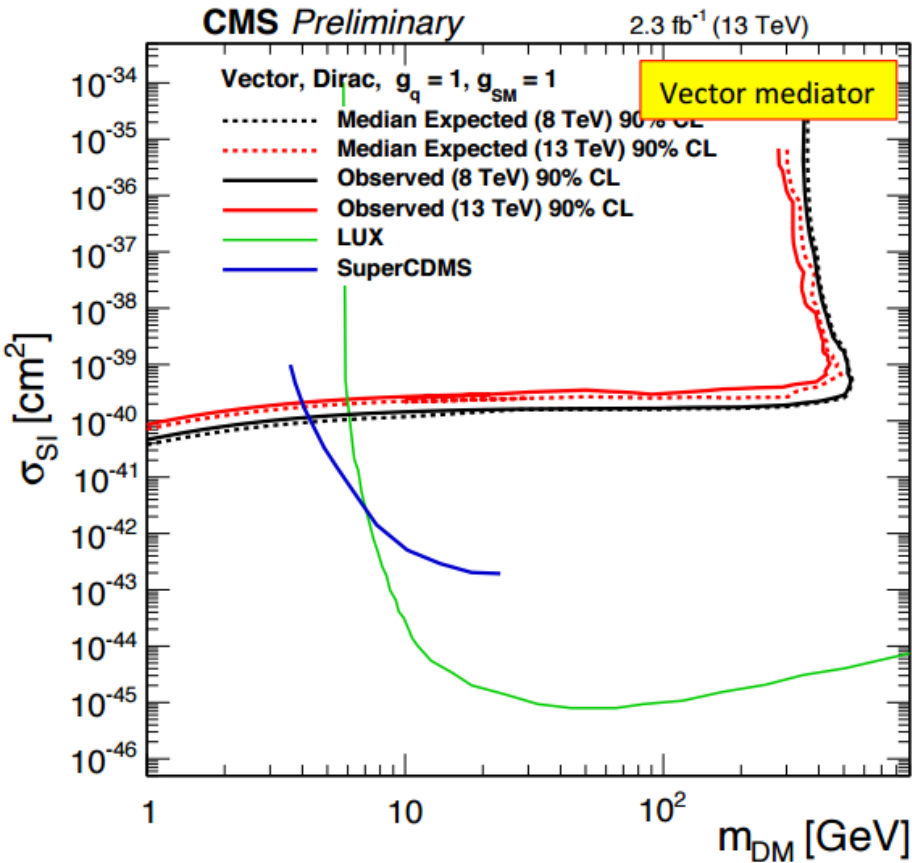


# CMS results for mono-jet, 13 TeV, $2.3 \text{ fb}^{-1}$





# CMS results for mono-jet, 13 TeV, $2.3 \text{ fb}^{-1}$





# CMS results for mono-Z, 13 TeV, 2.3 fb<sup>-1</sup>

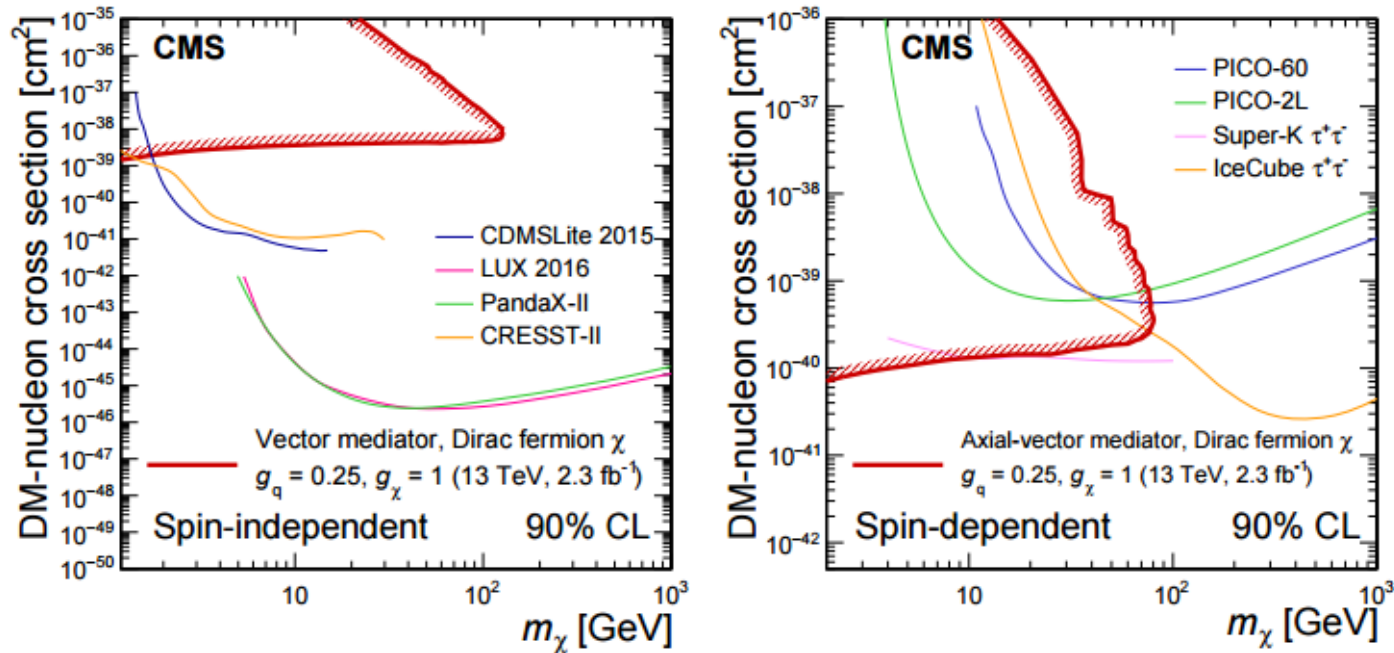
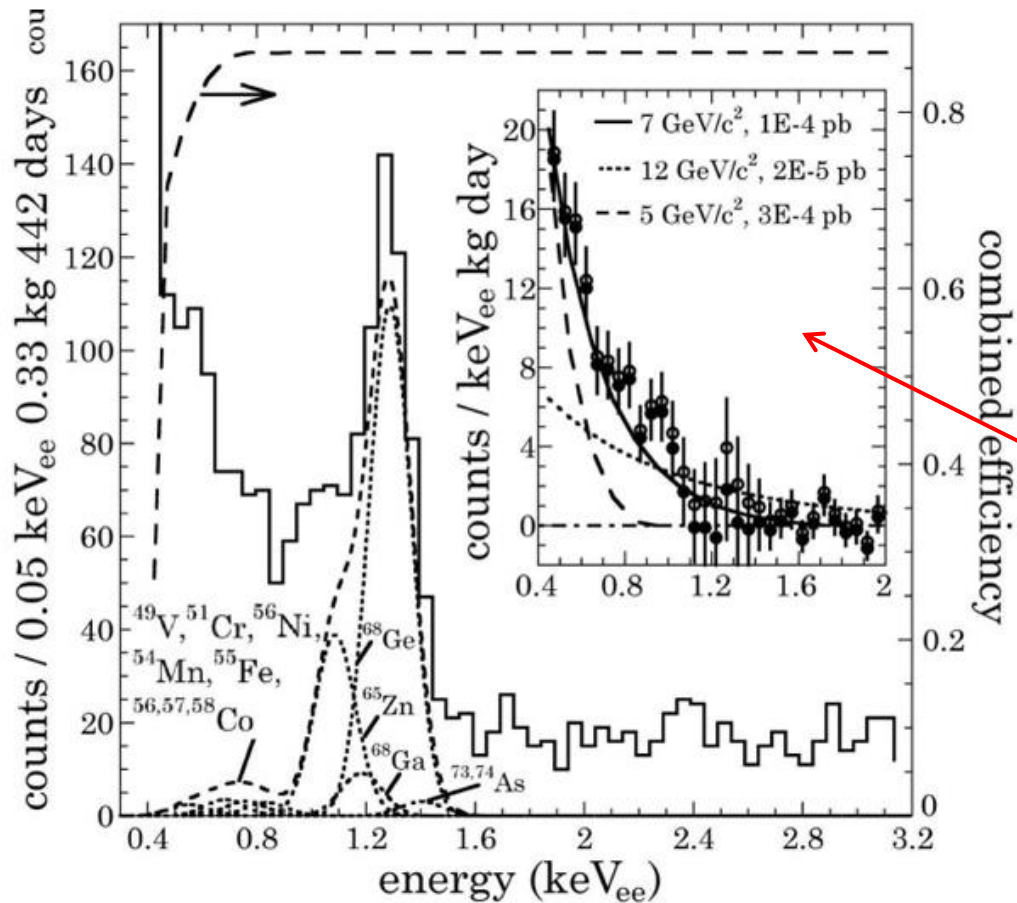


Figure 7: Observed 90% CL limits on the DM-nucleon scattering cross sections in both spin-independent (left) and spin-dependent (right) cases, assuming a mediator-quark coupling constant  $g_q = 0.25$  and mediator-DM coupling constant  $g_\chi = 1$ . The line shading indicates the excluded region. Limits from the LUX [75], CDMSLite [76], PandaX-II [77], and CRESST-II [78] experiments are shown for the spin-independent case. Limits from the Super-Kamiokande [79], PICO-2L [80], PICO-60 [81], and IceCube [82] experiments are shown for the spin-dependent case.

# CoGent



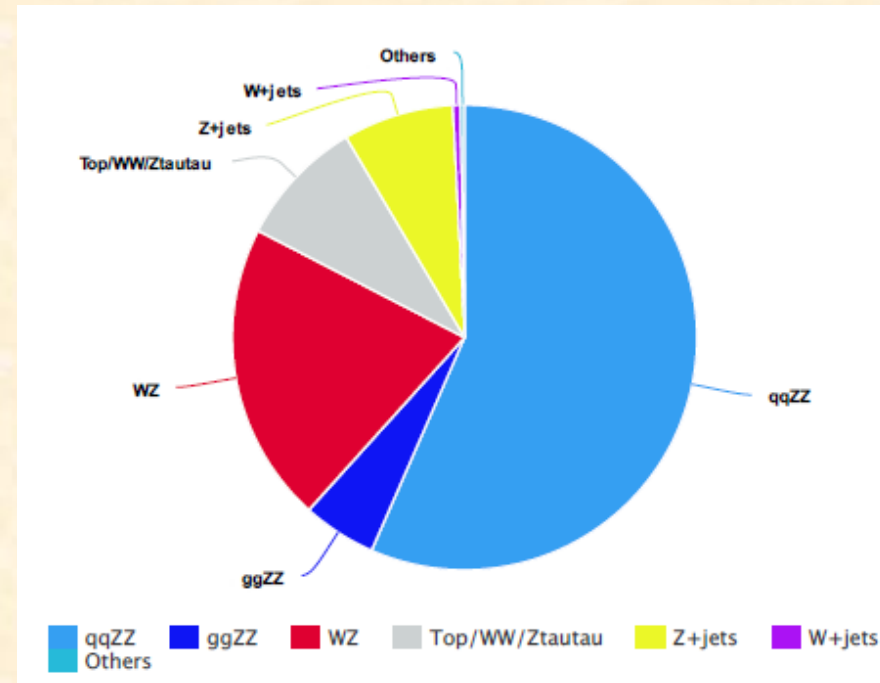
Рост количества событий в области малых энергий в данных CoGent. Гистограмма — накопленные к 2011 году данные, кривые в области 1–1,5 кэВ — вклады радиоактивных изотопов.

Результат вычета этих фоновых вкладов из данных, разные кривые на этой вставке отвечают гипотезам о частицах темной материи различной массы с массой 7–8 Гэв. arXiv:1106.0650

# Источники физического фона

- $ZZ \rightarrow \ell\nu\nu$ : основной фоновый процесс, режектировать невозможно. Оценивается с помощью монте-карло.
- $WZ$  (в основном  $W(\tau\nu)Z(ee, \mu\mu)$ ): второй по вкладу фоновый процесс. Форма распределений берется из монте-карло. Нормировка оценивается с помощью 3х лептонной контрольной области.
- $Z+jets$ : для оценки фона используется ABCD метод, форма распределения берется из монте-карло.
- $TOP, Z \rightarrow \tau\tau, WW$ : оценивается с помощью еμ-контрольной области, нормировка берется из монте-карло.
- $W+jets$ : fake-factor метод
- $ttV/tribosos$ : вклад маленький, для оценки используются теоретические расчёты.

Монте-карло оценка вклада фоновых процессов после всех отборов



*Signal Region (SR): "сигнальная область" область, где вклад сигнальных событий максимален .*

*Control Region (CR): "контрольная область" область, где доминирует исследуемый фон.*

# EFT Operators

Name	Operator	Coefficient
D1	$\bar{\chi}\chi\bar{q}q$	$m_q/M_*^3$
D2	$\bar{\chi}\gamma^5\chi\bar{q}q$	$im_q/M_*^3$
D3	$\bar{\chi}\chi\bar{q}\gamma^5q$	$im_q/M_*^3$
D4	$\bar{\chi}\gamma^5\chi\bar{q}\gamma^5q$	$m_q/M_*^3$
D5	$\bar{\chi}\gamma^\mu\chi\bar{q}\gamma_\mu q$	$1/M_*^2$
D6	$\bar{\chi}\gamma^\mu\gamma^5\chi\bar{q}\gamma_\mu q$	$1/M_*^2$
D7	$\bar{\chi}\gamma^\mu\chi\bar{q}\gamma_\mu\gamma^5q$	$1/M_*^2$
D8	$\bar{\chi}\gamma^\mu\gamma^5\chi\bar{q}\gamma_\mu\gamma^5q$	$1/M_*^2$
D9	$\bar{\chi}\sigma^{\mu\nu}\chi\bar{q}\sigma_{\mu\nu}q$	$1/M_*^2$
D10	$\bar{\chi}\sigma_{\mu\nu}\gamma^5\chi\bar{q}\sigma_{\alpha\beta}q$	$i/M_*^2$
D11	$\bar{\chi}\chi G_{\mu\nu}G^{\mu\nu}$	$\alpha_s/4M_*^3$
D12	$\bar{\chi}\gamma^5\chi G_{\mu\nu}G^{\mu\nu}$	$i\alpha_s/4M_*^3$
D13	$\bar{\chi}\chi G_{\mu\nu}\tilde{G}^{\mu\nu}$	$i\alpha_s/4M_*^3$
D14	$\bar{\chi}\gamma^5\chi G_{\mu\nu}\tilde{G}^{\mu\nu}$	$\alpha_s/4M_*^3$

*D1 – скаляр (спин независимый)*

*D5 – вектор (спин независимый)*

*D9 – тензор (спин зависимый)*

*D8 – аксиал (спин зависимый)*

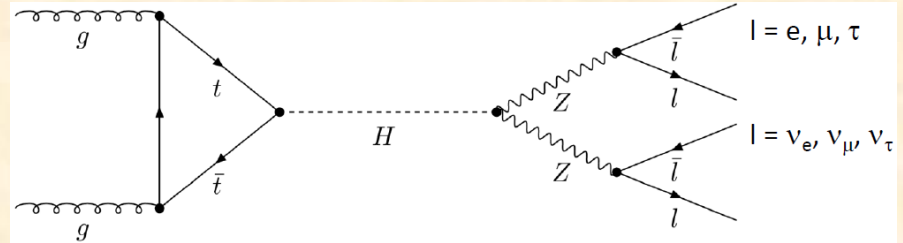
*D11 – скаляр (спин независимый)*



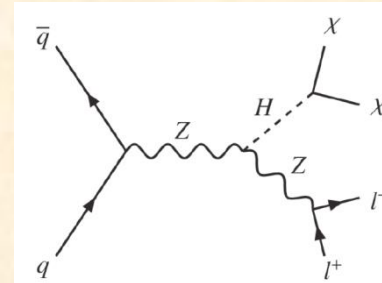
# Поиски новой физики в канале

$$Z(\rightarrow ll) + E_T^{miss}$$

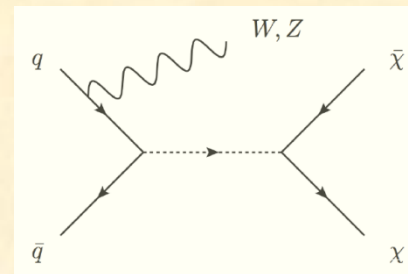
- Поиски дополнительных тяжелых бозонов Хиггса:  
 $H' \rightarrow ZZ \rightarrow ll\nu\nu$



- Поиски Хиггса Стандартной модели в распаде:  
 $ZH, Z \rightarrow ll, H \rightarrow inv$



- Поиск частиц темной материи (WIMP) при излучении  $Z$  в начальном состоянии (ISR) и распаде  $Z \rightarrow ll$



# Отбор объектов

## Electrons:

Likelihood medium

$p_T$  leading  $> 30$  GeV

$p_T$  subleading  $> 20$  GeV

$|\eta|_{\text{calo cluster}} < 2.47$

Object Quality cuts

$|\Delta(z_0) * \sin(\theta)| < 0.5$  mm

$|d_0 \text{Significance}| < 5$

Loose isolation WP

## Muons:

Likelihood medium

$|\eta| < 2.5$

$p_T$  leading  $> 30$  GeV

$p_T$  subleading  $> 20$  GeV

Object Quality cuts

$|\Delta(z_0) * \sin(\theta)| < 0.5$  mm

$|d_0 \text{Significance}| < 3$

Loose isolation WP

## Jets:

AntiKt4EMTopo jets

$p_T$  leading  $> 20$  GeV

$|\eta| < 4.5$

JVT  $< 0.59$  (for

$p_T < 60$  GeV,  $|\eta| < 2.4$ )

Jets cleaning

Possible overlaps among the various objects are resolved followed recommendations from the harmonisation group

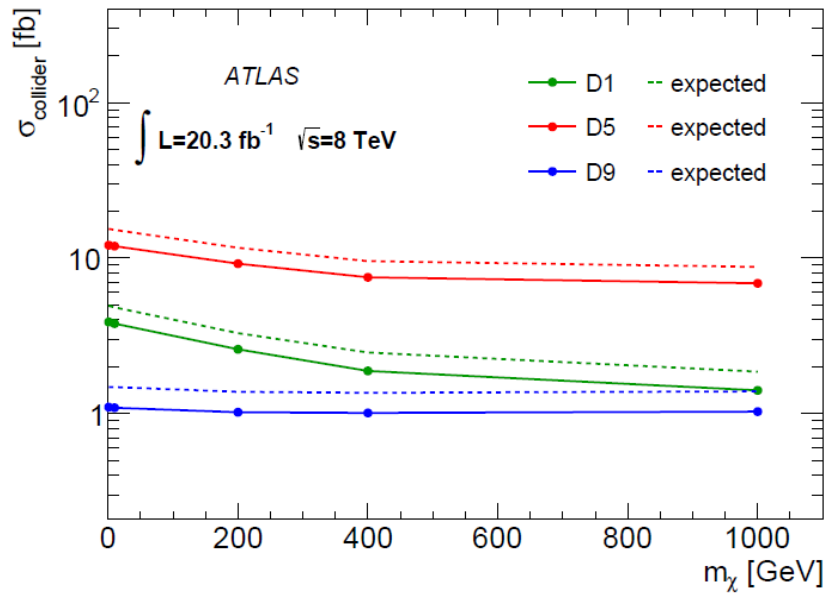
MET: track based soft term (TST)

# Отбор событий

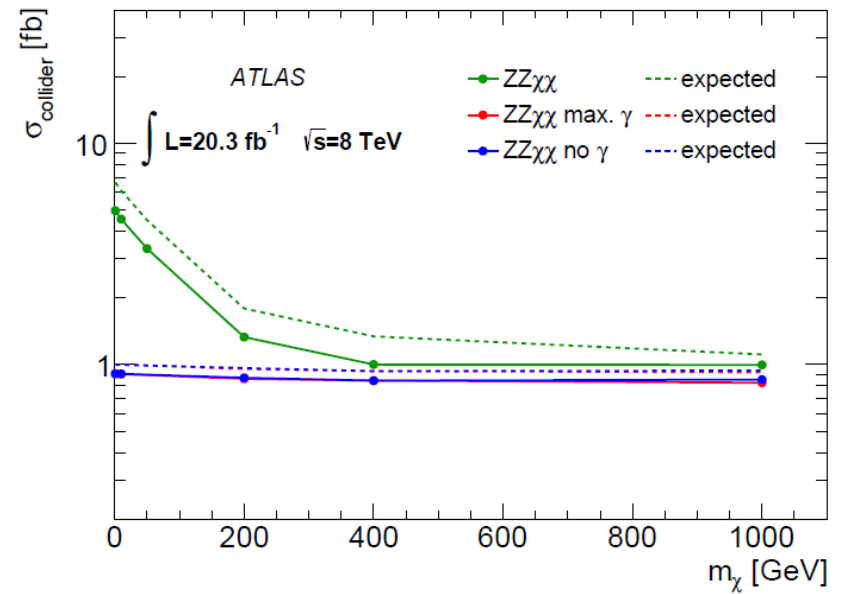
## Event Selection

Cut	High-Mass	Low-Mass	
Di-Lepton	Exactly one $ee$ or $\mu\mu$ pair with opposite charge		
Lepton $p_T$	(leading, sub-leading) > (30, 20)GeV		
Di-Lepton Mass	76 GeV ~ 106GeV		→ Within Z mass range
MET	> 120GeV	> 90GeV	→ Remove Z+jets events
$\Delta R(l,l)$	< 1.8		→ For boosted Z
$\Delta\phi(Z, E_t^{\text{miss}})$	> 2.7		→ Back-to-back (pT balance)
$ P_T(Z) - P_{T,\text{miss,jet}} /P_T(Z)$	< 0.2		} Specific cuts to further remove Z+jets events
$\Delta\phi(\text{Jet } E_t^{\text{miss}})_{\text{min}}$	> 0.4 w/ Jet_pT > 100GeV	> 0.7 w/ Jet_pT > 25GeV	
ZpT/mT	< 0.7	< 0.9	
B-Jet Veto	No B jets ( $P_T > 20$ GeV, $ \eta  < 2.5$ , 85% working point)		→ Suppress Top bkg

# Пределы на сечения DM (Run I)



(a) Limits on the ISR EFTs.



(b) Limits on the  $ZZ\chi\chi$  EFTs.



# Сравнение с данными других экспериментов

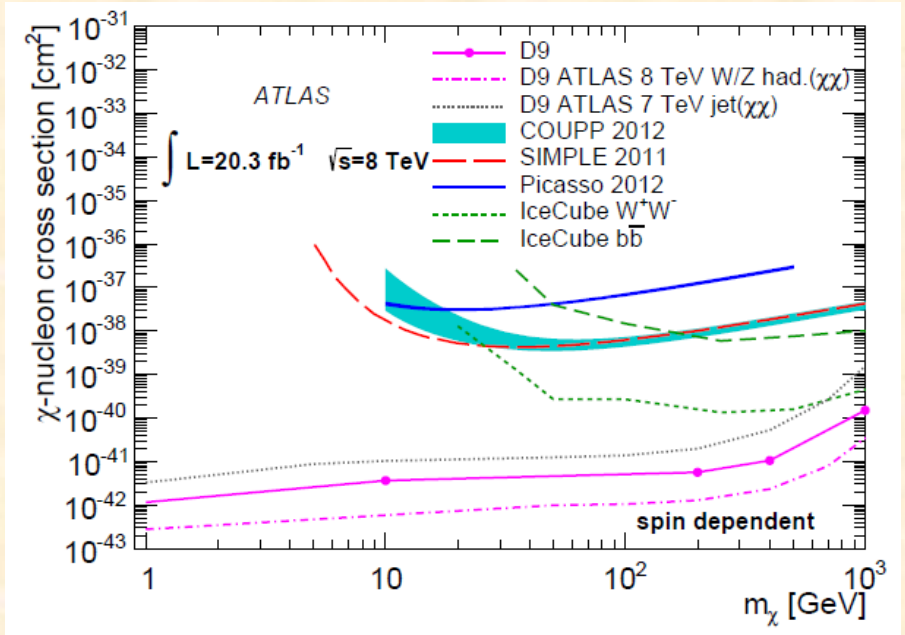


Figure 48: Spin dependent limits.

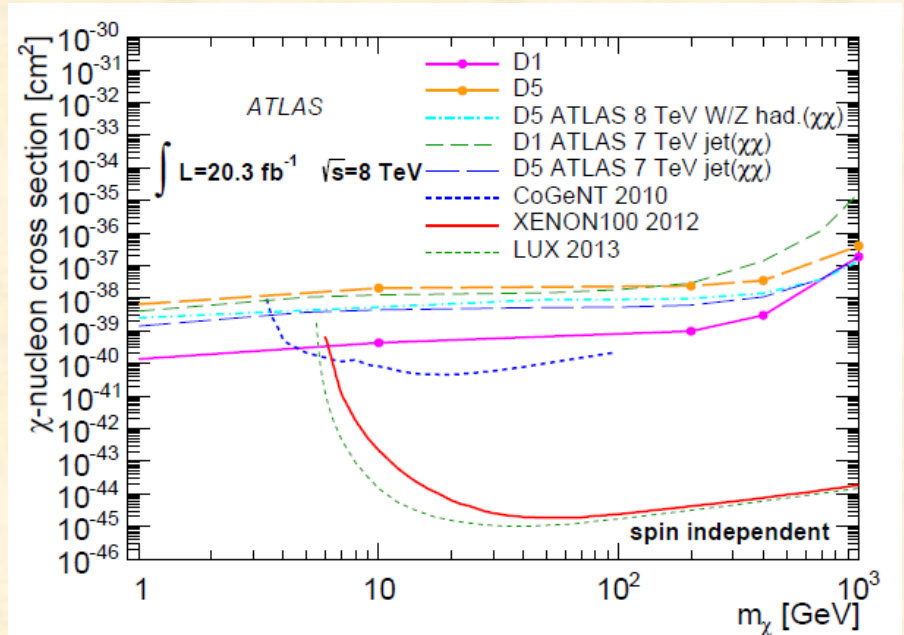
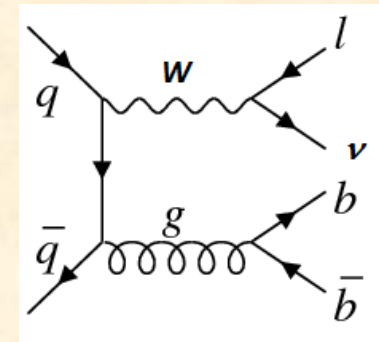
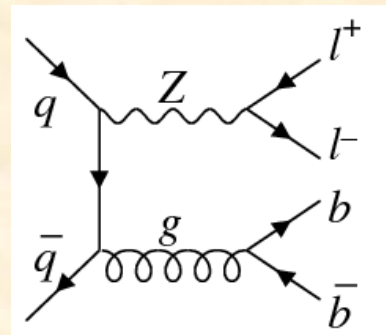
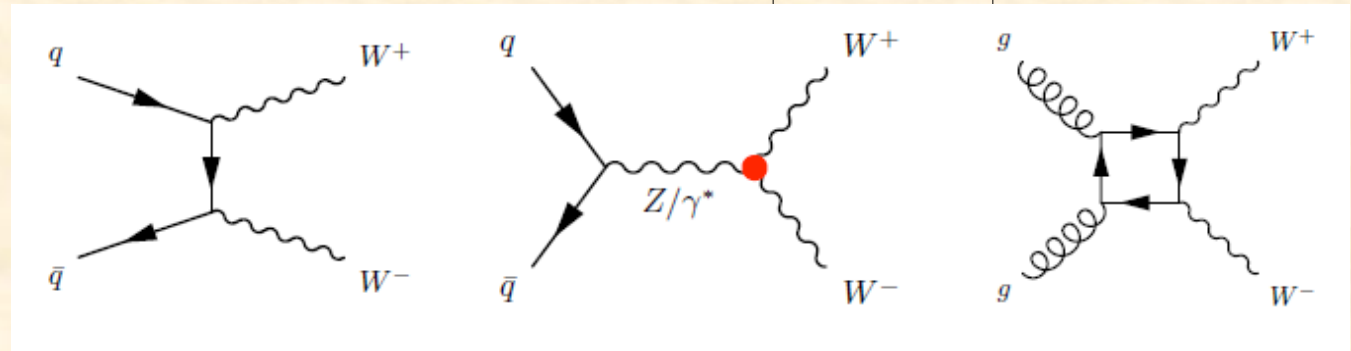
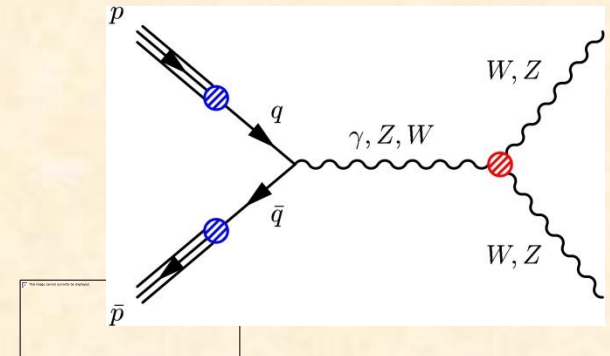
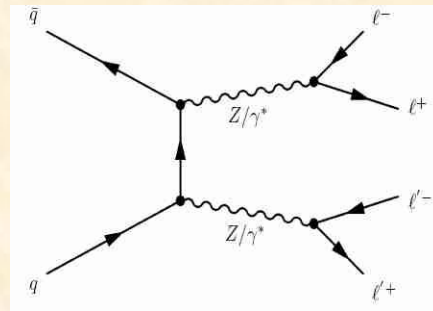


Figure 49: Spin independent limits.

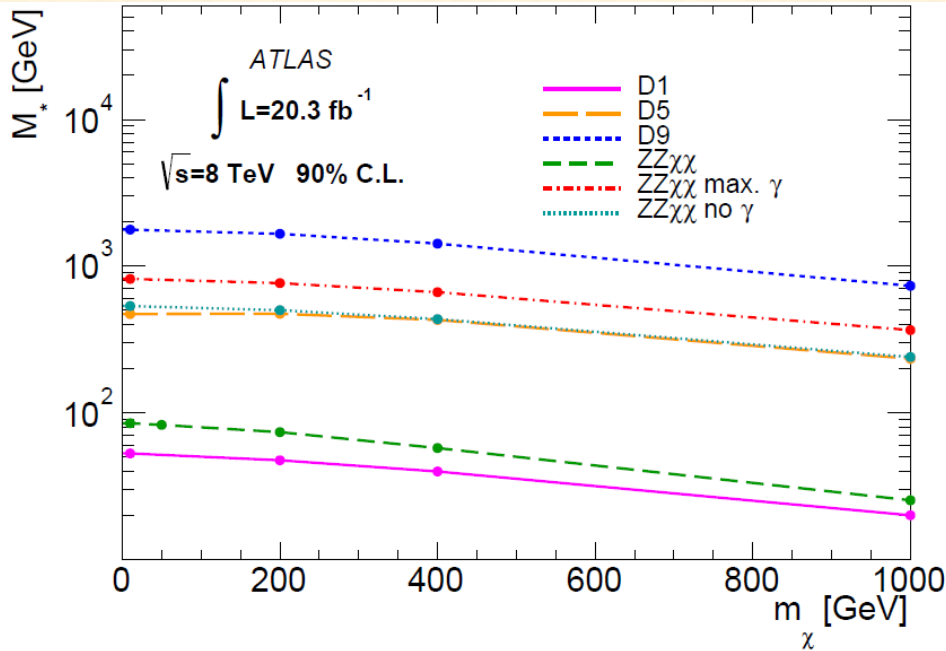
Верхняя оценка (“upper limit”) для спин зависимых сечений D9 и спин-независимых D1, D5 в сравнении с данными экспериментов “diret detection”

# Основные фоновые процессы

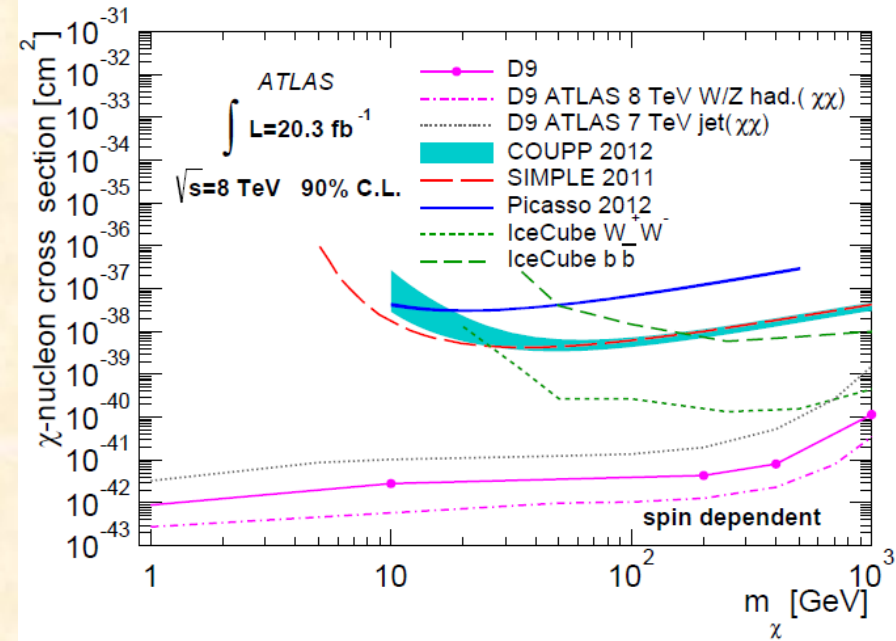


# Основные результаты Run I

## 8TeV, 20.3 fb<sup>-1</sup>



Observed 90% C.L. lower limits on the mass scale,  $M_*$ , of considered effective field theories as a function of  $m_\chi$ . For each operator, the values below the corresponding line are excluded.



Observed 90% C.L. upper limits on the  $\chi$ -nucleon scattering cross section as a function of  $m$  for the spin-dependent D9 effective operators mediating the interaction of the dark-matter particles with the  $qq$  initial state.

- В результате анализа данных отклонений от предсказаний стандартной модели не обнаружено.
- Установлены пределы на массы медиатора как функция частицы темной материи (с использованием EFT) для операторов EFT: D1, D5, D9.

# Cross sections: example for $D1'$

$$d\hat{\sigma} = \frac{\sum \overline{|\mathcal{M}|^2}}{4(p_1 \cdot p_2)} d\Phi_3,$$

$\mathcal{M}$  - АМПЛИТУДА ПРОЦЕССА

$d\Phi_3$  - 3х частичный фазовый объем

$p_1, p_2$  – импульсы начальных частиц,  $p_3, p_4$  – импульсы начальных частиц “темной материи”,  $k$  – импульс струи.

$$\left. \frac{d^2\hat{\sigma}}{dp_T d\eta} \right|_{D1'} = \frac{\alpha_s}{36\pi^2} \frac{x_1 x_2 s}{\Lambda^4} \frac{1}{p_T} \frac{\left[1 - f - \frac{4m_{DM}^2}{x_1 x_2 s}\right]^{3/2} \left[1 + (1 - f)^2\right]}{\sqrt{1 - f}}$$

$$f(p_T, \eta, x_1, x_2) \equiv \frac{p_T(x_1 e^{-\eta} + x_2 e^{\eta})}{x_1 x_2 \sqrt{s}}.$$

$x_1, x_2$  часть импульса протона, которую несет партон ( $x_{Bj}$ )



# Cross sections: relations

$$D1' \leftrightarrow D3', \quad D2' \leftrightarrow D4', \quad D5 \leftrightarrow D7, \quad D6 \leftrightarrow D8, \quad D9 \leftrightarrow D10,$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2\hat{\sigma}}{dp_T d\eta} \Big|_{D2'} &= \frac{d^2\hat{\sigma}}{dp_T d\eta} \Big|_{D4'} & \frac{d^2\hat{\sigma}}{dp_T d\eta} \Big|_{D3'} &= \frac{d^2\hat{\sigma}}{dp_T d\eta} \Big|_{D1'} & \frac{d^2\hat{\sigma}}{dp_T d\eta} \Big|_{D6} &= \frac{d^2\hat{\sigma}}{dp_T d\eta} \Big|_{D8} \\ \frac{d^2\hat{\sigma}}{dp_T d\eta} \Big|_{D7} &= \frac{d^2\hat{\sigma}}{dp_T d\eta} \Big|_{D5} & \frac{d^2\hat{\sigma}}{dp_T d\eta} \Big|_{D9} &= \frac{d^2\hat{\sigma}}{dp_T d\eta} \Big|_{D10} \end{aligned},$$

$$\frac{d^2\hat{\sigma}}{dp_T d\eta} \Big|_{D1,D2,D3,D4} = \left(\frac{m_q}{\Lambda}\right)^2 \frac{d^2\hat{\sigma}}{dp_T d\eta} \Big|_{D1',D2',D3',D4'}.$$