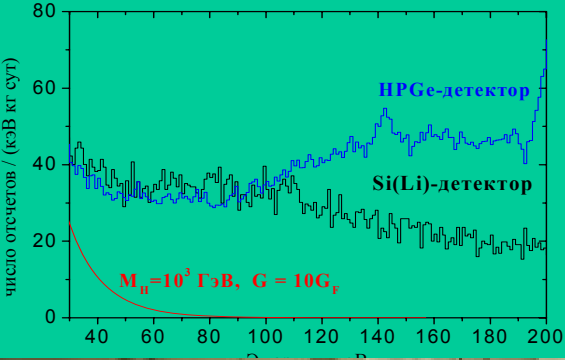


# WIMPs and Other Particles Searches for



For  $m_{\chi_0} = 1 \text{ TeV}$

VALUE (nb)	CL%	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
••• We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. •••				
< 3	90	1 ANGLOHER	02 CRES	AI
		2 BENOIT	00 EDEL	Ge
		3 BERNABEI	99D CNTR	SIMP
		4 DERBIN	99 CNTR	SIMP
< 0.06	95	5 KLIMENKO	98 CNTR	<sup>73</sup> Ge, incl.

<sup>4</sup> DERBIN <sup>99</sup> search for SIMPs (Strongly Interacting Massive Particles) in the mass range  $10^2 - 10^{14} \text{ GeV}$ . See their Fig. 3 for cross-section limits.

# Поиск частиц темной материи.

**А.В. Дербин**

**Петербургский институт ядерной физики**

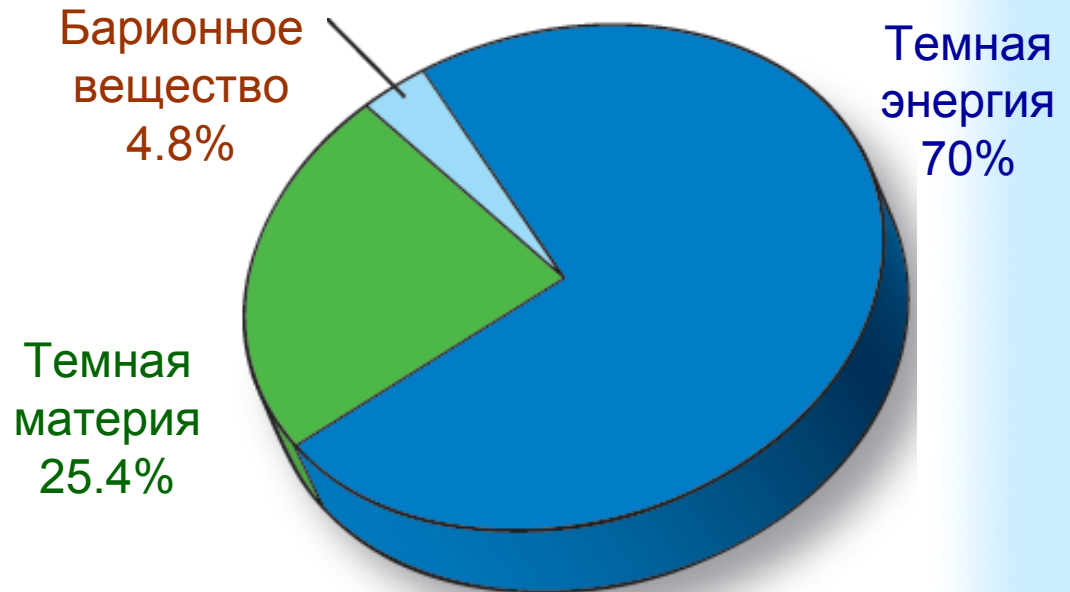


# Содержание

- 1. Свидетельства ТМ**
  - 1.1 Астрофизические
  - 1.2 Космологические
- 2. Кандидаты на ТМ: WIMPs, axion,...**
- 3. Методы регистрации**
  - 3.1. Прямые методы
  - 3.2. Косвенные методы
  - 3.3 Тэватрон, LHC
- 4. Рассеяние WIMPs на ядрах: SI, SD**
- 5. Детекторы и результаты поиска WIMPS**
  - 5.1 Сцинтилляционные DAMA
  - 5.2 Полупроводниковые CoGeNT, CDMS
  - 5.3 Фононные болометры CRESST, EDELWEIS
  - 5.4 Двухфазные TPC XENON, LUX, ZEPLIN,....
- 6. DarkSide – жидкоаргоновая TPC**  
**РЭД – жидкоксерононовая TPC**
- 7. Поиски реликтовых аксионов: AXDM, SAXS**

# Состав Вселенной

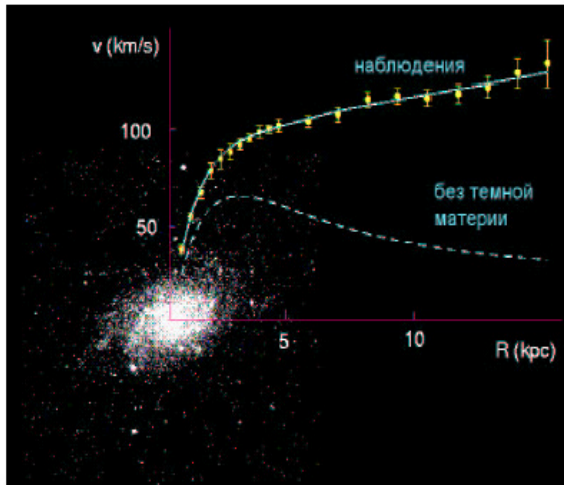
По данным «Планка», Вселенная состоит на **4,8 %** из обычного (барионного) вещества (предыдущая оценка — по данным WMAP — 4,6 %), на **25,4 %** из тёмной материи (против 22,7 %) и на **70 %** (против 73%) из тёмной энергии.



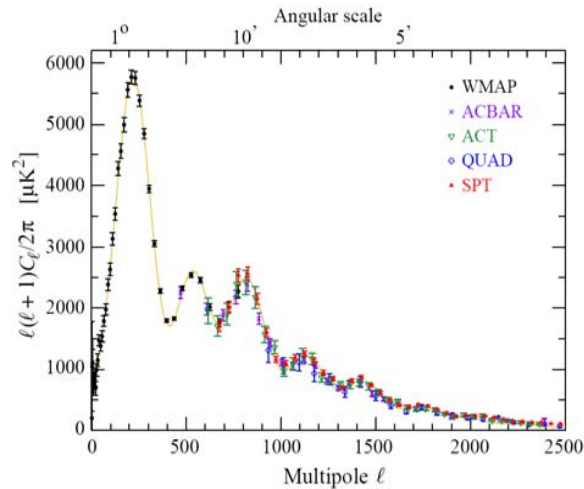
Parameter	Symbol	Value
Hubble parameter	$h$	$0.704 \pm 0.025$
Cold dark matter density	$\Omega_{\text{cdm}}$	$\Omega_{\text{cdm}} h^2 = 0.112 \pm 0.006$
Baryon density	$\Omega_{\text{b}}$	$\Omega_{\text{b}} h^2 = 0.0225 \pm 0.0006$
Cosmological constant	$\Omega_{\Lambda}$	$0.73 \pm 0.03$
Radiation density	$\Omega_{\text{r}}$	$\Omega_{\text{r}} h^2 = 2.47 \times 10^{-5}$

Согласно  $\Lambda$ CDM модели плотность темной материи в 5 раз больше барионной

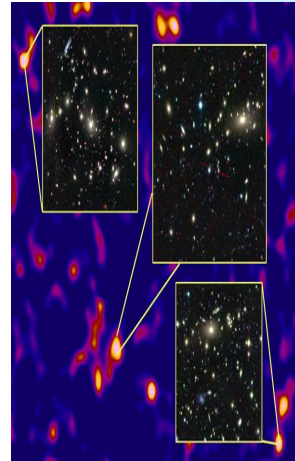
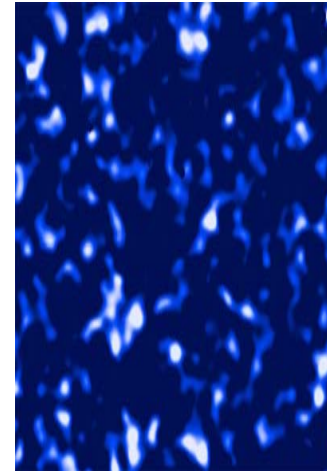
# Свидетельства ТМ (Dark matter)



Спиральные галактики



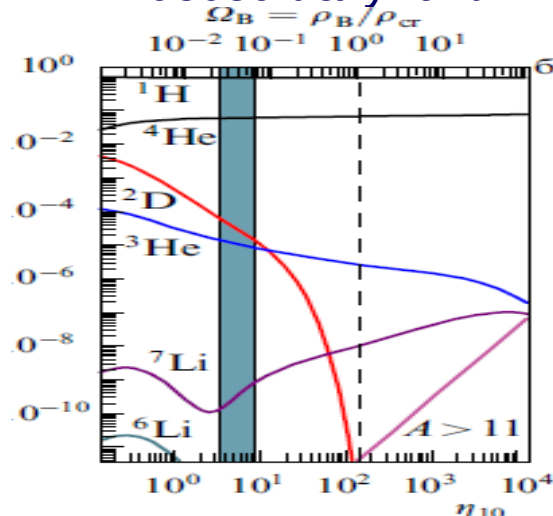
Анизотропия реликтового излучения



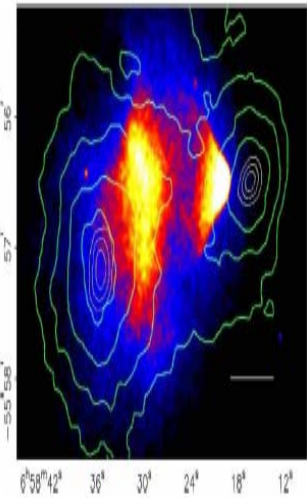
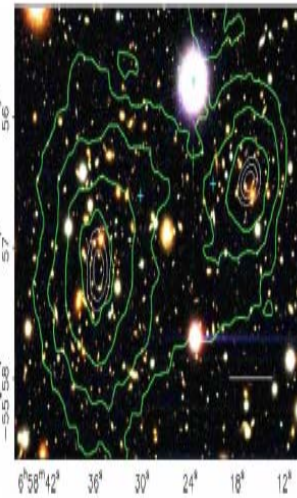
Крупномасштабная структура Вселенной



гр. и микролинзирование



Первоначальный нуклеосинтез



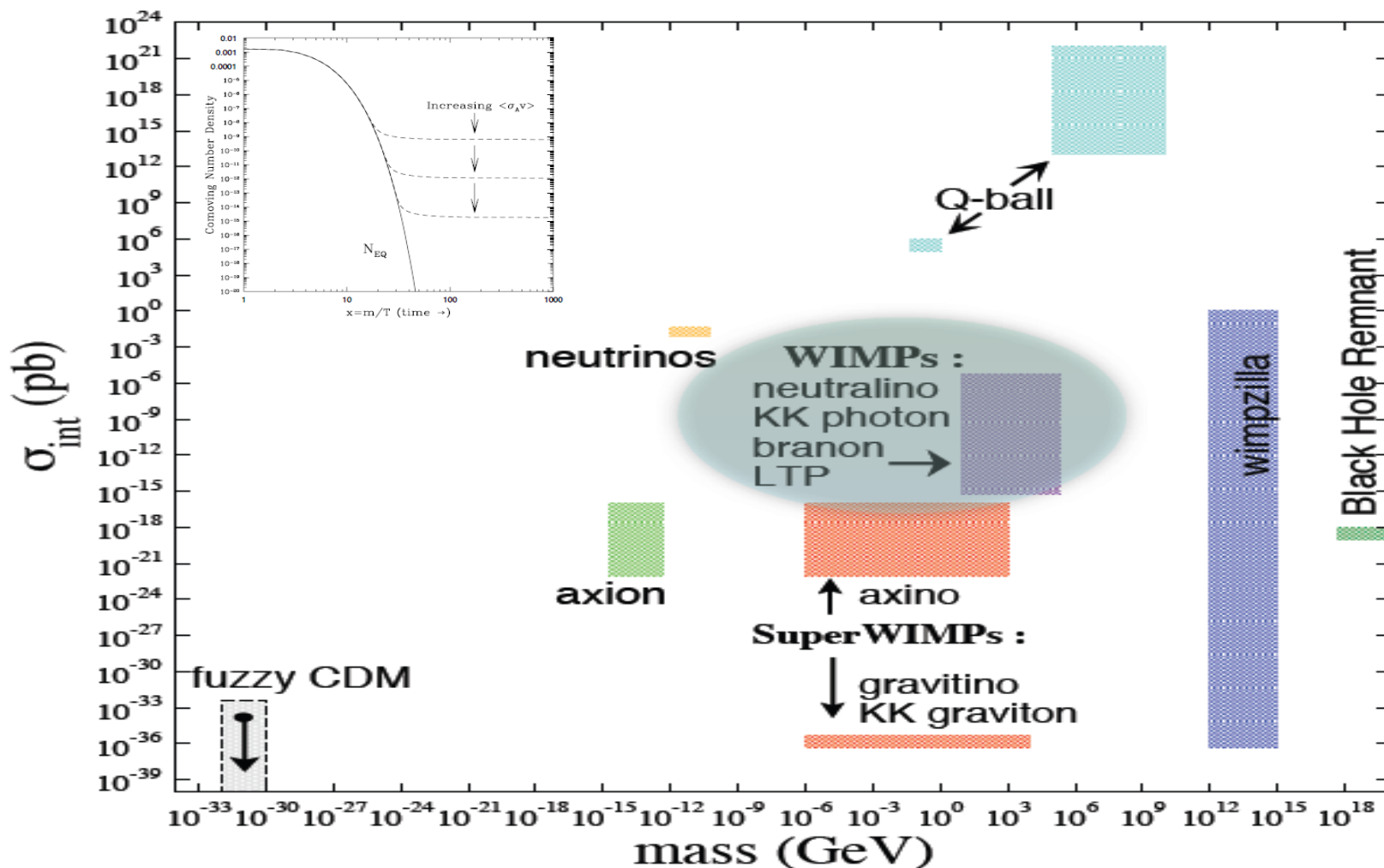
Столкновение галактик.

# Кандидаты на ТМ

1. Распространенность (0.2)
2. Взаимодействует гравитационным образом
3. Темная, не охлаждается излучением
4. Холодная (анизотропия микроволнового излучения и крупномасштабная структура Вселенной)
5. Слабовзаимодействующая (не видим в земных экспериментах и *Bullet cluster*)
6. Небарионная (первоначальный нуклеосинтез и структура мври)
7. Стабильная (по отношению к возрасту Вселенной)

Частицы	Масса
SUSY's	$n \times (0.01 - 1) \text{ ТэВ}$
Аксион	$n \times (10^{-6} - 10^{-2}) \text{ эВ}$
WIMPs	$n \times (0.01 - 1) \text{ ТэВ}$
Нейтрино	$n \times 1 \text{ кэВ}$
SIMPs, CHAMPs,	$\sim \text{ТэВ}$
Монополи	$10^{15} \text{ ГэВ}$
WIMPzilla, Q-ball	$10^{19} \text{ ГэВ}$
Зеркальные част.	$(1 - 10^3) \text{ ГэВ}$
Суперструны	$10^{19} \text{ ГэВ}$
Черные дыры	$10^{15} - 10^{30} \text{ г}$
MACHO	$< M_{\odot}$
Мод. Гр. MOND	

# Частицы – кандидаты на ТМ



Возможные массы и сечения простираются на много порядков:

$$m \sim 10^{-33} - 10^{19} \text{ ГэВ}, \sigma \sim 10^{-75} - 10^{-12} \text{ см}^2$$

# Нейтралино (*superWIMPs*) и аксион

Частицы темной материи не содержатся в Стандартной модели (небарионная материя и не легкие нейтрино)

*WIMPs: weakly interacting massive particles*

Если реализуется суперсимметрия,  
легчайшая стабильная суперсимметричная частица  
(нейтралино) кандидат на роль частиц ТМ



$$\rho = 0.3 \text{ ГэВ/см}^3$$
$$\Phi = \rho/m_\chi \approx 3 \times 10^7 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$$

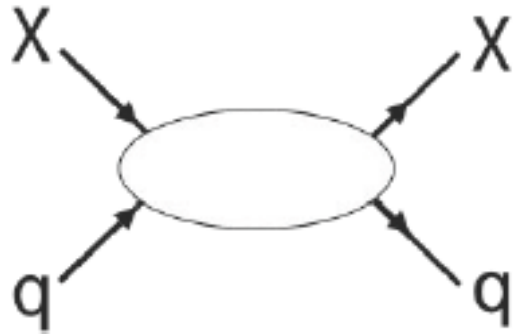
*Axion.* Для решения проблемы CP-сохранения в сильных взаимодействиях, КХД СМ должна быть дополнена аксионом, который может составлять ТМ



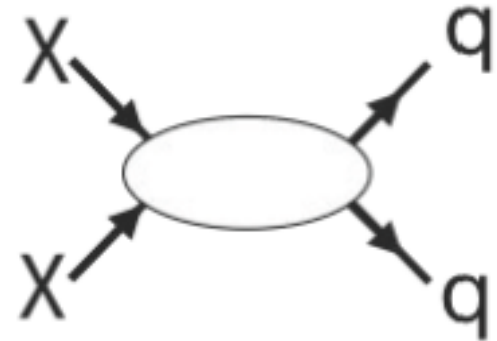
Отрицательные результаты LHC и экспериментов по поиску рассеяния частиц темной материи на ядрах смещают интерес от SUSY в сторону моделей с более легкими частицами

# Методы обнаружения WIMPs

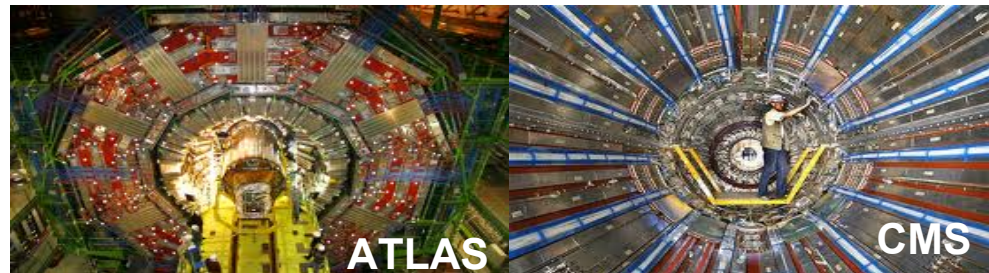
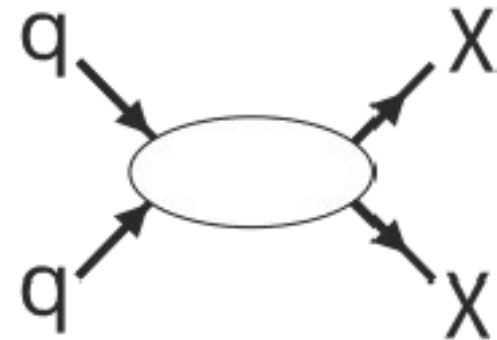
**Direct searches – WIMPs рассеиваются на веществе**



**inDirect searches – WIMPs аннигилируют**



**Рождение WIMPs на ускорителях**





# Регистрация частиц ТМ

## Косвенное детектирование

### 1. Захват и аннигиляция в Солнце

1.1 Регистрация нейтрино

### 2. Аннигиляция в галактике

2.1 Поток позитронов, анти-р

### 3. Рассеяние частиц СМ от удаленных источников

## Рождение на ускорителях

1. Тэватрон, LEP

2. CMS SUSY Results

3. ATLAS SUSY searches

## Прямое детектирование

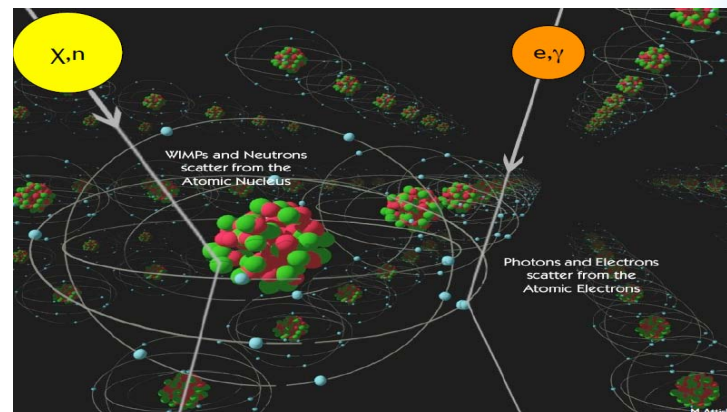
### 1. Аксион и ALPs, $m < 1$ МэВ

1.1 конверсия в фотон в магнитном поле

1.2 Взаимодействие с электроном

### 2. WIMPs $m > 1$ ГэВ

2.1 Взаимодействие с ядрами



# Список экспериментов

## Direct Dark Matter Search

ArDM	ANAIS	CoGeNT	CDMS	COUPP	CRESST
CUORE	DAMA	DEAP/CLEAN	DM-TPC	Drift	Edelweiss
Genius	HDMS	LUX	LIBRA	MIMAC	Majorana
NAIAD	NEWAGE	ORPHEUS	Picasso	ROSEBUD	SIMPLE
UKDMC	Ultima	XENON	XMASS	WARP	Zeplin

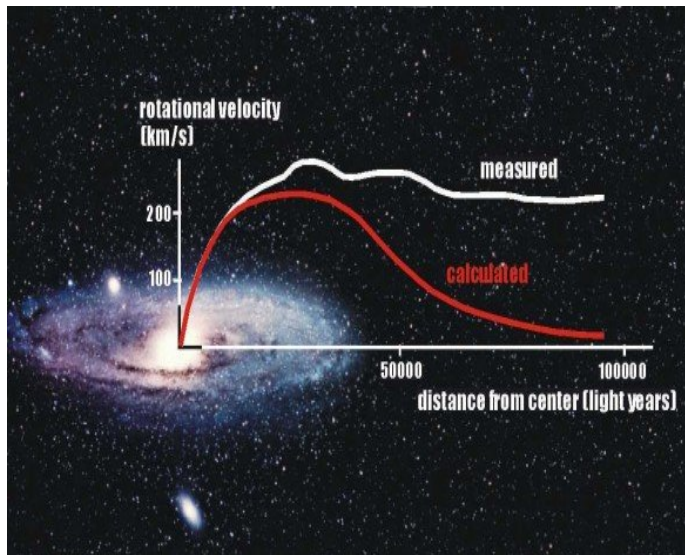
## Indirect Dark Matter search

AMANDA	AMS	ANTARES	BAIKAL
BESS	CAPRICE	GAPS	GLAST
HEAT	IceCube	IMAX	MACRO
Nestor	NINA	Pamela	Super-K

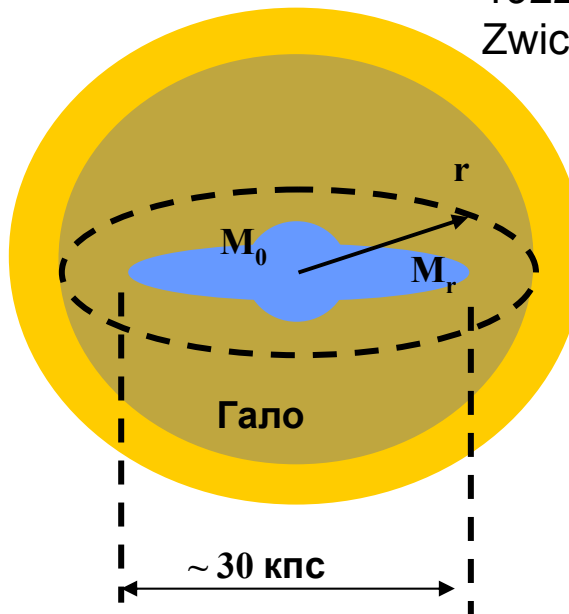
## Accelerators

ATLAS	CMS	Tevatron	LEP
-------	-----	----------	-----

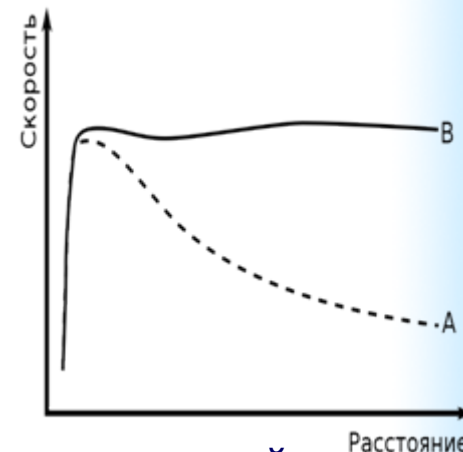
# Динамика спиральных галактик



1922 J.H. Jeans, 1932 J.Oort, F. Zwicky, S. Smith

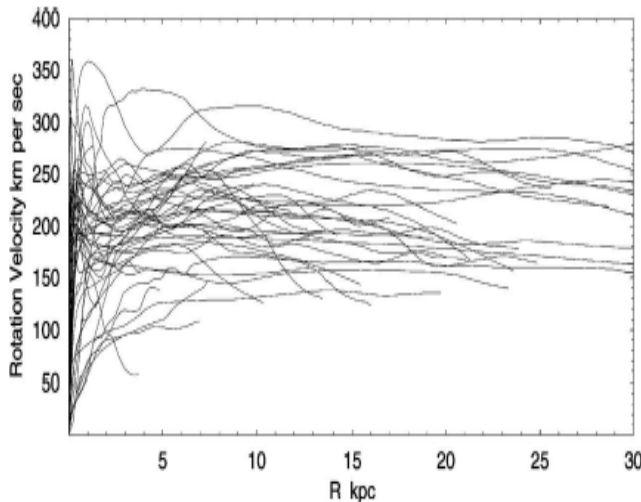
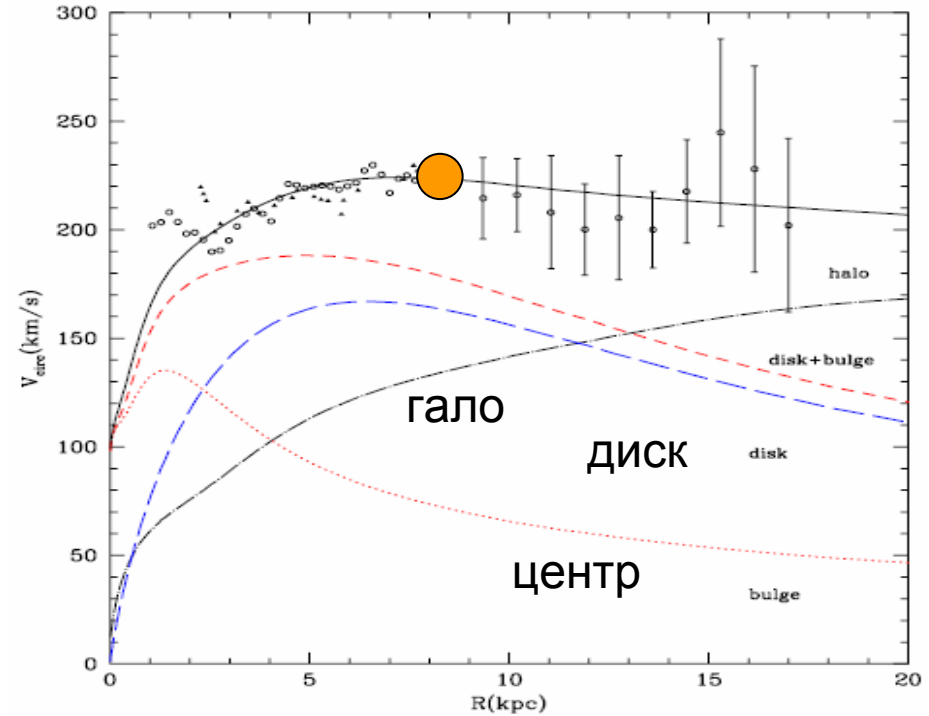
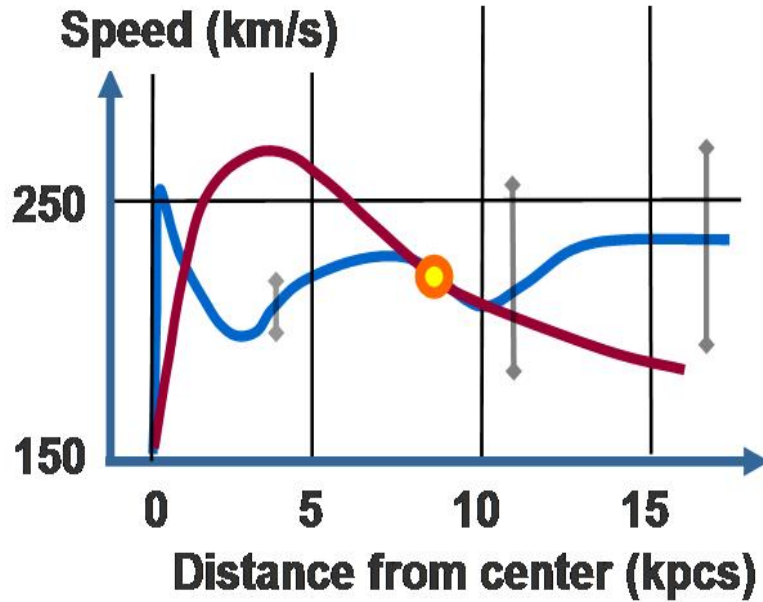


$$G \frac{mM_r}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$



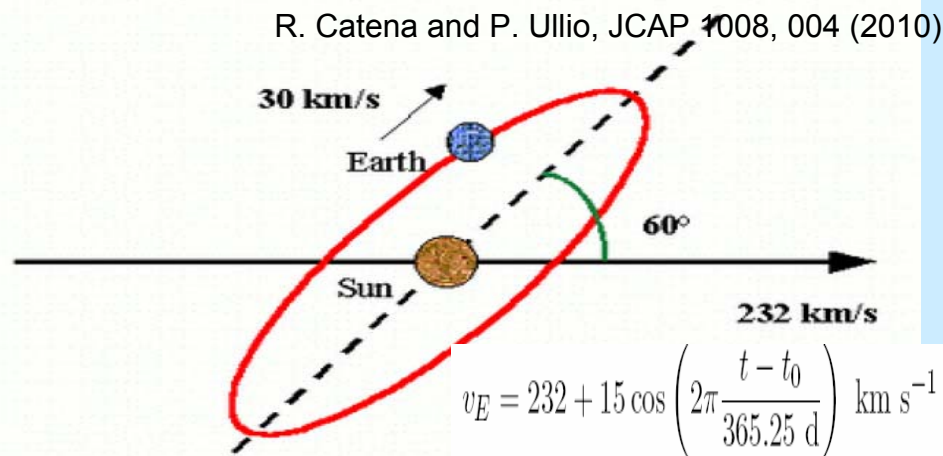
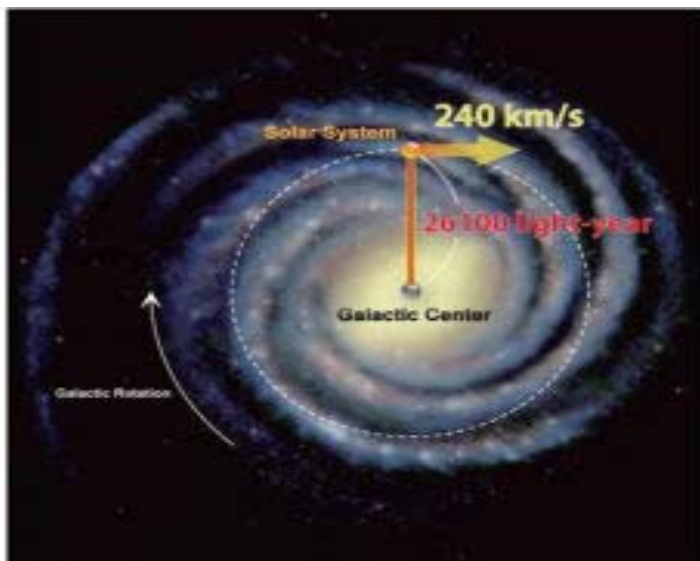
- $v(r) \sim r^{-1/2}$  для случая центральной массы  $M_0$
- $v(r) \sim r$  для равномерного распределения массы ( $M_r \sim r^3$ )
- $v(r) = const$  для случая  $M_r \sim r$  и  $\rho(r) \sim r^{-2}$

# Млечный Путь



Солнце находится на расстоянии 8 кпк от центра, что соответствует скорости 230 км/сек.  
Динамика других спиральных галактик, равно как и эллиптических и сферических, объясняется наличием гало ТМ.

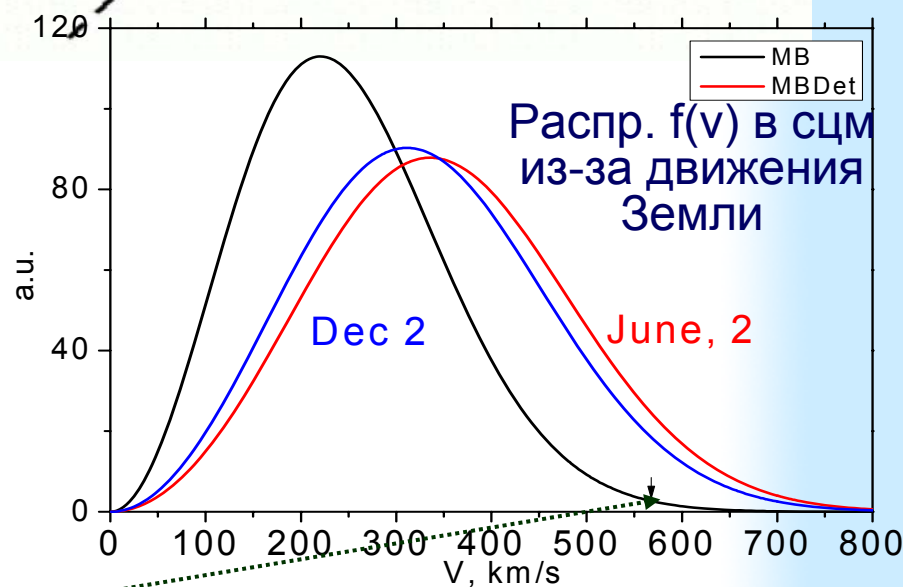
# Характеристики Гало ТМ



$\rho = 0.39 \pm 0.03 \text{ ГэВ/см}^3$   
 $V_{avr} = 220 \pm 20 \text{ км/с}$   $V_{disp} = 270 \pm 25 \text{ км/с}$

$$f_0(v)dv = 4\pi n_W \left(\frac{3}{2\pi\bar{v}^2}\right)^{3/2} v^2 \exp\left[-\frac{3v^2}{2\bar{v}^2}\right] dv$$

$$f_\eta(w)dw = \frac{4}{\pi^{1/2}} n_W x^2 \exp[-(x^2 + \eta^2)] \frac{\sinh(2x\eta)}{2x\eta} dx$$

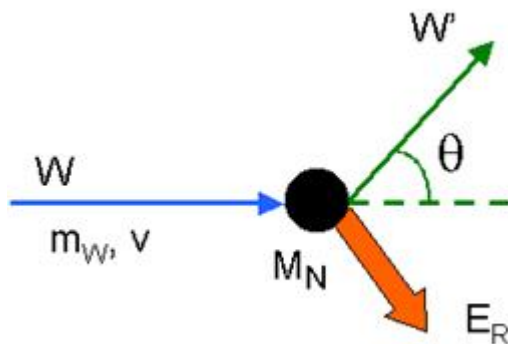


Распределение ТМ по  $f(v)$  зависит от коллапса и соответствует распр. М-Б. Максимальная скорость 560-600 км/сек. Солнце движется с  $v=230 \text{ км/с}$

# Упругое рассеяние WIMPs на ядрах

WIMP с  $m = 100 \text{ GeV}$  и  $v = 300 \text{ км/с}$  имеет  $E = 50 \text{ кэВ}$  и  $\lambda = 12 \text{ фм}$

$$\mu = \frac{m_W M_N}{m_W + M_N}$$



$$E_R = \frac{q^2}{2M_N} = \frac{\mu^2 v^2}{M_N} (1 - \cos\theta)$$

$$0 \leq E_R \leq E_W \frac{4\mu}{m_W + M_N}$$

$$m_W \gg M_N \Rightarrow E_R = 2M_N v^2$$

$V_{\text{esc}} = 600, \text{ Ar}, E_{\text{max}} = 80 \text{ кэВ}$

$$m_W \ll M_N \Rightarrow E_R = 2m_W v^2 \left( \frac{m_W}{M_N} \right)$$

$V_{\text{esc}} = 600, m_W = 10 \text{ ГэВ}, \text{ Xe}, E_{\text{max}} = 6 \text{ кэВ}$

- $q$  = переданный момент
- $\mu$  = приведенная масса
- $v$  = скорость WIMP в системе ядра
- $\theta$  = угол рассеяния в с.ц.м

# Сечение рассеяние WIMPs на ядрах

$$\mathcal{L}_{\chi N} \approx 4\chi^\dagger \chi (f_p \eta_p^\dagger \eta_p + f_n \eta_n^\dagger \eta_n) + 16\sqrt{2}G_F \chi^\dagger \frac{\vec{\sigma}}{2} \chi \cdot \left( a_p \eta_p^\dagger \frac{\vec{\sigma}}{2} \eta_p + a_n \eta_n^\dagger \frac{\vec{\sigma}}{2} \eta_n \right) + \mathcal{O}(q^2/M)$$

**Спин независимое и спин-зависимое сечение рассеяния**

$$\frac{d\sigma_{\chi N}}{dE_{recoil}} = \frac{m_N}{2\mu^2 v^2} [\sigma_0^{SD} F_{SD}^2(E_{recoil}) + \sigma_0^{SI} F_{SI}^2(E_{recoil})]$$

$$\sigma_0^{SI} = \frac{4\mu^2}{\pi} [Z f_p + (A - Z) f_n]^2$$

$\sim A^2$  для  $f_p = f_n$  и  $m_W \gg M_N$

Для ядер с  $J \ll 0$

$$\sigma_0^{SD} = \frac{32\mu^2 G_F^2}{\pi} \frac{J+1}{J} [a_p \langle S_p \rangle + a_n \langle S_n \rangle]^2$$

Потеря когерентности

$$\sigma^{SI}(qr_n) = \sigma_0^{SI} \cdot F^2(qr_n)$$

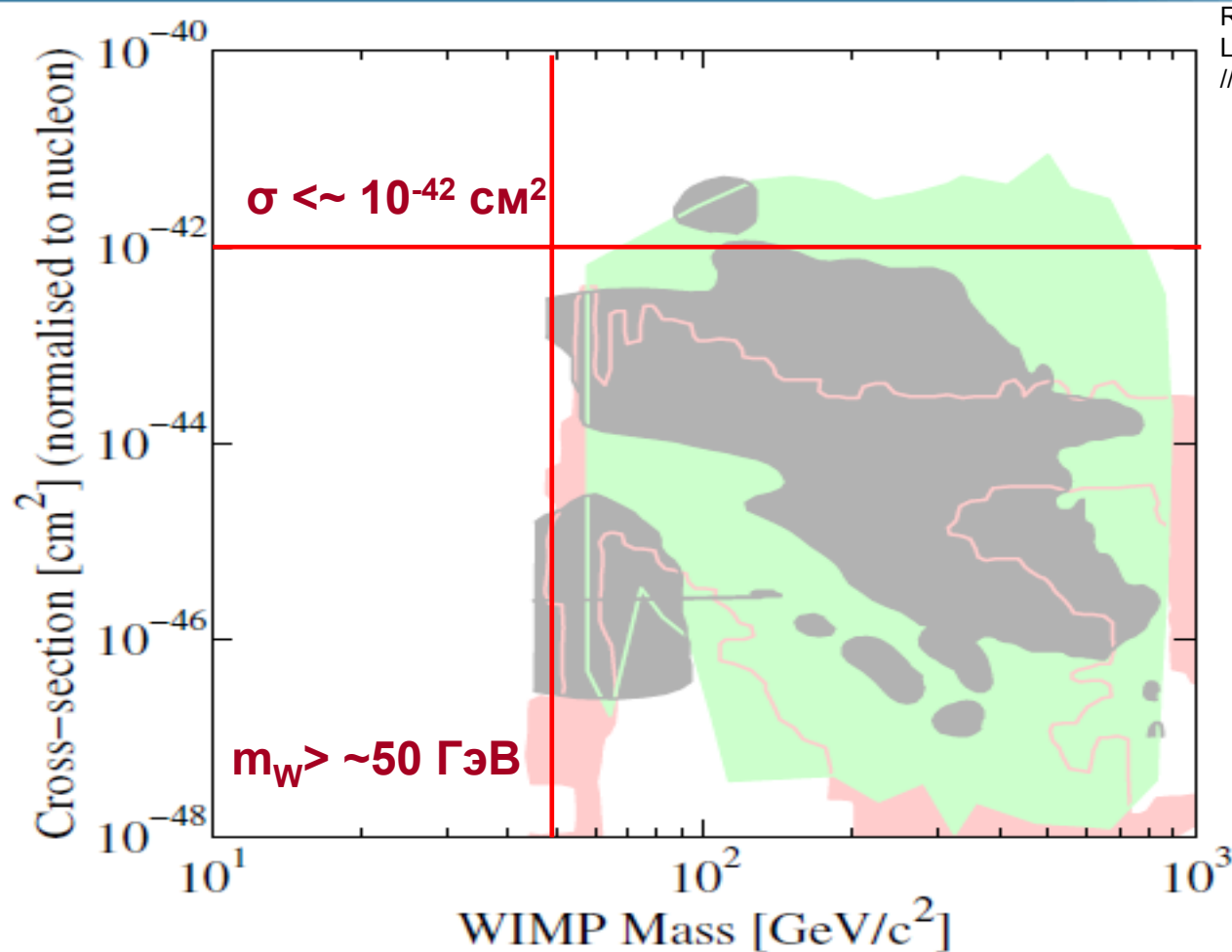
Формфактор Helm

$$F(qr_n) = 3 \frac{(\sin(qr_n) - qr_n \cos(qr_n))}{(qr_n)^3} \cdot e^{(qs)^2/2}$$

$$r_n^2 = c^2 + \frac{7}{3} \pi^2 a^2 - 5s^2$$

Bruch PH

# Ожидаемые значения $m_W$ и $\sigma_{SI}$ в *SUSY* и *SUGRA*



R. Gaitskell et al. DMTools  
Limit Plot Generator. <http://dmtools.brown.edu:8080>.

Предсказания  $m_W$  и  $\sigma$  в *SSM* с использованием экспериментальных ограничений: *constrained MSSM* (серый), *Low-Energy SSM* (зеленый), *minimal SUGRA* (розовый)



# Скорость счета WIMPs и фон детектора

$$R \approx N \Phi \sigma \approx N \frac{\rho_W}{m_W} \langle v \rangle \sigma_{SI(SD)}$$

$\rho_W$  и  $\langle v \rangle$  - из астрофизических данных

$m_W$  и  $\sigma_{SI(SD)}$  < --- > физика частиц

$$R = (6 \times 10^{26} / 40) \times (0.39 / 100) \times (29 \times 40)^2 \times 10^{-42} \times 3 \times 10^7 \times 8.64 \times 10^4$$

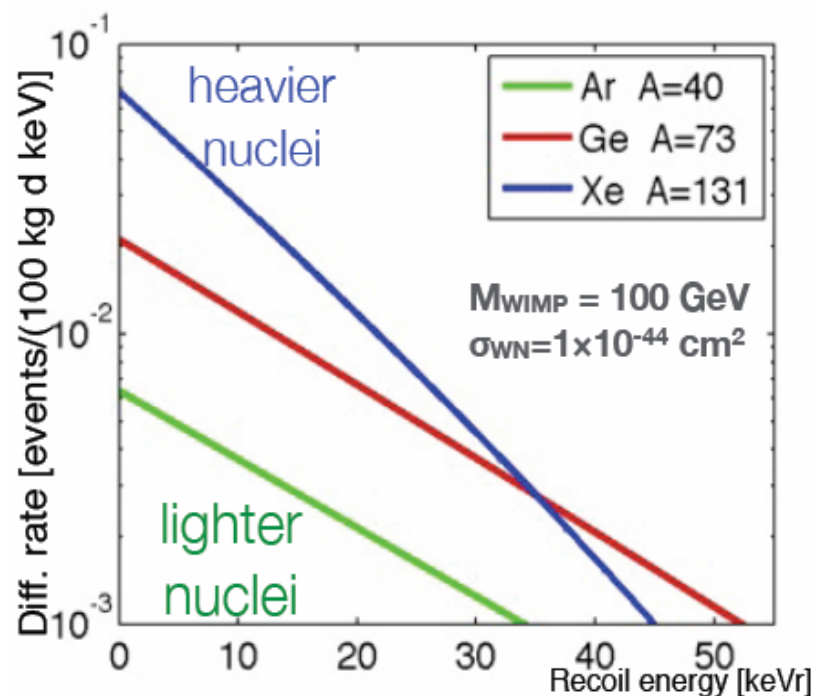
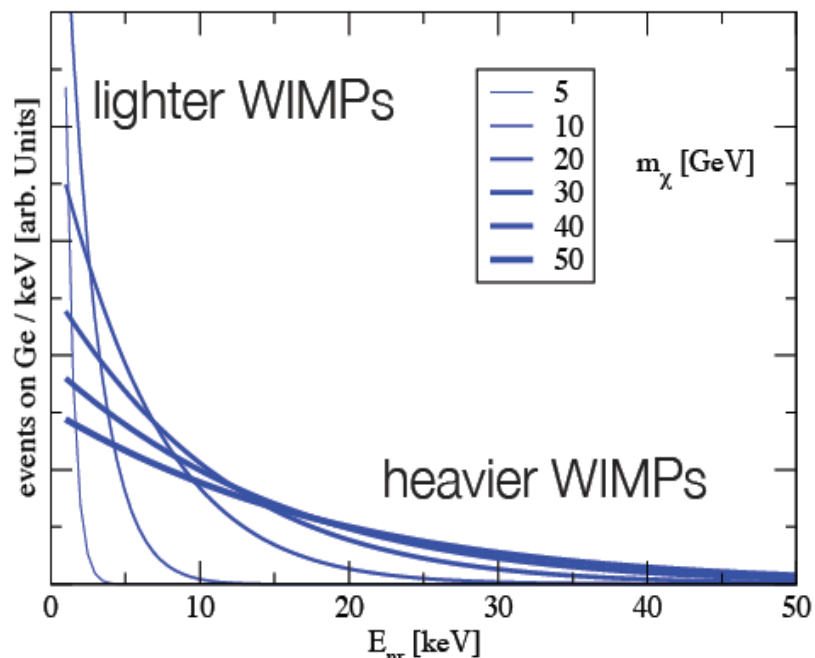
Число событий в 1 кг Ar составит 0.2 события в сутки при сечении  $10^{-42} \text{ см}^2$  (на нуклон)  $m = 100 \text{ ГэВ}$  в области энергий от 0 до 50 кэВ

**0.7 события на 1 кг в год для сечения  $10^{-44} \text{ см}^2$  и  $m_W = 100 \text{ ГэВ}$**

Скорость счета незащищенного детектора массой 1 кг  $\sim 10 \text{ Гц}$

# Спектр ядер отдачи

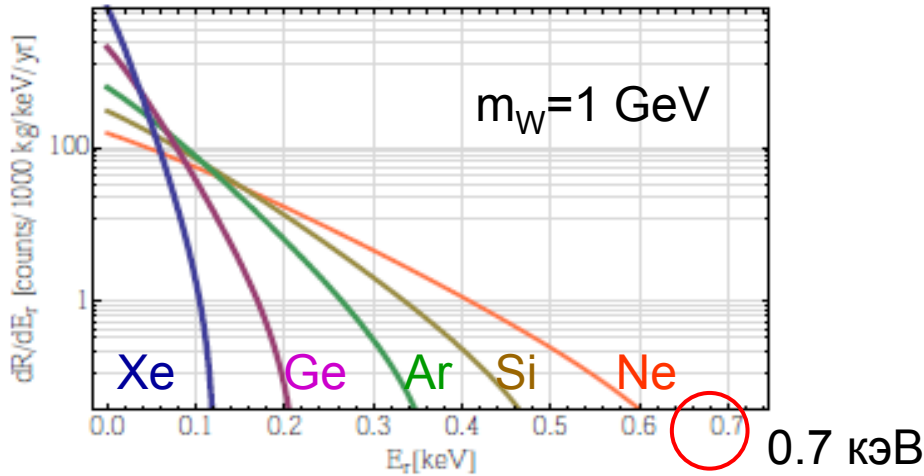
$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{\rho}{m_W} \int_{v > (M_N E_R / 2\mu^2)^{1/2}}^{v_{\max}} F^2(E_R) \frac{d\sigma_{SI(D)}}{dE_R}(E_R, v) f(\vec{v}, t) v dv$$



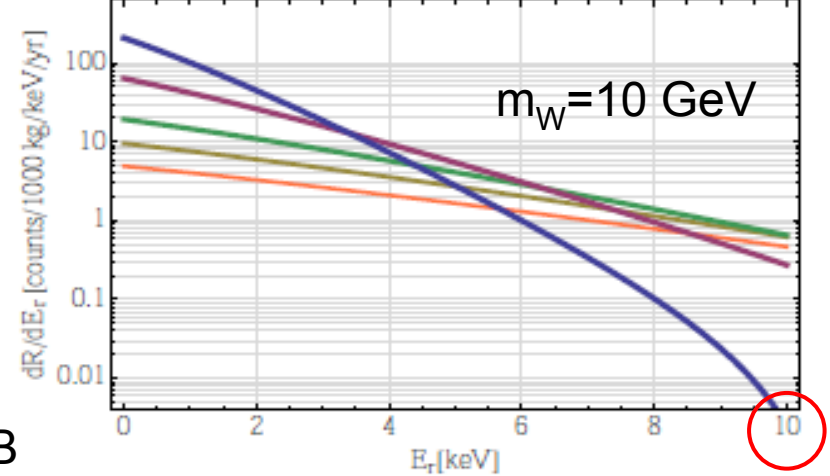
Тяжелые WIMPs дают большой сигнал. Тяжелые ядра имеют большее сечение при малых энергиях. Quenching factor (ионизационный дефицит) различный для разных ядер. Учитывая отличие в пороге регистрации детекторов, сравнение различных экспериментов - не простая задача.

# Спектр ядер отдачи Xe, Ge, Ar, Si (с/т keV y)

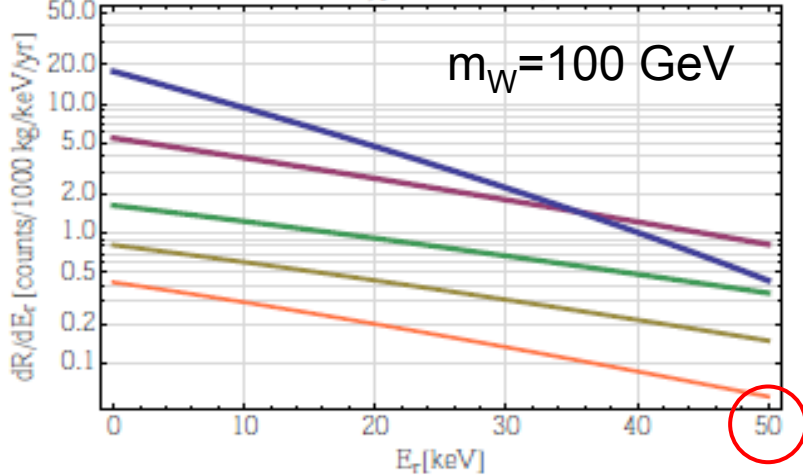
Differential Rate for  $m_\chi = 1 \text{ GeV}/c^2$ ,  $\sigma = 1 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$



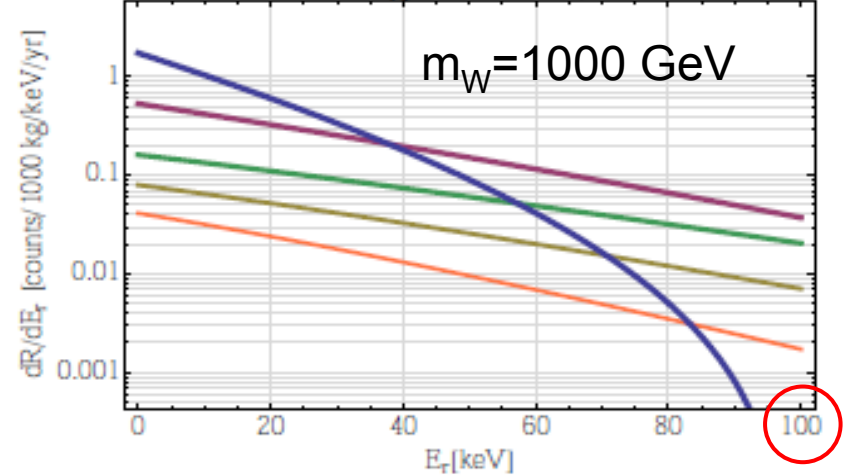
Differential Rate for  $m_\chi = 10 \text{ GeV}/c^2$ ,  $\sigma = 1 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$



Differential Rate for  $m_\chi = 100 \text{ GeV}/c^2$ ,  $\sigma = 1 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$



Differential Rate for  $m_\chi = 1000 \text{ GeV}/c^2$ ,  $\sigma = 1 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$



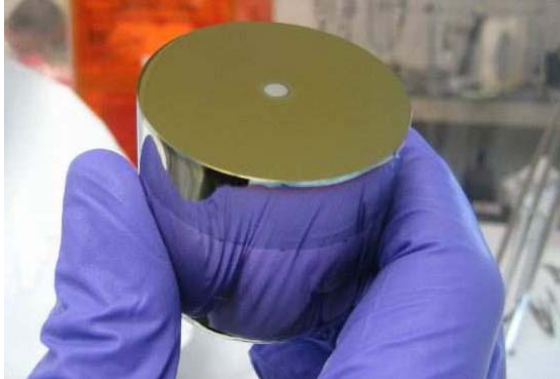
100 кэВ

# Идентификация сигнала от WIMPs

1. Форма спектра ядер отдачи
2. Временные вариации формы и скорости счета из-за движения Земли
3. Отбор событий, связанных с ядрами отдачи
4. Различный вклад от спин-зависимого и спин-независимого рассеяние для детекторов с разным изотопным составом
5. Определение направление ядра отдачи

# Детекторы WIMPs

1. Полупроводниковые.  
Электроны.



2. Сцинтилляционные  
кристаллы. Фотоны



4. Болометрические.  
Фононы



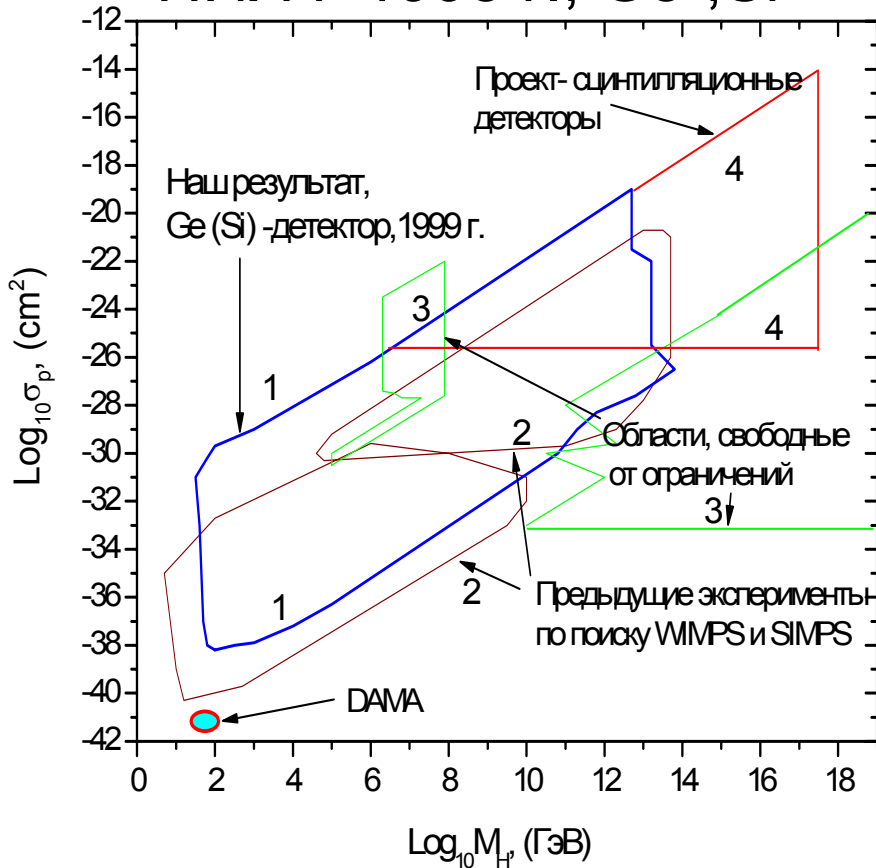
3. Сцинтилляционные  
жидкости. Фотоны



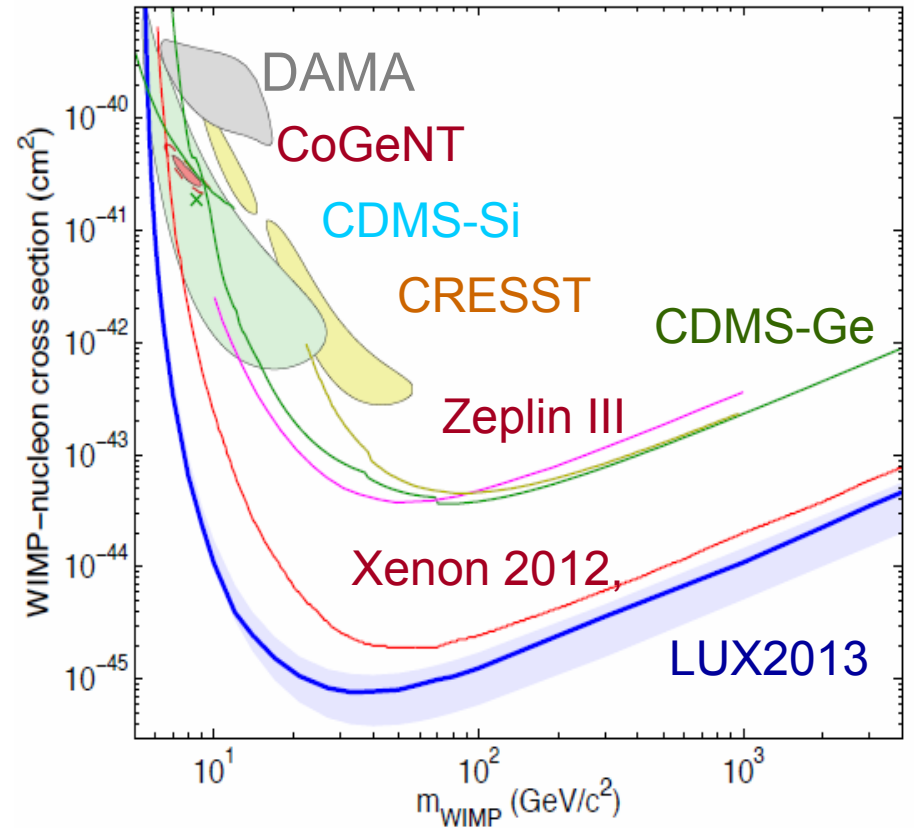
В большинстве используются детекторы с 2-мя методами регистрации, что позволяет разделить сигнал от ядра и электрона и понизить фон.

# Прогресс в поиске рассеяния WIMPs на ядрах

ПИЯФ 1998 г., Ge-, Si-



Xenon 2012, LUX2013



$R \sim E_{\text{Threshold}}$

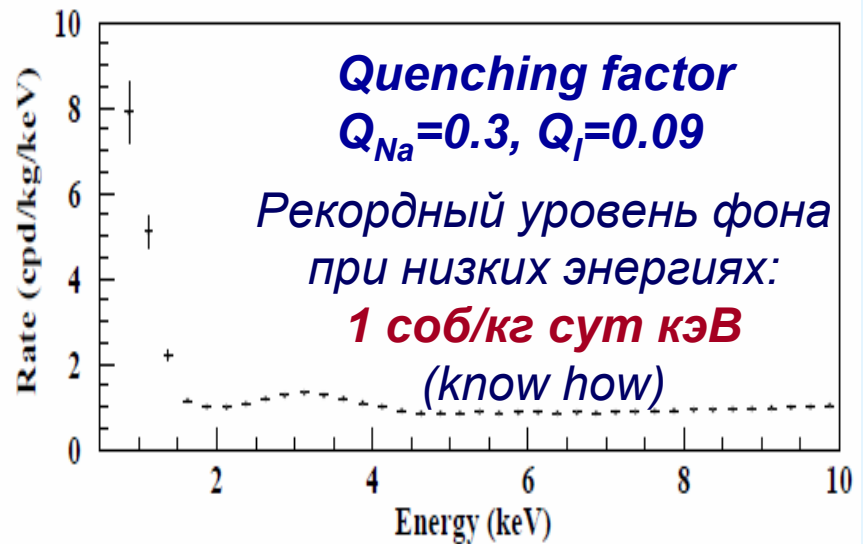
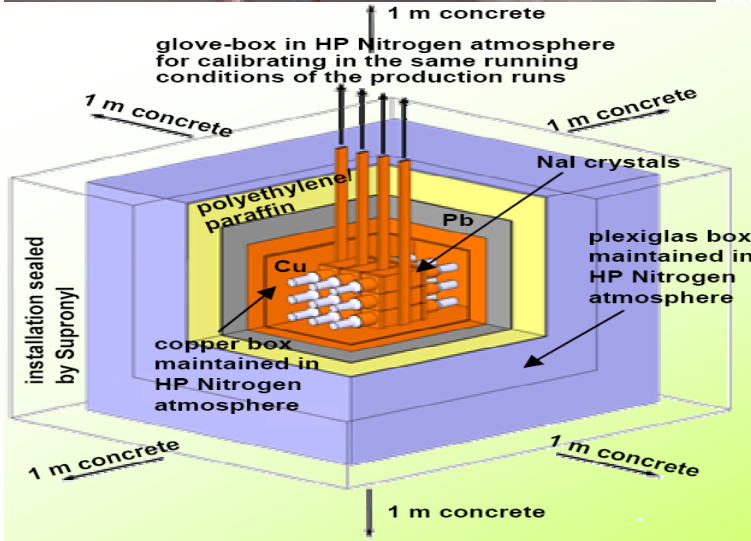
$\text{Flux} \sim 1/m$

Чувствительность экспериментов за 15 лет возросла на **5-6 порядков**: от  $10^{-39} \text{ cm}^2$  до  $10^{-45} \text{ cm}^2$  для  $m_W \sim 100 \text{ ГэВ}$ . Уменьшение  $R$  для малых  $m_W$   $R$  определяется порогом, при больших – потоком WIMPs.

# DAMA/NaI (100 кг) и DAMA/LIBRA (250 кг)



статистика  
1.17 т×год  
13 годовых  
циклов



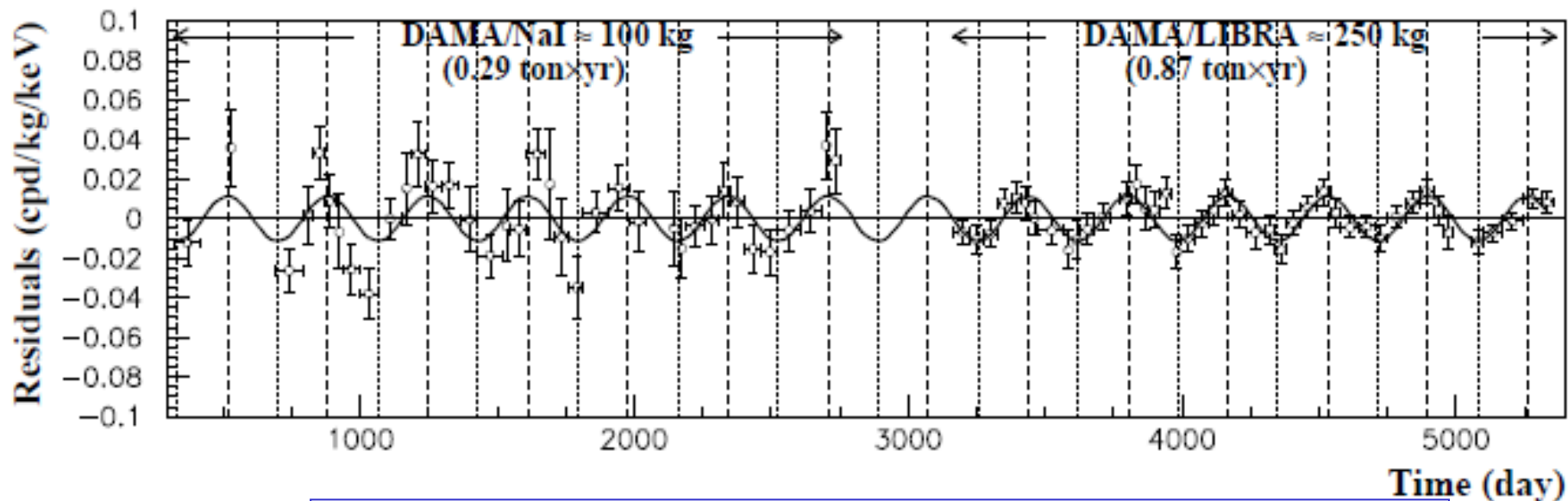
25 NaI кристаллов (5х5) просматриваются с двух сторон ФЭУ, работающими в одноэлектронном режиме (~6 фэ/кэВ). Защита Cu/Pb/Cd/полиэтилен/парафин

# DAMA/LIBRA: вариации скорости счета – 9 $\sigma$

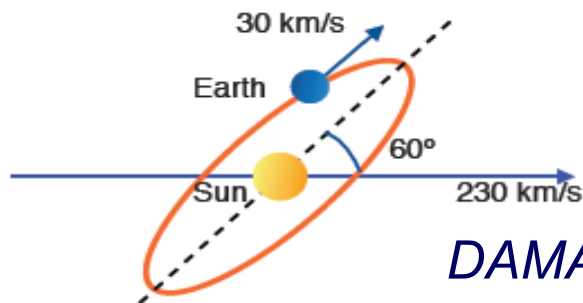
1.17 т × лет за 13 циклов

arXiv:1301.6243v1

2-6 keV



$$F(t) = A \cos [(2\pi/T) (t - t_0)], \quad t_0 = 152.5 \text{ для 2 июня}$$

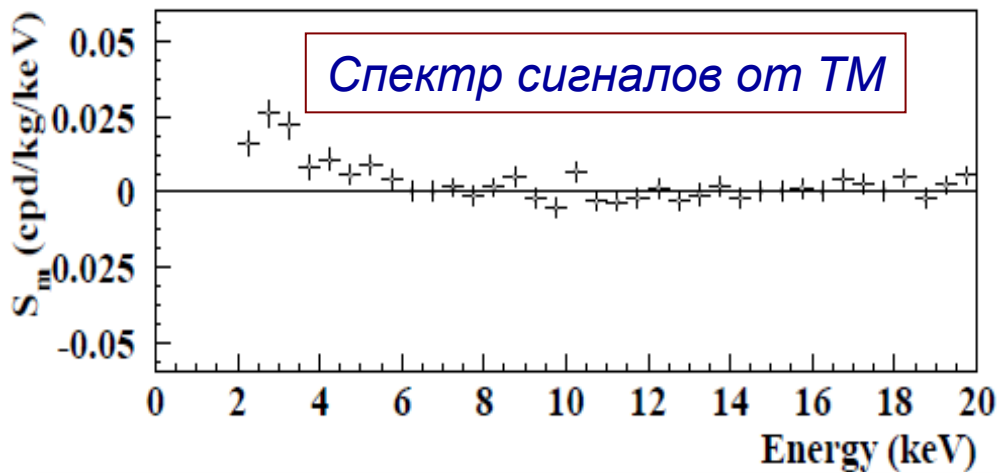


$$A = (0.0116 \pm 0.0013) \text{ cpd/kg/keV,}$$
$$T = (0.999 \pm 0.002) \text{ yr}$$
$$t_0 = (146 \pm 7) \text{ day.}$$

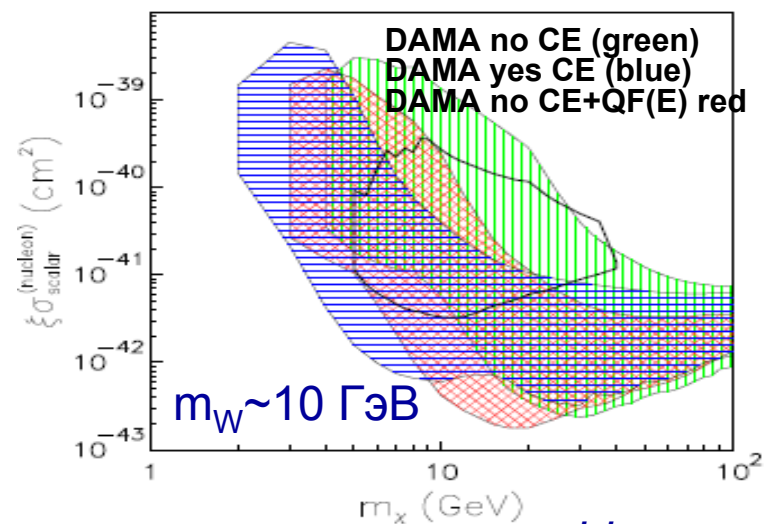
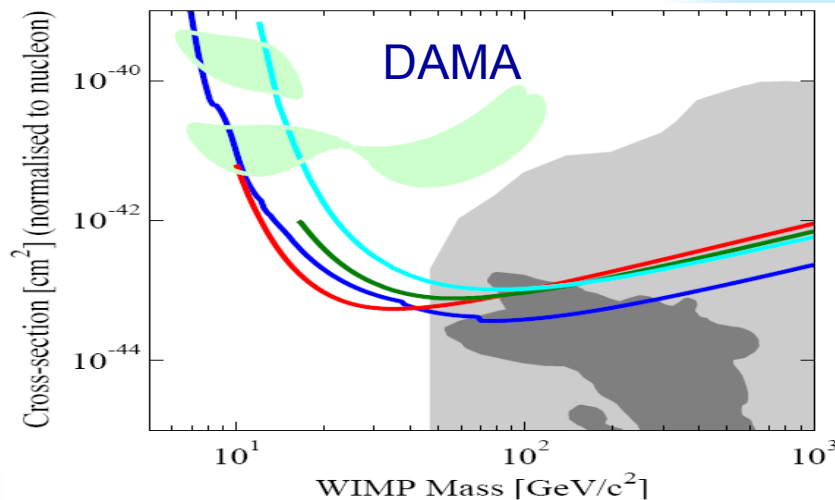
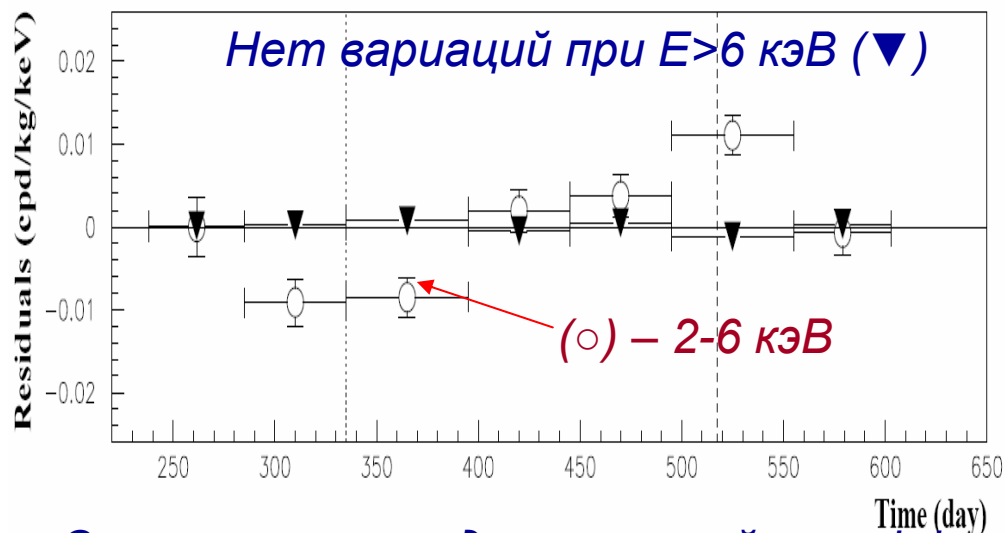
DAMA/LIBRA наблюдает вариации скорости счета NaI детекторов в интервале 2-6 кэВ на уровне 8.9- $\sigma$



# DAMA: вариации скорости счета



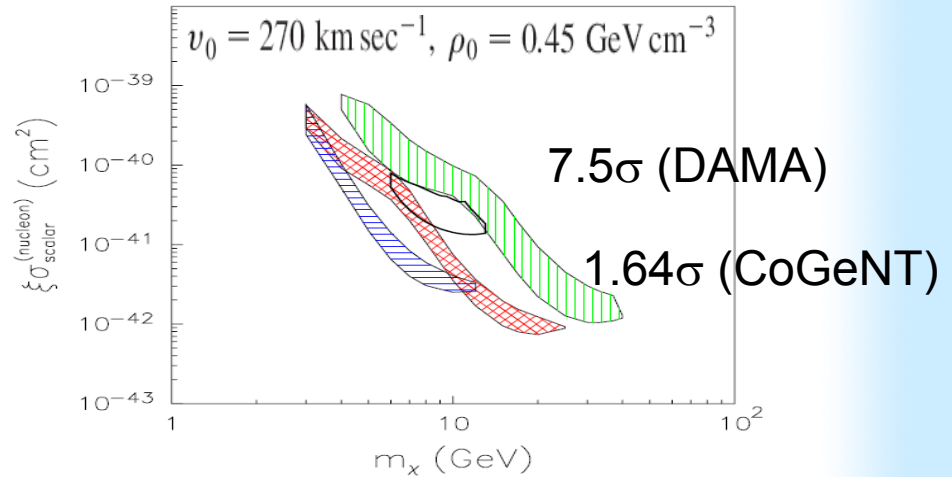
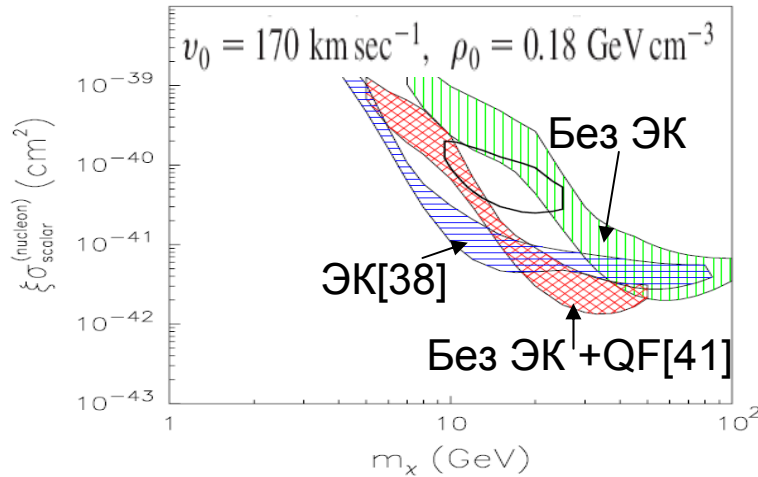
2-6 keV



С учетом неопределенностей от эффекта каналирования и quenching factor область оказывается широкой:  $m_W = 2-100$  ГэВ и  $\sigma = 10^{-39}-10^{-43}$  см<sup>2</sup>

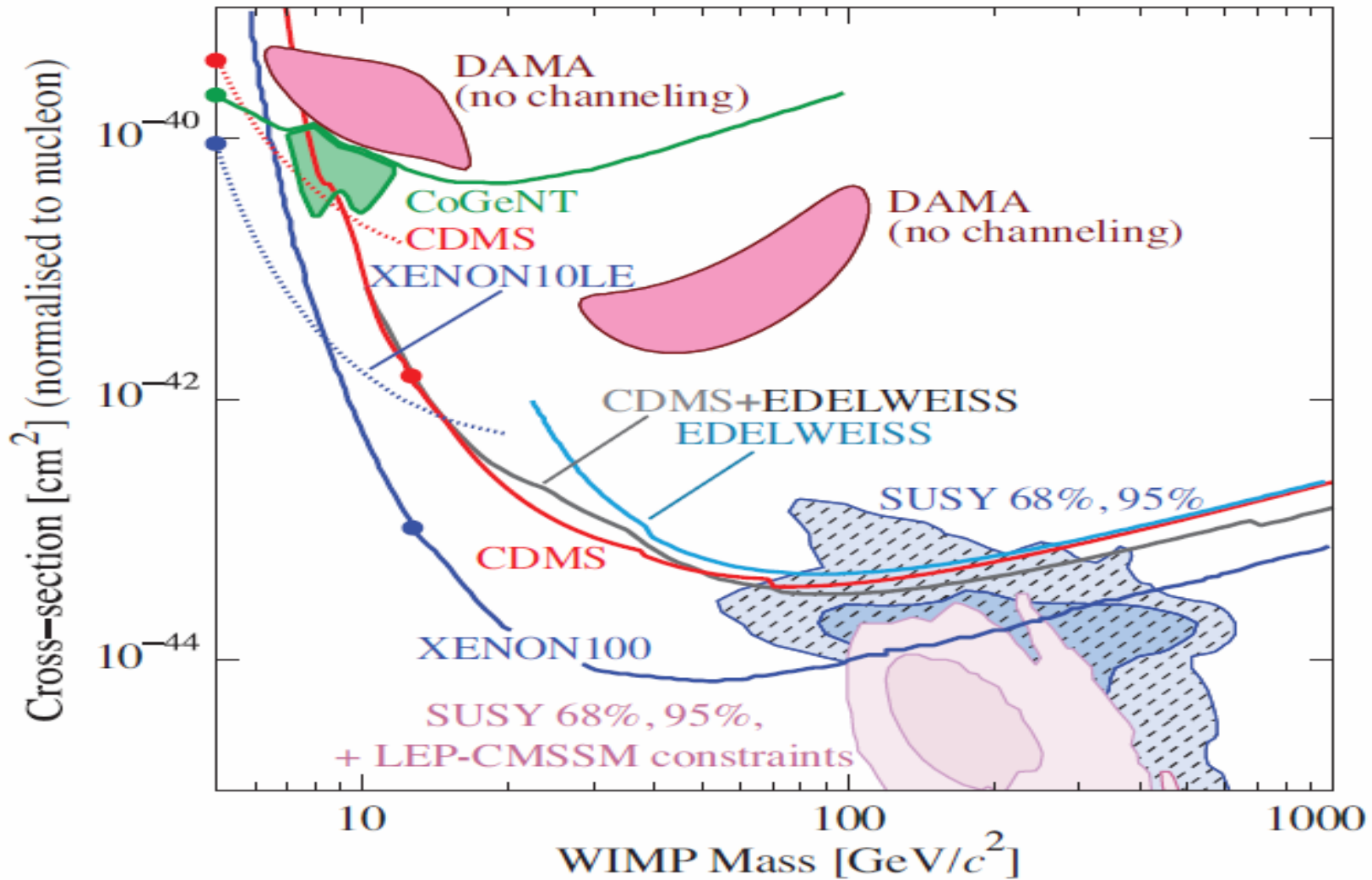
# Неопределенности анализа

1. Плотность гало в солнечной системе (СС)
2. Скорость вращения СС (170 - 270) км/сек
3. Распределение ТМ по скоростям
4. Критическая скорость
5. Сечение взаимодействия
6. Quenching factor для NaI -детектора
7. Эффект каналирования ионов в NaI-кристалле



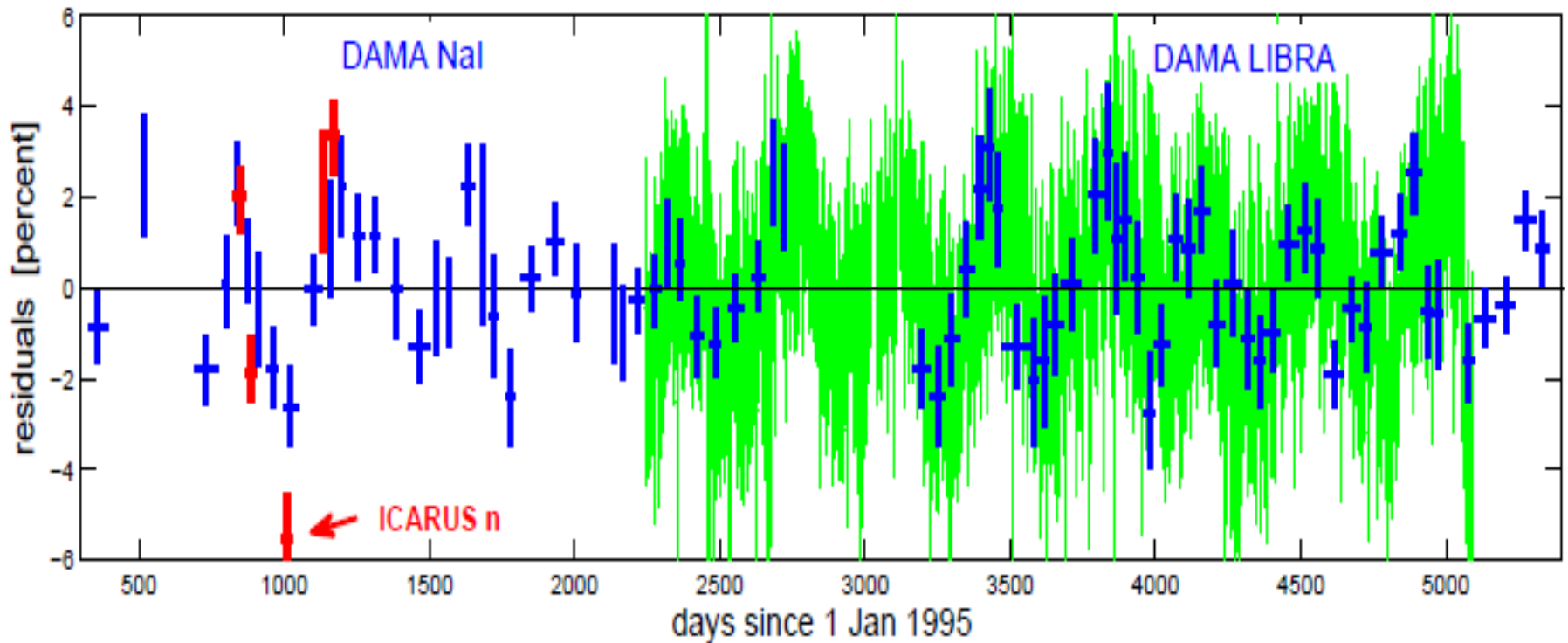
Model	$v_0 = 170 \text{ km sec}^{-1}$		$v_0 = 220 \text{ km sec}^{-1}$		$v_0 = 270 \text{ km sec}^{-1}$	
	$\rho_0^{min}$	$\rho_0^{max}$	$\rho_0^{min}$	$\rho_0^{max}$	$\rho_0^{min}$	$\rho_0^{max}$
A0	0.18	0.28	0.30	0.47	0.45	0.71
A1,B1	0.20	0.42	0.34	0.71	0.62	1.07
A2,B2	0.24	0.53	0.41	0.89	0.97	1.33
A3,B3	0.17	0.35	0.29	0.59	0.52	0.88
A4,B4	0.26	0.27	0.44	0.45	0.66	0.67
A5,B5	0.20	0.44	0.33	0.74	0.66	1.11
A6,B6	0.22	0.39	0.37	0.65	0.57	0.98
A7,B7	0.32	0.54	0.54	0.91	0.82	1.37
C1	0.36	0.56	0.60	0.94	0.91	1.42
C2	0.34	0.67	0.56	1.11	0.98	1.68
C3	0.30	0.66	0.59	1.10	0.97	1.66
C4	0.32	0.65	0.54	1.09	0.96	1.64
D1,D2	0.32	0.50	0.54	0.84	0.81	1.27
D3,D4	0.19	0.30	0.32	0.51	0.49	0.76

# Результат DAMA на плоскости $m_W$ vs $\sigma_{SI}$



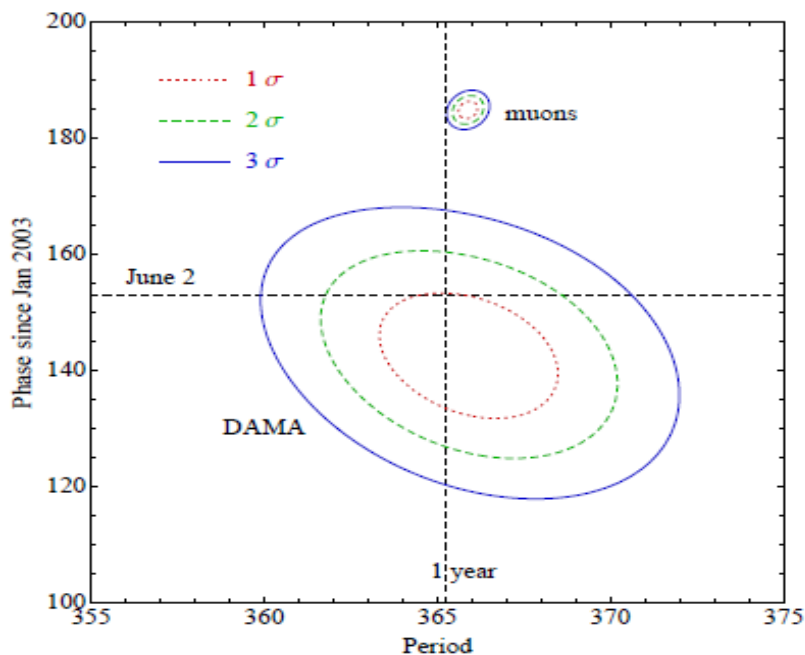
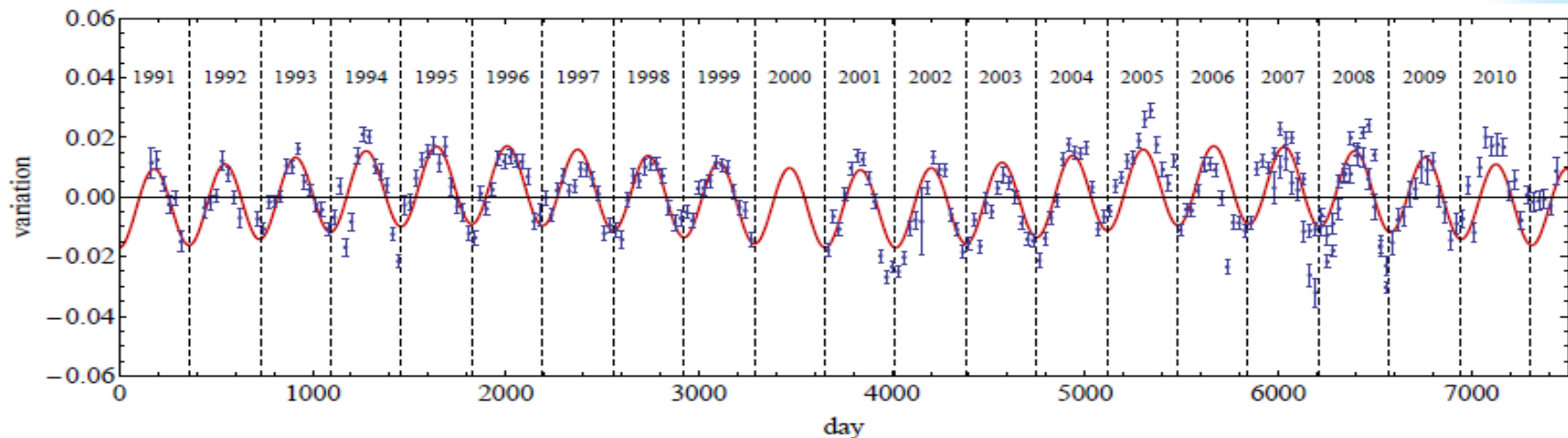
Результат DAMA для  $\sigma_{SI}$  не подтверждается рядом других экспериментов

# DAMA vs поток мюонов в LVD



1. Корреляция скорости счета в детекторах DAMA (синий, ядра отдачи + электроны) с детекторами LVD (зеленый, мюоны,  $28 / \text{м}^2 \text{сут}$ ) и ICARUS (красный, нейтроны).
2. Уменьшение амплитуды: 1995-2001:  $(20.0 \pm 3.2) 10^{-2} \text{ ev/kg d keVee}$ ; 2003-2007-  $(10.7 \pm 1.9) 10^{-2} \text{ ev/kgdkeV}$ ; 2003-2009-  $(8.5 \pm 2.2) 10^{-2} \text{ ev/kgd keV}_{ee}$ ;
3. Нет отбора сигналов от ядер отдачи

# DAMA vs поток мюонов в ГранСассо

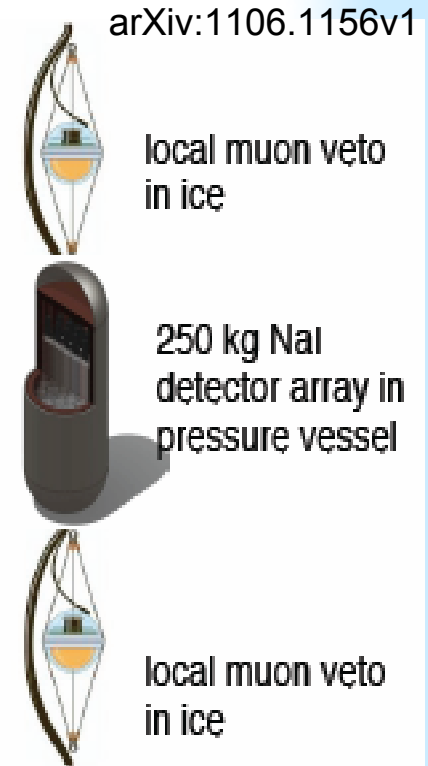


arXiv:1204.5180v2

Модуляция потока мюонов, определенная по данным MACRO, LVD и BOREXINO, совпадает с данными DAMA по периоду, но отличается по фазе на  $5.2\sigma$  (30 сут). Данные DAMA на  $1\sigma$  отклоняются от 2 ИЮНЯ.

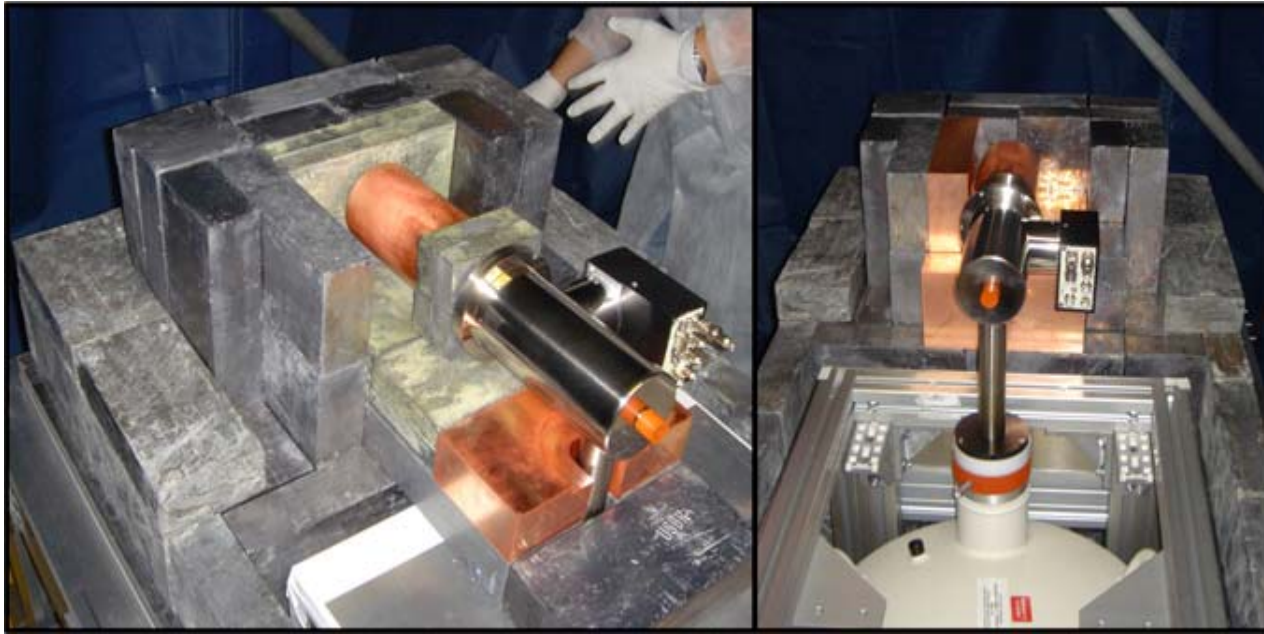
# DM-Ice на Южном полюсе

Laura Baudis

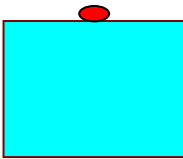


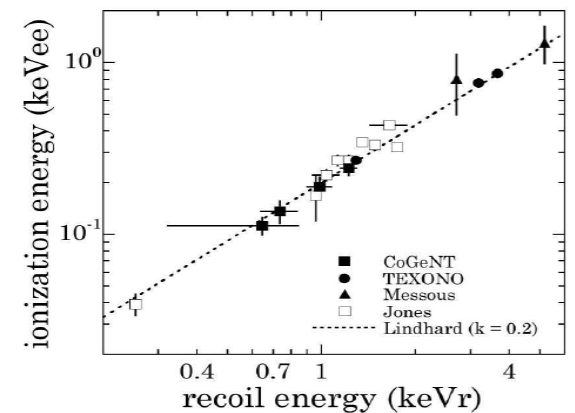
Для проверки возможной корреляции с потоком мюонов, 17 кг NaI детекторов располагаются в скважине на Южном полюсе на глубине 2.4 км (январь 2011). Целью является размещение 250-500 кг NaI. Детектор нейтрино **IceCube** используется как мюонное вето.

# CoGeNT – p-type point-contact Ge-детекторы



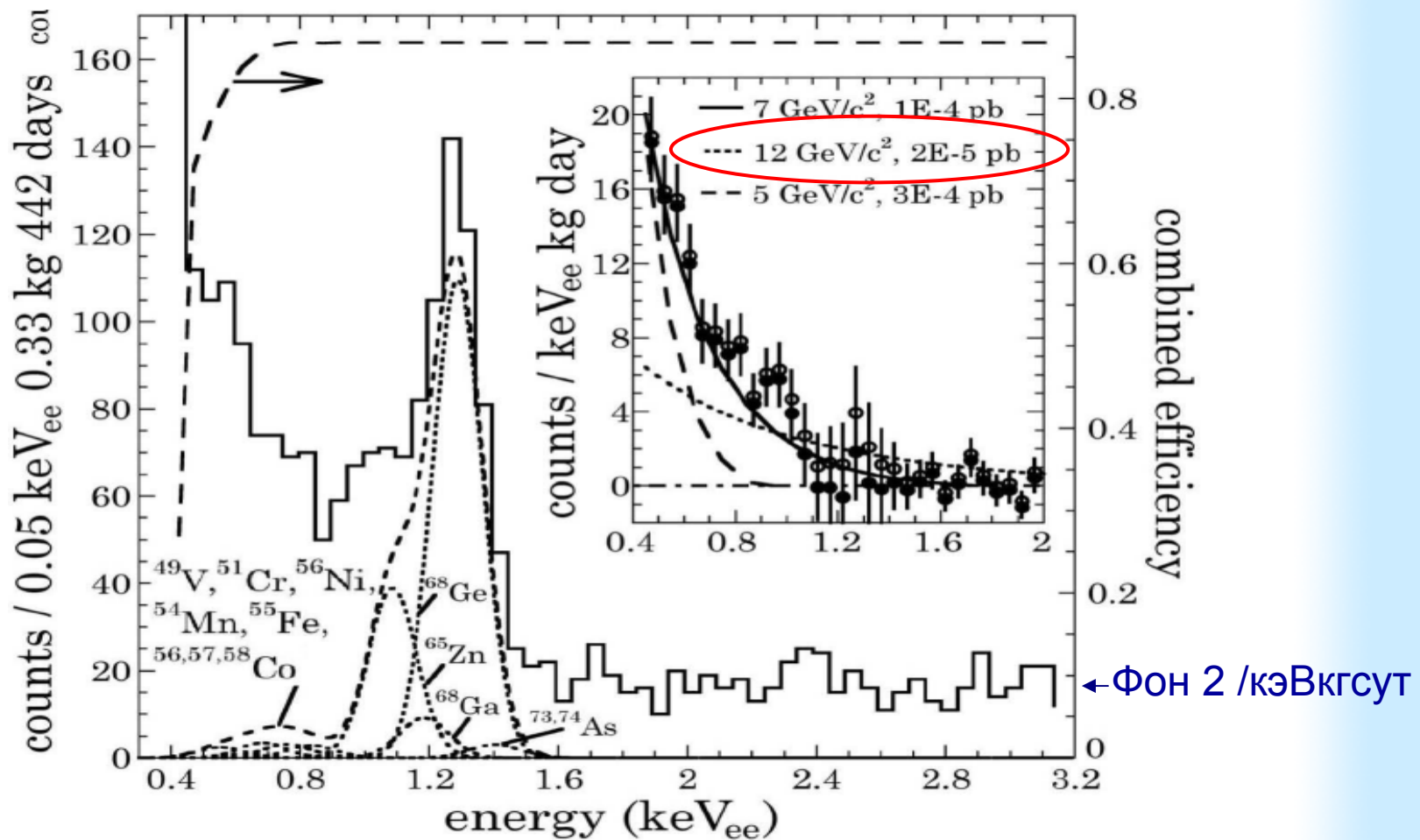
*Coherent  
Germanium  
Neutrino  
Technology  
Saudan mine  
716 м.в.э.  
Отбор событий  
вблизи  
поверхности.  
Не болометр*

Property		Value
Manufacturer	Canberra (modified BEGe)	
Total Mass		443 gram
Estimated Fiducial Mass		~330 gram
Outer Diameter		60.5 mm
Length		31 mm
Capacitance	<b>1.8 pF</b> (at 3000 V bias)	



Новый тип детекторов с точечным контактом, малой емкостью и FWHM=150 эВ

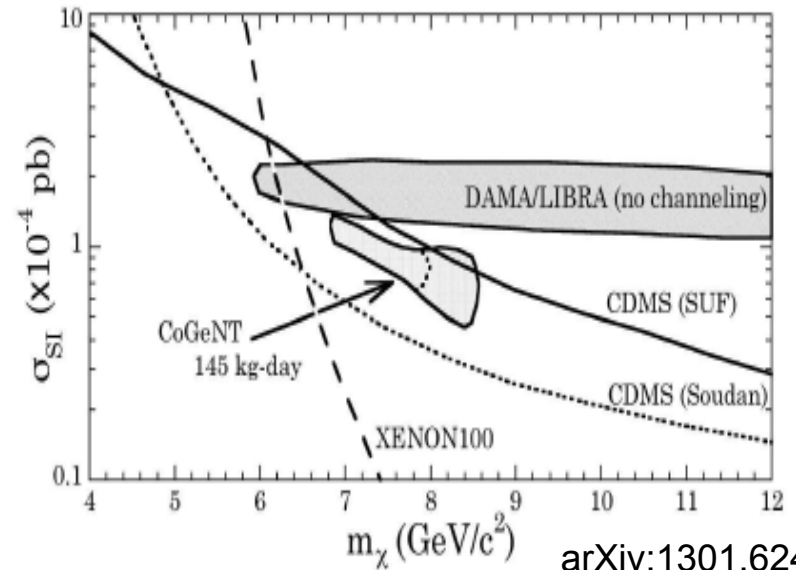
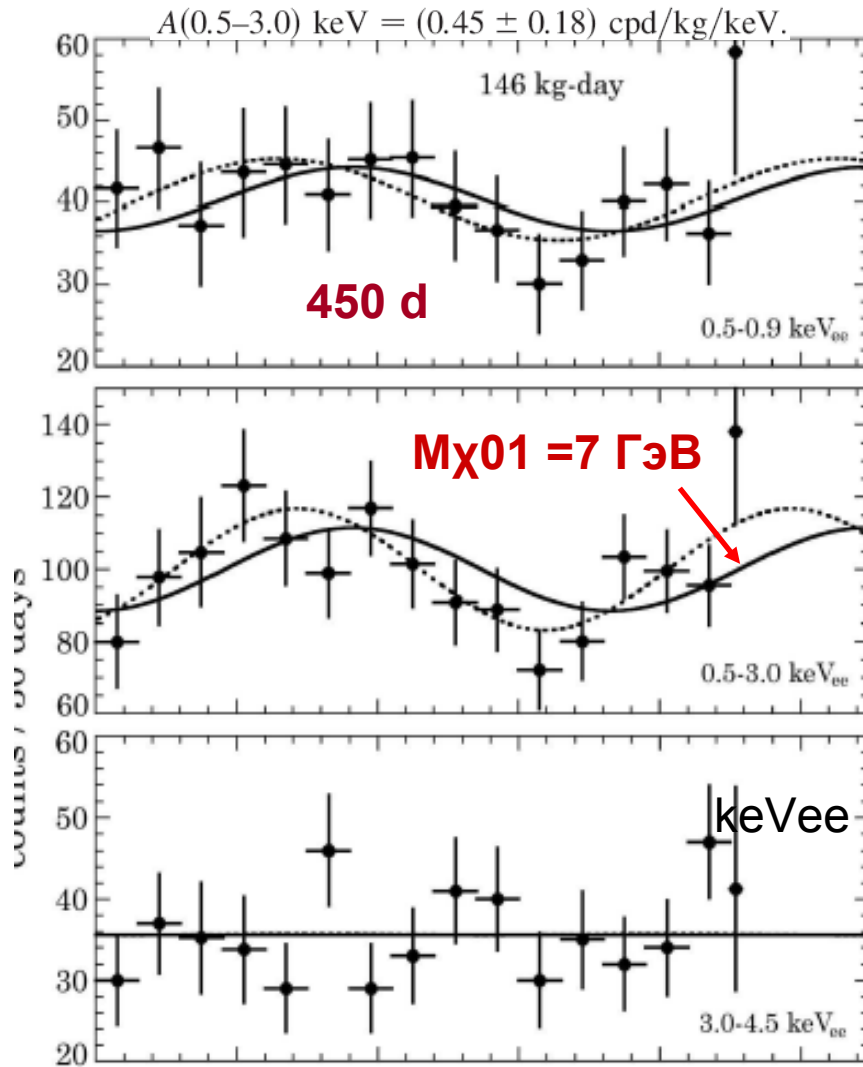
# Спектр PPGe-детектора 330 г за 442 суток



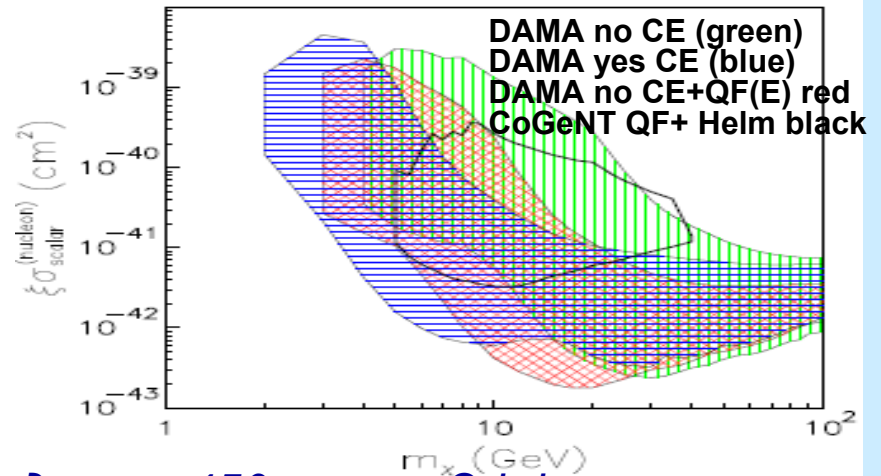
Благодаря высокому разрешению спектр измерен с порога 0.3 кэВ. Основной вклад в этой области связан с активацией Ge на поверхности. Остаточный фон соответствует области  $m_w = 8 \text{ ГэВ}$  и  $\sigma \sim 10^{-40}-10^{-41}$



# CoGeNT – вариации 2.8 $\sigma$ эффект

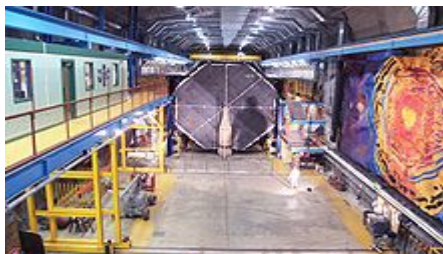
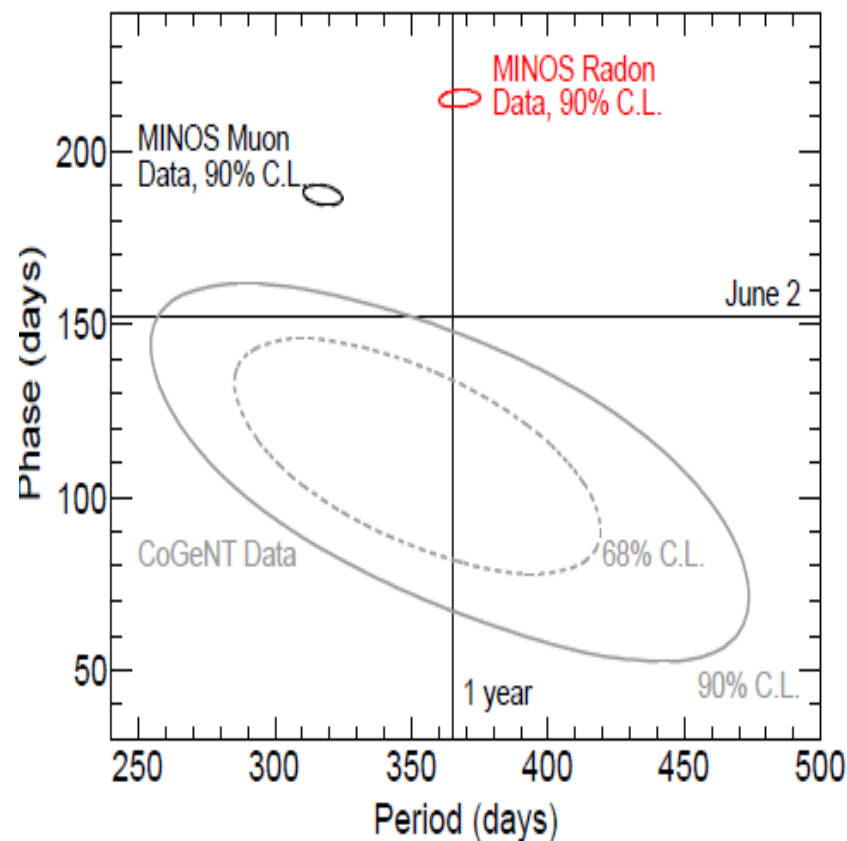
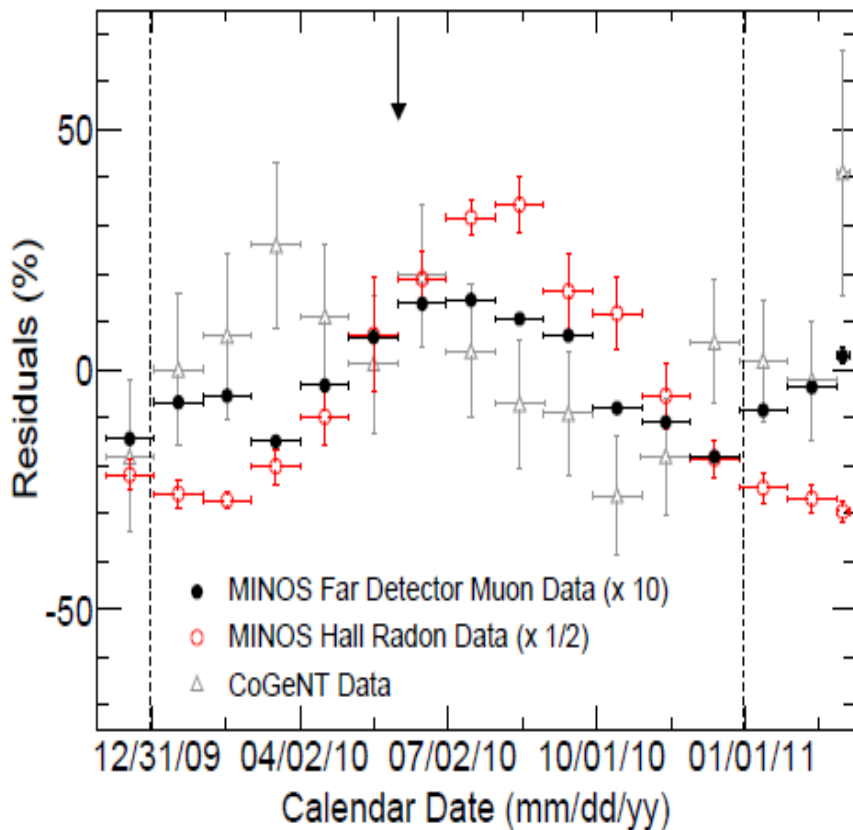


arXiv:1301.6243v1



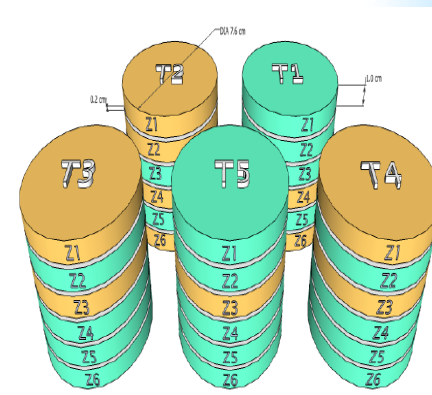
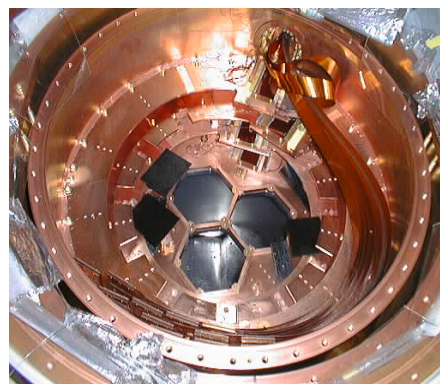
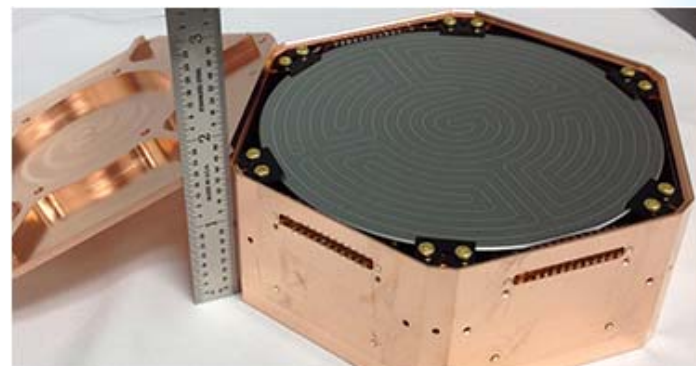
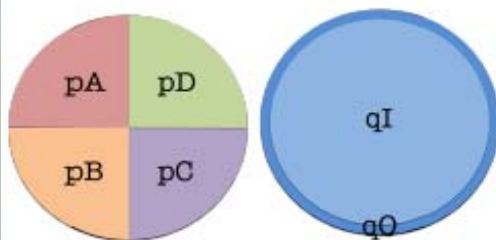
В отличие от DAMA измерения проводились 450 суток. Эффект вариации сигнала  $\sim 0.5 \text{ соб/кг сут кэВ}$  на уровне 2.8  $\sigma$ . Контур  $m_{\chi}$  и  $\sigma$  для 90 % у.д.

# Фаза CoGeNT отличается от фазы MINOS на $3\sigma$



1. Нет отбора сигналов от ядер отдачи
2. Отбор событий вблизи поверхности детектора

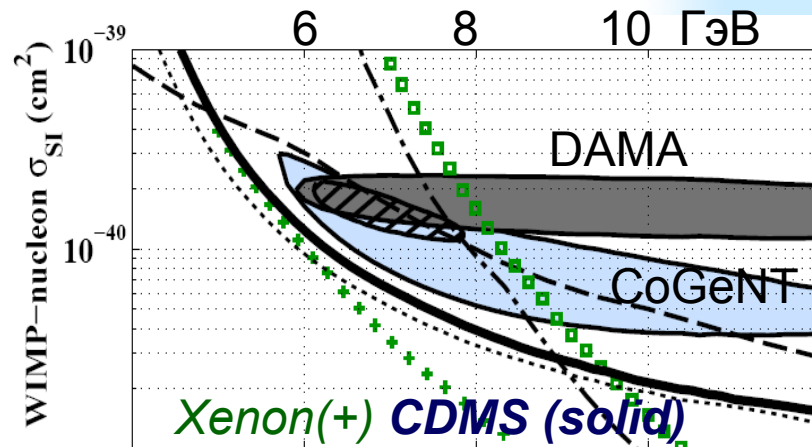
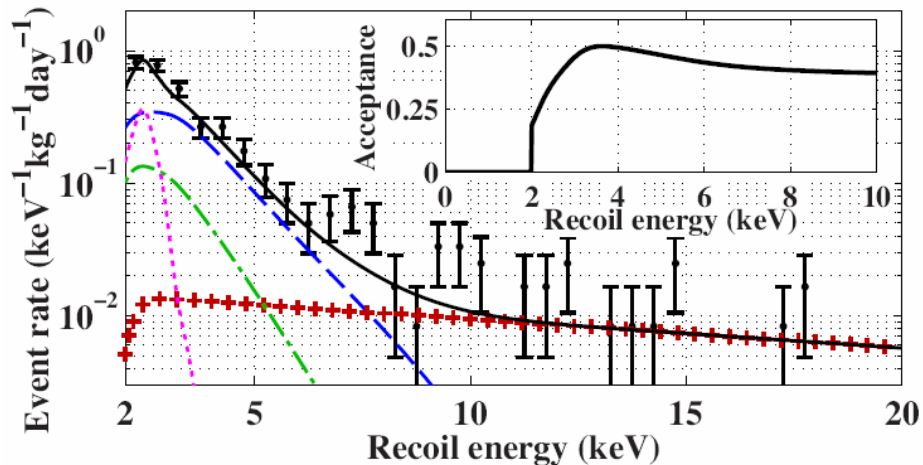
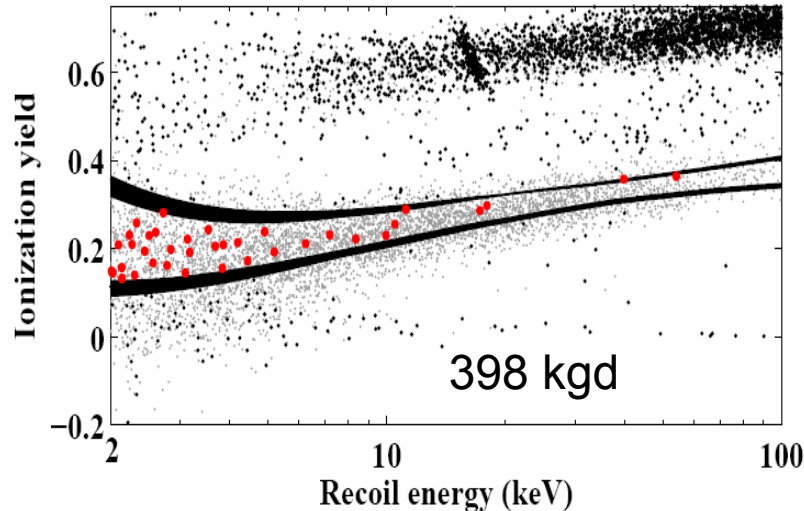
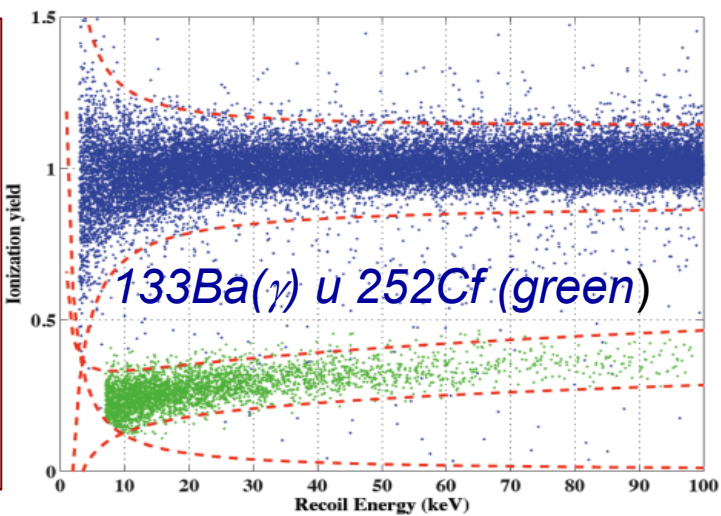
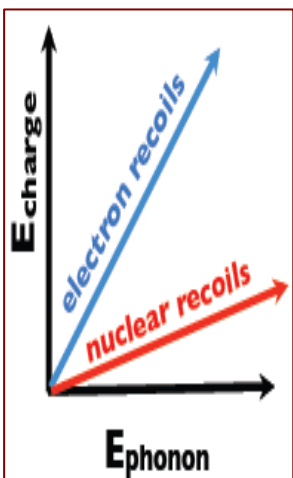
# CDMS - Cryogenic Dark Matter Search



*Массив Ge- и Si-детекторов, работающих при 20 мК в лаборатории Saudan.*

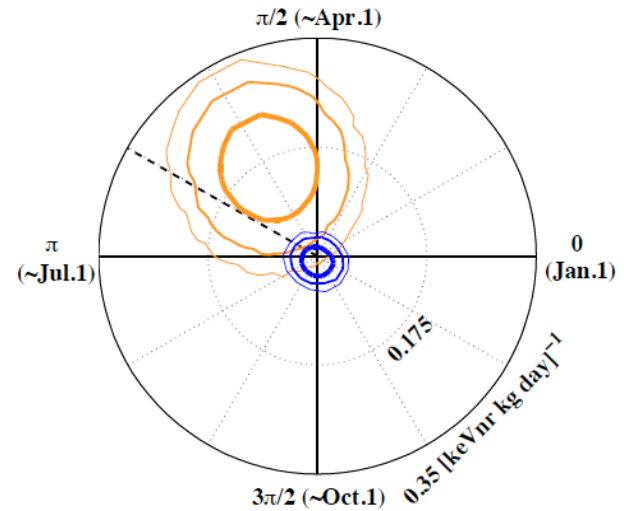
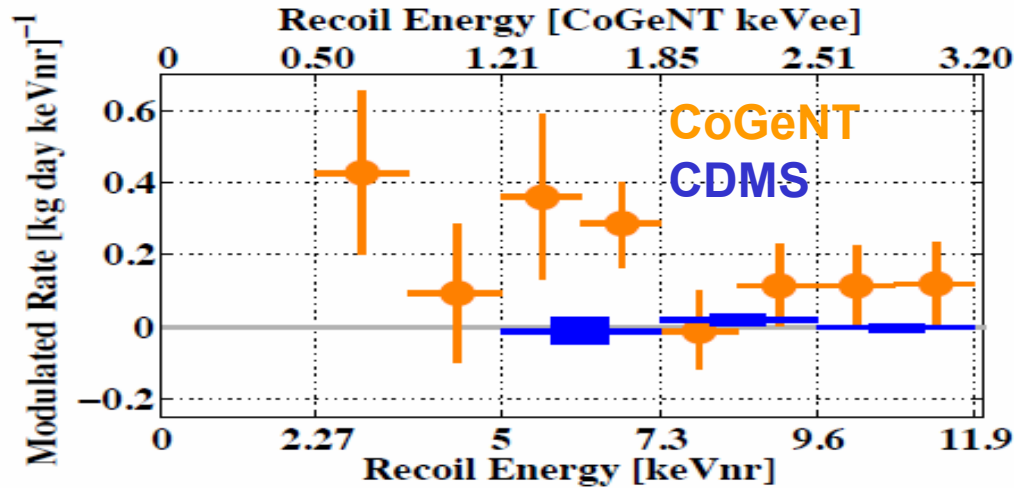
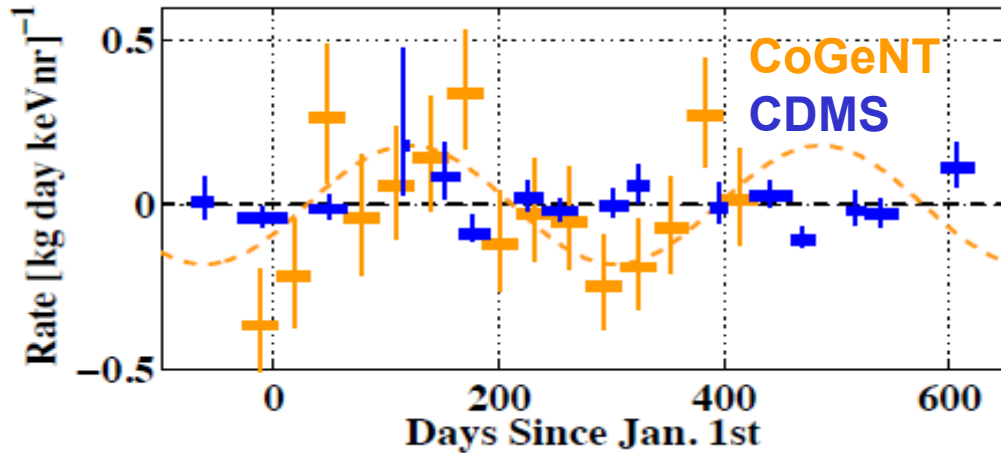
*19 Ge- и 11 Si-детекторов диаметром 76 мм и толщиной 10 мм (250 и 100 г). Измеряется ионизационный и фоновый сигналы. Фоны регистрируются за счет разрушения сверхпроводимости в тонких полосках Al-Ti.*

# Дискриминация электронов и ядер отдачи



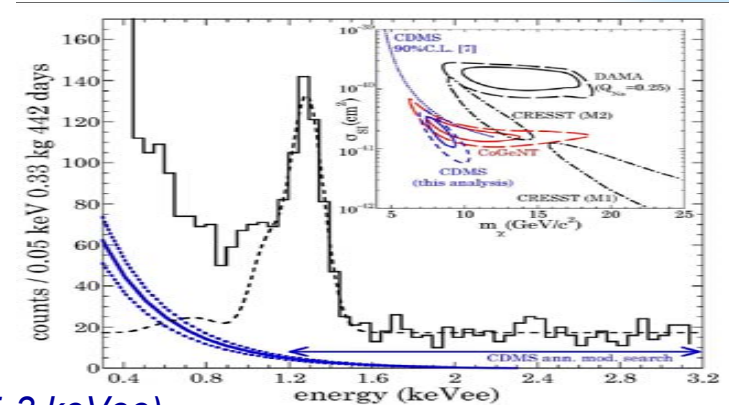
Выполненное разделение событий от  $e$  и ядер позволило достигнуть рекордного фона 0.1 соб/кэв кг сут. и закрыть область малых  $m_{W\tilde{}}$ .

# Вариации СС: CDMS vs CoGeNT



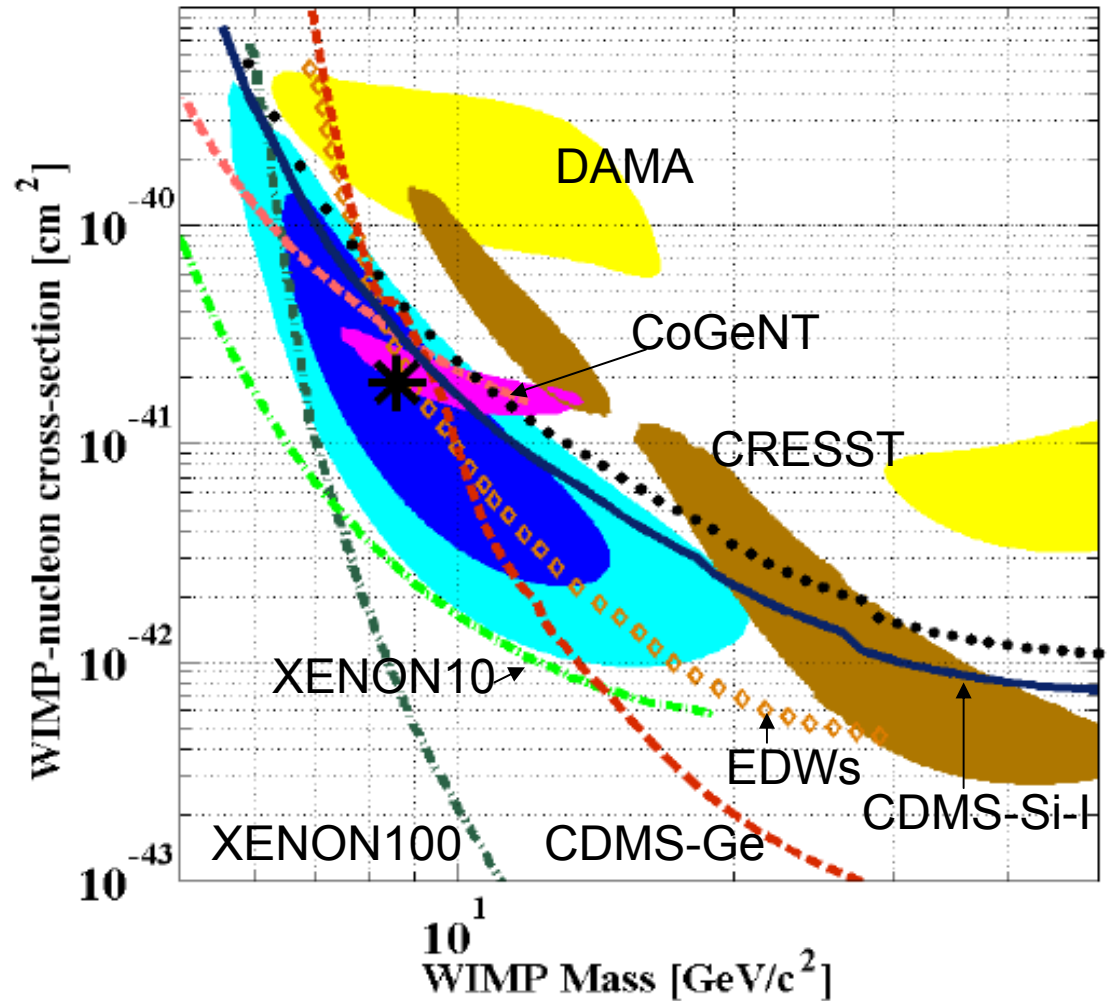
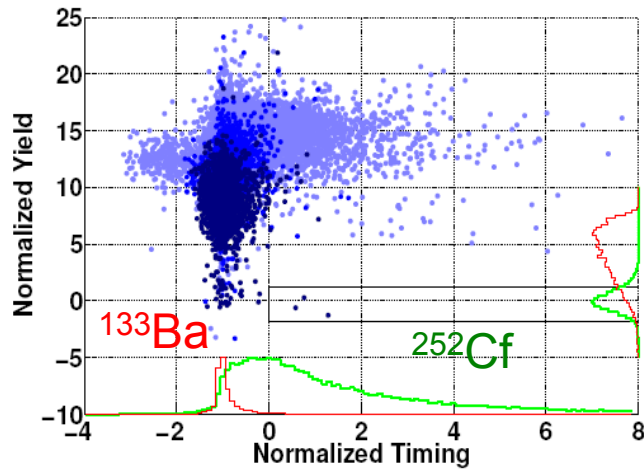
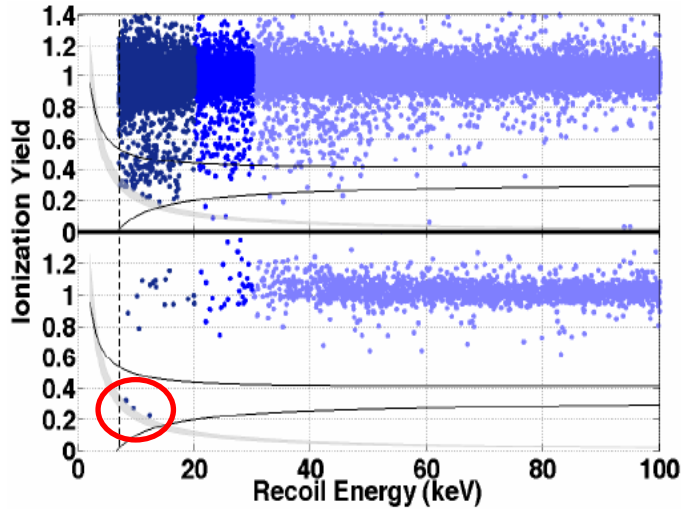
$<0.06 \text{ ev/keVnr kg day}$   
 $5-12 \text{ keVnr}$   
 $1.2-3.2 \text{ keVee}$

Нет вариаций на уровне 0.06 в 1.2-3.2 keVee.  
 Порог CDMS в 2.5 раза выше чем CoGeNT (0.5-3 keVee)



# CDMS: результаты с Si-детекторов

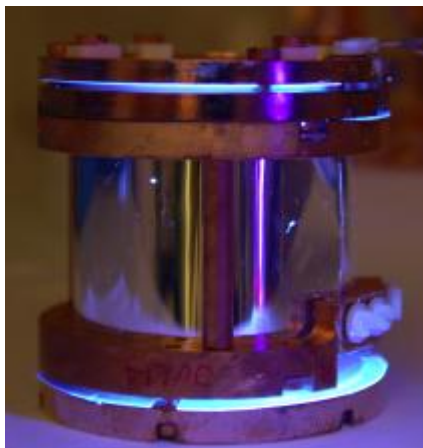
arXiv:1304.4279v1 15 Apr 2013



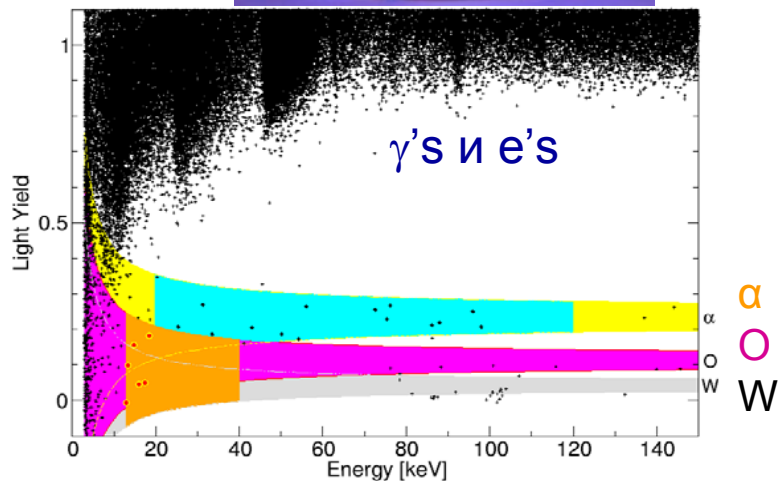
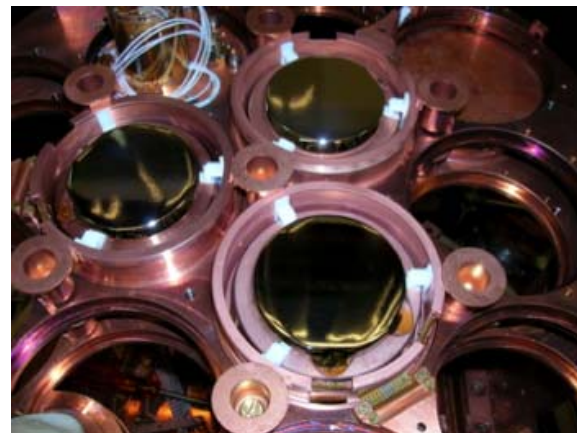
8 Si detectors with total exposure of 140.2 kg-days. 3 WIMP-candidates with background  $0.41 \pm 0.20 \pm 0.26$ . Probability of fluctuation for 3 or more ev's is 5.4%.

# Болометры: CRESST, EDELWEISS

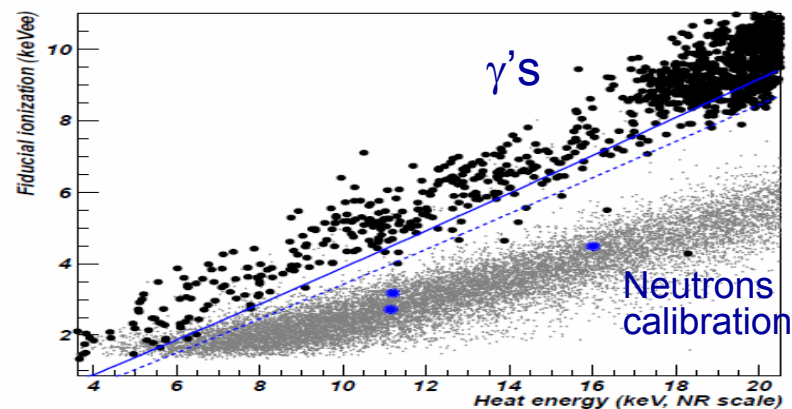
LNGS,  
Italy



Modane,  
France



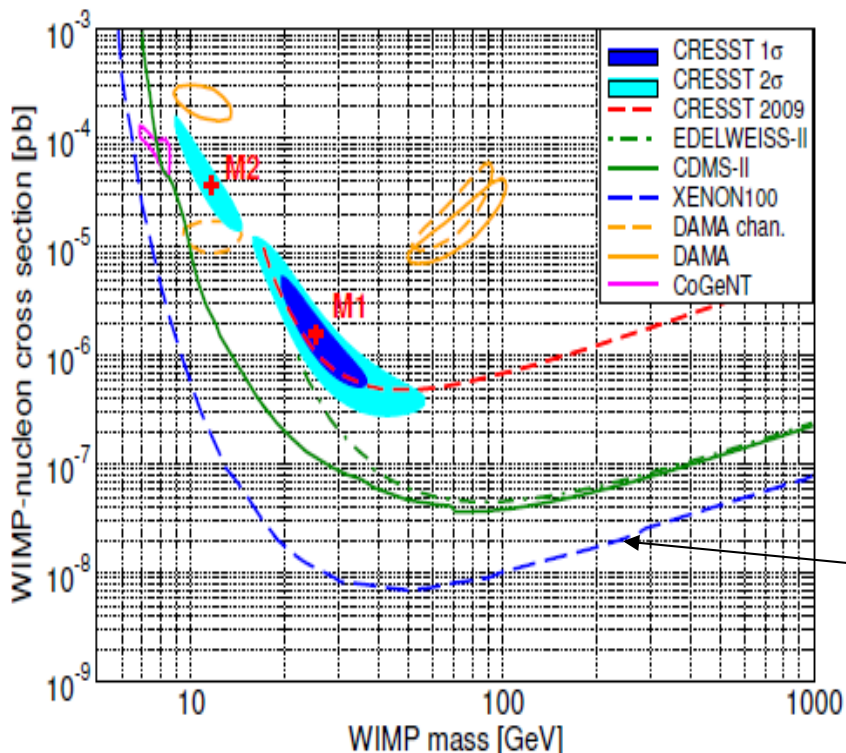
**CaWO<sub>3</sub>** детекторы при 10 мК  
(сцинтилляционный и фоновый  
сигналы) 67событий за 730 кг сут.  
37событий ожидаются как фоновые.



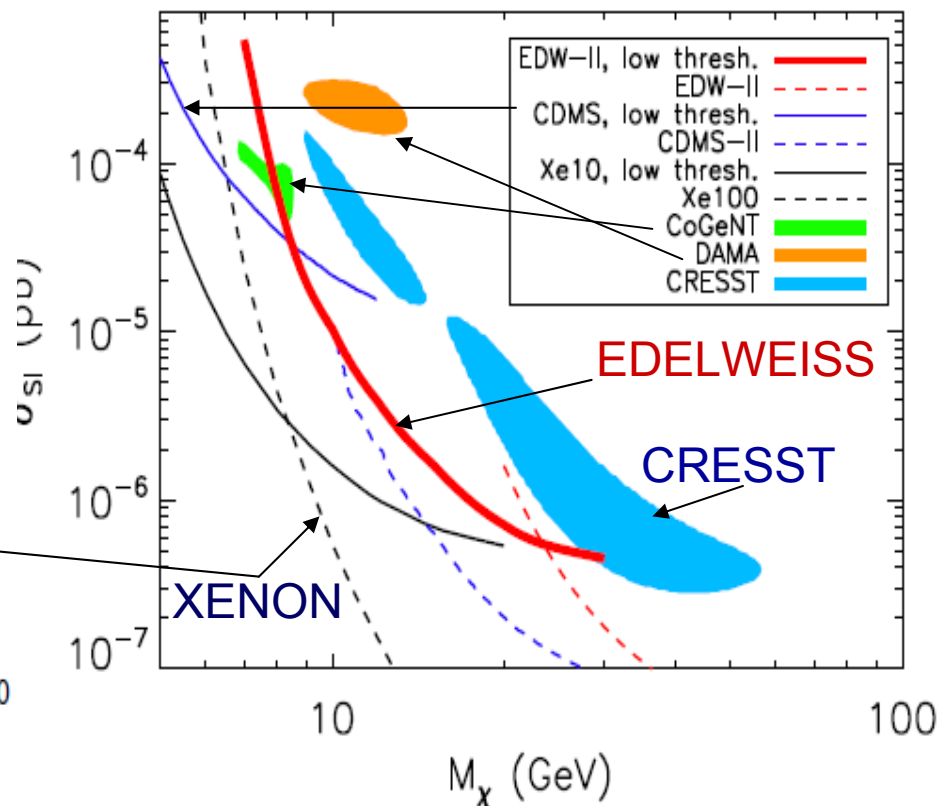
**Ge** детекторы при 18 мК  
5 событий за 427 кг сут. 3 соб.  
ожидаются как фоновые. Новые 10  
x 800 г кристаллы с лучшим фоном.

# Болометры: CRESST, EDELWEISS

Диапазон  $m_W$  – (5 -1000) ГэВ



Малые массы ( 5 – 50) ГэВ



	M1	M2
$e/\gamma$ -events	$8.00 \pm 0.05$	$8.00 \pm 0.05$
$\alpha$ -events	$11.5^{+2.6}_{-2.3}$	$11.2^{+2.5}_{-2.3}$
neutron events	$7.5^{+6.3}_{-5.5}$	$9.7^{+6.1}_{-5.1}$
Pb recoils	$15.0^{+5.2}_{-5.1}$	$18.7^{+4.9}_{-4.7}$
signal events	$29.4^{+8.6}_{-7.7}$	$24.2^{+8.1}_{-7.2}$
$m_\chi$ [GeV]	25.3	11.6
$\sigma_{WN}$ [pb]	$1.6 \cdot 10^{-6}$	$3.7 \cdot 10^{-5}$

Эксперимент CRESST используя форму фона нашел два решения **11** и **25 ГэВ** с уровнем значимости  $\sim 4.7$  и  $4.2 \sigma$ . Фон 67 соб. Наиболее строгие пределы получены в экспериментах Xенон100 и LUX, использовавших детекторы на жидких благородных газах.



# Детекторы на жидких благородных газах

высокий световыход в УФ

- Низкая концентрация U, Th, K  
возможность e/N дискриминации  
при измерении ионизационного и  
сцинтилляционного сигналов
- доступен в больших объемах,  
прозрачность и время жизни  
электронов позволяют построить  
детектор массой тонны

• пространственное  
восстановление позволяет  
выделить центральный объем.

Успех Борексина стимулировал  
развитие жидких сцинтилляторов

Письма в ЖЭТФ, том 11, стр. 513 - 516

5 июня 1970 г.

НОВЫЙ МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ СЛЕДОВ ИОНИЗУЮЩИХ ЧАСТИЦ  
В КОНДЕНСИРОВАННОМ ВЕЩЕСТВЕ <sup>1)</sup>

Б.А.Долгошин, В.Н.Лебедеико, Б.У.Родионов

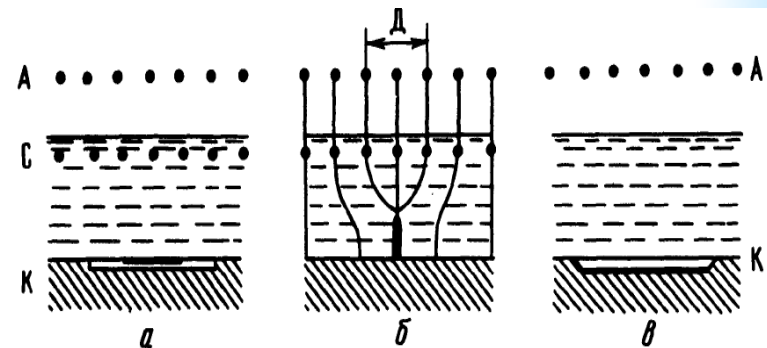
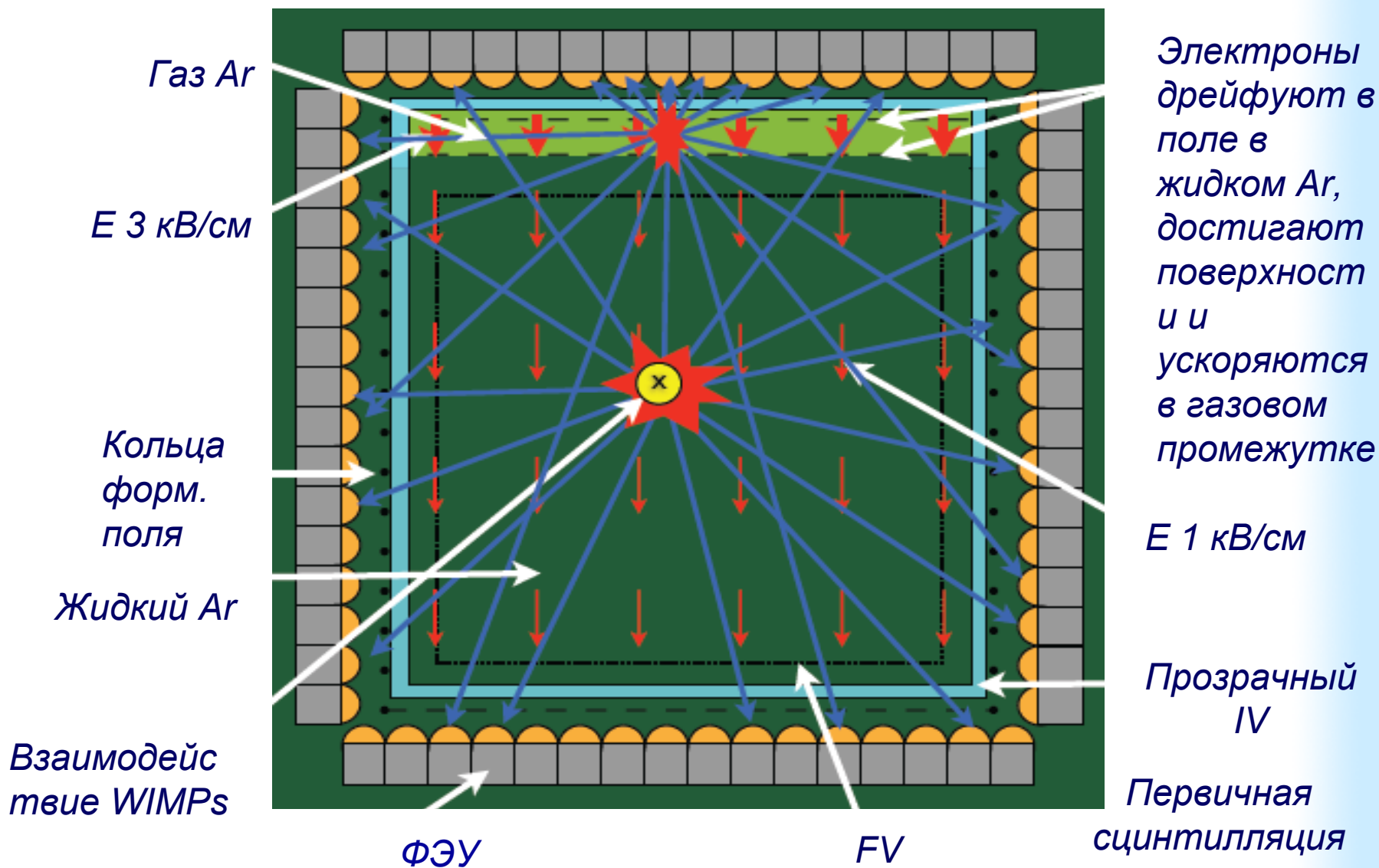


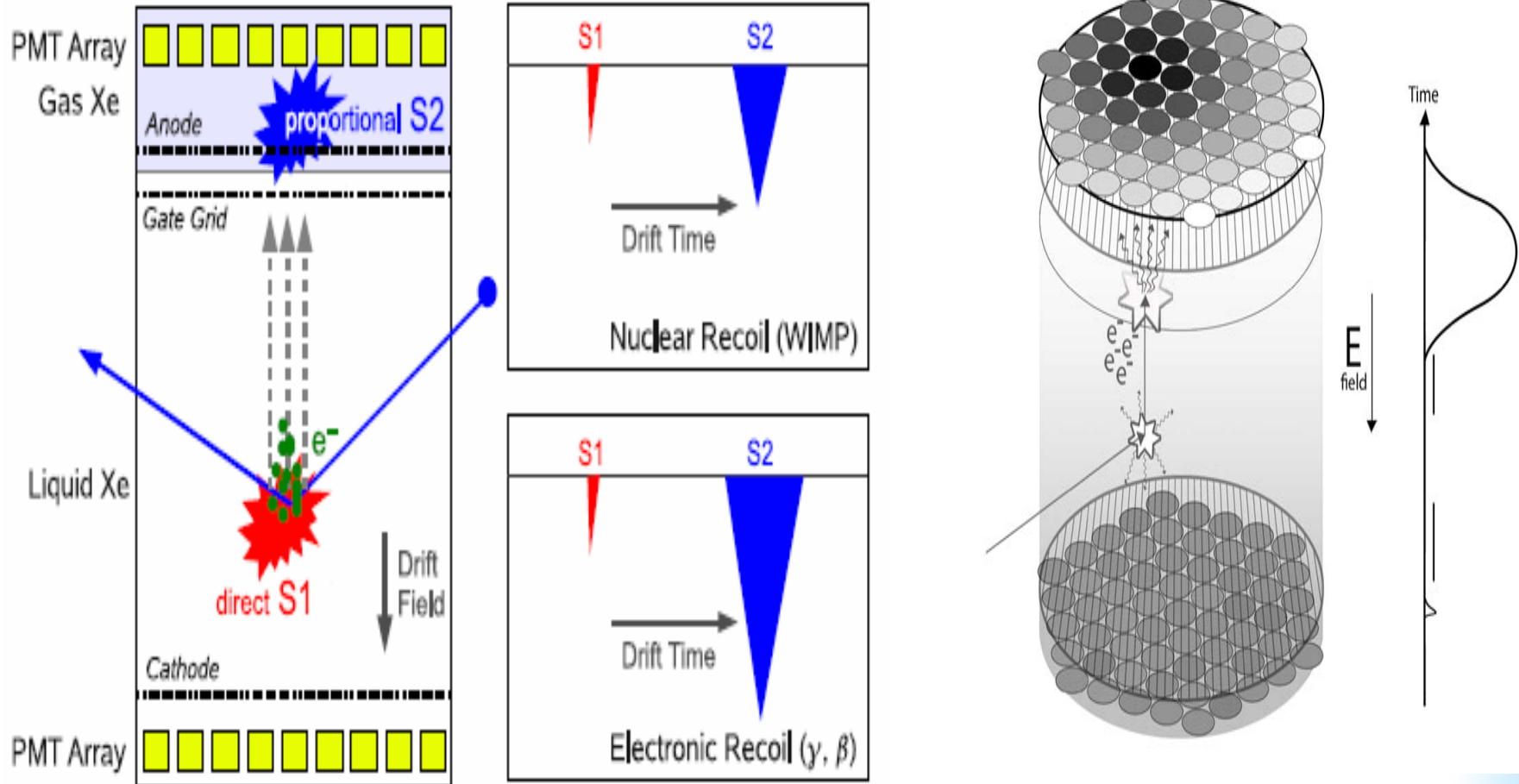
Рис. 1. Схемы опытов: а) – трехэлектродная камера с  $\alpha$ -источником: А – анод, С – сетка, К – катод. Расстояние АС – 1 см, СК – 2 см, слой жидкости над сеткой около 0,1 см; б) – то-же, но на катоде укреплен инжектор. Показаны силовые линии электрического поля, определяющие диаметр области эмиссии электронов с поверхности жидкости; в) – двухэлектродная система с  $\alpha$ -источником на катоде. АК – 1 см, слой жидкости 0,4 см

Ne(4), Ne(25), Ar(87), Kr(120), Xe(165), Rn(211): детекторы на жидких благородных газах обладают всеми достоинствами жидких сцинтилляторов. Схема регистрации в газе была предложена и реализована в 1970 г.

# Двухфазный детектор



# Двухфазный детектор - 2 phases TPC



*S1 – сцинтилляционный сигнал, S2- сигнал электронов, прорейфовавших к поверхности. Временной интервал между S1 и S2 позволяет определить координату Z. Отношение амплитуд S1 и S2 используется для дискриминации событий от электрона и ядра отдачи. S2 восстановит x,y.*

# Liquid Xe: XENON, XMASS, LUX, ZEPLIN



In passive shield  
at LNGS  
**161 kg LXe (50 kg  
fiducial)**, 2-phase,  
242 PMTs

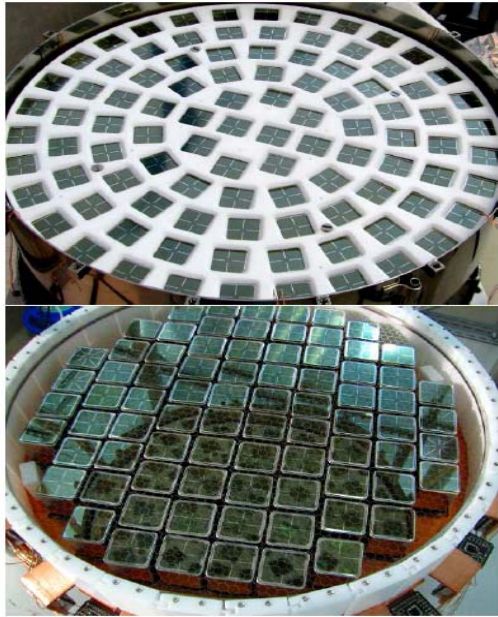
In water Cherenkov  
shield at Kamioka  
**835 kg LXe (100 kg  
fiducial)**, 1-phase,  
642 PMTs

At 1.8 km undgrnd  
Devis Lab.  
**500 kg LXe (100 kg  
fiducial)**, 2-phase,  
122 PMTs

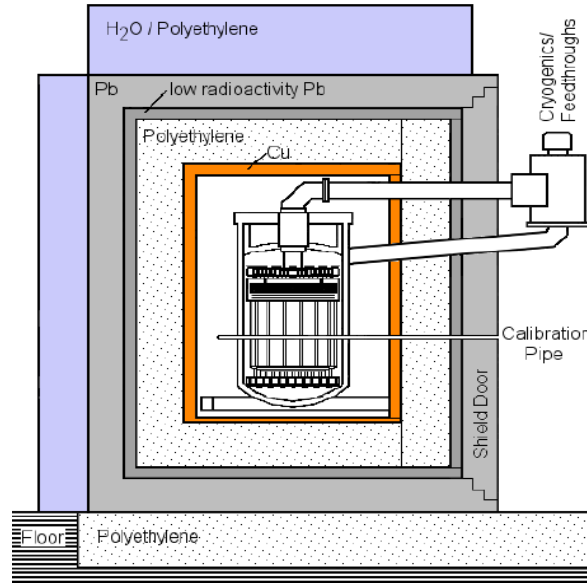
Operated at the  
Boulby mine, UK  
**12 kg (6 kg  
fiducial)** 2-phase,  
31 PMTs

# XENON-100 в Гран Сассо

arXiv:1107.2155v2



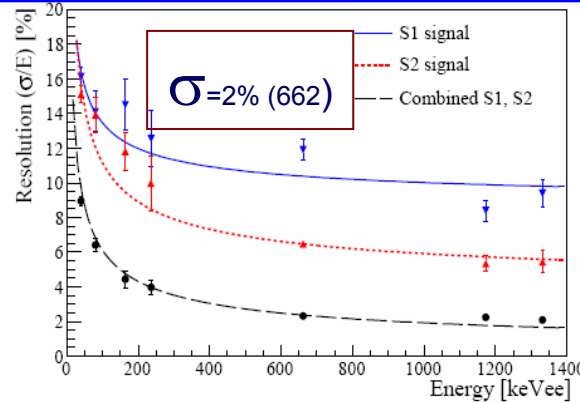
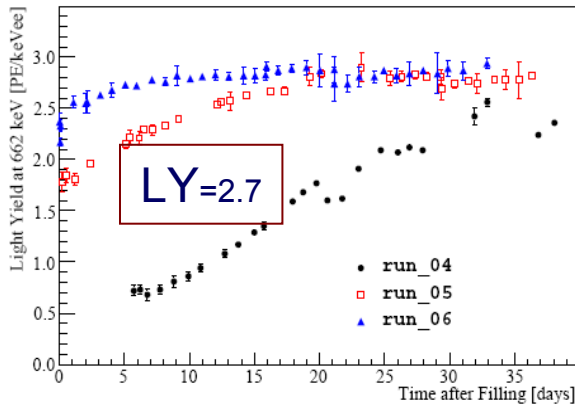
ФЭУ



ЗАЩИТА



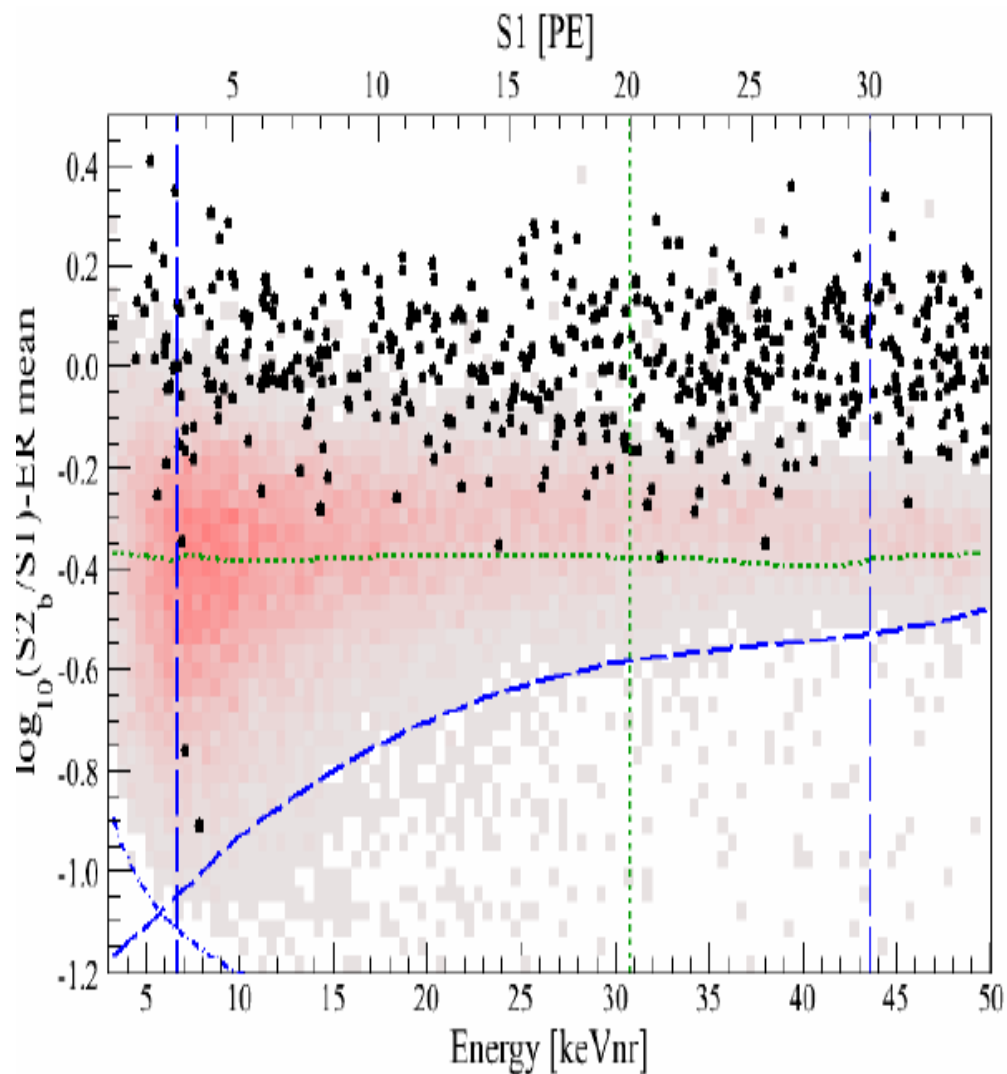
КРИОСТАТ В ЗАЩИТЕ



**178 nm, PMTs -**  
 Hamamatsu R8520-06-AI  
 PMTs, light yield LY = 2.7  
 (4.7) p.e./keVee, electron  
 lifetime  $\tau_e = 100 - 450$  mks,  
 charge yield  $L_e = 200 -$   
 400 p.e./keV

**Хенон100 -62 кВ, 99 кг как вето, ФЭУ регистрируют как первичную сцинтилляцию в LXe, так и вторичную в газе Xe. ФЭУ работают в ВУФ области.**

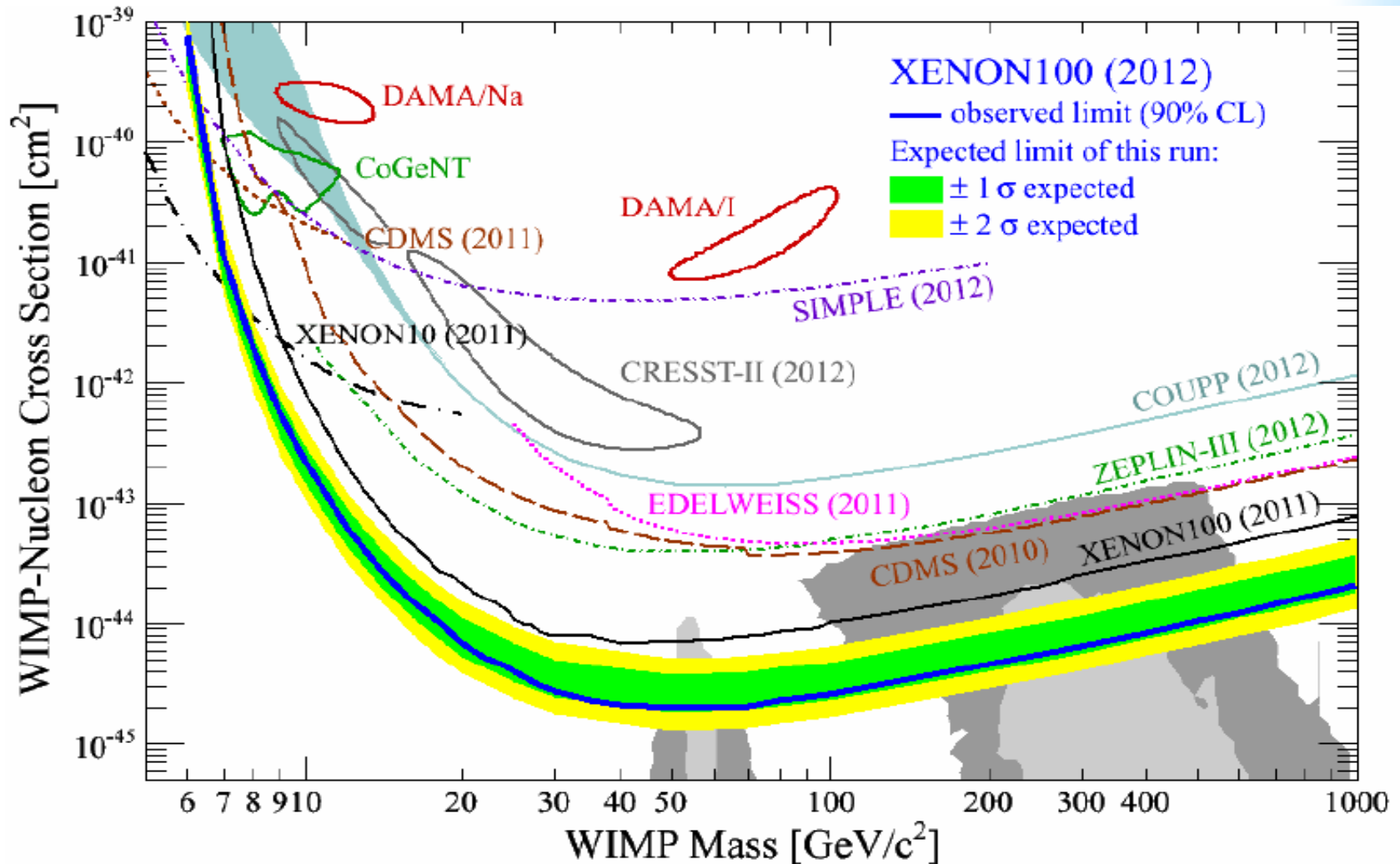
# XENON100 results



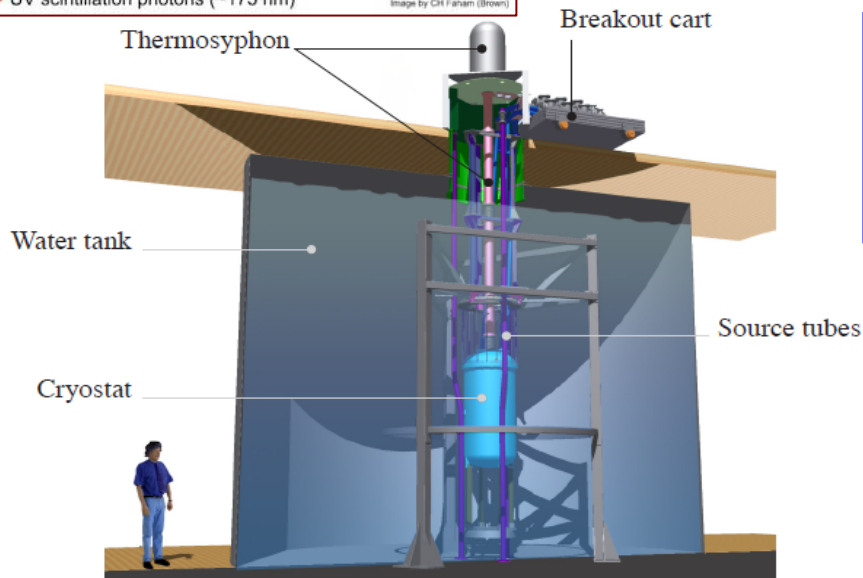
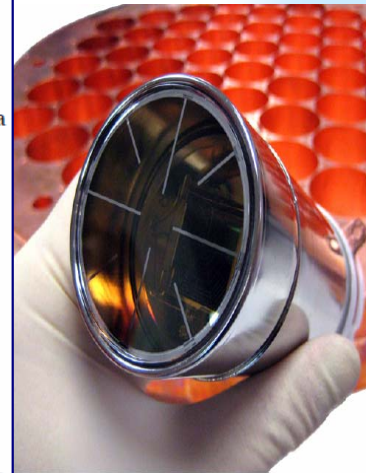
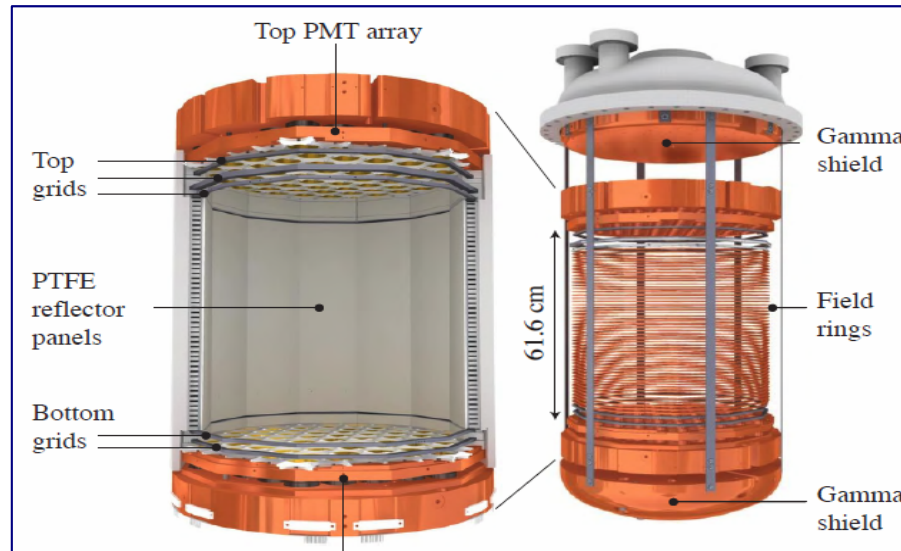
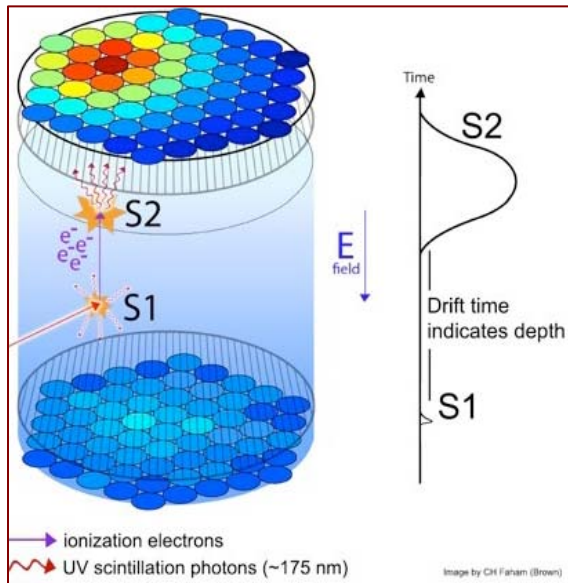
Livetime	224.6 days
Fiducial mass	34 kg
S1 Threshold	3 pe
S2 Threshold	150 pe
Expected ER Background	$0.79 \pm 0.16$
Expected NR Background	$0.17 + 0.12 - 0.07$
Expected background	$1.0 \pm 0.2$
Observed events in the benchmark region	2
90% CL cross section at 50 GeV	$2.0 \times 10^{-45} \text{cm}^2$

*Зарегистрировано 2 события за 225 x 34 сут. кг при ожидаемом фоне ( $1 \pm 0.2$ )*

# XENON100 results



Xenon100 достиг чувствительности  $\sim 3 \times 10^{-45}$  см<sup>2</sup> для  $m_W = 100$  ГэВ. SIMPLE, PICASSO-Superheated Droplet Detector (C<sub>2</sub>ClF<sub>5</sub>), COUPP -bubble chamber (CF<sub>3</sub>).

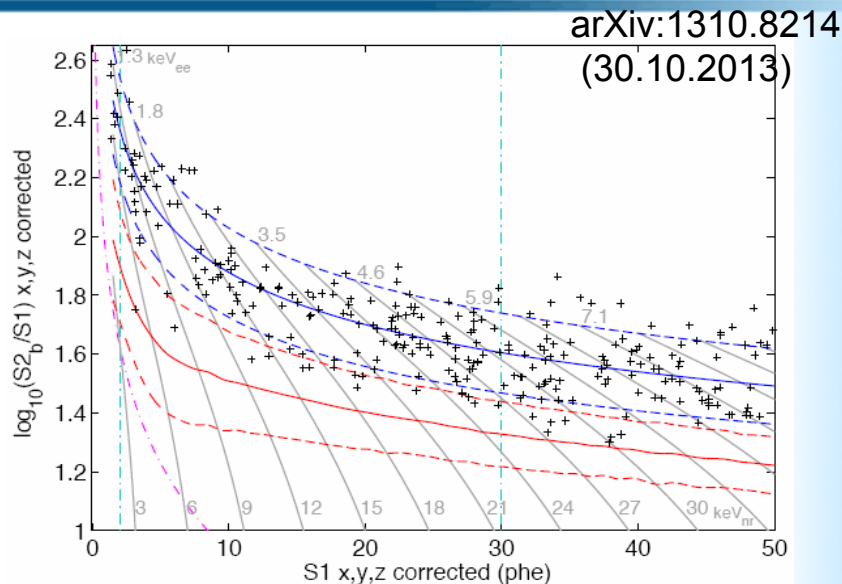
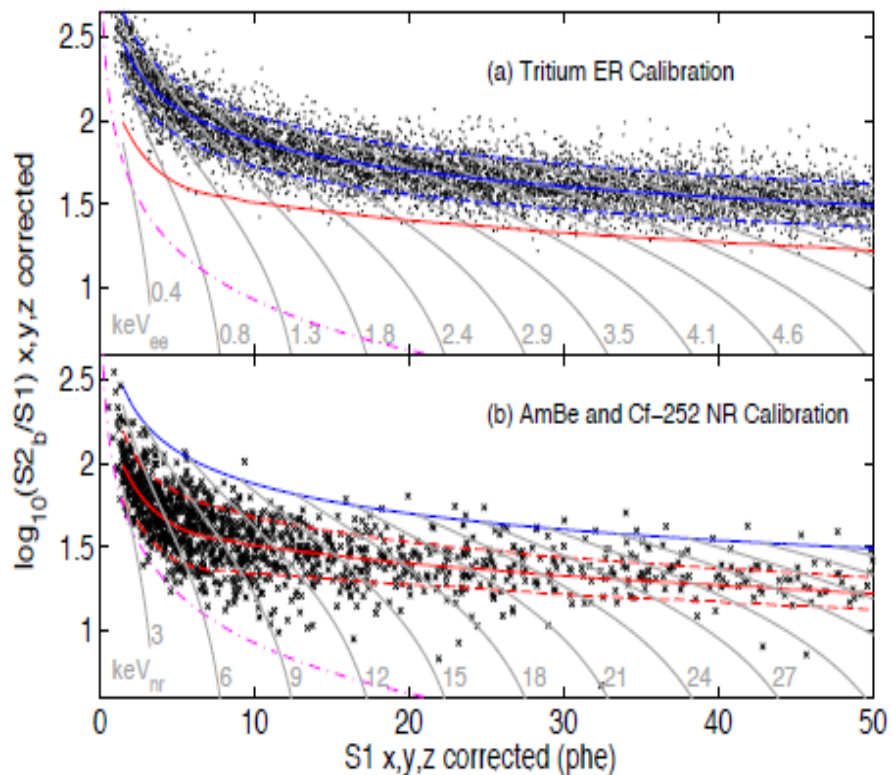


$E = 180 \text{ V/cm}$  в LXe,  $V = 1.5 \text{ mm}/\mu\text{s}$ ,  
 $E = 6 \text{ kV/cm}$  в газе Xe, длина др. 130 см  
 1 extracted e  $\Rightarrow$  25 p.e. R8778 PMTs  
 Q.E. = 33% at 178 nm

LUX содержит 370 кг LXe, 250 кг  
 составляют объем двухфазной TPC in  
 47 см диаметром и 48 см высотой.  
 Детектор расположен в лаборатории  
 DUSEL 4700 m.w.e. Представлены  
 данные для 118 кг FV @ 85 days



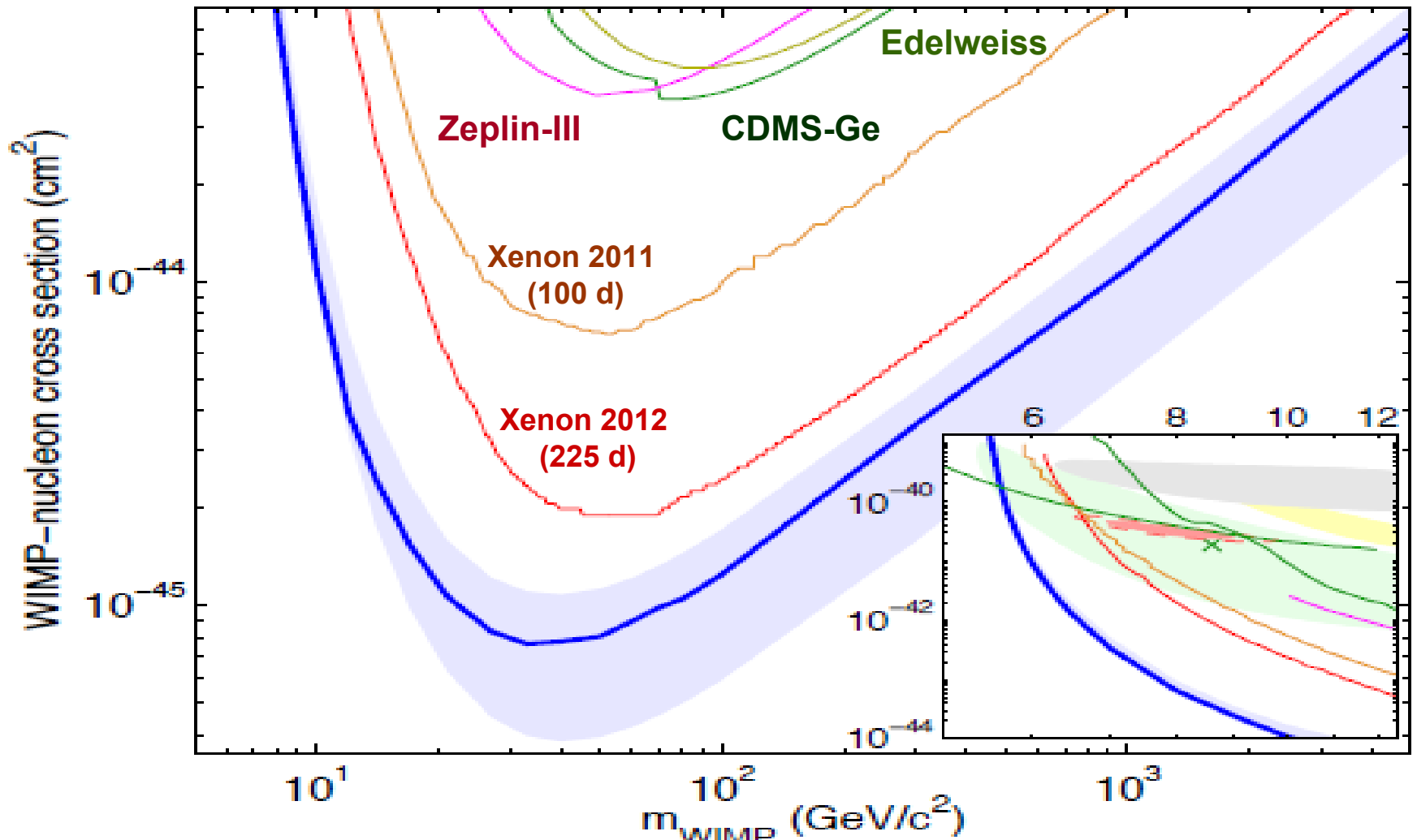
# First results from LUX (Large Underground Xenon)



S1 – мгновенная сцинтилляция в Xe, S2 – электролюминесценция в газе. S1, S2 – используются для определения выделившейся энергии и разделения сигналов от электронов и ядер отдачи. Два массива по 61 ФЭУ сверху и снизу. Для калибровки ER использовался растворенный тритированный метан и  $^{83m}\text{Kr}$  (2 ч), которые затем полностью выдувались Xe. Для калибровки NR использовались источники  $^{253}\text{Cf}$  и AmBe. 160 событий между 2 и 30 р.е. (S1)

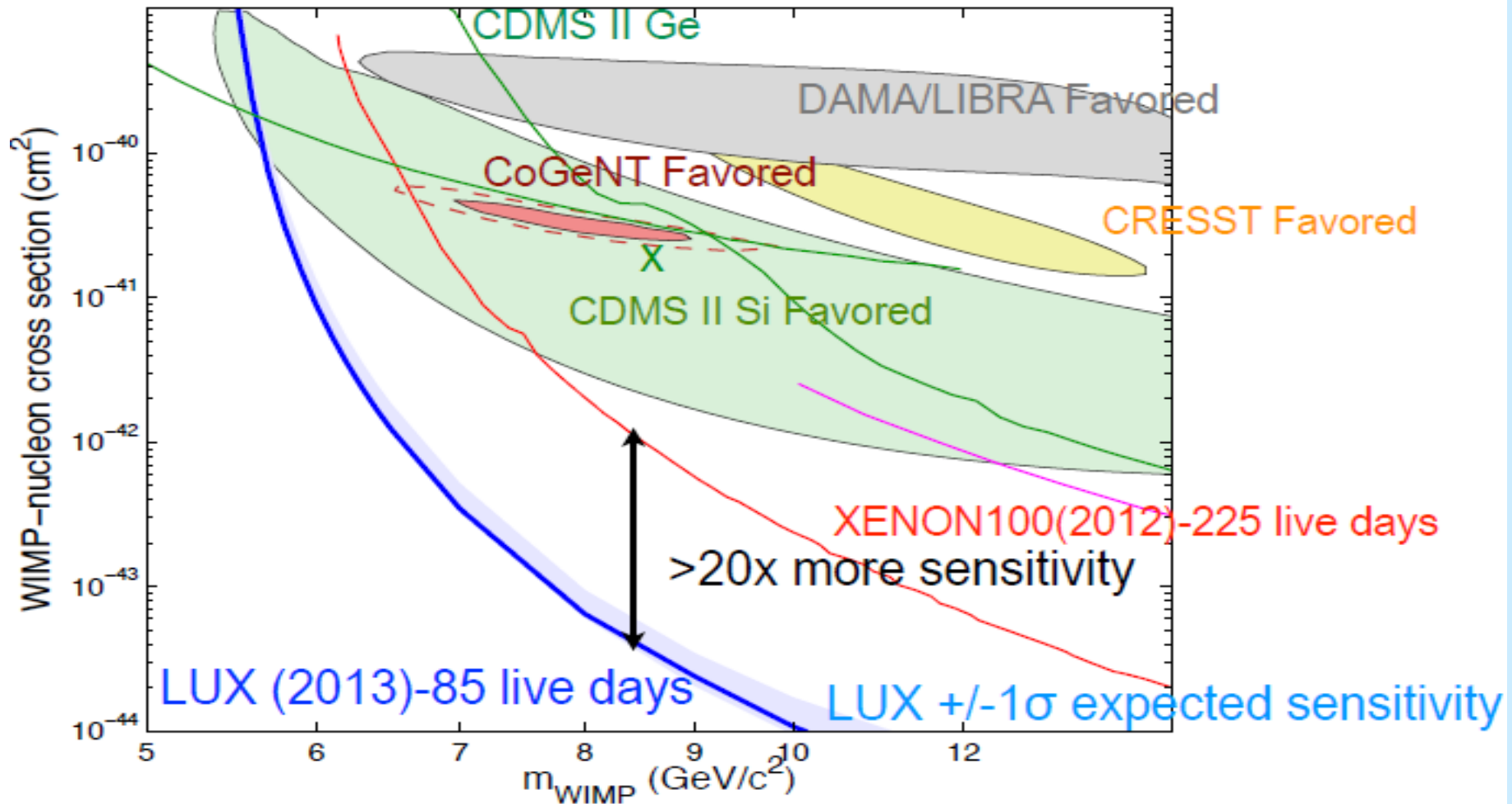
Source	Background rate, mDRU <sub>ee</sub>
$\gamma$ -rays	$1.8 \pm 0.2_{\text{stat}} \pm 0.3_{\text{sys}}$
$^{127}\text{Xe}$	$0.5 \pm 0.02_{\text{stat}} \pm 0.1_{\text{sys}}$
$^{214}\text{Pb}$	0.11–0.22 (90% C. L.)
$^{85}\text{Kr}$	$0.13 \pm 0.07_{\text{sys}}$
Total predicted	$2.6 \pm 0.2_{\text{stat}} \pm 0.4_{\text{sys}}$
Total observed	$3.1 \pm 0.2_{\text{stat}}$

# First results from LUX



LUX достиг чувствительности  $7 \times 10^{-46}$  см<sup>2</sup> (spin-independent, isospin-invariant) для  $m_W = 33$  ГэВ. LUX будет продолжать измерения в 2014 и 2015 г.г.

# WIMPs с массой 5-20 ГэВ

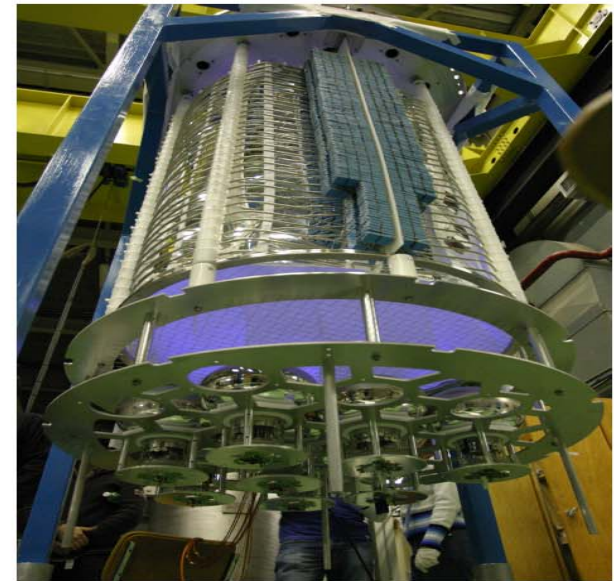
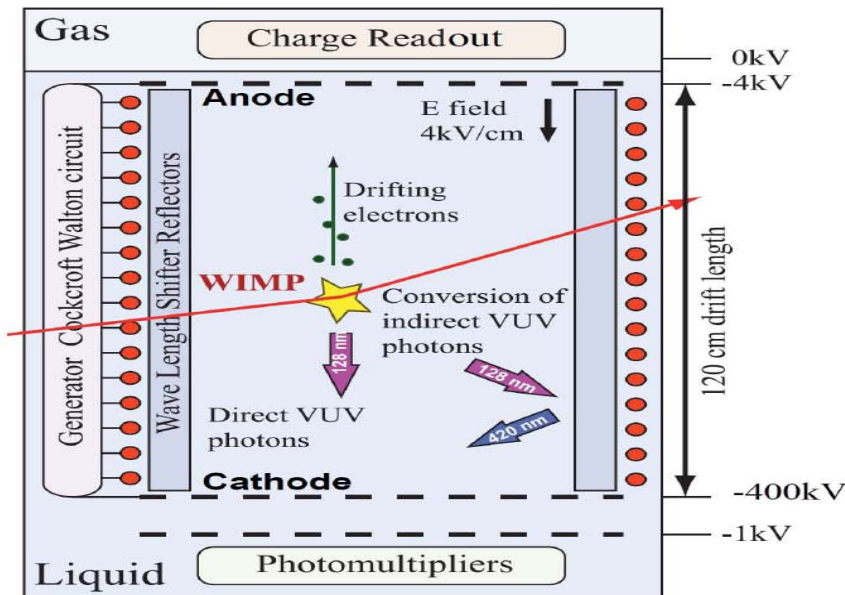


LUX и XENON (Xe -131) исключают положительные результаты DAMA (Na-23, I-127), CDMS (Si-28), CoGeNT (Ge-73) и CRESST (Ca-40, W-184, O-16)

# Liquid Ar: ArDM, DarkSide, CLEAN, DEAP

**Table 1.** Main properties of LAr: temperature at 1 atm and corresponding density, attenuation length for 50 keV  $\gamma$ , electron mobility at the boiling point, average energies needed for the production of an electron-ion pair [3] or of one scintillation photon [4] (measured for 1 MeV electrons), LAr scintillation wavelength, fast and slow scintillation lifetimes.

T at 1 atm (K)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\lambda_{att}$ 50 keV $\gamma$ (g/cm <sup>2</sup> )	$\mu_{electron}$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	$W_{ion}$ (eV)	$W_{\gamma}$ (eV)	$\lambda_{scint}$ (nm)	$\tau_{fast}$ (ns)	$\tau_{slow}$ ( $\mu_s$ )
87.2	1.396	1.4	500	23.6	25	128	7	1.6



# Liquid Ar: ArDM, DarkSide, CLEAN, DEAP



ArDM at  
Canfranc  
**850 kg** LAr TPC  
to be installed  
underground in  
2013

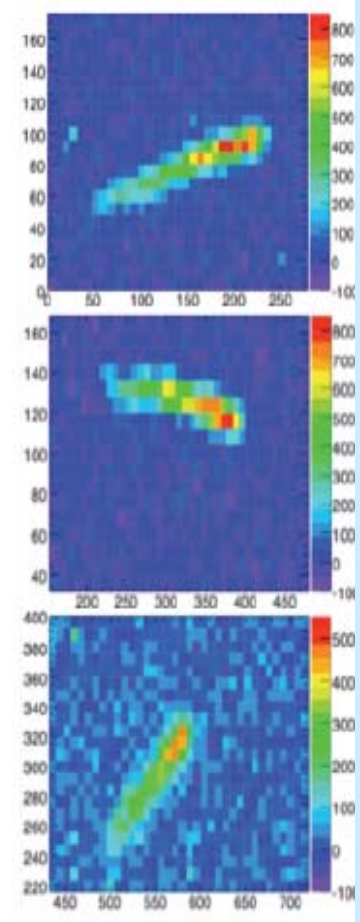
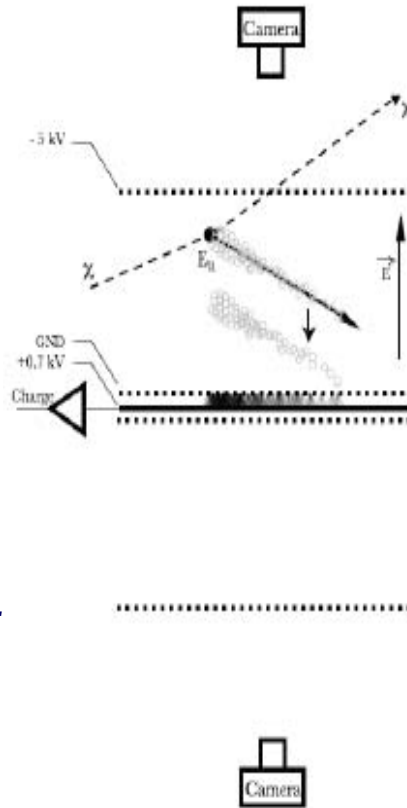
DarkSide at  
LNGS  
**150 kg** LArTPC in  
CTF at LNGS  
2-phase  
to run 2013

MiniCLEAN at  
SNOLab  
**500 kg** LAr (**150  
kg FV**) 1-phase  
under const.to  
run 2014

DEAP-3600 at  
SNOLab  
**3600 kg** LAr  
(**1000 kg FV**)  
1-phase under  
constr. 2014 -19

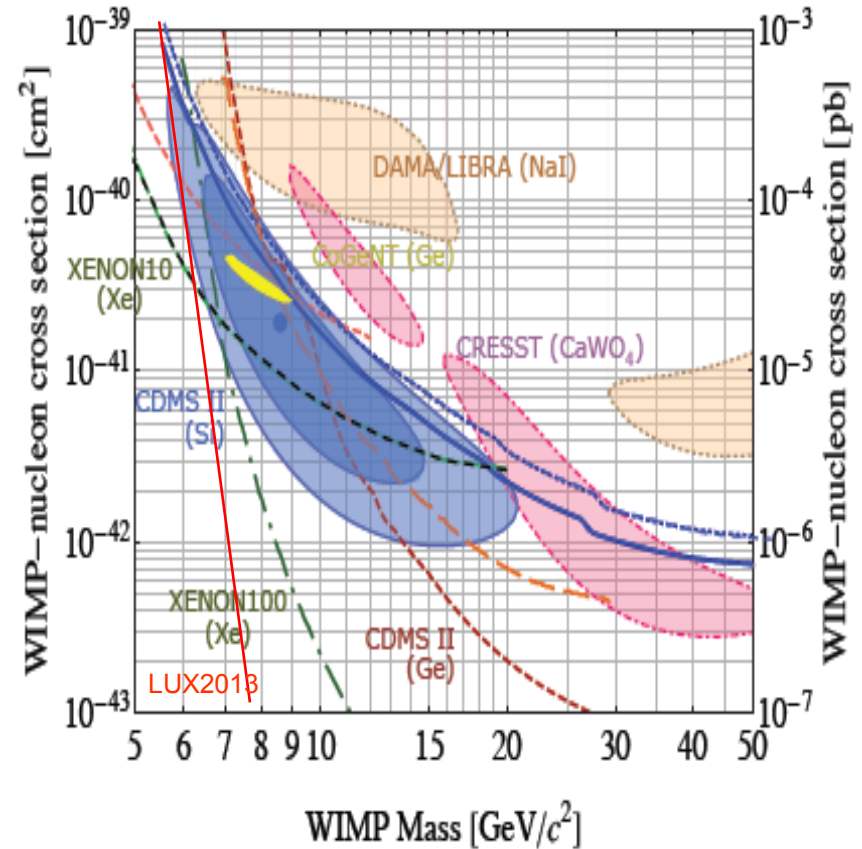
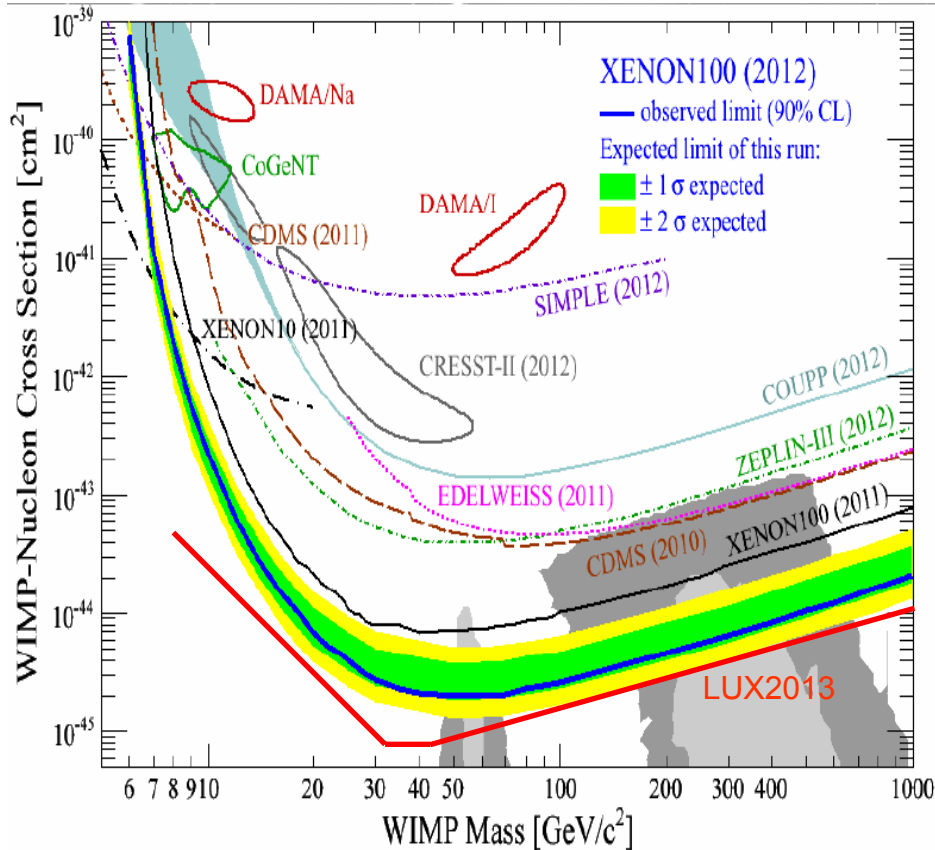
# Определение направления ядра отдачи

- **DMTPC** (CF<sub>4</sub> gas TPC, at MIT) first results from 10 | TPC 1 m<sup>3</sup> planned for WIPP
- **DRIFT** (negative ion, CS<sub>2</sub> TPC, at Boulby) results from 1.5 kg-days 24 m<sup>3</sup> planned (4 kg target)
- **NEWAGE** (CF<sub>4</sub> gas micro-TPC, 11.5 g) micro-dot charge readout chamber at Kamioka, first SD results



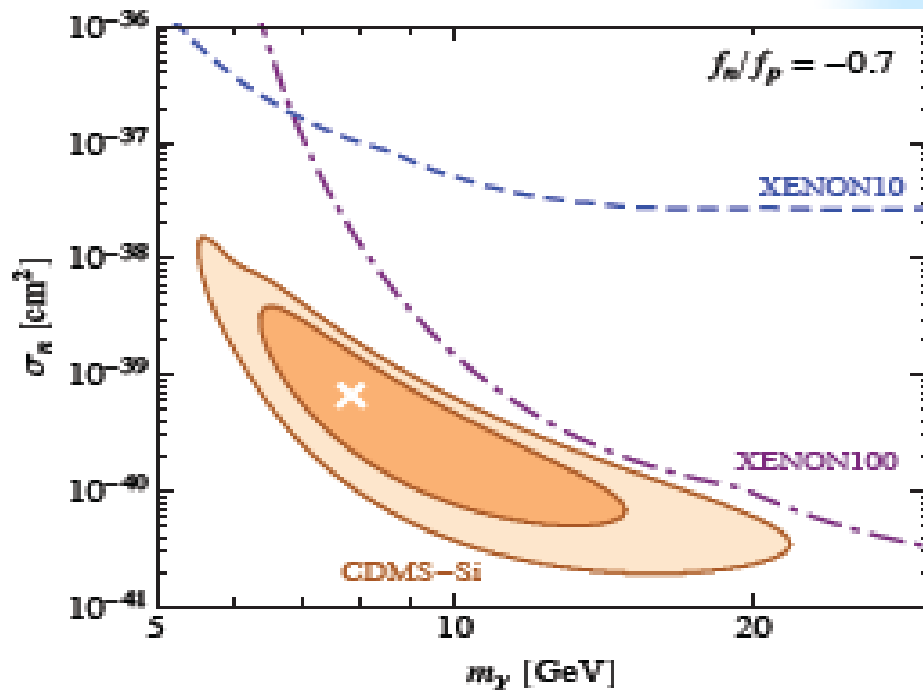
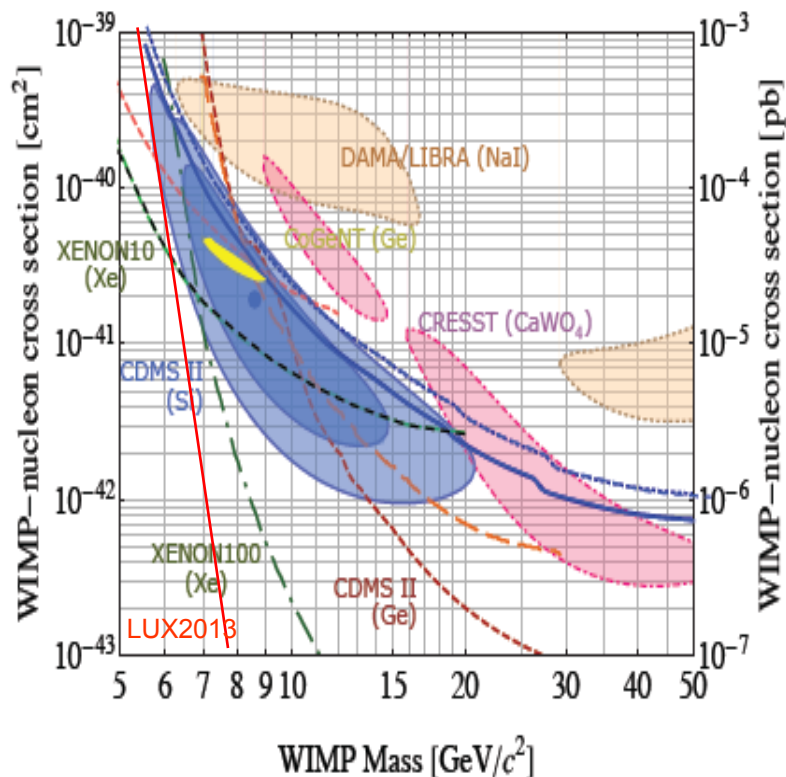
Корреляция направления ядер отдачи с направлением движения  $CS$  сквозь гало явилось бы надежным подтверждением сигнала ТМ. Газонаполненные ТРС и анизотропные сцинтилляторы будут использоваться для поиска ТМ.

# *DAMA, CoGeNT, CRESST, CDMS-Si vs LUX, CDMS-Ge, XENON, EDELWEISS, COUPP, SIMPLE*



1. **DAMA/LIBRA (NaI)** Годовые модуляции сигнала на 427,000 кг сут. Нет отбора сигналов от ядер отдачи.
2. **CoGeNT (Ge)** Неснижаемый фон, совместимый с 7-10 ГэВ WIMPs, + годовая модуляция. Нет отбора сигналов от ядер отдачи. Новая установка готовится.
3. **CRESST II (CaWO<sub>4</sub>)** (730 kg day). Превышение над высоким фоном. Новая у.
4. **CDMS (Si)** - 140.2 кг суток 3 события (случайность – 5%)

# Как объяснить наличие/отсутствие сигнала



$$R = \sigma_p \sum_i \eta_i \frac{\mu A_i}{\mu_p^2} I_{A_i} [Z + (A_i - Z) f_n/f_p]^2$$

Анализ при предположениях:

1. “Стандартный” WIMP с SI взаим.
2. Упругое рассеяние
3. Константы связи с p и n равны
4. “Стандартная модель Гало DM”

1. anapole, magnetic dipole, momentum- and velocity dependent
2. Неупругое рассеяние  $\chi \rightarrow \chi^*$
3. Isospin-violating DM  $f_n/f_p = -Z/(A-Z)$
4.  $V_0$ ,  $V_{esc}$ , Максвелл-Больцман

**Нет приемлемого объяснения существующих противоречий.  
Нужны новые эксперименты**



# Depleted Argon Cryogenic Scintillation and Ionization Detection

## Darkside Collaboration

Augustana College – SD, USA

Black Hill State University – SD, USA

Fermilab – IL, USA

INFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso – Assergi, Italy

INFN and Università degli Studi Genova, Italy

INFN and Università degli Studi Milano, Italy

INFN and Università degli Studi Naples, Italy

INFN and Università degli Studi Perugia, Italy

Institute for High Energy Physics – Beijing, China

Joint Institute for Nuclear Research – Dubna, Russia

Lomonosov Moscow State University, Russia

Princeton University, USA

RRC Kurchatov Institute – Moscow, Russia

**St. Petersburg Nuclear Physics Institute – Gatchina, Russia**

Temple University – PA, USA

University of Arkansas, USA

University of California, Los Angeles, USA

University of Houston, USA

University of Massachusetts at Amherst, USA

University of Hawaii, USA

Virginia Tech, USA

## Depleted Argon Cryogenic Scintillation and Ionization Detection

1. *DarkSide 10*

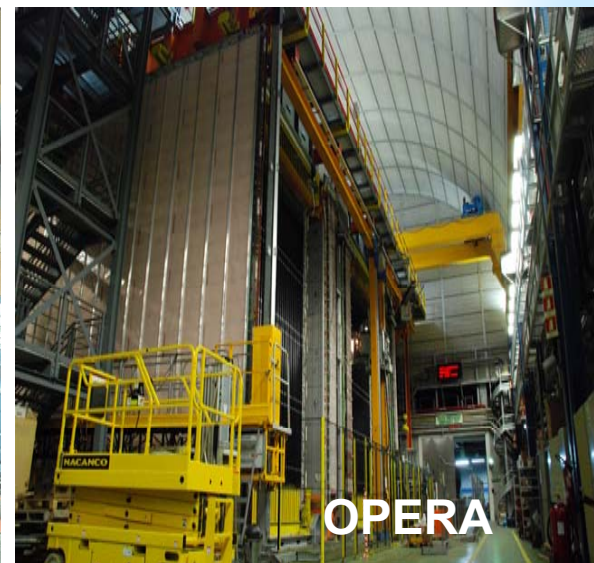
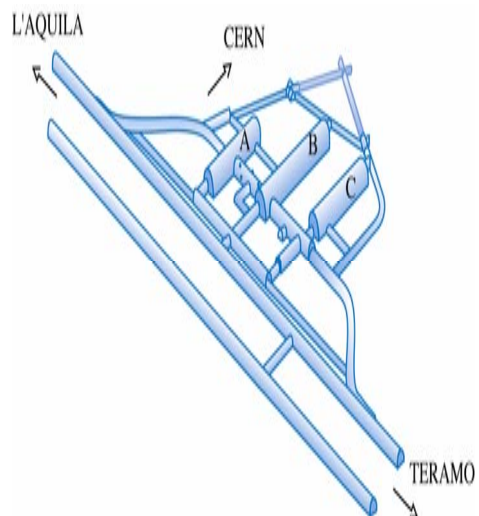
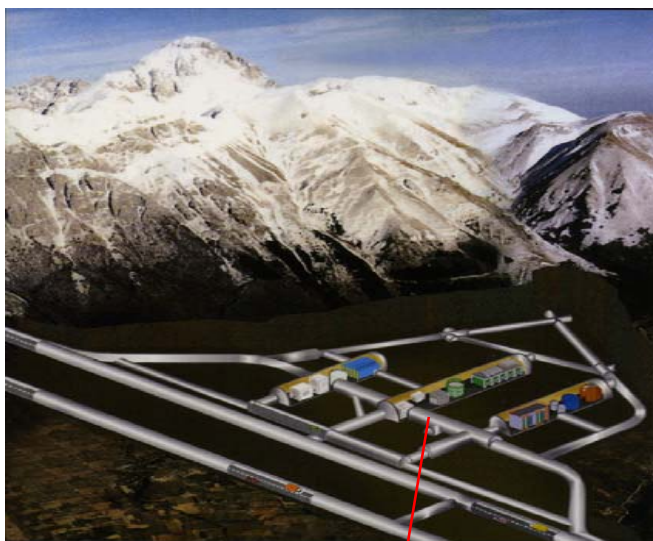
2. *DarSide 50*

3. *DarkSide G2*

*Двухфазный детектор (TPC), заполненный жидким аргоном с малым содержанием изотопа  $^{39}\text{Ar}$ , для регистрации ядер отдачи.*



# Подземная лаборатория Гран-Сассо



# DarkSide collaboration

D. Akimov<sup>k</sup>, T. Alexander<sup>d</sup>, D. Alton<sup>a</sup>, K. Arisaka<sup>v</sup>, H.O. Back<sup>m</sup>, P. Beltrame<sup>v</sup>, J. Benziger<sup>l</sup>, A. Bolozdynya<sup>k</sup>, G. Bonfini<sup>i</sup>, A. Brigatti<sup>r</sup>, J. Brodsky<sup>m</sup>, L. Cadonati<sup>s</sup>, F. Calaprice<sup>m</sup>, A. Candela<sup>l</sup>, H. Cao<sup>m</sup>, P. Cavalcante<sup>l</sup>, A. Chavarria<sup>m</sup>, A. Chepurinov<sup>j</sup>, S. Chidzik<sup>m</sup>, D. Cline<sup>v</sup>, A.G. Cocco<sup>s</sup>, C. Condon<sup>m</sup>, D. D'Angelo<sup>r</sup>, S. Davini<sup>w</sup>, E. De Haas<sup>m</sup>, **A. Derbin<sup>b</sup>**, G. Di Pietro<sup>r</sup>, **I. Dratchnev<sup>h</sup>**, D. Durben<sup>b</sup>, A. Empl<sup>w</sup>, A. Etenko<sup>k</sup>, A. Fan<sup>v</sup>, G. Fiorillo<sup>s</sup>, K. Fomenko<sup>i</sup>, F. Gabriele<sup>m</sup>, C. Galbiati<sup>m</sup>, S. Gazzana<sup>l</sup>, C. Ghag<sup>p</sup>, C. Ghiano<sup>i</sup>, A. Goretti<sup>m</sup>, L. Grandi<sup>m\*</sup>, M. Gromov<sup>l</sup>, M. Guar<sup>f</sup>, C. Guof<sup>e</sup>, G. Guray<sup>m</sup>, E. V. Hungerford<sup>w</sup>, Al. Ianni<sup>r</sup>, An. Ianni<sup>m</sup>, **A. Kayunov<sup>n</sup>**, K. Keeter<sup>b</sup>, C. Kendziora<sup>d</sup>, S. Kidner<sup>r</sup>, V. Kobychew<sup>f</sup>, G. Koh<sup>m</sup>, D. Korablev<sup>h</sup>, G. Korga<sup>w</sup>, E. Shields<sup>m</sup>, P. Lf<sup>r</sup>, B. Loer<sup>d</sup>, P. Lombardi<sup>r</sup>, C. Love<sup>o</sup>, L. Ludhova<sup>r</sup>, L. Lukyanchenko<sup>l</sup>, A. Lund<sup>x</sup>, K. Lung<sup>v</sup>, Y. Ma<sup>f</sup>, I. Machulin<sup>k</sup>, J. Maricic<sup>c</sup>, C.J. Martoff<sup>o</sup>, Y. Meng<sup>v</sup>, E. Meroni<sup>f</sup>, P.D. Meyers<sup>m</sup>, T. Mohayai<sup>d</sup>, D. Montanari<sup>d</sup>, M. Montuschi<sup>i</sup>, P. Mosteiro<sup>m</sup>, B. Mount<sup>b</sup>, **V. Muratova<sup>n</sup>**, A. Nelson<sup>m</sup>, A. Nemtsov<sup>s</sup>, N. Nurakhov<sup>k</sup>, M. Orsini<sup>i</sup>, F. Ortica<sup>l</sup>, M. Pallavicini<sup>q</sup>, E. Pantic<sup>v</sup>, S. Parmeggiano<sup>r</sup>, R. Parsells<sup>m</sup>, N. Pelliccia<sup>l</sup>, L. Perasso<sup>d</sup>, F. Perfetto<sup>s</sup>, L. Pinsky<sup>w</sup>, A. Pocar<sup>s</sup>, S. Pordes<sup>d</sup>, G. Ranucci<sup>r</sup>, A. Razeto<sup>i</sup>, A. Romani<sup>k</sup>, N. Rossi<sup>h,m</sup>, P. Saggese<sup>i</sup>, R. Saldanha<sup>l</sup>, C. Salvo<sup>q</sup>, W. Sands<sup>m</sup>, M. Seigar<sup>r</sup>, **D. Semenov<sup>n</sup>**, M. Skorokhvatov<sup>k</sup>, O. Smimov<sup>h</sup>, A. Sotnikov<sup>h</sup>, S. Sukhotin<sup>k</sup>, Y. Suvorov<sup>v</sup>, R. Tartaglia<sup>i</sup>, J. Tatarowicz<sup>o</sup>, G. Testera<sup>d</sup>, A. Teymourian<sup>v</sup>, J. Thompson<sup>b</sup>, **E. Unzhakov<sup>n</sup>**, R.B. Vogelaa<sup>r</sup>, H. Wang<sup>v</sup>, S. Westerdale<sup>m</sup>, M. Wojcik<sup>a</sup>, A. Wright<sup>m</sup>, J. Xu<sup>m</sup>, C. Yang<sup>e</sup>, S. Zavatarelli<sup>d</sup>, M. Zehfus<sup>b</sup>, W. Zhong<sup>e</sup>, G. Zuzel<sup>g</sup>

(DarkSide Collaboration)

- <sup>a</sup>Physics and Astronomy Department, Augustana College, Sioux Falls, SD 57197, USA
- <sup>b</sup>School of Natural Sciences, Black Hills State University, Spearfish, SD 57799, USA
- <sup>c</sup>Department of Physics, Drexel University, Philadelphia, PA 19104, USA
- <sup>d</sup>Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, IL 60510, USA
- <sup>e</sup>Institute of High Energy Physics, Beijing 100049, China
- <sup>f</sup>Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev 03680, Ukraine
- <sup>g</sup>Smoluchowski Institute of Physics, Jagellonian University, Krakow 30059, Poland
- <sup>h</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 141980, Russia
- <sup>i</sup>Laboratori Nazionali del Gran Sasso, SS 17 bis Km 18+910, Assergi (AQ) 67010, Italy
- <sup>j</sup>Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
- <sup>k</sup>National Research Centre Kurchatov Institute, Moscow 123182, Russia
- <sup>l</sup>Chemical Engineering Department, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA
- <sup>m</sup>Physics Department, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA
- <sup>n</sup>St. Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina 188350, Russia
- <sup>o</sup>Physics Department, Temple University, Philadelphia, PA 19122, USA
- <sup>p</sup>Department of Physics and Astronomy, University College London, London WC1E 6BT, United Kingdom
- <sup>q</sup>Physics Department, Università degli Studi and INFN, Genova 16146, Italy
- <sup>r</sup>Physics Department, Università degli Studi and INFN, Milano 20133, Italy
- <sup>s</sup>Physics Department, Università degli Studi Federico II and INFN, Napoli 80126, Italy
- <sup>t</sup>Chemistry Department, Università degli Studi and INFN, Perugia 06123, Italy
- <sup>u</sup>Department of Physics and Astronomy, University of Arkansas, Little Rock, AR 72204, USA
- <sup>v</sup>Physics and Astronomy Department, University of California, Los Angeles, CA 90095, USA
- <sup>w</sup>Department of Physics, University of Houston, Houston, TX 77204, USA
- <sup>x</sup>Physics Department, University of Massachusetts, Amherst, MA 01003, USA
- <sup>y</sup>Physics Department, Virginia Tech, Blacksburg, VA 24061, USA

25 ИНСТИТУТОВ

ПИЯФ



# Преимущества LAr и эксперимента DarkSide

1. Жидкий Ar имеет один из наиболее высоких световых выходов (40 ф.э./кэВ). Форма импульса обеспечивает разделение сигналов от ядра и электрона. Медленная и быстрая компонента высвечивания в жидком аргоне отличается в 200 раз ( $1.6 \mu\text{s}$  vs  $8 \text{ ns}$ ).

Фактор разделения  $> 10^8$  для сигналов с  $> 60$  р.е. ((WARP, 2006)

2. Дрейф электронов может быть выполнен на большие расстояния. Соотношение ионизационного и сцинтилляционного сигналов обеспечивает разделение  $10^2$ . (ICARUS) 1993; (WARP) 2006)

3. Пространственное разрешение для ионизационного сигнала позволяет отбрасывать многократное рассеяние и стеночный эффект.

4. Некоторые достоинства LAr-TPC уже продемонстрированы WARP.

1. Используется аргон, обедненный изотопом  $^{39}\text{Ar}$

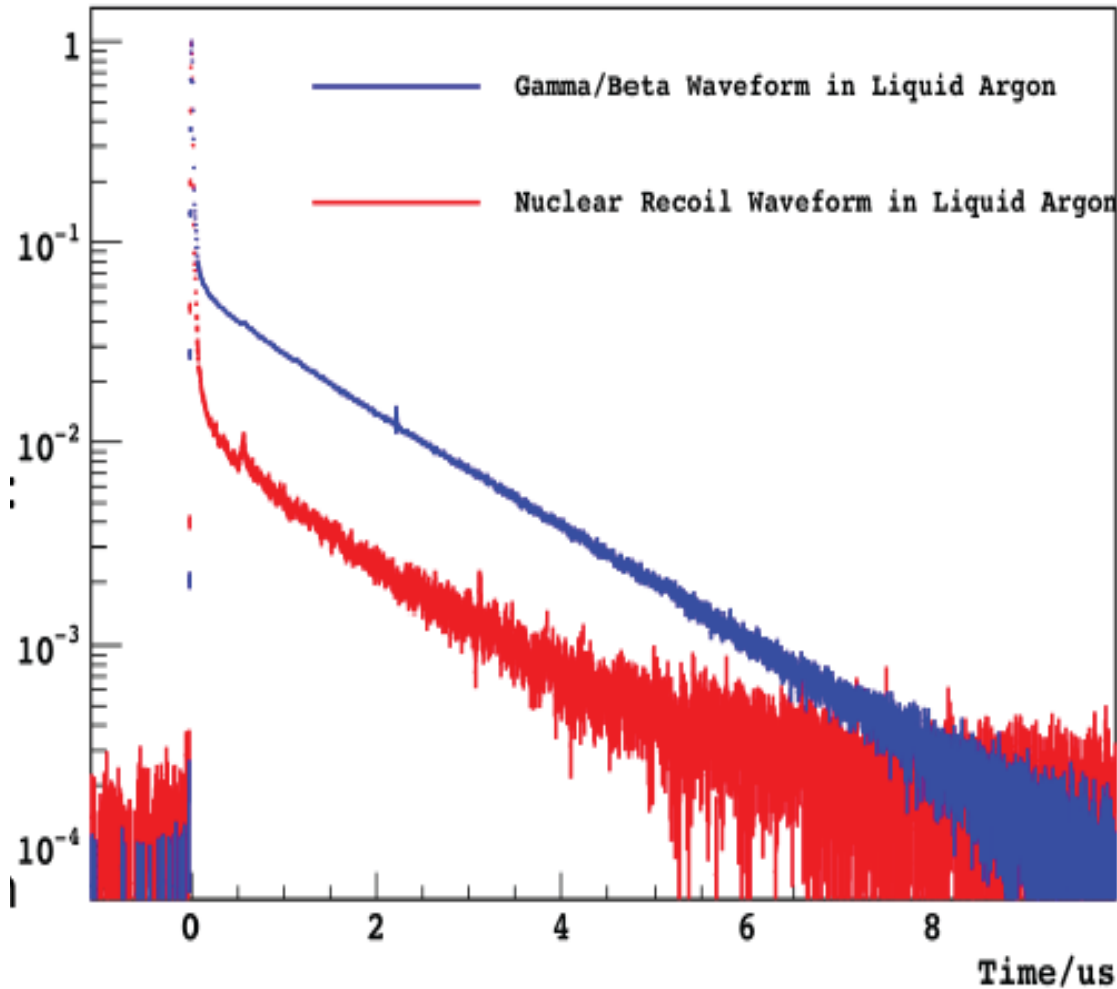
2. Новые ФЭУ (Qipid) с высокой квантовой эффективностью и низким уровнем фона

3. Эффективное внешнее вето от нейтронов (PC + 10B)

4. Ядро  $^{40}\text{Ar}$  получает большую энергию при столкновении с WIMPs с малой массой ( $\sim 10$  ГэВ)

5. Возможность проведения безфонного эксперимента

# Дискриминация $e/N$ по форме сц. импульса

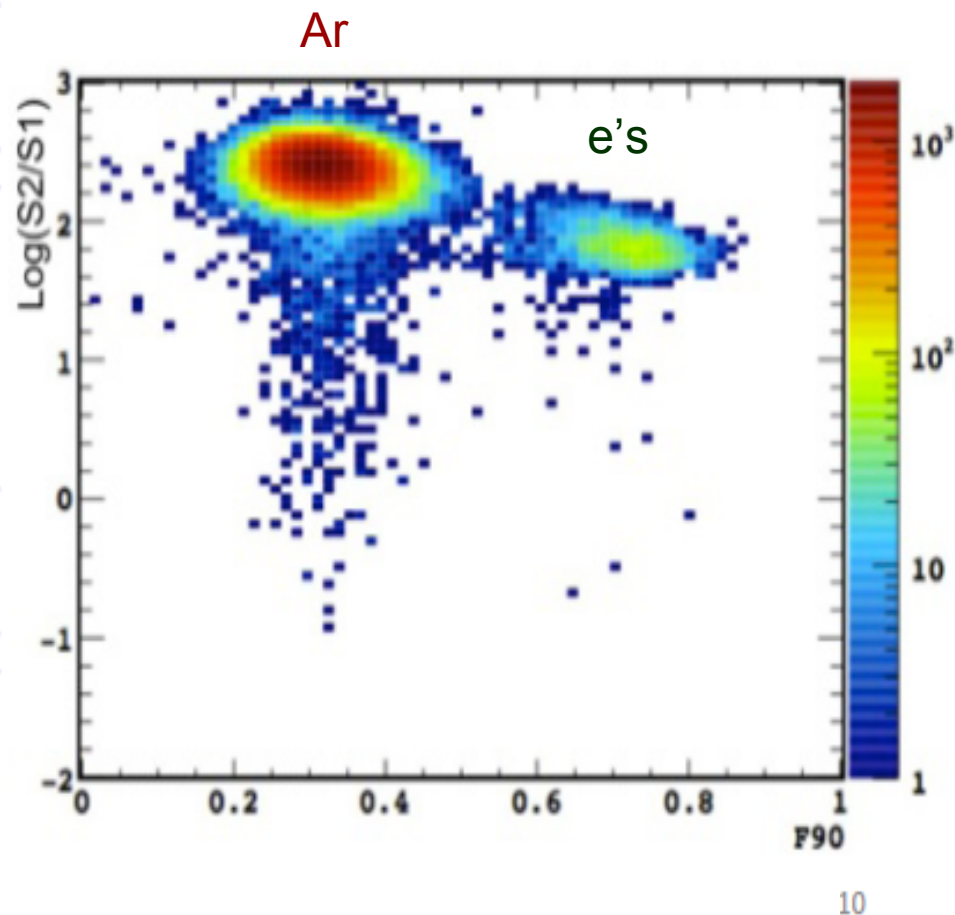
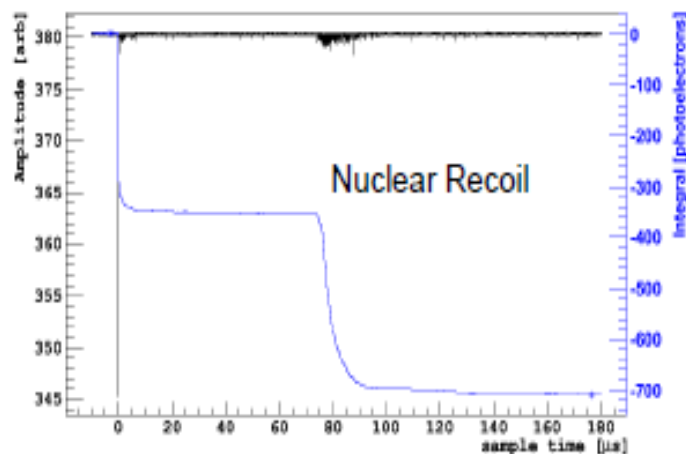
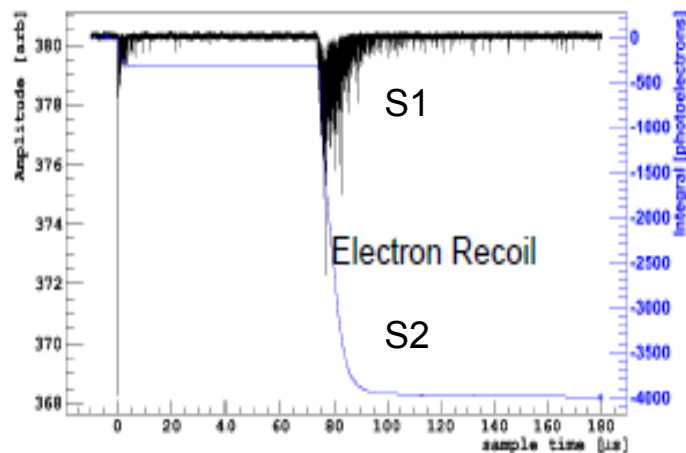


Быстрая компонента  
(6-7) нс

Медленная компонента  
(1.5-1.6) мкс

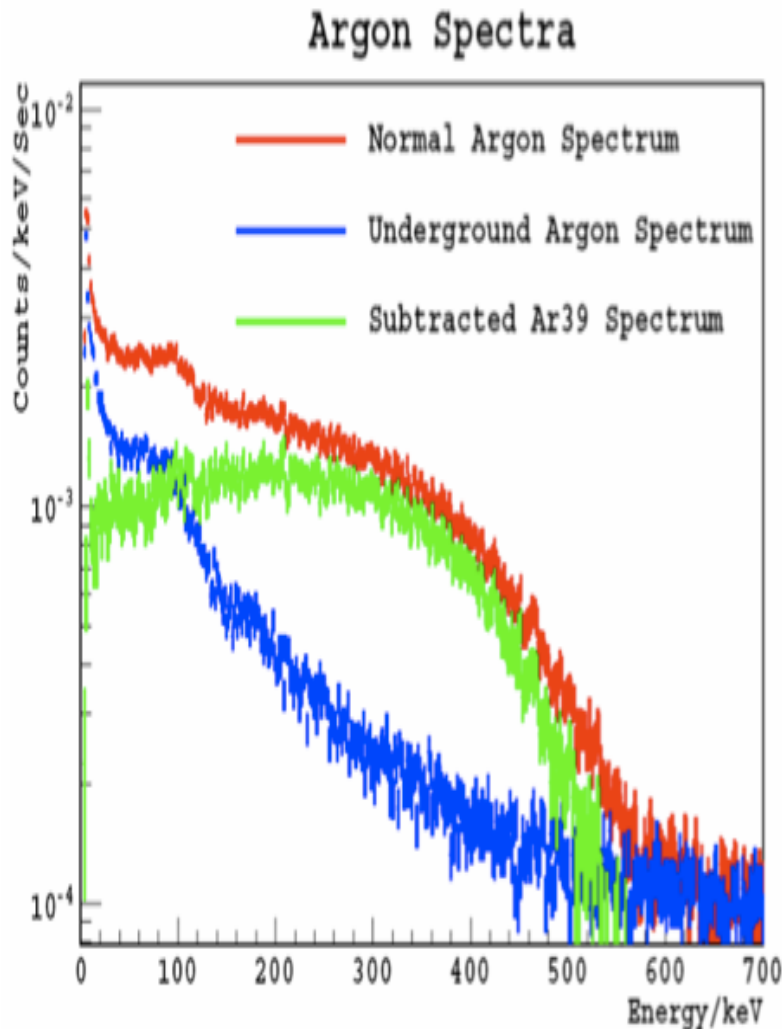
Отношение числа фотонов в быстрой и медленной компонентах высвечивания зависит от плотности ионизации. В жидком аргоне это отношение позволяет разделить импульсы от электрона и ядра отдачи с эффективностью  $\sim 10^8$  -  $10^9$  (>60 ф.э.)

# Дискриминация по отношению S1/S2 (сц. / ион.)



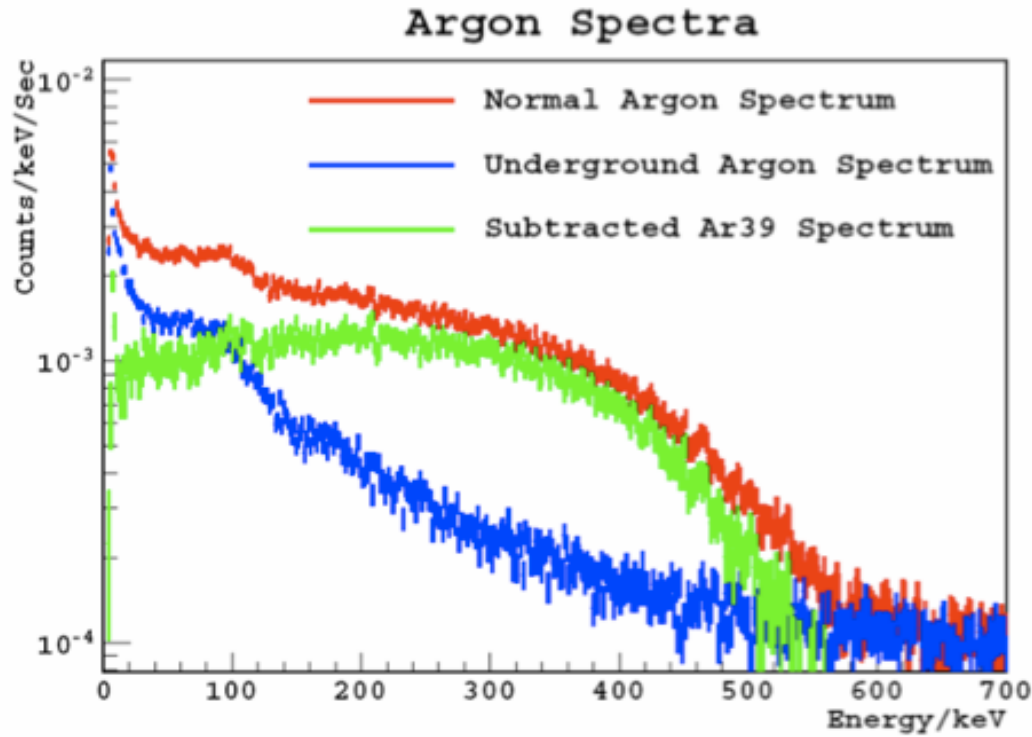
Эффективность разделения зависит от плотности ионизации и составляет  $10^2 - 10^3$  для электронов и ядер отдачи. Доля света в первые 90 нсек ( $F90$ ) для электрона в 2.5 раза больше.

# Фон, связанный с активностью $^{39}\text{Ar}$



1. Содержание  $^{40}\text{Ar}$  в атмосфере 1%
2.  $^{39}\text{Ar}$  производится в атмосфере в реакции  $^{40}\text{Ar}(n,2n)^{39}\text{Ar}$
3.  $^{39}\text{Ar}$  испытывает бета-распад,  $Q = 565$  кэВ,  $T_{1/2} = 269$  лет
4. В атмосфере отношение  $^{39}\text{Ar} / ^{40}\text{Ar} = 8 \times 10^{-16}$ , что соответствует активности 1 Бк/кг
4. В жидком аргоне скорость счета составляет  $10^3$  Бк/кг. Для детектора массой 1 т скорость счета  $10^6$ . Поскольку скорость дрейфа составляет 1 мкс/м, наложения импульсов, связанные с активностью  $^{39}\text{Ar}$ , ограничивают размер LAr детектора величиной  $\sim 1$  м.

# Подземный аргон



Успех Борексина по поиску жидкого органического сцинтиллятора с низким содержанием  $^{14}\text{C}$  в месторождениях, находящихся глубоко под землей. Производство  $^{39}\text{Ar}$  и  $^{40}\text{Ar}$  под землей связано с реакциями:

$^{40}\text{K} + e \rightarrow ^{40}\text{Ar} + \nu$ ;  $^{39}\text{K}(n,p)^{39}\text{Ar}$  где нейтроны производятся по реакции  $\alpha, n$ .  $\alpha$  - частицы в результате распадов в U и Th семействах. Производство  $^{40}\text{Ar}$  ~ концентрации K. Производство  $^{39}\text{Ar}$  ~  $[\text{U}+\text{Th}] \times \text{K}$ . Отношение  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  ~  $[\text{U}+\text{Th}]$ . Содержание U+Th в коре ppm, в мантии ppb. Концентрация  $^{39}\text{Ar}$  в мантии может быть в  $10^3$  раз меньше.



# *DS-10 в Гран Сассо*



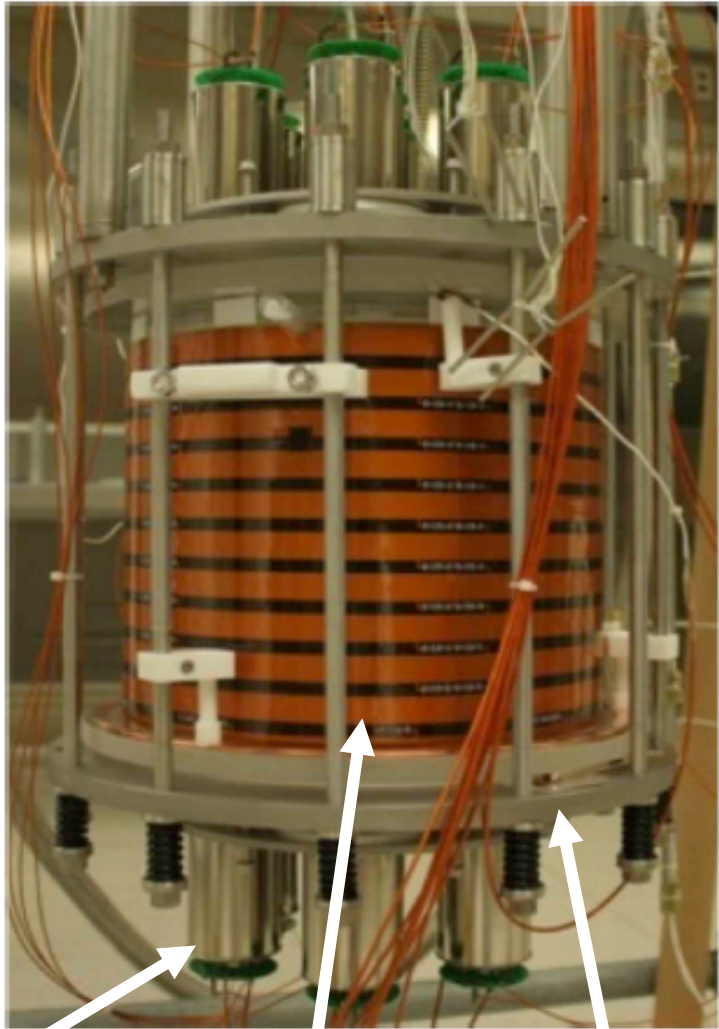
*Внутренний детектор*



*Пассивная защита*

*В 2011-2 г.г. DarkSide10 был размещен и испытан в ГС. Заполнен обычным Ar.*

# DarkSide-10

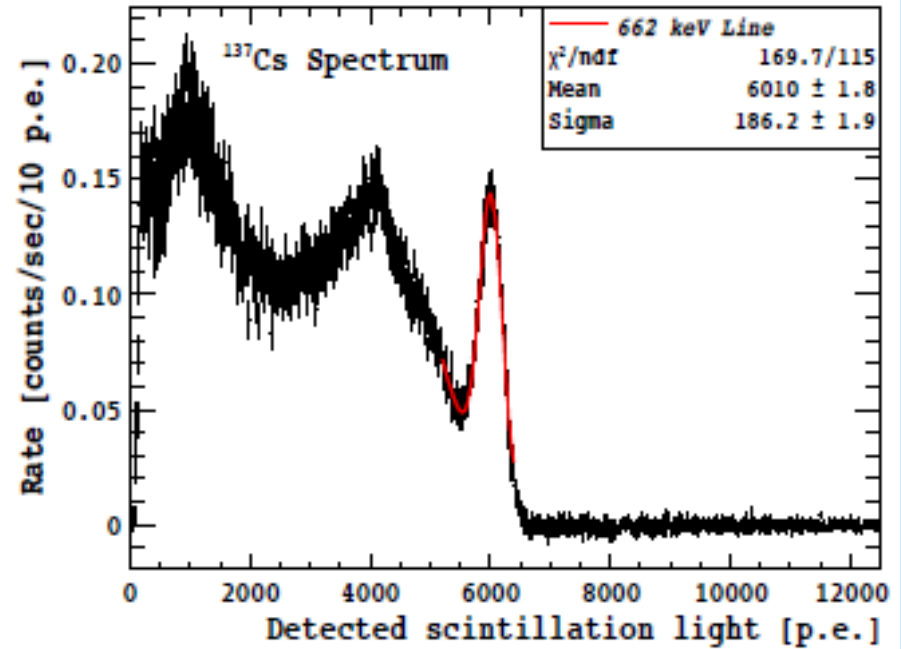


7x3" ФЭУ

Форм.  
поля

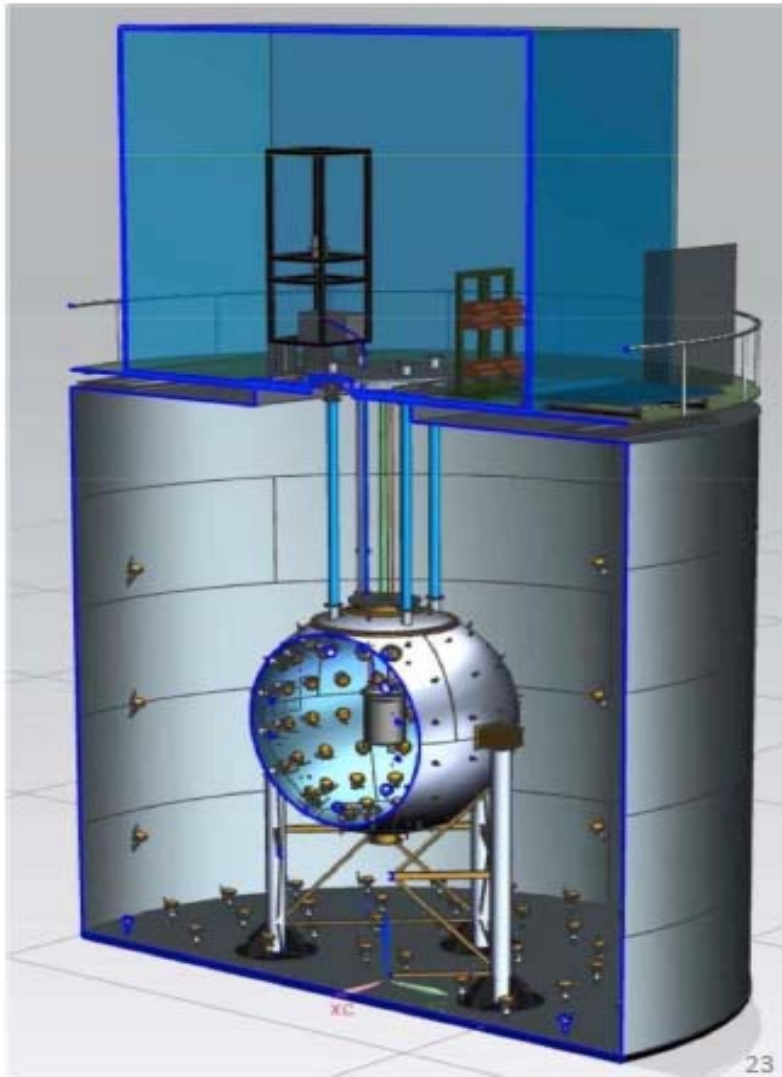
ТРВ+ИТО  
кварцевое окно

21



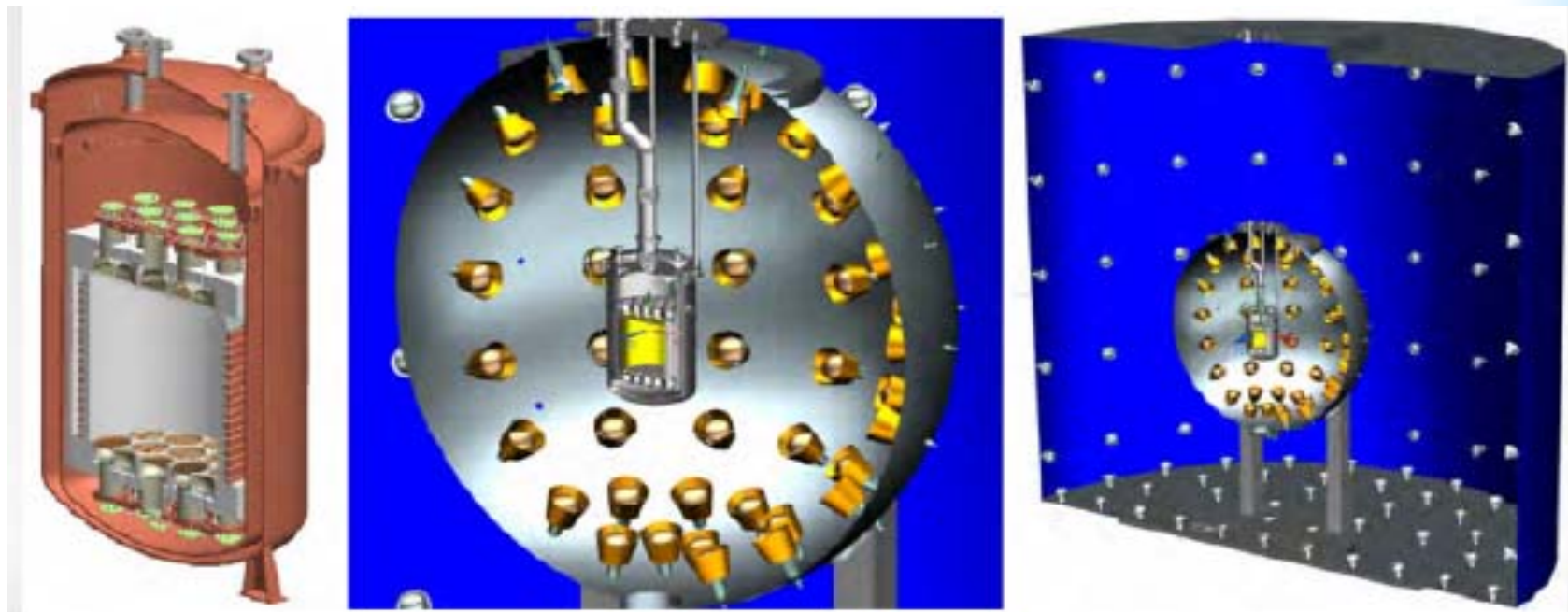
Масса 10 кг. 7x2 ФЭУ  
Hamamatsu R11065. 1кВ/см  
дрейф, 3 кВ/см в газе.  
Световыход (без поля) 8  
ф.э./кэВ. Разрешение 3% при  
662 кэВ.

# DarkSide50

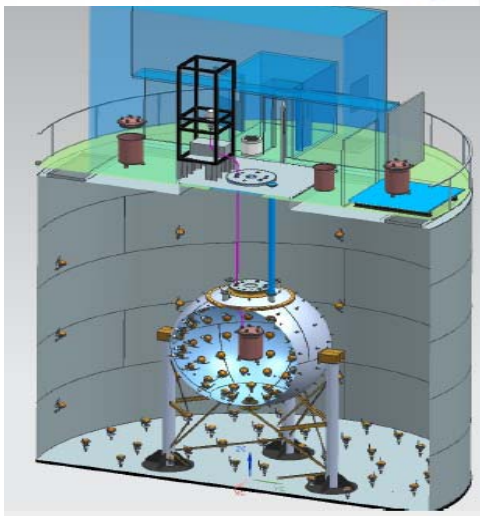


*50 кг подземного Ar. 30 кг – FV. 19 x 2 ФЭУ. Новые отражатели, сместители спектра tetraphenyl butadiene (TPB) и катод ИТО. Сцинтилляционное veto 110 8" ФЭУ. STF водный танк (11 м x 10 м) для защиты от внешней гаммы и нейтронов. 80 8 " Фэу.*

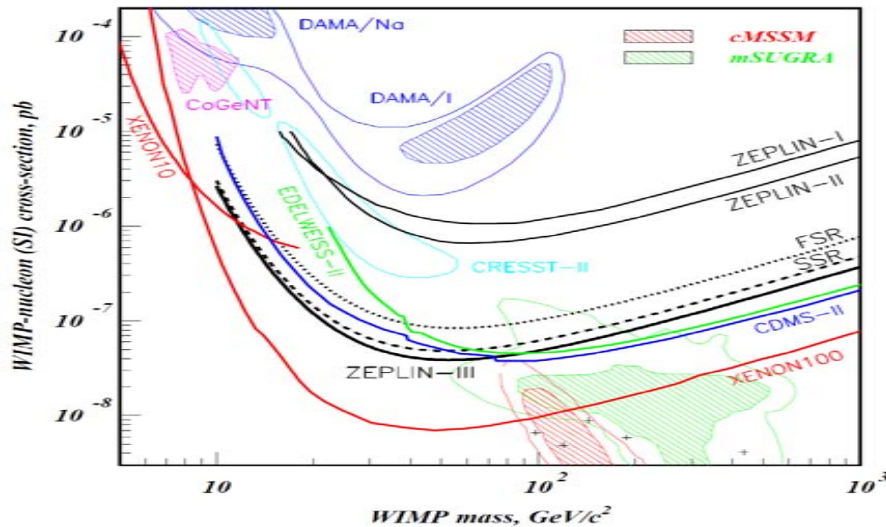
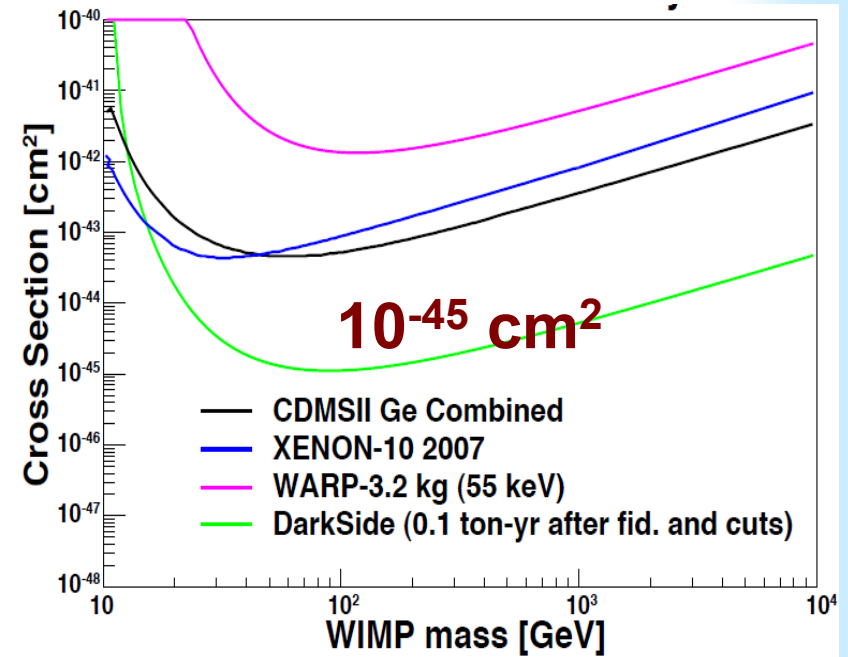
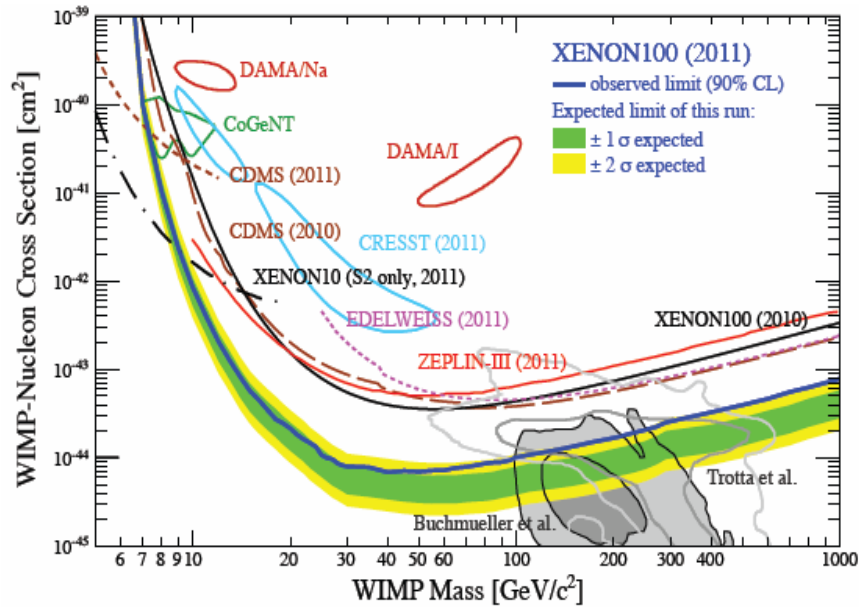
# DarkSide-50 in LNGS



Двухфазный детектор располагается внутри сферы  $d=4$  м, заполненной сцинтиллятором. Сфера находится внутри водяного танка  $d=11$  м (CTF)

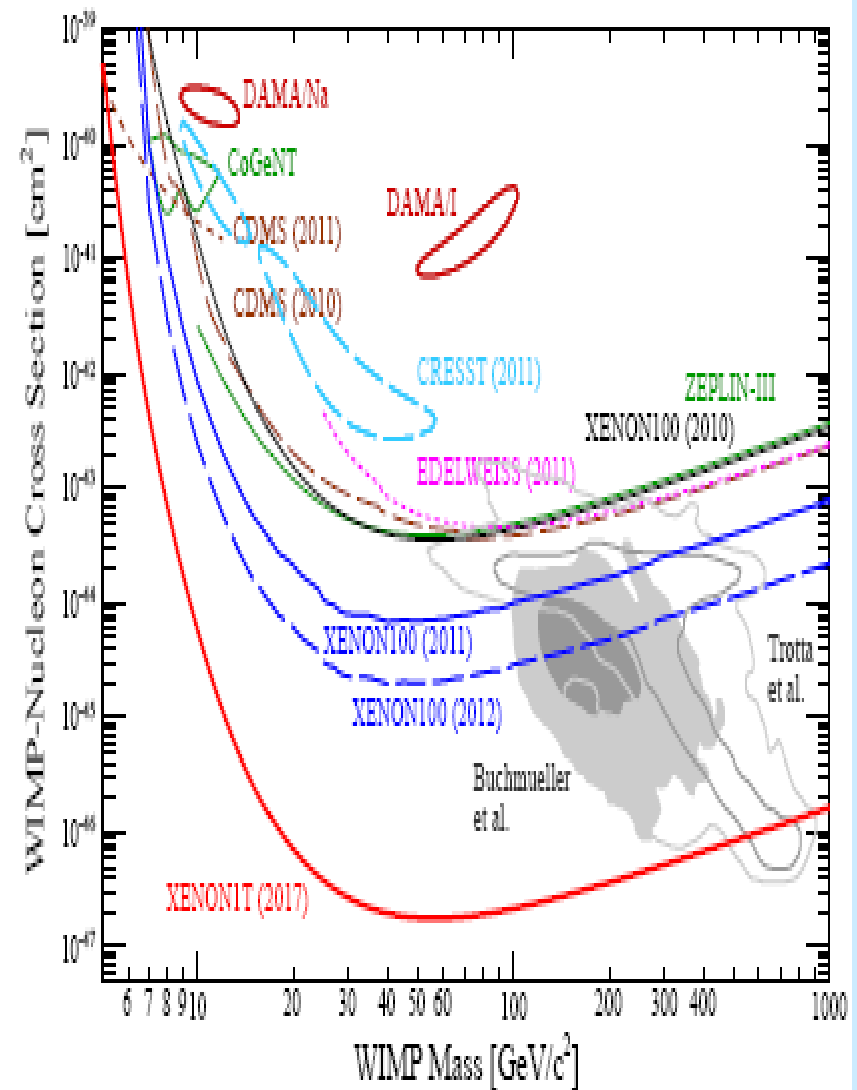
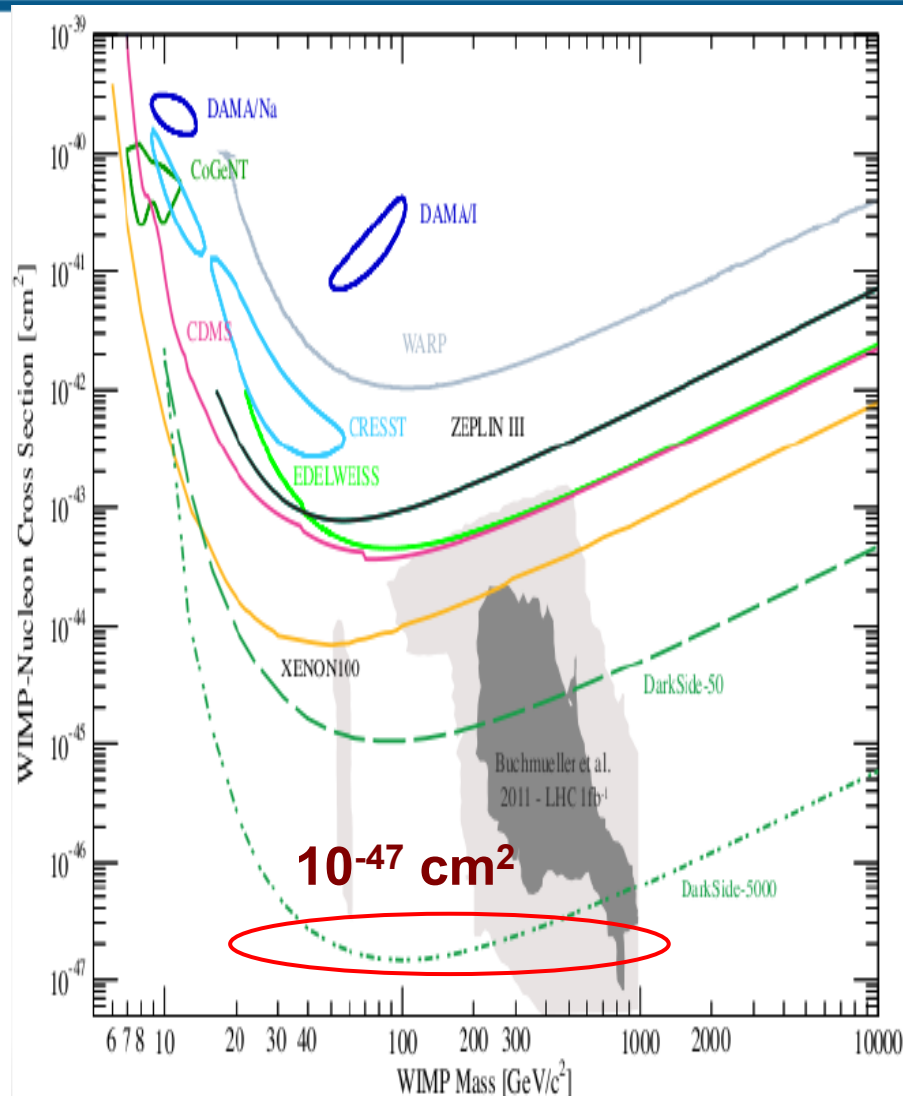


# Ожидаемая чувствительность DARKSIDE50



Уровень  $10^{-45} \text{ cm}^2$  для  $m_w = 100 \text{ ГэВ}$  может быть достигнут с чувствительным объемом 50 кг за 3 года измерений в безфоновом эксперименте

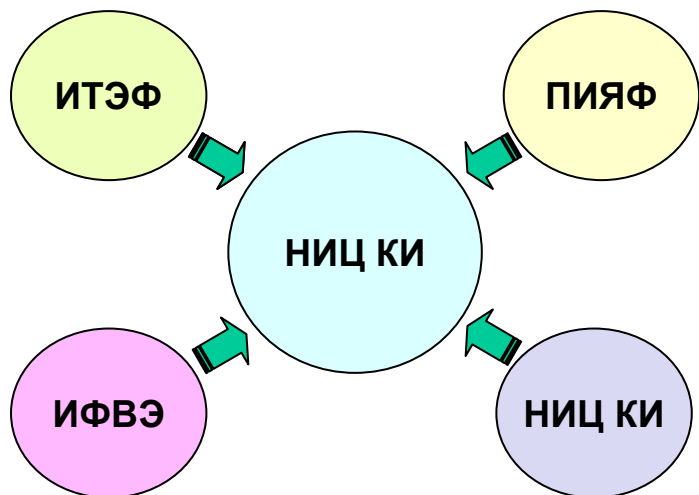
# Чувствительность *DarkSide-G2* (3.3 t)



*DarkSide2G, XENON1T и LZ должны накрыть почти всю область частиц SUSY*

# Российский Эмиссионный Детектор

**ПИЯФ – источник  $^8\text{Li}$**   
 **$\beta^-$  - распад с  $Q = 16 \text{ МэВ}$**



**Коллаборация РЭД:**  
**ИТЭФ, ПИЯФ, НИЦ КИ – НИЦ КИ**  
**МИФИ, ИЯФ, НИИЯФ МГУ**

**В настоящее время идет разработка детекторов и измерения ядер отдачи на реакторе МИФИ.**

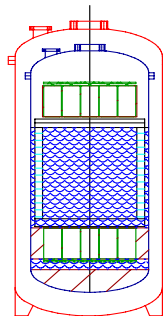
**РЭД**



РОССИЙСКИЙ ЭМИССИОННЫЙ ДЕТЕКТОР

**Для поиска  $\nu$ -N когерентного рассеяния**

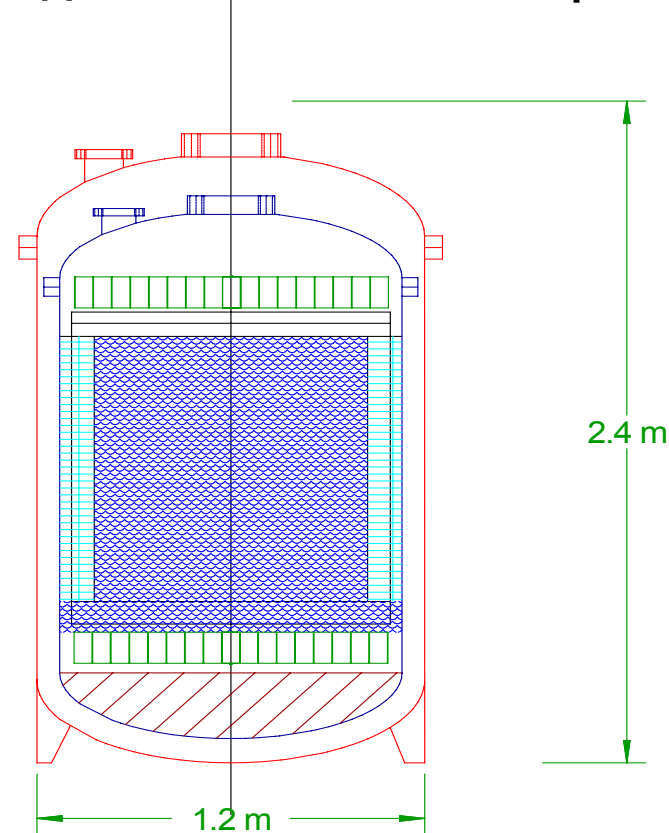
*RED-100*



**Д.Ю. Акимов, сессия ЯФ ОФН РАН, ИТЭФ**

*RED-3000*

**Для поиска Темной Материи**



## Perspectives to measure neutrino-nuclear neutral current coherent scattering with two-phase emission detector

D.Yu. Akimov<sup>1,2</sup>, I.S. Alexandrov<sup>1,2</sup>, V.I. Aleshin<sup>3</sup>, V.A. Belov<sup>1,2</sup>, A.I. Bolozdynya<sup>1</sup>, A.A. Burenkov<sup>1,2</sup>, A.S. Chepurnov<sup>1,5</sup>, M.V. Danilov<sup>1,2</sup>, A.V. Derbin<sup>4</sup>, V.V. Dmitrenko<sup>1</sup>, A.G. Dolgolenko<sup>2</sup>, D.A. Egorov<sup>1</sup>, Yu.V. Efremenko<sup>1,6</sup>, A.V. Etenko<sup>1,3</sup>, M.B. Gromov<sup>1,5</sup>, M.A. Gulin<sup>1</sup>, S.V. Ivakhin<sup>1</sup>, V.A. Kantserov<sup>1</sup>, V.A. Kaplin<sup>1</sup>, A.K. Karelin<sup>1,2</sup>, A.V. Khromov<sup>1</sup>, M.A. Kirsanov<sup>1</sup>, S.G. Klimanov<sup>1</sup>, A.S. Kobayakin<sup>1,2</sup>, A.M. Konovalov<sup>1,2</sup>, A.G. Kovalenko<sup>1,2</sup>, V.I. Kopeikin<sup>3</sup>, T.D. Krakhmalova<sup>1</sup>, A.V. Kuchenkov<sup>1,2</sup>, A.V. Kumpan<sup>1</sup>, E.A. Litvinovich<sup>3</sup>, G.A. Lukyanchenko<sup>1,3</sup>, I.N. Machulin<sup>3</sup>, V.P. Martemyanov<sup>3</sup>, N.N. Nurakhov<sup>1</sup>, D.G. Rudik<sup>1,2</sup>, I.S. Saldikov<sup>1</sup>, M.D. Skorokhatov<sup>1,3</sup>, V.V. Sosnovtsev<sup>1</sup>, V.N. Stekhanov<sup>1,2</sup>, M.N. Strikhanov<sup>1</sup>, S.V. Sukhotin<sup>3</sup>, V.G. Tarasenkov<sup>3</sup>, G.V. Tikhomirov<sup>1</sup>, O.Ya. Zeldovich<sup>2</sup>

### RED (Russian Emission Detector) Collaboration

<sup>1</sup>National Nuclear Research University «MEPhI», Moscow, Russia

<sup>2</sup>SSC RF Institute for Theoretical and Experimental Physics, Moscow, Russia

<sup>3</sup>National Research Centre Kurchatov Institute, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Russia

<sup>5</sup>Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics MSU, Moscow, Russia

<sup>6</sup>University of Tennessee, Knoxville, USA

МИФИ

ИТЭФ

КИ

ПИЯФ

НИЯФ МГУ

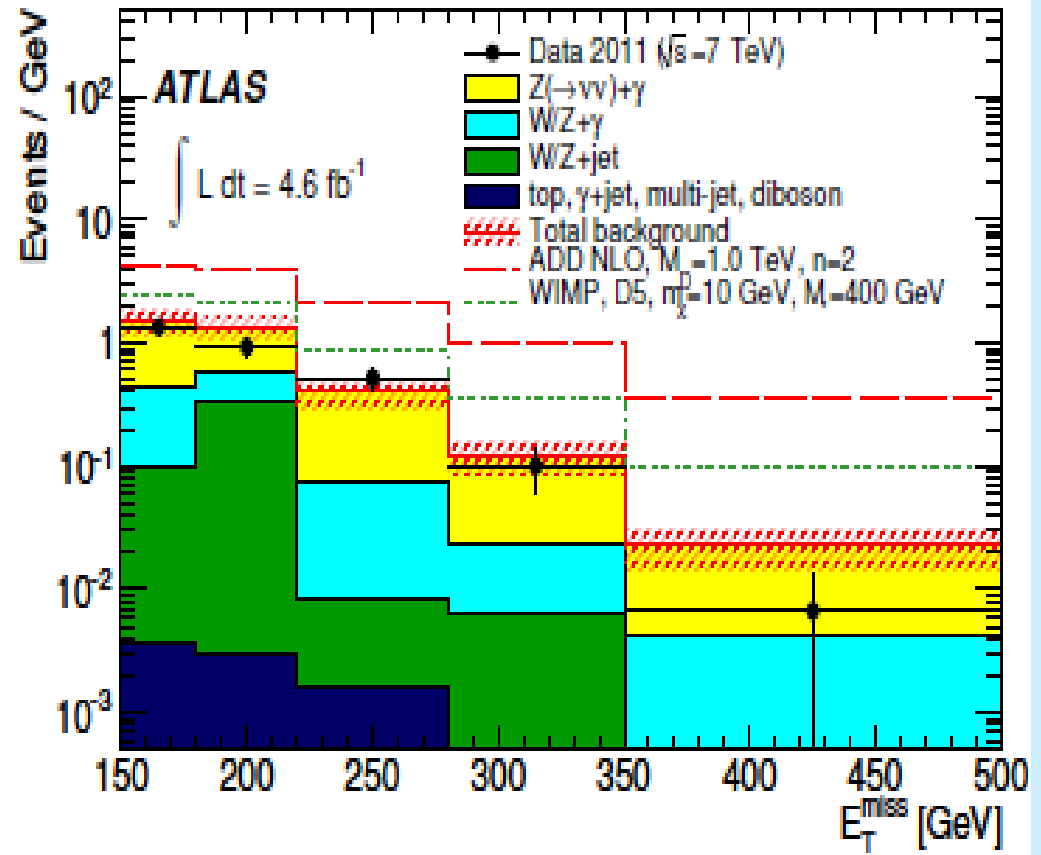
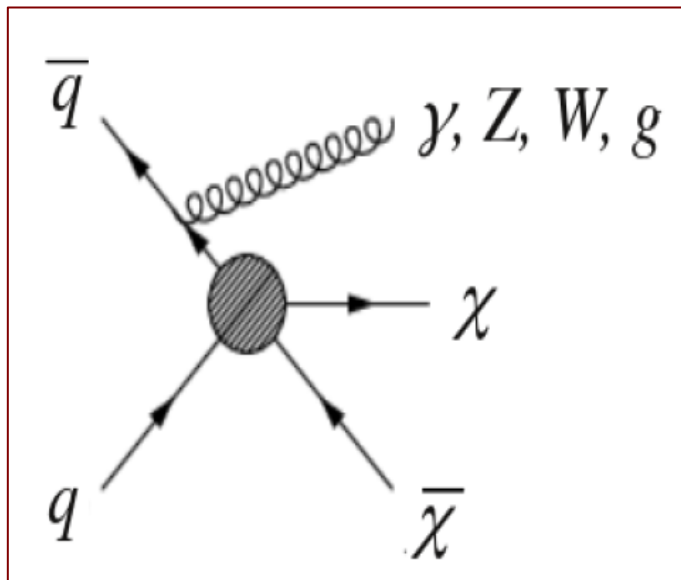
УТ



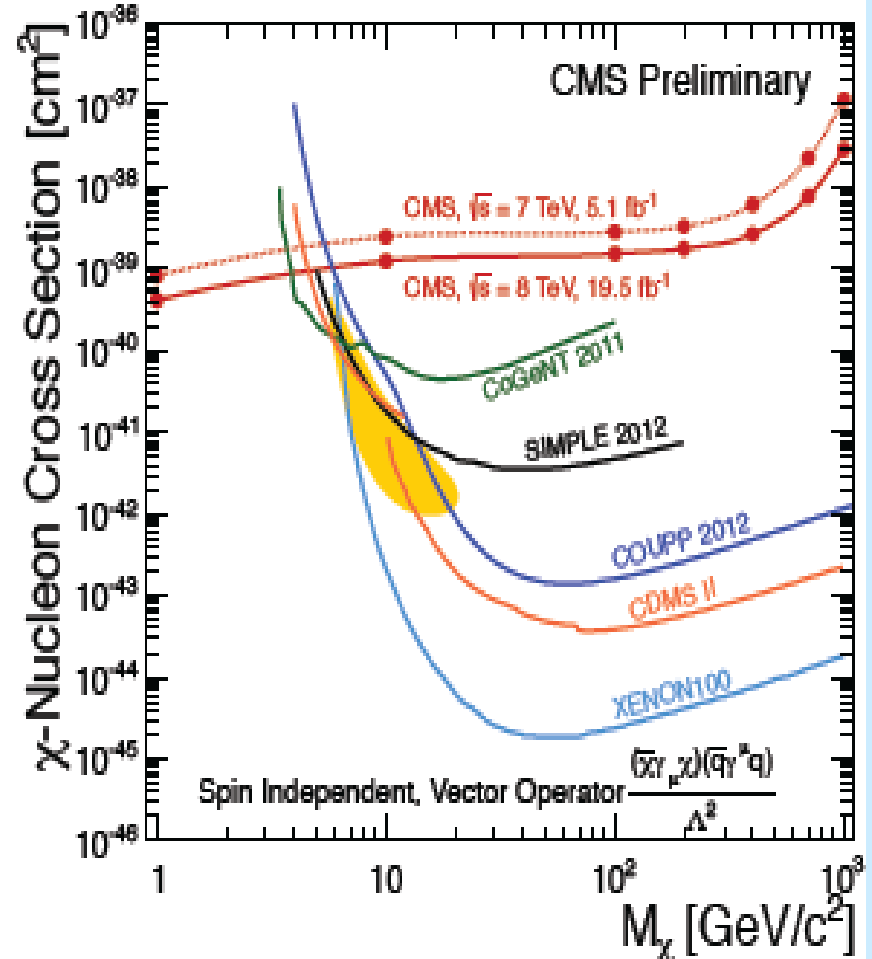
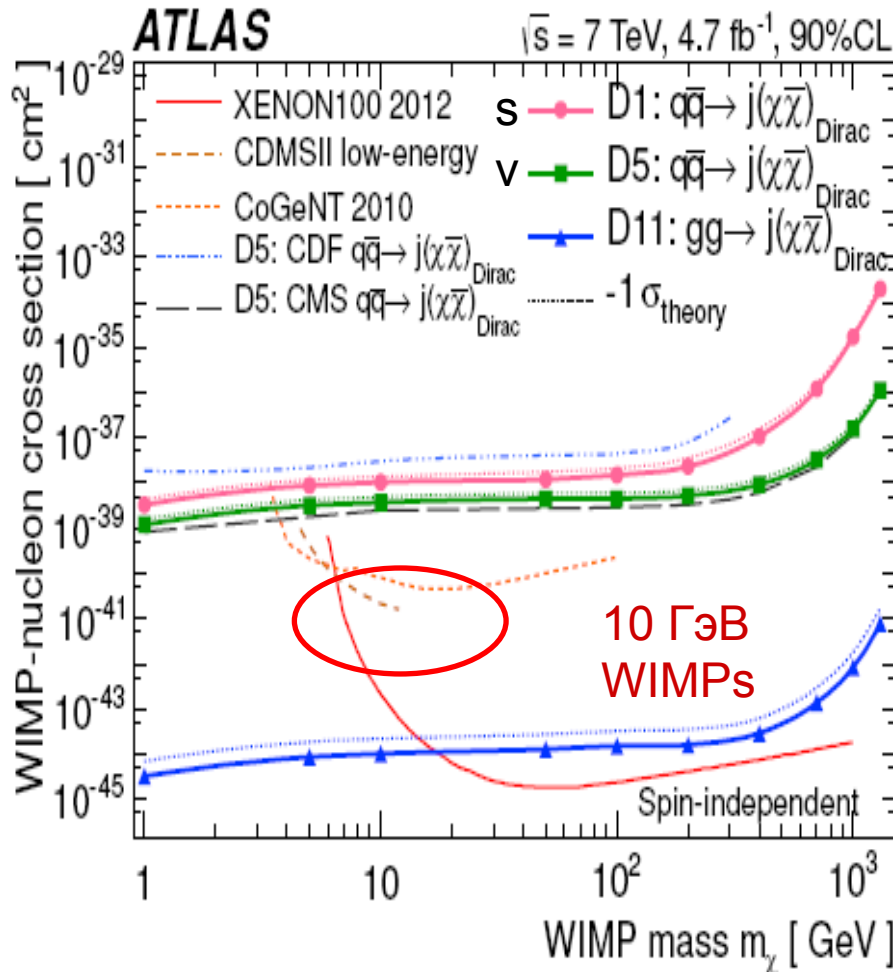
# Рождение WIMPs в колайдерных экспериментах

$$q\bar{q} \rightarrow \chi\bar{\chi}$$

$$q\bar{q} \rightarrow \chi\bar{\chi} + X$$

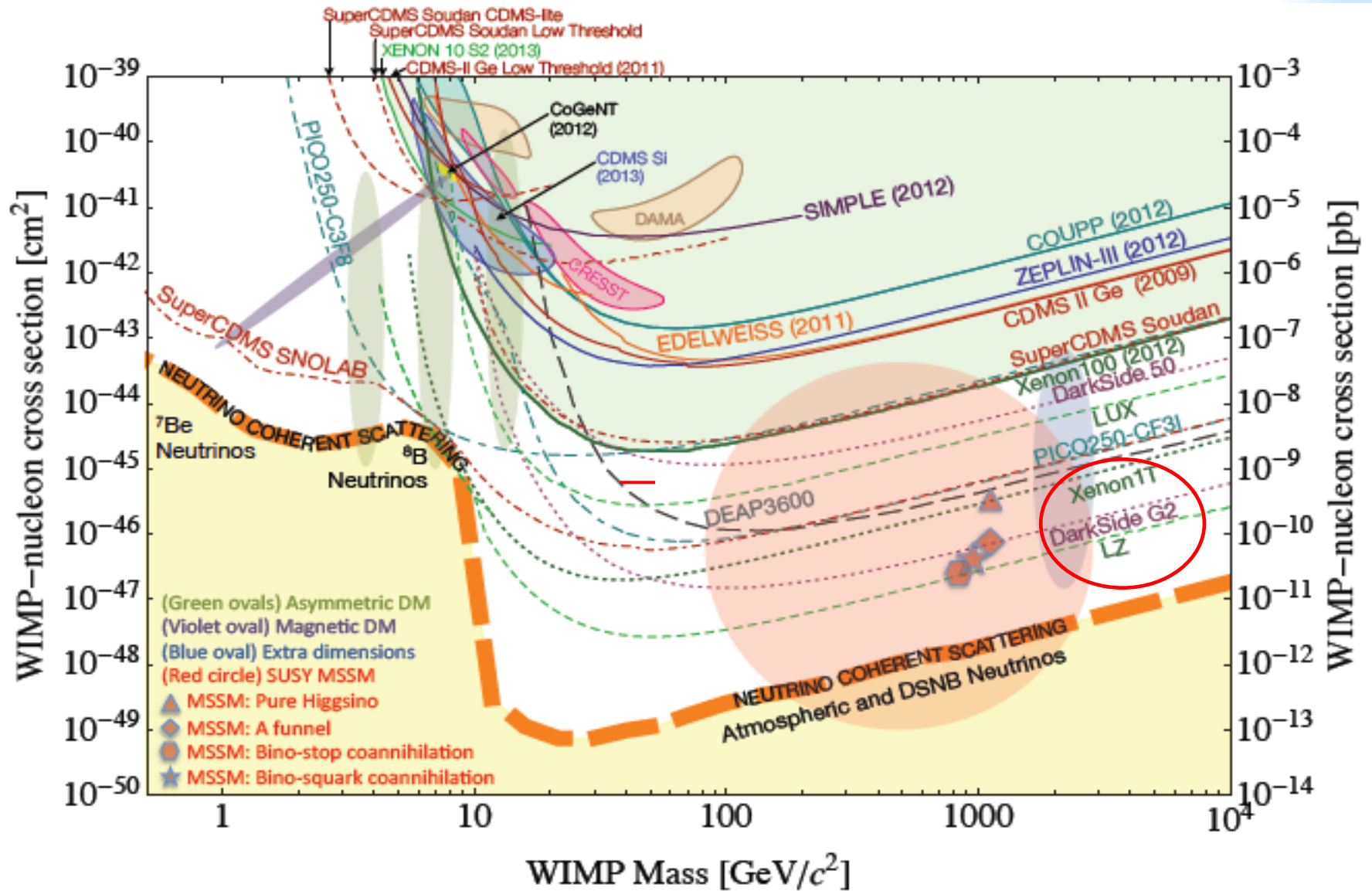


Поиск WIMPs основан на событиях с недостающей  $E(p)$  плюс одиночная частица (фотон, Z-, W-, g) или струя. Основной фон в СМ связан рождением Z вместе со струей и распадом Z на два нейтрино. Из отсутствия превышения событий над фоном устанавливаются пределы на SI и SD сечения WIMPs.



Ограничения на SI сечение из результатов поиска моноjets. Для SI взаимодействия пределы, полученные ATLAS и CMS, более строгие, чем пределы из прямых экспериментов для  $m_W < 10$  ГэВ. Только D11 закрывает положительные результаты DAMA, CoGeNT, CRESST

# Планы и пределы чувствительности $\nu$ ( $\odot$ +DSNB)



В следующий раз

# Спасибо за внимание!

