

# Сцинтилляционные кристаллы LiF как детектор частиц темной материи: проблемы и перспективы

Абдурашитов Д.Н.  
ИЯИ РАН, ОФВЭ

19.09.2011

# План доклада

- LiF как сцинтиллятор: проблемы и перспективы
- Основы прямого поиска – сечения, ядра отдачи, годовая модуляция
- Результаты основных экспериментов по прямому поиску частиц темной материи: CRESST, Xe100, CDMS, CoGeNT, DAMA/LIBRA (по материалам TAUP-2011)
- Перспективы LiF как детектора частиц темной материи

Цель исследования: оценка световыхыхода кристалла LiF(W) относительно NaI(Tl).

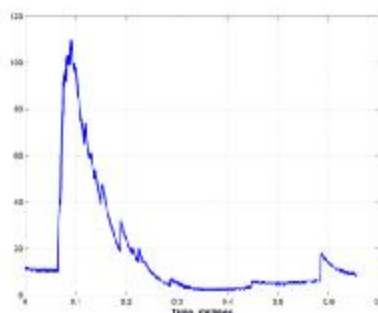
## 1. Методика исследования.

Для исследования был выбран один из двух больших кристаллов LiF(W), выращенных в Харькове на заводе «Монокристалл». Кристалл имеет размер 150x150x300 мм и оборудован одним окном диаметром 120 мм. Для просмотра кристалла использовался большой ФЭУ Hamamatsu R2321 со стандартным делителем. Выход анодного сигнала подается на зарядочувствительный предусилитель (ЗЧПУ) с постоянной времени 100 мкс. Сигнал ЗЧПУ просматривается 2-канальным цифровым осциллографом (ЦО) Лан10М5 от Руднев-Шилиева. Для запуска ЦО используется триггерный сигнал, сформированный по переднему фронту сигнала ЗЧПУ. В качестве радиоактивных источников были использованы источники ОСГИ  $^{137}\text{Cs}$  (662 кэВ),  $^{60}\text{Co}$  (1.17 и 1.33 МэВ),  $^{241}\text{Am}$  (27 и 60 кэВ), а также  $^{239}\text{Pu}$  - источник альфа-частиц с энергией 4.6 МэВ.

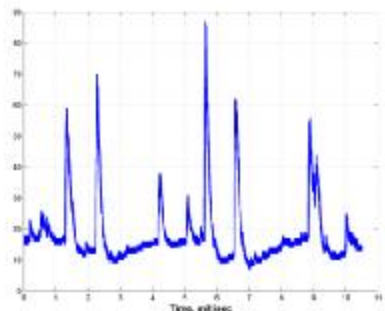
Как показал самый первый опыт работы, исследования такого рода практически невозможно проводить без специальной пассивной защиты от радиоактивного фона окружающей среды. Поэтому измерения проводились в подземном комплексе низкофоновой лаборатории ГГНТ, в счетной комнате 101. Во время измерений кристалл был окружен слоем свинца толщиной 8 см и вольфрама 2 см.

## 2. Характеристика сигналов.

Известно, что в высвечивании кристаллов LiF наблюдаются компоненты с длительностью в десятки и сотни микросекунд. Этим был обусловлен выбор постоянной времени ЗЧПУ в 100 мкс. На рисунке справа представлен кадр одного из событий высвечивания в LiF(W) при облучении каким-либо источником. По горизонтали отложено время в миллисекундах, по вертикали - оцифрованные значения сигнала ЗЧПУ в бинах ЦО. Видно, что сигнал складывается из



отдельных, по всей вероятности, 1-фотоэлектронных всплесков, наиболее интенсивных в начале и более редких в конце. Следует отметить, что выбор 100 мкс оказывается недостаточен, чтобы выбрать все фотоэлектроны, относящиеся к событию высвечивания – всплески еще поступают, а ЗЧПУ уже разряжается. Тем не менее, увеличивать время разряда ЗЧПУ не представляется возможным по следующей причине. На рисунке слева представлена осциллограмма сигнала ЗЧПУ при облучении кристалла источником  $^{239}\text{Pu}$ . Интенсивность источника (около 100 частиц в секунду) много меньше скорости шумовых 1-фотоэлектронных событий ФЭУ (около 5 кГц). При увеличении времени разряда существенно повысится вероятность наложения сигна-



лов, что будет приводить к значительным искажениям при определении амплитуды.

LiF(W), 18 кг

Производство

«Институт монокристаллов»

Харьков, Украина

ГГНТ БНО

Внутренний отчет ноябрь 2009

## LiF(W), 18 кг, ГГНТ БНО

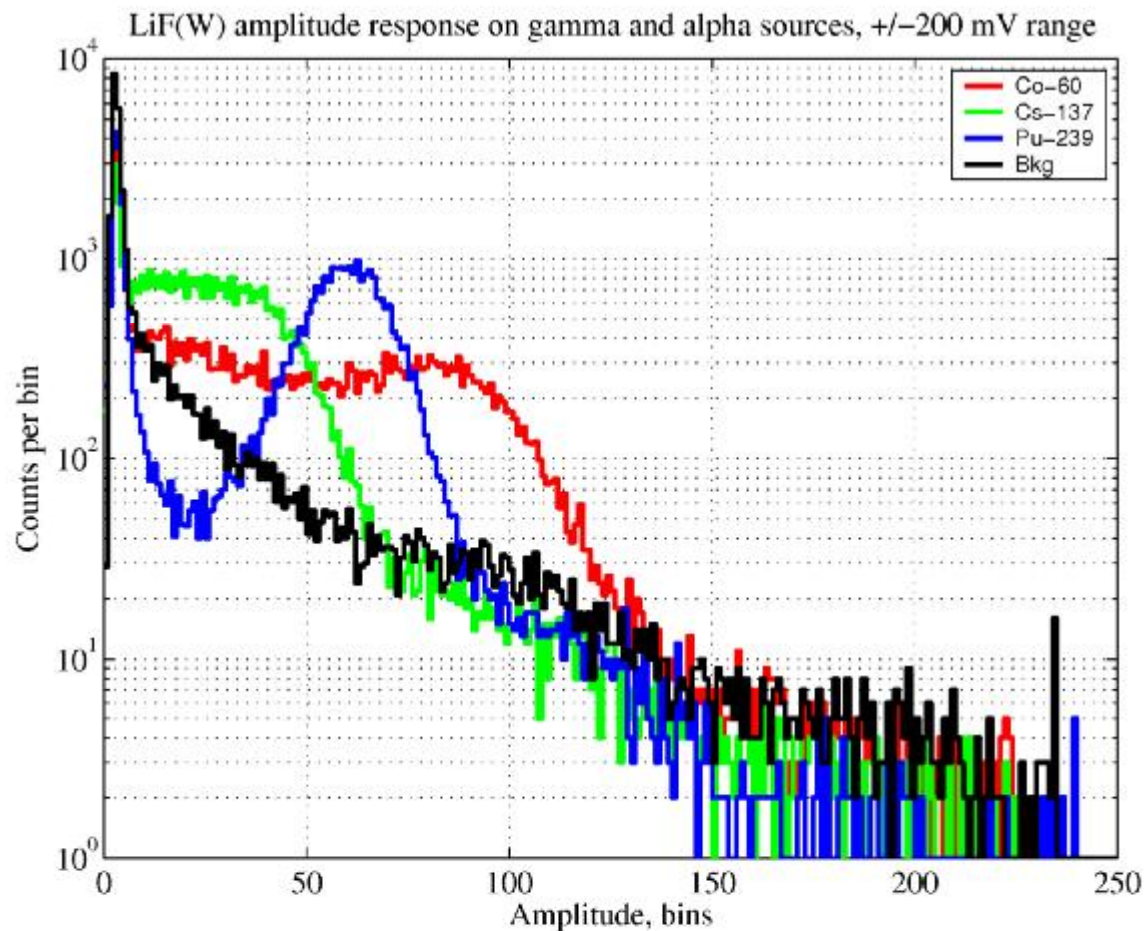


Рис. 2: Гистограммы амплитуд отклика кристалла LiF(W) на облучение источниками  $\gamma$ -квантов,  $\alpha$ -частиц и фон, диапазон  $\pm 200$  mV.

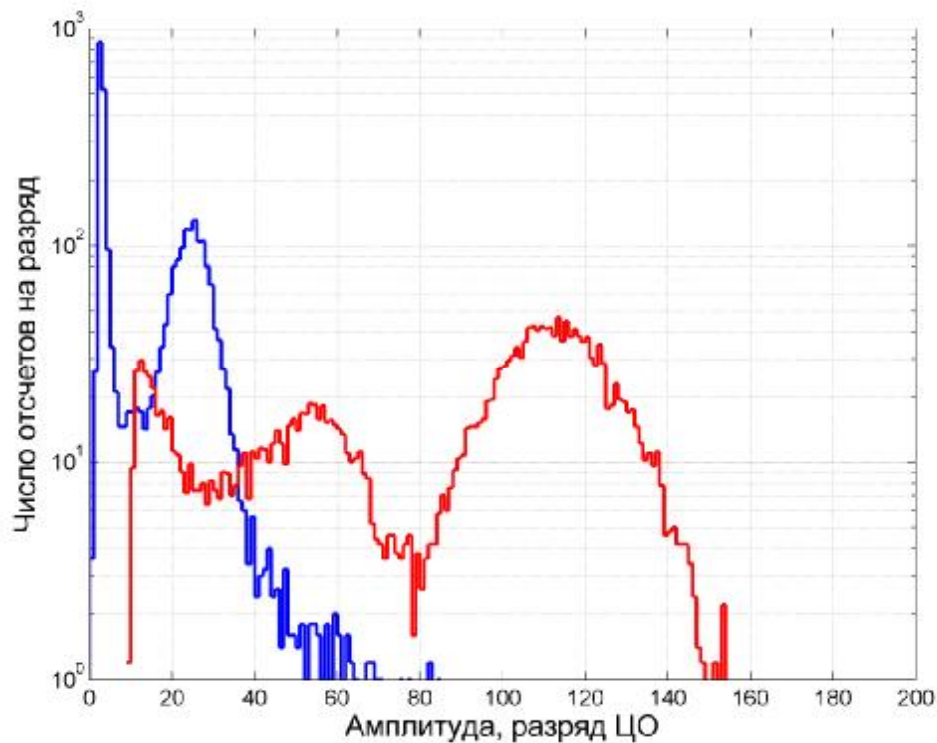
Источники:

$^{239}\text{Pu}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$

Таи предусилителя  
560 мкс

LiF(W), 18 кг, ГГНТ БНО

LiF+<sup>239</sup>Pu = 830 кэВ = 25 кан  
NaI+<sup>241</sup>Am = 60 кэВ = 115 кан



Световыход: 1.6% от NaI(Tl)

Отношение  $\alpha/e$ : 0.16

# LiF(W), 18 кг, ГГНТ БНО

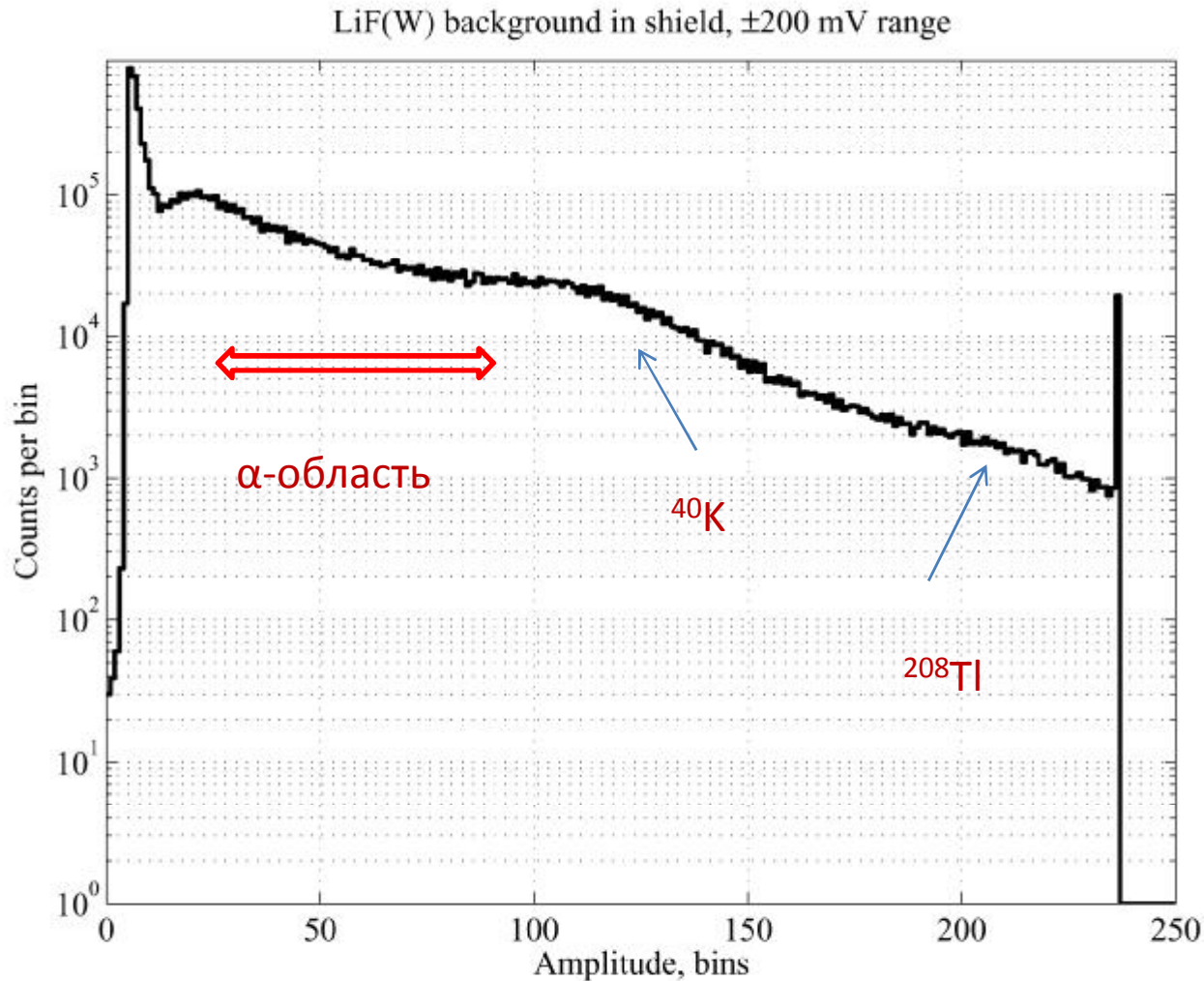


Рис. 2: Гистограмма фона детектора LiF(W) за 1194 часа набора, шкала по оси X 2 МэВ.

Верхний предел  
20  $\mu\text{Бк/кг}$

Соответствует  
 $10^{-11}$  г/г

по U/Th

По  $^{40}\text{K}$ :

$10^{-8}$  г/г

### Краткий отчет

об исследовании сцинтилляционных свойств кристалла LiF  
при температуре близкой к жидкому азоту  
Абдурашитов Д.Н., Берлев А.И., Калихов А.В., Шихин А.А.  
1-12.01 2011, БНО

Цель исследования: поиск сцинтилляционного высвечивания чистого кристалла LiF  
при температуре близкой к жидкому азоту

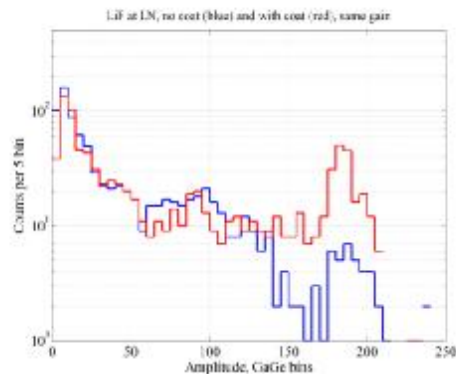
### Методика поиска и результаты.

Для охлаждения кристалла была применена криогенная установка, изготовленная на основе штатного хладопровода (медный стержень в тонкостенной рубашке из нержавеющей стали) одного из старых ППД производства ОИЯИ, любезно предоставленном В.Э.Янцем.

Для поиска сцинтилляционного отклика был выбран кристалл чистого LiF с размерами  $\varnothing 30 \times 50$  мм производства ЭХК, г. Ангарск. Для просмотра кристалла использовался ФЭУ Hamamatsu R374 со стандартным делителем, HV=760 В.. Выход анодного сигнала подается на зарядочувствительный преобразователь (ЗЧПУ) с постоянной времени 9.2 мкс. Сигнал ЗЧПУ, прошедший спектрометрический усилитель ORTEC-575 без формирования, просматривается 2-канальным цифровым осциллографом (ЦО) GaGe. Шаг оцифровки составляет 10 нс, длина кадра 200 мкс.

Предварительные измерения (АБК) не выявили сколько-нибудь заметного отклика на имеющиеся источники ( $^{60}\text{Co}$  и др.) при температуре кристалла LiF примерно  $-186^\circ\text{C}$ . Было решено (по предложению Кузьмина В.В.) искать отклик от мюонов космических лучей. Интегральная плотность потока мюонов на уровне АБК составляет  $270 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ . На указанном кристалле это должно приводить к  $10 \div 12$  отсчетов/час.

Для запуска ЦО используется триггерный сигнал, сформированный прохождением мюона в плоском пластическом сцинтилляторе, расположенном сверху кристалла LiF. Было проведено несколько измерений. В первом измерении кристалл LiF был без покрытия, в последующих – был покрыт специальной светоотражающей тефлоновой пленкой, предоставленной «Амкрис», Харьков.



На рисунке слева представлены амплитудные гистограммы, набранные от охлажденного кристалла LiF в совпадении с отсчетами в пластике (мюоны). Нижняя линия (синяя) – кристалл без покрытия, верхняя линия (красная) – кристалл покрыт отражающей пленкой. Скорость счета в обоих измерениях примерно 10 отсчетов/час, время набора – около 3-х сут каждый. На нижней гистограмме просматривается некое подобие пика в районе 100 бина. Верхняя гистограмма в основном плоская, с заметной долей переполнений.

Чистый LiF, охлажденный до жидкого азота

Световыход 10 фот/МэВ

Измерен по пролетающим мюонам космических лучей

Установка – на основе вышедшего из строя ППД, Дубна

## Короткоживущие первичные радиационные дефекты в кристалле LiF

© Л.А. Лисицына\*, Т.В. Гречкина, В.И. Корепанов, В.М. Лисицын

\*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003 Томск, Россия  
Томский политехнический университет,  
634034 Томск, Россия

(Поступила в Редакцию 9 ноября 2000 г.)

Методами импульсной спектроскопии с наносекундным разрешением кинетические параметры инициированных воздействием импульса электронов (ИЭ) люминесценции и свечения кристаллов LiF. Измерения проведены в спектральной области в диапазоне 11–150 К и временном интервале  $10^{-8}$ –10 с после окончания действия ИЭ приводит к созданию в кристалле LiF помимо  $F_2^-$ ,  $V_k^-$  и  $V_k^+$  дефектов двух типов, различающихся спектральным положением поглощательных переходов, временем жизни и характером температурной зависимости эффекта. Тип I имеют поглощательные переходы на 5.5 и 5.1 eV и излучательный на 5.3 и 4.75 eV. Тип II имеют поглощательные переходы на 5.3 и 4.75 eV и излучательный переход на 4.4 eV. Указанные зависимости в диапазоне 11–150 К изменение количественного соотношения между типами короткоживущих дефектов и величину квантового выхода  $F$ -центров. Предполагается, что обнаруженные дефекты являются автолокализованными экситонами различного типа.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы "Университеты России".

В ионных кристаллах первичными продуктами релаксации созданных радиацией электронных возбуждений являются пары френкелевских дефектов и автолокализованные экситоны (АЭ). Френкелевские пары со временем либо рекомбинируют, либо преобразуются в дефекты, стабильные при условиях эксперимента. АЭ, время жизни которых определяется спиновой мультиплетностью и степенью пространственного перекрытия электронных волновых функций электронного и дырочного компонентов, распадаются излучательно или безызлучательно.

В ряду щелочно-галогидных кристаллов (ЩГК) процессы образования и релаксации первичной дефектно-

ного импульса электронов (ИЭ), создававшего объемную плотность возбуждения не выше  $1 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$ , со средней энергией электронов 350 keV при длительности ИЭ 10 ns.

Исследовались особо чистые кристаллы LiF, прозрачные в диапазоне 12–0.5 eV, содержащие примеси Mg, Al, Si менее  $1 \cdot 10^{-3}$  mol.% и кислорода менее  $1 \cdot 10^{-5}$  mol.% (по данным протон-активационного анализа).

### 1. Результаты исследований

#### 1.1. Люминесценция кристалла LiF, ини-

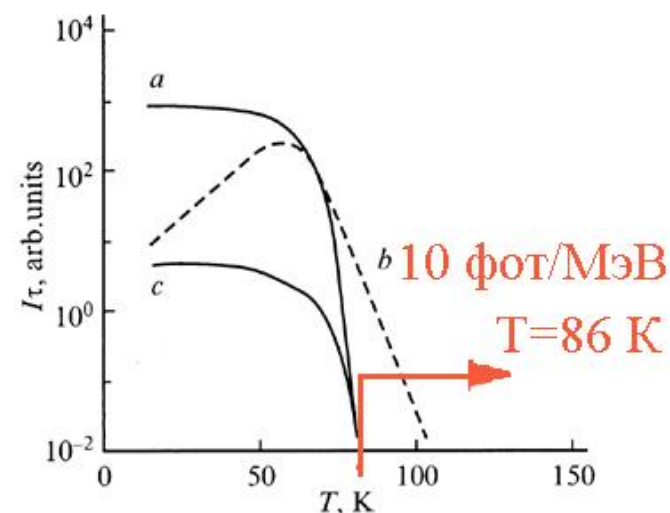


Рис. 3. Температурные зависимости высвечиваемых светосумм ( $I\tau$ ) на 5.8 (a), 4.4 (b), 3.5 eV (c), инициированных воздействием импульса электронов на кристалл LiF.



# Performance of scintillation materials at cryogenic temperatures

## Review Article

V. B. Mikhailik\* and H. Kraus

### Maximal Light yield at low temperatures:

**CaWO<sub>4</sub> = 16000 phot/MeV (100%)**

**MgF<sub>2</sub> = 12800 phot/MeV**

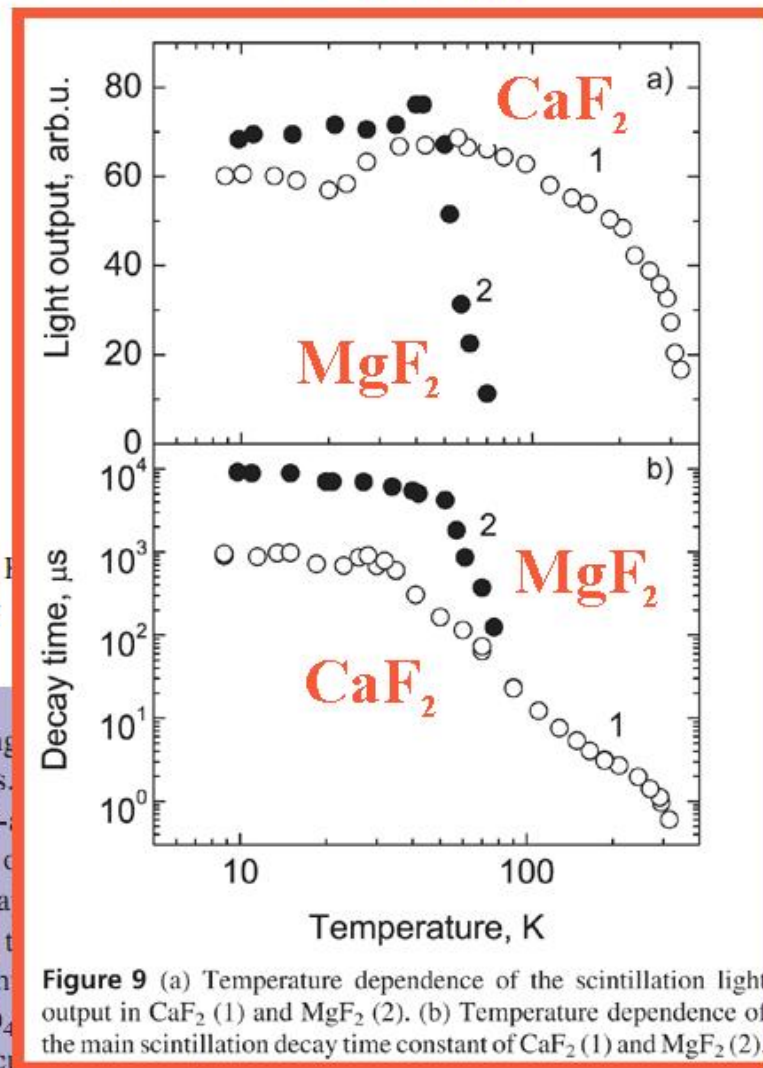
**CaF<sub>2</sub> = 11200 phot/MeV**

Department of Physics, University of Oxford, Denys Wilkinson Building, 1  
Received 27 October 2009, revised 20 January 2010, accepted 27 January 2010  
Published online 11 March 2010

An increasing number of applications of scintillators at low temperatures, particularly in cryogenic experiments searching for rare events, has motivated the investigation of scintillation properties of materials over a wide temperature range. This paper provides an overview of the latest results on the study of luminescence, absorption and scintillation properties of materials selected for rare event searches so far. These include CaWO<sub>4</sub>, ZnWO<sub>4</sub>, CdWO<sub>4</sub>, MgWO<sub>4</sub>, CaMoO<sub>4</sub>, CdMoO<sub>4</sub>, Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub>, CaF<sub>2</sub>, MgF<sub>2</sub>, ZnSe and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti. We discuss the progress achieved in research and development of these

standing physics. of self- model c made a energy t the light CdWO<sub>4</sub> we disc with emphasis on their application as cryogenic phonon-

**Spectral range  
260-600 nm**



**Figure 9** (a) Temperature dependence of the scintillation light output in CaF<sub>2</sub> (1) and MgF<sub>2</sub> (2). (b) Temperature dependence of the main scintillation decay time constant of CaF<sub>2</sub> (1) and MgF<sub>2</sub> (2).

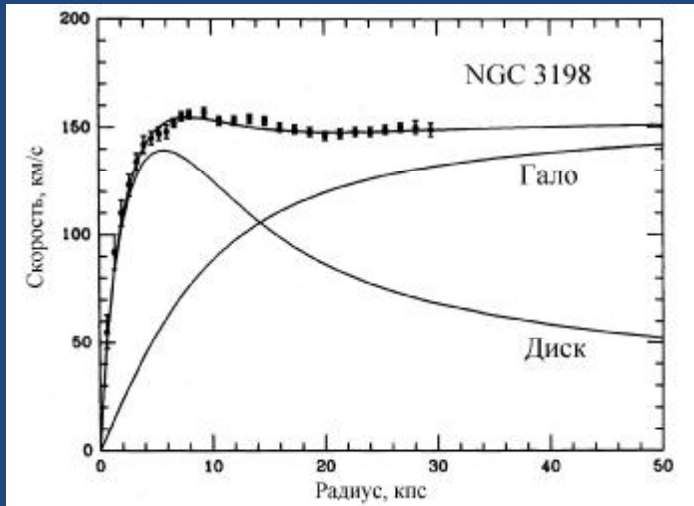
# Чистый LiF как сцинтиллятор

- Есть веские основания ожидать заметного световыхода при температуре 40-50 К
- Все, что можно было сделать «на коленке» - сделано
- Теоретический верхний предел световыхода (по ширине запрещенной зоны) -  $\sim 15000$  фот/МэВ  
в широком спектральном диапазоне

# Свидетельства присутствия DM

Скорость вращения звезд

Гравитационное линзирование



Albada et al, Ap.J. 295 (1985) 305

$$v(R) = \sqrt{G \frac{M(R)}{R}}$$

$$M(R) = 4\pi \int_0^R \rho(r) r^2 dr$$

Гало:  $M(R) \propto R$ ,  $v(R) \propto const$

Диск:  $M(R) \propto M(0)$ ,  $v(R) \propto R^{-1/2}$



$\Omega_{dm} = \rho_{dm} / \rho_{cr} = 0.23$  - во Вселенной

# Суперсимметрия и темная материя

$$R = (-1)^{3(B-L)+2S}$$

Строгое сохранение R-четности приводит к появлению LSP --- тяжелых слабо взаимодействующих кандидатов на темную материю

$$\text{LSP} = \tilde{\chi}^0, \quad m_{\tilde{\chi}} = 1 \text{ ГэВ} - 300 \text{ ТэВ}$$

MCCM

Normal particles	R=1	SUSY partners	R=-1
Symbol	Name	Symbol	Name
$q = u, c, t$	up quarks	$\tilde{q}_u^1, \dots, \tilde{q}_u^6$	up squarks
$q = d, s, b$	down quarks	$\tilde{q}_d^1, \dots, \tilde{q}_d^6$	down squarks
$l = e, \mu, \tau$	leptons	$\tilde{l}_1, \dots, \tilde{l}_6$	sleptons
$\nu$	neutrinos	$\tilde{\nu}_1, \dots, \tilde{\nu}_3$	sneutrinos
$g$	gluons	$\tilde{g}$	gluinos
$W^\pm$	W boson	$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^\pm$	charginos
$H^\pm$	charged Higgs		
$\gamma$	photon		
$Z^0$	Z boson		
$h^0 (H_2^0)$	light scalar Higgs	$\tilde{\chi}_1^0, \dots, \tilde{\chi}_4^0$	neutralinos
$H^0 (H_1^0)$	heavy scalar Higgs		
$A^0 (H_3^0, P_0)$	pseudoscalar Higgs		

G.Jungman et al, "Supersymmetric Dark Matter", Phys. Rep. 267 (1996) 195

# Упругое рассеяние

$$\frac{d\sigma}{d|\vec{q}|^2} = \frac{\sigma_0}{4m_r^2 v^2} F^2(|\vec{q}|)$$

$|\vec{q}|$  — импульс, передаваемый ядру

$m_r = m_\chi m_N / (m_\chi + m_N)$  — приведенная масса

$F$  — форм-фактор, понижающий сечение

$$\sigma_0 = \int_0^{4m_r^2 v^2} \frac{d\sigma(q=0)}{d|\vec{q}|^2} d|\vec{q}|^2 \quad \text{--- "point-like" cross section}$$

Спиновое взаимодействие (SD)

$$\sigma_0 = \frac{32}{\pi} G_F^2 m_r^2 \Lambda^2 J(J+1)$$

$$\Lambda = \frac{1}{J} (a_p \langle S_p \rangle + a_n \langle S_n \rangle)$$

$$F^2(|\vec{q}|) = S(|\vec{q}|) / S(0)$$

сложная форма

Скалярное взаимодействие (SI)

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

$$f_p \approx f_n \quad \text{--- но не всегда!}$$

$$F(Q) \propto \exp(-Q)$$

простая форма

## unpaired proton

Isotope	Abundance(%)	$\lambda^2 J(J + 1)$
$^1\text{H}$	100	0.750
$^7\text{Li}$	92.5	0.411
$^{19}\text{F}$	100	0.647
$^{23}\text{Na}$	100	0.041
$^{27}\text{Al}$	100	0.087
$^{35}\text{Cl}$	75.8	0.036
$^{51}\text{V}$	99.8	0.167
$^{69}\text{Ga}$	60.1	0.021
$^{71}\text{Ga}$	39.9	0.089
$^{75}\text{As}$	100	0.000
$^{93}\text{Nb}$	100	0.162
$^{107}\text{Ag}$	57.8	0.054
$^{109}\text{Ag}$	48.2	0.057
$^{127}\text{I}$	100	0.023

## unpaired neutron

Isotope	Abundance(%)	$\lambda^2 J(J + 1)$
$^3\text{He}$	$1.3 \times 10^{-4}$	0.928
$^{29}\text{Si}$	4.7	0.063
$^{67}\text{Zn}$	4.1	0.073
$^{73}\text{Ge}$	7.8	0.065
$^{99}\text{Ru}$	12.7	0.039
$^{101}\text{Ru}$	17.0	0.049
$^{111}\text{Cd}$	12.8	0.072
$^{113}\text{Cd}$	12.2	0.079
$^{115}\text{Sn}$	0.4	0.173
$^{117}\text{Sn}$	7.7	0.205
$^{129}\text{Xe}$	26.4	0.124
$^{131}\text{Xe}$	21.2	0.055

J.Ellis and R.A.Flores, Phys.Lett.B 263 (1991)

Method	Nucleus	$\eta_A$
Odd Group	$^1\text{H}$	3
Odd Group	$^3\text{He}$	0.41
Odd Group	$^{17}\text{O}$	0.0047
Odd Group	$^{19}\text{F}$	0.0071
Odd Group	$^{23}\text{Na}$	$2.8 \times 10^{-4}$
Shell Model	$^{29}\text{Si}$	$2.4 \times 10^{-4}$
Odd Group	$^{35}\text{Cl}$	$1.2 \times 10^{-4}$
Perturbation Theory	$^{39}\text{K}$	$2.1 \times 10^{-4}$
Shell Model	$^{73}\text{Ge}$	$2.0 \times 10^{-4}$
Shell Model	$^{93}\text{Nb}$	$1.6 \times 10^{-4}$
IBFM	$^{131}\text{Xe}$	$1.7 \times 10^{-5}$

$^7\text{Li} = 0.08$

Table 7. Nuclear dependence in comparison of spin and scalar cross-sections. Values for the spin moments are from previous discussion in this section.

Obviously, the question of theoretical expectation for the relative strengths of the scalar and spin couplings is a model-dependent one. However, since the two detection schemes may involve significantly different detection strategies, estimates of the relative importance of the two interactions are needed for developing these strategies. Perhaps the best hints can be obtained by broad numerical surveys of supersymmetric parameter space [298], and these will be discussed later in Section 11. Here, we give a brief analytic comparison of the spin and scalar interactions in the MSSM, but it should be kept in mind that there are significant model dependencies that cannot be taken into account by such a discussion.

It is worthwhile to separate the model-dependent factors from the nuclear physics as much as possible. The nuclear dependence of the  $\Lambda^2$  factor in the spin cross section is not easily separated from the model dependence. But we will write

$$\frac{\sigma_{0\ spin}}{\sigma_{0\ scalar}} = \eta_A \left[ a_p \frac{\langle S_p \rangle}{S_T} + a_n \frac{\langle S_n \rangle}{S_T} \right]^2 \left[ \frac{Z f_p}{\sqrt{2} G_F} + \left( 1 - \frac{Z}{A} \right) \frac{f_n}{\sqrt{2} G_F} \right]^{-2}, \quad (7.41)$$

where the nuclear dependence is given mainly by the factor

$$\eta_A = \frac{4S_T^2 J(J+1)}{A^2}, \quad (7.42)$$

and  $S_T = |\langle S_p \rangle| + |\langle S_n \rangle|$ . In the odd-group model,  $S_T^2/J^2$  is precisely the parameter  $\lambda^2$  of Ref. [298]. In more general nuclear calculations it can differ from the odd-group-model value. Some values of  $\eta_A$  are given in Table 7.

In order to proceed, assume that one type of nucleon dominates the spin-dependent interaction. As a numerical example, we will take the case of a  $B$ -ino in the large squark-mass limit (and assume degenerate squark masses), for which [275]

$$a \simeq 0.1 \frac{m_{\tilde{W}}^2}{m_{\tilde{q}}^2}. \quad (7.43)$$

For the scalar interaction, take the numerical example provided by Figure 2 of Ref. [285], where  $m_{\tilde{q}} = 200$  GeV. Thus  $f_p \simeq f_n \simeq 10^{-8}$  GeV $^{-2}$ . With this example, we find

$$\frac{\sigma_{0\ spin}}{\sigma_{0\ scalar}} \approx 250 \eta_A. \quad (7.44)$$

This implies dominance of the scalar interaction for  $A \gtrsim 20$ , roughly speaking.

Before continuing, we re-emphasize that there is no substitute for a complete SUSY-model calculation in the case of light nuclei, say for definiteness  $A \lesssim 40$ , because we know that the amplitudes involved can vary by an order of magnitude depending on the model parameters. It is also useful to remember that there are significant theoretical uncertainties, both from nuclear physics and from the spin content of the proton, that enter into the spin-dependent cross section [269][275], and theoretical uncertainties from the pion-nucleon sigma term that enter into the scalar cross sections as well. However, the basic conclusion seems to be confirmed by numerical experiments. In surveys of supersymmetric parameter space, one finds that the scalar interaction almost always dominates for nuclei with  $A \gtrsim 30$ . This has been noted in Ref. [285] and more recently stressed in Ref. [298].

# Неупругое рассеяние

Два состояния:  $\chi_+$  и  $\chi_-$  с разностью масс:  $\delta = m_{\chi_+} - m_{\chi_-}$

Рассеяние возможно в случае ( $\beta = v/c$ ):

$$\delta < \frac{\beta^2 m_\chi m_N}{2m_\chi + m_N}$$

Для примера:  $\beta c = 220$  км/с,  $m_\chi = 100$  ГэВ/с<sup>2</sup>

$$\delta_{Ge} = 11 \text{ кэВ} \text{ и } \delta_I = 15 \text{ кэВ}$$

Тогда если  $\delta = 13$  кэВ, сигнал в DAMA будет, а в CDMS — нет.



# Неупругое рассеяние: DAMA vs CDMS ( $\sim 4\text{кгGe} + \text{Si}$ )

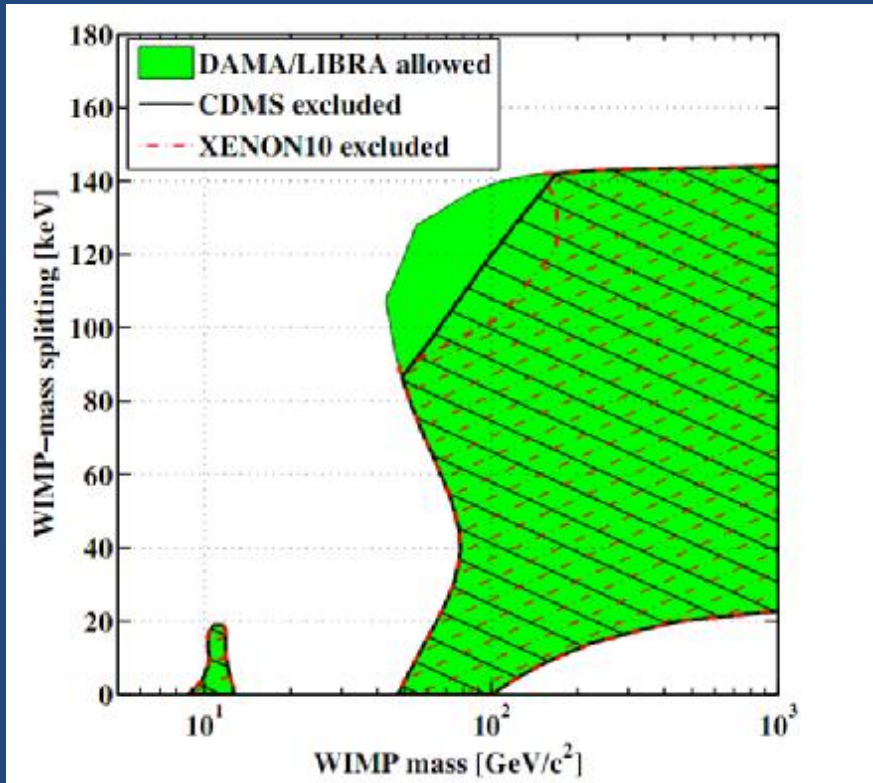


TABLE V. Breakdown of the events in the Ge WIMP-search data as we apply each cut. One event with a recoil of 64 keV passes all of the cuts in the current analysis.

	Initial	Current
All events	968 680	968 680
Not random trigger	940 619	940 619
Analysis thresholds (Sec. V B 10)	79 655	79 460
Singles (Sec. V B 8)	20 715	20 907
Data quality (Sec. V B 1)	18 852	19 027
Pile up (Secs. V B 2 and V B 3)	17 622	17 793
Muon veto (Sec. V B 7)	17 171	17 339
Ionization threshold (Sec. V B 6)	14 697	14 835
Fiducial volume (Sec. V B 4)	7 187	7 615
Nuclear-recoil band (Sec. V B 5)	29	23
Phonon timing (Sec. V B 9)	0	1

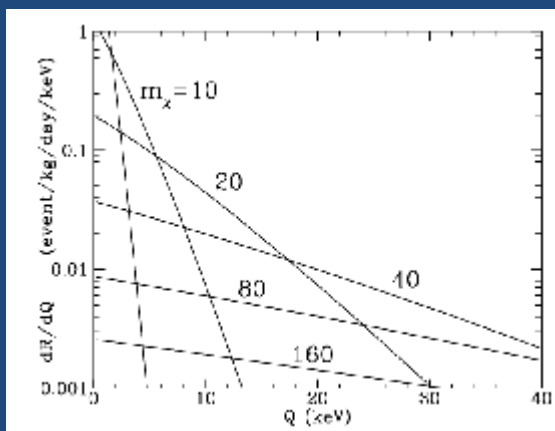
D.Akerib et al, Ph.Rev. D 72 0520009 (2005)

CDMS-II: Z.Ahmed et al, arXiv:09123592v1

Xe (Xe100, LUX) и W (CaWO<sub>4</sub>, CRESST) --- перекроют DAMA, если WIMP достаточно тяжелые

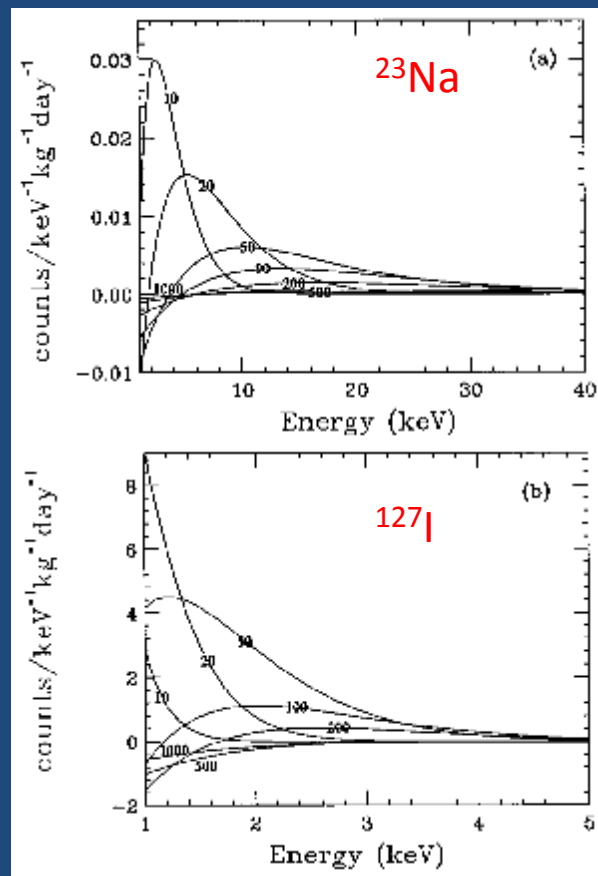
# ЯДРА ОТДАЧИ: СПЕКТР, ГОДОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ

Форма спектра ядер отдачи  $^{73}\text{Ge}$   
 $\sigma_0 = 4 \times 10^{-36} \text{ см}^2$



G.Jungman et al,  
Ph.Rep. 267 (1996)

Sarsa Ph.Rev. D56 4 (1997)



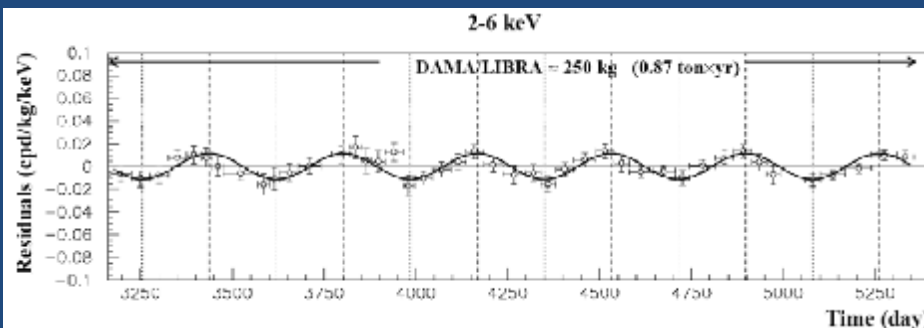
Орбитальная скорость Солнца  $V_{\odot} \sim 230 \text{ км/с}$   
 Орбитальная скорость Земли  $V_{\oplus} \sim 30 \text{ км/с}$   
 Угол наклона  $\delta \sim 31^\circ$

$$V_r(t) = V_{\odot} + V_{\oplus} \sin \delta \cos[\omega(t - t_0)]$$

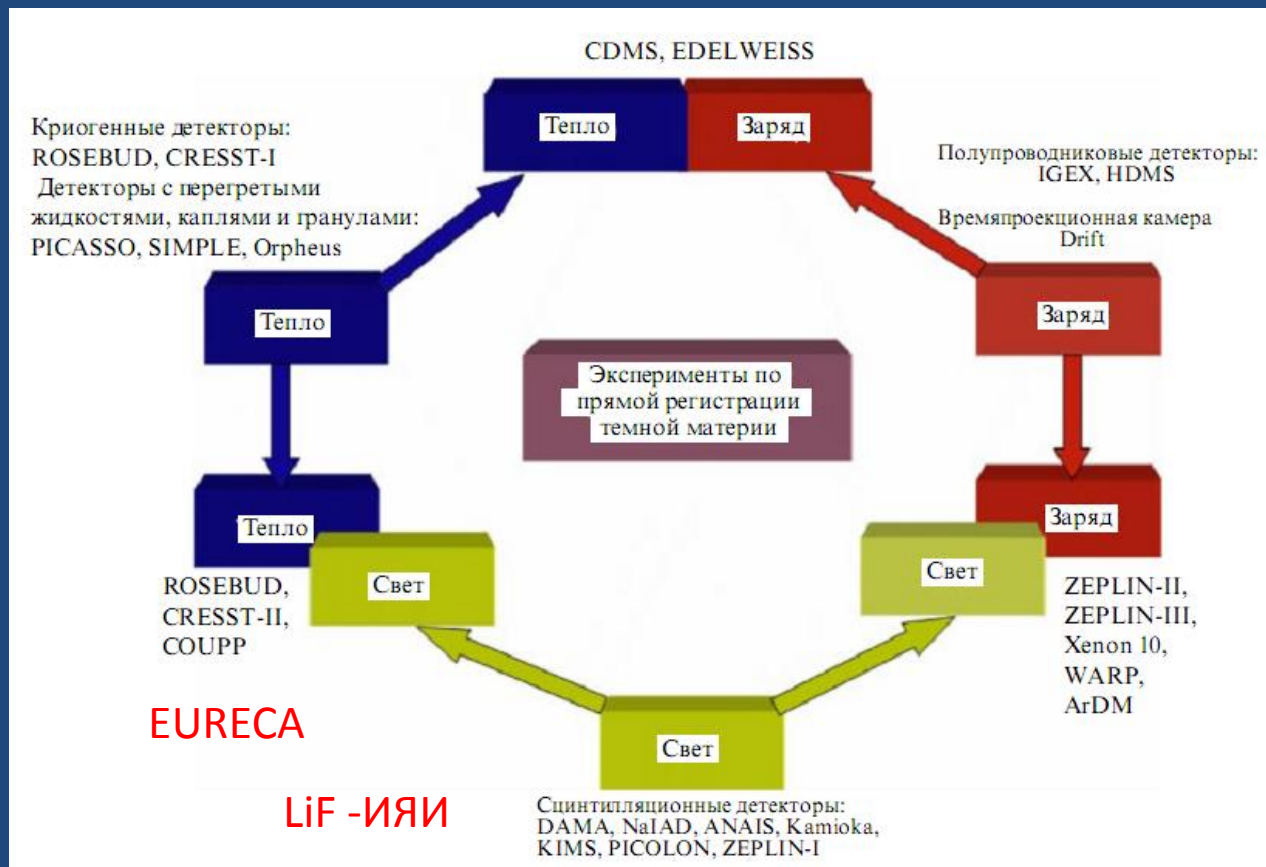
Скорость движения Земли вокруг гало

$\omega = 2\pi/365 \text{ [1/сут]}, t_0 = 2 \text{ июня}$   
 $V_{\text{max}} = 245 \text{ км/с}, V_{\text{min}} = 215 \text{ км/с}$

DAMA/LIBRA, 2-6 кэВ,  $A \sim [0.01 \pm 0.01] \text{ отсч/кг/сут}$



# Методы прямого детектирования



## Type of experiments

☀ Relying on reduction and interpretation of the background

measure heat and ionization:

**CDMS-II** 19 Ge ( $\sim 230$  g each) crystals at Soudan (2100 mwe)

**EDELWEISS-II** 10 Ge (400 g each) crystals at Modane (4800 mwe)

measure heat and scintillation:

**CRESST-II** 9  $\text{CaWO}_4$  ( $\sim 300$  g each) crystals at Gran Sasso (3400 mwe)

measures ionization:

**CoGeNT** 440 g Ge crystal at Soudan (2100 mwe)

measures scintillation:

**KIMS** 103.4 kg CsI crystals at YangYang (2000 mwe)

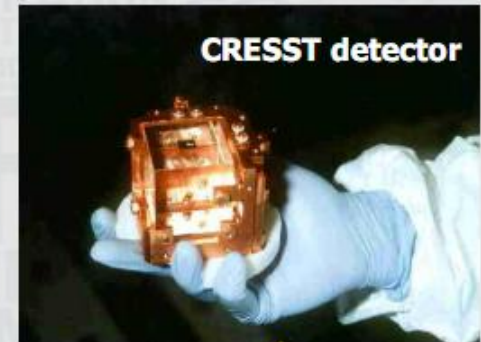
measure scintillation and ionization:

**XENON 100** 62 kg liquid Xenon at Gran Sasso (3400 mwe)

**ZEPLIN-III** 12 kg liquid Xenon at Boulby (2800 mwe)

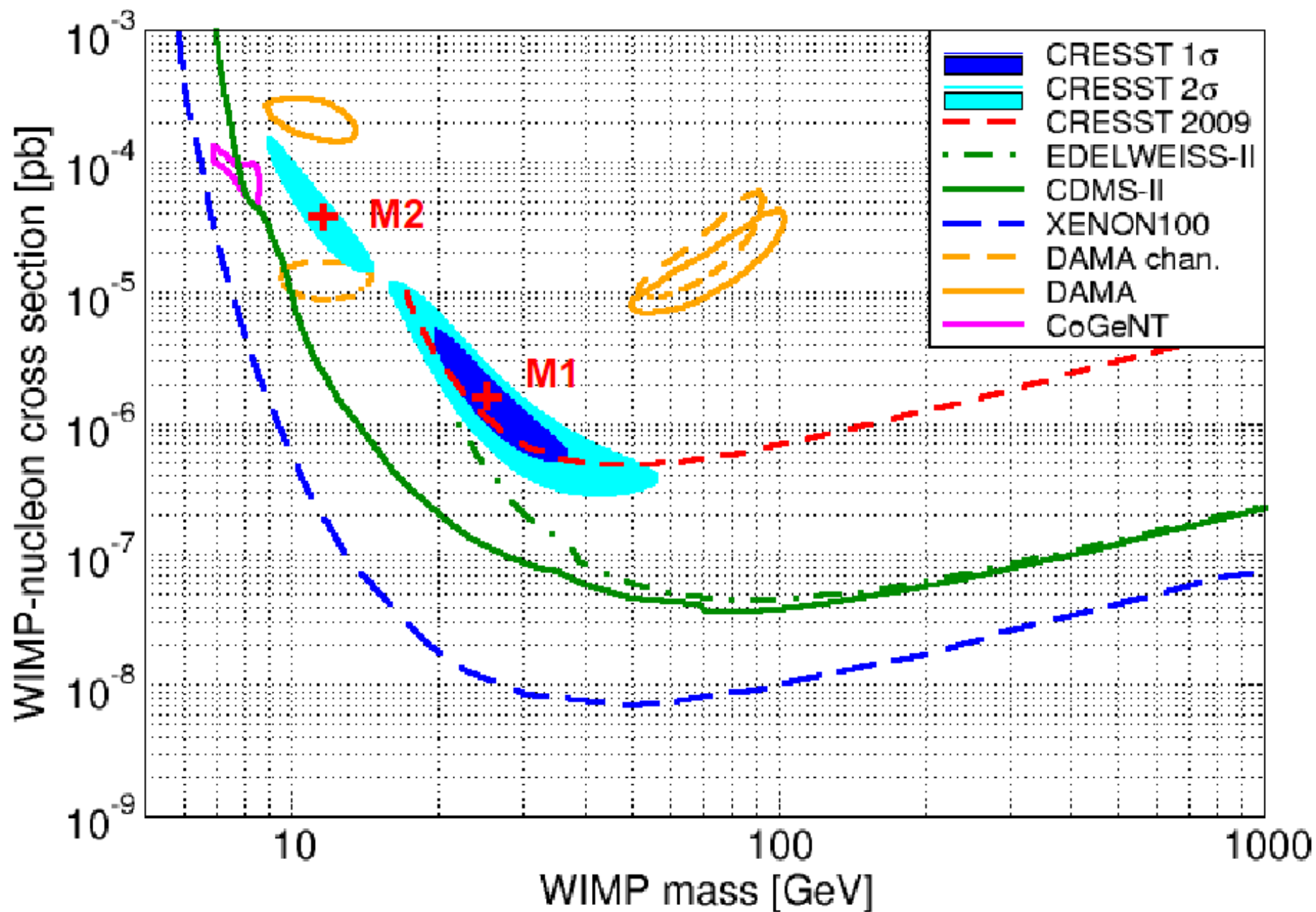
measures bubble nucleation:

**SIMPLE** 208+215 g superheated liquid  $\text{C}_2\text{ClF}_5$  droplets at Bas Bruit (1500 mwe)



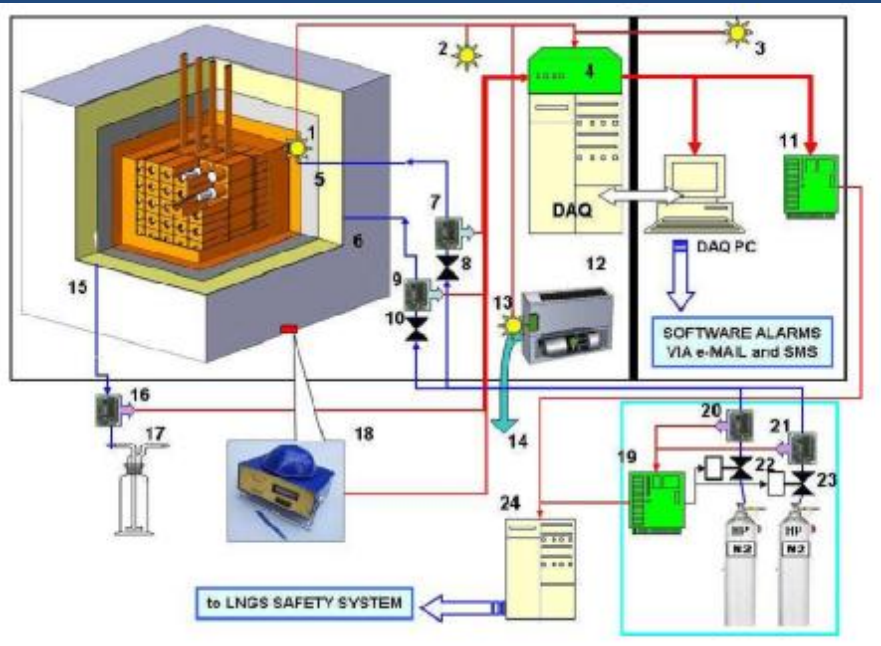
Listen to talks  
by the experiments

...



# DAMA/NaI/LIBRA

Bernabei et al, Eur. Phys. J. C 56 (2008)



25 кристаллов NaI по 10 кг  
Время набора ~15 лет

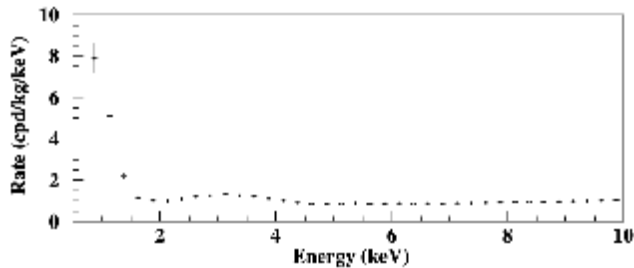
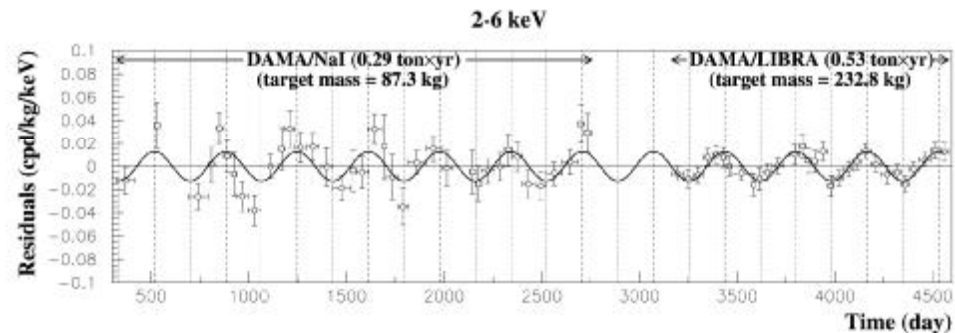
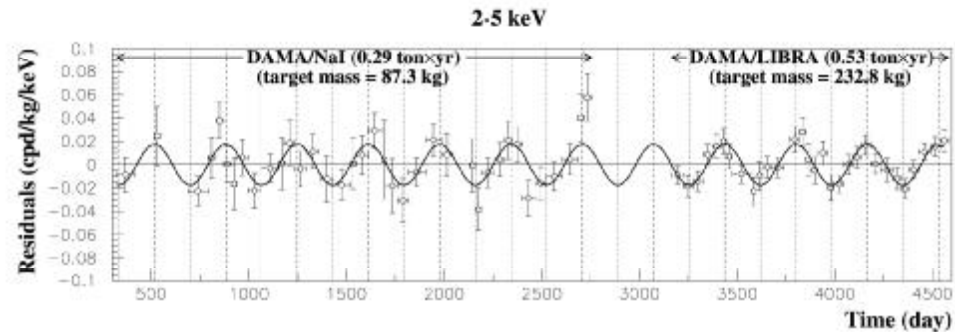
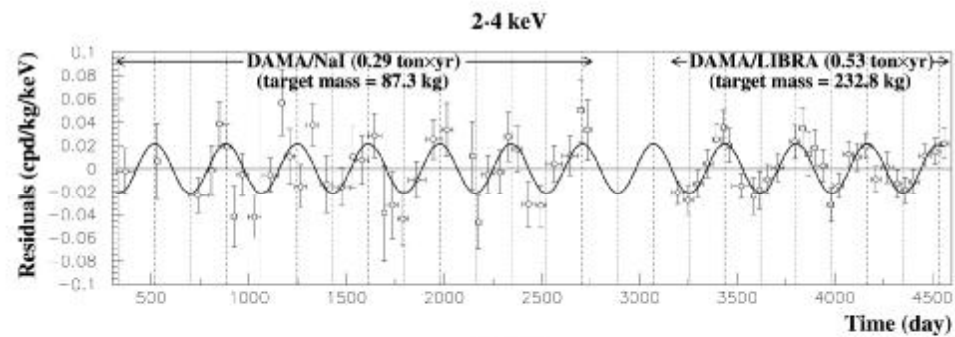


Fig. 1 Cumulative low-energy distribution of the *single-hit* scintillation events (that is each detector has all the others as veto), as measured by the DAMA/LIBRA detectors in an exposure of 0.53 ton  $\times$  yr. The energy threshold of the experiment is 2 keV and corrections for efficiencies are already applied

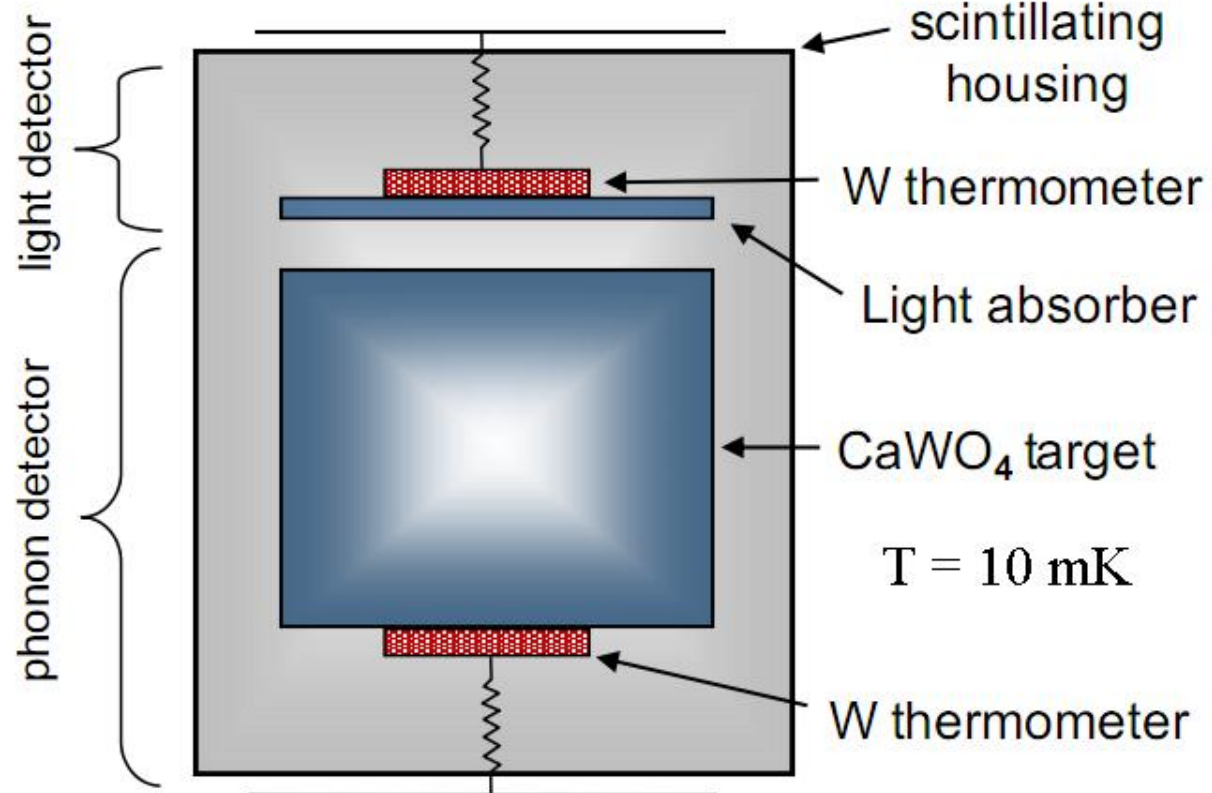
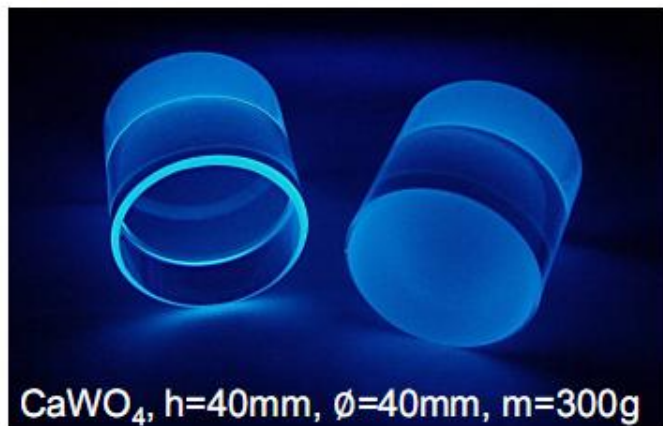


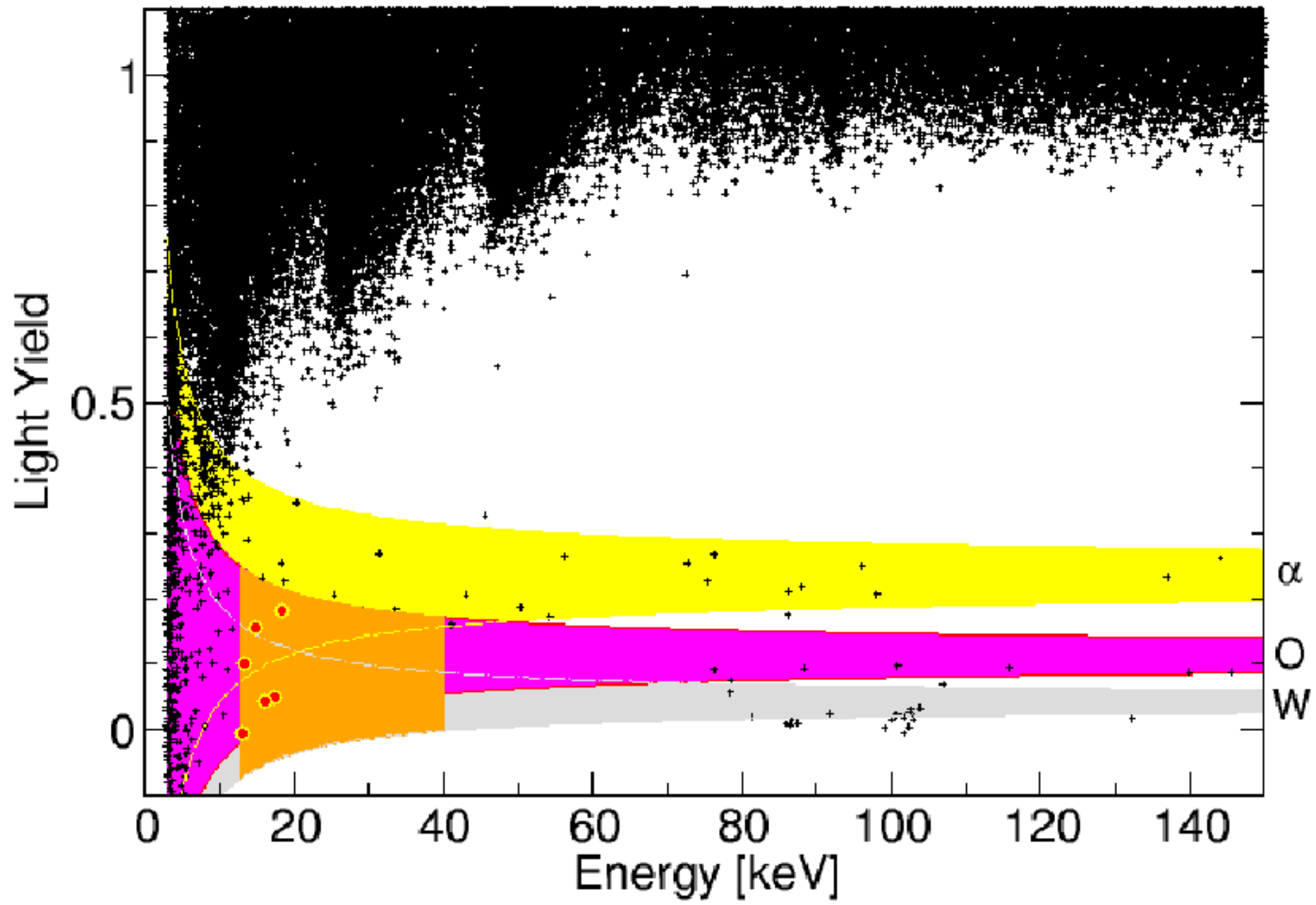
2-6 кэВ, R~1.1 отсчет/кг/сут

2-6 кэВ, A=[0.0114 ± 0.0013] отсчет/кг/сут

## CRESST target:

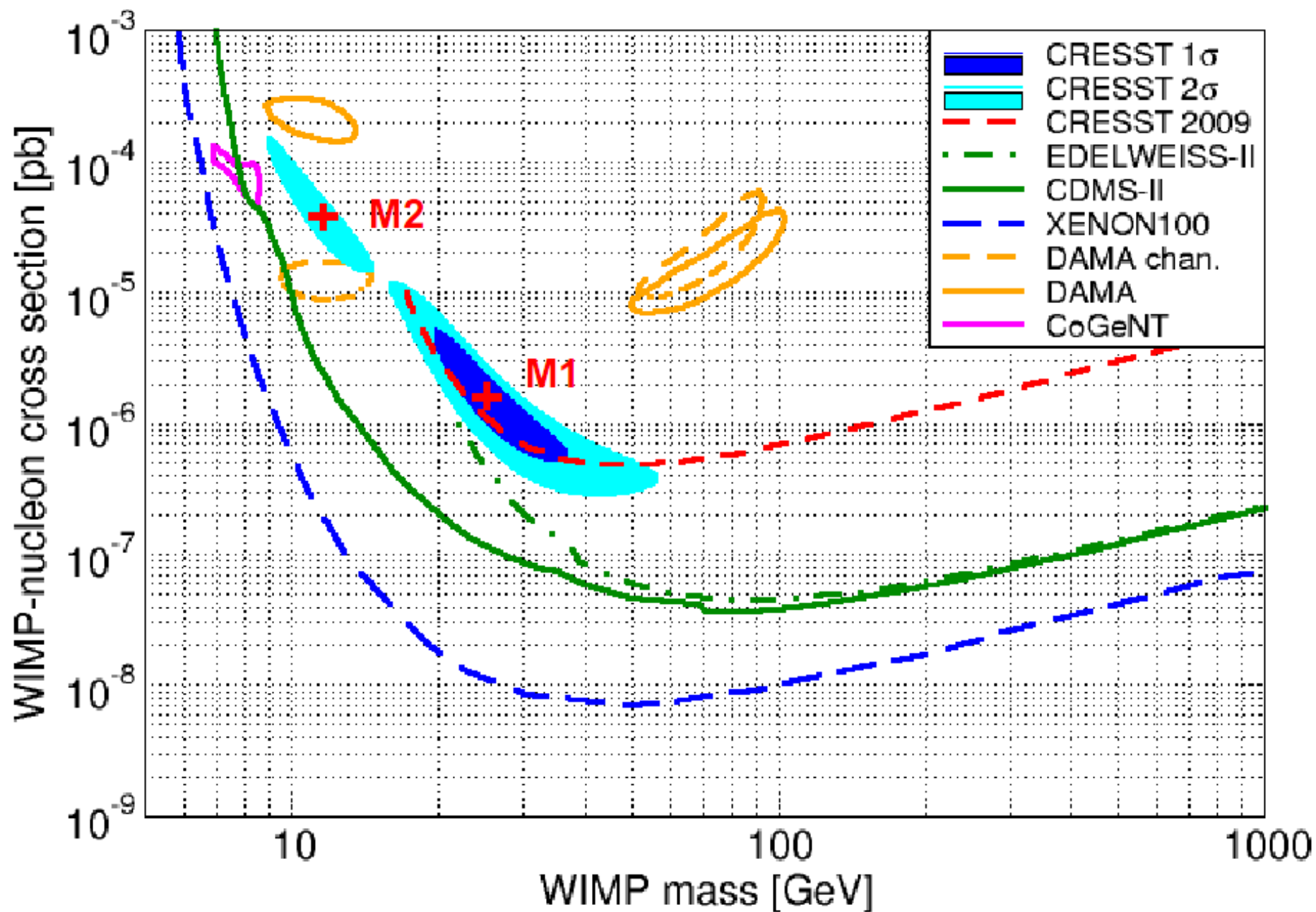
scintillating  $\text{CaWO}_4$  crystals  
up to 33 in the current setup





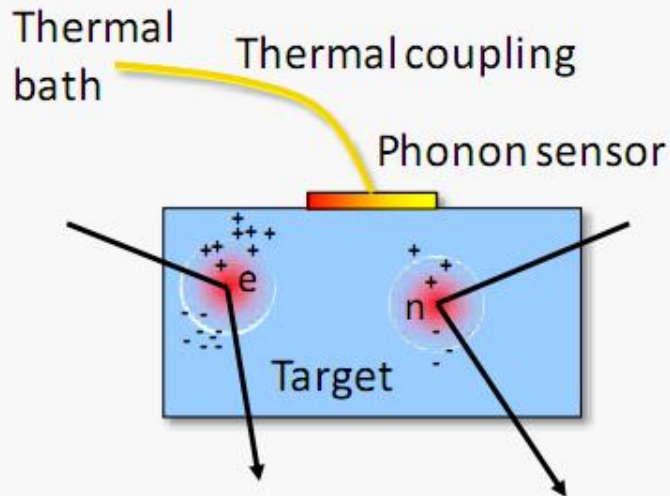


	M1	M2
$e/\gamma$ events	$8.00 \pm 0.05$	$8.00 \pm 0.05$
$\alpha$ events	$11.5^{+2.6}_{-2.3}$	$11.2^{+2.5}_{-2.3}$
neutron events	$7.5^{+6.3}_{-5.5}$	$9.7^{+6.1}_{-5.1}$
Pb recoils	$15.0^{+5.2}_{-5.1}$	$18.7^{+4.9}_{-4.7}$
signal events	$29.4^{+8.6}_{-7.7}$	$24.2^{+8.1}_{-7.2}$
$m_\chi$ [GeV]	25.3	11.6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

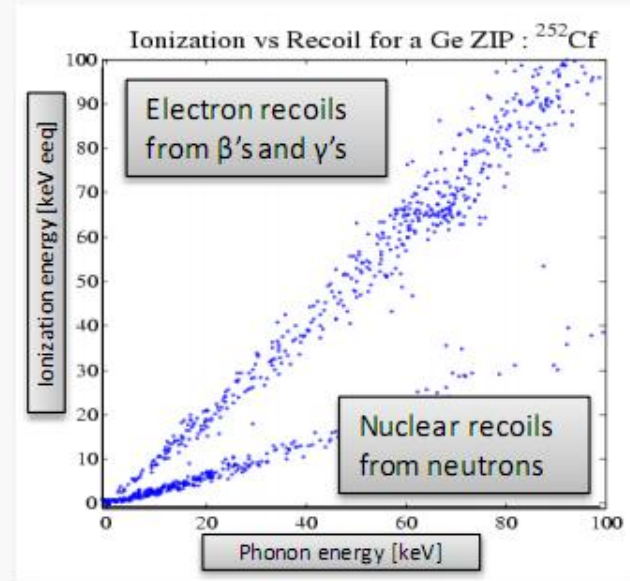
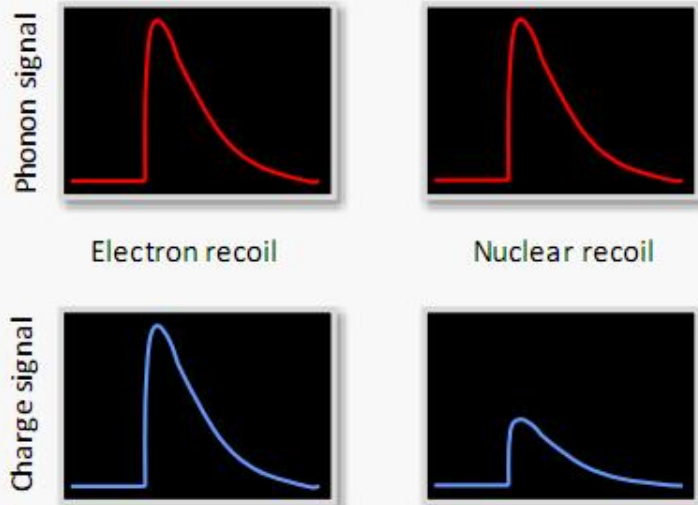


# CDMS Technology

## Operating Principle

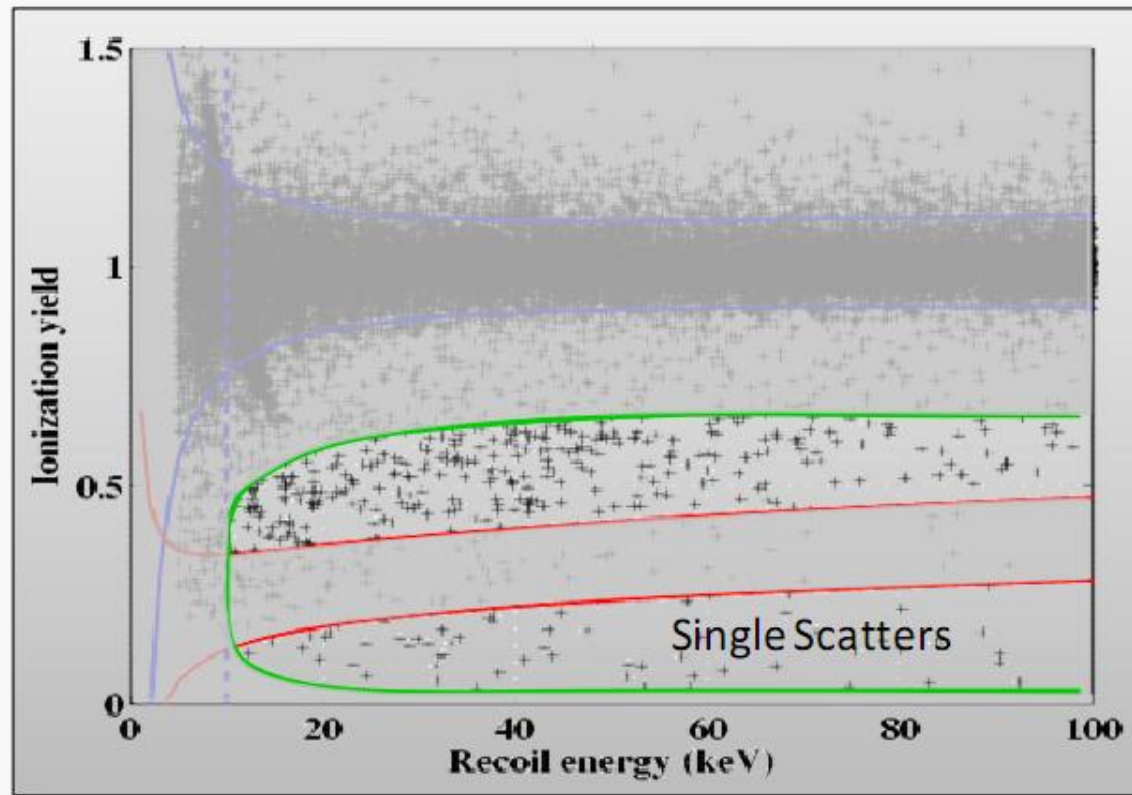


- Phonon signal: measures energy deposition
- Ionization signal: quenched for nuclear recoils (lower signal efficiency)
- Allows us to distinguish potential signal from background

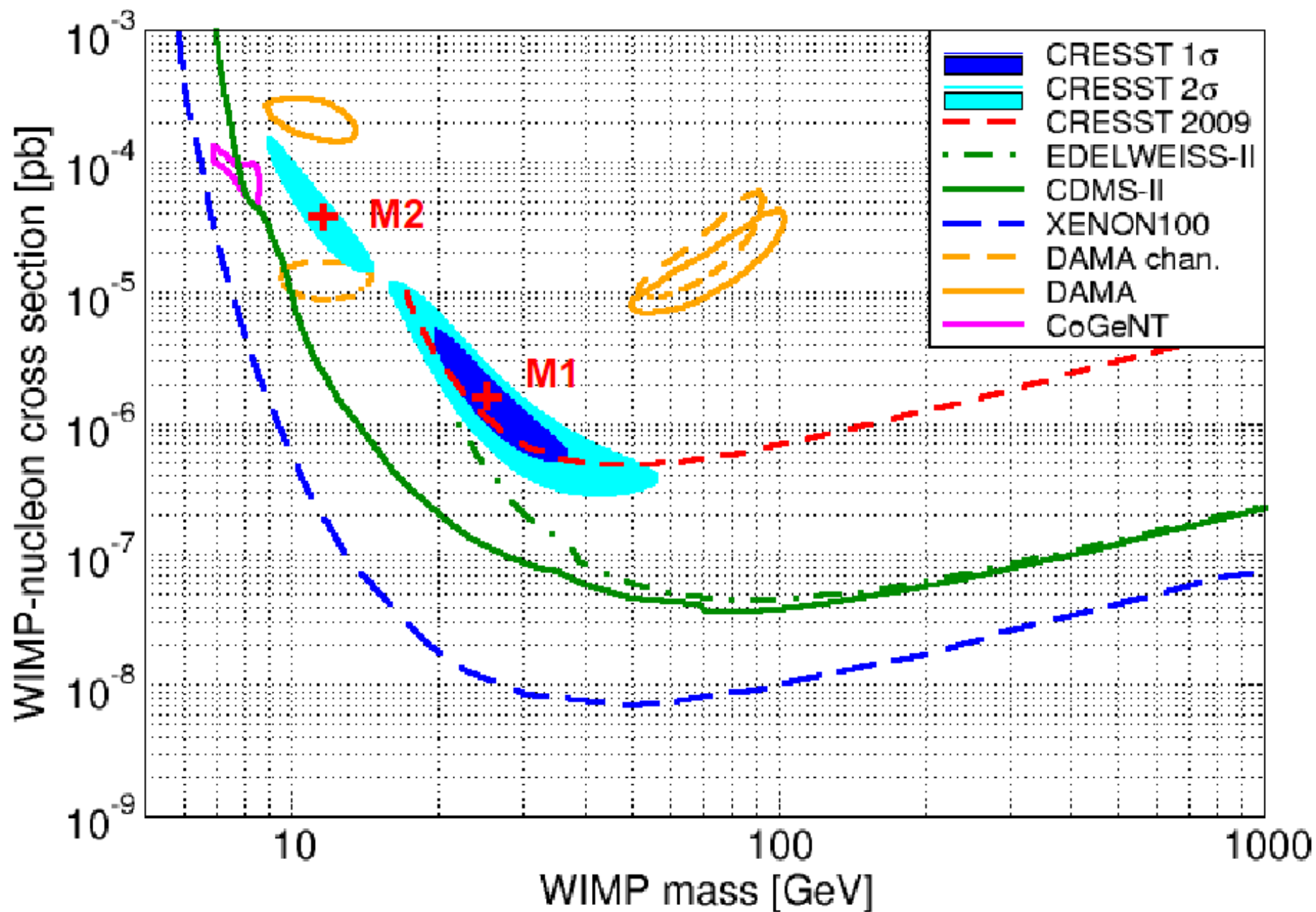


# CDMS – Data Analysis

## Background Estimate – Surface Events, ‘Leakage’



Estimate background from calibration data, single scatters outside NR band, multiple scatters inside and outside NR band



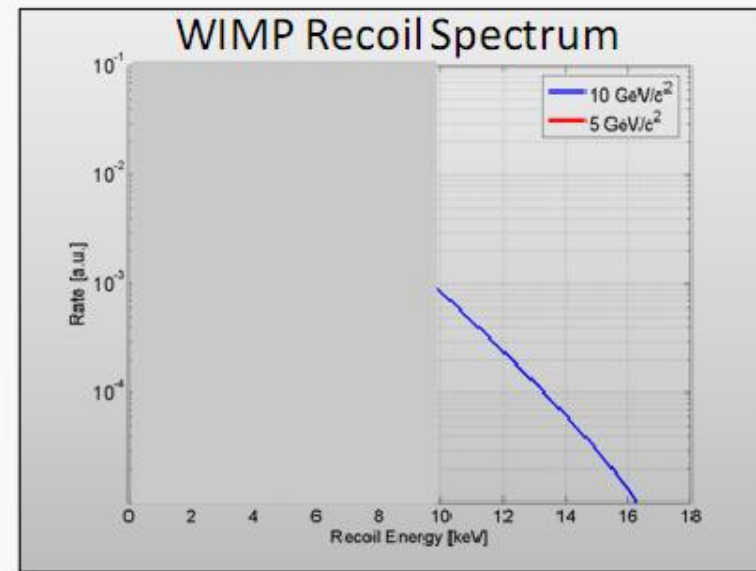
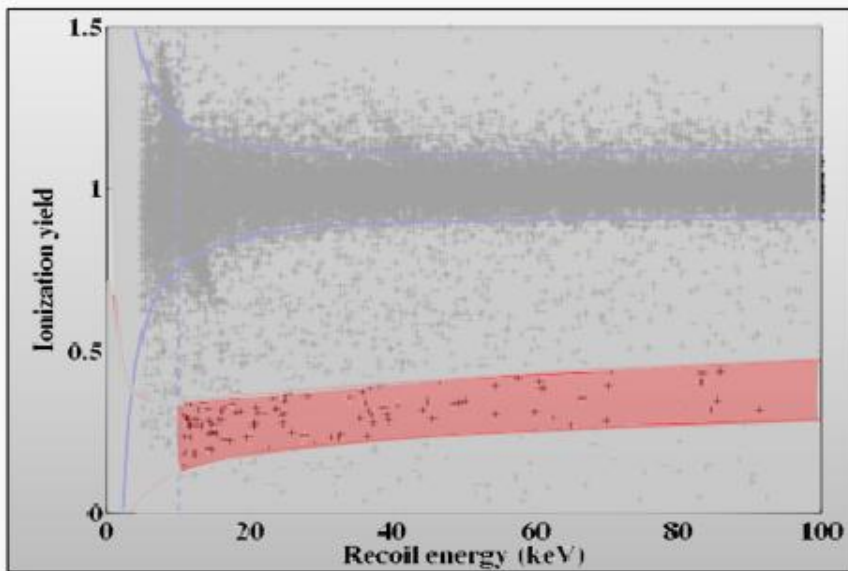
# DAMA/CoGeNT – Low Mass WIMPs?

## Evidence:

- DAMA: annual oscillation signal
- CoGeNT: Exponential rate increase at low energy
- Both have an interpretation as low mass WIMP (< 10 GeV) signal

## What can we (CDMS) do?

- Lower Threshold
- Background increases
- BUT: expected rate shoots up dramatically



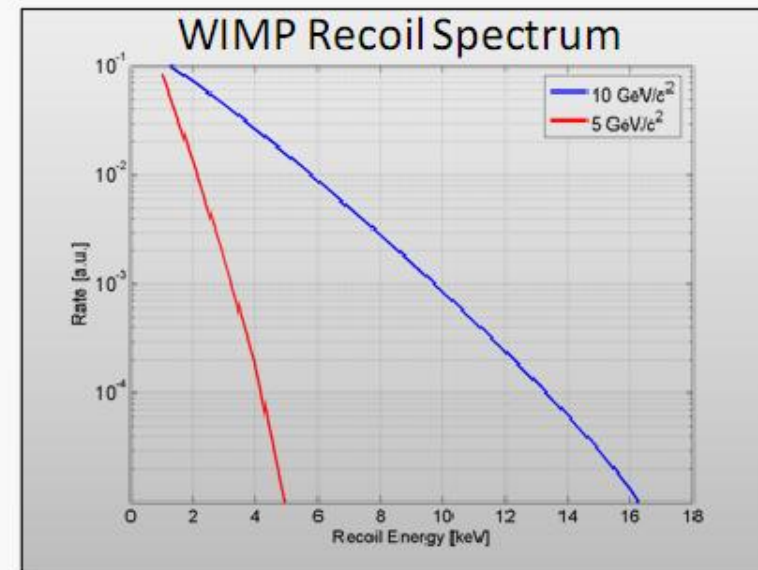
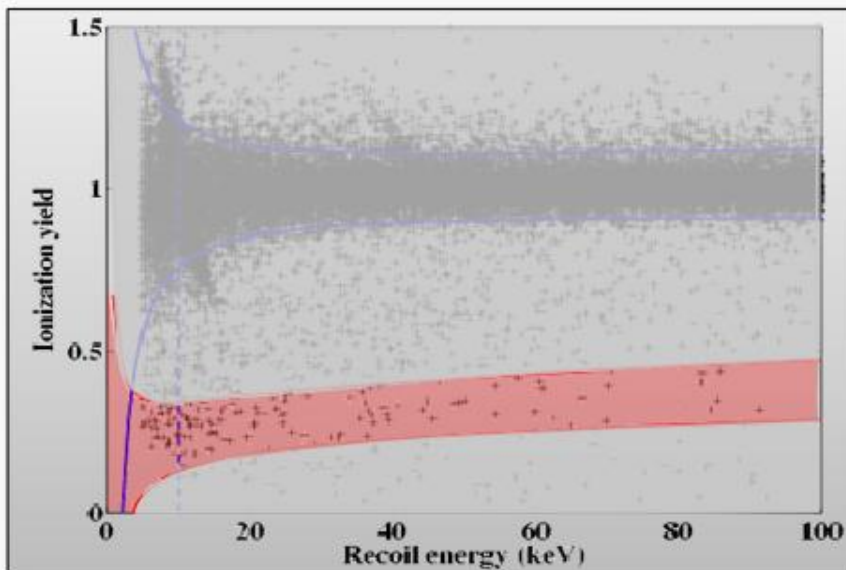
# DAMA/CoGeNT – Low Mass WIMPs?

## Evidence:

- DAMA: annual oscillation signal
- CoGeNT: Exponential rate increase at low energy
- Both have an interpretation as low mass WIMP ( $< 10$  GeV) signal

## What can we (CDMS) do?

- Lower Threshold
- Background increases
- BUT: expected rate shoots up dramatically



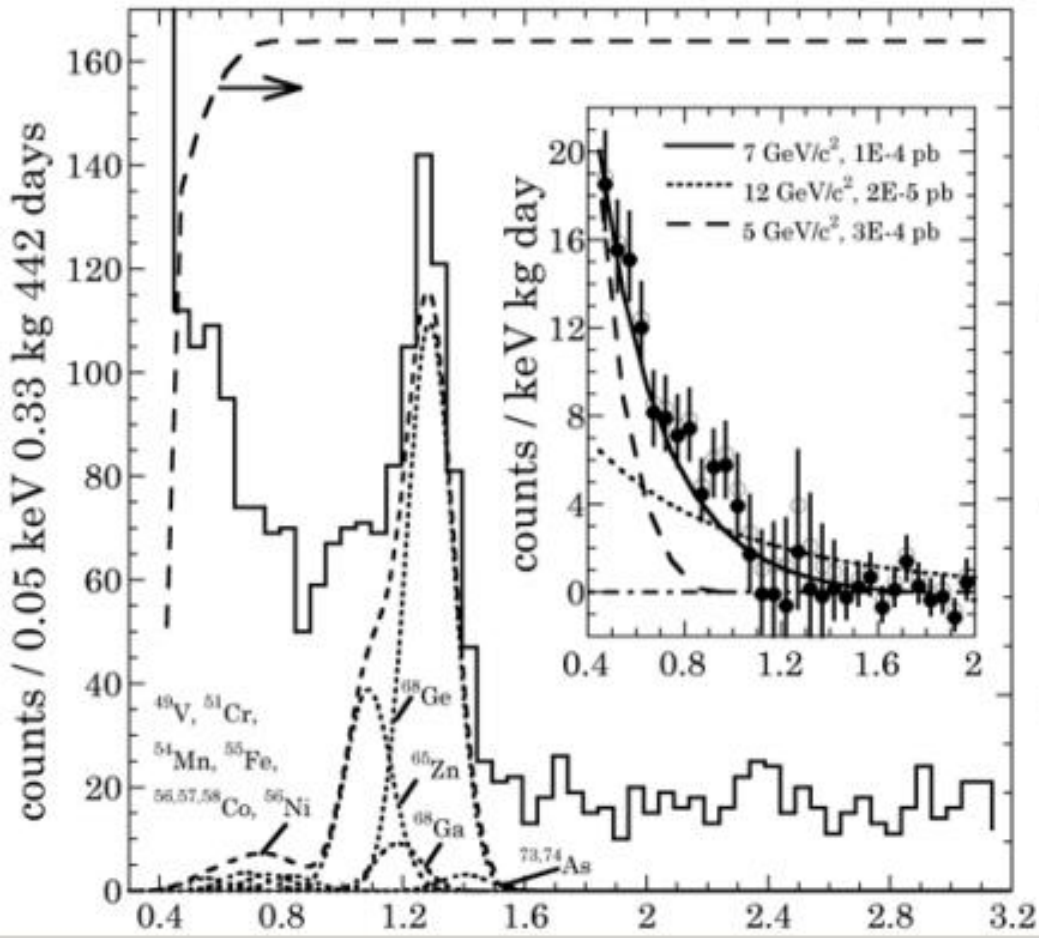
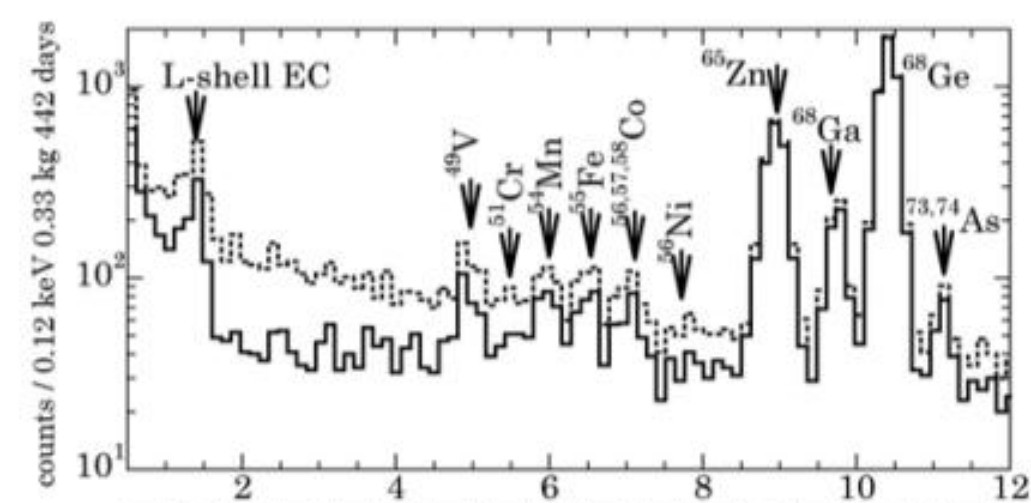
# CoGeNT

p-type Ge детектор

Низкий шум

300 г

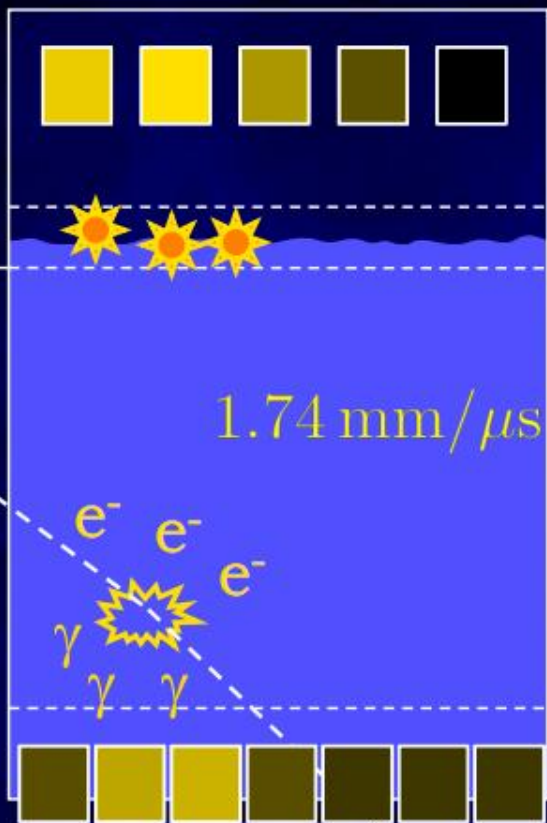
15 мес набора





# Dual-Phase Xenon TPC

top  
PMT array  
(position)



anode (+)

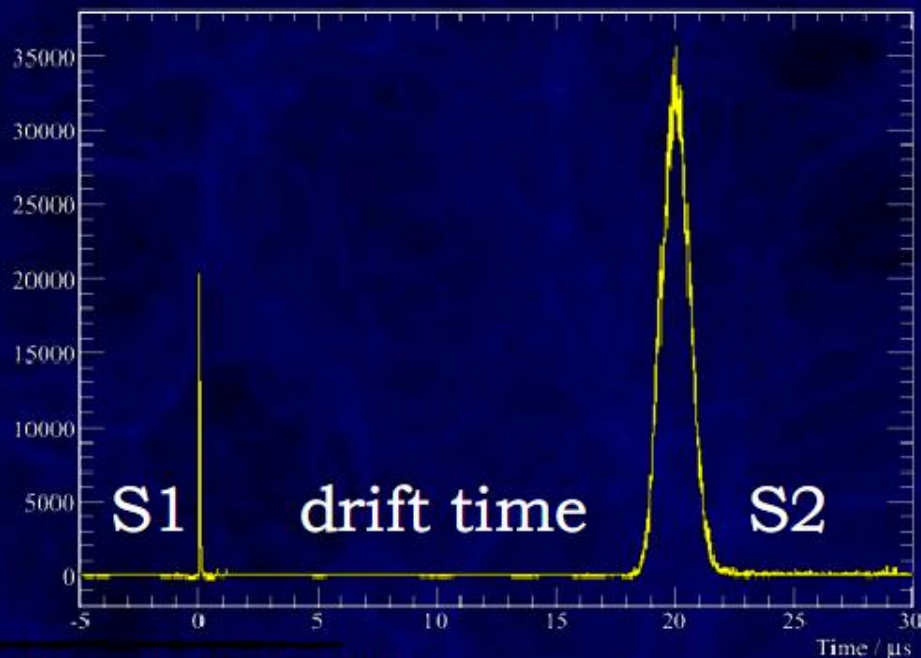
gas xenon

liquid xenon

1.74 mm/ $\mu$ s

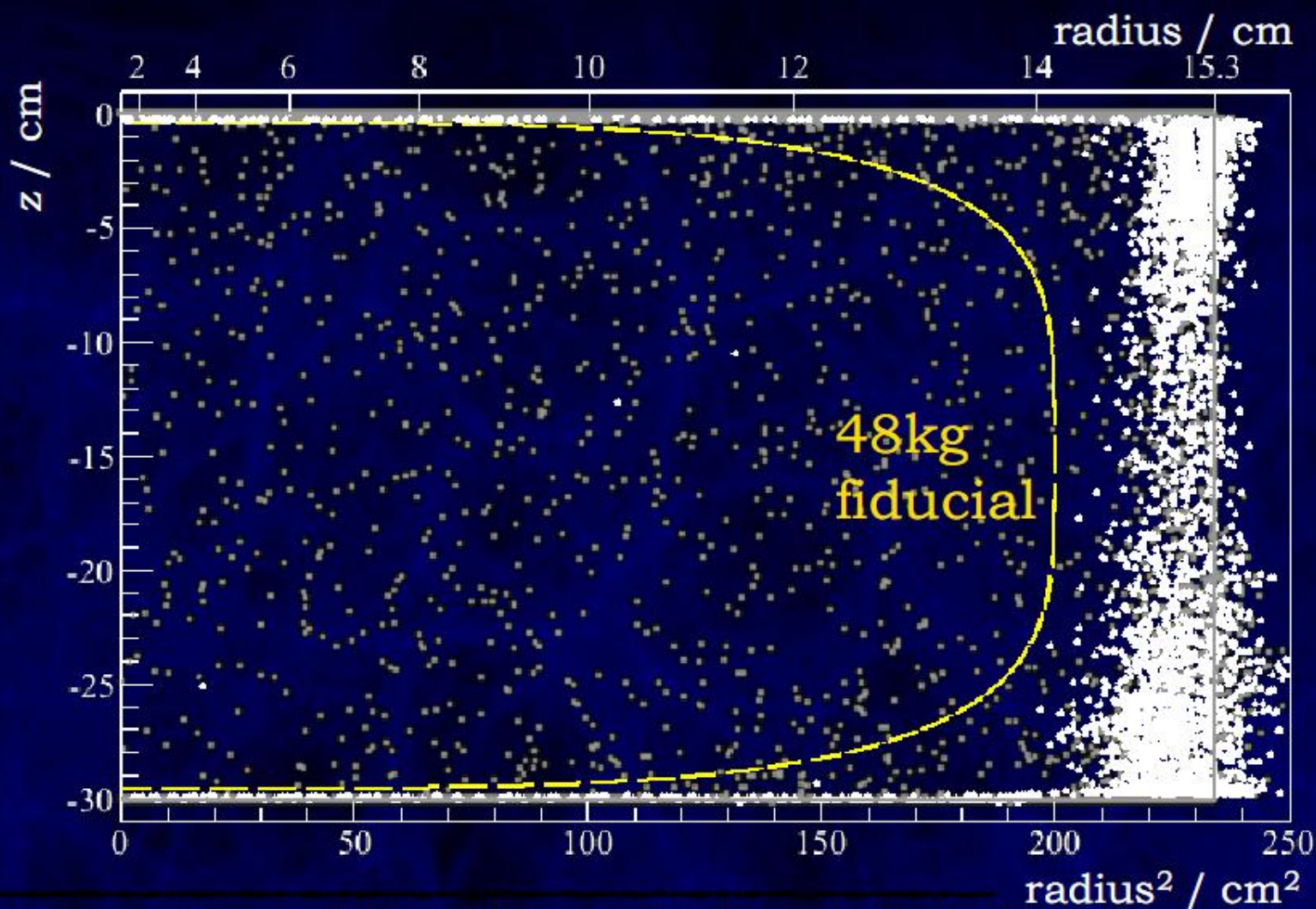
cathode (-)  
bottom  
PMT array  
(S1, S2)

3D position information  
S2 hit pattern:  $\delta r < 3$  mm  
drift time:  $\delta z < 300$   $\mu$ m



# The Power of Fiducialization

background for published run (dominated by  $^{85}\text{Kr}$ )



# Nuclear Recoil Equivalent Energy

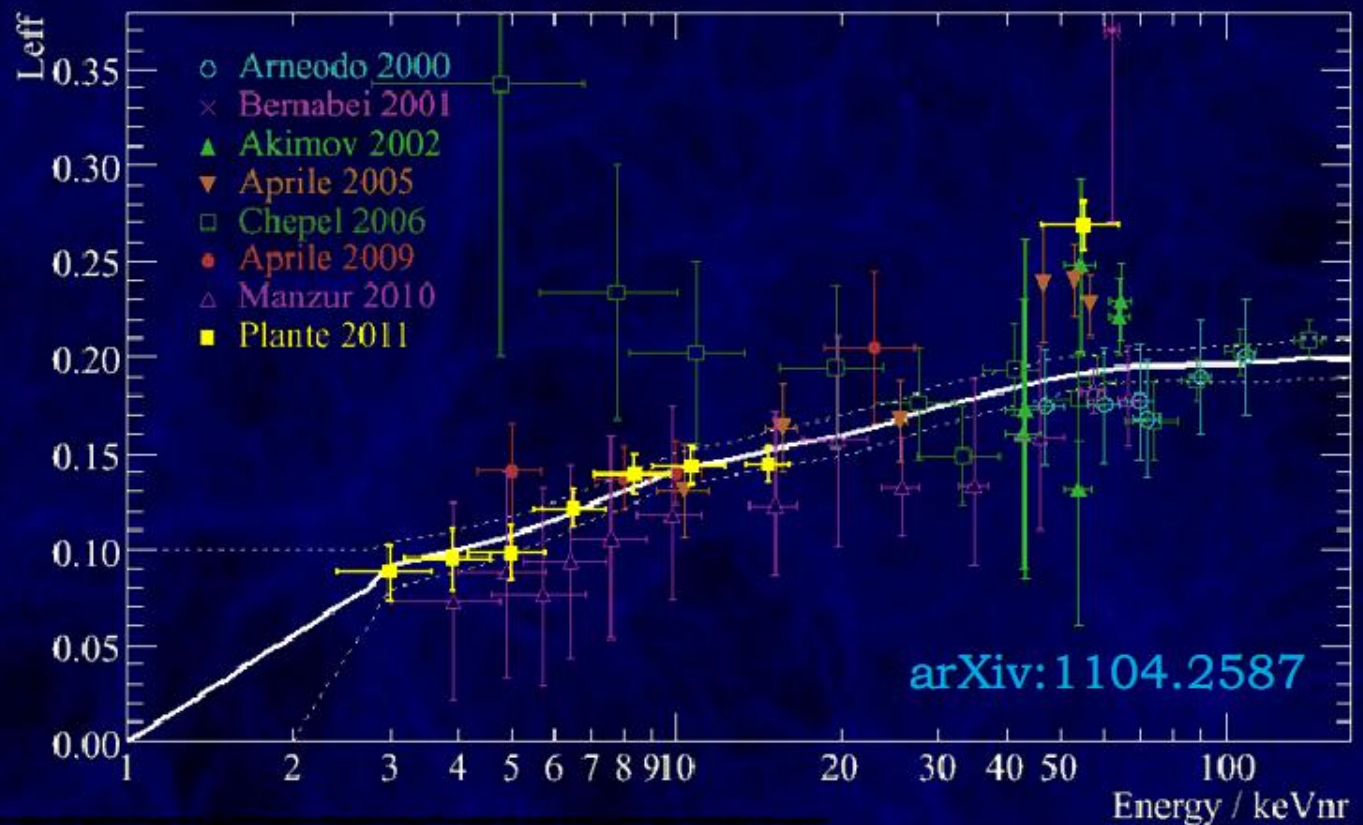
Nuclear Recoil Energy: 
$$E_{nr} = \frac{S1}{L_y} \cdot \frac{S_{ee}}{S_{nr}} \cdot \frac{1}{\mathcal{L}_{eff}}$$

$$L_y(122\text{keV}_{ee}) = (2.2 \pm 0.1) \frac{\text{PE}}{\text{keV}_{ee}}$$

$S_{ee} = 0.58$

$S_{nr} = 0.95$

$\mathcal{L}_{eff}$ : use fit  
to all data  
and take  
into account  
as systematic

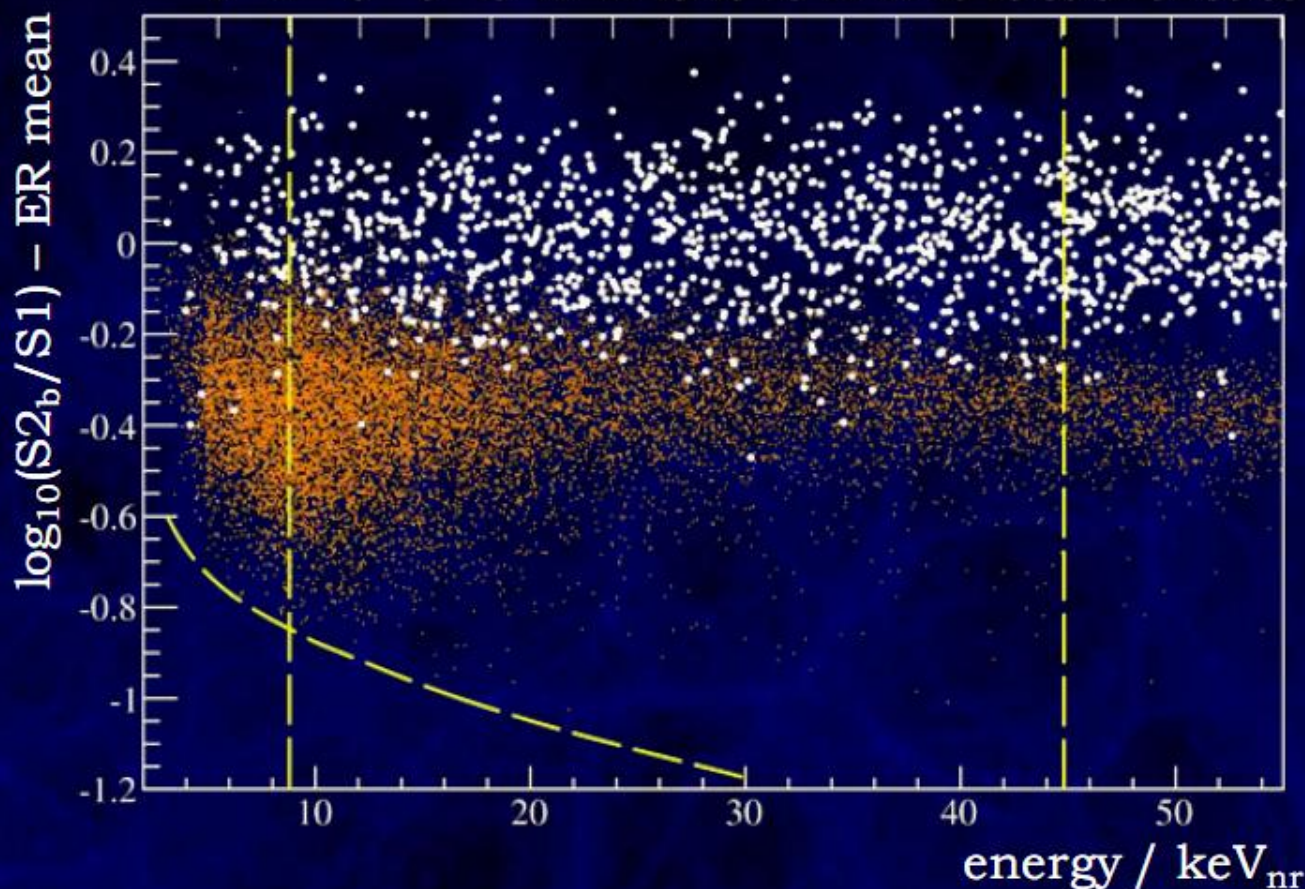


# Discrimination

100.9 live days, 48kg fiducial:

S1 / PE

2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38

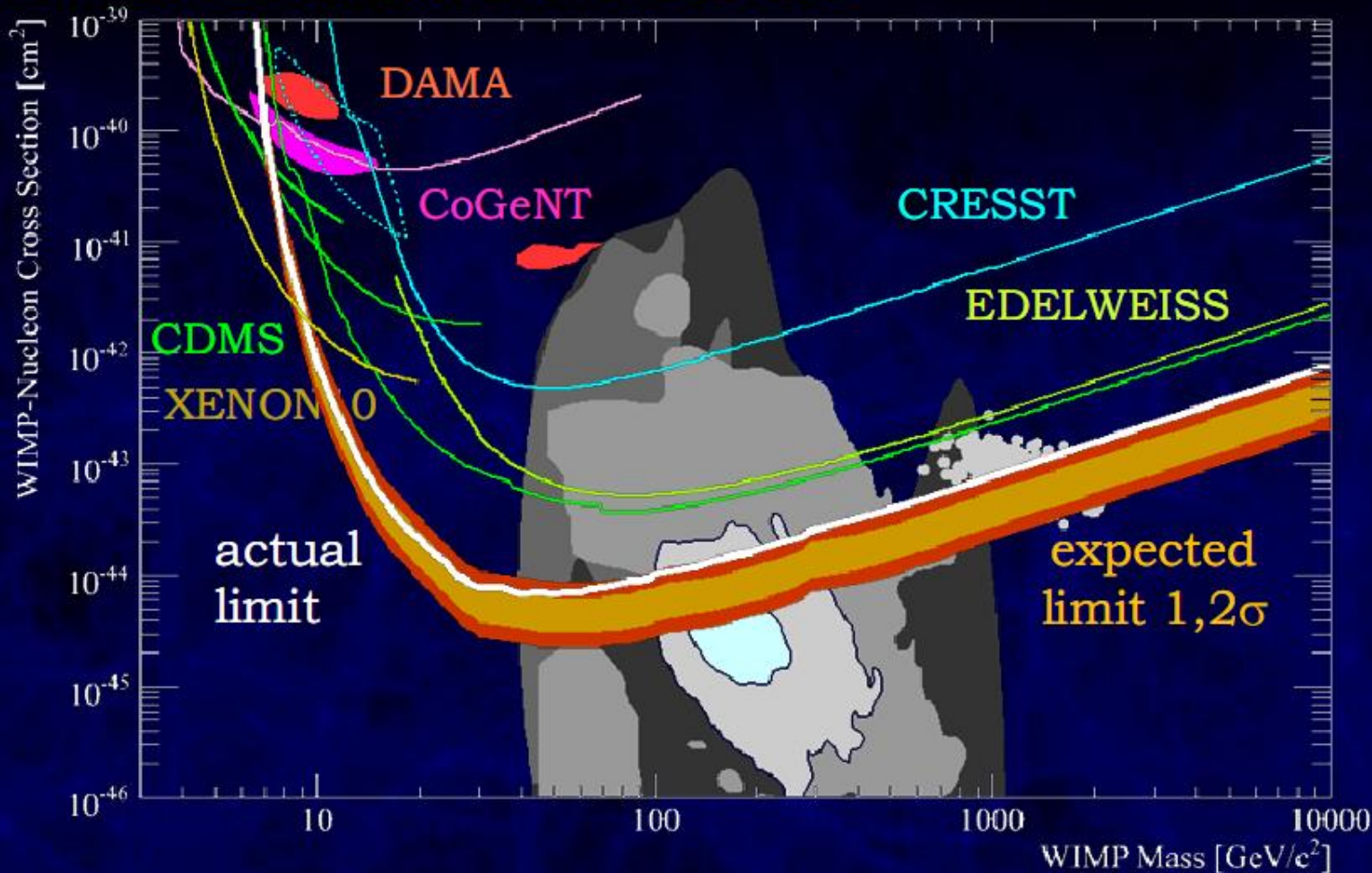


electronic  
recoils  
(background)

nuclear  
recoils  
(calibration)

likelihood analysis: no observation of a signal ( $p_0=31\%$ )

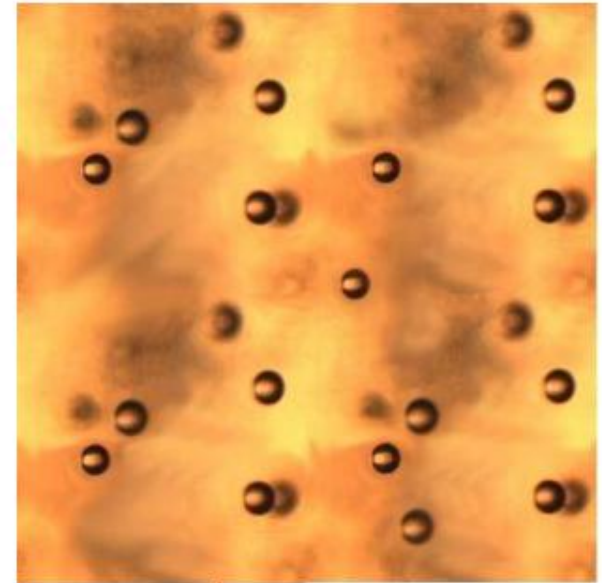
# XENON100 Limit 2011



strongest limit to date; excludes SUSY parameter space  
excludes iDM scattering off I as explanation for DAMA

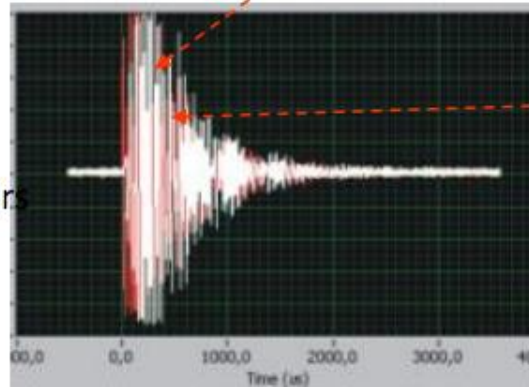
# TAUP 2011 - PICASSO

- 150  $\mu\text{m}$  droplets of  $\text{C}_4\text{F}_{10}$  dispersed in polymerised gel \*
- Droplets superheated at ambient T & P ( $T_b = -1.7^\circ\text{C}$ )
- Radiation triggers phase transition
- Events recorded by piezo-electric transducers
- Operating temperature determines energy threshold



## Main attractive features:

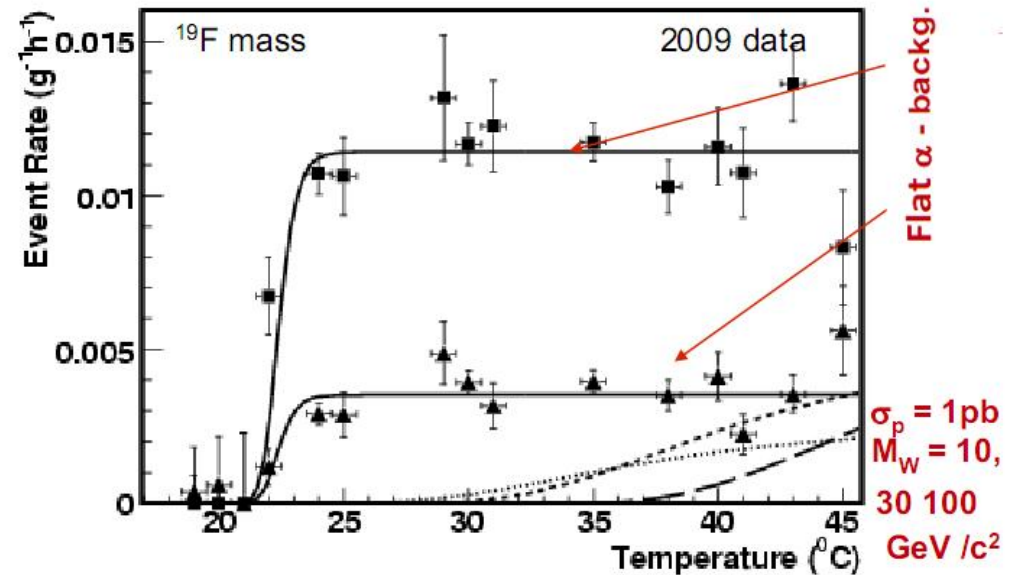
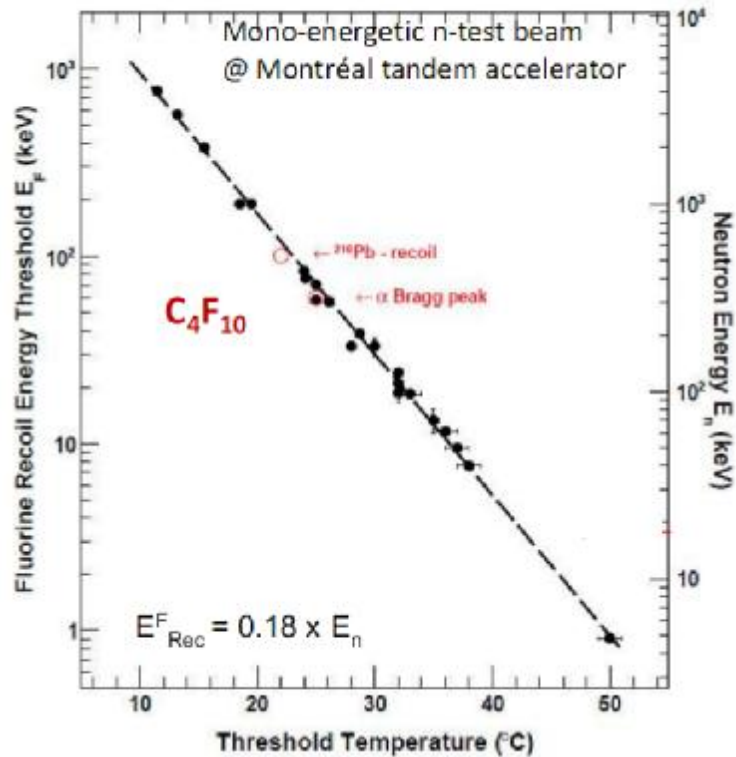
- **low threshold  $45^\circ\text{C} \rightarrow E_{\text{th}} = 2 \text{ keV}$**
- **inexpensive! 0.19 k\$/kg ( $\text{C}_4\text{F}_{10}$ )**
- **insensitive to  $\gamma$  - background**



\* Inspired by personal neutron dosimeters  
@ Bubble Technology Industries, ON

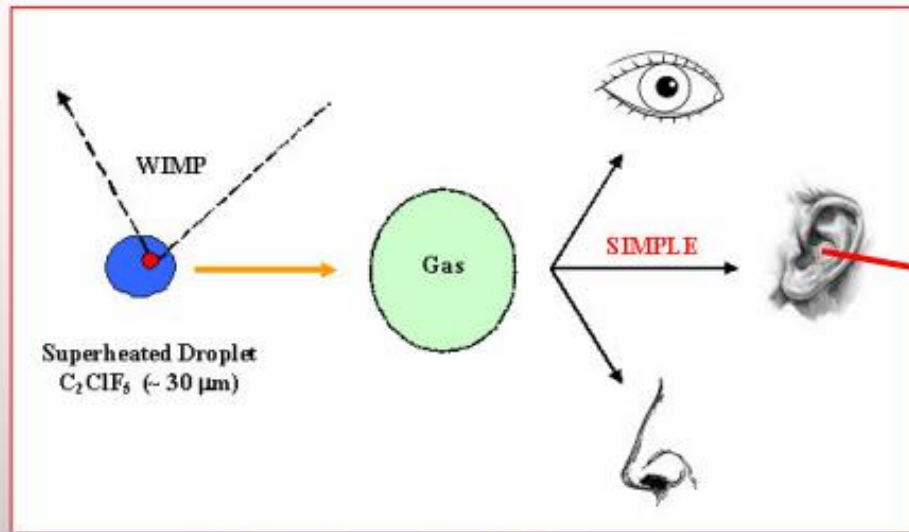


# Calibration of Energy Threshold



Fit WIMP response & flat  $\alpha$  background

# SIMPLE - SDD



( Seitz : Phys. Fluids 1 (1979) 1 )

(i)  $E > E_c = 4\pi r_c^2 \gamma / 3\epsilon$

(ii)  $\Delta E / \Delta x > E_c / \Delta r_c$

key feature : *selective sensitivity*  
tunable (P,T) double threshold device



?



## Phase II SIMPLE

### ➤ Stage 1: Oct 2009 – Feb 2010

- $13.47 \text{ kgd} \leq 2.2 \text{ bar}$
- 9 undiscriminated events  
(analyzed via Feldman-Cousins)

⇒reconstruction/improvement of neutron shield (0.25 evt/kgd)  
⇒improved radio-assays  
⇒new detector efficiency  
⇒fine tuning analysis

### ➤ Stage 2: May 2010 – July 2010

- $6.71 \text{ kgd} \leq 2.2 \text{ bar}$
- zero undiscriminated events



## Recent experimental results

The situation is very exciting ... but confusing:

DAMA/NaI + DAMA/LIBRA 1002.1028 cumulative exposure: 427,000 kg x day (13 annual cycles)  
confirms annual modulation effect at  $8.9 \sigma$  C.L.

CoGeNT, 1002.4703, 18.48 kg x day, excesses of events over the expected background  
1106.0650, after 15 months, confirms annual modulation effect at  $2.8 \sigma$  C.L.

CRESST, several talks, 333 kg x day, excesses of events over the expected background

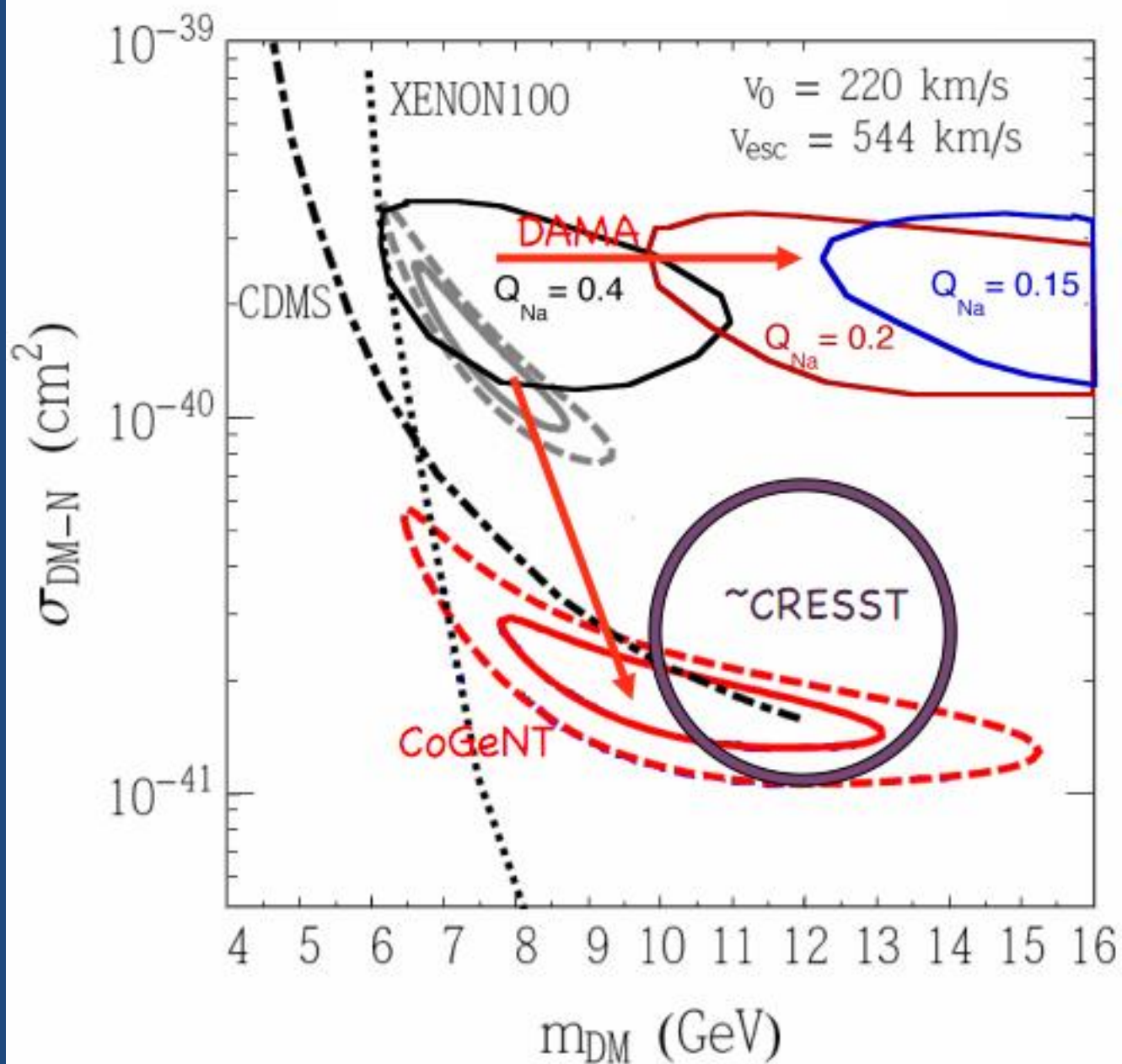
On the contrary, CDMS II 0912.3592 612 kg x day, and energies  $> 10$  keV  
1011.2482 241 kg x day, low-energy reanalysis

XENON 100 1104.2549 1471 kg x day

XENON 10 1104.3088

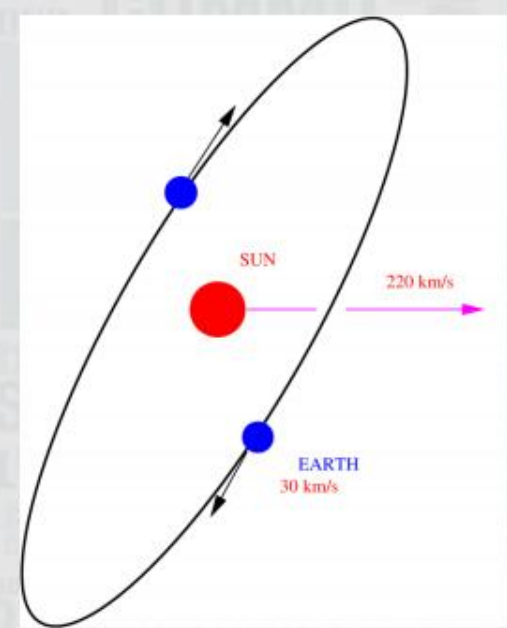
SIMPLE 1106.3014 14.1+13.67 kg x day,

found no evidence for dark matter with  $m_{\text{WIMP}} \sim 10$  GeV



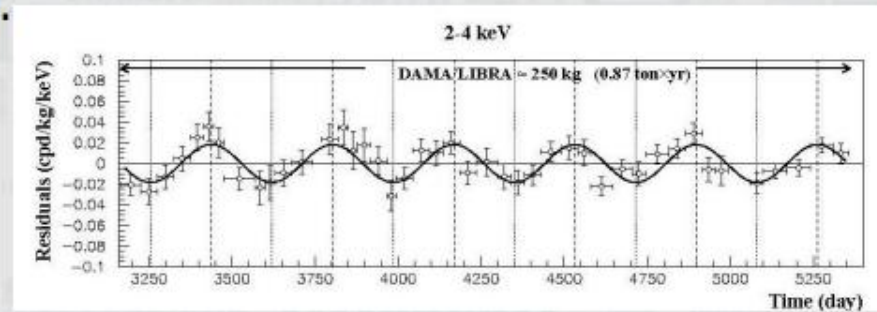
## Annual modulation

Drukier, Freese, Spergel, 86  
Freese, Frieman, Gould, 88



### DAMA/LIBRA

250 kg NaI crystal scintillators at Gran Sasso.  
does not strongly discriminate between  
WIMP scatters and background events



CoGeNT 440 g Ge crystal at Soudan (2100 mwe)

In the future: KIMS 103.4 kg CsI crystal scintillators at YangYang (2000 mwe)

ANAIS project 250 kg NaI crystal scintillators at Canfranc (2500 mwe)

DM-Ice project 250 kg NaI crystal scintillators at South Pole (2200 mwe)

...

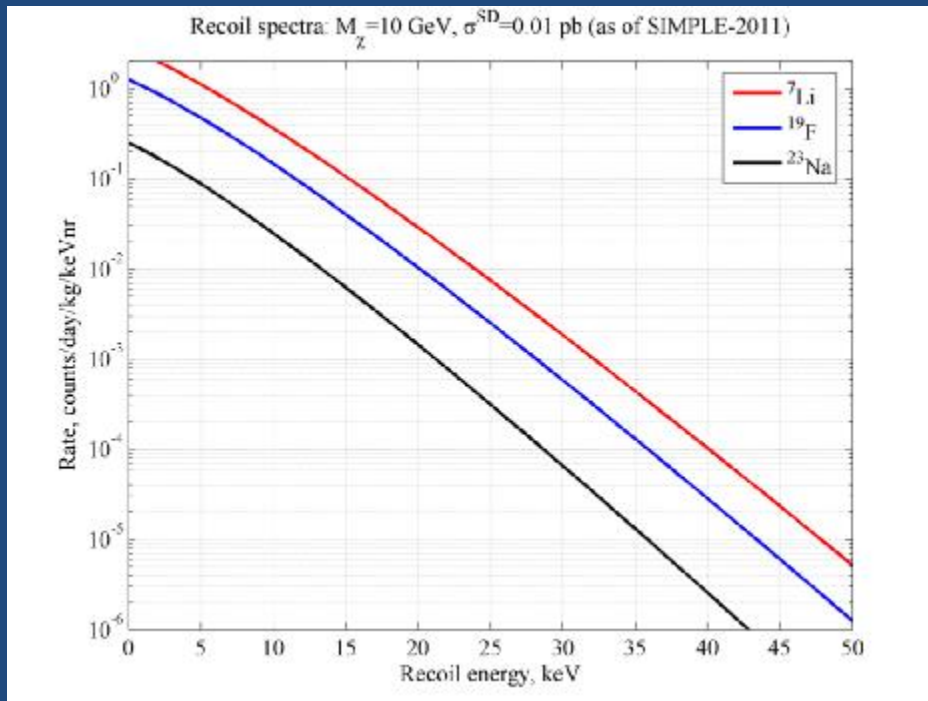
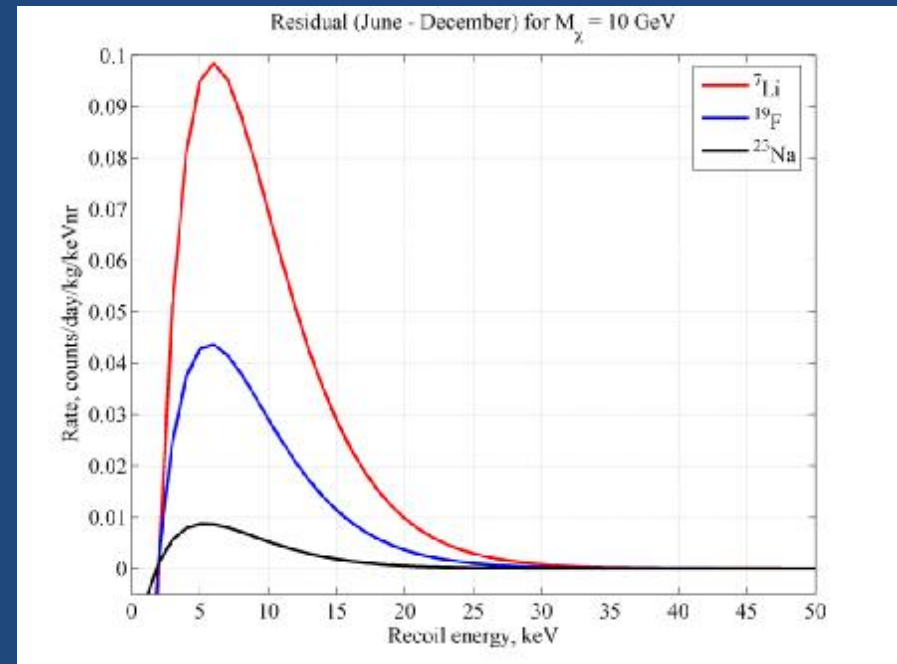
Listen to talks  
by the experiments

Спектр ядер отдачи и годовая модуляция в LiF при ограничении SIMPLE:

$$\sigma_{SD} = 10^{-2} \text{ pb}, M_{\chi} = 10 \text{ ГэВ}/c^2$$

При световыходе LiF 10000 фот/МэВ светосборе 0.8 и кв. эфф. 0.25 получим 2 ф.э./кэВ (как в Хе100)

ДАМА/NaI – 5-6 ф.э. кэВ



Порог – от 5 ф.э.

При  $Q = 0.2$  соответствует 10-15 кэВ энергии ядра отдачи

# Заключение

- Неорганические сцинтилляторы не исчерпали свой потенциал
- Сцинтилляционный метод – большие массы
- Радиационная чистота - годовая модуляция
- LiF – чувствительность к легким WIMP; преобладание SD-рассеяния