

# Возможности применения сцинтилляционных кристаллов LiF как детекторов частиц темной материи

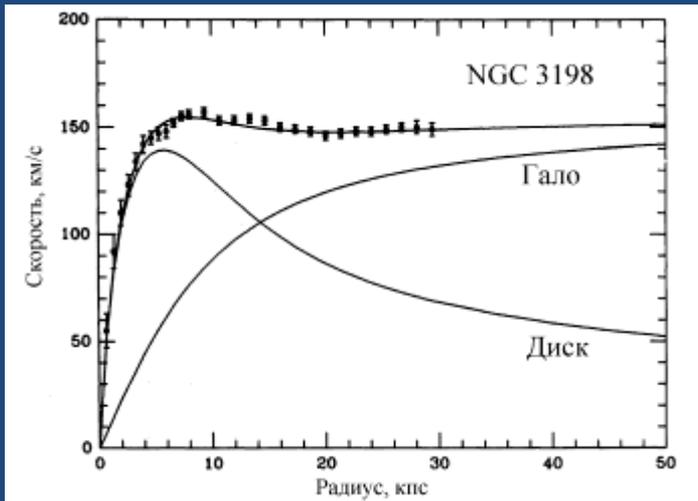
Д.Абдурашитов, А.Гектин, А.Непомнящих,  
Е.Раджабов, Н.Ширан

ИСМАРТ-2012, Дубна  
20 ноября 2012

# 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

# Упругое рассеяние

$$\frac{d\sigma}{d|\vec{q}|^2} = \frac{\sigma_0}{4m_r^2 v^2} F^2(|\vec{q}|) \quad \begin{array}{l} |\vec{q}| \text{ — импульс, передаваемый ядру} \\ m_r = m_\chi m_N / (m_\chi + m_N) \text{ — приведенная масса} \\ F \text{ — форм-фактор, понижающий сечение} \end{array}$$

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

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

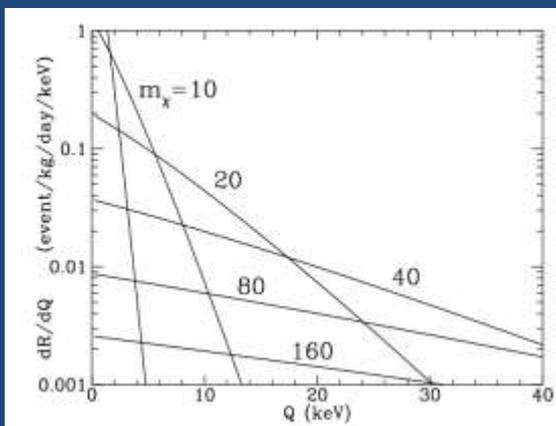
## unpaired neutron

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)

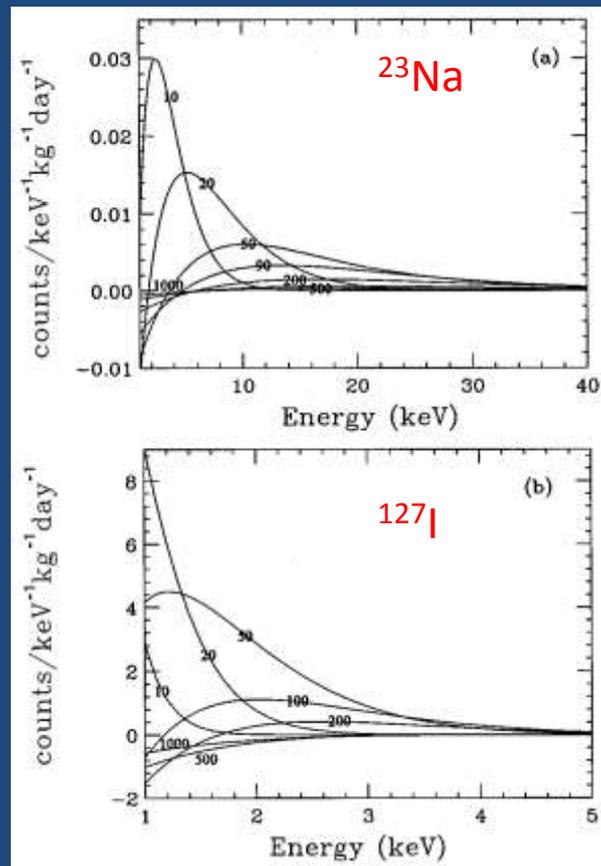
# ЯДРА ОТДАЧИ: СПЕКТР, ГОДОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ

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)



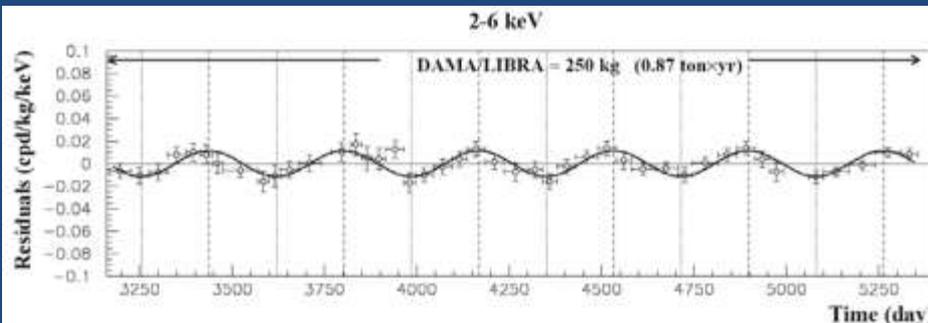
Орбитальная скорость Солнца  $V_{\odot} \sim 230 \text{ км/с}$   
 Орбитальная скорость Земли  $V_{\oplus} \sim 30 \text{ км/с}$   
 Угол наклона  $\delta \sim 31^\circ$

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

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,  $A \sim [0.01 \pm 0.01] \text{ отсч/кг/сут}$



## 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

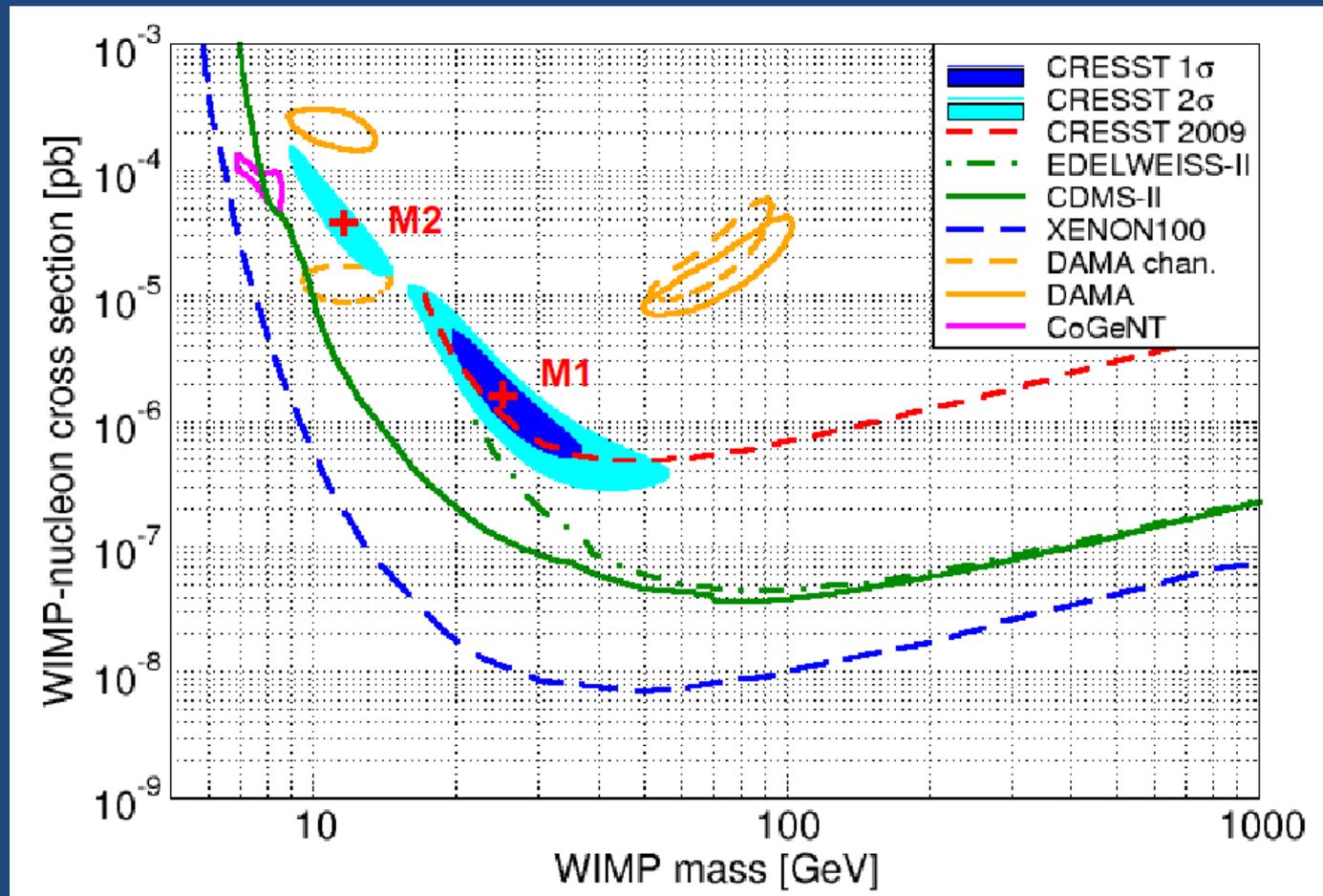
XENON 100 1104.2549 1471 kg x day

XENON 10 1104.3088

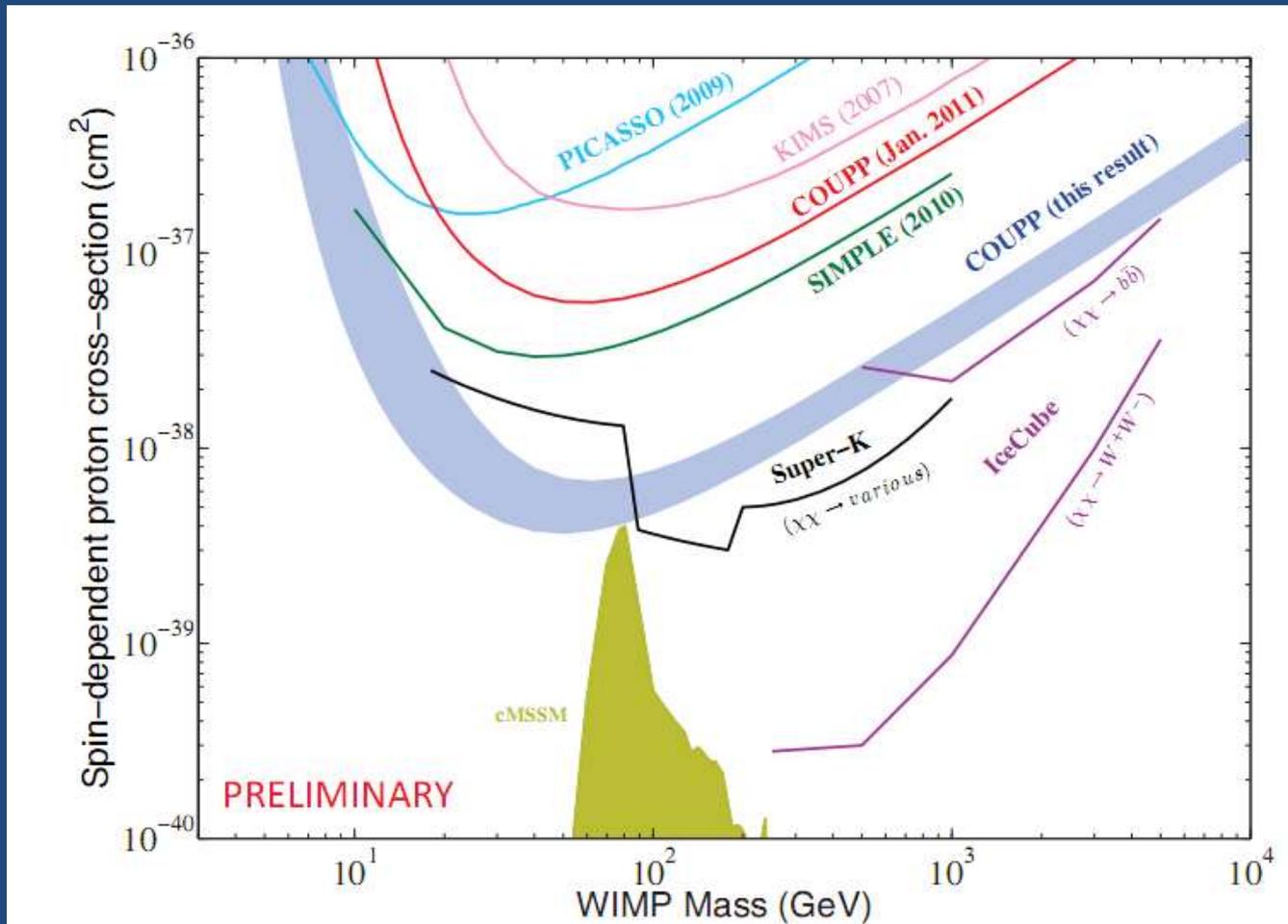
SIMPLE 1106.3014 14.1+13.67 kg x day,

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

# Ограничения по SI-рассеянию 2011-2012



# Ограничения по SD-рассеянию 2011

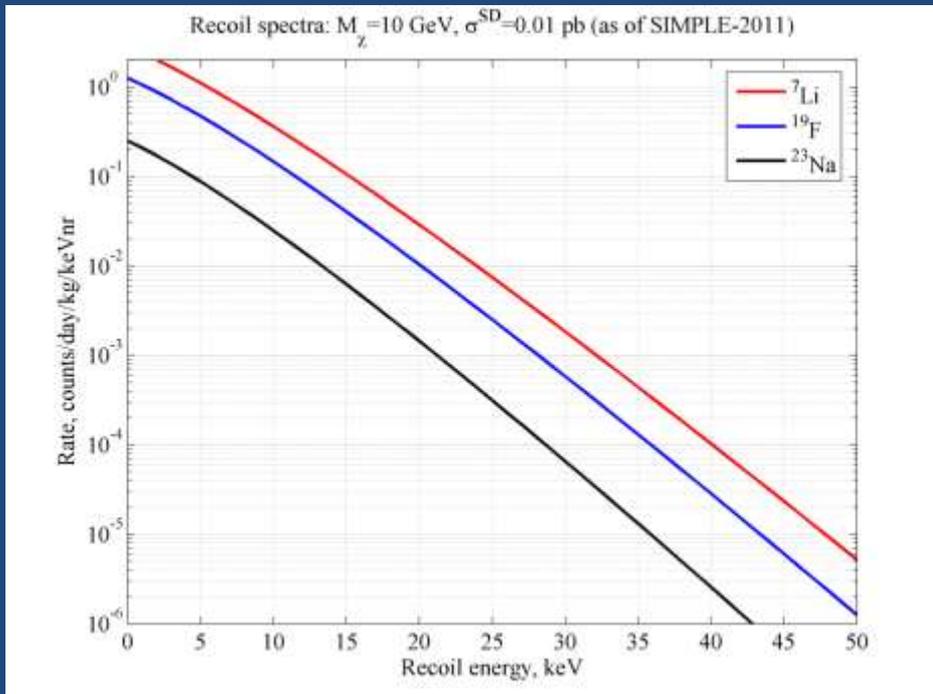
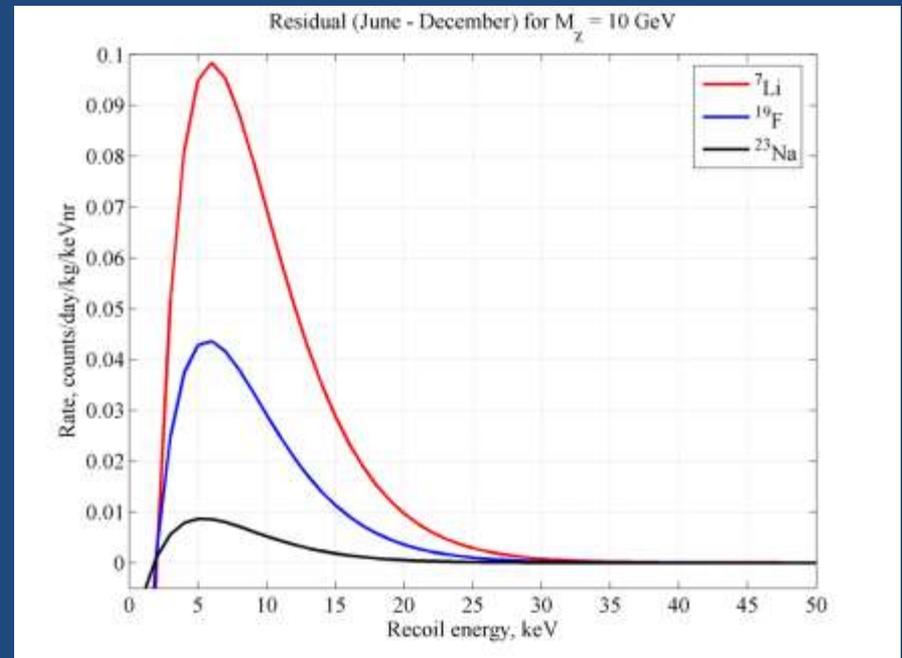


Спектр ядер отдачи и годовая модуляция на примере LiF при ограничении SIMPLE:

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

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

Порог в DAMA/NaI – 5-6 ф.э. кэВ

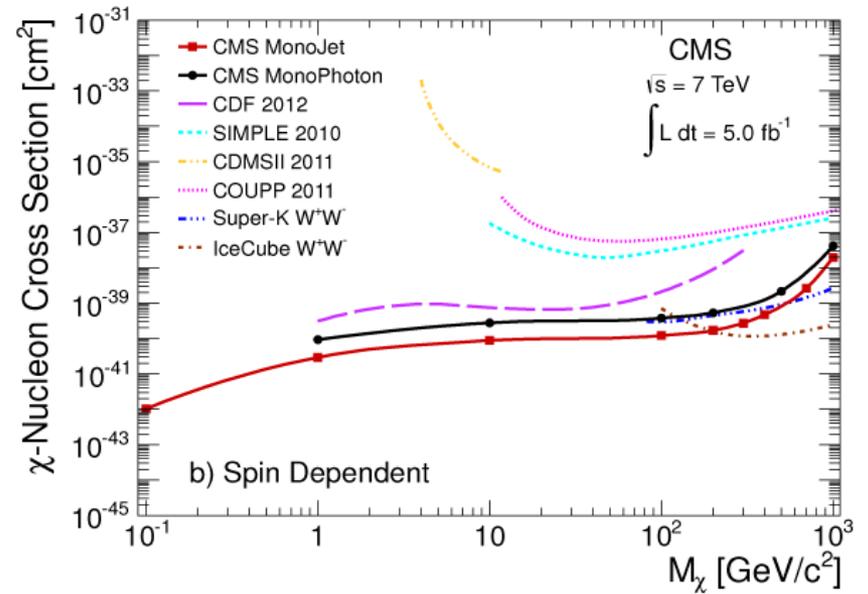
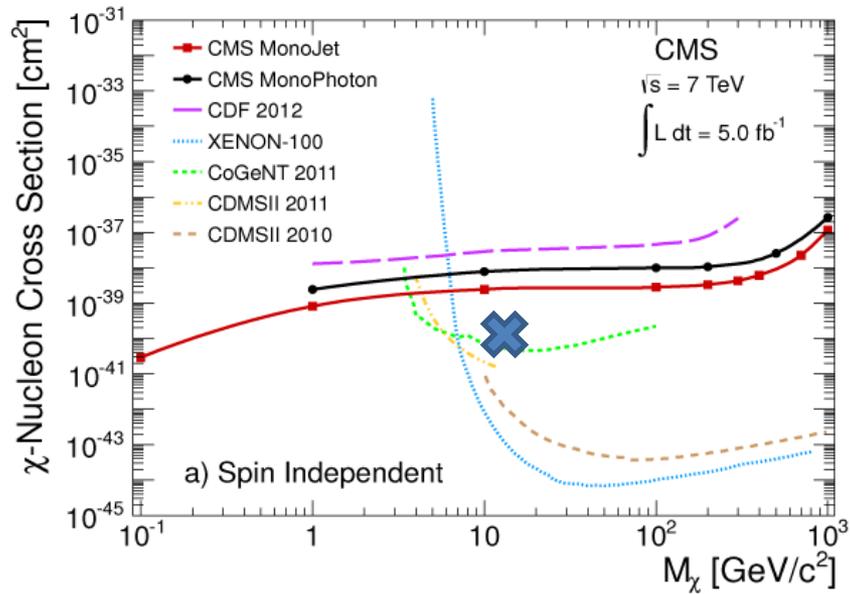


Порог – от 6 ф.э. = 3 кэВ э.ш.  
При  $Q = 0.3$  соответствует  $\sim 10$  кэВ энергии ядра отдачи

Скорость счета  $> 10$  кэВ:  
 $\sim 0.3$  событий  $\text{кг}^{-1} \text{сутки}^{-1}$   
100 кг обеспечит  $\sim 1000$  в месяц  
**ГОДОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ!!!**

# Ограничения ЛНС

## 2012



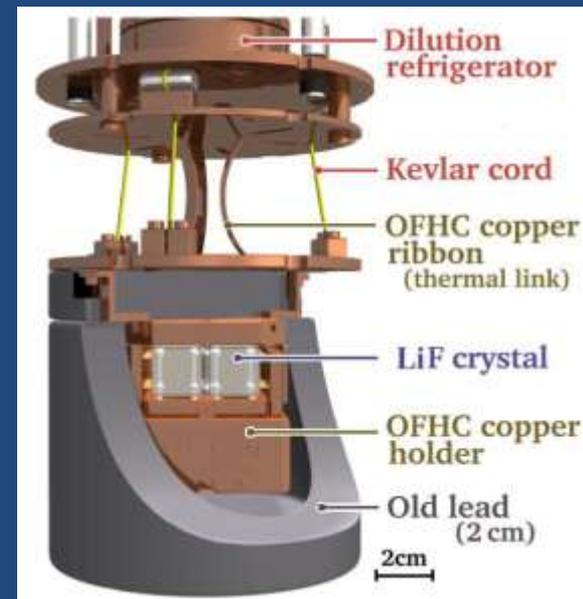
# Содержание U/Th/K

	$^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$^{210}\text{Pb}$
	[ppt]	[ppt]	[ppm]	[Bq/kg]

Свинец <100 1400 <1 <2

Медь <100 600 <1 -

LiF ~10 ~3 - ~10-4



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)



Astroparticle  
Physics

Astroparticle Physics 19 (2003) 135–144

[www.elsevier.com/locate/astropart](http://www.elsevier.com/locate/astropart)

## First results from dark matter search experiment with LiF bolometer at Kamioka underground laboratory

K. Miuchi <sup>a,\*</sup>, M. Minowa <sup>a,b</sup>, A. Takeda <sup>a</sup>, H. Sekiya <sup>a</sup>, Y. Shimizu <sup>a</sup>,  
Y. Inoue <sup>b,c</sup>, W. Ootani <sup>c</sup>, Y. Ootuka <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Department of Physics, School of Science, University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

<sup>b</sup> Research Center for the Early Universe (RESCEU), School of Science, University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

<sup>c</sup> International Center for Elementary Particle Physics (ICEPP), University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

<sup>d</sup> Institute of Physics, University of Tsukuba, 1-1-1 Ten'nodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8571, Japan

Received 14 July 2002; received in revised form 14 July 2002; accepted 20 July 2002

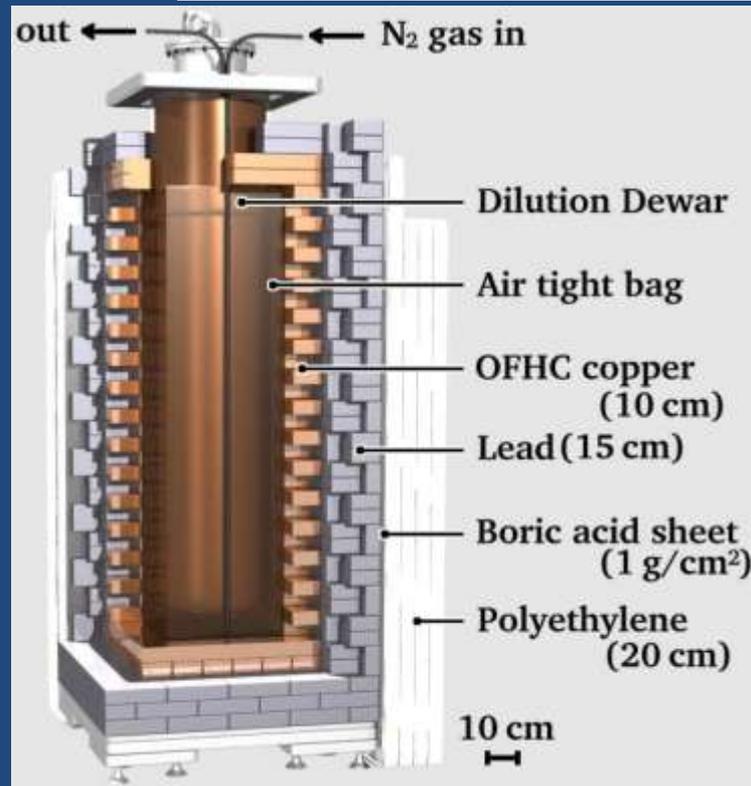
### Abstract

The Tokyo group has performed the first underground dark matter search experiment from 2001 through 2002 at Kamioka Observatory (2700 m.w.e). The detector is eight lithium fluoride bolometers with a total mass of 168 g and aims for the direct detection of weakly interacting massive particles (WIMPs) via spin-dependent interaction. With an exposure of 4.1 kg days, we derived the limits in the  $a_p$ - $a_n$  (WIMP-nucleon couplings) plane and excluded a large part of the parameter space allowed by the UKDMC experiment.

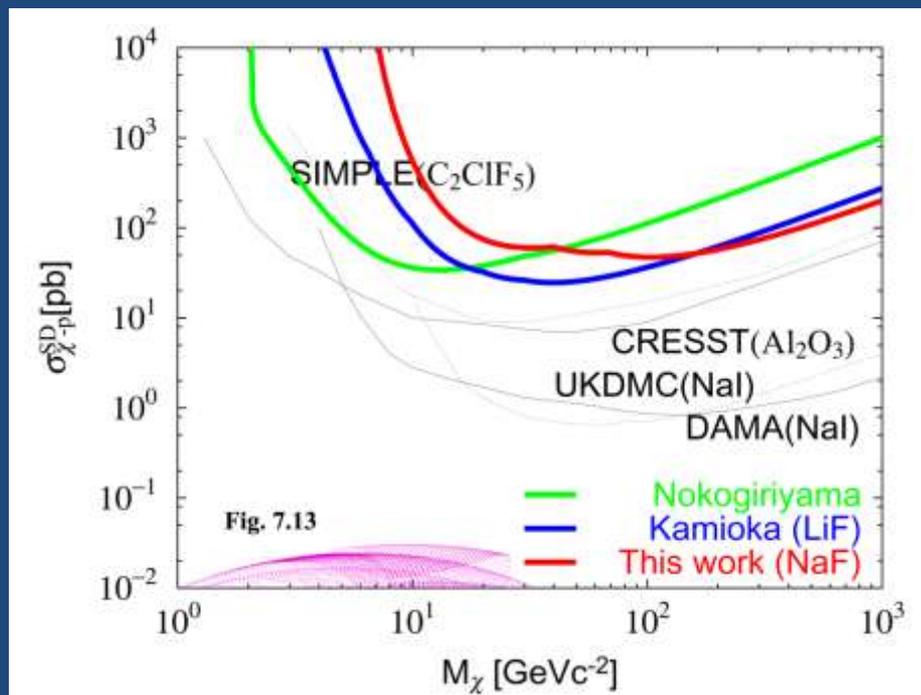
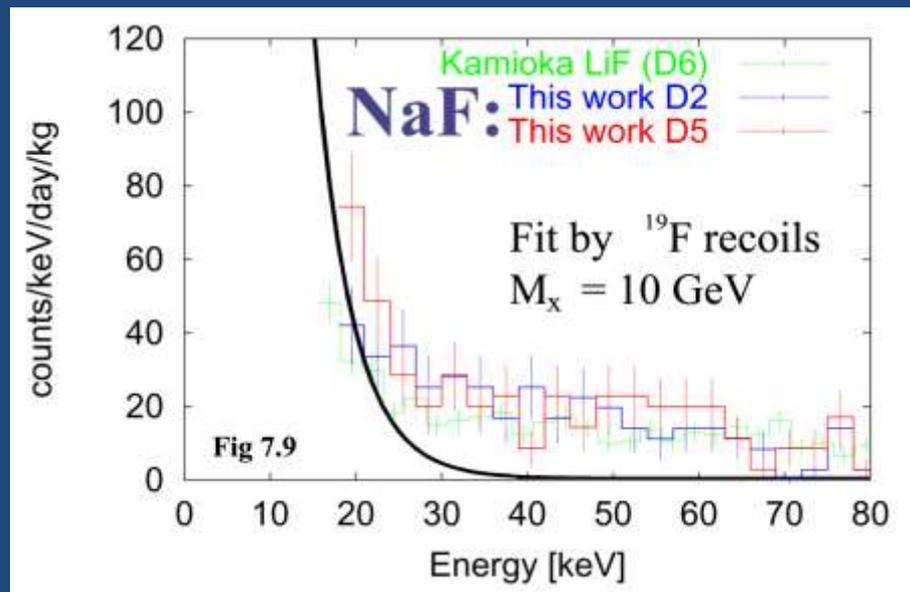
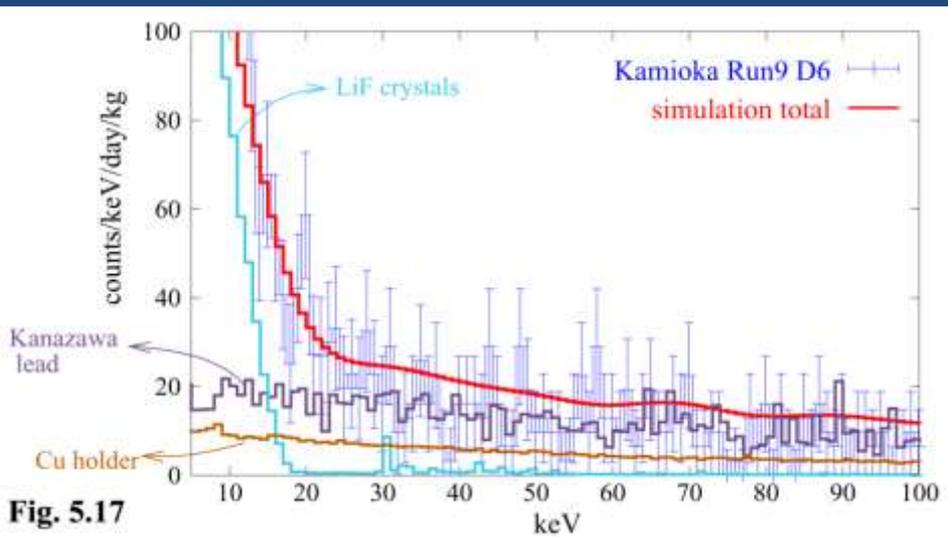
© 2002 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

PACS: 14.80.Ly; 29.40.Ym; 95.35.+d

Keywords: Dark matter; Neutralino; Weakly interacting massive particle; Lithium fluoride; Bolometer



2008 – измерения с NaF



## LiF(W), 18 кг, ГГНТ БНО, T~300 К

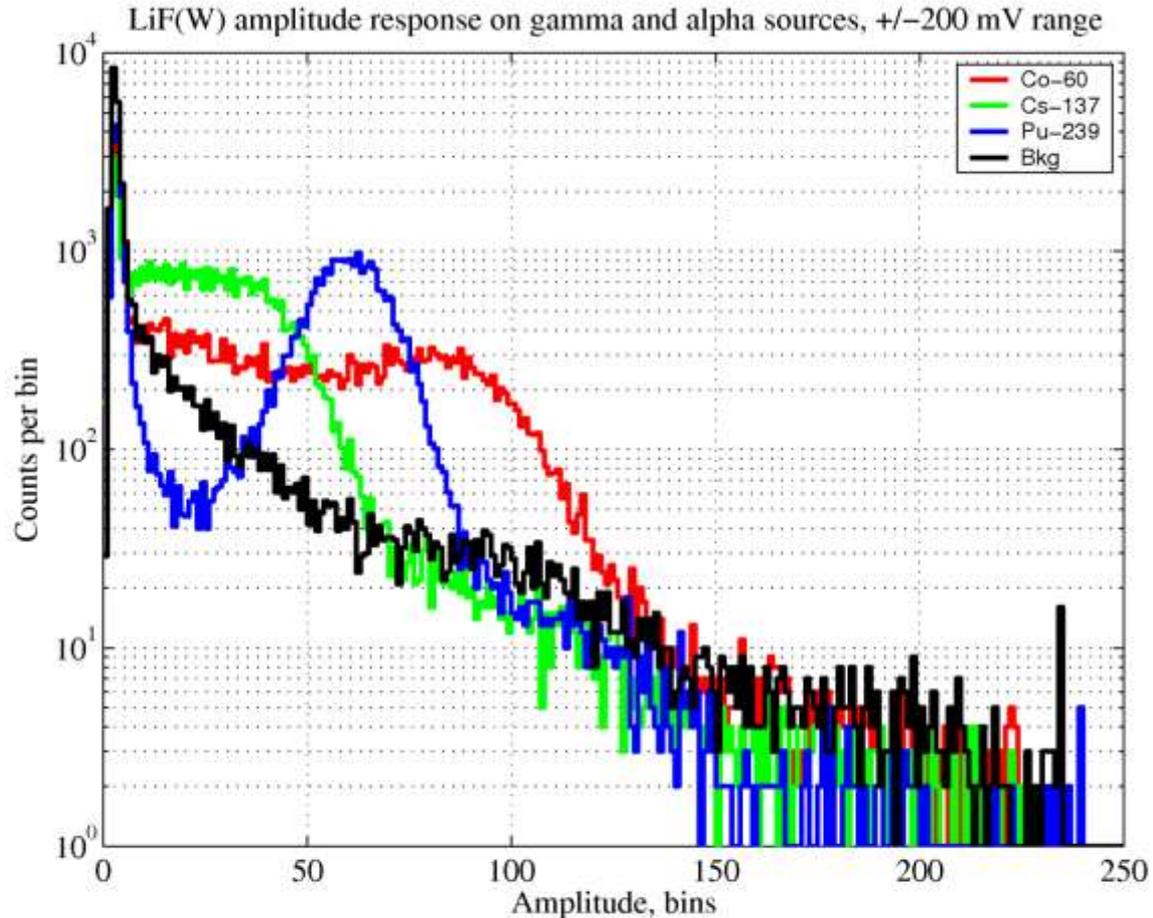


Рис. 2: Гистограммы амплитуд отклика кристалла LiF(W) на облучение источниками  $\gamma$ -квантов,  $\alpha$ -частиц и фон, диапазон  $\pm 200$  mV.

Источники:

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

Таи предусилителя  
560 мкс

Световыход:  
 $\sim 800$  фотон/МэВ

## 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) 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  $F_2^-$ ,  $V_2^-$  и  $V_1^-$  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 квантовую эффективность. Предполагается, что обнаруженные дефекты являются локализованными 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  $1 \cdot 10^{-3} \text{ mol.}\%$  и кислорода менее  $1 \cdot 10^{-5} \text{ mol.}\%$  (по данным протон-активационного анализа).

### 1. Результаты исследований

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

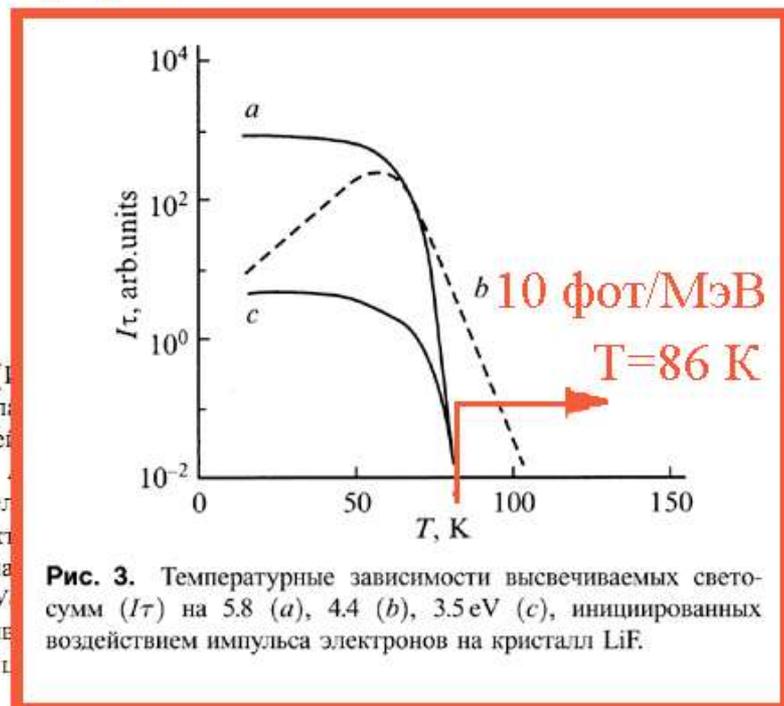


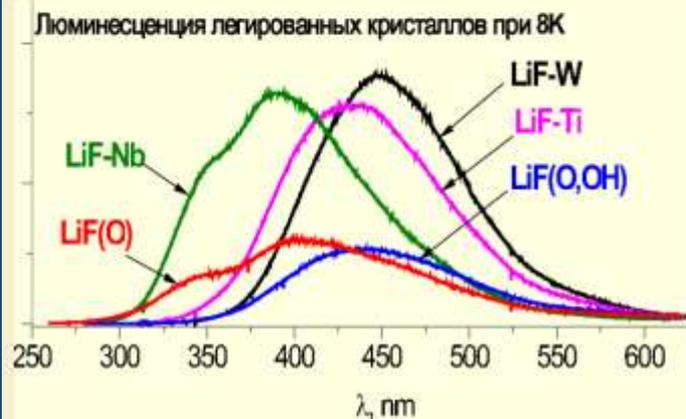
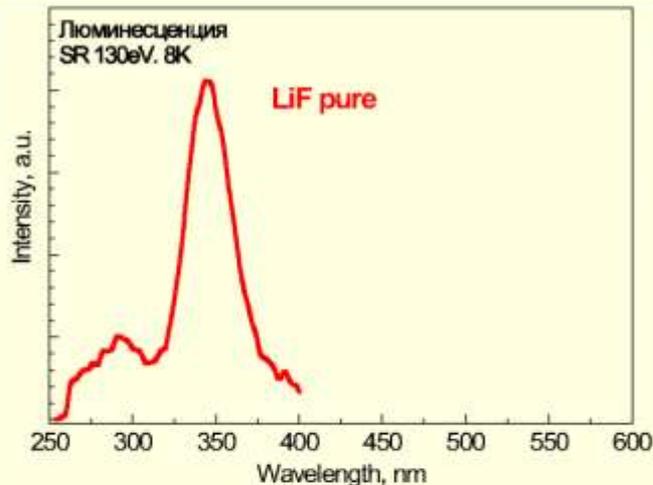
Рис. 3. Температурные зависимости высвечиваемых сумм ( $I\tau$ ) на 5.8 (a), 4.4 (b), 3.5 eV (c), инициированных воздействием импульса электронов на кристалл LiF.

# Абсолютный световыход LiF

- ИСМА, Харьков – DESY, Гамбург:  
T=8 К, источник – синхротронное излучение  
130 эВ, сравнение с CsI
- ИГХ, Иркутск – T=8 К, источник – рентген  
35 кэВ, сравнение с CaF<sub>2</sub>
- КСАРР, Тюбинген – T= [4...60] К, источник <sup>241</sup>Am,  
сравнение с NaI(Tl)

# Световыход LiF (ИСМА, Харьков)

## Исследование низкотемпературной люминесценции кристаллов LiF



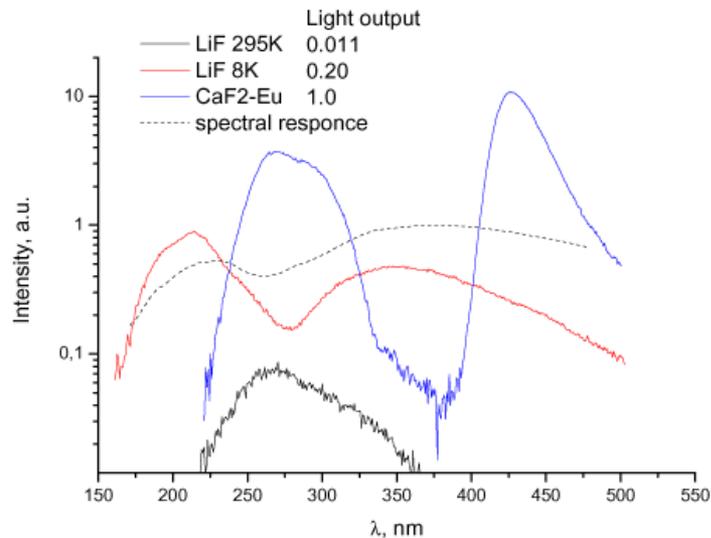
### Результаты

- Интенсивность собственного УФ свечения зависит от чистоты кристалла LiF.
- Сцинтилляционный выход LiF близок к 5000 фот/ МэВ
- Синяя люминесценция легированных кристаллов, связана с кислородом и расположенными по соседству ионами металлов.

**Для поиска темной материи – требуется оптимизация свечения LiF**

# Световыход LiF (ИГХ, Иркутск)

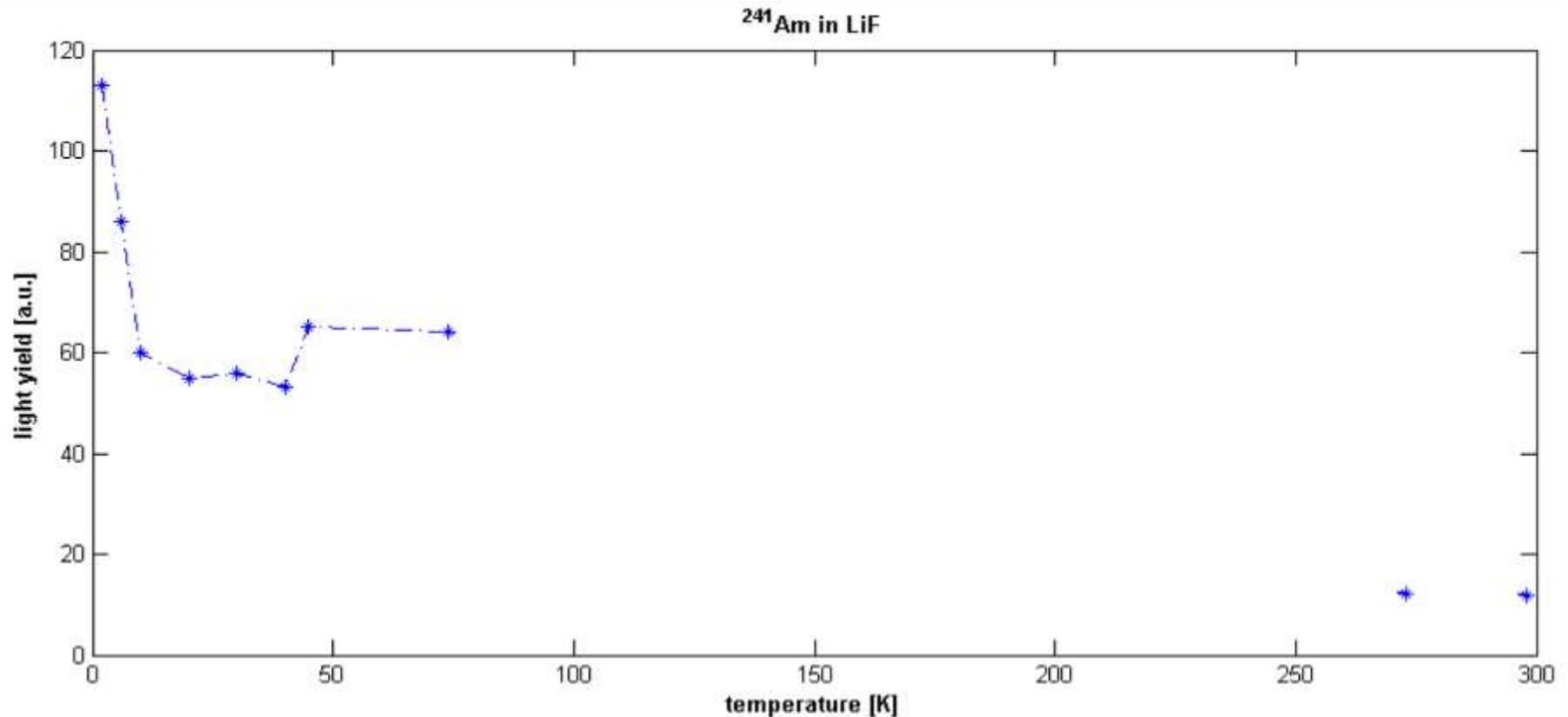
Корректировка на спектральную чувствительность



Спектральная чувствительность установки и скорректированные спектры свечения кристаллов LiF и CaF<sub>2</sub>-0.1%EuF<sub>3</sub> при рентгеновском возбуждении. Указана суммарная интенсивность спектров свечения.



# Световыход LiF (КСАРР, Tubingen)



$LY(\text{LiF}(2\text{K})) \sim 10LY(\text{LiF}(300\text{K}))$  for  $\alpha$ -particles

$LY(2\text{K}) \leq 1000\gamma/\text{MeV}$ ,  $\tau > 1 \text{ ms}$ ,  $\alpha/\beta$  - ?,  $S_\lambda$  - ?

# Заключение

- Значительный разброс результатов измерения абсолютного световыхода LiF (1000, 5000 и 12000 фотон/МэВ) оставляет вопрос открытым
- Сцинтилляционный метод дает возможность использовать большие массы в режиме спектрометрии (в отличие от COUPP и SIMPLE): 100 кг даст статистику ~1000 соб/месяц – годовая модуляция!
- Основной источник фона – защита; для естественной смеси LiF опасен тритий, но – обогащение по  $^7\text{Li}$ , рост кристаллов под землей

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**