Неорганические сцинтилляционные кристаллы в экспериментах по поиску частиц темной материи: состояние и перспективы

> Абдурашитов Д.Н. ИЯИ РАН, ОЭФ 19.04.2011

План доклада

- Мотивация и природа DM (SUSY)
- Прямой поиск сечения, ядра отдачи, годовая модуляция
- Неорганические кристаллы:
 - Nal(Tl) Csl(Tl) Csl(Na) CaF₂(Eu)
- Перспективы
 - Радиационная чистота (увеличение массы)
 - EURECA
 - LiF(W) LiF

Свидетельства присутствия DM

Скорость вращения звезд



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

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

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

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

Гравитационное линзирование



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

Суперсимметрия и темная материя

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

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

LSP =
$$\tilde{\chi^0}$$
, m_{χ} =1 ГэВ – 300 ТэВ

MCCM

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

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

Упругое рассеяние

--- "point-like" cross section

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

 $|\vec{q}|$ — импульс, передаваемый ядру $m_r = m_{\chi} m_N / (m_{\chi} + m_N)$ — приведенная масса $F - \phi$ орм-фактор, понижающий сечение

$$\sigma_0 = \int_0^{4m_r^2 v^2} \frac{d\sigma(q=0)}{d|\vec{q}|^2} d|\vec{q}|^2$$

Спиновое взаимодействие (SD)

$$\sigma_0 = rac{32}{\pi} G_F^2 m_r^2 \Lambda^2 J(J+1)$$
 $\Lambda = rac{1}{J} (a_p \langle S_p
angle + a_n \langle S_n
angle)$
 $F^2(ert ec q ert) = S(ert ec q ert) / S(0)$
сложная форма

Скалярное взаимодействие (SI) $\sigma_0 = rac{4 m_r^{-2}}{\pi} [Z f_p + (A-Z) f_n]^2$ $f_p pprox f_n$ — но не всегда! $F(Q) \propto exp(-Q)$ простая форма

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

Method	Nucleus	η_A	
Odd Group	$^{1}\mathrm{H}$	3	
Odd Group	$^{3}\mathrm{He}$	0.41	'LI = 0.08
Odd Group	¹⁷ O	0.0047	
Odd Group	^{19}F	0.0071	
Odd Group	²³ Na	2.8×10^{-1}	4
Shell Model	²⁹ Si	2.4×10^{-1}	4
Odd Group	^{35}Cl	1.2×10^{-1}	4
Perturbation Theory	³⁹ K	2.1×10^{-1}	4
Shell Model	73 Ge	2.0×10^{-1}	4
Shell Model	⁹³ Nb	1.6×10^{-1}	4
IBFM	131 Xe	1.7×10^{-1}	5

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 Λ^2 factor in the spin cross section is not easily separated from the model dependence. But we will write

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

where the nuclear dependence is given mainly by the factor

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

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 λ^2 of Ref. [298]. In more general nuclear calculations it can differ from the odd-group-model value. Some values of η_A are given in Table 7.

In order to proceed, assume that one type of nucleon dominates the spindependent 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]

$$a \simeq 0.1 \frac{m_W^2}{m_{\tilde{q}}^2}.$$
 (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

$$\frac{\sigma_{0\,spin}}{\sigma_{0\,scalar}} \approx 250\,\eta_A. \tag{7.44}$$

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 $A \leq 40$, 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: χ_+ и χ_- с разностью масс: $\delta = m_{\chi_+} - m_{\chi_-}$ Рассеяние возможно в случае ($\beta = v/c$):

 $\delta < rac{eta^2 m_\chi m_N}{2m_\chi + m_N}$ Для примера: eta c = 220 км/с, $m_\chi = 100$ ГэВ/с² $\delta_{Ge} = 11$ кэВ и $\delta_I = 15$ кэВ

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

D.Smith&N.Weiner, "Inelastic dark matter" Ph.Rev.D 64 043502 (2001)

Heyпругое рассеяние: DAMA vs CDMS (~4кгGe + 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. VB8)	20715	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 17 1	17 339
Ionization threshold (Sec. VB6)	14 697	14 835
Fiducial volume (Sec. VB4)	7187	7615
Nuclear-recoil band (Sec. VB5)	29	23
Phonon timing (Sec. VB9)	0	1

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

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

Хе (Xe100, LUX) и W (CaWO₄, CRESST) --- перекроют DAMA, если WIMP достаточно тяжелые

ЯДРА ОТДАЧИ: СПЕКТР, ГОДОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ

Форма спектра ядер отдачи 73 Ge σ_0 =4x10 $^{-36}$ см 2



G.Jungman et al, Ph.Rep. 267 (<u>1</u>996)

Орбитальная скорость Солнца V_{\odot} ~230 км/с Орбитальная скорость Земли V_{\oplus} ~30 км/с Угол наклона δ ~31° V_r(t) = V_{\odot} + V_{\ominus} sin δ cos[ω (t - t_o)] Скорость движения Земли вокруг гало

ω=2π/365 [1/сут], t₀ = 2 июня V_{max}=245 км/с, V_{min}=215 км/с



DAMA/LIBRA, 2-6 кэВ, А~[0.01 ± 0.01] отсч/кг/сут



Методы прямого детектирования



Рябов и др. УФН т. 178 №11 (Окт 2008)

Методы прямого детектирования: неорганические сцинтилляторы

Кристалл	Световыход фотон/МэВ	т, нс	λ, нм	Плотность г/см ³
Nal(Tl)	38000	230	415	3.4
CsI(TI)	65000	800	540	4.5
CaF ₂ (Eu)	19000	940	420	3.2
LiF(W)	~800	~100 мкс	~400	2.6

Абдурашитов и др., Препринт ИЯИ (2011) в печати

Свойства ядер мишеней

Ядро	Z	Α	J	<sp></sp>	<sn></sn>
Na	11	23	3/2	0.25	0.02
Cs	55	133	7/2	-0.37	<0.01
I	53	127	5/2	0.31	0.07
F	9	19	1/2	-0.44	0.11
Li	3	7	3/2	0.50	<0.01



25 кристаллов Nal 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

DAMA/Nal/LIBRA

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











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

ANAIS

3 кристалла Nal по 10 кг Время набора < 2-х лет

Sarsa et al, Phys. Rev. D56 4 (1997)





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

DAMA, 2-6 кэВ, R~1.1 отсчет/кг/сут



Окно 10-30 кэВ



FIG. 13. June minus December spectra. The expected residual signal for typical WIMP's are also shown: M = 30 GeV and $\sigma_{\text{Na}} = 10^{-32}$ cm² (dotted line) and M = 150 GeV and $\sigma_I = 10^{-30}$ cm² (solid line).

10-20 кэВ, есть модуляция или нет

NAIAD

7 кристаллов Nal, 55 кг всего < 2 лет набора

Окно 4-10 кэВ



Fig. 6. Total energy spectrum from one of the crystals (DM74) (filled squares), spectrum of electron recoils after asymmetry cuts from the fit to the main peak on the time constant distribution (open circles), and the upper limits on the nuclear recoil rate for various energy bins (filled circles).



Fig. 8. NAIAD limits (90% C.L.) on WIMP-nucleon spin-independent (a) and WIMP-proton spin-dependent (b) crosssections as functions of WIMP mass. Also shown are the region of parameter space favoured by the DAMA positive annual modulation signal (DAMA/NaI-1 through DAMA/NaI-4) (closed curve), limits on the spin-independent cross-section set by the DAMA experiment (DAMA/NaI-0) using PSA (dashed curve) and the projected limit of DAMA experiment (DAMA/ NaI-0 through DAMA/NaI-4, dotted curve), if the DAMA group were to apply pulse shape discrimination to all available data sets.



Fig. 9. NAIAD model-independent limits (90% C.L.) on spindependent WIMP-proton (a) and WIMP-neutron (b) crosssections as functions of WIMP mass. The limits have been derived following the procedure described in Ref. [29]. Dashed curves show the limits extracted from interactions with sodium, dotted curves show those from iodine, and solid curves show combined limits.

B.Ahmed et al, Astrop. Phys. 19 (2003) G.Alner et al, arXiv:hep-ex/0504031v1

Nal ELEGANT V

30 кристаллов Nal по 20 кг (Всего 600 кг) Время набора ~1 год

Fushimi et al, Astrop. Phys. 12 (1999)



Fig. 2. The energy spectrum of the low energy region. A prominent peak around 50 keV is 46.5 keV gamma ray and associated beta ray from 210 Pb. Two peaks around 15 keV and around 80 keV are due to the background from 222 Rn in the nir-tight container. A dotted line shows the energy spectrum which was taken just after exchanging the nitrogen dewar.

Fig. 3. The changes of the event rate in the energy windows, 'A' (closed circle) and 'B' (open circle). The size of the circles corresponds to the error. The well-known backgrounds are already subtracted from the raw data. The expected annual modulations with the calculated upper limits on the modulating amplitudes are shown by solid lines.

Energy window	x	r	CL	$S_{m, \text{limit}} (\text{kg}^{-1} \text{day}^{-1})$
8-15 keV	34.2 ± 1.5	0.468	0.680	0.20
15-30 keV	8.2 ± 1.2	0.092	0.536	0.053
8-30 keV	42.4 ± 1.9	0.368	0.643	0.25

DAMA/LIBRA: 2-6 кэВ, А=[0.0114 ± 0.0013] отсчет/кг/сут

KIMS - Csl

4 кристалла CsI(TI), 35 кг всего ~3 мес набора Окно 3-10 кэВ

¹³⁷Cs – на уровне 10-100 мБк/кг



Reconstructed NR events



FIG. 5 (color online). Allowed region (90% confidence level) in $a_p - a_n$ plane by KIMS data (inside the solid line contour) for 50 GeV WIMP mass. Results of CDMS [19] (dotted line) and NAIAD [20] (dot-dashed line) are also shown.





Lee et al, Phys. Rev. Lett. 99 091301 (2007)



Y. Shimizu et al, Phys.Lett.B633 (2006)

Radiopurity Kim et al, New J. of Phys. 12 (2010)

Table 3. Background summary of dark matter experiments using crystal scintillators. 'Bg' means the background level measured at about 10 keV energy in units of $(\text{keV kg day})^{-1}$.

Crystal	Experiment	Mass (kg)	U (ppt)	Th (ppt)	^{nat} K (ppb)	Bg	Reference
Nal(Tl)	ELEGANT V	662	<500	<500	<300	~10	[43]
	DAMA/NaI	100	2–10	1–6		~ 1.5	[44]
	DAMA/LIBRA	232.8	0.7-10	0.5–7.5	≼20	~ 1	[41]
CsI(Tl)	KIMS	34.8	0.75	0.38		4–5	[50]
CaF ₂ (Eu)	Tokyo	0.31	~ 80	~ 28		~5	[17, 36]

SD WIMP-proton



SI WIMP-proton



ПРОЕКТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

- Nal: DAMA --- эффект модуляции уже >8 σ; ANAIS --- чистота DAMA, масса 100 кг
- Csl: KIMS --- ¹³⁷Cs до 2 мБк/кг, ~100 кг
- EURECA: --- болометры + сцинтилляторы
 Csl, BGO, ZnWO₄, CaWO₄, CaWO₄, CaMoO₄, BaF₂, CaF₂
- LiF: --- сцинтиллятор?

LiF bolometers – Miuchi et al, Astrop. Phys. 19 (2003)

K. Miuchi et al. | Astroparticle Physics 19 (2003) 135-144



K. Miuchi et al. | Astroparticle Physics 19 (2003) 135-144



ap

Краткий отчет

об исследовании сцинтилляционных свойств кристаллов LiF(W) Абдурашитов Д.Н., Гаврин В.Н., Горбачев В.В., Калихов А.В., Шихин А.А., 17-23.11 2009, БНО

Цель исследования: оценка световыхода 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 150х150х300 мм и оборудован одним окном диаметром 120 мм. Для просмотра кристалла использовался большой ФЭУ Нататаtsu R2321 со стандартным делителем. Выход анодного сигнала подается на зарядочувствительный предусилитель (ЗЧПУ) с постоянной времени 100 мкс. Сигнал ЗЧПУ просматривается 2-канальным цифровым осциллоскопом (ЦО) Лан10М5 от Руднев-Шиляева. Для запуска ЦО используется триггерный сигнал, сформированный по переднему фронту сигнала ЗЧПУ. В качестве радиоактивных источников были использованы источники ОСГИ ¹³⁷Cs (662 кэВ), ⁶⁰Co (1.17 и 1.33 МэВ), ²⁴¹Am (27 и 60 кэВ), а также ²³⁹Pu - 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





ле и более редких в конце. Следует отметить, что выбор 100 мкс оказывается недостаточен, чтобы выбрать все фотоэлектроны, относящиеся к событию высвечивания – вплески 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 ²³⁹Pu. 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, ГГНТ БНО

Внутренний отчет ноябрь 2009

LiF(W), 18 кг, ГГНТ БНО



Рис. 2: Гистограммы амплитуд отклика кристалла LiF(W) на облучение источниками γ -квантов, α -частиц и фон, диапазон ±200 mV.

LiF(W), 18 кг, ГГНТ БНО

PRELIMINARY

Верхний предел

Соответствует

20 μБк/кг

10-11 г/г

по U/Th



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



Вакуумно-чистый LiF, Томский Политех. Унив. Лисицына и др., ФТТ 43 9 (2001)



Рис. 1. Спектры люминесценции, инициированные воздействием единичного импульса электронов на кристалл LiF при температуре 20 (a), 50 (b), 80 K (c) и измеренные с различной временной задержкой к моменту окончания действия импульса: 10 (a, b), 100 ns (c). На вставке: спектр миллисекундного компонента свечения при 22 K.



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.



Рис. 2. Температурные зависимости значений компонентов затухания в различных полосах спектра свечения, инициированного воздействием единичного импульса электронов на кристалл LiF.

Заключение

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