

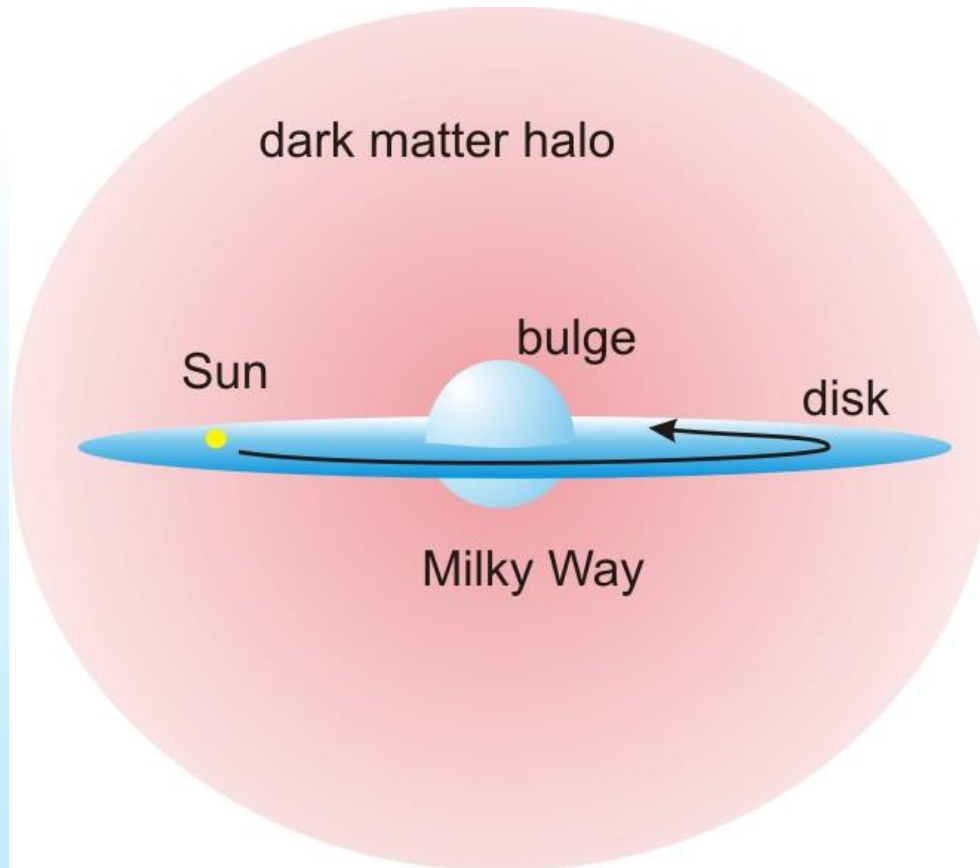
*Поиск темной материи в
экспериментах DAMA/LIBRA и
COSINE-100*

Ю.Г.Нарышкин

План доклада

- *Введение*
- *DAMA/LIBRA*
- *COSINE-100*
- *DAMA/LIBRA vs COSINE-100*
- *Ответ DAMA на критику*

Прямое детектирование



$$R \propto N_T N_\chi f(\vec{v}) \langle v \rangle \sigma$$

R Event rate
 N_T # of target particles
 $N_\chi = \frac{\rho_0}{m_\chi}$ # of WIMP
 $f(\vec{v})$ WIMP velocity distribution
 $\langle v \rangle$ Averaged WIMP velocity
 σ Cross section for DM-nucleus scattering

$$\Rightarrow \frac{dR}{dE_R} = \frac{N_T \rho_0}{m_\chi} \int^{v_{\max}} d\vec{v} f(\vec{v}) |\vec{v}| \frac{d\sigma(\vec{v})}{dE_R}$$

Drukier, Freese, Spergel PRD 86
Freese et al. PRD 88

Прямое детектирование

$v_{sun} = 232 \text{ km/sec}$, скорость солнца в гало
 $v_{orb} = 30 \text{ km/sec}$, орбитальная скорость Земли

$$v_{sun+orb} = v_{sun} + v_{orb} \cos(\gamma) \cos(\omega[t - t_0])$$

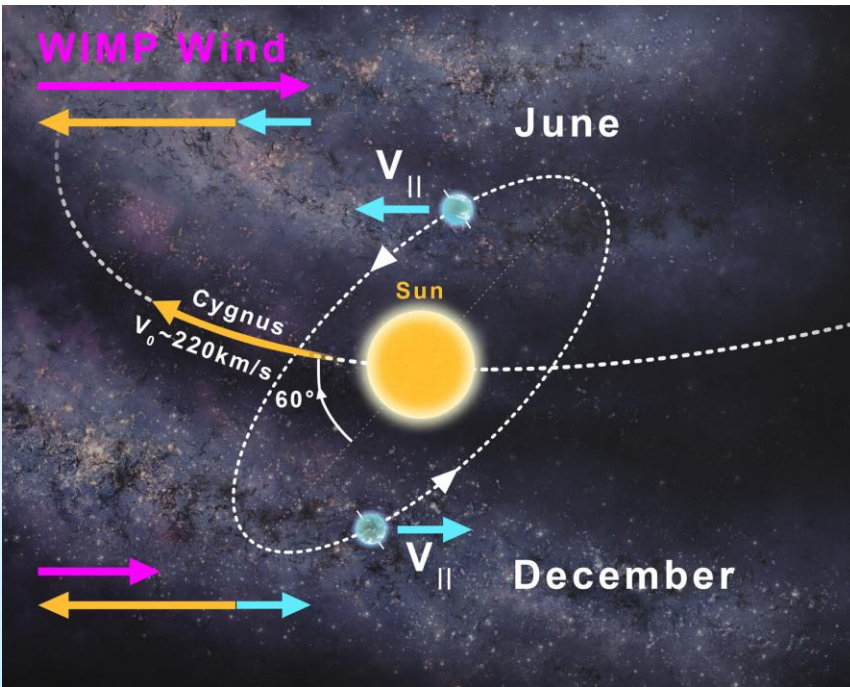
где γ -наклон орбиты земли по отношению к плоскости галактики (60°), $\omega = 2\pi/T$, $T = 1 \text{ год}$

$\eta(t) = v_{sun+orb}(t)/v_0$,
скорость ТМ $v_0 = 220 \pm 50 \text{ km/sec}$

$t_0 = 2 \text{ июня}$, когда $v_{sun+orb}$ - максимальная

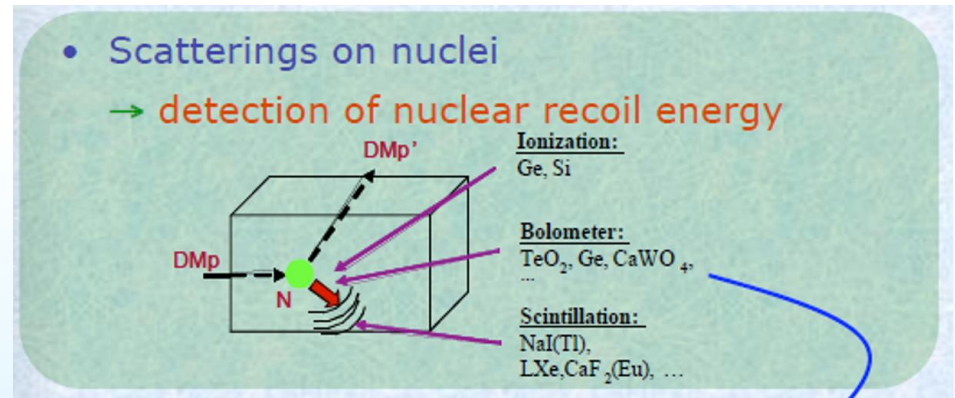
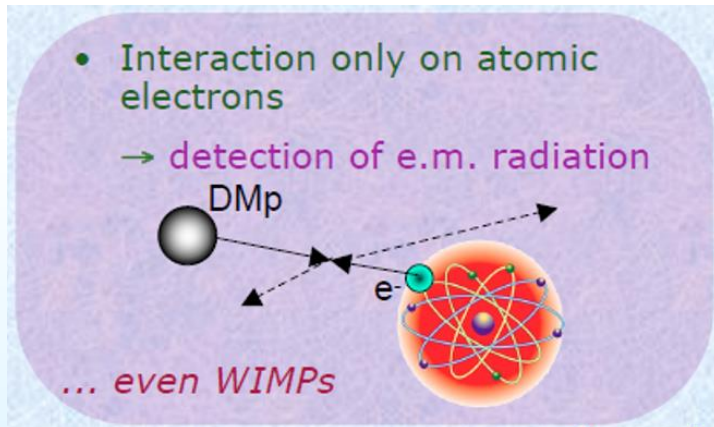
$$S_k[\eta(t)] = S_0 + S_m \cos(\omega[t - t_0])$$

S_0 – не зависящая от времени величина
 S_m – амплитуда модуляции



- Распределение должно быть по синусоиде
- Максимум должен соответствовать 2 июня
- Период распределения – 1 год.
- Сигнал при низких энергиях
- События с одним хитом

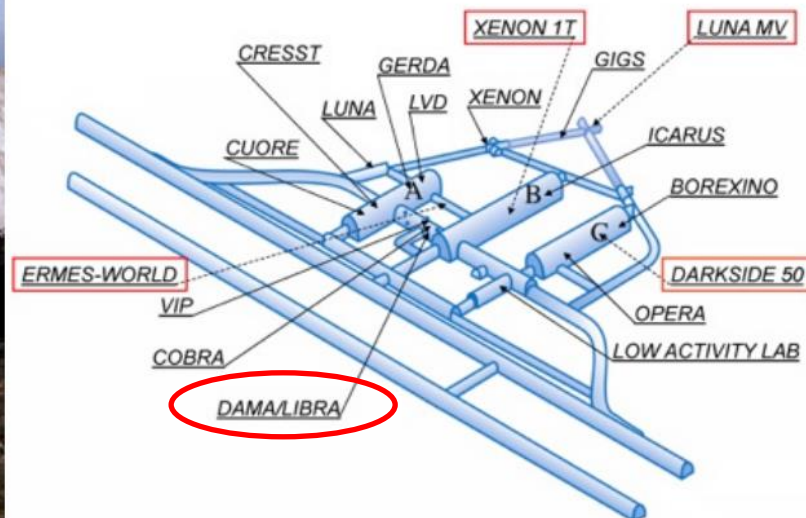
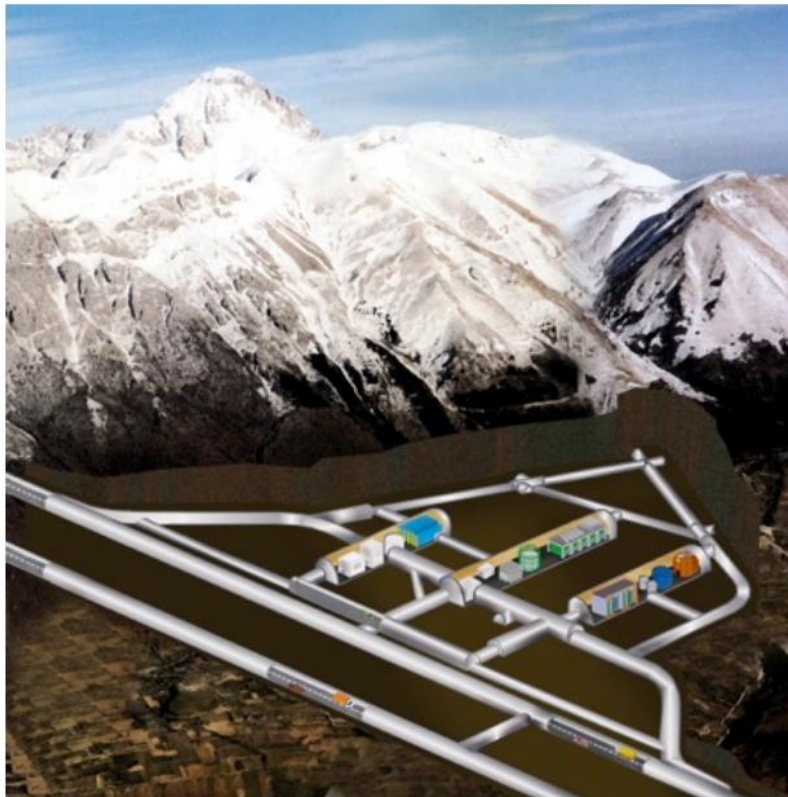
Прямое детектирование



При взаимодействии частиц ДМ в детекторах NaI(Tl) ключевой величиной является регистрируемая энергия E_{det} , которая связана с энергией, образующейся в процессе взаимодействия частиц ТМ с детектором E_{rel} ;

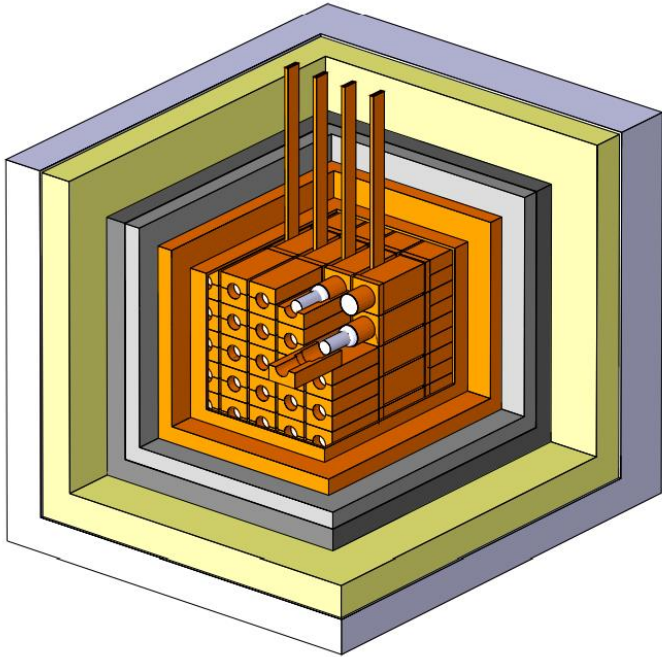
- продукты взаимодействия имеют электромагнитную природу (в основном электроны);
- ядерная отдача с кинетической энергией E_{rel} создается за счет рассеяния частиц ТМ либо на ядрах натрия, либо на ядрах йода (NaI).

DAMA/LIBRA @ LNGS



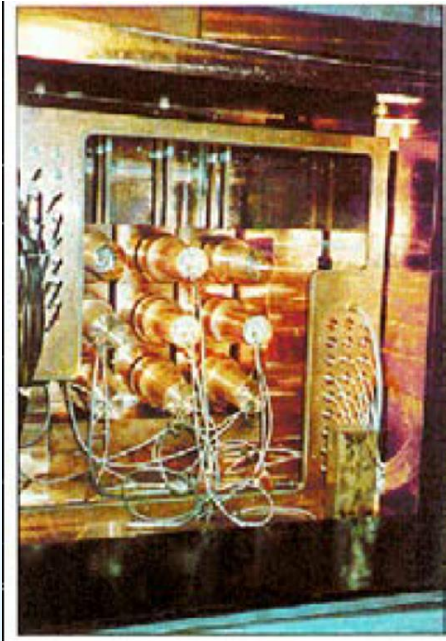
- Детектор DAMA (DARk MAtter), находится глубоко под землей в LNGS, 1400-метровая толща горных пород над Лабораторией представляет собой естественное покрытие, обеспечивающее уменьшение потока космических лучей в миллион раз;
- поток нейтронов в подземных залах примерно в тысячу раз меньше, чем на поверхности из-за очень малого количества урана и тория в доломитовых известняковых породах горы.

DAMA/LIBRA @ LNGS



- 25 NaI легированных таллием NaI(Tl) с высокой степенью “радио-чистоты” кристаллов
- Каждый кристалл NaI(Tl) имеет массу 9,70 кг и размер (10,2 × 10,2 × 25,4) см³.
- Кристаллы обернуты тефлоновой фольгой Tefatex и заключены в корпус из радиочистой OFHC (oxygen-free high thermal conductivity) Cu;
- Кварцевые световоды длиной 10 см выполняют также роль оптических окон на двух торцах кристаллов и соединены с двумя низкофоновыми фотоумножителями (ФЭУ).
- Порог каждого из двух ФЭУ на кристалле установлен на уровне одного фотозлектрона;
- их совпадение обеспечивает срабатывание детектора
- Энергетический порог на уровне 1-2 кэВ в электронном эквиваленте.

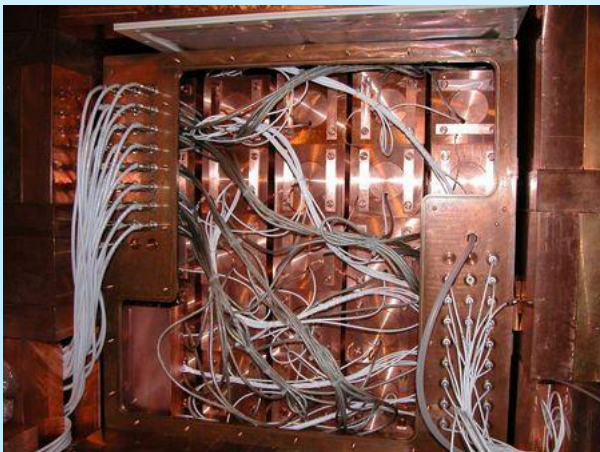
Защита толщиной около 1 м бетона (из скального материала Гран-Сассо) окружает пассивный экран, действуя как дополнительный замедлитель нейтронов.



DAMA/NaI (1995-2002)

9x9.7 kg NaI(Tl) 3x3 matrix
7 annual cycles

DAMA/LIBRA (2003-2010)



DAMA/LIBRA - A (Large sodium Iodide Bulk for RAre processes)

Eur. Phys. J. C (2008) 56: 333–355

25x9.7 kg NaI(Tl) 5x5 matrix
7 annual cycles

DAMA/LIBRA phase II (2011-now)



- В конце 2010 года все фотоумножители (ФЭУ) были заменены на ФЭУ второго поколения Hamamatsu R6233MOD с более высокой **квантовой эффективностью** (QE) и более низким фоном по сравнению с теми, которые использовались в фазе 1;
- Энергетический порог 1 кэВ.
- Суммарное облучение DAMA/LIBRA–phase2 составляет: 1,53 т × год с энергетическим порогом 1 кэВ;
- при включении данных DAMA/NaI и DAMA/LIBRA–phase1 кумулятивное воздействие составляет 2,86 т × год, что соответствует 22 независимым годовым циклам.

25x9.7 kg NaI(Tl) 5x5 matrix
Exposure: 1.53 ton x year

DAMA/LIBRA

$$S[\eta(t)] = S_0 + S_m \cos(\omega[t - t_0])$$

S_0 – не зависящая от времени величина, $\omega=2\pi/T$, $T=1$ год

S_m – амплитуда модуляции

- экспериментально наблюдаемой является не постоянная часть сигнала S_0 а его амплитуда модуляции, S_m как функция энергии.
- Интенсивность взаимодействия частиц темной материи определяется как количество событий в день (cpd) на кг детектора на кэВ энергетического спектра
- Поскольку вероятность того, что частица ТМ взаимодействует более чем в одном детекторе, пренебрежимо мала, сигнал ТМ может присутствовать только в событиях с одним "хитом" (т.е. события, в которых сработал только один детектор)
- Таким образом, сравнение результатов однократных событий с результатами многократных соответствует сравнению случаев "beam-on" и "beam-off" с частицами ТМ.

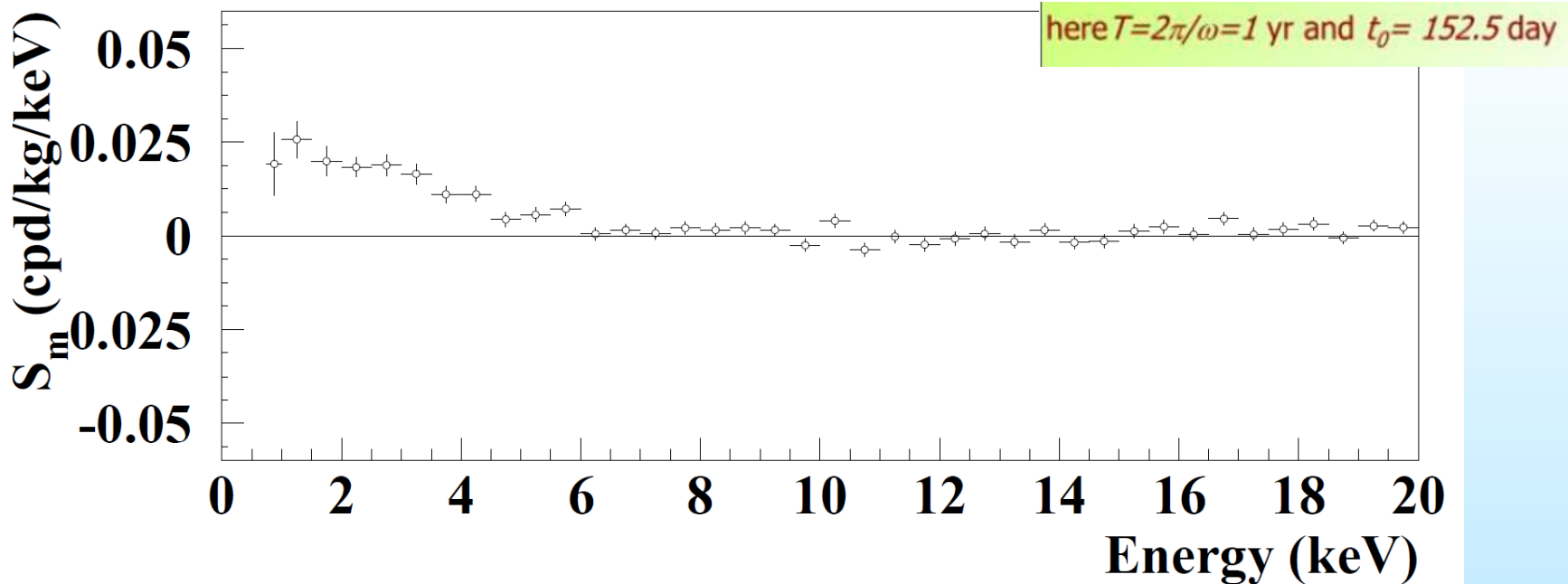
DAMA/LIBRA

- Фон усредняется за каждый год набора данных, так как по утверждению DAMA/LIBRA он слабо меняется со временем, т.е. используется усредненное значение фона за год.
- Далее “усредненный” фон вычитается из числа зарегистрированных одиночных событий (rates)
- В результате получают “residuals”
- Полученные распределения residuals как функция времени фитируются функцией: $S = S_0 + S_m \cos(\omega[t - t_0])$

DAMA/LIBRA: PHASE II

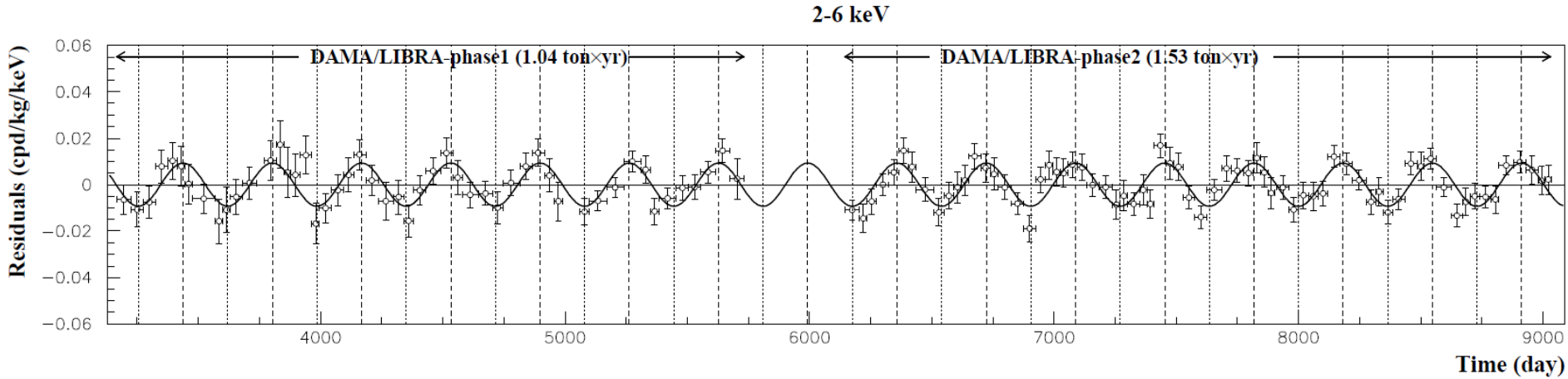
Энергетическое распределение амплитуды модуляции

$$S_k(t) = S_{0,k} + S_{m,k} \cos[\omega(t - t_0)] \quad t_0 = 152.5 \text{ day}$$



- Амплитуды модуляции, S_m , как функция энергии для всех наборов данных: DAMA/NaI, DAMA/LIBRA-фаза1 и DAMA/LIBRA-фаза2 выше 2 кэВ;
- ниже 2 кэВ используется только данные DAMA/LIBRA-phase2 (1,53 тонны × год).
- Четкая модуляция присутствует в области самых низких энергий (2-6 кэВ),
- S_m совместимы с нулевым значением при энергиях > 6 кэВ.

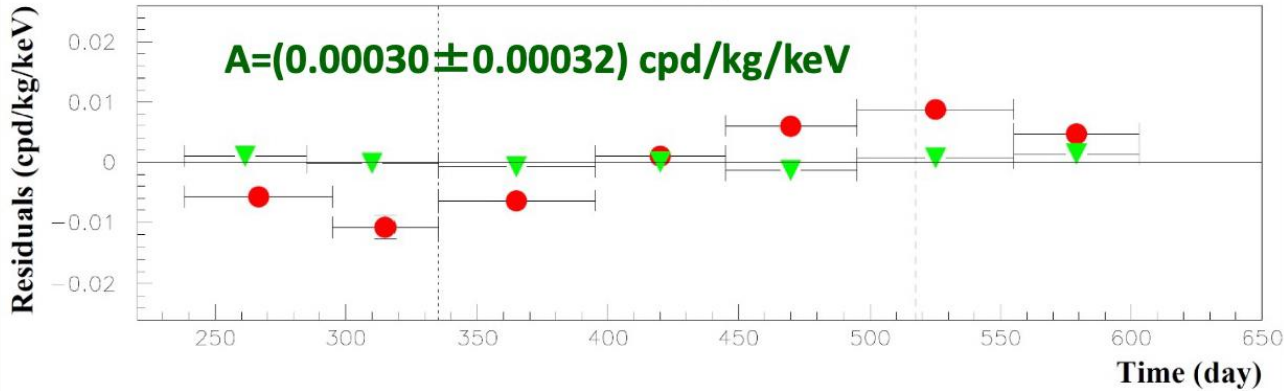
DAMA/LIBRA



- Экспериментальная остаточная скорость одиночных сцинтилляционных событий, измеренная с помощью DAMA/LIBRA-phase1 и DAMA/LIBRA-phase2 в интервалах энергий (2–6) кэВ, как функция времени.
- $A \cos \omega(t - t_0)$ с периодом $T = 2\pi / \omega = 1$ год, фазой $t_0 = 152,5$ дня (2 июня) и амплитудой модуляции A , равной центральному значению. Significance = 13.4σ
- для процедура фитирования DAMA/LIBRA всегда использовались остаточные спектры (residuals) частоты событий путем вычитания из сырых спектров среднего фона.

DAMA/LIBRA: фон

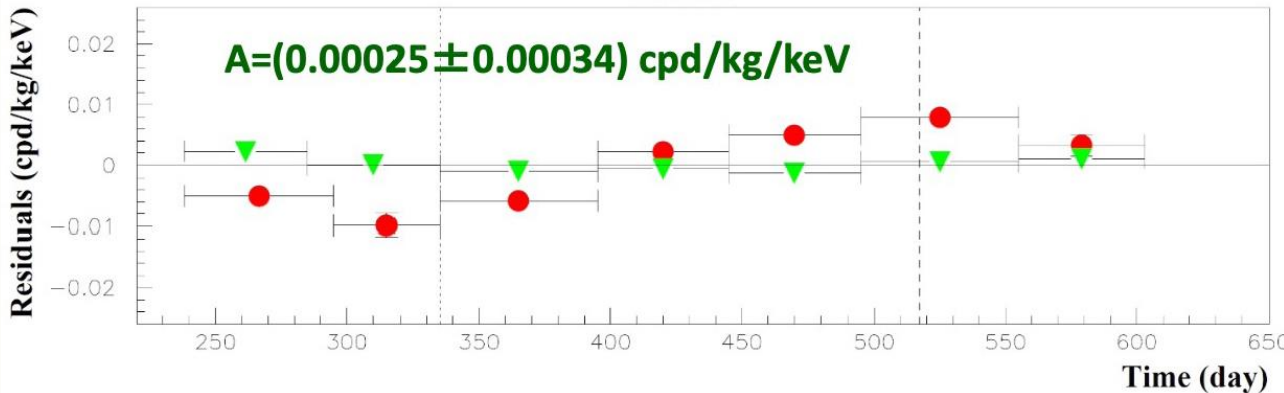
1-6 keV



Single hits events

Multiple hits events

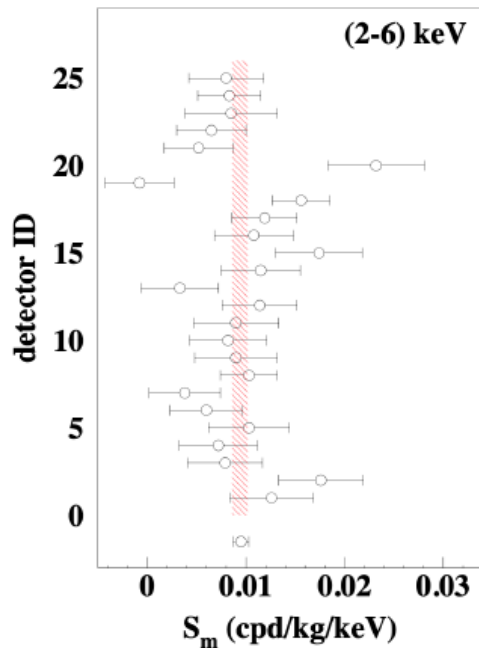
2-6 keV



- Четкая модуляция в одиночных событиях (красный)
- Отсутствие модуляции в множественных событиях (зеленый)

S_m for each detector

DAMA/LIBRA-phase1 + DAMA/LIBRA-phase2
total exposure: 2.57 ton×yr

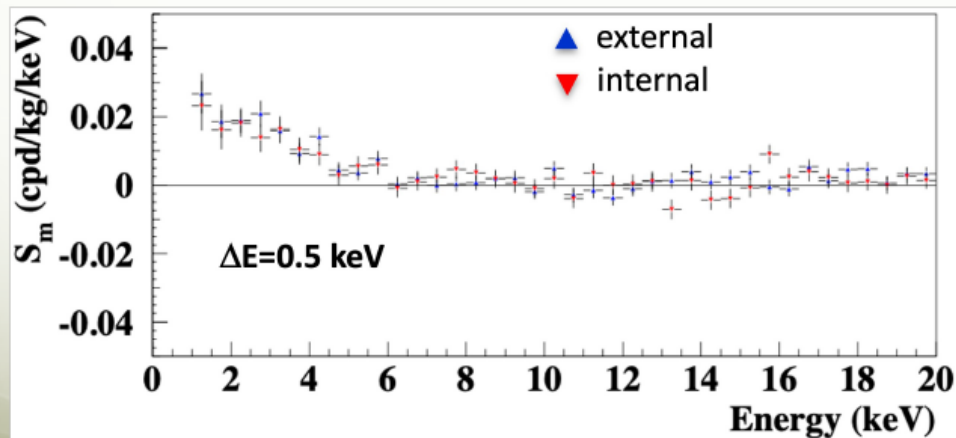
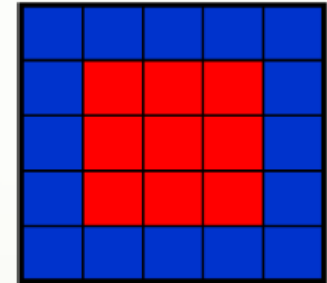


S_m in (2 - 6) keV for each of the 25 detectors (1σ error)

Shaded band = weighted averaged $S_m \pm 1\sigma$

- $\chi^2/\text{dof} = 38.2/24$ d.o.f. (P=3.3%)
- removing C19 and C20: $\chi^2/\text{dof} = 22.1/22$ d.o.f.

External vs internal detectors:



1-4 keV $\chi^2/\text{dof} = 1.9/6$

1-10 keV $\chi^2/\text{dof} = 7.6/18$

1-20 keV $\chi^2/\text{dof} = 36.1/38$

- The signal is rather well distributed over all the 25 detectors
- No difference between ext and int detectors

DAMA/LIBRA: источники фона

- радиоактивные изотопы в материалах детектора и окружающей среде
- зависящие от времени фоны от короткоживущих космогенно активированных радионуклидов (изотопы, которые образуются при взаимодействии космических лучей со стабильными нуклидами в материале детектора, т.н. “космогенный фон”). почти все космогенные изотопы происходят в результате взаимодействия космических лучей с ядрами Na или I.
- Radon
- Мюоны: cosmic rays interacting in the detectors, secondary radiation resulting from cosmic rays interacting
- PMT and electronics noise (detector noise)
- Нейтроны

NIMA592(2008)297, EPJC56(2008)333, J. Phys. Conf. ser. 203(2010)012040, arXiv:0912.0660, S.I.F.Atti Conf.103(211), Can. J. Phys. 89 (2011) 11, Phys.Proc.37(2012)1095, EPJC72(2012)2064, arxiv:1210.6199 & 1211.6346, IJMPA28(2013)1330022, EPJC74(2014)3196, IJMPA31(2017)issue31, Universe4(2018)116, Bled19(2018)27, NPAE19(2018)307, PPNP114(2020)103810

Радиоактивный фон

Source	$\Phi_{0,k}^{(n)}$ (neutrons cm ⁻² s ⁻¹)	η_k	t_k	$R_{0,k}$ (cpd/kg/keV)	$A_k = R_{0,k}\eta_k$ (cpd/kg/keV)	A_k/S_m^{exp}	
SLOW neutrons	Thermal n (10 ⁻² – 10 ⁻¹ eV)	1.08×10^{-6}	$\simeq 0$ However $\ll 0.1$	-	$< 8 \times 10^{-6}$	$\ll 8 \times 10^{-7}$	$\ll 7 \times 10^{-5}$
	Epithermal n (eV–keV)	2×10^{-6}	$\simeq 0$ However $\ll 0.1$	-	$< 3 \times 10^{-3}$	$\ll 3 \times 10^{-4}$	$\ll 0.03$
FAST neutrons	Fission, (α, n) \rightarrow n (1–10 MeV)	$\simeq 0.9 \times 10^{-7}$	$\simeq 0$ However $\ll 0.1$	-	$< 6 \times 10^{-4}$	$\ll 6 \times 10^{-5}$	$\ll 5 \times 10^{-3}$
	$\mu \rightarrow n$ from rock (> 10 MeV)	$\simeq 3 \times 10^{-9}$	0.0129	End of June	$\ll 5 \times 10^{-4}$	$\ll 7 \times 10^{-6}$	$\ll 6 \times 10^{-4}$
	$\mu \rightarrow n$ from Pb shield (> 10 MeV)	$\simeq 6 \times 10^{-9}$	0.0129	End of June	$\ll 1.1 \times 10^{-3}$	$\ll 1.4 \times 10^{-5}$	$\ll 1.3 \times 10^{-3}$
	$\nu \rightarrow n$ (few MeV)	$\simeq 3 \times 10^{-10}$	0.03342 ^a	Jan. 4th ^a	$\ll 5 \times 10^{-5}$	$\ll 1.8 \times 10^{-6}$	$\ll 1.6 \times 10^{-4}$
Direct μ	$\Phi_0^{(\mu)} \simeq 20 \mu\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$	0.0129	End of June	$\simeq 10^{-7}$	$\simeq 10^{-9}$	$\simeq 10^{-7}$	
Direct ν	$\Phi_0^{(\nu)} \simeq 6 \times 10^{10} \nu \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	0.03342 ^a	Jan. 4th ^a	$\simeq 10^{-5}$	3×10^{-7}	3×10^{-5}	

- Сводка вкладов в общий поток нейтронов;
- Скорость счета $R_{0,k}$ в фазе 2 DAMA/LIBRA для одиночных событий в диапазоне энергий (1–6) кэВ, индуцированных нейтронами, мюонами и солнечными нейтрино, подробно для каждого компонента.
- Амплитуды модуляции, A_k , (последний столбец) показан относительный вклад в годовую амплитуду модуляции, наблюдаемую DAMA/LIBRA-phase2, $S_{exp} \simeq 0,011$ имп/сутки/кг/кэВ.

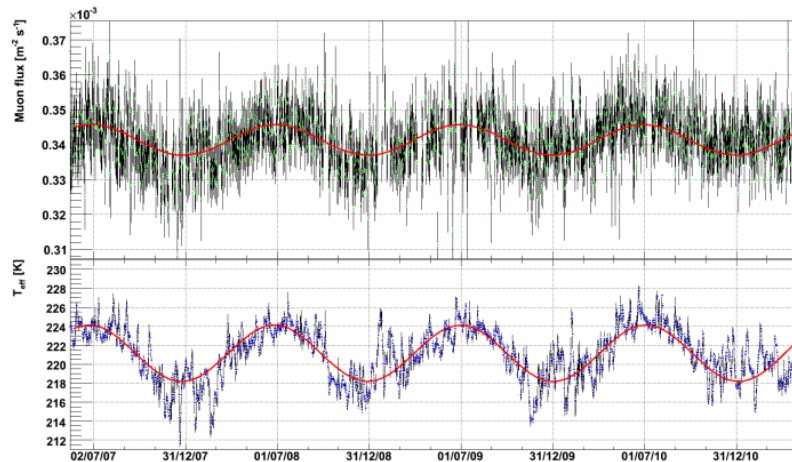
DAMA/LIBRA: фон, мюоны

- Мюоны космических лучей (μ) могут проникать глубоко под земную поверхность и напрямую взаимодействовать с элементами экспериментальной установки, или они могут взаимодействовать с окружающей инфраструктурой или экранирующими материалами, производя **вторичные** частицы, такие как **нейтроны** и **гамма**.
- Поток **мюонов** демонстрирует **годовую модуляцию в зависимости от температуры**. При более высоких температурах атмосфера Земли менее плотная, что позволяет большему количеству пионов и каонов от взаимодействия космических лучей с верхними слоями атмосферы распадаться на высокоэнергетические мюоны, которые могут проникать на глубину DAMA/LIBRA.
- **Поток мюонов в LGS** в среднем примерно в **10^6 раз ниже**, чем измеренное на уровне моря. Годовое изменение потока мюонов $\simeq 2\%$;
- Поток мюонов имеет фазу с максимумом, который приходится на конец июня/начало июля (28 июня ± 6 дней).

DAMA/LIBRA: ϕ_{OH}

<https://agenda.infn.it/event/9489/attachments/58002/68401/Kudryav.pdf>

Can muons explain the DAMA signal?



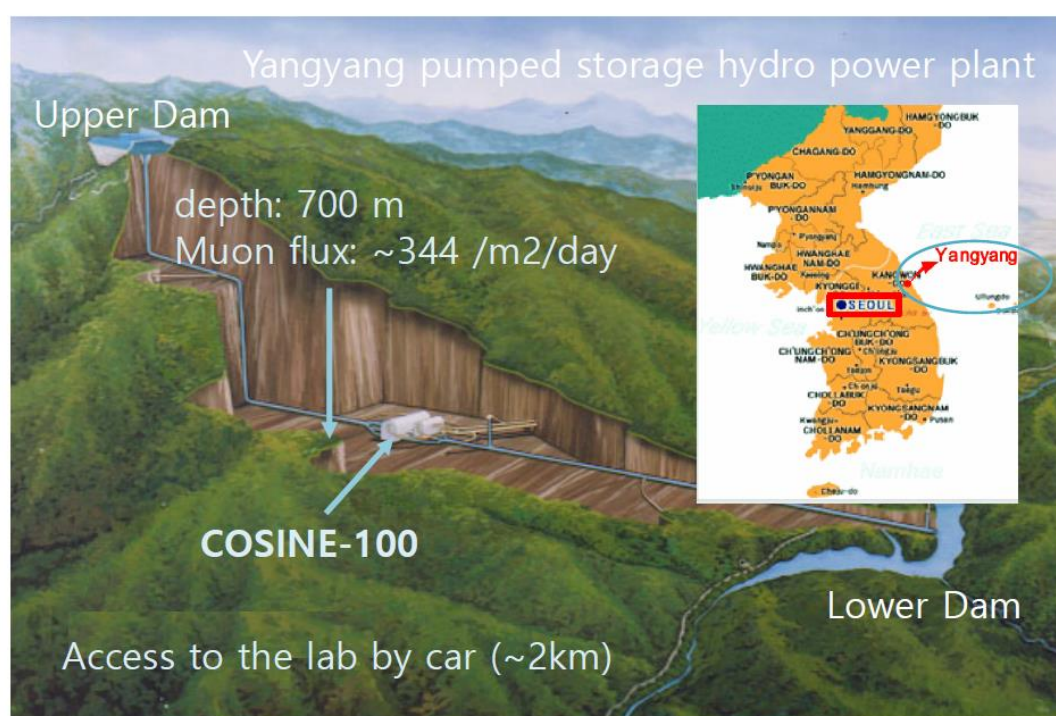
Borexino
Collaboration,
JCAP 1205
(2012), 015.

- Annual modulation of the muon rate has been observed by Borexino, LVD and MACRO.
- The modulation amplitude is about 1.4% of the average rate.

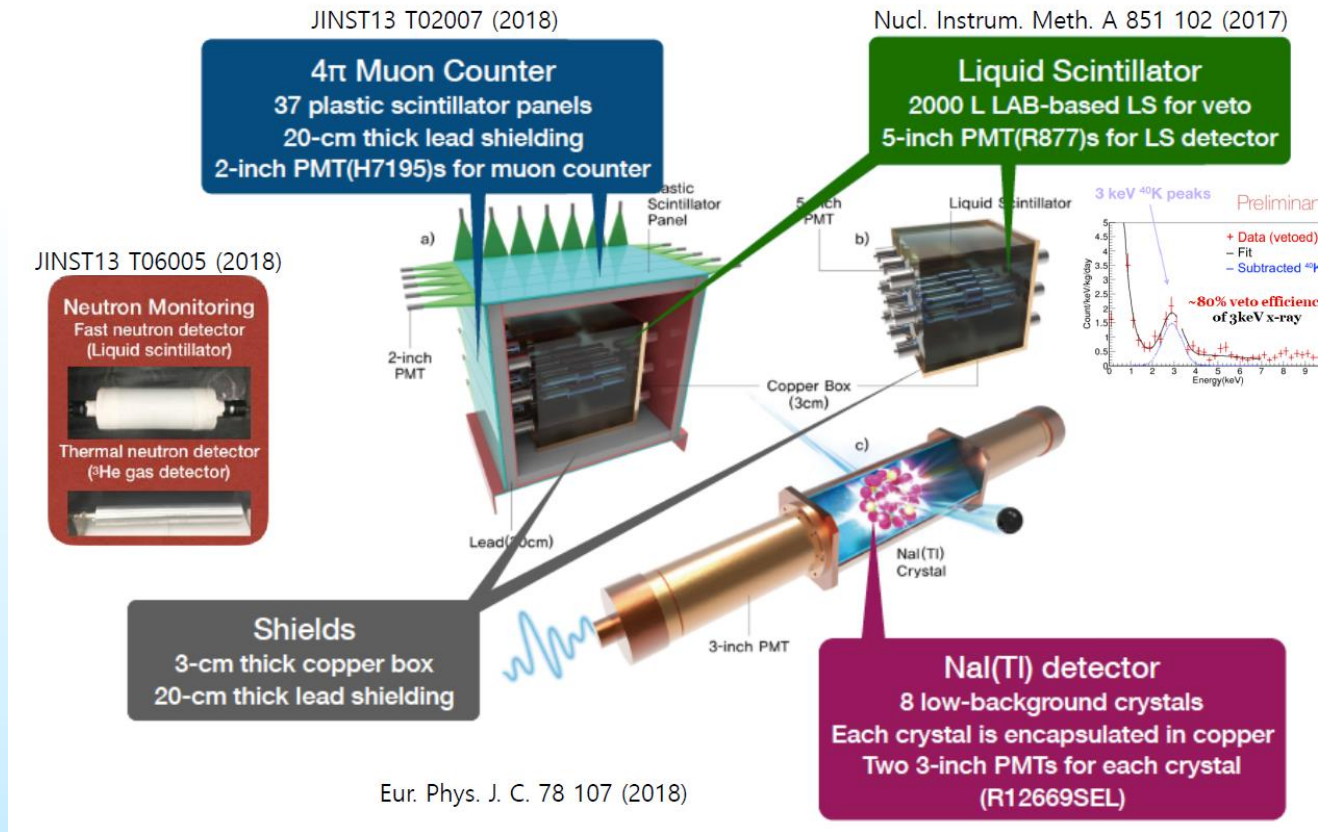
The simple estimate in Bernabei et al. EPJC72 (2012) 2064, clearly show that muon-induced neutron rate amplitude (4.6×10^{-5}) is several orders of magnitude smaller than the DAMA modulation amplitude.

COSINE-100

- Located at Yangyang underground laboratory (Y2L), South Korea
- 15 institutions, ~50 members
- Physics run started September 2016

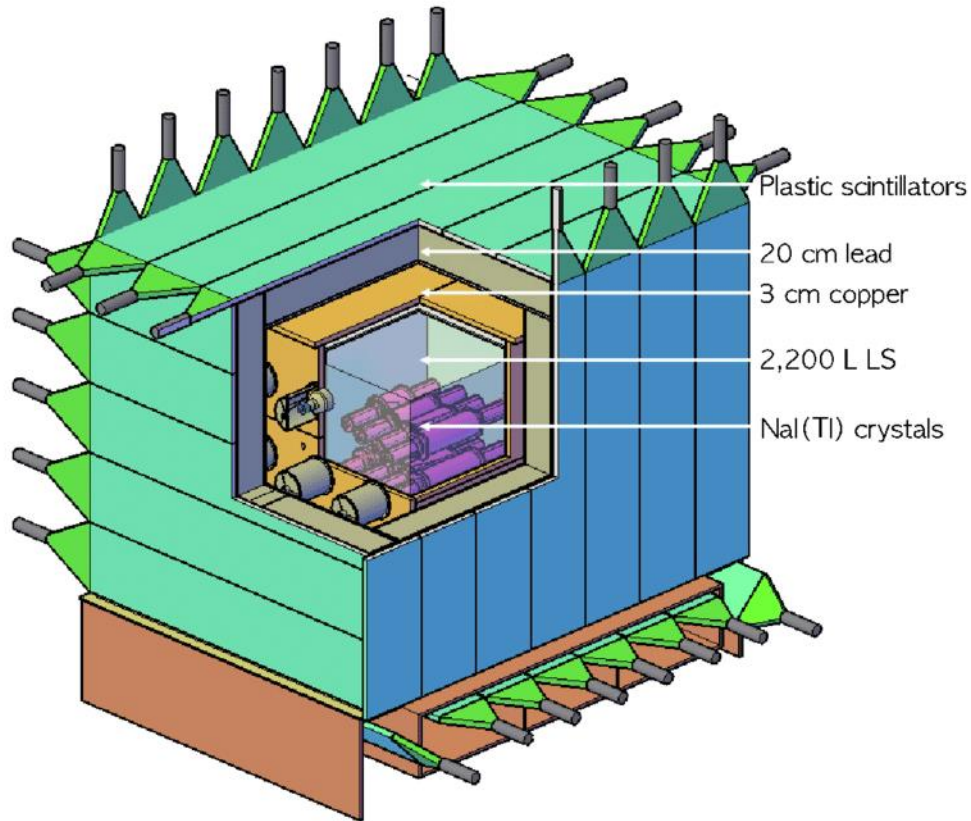


COSINE-100



- 8 низкофоновых кристаллов NaI(Tl), расположенных в ряд 4x2 штуки, с общей массой мишени 106 кг. Каждый кристалл соединен с двумя фотоумножителями (ФЭУ).
- Детекторы NaI(Tl) погружены в жидкий сцинтиллятор объемом 2200 литров, что позволяет идентифицировать и последующее понизить вклад радиоактивного фона, наблюдаемого кристаллом.
- Жидкий сцинтиллятор и пластиковыми сцинтилляторами для уменьшения фонового вклада внешнего излучения, а также мюонов космических лучей.

COSINE-100

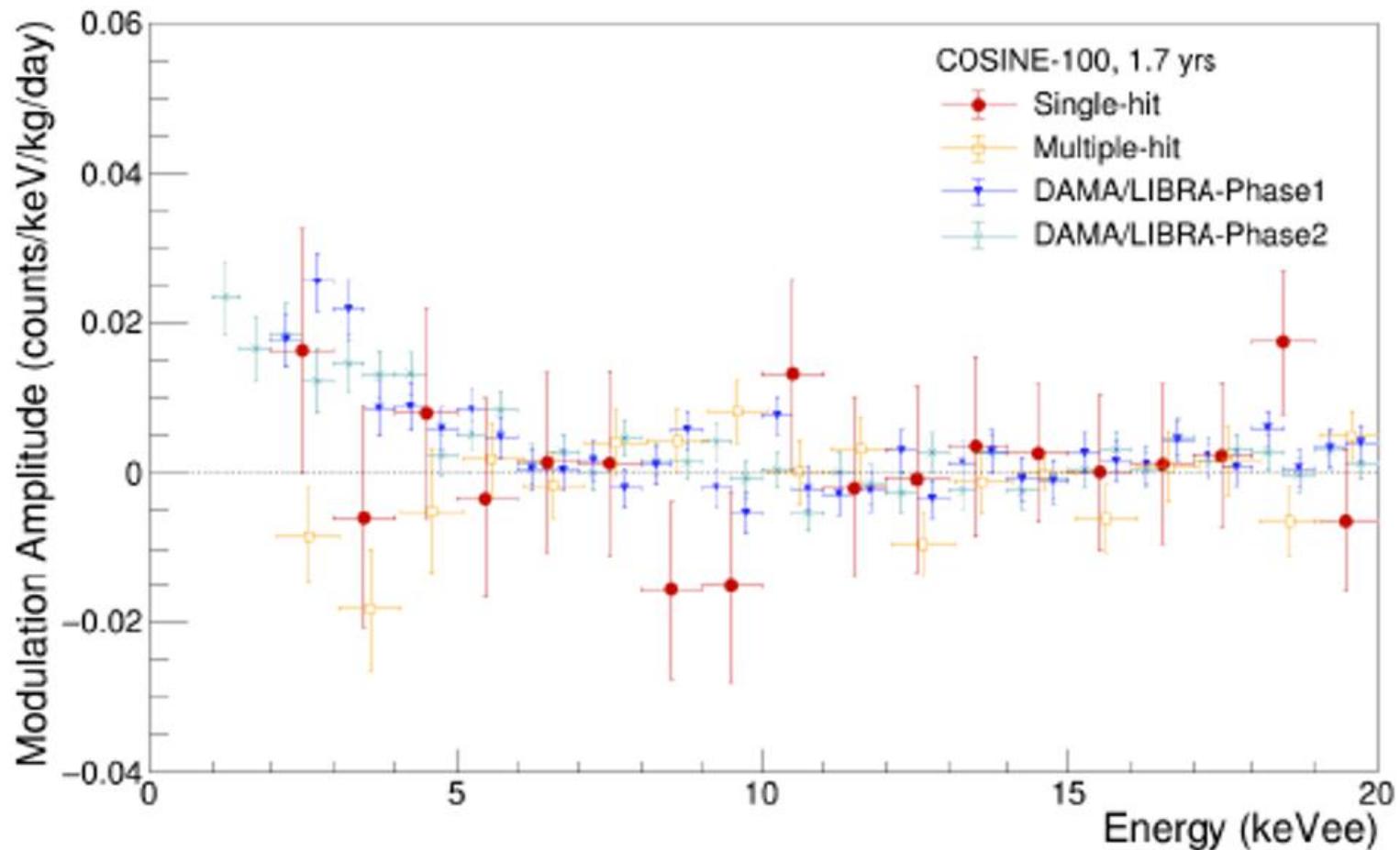


8 NaI(Tl) crystals

- U/Th/K level below DAMA, ^{210}Po Comparable
- Light yield $\sim 2 \times$ DAMA
- Total background $2\sim 4 \times$ DAMA's average

COSINE-100

arxiv:1903.10098



COSINE-100

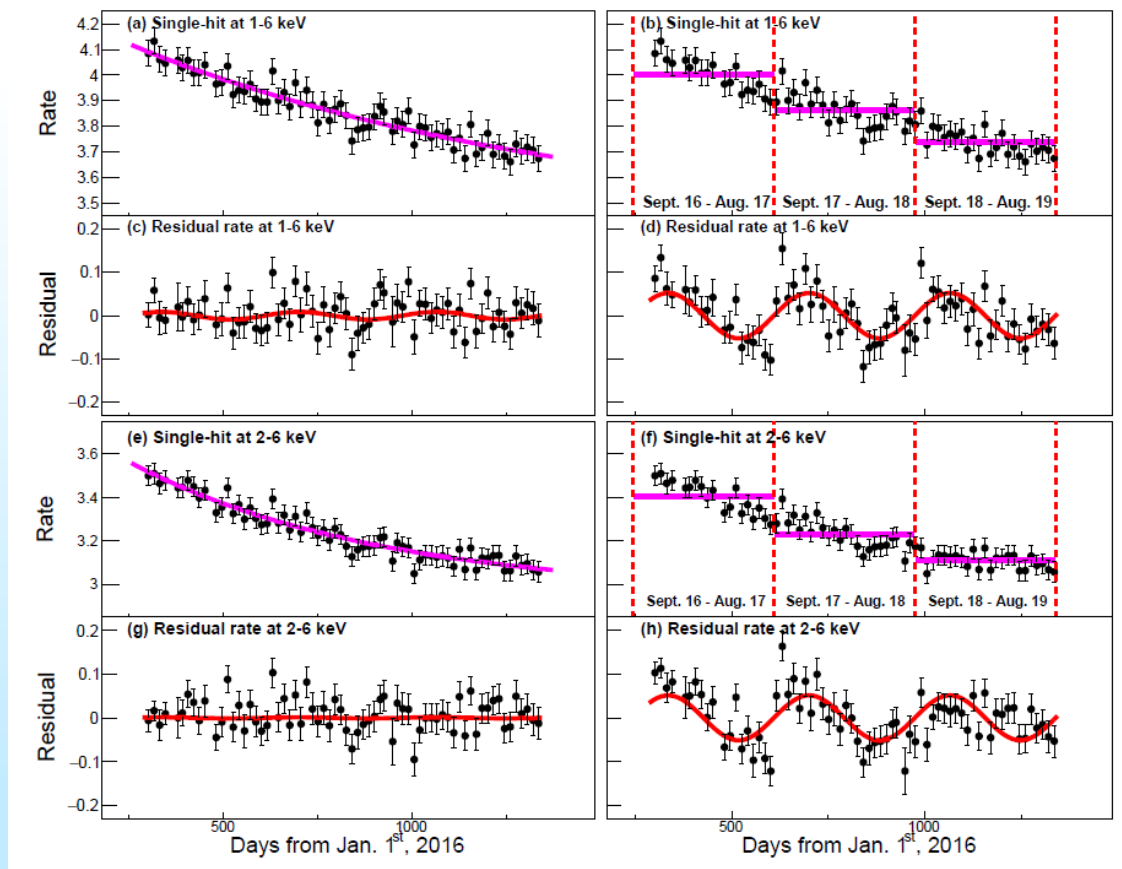
- Поскольку в анализе DAMA/LIBRA всегда использовались спектры частоты событий (residuals) полученные путем вычитания среднего фона для фитирования, моделируется фон зависящий от времени. **Используется два разных подхода.**
- Первая модель использует **экспоненциальную функцию** для описания зависящего от времени фона, который использовался для первоначальных годовых исследований модуляции в COSINE-100.
- Во второй модели используется **среднегодовые rates**, как и в эксперименте DAMA/LIBRA.
- После **вычитания фона** остаточные rates аппроксимируются **синусоидальной функцией**,

$$R(t) = S_m \cos \frac{2\pi(t - t_0)}{T}$$

COSINE-100: критика DAMA

Статья [arXiv:2208.05158](https://arxiv.org/abs/2208.05158) с критикой DAMA 10.08.2022

COSINE-100
Stat analysis



Одиночные
события

DAMA/LIBRA
Stat analysis

анализ данных COSINE-100 с точки зрения годовой модуляции, но с использованием методов анализа DAMA/LIBRA.

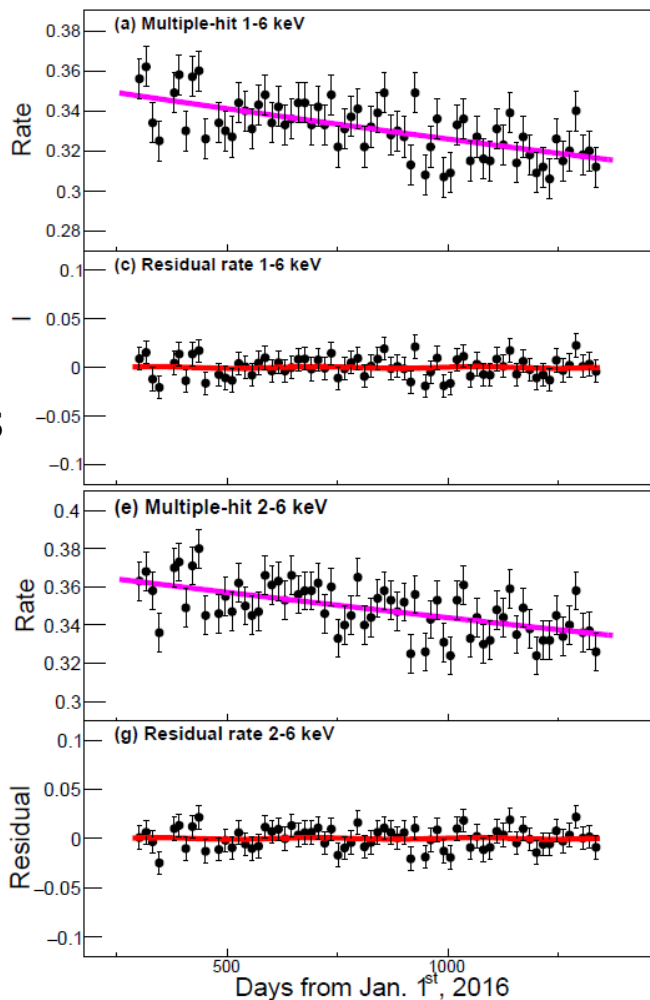
COSINE-100: критика DAMA

counts/kg/keV/day	1–6 keV	2–6 keV
COSINE-100, DAMA method	-0.0441 ± 0.0057	-0.0456 ± 0.0056
DAMA/LIBRA	0.0105 ± 0.0011	0.0095 ± 0.0008
COSINE-100	0.0067 ± 0.0042	0.0050 ± 0.0047
ANAIS-112	-0.0034 ± 0.0042	0.0003 ± 0.0037

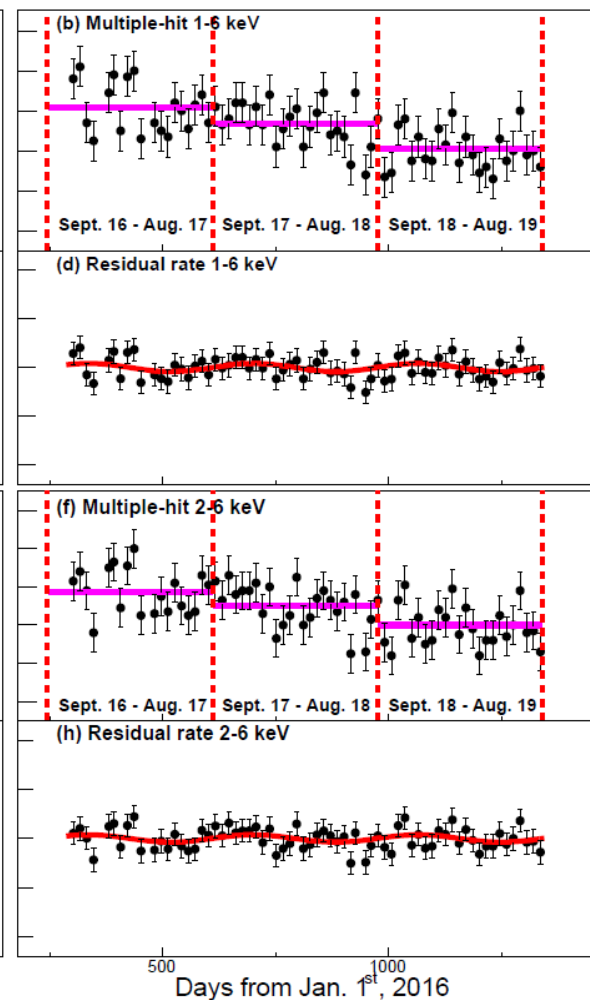
Годовые амплитуды модуляции из различных экспериментов. Амплитуды годовой модуляции t_s по DAMA-подобному методу к данным COSINE-100 за 3 года (настоящая работа) сравниваются с результатами DAMA/LIBRA, COSINE-100 и ANAIS-112, в области 1-6 кэВ и в области 2-6 кэВ.

COSINE-100: критика DAMA

Множественные
события



COSINE-100
Stat analysis



DAMA/LIBRA
Stat analysis

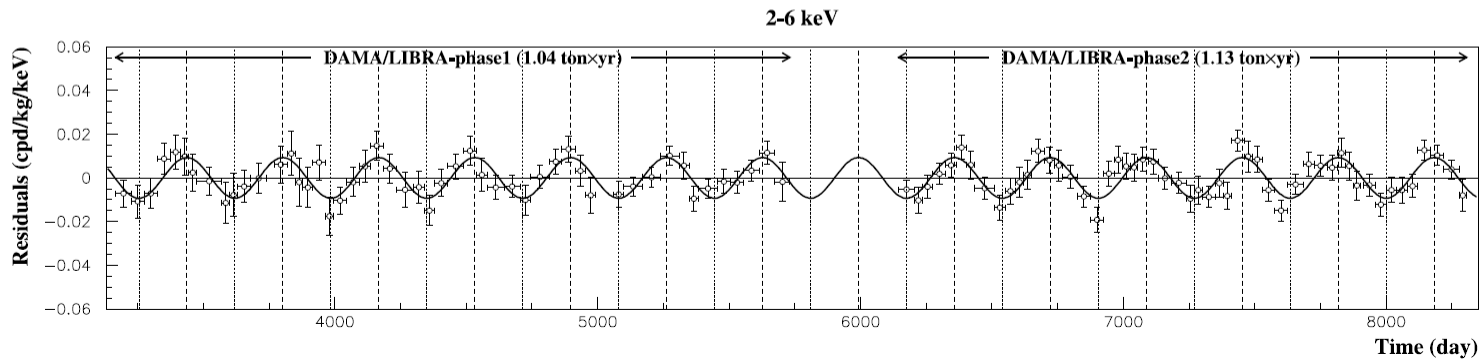
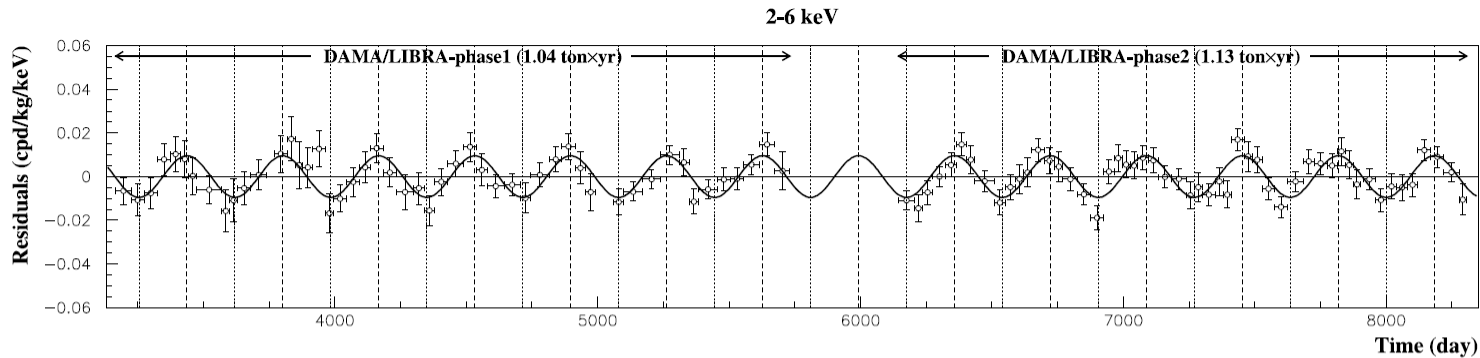
Ответ DAMA на критику

Статья DAMA с ответом на критику COSINE-100:arXiv:2209.00882

- появление **модуляции с ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ** амплитудами связано со **своеобразным поведением фона COSINE-100**, сильно уменьшающейся со временем, это не относится к DAMA/LIBRA.
- **Детекторы DAMA/LIBRA NaI(Tl) не являются «такими же» как детекторы COSINE-100**, т.к. они были выращены из разных порошков, с использованием разных процедур очистки, выращивания; они десятилетиями хранятся под землей, у них разные коэффициенты гашения ядер отдачи и т.д. Они имеют совершенно разные остаточные загрязнения и особенности, а также другую электронику и все остальные детали экспериментальной установки.
- Влияние долговременного изменяющегося во времени фона — если таковое имеется — незначительно

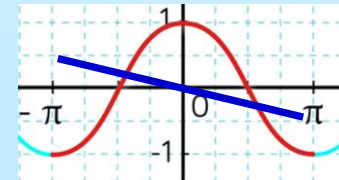
Ответ DAMA на критику

Progress in Particle and Nuclear Physics 114 (2020) 103810



Модуляция за вычетом фона, усредненного за год

Модуляция за вычетом фона, зависящего от времени (линейно в каждом году)



$$A = (0,0093 \pm 0,0008) \text{ cpd/kg/keV}$$

(фон, зависящий от времени)

$$\chi^2/n.d.f : 60,4/75$$

$$A = (0,0095 \pm 0,0008) \text{ cpd/kg/keV}$$

(усредненный фон за год)

$$\chi^2/n.d.f : 71,8/101$$

COSINE-100: ВЫВОДЫ

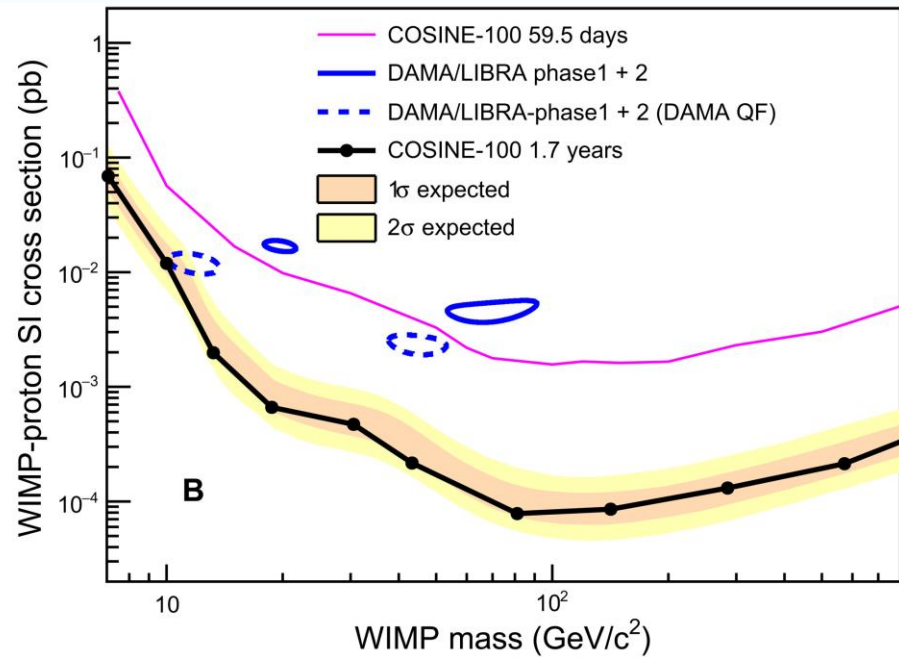
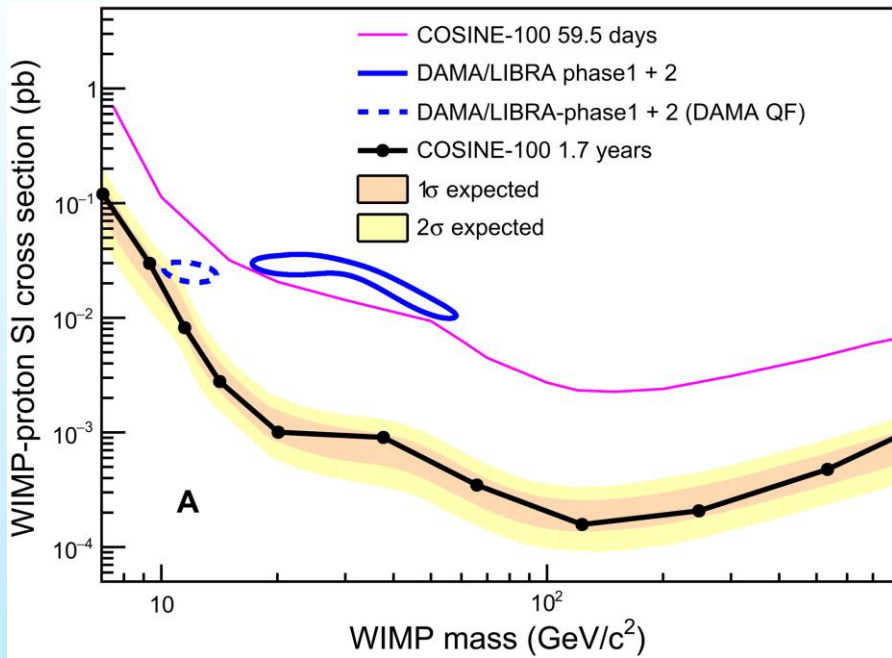
- В эксперименте DAMA/LIBRA использовалась residual rates вычитая среднюю скорость в каждом годовом цикле сбора данных, примерно начиная с сентября. Если фон не является постоянным во времени, эта процедура может генерировать ежегодно модулированные частоты событий.
- В частности, медленно увеличивающаяся частота событий в зависимости от времени может обеспечить ежегодную модуляцию, подобную наблюдаемой DAMA/LIBRA без сигналов темной материи.
- Зависимая от времени модель фона с использованием одной экспоненциальной функции затухания не дает модуляции по данным COSINE-100.
- Кроме того, метод, подобный DAMA, обеспечивает согласованный годовой сигнал модуляции DAMA/LIBRA при модуляции амплитуды, но фазы модуляции противоположны DAMA/LIBRA.
- Хотя наблюдаемая фаза противоположна наблюдениям DAMA/LIBRA, постоянная величина амплитуды модуляции может указывать на интересное явление, скрытое в процедуре вычитания фона DAMA/LIBRA.

COSINE-200: планы

- Needs a factor two or more improvement
- Current COSINE-100 shield is designed for 200 kg experiment
- Replace all crystals
- COSINE-200 in the South Pole or Grand Sasso?
- COSINE-200 will be precursor for COSINE-1ton
- COSINE-1ton experiment ? (2025~), 0.5 keV threshold

Back Up

WIMP cs limits



Источники систематики

RADON	Sealed Cu box in HP Nitrogen atmosphere	$<2.5 \times 10^{-6}$ cpd/kg/keV
TEMPERATURE	Installation is air conditioned+ detectors in Cu housings directly in contact with multi-ton shield huge heat capacity, T continuously recorded	$<10^{-4}$ cpd/kg/keV
NOISE	Effective full noise rejection near threshold	$<10^{-4}$ cpd/kg/keV
BACKGROUND	No modulation above 6 keV; no modulation in the (2-6) keV multiple-hits events;	$<10^{-4}$ cpd/kg/keV
SIDE REACTIONS	Muon flux variation measured at LNGS	$<3 \times 10^{-5}$ cpd/kg/keV
EFFICIENCIES	Regularly measured by dedicated calibrations	$<10^{-4}$ cpd/kg/keV

DAMA/LIBRA: predictions

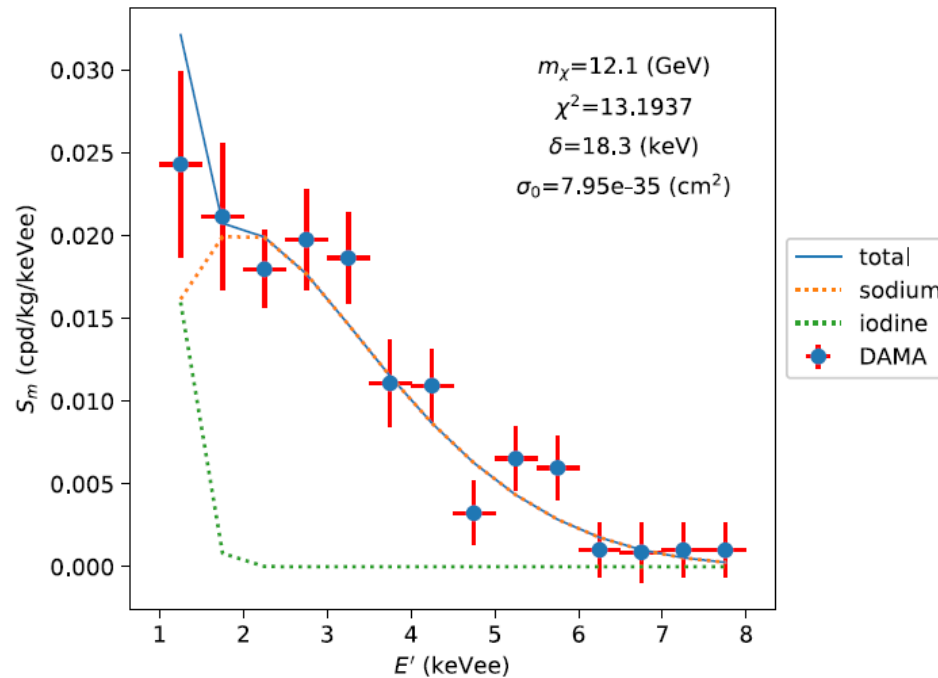
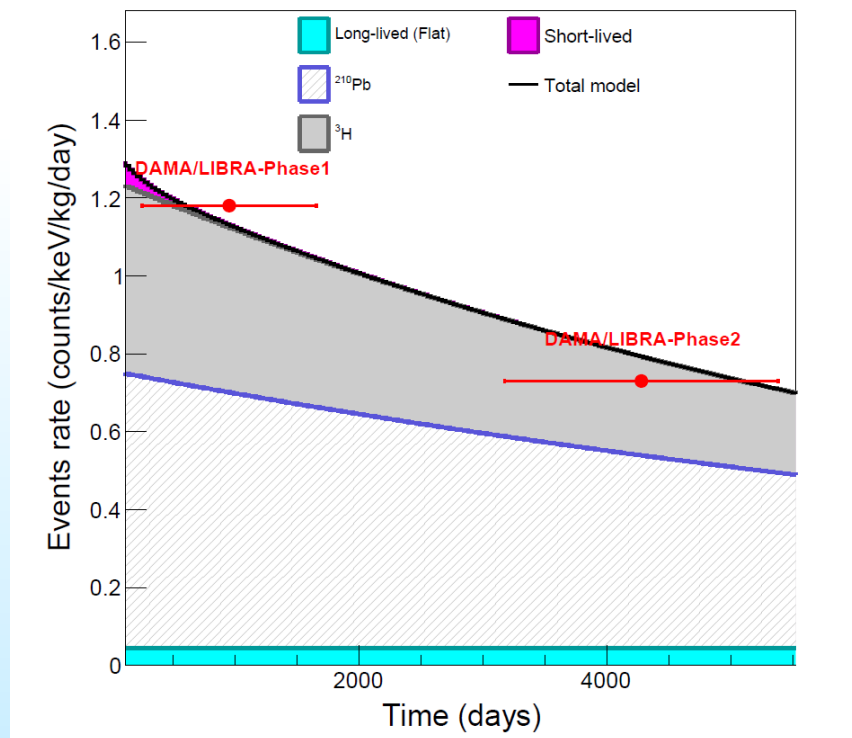


FIG. 1. DAMA modulation amplitudes as a function of the measured ionization energy E' for the absolute minimum of the pSIDM model in the case of a Maxwellian WIMP velocity distribution. The points with error bars correspond to the combined data of DAMA/NaI [32], DAMA/LIBRA-phase1 [3,4] and DAMA/LIBRA-phase2 [8].

COSINE-100: критика DAMA



COSINE-100 кристалл N6. Преобладающие фоны в этом кристалле связаны с ^3H и ^{210}Pb , получается пониженная интенсивность фона. Модель фона правдоподобно описывает снижение скорости от DAMA/LIBRA-фаза1 к DAMA/LIBRA-фаза2. Смоделированные данные генерируются из вышеупомянутого зависящего от времени фона без сигналов темной материи.

DAMA/LIBRA: significance

$$\sigma(S_m) = \sqrt{\frac{b^2 + S_0}{W(1 - \beta^2)}}$$

$$W = \sum_i \omega_i, \quad \omega_i = M \Delta t_i \Delta E \varepsilon$$

$$\beta = \langle \cos \rangle = \frac{1}{W} \sum_i \omega_i \cos(t_i - t_0)$$

$$\alpha = \langle \cos^2 \rangle = \frac{1}{W} \sum_i \omega_i \cos^2(t_i - t_0)$$

ε - efficiency

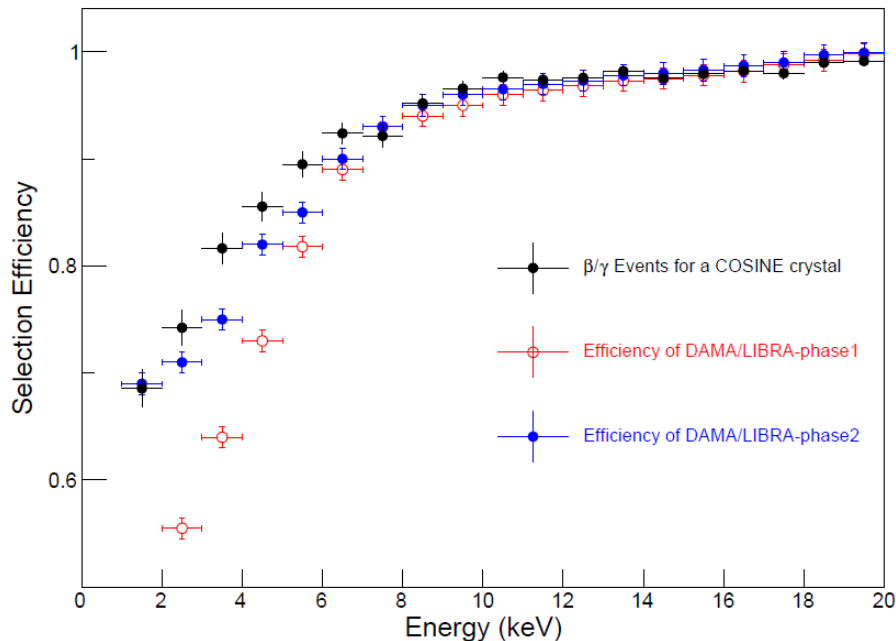
M - detector mass

Δt - time interval (day)

ΔE - energy interval

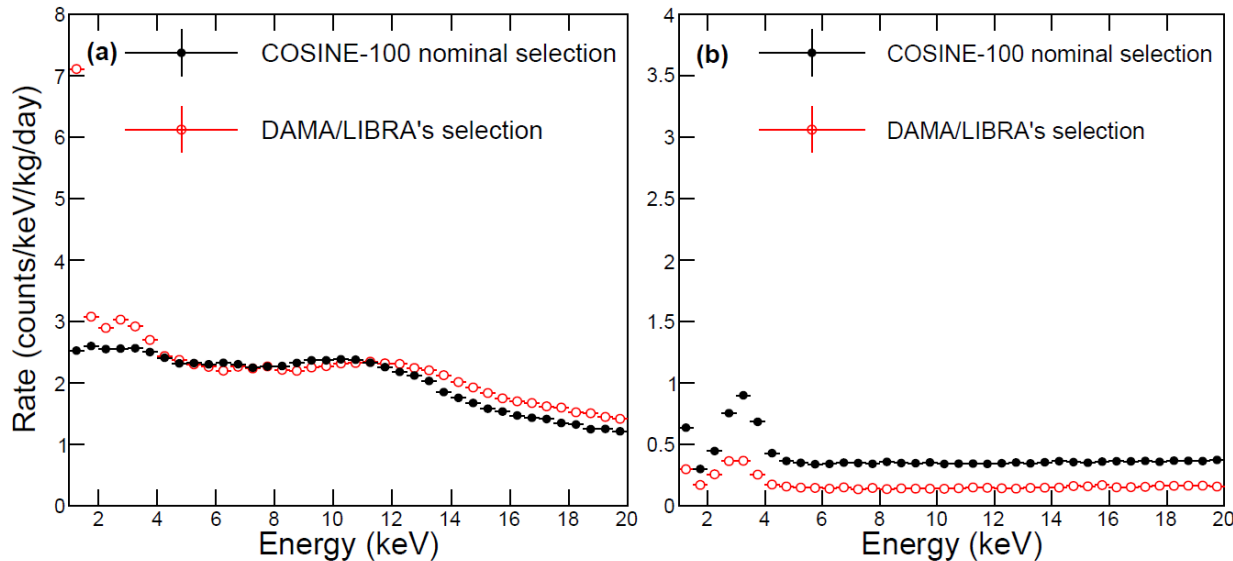
COSINE-100 vs DAMA/LIBRA differences: ES efficiency

Эффективность отбора с набором данных калибровки источником ^{60}Co , который использовался для анализа данных COSINE-100, DAMA/LIBRA использовала данные калибровки ^{241}Am .



- Эффективность отбора событий с выбором событий DAMA/LIBRA применительно к данным COSINE-100.
- Эффективности отбора событий, определенные по данным калибровки кристалла ^{60}Co COSINE-100.
- Критерии выбора, определены для обеспечения эффективности, аналогичной фазе 2 DAMA/LIBRA.

COSINE-100 vs DAMA/LIBRA: energy spectra

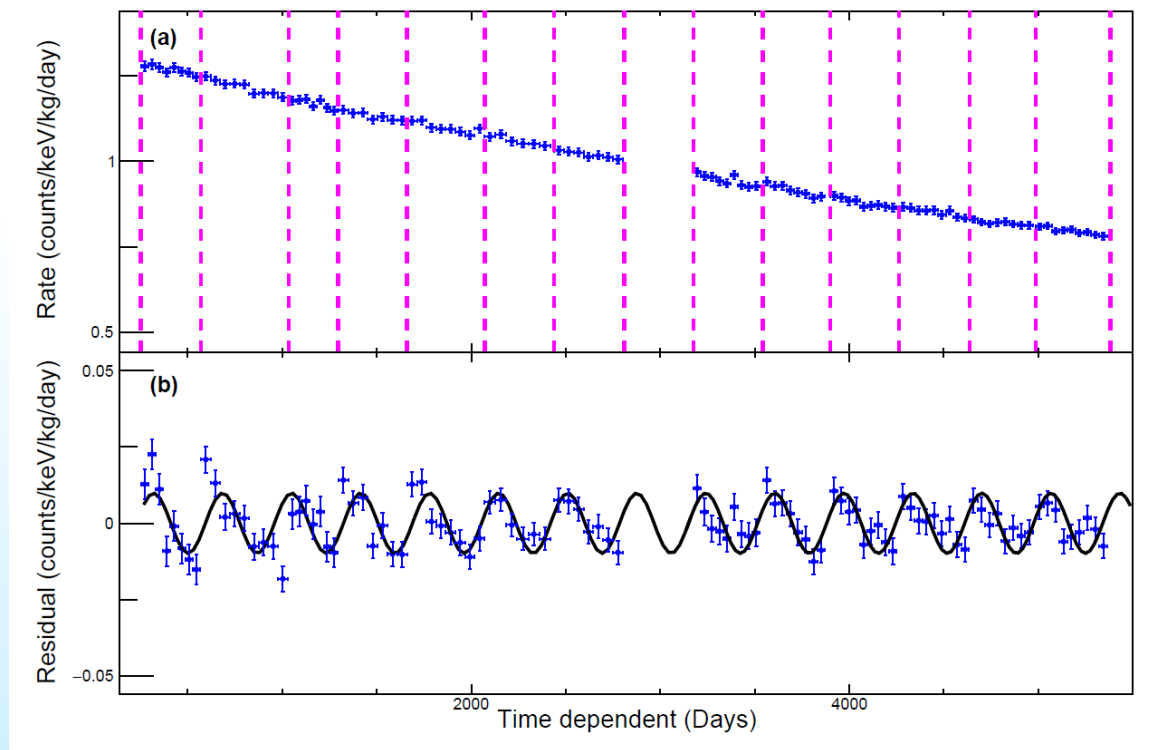


Энергетические спектры одиночных и многократных событий полученные после отбора событий. Выбор событий DAMA/LIBRA выше чем в COSINE-100 при энергии ниже 2 кэВ. Эти события были отнесены к категории шума, вызванного ФЭУ, в номинальной селекции событий COSINE-100.

В энергетическом спектре DAMA/LIBRA-phase2 присутствует умеренное увеличение частоты событий ниже 2 кэВ, хотя эти избыточные события были заявлены как возможные взаимодействия темной материи.

Однако возможность наличия остатков шума, вызванного ФЭУ, для избыточных событий данных DAMA/LIBRA не полностью исключена.

COSINE-100: критика DAMA



Монте-Карло модель данных для 13-летних циклов эксперимента DAMA/LIBRA. Вертикальные линии представляют начало и конец годовых циклов, используемых в DAMA/LIBRA.

Остаточный спектр за вычетом среднегодовой скорости в DAMA-подобном методе с модуляцией (сплошная линия). Наблюдается сильная отрицательная модуляция $S_m = 0.0098 \pm 0.0008$ counts/kg/кэВ/day, что соответствует примерно 12-й стат. значимости.

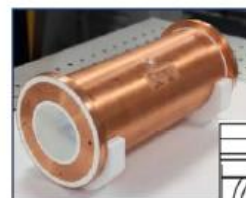
ANAIS

Detector set-up: detectors

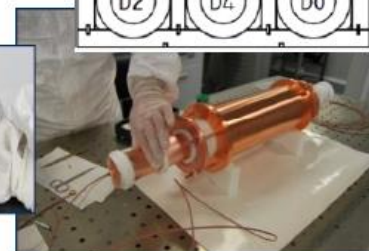
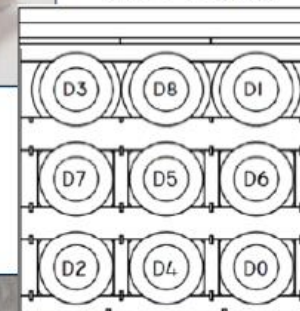
Nine modules produced by Alpha Spectra Inc following low radioactivity protocols

<i>Detector</i>	<i>Quality powder</i>	<i>Received at Canfranc in</i>
D0, D1	<90 ppb K	December 2012
D2	WIMPScint-II	March 2015
D3	WIMPScint-III	March 2016
D4, D5	WIMPScint-III	November 2016
D6, D7, D8	WIMPScint-III	March 2017

- **Nal(Tl) crystals** grown from selected ultrapure NaI powder and housed in OFE copper
- Mylar **window** allowing low energy calibration
- Two Hamamatsu R12669SEL2 **photomultipliers** coupled to each crystal at Canfranc clean room
 - Low background and high Quantum Efficiency
 - Radioactivity screening at Canfranc



12.5 kg each
4.75" diameter
11.75" length



Voltage dividers in
cuflon PCB

Housing made at LSC of
electroformed copper

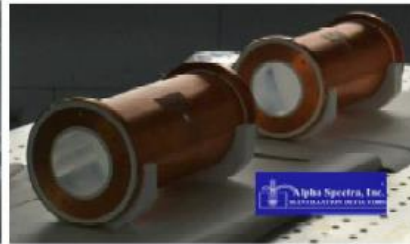


ANAIS

Goals and history



12.5 kg
Alpha Spectra Inc.



ANAIS-25



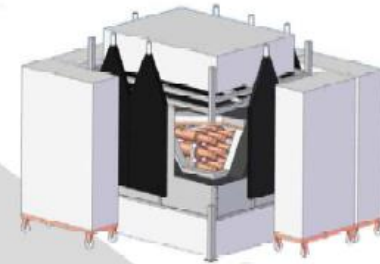
9.6 kg
Saint-Gobain



10.7 kg
BICRON

ANAIS-0

ANAIS-112



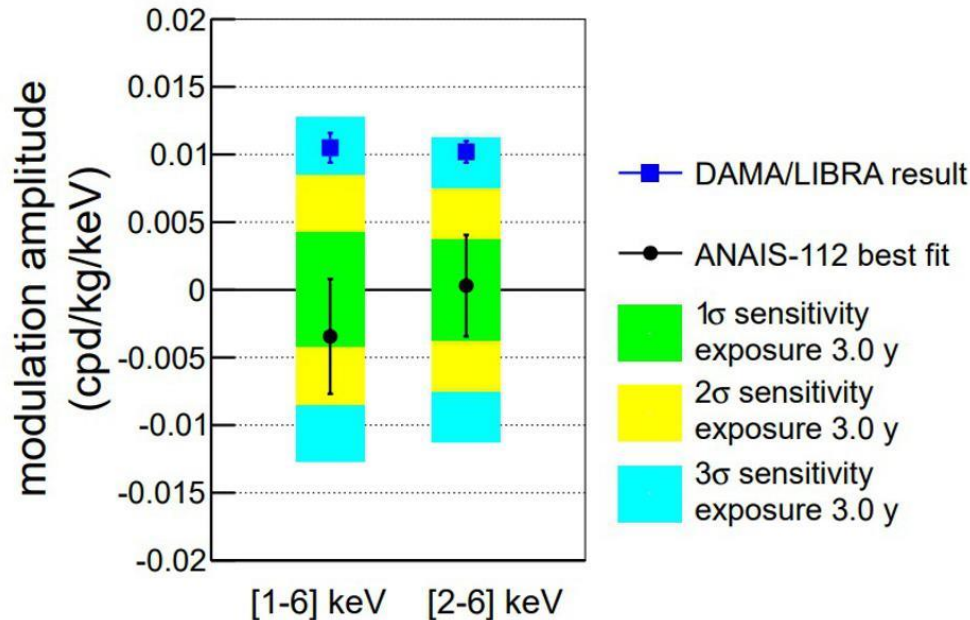
ANAIS-37



ANAIS-112:

- Commissioning in March-April 2017
- Calibration and general assessment from April to July 2017
- **Dark matter run** is underway since **3rd, August 2017**: first year of data taking is about to be successfully completed

ANAIS



The best-fit amplitude of an annual modulation signal for a nuclear recoil with sodium iodide. The DAMA/LIBRA result shows a signal at extreme confidence, but the best attempt to replicate that has instead yielded a null result. The default assumption should be that the DAMA collaboration has an unaccounted for noise artifact. J. AMARÉ ET AL./ANAIS-112 COLLABORATION, ARXIV:2103.01175

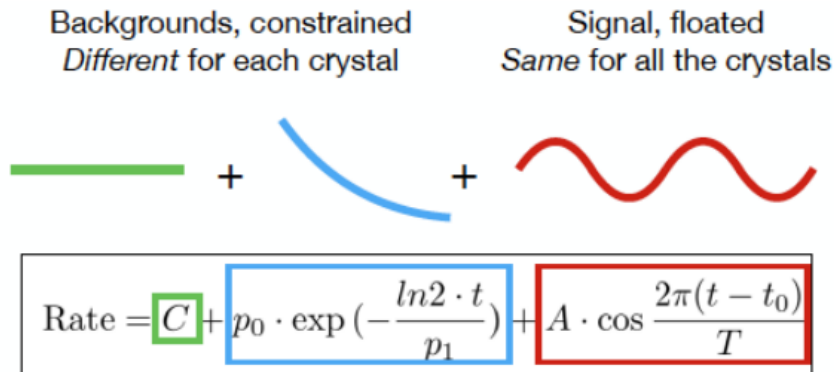
Барионная темная материя

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

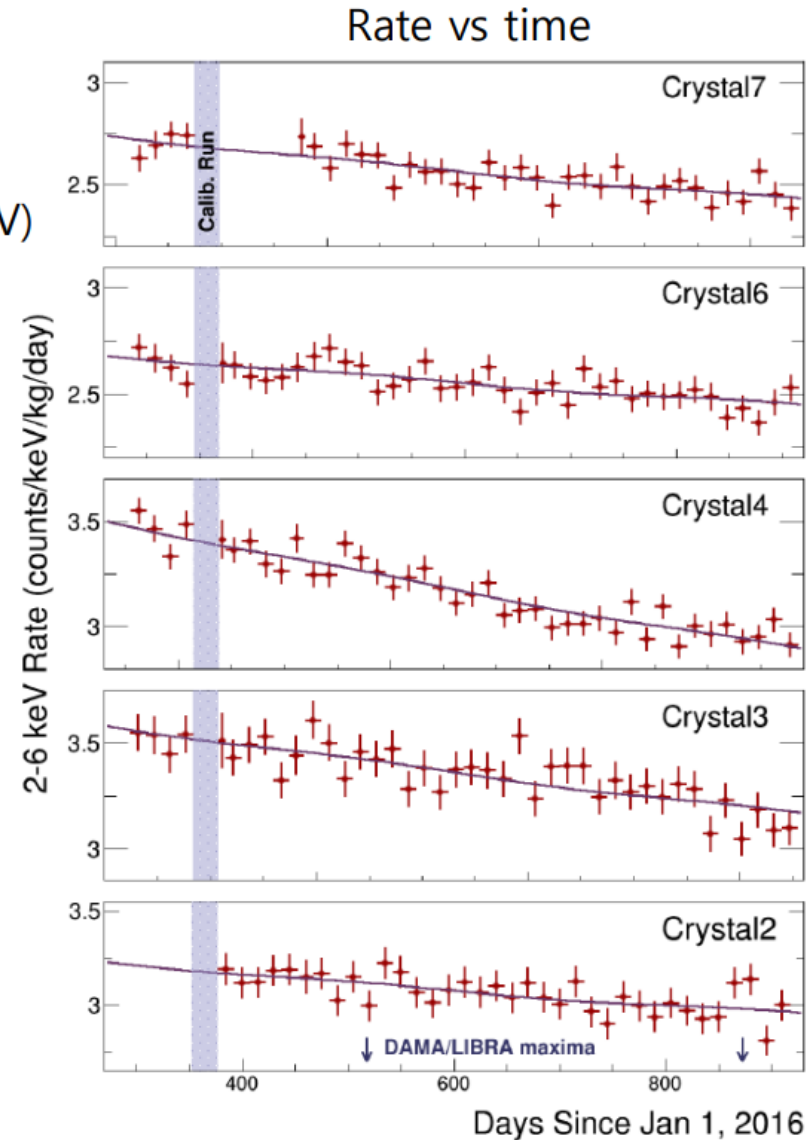
Death of stellar baryonic dark matter candidates
(Fields, Freese, and Graff, astro-ph/0007444)

COSINE-100

- 97.7 kg•yr exposure (SET2, 1.7 years)
- Background + modulation signal fit to data (2-6 keV)
- Simultaneous fitting of 5 crystals
- Analysis based on likelihood ratio method



Internal (^{40}K , ^{210}Pb)
cosmogenic (^3H , ^{109}Cd)



DAMA/LIBRA: шумы

- DAMA не использует активные методы подавления фона, такие как различение формы импульса, чтобы избежать отклонения сигналов WIMP. Тем не менее, DAMA использует некоторые методы для подавления шума фотоумножителя и других фонов.
- Эти методы могут подавлять случайный шум ФЭУ, но не устраняют фон от эффекта послесвечения динода. Послесвечение динода - это явление, которое, как полагают, вызвано излучением света от динодов ФЭУ, которое может достичь второй лампы с оптической связью, что приводит к ложному совпадению. Эти события наблюдались в эксперименте NAIAD NaI(Tl), и было обнаружено, что они не были должным образом отклонены при рассмотрении постоянной времени сцинтилляций
- Во-первых, они требуют что оба ФЭУ в кварцевом модуле регистрируют сигнал в определенном временном окне (50 или 100 нс). DAMA отбрасывает события с коротким временем затухания, что помогает уменьшить шум ФЭУ. Шум ФЭУ создает более быстрый импульс, чем сигнал.
- DAMA также обрезает «многократные события», когда сцинтилляционное событие происходит в нескольких кристаллах. Поскольку некоторые фоны могут перемещаться между детекторами и взаимодействовать дважды или в совпадении с другими фонами, но темная материя WIMP взаимодействует редко, событие, зарегистрированное несколькими детекторами, с большой вероятностью будет фоновым и может быть безопасно исключено.

DAMA/LIBRA: шумы

- В исследуемой области шумовые события, вызванные ФЭУ, в основном вносят вклад в “одиночные” события.
- Обычно они имеют быстрое время затухания менее 50 нс по сравнению с типичными сцинтилляциями NaI(Tl) около 250 нс.
- В эксперименте DAMA/LIBRA был разработан параметр для различения шума, вызванного ФЭУ, путем использования отношения быстрого заряда между 0 и 50 нс, X1, и медленного заряда между 100 и 600 нс, X2, каждый из которых определяется относительно времени в передний фронт сигнала ФЭУ.
- Параметр выбора события (ES), основанный на X1 и X2, обеспечил хорошее разделение шума, вызванного ФЭУ.
- Таким образом, если модуляция, обнаруженная в области самых низких энергий, была обусловлена модуляцией фона (а не сигналом), то в областях с более высокими энергиями должна присутствовать такая же или большая модуляция

Горячая или холодная?

Темная материя может быть разделена на **горячую** и **холодную**.

- **Горячая:** частицы имеют большую скорость (на стадии формирования вселенной, т.е. когда комки материи, из которых потом образуются первые галактики и скопления галактик, только начали формироваться).
 - препятствовали бы образованию крупномасштабных структур, что противоречит наблюдательным данным.
- **Холодная:** частицы имеют “маленькую” скорость на стадии формирования вселенной
 - темная материя, смогла бы сжаться в сгустки размером с галактику или меньше. Тогда галактики объединялись бы в скопления.

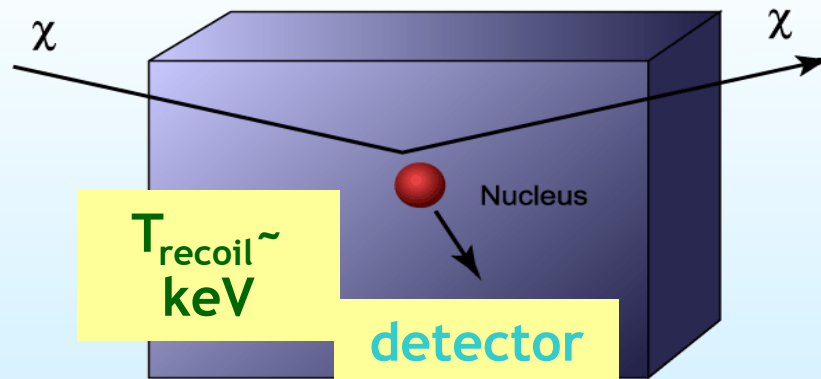
Наблюдения космической обсерватории Чандра показывают, что скопления галактик создаются слиянием групп и малых скоплений, что является сильным аргументом, подтверждающим гипотезу **холодной** темной материи.

Production of Liquid Scintillator

COSINE-100 uses a linear alkylbenzene (LAB)-based liquid scintillator, which contains 3 g/L of 2,5-diphenyloxazole (PPO) and 30 mg/L of 1,4-bis (2- methylstyryl) benzene (bis-MSB) as a primary and secondary wavelength shifter

Прямое детектирование

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



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

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

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

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

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

Modulation fitting: S_0 , S_m

В частности, значения S_m могут быть не только положительными, но и отрицательными или нулевыми, что связано с ожидаемыми профилями распределения энергии в июне и декабре в пределах конечного энергетического окна;

наивысшая чувствительность может быть получена при рассмотрении наименьших бинов по энергии, разрешенных доступной статистикой в интересующей области энергий.

Однако функции $S_{0,k}$ и $S_{m,k}$ зависят от: параметров физики частиц (таких как масса T_M , сечения и т. д.); астрофизические параметры (особенности темного гало, скорости и распределения); параметры ядерной физики (свойства мишени, форм-факторы и связи); экспериментальные параметры относительно отклика детектора.

В подходе годовой модуляции представляет интерес только тот фон, который способен имитировать сигнатуру, т. е. способен учитывать всю наблюдаемую амплитуду модуляции и одновременно удовлетворять всем многочисленным специфическим особенностям сигнатуры.

Радиоактивный фон: COSINE-100

- Фоновые компоненты делятся на четыре категории:
- внутреннее загрязнение, поверхностное загрязнение, внешние источники и космогенная активация. Примеси ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{210}Pb в кристалле составляют внутренний фон. Загрязнения ^{210}Pb на поверхности кристалла и прилегающих материалах являются поверхностной составляющей. Фоны от ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K в ФЭУ и материалах экрана представляют собой внешние источники. Чтобы оценить вклад космогенной активации, мы используем временной анализ, учитывающий время воздействия космических лучей на землю и время охлаждения каждого кристалла в подземной лаборатории (35).
- Наиболее доминирующие фоновые компоненты в ROI генерируются внутренним радионуклидным загрязнением и космогенной активацией. Сюда входят внутренние загрязнения ^{210}Pb и ^{40}K , а также поверхностное загрязнение ^{210}Pb . Вклад в ROI от космогенной активации в основном обусловлен ^3H с некоторыми дополнительными вкладами от ^{113}Sn и ^{109}Cd .
- Моделирование фона выполнялось независимо для каждого кристалла, показан совокупный результат подгонки модели к данным и систематическим погрешностям.

arXiv:1306.1411v2

Galaxy do not allow us to get information on this crucial key item without introducing a model for the Galaxy matter density. A widely used density distribution of Dark Matter is the isothermal sphere model; it consists in a spherical infinite system with a flat rotational curve. Due to its simplicity, the isothermal sphere model is often the used assumption in the evaluation of Dark Matter expected rates. However many of its underlying assumptions (sphericity of the halo, absence of rotation, isotropy of the dispersion tensor, flatness of the rotational curve) are not strongly constrained by astrophysical observations. Moreover, the isothermal sphere is strictly unphysical and may only represent the behavior of the inner part of physical systems, since it has a total infinite mass and needs some cutoff at large radii. Thus, the use of more realistic halo models is mandatory in the interpretation and comparison procedures, since the model dependent results can significantly vary. An extensive discussion about some of the more credited halo models has been reported e.g. in Ref. 115, 116 and references therein.

R. Bernabei, P. Belli, A. Bussolotti et al. / Progress in Particle and Nuclear Physics 114 (2020) 103810

The energy dependence of the modulation amplitude, $S_m(E)$, obtained through maximum likelihood method at fixed period and phase: $T = 1$ yr and $t_0 = 152.5$ day.

The usual procedure is to minimize the function $y_k = -2 \ln(\mathcal{L}_k) - const$ for each energy bin; the free parameters of the fit are the $(b_{jk} + S_{0,k})$ contributions and the $S_{m,k}$ parameter.

DM Halo

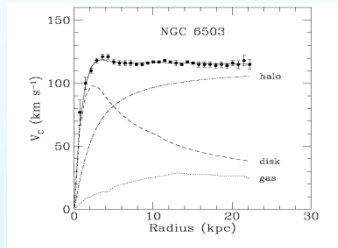
Drukier, Freese, Spergel PRD 86
Freese et al. PRD 88

III. THE HALO MODEL

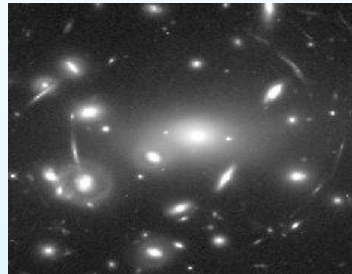
In discussing particle detectability, Goodman and Witten² assumed that the halo is composed of particles with velocities $\approx 200 \text{ km sec}^{-1}$. Because of the strong sensitivity of the system to particle velocity, we are motivated to use a more realistic model of the local distribution of dark matter.

Свидетельства существования “темной материи”

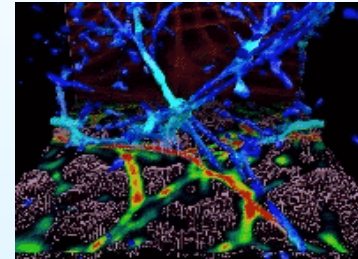
Rotation curves of galaxies



Lensing



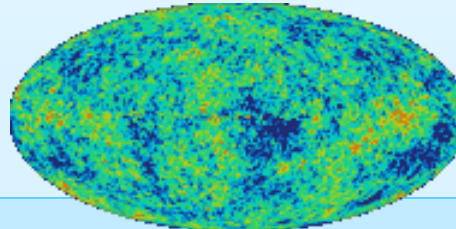
Large Scale Structure



Hot clusters



CMB



AND
MANY
MORE ...

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

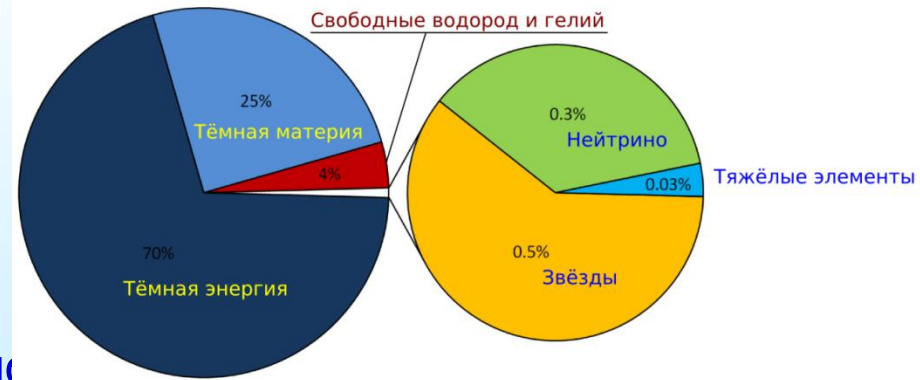
Проблема “тёмной материи”

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

- Кривые вращения космических объектов
- Гравитационное линзирование
- Bullet cluster
- Реликтовое излучение
-

Свойства DM:

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



Небарионная темная материя

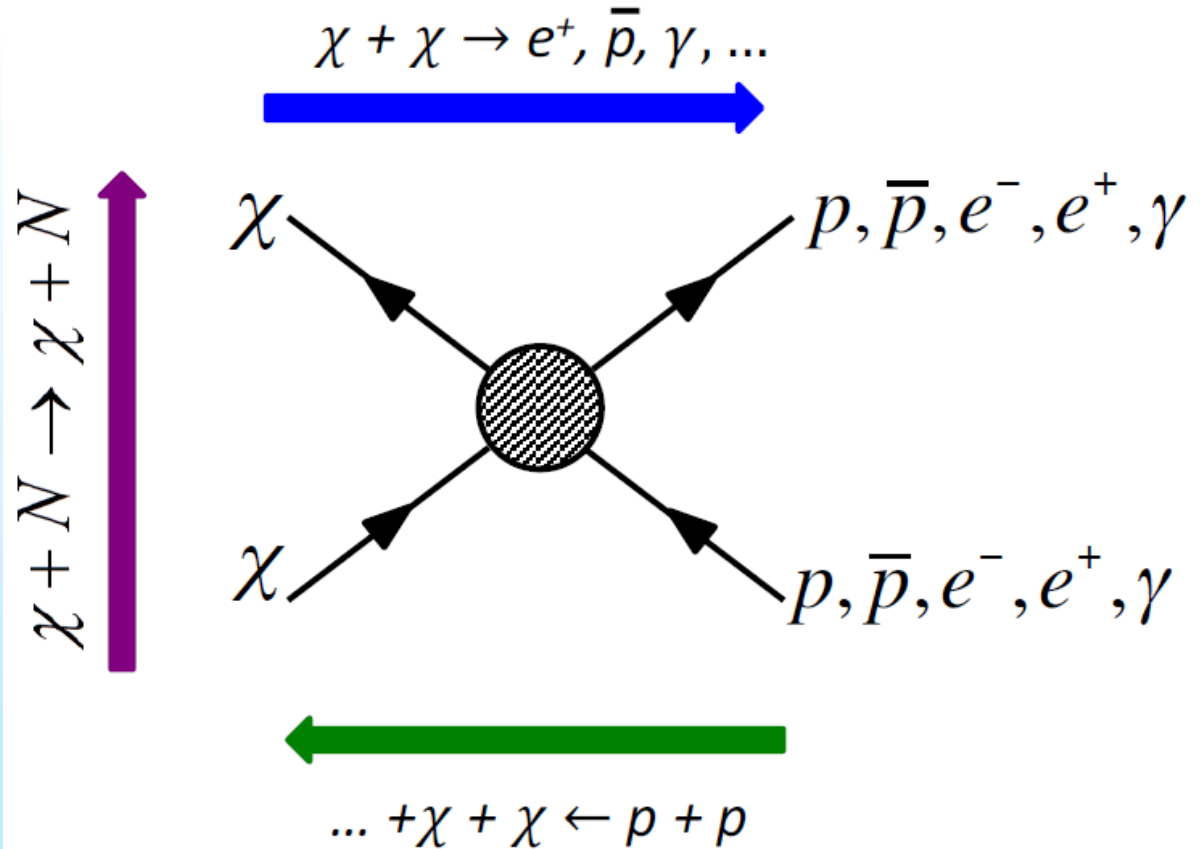
В отличие от барионной материи, небарионная не способствует формированию элементов в ранней Вселенной, и поэтому проявляется только через свои гравитационные эффекты. Кроме того частицы темной материи могут аннигилировать, с рождением γ -квантов и нейтрино.

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

Эксперименты по поиску DM

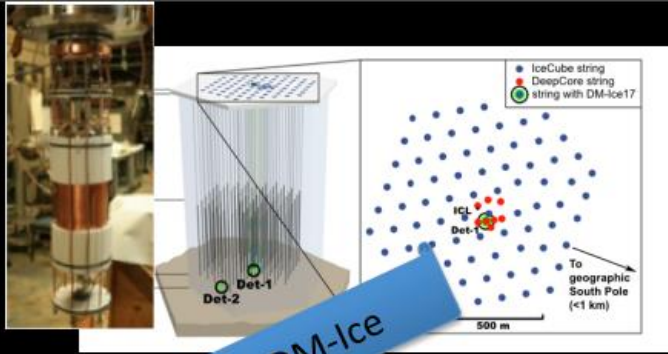
Косвенный поиск: аннигиляция WIMP
Эксперименты: PAMELLA, AMS ...

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



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

DAMA-like experiments



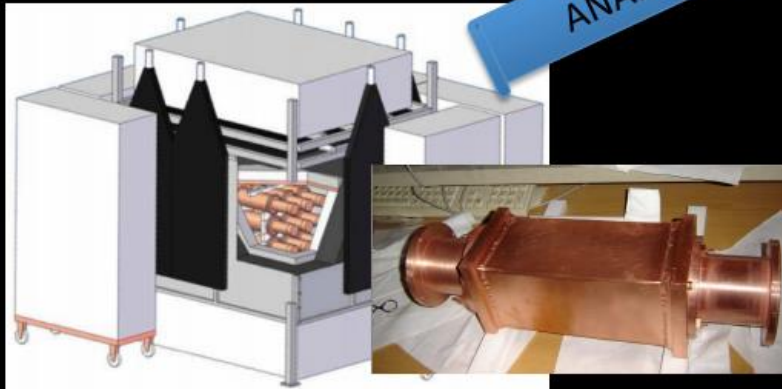
DM-Ice



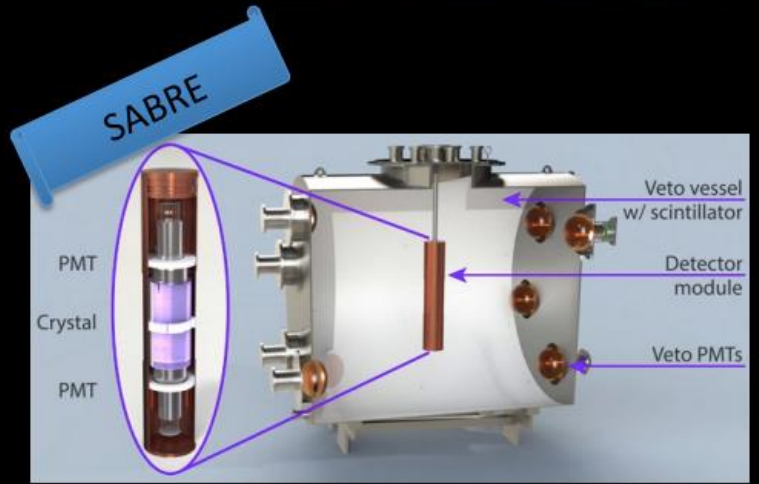
Cosine



A world wide effort



ANAIS



SABRE