

Благородные газы как сцинтилляторы: применение в детекторах частиц и излучений (обзор)

Д.Ю. АКИМОВ

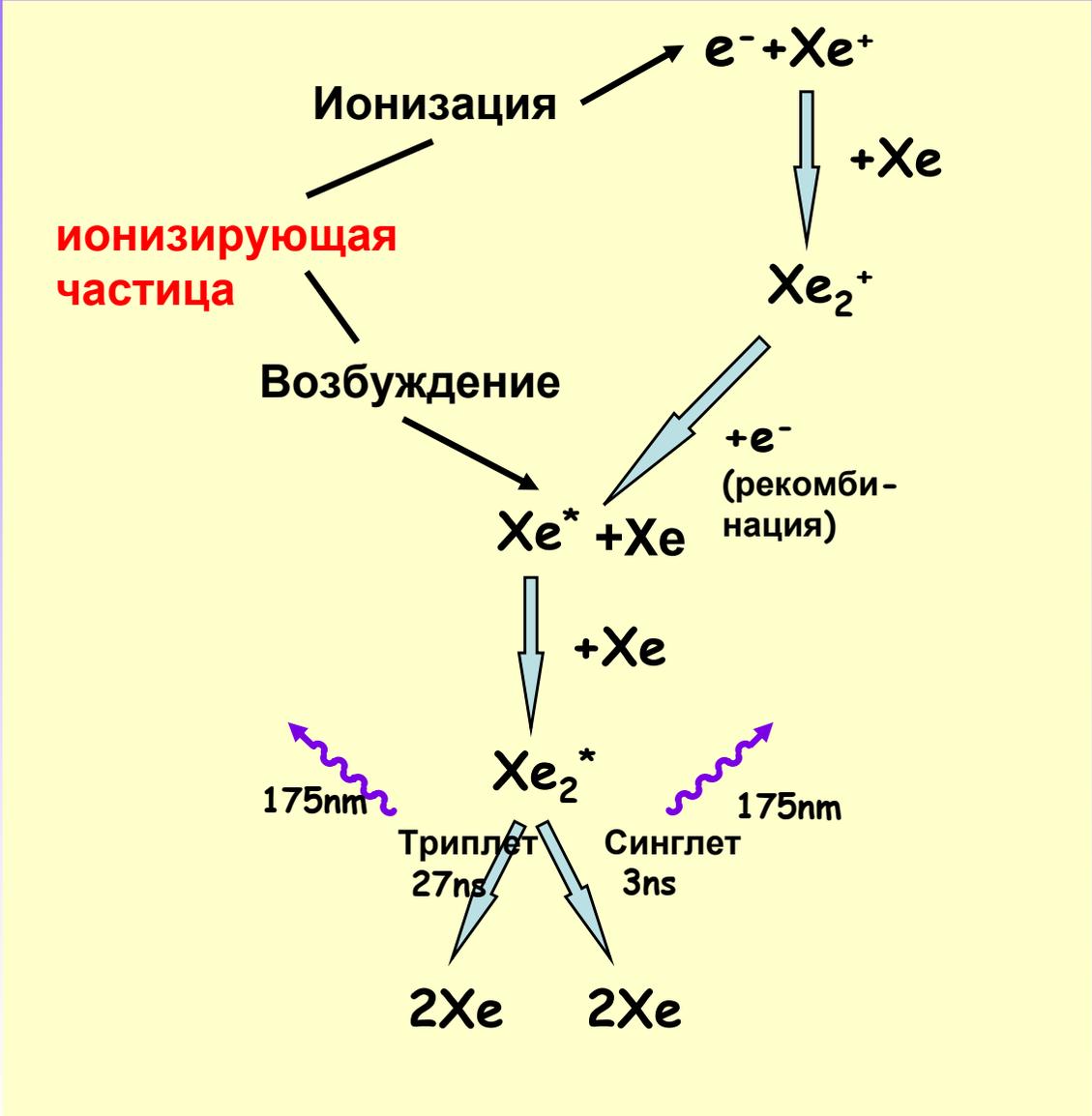
ФГУП ГНЦ РФ Институт Теоретической и Экспериментальной Физики, Москва

Содержание

- Сцинтилляция и электролюминесценция благородном газе
- Энергетическое разрешение детектора на благородном газе
- Применение для спектрометрии гамма-излучения
- Разработки для физики высоких энергий
- Детекторы для низкофоновой физики

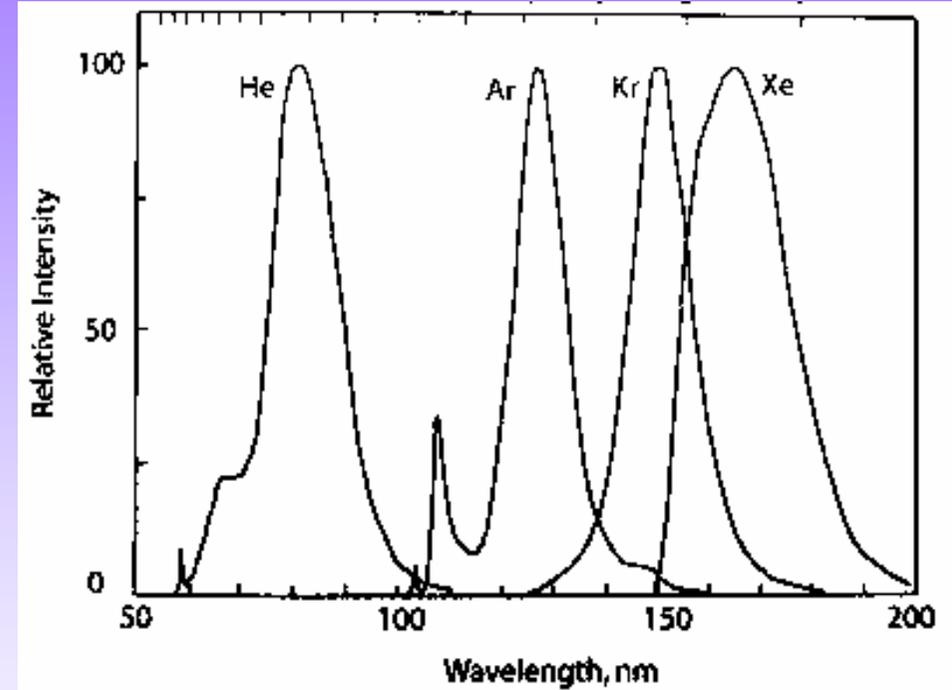
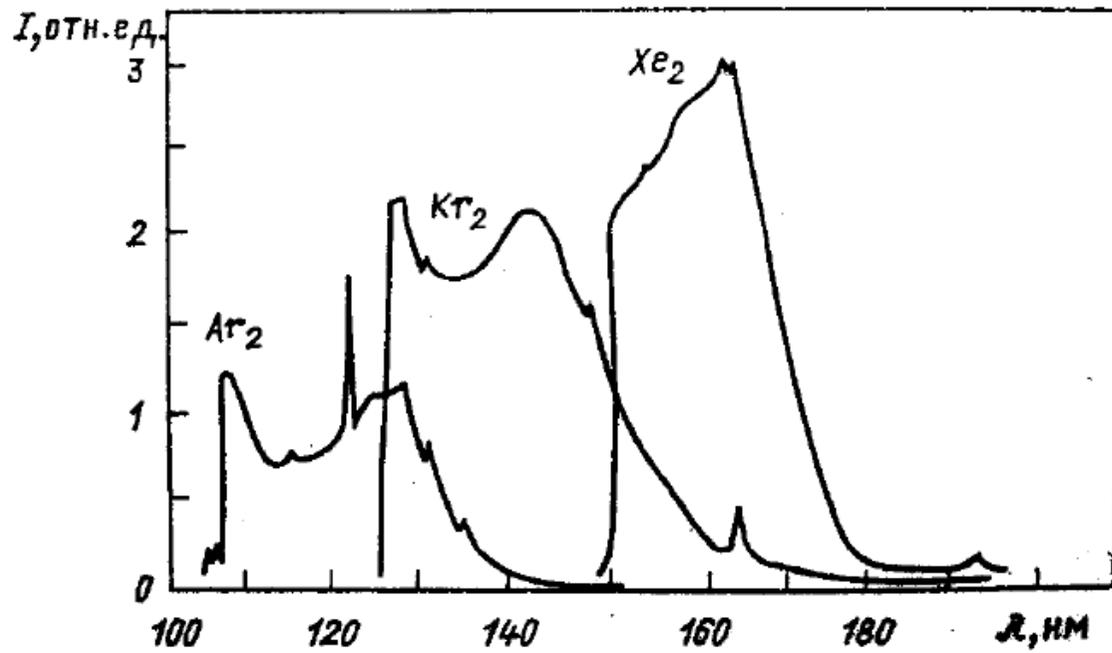
Сцинтилляция и ионизация

Сцинтилляция и ионизация на примере Хе:



Сцинтилляция спектры излучения

превалирует молекулярный континуум



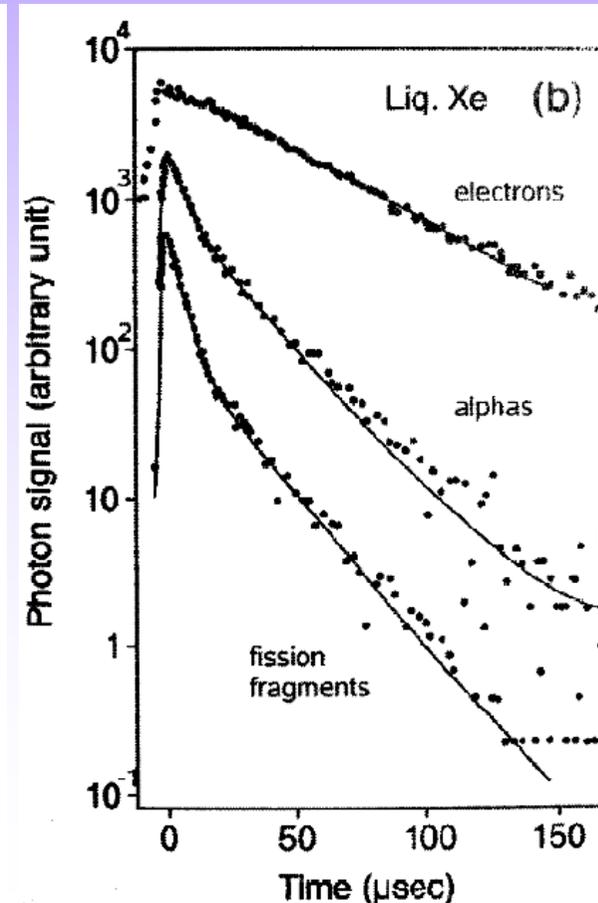
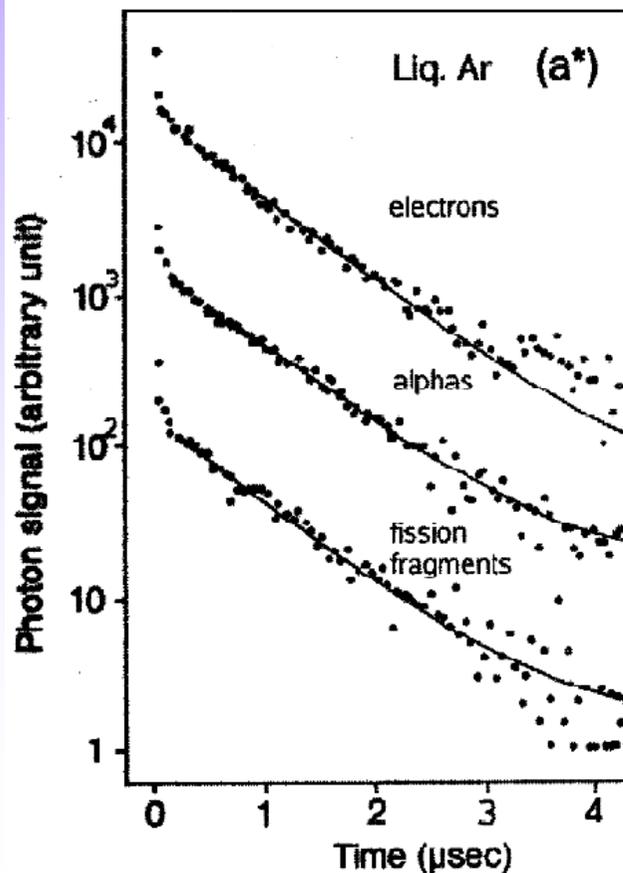
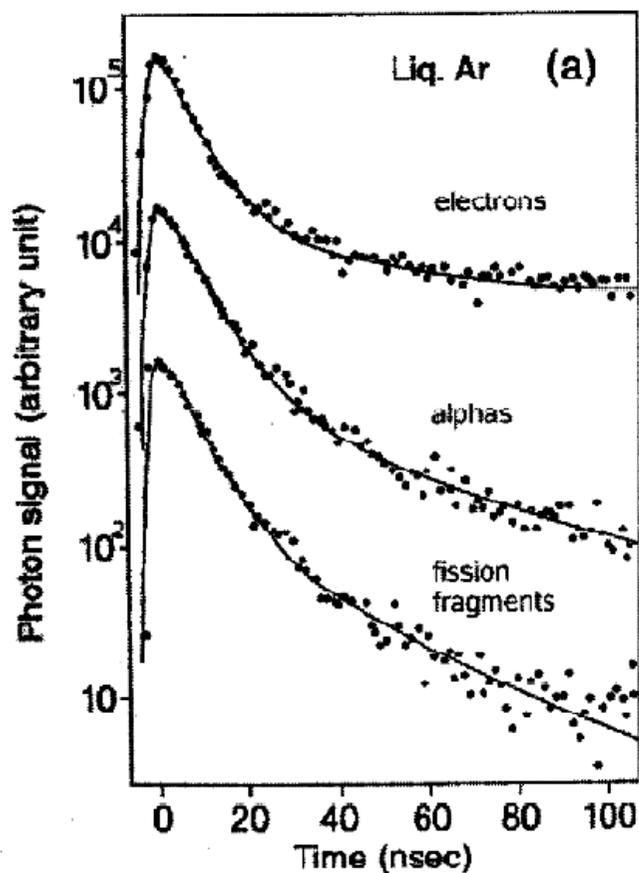
С ростом P его доля растет

Сцинтилляция

времена высвечивания

определяются:

- временами жизни синглетного и триплетного состояний,
- их заселенностью (зависит от dE/dX) и
- скоростью рекомбинации (зависит от dE/dX и величины эл. поля)



энергетическое разрешение конденсированный или сжатый газ

$$\Delta E/E = 2,36\sqrt{FW/E}$$

Ar	Kr	Xe
F = 0,11	0,07	0,059

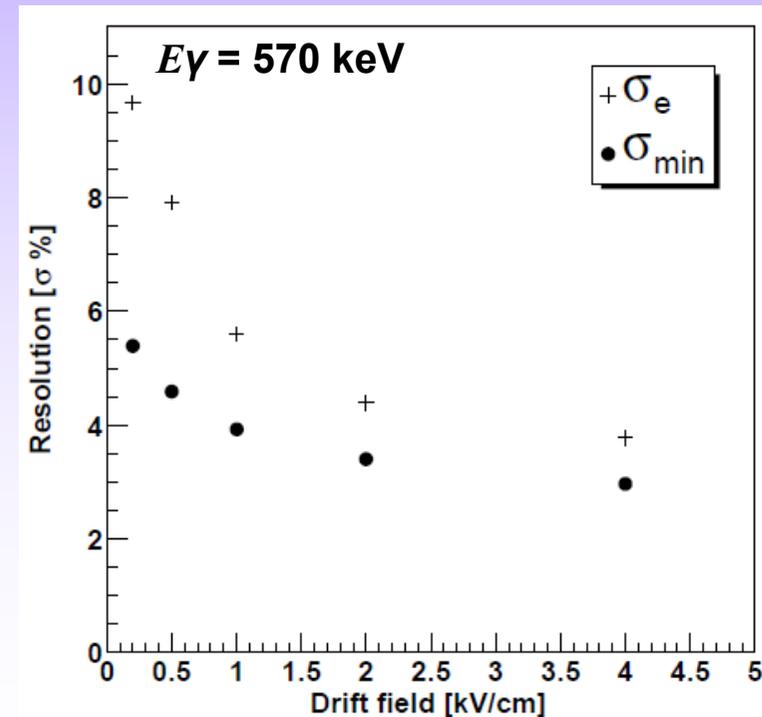
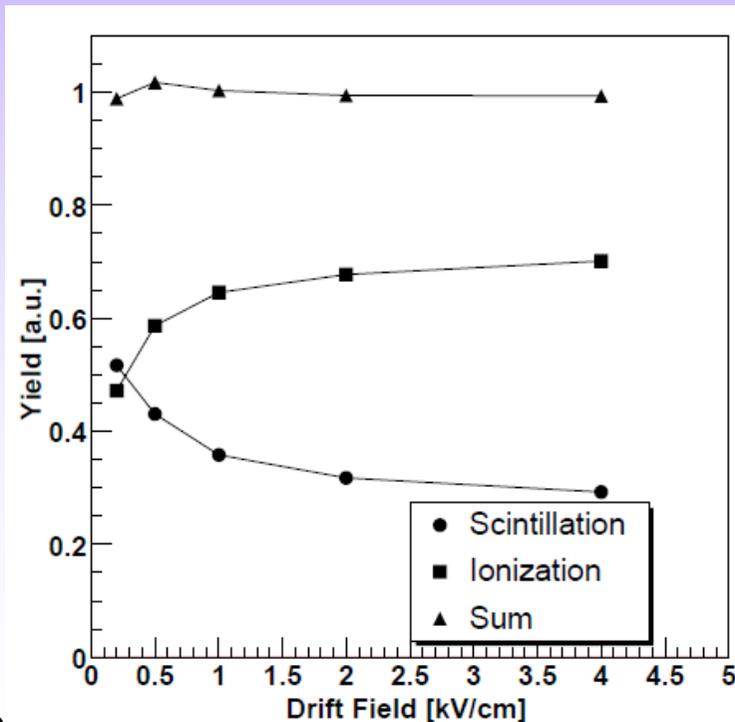
T. Doke et al., NIM
134, #2, p.353

1 МэВ: 0.2 – 0.4 %!

Реальное оказалось гораздо хуже!

10 – 20% энергии γ -кв. идет на образование δ -электронов с существенно большей плотностью ионизации, чем на основном треке

$Q = Q_0 / (1 + k \cdot E)$, где k – коэфф. рекомб., зависящий от плотн. ионизации, E – поле (в кВ/см)



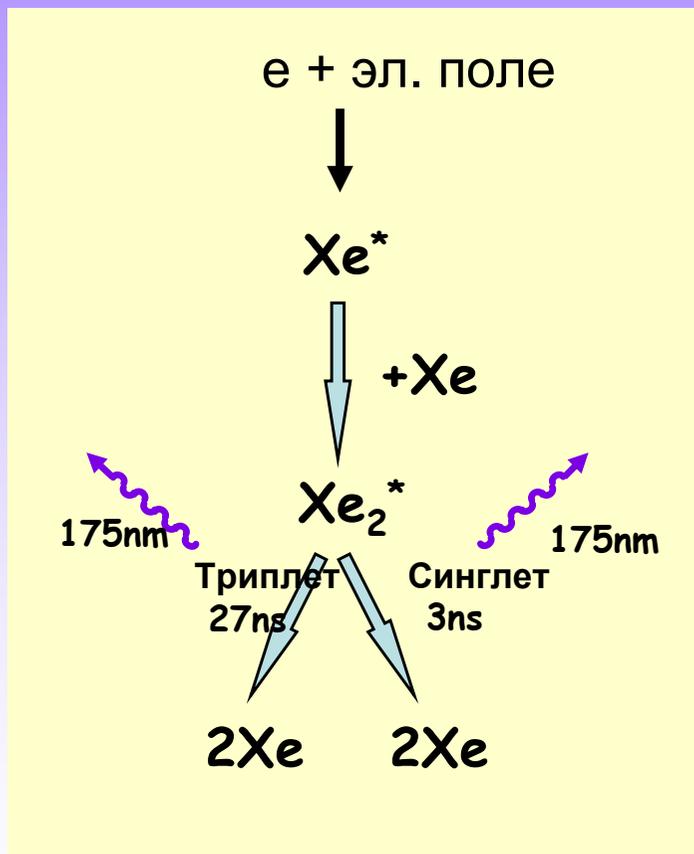
электролюминесценция (пропорциональная сцинтилляция)

J. Phys. Radium **19**, 103-105 (1958)

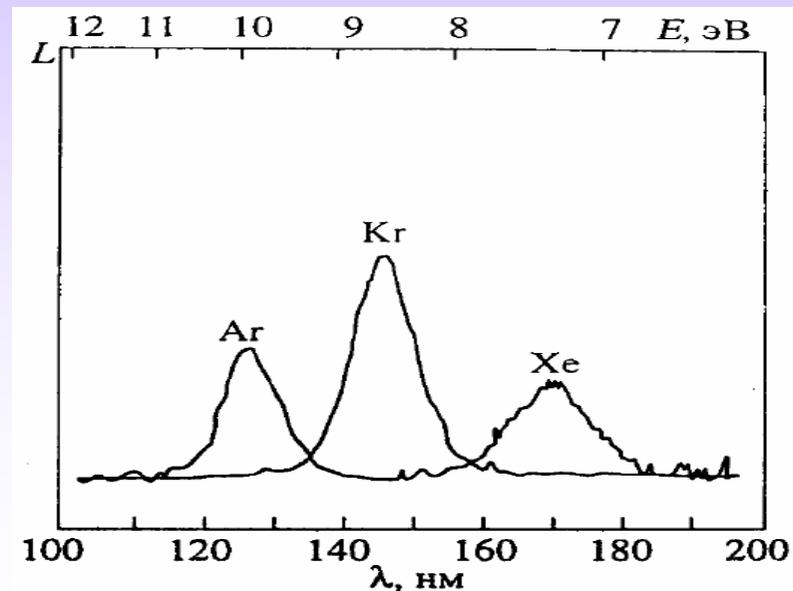
L. Koch, R. Lesueur в опытах с альфа – частицами и ксеноновым счетчиком с однородным электрическим полем, обнаружили свечение, значительно более сильное, чем сцинтилляция

$$N_{\phi} = a \cdot x \cdot (E/N) + b \cdot x,$$

где $a = 0.137 \text{ В}^{-1}$, $b = -4.7 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2/\text{атом}$,
 E (В/см) – напряжённость электрического поля в газовой фазе, $N = N_A \cdot \rho/A$ – плотность атомов, x – путь дрейфа



Спектр излучения:



Применение детекторов на благородных газах с использованием сцинтилляции и электролюминесценции

(на примере Хе)

Применение того или иного вещества в качестве детектора, как правило, определяется поставленными задачами и возможностями разработчика

- Спектрометрия рентгена и мягкого гамма (электролюминесценция)
- Попытки создания гамма-камер на жидком ксеноне
- Электромагнитные калориметры на ускорителях
- Низкофоновые эксперименты:

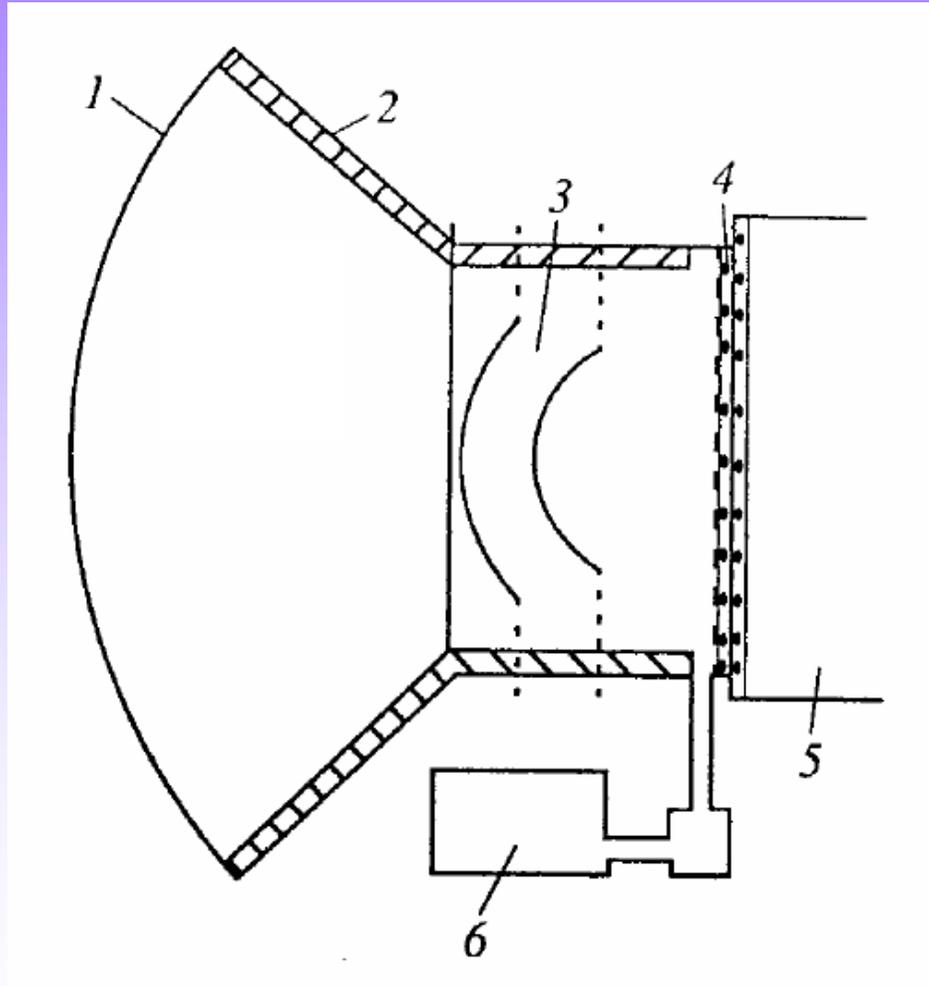
2 β распад ^{136}Xe - и детектор и, целиком, 2 β -распадчик!

Поиск Тёмной Материи – благодаря уникальной возможности одновременно регистрировать сцинтилляцию и ионизацию

Применение для спектрометрии рентгена и мягкого гамма-излучения

Газовый электролюминесцентный счетчик (GSPC) на спутнике EXOSAT

V.G. Taylor et al., IEEE Trans. NS, 1978, v. NS-25, p. 813



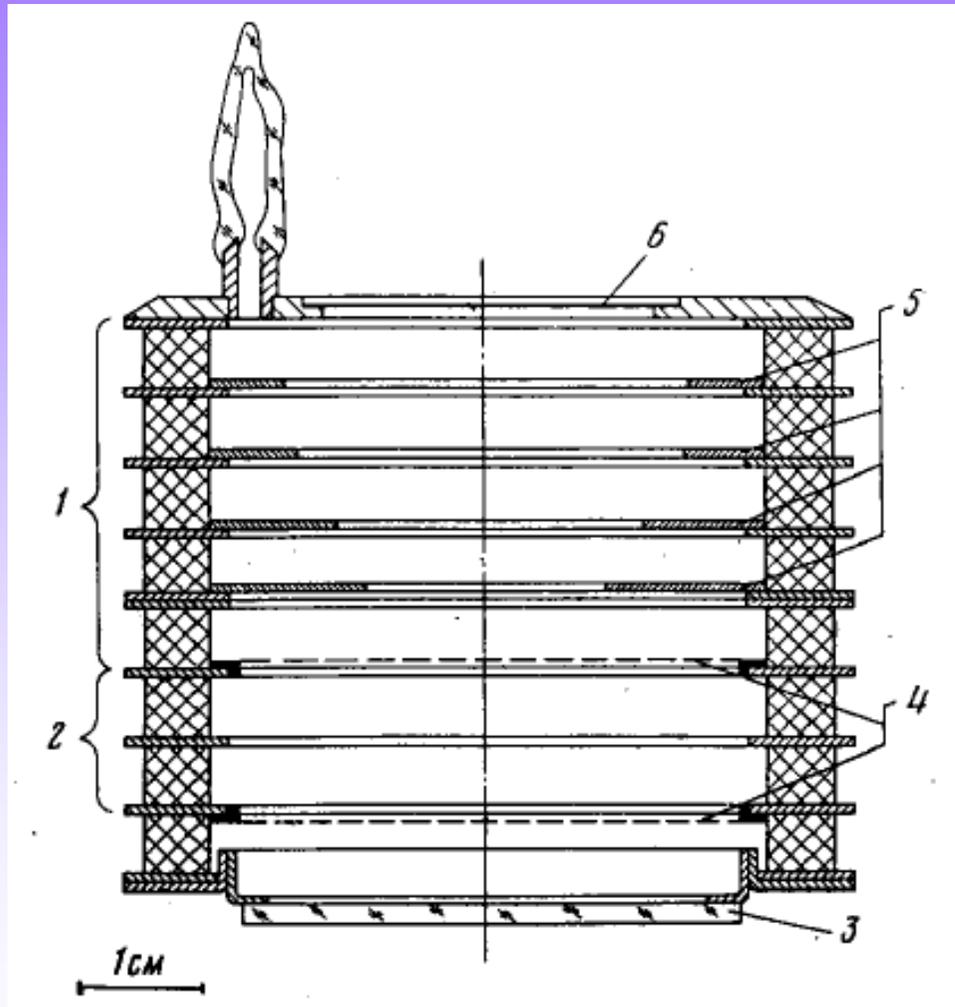
- 1 – входное Be окно, 1140 см²
- 2 – керамический корпус
- 3 – область пропорциональной сцинтилляции
- 4 – УФ-прозрачное окно
- 5 – ФЭУ ЕМІ D319
- 6 – геттер

Энергетическое разрешение на линии 5.9 кэВ (⁵⁶Fe) - 10% (ПШПМ)

Применение для спектрометрии рентгена и мягкого гамма-излучения

Отпаянный газовый электролюминесцентный детектор

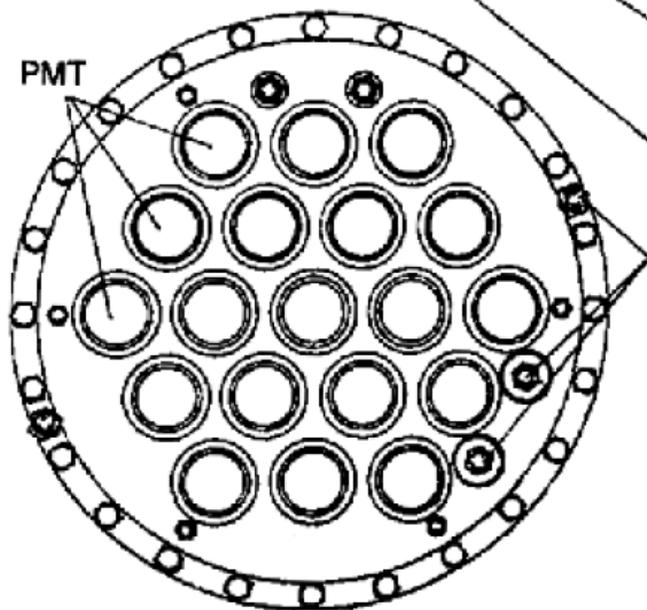
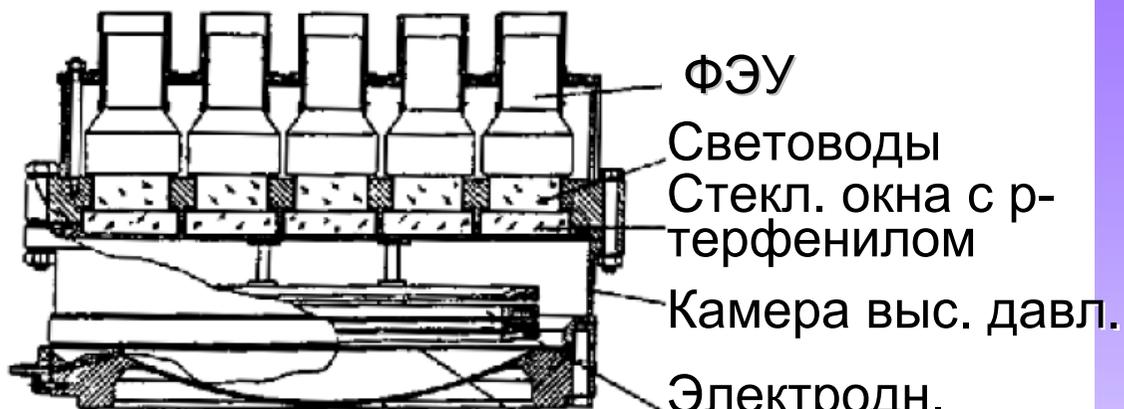
Гоганов Д.А. и др., ПТЭ, 1984, N 2, 206



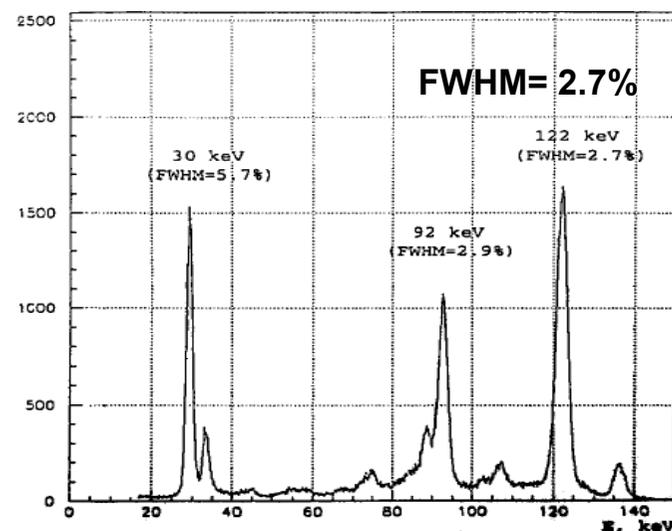
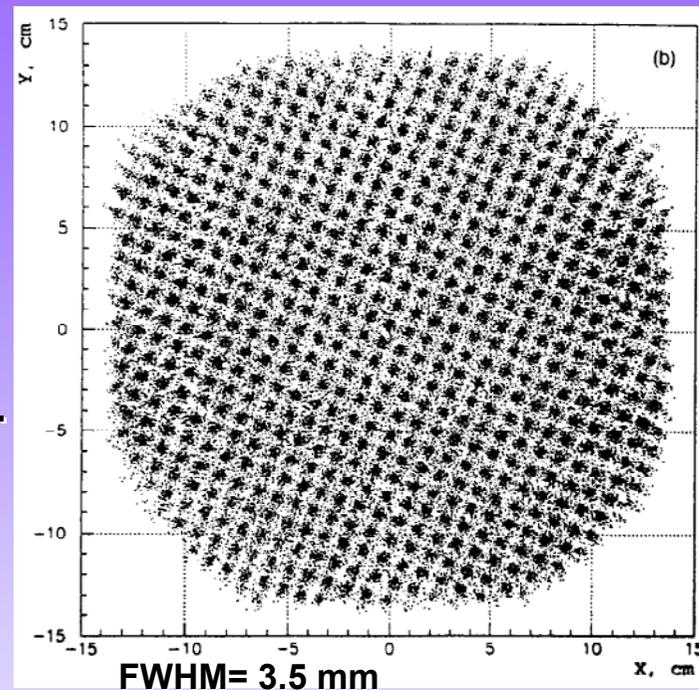
Энергетическое разрешение на линии 5.9 кэВ (^{56}Fe) – 10.5% (ПШПМ)

Применение для спектрометрии мягкого гамма-излучения

Электролюминесцентная гамма-камера на Хе высокого давления для медицины



A. Bolozdynya et al.,
NIM A385, (1997),
225



Наибольшее распространение получил жидкий Хе (LXe)

LXe является очень привлекательной средой для детекторов излучений и частиц благодаря:

- высокой плотности
- большому Z
- прекрасным сцинтилляционным свойствам – высокому световыходу (близкому к NaI(Tl)) и малому времени высвечивания (~30–40 нс)
- неограниченная радиационная стойкость

для низкофоновых экспериментов:

- низкая собственная радиоактивность (нет радиоактивных долгоживущих изотопов)
- возможность одновременного измерения сцинтилляционного и ионизационного сигналов (для поиска Тёмной Материи)

Основными препятствиями для его широкого использования являлись:

- сцинтилляция в области вакуумного ультрафиолета (175 нм),



разработаны ФЭУ
(для Ar – WLS)

- криогенные условия

- требование высокой степени очистки от примесей, поглощающих ультрафиолет и электроны ионизации



разработаны
методы очистки,
позволяющие
получить
прозрачность > 1м

Λ_{att}

LAr 66 ± 3 cm

LKr 82 ± 4 cm N. Ishida et al., NIM A 384 (1997) 380

LXe 29 ± 2 cm

LXe 36.4 ± 1.8 cm V.V. Solovov et al., NIM A 516 (2004) 462

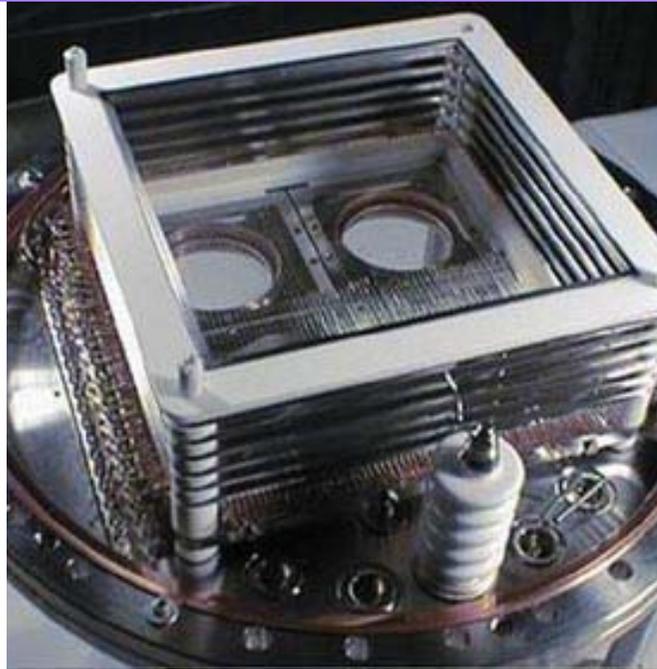
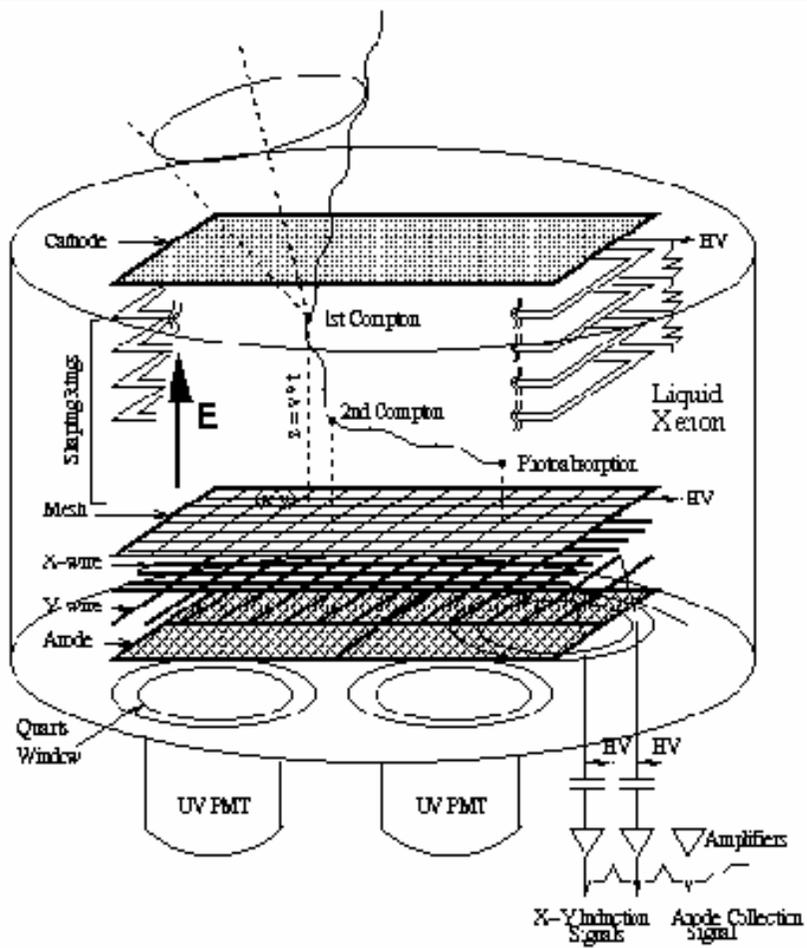
MEG, XMASS:

A. Baldini et al., NIM A 545 (2005) 753:

Rayleigh scattering length Λ_R is 40 – 50 cm, $\Lambda_{abs} > 1m$

Комптоновский гамма-телескоп для $E_\gamma = 0.3 - 10$ МэВ

LXeGRIT Liquid Xenon Gamma-Ray Imaging Telescope



Полёты в 1999 и 2000 гг.

Energy Resolution ($FWHM$) $8.8\%/\sqrt{E}$
Position Resolution (1σ) 1 mm (3 dimensions)
Angular Resolution (1σ) 3° at 1.8 MeV

<http://xenon.astro.columbia.edu/lxegrit/>

19.11.2008

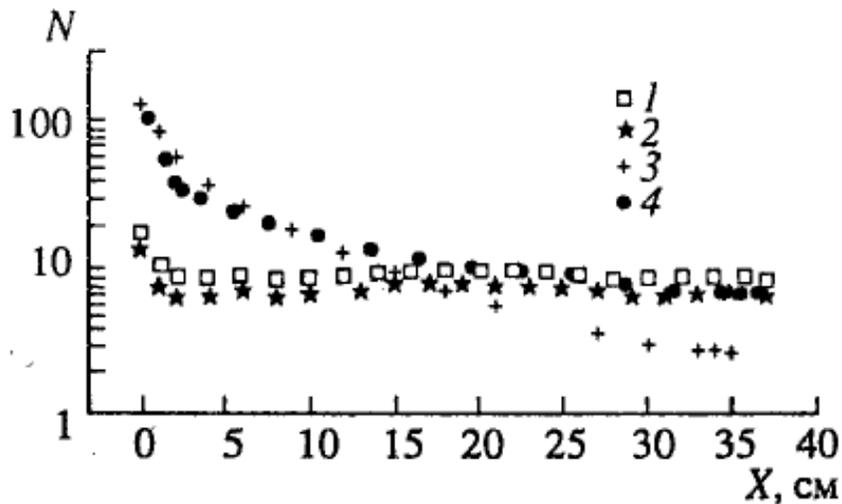
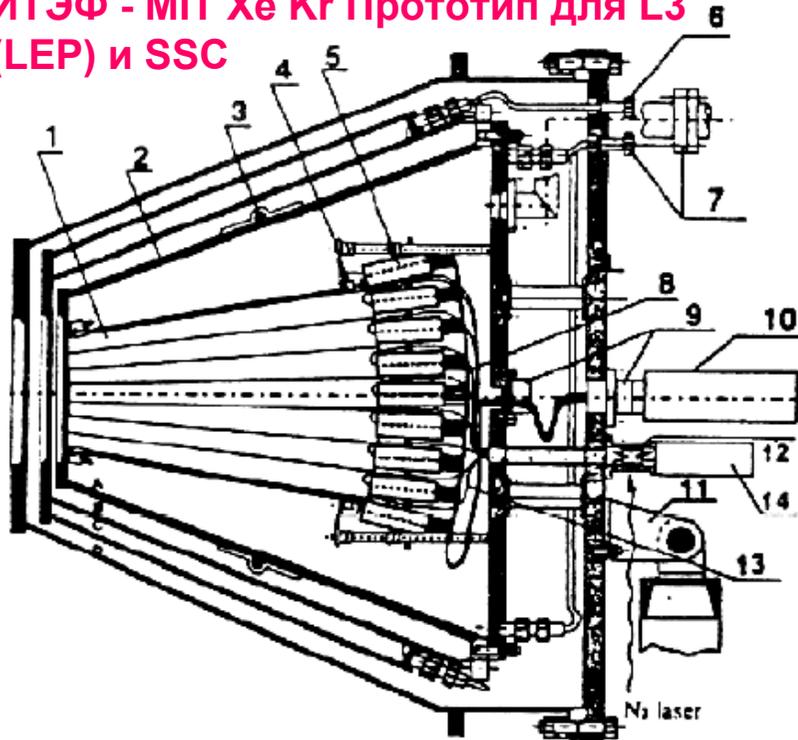
ИСМАРТ 2008, Харьков

14

Разработки для физики высоких энергий

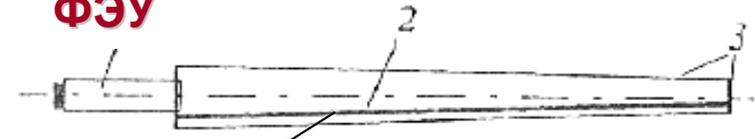
Электромагнитный калориметр - сцинтилляционная мода

ИТЭФ - МИТ Хе Кр Прототип для L3
(LEP) и SSC



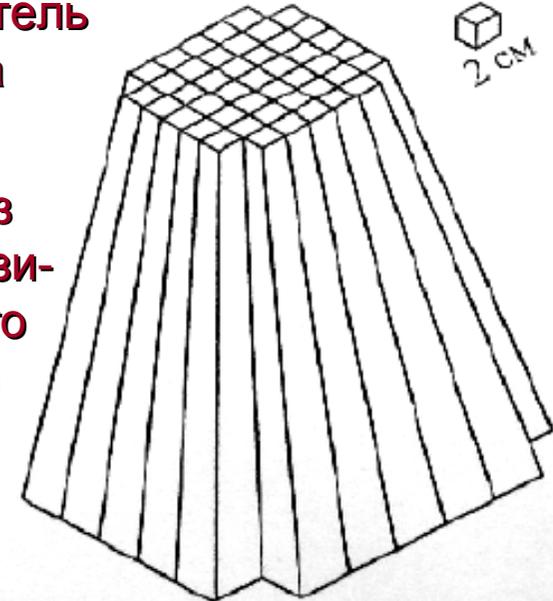
D. Akimov, et al., IEEE Trans. NS,
42 (1995), no. 6, part. 2, p. 2244

ФЭУ



**ВОЛНОВОЙ
СМЕСТИТЕЛЬ
СПЕКТРА**

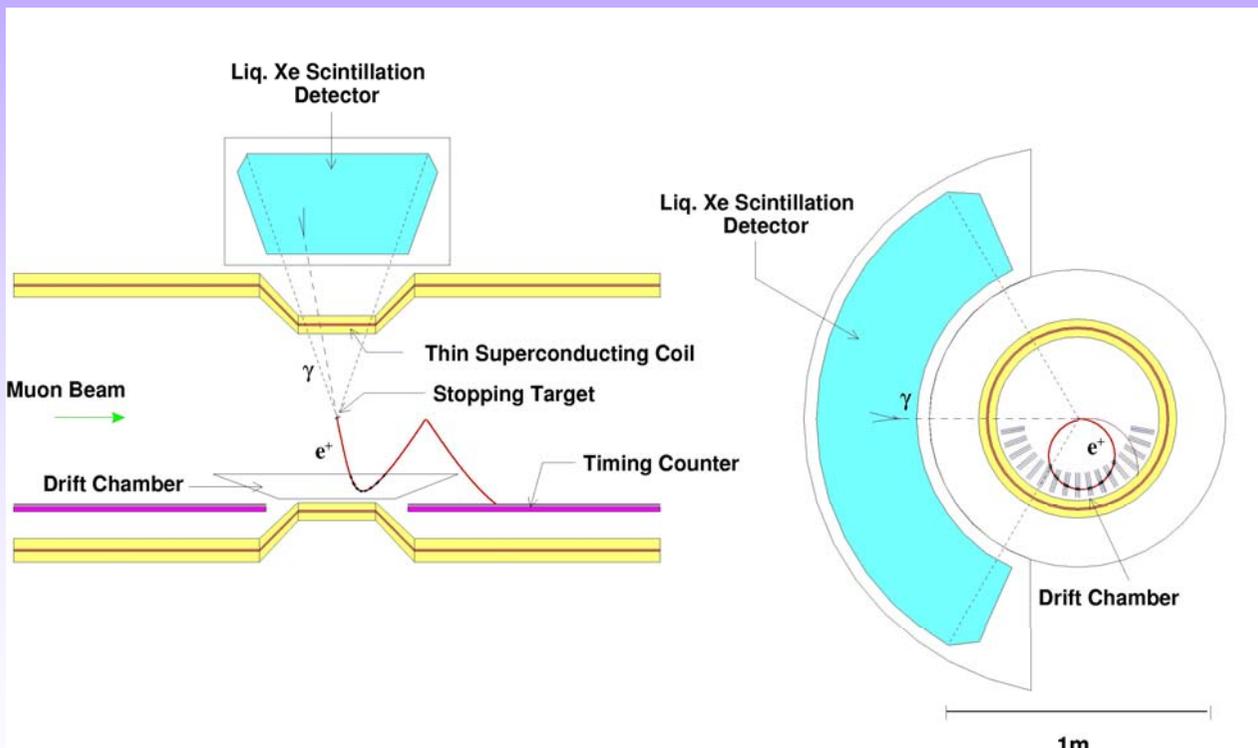
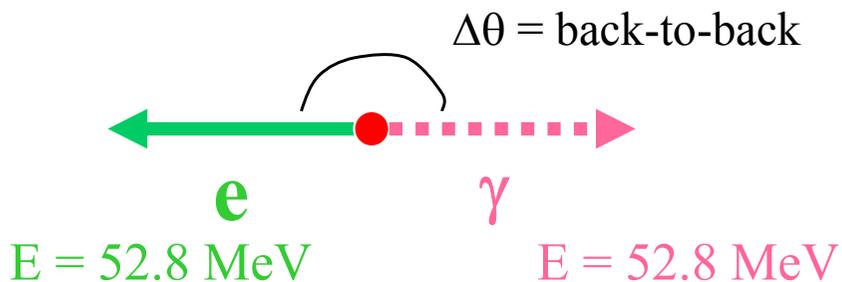
**ячейки из
металлизи-
рованного
Майлара**



$$\frac{\sigma(E_\gamma)}{E_\gamma} = \frac{5\%}{\sqrt{E_\gamma}} \quad \begin{array}{l} E_\gamma \text{ в ГэВ:} \\ 100 \div 350 \\ \text{МэВ} \end{array}$$

Разработки для физики высоких энергий

Эксперимент MEG ($\mu^- \rightarrow e, \gamma$)



from talk Giovanni Signorelli, INFN CALOR2004

- Stopped μ -beam: $10^8 \mu / \text{sec}$
- The most intense muon beam in the world, PSI (CH) is brought to rest in a $100\mu\text{m}$ Mylar target
- Liquid Xenon calorimeter for γ detection (scintillation); energy, position, timing
- Solenoid spectrometer & drift chambers
- Timing Counter for e^+ timing
- Readout by 848 2" quartz windowed PMTs
- Maximum coverage
- Thin entrance wall
- 10 % solid angle

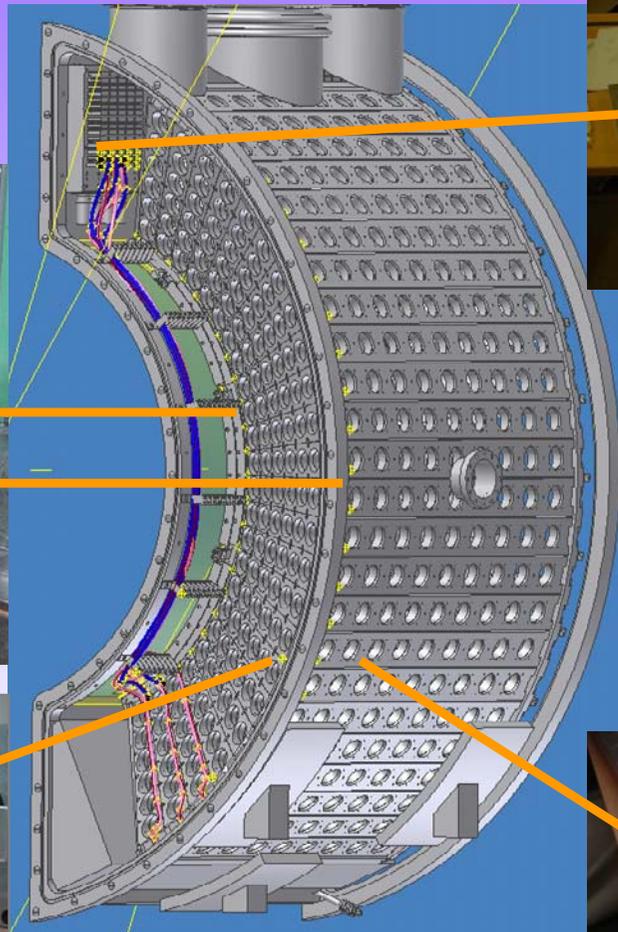
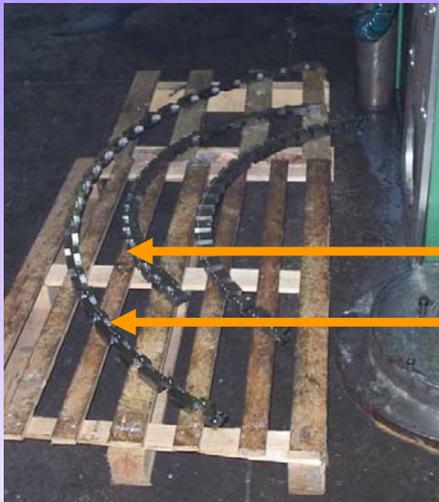
Разработки для физики высоких энергий

Эксперимент MEG ($\mu^- \rightarrow e, \gamma$)



Liquid Xenon calorimeter

The cryostat



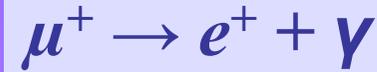
The PMTs



Hamamatsu **R9288ZA**
Specifically developed
for **low-temperature**
operation.

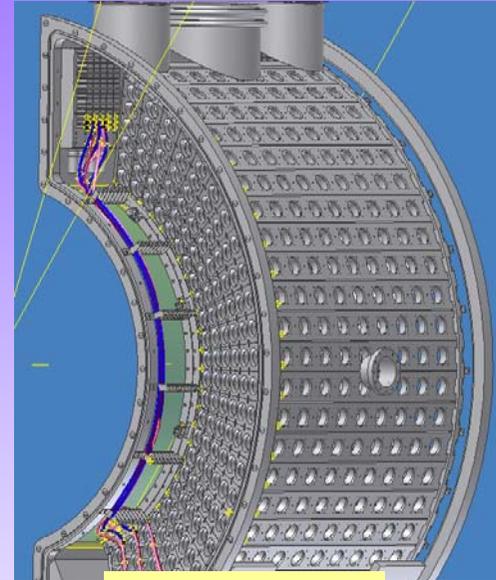
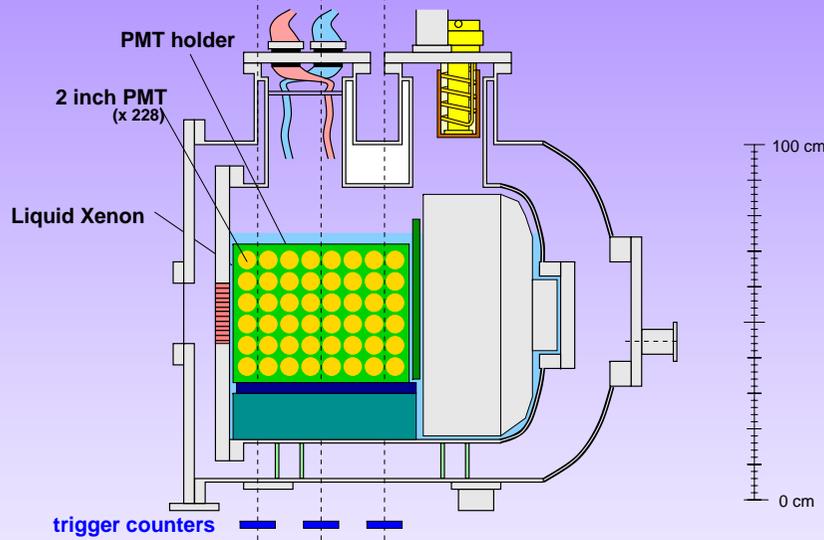
Разработки для физики высоких энергий

Эксперимент MEG ($\mu^- \rightarrow e, \gamma$)



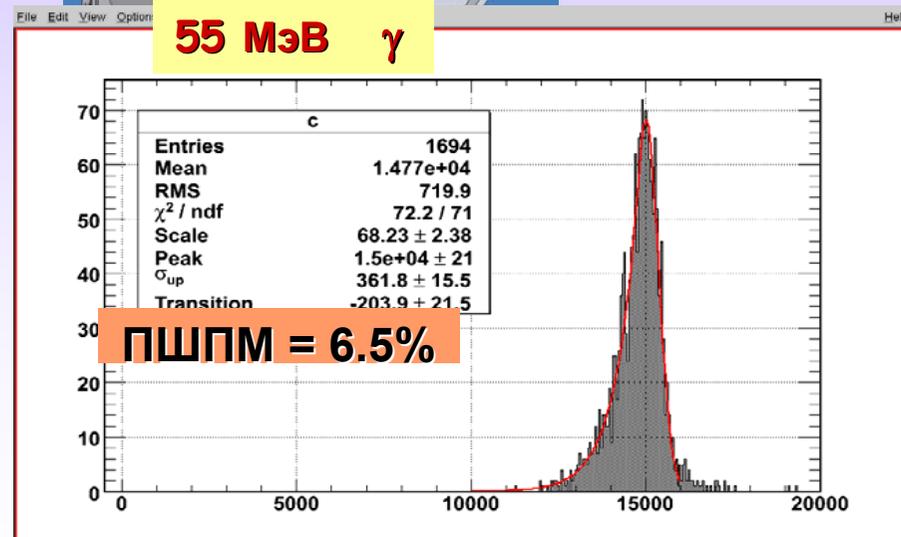
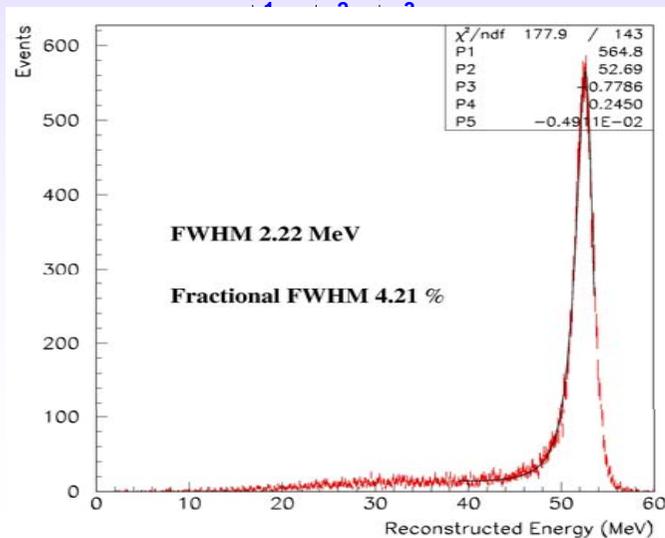
Калибровка γ -квантами от распада π^0 в реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ $54.9 \text{ MeV} < E(\gamma) < 82.9 \text{ MeV}$

"Large Prototype"
 $(4.8 \pm 0.2)\%$ ПШПМ



Временное разрешение

$$\sigma = 115 \text{ пс}$$



Низкофонные эксперименты: двойной безнейтринный бета распад ^{136}Xe

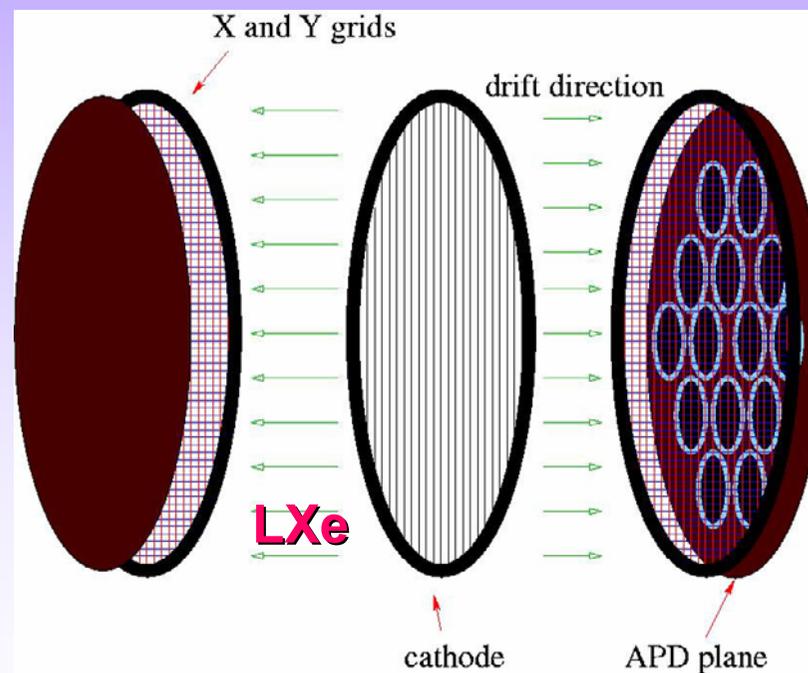
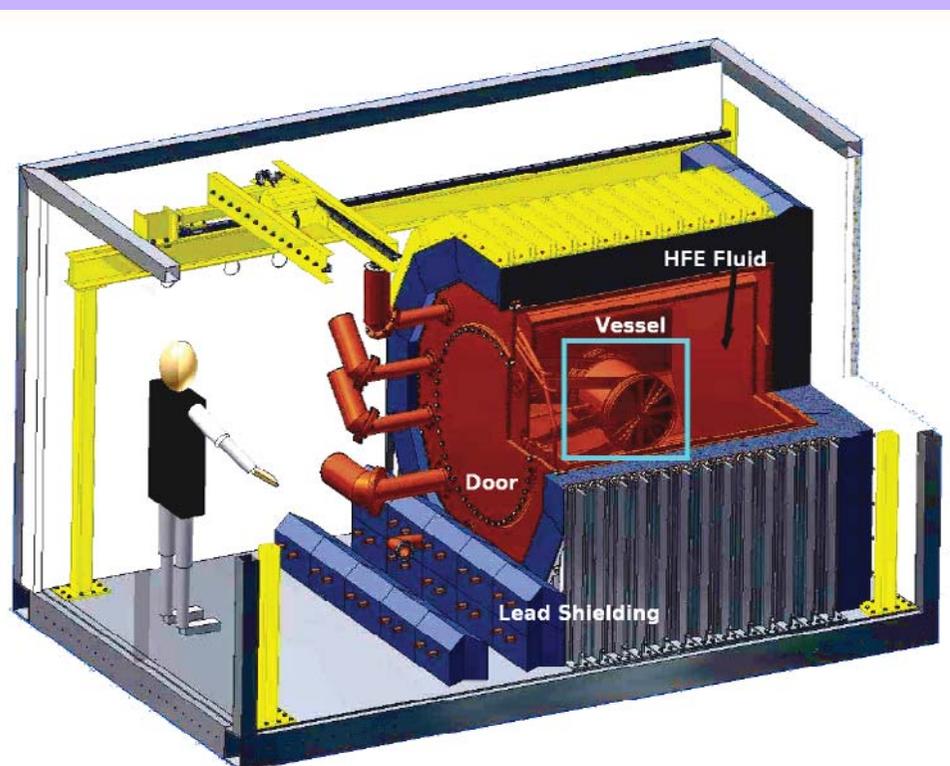
Эксперимент **EXO** – **E**nriched **X**enon **O**bservatory

Предполагает в окончательном варианте 10 т ^{136}Xe и лазерное мечение Ba^{++} как продукта распада. $0\nu 2\beta$ $T_{1/2} > 10^{28}$ лет

первая фаза EXO200 $0\nu 2\beta$ $T_{1/2} > 6 \cdot 10^{25}$ лет :

200 кг обогащённого ксенона (^{136}Xe ; 80%) в жидкой фазе, без мечения Ba

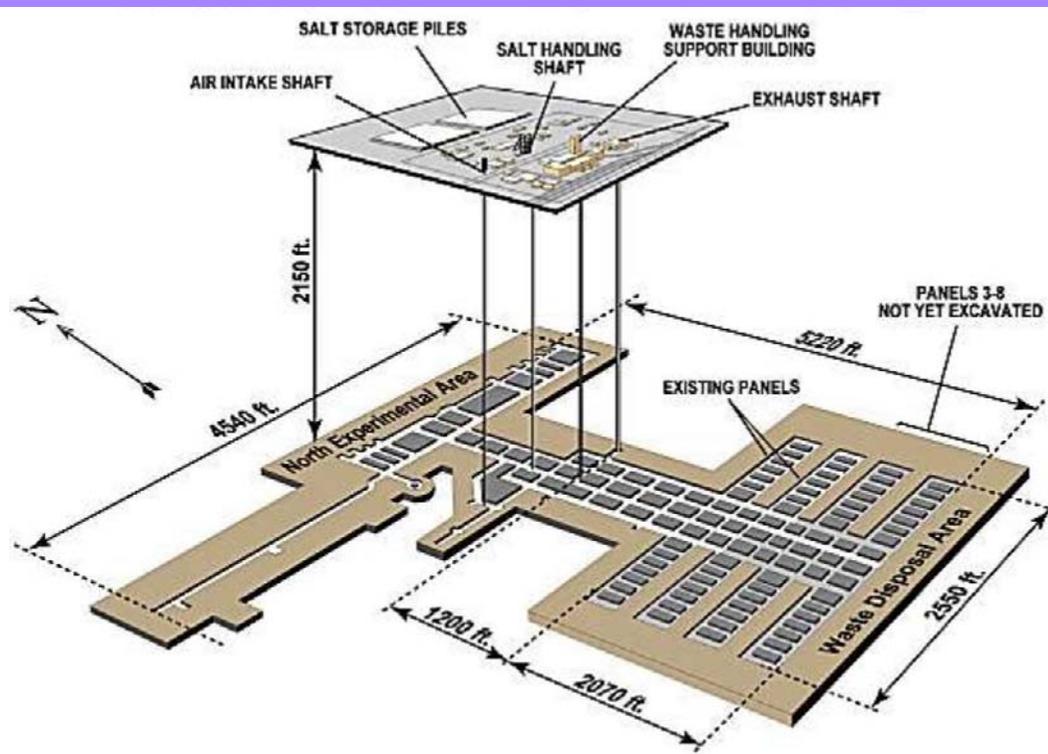
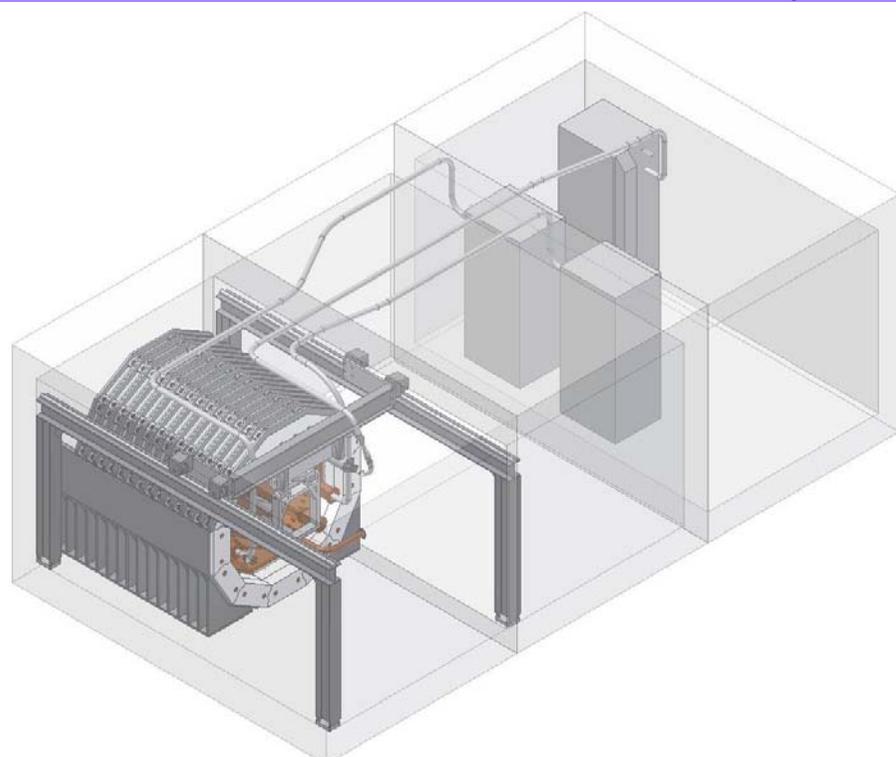
Задача EXO200 – продемонстрировать методику, обнаружить $2\nu 2\beta$ моду и дать новый предел на $0\nu 2\beta$ моду (существующий предел - $T_{1/2} > 1.2 \cdot 10^{24}$ лет)



Эксперимент EXO: первая фаза EXO200

Детектор и инфраструктура размещаются в отдельных модулях

WIPP – хранилище ядерных отходов



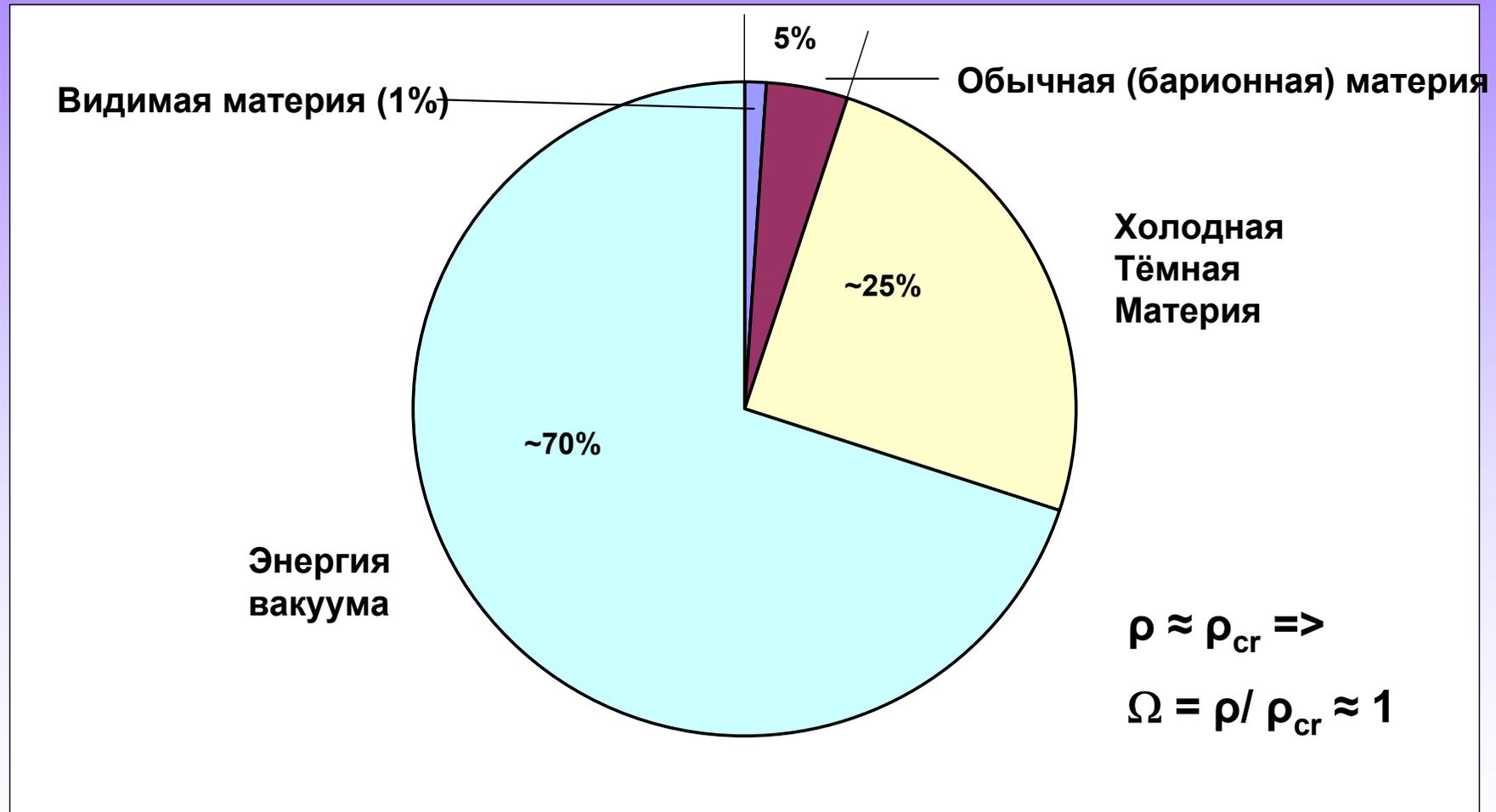
Case	Mass (ton)	Eff. (%)	Run Time (yr)	σ_E/E @ 2.5MeV (%)	Radioactive Background (events)	$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta}$ (yr, 90%CL)	Majorana mass (eV)	
							QRPA	NSM
Prototype	0.2	70	2	1.6*	40	$6.4 \cdot 10^{25}$	0.133	0.186

Низкофоновые эксперименты

поиск Тёмной Материи

“СТАНДАРТНАЯ” КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В масштабах всей Вселенной:



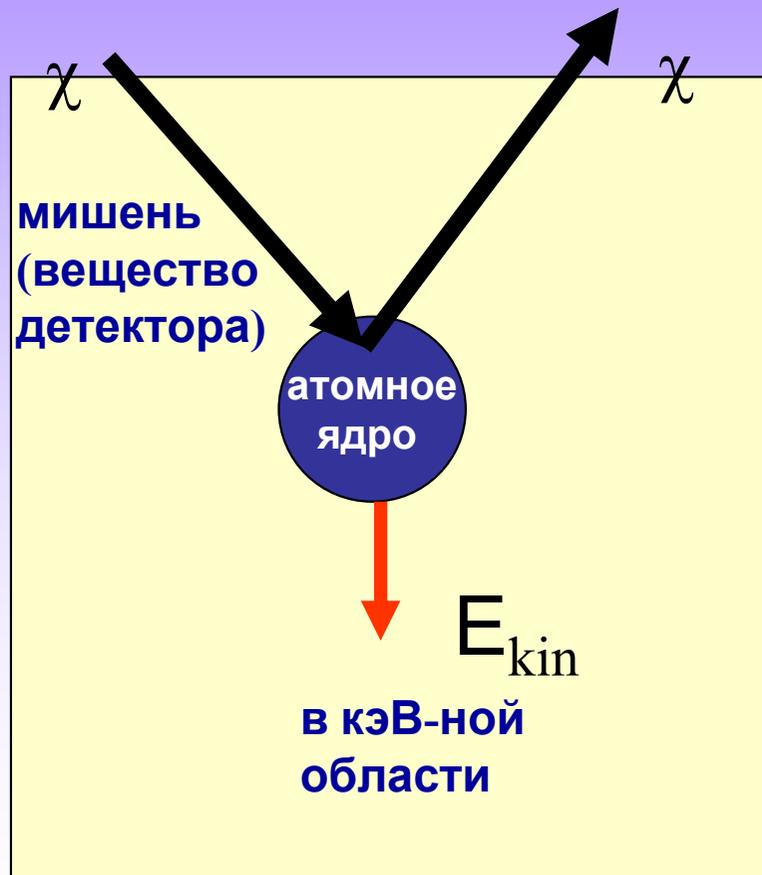
Низкофоновые эксперименты

поиск Тёмной Материи

WIMPs - (Weakly Interacting Massive Particles)

**Плотность (Галактическая) ~ 0.3 ГэВ/см³
 \sim несколько частиц в 1 литре**

**SUSY: нейтралино (χ),
 $M \sim 100$ ГэВ**



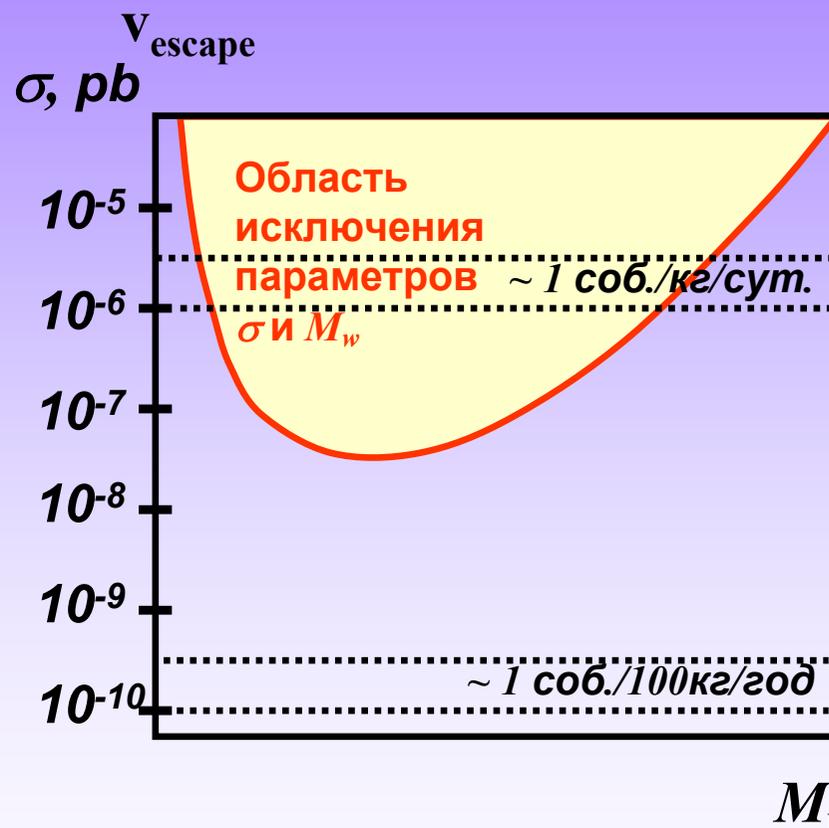
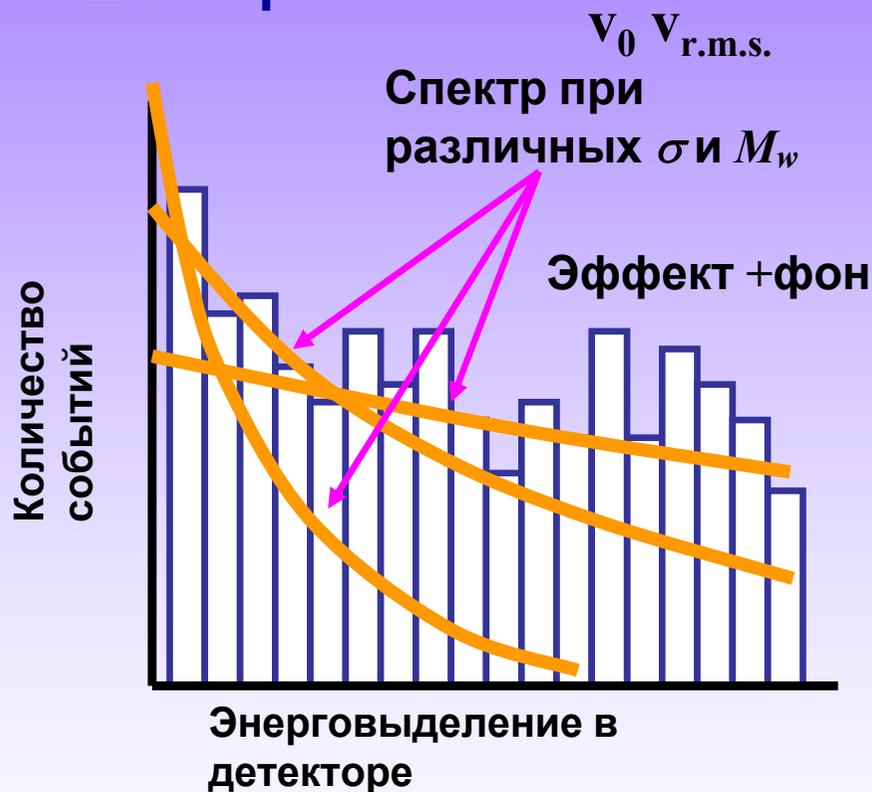
$\sigma \sim A^2$ - Спин-независимое (SI) взаимодействие

$\sigma \sim J(J+1)$ - Спин-зависимое (SD) взаимодействие

Всё бы хорошо, да мешает фон!



В Галактике распределение WIMP по скоростям квази-Максвелловское



Детекторы: *Ge, Si, NaI(Tl), CaF, Xe ...*

для сопоставления результатов используют

19.11.2008

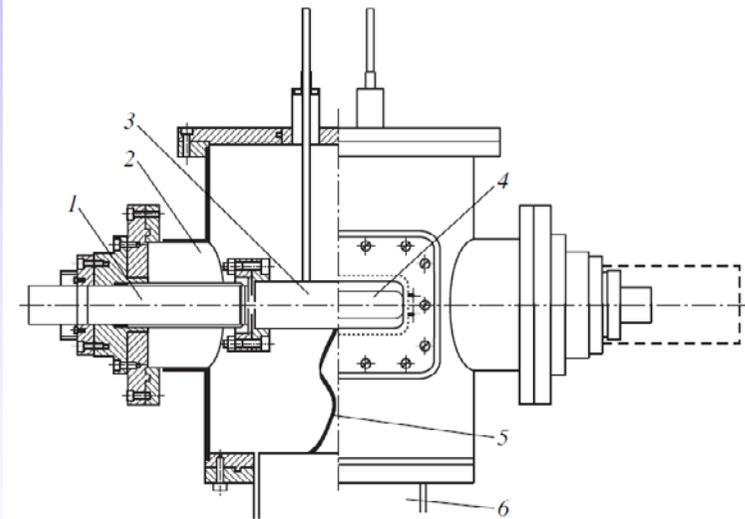
где $C=A^2$

$$\sigma_p = \frac{m_{red}^2(p, W)}{C m_{red}^2(Nucl, W)} \sigma < 10^{-6} pb$$

ЭКСПЕРИМЕНТ	Мишень	Тип/способ дискр.	Лаборатория
ANAIS	NaI	annual modulation	Canfranc
DAMA/NaI	NaI	annual modulation	LNGS
DAMA/LIBRA	NaI	annual modulation	LNGS
DAMA/1 ton	NaI	annual modulation	LNGS
NAIAD	NaI	PSD	Boulby
HDMS	Ge	ionization	LNGS
KIMS	CsI	PSD	Y2L (Korea)
CaF ₂ -Kamioka	CaF ₂	PSD	Kamioka
DAMA/LXe	LXe	PSD	LNGS
WARP	LAr	2 phase	LNGS
XENON 10	LXe	2 phase	LNGS
Zeplin II	LXe	2 phase	Boulby
Zeplin III	LXe	2 phase	Boulby
ArDM	LAr	2 phase	Canfranc
LUX	LXe	2 phase	Dusel
CLEAN	LNe	PSD	SNOLAB
DEAP	LAr	PSD	SNOLAB
XMASS	LXe	PSD	Kamioka
CDMS	Ge	bolometer	Soudan
CRESST	CaWO ₄	bolometer	LNGS
EDELWEISS	Ge	bolometer	Frejus
ROSEBUD	Ge, sap,tung	bolometer	Canfranc
COUPP	FSH	droplet	
PICASSO	FSH	droplet	SNOLAB
SIMPLE	FSH	droplet	Bas Bruit
Drift	CS ₂ gas	TPC	Boulby
MIMAC	³ He gas	TPC	

Первым экспериментом с LXe детектором ТМ был **DAMA/ХЕ** в **Gran Sasso**, проводился параллельно с DAMA/NAI (с кристаллами NaI(Tl))

- 2-л объём из сверхчистой меди
- 3 ФЭУ из низкофонового стекла с MgF_2 окнами
- Низкофоновая защита: медь, свинец, нейтронная защита
- Дискриминация фона e и γ по форме импульса



Установлен предел
на $2\nu 2\beta$ моду ^{136}Xe

$T_{1/2} > 1 \cdot 10^{22}$ лет

R. Bernabei et al.,
Phys. Lett. B 546
(2002) 23

Низкофоновые эксперименты

Детекторы для поиска Тёмной Материи

ZEPLIN I

ZEPLIN I в шахте Boulby

Экспозиция - 293 кг×сут.

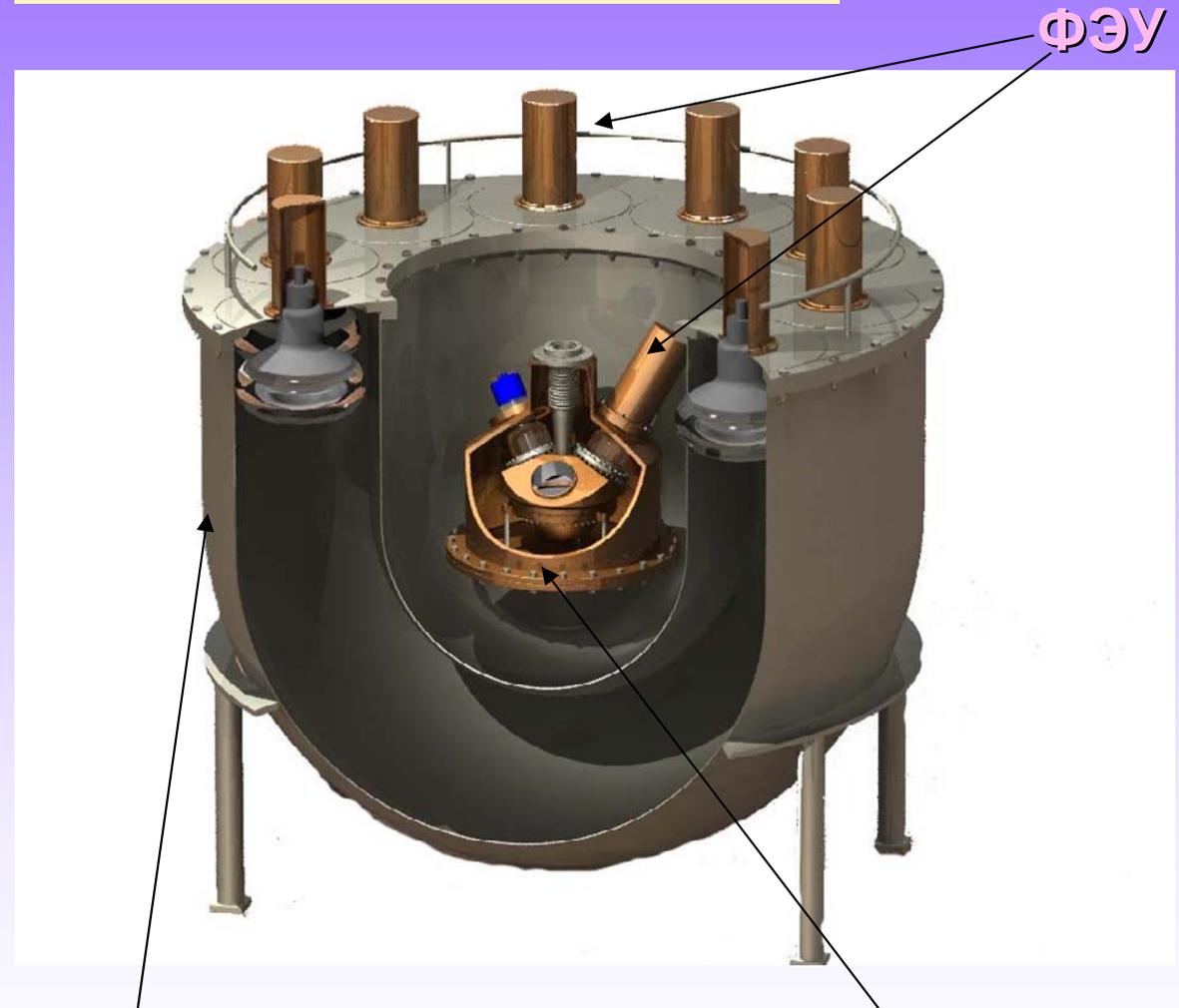
Полная масса Хе – 5 кг;

«Fiducial» – 3.2 кг

АС защита – 30 см жидкого
сцинтиллятора

Свинцовая защита - 25 см

Дискриминация фона e и γ
по форме импульса



АС защита – 0.93 т
жидкого сцинтиллятора

Вакуумный и LXe
объёмы и сверхчистой
Cu

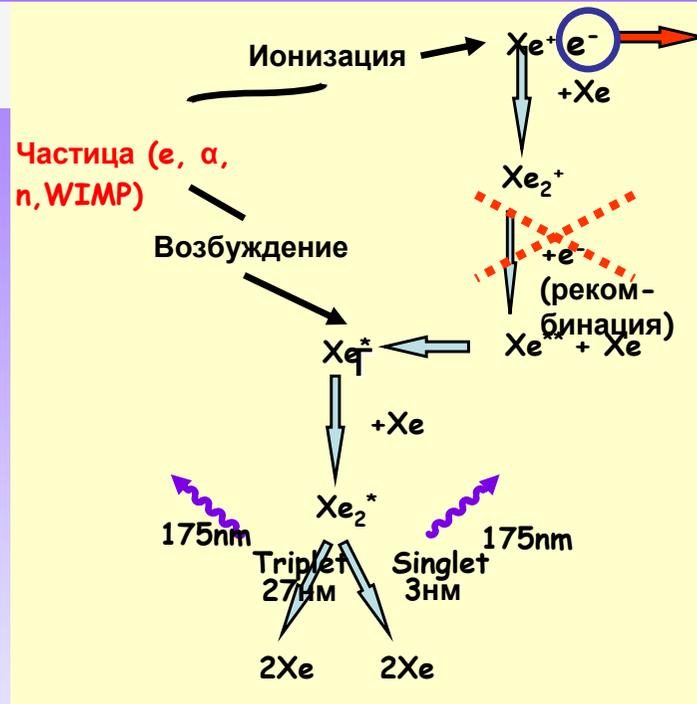
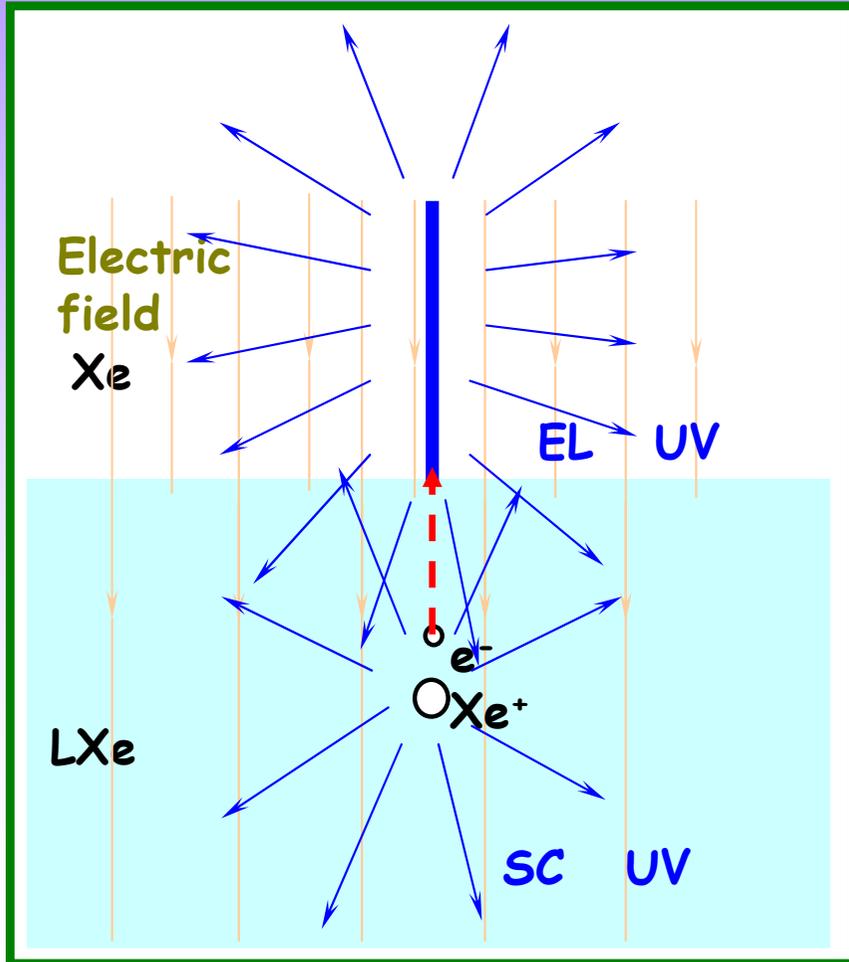
Низкофоновые эксперименты

Детекторы для поиска Тёмной Материи

Разделение частиц разного сорта в двухфазном детекторе (Xe)

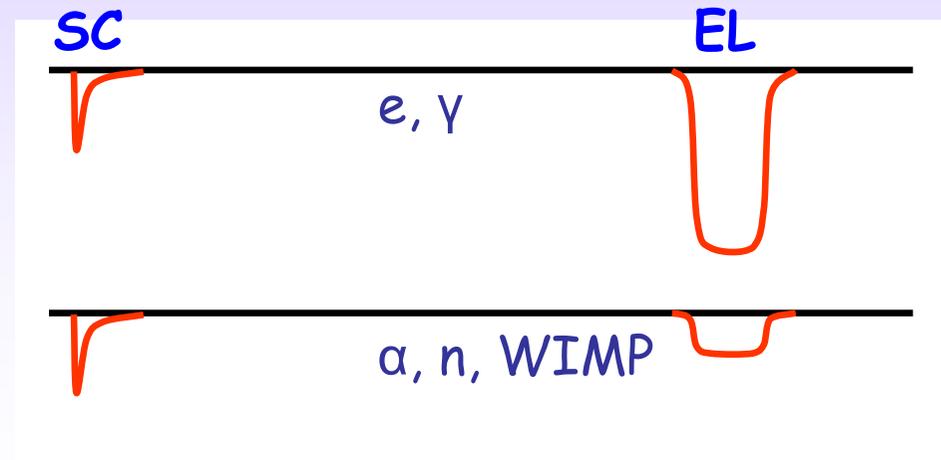
Б.А.Долгошеин, В.Н. Лебеденко, Б.У. Родионов

Для поиска Тёмной Материи:
А.С. Барабаш и А.И. Болоздыня,
Письма в ЖЭТФ, 1989, т.49, с. 359

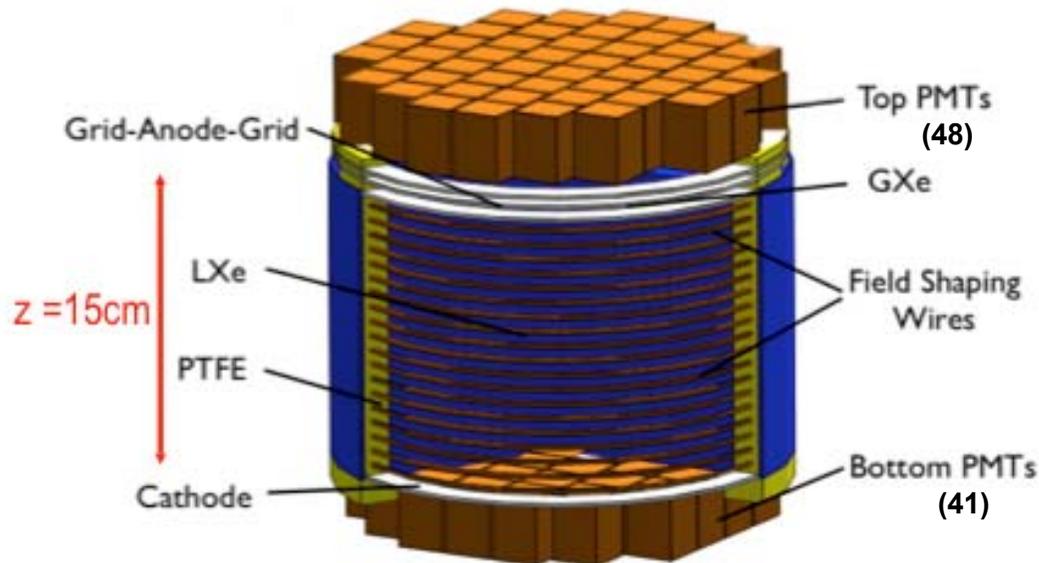


Электроны частично вытягиваются с трека:
рекомбинация подавлена

Степень подавления зависит от dE/dX



Двухфазный детектор Xepion10



$\varnothing \sim 20\text{ cm}$; область дрейфа = 15 cm
 LXe - 25 кг (15 кг в чувствительной области)

Низкорadioактивные ФЭУ:

U - 0.17 ± 0.04 мБк/ФЭУ

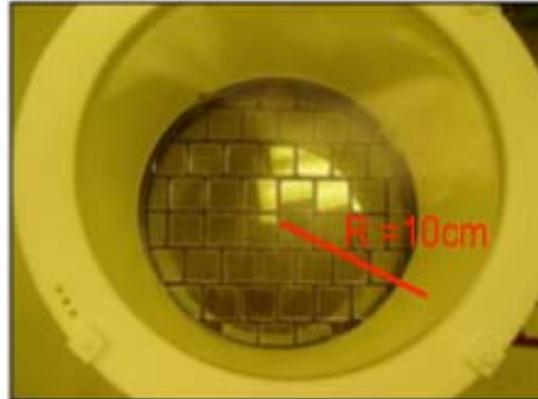
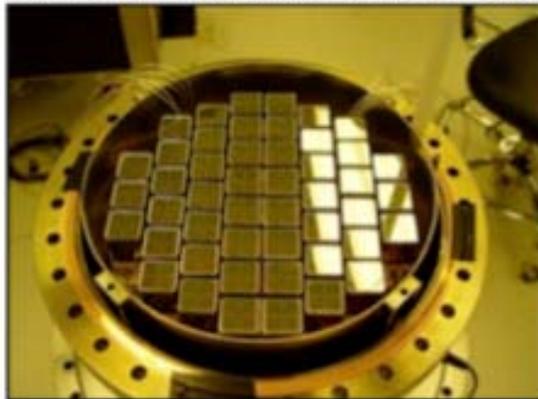
Th - 0.20 ± 0.09 мБк/ФЭУ

K - 10 ± 1 мБк/ФЭУ

Co - 0.56 ± 0.05 мБк/ФЭУ

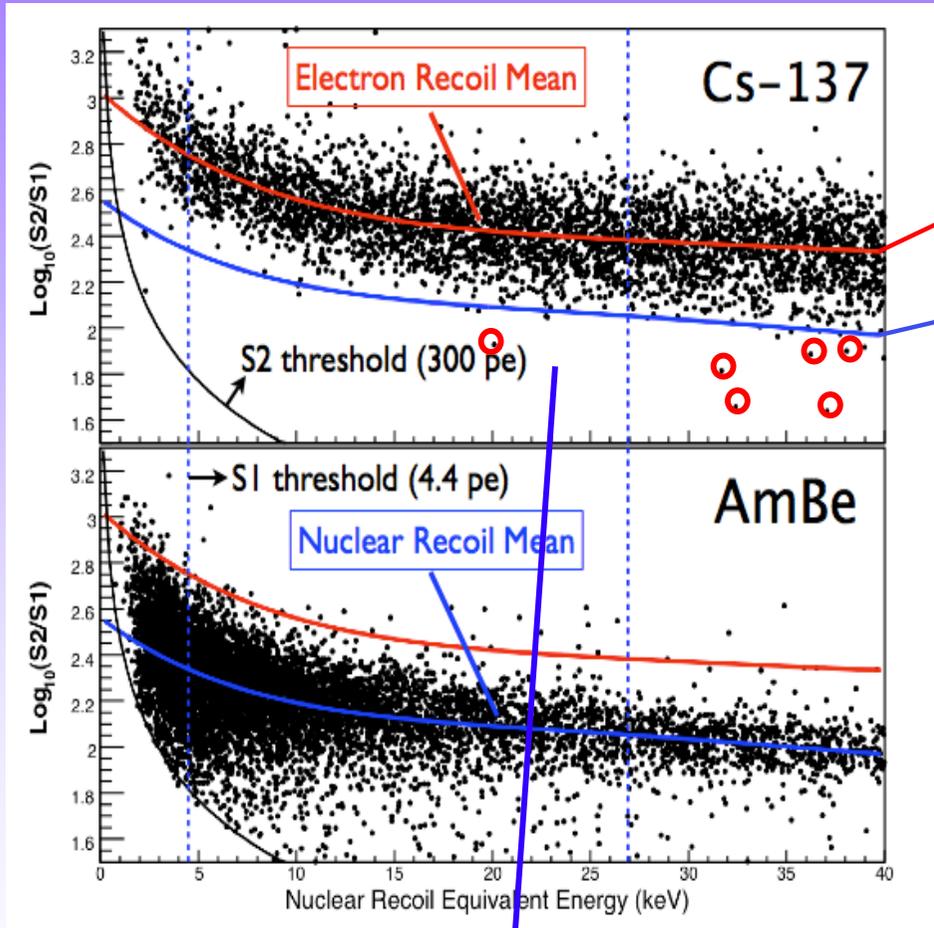
3.0 фэ/кэВ для 122 кэВ γ

89 PMTs: Hamamatsu R8520-AL 2.5 cm square



E. Aprile TAUP2007:

Gamma/Neutron calibration

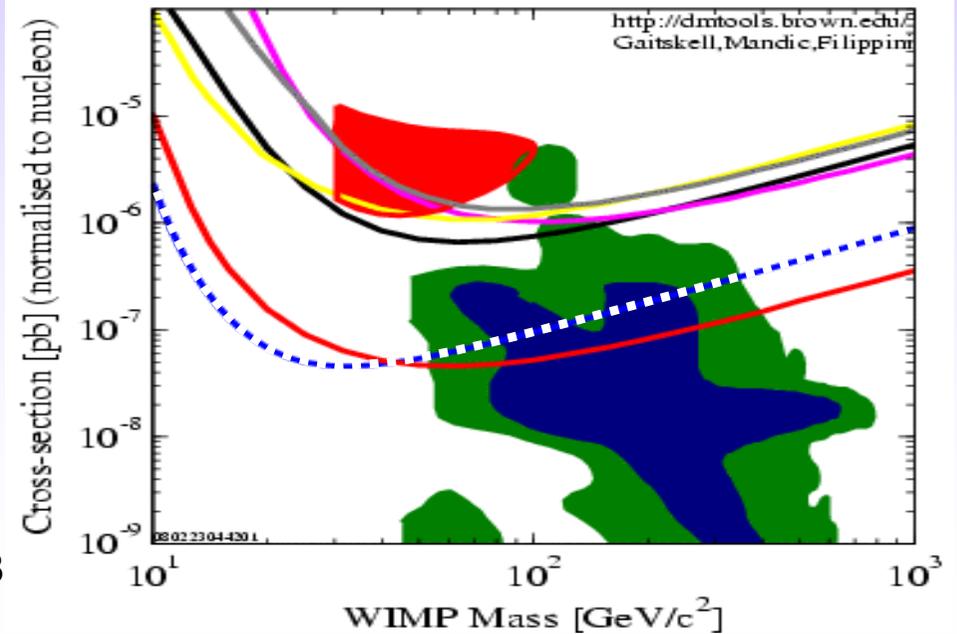
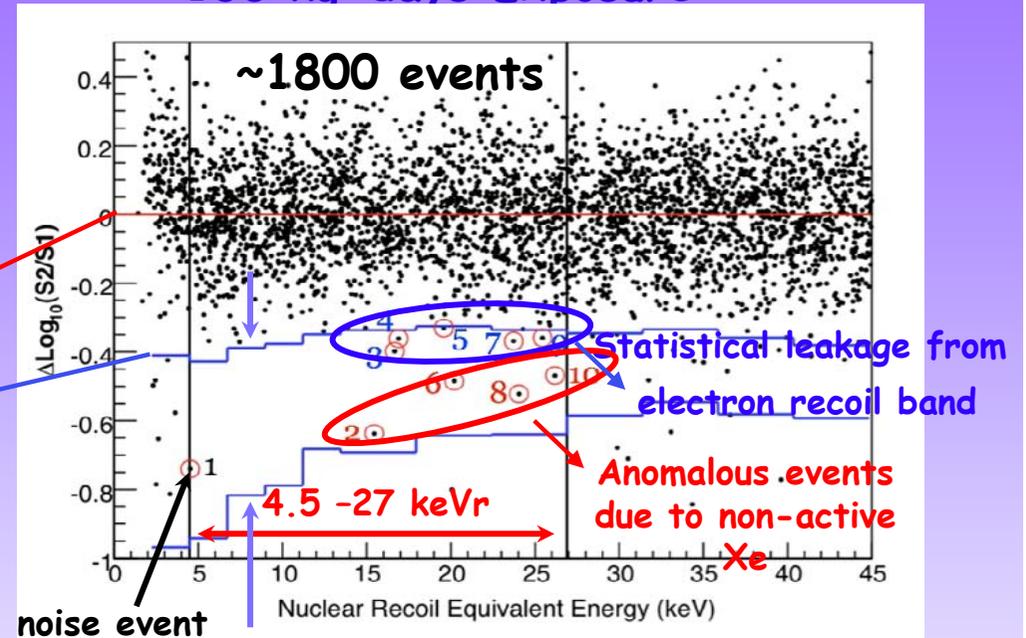


~ 99.5 % gamma events
are rejected below
nuclear recoil mean

19.11.2008

ICMART 2008

Blind Analysis
136 ka-days Exposure



Двухфазный детектор ZEPLIN-II

Парафин, нагруженный Gd

Разъёмы, охлаждение

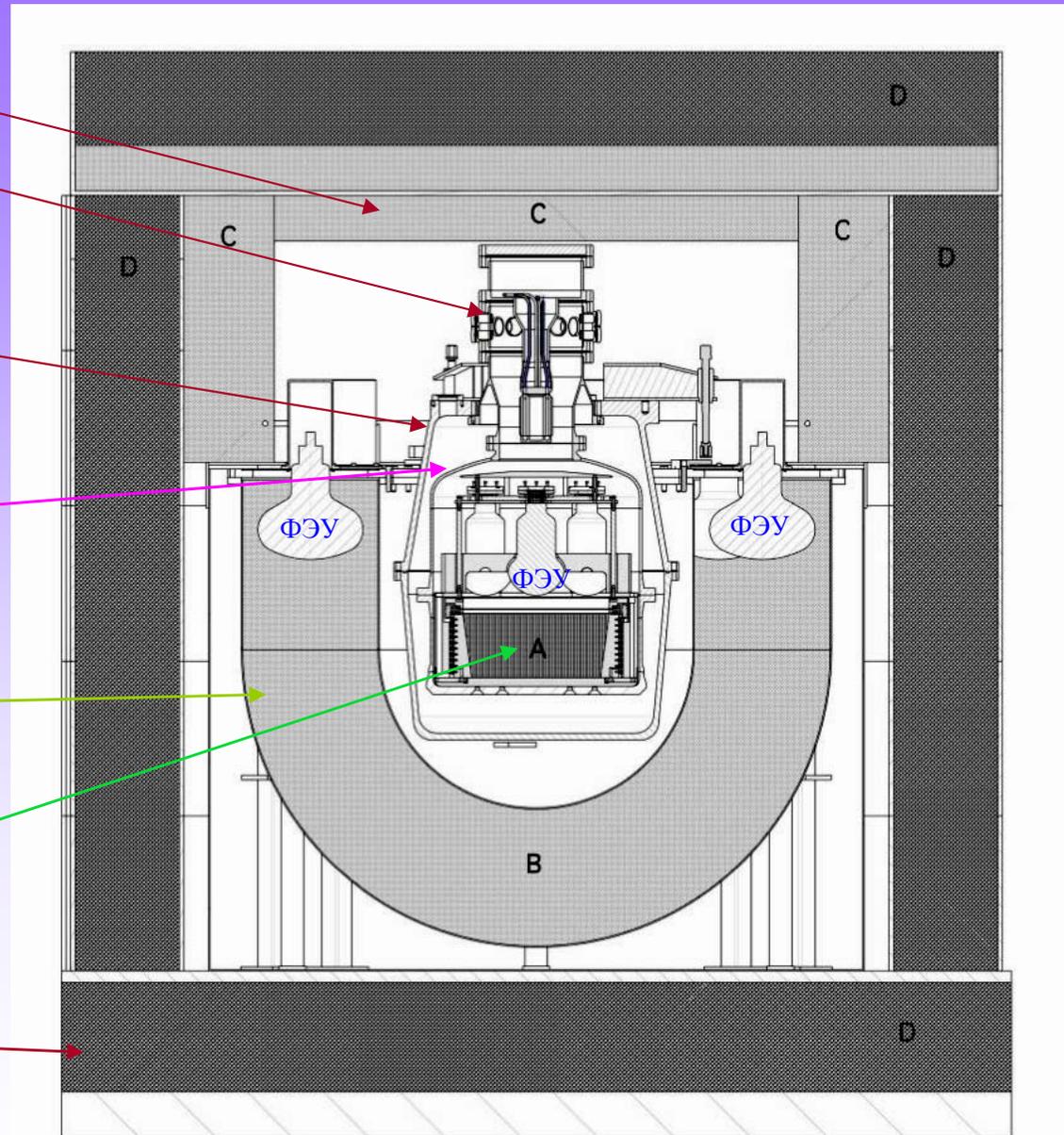
Вакуумный объём,
нерж. сталь

Внутренний медный объём,
диаметр 50 см

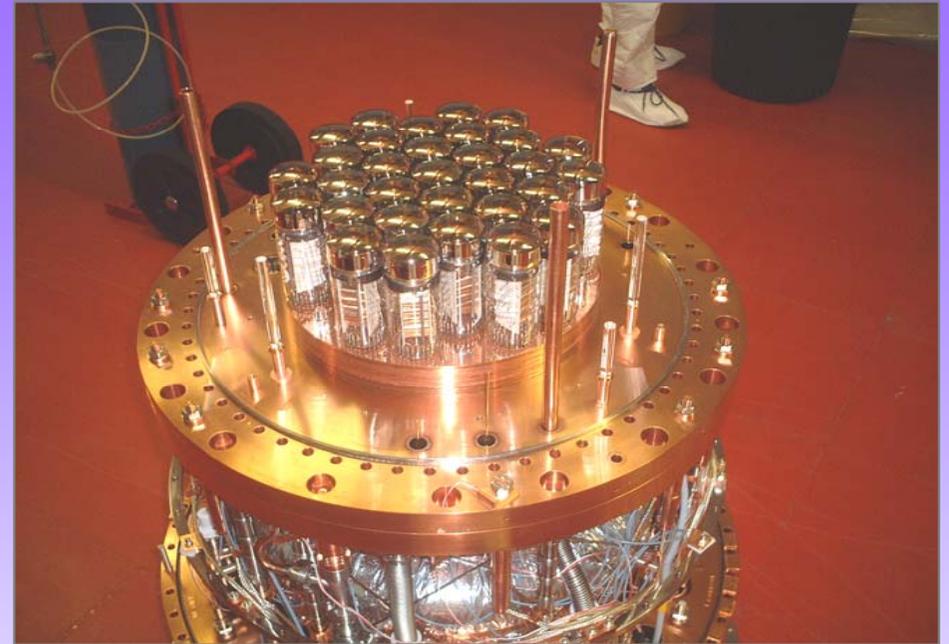
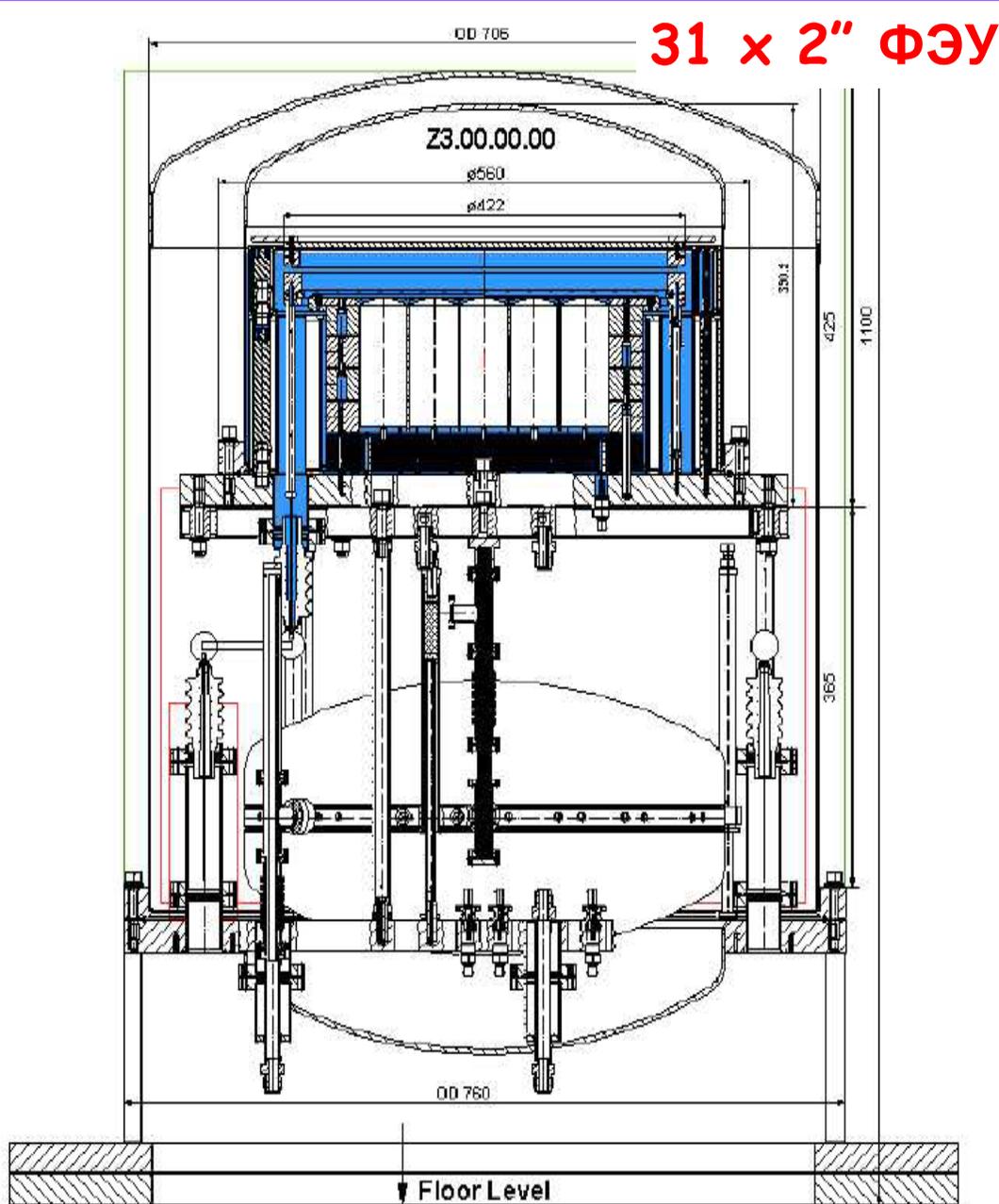
Активное вето,
жидкий
сцинтиллятор
(30 см CH₂)

Жидкий ксенон (>30 кг)

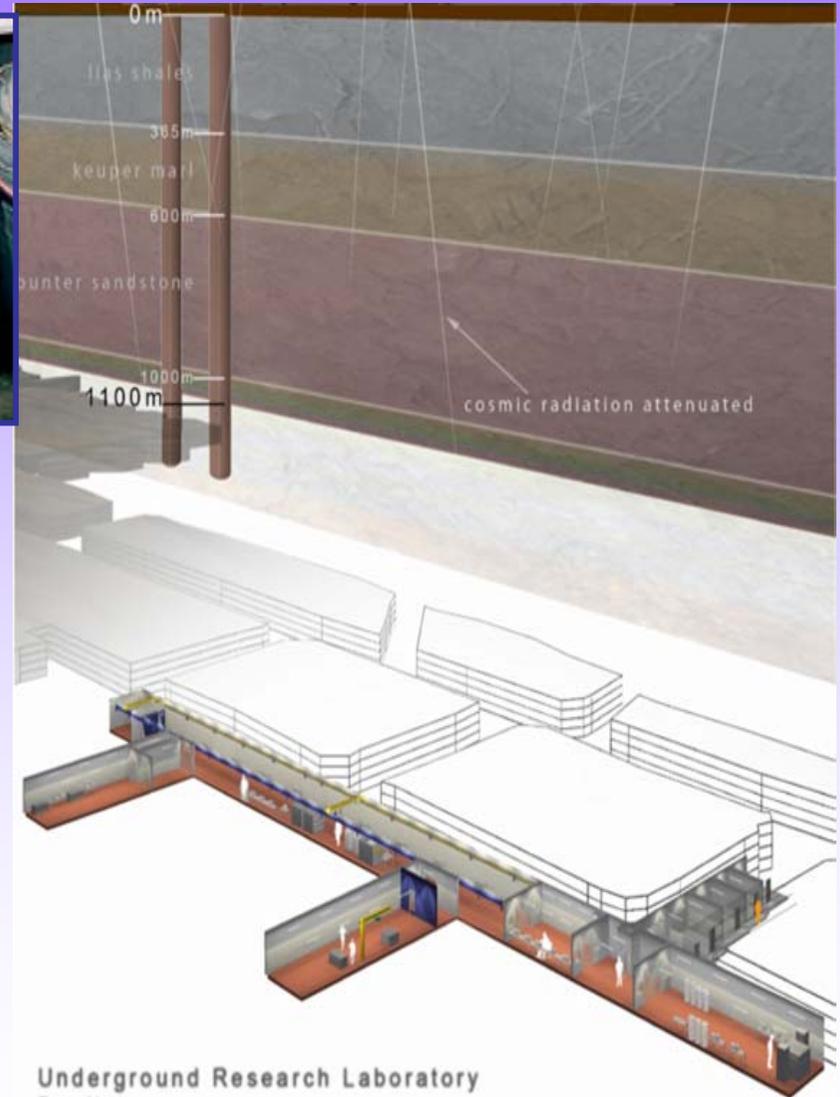
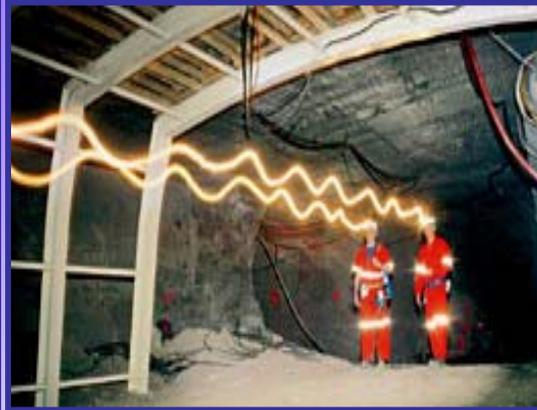
Свинец
(22.5 см)



Двухфазный детектор ZEPLIN-III



Подземная лаборатория Boulby



Underground Research Laboratory
Boulby

Глубина 1100 м (2.8 км в.э.)



1-я фаза эксперимента
(завершена)

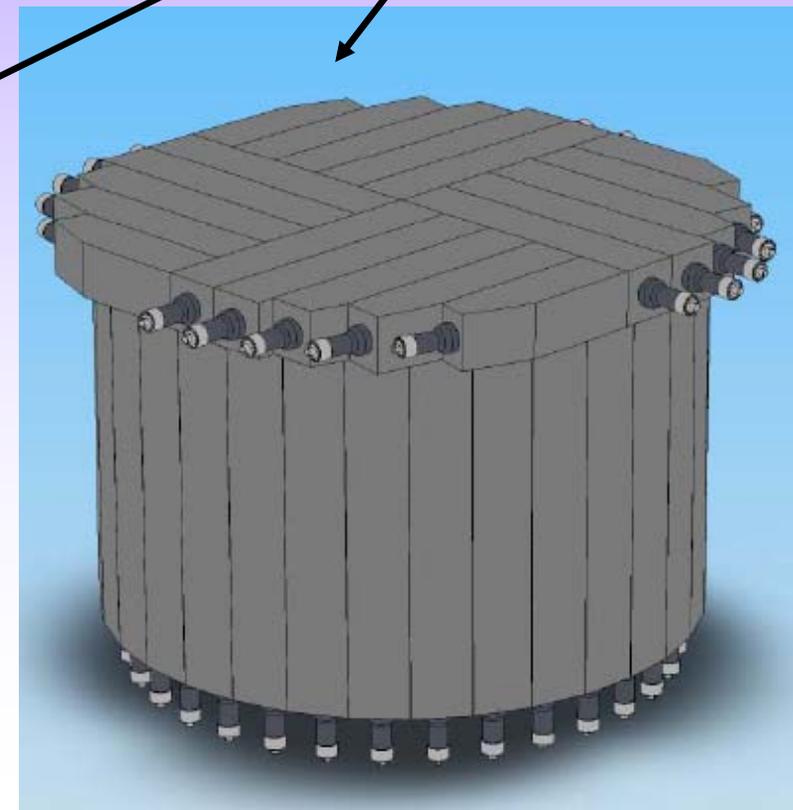
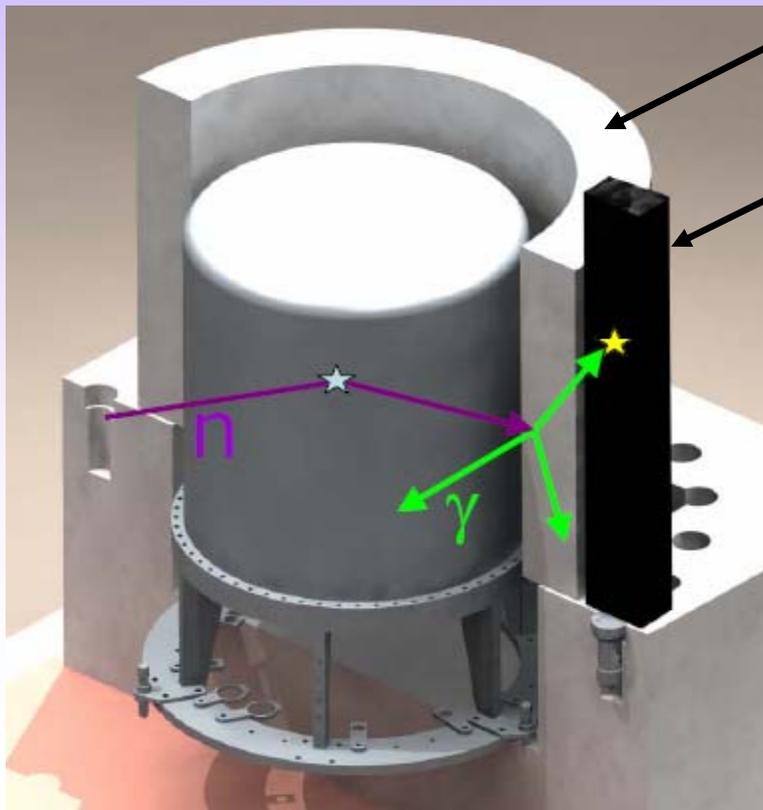
2-я фаза эксперимента:

замена ФЭУ на более
низкофоновые и установка
системы нейтронного «вето»

(А.Кобякин, доклад 19.11.08)

Пластик,
нагруженный Gd

Пластмассовый сц-р
UPS-923A



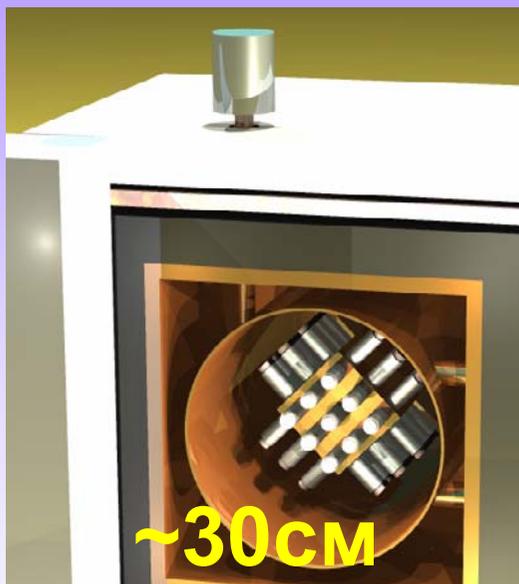
**Следующее поколение детекторов
для поиска Тёмной Материи -
детекторы большой массы**

XMASS
Xenon100
LUX

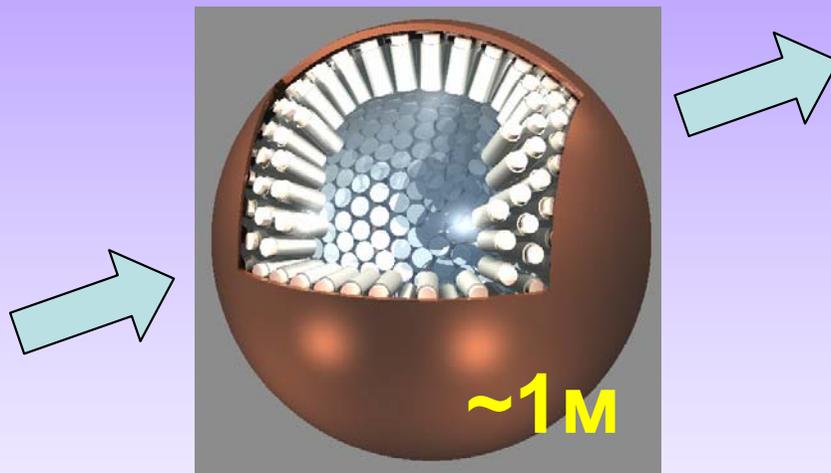
XMASS – многозадачный детектор

Благодаря 4π светосбору – низкий энергетический порог

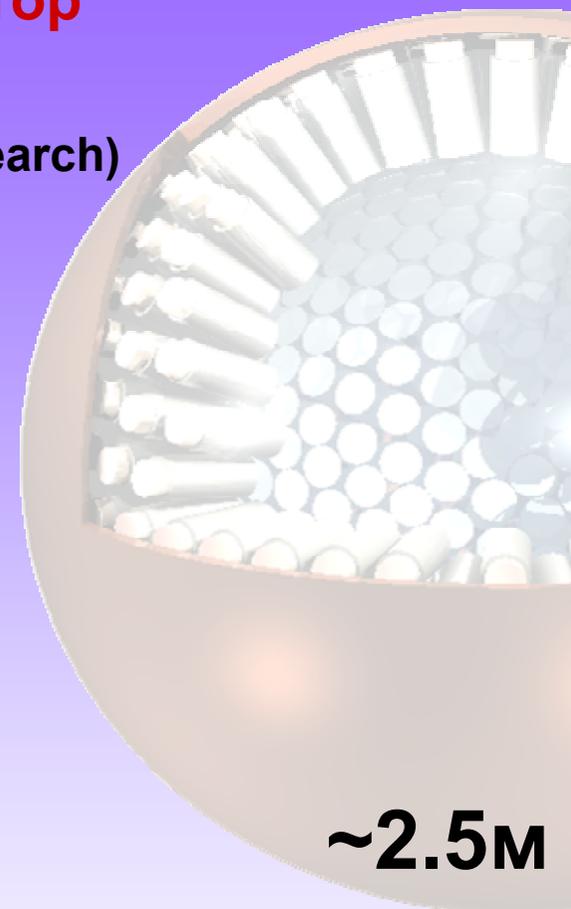
- Xenon detector for Weakly Interacting **MASS**ive Particles (DM search)
- Xenon **MASS**ive detector for Solar neutrino (pp/7Be)
- Xenon neutrino **MASS** detector (double beta decay)



Прототип R&D
FV ~ 3кг

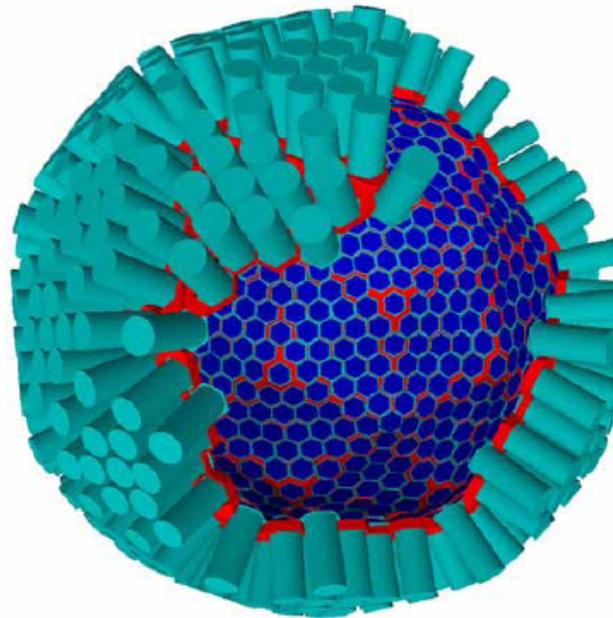
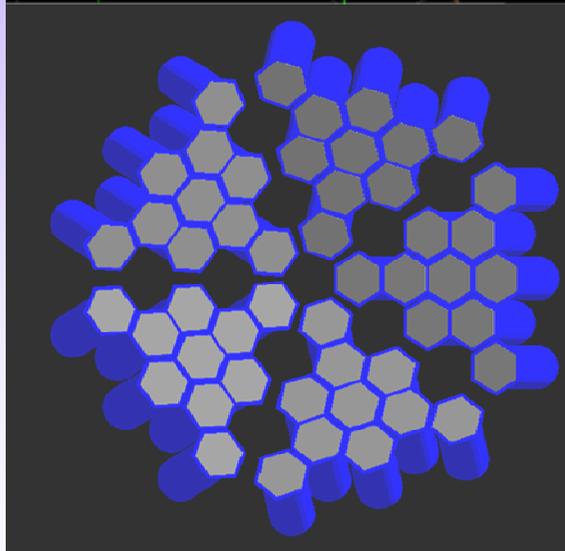
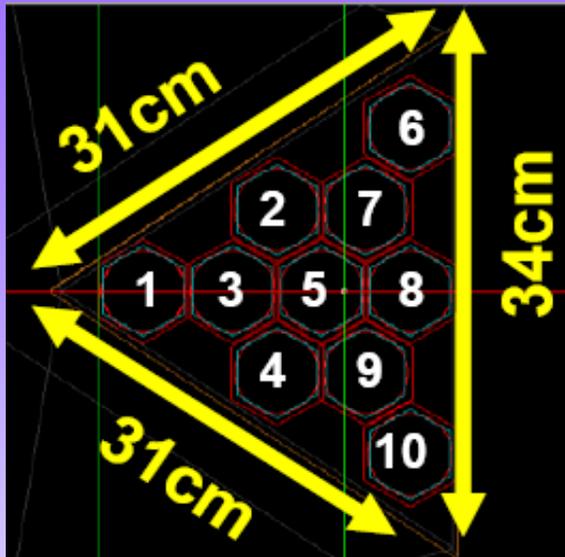


~1 м
~1 т
FV ~100кг
Поиск Тёмной Материи



~2.5 м
~20 т
FV ~10т
Солнечные нейтрино
Поиск Тёмной Материи

S. Moriyama, idm2004

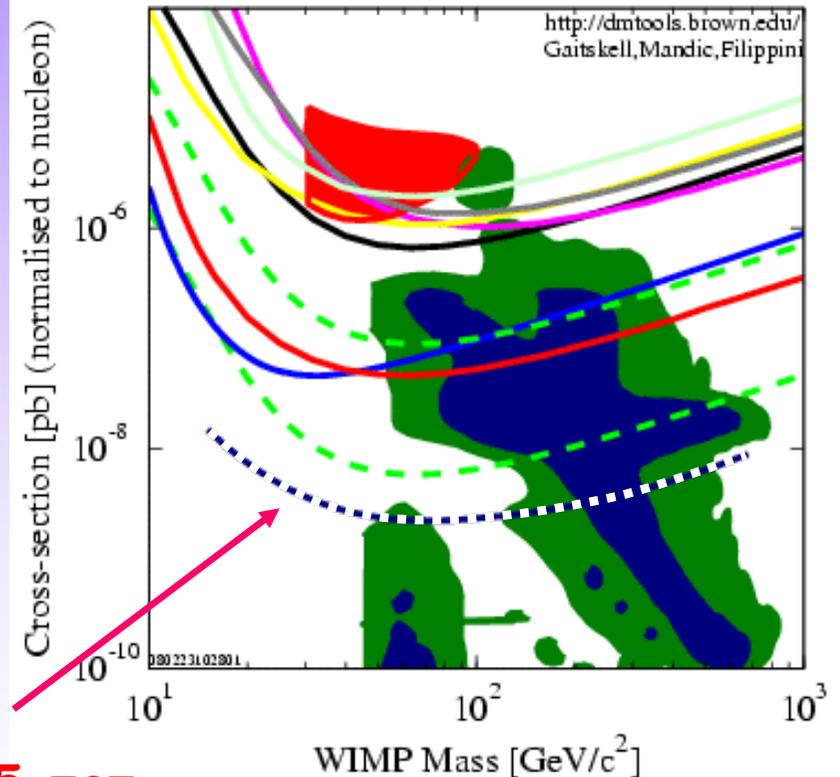
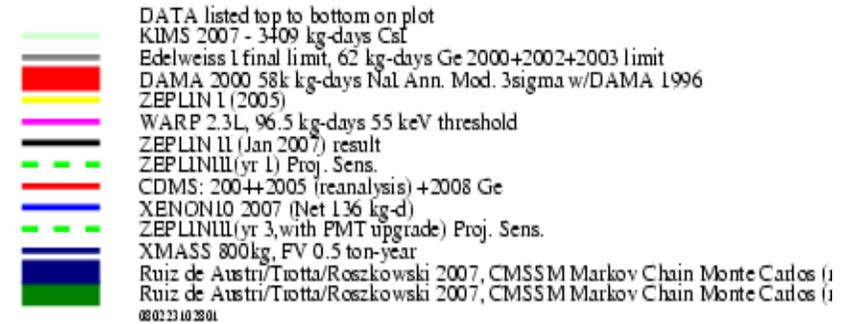
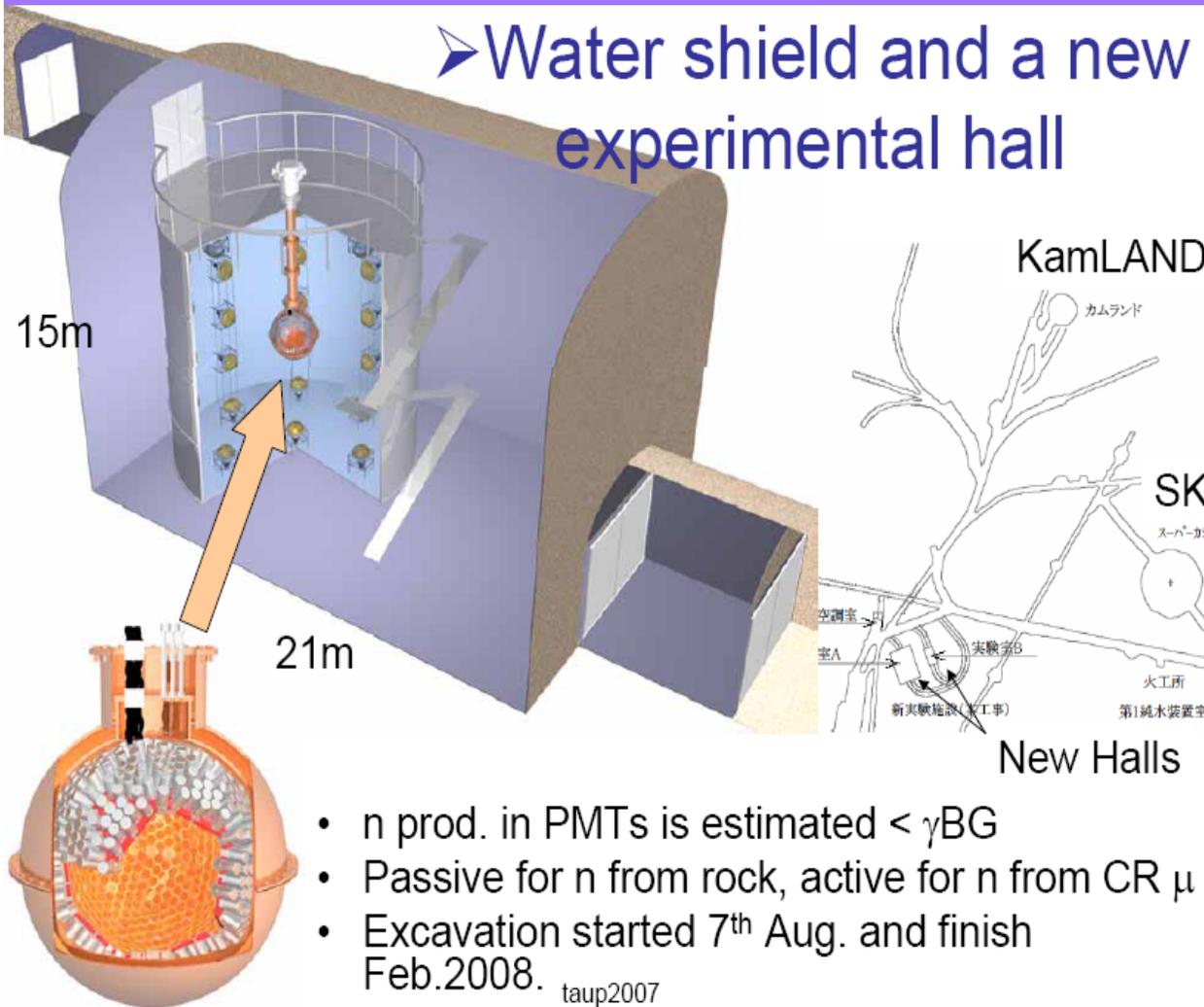
XMASS – многозадачный детектор

800 кг детектор

- 60 треугольников
- 10 ФЭУ/треугольник x 60 = 600 ФЭУ
- +212 ФЭУ между треугольниками
- Полное кол-во 812 ФЭУ
- Покрытие ФЭУ 67%
- Расстояние от ц-ра до фотокатода ~ 45 см
- FV: $R = 25$ см
- Все ФЭУ – в жидком Хе



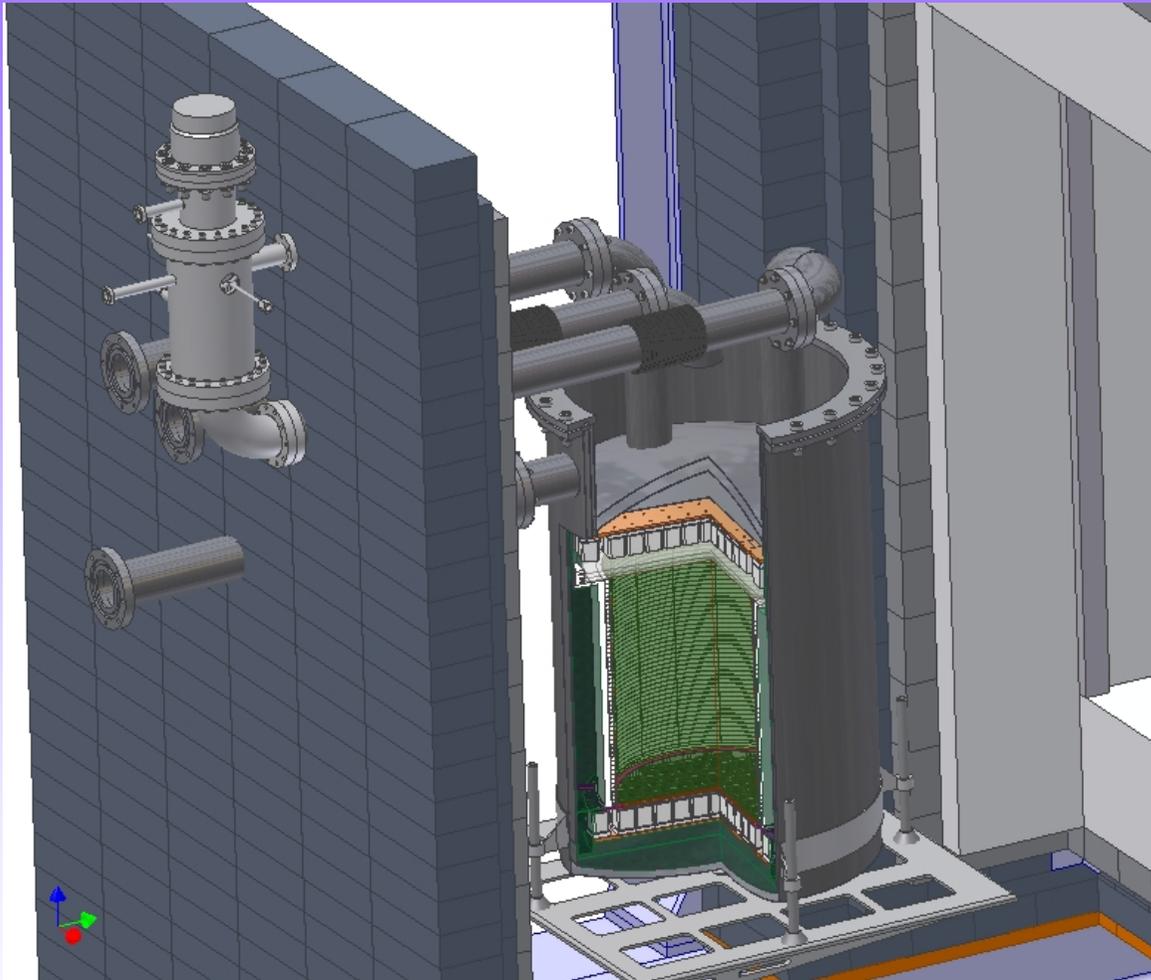
Water shield and a new experimental hall



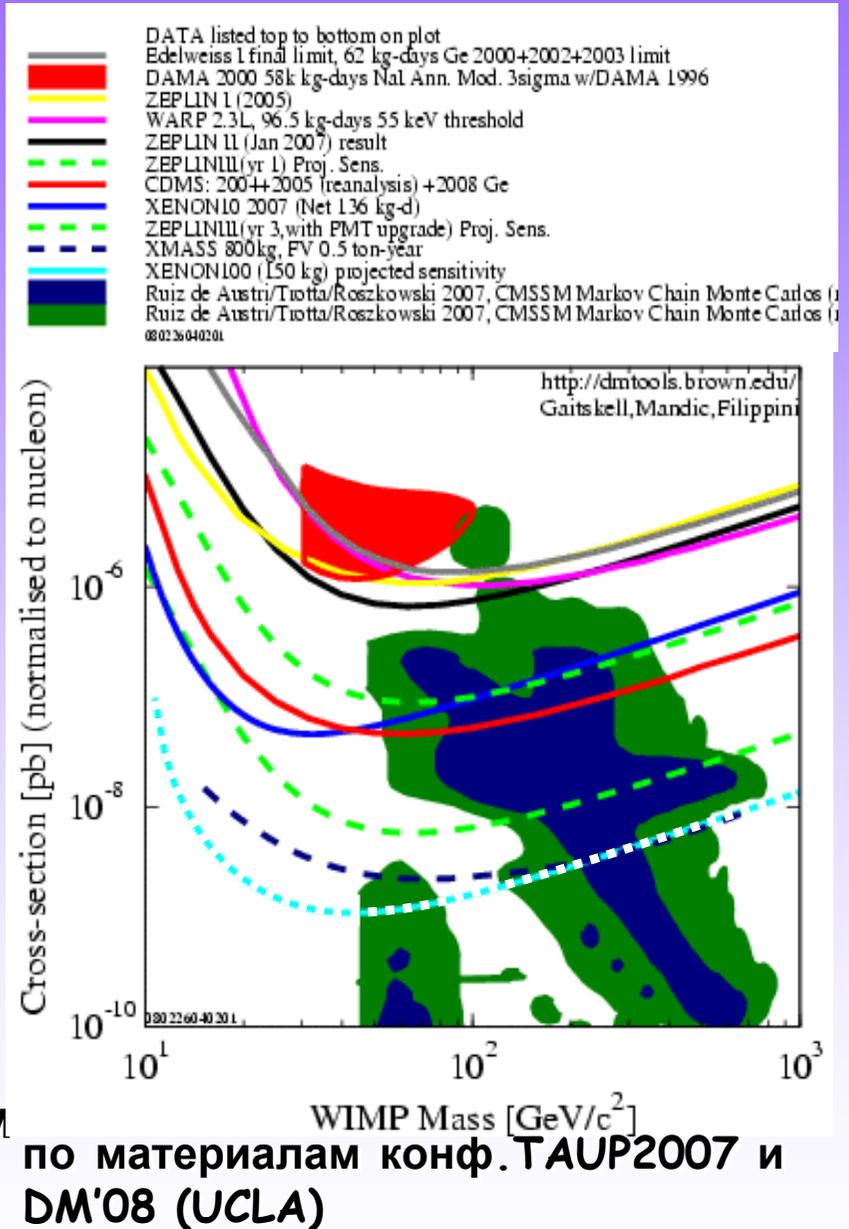
При экспозиции 5 лет

Хенон100

масштабированный Хенон10

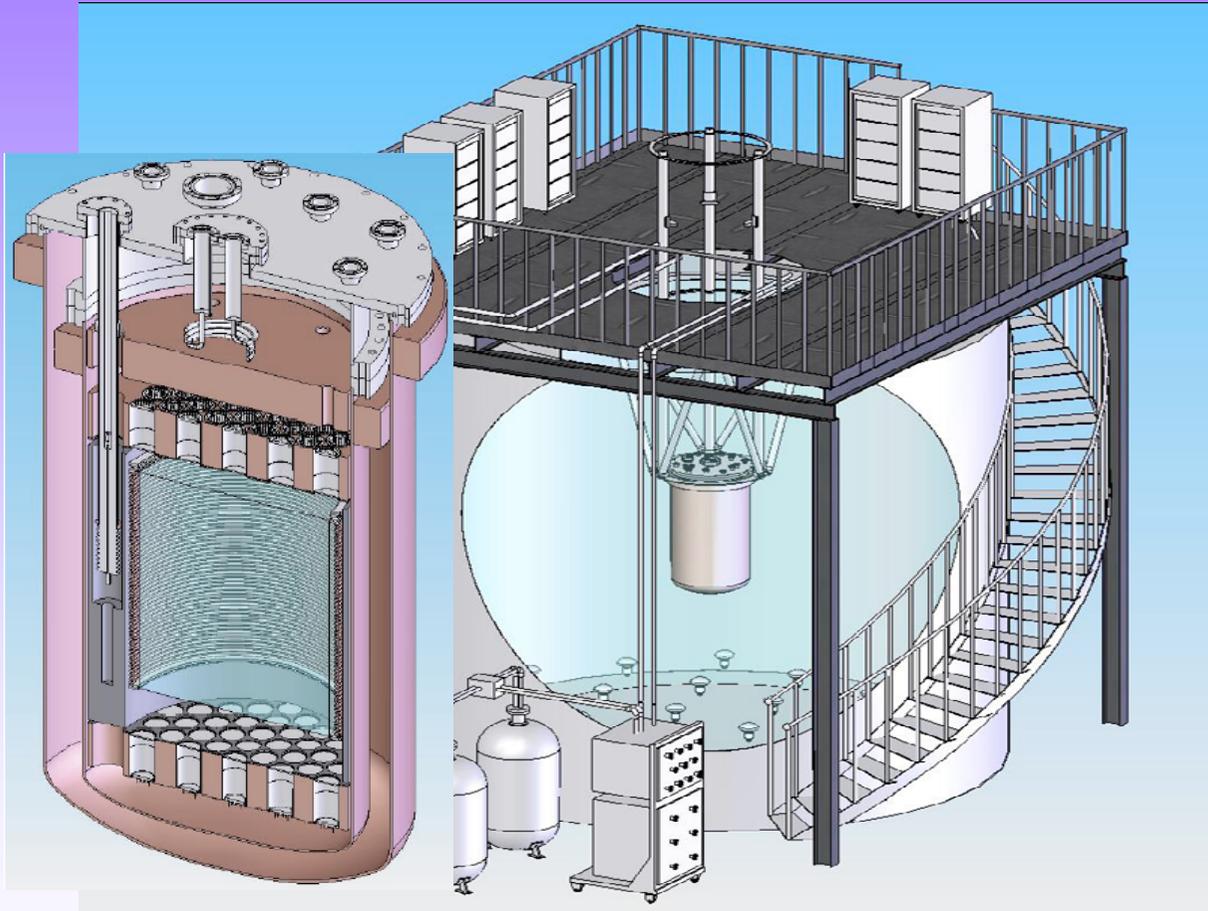


150 кг полная масса Xe (70 кг в рабочем объёме)



LUX

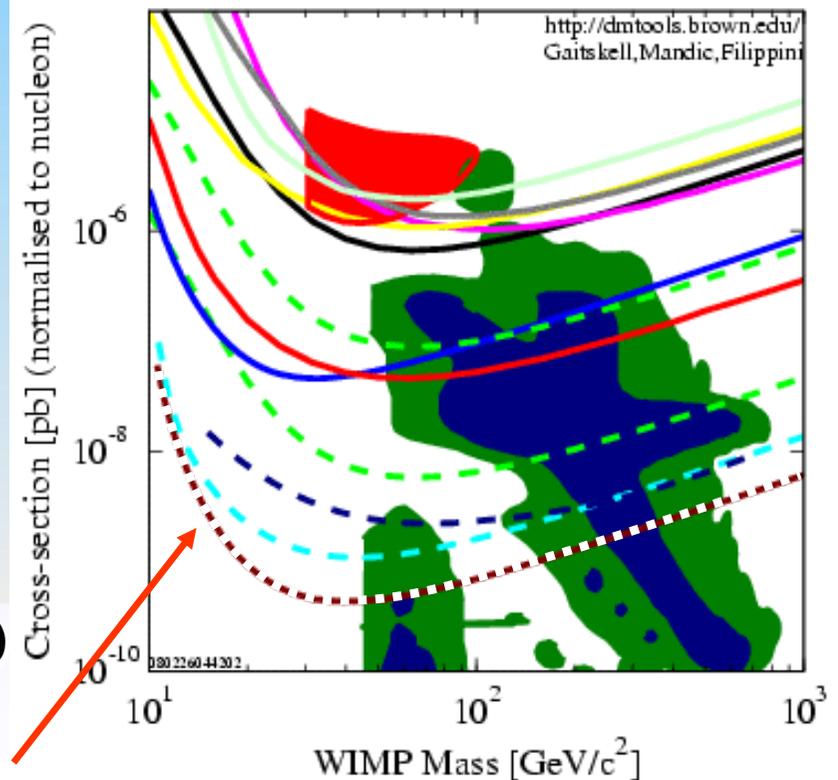
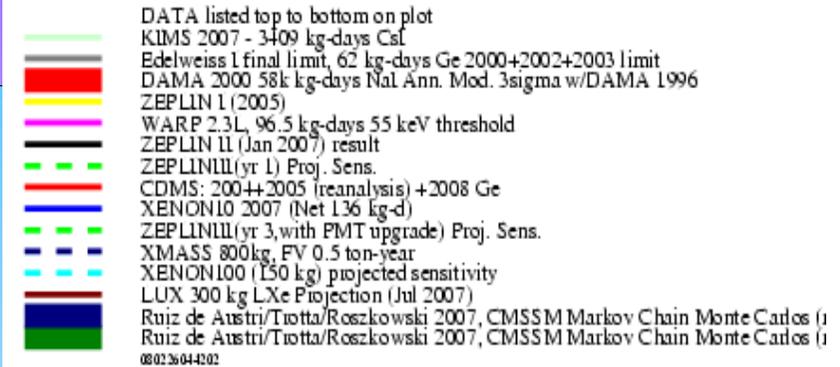
Large **U**nderground **X**enon detector
SUSEL - at Homestake; South Dakota



300 кг полная масса Xe (150 кг в рабочем объёме)
 Большой танк с водой просм. ФЭУ - активн.
 защита от мюонов.

19.11.2008

При экспозиции 10 мес.



Hamamatsu:

для MEG

R6041



ø5 см x 4 см
QE 5-8%

R9288



ø5 см x 4 см
QE 20% **НФ**

для XMASS

R8778



ø5 см x 12 см
QE 26% **НФ**

для Xe10, Xe100

R8520

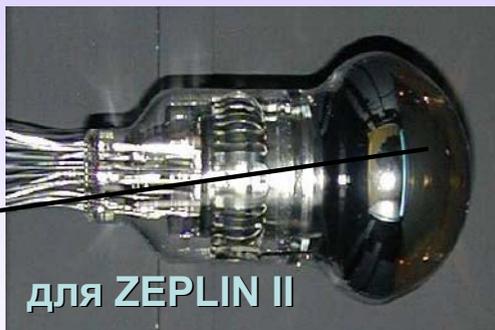


25 см x 25 см
QE ~30% **НФ**

Electron Tube :

Полупрозрачный
металлич. слой
для увеличения
проводимости
фотокатода при
низких
температурах

D742QKFLB
parent 9372B



для ZEPLIN II

ø12.8 см **НФ**

ETL D730
parent ETL 9829Q
Bi-alkali



для ZEPLIN III

ø5 см QE 20 -30% **НФ**

металлич. стрипы
для увеличения
проводимости
фотокатода при
низких
температурах

сейчас готовится новая версия ФЭУ

НФ - низкофоновые: уменьшено содержание изотопов U и Th цепочек в ~30 и ~10 раз, соотв., ⁴⁰K – в ~ 50 ÷ 100 раз

Заключение

Детекторы на основе жидких благородных газов нашли своё применение в низкофоновой физике (благодаря своим уникальным свойствам)

Данные разработки стимулировали создание специализированных низкофоновых низкотемпературных ФЭУ и развитие методов тонкой очистки благородных газов