



Болоздыня Александр Иванович

# ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ НА ОСНОВЕ ЧИСТЫХ БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СЛАБОИОНИЗИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ И ПОЛЕЙ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

# СОДЕРЖАНИЕ

## ВВЕДЕНИЕ

Глава 1. ЧИСТЫЕ БЛАГОРОДНЫЕ ГАЗЫ КАК РАБОЧЕЕ ВЕЩЕСТВО ДЕТЕКТОРОВ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Глава 2. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Глава 3. ЭЛЕКТРО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Глава 4. ЭМИССИОННЫЕ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Глава 5. ЖИДКОСТНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ С ТРЕХМЕРНОЙ ПОЗИЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ

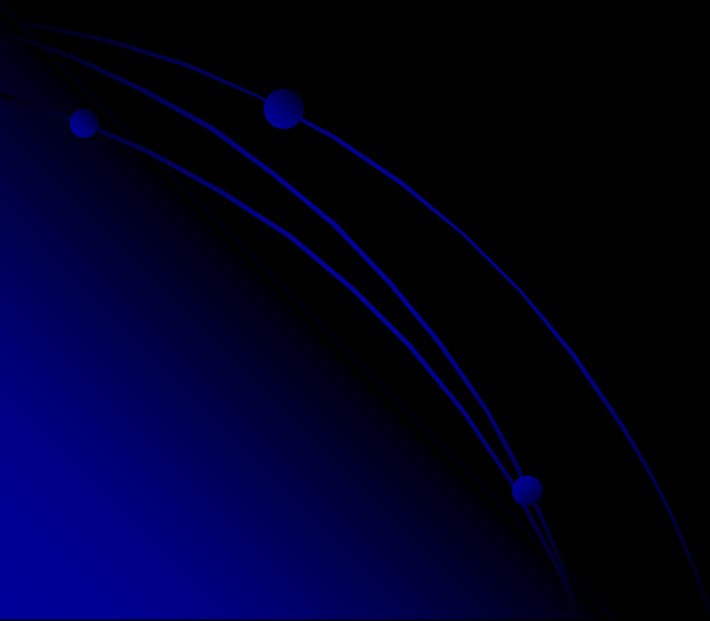
Глава 6. РЕГИСТРАЦИЯ СЛАБОИОНИЗИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ ДЕТЕКТОРОВ С ТРЕХ-МЕРНОЙ ПОЗИЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ

Глава 7. ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОЛЕЙ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

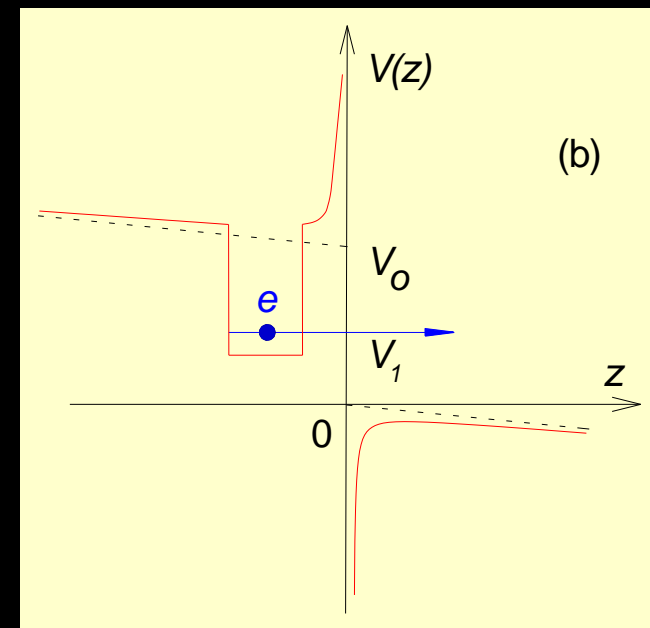
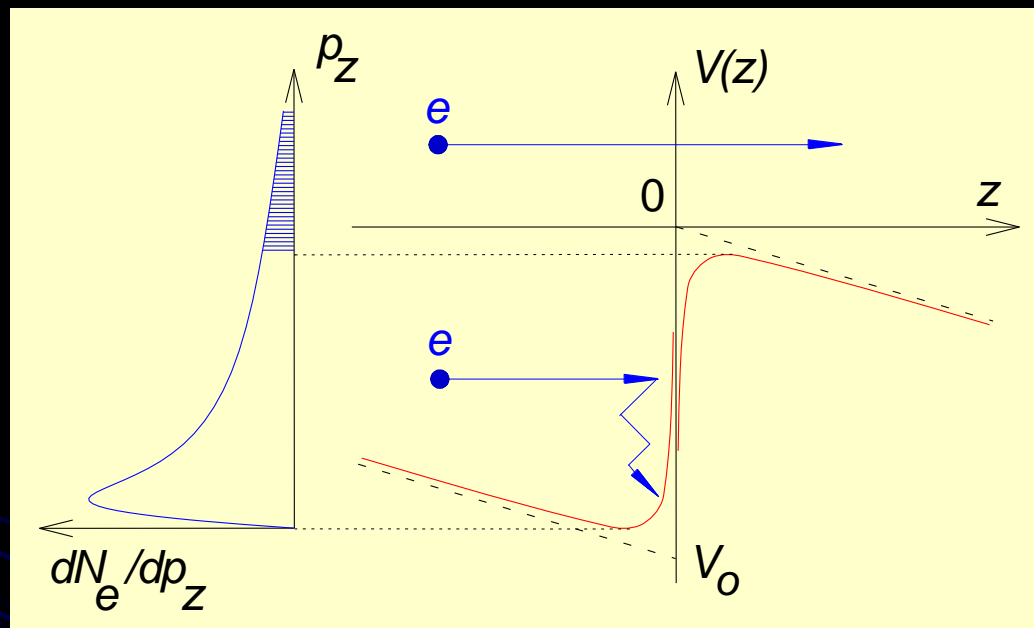
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

## Глава 1

# ЧИСТЫЕ БЛАГОРОДНЫЕ ГАЗЫ КАК РАБОЧЕЕ ВЕЩЕСТВО ДЕТЕКТОРОВ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ



# Эмиссия «свободных» электронов из неполярных диэлектриков

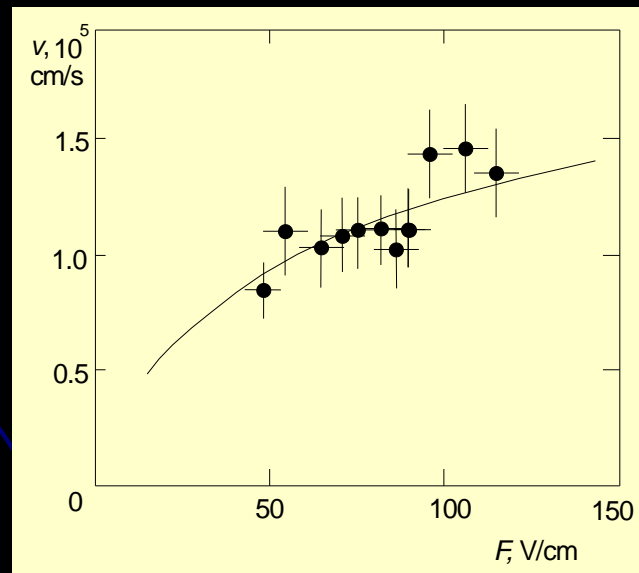
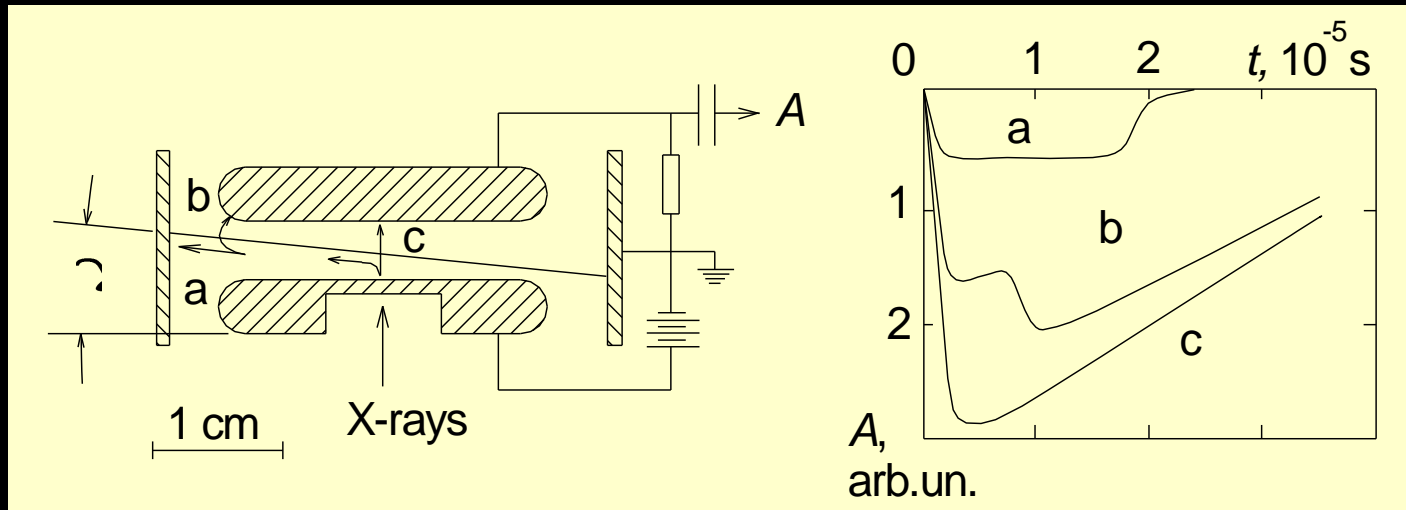


$$V_1(z) = V_0 - eF_1z + eA_1, z < 0$$

$$V_2(z) = -eF_2z + eA_2, z > 0$$

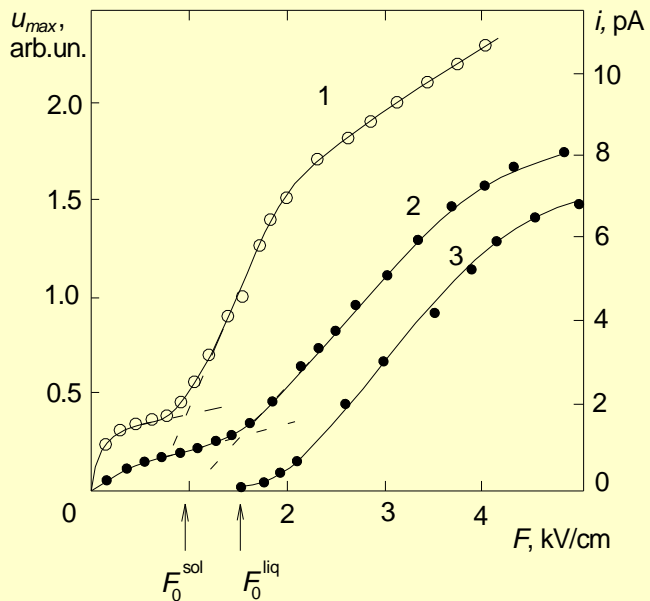
$$A_{1,2} = -e(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) / \left[ \varepsilon_{1,2} (z + \xi z / |z|) (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \right]$$

# Подповерхностный дрейф электронов



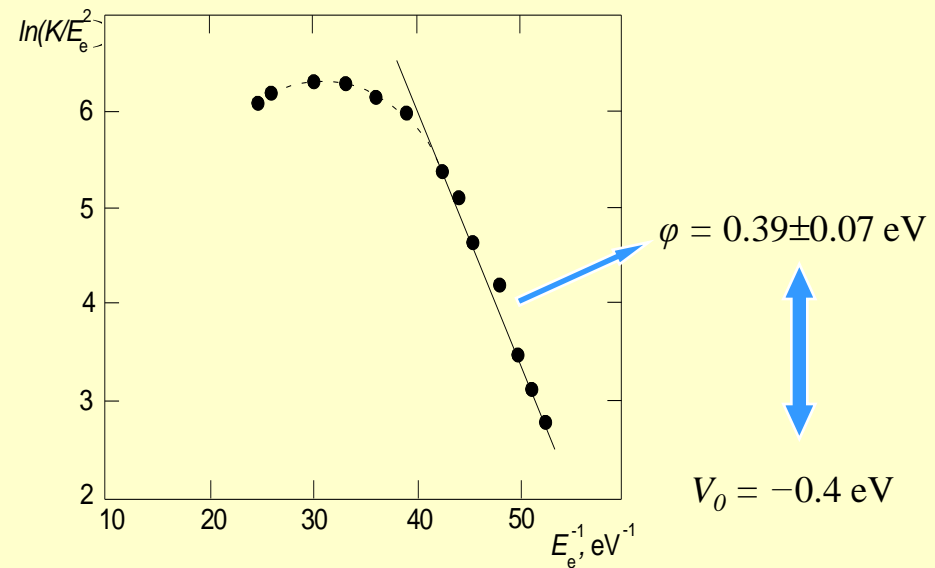
# Доказательство термоэлектронного характера эмиссии электронов из конденсированных тяжелых благородных газов

Эмиссионные кривые для ж. и тв. криптона



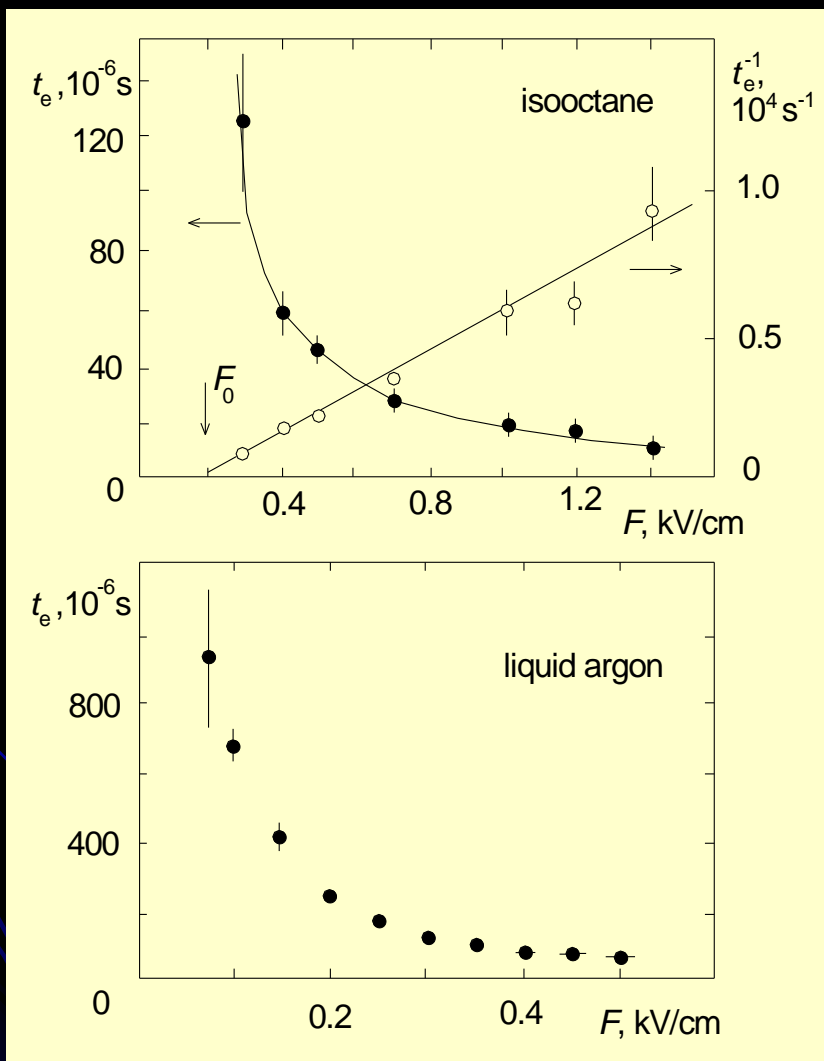
Следуя закону Ричардсона-Дэшмена-Лауэ

$$K = I_e / I_i = \langle E_e \rangle^2 \exp \left[ -\frac{\phi}{(2/3)\langle E_e \rangle} \right]$$



# Характерное время эмиссии тепловых электронов из некоторых неполярных жидких диэлектриков

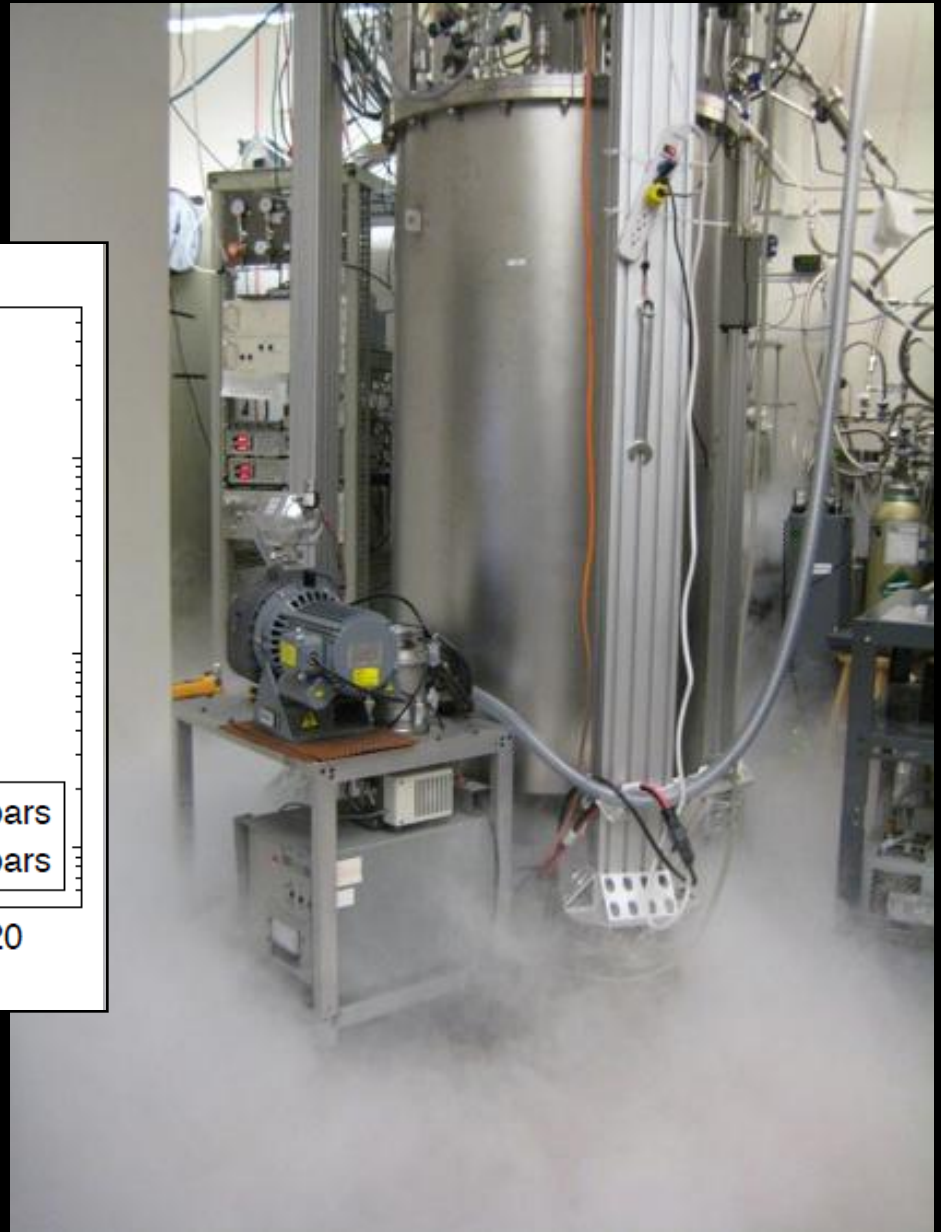
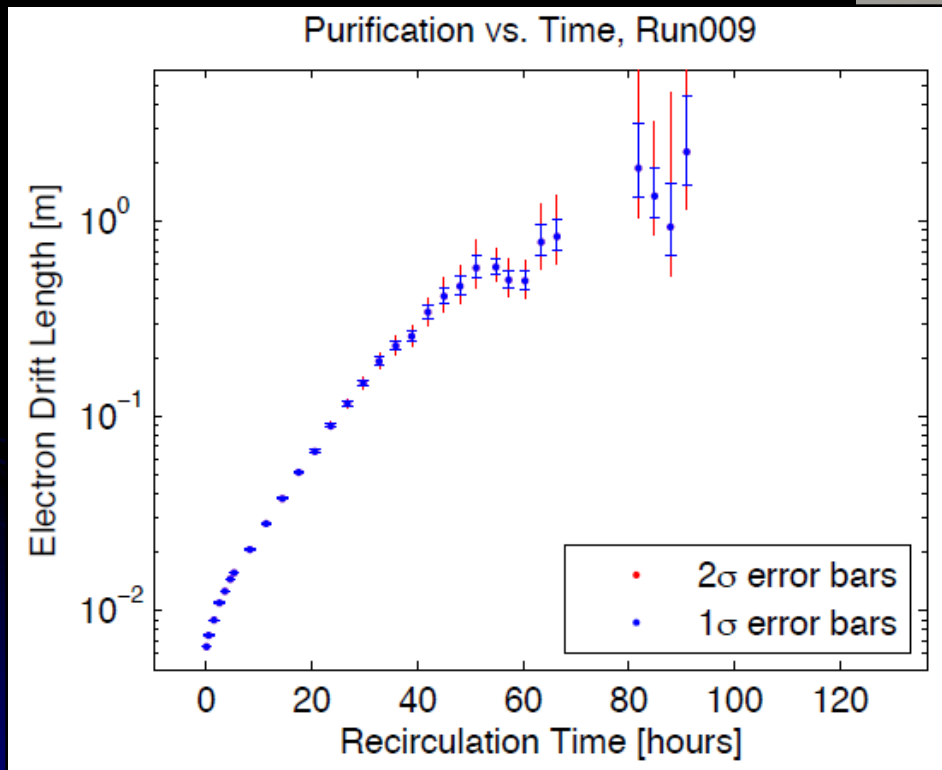
$$t_e \sim (\Lambda/v_d) \exp\{[V_0 - 2eA_1^{1/2}(1 + A_2^{1/2}/A_1^{1/2})F^{1/2}]/k_B T\}$$



	$T, K$	$\mu\omega, cm^2/V/s$	$V_0, eV$	$E_c, kV/cm$	$E_0, kV/cm$	$te$
<b><i>Emitters of cold electrons</i></b>						
$L^4He$	1-2	0.03	+1			10 s (100V/cm)
$Ln-H$	300	0.09	+0.09	100	0.03	
$Liso-O$	300	7	-0.18	90	0.15	20 $\mu s$ (1kV/cm)
$LTMP$	297	24	-0.3	50		
$LAr$	84	475	-0.21	0.2		700 $\mu s$ (100 V/cm)
$sNe$	24	600	+1.1			
<b><i>Emitters of hot electrons</i></b>						
$LCH_4$	100	400	-0.18	1.5	<4	
$sCH_4$	77	~1000	0		<1.5	< 0.1 $\mu s$ (>1kV/cm)
$LAr$	84	475	-0.21	0.2	0.25	< 0.1 $\mu s$ (>0.3kV/cm)
$sAr$	83	1000	+0.3 (6K)		0.1	< 0.1 $\mu s$ (>100V/cm)
$LKr$	116	1800	-0.4	0.08	1.6	< 0.1 $\mu s$ (>1.6kV/cm)
$sKr$	116	3700	-0.25 (20K)		0.98	< 0.1 $\mu s$ (>1kV/cm)
$LXe$	161	2200	-0.61	0.05	1.75	< 0.1 $\mu s$ (>1.8kV/cm)
$sXe$	161	4500	-0.46 (40K)		1.25	< 0.1 $\mu s$ (>1.3kV/cm)



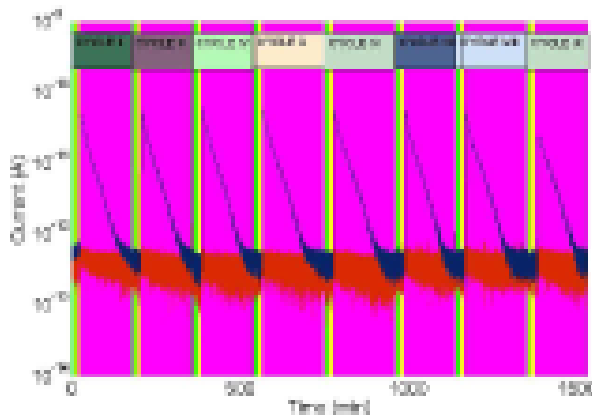
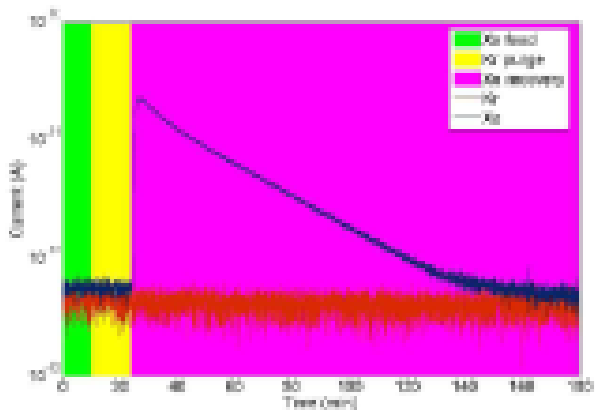
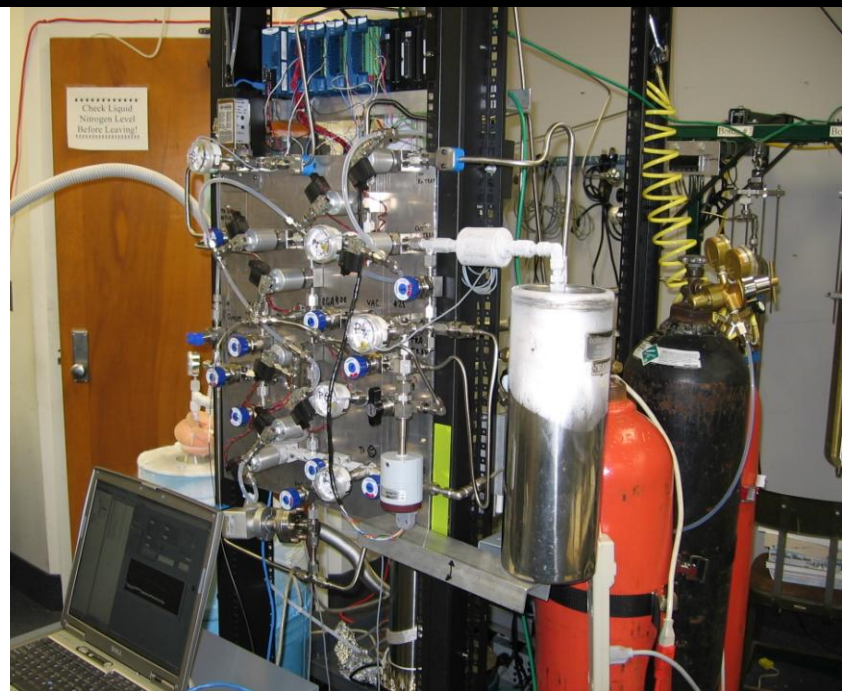
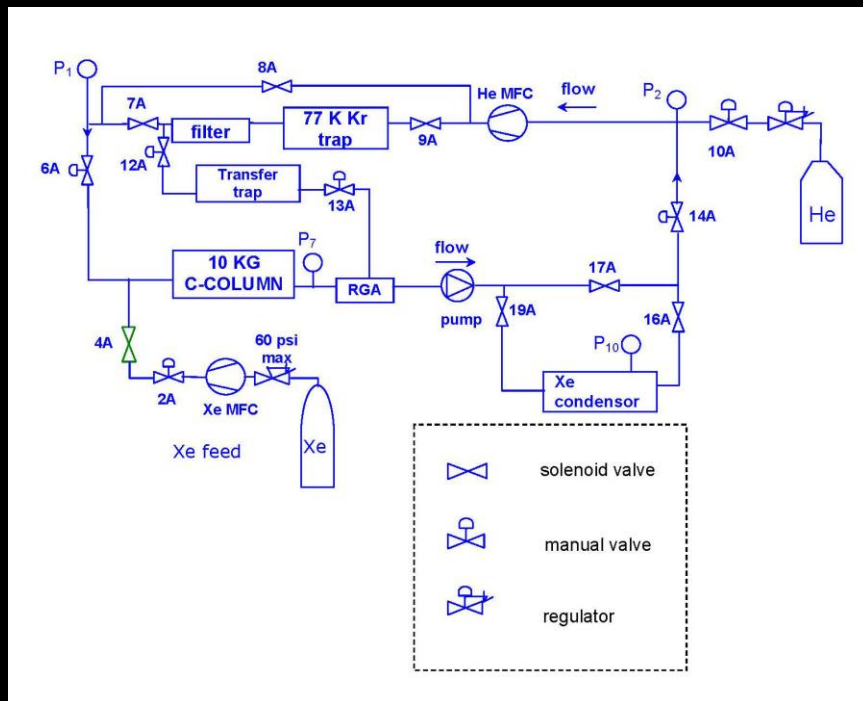
# 2009 LUX прототип 65 кг LXe



# CWRU chromatographic system removing Kr from Xe

2006  
26 kg

2011  
350 kg



120 cycles 26 kg Xe  
for XENON10  
<3 ppt ( $10^{-12}$ ) Kr

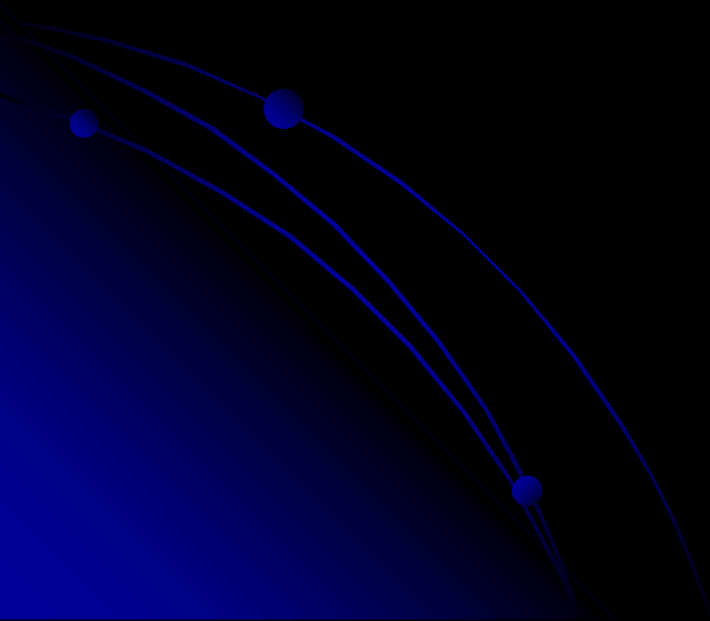
< $6 \cdot 10^{-23}$   $^{85}\text{Kr}$

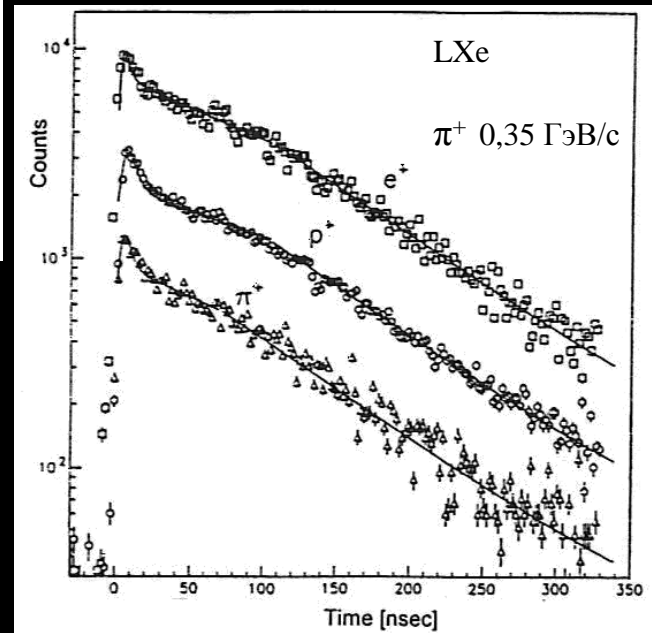
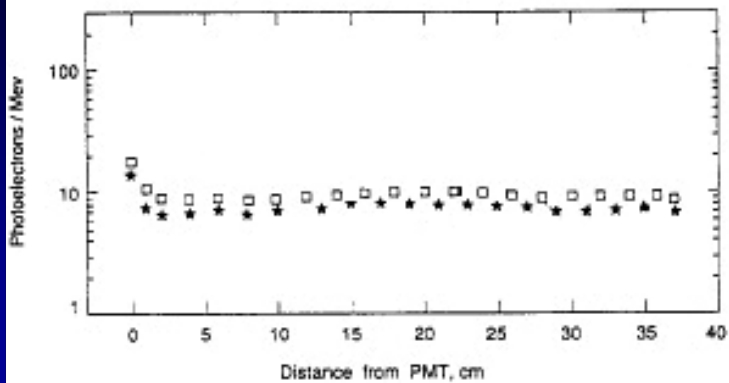
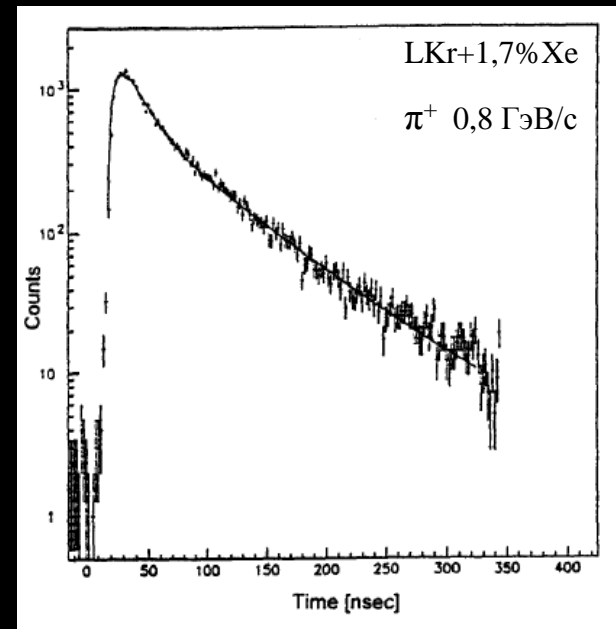
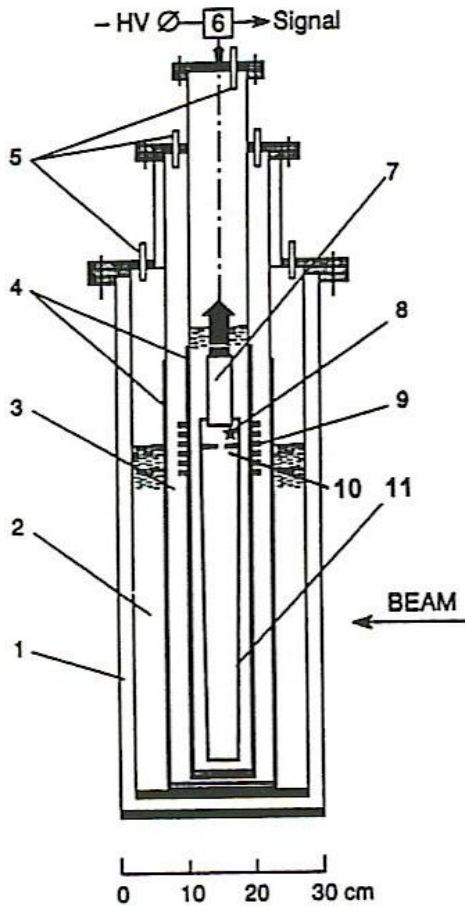
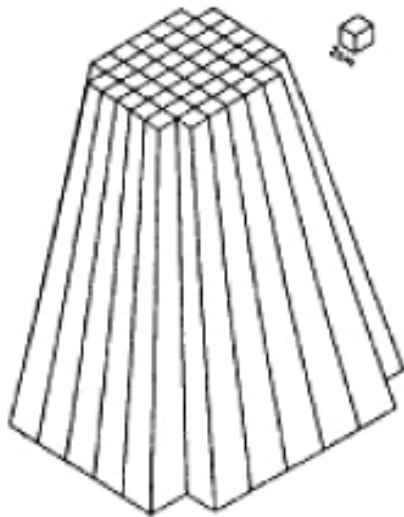
# Выводы из Главы 1

1. Чистые благородные газы обладают уникальной комбинацией детектирующих свойств, позволяя эффективно конвертировать энергию, передаваемую регистрируемым излучением, в световое излучение (сцинтилляцию) и носители заряда (ионизацию).
2. Сцинтилляционное излучение плотных благородных газов и носители электрического заряда могут эффективно собираться из массивных образцов благородных газов, а также переноситься через границу раздела конденсированных и разреженных фаз тяжелых благородных газов и некоторых других неполярных диэлектриков.
3. В разреженных фазах чистых благородных газов возможно эффективное усиление ионизационного сигнала с помощью электролюминесценции вплоть до регистрации отдельных электронов.
4. Разработаны эффективные технологии очистки благородных газов от молекулярных и электроотрицательных примесей, разделения ксенона от криптона ниже уровня 2 ppt, способы охлаждения массивных детекторов на конденсированных благородных газов .

## Глава 2

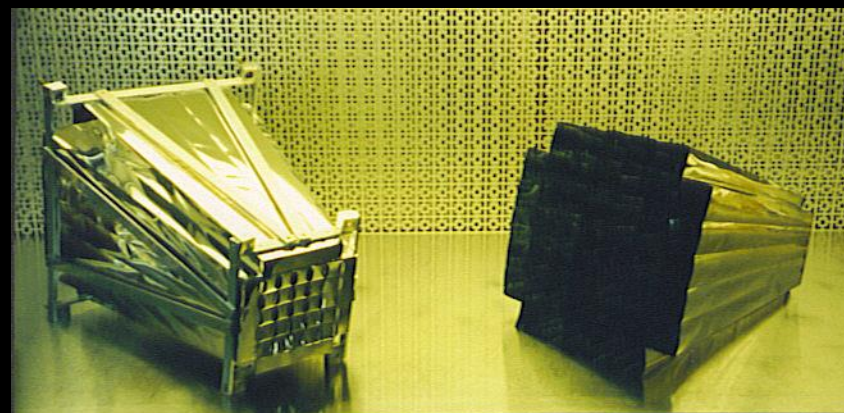
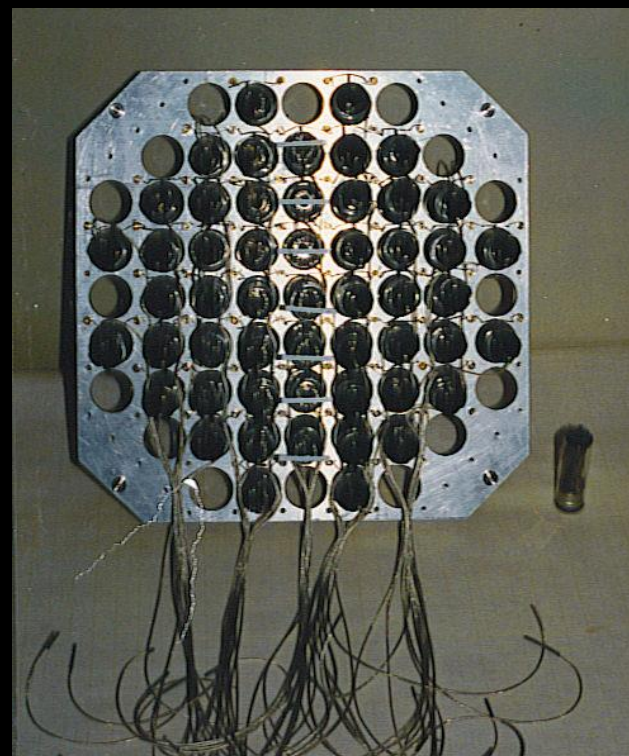
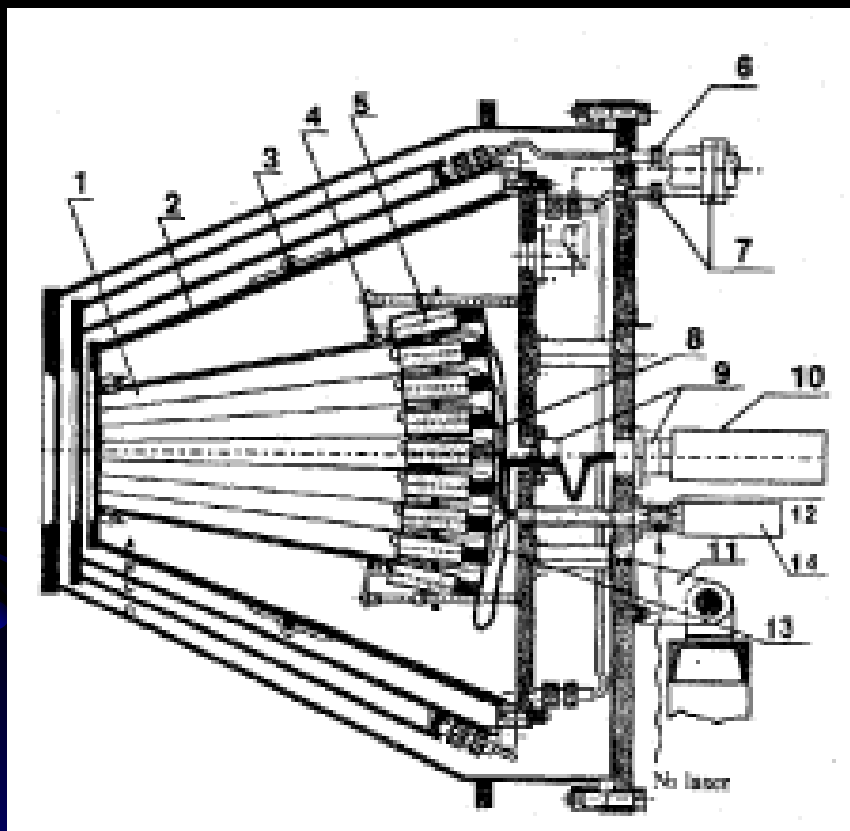
# СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ





# ЛИДЕР – 130 кг LXe ЭМ калориметр

1993-1994



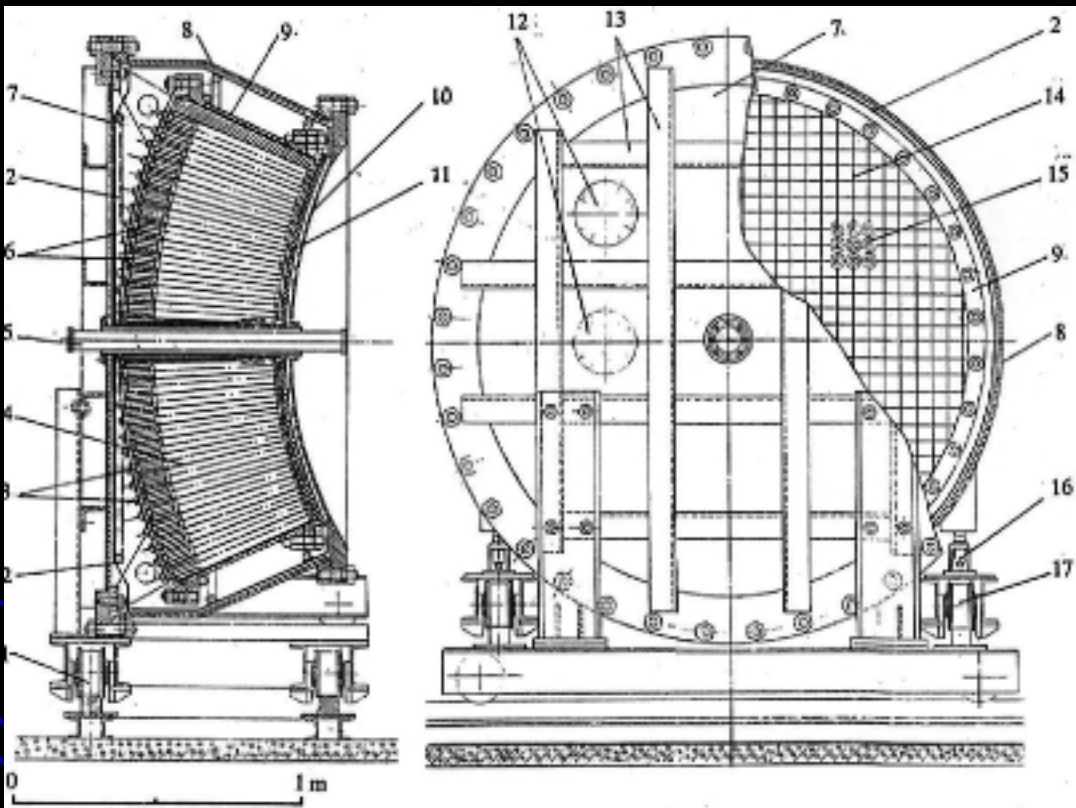
$$\sigma_E/E = 5\% \sqrt{E(\text{GeV})}$$

$$\sigma_X = 7\text{mm}$$

$$\sigma_t = 0.6 \text{ nsec}$$

07.02.2011

# Проект форвард-калориметра KRYPTONWALL для эксперимента WASA на ускорителе CELSIUS



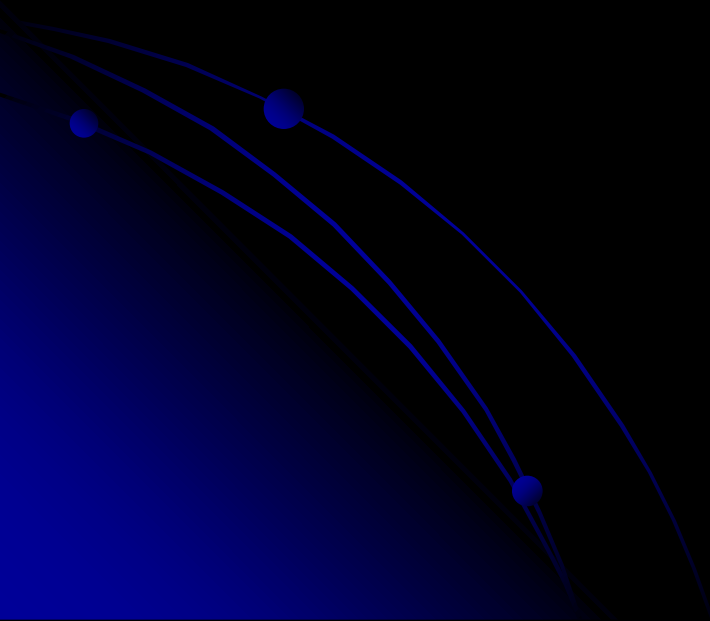
# Выводы из Главы 2

1. Сцинтилляционное излучение чистых благородных газов можно использовать для позиционно-чувствительной регистрации частиц высокой энергии и ядерных реакций с энергосвободными порядками 1 МэВ.
2. Найдено техническое решение создания прецизионного гранулированного сцинтилляционного электромагнитного калориметра для позиционной регистрации ливней с энергиями свыше 100 МэВ.
3. Побочными, но крайне важным результатом этого цикла исследований, была демонстрация того, что
  - (1) Можно использовать фотоумножители со стеклянными корпусами и кремниевые фотодиоды и их сборки в чистых сжатых и жидких тяжелых благородных газах;
  - (2) Можно эффективно собирать сцинтилляционное излучение из массивных (130 кг) образцов ксенона и детекторов метровых размеров;
  - (3) Разработанные методы очистки позволяют создавать массивные сцинтилляционные детекторы на сжиженном ксеноне и криптона и их смесях.

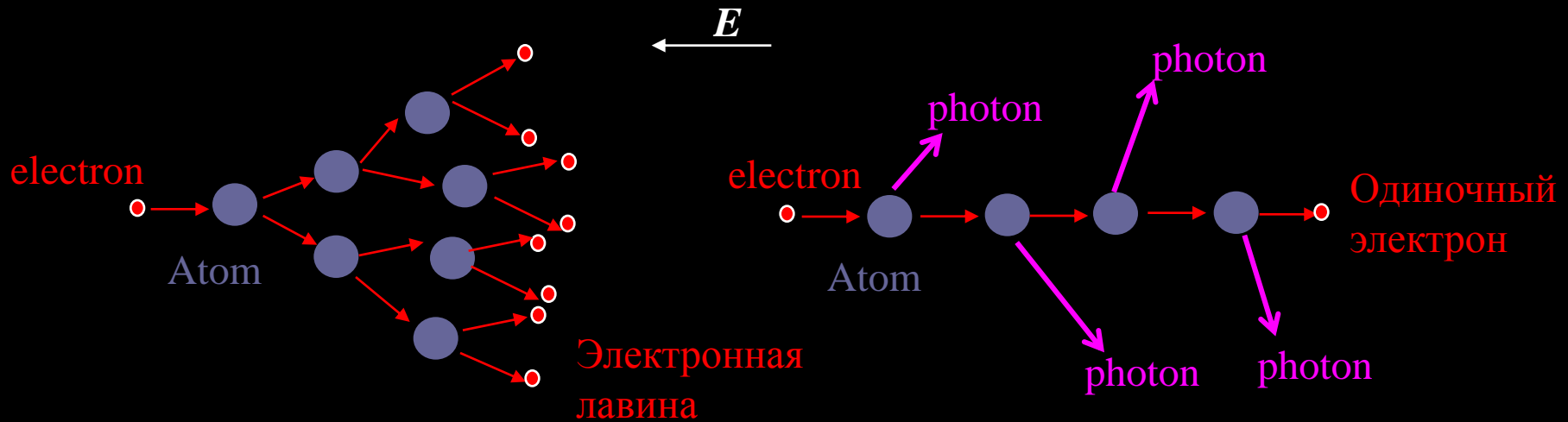


## Глава 3

# ЭЛЕКТРО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ



# Сравнение электролюминесценции и газового усиления



Газовое Усиление

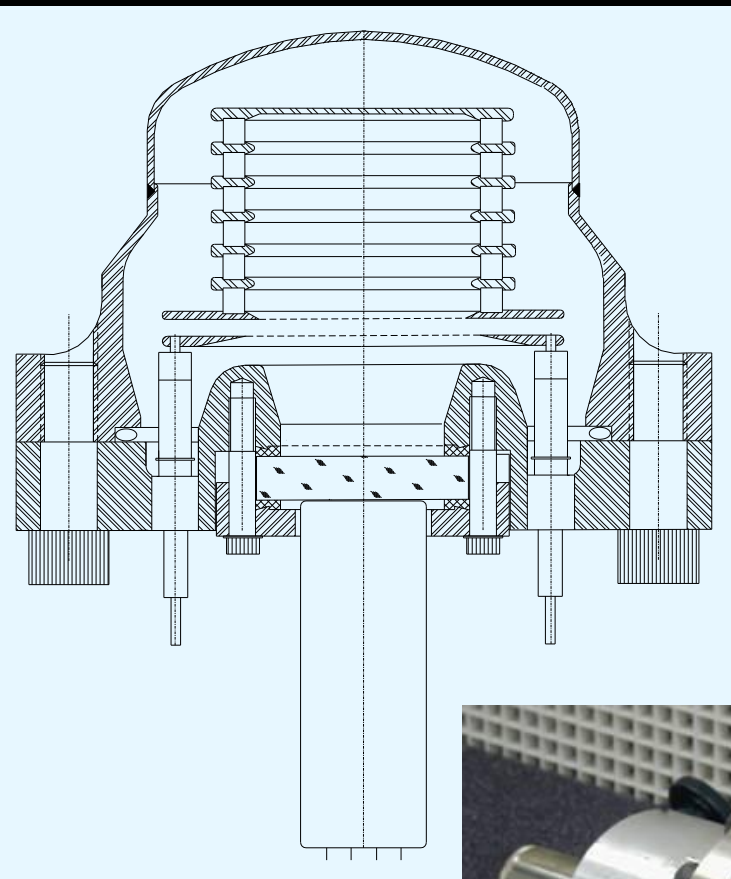
Электролюминесценция

В однородном электрическом поле  $E=V/d$

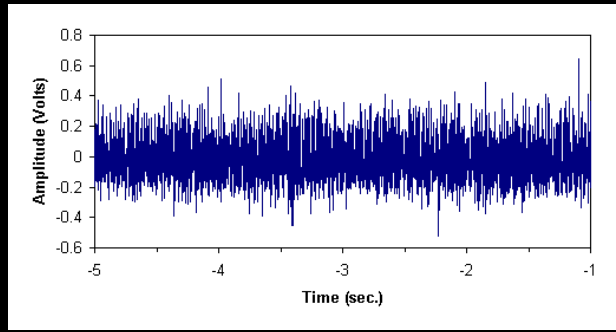
$$N_e = N_o \exp(\alpha x), \quad \alpha = \alpha(E)$$

$$N_{ph} = 70 N_o (E/p - 1.0) pd \sim N_o V$$

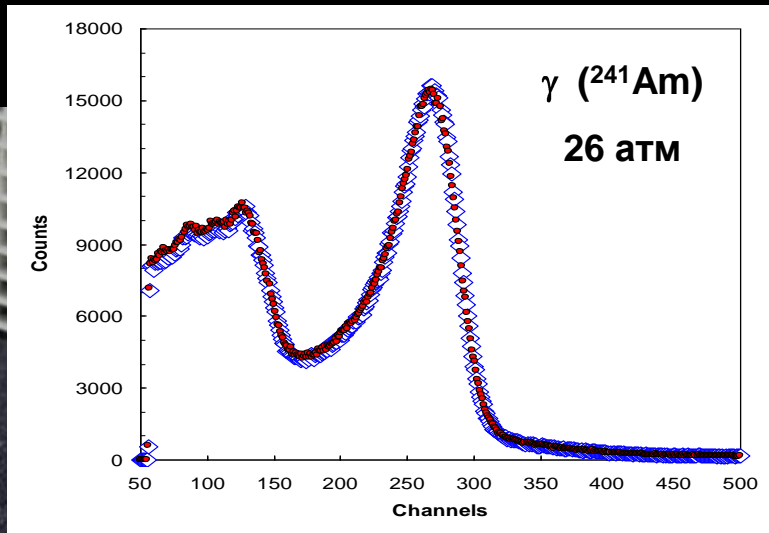
# Рекордная виброустойчивость



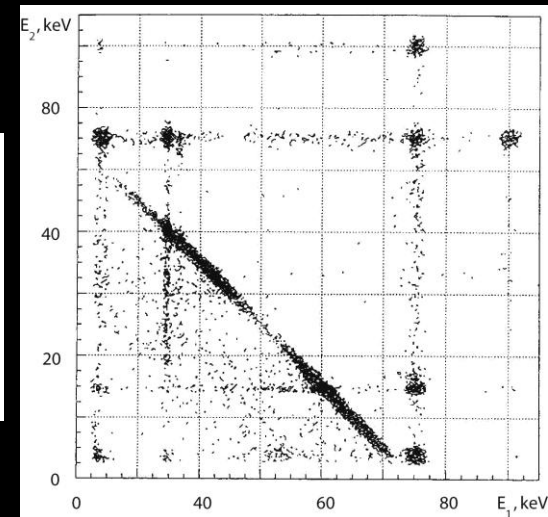
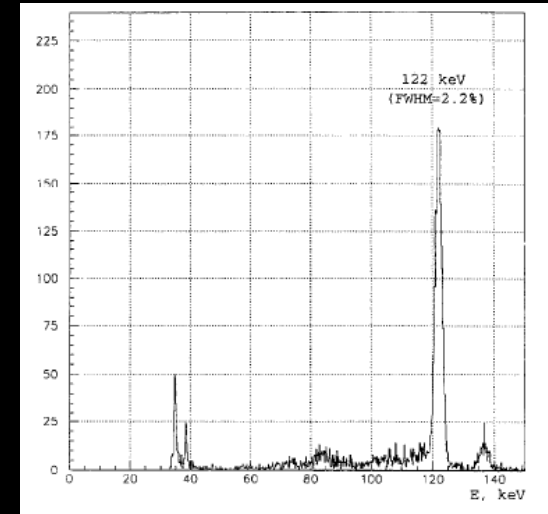
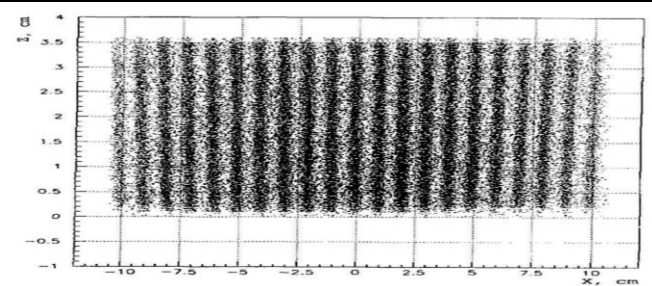
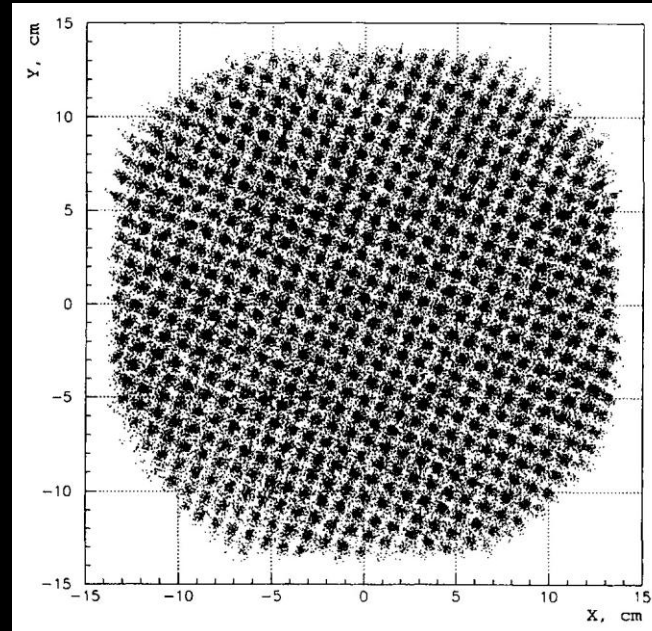
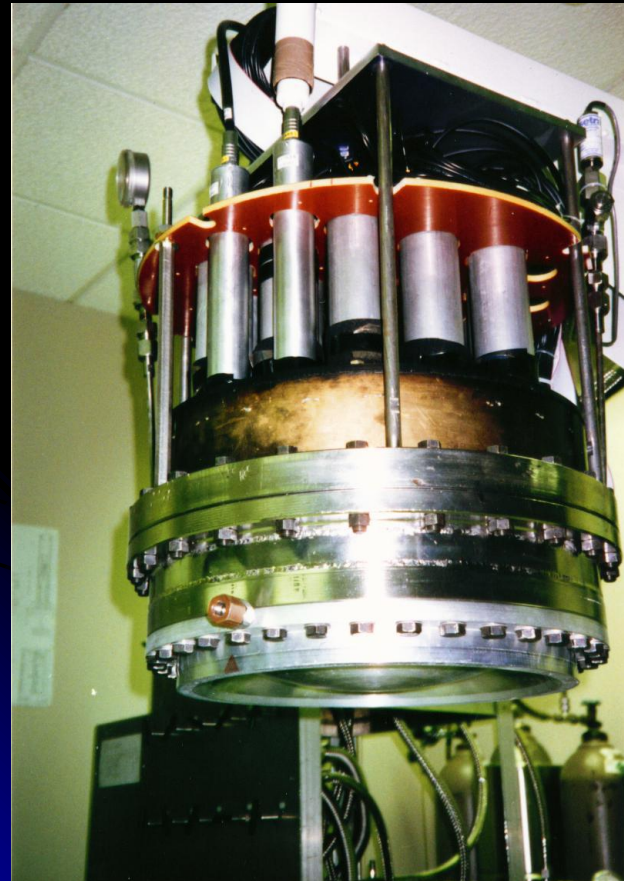
Vibration  
Waveform



◇ Off  
● On



# 1994-95 3D электролюминесцентная гамма камера на сжатом ксеноне



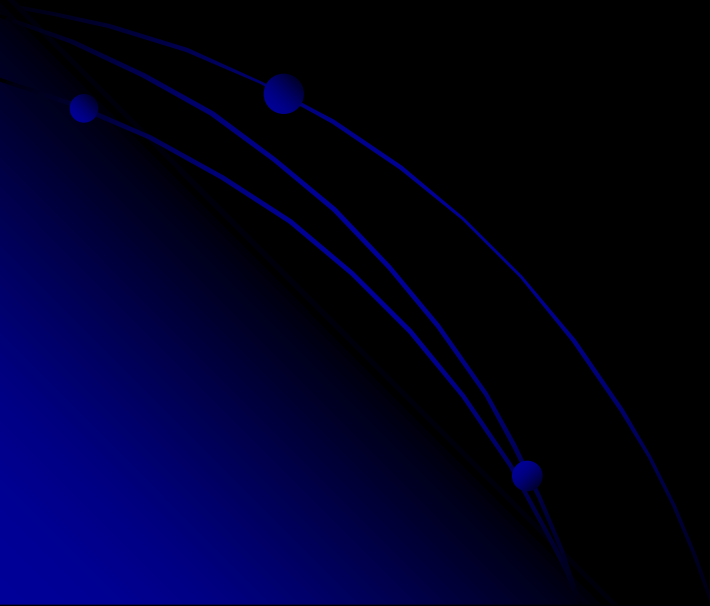
07.02.2011

# Выводы из Главы 3

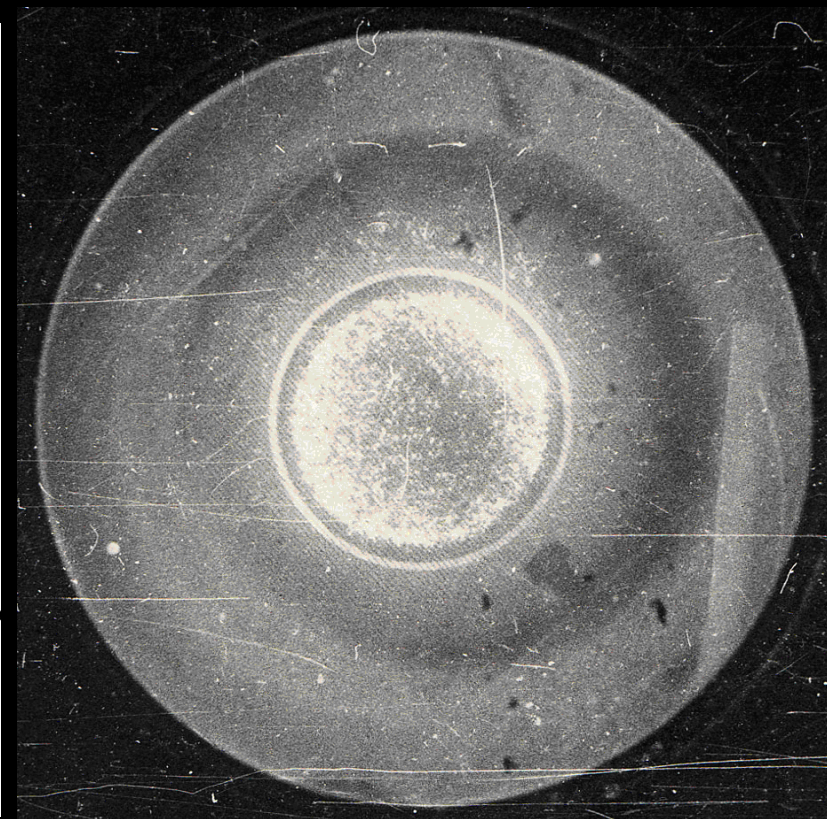
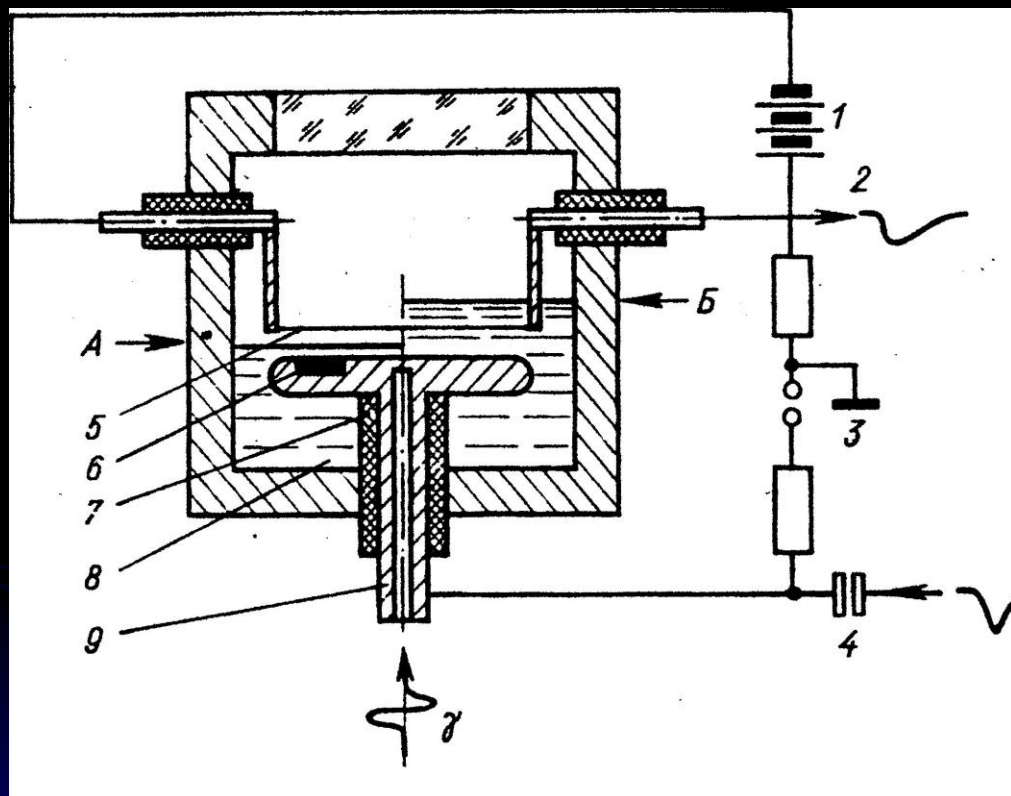
1. Методические исследования электролюминесцентных детекторов подтвердили их чрезвычайную устойчивость к внешним неблагоприятным факторам таким, как вибрация.
2. Показано, что электролюминесценция чистых благородных газов способна обеспечить эффективное усиления ионизационного сигнала, а благодаря линейности «светового усиления», в электролюминесцентных детекторах достигается хорошее энергетическое разрешение в области кэВ-ных энергий.
3. Электролюминесцентные детекторы, оснащенные многоканальными фотоприемниками, обеспечивают хорошую позиционную чувствительность (порядка 1-3 мм) при умеренном числе каналов считывания (порядка 1 канала на 10 см<sup>2</sup> области позиционной чувствительности).
4. Технология считывания сигналов с электролюминесцентных детекторов органично сочетается с регистрацией сцинтилляций.

## Глава 4

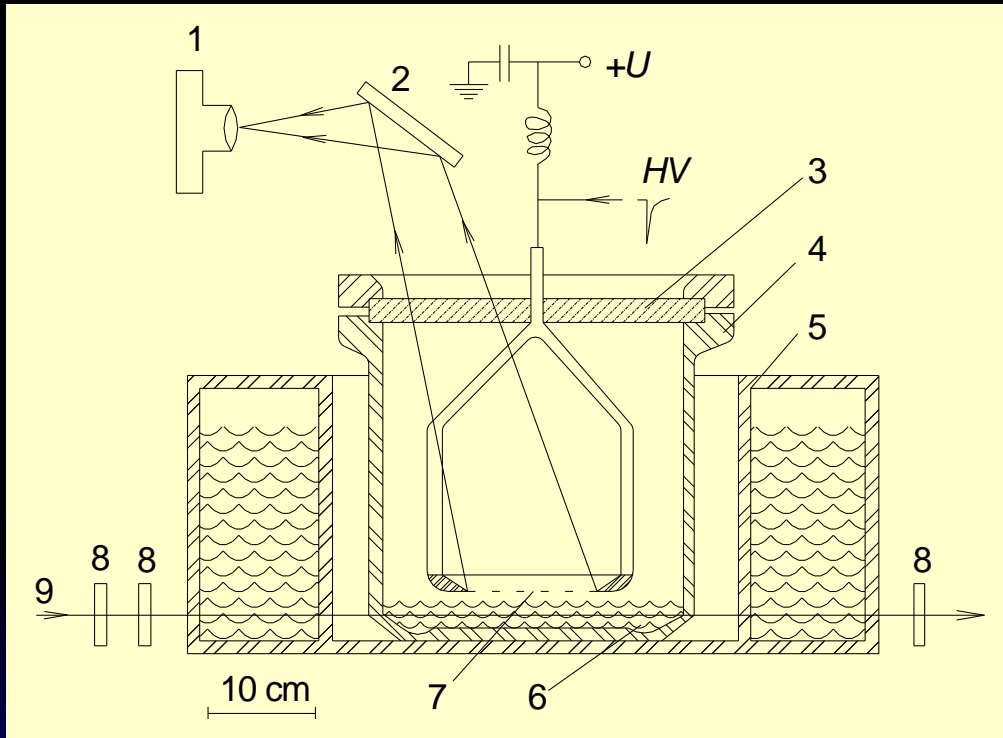
# ЭМИССИОННЫЕ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ



# 1970-73 Эмиссионная искровая камера



# 1977 Эмиссионная стримерная камера





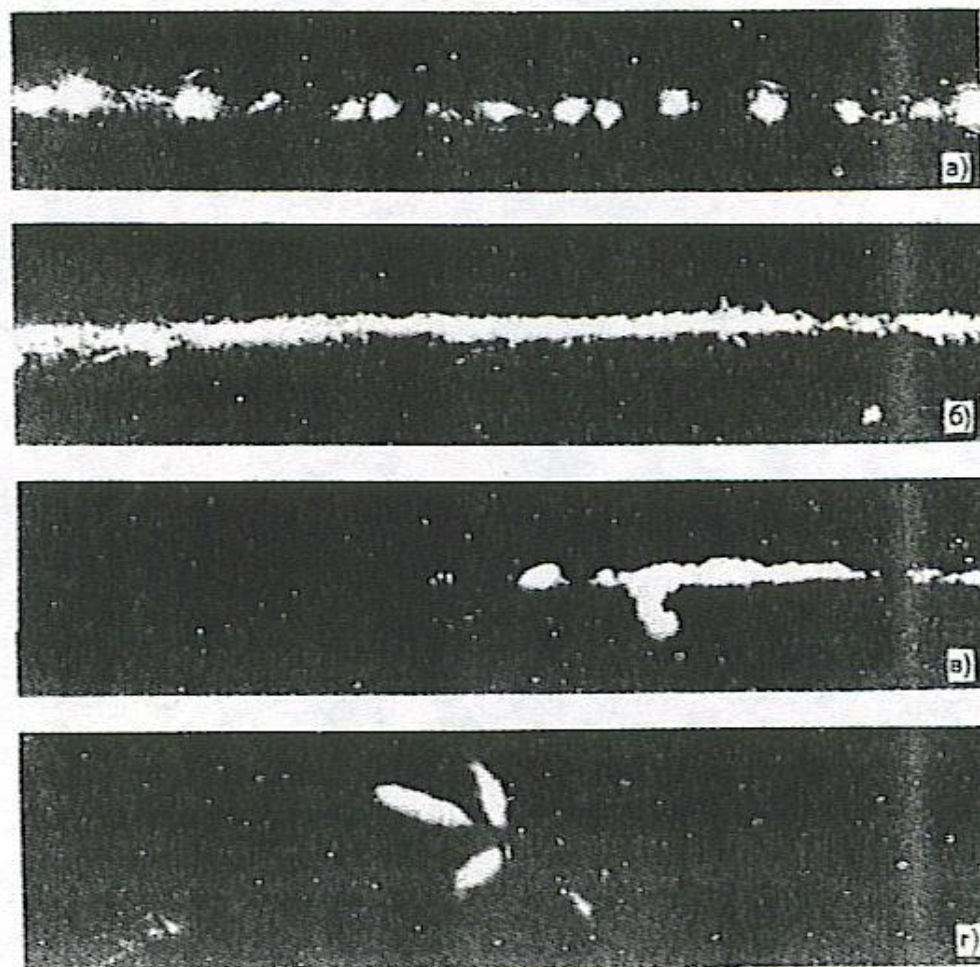
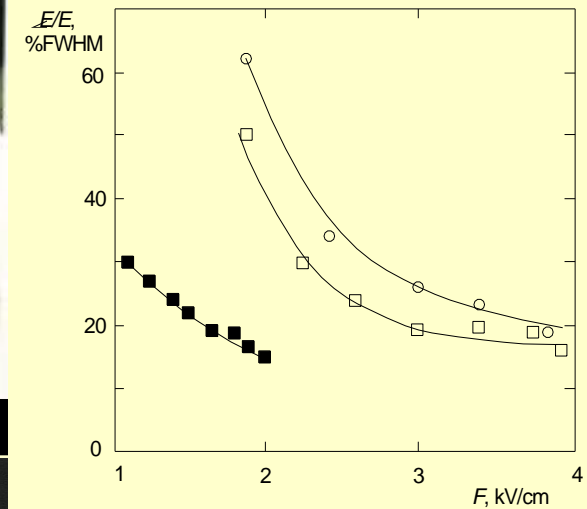
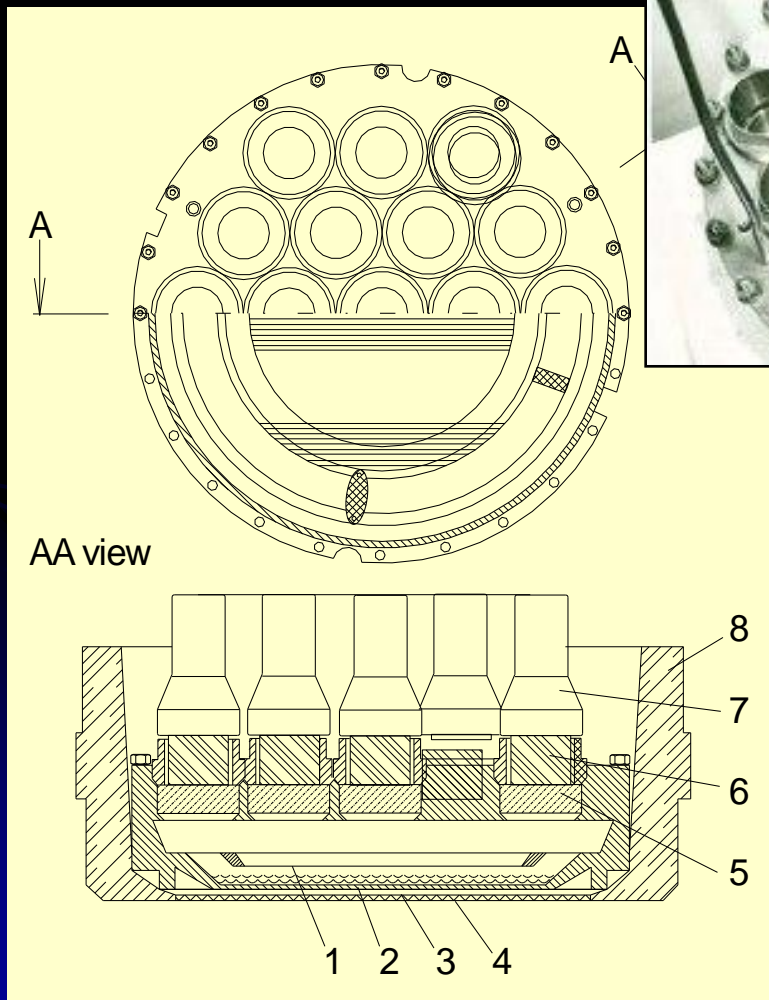


Рис. 6.7. Фотографии треков частиц в эмиссионной стримерной камере (а – частица прошла через газовую фазу над твердым криптоном; б–г – частицы прошли через твердый криптон). Температура 78 К, постоянное поле 1,5 кВ/см, импульсное поле амплитудой 2–5 кВ/см и длительностью 60 нс. Съемка производилась с расстояния 1,5 м фотокамерой "Зенит-В" с объективом "Юпитер-9" на аэрофотопленку типа 29



# 1983 Эмиссионная электролюминесцентная гамма камера

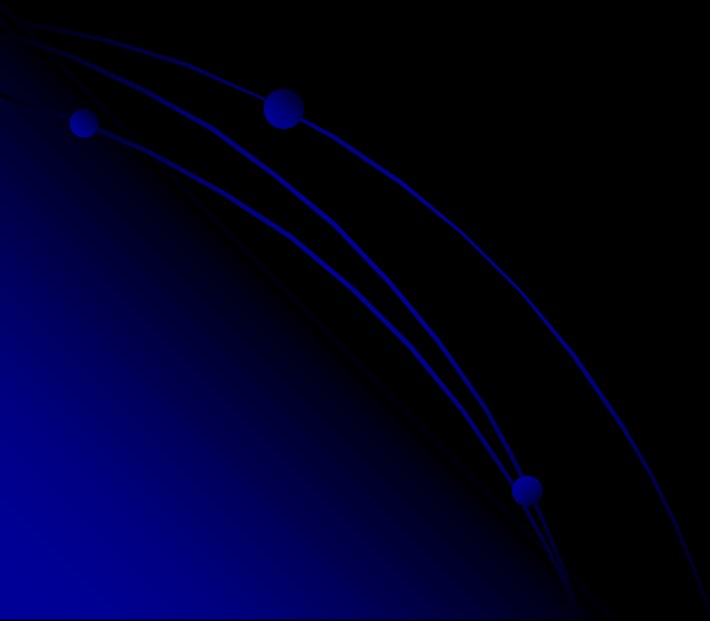


# Выводы из Главы 4

1. Эмиссионные детекторы обладают совокупностью детектирующих свойств, которые делают их уникальным инструментом экспериментальной ядерной физики: сочетание конденсированной рабочей среды с газовой фазой, где возможно усиление ионизационного сигнала вплоть до регистрации отдельных электронов.
2. Первые опыты показали, что эмиссионные детекторы могут использоваться для поиска частиц с аномально низкой ионизирующей способностью.
3. Методические исследования электролюминесцентных эмиссионных детекторов показали возможность сочетания достоинств эмиссионного детектора и электролюминесцентной камеры в одном приборе.

## Глава 5

# ЖИДКОСТНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ С ТРЕХМЕРНОЙ ПОЗИЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ



# 1995 ЭМИССИОННЫЙ ДЕТЕКТОР «БЕЗ СТЕНОК»

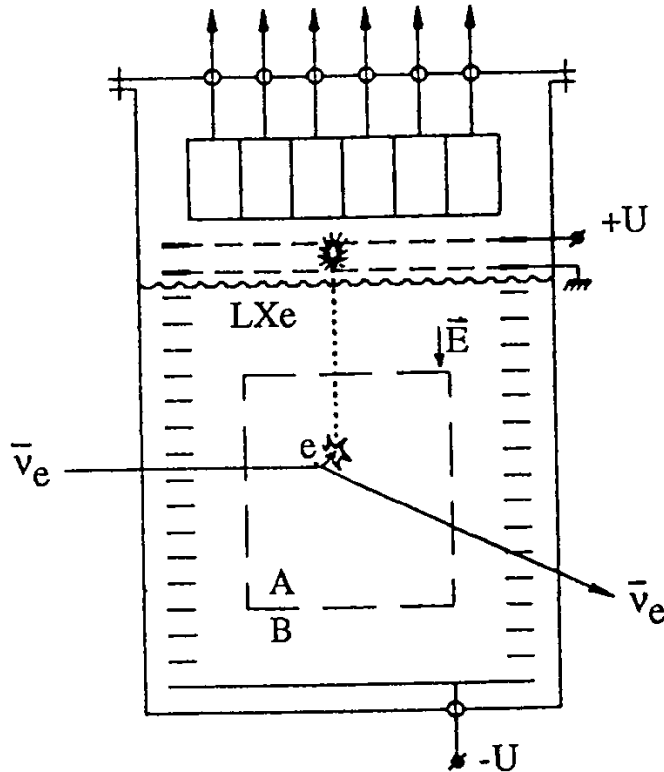


Fig.4. LXe time-projection scintillating drift chamber as wall-less detector for measurements of magnetic momentum neutrino.

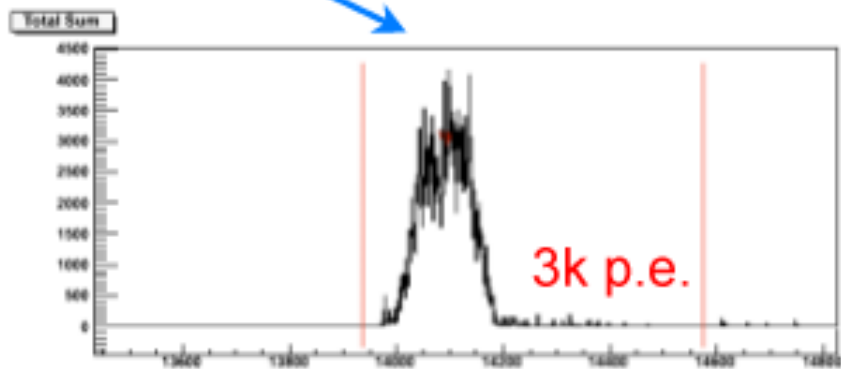
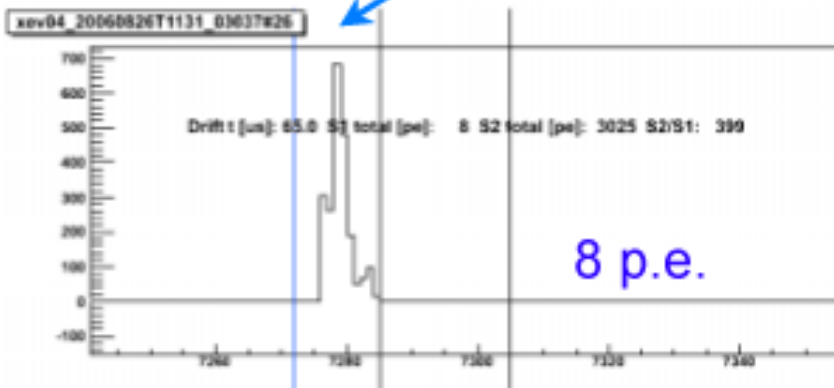
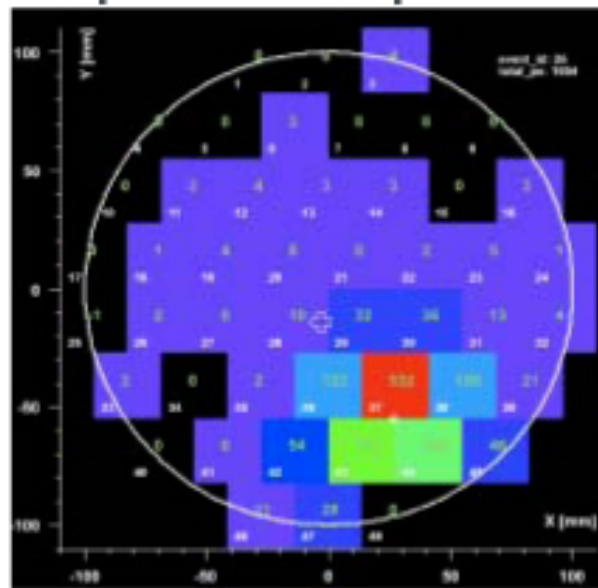
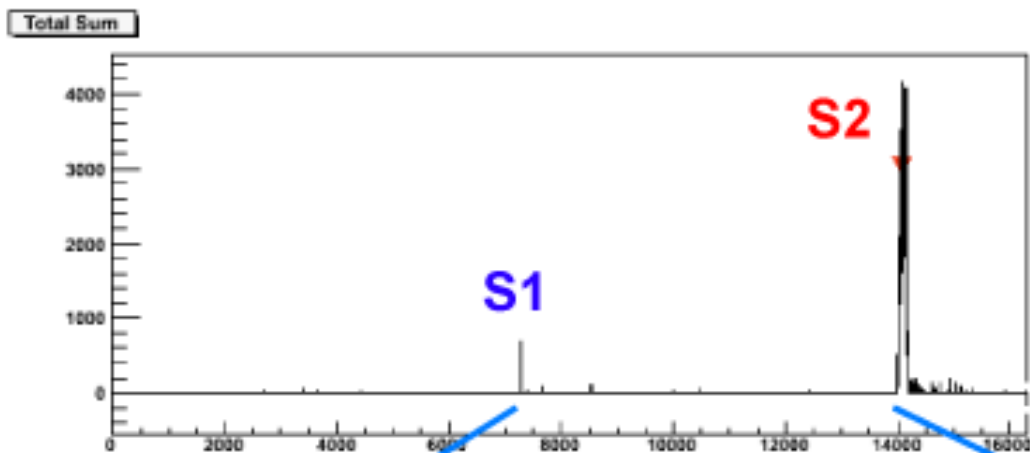
- Одно-электронная чувствительность
- Два сигнала: ионизация и возбуждение атома
- «Самозранировка»
- Большая масса

# WIMP Signals in a Dual-Phase Xenon Detector



4 keV<sub>ee</sub> event; S1: 8 p.e  $\Rightarrow$  2 p.e./keV

Hit pattern of top PMTs

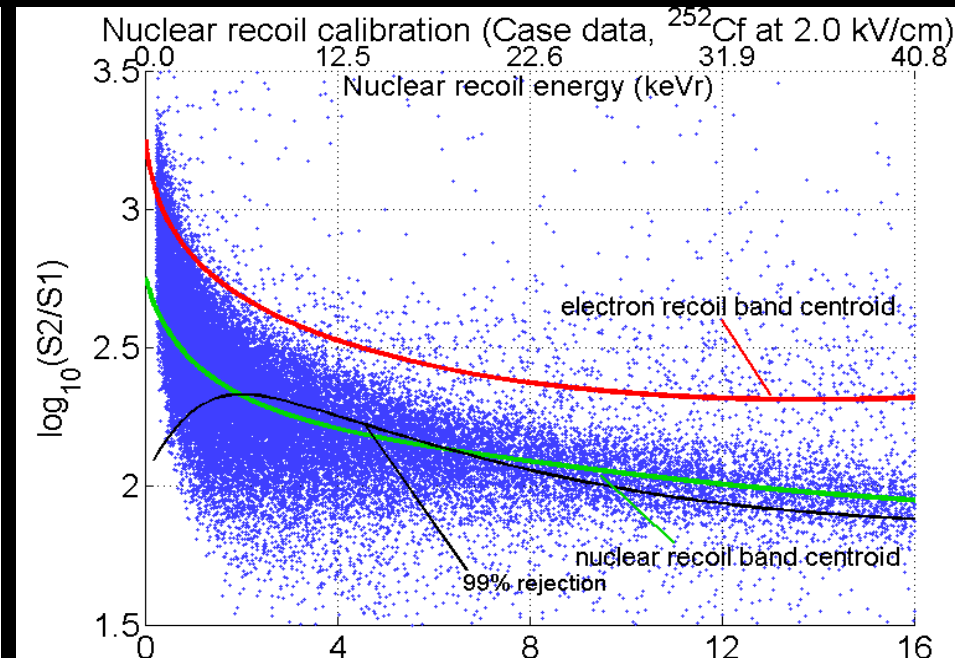
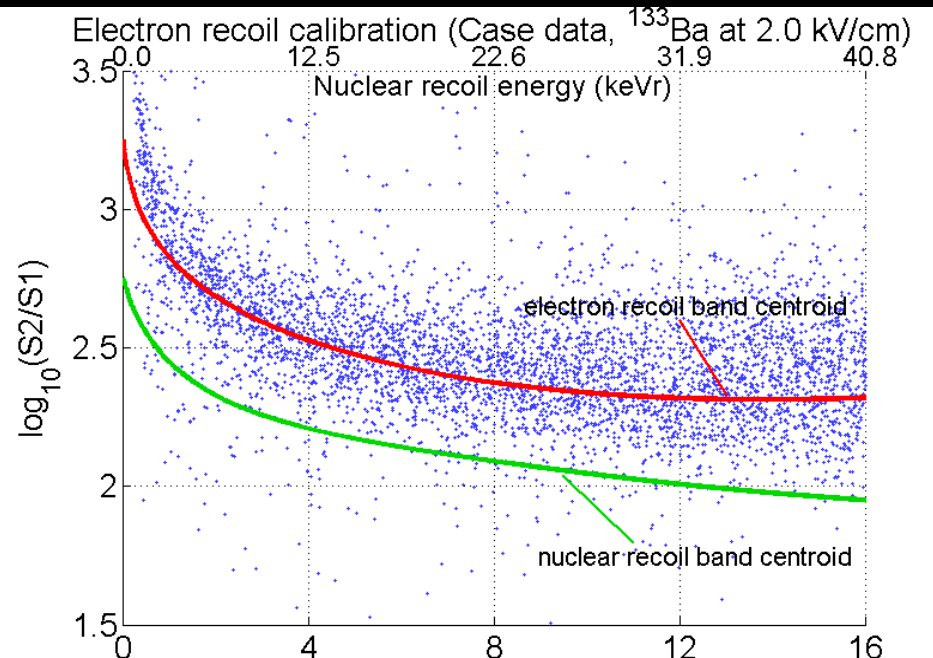




# Разделение сигналов от гамма-квантов и нейтронов

## Электроны от $^{133}\text{Ba}$

## Нейтроны от $^{252}\text{Cf}$

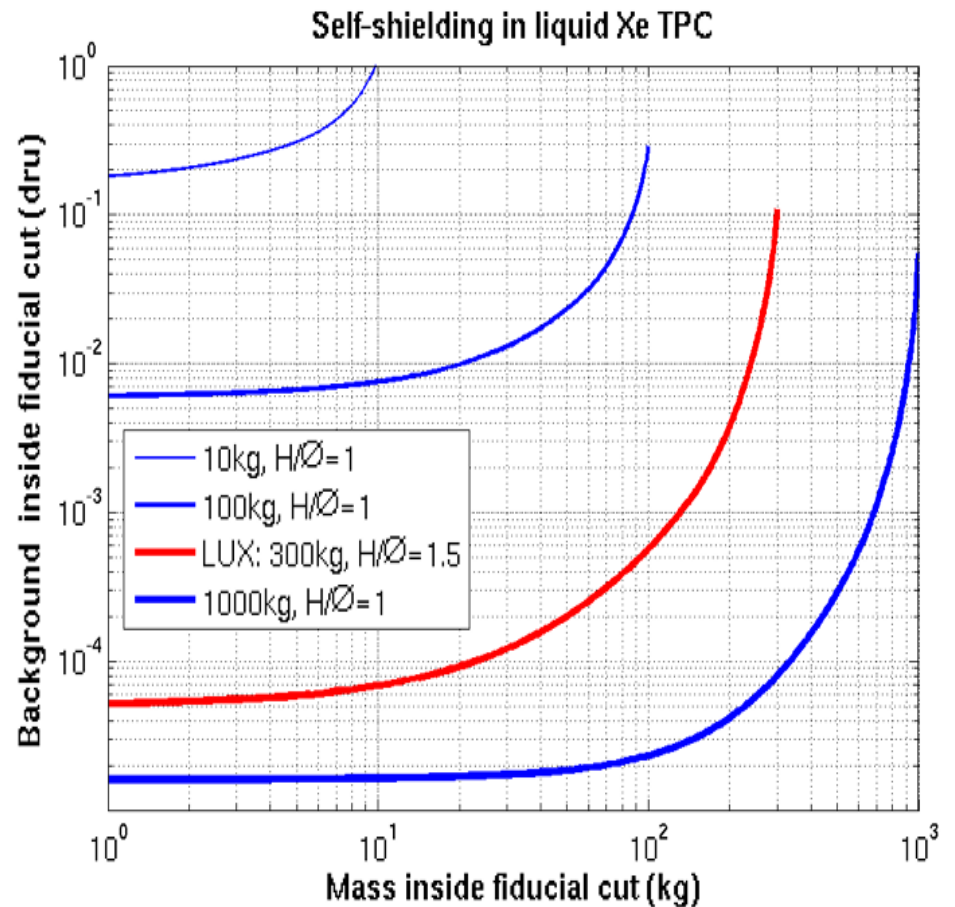
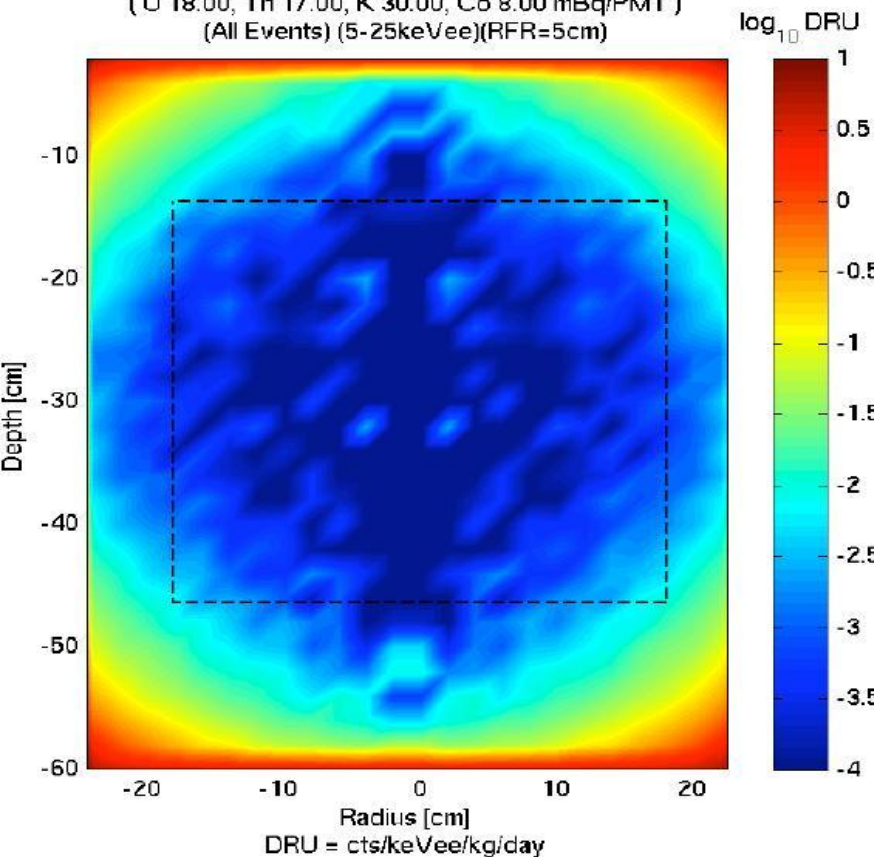


Энерговыведение (кэВ эквивалентной энергии)

Measurements above ground

# Эффект самоэкранировки

LUX300v4\_R8778H - TopPMTs, BotPMTs  
(U 18.00, Th 17.00, K 30.00, Co 8.00 mBq/PMT)  
(All Events) (5-25keVee)(RFR=5cm)

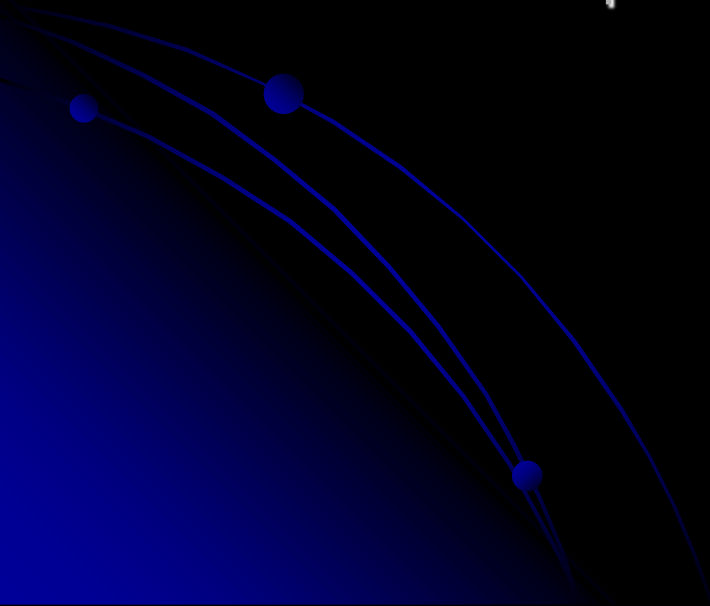


# Выводы из Главы 5

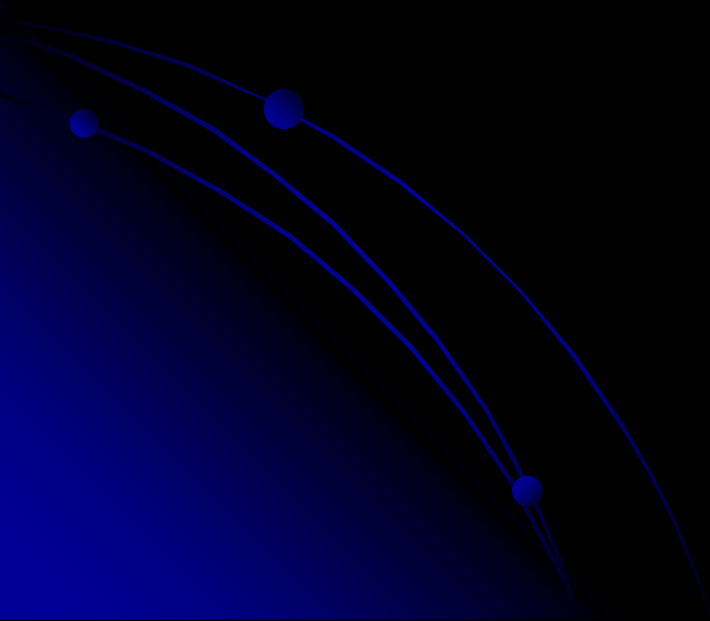
1. **Успешное развитие технологий быстрых сцинтилляционных детекторов, высокочувствительных к ионизации электролюминесцентных детекторов и эмиссионных детекторов, привело к пониманию того, что все эти подходы могут быть объединены в новом классе детекторов – рекордных по чувствительности к редким и слабоионизирующим частицам детекторам «без стенок».**
2. **Для достаточно больших и массивных детекторов объем сверхчистого вещества детектора  $V$ , окружающего чувствительный объем  $A$ , может играть роль защиты от радиоактивного излучения окружающих материалов. В режиме активной защиты слой  $V$  используется для отсева событий в объеме  $A$ , коррелированных по времени с событиями в объеме  $V$ . Это позволяет исключать события, произошедшие в результате многократных рассеяний фоновых частиц.**
3. **Дополнительным мощным методом отсева фоновых событий служит идентификация природы взаимодействия по соотношению долей энергии, затраченных на ионизацию и возбуждение рабочей среды детектора.**

## Глава 6

# РЕГИСТРАЦИЯ СЛАБОИОНИЗИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ ДЕТЕКТОРОВ С ТРЕХ-МЕРНОЙ ПОЗИЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ



# Регистрация WIMP



Плотность частиц холодного  
темного вещества на Земле:

$$\rho \sim 300 \frac{m_{\text{proton}}}{\text{liter}}$$

$$m_{\text{wimp}} \sim 100 m_{\text{proton.}}$$

**3 WIMPS / liter !**

Typical orbital velocity:

$$v \approx 230 \text{ km/s}$$

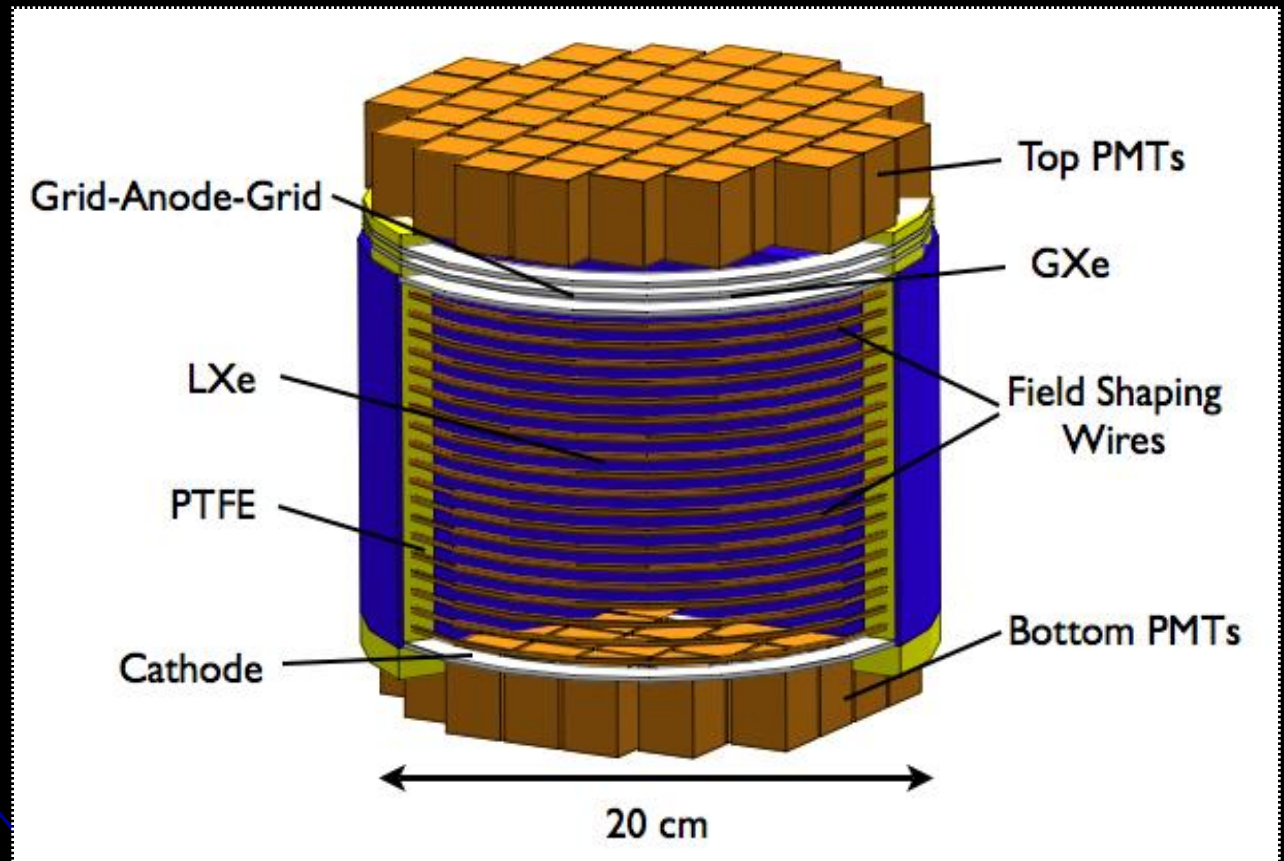
Coherent scalar interactions:  $A^2$

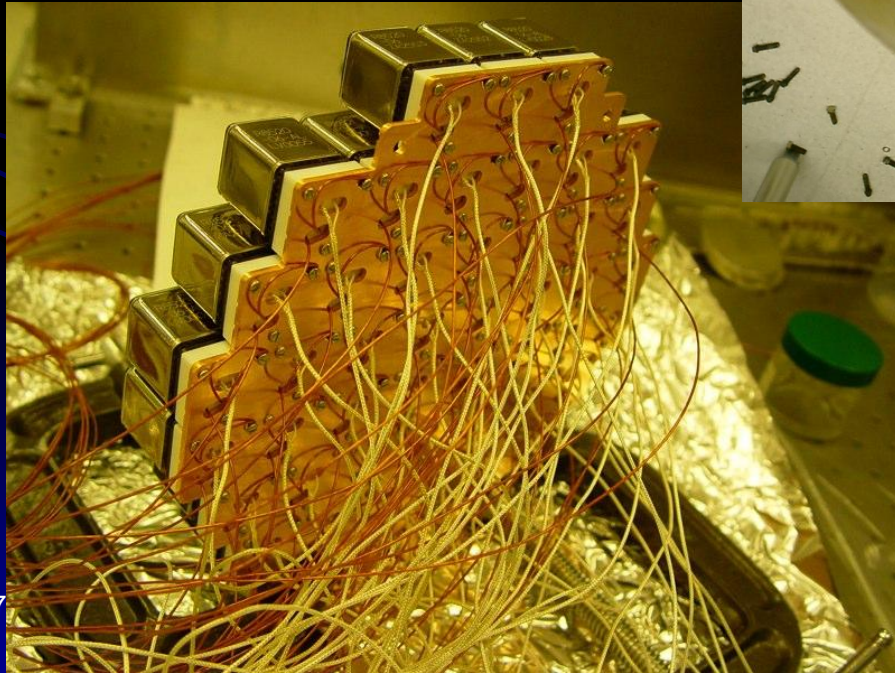
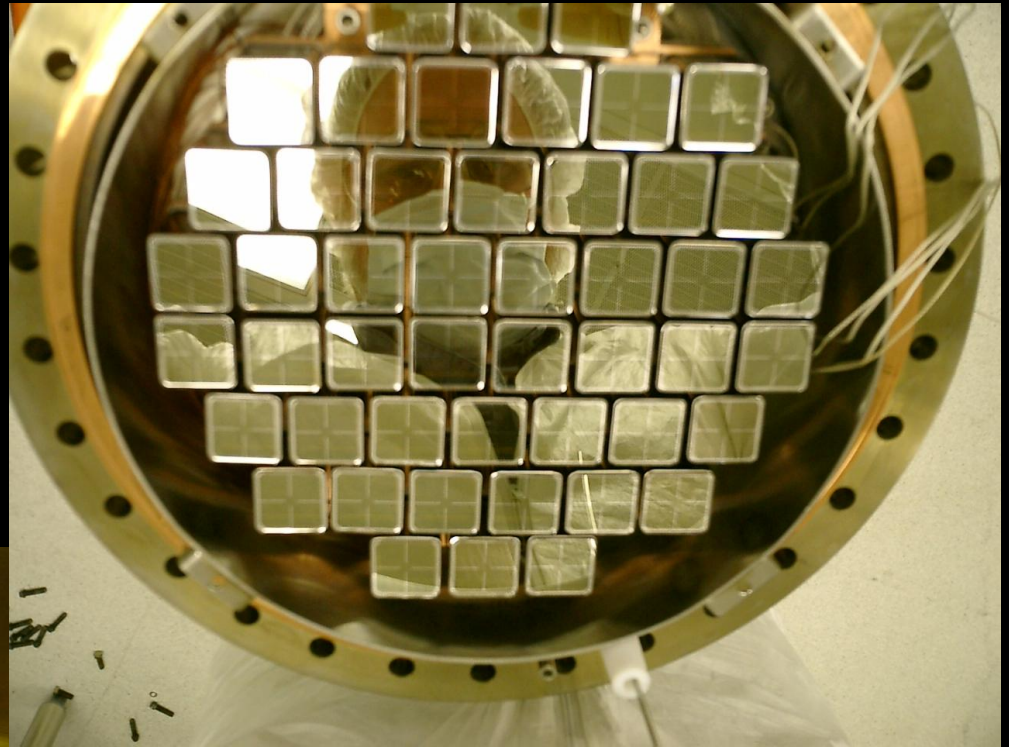


**Скорость счета:**

**< 0.06 события/кг/день**

# 2004-2007 XENON-10

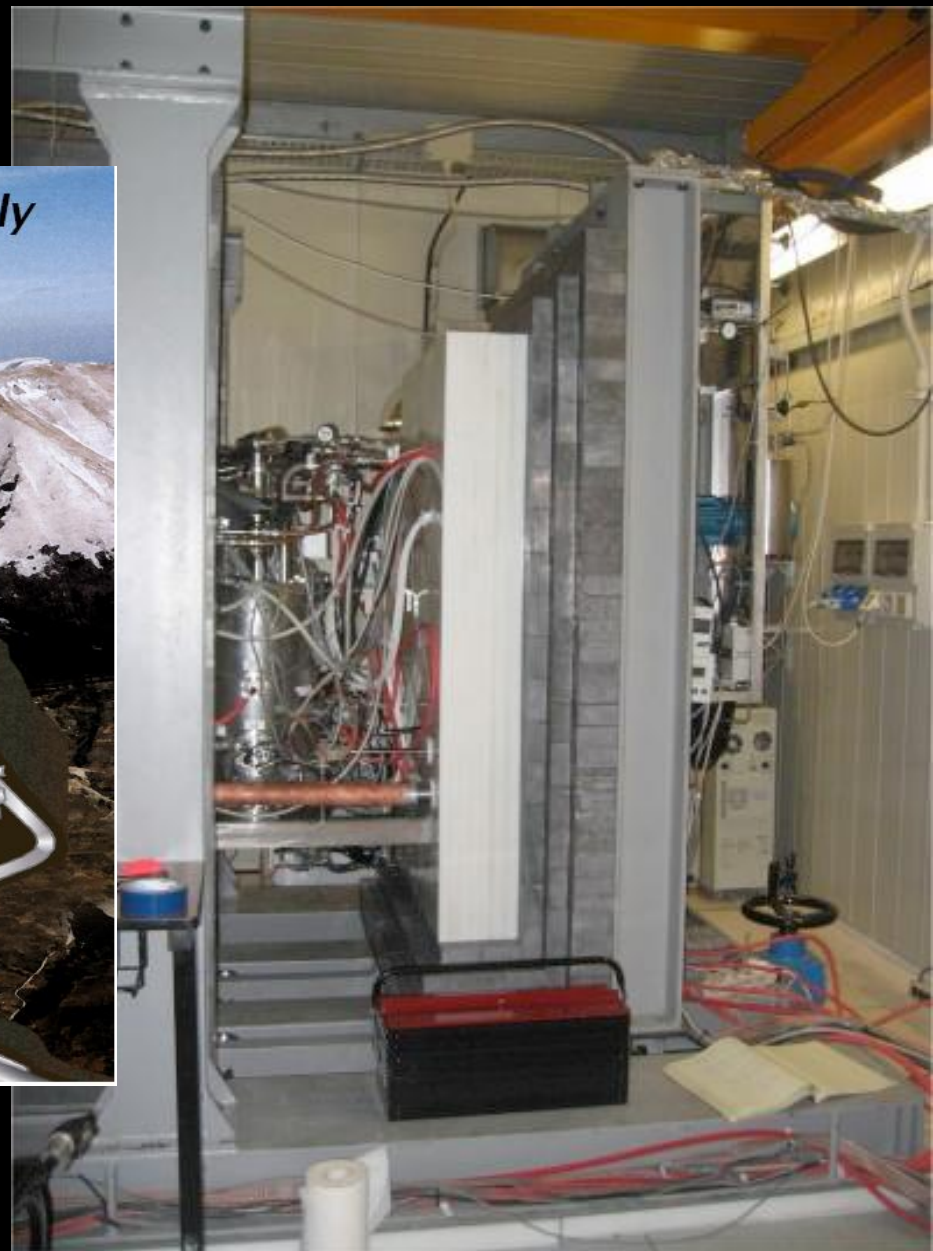
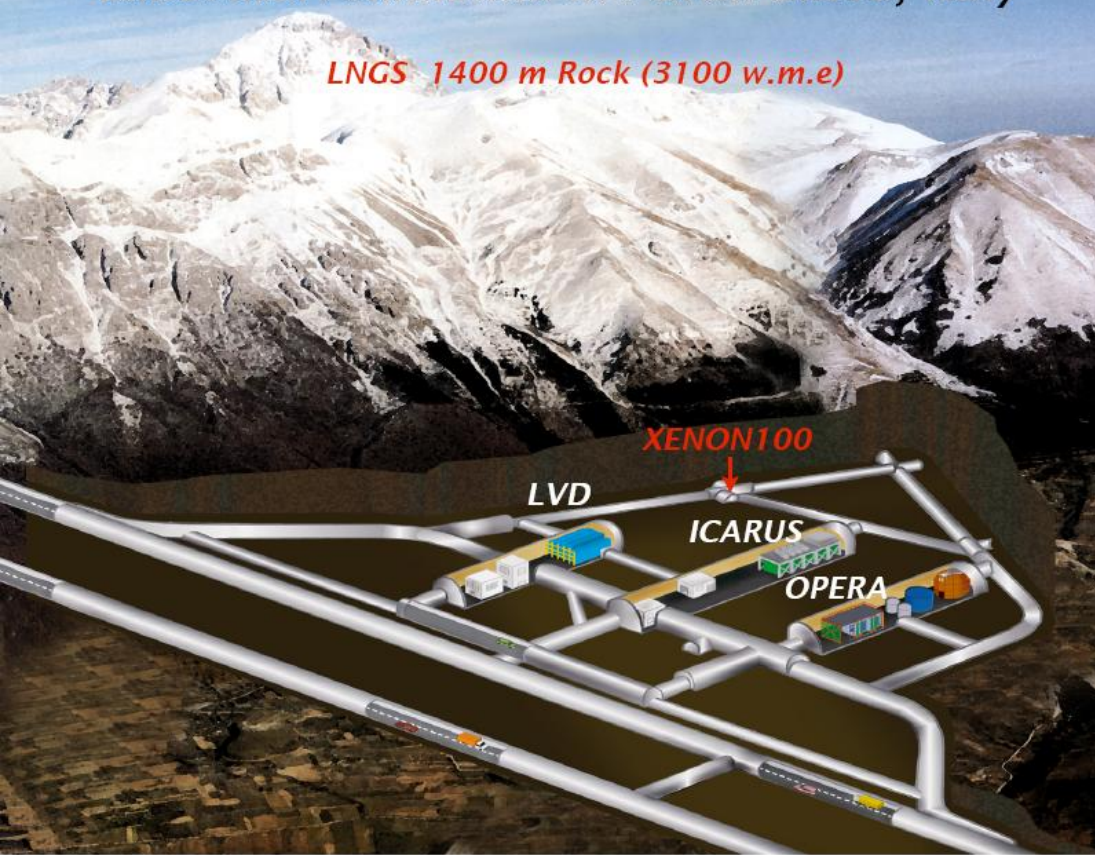


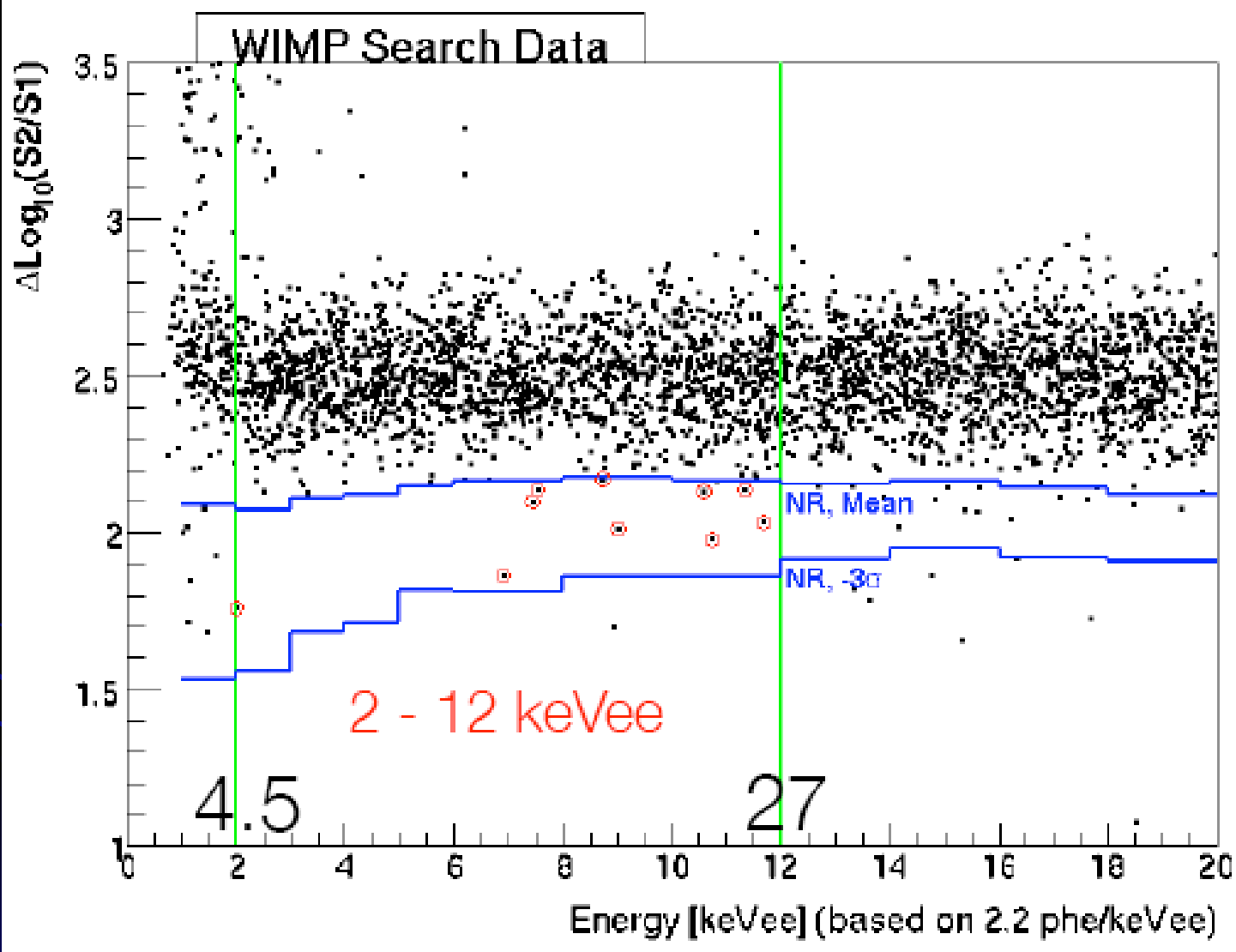




# Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Italy

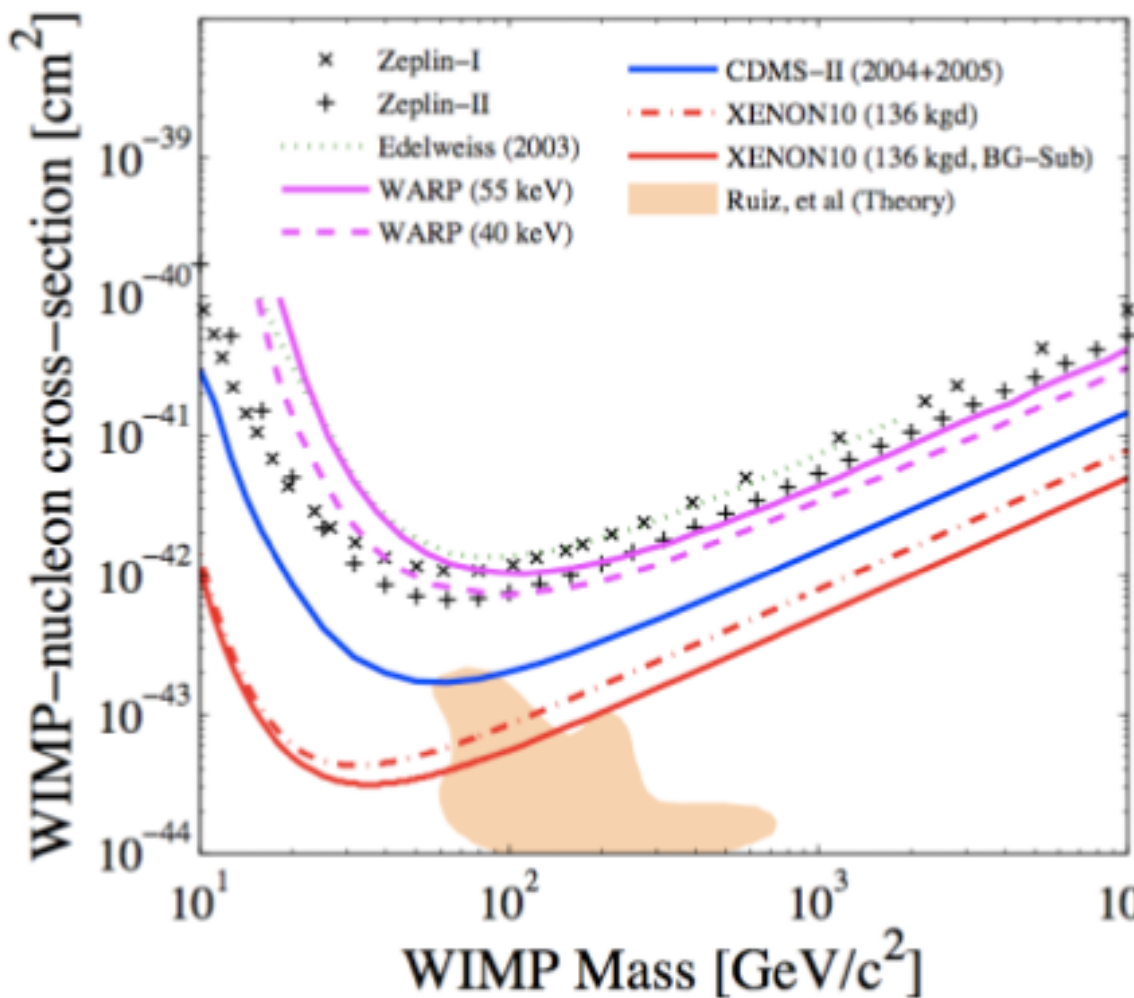
LNGS 1400 m Rock (3100 w.m.e)



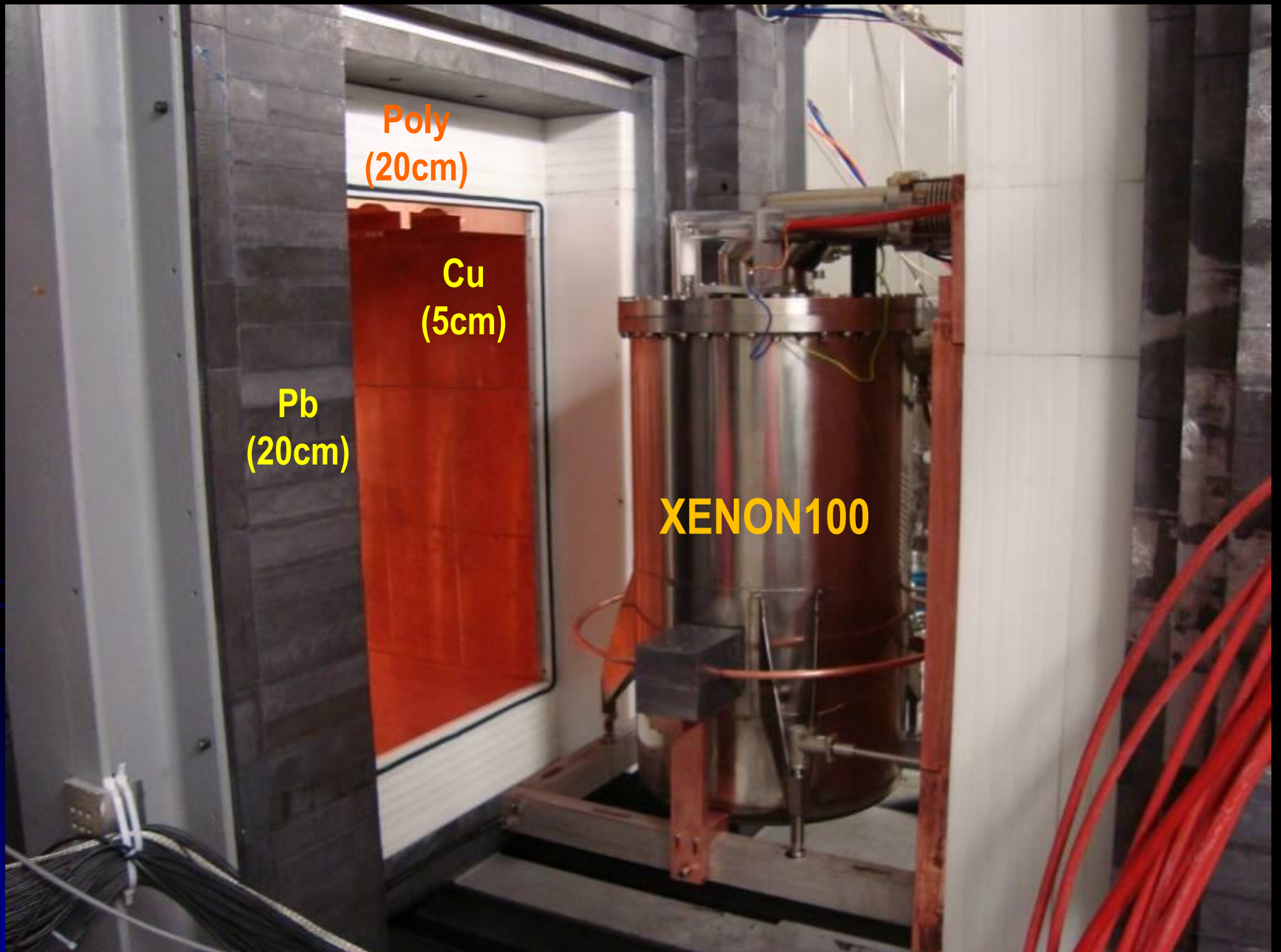


# 2007 Рекорд эмиссионного детектора XENON-10

## Spin-Independent Exclusion Limits (90% C.L.)



- Upper limits on the WIMP- nucleon cross section derived with Yellin Maximal Gap Method (PRD 66 (2002))
- For a WIMP of mass 100 GeV/c<sup>2</sup>
  - 9.0 × 10<sup>-44</sup> cm<sup>2</sup> Max Gap (4.5-15.5keVr)
  - 5.5 × 10<sup>-44</sup> cm<sup>2</sup> including known Back
- Factor of 6 below best previous limit
- **XENON10** is now the first experiment to probe a significant part of the theoretically predicted cross section for neutralinos
- With a phased approach towards ton scale, XENON aims at maximizing discovery potential at every phase



Poly  
(20cm)

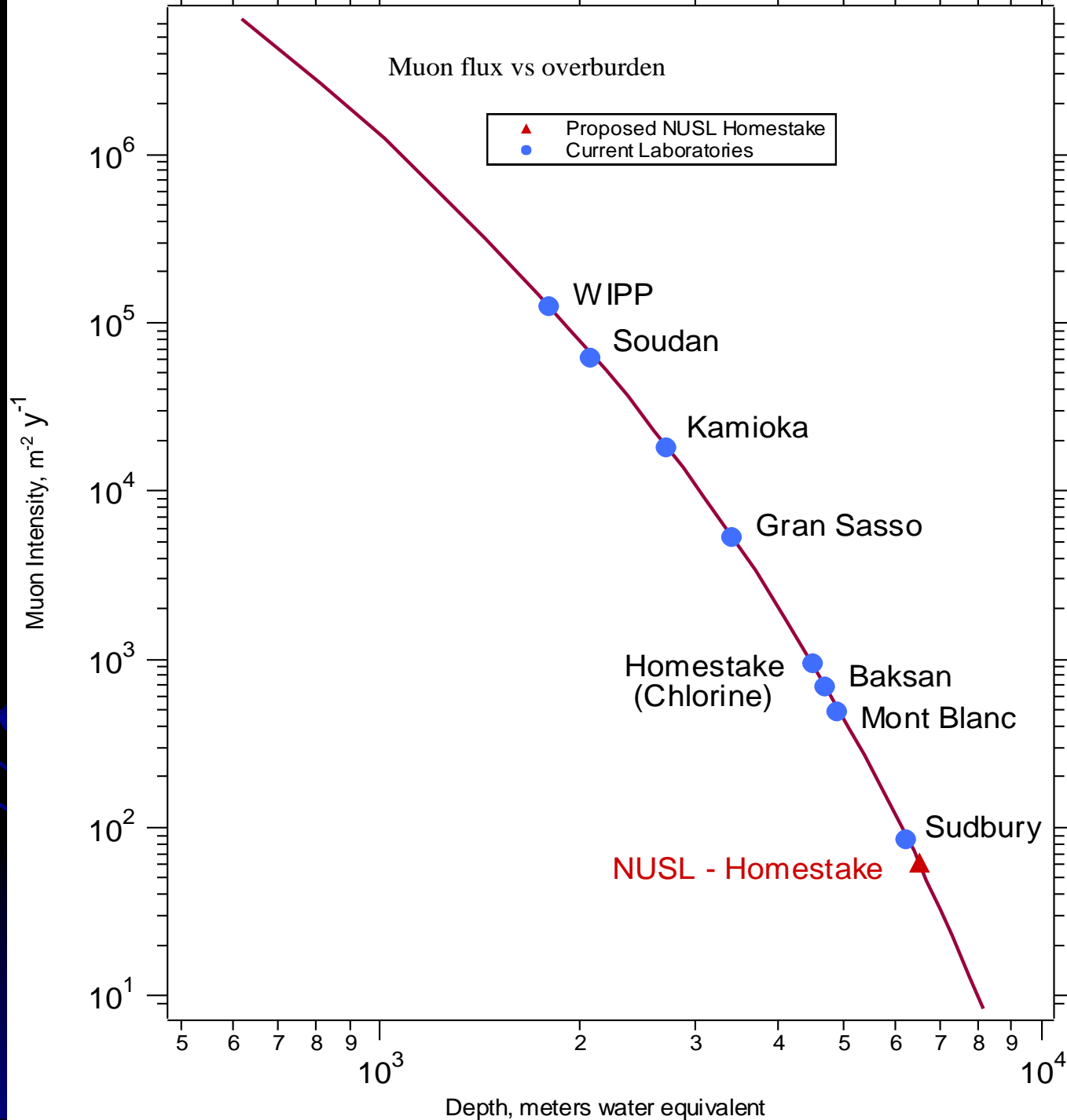
Cu  
(5cm)

Pb  
(20cm)

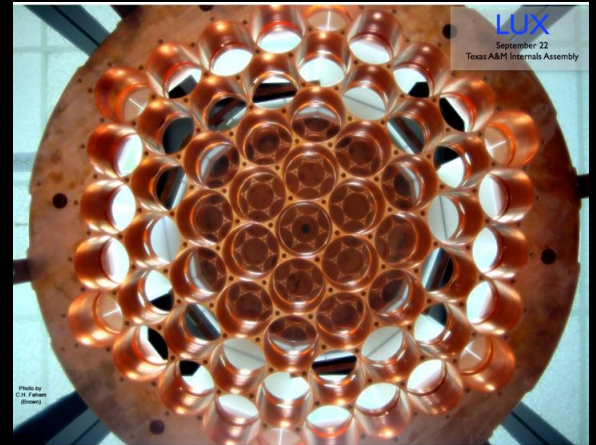
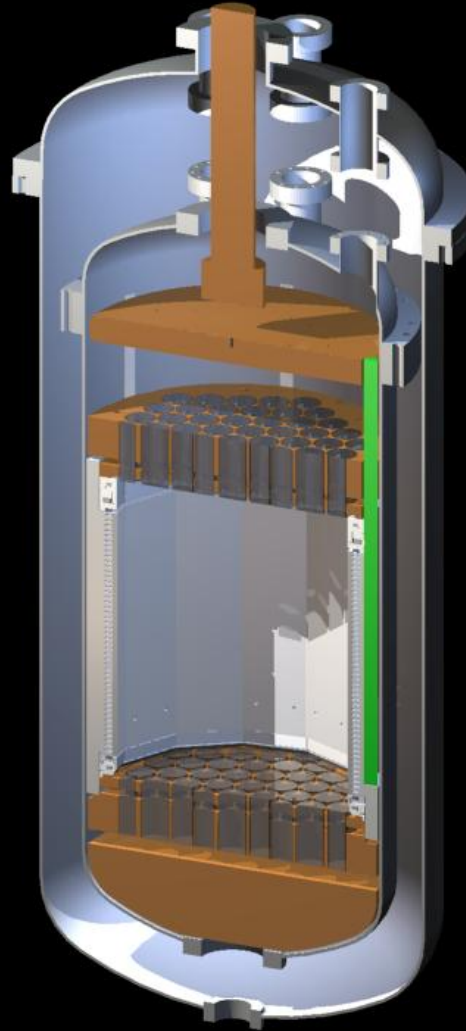
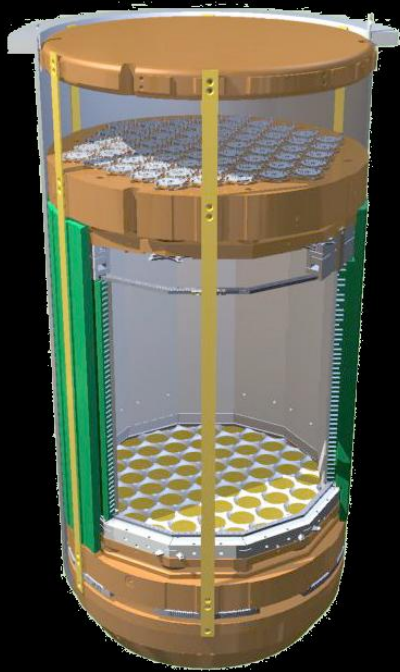
XENON100



LUX Collaboration Meeting  
March 2009, Lead, SD



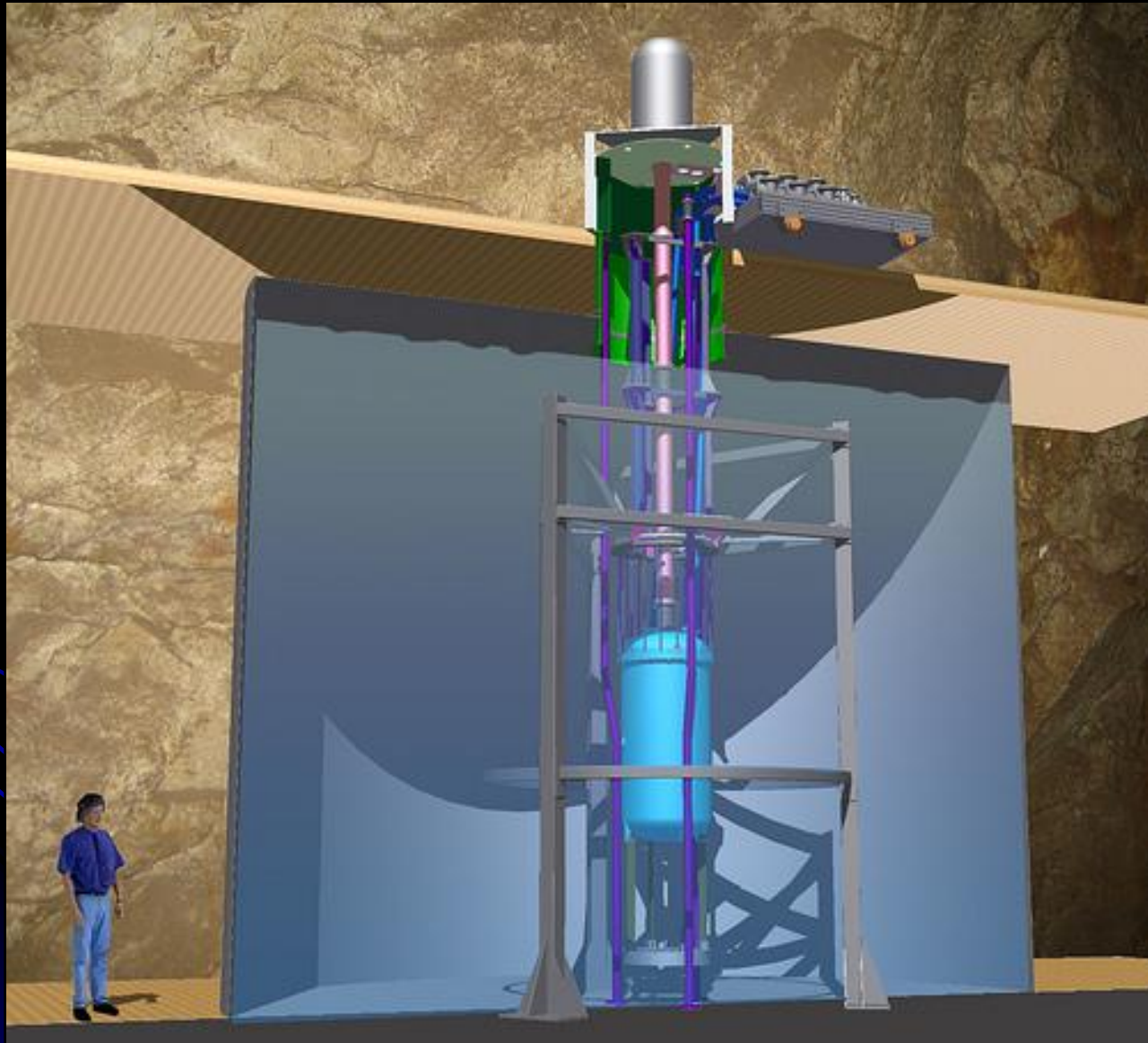
# 2010 Детектор LUX – 350 kg LXe



07.02.2011

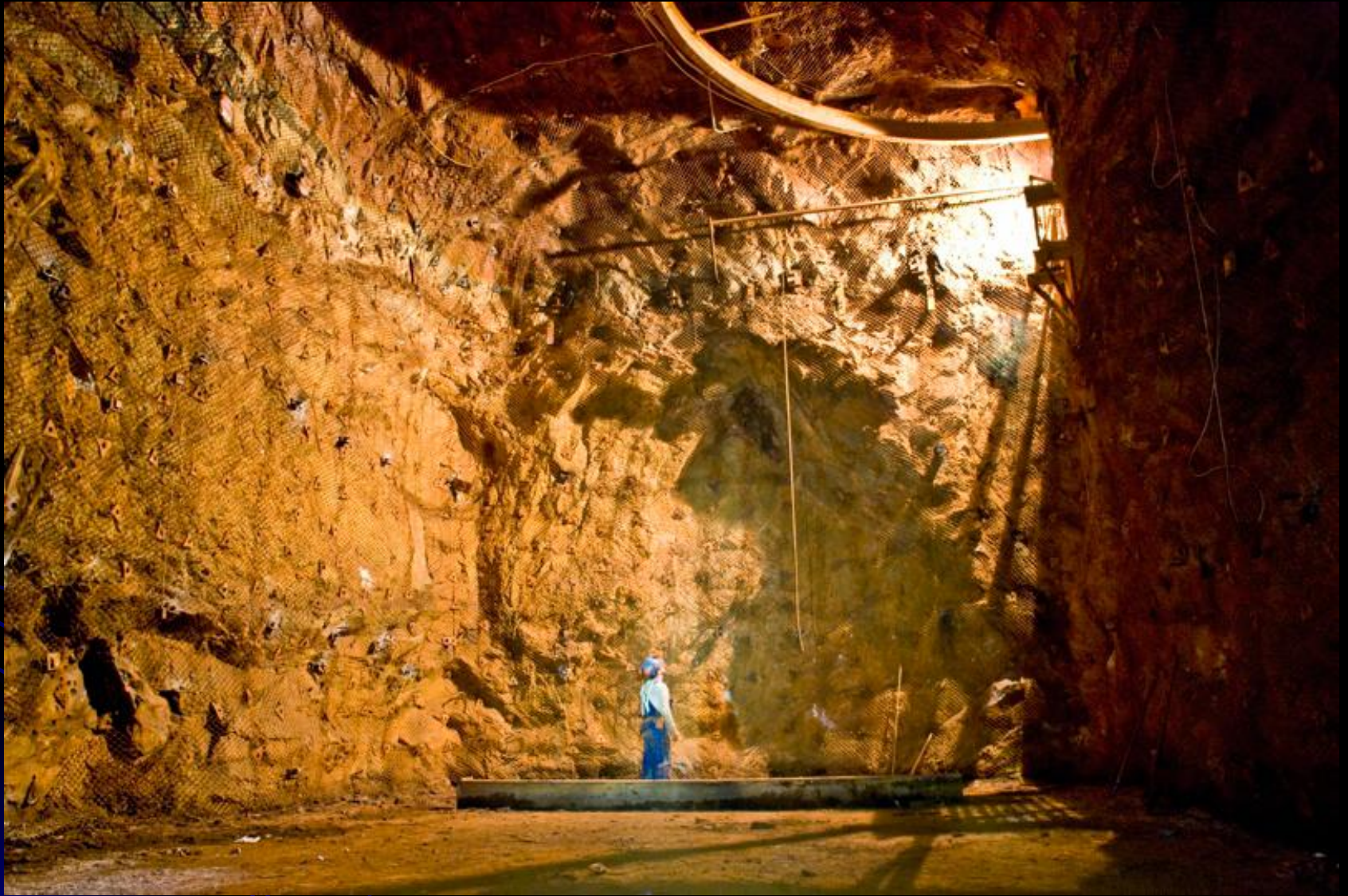
**Predicted WIMP rate = 4 events in 300 day for  $7 \cdot 10^{-46} \text{ cm}^2$  @ 100 GeV**

# LUX в пещере Дэвиса



07.02.2011



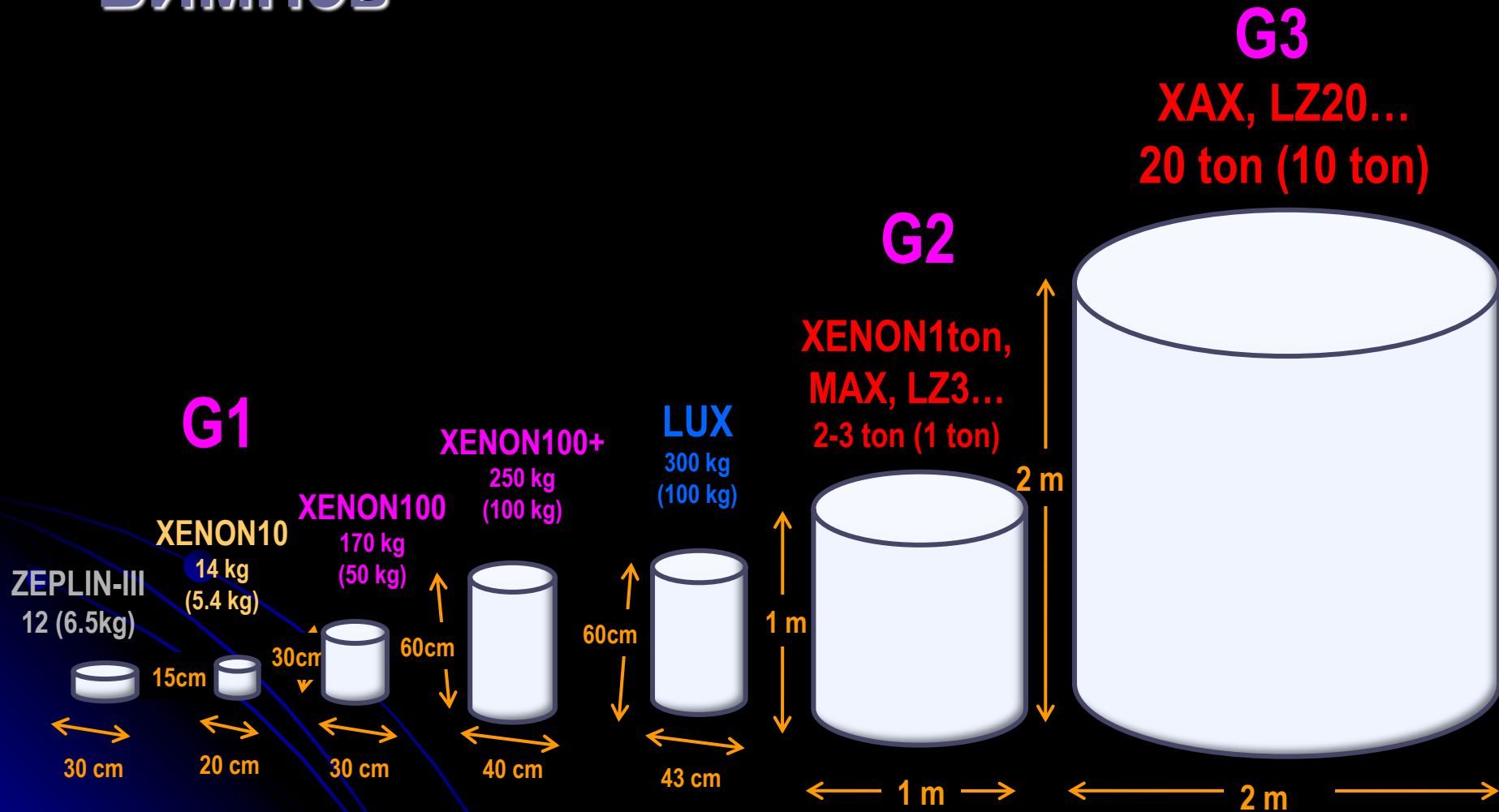


# Эмиссионные детекторы ВИМПов

Project	Detector mass, Total/Feducial, kg	Sensitivity, $10^{-44}\text{cm}^2$	Location, Years on duty	Status	Ref.
XENON10	25/5 LXe	8.8 @ 100 GeV/c <sup>2</sup> 5.5 @ 30 GeV/c <sup>2</sup>	GS, 2006-07	Completed	a
XENON100	100/10 LXe	0.2 @ 100 GeV/c <sup>2</sup>	GS, 2008-09	Active	b
ZEPLIN II	31/8 LXe	66 @ 55 GeV/c <sup>2</sup>	BM, 2006-07	Completed	c
ZEPLIN III	12/6.5 LXe	0.18 @ 55 GeV/c <sup>2</sup>	BM, 2008-09	Active	d
LUX	300/100 LXe	0.07 @ 100 GeV/c <sup>2</sup>	H, 2010	u/c	e
WARP10	10/2.6 LAr	75 @ 100 GeV/c <sup>2</sup>	GS, 2006	Completed	g
WARP100	100 LAr	1 @ 100 GeV/c <sup>2</sup>	GS, 2009-10	u/c	g

Notes: BM – Boulby mine (England); GS – Gran Sasso Underground Laboratory (Italy);  
H – Homestake DUSEL (South Dakota); u/c – under construction;  
a – Angle et al., 2007; b – Aprile and Baudis, 2009; c – Alner et al., 2007; g – Benetti et al., 2008

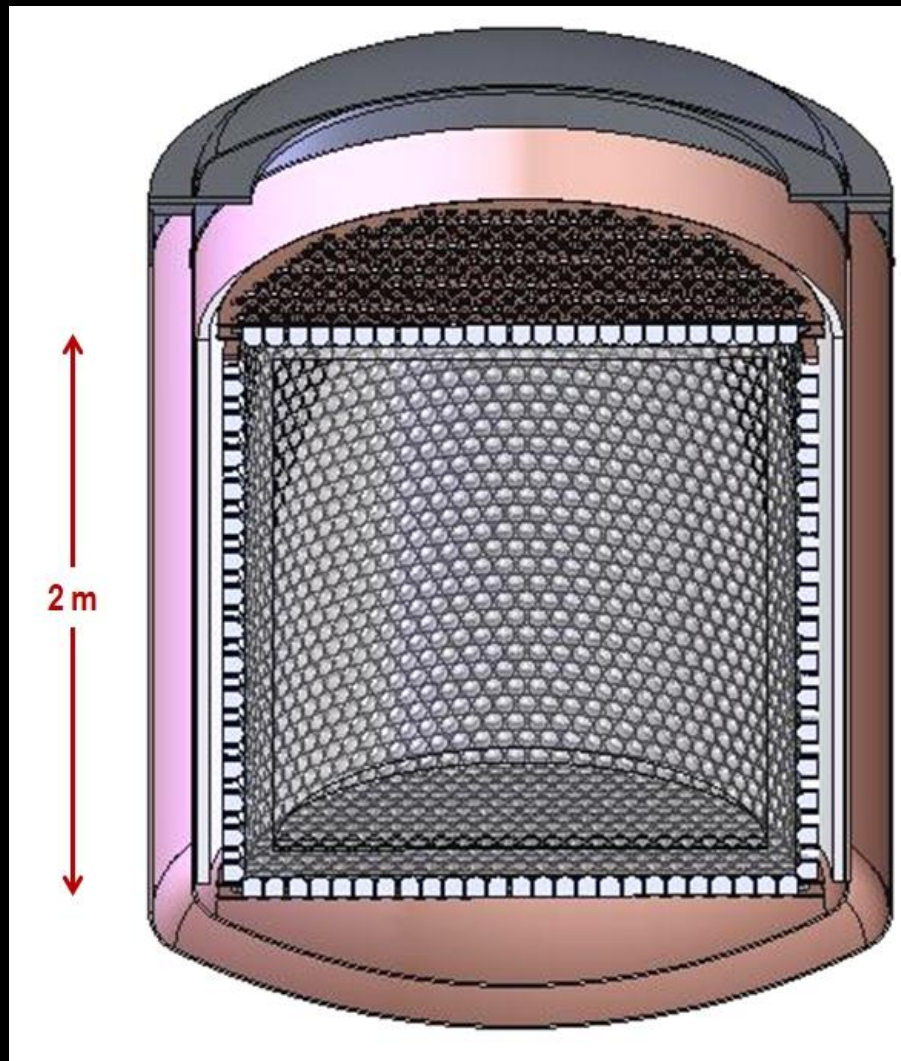
# Семейство эмиссионных детекторов ВИМПов



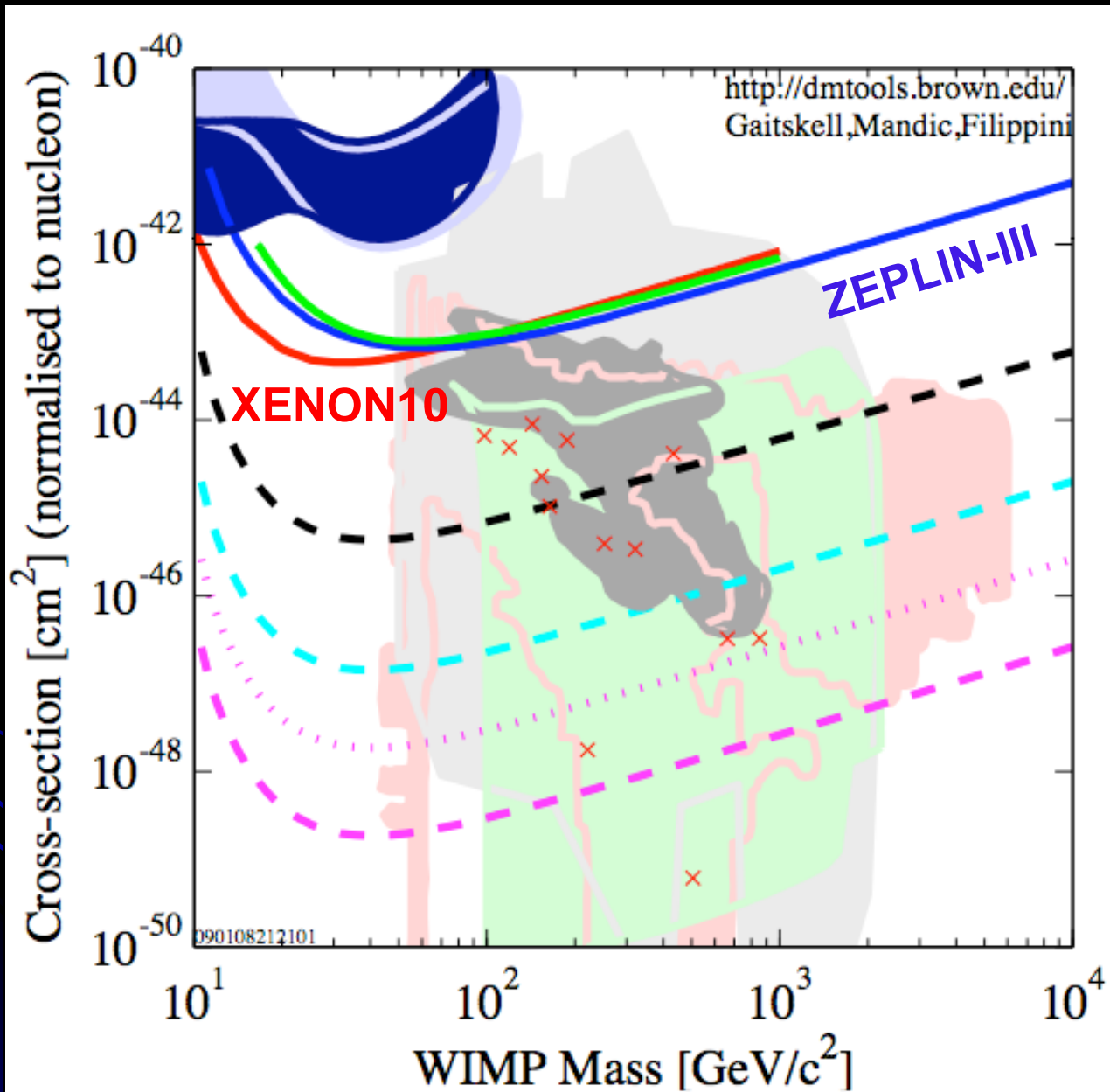
# 20 тонн LXe – проекты эмиссионных детекторов



LZ20



XAX



LUX

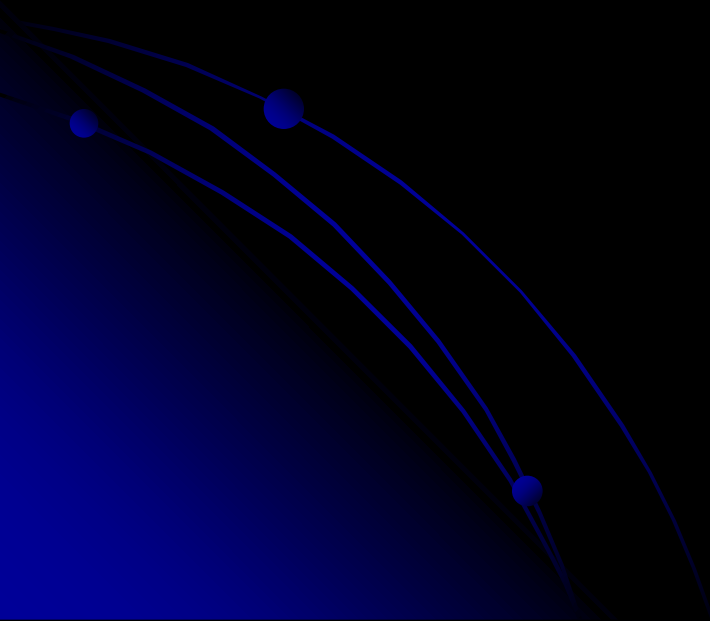
LZ3

LZ20 1y

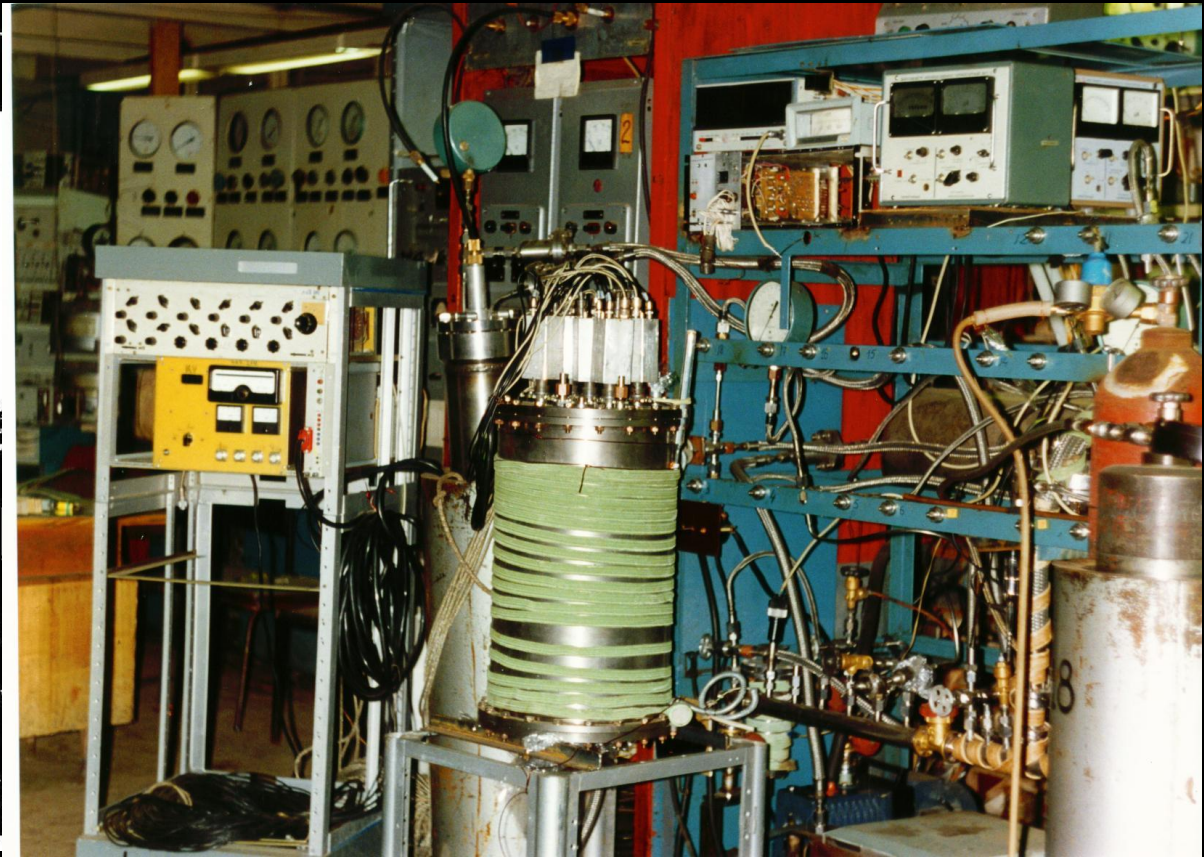
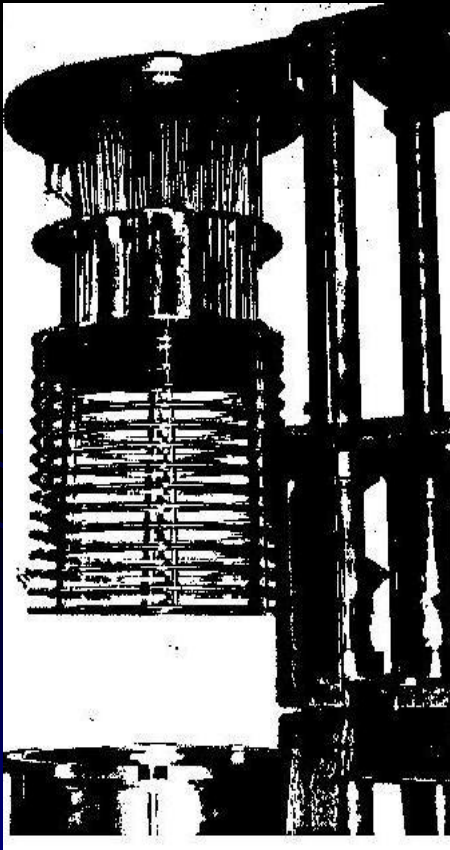
LZ20 10y



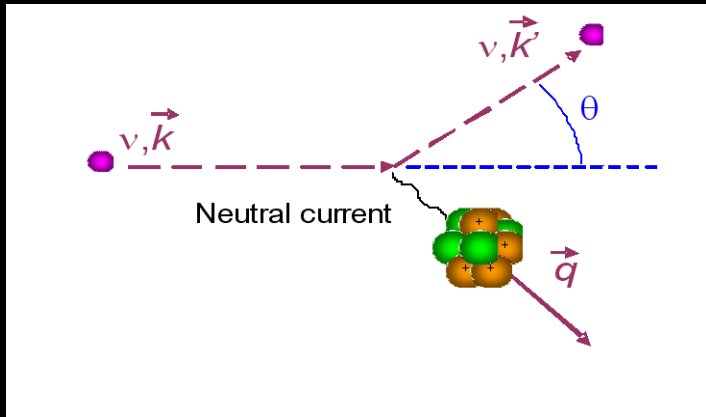
# Регистрация нейтрино



# 1992-1996 Эмиссионный детектор для регистрации $(\nu e)$ -рассеяния (неокончен)



# Когерентное рассеяние



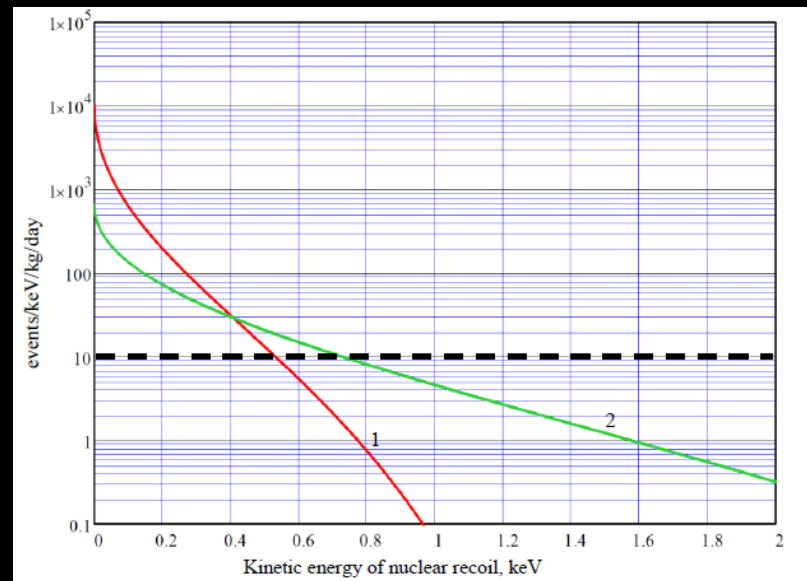
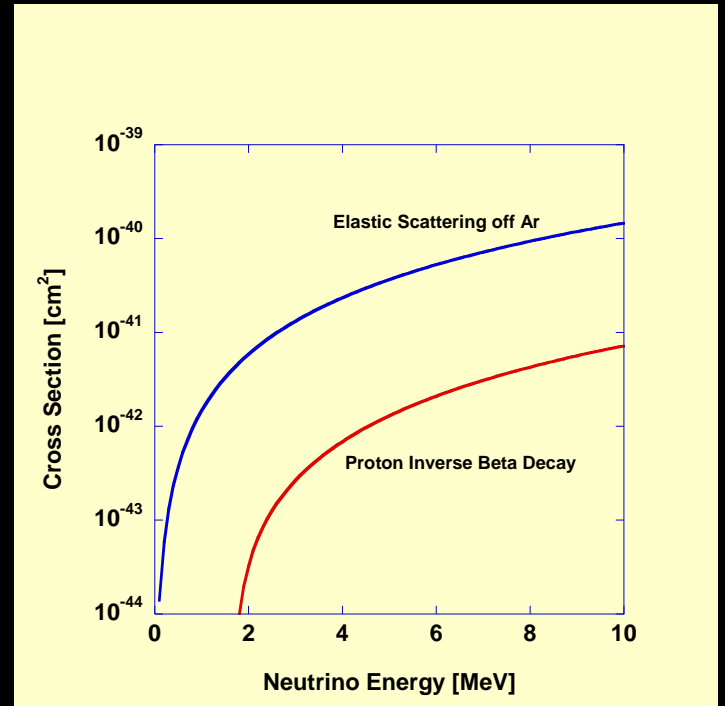
**Large cross-section**

$$\sigma_{\text{elastic}} = \frac{G_F^2}{4\pi} N^2 E_\nu^2$$

$$\approx 0.4 \times 10^{-44} \text{ cm}^2 A^2 E_\nu (\text{MeV})^2$$

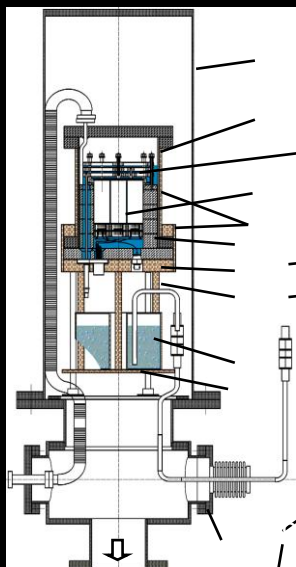
**Small recoil energies**

$$\langle E_{\text{recoil}} \rangle = 716 \text{ eV} \frac{E_\nu^2 (\text{MeV})}{A}$$

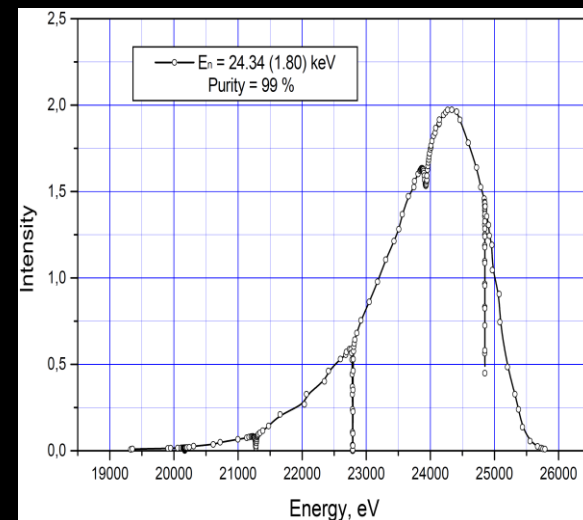
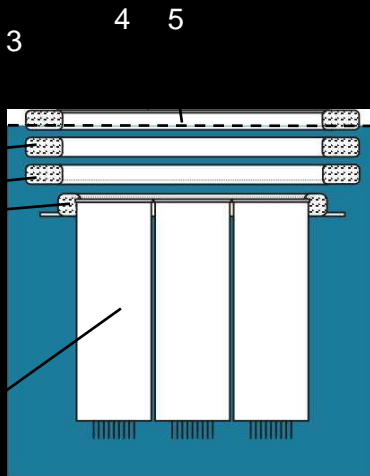




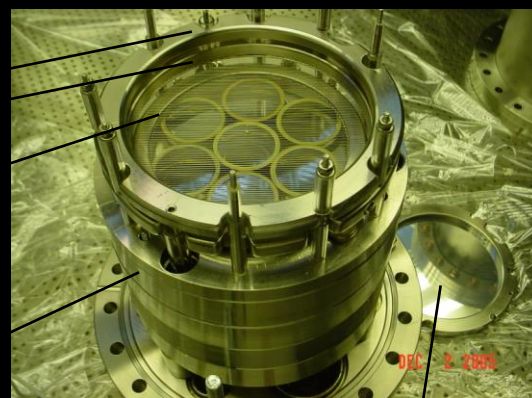
# Коллаборация РЭД: Модельный эксперимент на ИРТ НИЯУ МИФИ



откачка 6  
а

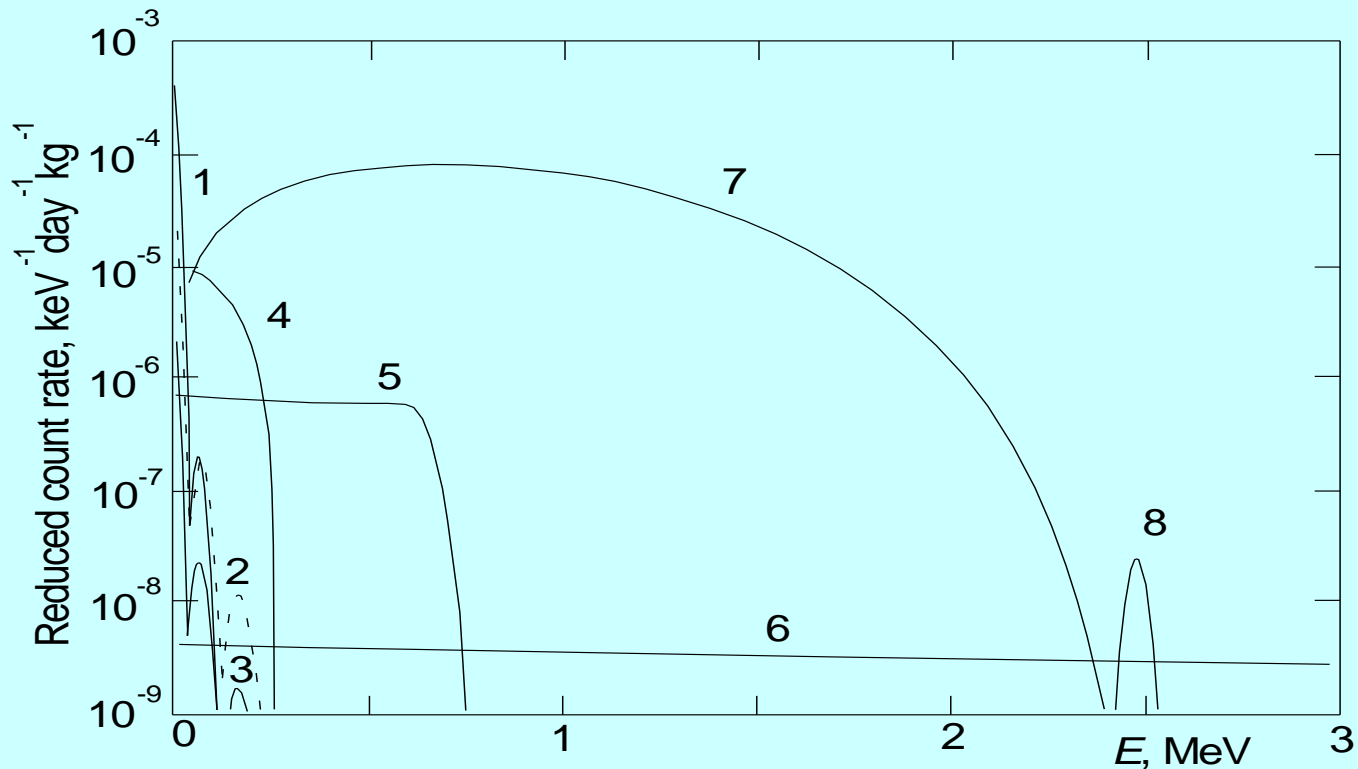


спектр нейтронов после Fe-Al фильтра



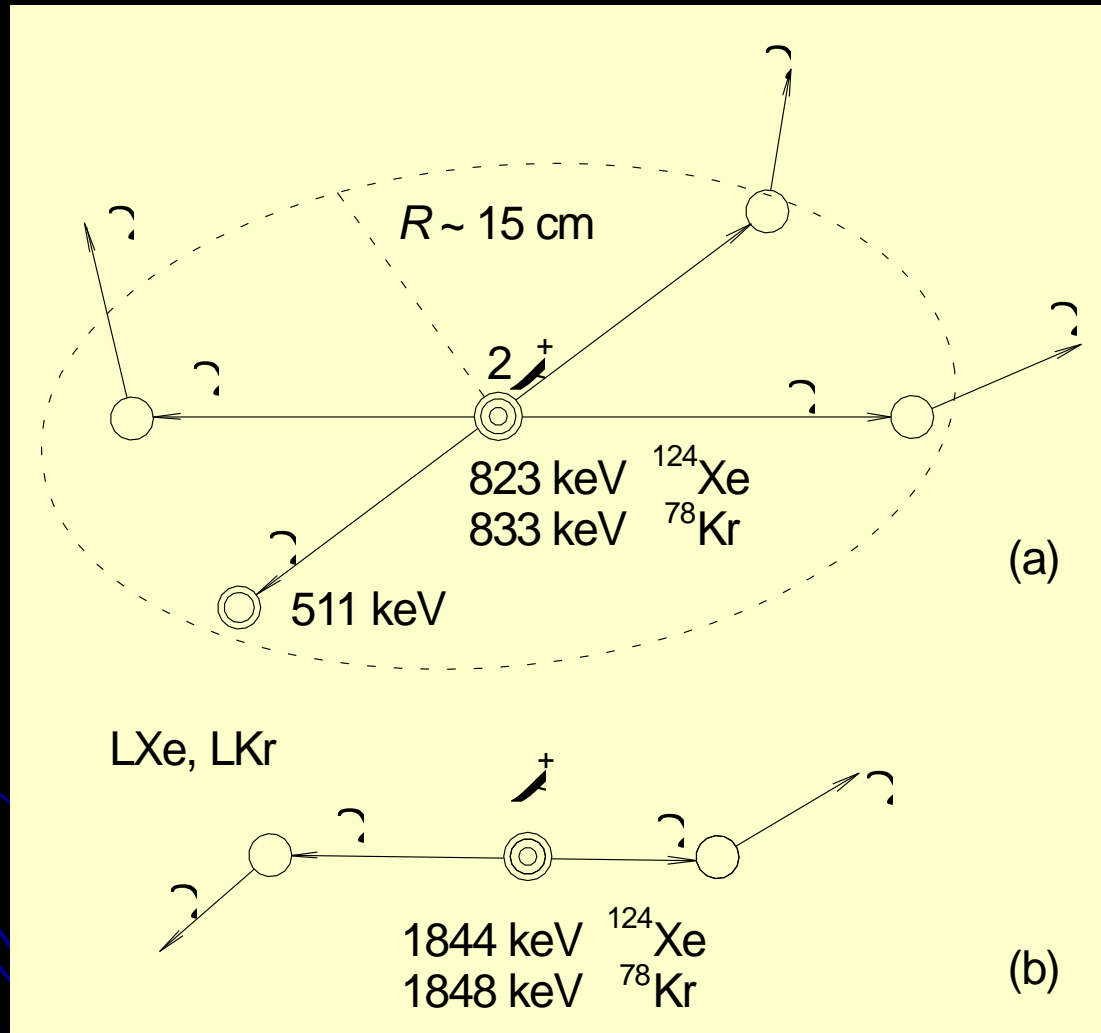
4

# Солнечные нейтрино



Ожидаемые спектры от вимпов с массами 0,1, 1 и 10 ТэВ/ $c^2$  (1, 2 и 3, соответственно), солнечных нейтрино  $pp$ -,  ${}^7\text{Be}$  и  ${}^8\text{B}$  циклов (4, 5 и 6, соответственно) и двойного бета-распада с  $10^{22}$  лет периода полураспада для нейтринного (7) и  $10^{27}$  лет для безнейтринного (8) распадов, соответственно, в естественной смеси изотопов ксенона.

# Регистрация двойного позитронного $\beta^+$ -распада

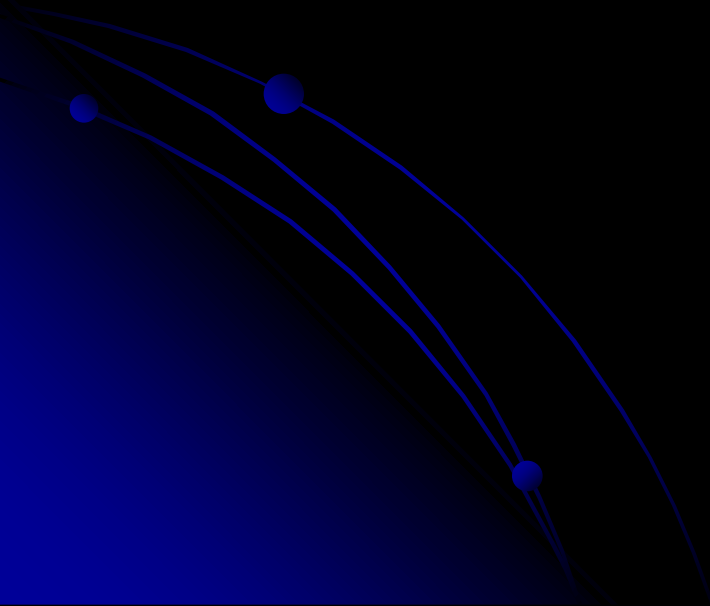


# Выводы из Главы 6

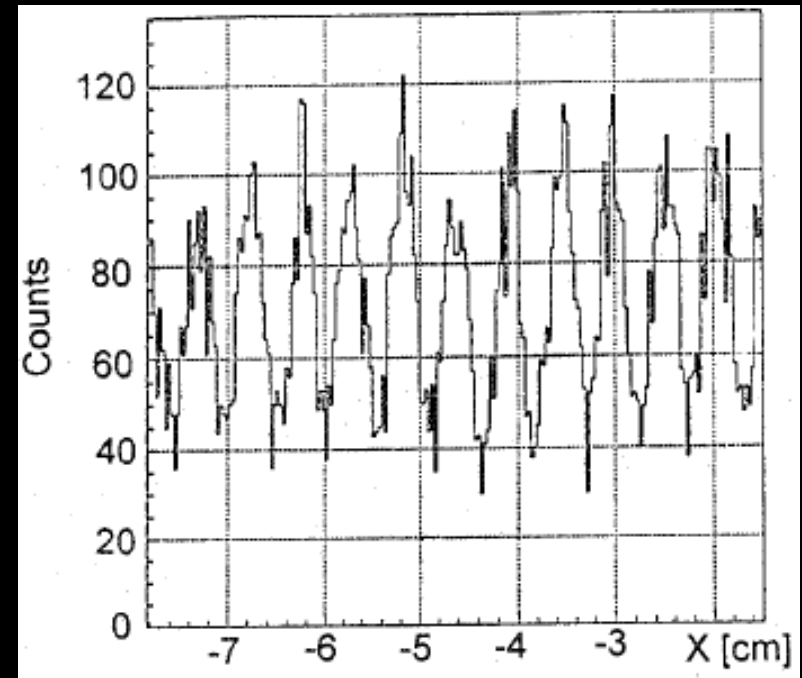
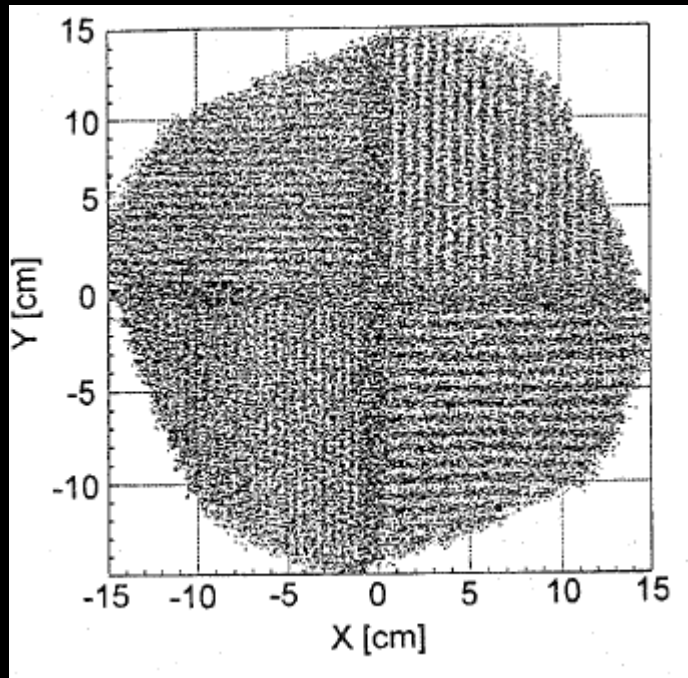
1. Использование эмиссионных детекторов на сжиженных благородных газах, работающих в режиме «безстеночного» детектора, привело к резкому увеличению чувствительности экспериментов по поиску холодного темного вещества во Вселенной.
2. Эмиссионная детекторная технология – безусловный лидер в постановке экспериментов следующего поколения с массой рабочего вещества в несколько тонн. Таким детекторам будет под силу также регистрация низкоэнергичных солнечных нейтрино, безнейтринного бета-распада.
3. Одним из перспективных направлений расширения области применения эмиссионных детекторов является постановка опыта по обнаружению когерентного рассеяния реакторных антинейтрино. В случае успешного решения этой задачи сданет возможным создание компактных и очень эффективных приборов для нейтринной диагностики энергетических реакторов.

## Глава 7

# ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОЛЕЙ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ



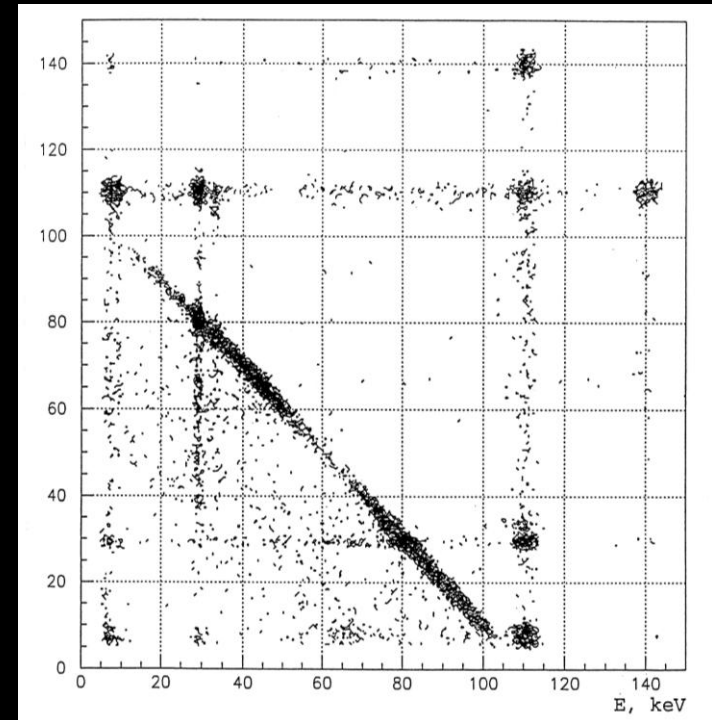
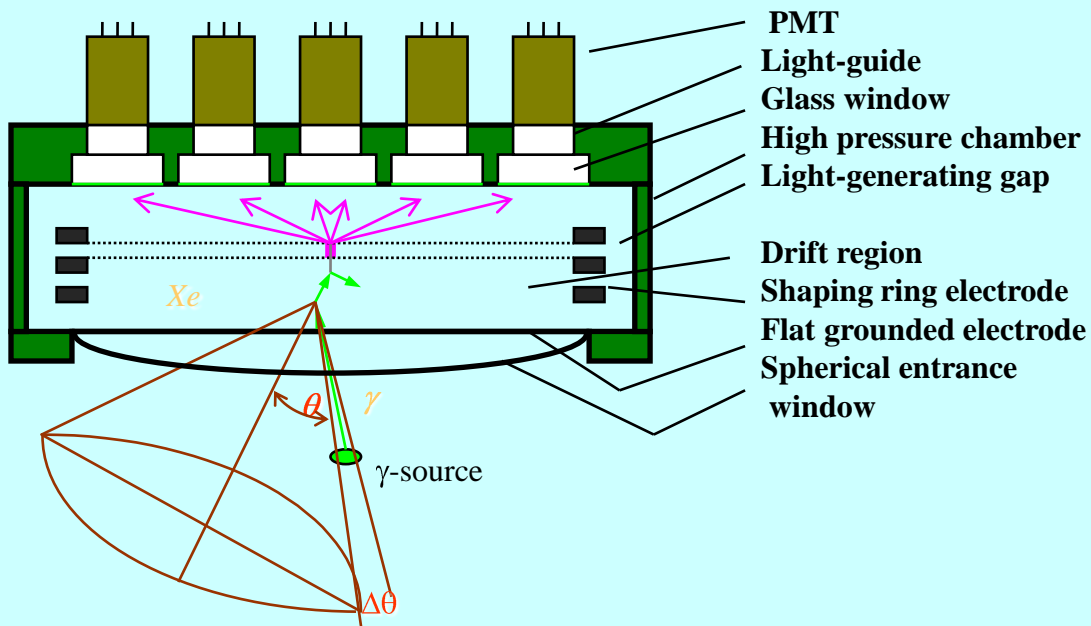
# Электролюминесцентная гамма-камера



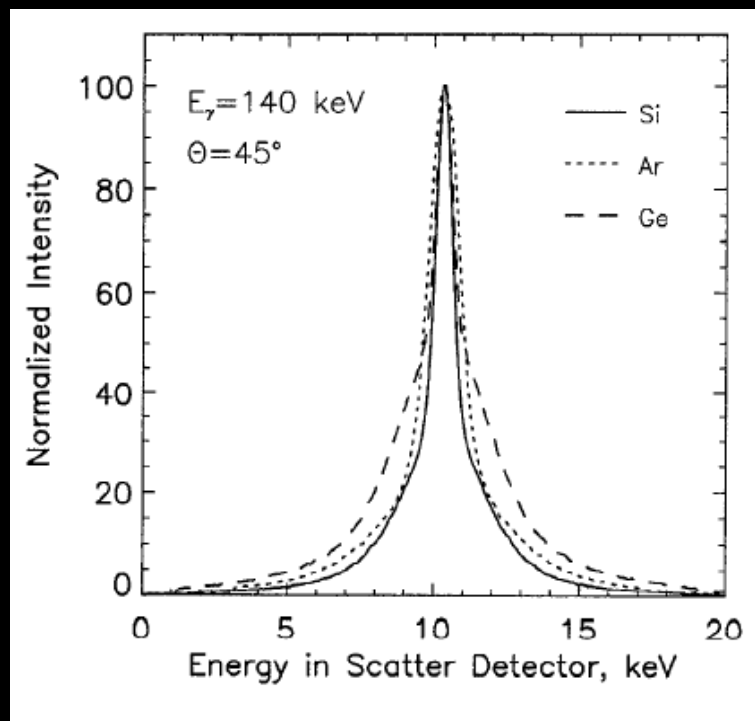
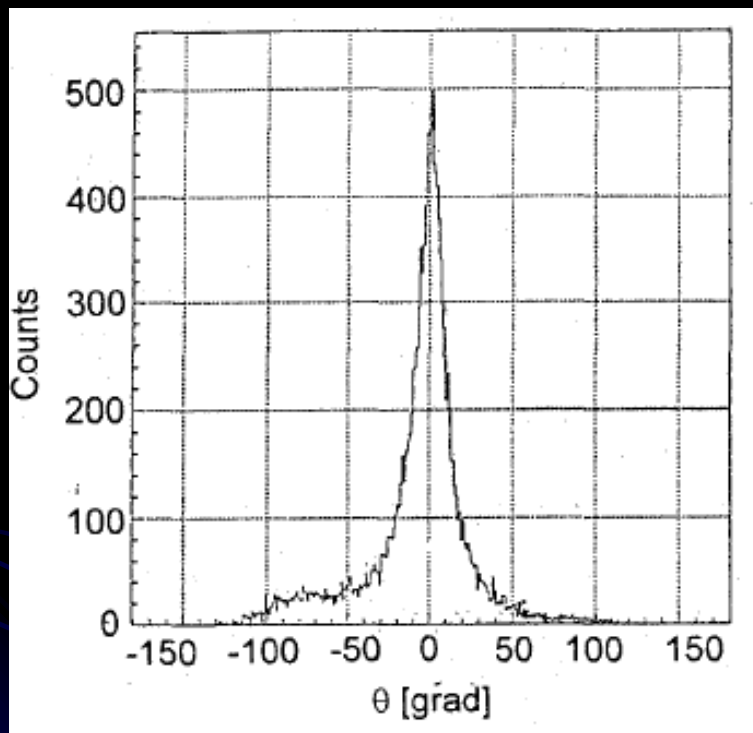
Изображение свинцового бар-фантома, полученное с точечно-подобным источником  $^{241}\text{Am}$ , установленным на расстоянии 1,5 мм от входного окна детектора СДК-19 (слева) и распределение плотности точек в сечении нижнего левого квадранта на линии  $Y = -5$  см.

# Комптоновская гамма-камера

$$\cos \theta = 1 - m_e c^2 [1/E_a - 1/(E_a + E_s)]$$

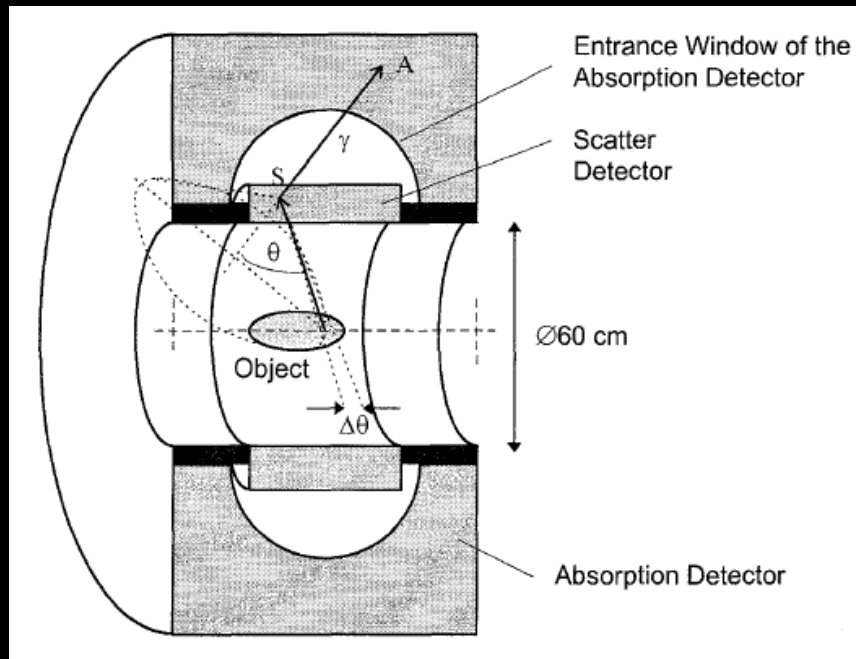


Хе, Ge → плохое угловое разрешение из-за Допплер-эффекта





# Цилиндрическая комптон-камера для SPECT



*Усиление чувствительности*

$$G = (\epsilon_{CC} / \epsilon_{AC}) k_{\theta} k_E / m$$

Parameters of the Compton Camera in Comparison with Three-headed SPECT System with ROR = 30 cm

Configuration	System Position Resolution, mm FWHM	Sensitivity Gain at $m=10$	System Energy Resolution, % FWHM	Total Detection Efficiency, %	Allowed Count Rate of Accepted Events, MHz	Number of Channels in the Scatter Detector	Number of Channels in the Absorption Detector
3 head SPECT	10-15	1	9	0.01	0.3	-	200
5mmSi/ /1.3cmNaI(Tl)	26	50	9	14	<1	30,000	800
5mmSi/ /1cmCdZnTe	22	50	6	14	>100	30,000	20,000
10cm20atmAr / /20cm20atmXe	10-20	10	2	4	10	300	1,000
5mmSi / /20cm20atmXe	10-20	50	2	14	10	30,000	1,000



# Выводы из Главы 7

1. Технология детекторов на чистых благородных газах с большой плотностью (жидкость) и атомным номером среды (ксенон) обладает значительным потенциалом для создания томографических систем, включая однофотонную томографию и ПЭТ.
2. Уже первые попытки создания детекторов для однофотонной томографии привели к разработке детекторов с рекордными параметрами по пространственному и энергетическому разрешению.
3. Детекторы с трехмерной позиционной чувствительностью могут послужить основой для разработки принципиально новой техники для медицинской интроскопии – комптоновским камерам.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

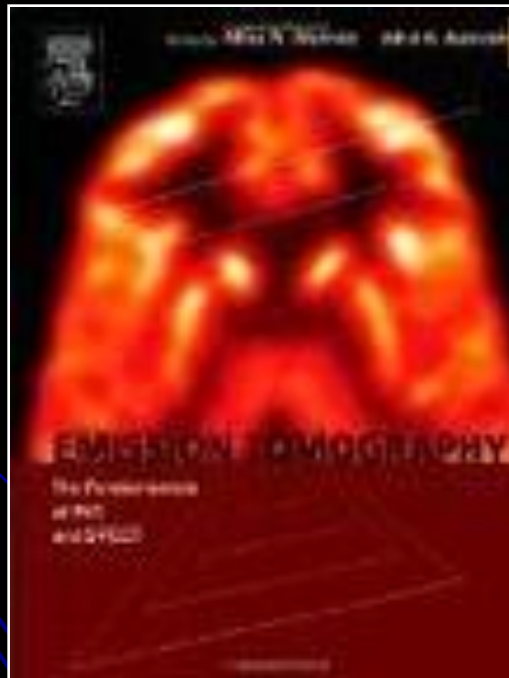
1. Технические проблемы, долгое время ограничивавшие использование плотных тяжелых благородных газов, в настоящее время решены. Достигнутый уровень технологии позволяет создавать низкофоновые «безстеночные» детекторы рабочей массой 1-10 тонн
2. Первый истинно «безстеночный» эмиссионный детектор вимпов XENON-10 исключил значительную часть теоретически разрешенного параметрического пространства «сечение-масса» для нейтралино и тяжелых Майорановских нейтрино с массами в диапазоне  $10 \text{ ГэВ}/c^2 - 2 \text{ ТэВ}/c^2$  из кандидатов в холодное темное вещество.
3. Эмиссионные детекторы следующего поколения будут использовать до тонны жидкого ксенона для решения нескольких задач, включая поиски двойного бета-распада и регистрацию солнечных нейтрино
4. Технология детекторов на чистых благородных газах обладает значительным потенциалом для создания новых томографических систем диагностики для ядерной медицины

# Основные результаты опубликованы здесь

2010  
World Scientific

2004  
Academic Press

1993  
Энергоатомиздат



2006  
Wiley-VCH

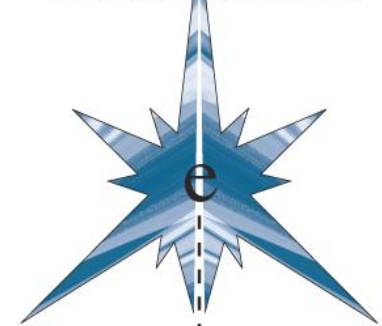
E. Aprile, A.E. Bolotnikov,  
A.I. Bolozdynya, T. Doke

WILEY-VCH

Noble  
Gas Detectors



emission detectors

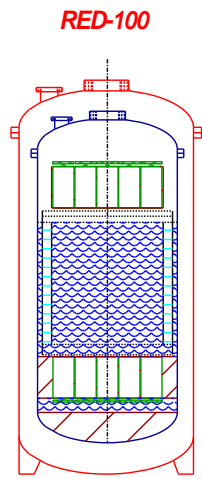
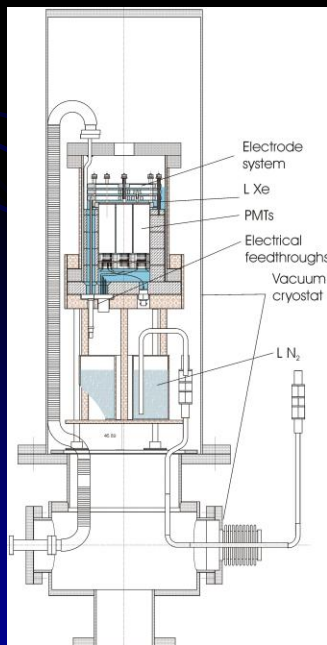


alexander i bolozdynya

World Scientific



РОССИЙСКИЙ ЭМИССИОННЫЙ ДЕТЕКТОР



RED-100

