



*Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»*

*Институт ядерной физики и технологий  
Лаборатория экспериментальной ядерной физики  
<http://enpl.mephi.ru/>*



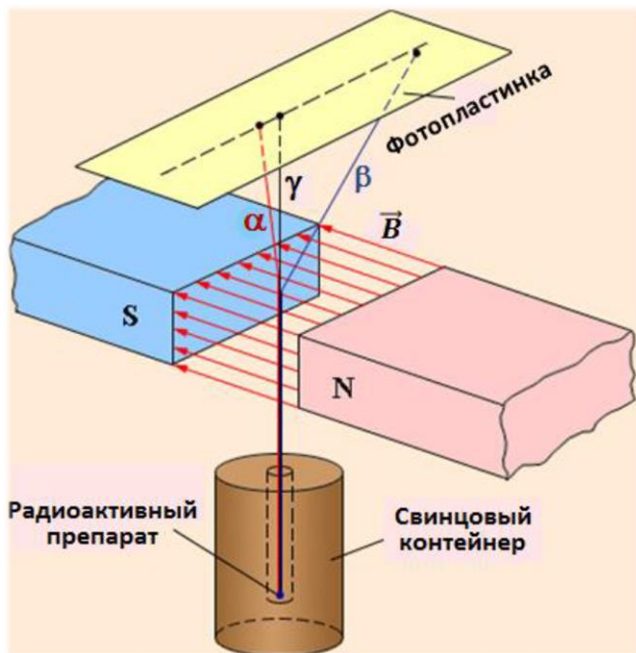
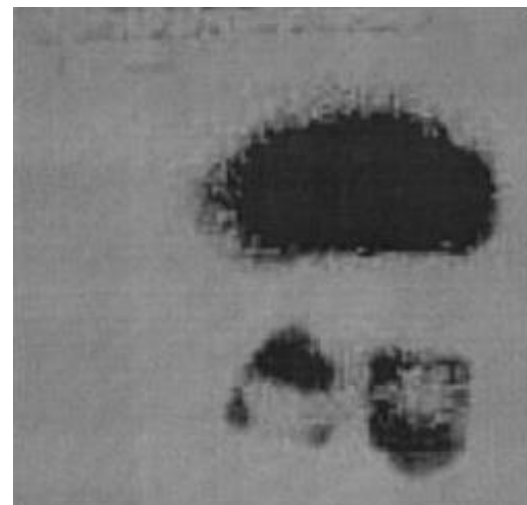
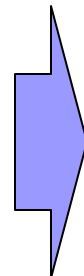
РОССИЙСКИЙ ЭМИССИОННЫЙ ДЕТЕКТОР

*Александр Болоздыня*

**Как разработка новых методов  
детектирования элементарных частиц  
помогает решать актуальные задачи  
безопасности атомной энергетики и  
нераспространения ядерного оружия**

## Открытие радиоактивности

Первое свидетельство радиоактивного распада атомных ядер, обнаруженное *А. Беккерелем в 1896 г.* На фотопластинке отчетливо видны потемнения, образовавшиеся в результате того, что *А. Беккерель* положил на неё образцы урановой соли.



**Радиоактивность – самопроизвольное испускание атомными ядрами различных частиц и излучений**

К **1900 г.** наблюдались основные виды радиоактивности:

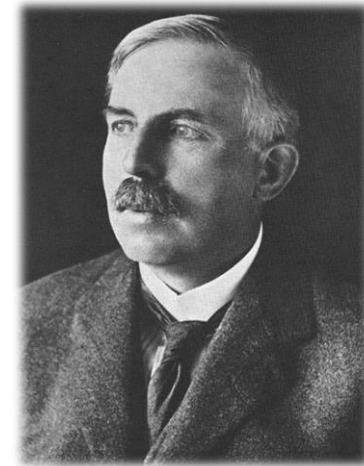
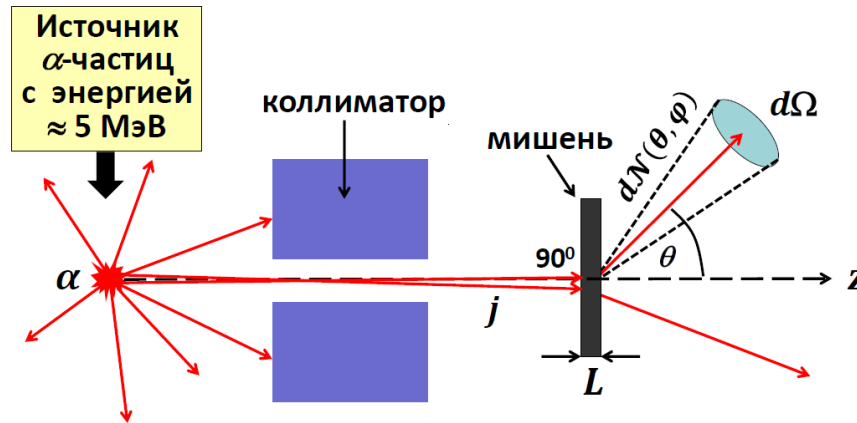
- Альфа ( $\alpha$ ) распад (испускание ядер гелия)  
– **1898 г. Э. Резерфорд,**
- Бета ( $\beta$ ) распад (испускание электронов)  
– **1898 г. Э. Резерфорд,**
- Гамма ( $\gamma$ ) распад (испускание гамма-квантов)  
– **1900 г. П. Виллард.**

Все эти распады обусловлены внутриядерными процессами. Но сами ядра были открыты лишь в **1911 г. Э. Резерфордом.**

# Открытие ядра у атома

Атомное ядро открыто в 1911 г.

*Эрнстом Резерфордом* в лаборатории Манчестерского университета (Англия) в результате анализа опытов *Гейгера* и *Марсдена* по рассеянию  $\alpha$ -частиц на тонких золотых и платиновых фольгах, начатых в 1909 г.



Э. Резерфорд (1871-1937)

## КЛЮЧЕВЫЕ ЭТАПЫ В ПОЗНАНИИ СТРОЕНИЯ ЯДРА

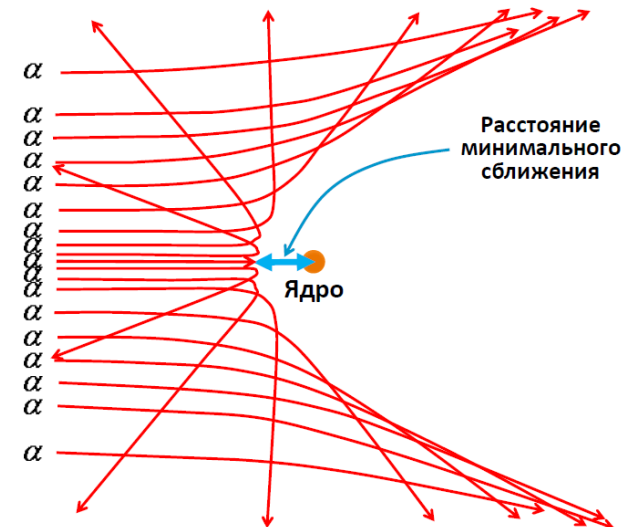
1909 г. – Опыты *Гейгера* и *Марсдена* (опыт Резерфорда), Англия,

1911 г. – Открытие ядра атома (*Резерфорд*, Англия),

1932 г. – Открытие нейтрона (*Чэдвик*, Англия),

1932 г. – Протон-нейтронная модель ядра, *Майорана*, Италия, *Д.Д. Иваненко*, СССР, *Гейзенберг*, Германия,

1964 г. – Кварковое строение протона и нейтрона, *Гелл-Манн*, *Цвейг*, США.



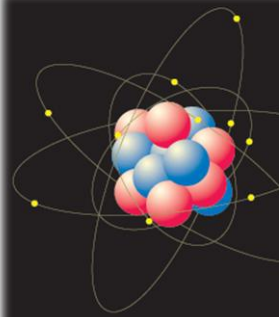
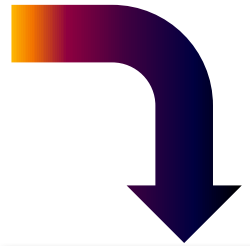
# Таблица Д.И. Менделеева и структура атома



Д.И. Менделеев (1834-1907)

## Современная периодическая система элементов Д.И.Менделеева

Group 1 Ia																	18																		
											13	14	15	16	17																				
1											IIa	IVa	Va	VIa	VIIa																				
1											IIa	IVa	Va	VIa	VIIa																				
1 1.00794 <b>H</b> Hydrogen Водород											10.811 5 <b>B</b> Boron Бор	12.011 6 <b>C</b> Carbon Углерод	14.00674 7 <b>N</b> Nitrogen Азот	15.9994 8 <b>O</b> Oxygen Кислород	18.9984032 9 <b>F</b> Fluorine Фтор	20.1797 10 <b>Ne</b> Neon																			
2 6.941 3 <b>Li</b> Lithium Литий	9.012182 4 <b>Be</b> Beryllium Бериллий											26.981538 13 <b>Al</b> Aluminum Алюминий	28.0855 14 <b>Si</b> Silicon Кремний	30.973761 15 <b>P</b> Phosphorus Фосфор	32.066 16 <b>S</b> Sulphur Сера	35.4527 17 <b>Cl</b> Chlorine Хлор	39.948 18 <b>Ar</b> Argon																		
3 22.989770 11 <b>Na</b> Sodium Натрий	24.3050 12 <b>Mg</b> Magnesium Магний	44.955910 19 <b>K</b> Potassium Калий	47.867 20 <b>Ca</b> Calcium Кальций	50.9415 21 <b>Sc</b> Scandium Скандий	51.9961 22 <b>Ti</b> Titanium Титан	54.938046 23 <b>V</b> Vanadium Ванадий	55.845 24 <b>Cr</b> Chromium Хром	58.933200 25 <b>Mn</b> Manganese Марганец	58.6934 26 <b>Fe</b> Iron Железо	58.933200 27 <b>Co</b> Cobalt Кобальт	58.933200 28 <b>Ni</b> Nickel Никель	63.546 29 <b>Cu</b> Copper Медь	65.39 30 <b>Zn</b> Zinc Цинк	69.723 31 <b>Ga</b> Gallium Галлий	72.61 32 <b>Ge</b> Germanium Германий	74.92160 33 <b>As</b> Arsenic Мышьяк	78.96 34 <b>Se</b> Selenium Селен	79.904 35 <b>Br</b> Bromine Бром	83.80 36 <b>Kr</b> Krypton																
4 39.0983 19 <b>K</b> Potassium Калий	40.078 20 <b>Ca</b> Calcium Кальций	44.955910 21 <b>Sc</b> Scandium Скандий	47.867 22 <b>Ti</b> Titanium Титан	50.9415 23 <b>V</b> Vanadium Ванадий	51.9961 24 <b>Cr</b> Chromium Хром	54.938046 25 <b>Mn</b> Manganese Марганец	55.845 26 <b>Fe</b> Iron Железо	58.933200 27 <b>Co</b> Cobalt Кобальт	58.6934 28 <b>Ni</b> Nickel Никель	58.933200 29 <b>Cu</b> Copper Медь	63.546 30 <b>Zn</b> Zinc Цинк	65.39 31 <b>Ga</b> Gallium Галлий	69.723 32 <b>Ge</b> Germanium Германий	72.61 33 <b>As</b> Arsenic Мышьяк	74.92160 34 <b>Se</b> Selenium Селен	78.96 35 <b>Br</b> Bromine Бром	79.904 36 <b>Kr</b> Krypton	83.80 37 <b>Rb</b> Rubidium Рубидий	85.4678 38 <b>Sr</b> Strontium Стронций	88.90585 39 <b>Y</b> Yttrium Иттрий	91.224 40 <b>Zr</b> Zirconium Цирконий	92.90638 41 <b>Nb</b> Niobium Ниобий	95.94 42 <b>Mo</b> Molybdenum Молибден	97.9055 43 <b>Tc</b> Technetium Технеций	101.07 44 <b>Ru</b> Ruthenium Рутений	102.90550 45 <b>Rh</b> Rhodium Родий	106.42 46 <b>Pd</b> Palladium Палладий	107.8682 47 <b>Ag</b> Silver Серебро	112.411 48 <b>Cd</b> Cadmium Кадмий	114.818 49 <b>In</b> Indium Индий	118.710 50 <b>Sn</b> Tin Олово	121.760 51 <b>Sb</b> Antimony Сурьма	127.60 52 <b>Te</b> Tellurium Теллур	126.90447 53 <b>I</b> Iodine Иод	131.29 54 <b>Xe</b> Xenon Ксенон
5 85.4678 37 <b>Rb</b> Rubidium Рубидий	87.62 38 <b>Sr</b> Strontium Стронций	88.90585 39 <b>Y</b> Yttrium Иттрий	91.224 40 <b>Zr</b> Zirconium Цирконий	92.90638 41 <b>Nb</b> Niobium Ниобий	95.94 42 <b>Mo</b> Molybdenum Молибден	97.9055 43 <b>Tc</b> Technetium Технеций	101.07 44 <b>Ru</b> Ruthenium Рутений	102.90550 45 <b>Rh</b> Rhodium Родий	106.42 46 <b>Pd</b> Palladium Палладий	107.8682 47 <b>Ag</b> Silver Серебро	112.411 48 <b>Cd</b> Cadmium Кадмий	114.818 49 <b>In</b> Indium Индий	118.710 50 <b>Sn</b> Tin Олово	121.760 51 <b>Sb</b> Antimony Сурьма	127.60 52 <b>Te</b> Tellurium Теллур	126.90447 53 <b>I</b> Iodine Иод	131.29 54 <b>Xe</b> Xenon Ксенон	132.90545 55 <b>Cs</b> Caesium Цезий	137.327 56 <b>Ba</b> Barium Барий	138.9055 57 <b>La</b> Lanthanum Лантан	178.46 72 <b>Hf</b> Hafnium Гафний	180.9479 73 <b>Ta</b> Tantalum Тантал	183.84 74 <b>W</b> Tungsten Вольфрам	186.207 75 <b>Re</b> Rhenium Рений	190.23 76 <b>Os</b> Osmium Осий	192.227 77 <b>Ir</b> Iridium Иридий	195.078 78 <b>Pt</b> Platinum Платина	196.96655 79 <b>Au</b> Gold Золото	200.59 80 <b>Hg</b> Mercury Ртуть	204.3833 81 <b>Tl</b> Thallium Таллий	208.98038 82 <b>Pb</b> Lead Свинец	207.2 83 <b>Bi</b> Bismuth Висмут	208.98038 84 <b>Po</b> Polonium Полоний	208.98038 85 <b>At</b> Astatine Астат	208.98038 86 <b>Rn</b> Radon Радон
6 132.90545 55 <b>Cs</b> Caesium Цезий	137.327 56 <b>Ba</b> Barium Барий	138.9055 57 <b>La</b> Lanthanum Лантан	178.46 72 <b>Hf</b> Hafnium Гафний	180.9479 73 <b>Ta</b> Tantalum Тантал	183.84 74 <b>W</b> Tungsten Вольфрам	186.207 75 <b>Re</b> Rhenium Рений	190.23 76 <b>Os</b> Osmium Осий	192.227 77 <b>Ir</b> Iridium Иридий	195.078 78 <b>Pt</b> Platinum Платина	196.96655 79 <b>Au</b> Gold Золото	200.59 80 <b>Hg</b> Mercury Ртуть	204.3833 81 <b>Tl</b> Thallium Таллий	208.98038 82 <b>Pb</b> Lead Свинец	207.2 83 <b>Bi</b> Bismuth Висмут	208.98038 84 <b>Po</b> Polonium Полоний	208.98038 85 <b>At</b> Astatine Астат	208.98038 86 <b>Rn</b> Radon Радон	132.90545 55 <b>Cs</b> Caesium Цезий	137.327 56 <b>Ba</b> Barium Барий	138.9055 57 <b>La</b> Lanthanum Лантан	178.46 72 <b>Hf</b> Hafnium Гафний	180.9479 73 <b>Ta</b> Tantalum Тантал	183.84 74 <b>W</b> Tungsten Вольфрам	186.207 75 <b>Re</b> Rhenium Рений	190.23 76 <b>Os</b> Osmium Осий	192.227 77 <b>Ir</b> Iridium Иридий	195.078 78 <b>Pt</b> Platinum Платина	196.96655 79 <b>Au</b> Gold Золото	200.59 80 <b>Hg</b> Mercury Ртуть	204.3833 81 <b>Tl</b> Thallium Таллий	208.98038 82 <b>Pb</b> Lead Свинец	207.2 83 <b>Bi</b> Bismuth Висмут	208.98038 84 <b>Po</b> Polonium Полоний	208.98038 85 <b>At</b> Astatine Астат	208.98038 86 <b>Rn</b> Radon Радон
7 223 87 <b>Fr</b> Francium Франций	226 88 <b>Ra</b> Radium Радий	227 89 <b>Ac</b> Actinium Актиний	140.116 58 <b>Ce</b> Cerium Церий	140.90765 59 <b>Pr</b> Praseodymium Прометий	144.24 60 <b>Nd</b> Neodymium Неодим	145 61 <b>Pm</b> Promethium Прометий	150.36 62 <b>Sm</b> Samarium Самарий	151.964 63 <b>Eu</b> Europium Европий	157.25 64 <b>Gd</b> Gadolinium Гадолий	158.92534 65 <b>Tb</b> Terbium Тербий	162.50 66 <b>Dy</b> Dysprosium Диспрозий	164.93032 67 <b>Ho</b> Holmium Гольмий	167.26 68 <b>Er</b> Erbium Эрбий	168.93421 69 <b>Tm</b> Thulium Тулий	173.04 70 <b>Yb</b> Ytterbium Иттербий	174.967 71 <b>Lu</b> Lutetium Лютеций	223 87 <b>Fr</b> Francium Франций	226 88 <b>Ra</b> Radium Радий	227 89 <b>Ac</b> Actinium Актиний	140.116 58 <b>Ce</b> Cerium Церий	140.90765 59 <b>Pr</b> Praseodymium Прометий	144.24 60 <b>Nd</b> Neodymium Неодим	145 61 <b>Pm</b> Promethium Прометий	150.36 62 <b>Sm</b> Samarium Самарий	151.964 63 <b>Eu</b> Europium Европий	157.25 64 <b>Gd</b> Gadolinium Гадолий	158.92534 65 <b>Tb</b> Terbium Тербий	162.50 66 <b>Dy</b> Dysprosium Диспрозий	164.93032 67 <b>Ho</b> Holmium Гольмий	167.26 68 <b>Er</b> Erbium Эрбий	168.93421 69 <b>Tm</b> Thulium Тулий	173.04 70 <b>Yb</b> Ytterbium Иттербий	174.967 71 <b>Lu</b> Lutetium Лютеций		
8 262 90 <b>Th</b> Thorium Торий	262 91 <b>Pa</b> Protactinium Протактиний	262 92 <b>U</b> Uranium Уран	262 93 <b>Np</b> Neptunium Нептуний	262 94 <b>Pu</b> Plutonium Плутоний	262 95 <b>Am</b> Americium Америций	262 96 <b>Cm</b> Curium Кюриум	262 97 <b>Bk</b> Berkelium Берклиум	262 98 <b>Cf</b> Californium Калифорний	262 99 <b>Es</b> Einsteinium Эйнштейний	262 100 <b>Fm</b> Fermium Фермий	262 101 <b>Md</b> Mendelevium Менделеев	262 102 <b>No</b> Nobelium Нобелиум	262 103 <b>Lr</b> Lawrencium Лоуренсий	262 90 <b>Th</b> Thorium Торий	262 91 <b>Pa</b> Protactinium Протактиний	262 92 <b>U</b> Uranium Уран	262 93 <b>Np</b> Neptunium Нептуний	262 94 <b>Pu</b> Plutonium Плутоний	262 95 <b>Am</b> Americium Америций	262 96 <b>Cm</b> Curium Кюриум	262 97 <b>Bk</b> Berkelium Берклиум	262 98 <b>Cf</b> Californium Калифорний	262 99 <b>Es</b> Einsteinium Эйнштейний	262 100 <b>Fm</b> Fermium Фермий	262 101 <b>Md</b> Mendelevium Менделеев	262 102 <b>No</b> Nobelium Нобелиум	262 103 <b>Lr</b> Lawrencium Лоуренсий								



\* Element has no stable nuclides. For radioactive elements the value in parentheses refers to the number of nucleons (mass number) of the most stable isotope (IUPAC, 1995).  
 \* Элемент не имеет устойчивых изотопов. Для него в скобках приведено значение массового числа (число нуклонов в ядре) наиболее долгоживущего изотопа (ИЮПАК, 1995).  
 {} Alternative english name  
 {} American spelling of the element's name  
 {} Альтернативное английское название  
 {} Американское написание названия элемента

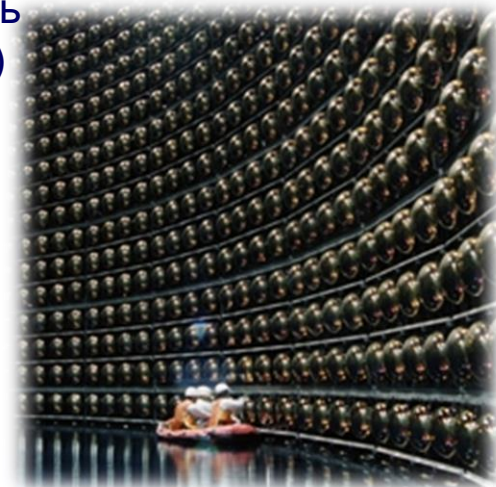
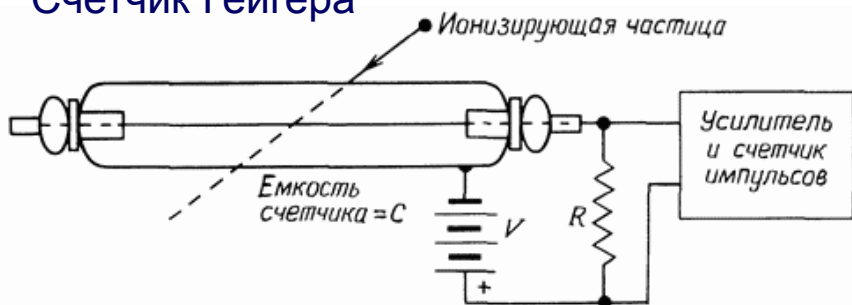
© P.C. Сайфуллин, А.Р.Сайфуллин, 2004  
 © R.S. Saifullin, A.R. Saifullin, 2004

Mar 2004

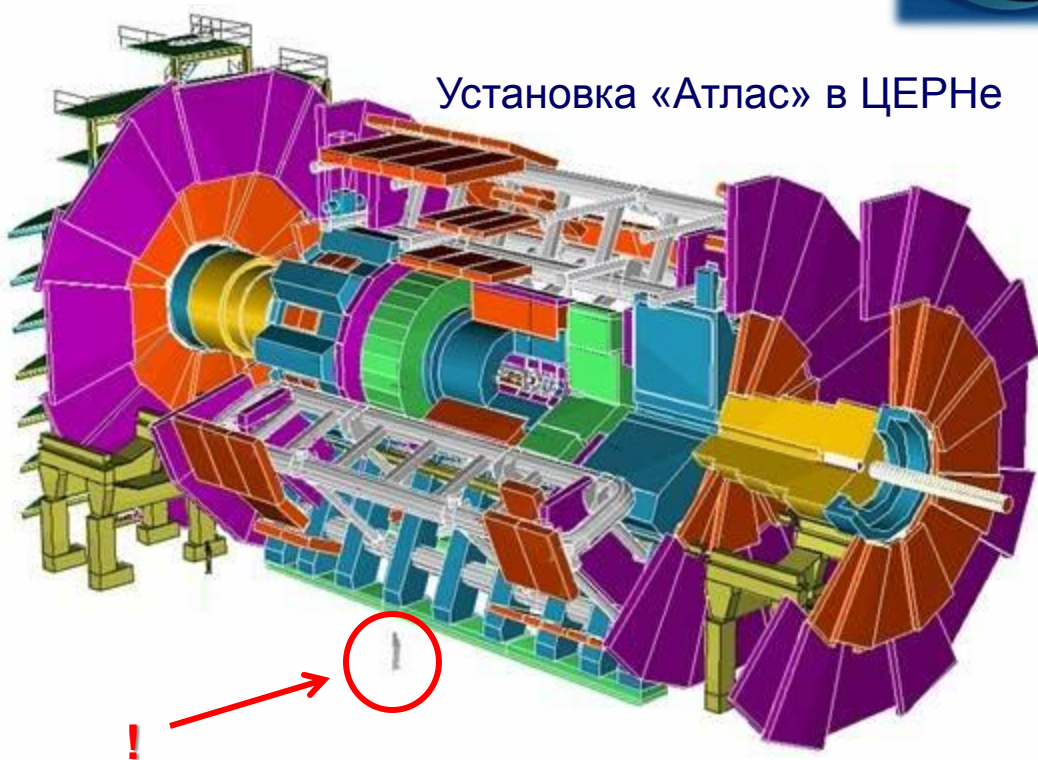
# Инструментарий современной ядерной физики

Фотоэлектронный умножитель  
(Л.А.Кубецкий/В.К.Зворыкин)

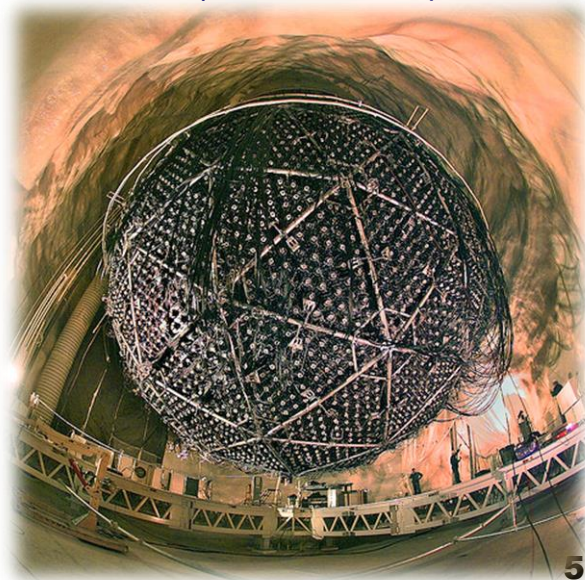
Счетчик Гейгера



Установка «Атлас» в ЦЕРНе

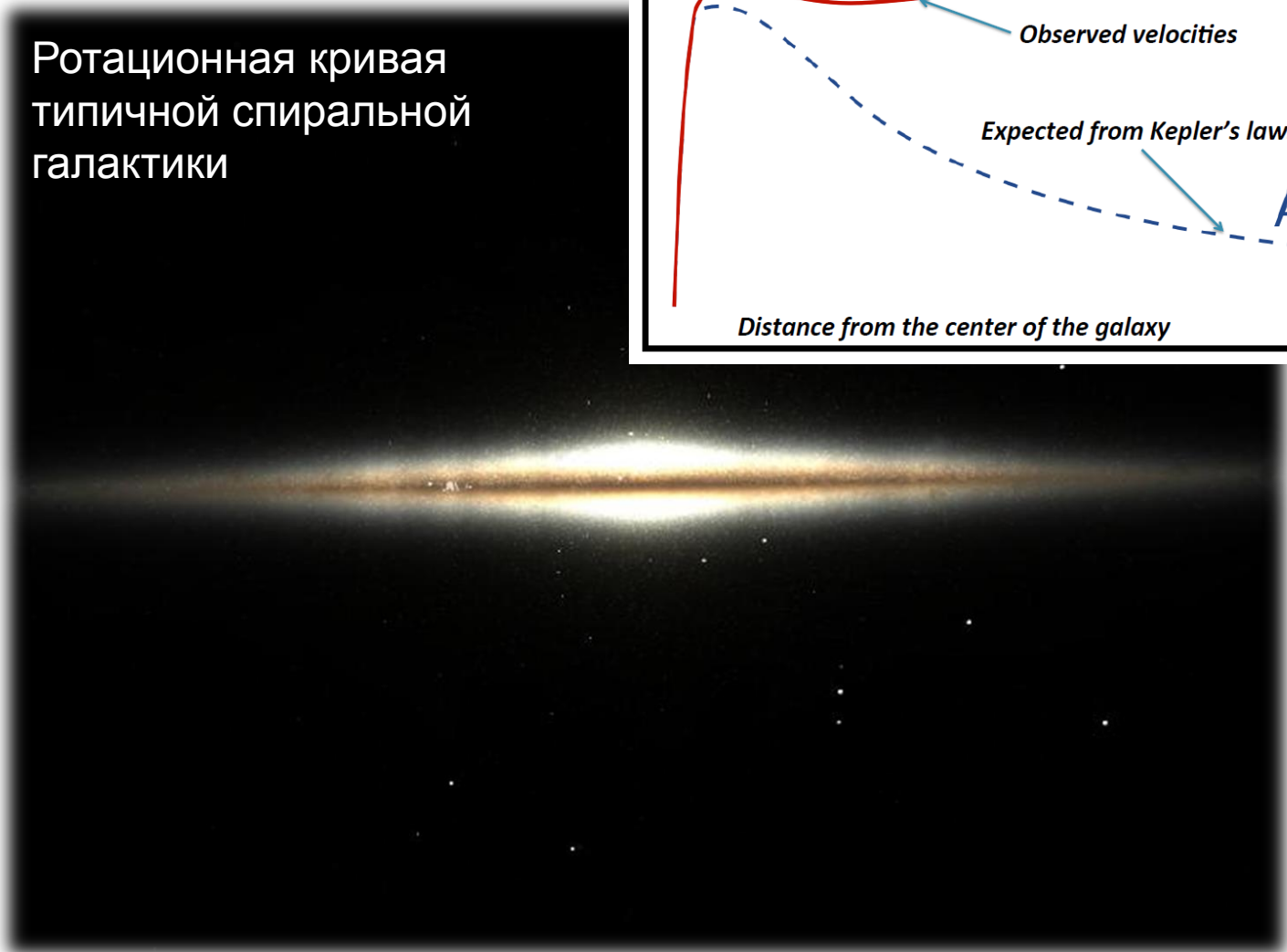
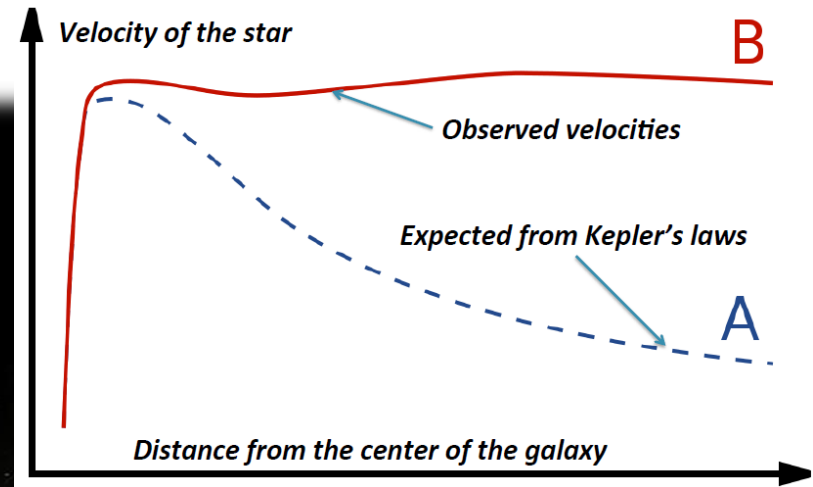


Подземный детектор KamLAND  
(~1000 тонн)



# Проблемы современной физики: «Недостающая масса» Вселенной

Ротационная кривая  
типичной спиральной  
галактики



Мемориальная доска  
на корпусе «Э» МИФИ  
в память о

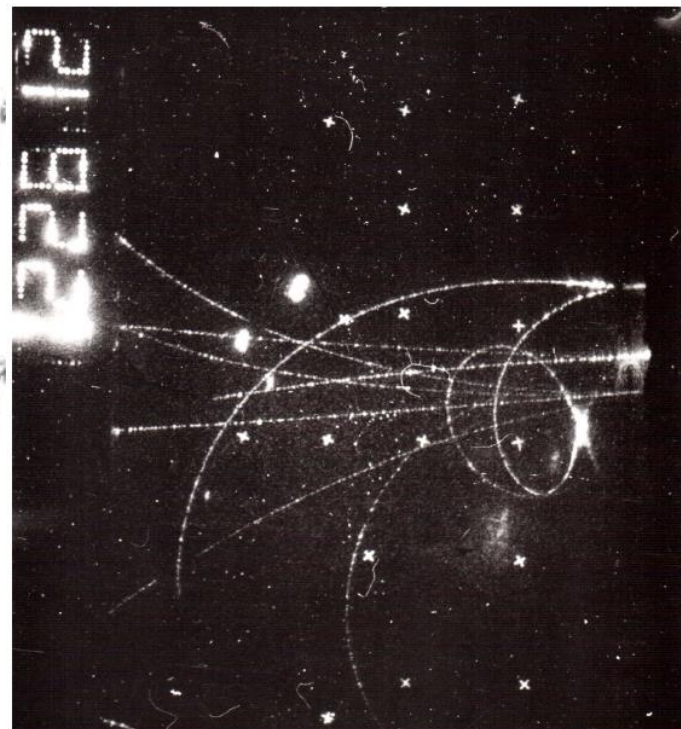
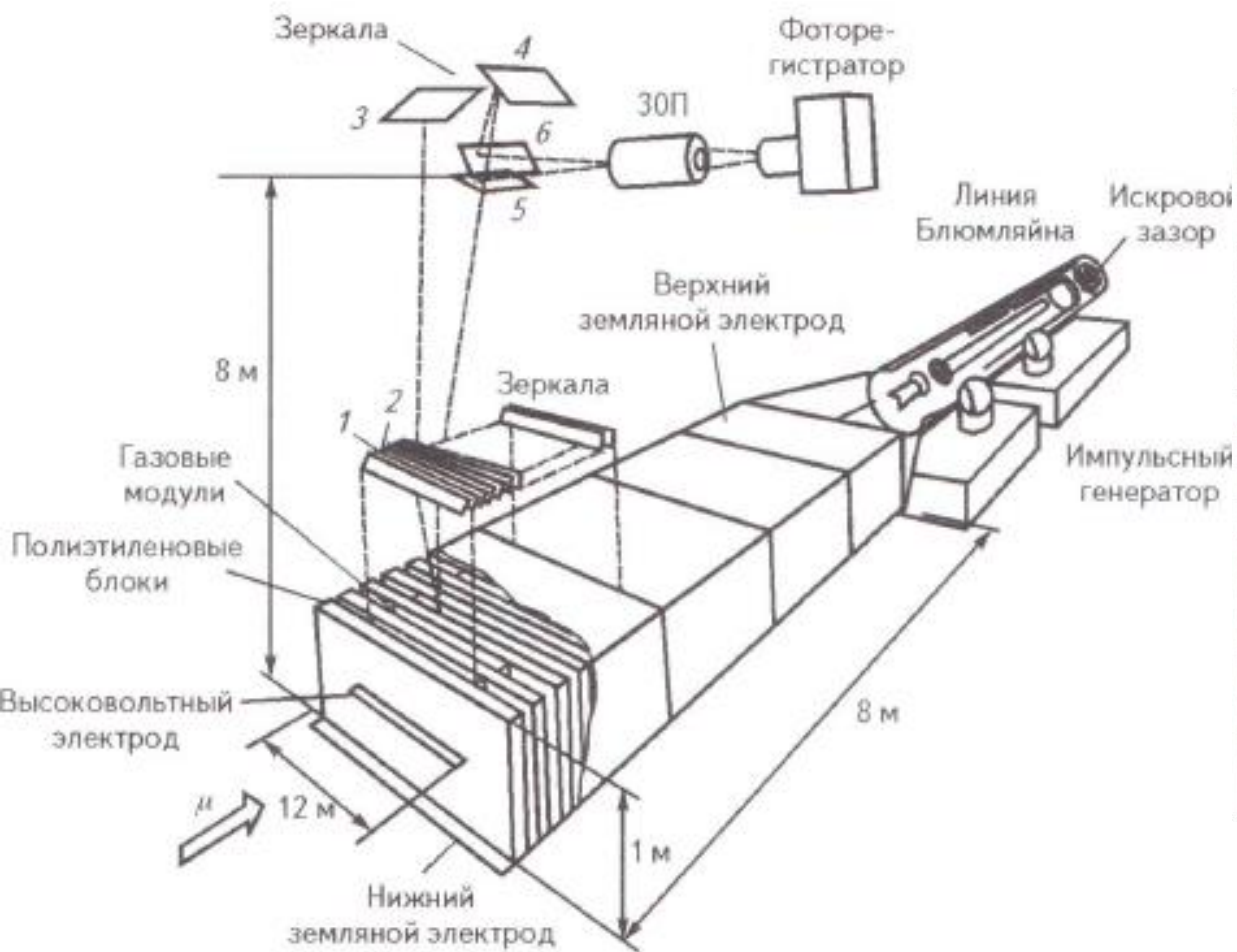
Борисе Анатольевиче  
Долгошеине

(Ленинская премия 1970  
года за создание  
трекового детектора  
нового  
типа *стримерная  
камера*)

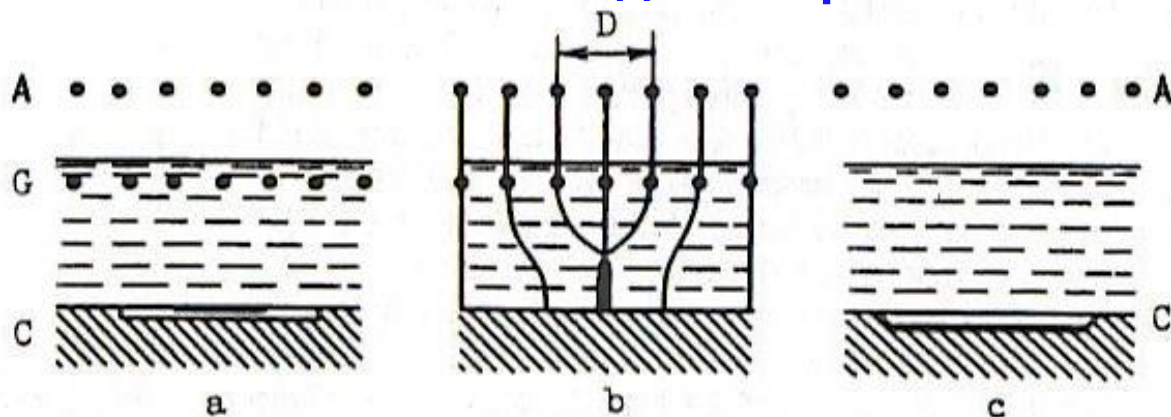
Открыта 18 ноября  
2014 г.



**Самая большая стримерная камера в мире была создана в МИФИ для поиска  $W$ -бозона на ускорителе  $У-70$  (1967)**



## 1969-70 Регистрация частиц с помощью двух-фазных эмиссионных детекторов



Б.А. Долгошеин



Б.У. Родионов



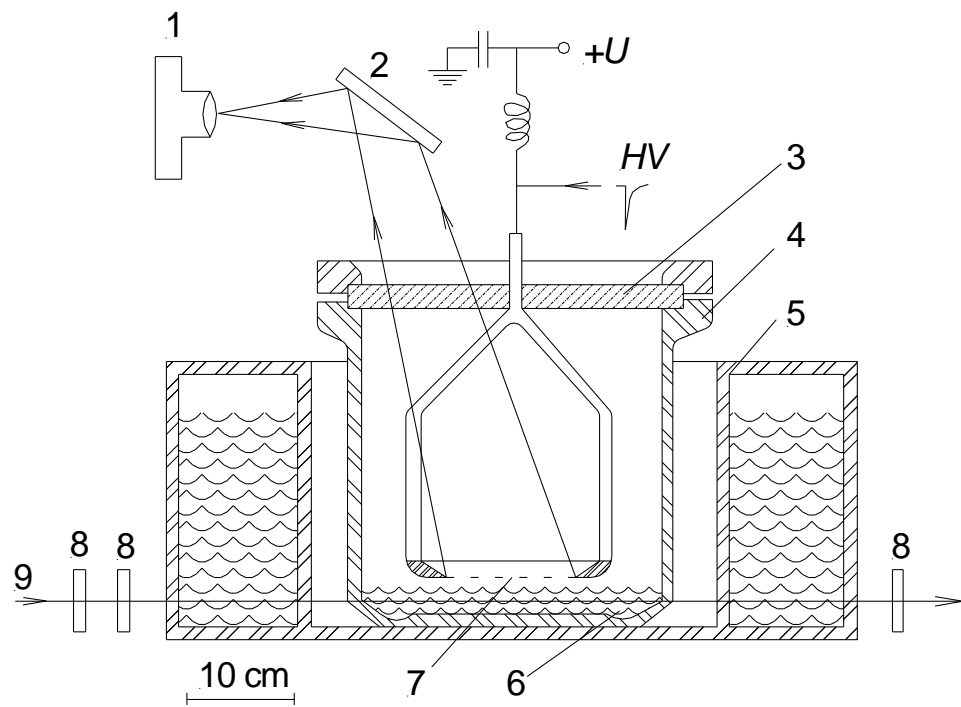
В.Н. Лебедеенко

Долгошеин Б.А., Лебедеенко В.Н. и Родионов Б.У. Новый метод регистрации треков ионизирующих частиц в конденсированном веществе, Письма в ЖЭТФ, 1970, т.11, стр. 351-353.

Hutchinson G. W. (1948). Ionization in liquid and solid argon, *Nature*, 162, pp. 610-611.

1977-1979

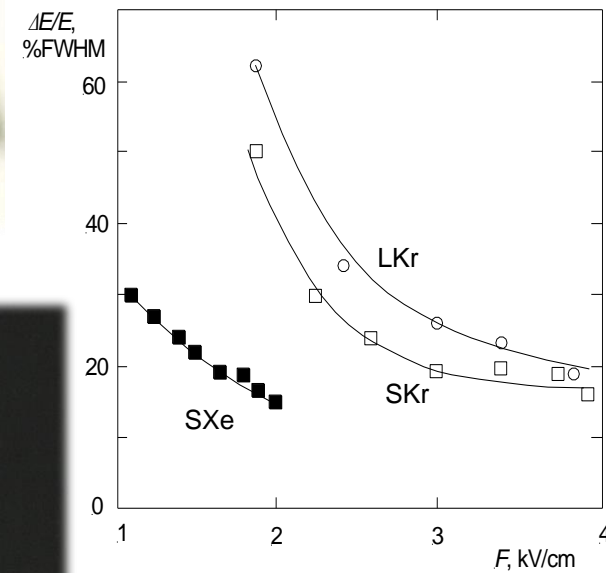
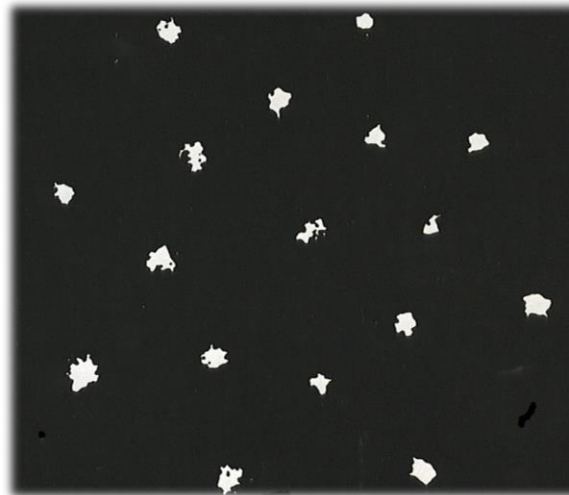
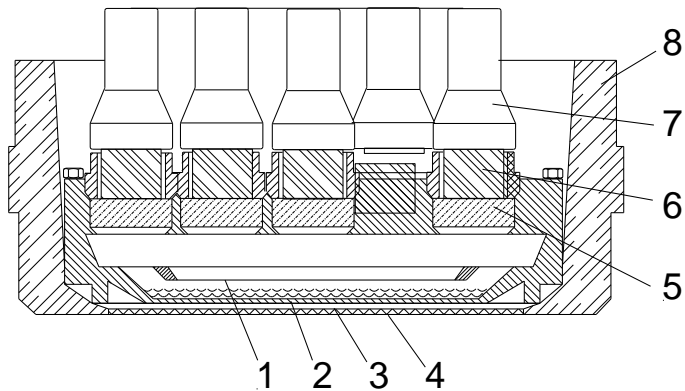
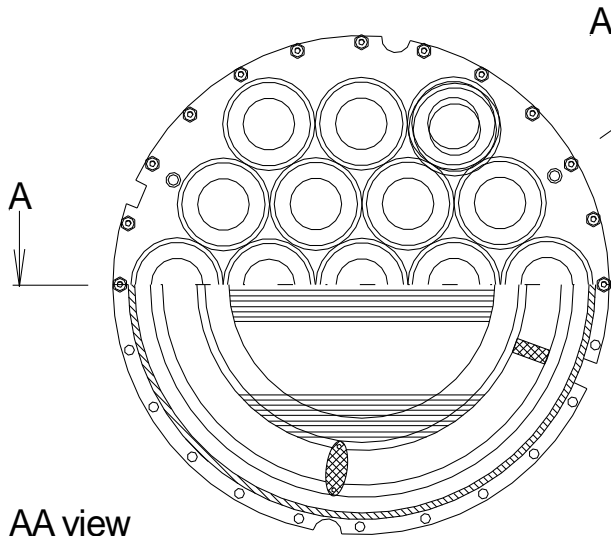
# Эмиссионная стримерная камера на твёрдом криптоне



Болоздыня А.И., Егоров О.К., Коршунов А.А., Соколов Л.И., Мирошниченко В.П., Родионов Б.У. Первые наблюдения треков частиц в конденсированном веществе, полученные эмиссионным методом, *Письма в ЖЭТФ*, 1977, т. 25, стр. 401-404

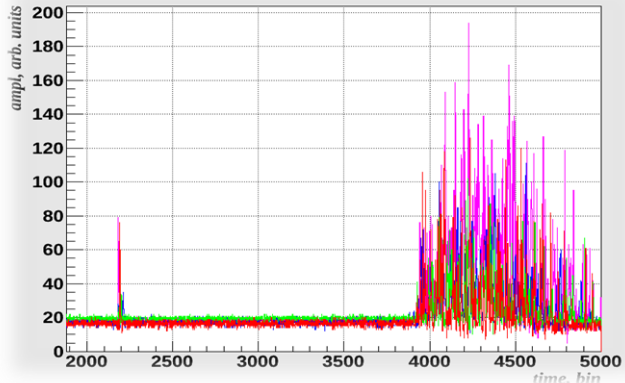
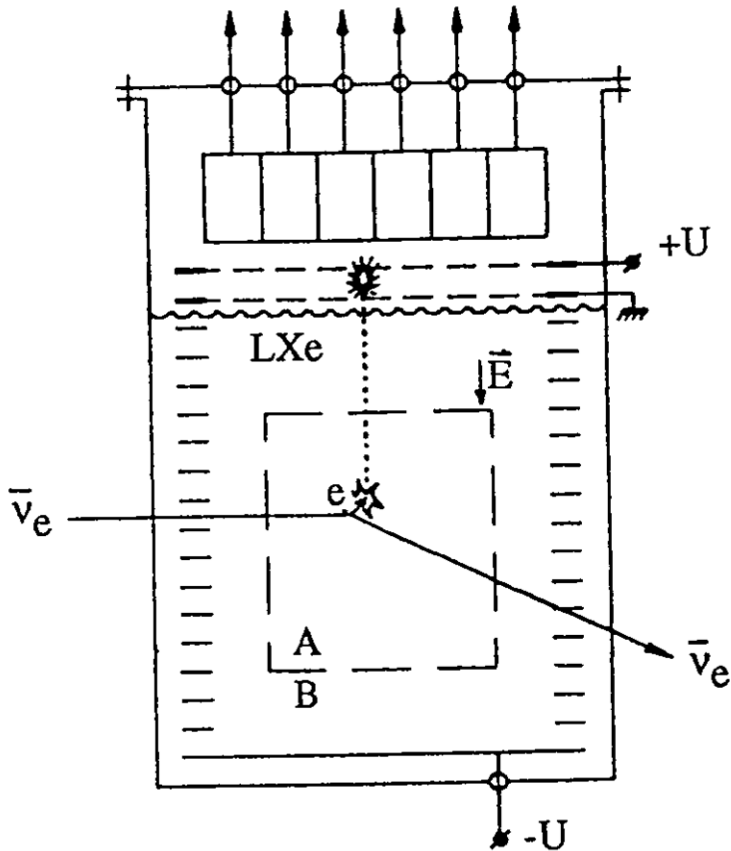
1982-1985

# 2D электро-люминесцентная эмиссионная гамма камера на твёрдом ксеноне для ядерной медицины



Egorov, V. V., Miroshnichenko, V. P., Rodionov, B. U., Bolozdynya, A. I., Kalashnikov, S. D. and Krivoshein, V. L. Electroluminescence emission gamma-camera, *Nucl. Instrum. Meth.* 1983, v.205, pp. 373-374.

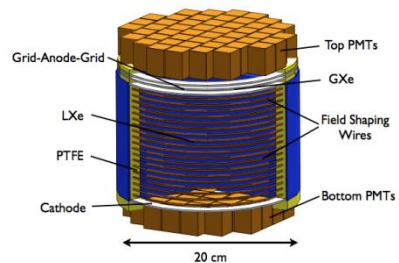
# 1995 Выдвинута идея эмиссионного детектора «без стенок» для поиска ТМ и регистрации нейтрино



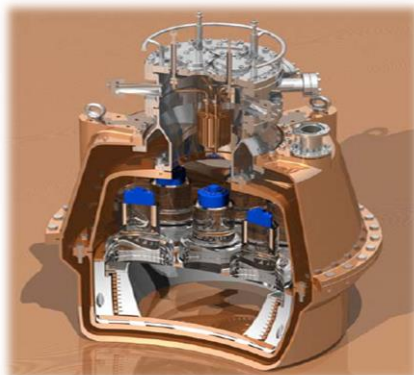
- Чувствителен к одиночным электронам
- Двойной сигнал: возбуждение и ионизация среды
- «Само-экранировка»
- Большая масса
- Можно использовать для поиска редких и слабых сигналов

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

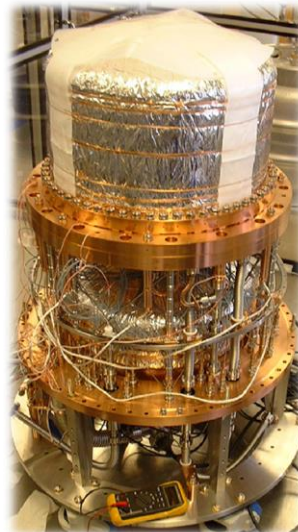
# 2003-2021 Эмиссионные детекторы для поиска Тёмной Материи



**XENON 10**



**ZEPLIN II**



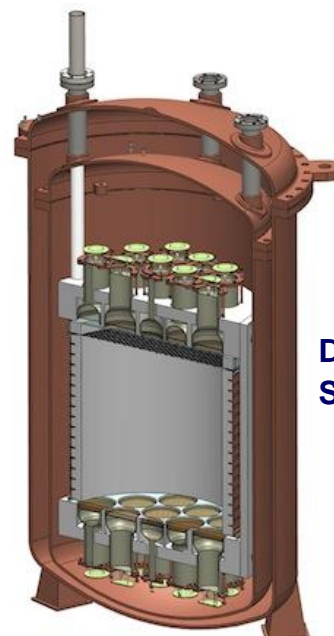
**ZEPLIN III**



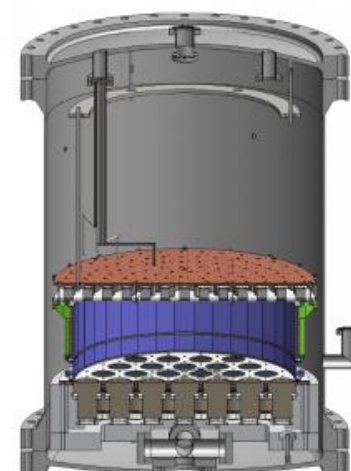
**LUX**



**XENON 100**



**DARK  
SIDE**

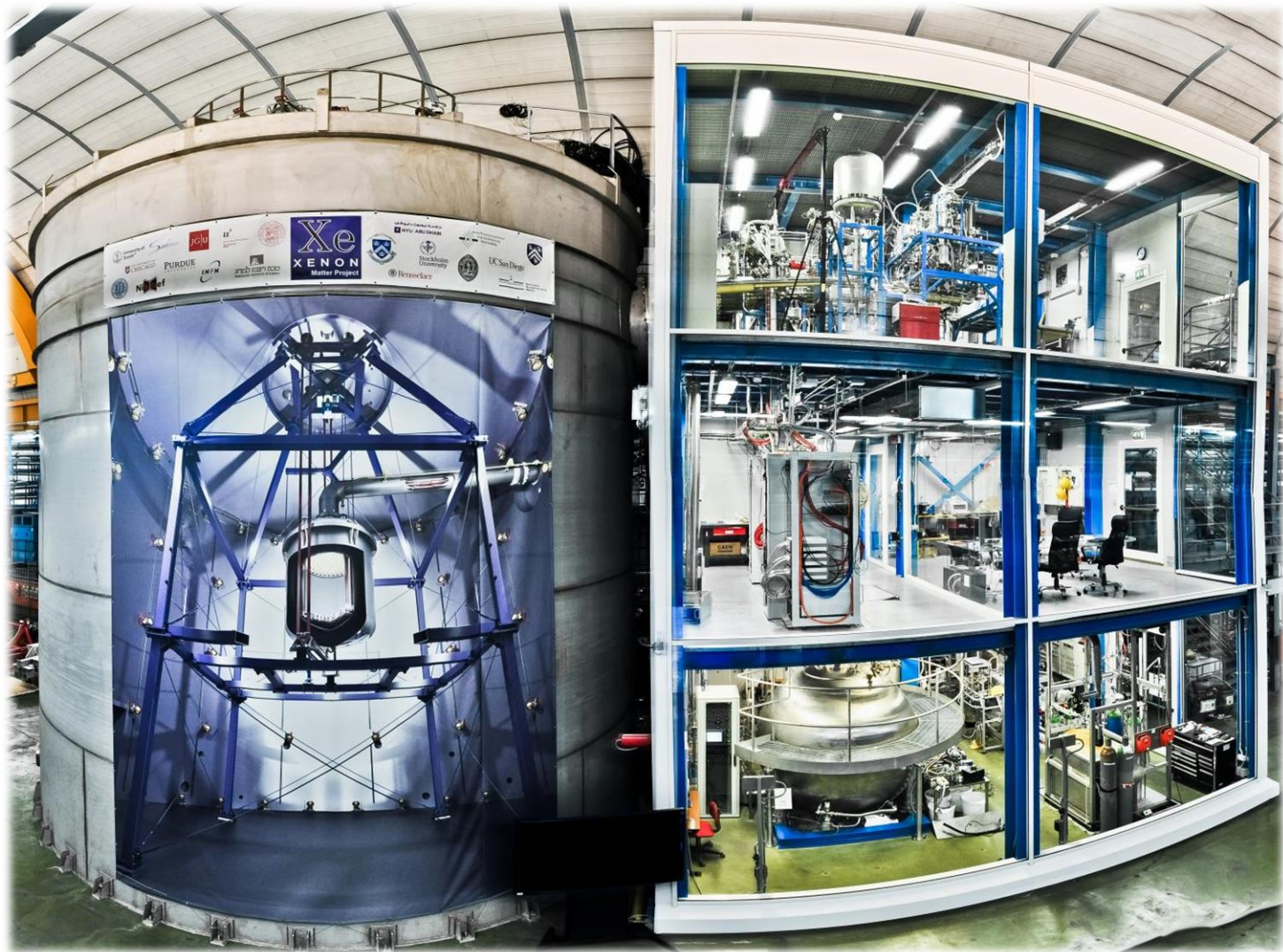


**PANDA-X**



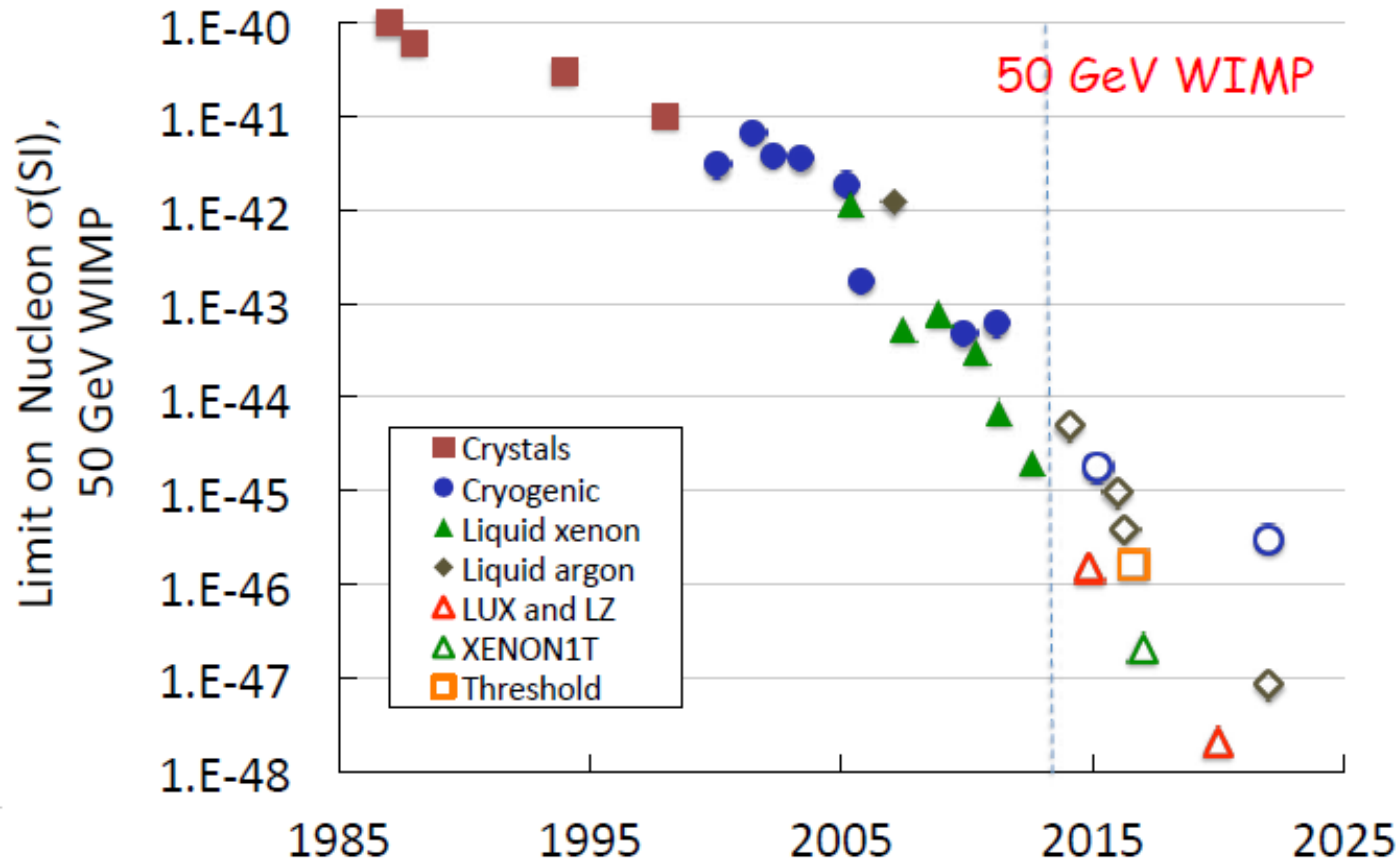
**The 8-m diameter LUX water tank (to contain LZ), Davis Campus, 4850-ft u/g level, Sanford Underground Research Facility**

H. ARAUJO



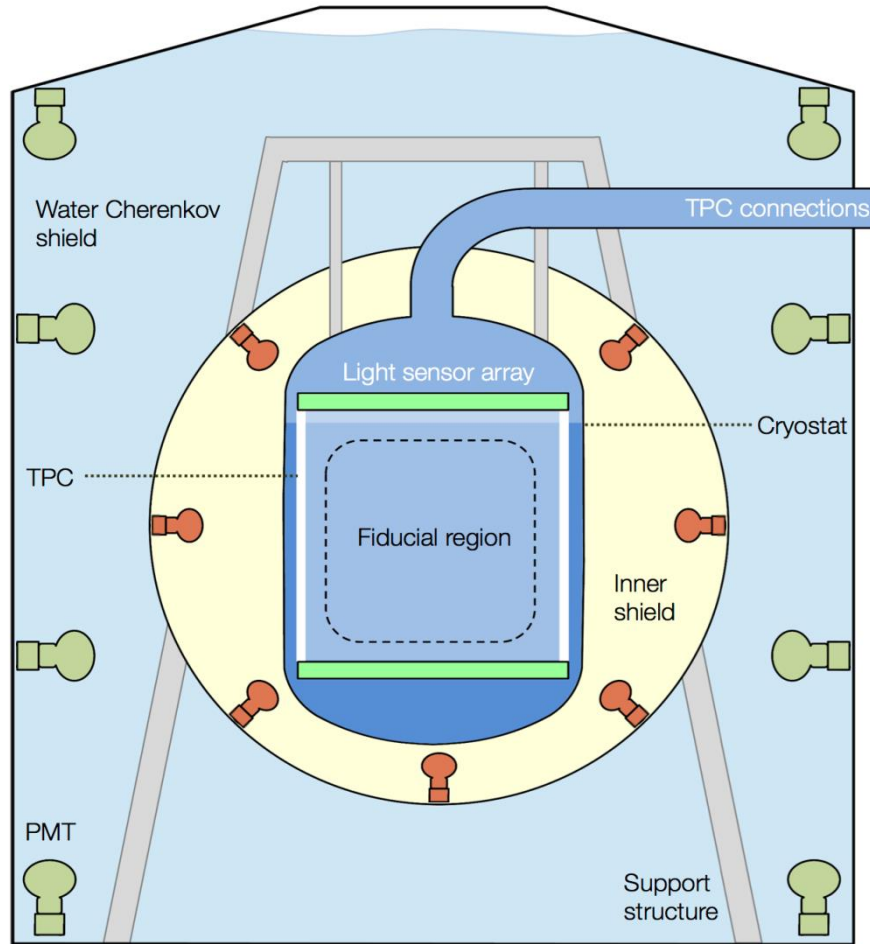
Детектор **XENON1T** в подземной лаборатории в Гран Сассо (Италия)

# Результаты экспериментов по поиску Тёмной Материи по мере совершенствования технологии регистрации



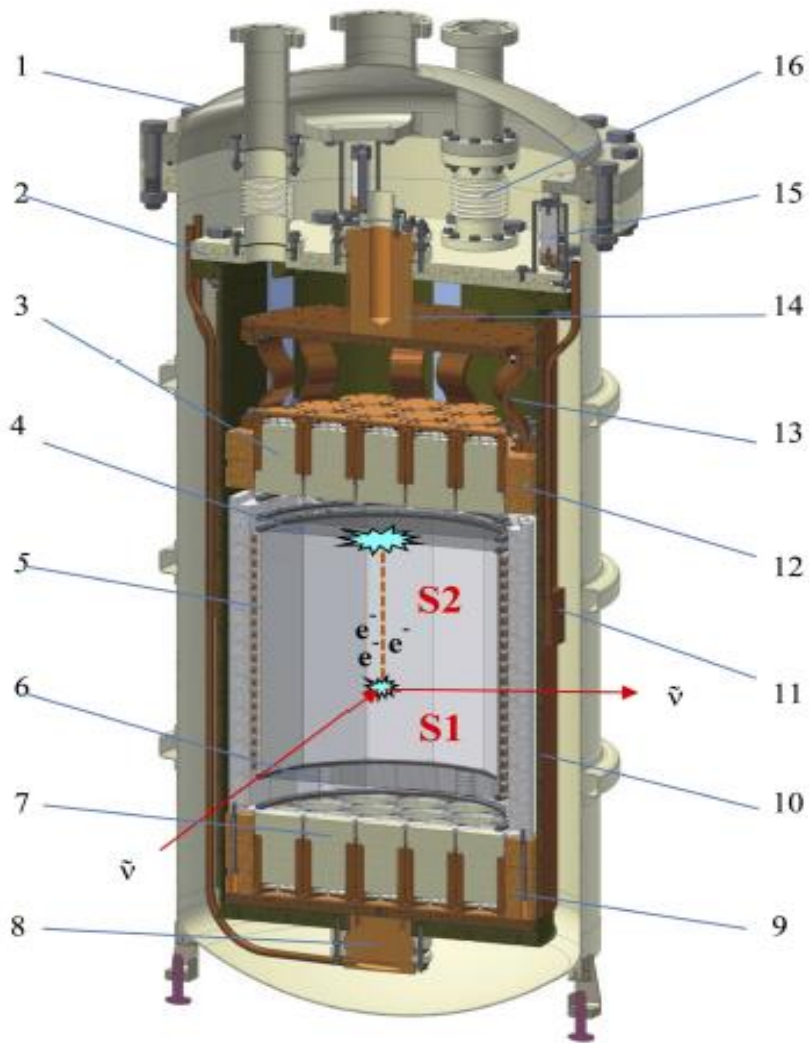
Plots compiled by  
Mike Witherell, UCSB

G3



40 тонн  
LXe



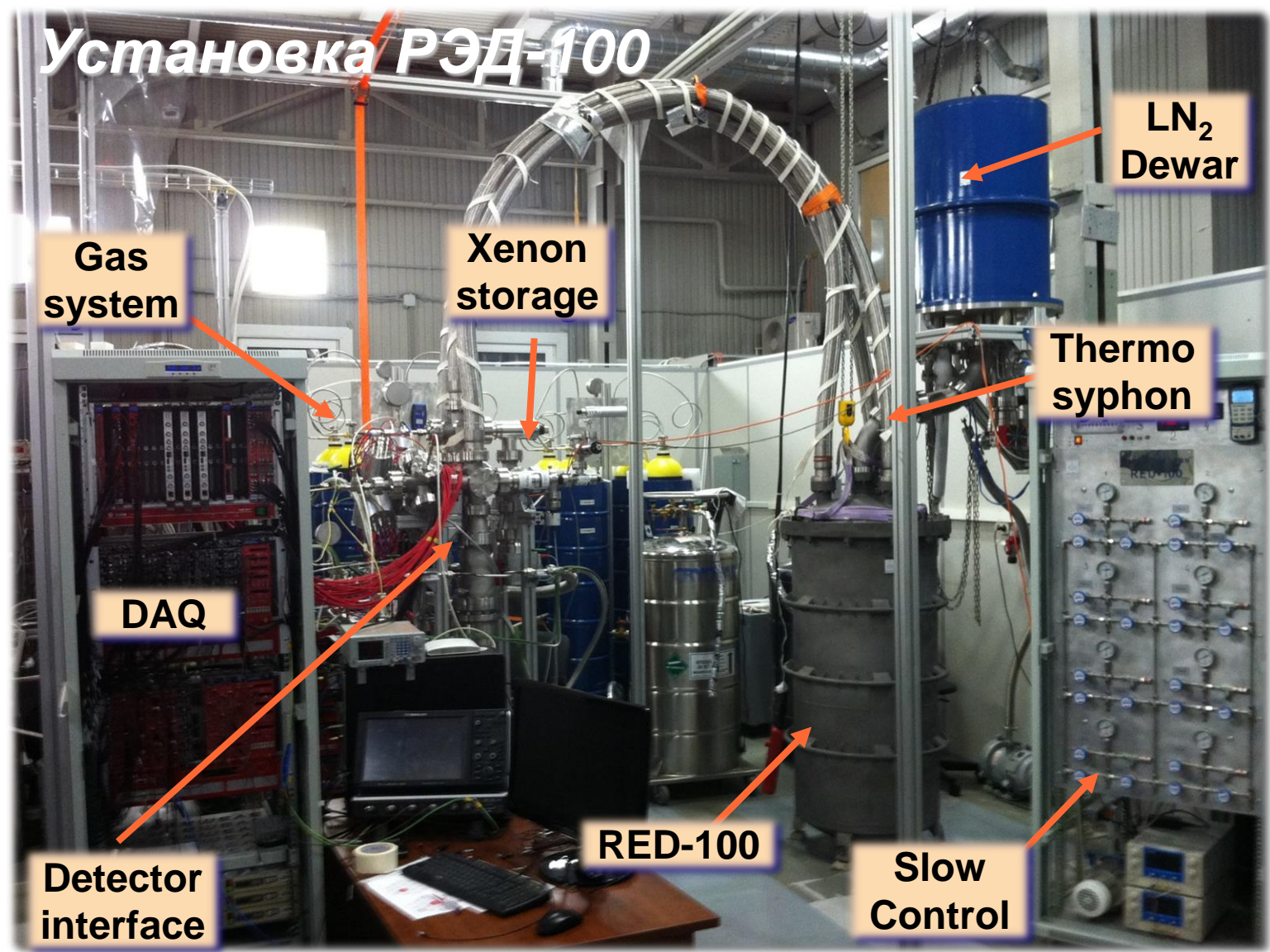


## Детектор РЭД-100 (построен в МИФИ в 2012-2018)

1 – внешний (тёплый) сосуд криостата,  
 2 – внутренний (холодный) сосуд криостата,  
 3 – верхняя матрица из девятнадцати ФЭУ типа HAMAMATSU R11410-20,  
 4 – сетчатый анод и вытягивающая сетка,  
 5 – рабочий объем, окруженный тефлоновым отражателем со встроенными полезадающими электродами,  
 6 – сетчатый катод,  
 7 – нижняя матрица из девятнадцати ФЭУ,  
 8 – нижний центральный теплосъемник с термосифоном,  
 9 – медная обойма для нижней матрицы ФЭУ,  
 10 – медный кожух холодного сосуда криостата,  
 11 – один из двух боковых теплосъемников с термосифонами,  
 12 – медная обойма верхней матрицы ФЭУ,  
 13 – гибкий тепловой мост,  
 14 – верхний центральный теплосъемник с медным диском, на котором конденсируется ксенон,  
 15 – теплоизолирующий подвес на основе материала Vespel,  
 16 – сильфонная тепловая развязка на трубопроводе для вывода кабелей.

50 cm

# Установка РЭД-100



Gas system

Xenon storage

LN<sub>2</sub> Dewar

Thermo syphon

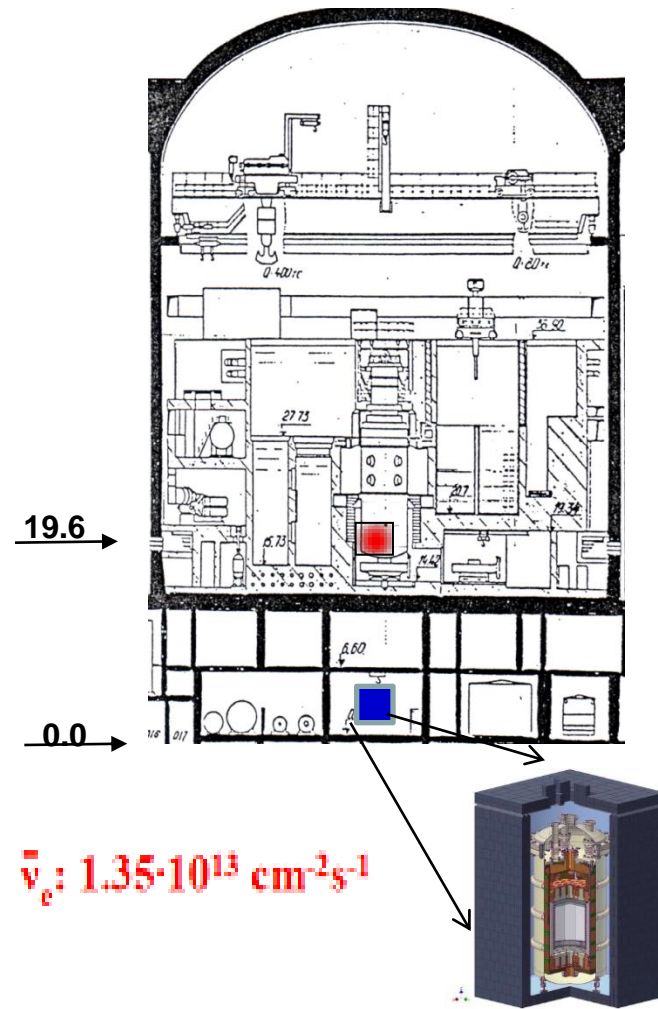
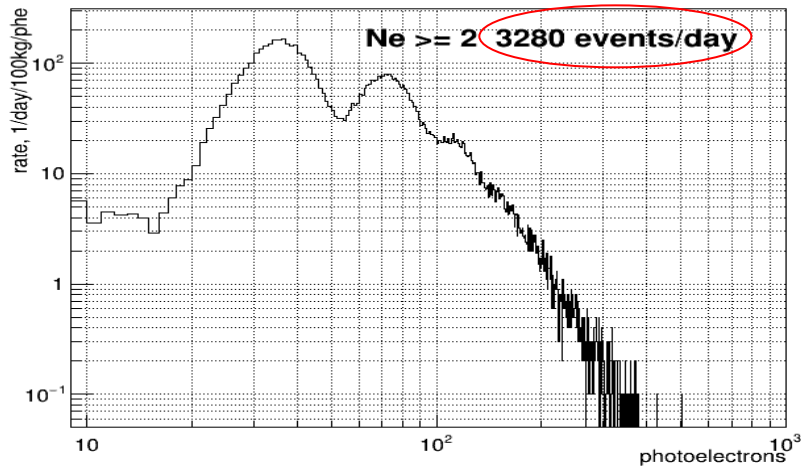
DAQ

Detector interface

RED-100

Slow Control

# Эксперимент РЭД-100, идущий на Калининской АЭС



# Заключение

- **Разработка новых методов регистрации элементарных частиц активно ведётся в НИЯУ МИФИ**
- **Эмиссионные двухфазные детекторы**, впервые введённые в экспериментальную практику в МИФИ в лаборатории *Бориса Анатольевича Долгошеина*, заняли уникальную нишу в арсенале современных экспериментальных методов поиска тёмной материи и обещают прорыв в области нейтринной физики.
- **Эксперимент второго поколения *G2* по прямой регистрации тёмной материи в 2015-2025 гг.** использует эмиссионный детектор *LZ*, содержащий 8 тонн жидкого ксенона.
- **Ожидается, что третье поколение таких детекторов *G3*** массой до 50 тонн жидкого ксенона будет использоваться для решения нескольких фундаментальных задач одновременно.
- **Лаборатория экспериментальной ядерной физики НИЯУ МИФИ** является базой для российского участия в ***G2 + G3*** экспериментах и развития **нового метода контроля** за ядерными реакторами