



**Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»**

Институт ядерной физики и технологий

Лаборатория экспериментальной ядерной физики

<http://enpl.mephi.ru/>

А.И. Болоздыня

Экспериментальная ядерная физика

Лекция №4

Методы регистрации ядерных частиц

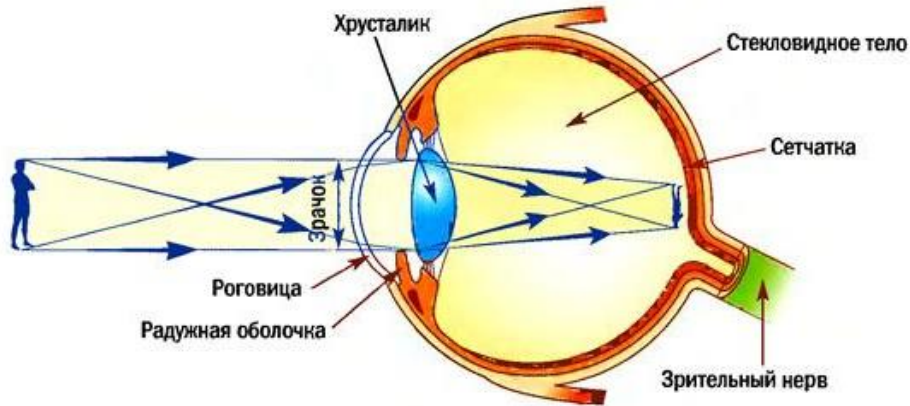
2017

Лекция №4

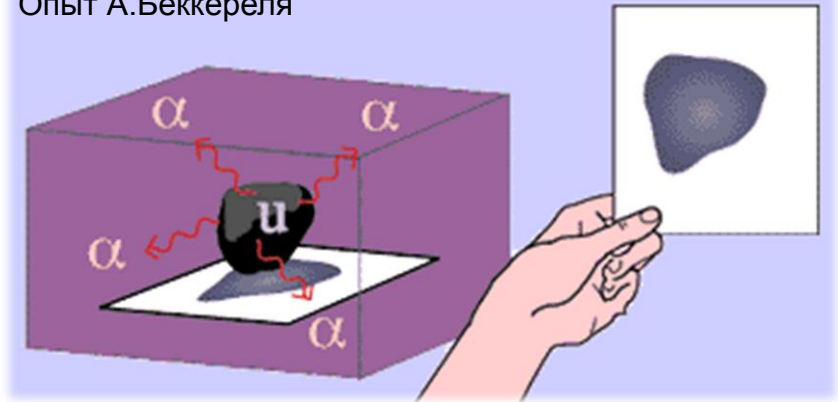
Методы регистрации ядерных частиц

- 1. Как увидеть невидимое?**
- 2. Трековые детекторы**
- 3. Газовые детекторы**
- 4. Фотодетекторы**
- 5. Полупроводниковые детекторы**
- 6. Методы идентификации частиц**

1. Как увидеть невидимое?



Опыт А.Беккереля



Информативность ядернофизического эксперимента определяется возможностями тех детекторов и методов регистрации ядерных излучений, которые в нём используются.

История ядерной физики - это, по-существу, история создания новых приборов и методов регистрации частиц с рекордными на момент создания характеристиками. Значительное количество Нобелевских премий получено изобретателями и разработчиками новых методов регистрации.

Детекторы служат как для регистрации частиц, так и для определения их характеристик: энергии, импульса, траектории движения, удельных ионизационных потерь и др.

Часто в экспериментах приходится выделять «полезные» события на гигантском фоне «посторонних» событий, которых может быть в миллиарды раз больше. Для этого используются различные комбинации детекторов и методов регистрации, применяют схемы совпадений или антисовпадений между событиями, зарегистрированными различными детекторами, проводят отбор событий по амплитуде и форме сигналов, по ионизационным потерям, по форме траекторий в детекторе и т. д.

Первым прибором, который использовался для регистрации излучений был глаз, который сам по себе является чрезвычайно сложным и высокочувствительным детектором фотонов.

The Nobel Prize in Physics 1903



Antoine Henri
Becquerel
Prize share: 1/2



Pierre Curie
Prize share: 1/4

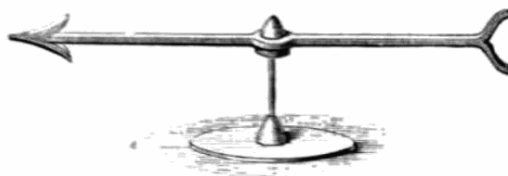


Marie Curie, née
Skłodowska
Prize share: 1/4

The Nobel Prize in Physics 1903 was divided, one half awarded to Antoine Henri Becquerel *"in recognition of the extraordinary services he has rendered by his discovery of spontaneous radioactivity"*, the other half jointly to Pierre Curie and Marie Curie, née Skłodowska *"in recognition of the extraordinary services they have rendered by their joint researches on the radiation phenomena discovered by Professor Henri Becquerel"*.

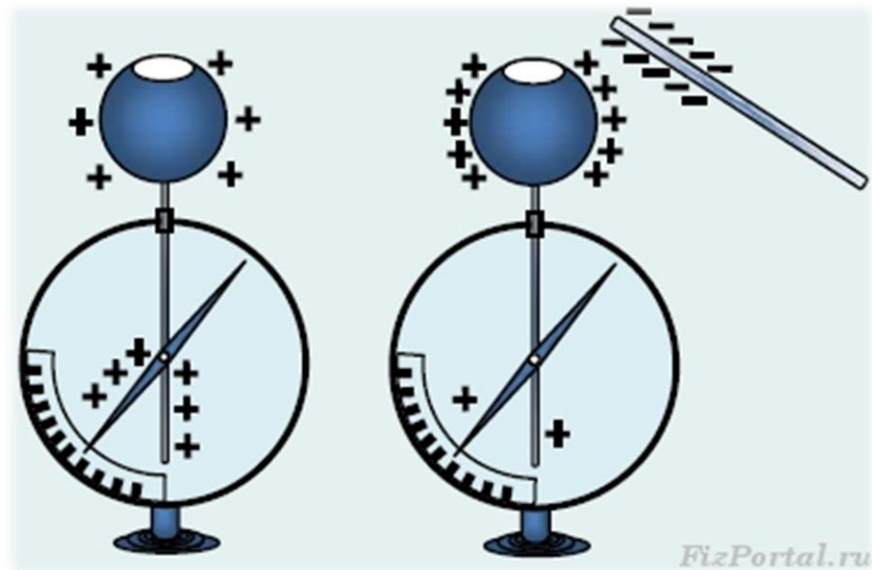
Photos: Copyright © The Nobel Foundation

Первые детекторы

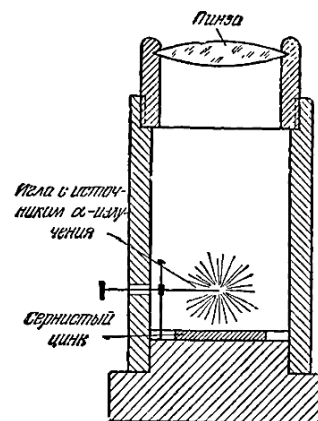
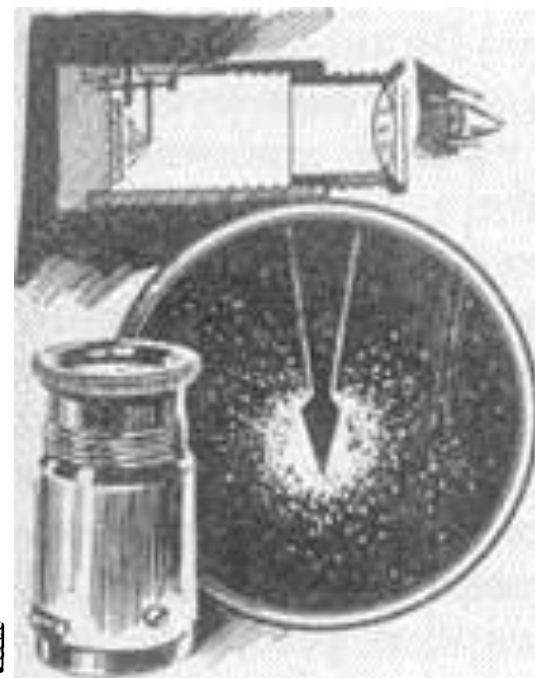


Gilbert's *versorium*
(~1600)

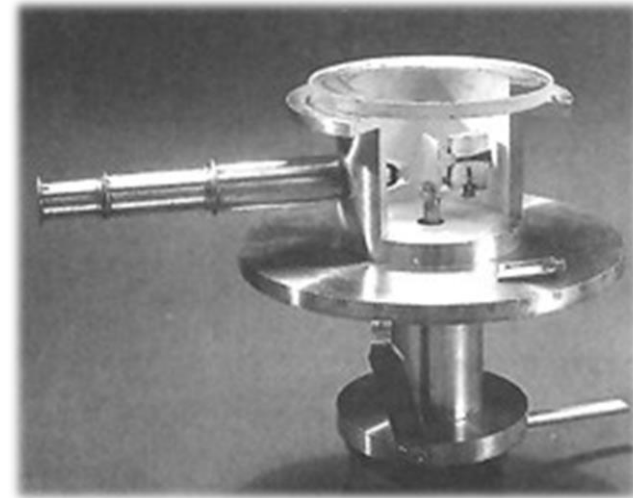
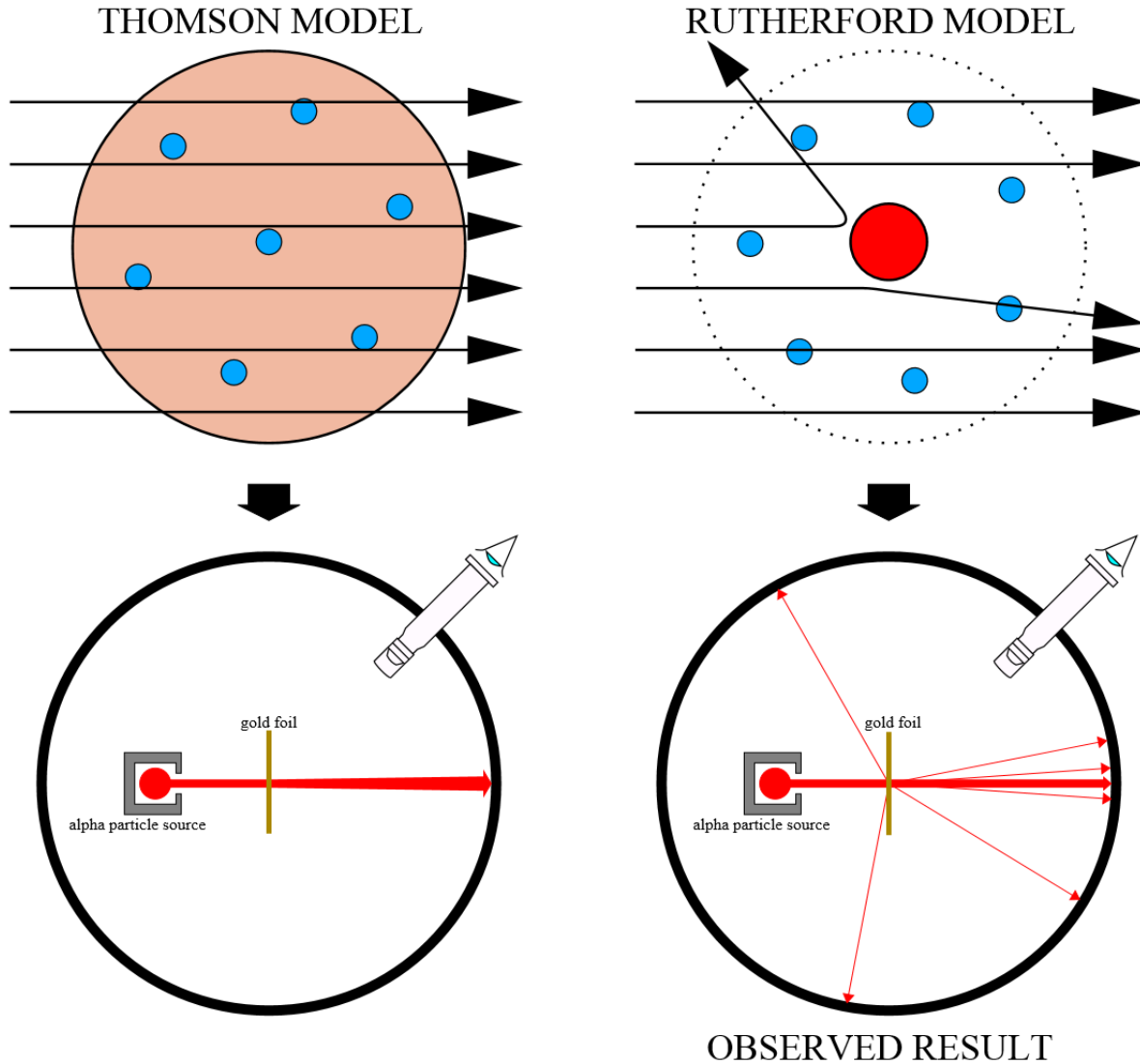
Electroscope



Spintariscope by W. Crooks
(1903)



Эксперимент Гейгера-Мардсена (1908-1913)



Модель установки Гейгера-Мардсена

Основные характеристики детекторов

- **эффективность регистрации** - вероятность регистрации частицы при попадании её в детектор
- **временное разрешение** - минимальное время, в течение которого детектор фиксирует две частицы как отдельные события
- **мёртвое время** или время восстановления - время, в течение которого детектор после регистрации частицы либо вообще теряет способность к регистрации следующей частицы, либо существенно ухудшает свои характеристики
- **энергетическое разрешение** - точность определения энергии частицы
- **пространственное разрешение** - точностью определения координаты частицы

2. Трековые детекторы

При определенных условиях траекторию заряженной частицы, можно сделать видимой. Для этого используются трековые детекторы.

По траектории (треку) можно определить некоторые базовые характеристики частицы и даже идентифицировать её; можно также исследовать редкие события и реакции частиц

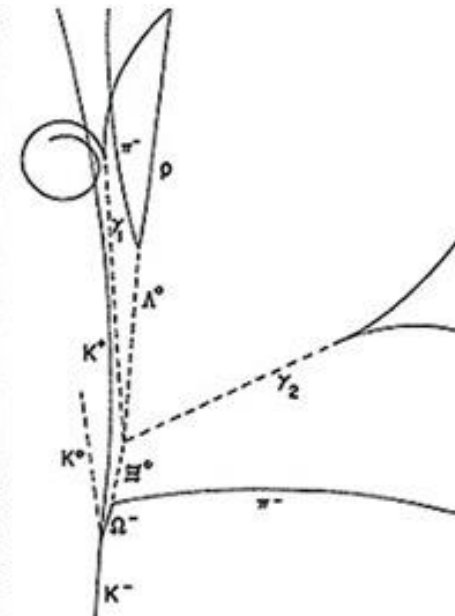
Условно трековые или координатные детекторы можно разделить на две большие группы

Фильмовые

- Ядерные фотоэмульсии
- Диэлектрические детекторы
- Камера Вильсона
- Диффузионная камера
- Пузырьковая камера
- Искровая камера

Безфильмовые

- Многопроволочная пропорциональная камера
- Дрейфовая камера
- Время-проекционная камера
- Микростриповый детектор
- Детекторы MICROMEGAS



Типичные пространственные и временные характеристики трековых и координатных детекторов

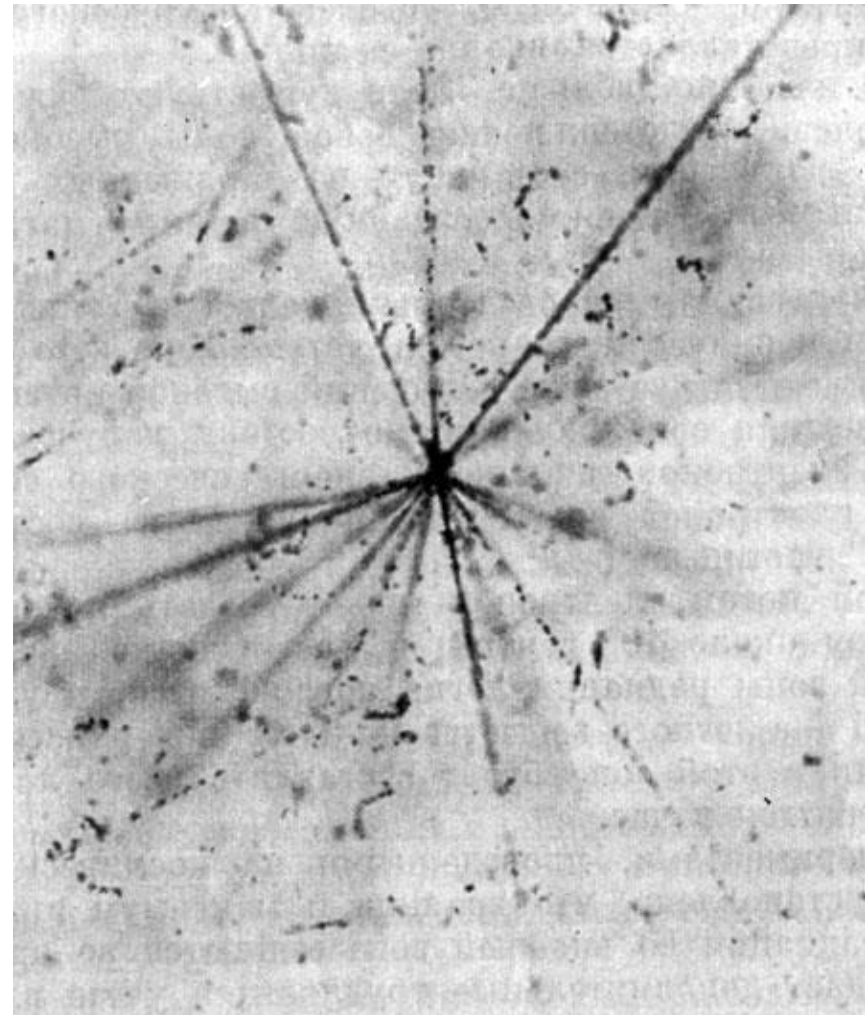
Тип детектора	Пространственное разрешение, мм	Временное разрешение, сек	Мертвое время, сек
Эмульсии	10^{-3}	-	-
Камера Вильсона	0.3	0.1	0.01
Диффузионная камера	0.5	1	-
Пузырьковая камера	0.1	10^{-3}	0.1
Искровая камера	0.1-0.3	10^{-6}	10^{-8}
Стримерная камера	0.2-0.3	$2 \cdot 10^{-6}$	0.1
Пропорциональная камера	0.05-0.3	10^{-9} - 10^{-8}	$2 \cdot 10^{-7}$
Дрейфовая камера	0.1-0.2	$2 \cdot 10^{-9}$	10^{-7}
Кремниевые микроstriпы	0.01-0.02	10^{-8}	10^{-8}

Фильмовые трековые детекторы

называют группу детекторов, в которых при прохождении заряженной частицы возникает визуально наблюдаемый *след (трек)* этой частицы.

Фильмовые трековые детекторы сыграли выдающуюся роль в силу наглядности и возможности получения исчерпывающей пространственной картины изучаемого процесса.

С помощью этих детекторов были открыты элементарные частицы *позитрон, мюон, пионы, странные и очарованные частицы*, а также исследовались *ядерные распады и реакции*.

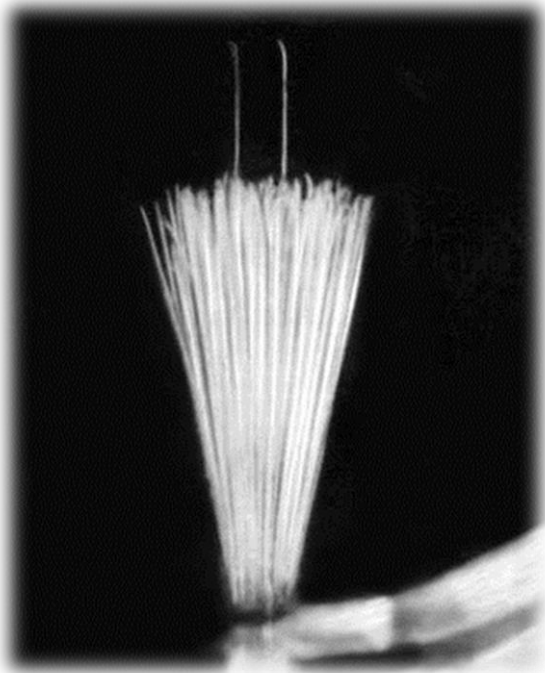


Микрофотография ядерного взаимодействия, зарегистрированного в *фото эмульсии* на борту советского космического корабля-спутника в 60-е годы

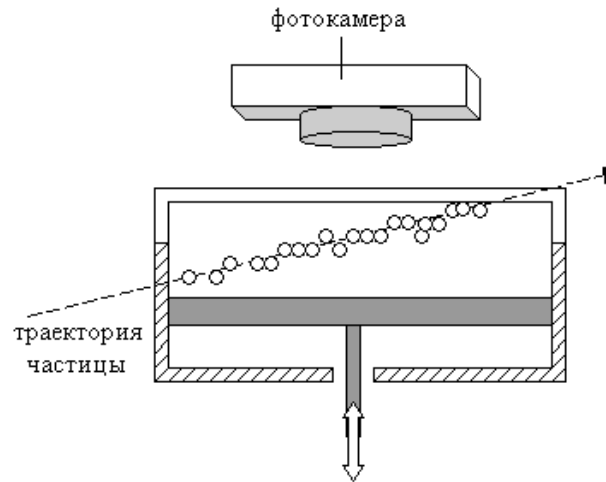
Камера Вильсона (Cloud chamber)



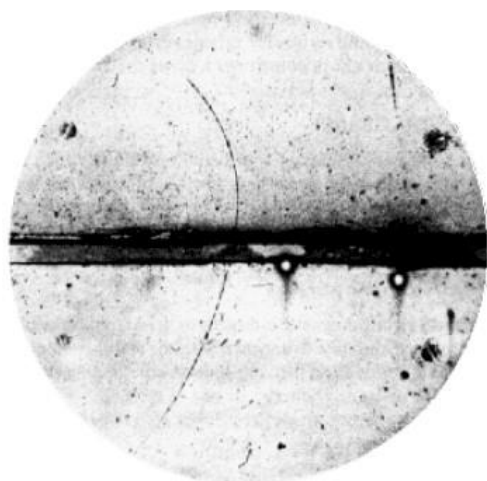
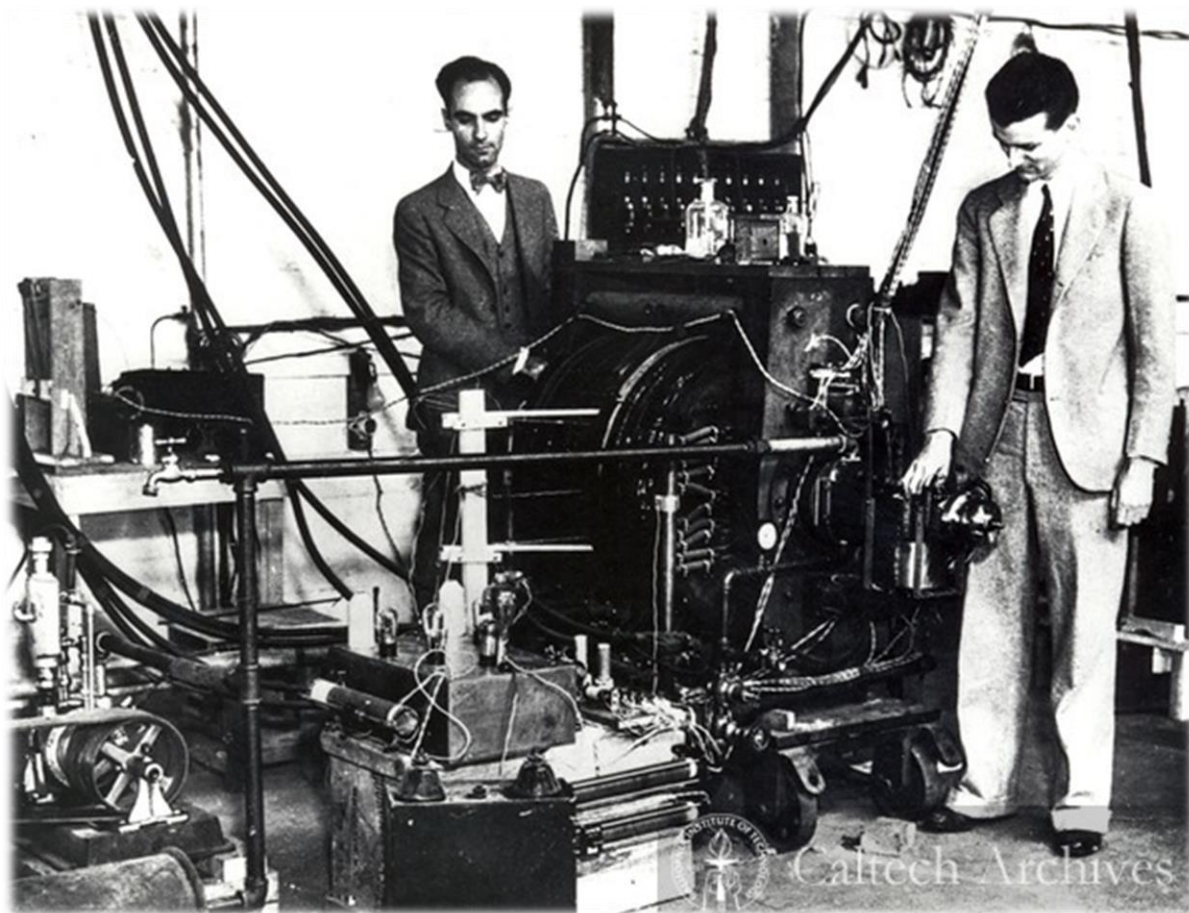
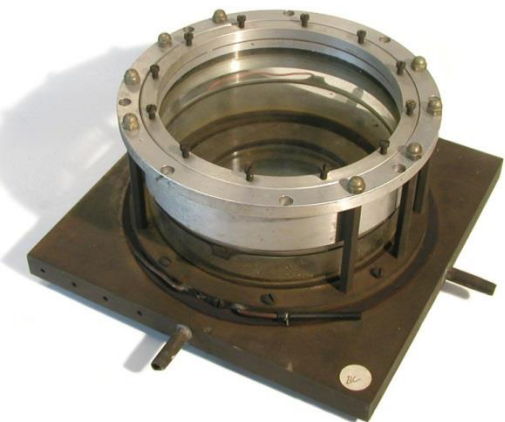
Чарльз Вильсон
(1869-1959), Н.п. 1927



Треки альфа-частиц в камере Вильсона



<https://www.youtube.com/watch?v=noP7HT-Uins>



Карл Андерсен (Carl Anderson) и Сет Недермейер (Seth Neddermeyer) с камерой Вильсона, работающей в магнитном поле.

Это оборудование было использовано Андерсеном для открытия **позитрона** – первого свидетельства существования антиматерии в 1932 году; через четыре года были также открыты **мюоны**.

Оборудование работало **17 лет** в Guggenheim Aeronautical Lab

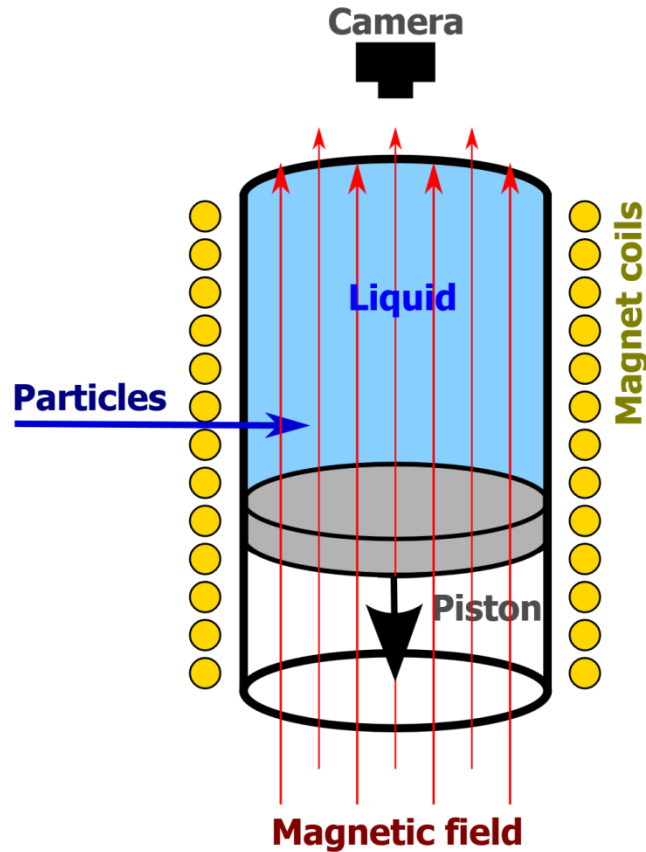


Donald A. Glaser
(1926-2013)
H.n. 1960

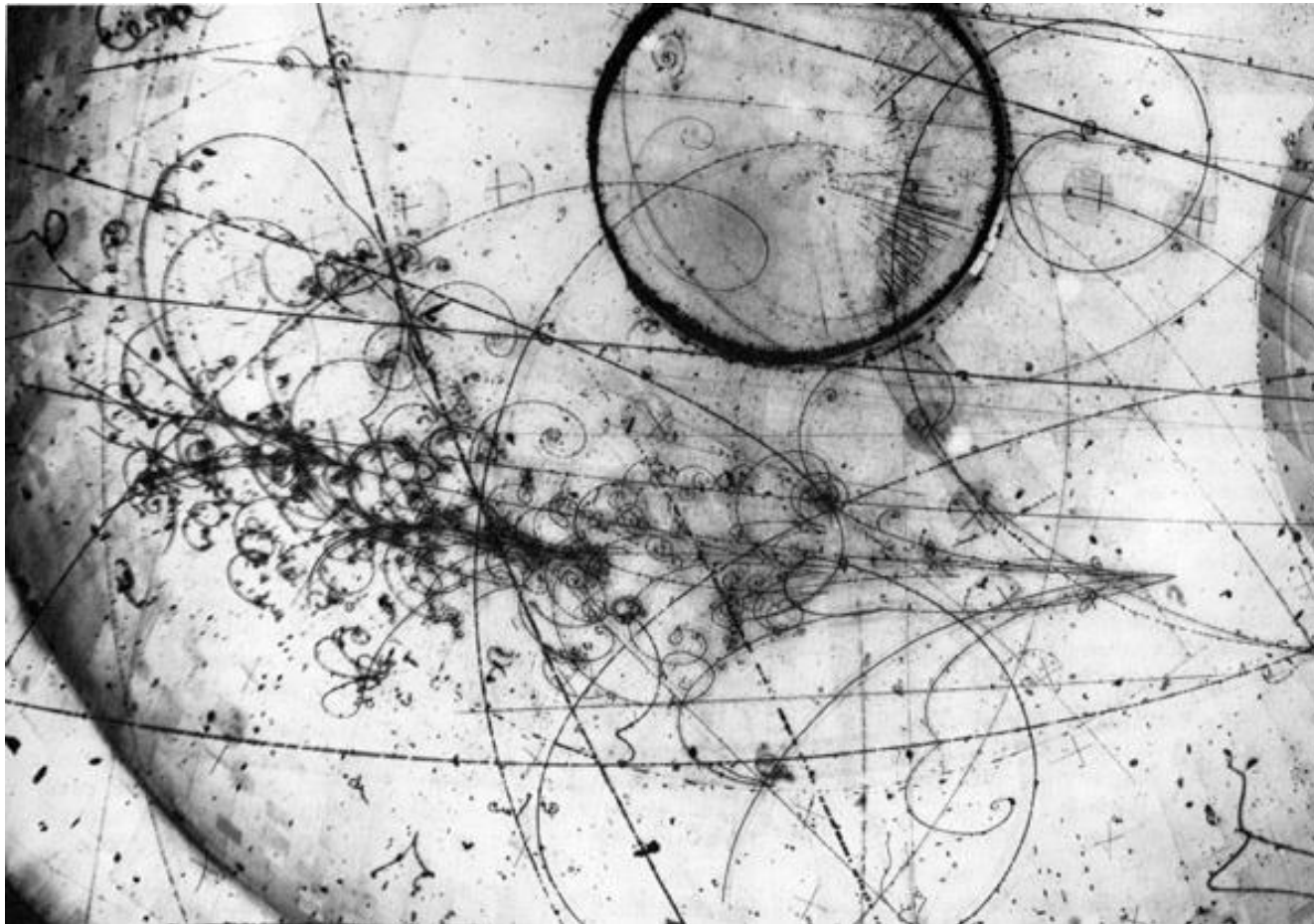
Bubble chamber



Fermilab's disused
15-foot bubble
chamber

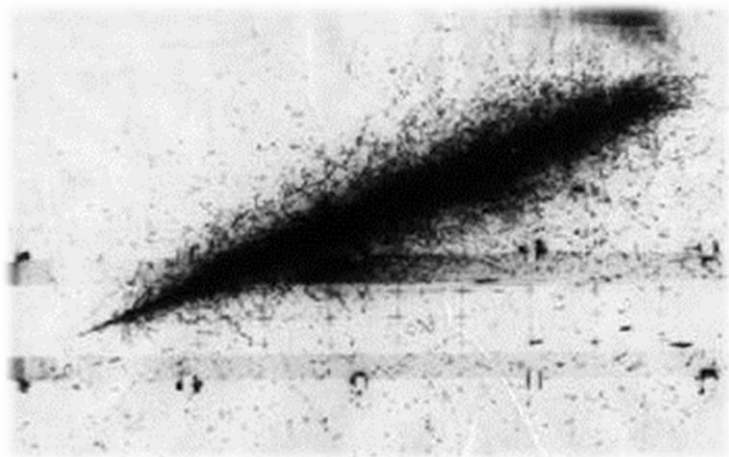
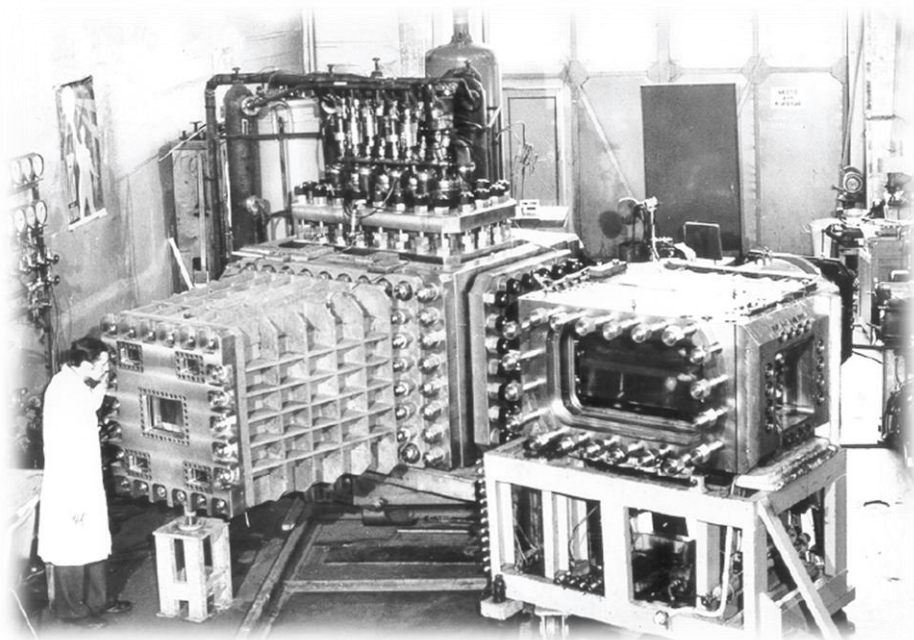


Antiproton-proton annihilation
CERN

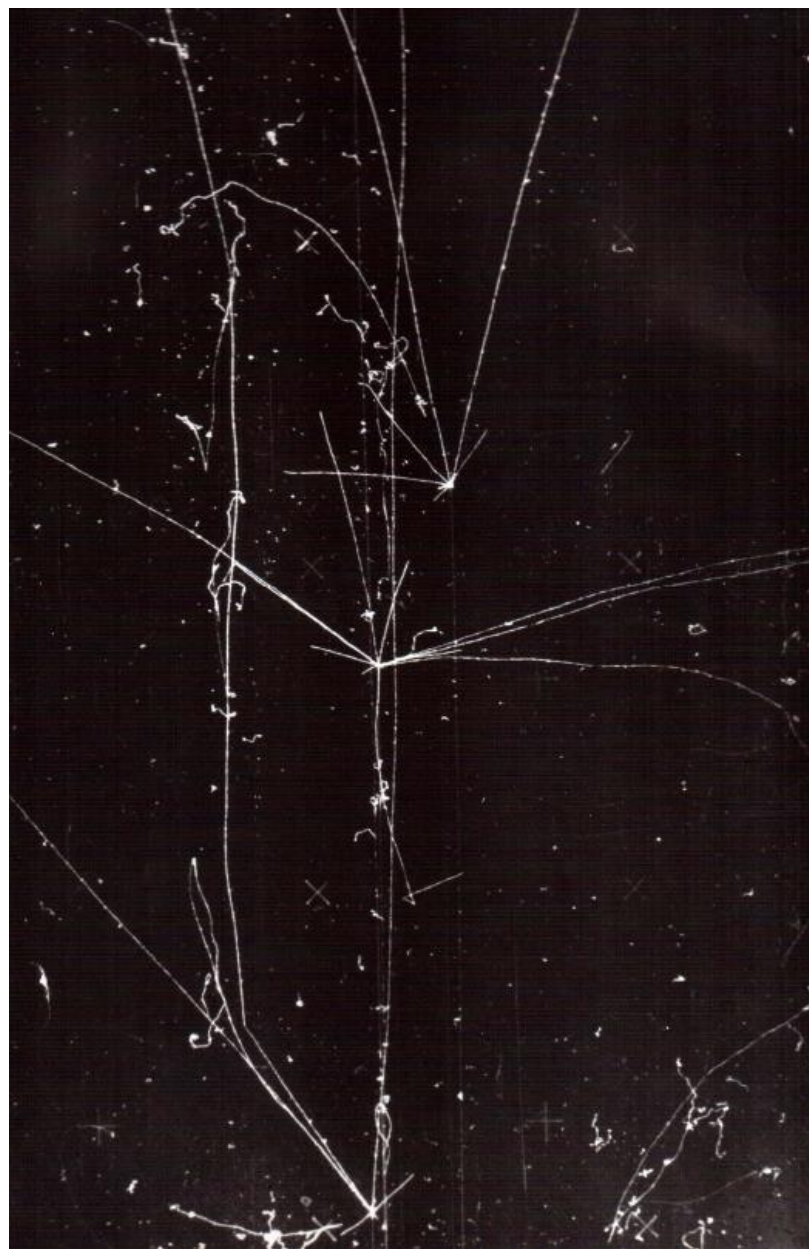


Треки частиц в жидко-водородной 15-футовой пузырьковой камере в магнитном поле 30 кГс от сверхпроводящего магнита

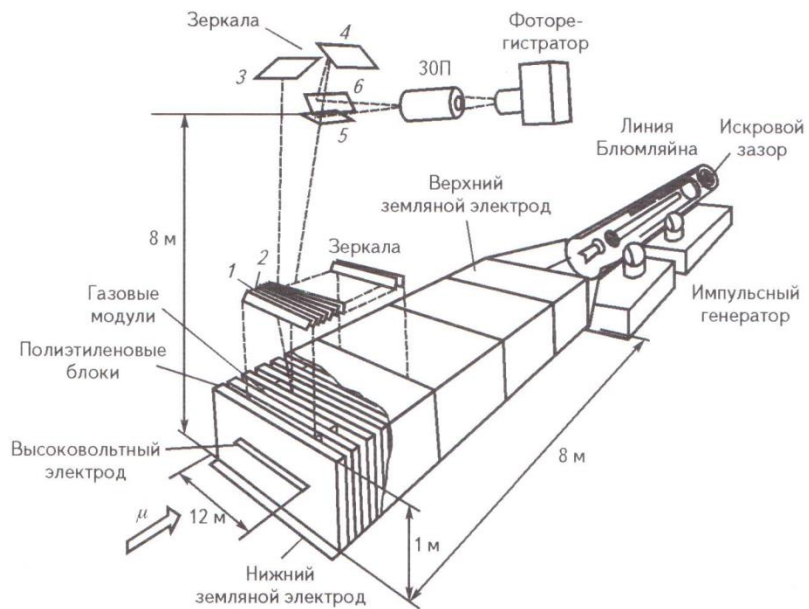
800-литровая жидкоксеронона пузырьковая камера ДИАНА
(ИТЭФ, Москва)



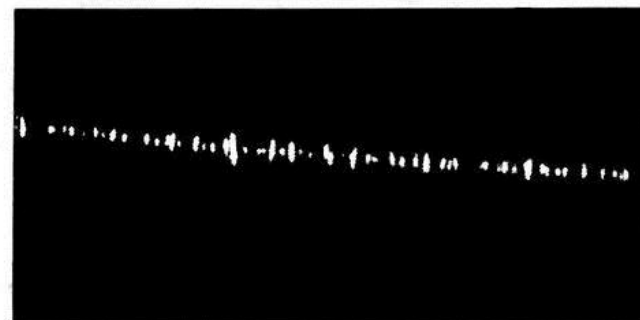
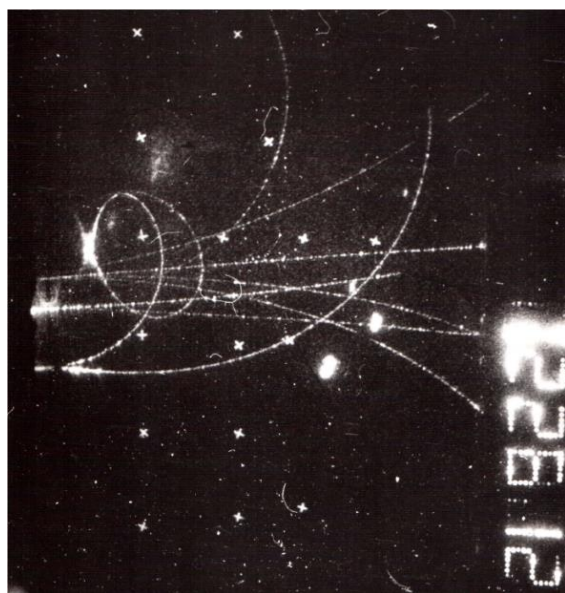
Фотография электромагнитного ливня в
180-литровой ксерононовой камере ИТЭФа



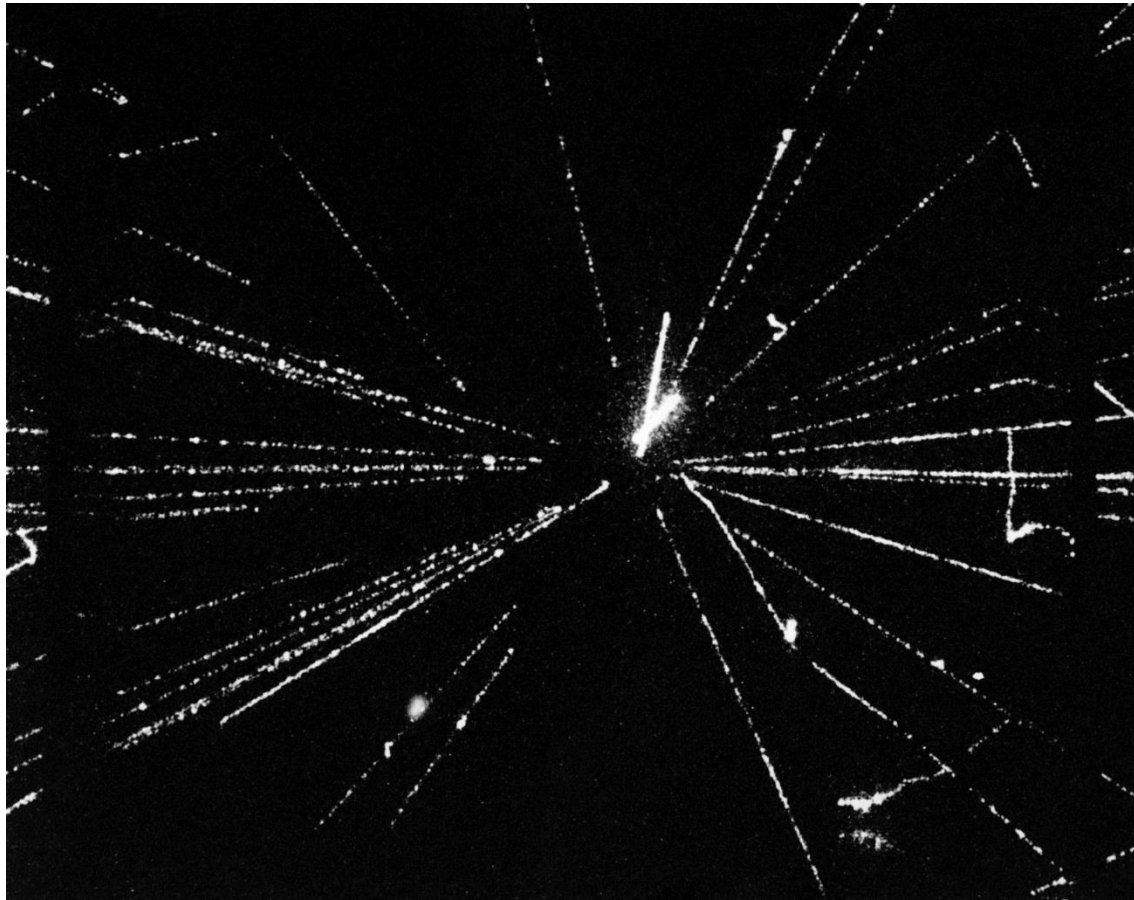
Стримерная камера



Борис Анатольевич Долгошеин
(1930-2010) Л.п.1970



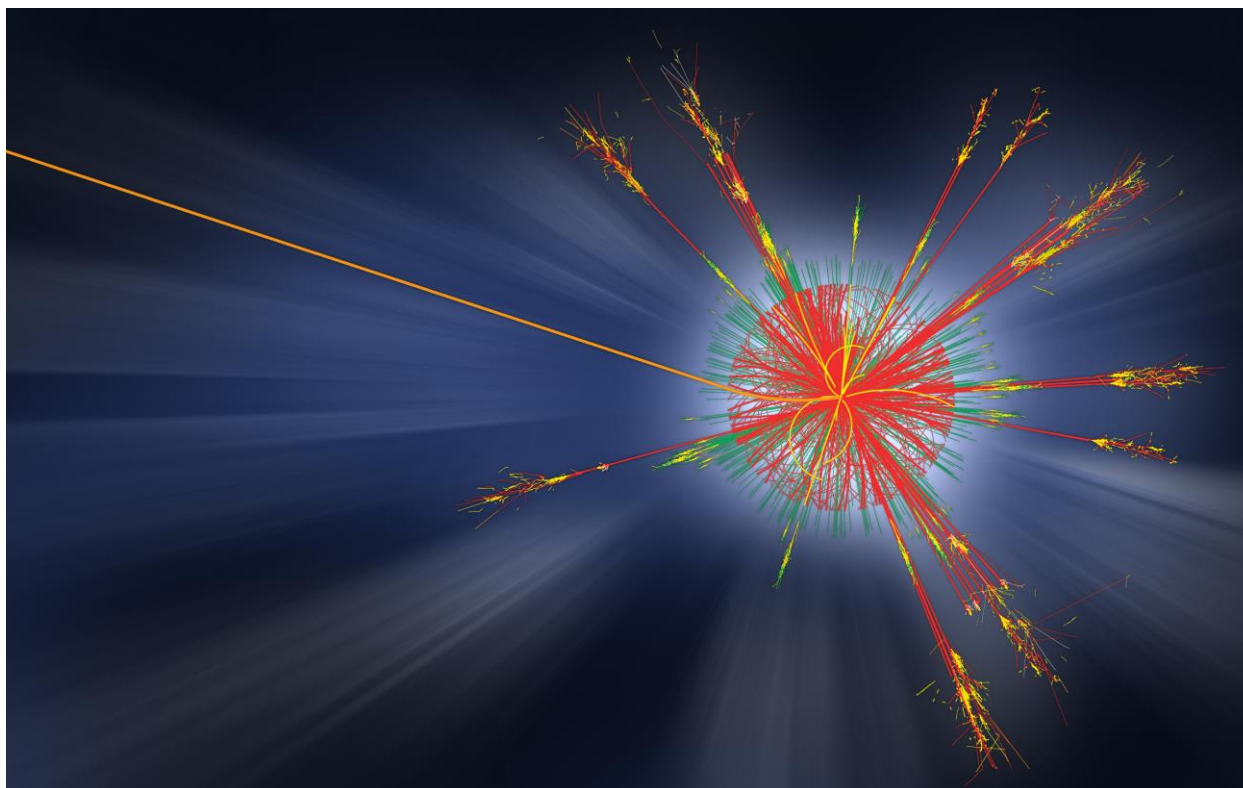
Трек заряженной частицы в стримерной камере



Аннигиляция антипротона в стримерной камере в эксперименте UA5 (CERN)

Безфильмовые трековые детекторы

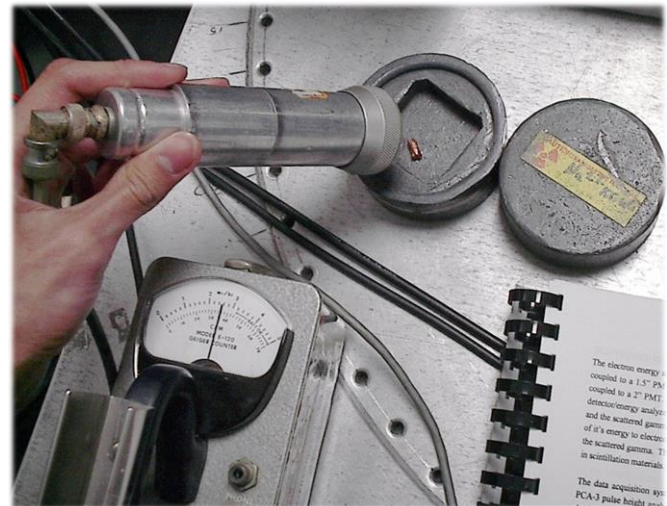
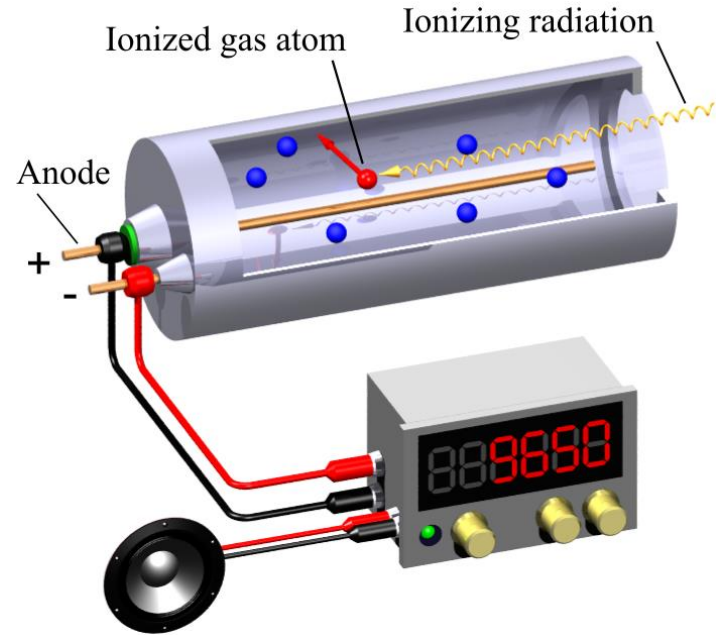
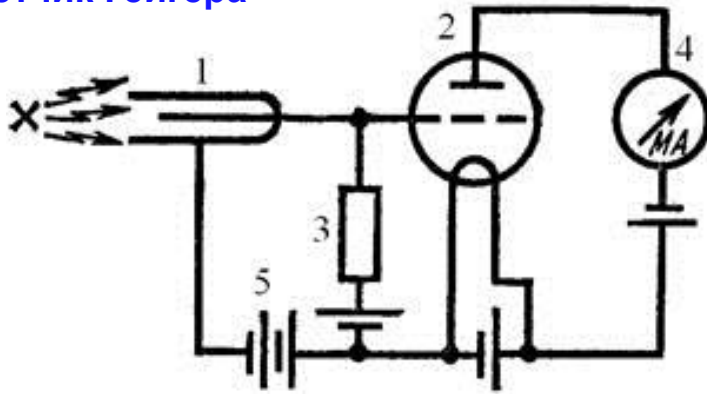
с цифровой реконструкцией треков создают чаще всего на базе газовых детекторов или комбинации различных детекторов, включая многопроволочные камеры, кремниевые микроstriповые камеры, детекторы переходного излучения, волоконные сцинтилляционные детекторы и др.



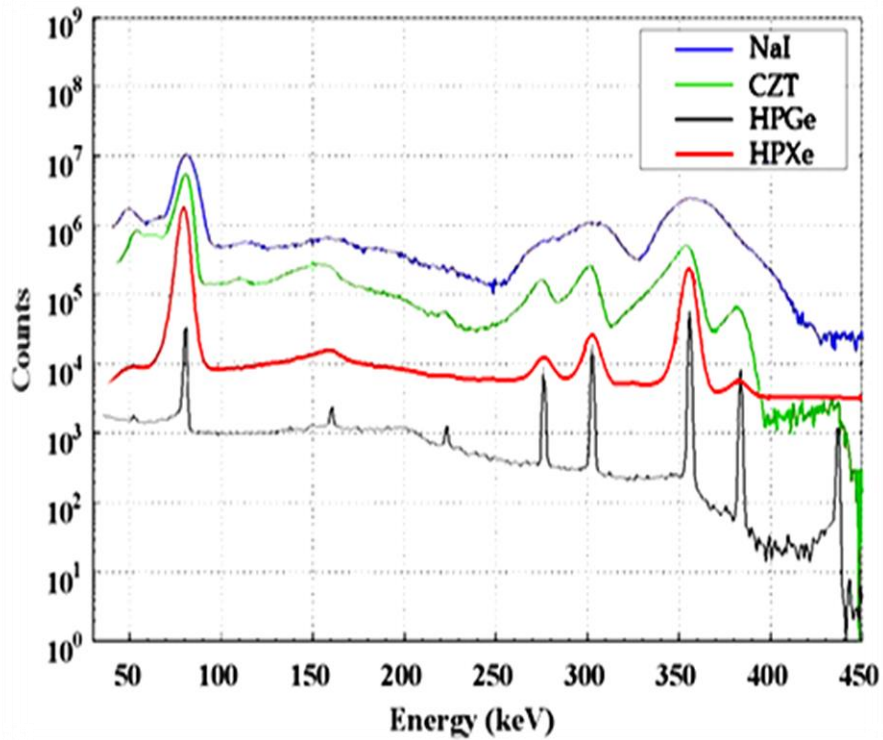
3. Газовые детекторы

Газоразрядные детекторы

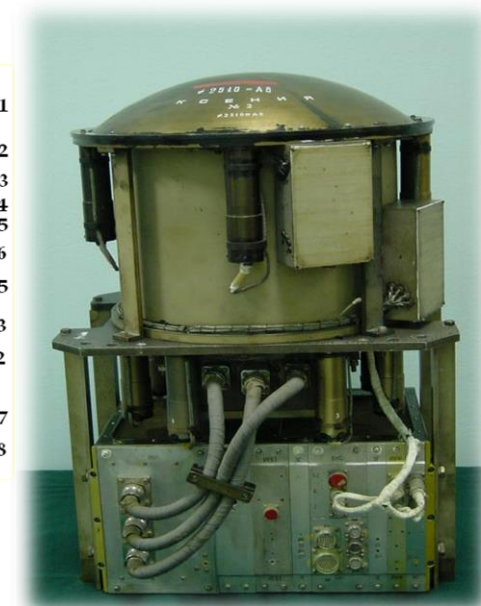
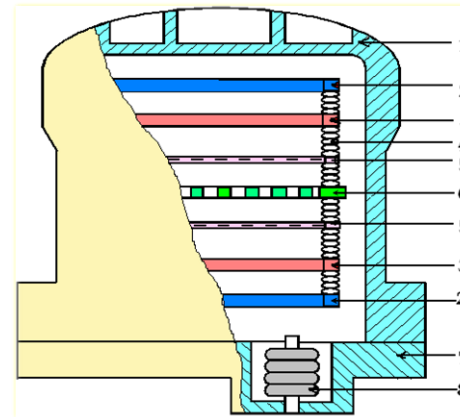
Счётчик Гейгера



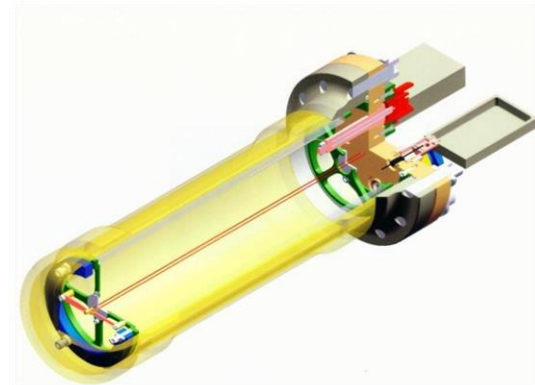
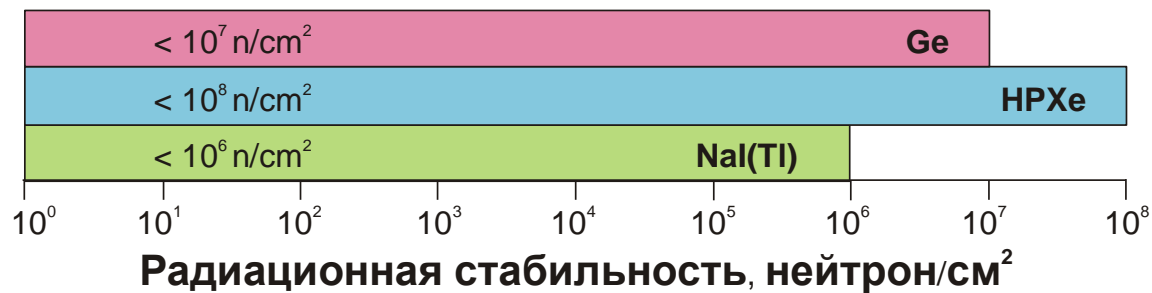
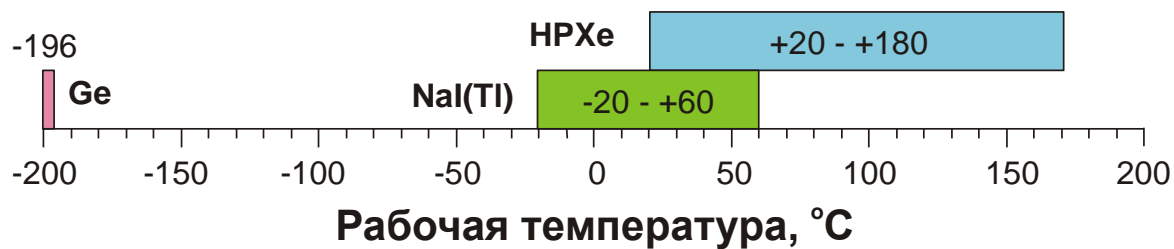
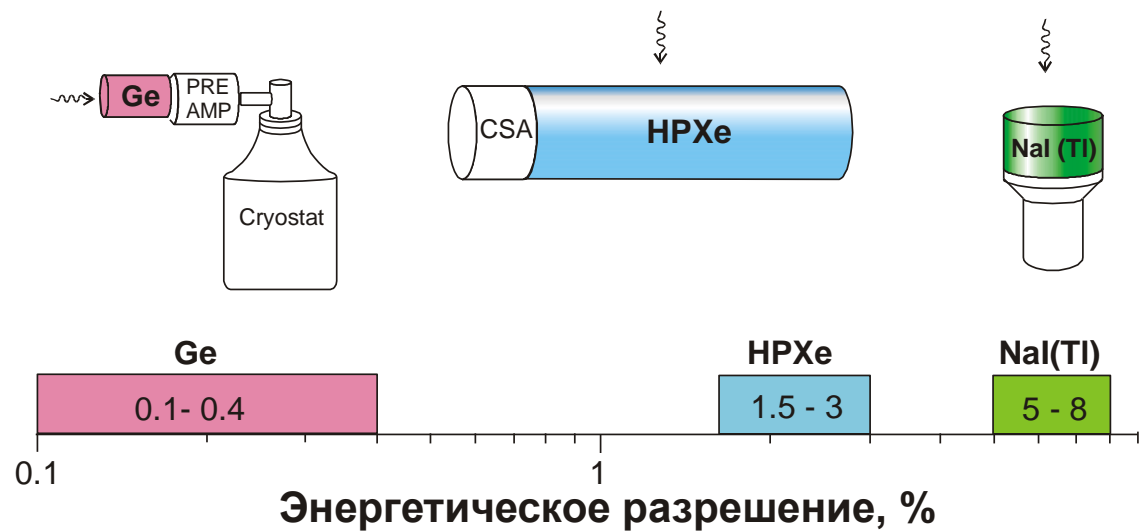
Спектрометрия с ионизационными камерами на сжатом ксеноне



Плоско-параллельная ионизационная камера на сжатом ксеноне для гамма-телескопа «Ксения» (МИФИ), установленного на орбитальной станции МИР

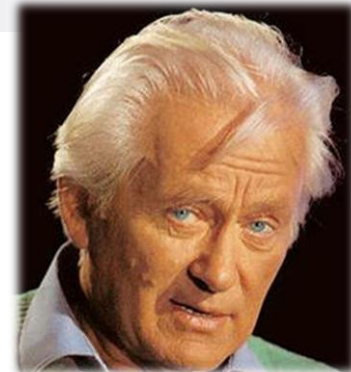


Энергетический диапазон	0.1÷5 МэВ
FWHM на 662 кэВ	23 кэВ
Плотность ксенона	0.6 г/см ³
Чувствительный объем	1000 см ³
Диаметр	250 мм
Длина	300 мм
Общая масса	5 кг
Напряжение	± 24 В
Потребляемая мощность	5 Вт



Многопроволочные пропорциональные камеры

Жорж Шарпак
(1924-2010)
Н.п. 1992



Многопроволочная пропорциональная камера (МПК)

представляет собой систему тонких (10 мкм) параллельных проволочек-анодов, расположенных в одной плоскости, которые находятся в газовом объеме между двумя плоскими параллельными друг другу и аноду катодами (сплошными или проволочными).

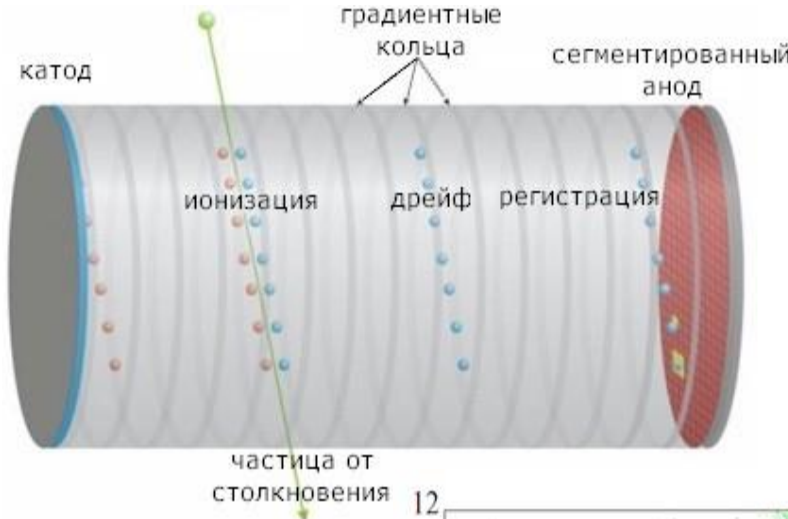
МПК обеспечивают газовое усиление 10^4 - 10^5 и пропорциональность амплитуды сигнала энергии, оставленной частицей в объеме газа.

МПК были разработаны Georges Charpak в ЦЕРНе в 1968 г., отмечено Нобелевской премией 1992 г



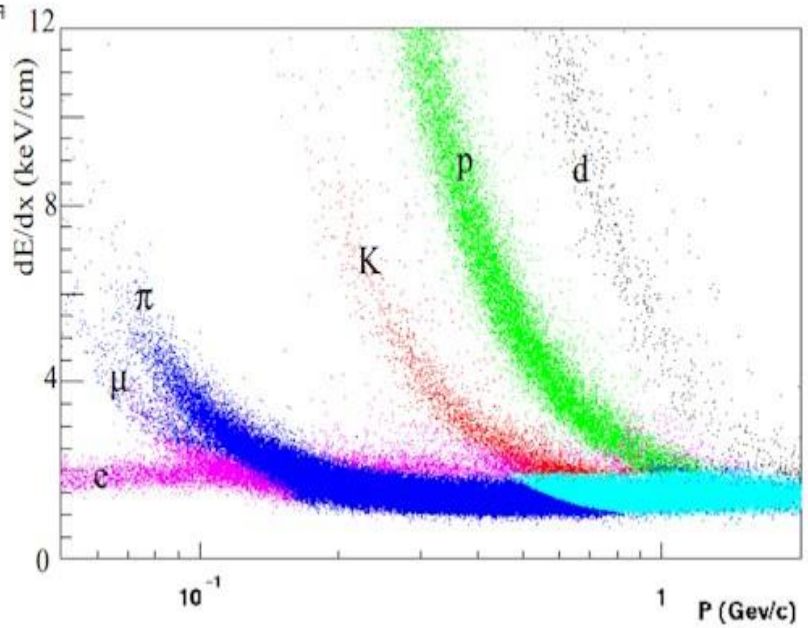
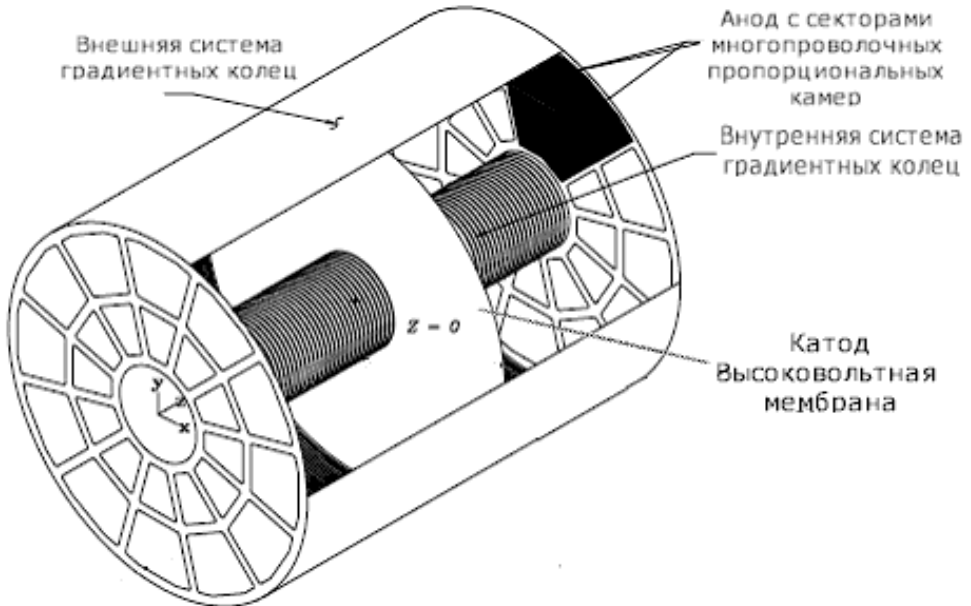
Время-проекционные камеры (Time-Projection Chamber=TPC)

Первая TPC построена в 1974 г.) в LBNL для электрон-позитронного коллайдера в Стенфорде.



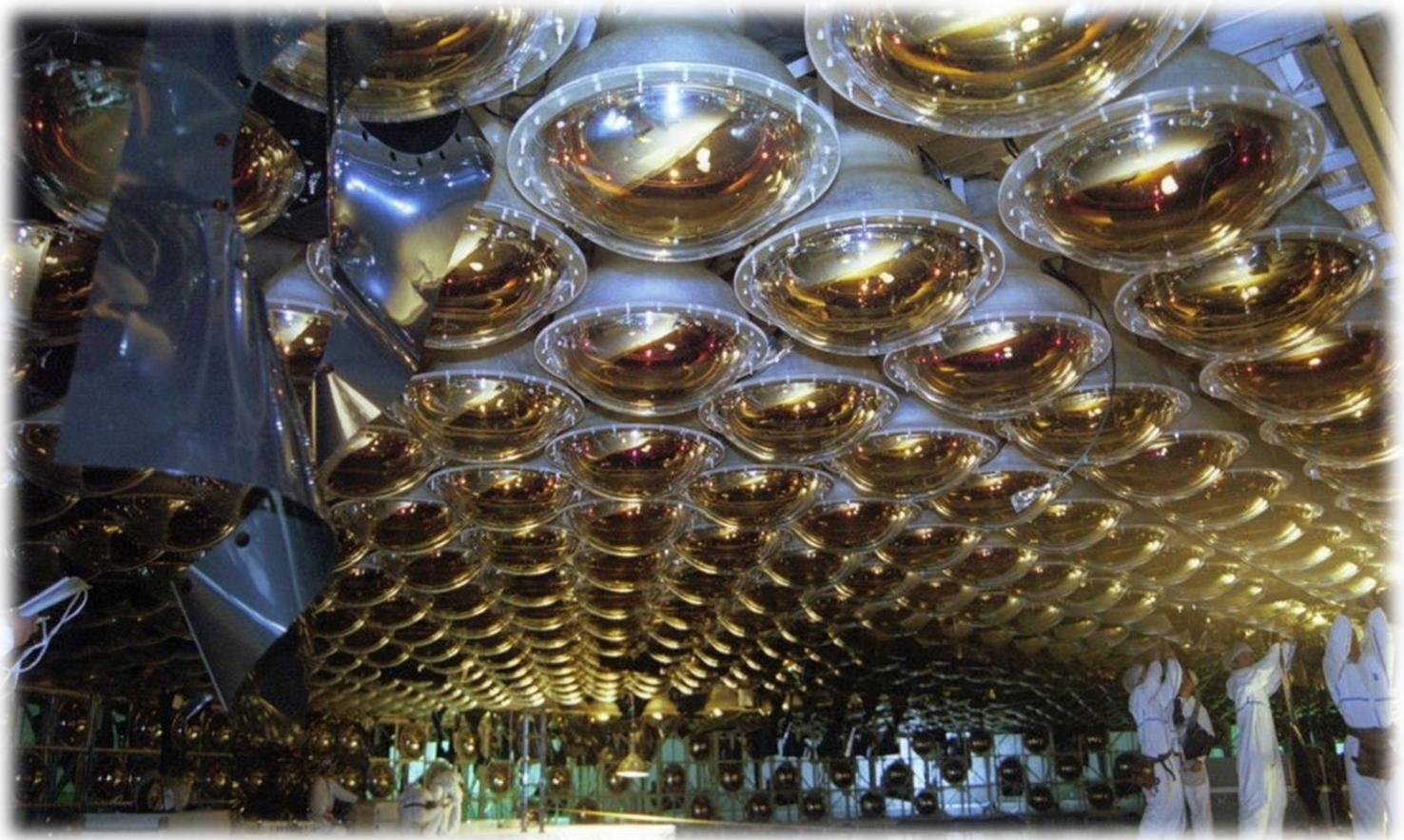
David Nygren

(1938-now)
"the most distinguished developer of particle detection instruments in the country"



Идентификация частиц с помощью время-проекционной камеры детекторного комплекса STAR

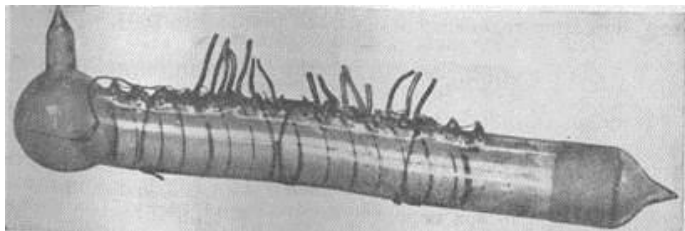
4. Фотодетекторы



Фотоэлектронные умножители (ФЭУ)

Первый фотоэлектронный умножитель был создан *в СССР в начале 1930-х годов Л.А. Кубецким* («трубка Кубецкого»). Для фокусировки и ускорения электронов в ней использовалось магнитное поле. В современных ФЭУ для этих целей в основном используется электростатическое поле. В широкую практику введены американским инженером русского происхождения *В.К. Зворыкиным, изобретателем кинескопа и цв. телевидения*

В ФЭУ фотоны попадают на фотокатод из которого за счет фотоэффекта выбивают электроны. Электроны затем направляются электрическим полем на систему динодов, где их поток умножается за счет вторичной электронной эмиссии. Ток в цепи анода значительно превышает ток от фотокатода. Коэффициент усиления в некоторых ФЭУ достигает 10^{11} .



Трубка Кубецкого



Современный ФЭУ



ЛЕОНИД АЛЕКСАНДРОВИЧ
КУБЕЦКИЙ
(1906—1959)



Владимир Козьмич Зворыкин
(1888-1982)

Сцинтилляционный детектор = ФЭУ+сцинтиллятор (конвертор $dE/dx \rightarrow photons$)

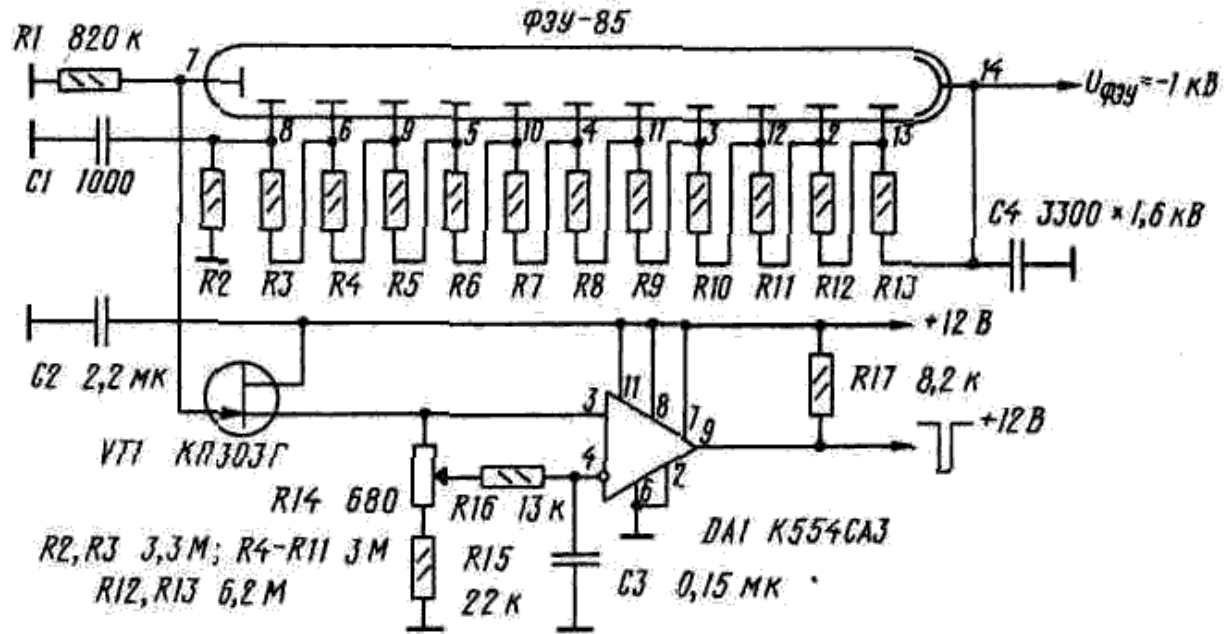
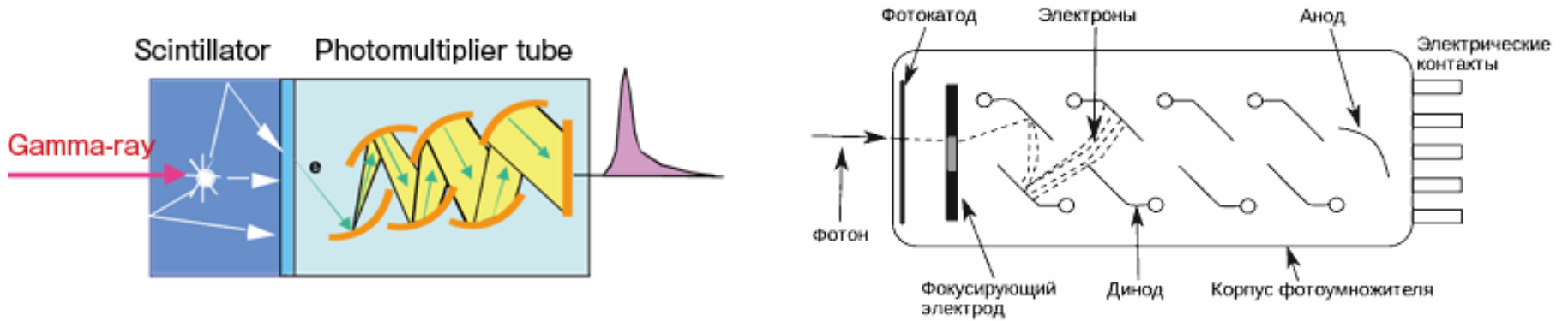
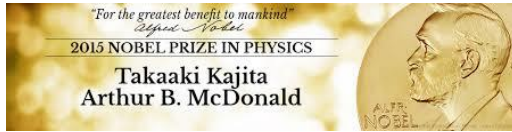
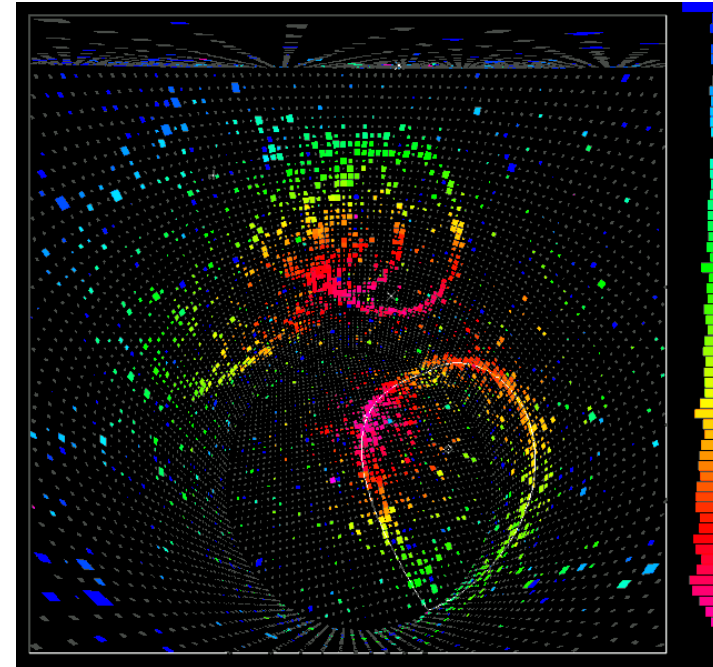
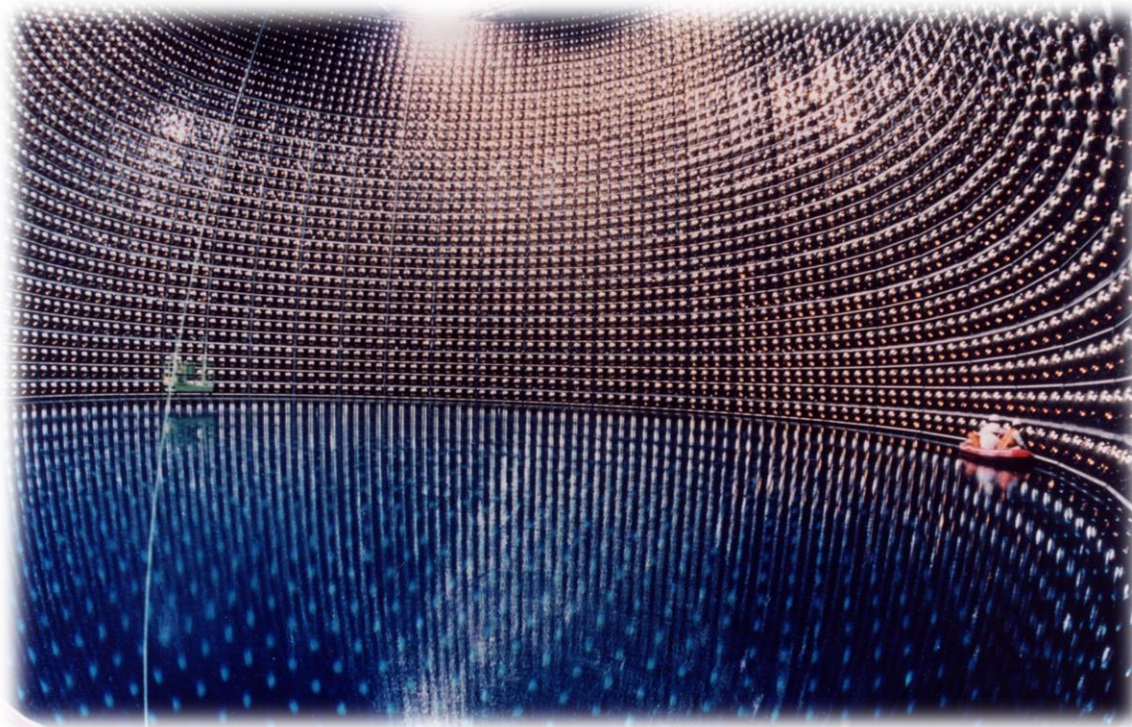


Схема включения ФЭУ

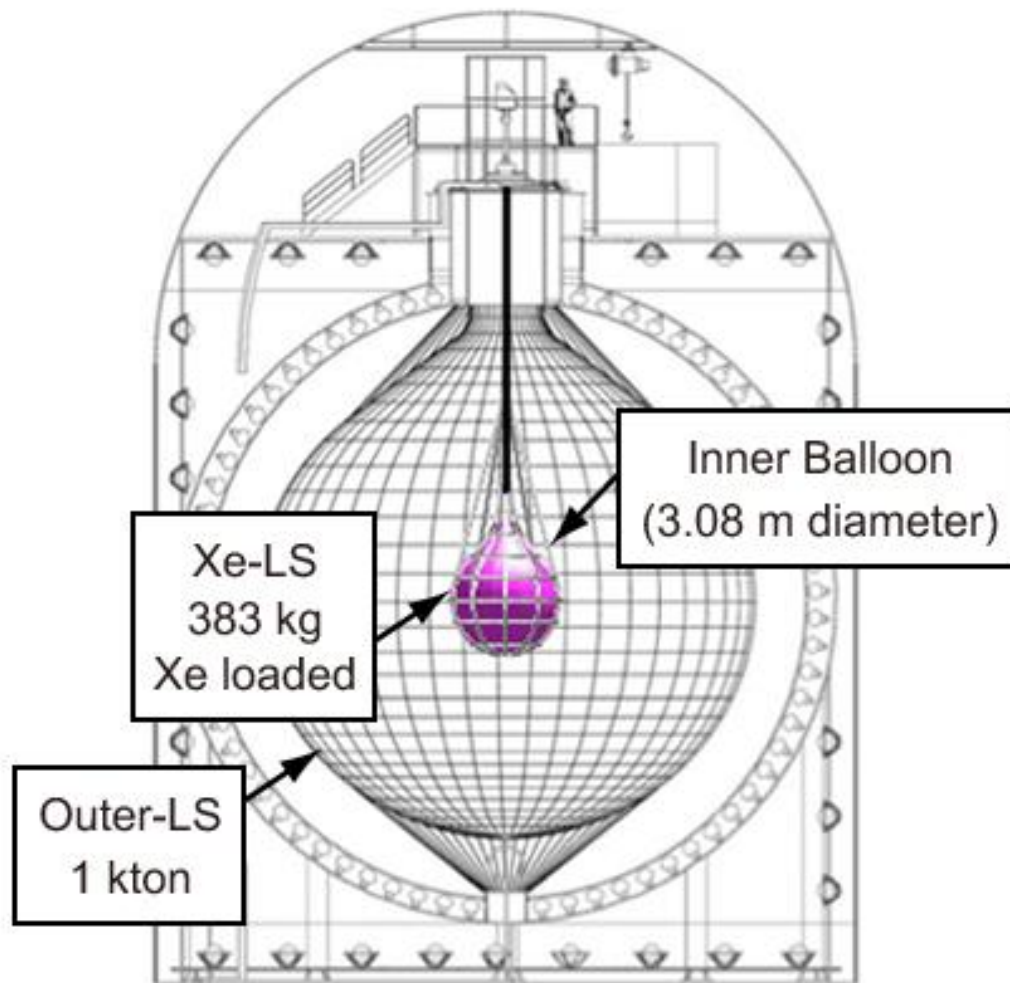
Super-Kamioka Neutrino Detection Experiment



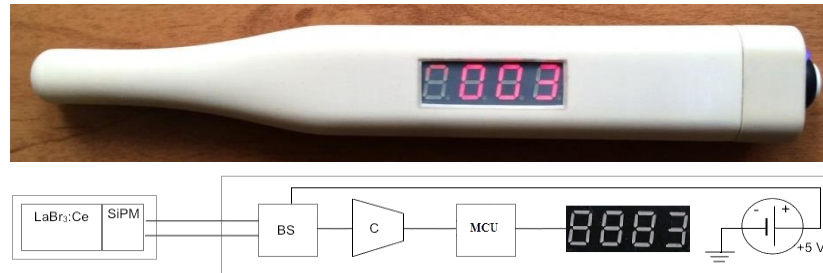
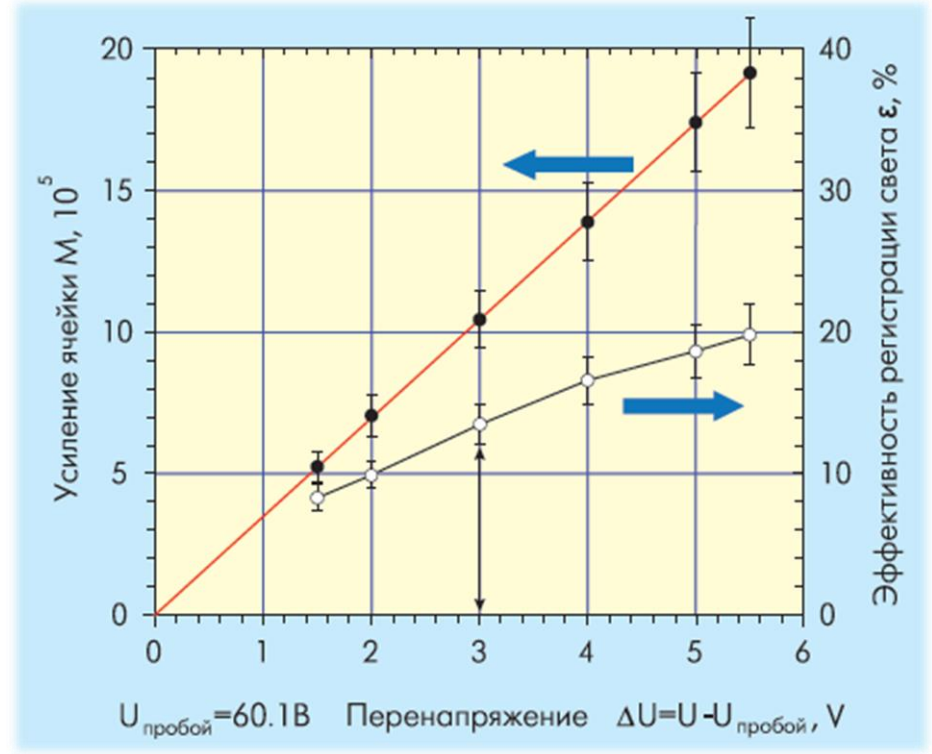
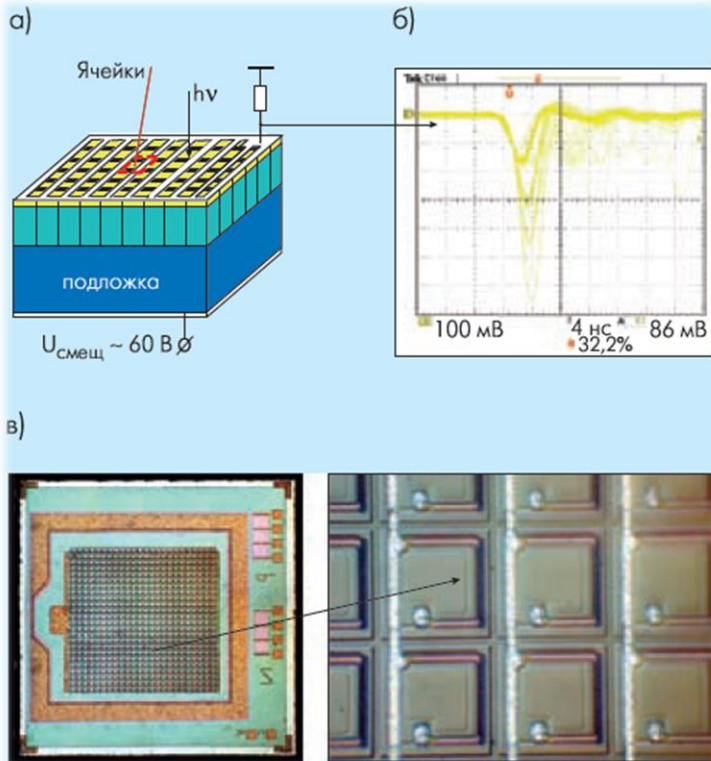
The Super-K is located 1,000 m (3,300 ft) underground in the Mozumi Mine in Hida's Kamioka area. It consists of a cylindrical stainless steel tank that is 41.4 m (136 ft) tall and 39.3 m (129 ft) in diameter holding 50,000 tons of ultra-pure water. The tank volume is divided by a stainless steel superstructure into an inner detector (ID) region that is 33.8 m (111 ft) in diameter and 36.2 m (119 ft) in height and outer detector (OD) which consists of the remaining tank volume. Mounted on the superstructure are 11,146 photomultiplier tubes (PMT) 50 cm (20 in) in diameter that face the ID and 1,885 20 cm (8 in) PMTs that face the OD.



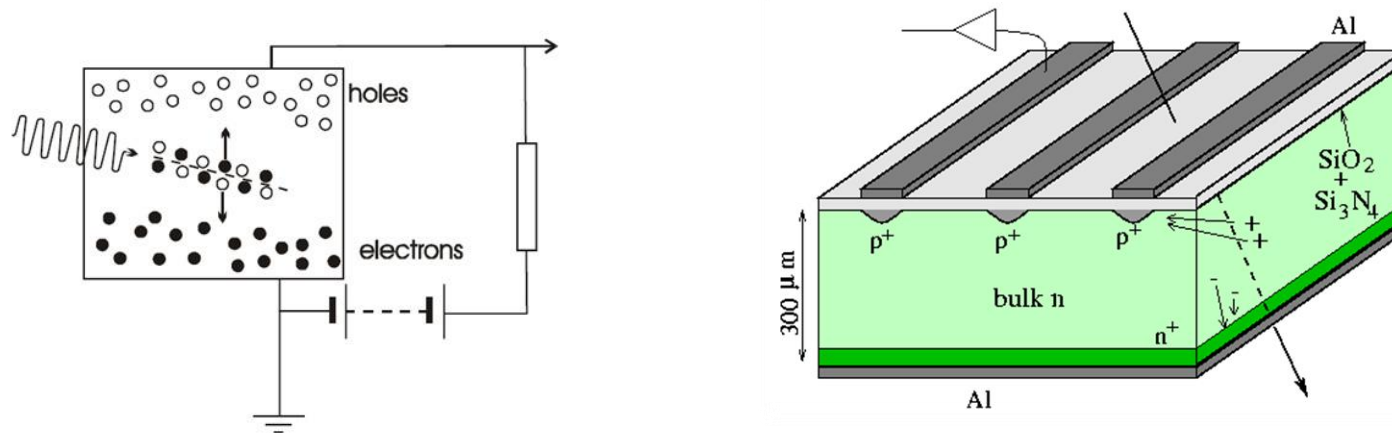
KamLAND-Zen Double Beta Decay Search



Твердотельные фотоумножители (Silicon photo multipliers = SiPM)



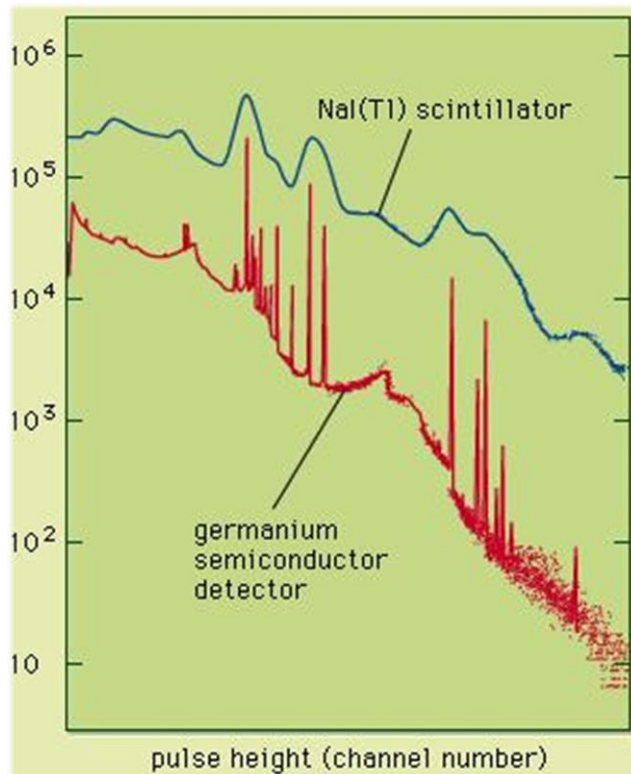
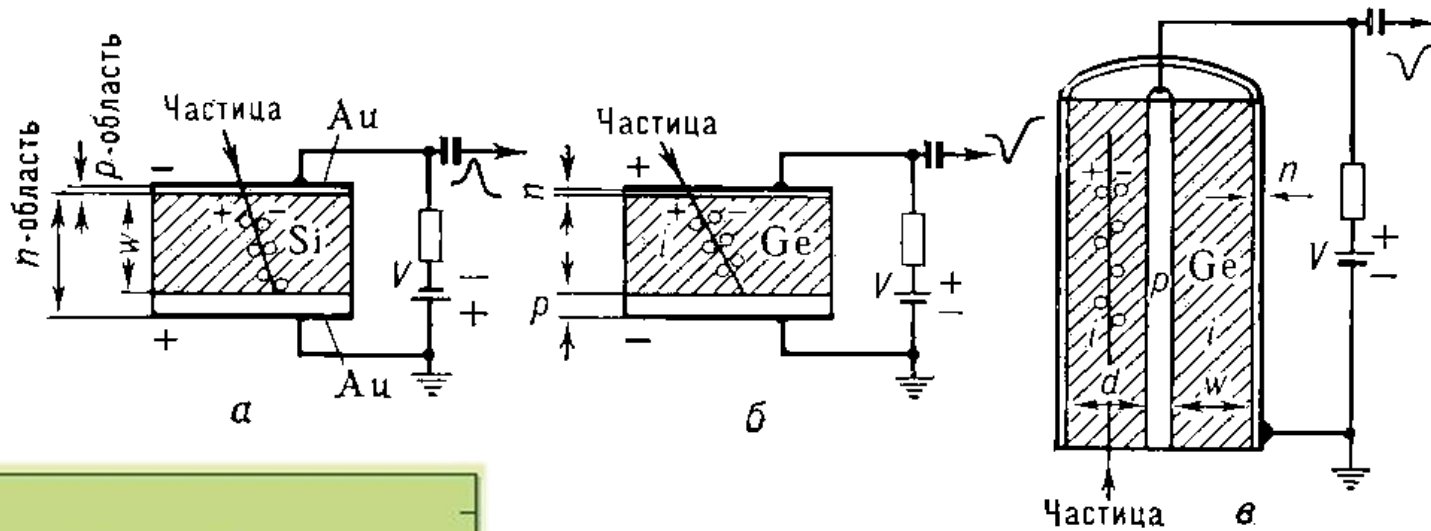
5. Полупроводниковые детекторы



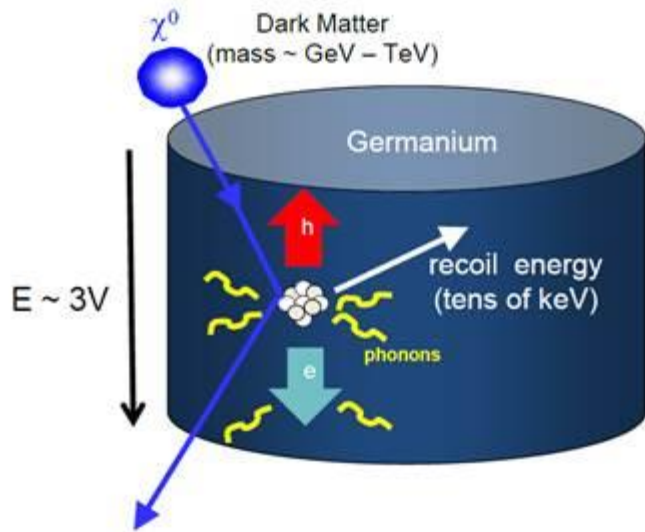
Энергия, необходимая для рождения одной пары электрон-дырка **в кремнии** равна **3.62 эВ** при температуре $T = 300$ К и **3.72 эВ** при $T = 80$ К, **в германии** **2.95 эВ** при $T = 80$ К, что при использовании полупроводникового счётчика в качестве спектрометра позволяет в несколько раз улучшить энергетическое разрешение по сравнению с газонаполненными счётчиками, такими как ионизационная камера и пропорциональный счётчик (энергия для рождения пары электрон-ион в газе **~20-30 эВ**).

Толщина чувствительной области **п.п.д.** обычно не превышает **5 мм**, что соответствует пробегу протонов с энергией **~30 МэВ** и α -частиц с энергией **~120 МэВ** в кремнии.

Для германия толщина 5 мм соответствует пробегам протонов и α -частиц с энергиями **~40 МэВ** и **~160 МэВ** соответственно.

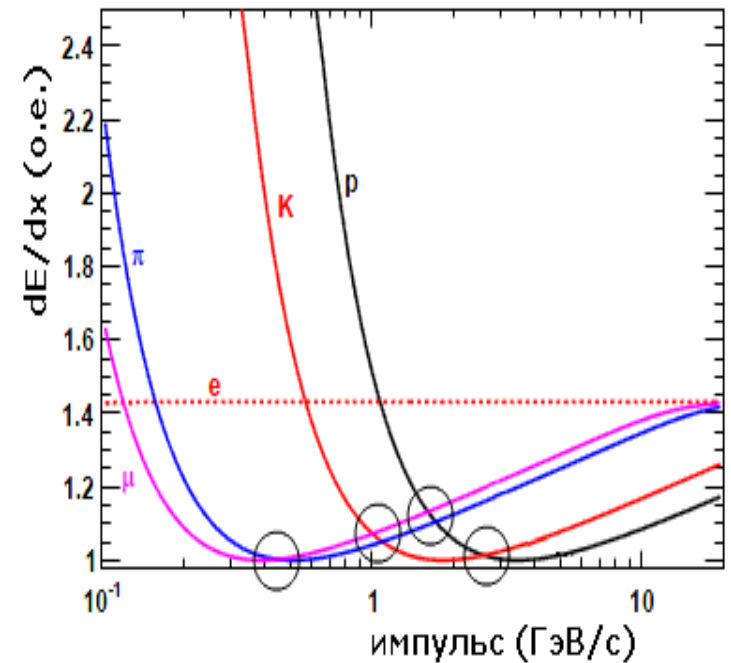
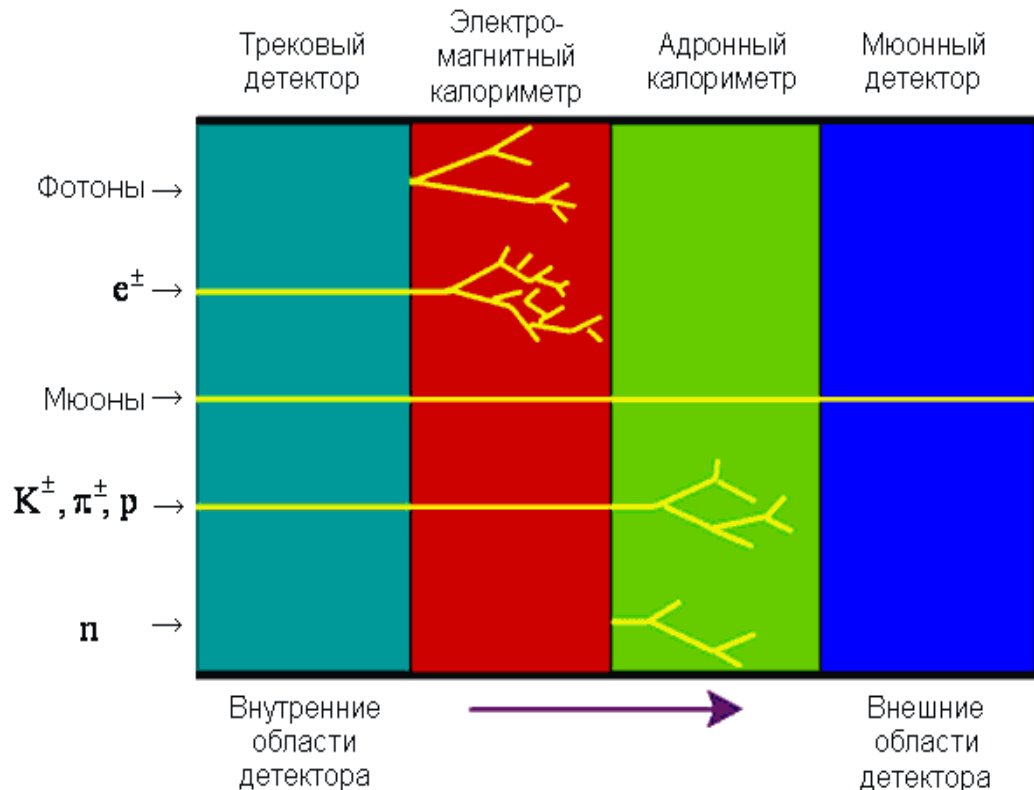


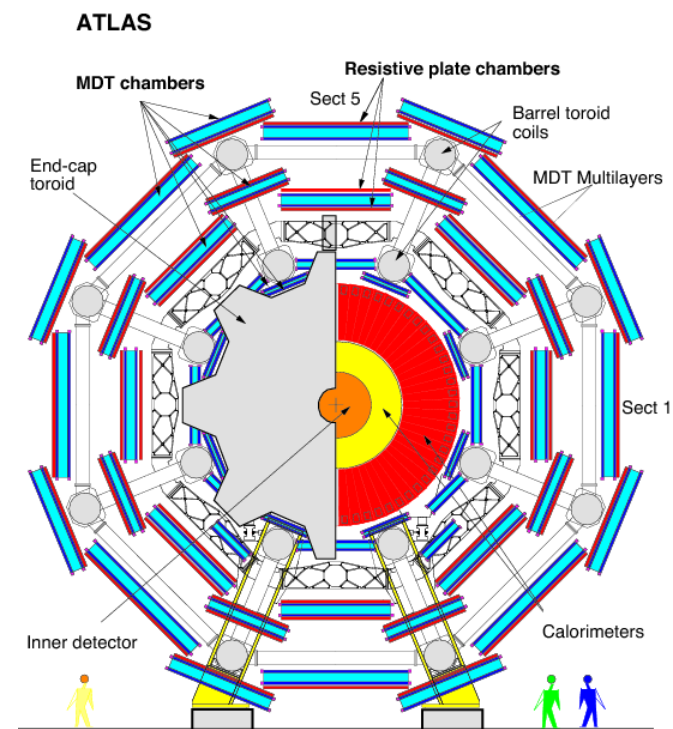
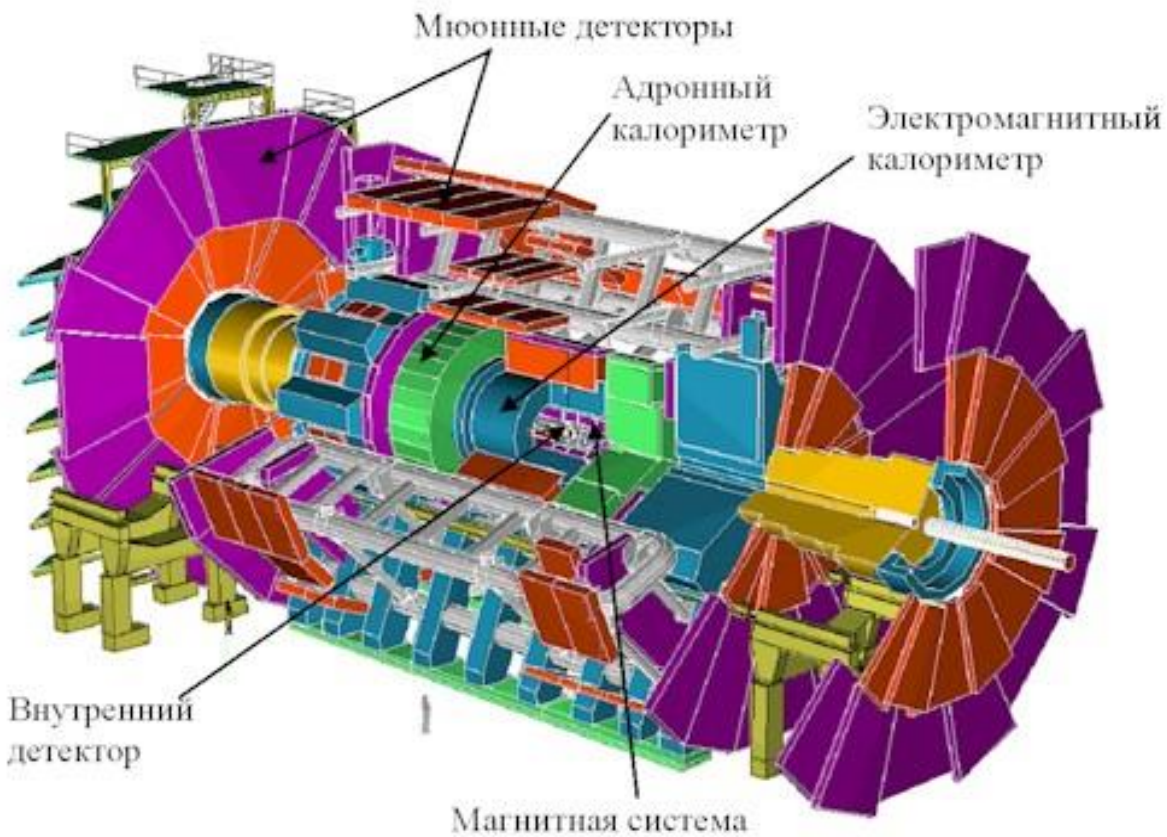
**Пример использования криогенных фоновых детекторов в эксперименте
Cryogenic Dark Matter Search (CDMS)**



6. Методы идентификации частиц

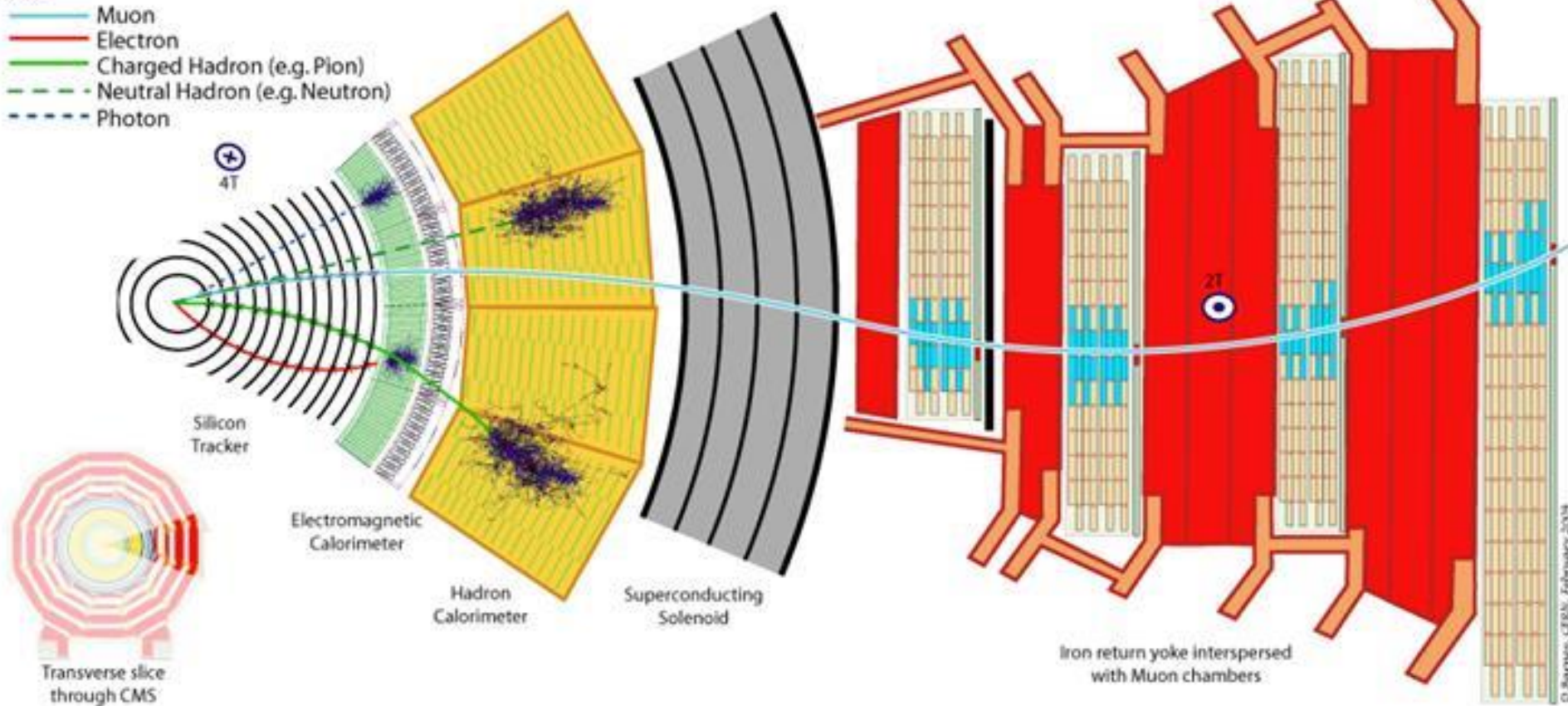
Детекторы, используемые в физике высоких энергий для регистрации частиц, состоят, как правило, из нескольких структур, входящих в состав единого регистрирующего комплекса. Каждая структура рассчитана для регистрации частиц с определенными характеристиками. Отдельные структуры детектора расположены так, чтобы различного типа частицы, последовательно проходя через них, оставляли определённую информацию о прошедшей через них частице. На основе этой информации затем восстанавливаются характеристики частицы.



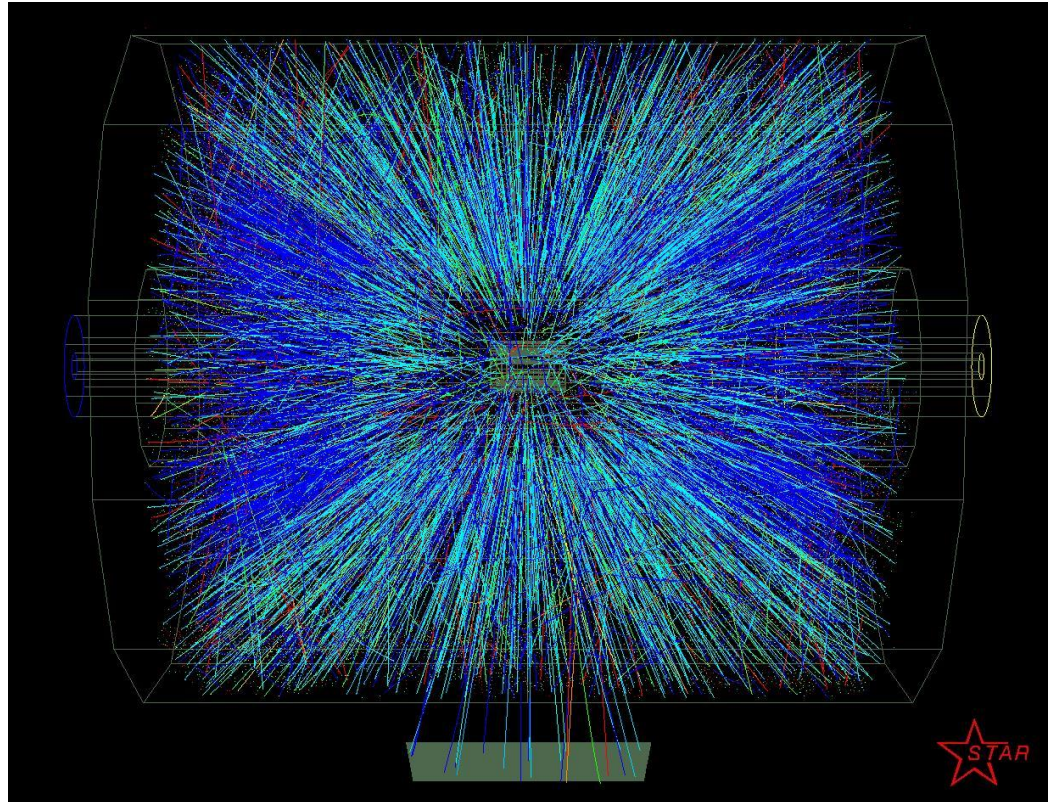
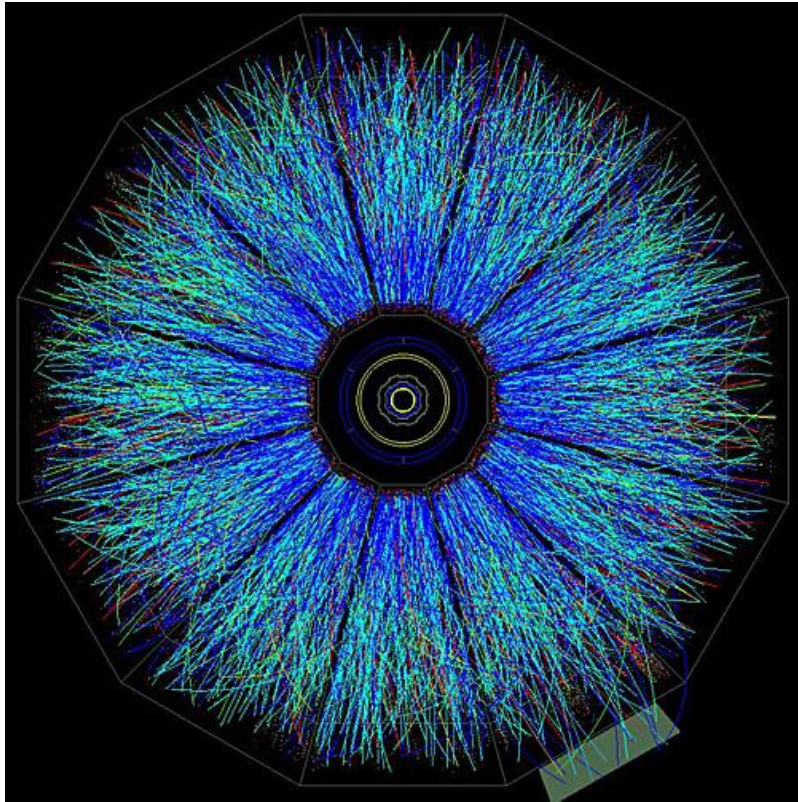


Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



D. Burnings, CERN, February 2004



Треки вторичных частиц от Au-Au столкновения на детекторном комплексе STAR, полученные на релятивистском ионном коллайдере RHIC (Брукхейвен, США)

Information sources

1. К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. СПб.: Издательство «Лань», 2008. Т.1, стр.165-172
2. Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов. Детекторы частиц, НИЯФ МГУ
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/detectors/index.html>
3. Ю.М. Широков, Н.П. Юдин Ядерная физика. Изд. 2е. М.: Наука, 1980. Глава IX, с.491-528. <http://review3d.ru/shirokov-yu-m-yudin-n-p-yadernaya-fizika-izd-2e>
4. K.S.Krane. Introductory Nuclear Physics. Wiley, 1988. Chapter 7, p.204-246; <http://www.fulviofrisone.com/attachments/article/446/Krane%20-%20Introductory%20Nuclear%20Physics.pdf> .
5. А.И.Болоздыня и И.М. Ободовский. Детекторы ионизирующих частиц и излучений. Долгопрудный : Интеллект, 2012 . – 204 с