

Методы регистрации частиц. Детекторы

В.И. Тельнов

Новосибирский Государственный университет

Методы регистрации частиц. Детекторы.

Измерение координат:

- пропорциональные и дрейфовые камеры и др. газовые детекторы,
- полупроводниковые детекторы.

Идентификация частиц:

- сцинтилляционные счетчики,
- черенковские счетчики,
- счетчики переходного излучения.

Регистрация фотонов:

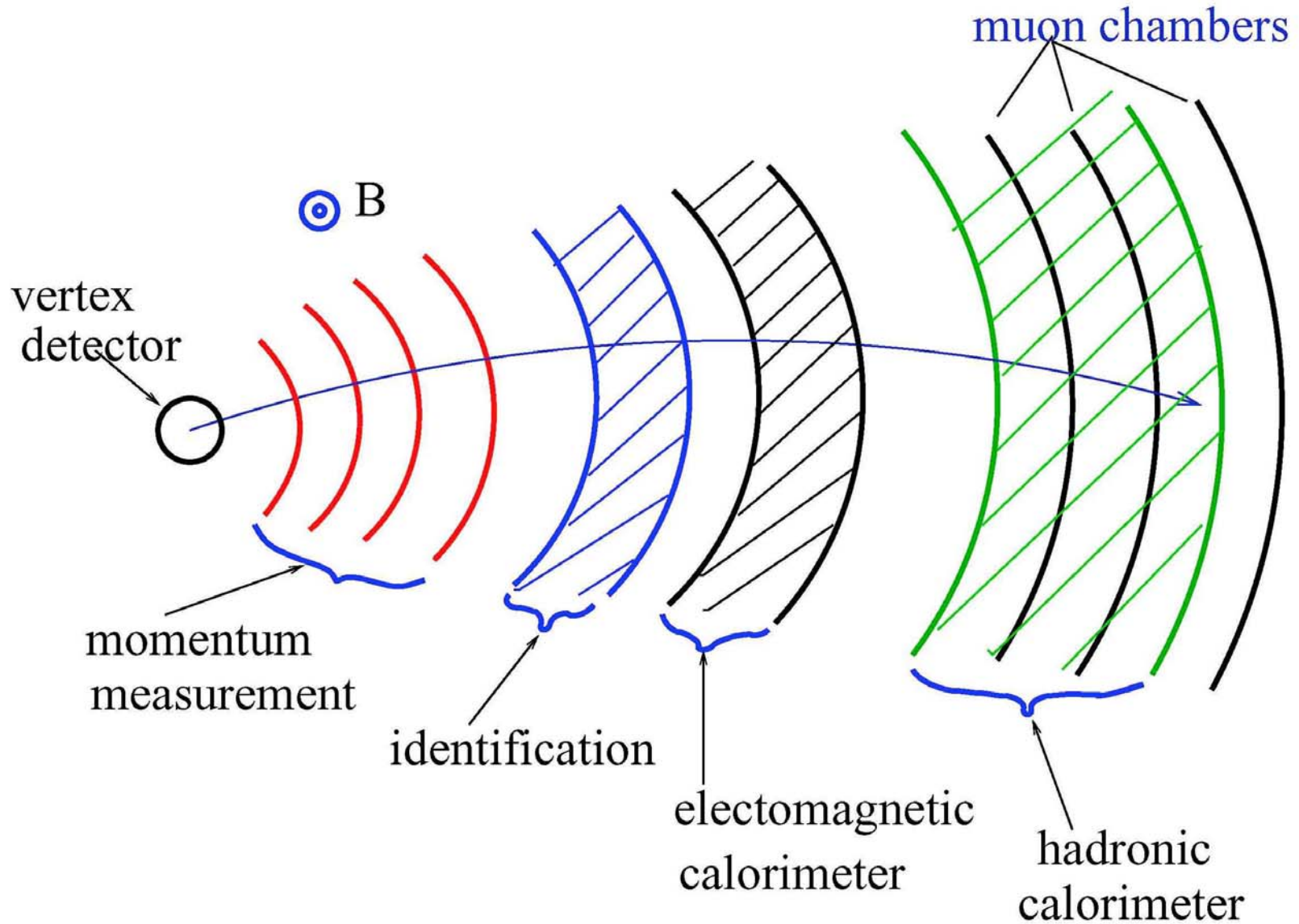
- пропорциональная камера,
- счетчики полного поглощения, сэндвичи,
- полупроводниковые детекторы.

Адронные калориметры.

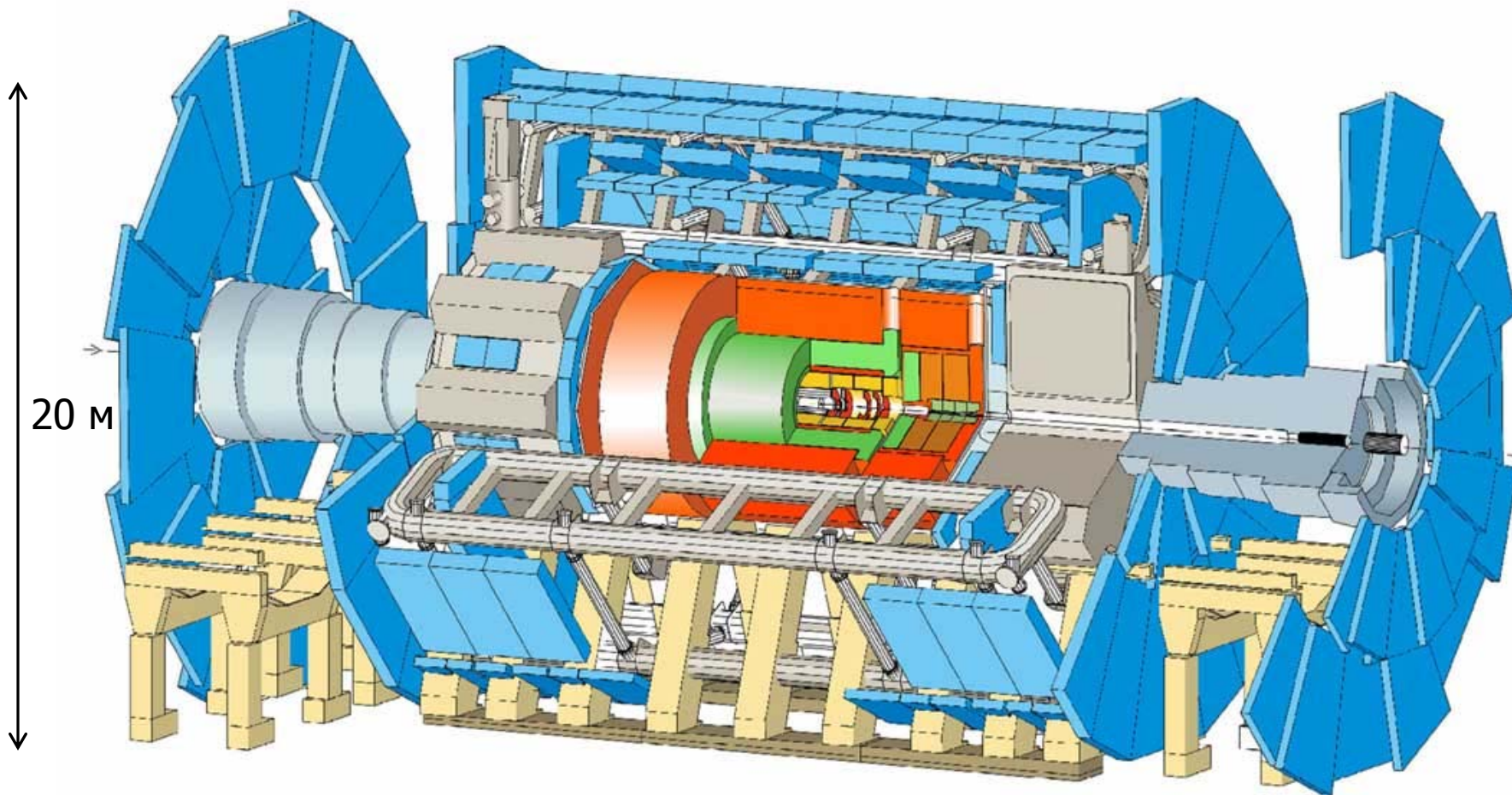
Эксперименты на ускорителях:

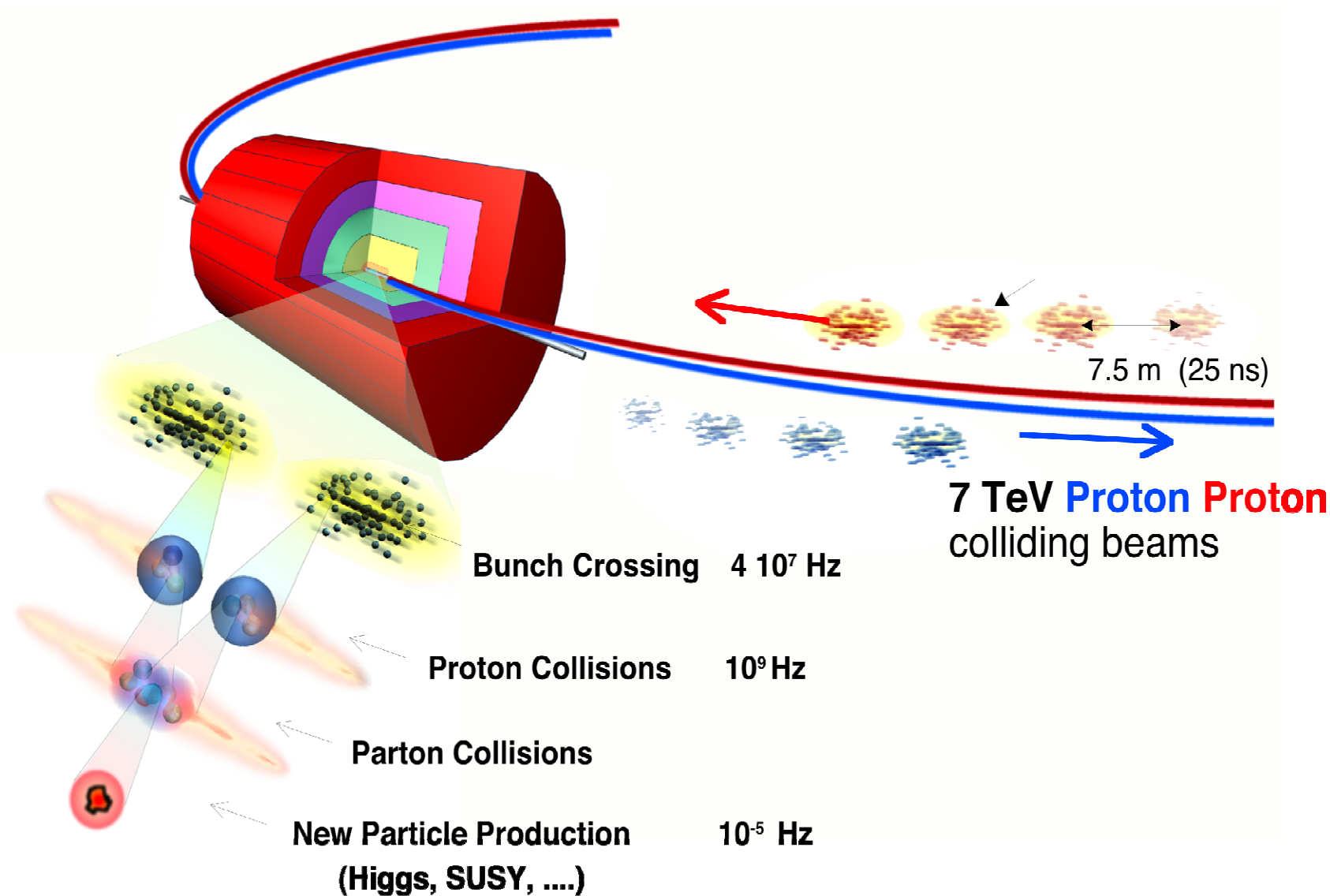
- основные компоненты больших детекторов, триггер, обработка информации.

Структура “стандартного” детектора на ускорителе



Детектор ATLAS на LHC





Selection of 1 event in 10,000,000,000,000

A simulated event in ATLAS (CMS)

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$$

pp collision at $\sqrt{s} = 14$ TeV

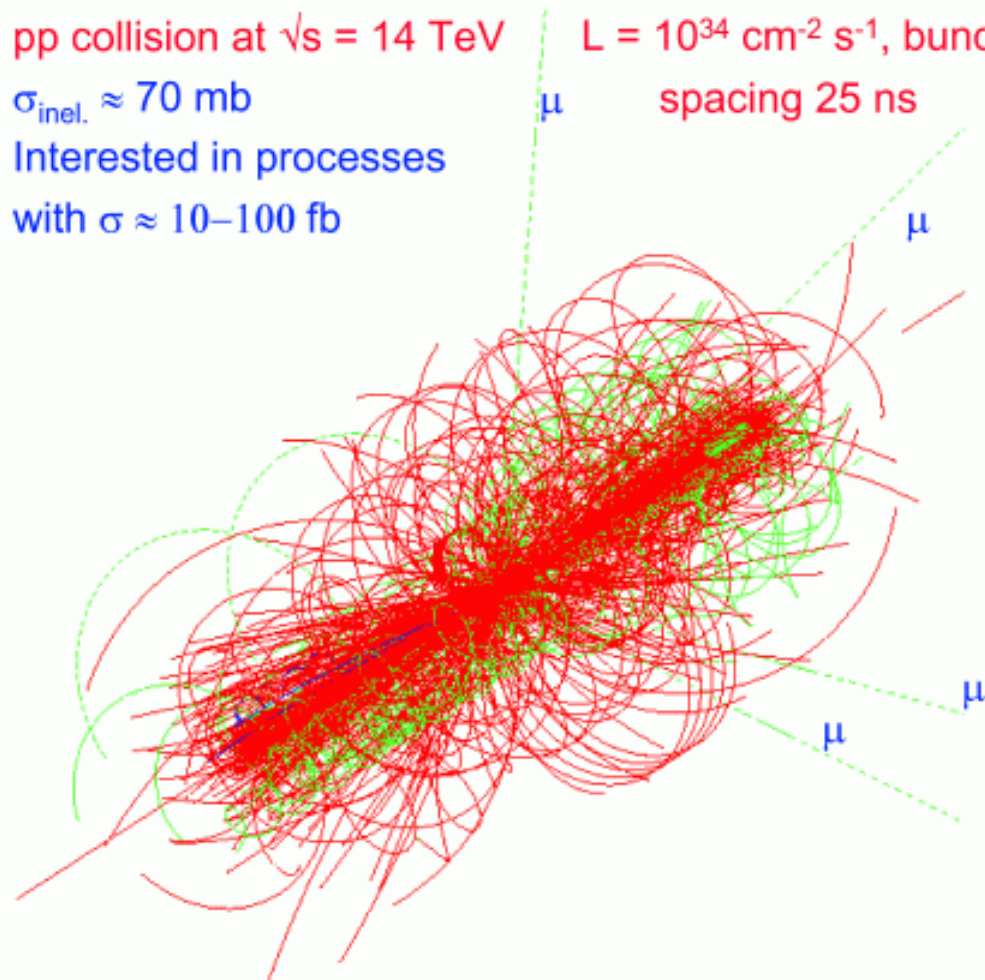
$\sigma_{\text{inel.}} \approx 70$ mb

Interested in processes

with $\sigma \approx 10\text{--}100$ fb

$L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, bunch

spacing 25 ns



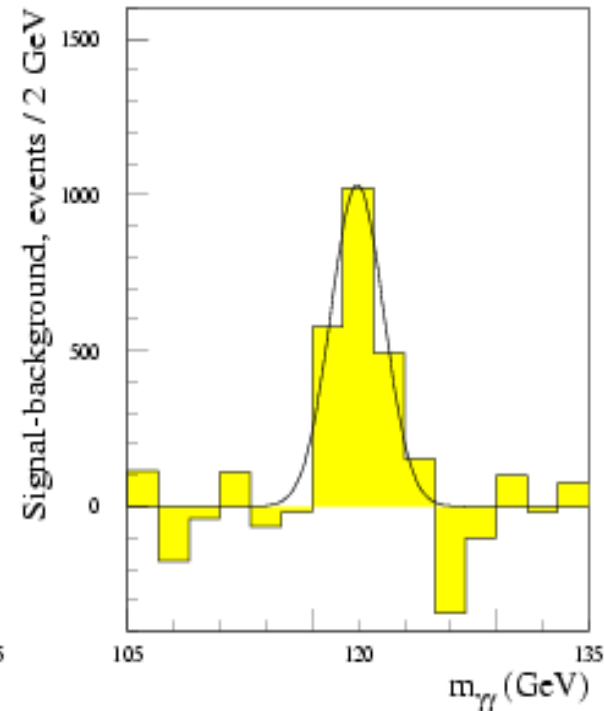
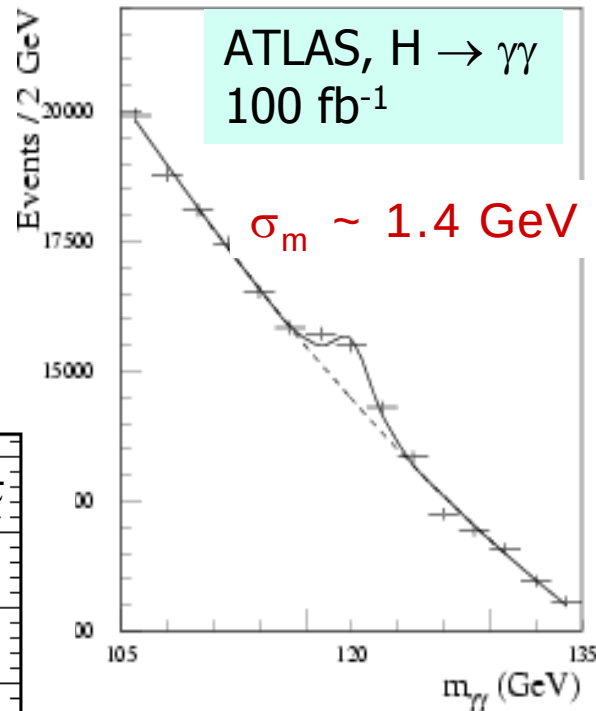
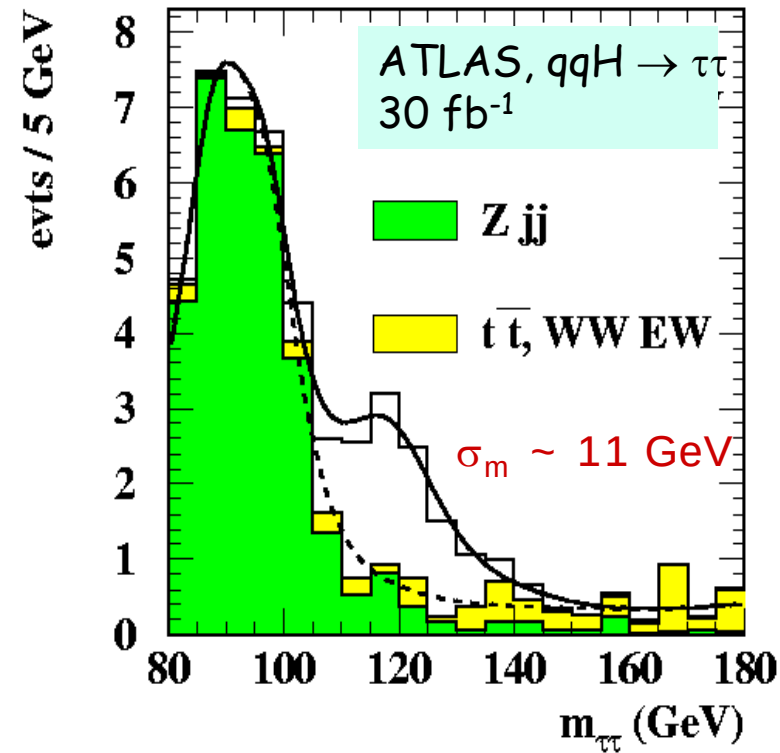
≈ 23 overlapping minimum bias events / BC

≈ 1900 charged + 1600 neutral particles / BC

на одно
столкновение пучков

A light Higgs is one of the goals

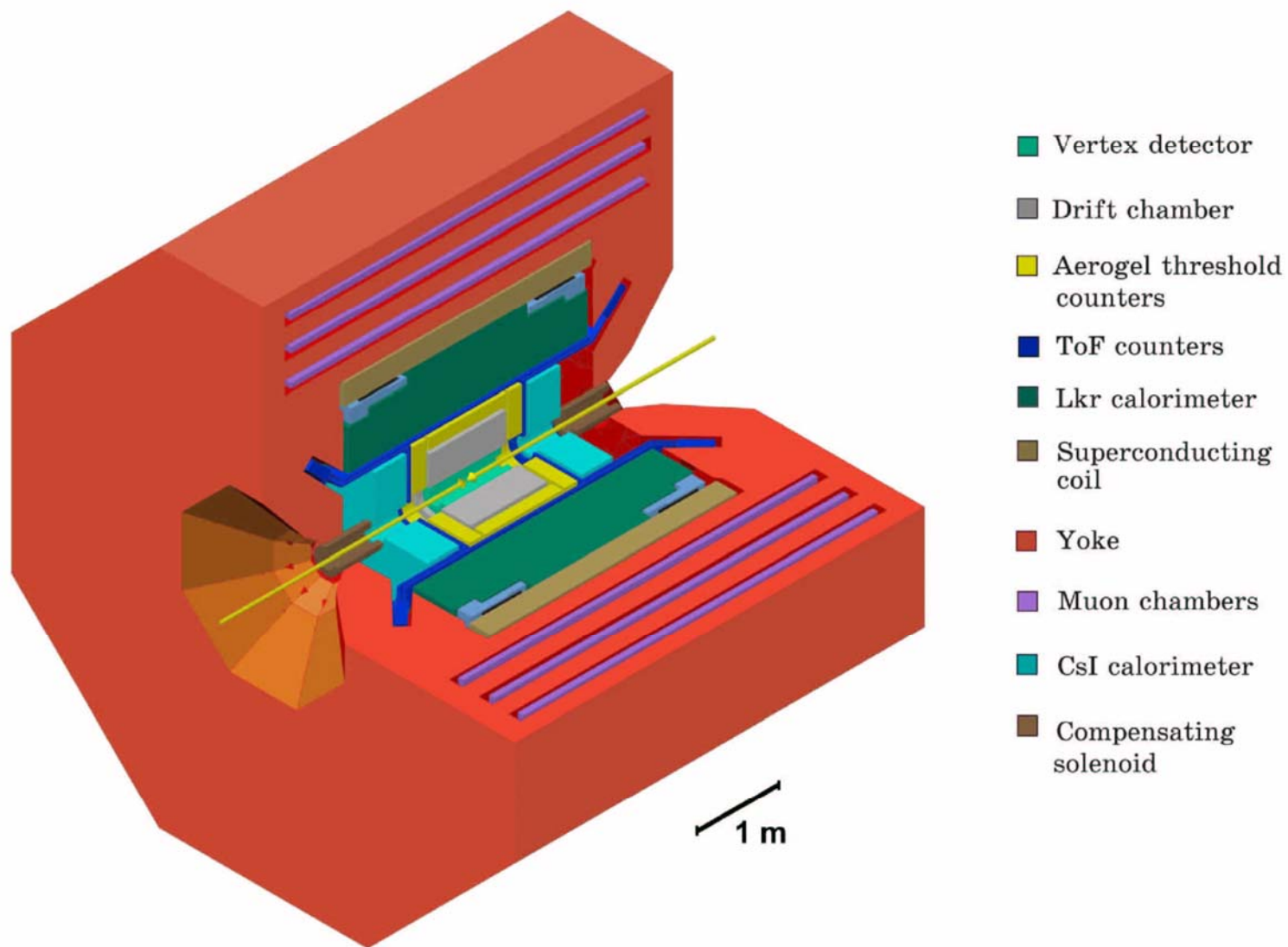
$$m_H \sim 120 \text{ GeV}$$



BG dominated by
irreducible
components

It will need a perfectly
understood detector in
terms of photon
identification,
calorimetry, tracking,

Детектор КЕДР (ИЯФ)



Измерение координат

а) пропорциональные и дрейфовые камеры;

б) полупроводниковые детекторы

Пропорциональные счетчики
(камеры)

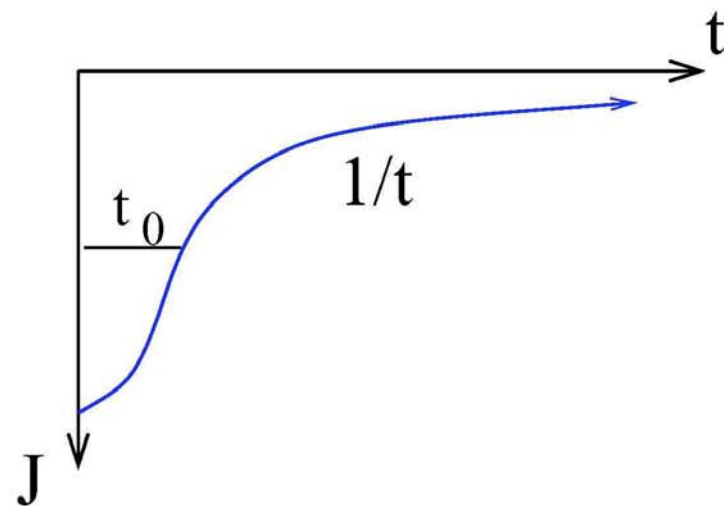
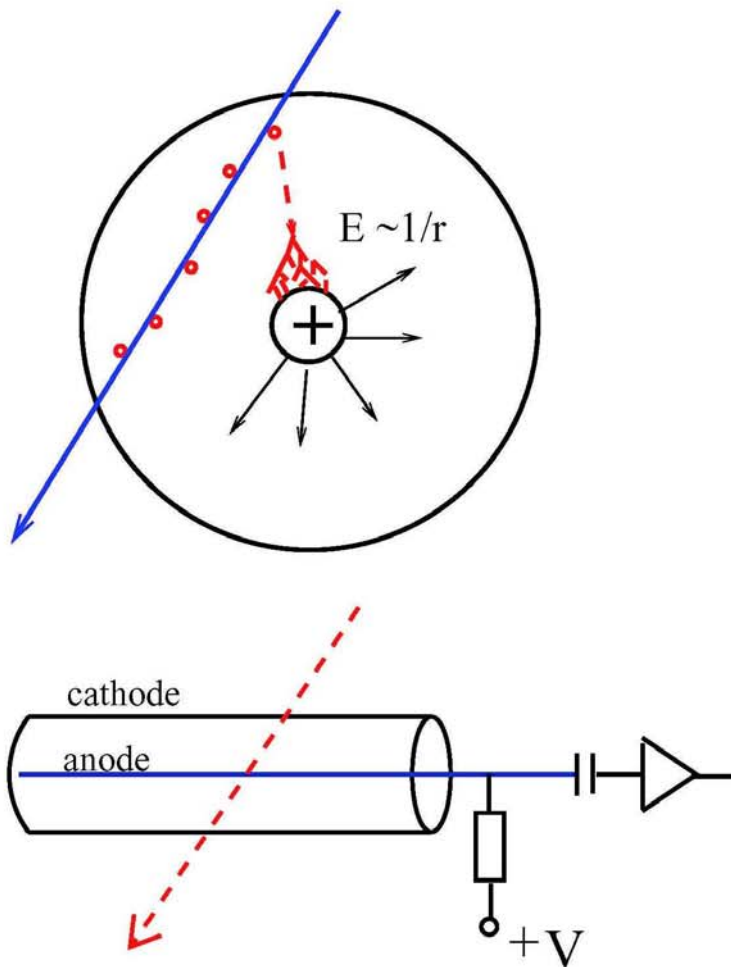
$$R_a \sim 20 \text{ мкм}, R_c = 0.2 - 5 \text{ см}$$

$$V \sim 3 - 5 \text{ кВ}$$

Поле вблизи проволоочки $E \sim 300 - 500 \text{ кВ/см}$

Ударная ионизация, усиление $M \sim 10^5 - 10^6$

Импульс тока от точечной ионизации

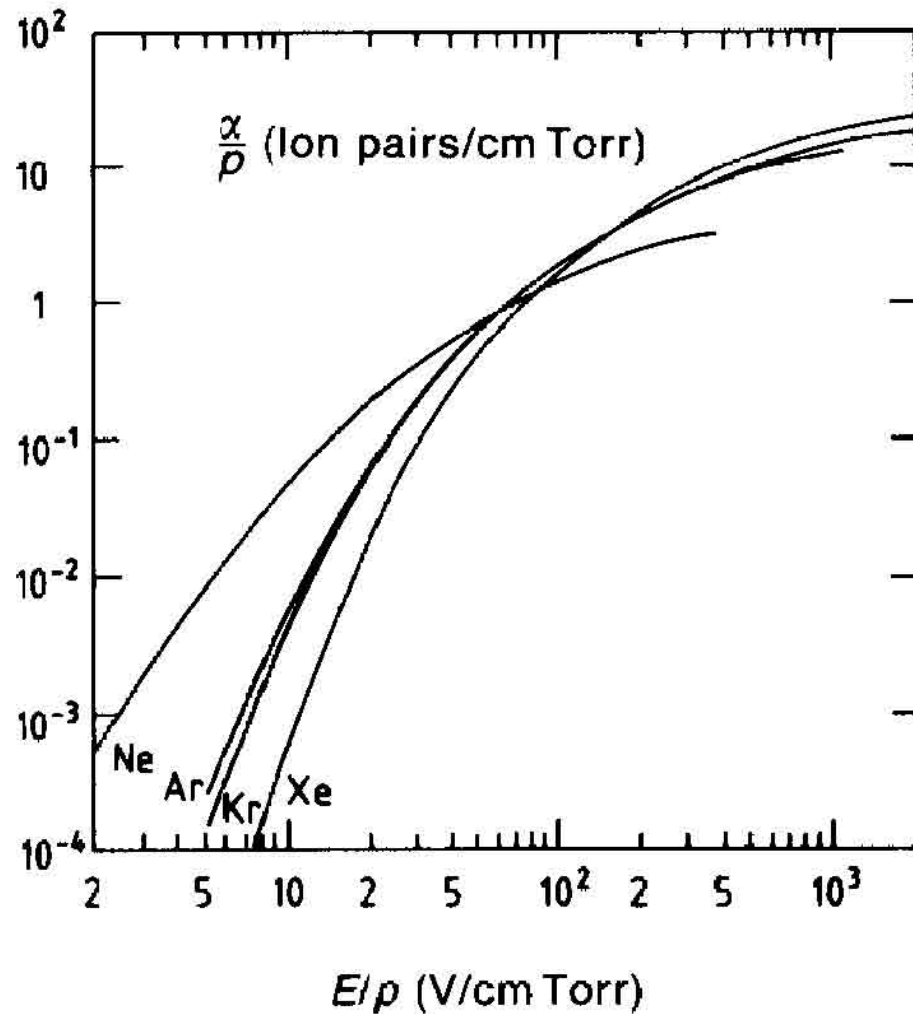


$$t_0 \sim 1 - 5 \text{ нс.}$$

Ампл. сигнала пропорц. ионизации.

Газовое усиление $dN = N\alpha dx$ $N = N_0 e^{\int \alpha dx}$

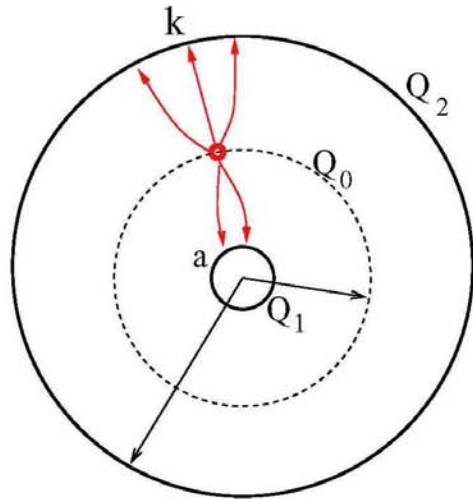
α - коэффициент Таундсена



Образование сигнала в пропорциональном счетчике

Электрон проходит ~ 20 длин “ионизационных” пробегов: $M \sim 2^{20} \sim 10^6$
 Основное число пар ионов образуется в последних столкновениях, т.е. вблизи анодной проволоочки.

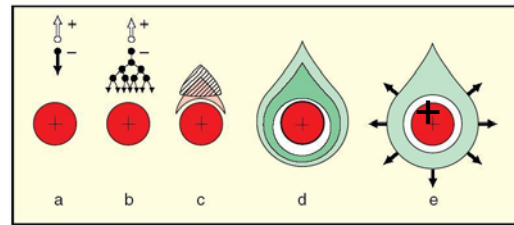
Основной сигнал возникает при отходе ионов от анодной проволоочки



$$\int_{r_a}^{r_k} E dr = const$$

$$Q_1 + Q_2 + Q_0 = 0$$

$$Q_1 \ln(r_k/r_a) - Q_0 \ln(r_k/r) = 0$$



$$Q_1 = Q_0 \frac{\ln(r/r_k)}{\ln(r_r/r_a)}$$

$$J = \frac{dQ_1}{dt} = \frac{Q_0}{\ln \frac{r_k}{r_a}} \frac{2\lambda}{r^2} \mu \quad \frac{dr}{dt} = v = \mu E = \mu \frac{2\lambda}{r} \quad (\mu - \text{подвижность})$$

$$J = \frac{Q_0 2\mu \lambda}{\ln \frac{r_k}{r_a} (r_a^2 + 4\lambda \mu t)} \propto \frac{1}{t + t_0}, \quad t_0 = \frac{r_a^2}{4\lambda \mu}, \quad U = \frac{Q_1}{c} \propto \ln \left(1 + \frac{t}{t_0} \right)$$

При $r_a = 15 \cdot 10^{-4}$ см, $E_0 = \frac{2\lambda}{r_a} \sim 3 \cdot 10^5$ В/см, $\mu = 1.7(Ar) \Rightarrow t_0 \sim 4 \cdot 10^{-9}$ сек.

Полное время сбора ионов $t_{\max} \approx r_k^2 / (2E_0 r_a \mu) \sim 10^{-3}$ см для $r_k \sim 1$ см.

Пропорциональный счетчик (продолжение)

Медленная составляющая тока «обрезается» электроникой (дифференцирующая цепочка) и остается только быстрая составляющая от тока $I \sim 1/(t+t_0)$. При полях в счетчике $E > 1$ кВ/см электроны, образованные пролетевшей частицей, движутся со скоростями дрейфа $v_{др} \sim (0.3-1)10^7$ см/с, так что время сбора электронов при радиусе трубки ~ 1 см составляет порядка 100 нс. При постоянной интегрирования порядка $t_{int} = 100$ нс доля от полного сигнала составит

$$\frac{Q_1}{Q_0} \approx \frac{\ln(t_{int} / t_0)}{\ln(t_{max} / t_0)} \approx \frac{\ln(100 \text{ нс} / 5 \text{ нс})}{\ln(1 \text{ мс} / 5 \text{ нс})} = \frac{3}{12} \sim 0.25$$

Сигнал на входной емкости составит $U \sim Q_1 / c = 0.25 Q_0 / c$

Например: заряженная частица образовала 100 пар ионов, $c \sim 10^{-11}$ ф,
 $U = (0.25 \cdot 100 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} / 10^{-11}) \text{ В} \sim 3 \cdot 10^{-5} \text{ В}$, где М-коэф. газового усиления.

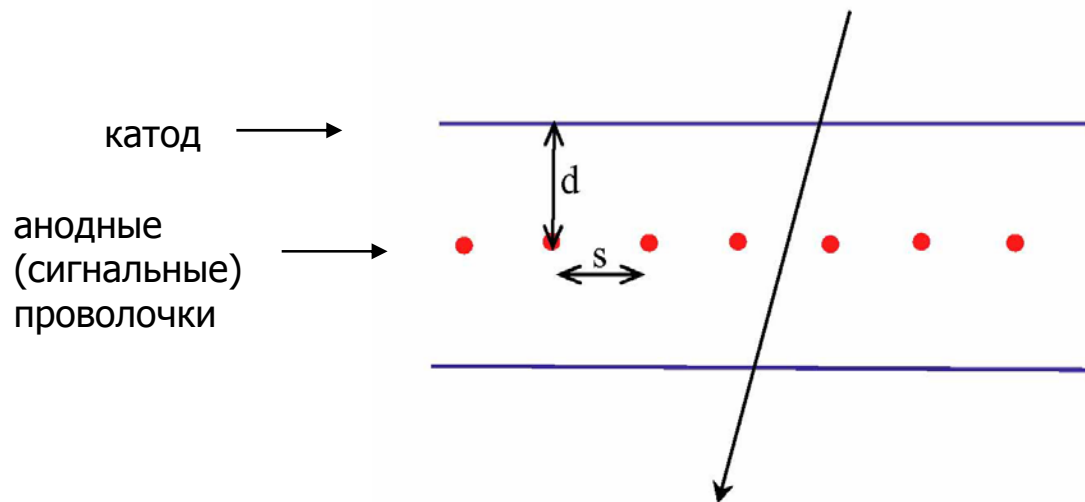
При $M = 10^5$ $U \sim 0.3$ В. Это очень большой сигнал.

Газы. 1) мало прилипание электронов, 2) хорошее поглощение фотонов, вылетающих из лавины, чтобы они не давали вторичных электронов при попадании на катод.

Обычно используются инертные газы с примесью высокомолекулярных газов: $\text{Ar} + n\% \text{CO}_2$, $\text{Ar} + \text{C}_4\text{H}_{10}$ и.т.д. (большое множество).

Пропорциональная камера

Шарпак, 1968



$s \sim 2-5 \text{ мм}$

$d \sim 5 \text{ мм}$

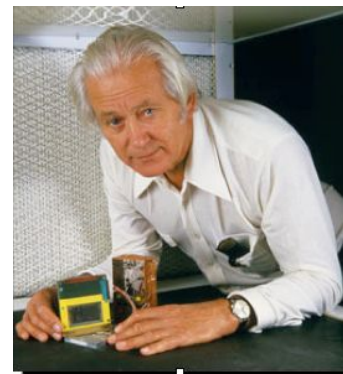
$r_a \sim 20-30 \text{ мкм}$

Вблизи проволочек происходит газовое усиление. На проволочке, вблизи которой пролетела частица, возникает отрицательный сигнал, на соседних – положительный сигнал ($\sim 15\%$ от основного), наведенный отходящими ионами, который больше, чем емкостная наводка с сигнальной проволоочки. Электроника регистрирует только отрицательный сигнал.

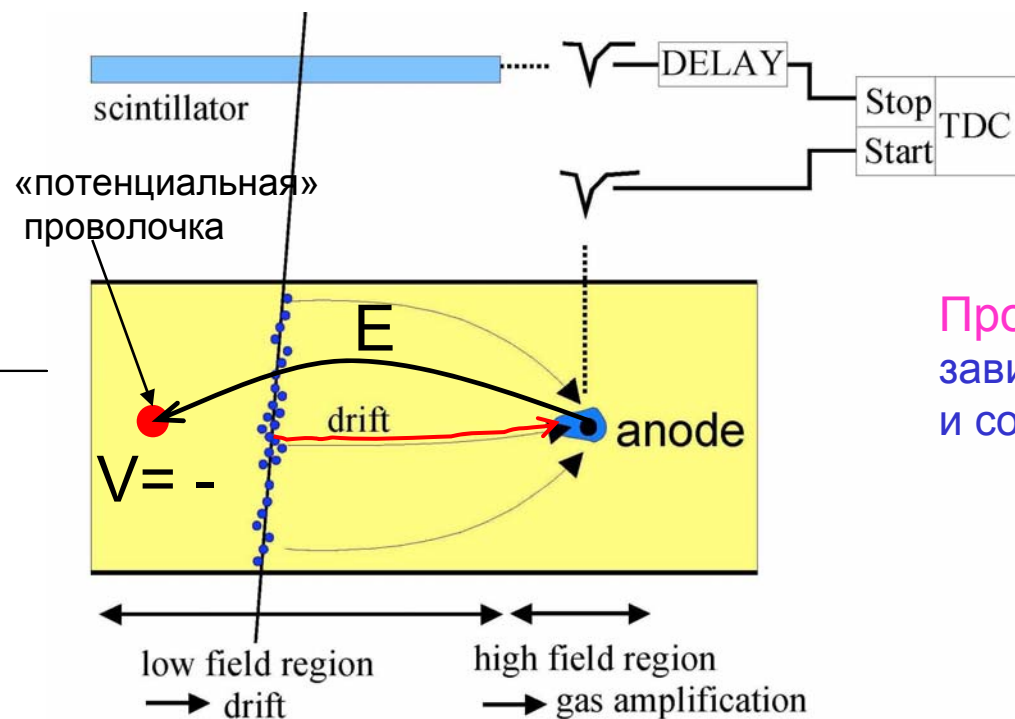
Пространственное разрешение $\sigma = s / \sqrt{12} \sim 0.7 \text{ мм}$

Г. Шарпак, Нобелевская премия, 1992

Лекции по современной экспериментальной физике
В.И.Тельнов



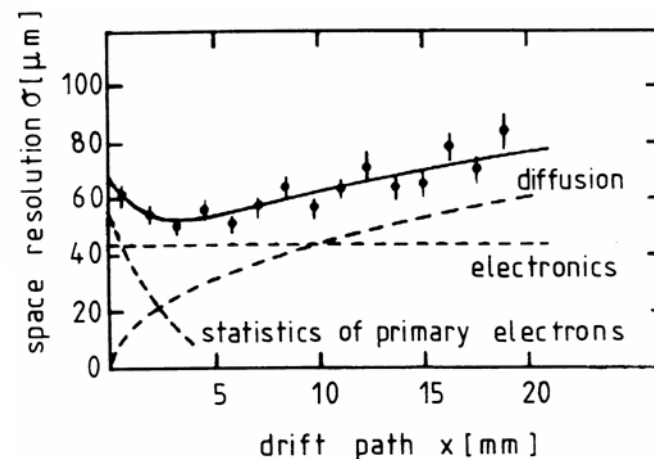
Дрейфовые камеры



$$x=f(t) \quad t - \text{время}$$

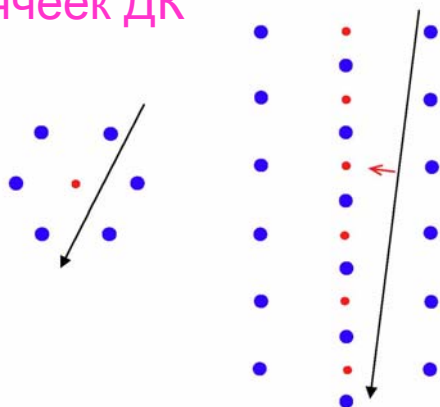
начало отсчета времени известно по времени столкновения пучков или берется от сцинт. счетчика или находится при нескольких сдвинутых камер.

Пространственное разрешение зависит от расстояния трека от проволочки и составляет $\sigma \sim 50-100$ мкм



простр. разрешение 50-150 мкм
временное разреш. 1-2 нс
мертвое время <50 нс

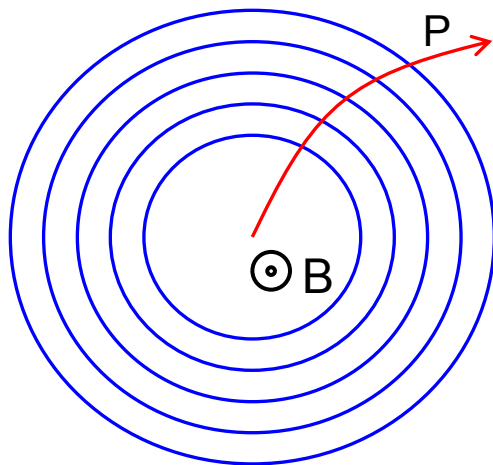
Виды ячеек ДК



о современной экспериментальной физике
В.И.Тельнов

Измерение импульса

Точность измерения импульса по стрелке прогиба

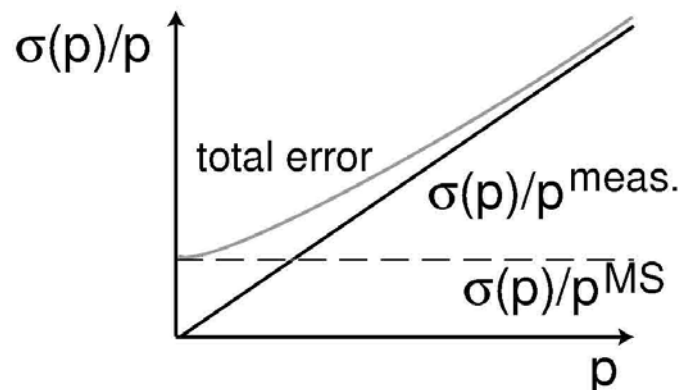


$$\left. \frac{\sigma(p_T)}{p_T} \right|^{meas.} = \frac{\sigma(x) \cdot p_T}{0.3 \cdot BL^2} \sqrt{720/(N+4)}$$

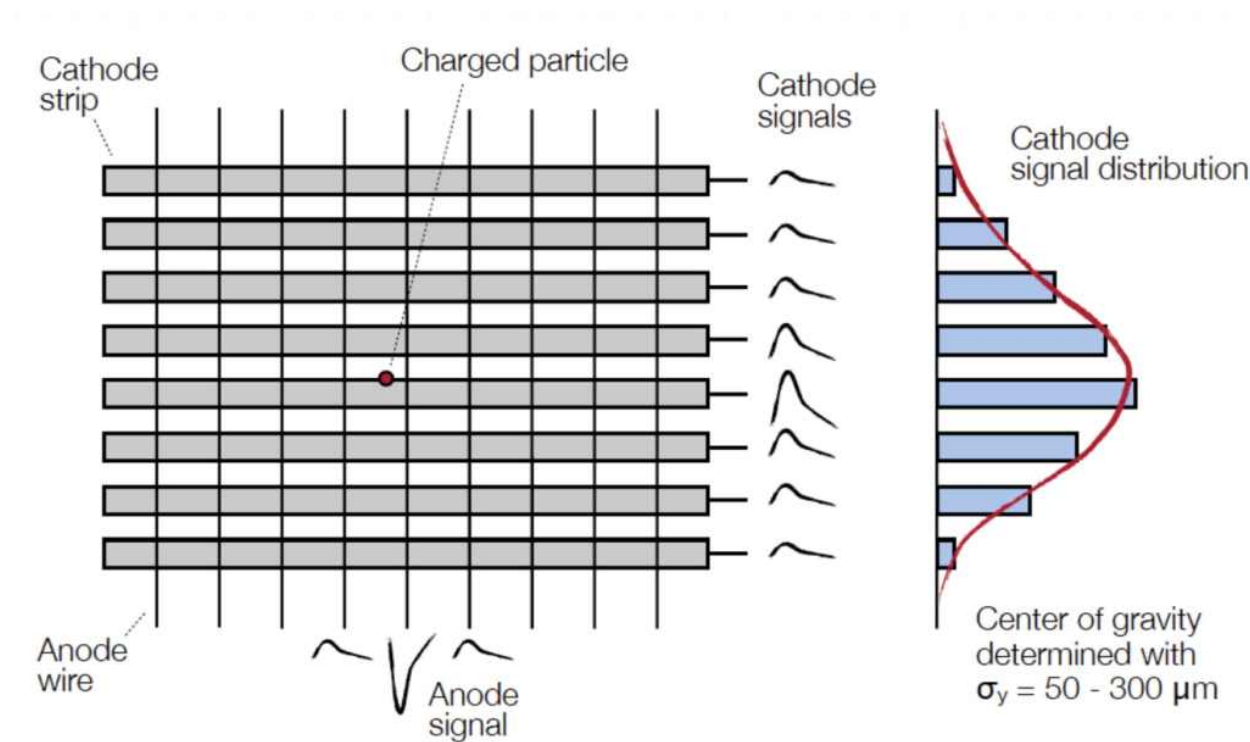
B-магн. поле, L – база, N-число изм. на траектории,
σ – простр. точность.

При малых импульсах точность ограничена многократным рассеянием

$$\left. \frac{\sigma(p)}{p_T} \right|^{MS} = 0.045 \frac{1}{B\sqrt{LX_0}}$$



Измерение координаты по центру тяжести заряда, наведенного на катодные полосы, перпендикулярные анодным проволочкам.

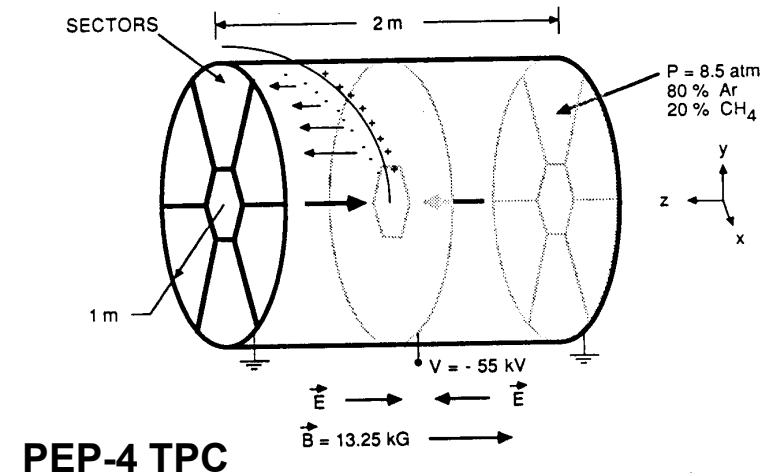
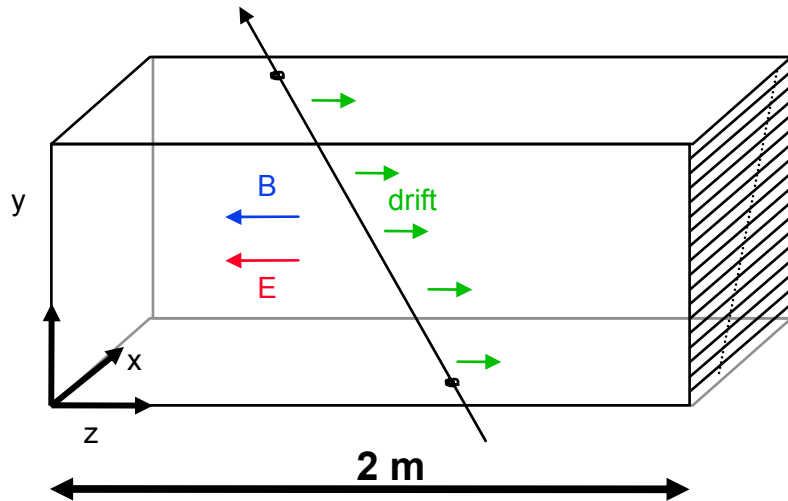


Поскольку заряд наводится на несколько полосок, то его центр тяжести практически не зависит от шага катодных полосок (и анодных проволочек). Достигается пространственное разрешение $\sigma < 50 \mu\text{м}$.

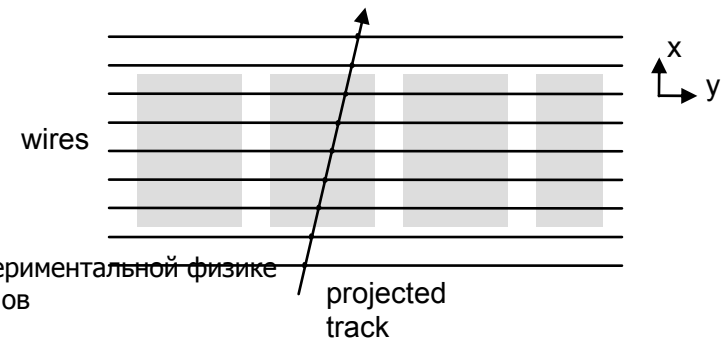
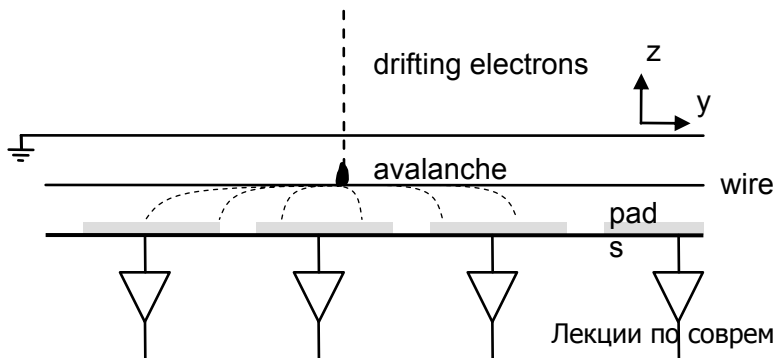
Можно катодные полосы соединить кусочками кабеля и измерять разность времен прихода сигнала к концам линий задержки, $x = v(t_2 - t_1)$

Time Projection Chamber (TPC)

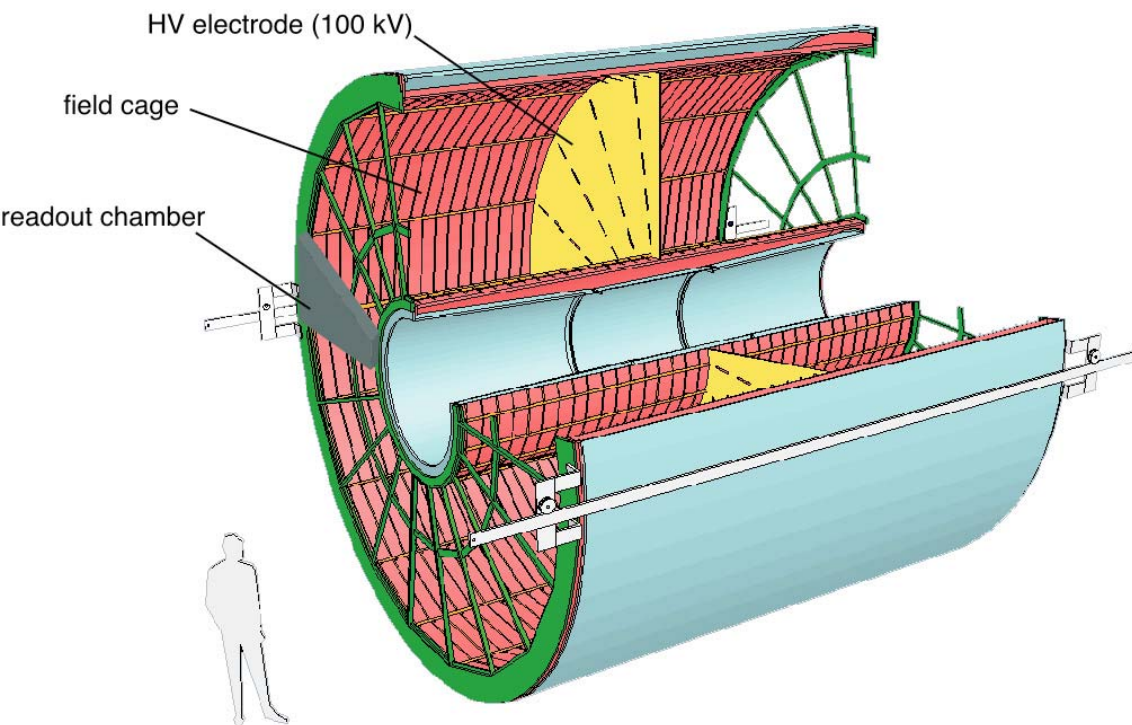
- A 3D-imaging chamber with rather long drift length



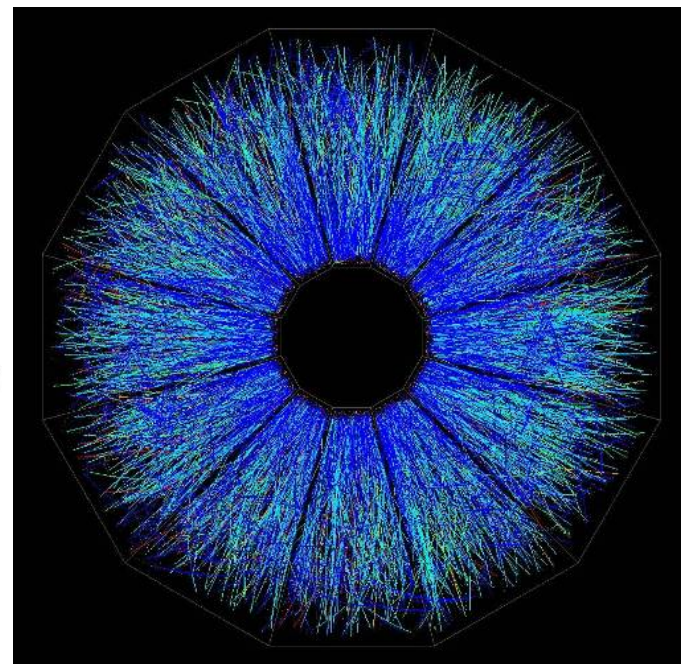
- ⇒ homogeneous B- and E-fields
- ⇒ anode plane equipped with MWPC wire chambers



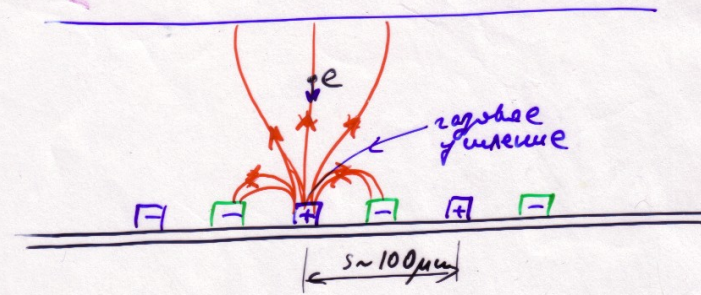
Время-проекционная камера
Time projection chamber (TPC)
детектор ALICE (CERN)



Зарегистрированное событие
при столкновении Pb-Pb



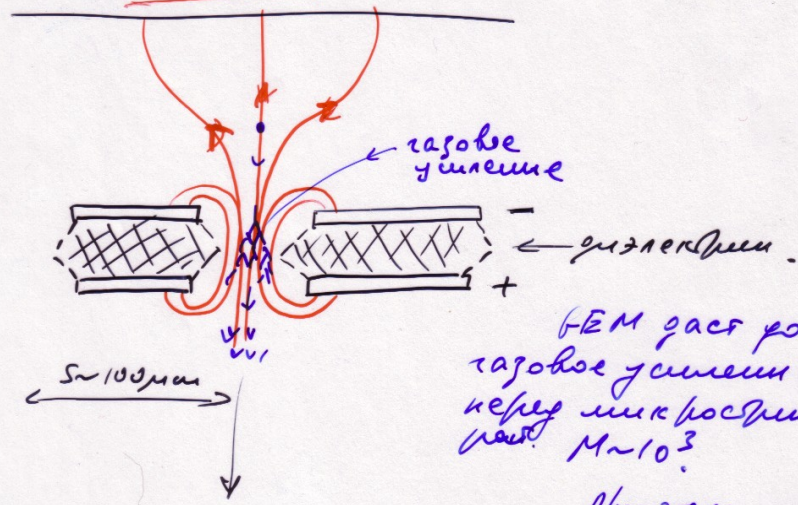
Микроспоровые камеры



Значительно дешевле ионизационных,
но разрешение хуже в несколько раз
и работают неустойчиво (шумы)

GEM

(Gas Electron Multiplier)



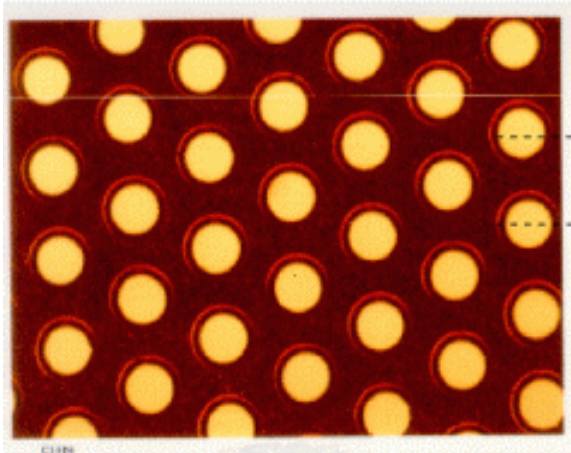
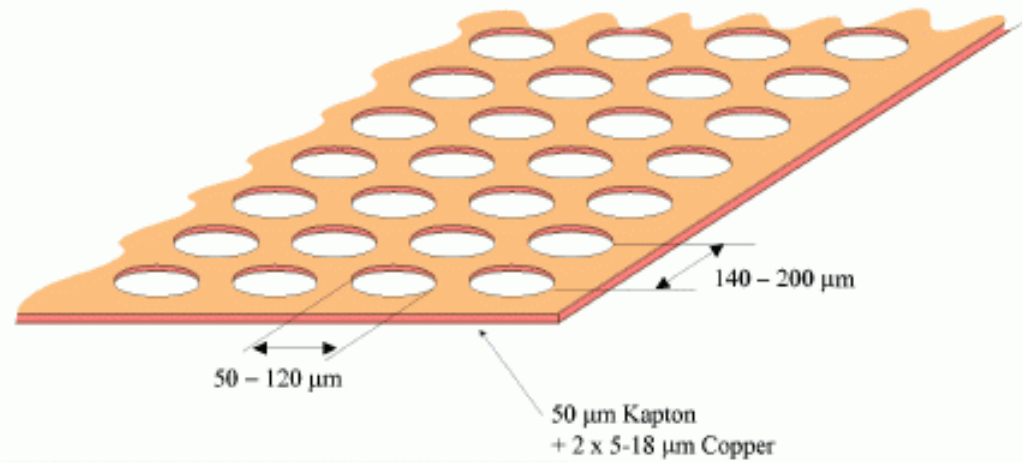
GEM дает хорошие
газовое усиление
через микроспоровые каме-
ры. $M \sim 10^3$.

При этом μ -strip
камера раб. стабильно

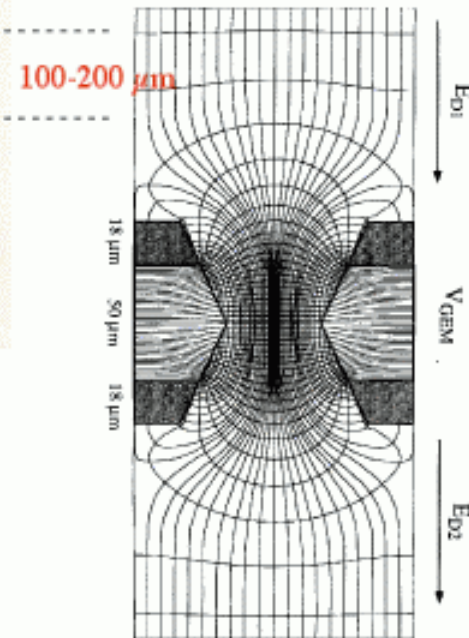
микроспоровая камера

◆ GEM: The Gas Electron Multiplier

(R. Bouclier et al., NIM A 396 (1997) 50)

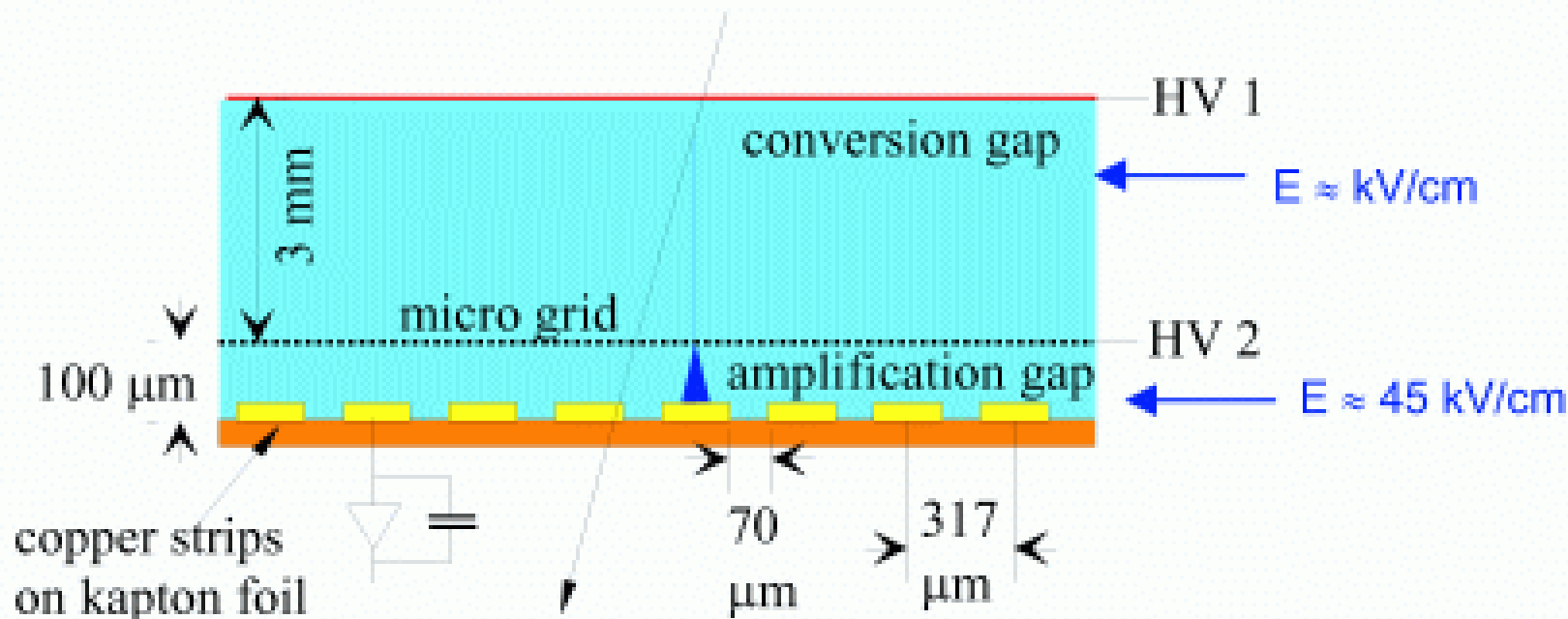


Micro photo of a GEM foil



◆ MICROMEAS

(G. Charpak et al., CERN-LHC/97-08)

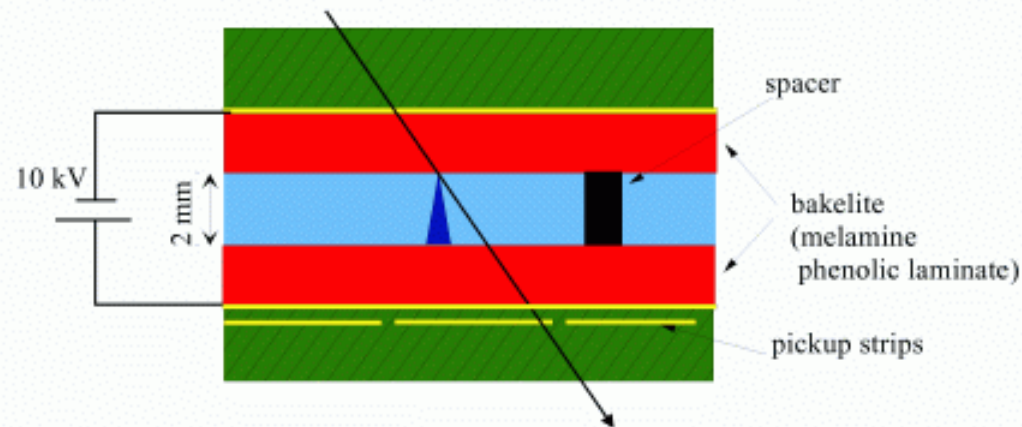


Gas: Ar-DME ($\approx 80:20$)

High rate capability ($10^9 /(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$, prototype in test beam)

◆ Resistive plate chambers (RPC)

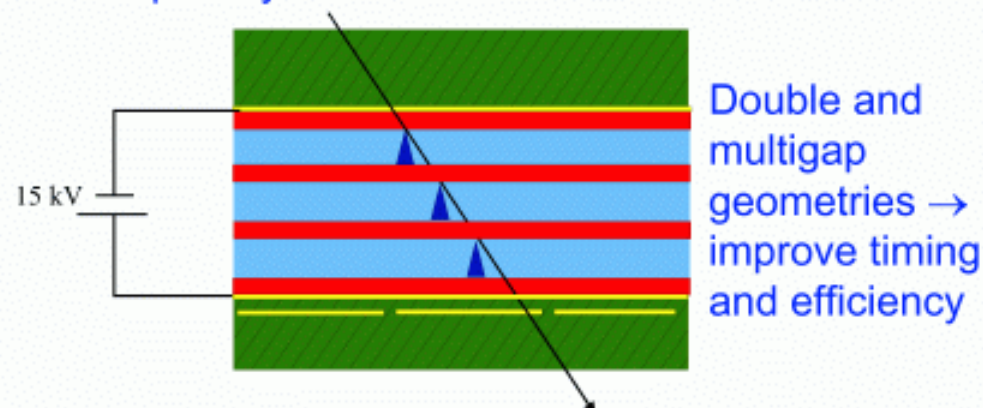
No wires !



Gas: $C_2F_4H_2$, (C_2F_5H) + few % isobutane

(ATLAS, A. Di Ciaccio, NIM A 384 (1996) 222)

Time dispersion $\approx 1..2$ ns $\rightarrow$ suited as trigger chamber
Rate capability ≈ 1 kHz / cm^2

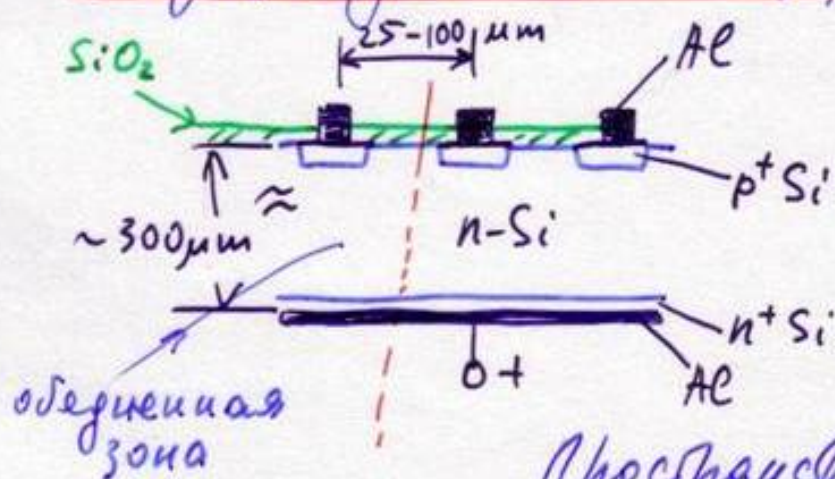


Double and
multigap
geometries $\rightarrow$
improve timing
and efficiency

Problem: Operation close to streamer mode.

Полупроводниковые координатные датчики

работает как диод



$$W / \text{напря} \sim 3.6 \text{ В}$$

$$\Delta E \sim 120 \text{ кэВ}$$

$$\Rightarrow 30 \cdot 10^3 \text{ нар}$$

$$\text{бшум} \sim \frac{1}{20} \text{ сигнала}$$

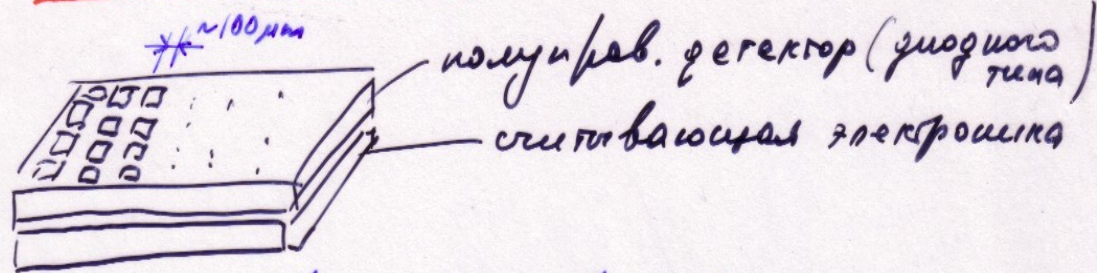
$$\tau_{\text{сгор}} \sim 3 \cdot 10^{-8} \text{ с}$$

Пространственная точность
до 5 мкм!

Используется в качестве "микровизионного" детектора во многих экспериментах для нахождения вершинных событий.

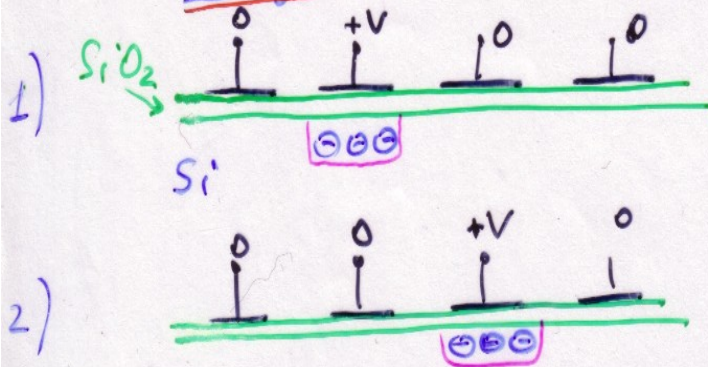
↑ это "микростриповый" детектор, измеряет одну координату

"Pixel" детектор



универсальность сразу все координаты.
Позволяют работать при больших фонах

Charged coupled device (CCD) или ПЗС

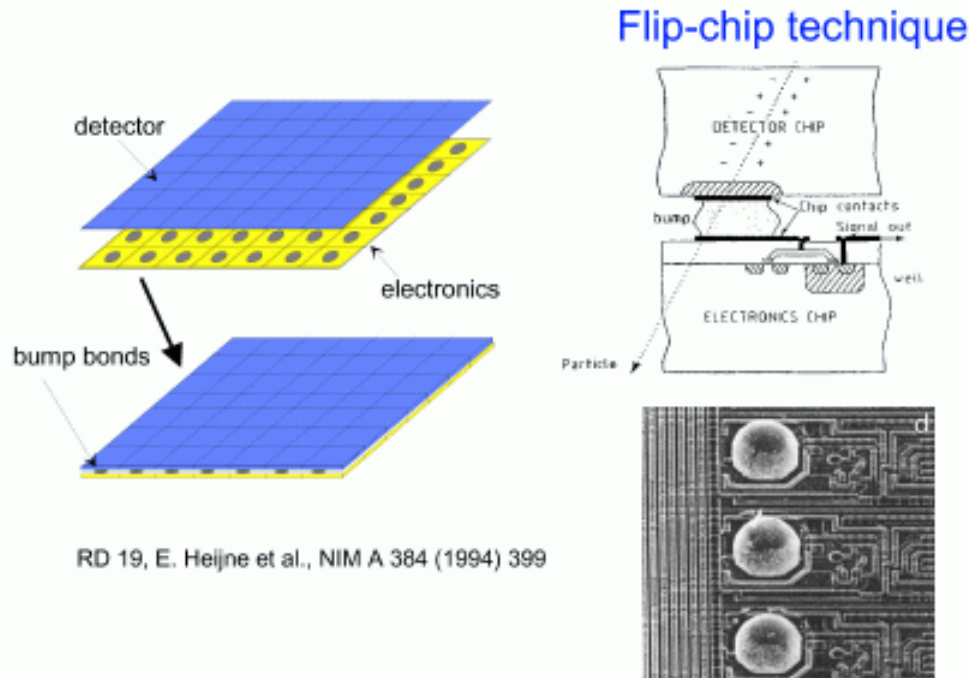


Используются в астрономии (режис. мягкого
рент. излучения)

Для регистрации оптических изображений,
цифровые фотоаппараты, чувств. ~ 2000 эф.
расселения

◆ Silicon pixel detectors

- Segment silicon to diode matrix
- also readout electronic with same geometry
- connection by bump bonding techniques



RD 19, E. Hjeltnes et al., NIM A 384 (1994) 399

- Requires sophisticated readout architecture
- First experiment WA94 (1991), WA97
- OMEGA 3 / LHC1 chip (2048 pixels, $50 \times 500 \mu\text{m}^2$) (CERN ECP/96-03)
- Pixel detectors will be used also in LHC experiments (ATLAS, ALICE, CMS)

Some characteristic numbers for silicon

- ✦ Band gap: $E_g = 1.12 \text{ V}$.
- ✦ $E(\text{e}^{\text{-}}\text{-hole pair}) = 3.6 \text{ eV}$, ($\approx 30 \text{ eV}$ for gas detectors).
- ✦ High specific density (2.33 g/cm^3) $\rightarrow \Delta E/\text{track length}$ for M.I.P.'s.: $390 \text{ eV}/\mu\text{m} \approx 108 \text{ e-h}/\mu\text{m}$ (average)
- ✦ High mobility: $\mu_e = 1450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_h = 450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
- ✦ Detector production by microelectronic techniques $\rightarrow$ small dimensions $\rightarrow$ fast charge collection ($< 10 \text{ ns}$).
- ✦ Rigidity of silicon allows thin self supporting structures.
Typical thickness $300 \mu\text{m} \rightarrow \approx 3.2 \cdot 10^4 \text{ e-h}$ (average)

Идентификация гасов

Время пролета.

$$t = \frac{R}{v}$$

$$\rho = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \leftarrow \text{известно по кривизне}$$

$$M^2 = \rho^2 \left(\frac{t^2}{R^2} - \frac{1}{c^2} \right)$$

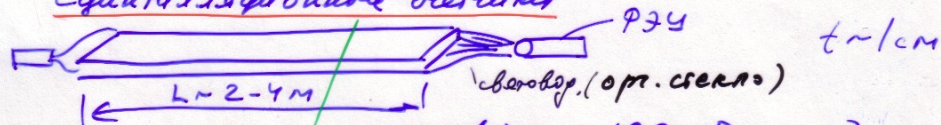
$$\delta M^2 = \frac{2\rho^2 \delta t}{v R}$$

$$\rho_{\max} \sim \sqrt{R/\delta t}$$

П-к-разделение

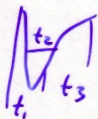
типично для сис. сегментов.
 при $\delta t \sim 200 \cdot 10^{-12}$ сек и $R = 1$ м
 п-к разделяются до $\rho \sim 1$ бев/с.
 при $\delta t \sim (30-50) \cdot 10^{-12}$ сек (искровые сегменты) пегова
 $\rho_{\max} \sim 2$ бев/с

Синхронизационные сегменты



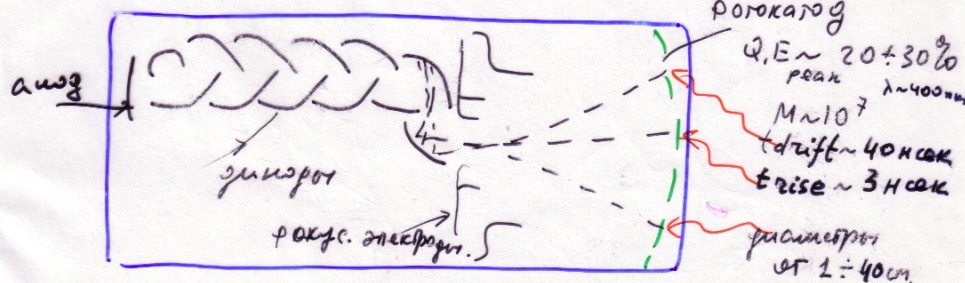
$L \delta$ на $100 \geq B$
 1 см пластмассы $\Delta E \sim 2$ МэВ $\Rightarrow 2 \cdot 10^4$
 светосбор $\leq 10\%$ $\Rightarrow 2 \cdot 10^3$
 кв. чувств. ФЭУ $\sim 20\%$ $\Rightarrow 400$ ф. электр.
 ($\lambda \sim 400$ нм.)
 $\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{1}{\sqrt{N}} \sim 5\%$
 + 10% - флукт. пом. энергии (лангзай)

сис. импульс света



$t_1 \sim 0.5-1$ нсек
 $t_2 \sim 1.5-3$ нсек.
 $t_3 \sim 1.5-3$ нсек.

+ синхронизатор
 пластмасса + синхронизация сигнала



$$\Delta t = \frac{Lc}{2p^2} (m_1^2 - m_2^2)$$

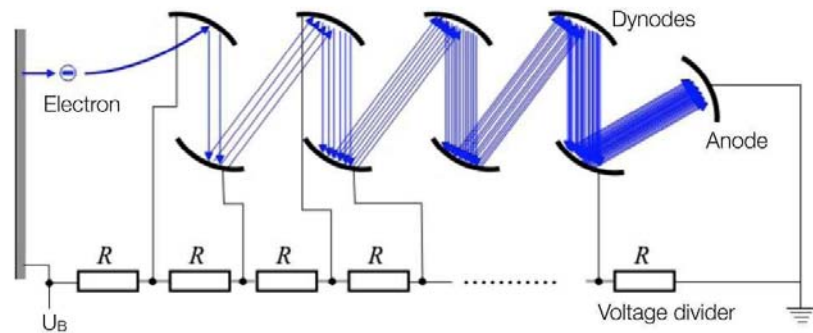
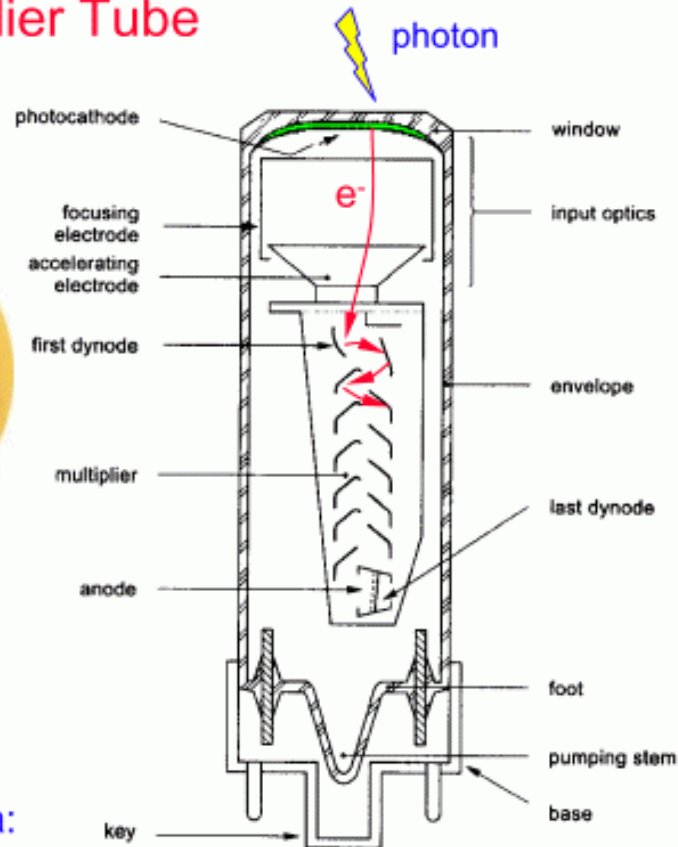


Photo Multiplier Tube (PMT)



(Philips Photonic)



main phenomena:

- photo emission from photo cathode.
- secondary emission from dynodes.

dynode gain $g=3-50$ ($f(E)$)

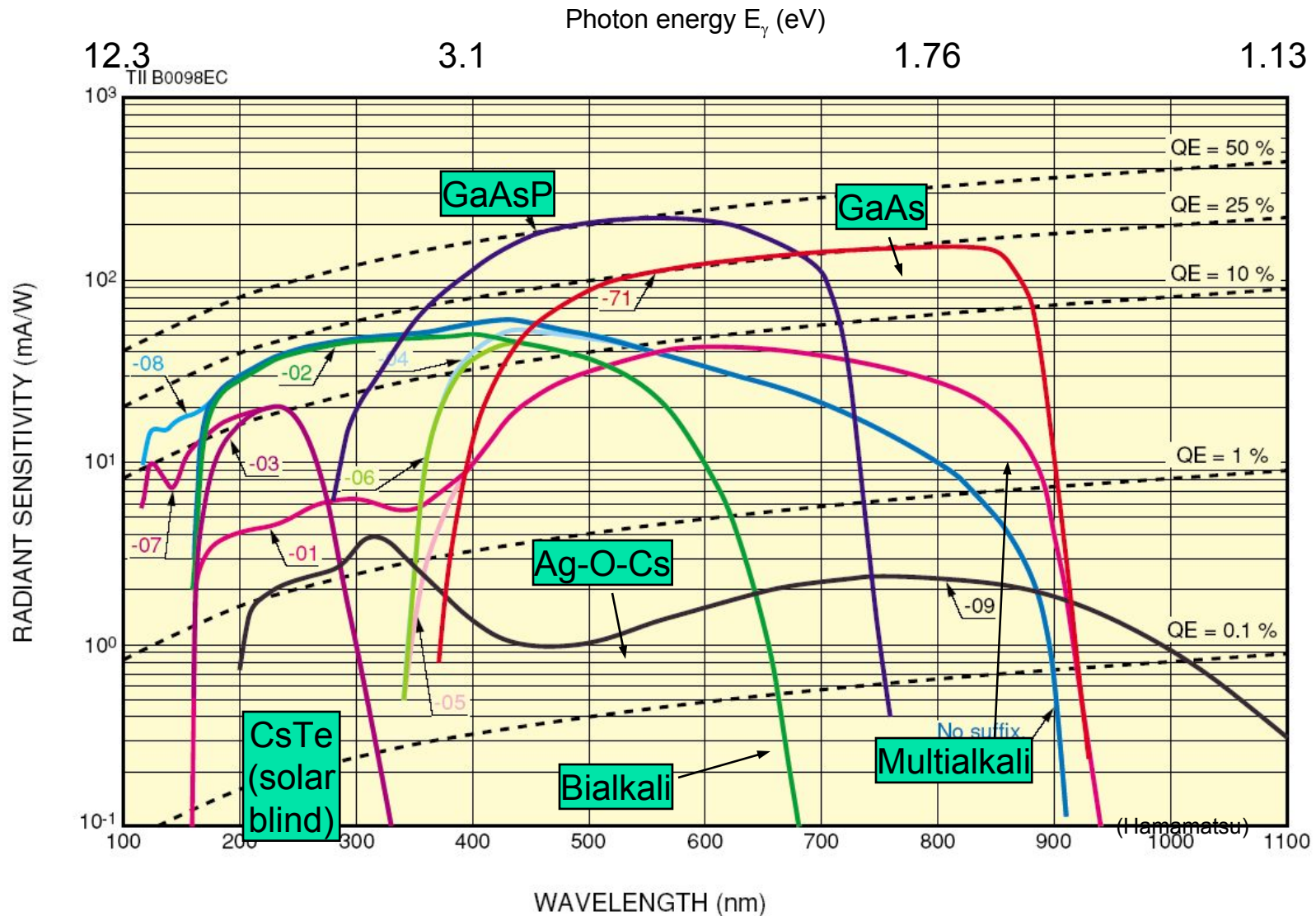
total gain $M = \prod_{i=1}^N g_i$

10 dynodes with $g=4$

$M = 4^{10} \approx 10^6$

PM's are in general very sensitive to B-fields, even to earth field (30-60 μ T). μ -metal shielding required.

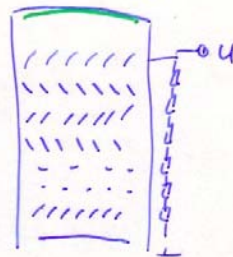
(External) QE of typical semitransparent photo-cathodes



Bialkali: SbKCs, SbRbCs **Multialkali:** SbNa₂KCs (alkali metals have low work function)

Лекции по современной экспериментальной физике
В.И.Тельнов

Другие РДЖ



тапозы

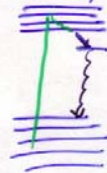


сетчатый ФДУ
(работает в однородном
магнитном поле)

(6,1)



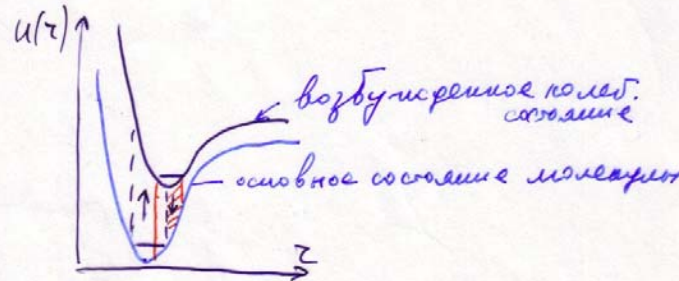
Механизм сенсибилизации
Неорганические соли. (NaI(Tl), CsI(Tl)...) . . .



← активаторы ТЛ и др.

спектр излучения отливается от
спектра помехи

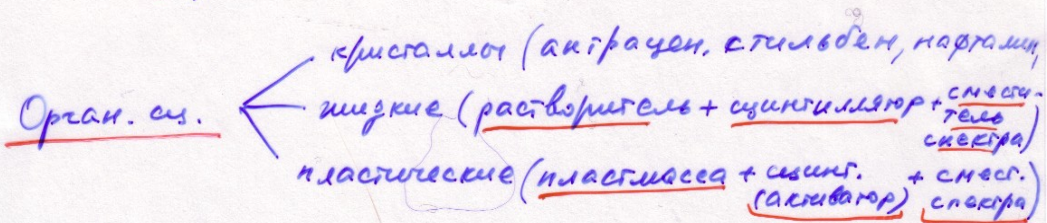
Ори. сенсибилизатор (кристаллы, чистые, молекулы)



Переход совершается между экстремальными
уровнями, но возбужденному состоянию
соотв. возбужденное сост. Молекулы, по тому
спектр помехи отливается (чистые), тем
спектр излучения.

Органические сцинтилляторы (продолжение)

Орган. сц.



Например:

жидкий сцинтиллятор!

основа — толуол, ксилол

активатор
(сцинтиллятор) — p-терфенил $2-10 \frac{\text{г}}{\text{литр}}$!

смес. тело спектра

(для совм. с ФЭУ) РОРОР
(и уменьшения помех)
смеситель РОРОР $\lambda_{\text{авт}} \sim 360 \text{ нм}$

$\sim 0.01-0.5 \frac{\text{г}}{\text{литр}}$

$\lambda_{\text{сц.т.}} \sim 415-420 \text{ нм}$

пластические сцинтилляторы

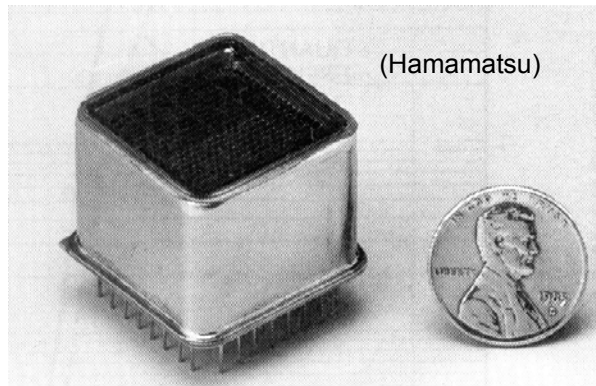
основа — полистирол, поливинилтолуол
плексиглас, и др.

активатор — стилобен, нафталин, РВД, ВТВВQ
 $\sim 1-3\%$

смесители РОРОР $360 \rightarrow 415-420$
ВВQ $380-430 \rightarrow 500-505$ $\sim 0.01\%$

Энергия пом. в основном в "основе" (растворитель)
который не сцинтиллирует и имеет $I_{\text{возб}} > I_{\text{возб. актив.}}$
Затем энергия передается активатору (создатель, поощрение)

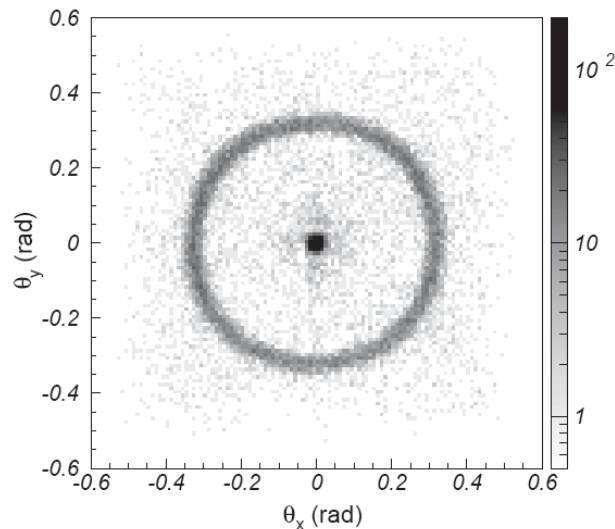
Multi-anode and flat-panel PMT's



Multi-anode (Hamamatsu H7546)

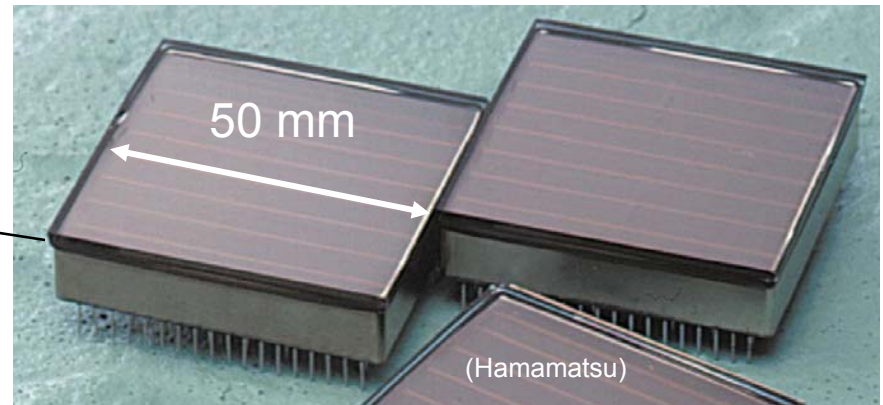
- Up to 8×8 channels ($2 \times 2 \text{ mm}^2$ each);
- Size: $28 \times 28 \text{ mm}^2$;
- Active area $18.1 \times 18.1 \text{ mm}^2$ (41%);
- Bialkali PC: $\text{QE} \approx 25 - 45\%$ @ $\lambda_{\text{max}} = 400 \text{ nm}$;
- Gain $\approx 3 \times 10^5$;
- Gain uniformity typ. 1 : 2.5;
- Cross-talk typ. 2%

Cherenkov rings from
3 GeV/c π^- through aerogel



Flat-panel (Hamamatsu H8500):

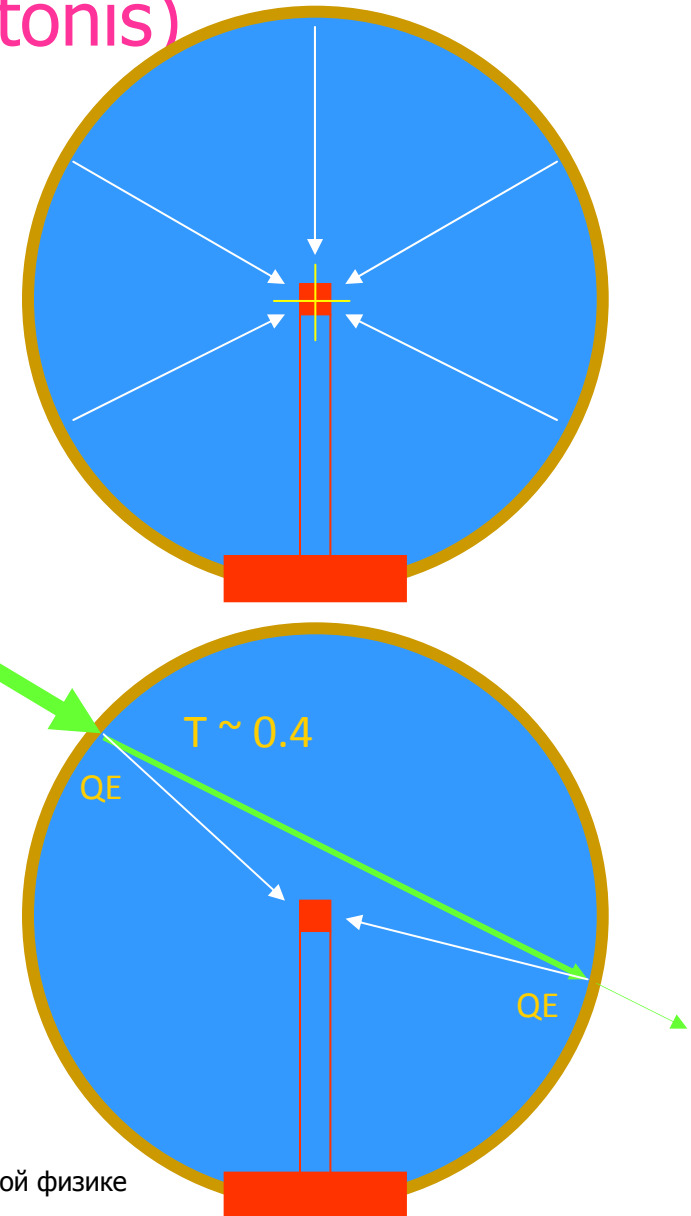
- 8 x 8 channels ($5.8 \times 5.8 \text{ mm}^2$ each)
- Excellent surface coverage (89%)



X-HPD project (CERN / Photonis)

Concept of a large spherical tube with central spacial scintillation crystal (X-tal) anode
= modern implementation of Philips Smart / Lake Baikal concept.

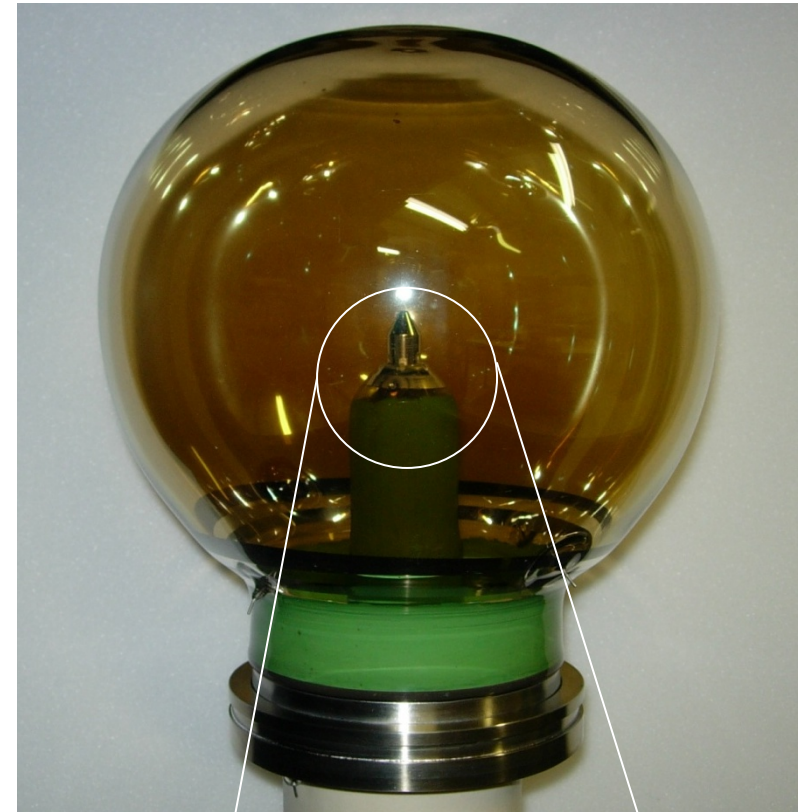
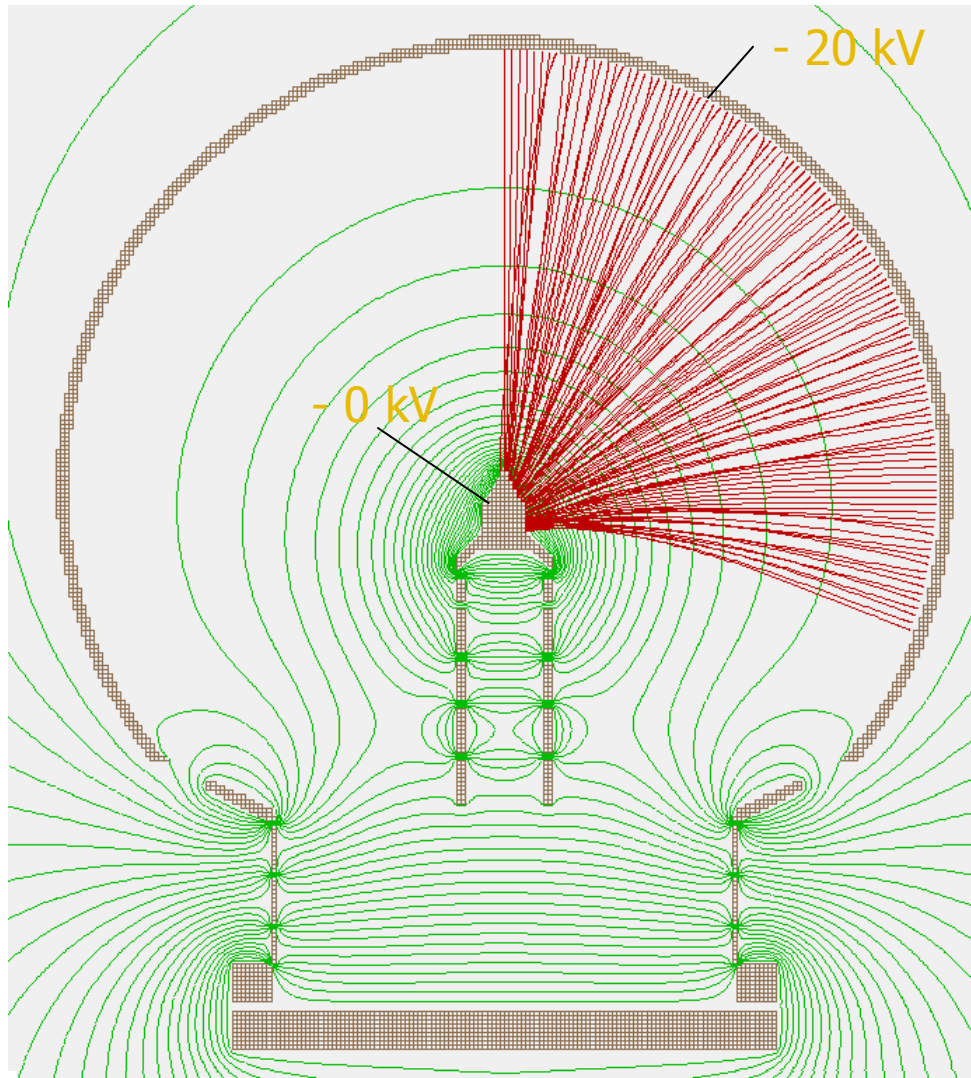
- Accelerate photoelectron hits scintillator and generates scintillation light: ~ 25 photons/keV.
- Detect scint light with small external photodetector (e.g. PMT, G-APD). 1 photon = 30-50 detected photoelectrons.
- Radial electric field
 - negligible transit time spread
 - $\sim 100\%$ collection efficiency
 - no magnetic shielding required
- Large viewing angle ($d\Omega \sim 3\pi$)
- Possibility of anode segmentation
 - imaging capability (limited!)
- Sensitivity gain through 'Double-cathode effect' → $QE_{\max} \sim 50\%$ observed.



A. Braem et al., *NIM A* 602, (2009), 193-196

Лекции по современной экспериментальной физике
В.И.Тельнов

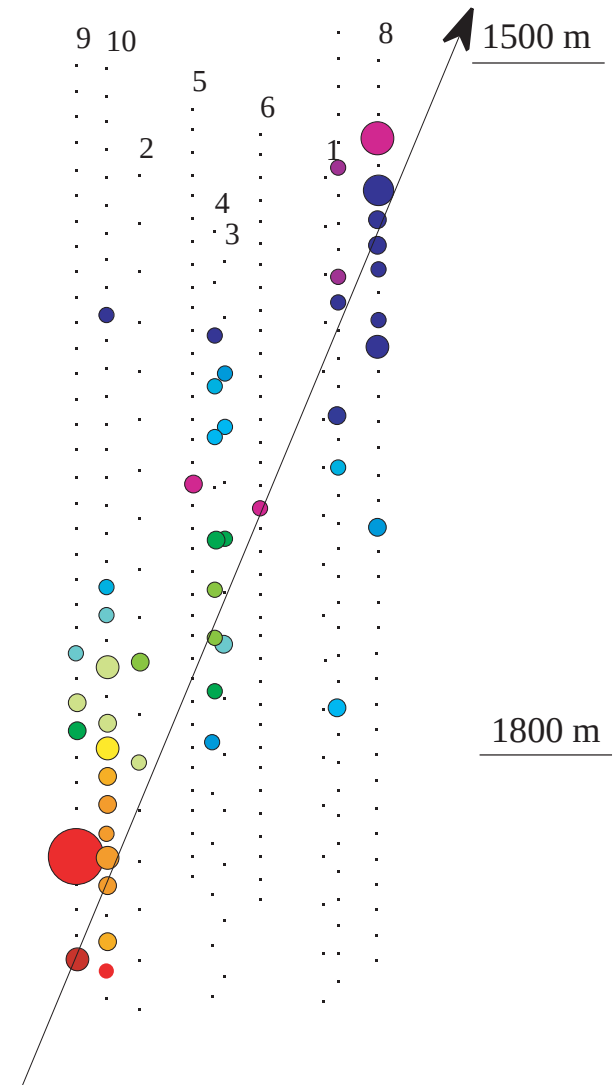
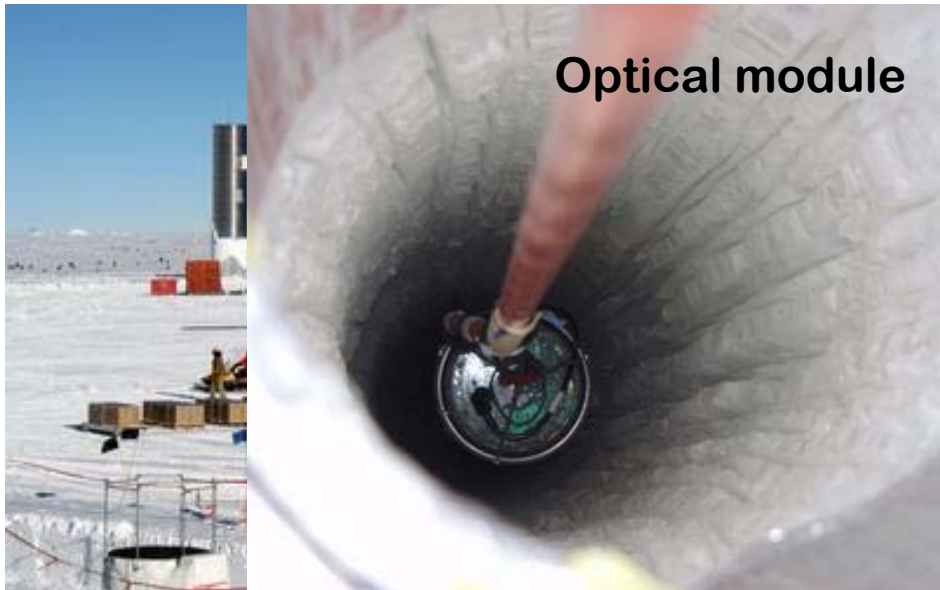
X-HPD project (CERN)



Лекции по современной экспериментальной физике
В.И.Тельнов

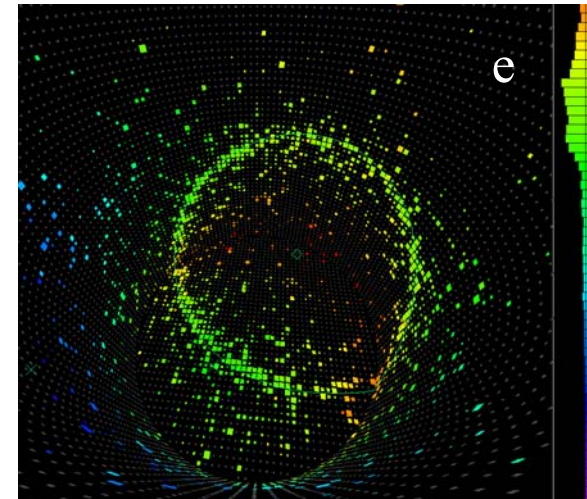
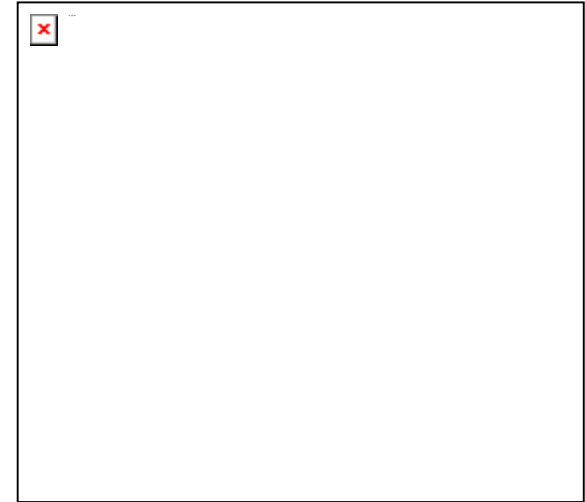
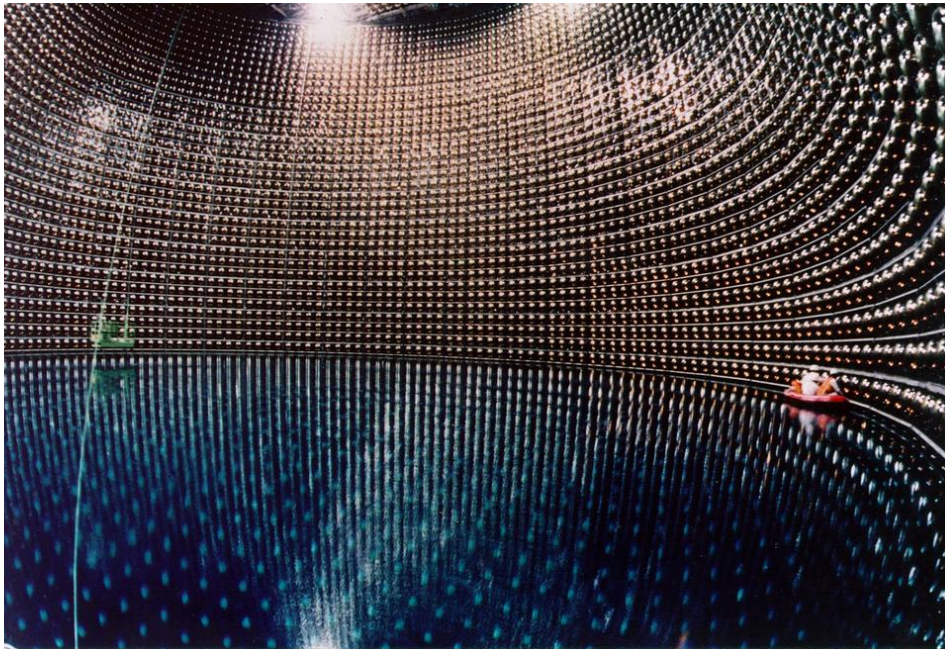
Ice-Cube

- Neutrino experiment in the ice of the South Pole, detecting Cherenkov light from up-going neutrinos that have traversed the earth, and then $\nu_\mu N \rightarrow \mu X$
- Others use similar technique with sea water as the target/radiator (ANTARES, NESTOR, etc)
- Very challenging deployment!

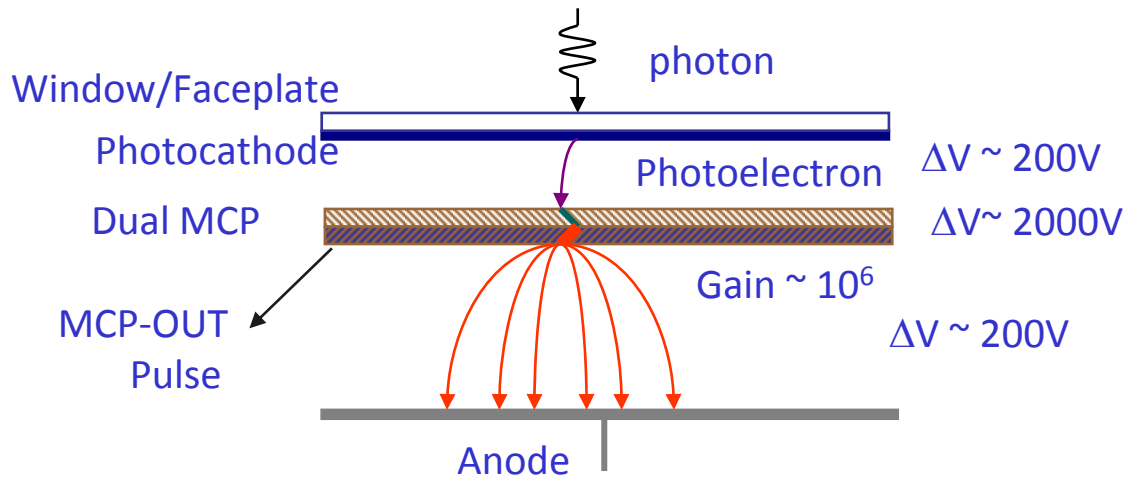


Super-Kamiokande

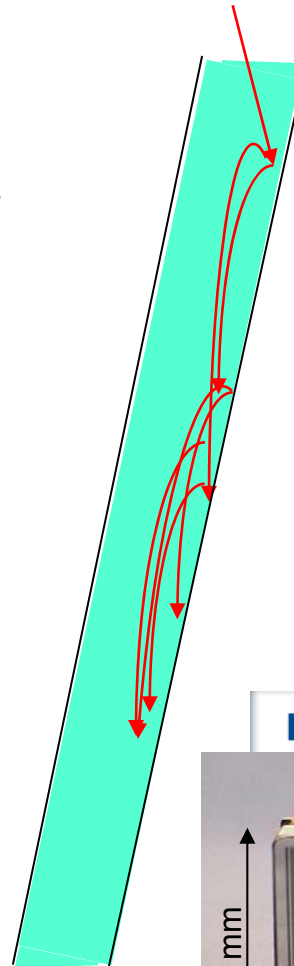
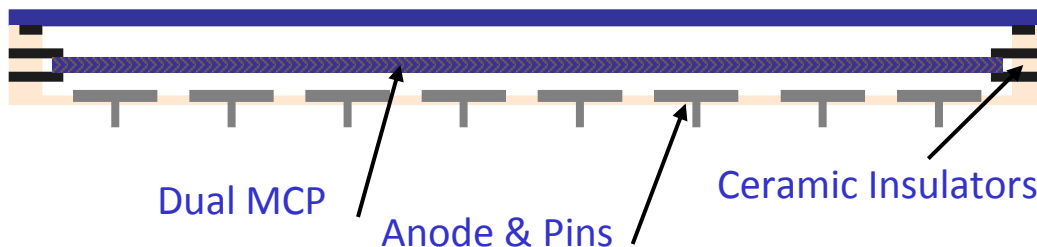
- Neutrino detector using water as the target and detector medium
- Clear separation (real data) of μ - and e-like rings (showering)
Misidentification rate < 1%



Micro Channel Plate (MCP) based PMTs

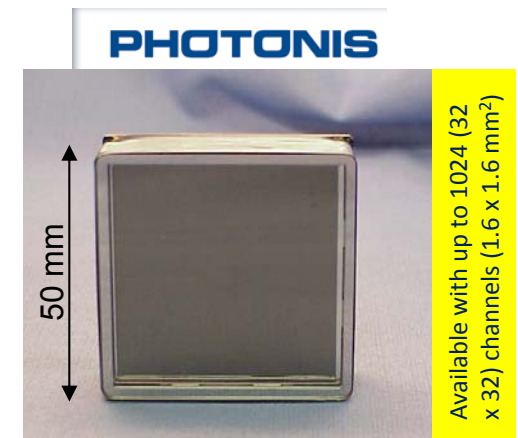


Gain stage and detection are decoupled → lots of potential and freedom for MA-PMTs: Anode can be easily segmented in application specific way.

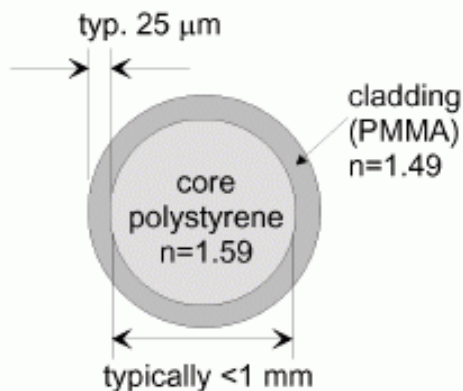


- Typical secondary yield is 2
- For 40:1 L:D there are typically 10 strikes ($2^{10} \sim 10^3$ gain single plate)
- Pore sizes range from <10 to $25 \mu m$.
- Small distances → small TTS and good immunity to B-field

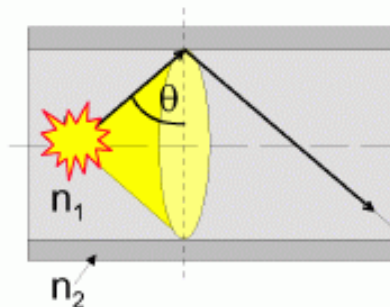
Лекции по современной экспериментальной физике
В.И.Тельнов



◆ Optical fibers



light transport by total internal reflection



$$\theta \geq \arcsin \frac{n_2}{n_1} \approx 69.6^\circ$$

$$\frac{d\Omega}{4\pi} = 3.1\% \quad \text{in one direction}$$

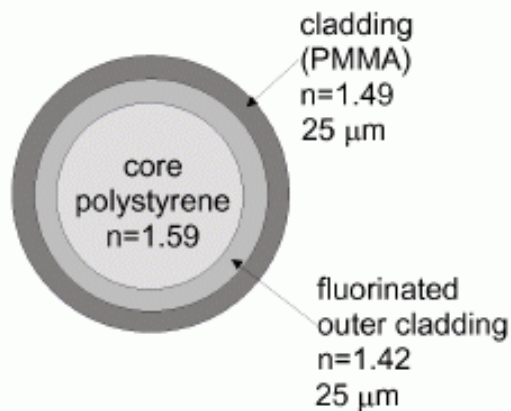
minimize n_{cladding} .

Ideal: air ($n=1$), but impossible due to surface imperfections

multi-clad fibres
for improved
aperture

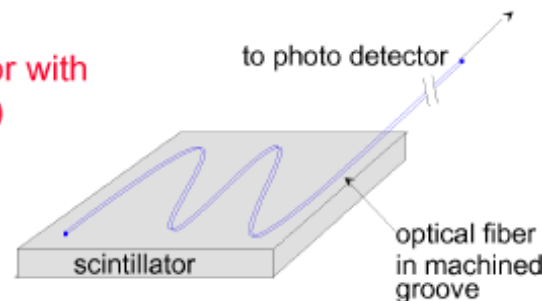
$$\frac{d\Omega}{4\pi} = 5.3\%$$

and absorption
length: $\lambda > 10$ m for
visible light



Внутренняя часть волокна содержит сместитель спектра:
фотон поглощается и перевысвечивается (на меньшей частоте) изотропно, только поэтому свет захватывается в волокно.

readout of a scintillator with
a fiber (schematically)



♦ Hybrid photo diodes (HPD)

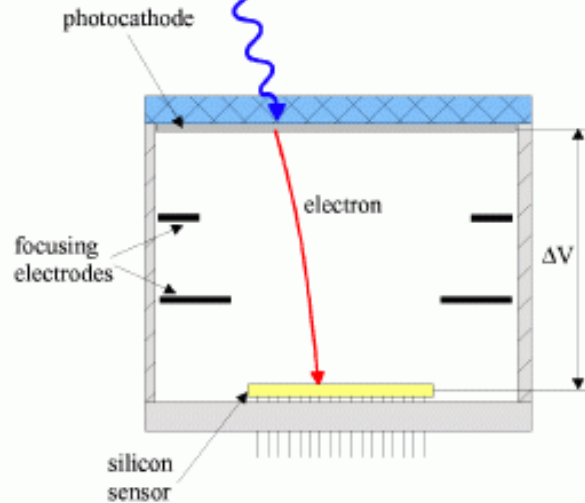


photo cathode + p.e.
acceleration + silicon
det. (pixel, strip, pads)

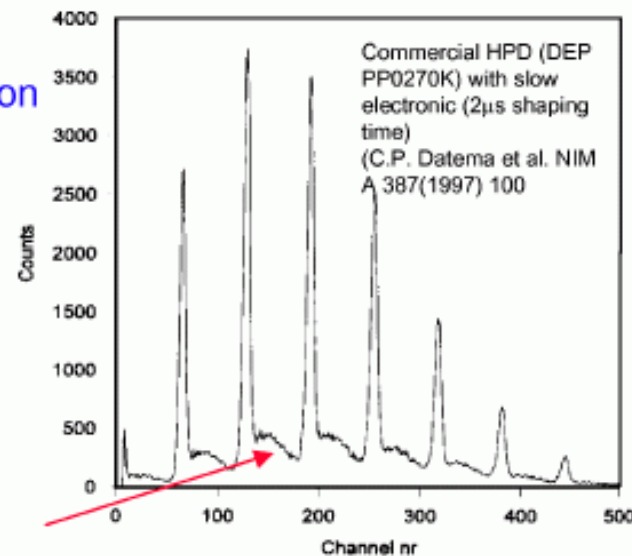
Photo cathode like in PMT, ΔV 10-20 kV

$$G = \frac{e\Delta V}{W_{Si}} = \frac{20 \text{ keV}}{3.6 \text{ eV}} \approx 5 \cdot 10^3 \quad (\text{for } \Delta V = 20 \text{ kV})$$

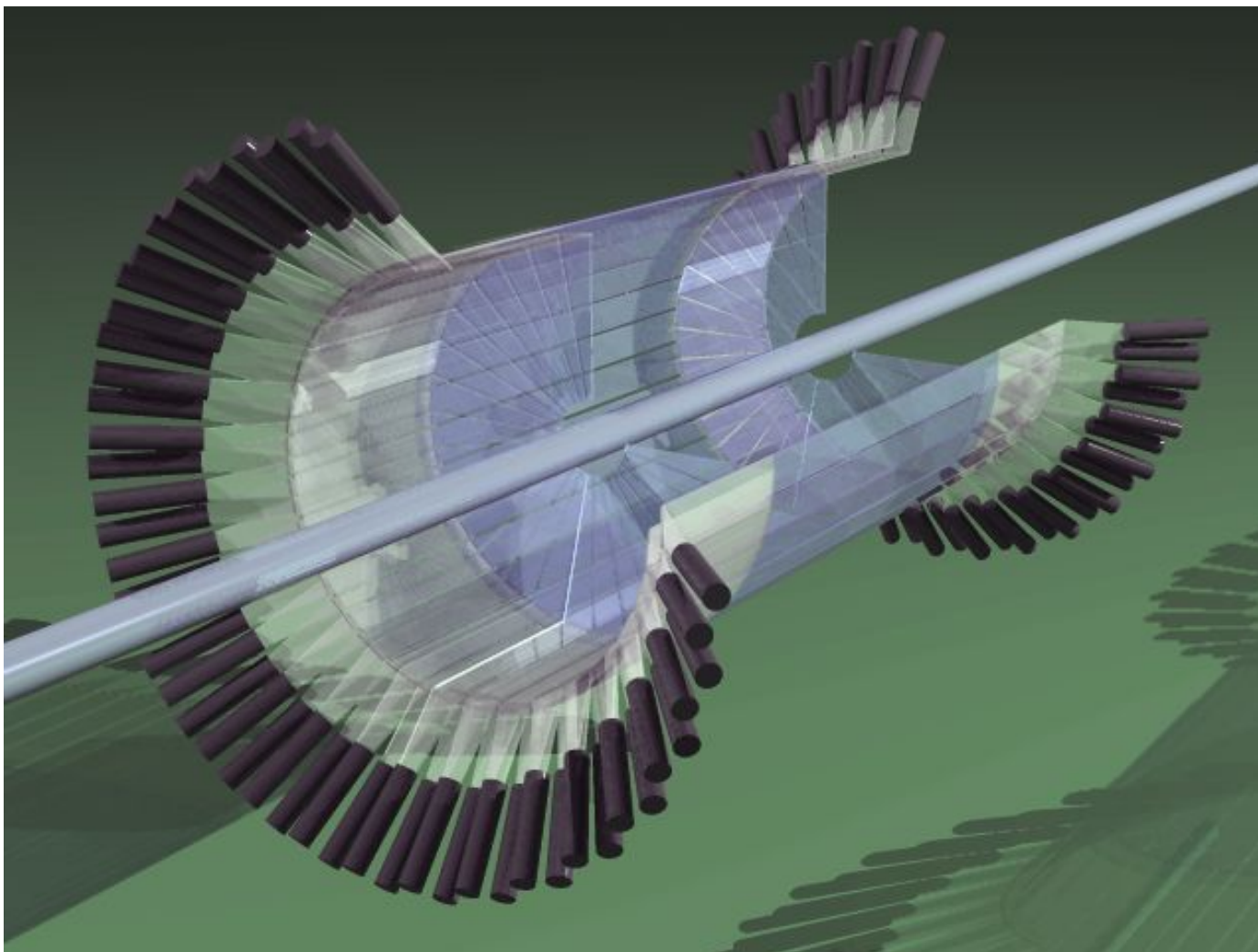
Single photon detection
with high resolution

Poisson statistics
with $\bar{n} = 5000$!

Background from
electron backscattering
from silicon surface



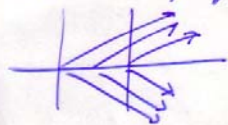
Система сцинтилляционных счетчиков детектора КЕДР



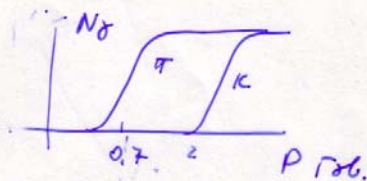
Черенковские счетчики

(7)

Черенк. излучение - сл. ионизирующее излучение



$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$$



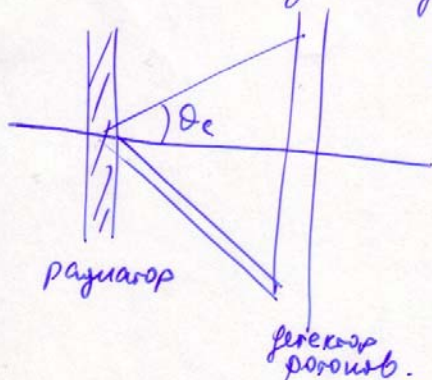
Пороговое излучение



1) из-за разницы (rho 20 атм)
 2) асфальт (n=1.02, ... 1.08)
 $\approx n(SiO_2) + 2n(H_2O)$
 3-5

Получают 5-10 фотоэлементов
 или толщиной 10 см - фотодетектор.

RICH - Ring Imaging Cherenkov counters.



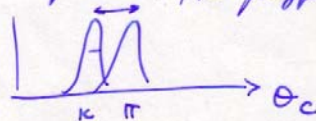
$$\frac{v}{c} = \frac{1}{n \cos \theta_c}$$

$$P_{max} \propto \sqrt{\frac{m_2^2 - m_1^2}{2N \sqrt{n^2 - 1} \theta_c}} \quad (N\sigma)$$

с твердым (кварцевым) радиатором $P_{max}(3\sigma) \sim 4 \div 5 \text{ ГГц/с}$.

с жидким $P_{max}(3\sigma) \sim 30 \text{ ГГц/с}$

для π/K разделения



Кривые пропускания окон (кварц, NaF) и квантовая чувствительность газовых добавок в детектор (ТМЭ, ТЕА)

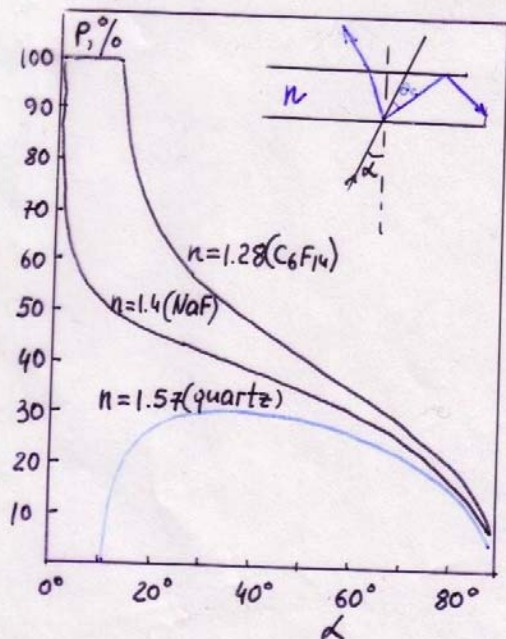
Radiator

SLD, DELPHI - фреон C_6F_{14} , $n=1.28$, ТМЭ
 PSI-proposal - NaF, $n=1.4$, ТМЭ, ТЕА
 ← кристалл

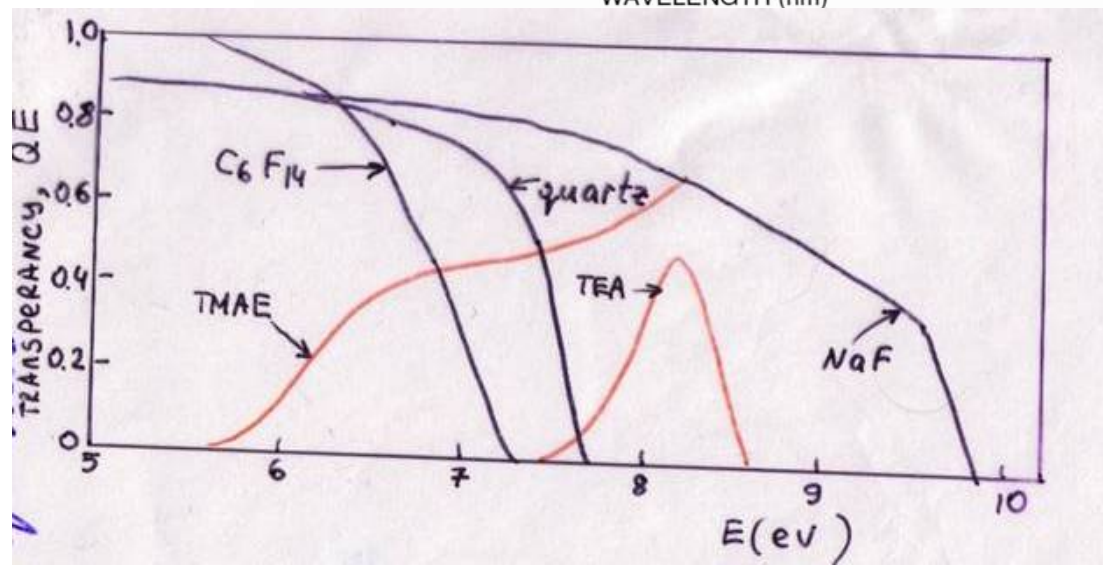
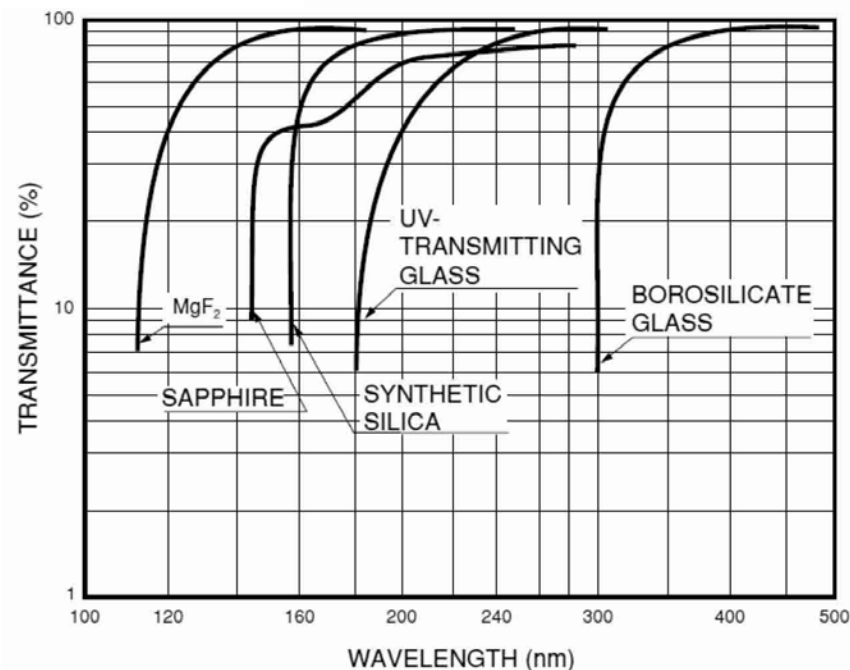
But why not a quartz?

Possible arguments:

1. too large n (total internal reflection)
2. large chromatic dispersion

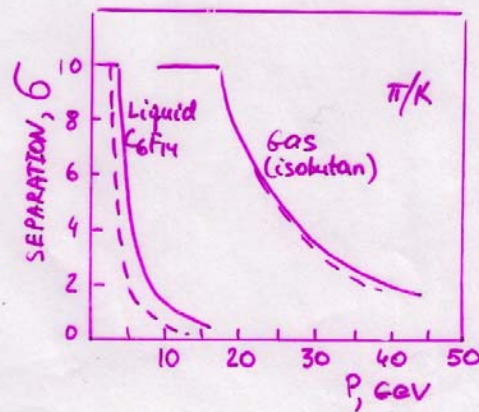
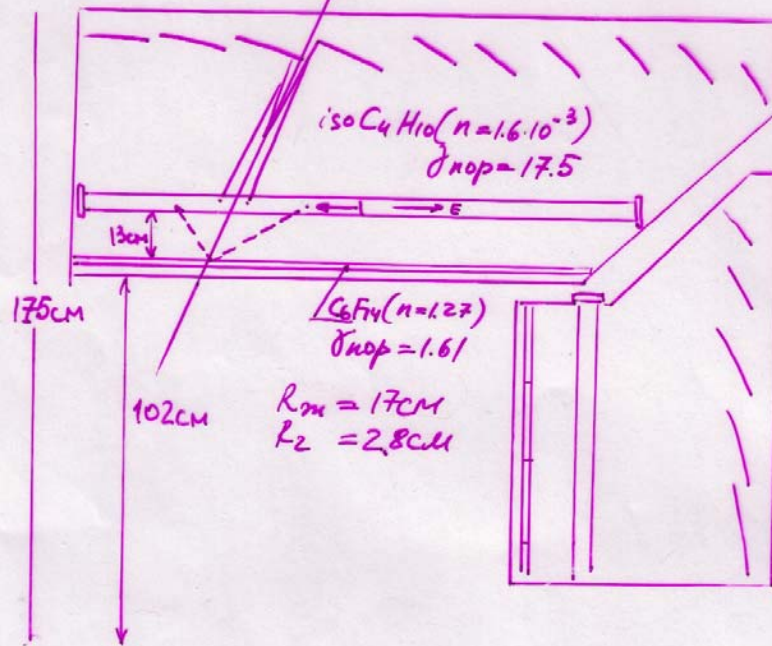


at $\alpha \geq 20^\circ$ - no principal difference



SLD (DELPHI) (8)

TMAE(55>B) $\Rightarrow$ кварц

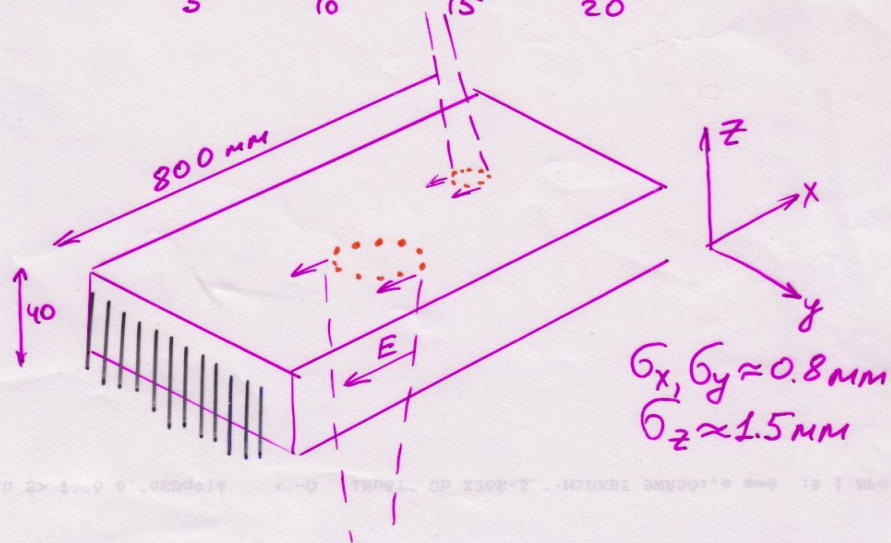
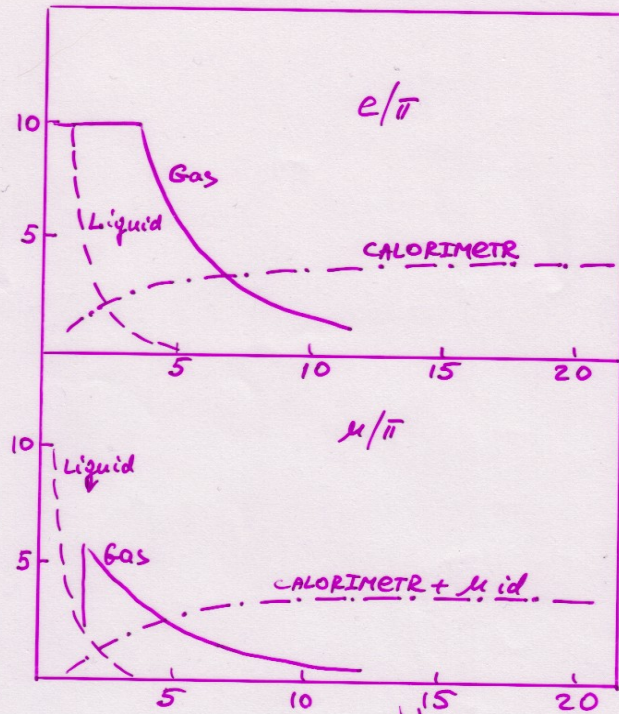


— 90°
 --- 45°

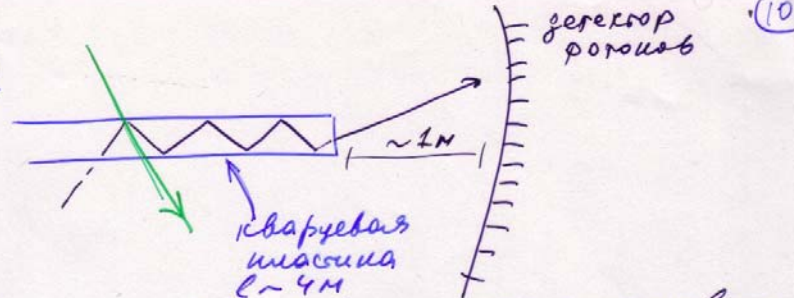
26

C_6F_{14} 0.23-7.5(5) GeV
 C_4H_{10} 8-37 GeV

SLD (н/погоарм)

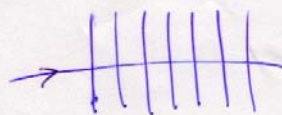
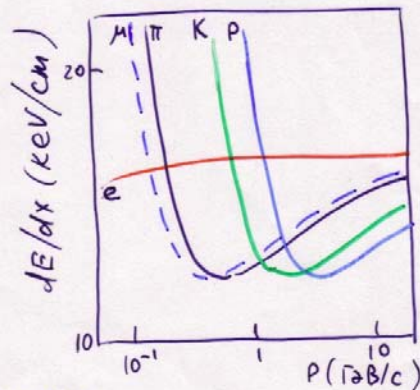


ФIRC

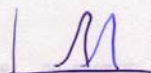
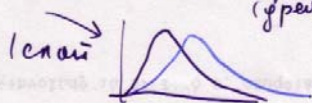


Часть гермиевого света за счет полного внутреннего отражения выходит через торцы кварцевой пластинки. Там фотон регистрируется мощью вакуумного фотодиода

Сделано
Примено для В-фабрики в Стэнфорде.
(можно измерять разность времени, но будет погрешность)
Время фиксации по поперечной потере



многократная
система прои. камер ~ 50 слоев.
(фреймворк)

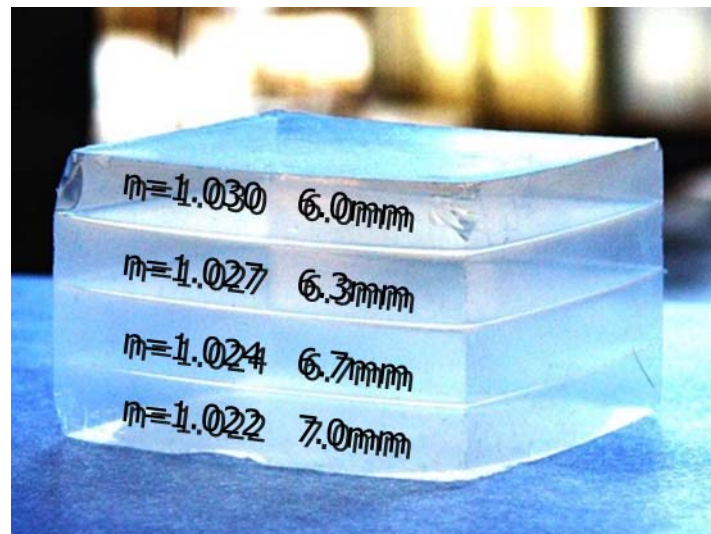
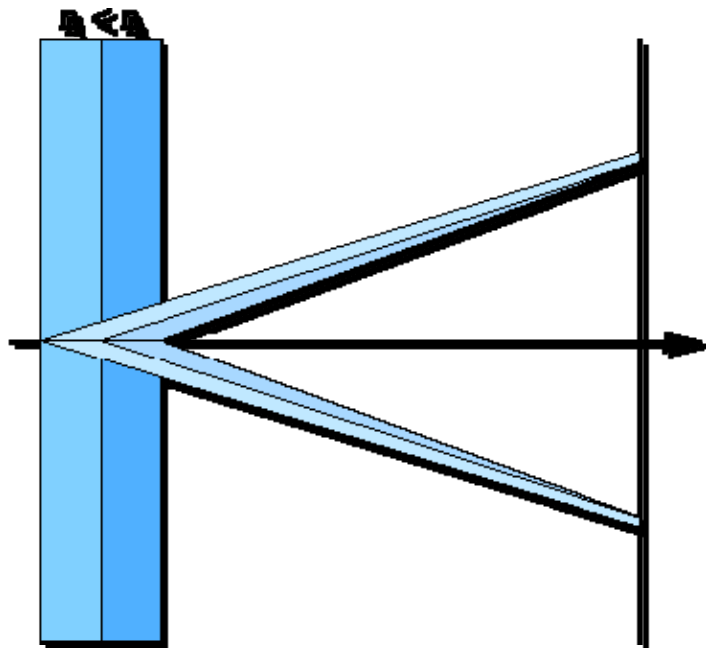


$\Sigma \sim 50\%$ минимизация

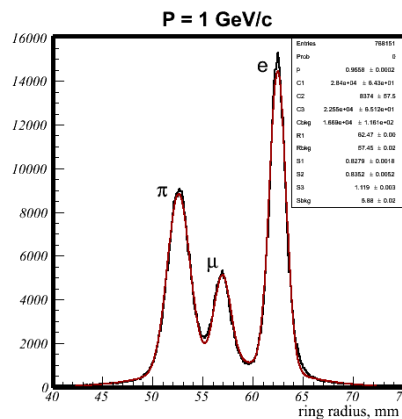
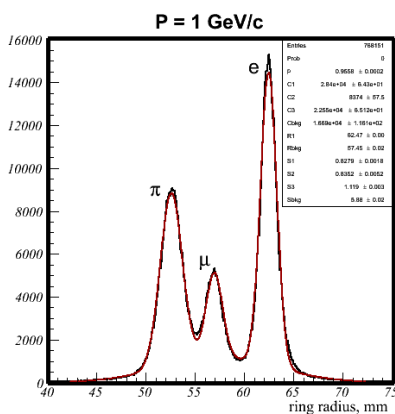
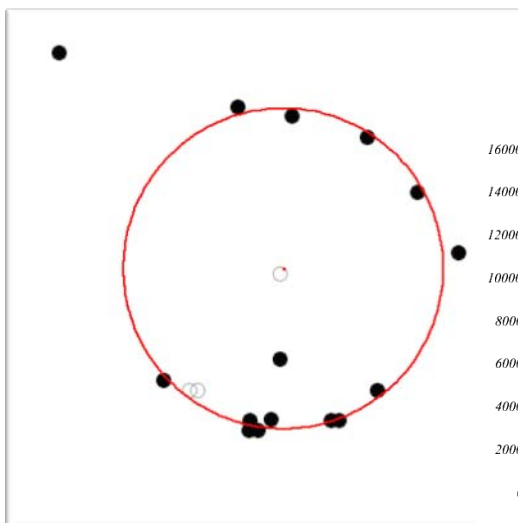
П-К разделение $\rho \approx 0.7 \text{ г/см}^3$
 $\rho \geq 1.5 \text{ г/см}^3$

Достигается точность
измерения dE/dx
 $\sim \frac{\Delta A}{A} \sim 5 \pm 10\%$

Focusing Aerogel RICH (FARICH)



Планируются использовать для идентификации частиц в нескольких экспериментах

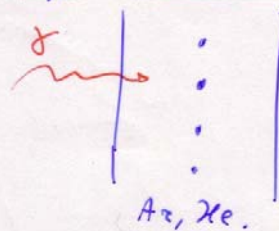


π / K : **7.6 σ** @ 4 GeV/c
 μ / π : **5.3 σ** @ 1 GeV/c

Регистрация и измерение энергии фотонов

1) рентгеновские фотоны $E \sim 1 - 100 \text{ кэВ}$.

а) пропорциональная камера



$$n_e \sim \frac{E}{30 \text{ эВ}}$$

$$E = 10 \text{ кэВ} \quad n_e \sim 300$$

$$\frac{\sigma_E}{E} \sim \sqrt{\frac{F + \Phi}{n}}$$

F - фактор Фано (статистика ионизации)

$\sim 0.3 - 0.8$

Φ - статистика тепловых умножений ~ 0.7

Итого $\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{1}{\sqrt{n}}$

$$10 \text{ кэВ} \Rightarrow \frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{1}{\sqrt{300}} \sim 6\%$$

б) полупроводниковые детекторы

$W \sim 3 \text{ эВ}$ в 10 раз меньше, чем в камерах

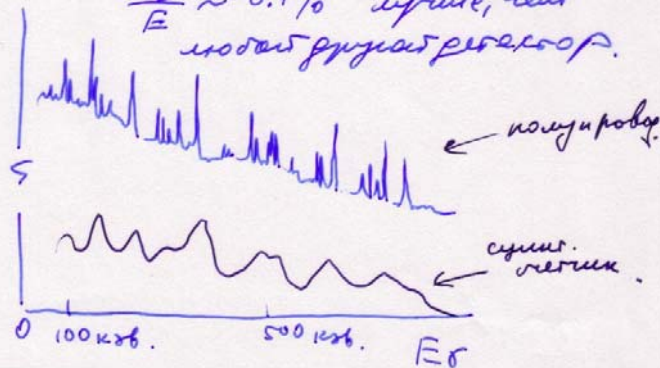
Для $E = 10 \text{ кэВ}$ $n_e = 3000$, $F_{Si, Ge} \leq 0.15$

$$\Rightarrow \frac{\sigma_E}{E} \sim \sqrt{\frac{0.15}{3000}} = 0.7\% \rightarrow \sim 1\% \text{ с учетом шумов}$$

Для $E \sim 1 \text{ МэВ}$

$\frac{\sigma_E}{E} \sim 0.1\%$ лучше, чем у пропорциональной камеры.

Спектр энергии
возбужд. атом



фотоны высокой энергии

$E_\gamma \sim 10 \text{ МэВ} \text{ --- } \text{ТэВ} \dots \dots$

Бегущий полный потенциал

NaI(Tl) / CsI(Tl) ... BGO
 $\sim 16000 \quad \sim 6000$
 40000 фотонов / МэВ.

$X_0 \text{ ---}$
 2.6 см NaI
 1.95 см CsI
 1.12 см BGO

Свободор $\sim 10-50\%$
 QE фотокамера $\sim 15\%$ (РЗУ) $\Rightarrow \sim 4 \cdot 10^4 \cdot 0.2 \cdot 0.15 \sim 10^3 / \text{МэВ}$
 (или полупров. фотокамера) фотоэлектроник в NaI

Для CsI(Tl) выход $\sim 0.4 \text{ NaI(Tl)}$

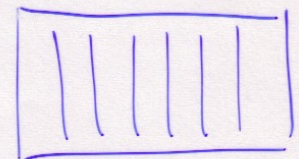
Типично при низких энергиях

$$\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{0.02}{\sqrt{E(\text{ГэВ})}} \quad \text{и} \quad \frac{\sigma}{E} \sim 0.025 / E^{1/4} (\text{ТэВ})$$

или больших E

$E = 10 \text{ МэВ} \quad \frac{\sigma_E}{E} \sim 20\% \quad E = 1 \text{ ГэВ} \quad \frac{\sigma_{\text{полн}}}{E} \sim 2\%$

Микро-кристалловый калориметр.



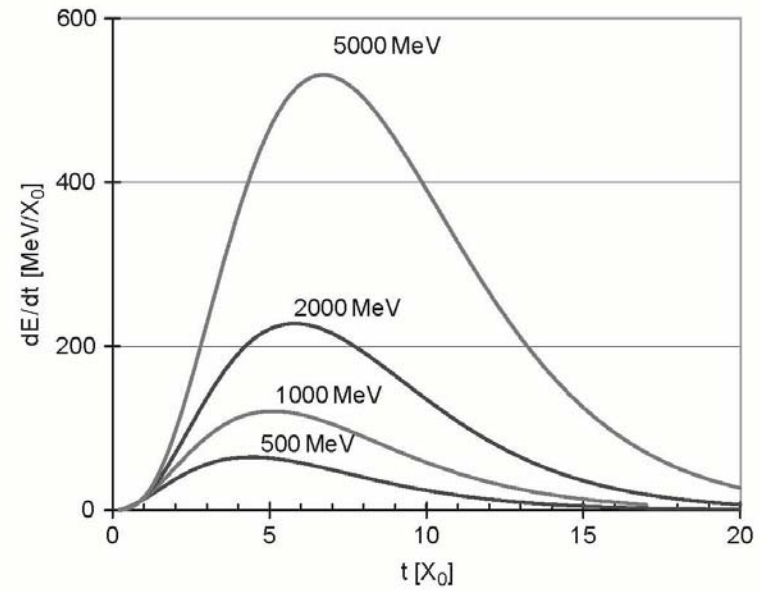
$T = 120 \text{ K}$
 $X_0 = 4.6 \text{ см}$

Собирается поперечная
 площадь в МЯР
 100 МэВ 5%
 1 ГэВ 2%

Делается для детектора КЕДР (работает)

Толщина детекторов полного поглощения

$t \sim 15 \div 20 X_0$
 $\sim 30 \text{ см CsI}$
 $\sim 70 \text{ см LKr}$
 $\uparrow$ тиркит



Homogeneous calorimeters

Two main types: Scintillator crystals or “glass” blocks (Cherenkov radiation).

→ photons. Readout via photomultiplier, -diode/triode

◆ Scintillators (crystals)

Scintillator	Density [g/cm ³]	X ₀ [cm]	Light Yield γ/MeV (rel. yield)	τ ₁ [ns]	λ ₁ [nm]	Rad. Dam. [Gy]	Comments
NaI (TI)	3.67	2.59	4×10 ⁴	230	415	≥10	hygroscopic, fragile
CsI (TI)	4.51	1.86	5×10 ⁴ (0.49)	1005	565	≥10	Slightly hygroscopic
CSI pure	4.51	1.86	4×10 ⁴ (0.04)	10 36	310 310	10 ³	Slightly hygroscopic
BaF ₂	4.87	2.03	10 ⁴ (0.13)	0.6 620	220 310	10 ⁵	
BGO	7.13	1.13	8×10 ³	300	480	10	
PbWO ₄	8.28	0.89	≈100	10 10	≈440 ≈530	10 ⁴	light yield ~f(T)

Relative light yield: rel. to NaI(Tl) readout with PM (bialkali PC)

◆ Cherenkov radiators

Material	Density [g/cm ³]	X ₀ [cm]	n	Light yield [p.e./GeV] (rel. p.e.)	λ _{cut} [nm]	Rad. Dam. [Gy]	Comments
SF-5 Lead glass	4.08	2.54	1.67	600 (1.5×10 ⁻⁴)	350	10 ²	
SF-6 Lead glass	5.20	1.69	1.81	900 (2.3×10 ⁻⁴)	350	10 ²	
PbF ₂	7.66	0.95	1.82	2000 (5×10 ⁻⁴)		10 ³	Not available in quantity

Relative light yield: rel. to NaI(Tl) readout with PM (bialkali PC)



Properties of some crystal scintillators

3a Scintillators

Scintillator composition	Density (g/cm ³)	Index of refraction	Wavelength of max. Em. (nm)	Decay time Constant (μs)	Scinti Pulse height ⁽¹⁾	Notes
NaI(Tl)	3.67	1.9	410	0.25	100	2)
CsI	4.51	1.8	310	0.01	6	3)
CsI(Tl)	4.51	1.8	565	1.0	45	3)
CaF ₂ (Eu)	3.19	1.4	435	0.9	50	
BaF ₂	4.88	1.5	190/220 310	0.0006 0.63	5 15	
BGO	7.13	2.2	480	0.30	10	
CdWO ₄	7.90	2.3	540	5.0	40	
PbWO ₄	8.28	2.1	440	0.020	0.1	
CeF ₃	6.16	1.7	300 340	0.005 0.020	5	
GSO	6.71	1.9	430	0.060	40	
LSO	7	1.8	420	0.040	75	
YAP	5.50	1.9	370	0.030	70	

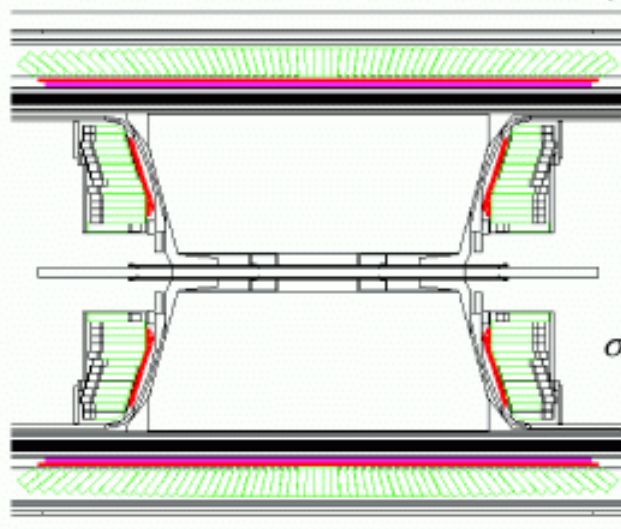
1) Relative to NaI(Tl) in %; 2) Hygroscopic; 3) Water soluble

ментальной физике

Examples

OPAL Barrel + end-cap: lead glass + pre-sampler

(OPAL collab. NIM A 305 (1991) 275)



≈ 10500 blocks (10 x 10 x 37 cm³, 24.6 X₀),
PM (barrel) or PT
(end-cap) readout.

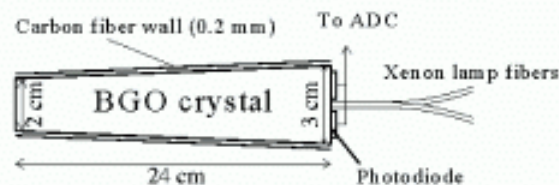
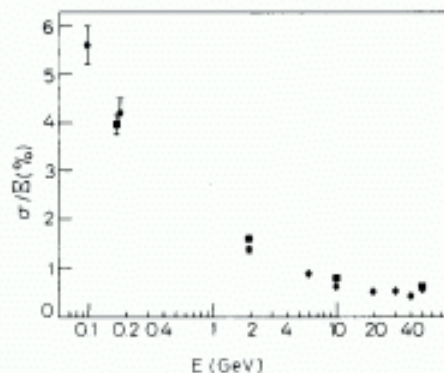
$$\sigma(E)/E = 0.06/\sqrt{E} \oplus 0.002$$

Spatial resolution
(intrinsic) ≈ 11 mm
at 6 GeV

BGO E.M. Calorimeter in L3

(L3 collab. NIM A 289 (1991) 53)

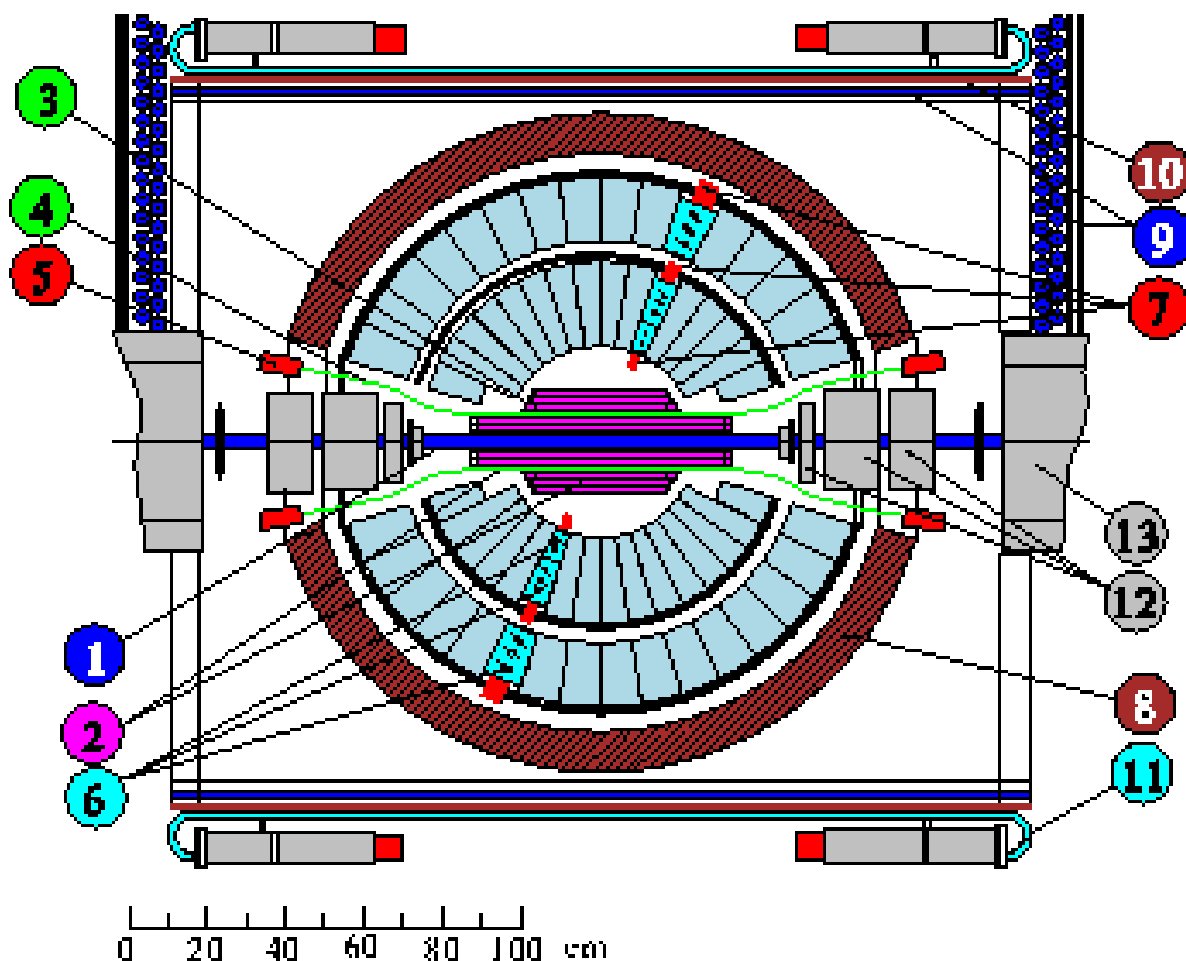
11000 crystals, 21.4 X₀,
temperature monitoring +
control system
light output -1.55% / °C



$\sigma_E/E < 1\%$ for $E > 1$ GeV
spatial resolution < 2 mm
($E > 2$ GeV)

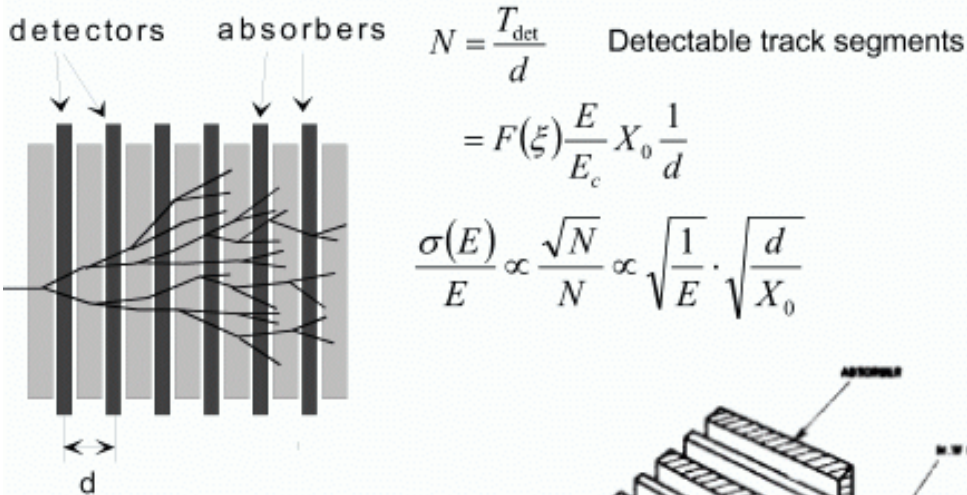
Partly test beam results !

Нейтральный детектор (ИЯФ)



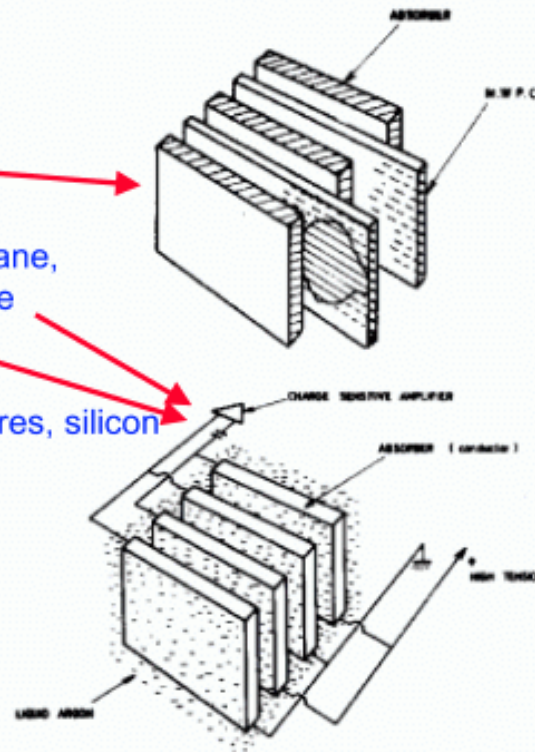
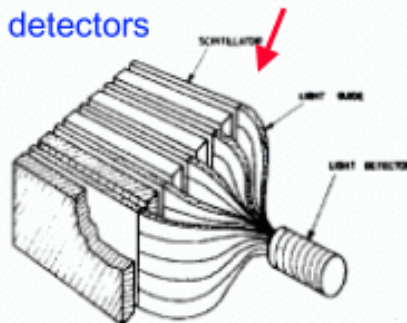
Sampling calorimeters

Absorber + detector separated → additional sampling fluctuations



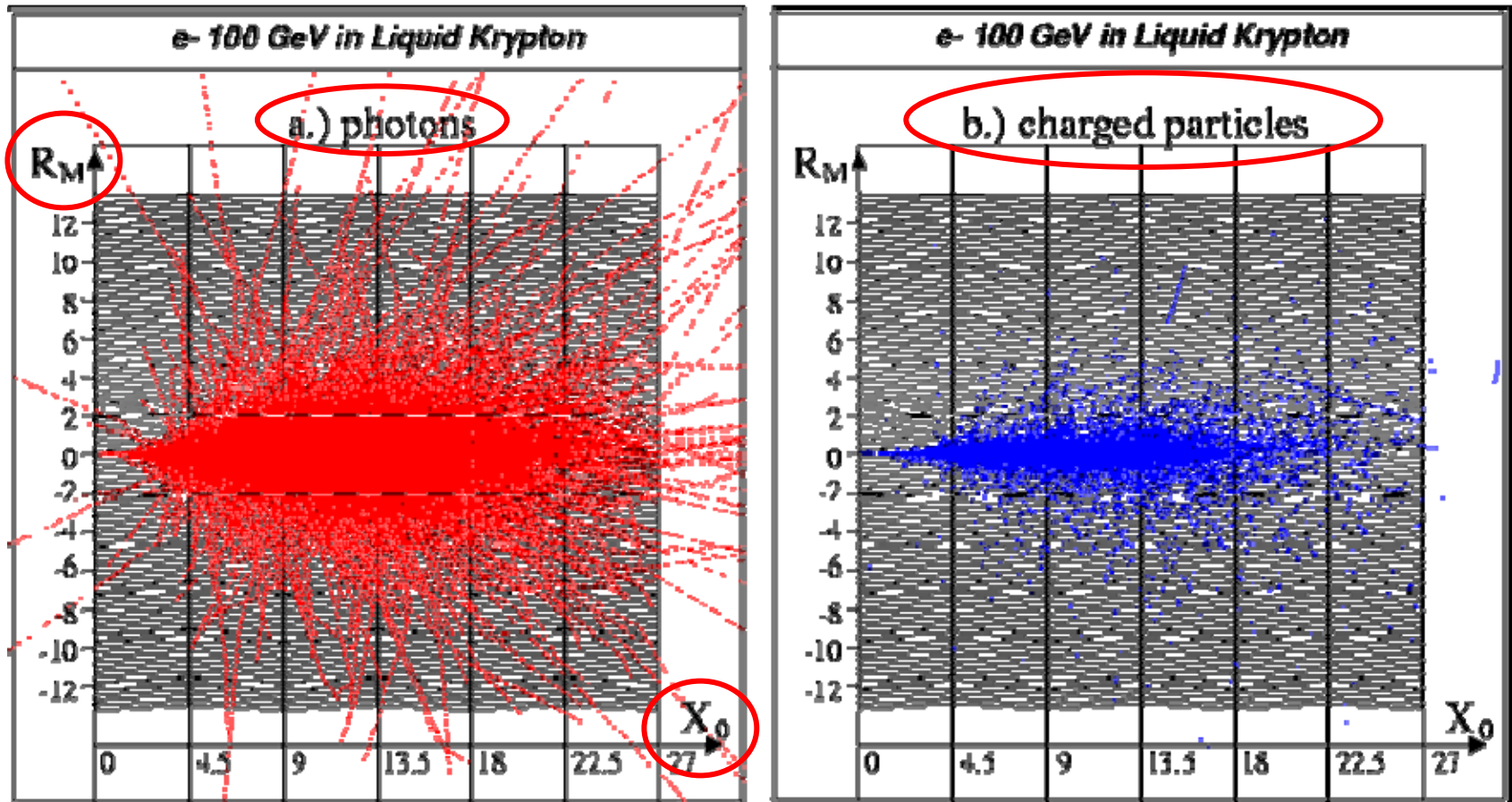
- MWPC, streamer tubes
- warm liquids
TMP = tetramethylpentane,
TMS = tetramethylsilane

- cryogenic noble gases:
mainly LAr (LXe, LKr)
- scintillators, scintillation fibres, silicon detectors



EM showers profiles

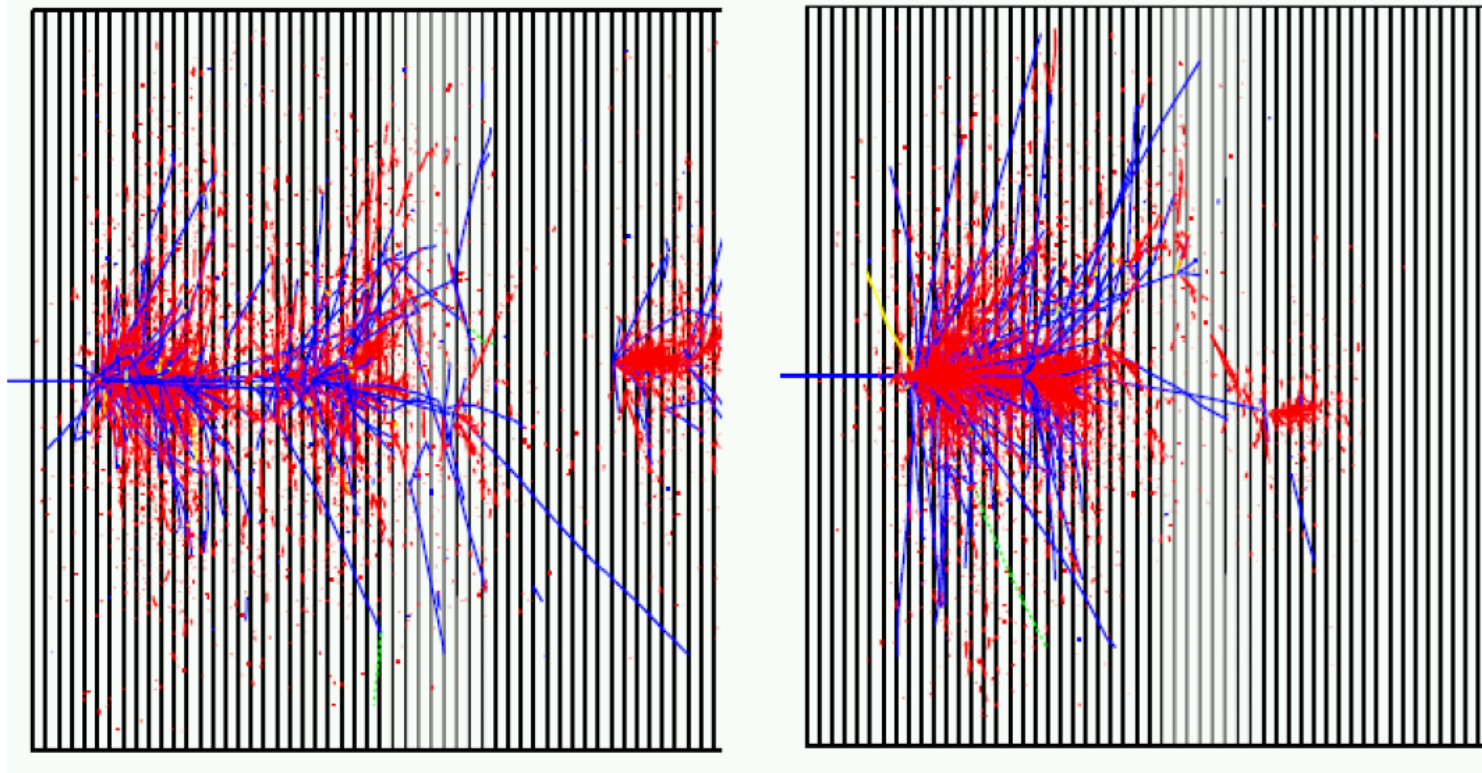
EM shower development in krypton ($Z=36$, $A=84$)



GEANT simulation of a 100 GeV electron shower in the liquid Krypton calorimeter

Hadronic Calorimetry

Simulations of hadron showers

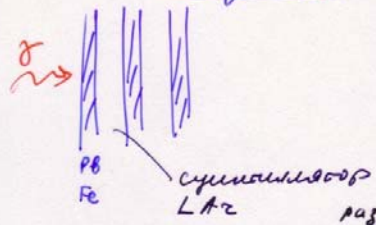


Red - e.m. component Blue – charged hadrons

Unlike electromagnetic showers, hadron showers do not show a uniform deposition of energy throughout the detector medium

Сензивит

для δ и электронов



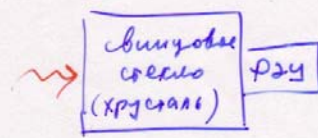
$$\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{15\%}{\sqrt{E}} \sqrt{\frac{t}{x_0}} \quad (GeV)$$

обычно $t \sim 2 \text{ мм Pb}$
 $t/x_0 \sim 0.3$

$$\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{8\%}{\sqrt{E}} \text{ ГэВ}$$



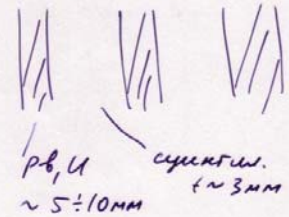
Черенковские счетчики полного поглощения



$$\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{5\%}{\sqrt{E \text{ ГэВ}}}$$

хуже чем у калориметров NaI, CsI...
за счет пункт. числа Ф.Э.

Адронные калориметры

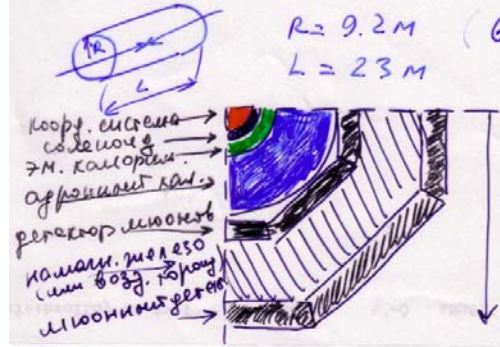


полная поглущия
 $\sim 1-2 \text{ м} (E=10-1000 \text{ ГэВ})$

$$\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{0.4}{\sqrt{E \text{ ГэВ}}}$$

$$E=100 \text{ ГэВ} \Rightarrow \frac{\sigma_E}{E} \sim 4\%$$

Детектор ATLAS для LHC ($\sqrt{s}=14 \text{ ТэВ}$) CERN



$R = 9.2 \text{ м}$
 $L = 23 \text{ м}$
(6 этапов)
ром.

Столкновения пучков
сред 25 нсек ($\sim 40 \text{ МГц}$),
по 20 событий за встречу,
 ~ 1000 столкнов. за встречу!
Пучки отбирают
всего $\sim 10^2$ сб/сек
Правление в 10^7 раз
"Триггер" отбирает
интересные события

Грид-инфраструктура LHC – ЦЕРН (Tier-0)



2016→2018

- CPU 3.8→6.3 (million HEPSpec06)
- Disk 310 PB→520 PB
- Tape 390 PB→850 PB

Институт экспериментальной физики
В.И.Тельнов