

Въведение в детектори на елементарни частици

Пейчо Петков

Софийски Университет „Св. Кл. Охридски“

Слайдове: Л. Литов (СУ), П. Яйджиев (ИЯИЯЕ, БАН)

Единици в субатомната физика

Енергия

1 electron-Volt (eV):

Енергията на частица със заряд $= |e|$,
Намираща се първоначално в покой и
Ускорена в електростатичен потенциал 1 Volt
($e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$)

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Производни:

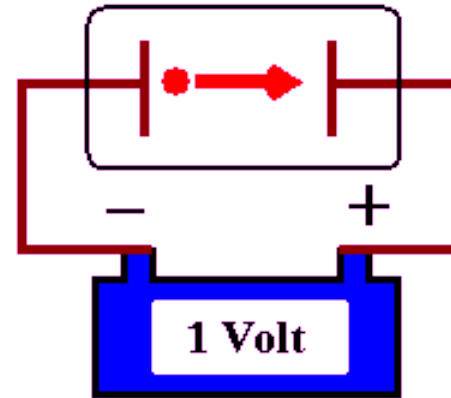
$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}; \quad 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}; \quad 1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

Енергията на протон в LHC: Energy of a proton in the LHC :

$$7 \text{ TeV} = 1.12 \times 10^{-6} \text{ J}$$

(енергията на тяло с маса $= 1 \text{ mg}$ движещо се със скорост $= 1.5 \text{ m/s}$)



Маса, разстояние, енергия, температура

- Свързани величини
- В субатомната физика единицата за енергия е електрон волт
- $E=mc^2$ $c= 3 \cdot 10^8$ m/s скорост на светлината
- $E=k_B T$ $k= 10^{-4}$ eV/K константа на Болцман
- $E=hc/\lambda$ $h=4 \cdot 10^{-15}$ eV s константа на Планк

- Маса на електрона 0.5 MeV
- Маса на протона 1 GeV
- 1 eV ~ 10 000 K 1 GeV ~1 femtometre (fm) = 10^{-15} m

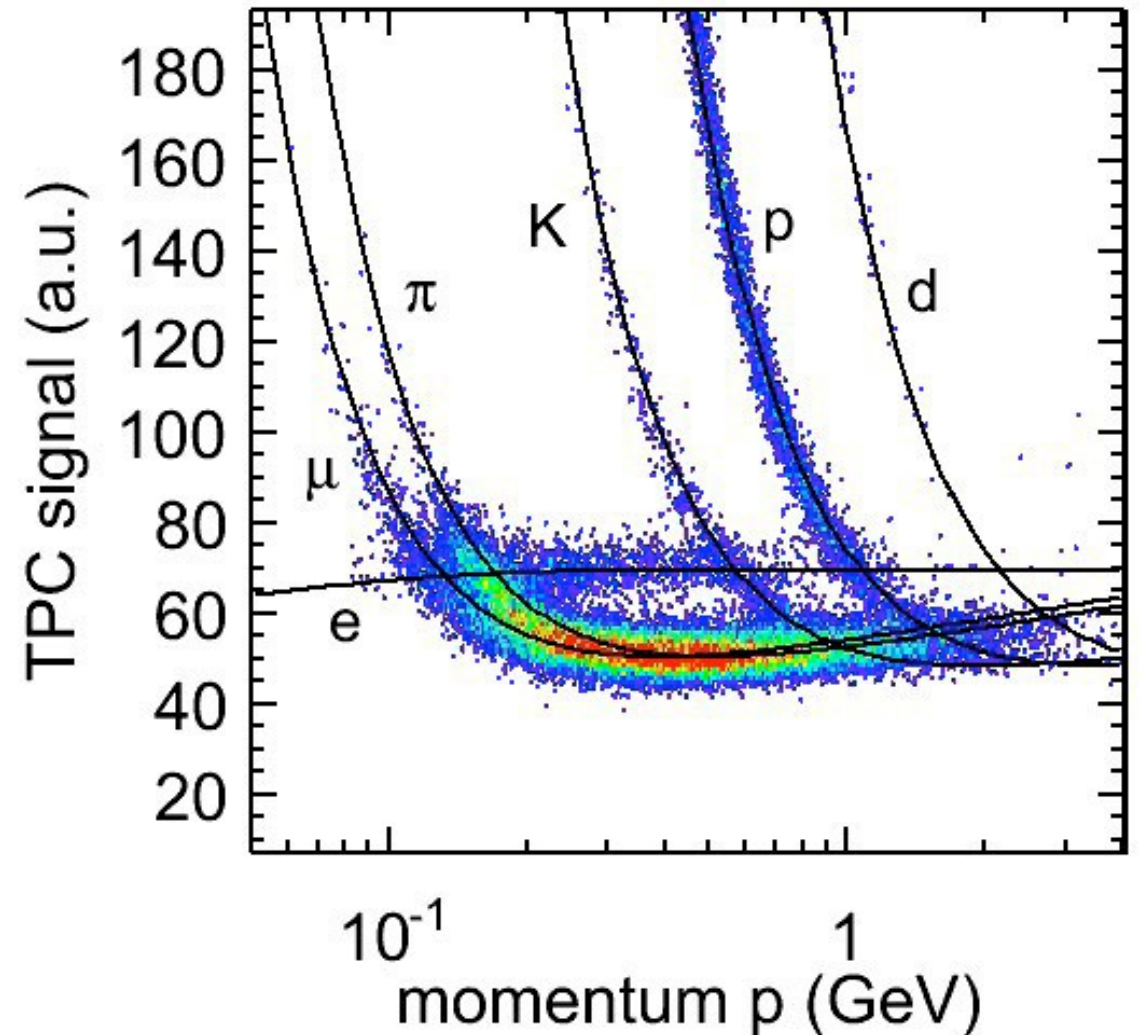
Взаимодействие с веществом

□ Ионизация (dE/dx)

- $E_{инц} > E_{йон}$
- Зависи силно от
 - Скорост (енергия)
 - Типа на веществото (Z)
 - Типа на частицата

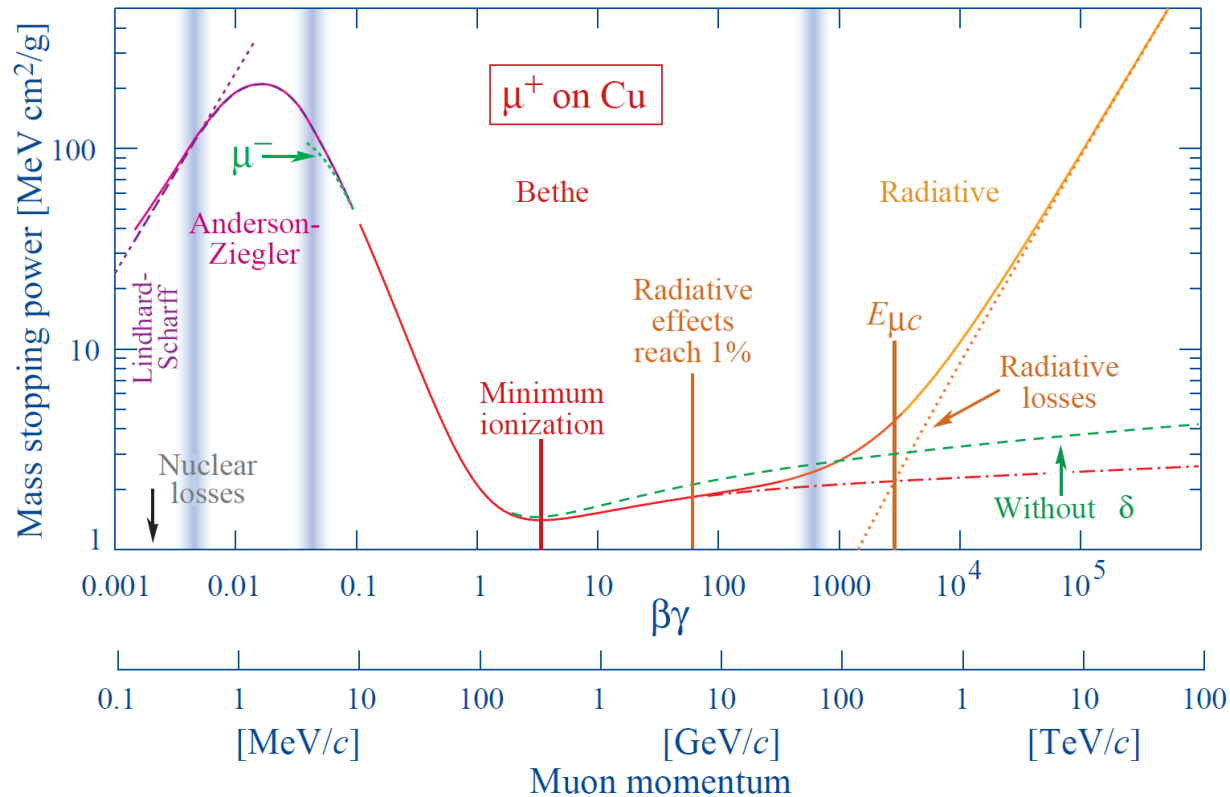
□ Възбуждане на атоми $E_{инц} < E_{йон}$

□ Ядрени реакции (p, n, йони)



Взаимодействие с веществом

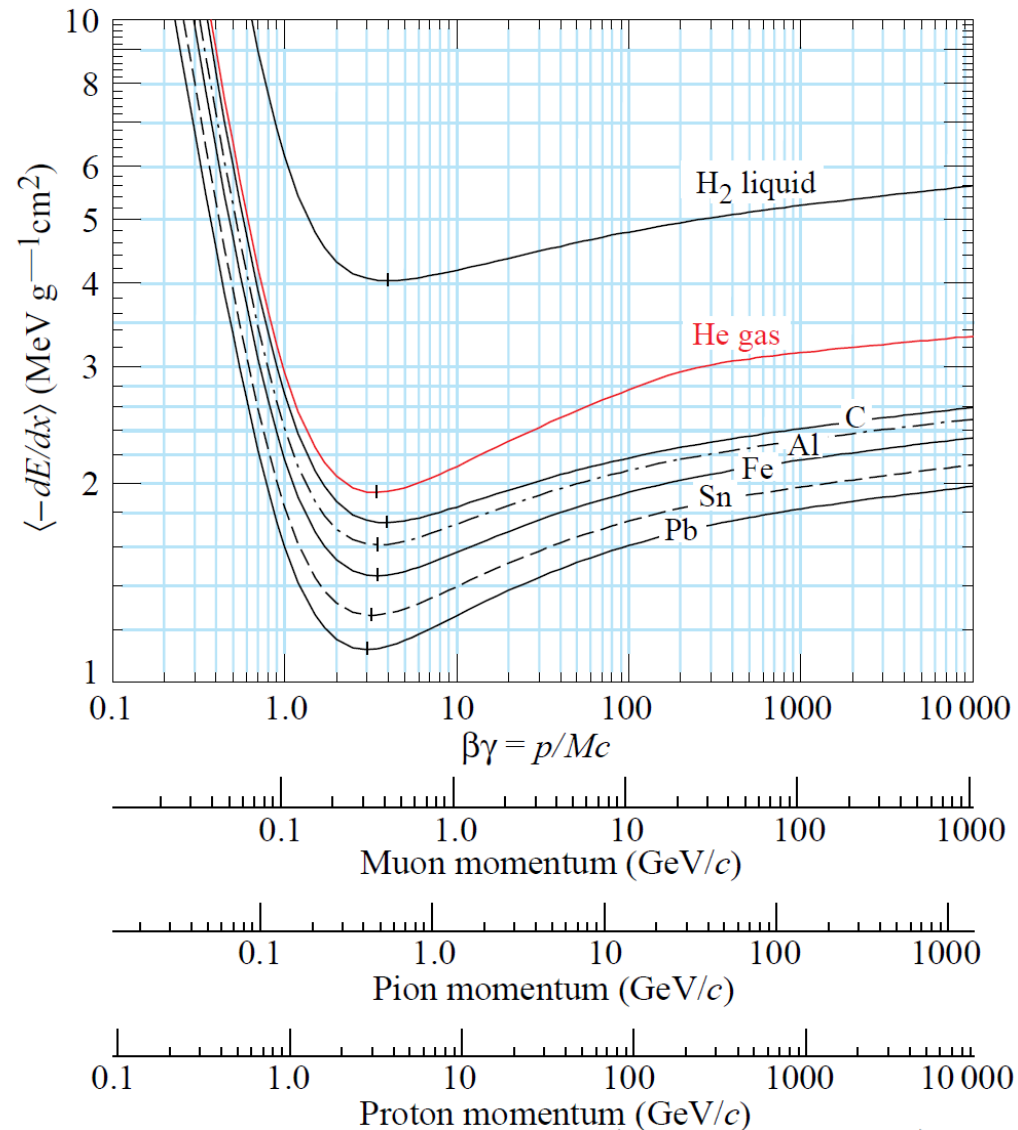
- Ионизация
- Формула на Бете
- Отделена средна енергия



$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

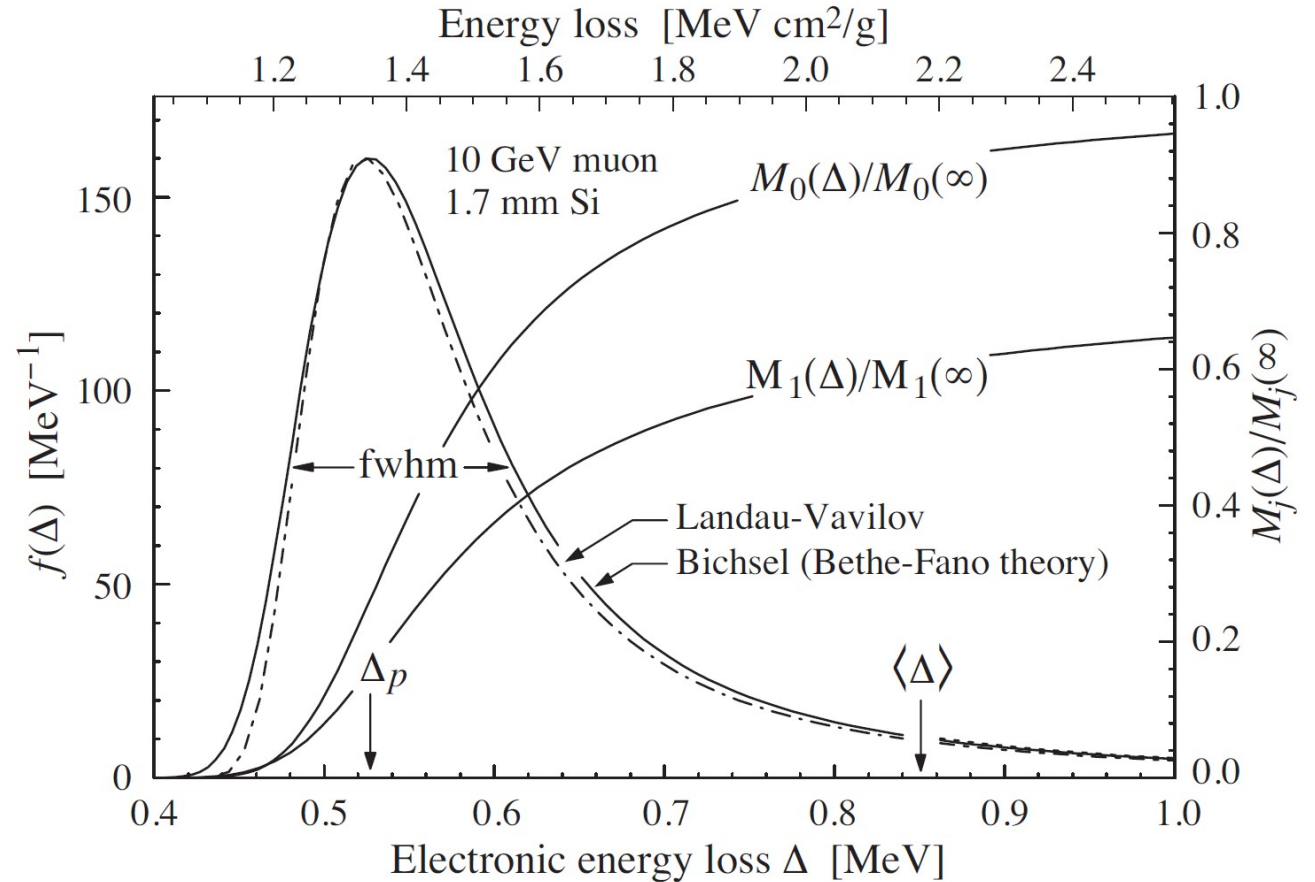
Взаимодействие с веществом

- Зависимост от масата на частицата
- Зависимост от материала, през който преминава частицата



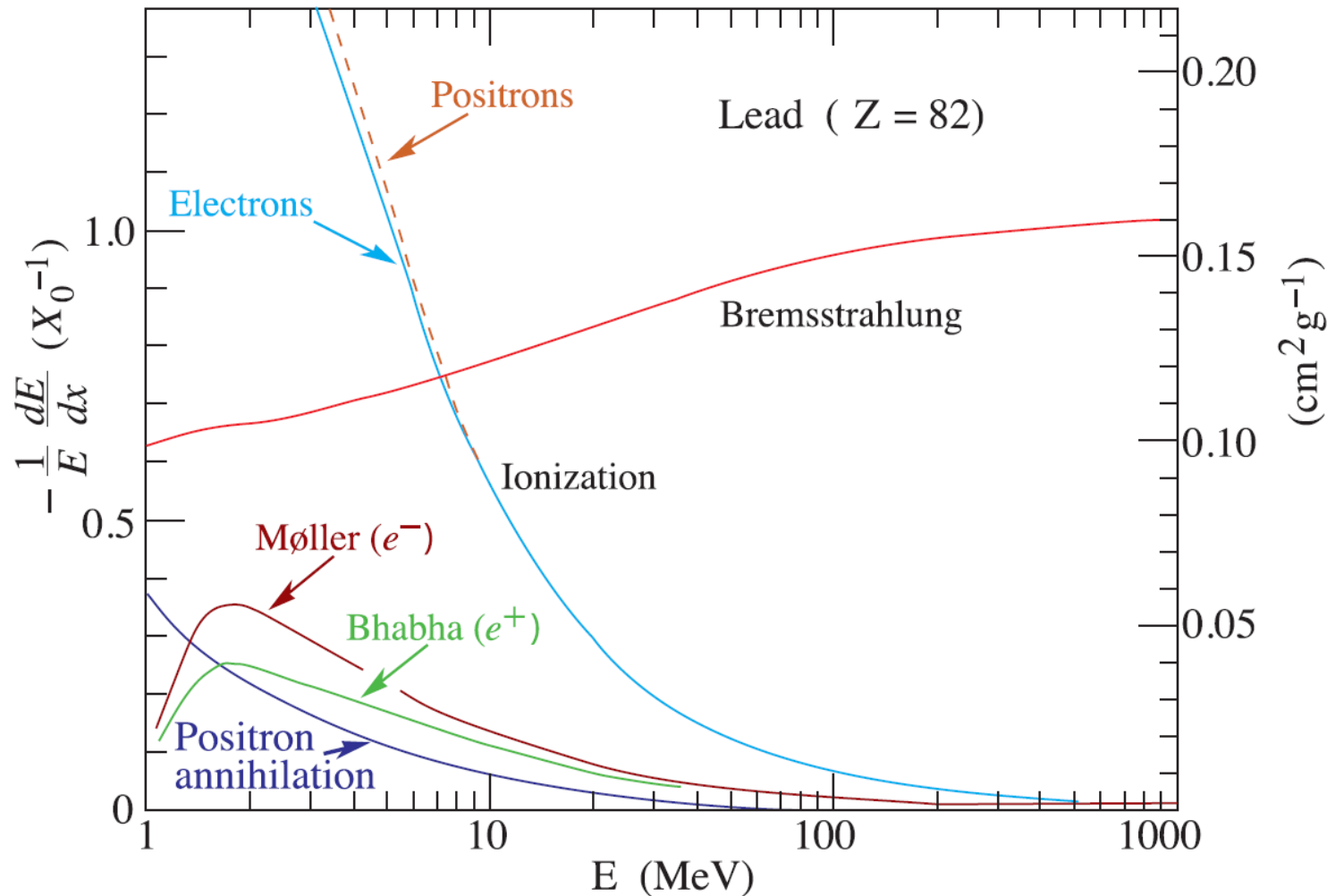
Взаимодействие с веществом

- При преминаване през вещество отдадената от частиците енергия флукутира
- Разпределение на Ландау
- Съответно сигнала от детектора също флукутира



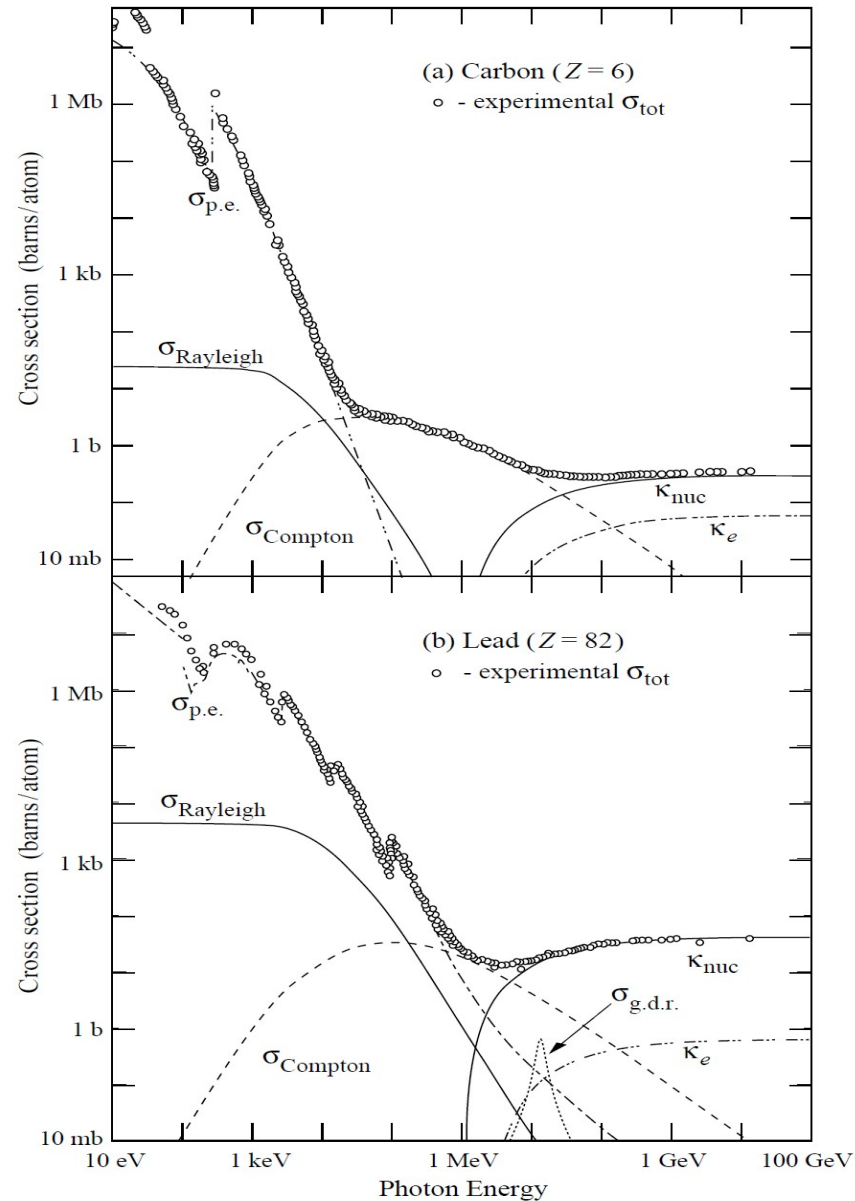
Взаимодействие с веществом - электроны

- Йонизация ($E < 0.255 \text{ MeV}$)
- Мюлерово разсейване на електронни ($E > 0.255 \text{ MeV}$)
- Бхабха разсейване за позитрони ($E > 0.255 \text{ MeV}$)
- Спирачно излъчване
- Критична енергия
- Аниhilация

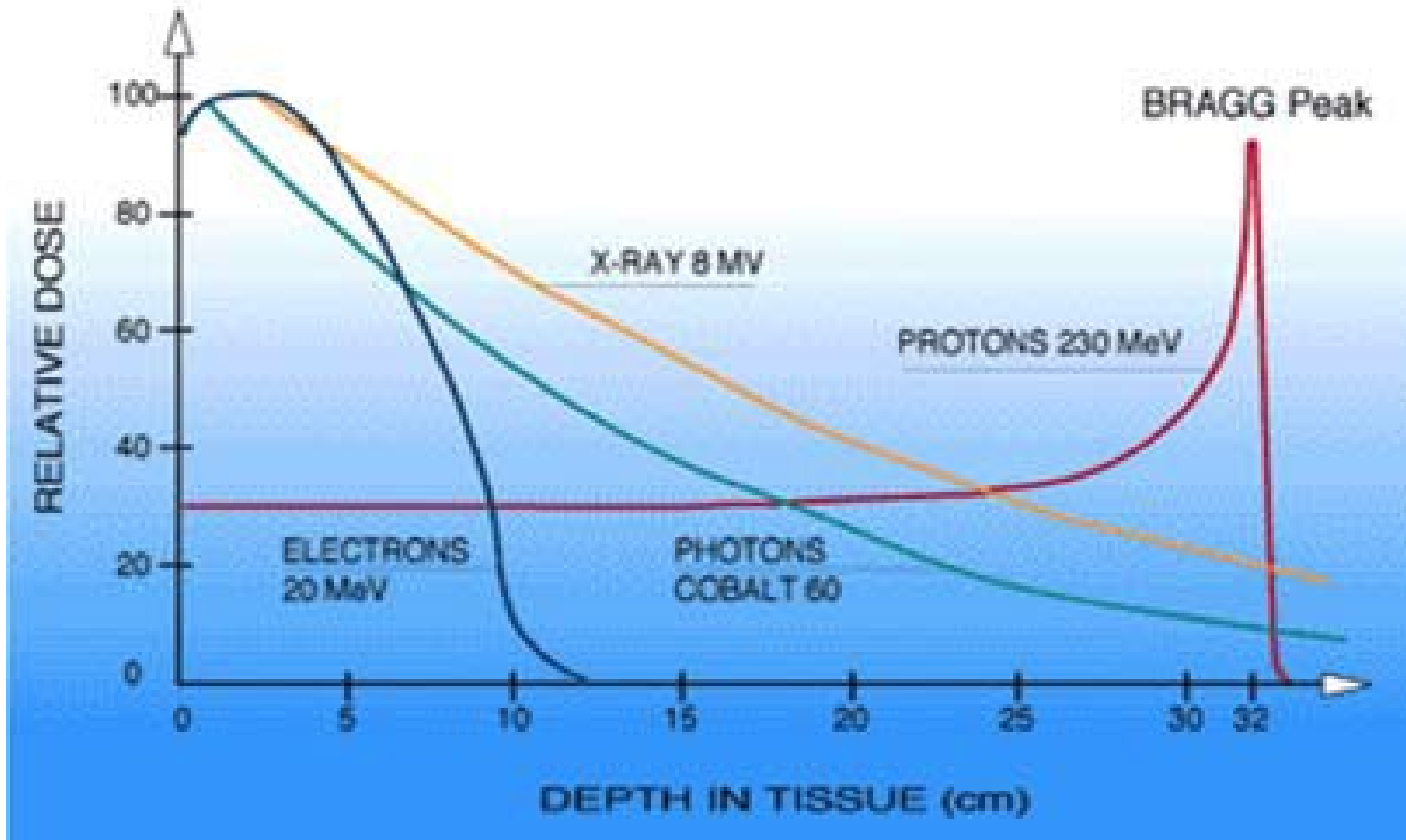


Взаимодействие с веществом - фотоны

- $\sigma_{p.e.}$ - фотоэффект
- σ_{Rayleigh} = Релеево разсейване
- σ_{Compton} = Комптоново разсейване
- κ_{nuc} = Раждане на двойка $e^+ e^-$ в полето на ядрото
- κ_e = Раждане на двойка $e^+ e^-$ в полето на електроните
- $\sigma_{\text{g.d.r.}}$ = Фото-ядрени реакции (основно гигантски диполен резонанс)
- В тези реакции ядрото е разрушено

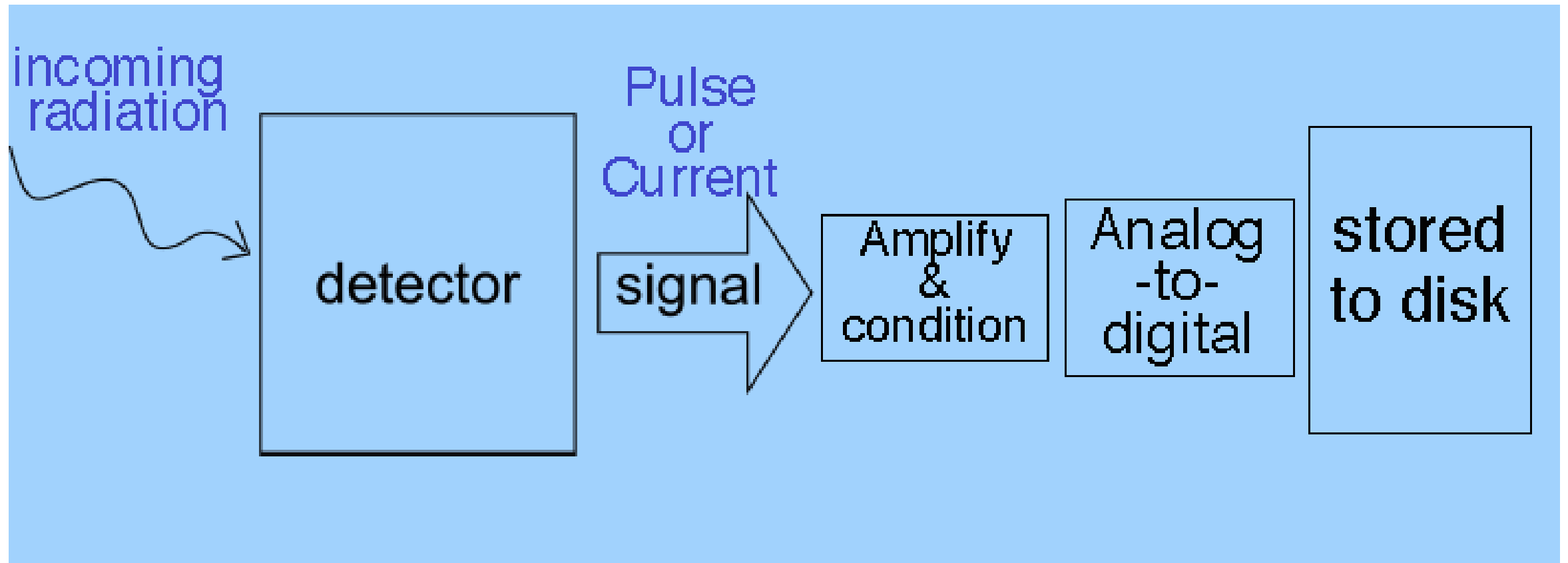


Взаимодействие с веществом



Детектори на йонизиращо лъчение

Детектираща система



Детектори

➤ Какво измерваме

- ✓ Енергия
- ✓ Позиция
- ✓ Количество

➤ Основни характеристики

- ✓ Разделителна способност по енергия
- ✓ Пространствена разделителна способност
- ✓ Ефективност

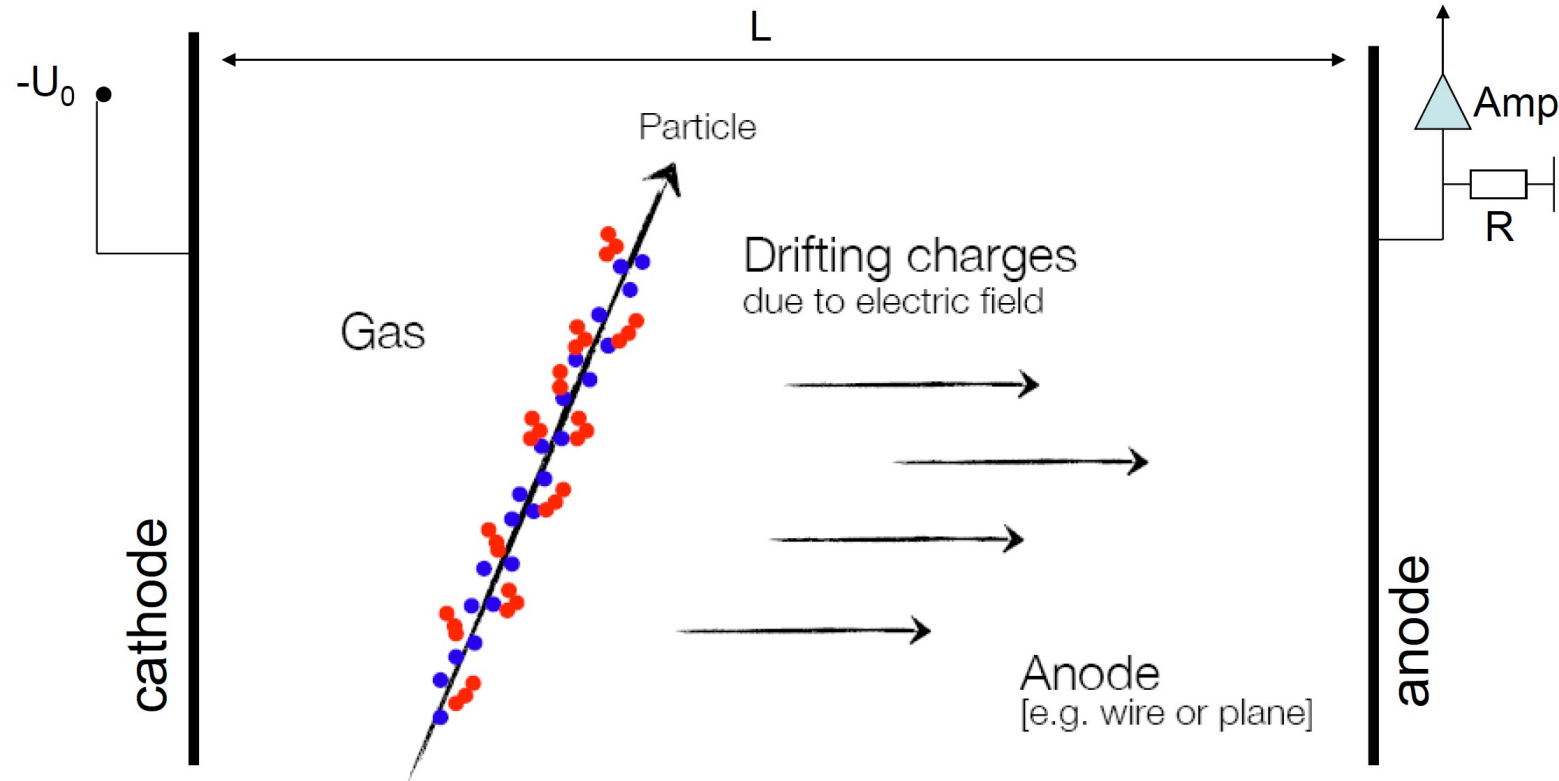
Типове детектори

- Броячи
 - ✓ Брой взаимодействия
- Спектрометри и калориметри
 - ✓ Брой взаимодействия и отделена енергия
- Дозиметри
 - ✓ Пълна депозирана енергия
- Образни системи
 - ✓ Следи на заредени частици
 - ✓ СТ, PET, SPECT

Типове детектори (метод на регистрация)

- Газонапълнени детектори
- Твърдотелни детектори (полупроводникови)
- Органични сцинтилатори
- Неорганични сцинтилатори
- Сцинтилаторите се нуждаят и от фотодетектор

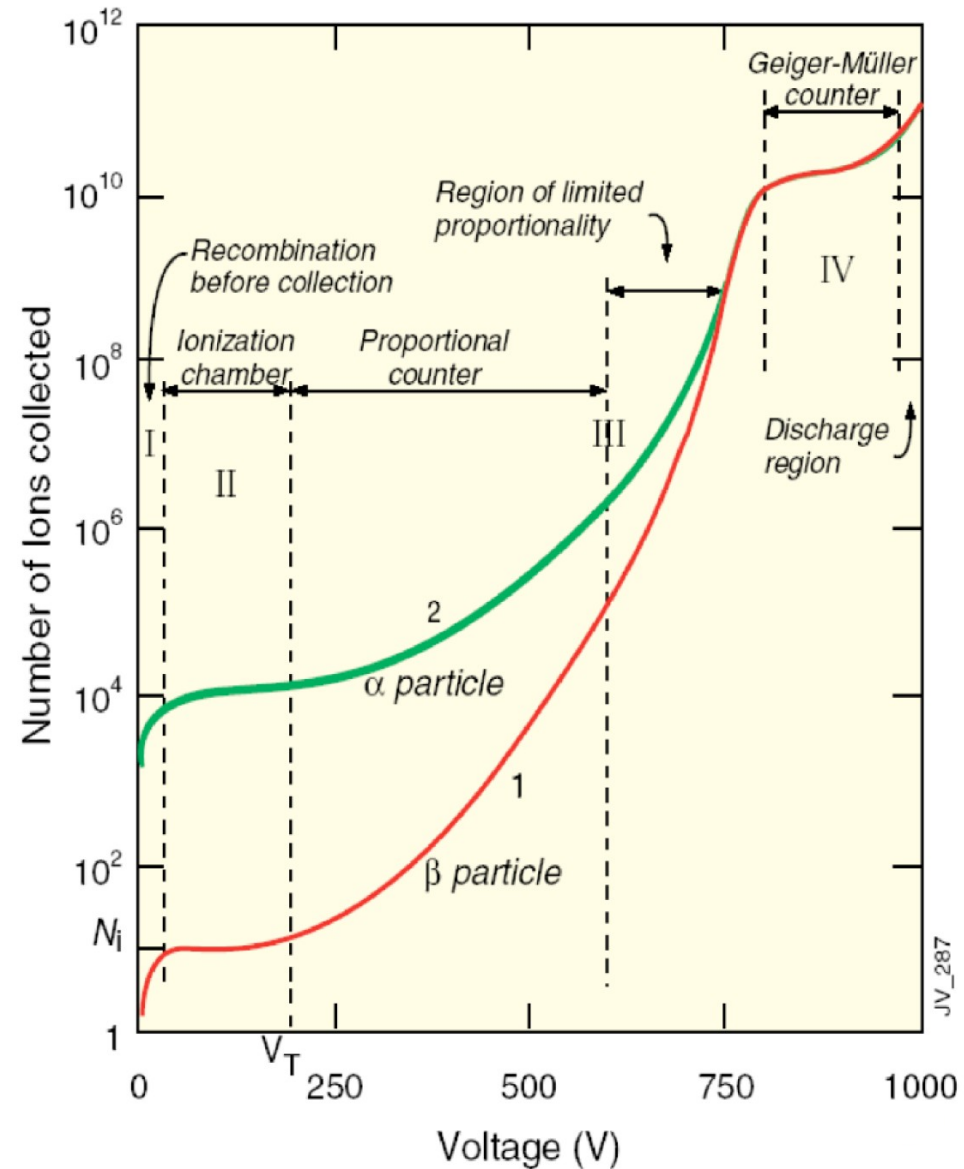
Газонапълнени детектори



- Primary Ionization
- Secondary Ionization (due to δ -electrons)

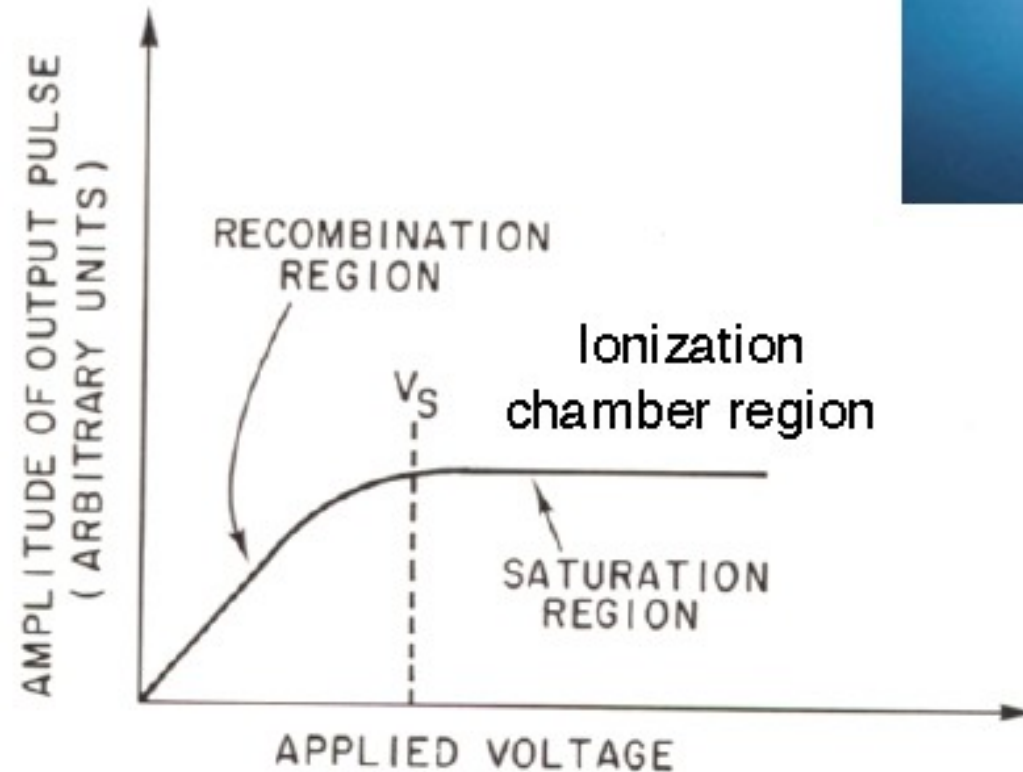
Газонапълнени детектори

- Йонизационни камери
- Пропорционални броячи
- Гайгер-Мюлерови броячи



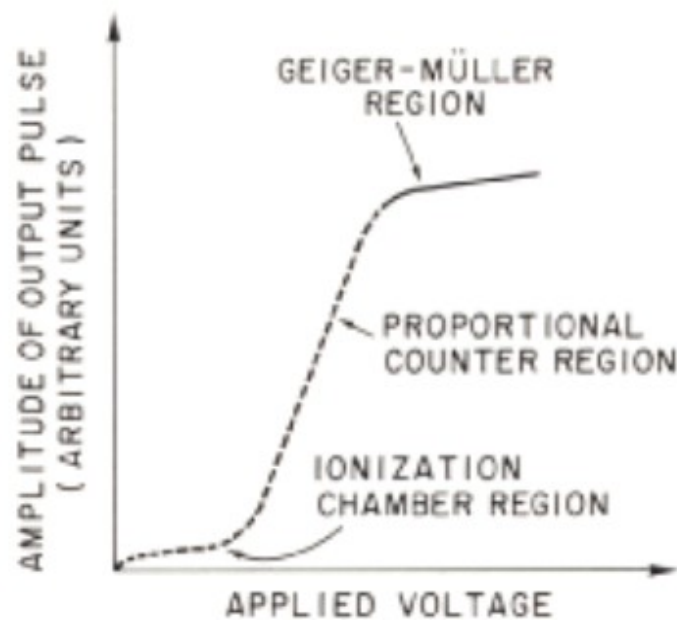
Йонизационни камери

- Няма умножение
- Няма мъртво време
- Сигнал = отделения заряд
- Различни конфигурации за различни изотопи
- Калибровка



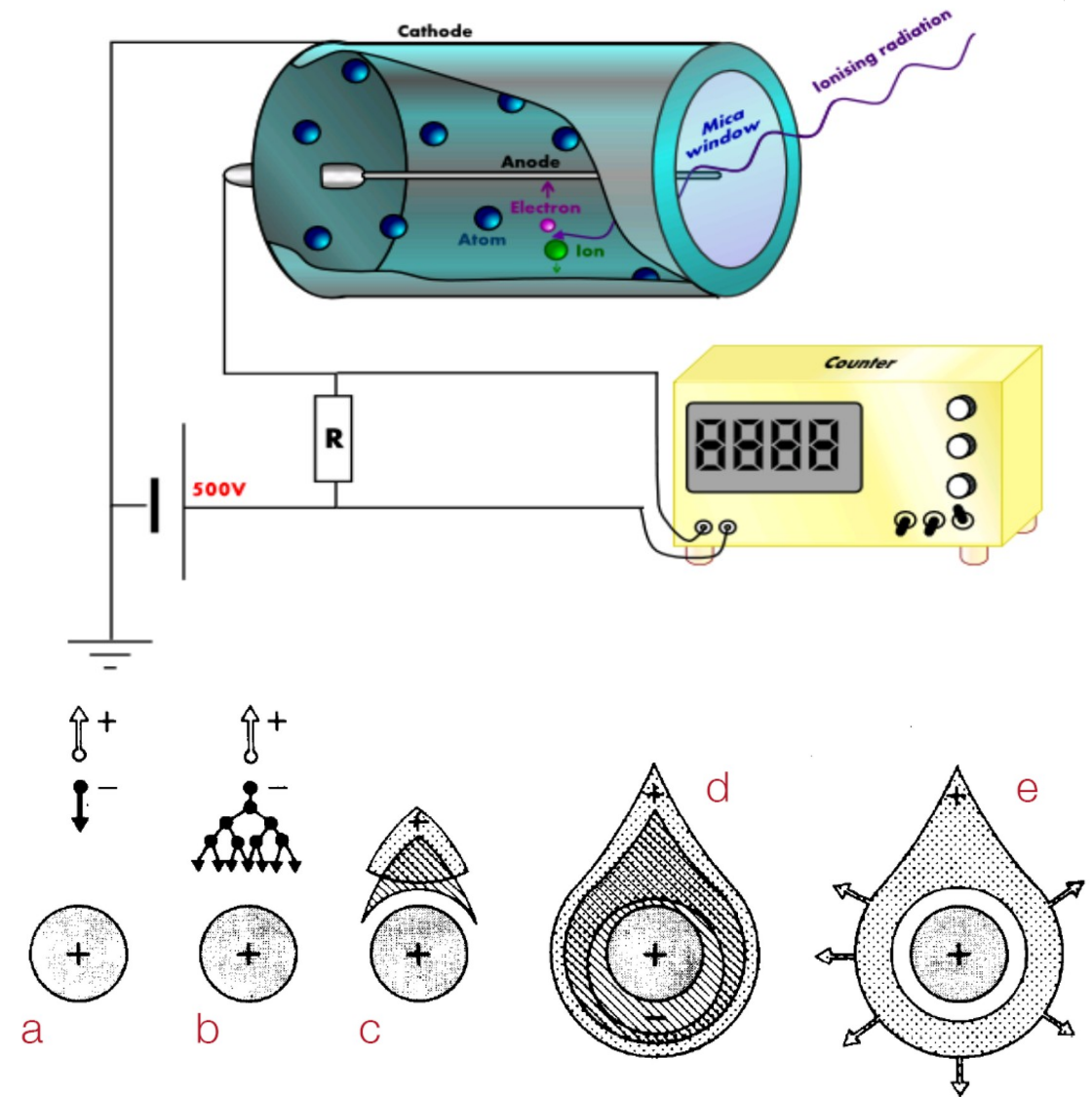
Гайгер - Мюлерови броячи

- Няма информация за енергията
- Голямо мъртво време
- Тънък прозорец



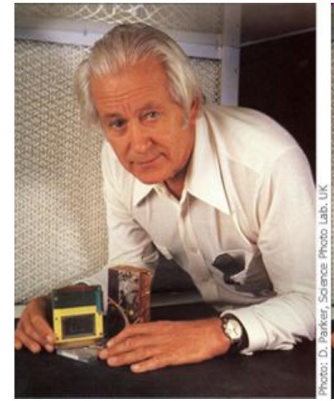
Пропорционален брояч

- Единична анодна нишка
- Цилиндричен катод
- $E \sim 1/R$
- Газово усилване само около анода
- Електроните се събират за ~ 1 ns

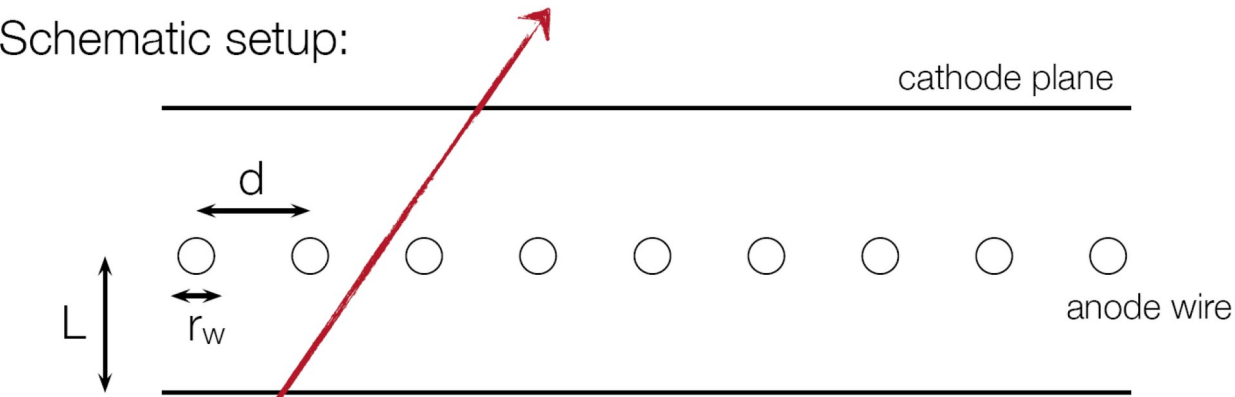


Многоишков пропорционална камера

G. Charpak
Nobel price (1992)



Schematic setup:



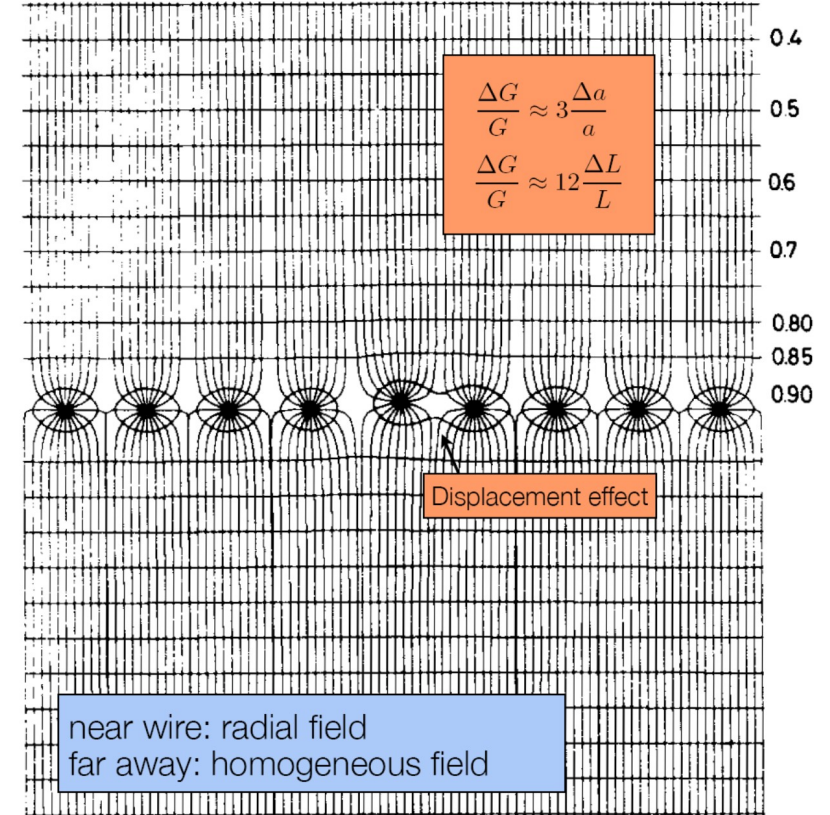
Parameters:

$d = 2 - 4 \text{ mm}$
 $r_w = 20 - 25 \mu\text{m}$
 $L = 3 - 6 \text{ mm}$
 $U_0 = \text{several kV}$
 Total area: $O(\text{m}^2)$

Features:

Tracking of charged particles
 Some PID capabilities via dE/dx
 Large area coverage
 High rate capabilities

- Революция във физиката на високите енергии
- Предложена от Д. Шарпак
- Позволява изграждане на системи за проследяване на следите на заредени частици



Многоишкова пропорционална камера

- Разделителна способност

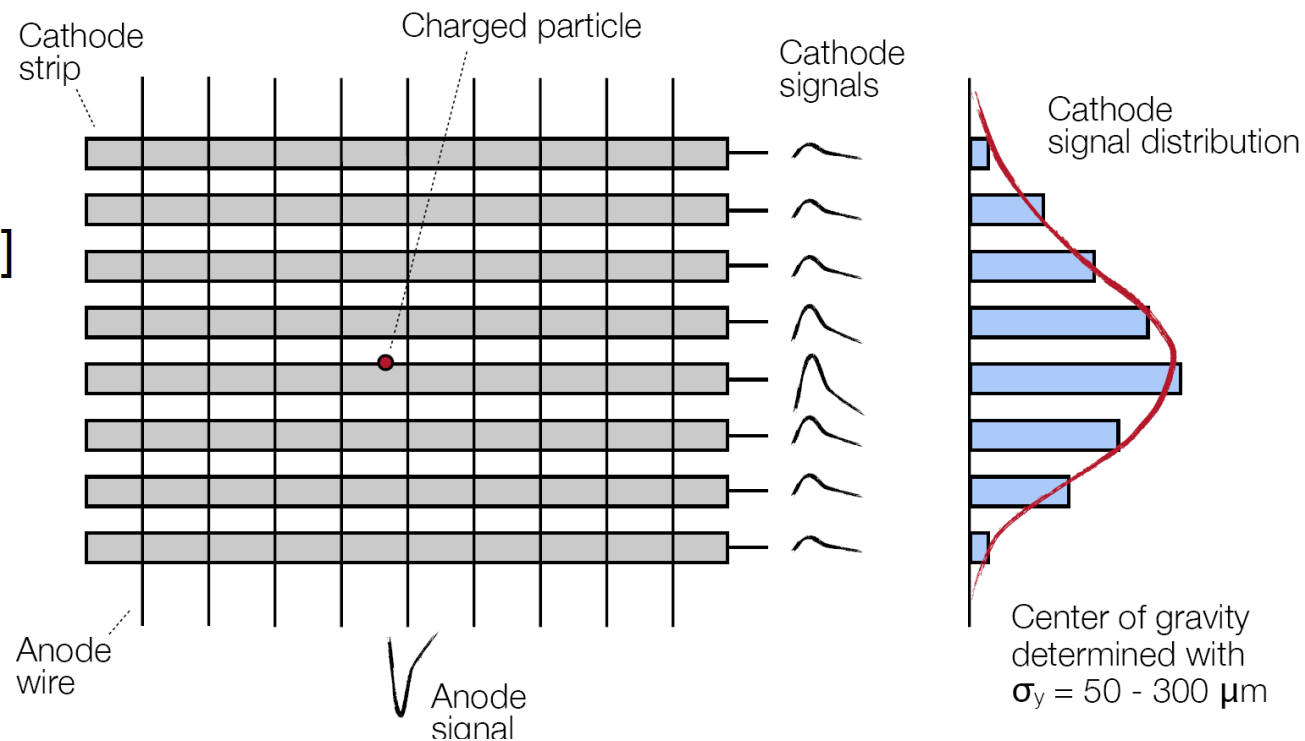
$$\sigma_x = d/\sqrt{12} \quad [d=2-4 \text{ mm}, \sigma_x \sim 0.6-1 \text{ mm}]$$

- Подобрения - сема се сигнала и от катодните плоскости

- Катода се оформя във вид на стрипове

- Център на тежеста

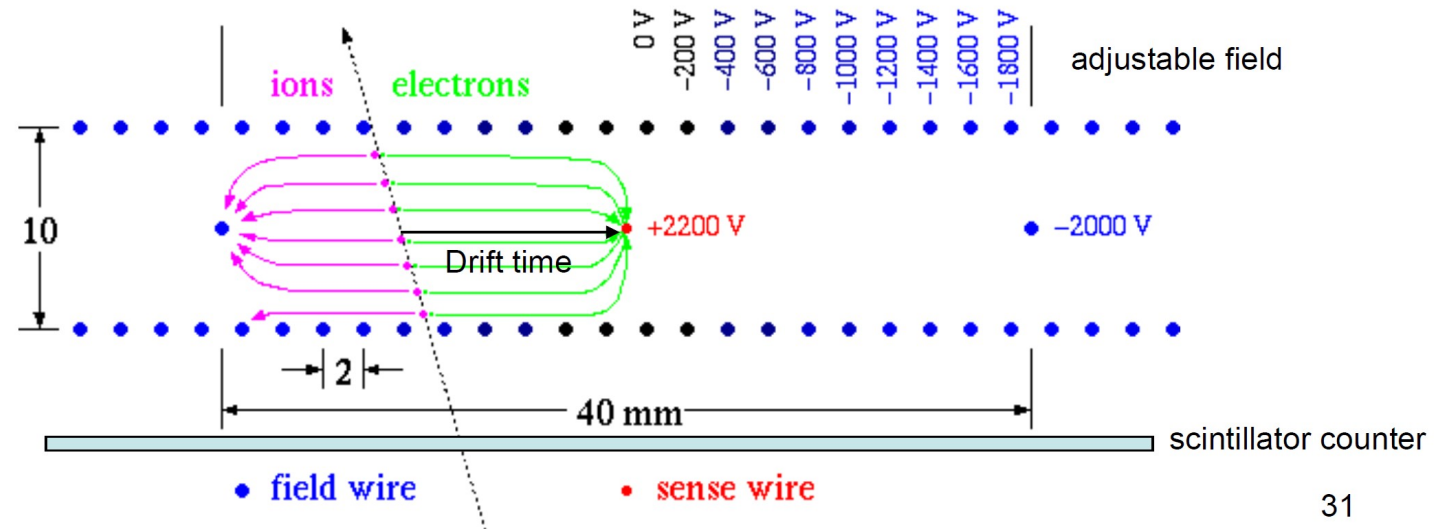
$$\sigma_y = 50 - 300 \text{ } \mu\text{m}$$



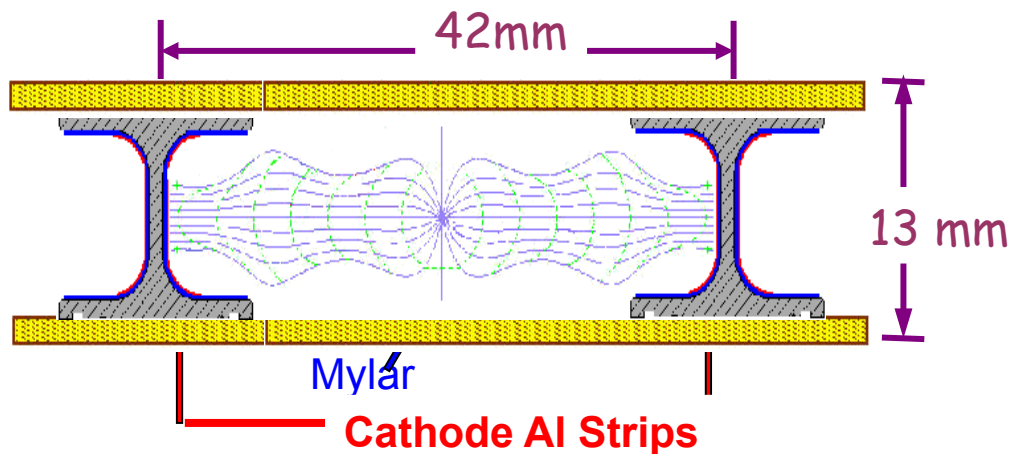
Дрейфови камери

- Полето осигурява постоянна скорост на дрейф на електроните
- Измерва се времето за достигане на електроните до анодните нишки
- Стартов сигнал от бърз външен детектор

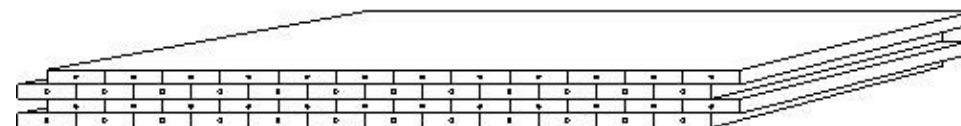
$$x = \int_0^{t_D} v_D dt$$



Дрейфови камери - CMS



4 Layers = 1 Superlayer (SL)



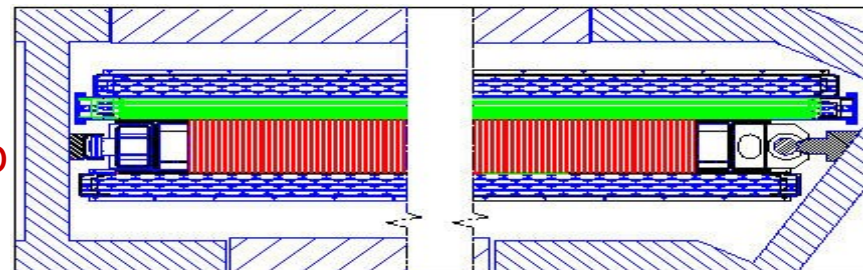
Independent Subunit

(Gas tightness, HV, Front End)

GAS: Ar/CO₂ (85/15)

HV: Wires 3600 V
 Strips 1800 V
 I-beams -1200 V

Φ SL
 θ SL
 Honeycomb
 Φ SL

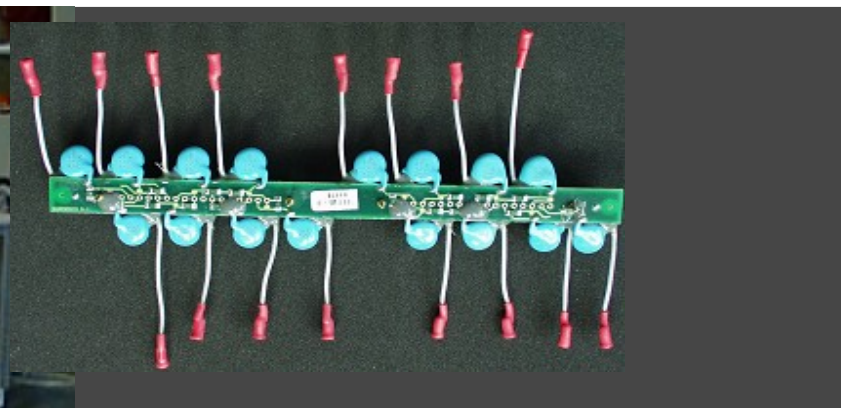
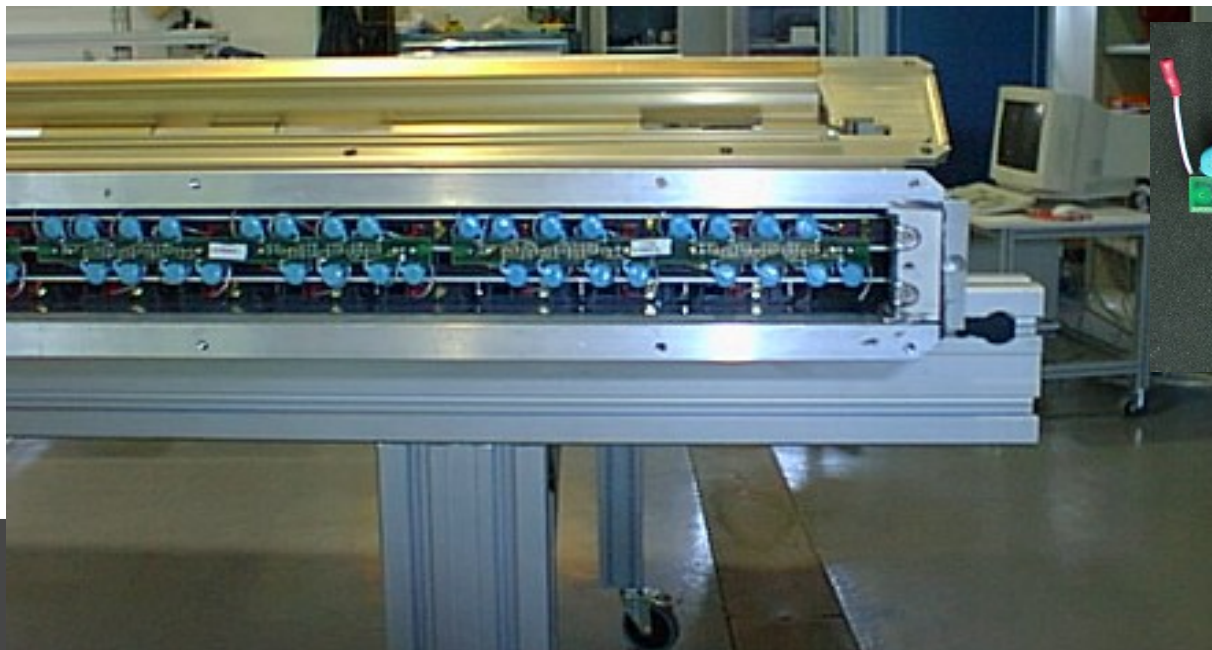


T_{max}: 380 ns
 Drift Velocity : ~ 55μm/ns

Single Wire
 Resolution : < 300 μm

100μm Φ
 150μm θ

Дрейфови камери - CMS



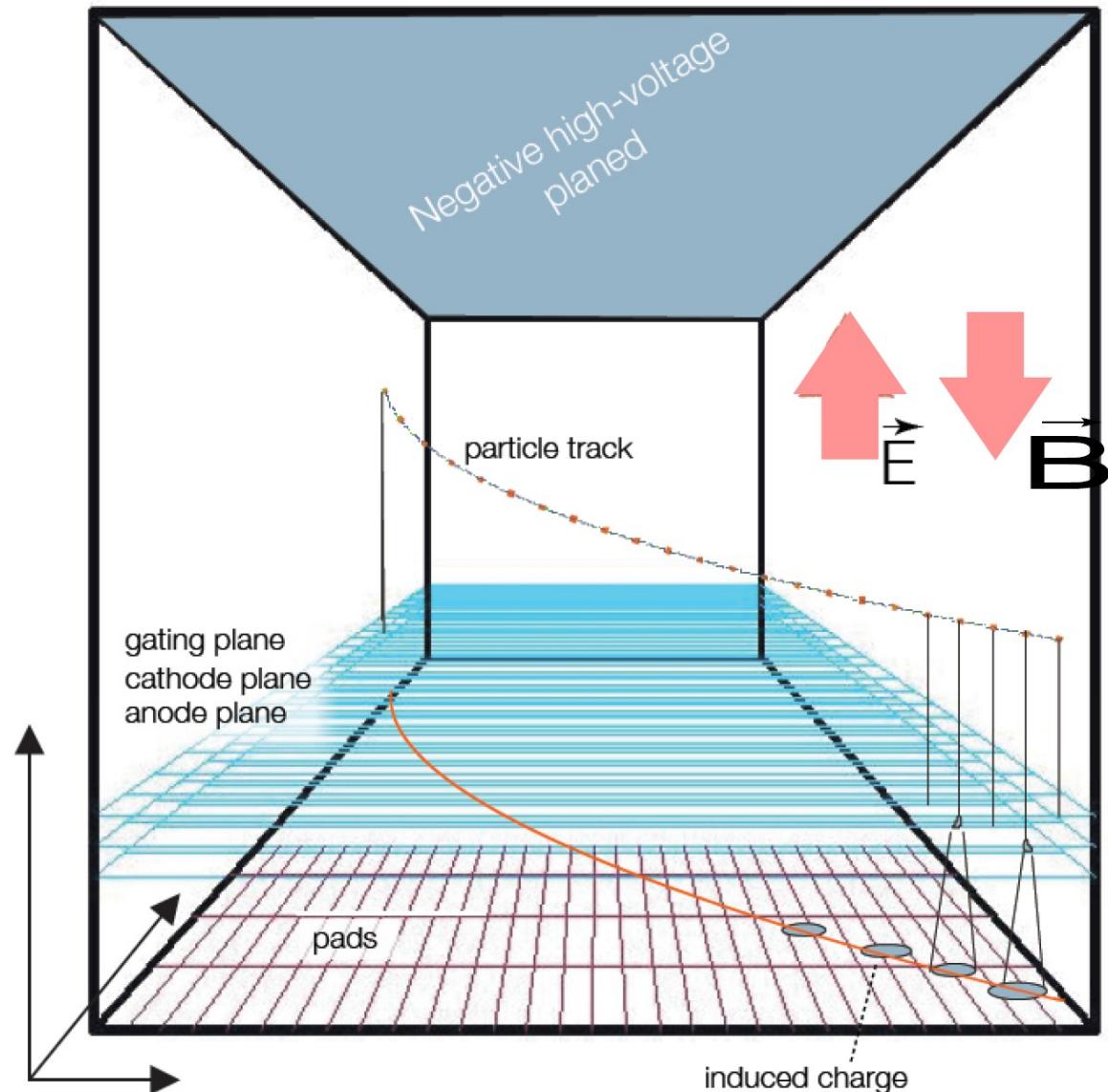
FE BOARDS



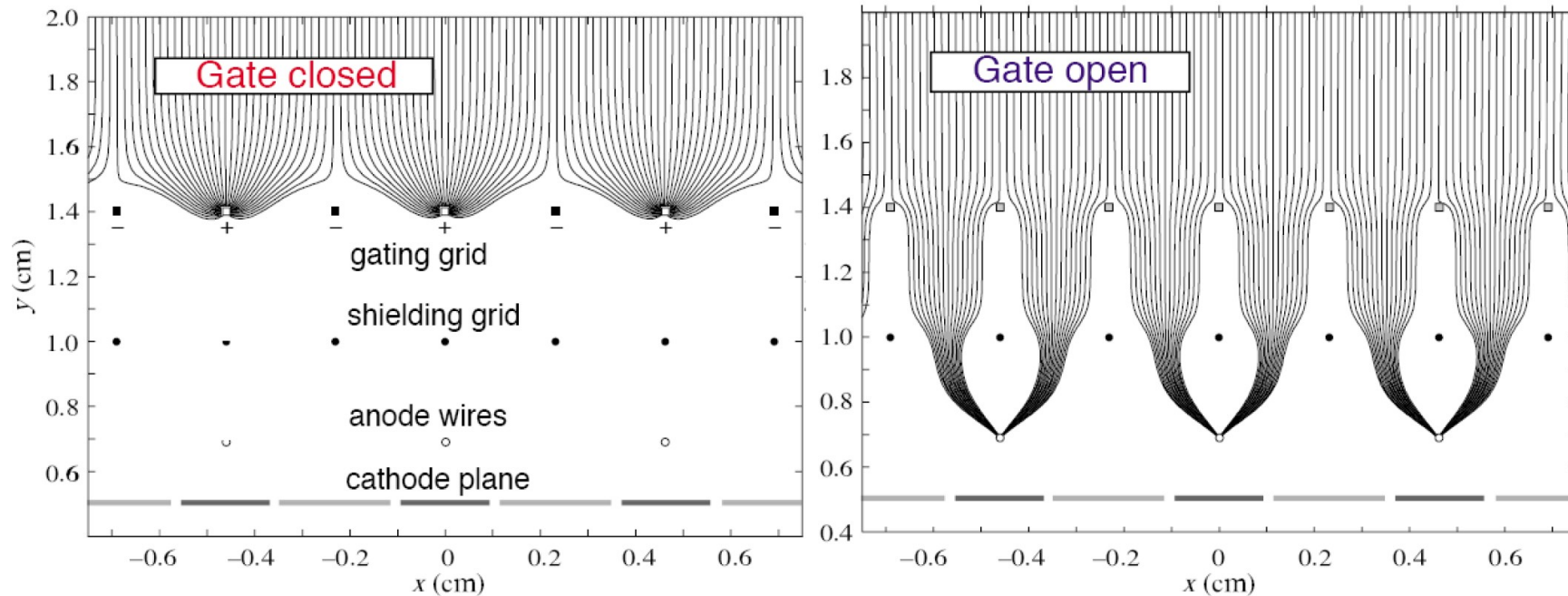
Време-проекционни камери

- Измерва x , y MWPC + pads
- Измерва z - време на дрейф
- Включено магнитно поле B - измерва се импулса
- Измерва отделена енергия - dE/dx
- Типична разделителна способност

z : mm; x : 150 - 300 μm ; y : mm
 dE/dx : 5 - 10%



Време-проекционни камери



- Проблем – натрупан заряд от бавни йони – изменя E
- Решение две решетки пред MWPC
- Решетка – gate
- Екранираща решетка

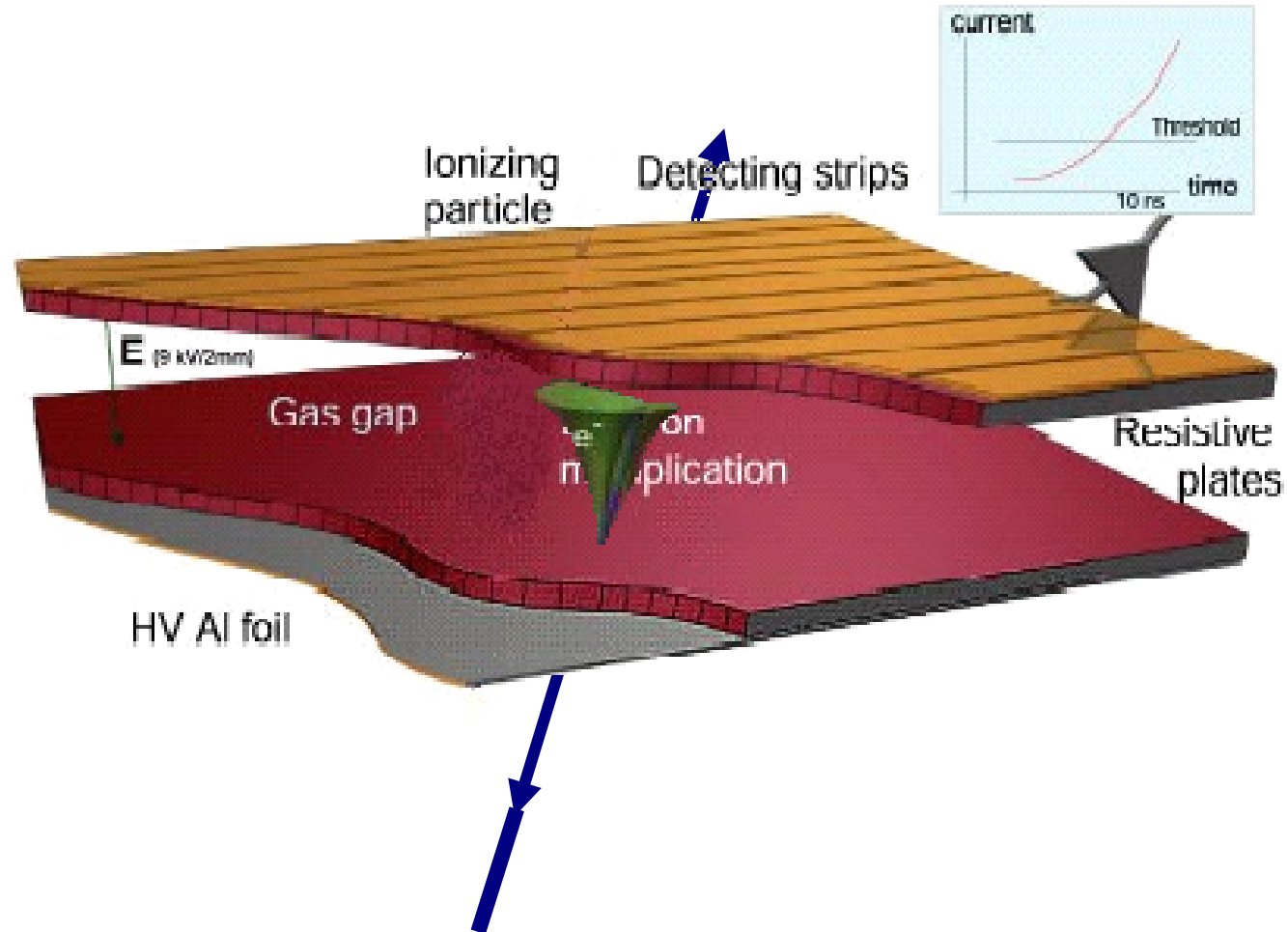
Време-проеекционни камери ALICE

- Дължина 5 м
- Радиус 2.5 м
- ВН – 100 кВ
- Газ Ne/CO₂/N₂ (90-10-5)
- Площадки – 557568
- Усилване > 10²
 $\sigma_t = 250 \mu\text{m}$
 $\sigma_p/p \sim 1\% p$; $\varepsilon \sim 97\%$
 $\sigma_{dE/dx}/(dE/dx) \sim 6\%$



Камери със съпротивителна плоскост (RPC)

- Бързи детектори
- Несложна конструкция
- Евтини
- Покриват големи площи
- Висока пространствена разделителна способност
- Висока разделителна способност по време
- $\delta x \sim 100 \mu\text{m}$, $\delta t \sim 30 \text{ ps}$

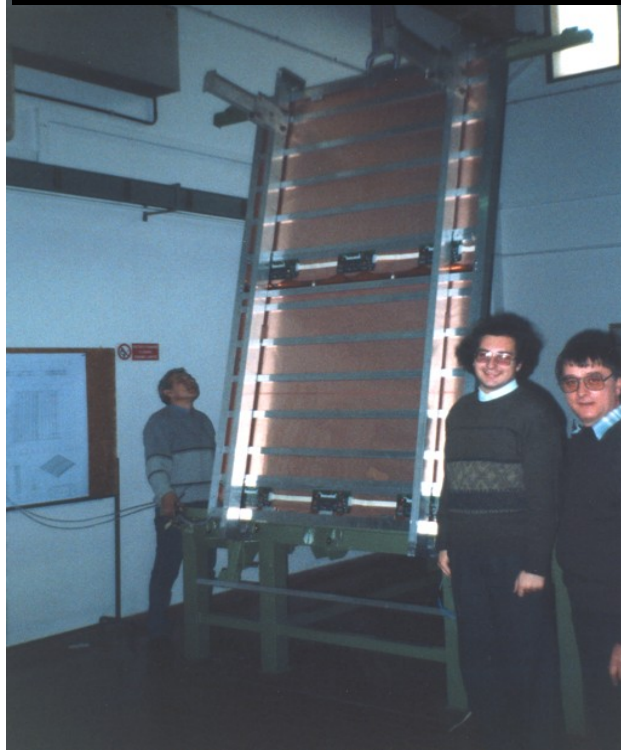


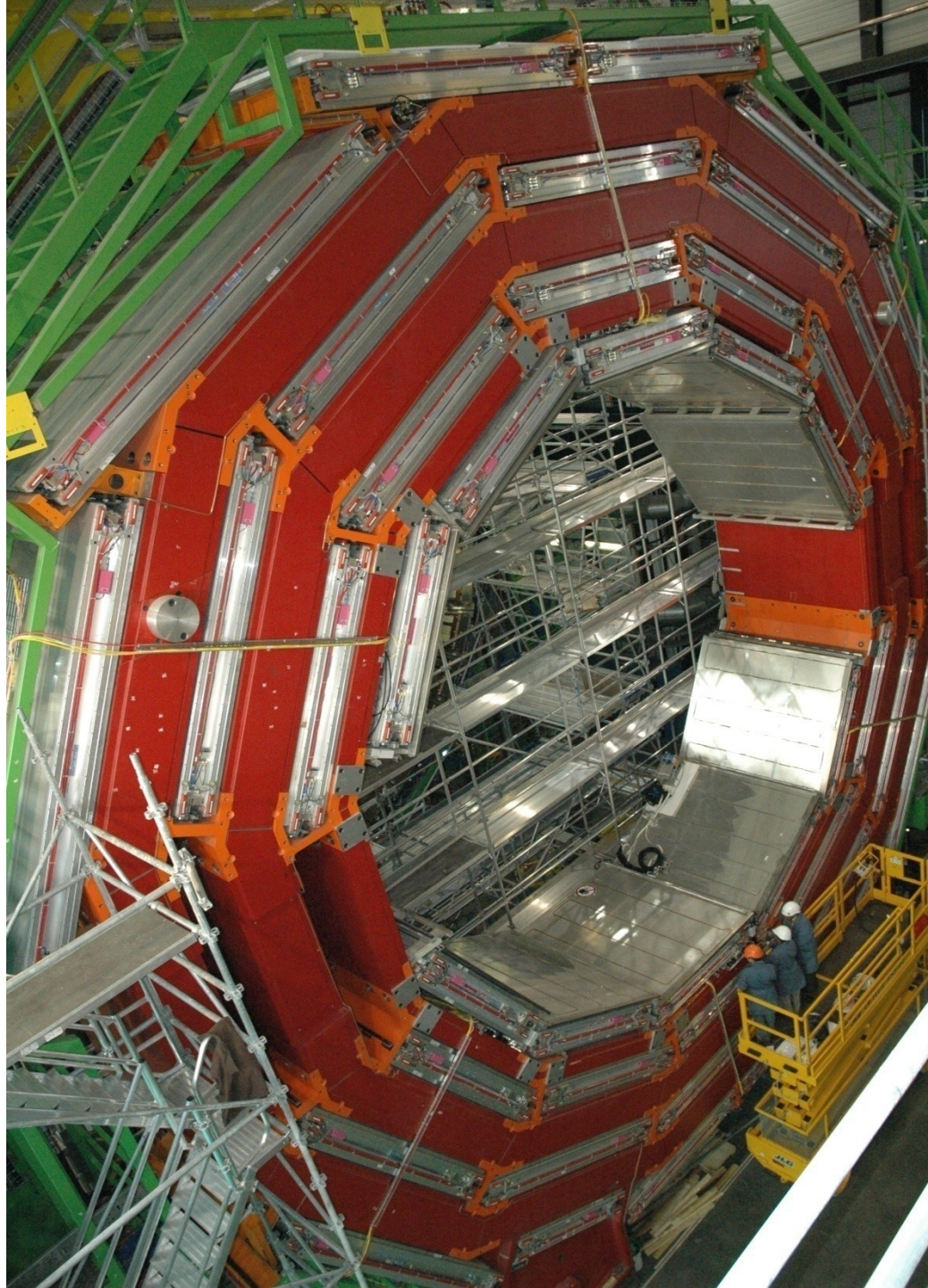
RPC за детектора CMS



Production of all RPC frames (> 20 tons) at *Stilmet* in Sofia

In Sofia – assembly and tests 125 of RPC





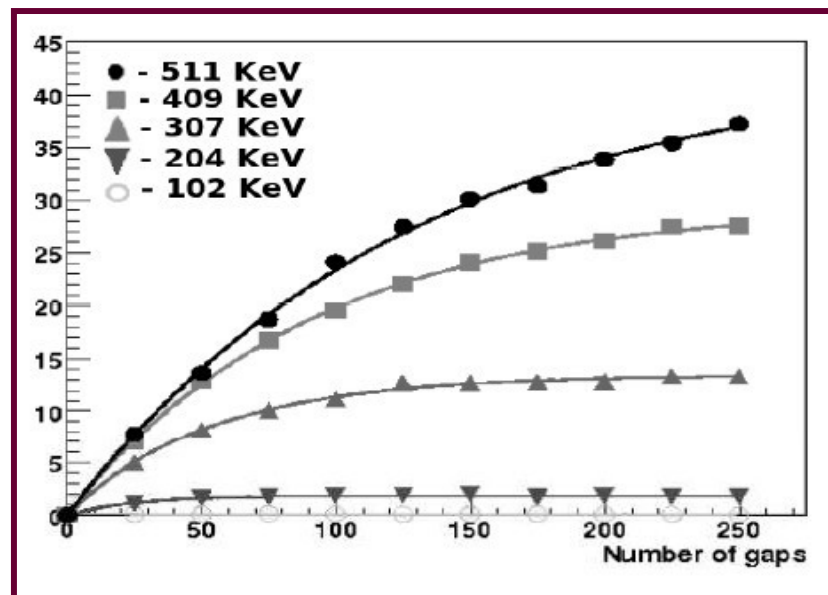
RPC за медицински приложения



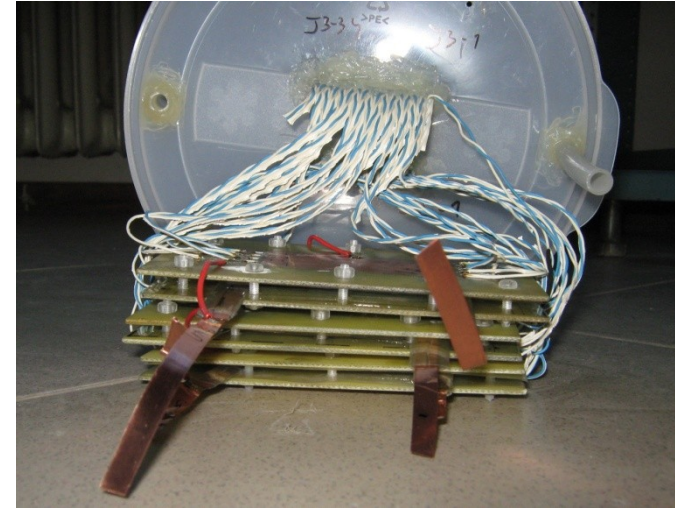
Висока пространствена и времева разделителна способност! $\delta x \sim 100$ mm, $\delta t \sim 30$ ps

max yield *511 KeV* $\sim 43\%$,
95% level - at 381 ± 13 gaps

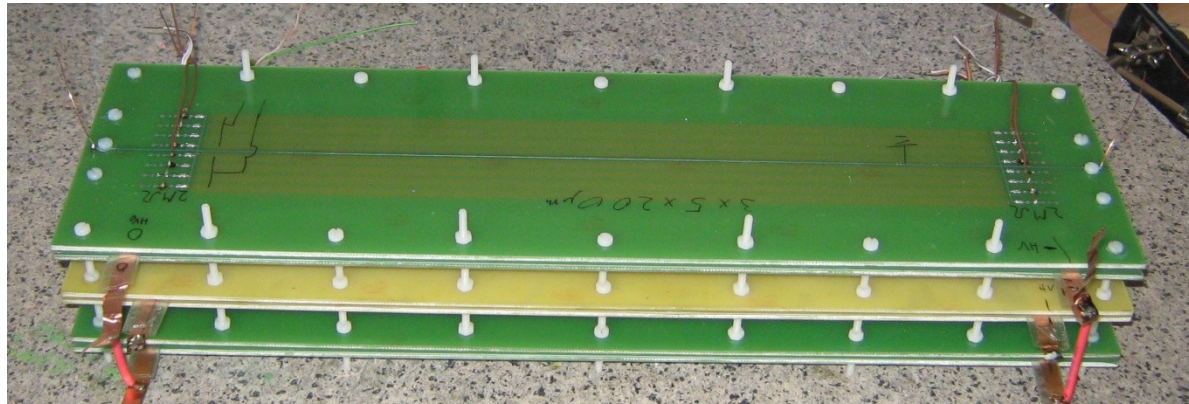
**100 процена осигуряват
достатъчна ефективност**



RPC конструкция



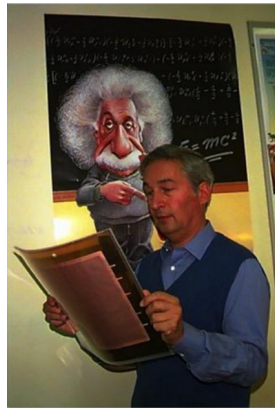
Скалирани прототипи – физически
и химически свойства



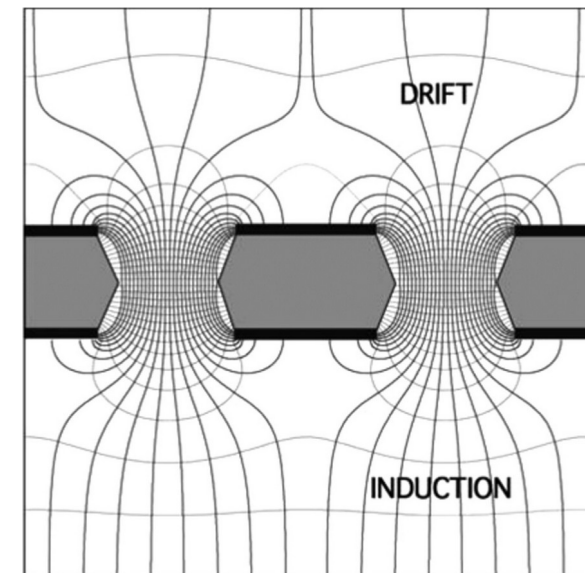
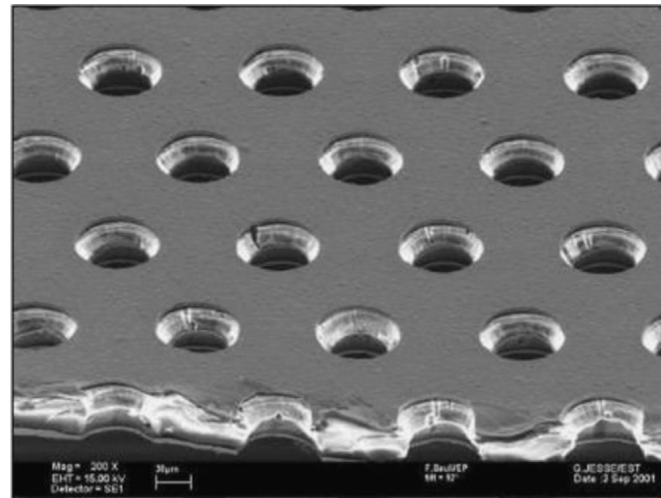
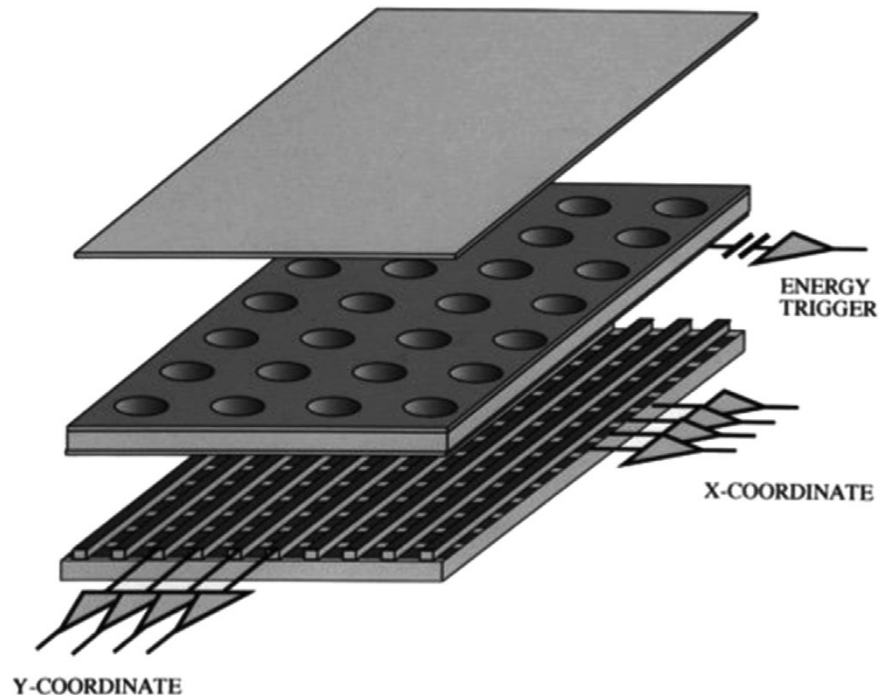
Пълномащабен прототип за
изследване на характеристиките
и производителността

Газов електронен умножител - GEM

- С цел да се намалят разрядите и натрупване на заряди
- Ускоряваща решетка – полимерно метализирано фолио
- Отвори формиращи ускоряващо поле ($70\ \mu\text{m}$, dist $140\ \mu\text{m}$)
- Пространствено разделителна способност $\sim 100\ \mu\text{m}$, време $\sim 5\ \text{ns}$

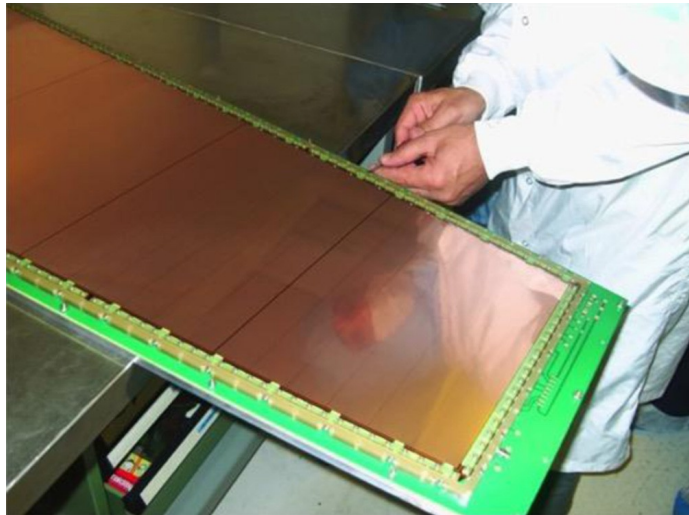
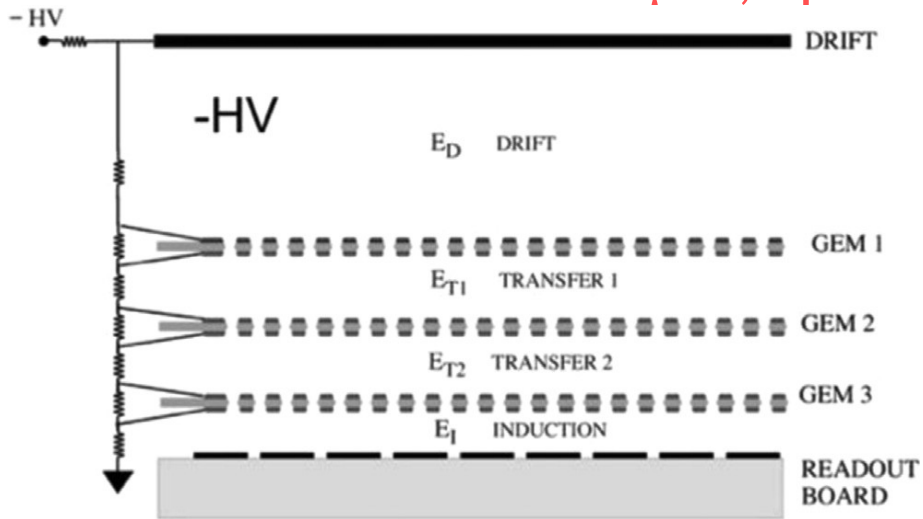


Fabio Sauli

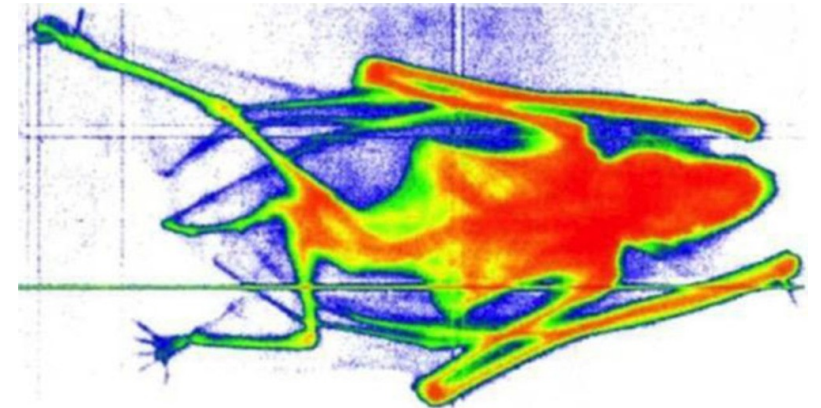
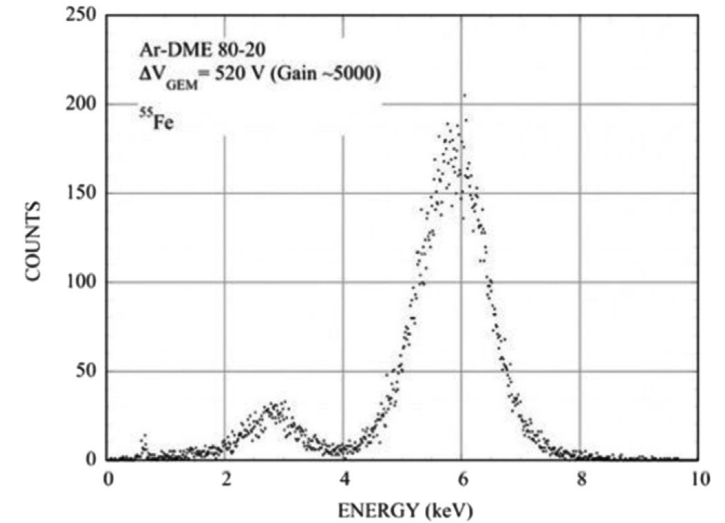


Газов електронен умножител - GEM

- Пространствено разделителна способност $\sim 100 \mu\text{m}$, време $\sim 5 \text{ ns}$



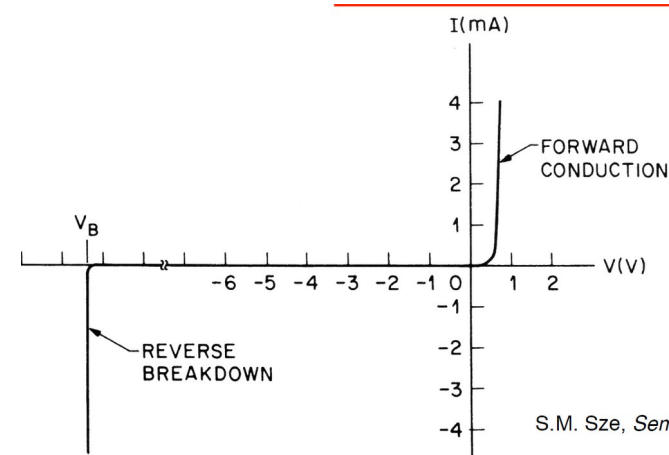
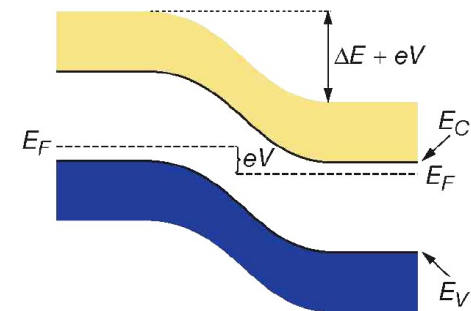
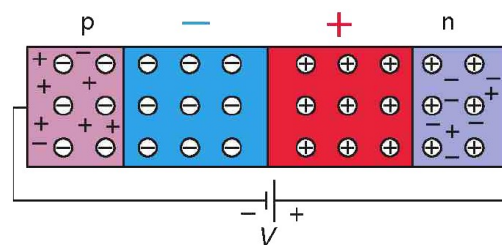
Регистрация на неутрални частици



Полупроводникови детектори

- Работят на същия принцип - създаване на двойка електрон - дупка в областта на p-n прехода
- Нужни са само 3 eV (газови - 34 eV)
- Обикновено изискват охлаждане (за да се намалят шумовете)
- Изискват материали с много висока чистота и строг контрол на примесите

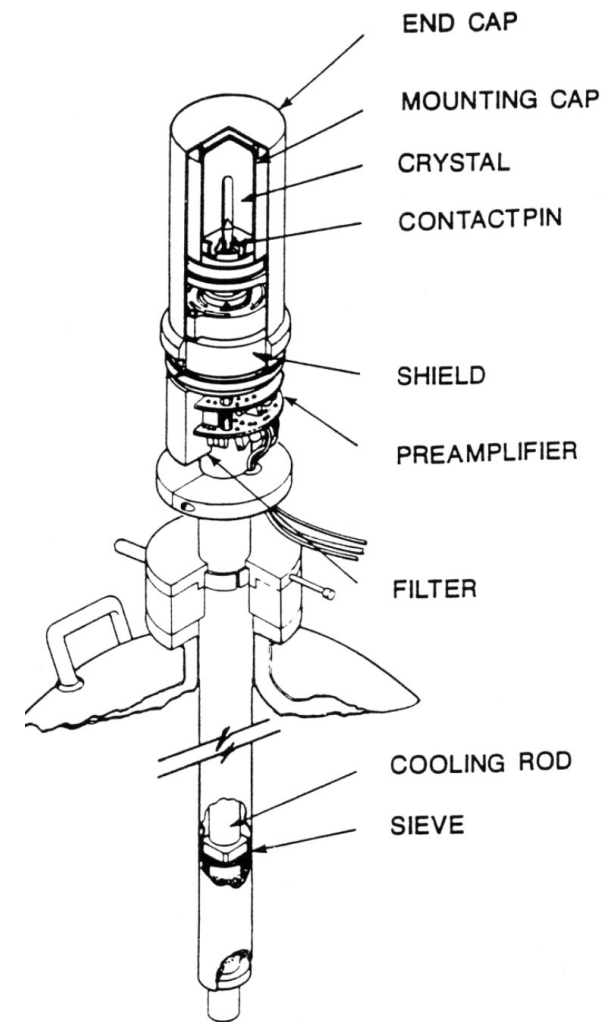
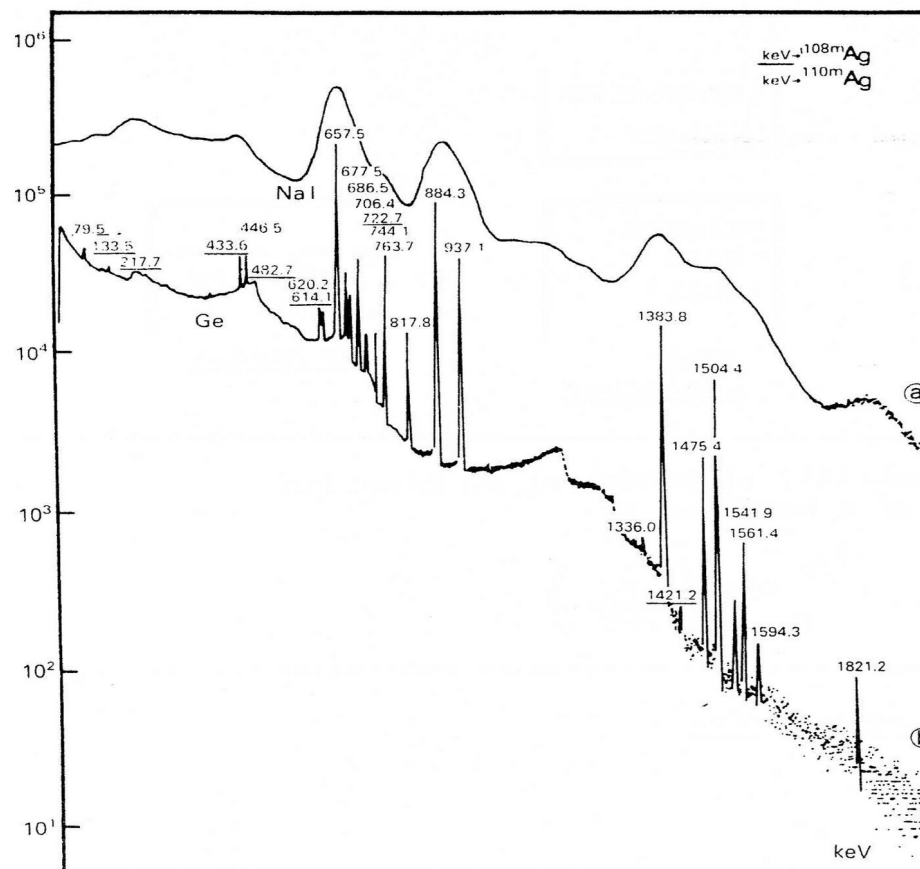
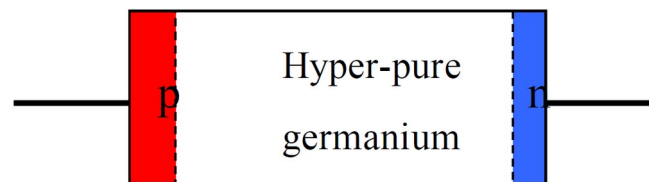
p-n junction with reverse bias



S.M. Sze, *Semiconductor Devices*, J. Wiley & Sons, 1985

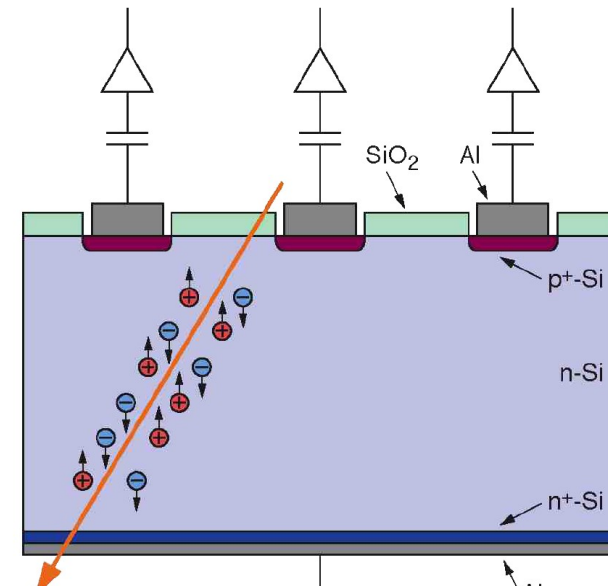
Полупроводникови детектори - Ge детектор

- Сврѣх чист Ge
- Висока разделителна способност по енергии
- Изключително добър за гама спектроскопия
- Изисква охлаждане с течен азот
- Сложна електроника
- Радиационни увреждания

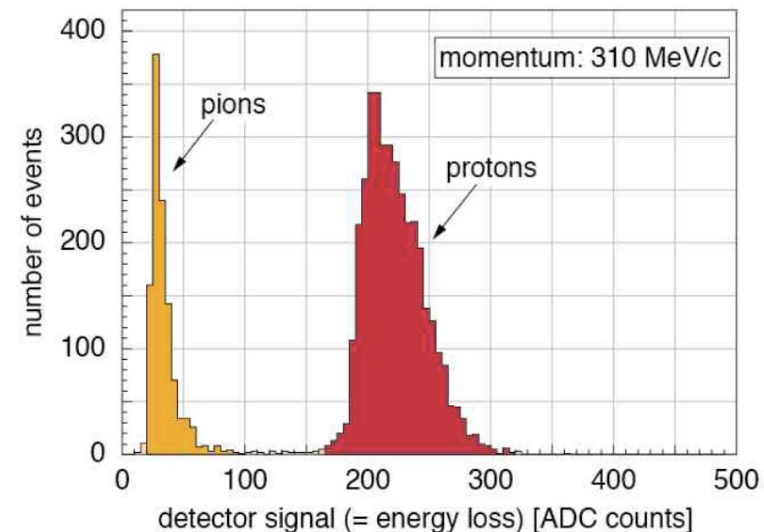


Полупроводникови детектори - Si

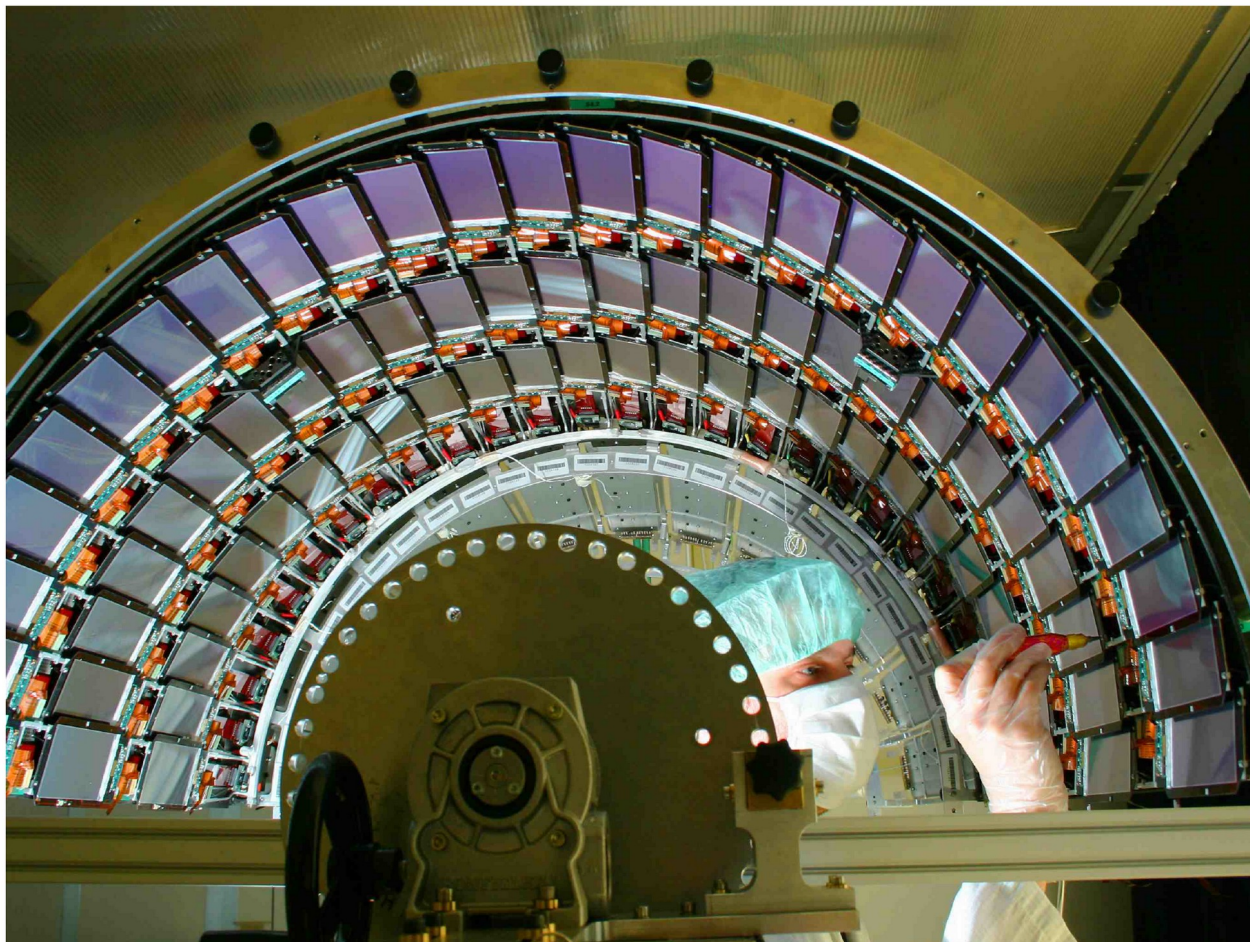
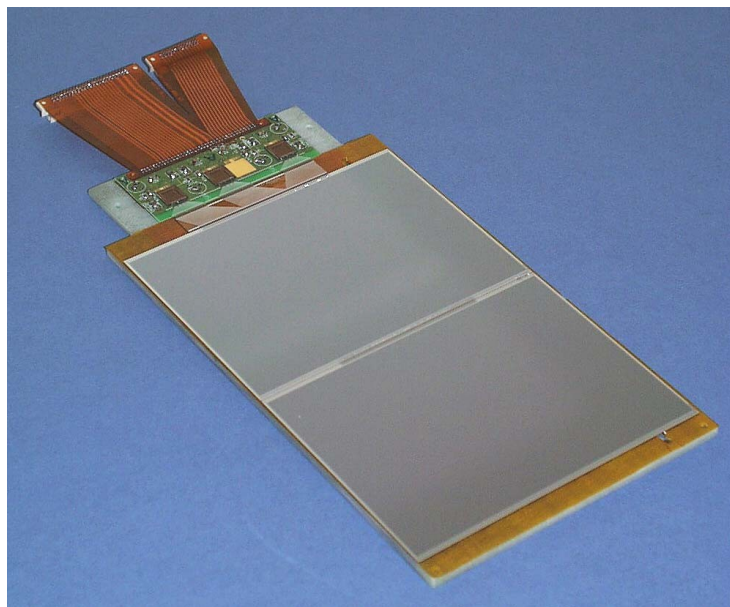
- Микрострипови детектори
- Заряд отделен в обеднената зона
- Дебелина - 300 μm
- Напрежение < 200 В
- n^+ слой за подобряване на омичния контакт
- Алуминиево покритие
- Отделя се малко количество енергия (около 78 кеВ за 300 μm)



Pions and Protons:

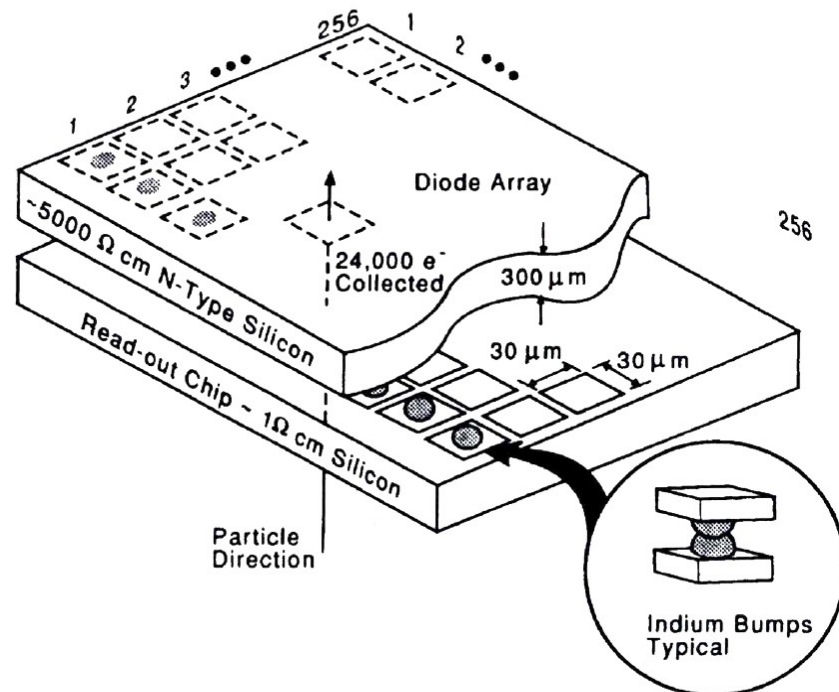


Полупроводникови детектори - Si (CMS)

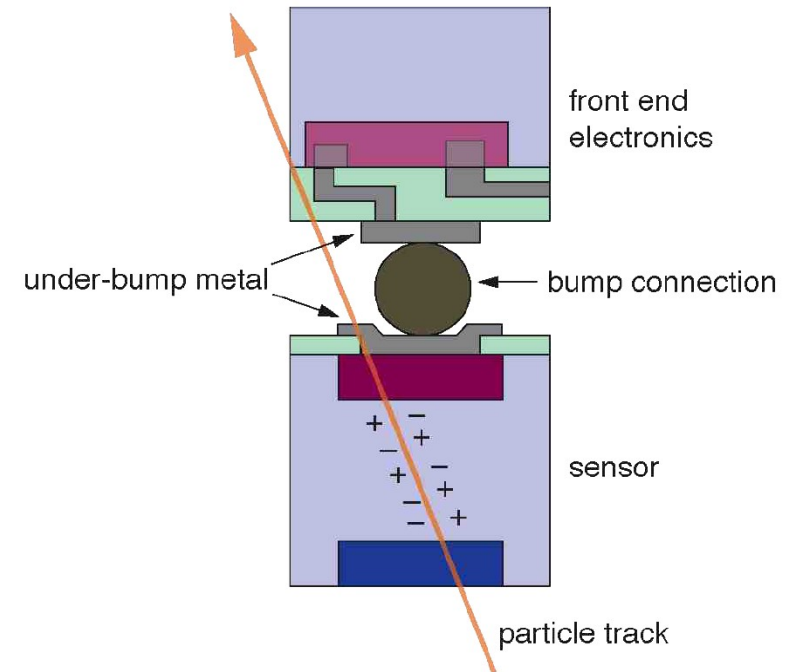


Полупроводникови детектори - Si

➤ Пикселни детектори

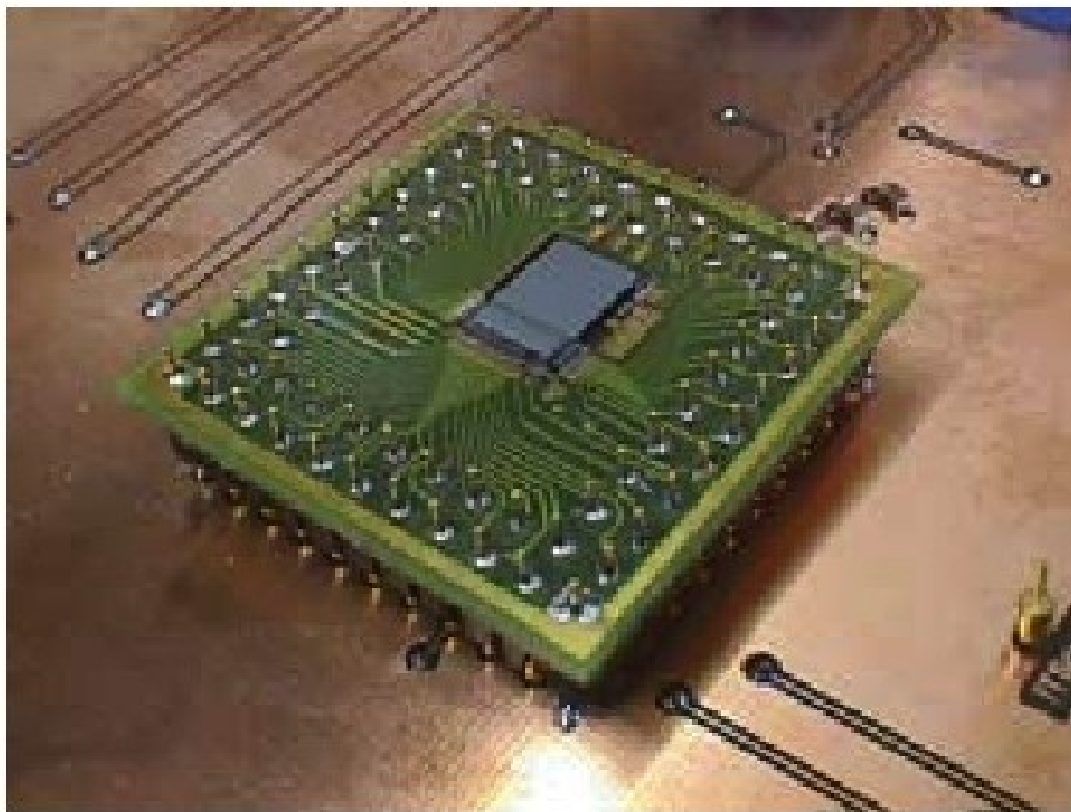


S.L. Shapiro et al., *Si PIN Diode Array Hybrids for Charged Particle Detection*, Nucl. Instr. Meth. A **275**, 580 (1989)



L. Rossi, *Pixel Detectors Hybridisation*, Nucl. Instr. Meth. A **501**, 239 (2003)

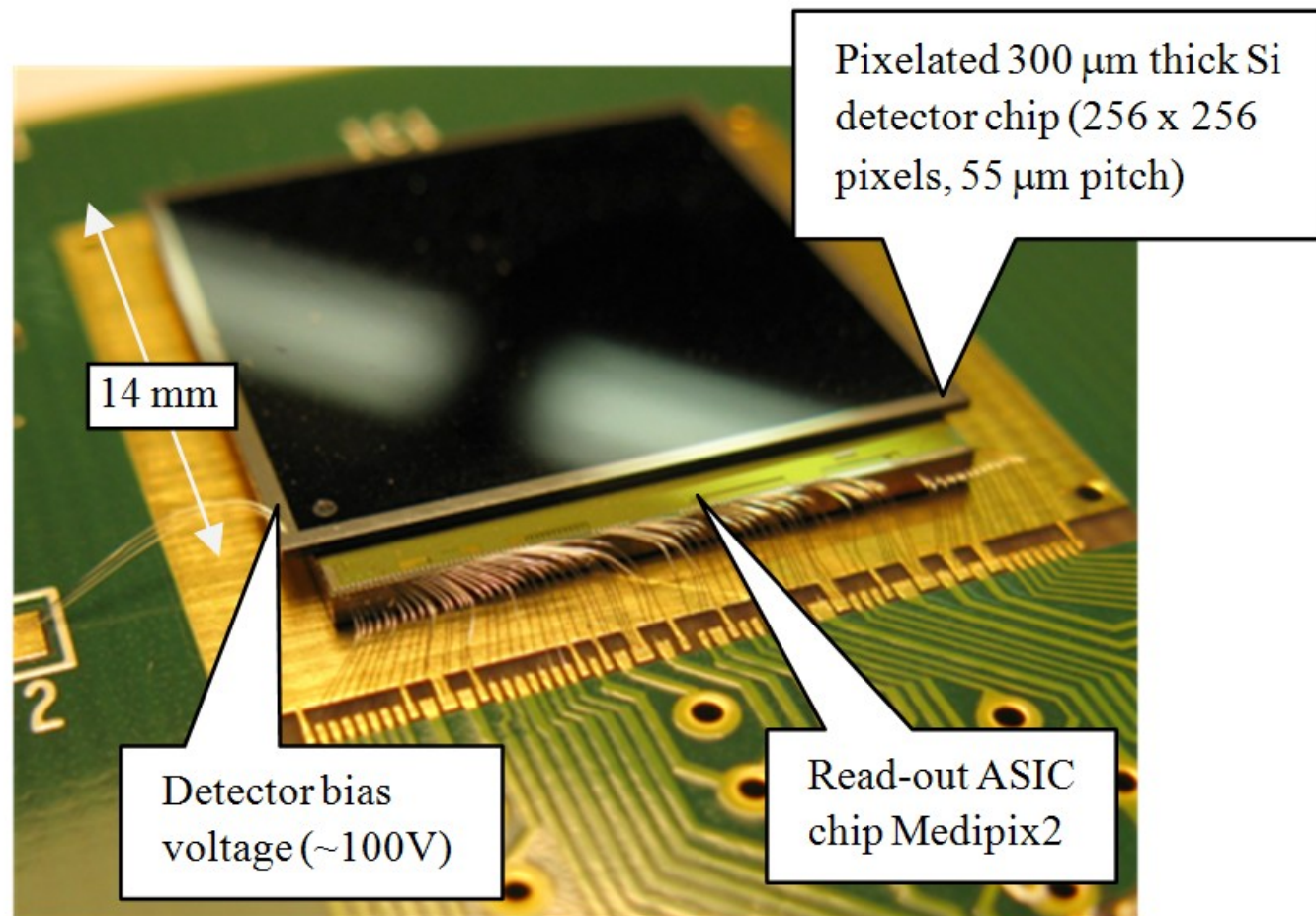
Полупроводникови детектори - Пикселен детектор



- 36x40 pixel chip
- chip size 8.4mm x 6.3mm
- pixel size 150 μ x 150 μ

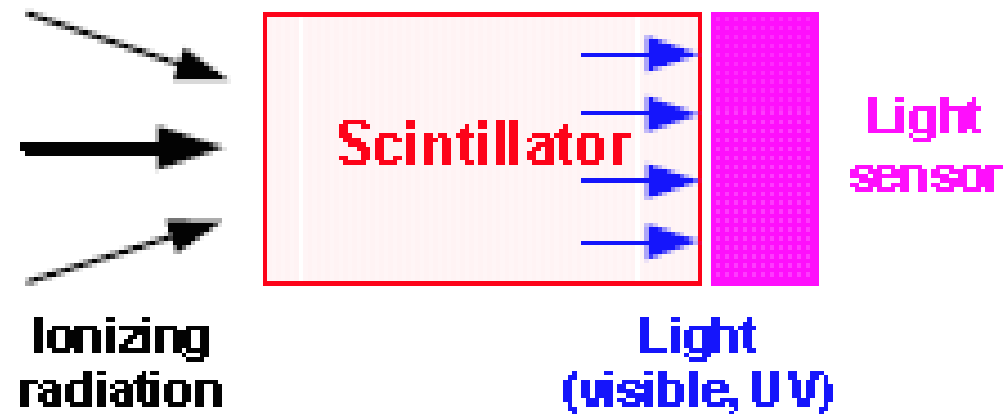
Полупроводникови детектори

- Medipix (CERN)
- Висока пространствена р.сп. (50 μm)
- Висока скорост на четене
- Няма шум
- Няма ток на тъмно
- Неограничена динамична скала
- Дискриминация по енергия



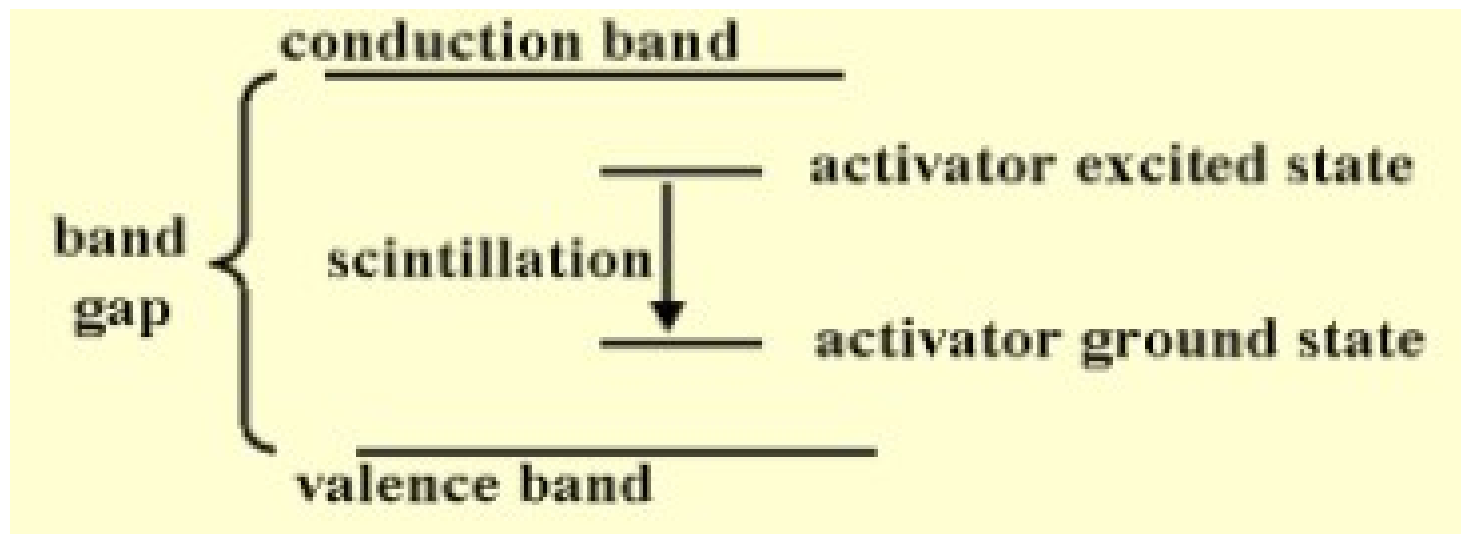
Органични течни сцинтилатори

- Сцинтилатори – при преминаване на йонизиращо лъчение излъчват светлина (възбудени състояния на атомите)
- Малък примес от вещество (сцинтилиращо) с различен спектър на излъчване от основното
- Органичен разтворител (трябва да разтвори сцинтилатора)
- Първичен сцинтилатор (р-терфенил)
- Вторичен примес (преобразовател на дължината на вълната)
- Добавки
- Ефективни за измерване на бета частици (H^3 , C^{14})



Неорганични сцинтилатори

- Погълнатата енергия превежда електрони от валентната зона в забранената зона
- Примеси, така подбрани, че да имат разрешени енергетични нива в забранената зона
- Излъчената от тях светлина не се поглъща



Неорганични сцинтилатори

- Чувствителност

- Разделителна способност
(енергия,
пространствена, скорост
на броене)

- Фотодетектор

	NaI(Tl)	BGO	LSO(Ce)	GSO(Ce)
Density (gm/cm ³)	3.67	7.13	7.4	6.71
Effective Atomic Number	51	75	66	59
Attenuation Coefficient (@ 511 keV, cm ⁻¹)	0.34	0.955	0.833	0.674
Light Output (photons/Mev)	40K	~8K	~30K	~20K
Decay Time	230 ns	300 ns	12 ns 40 ns	60 ns
Wavelength	410 nm	480 nm	420 nm	430 nm
Index of Refraction	1.85	2.15	1.82	1.85
Hygroscopy	yes	no	no	no
Rugged	no	yes	yes	no

Спектрометрична система

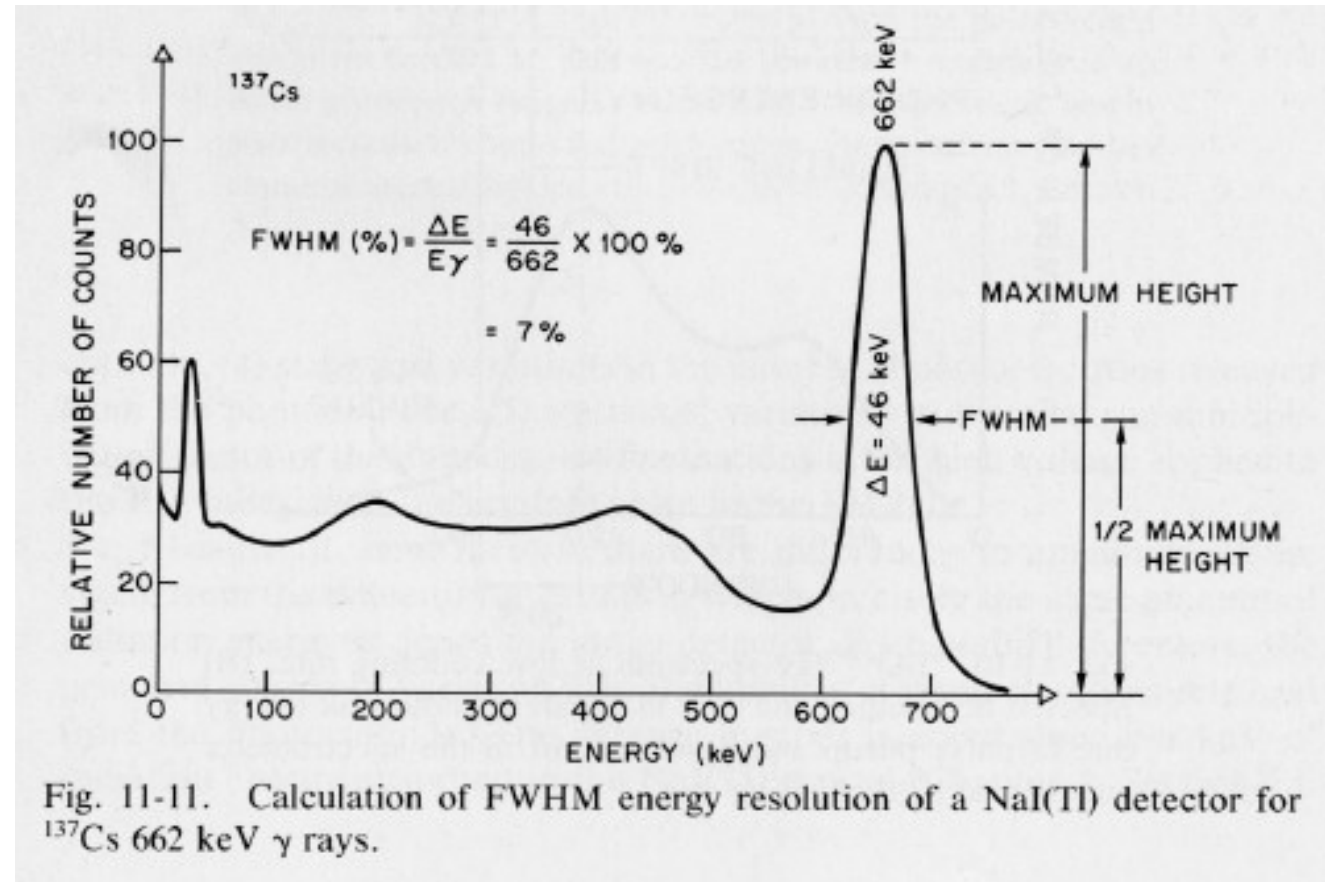
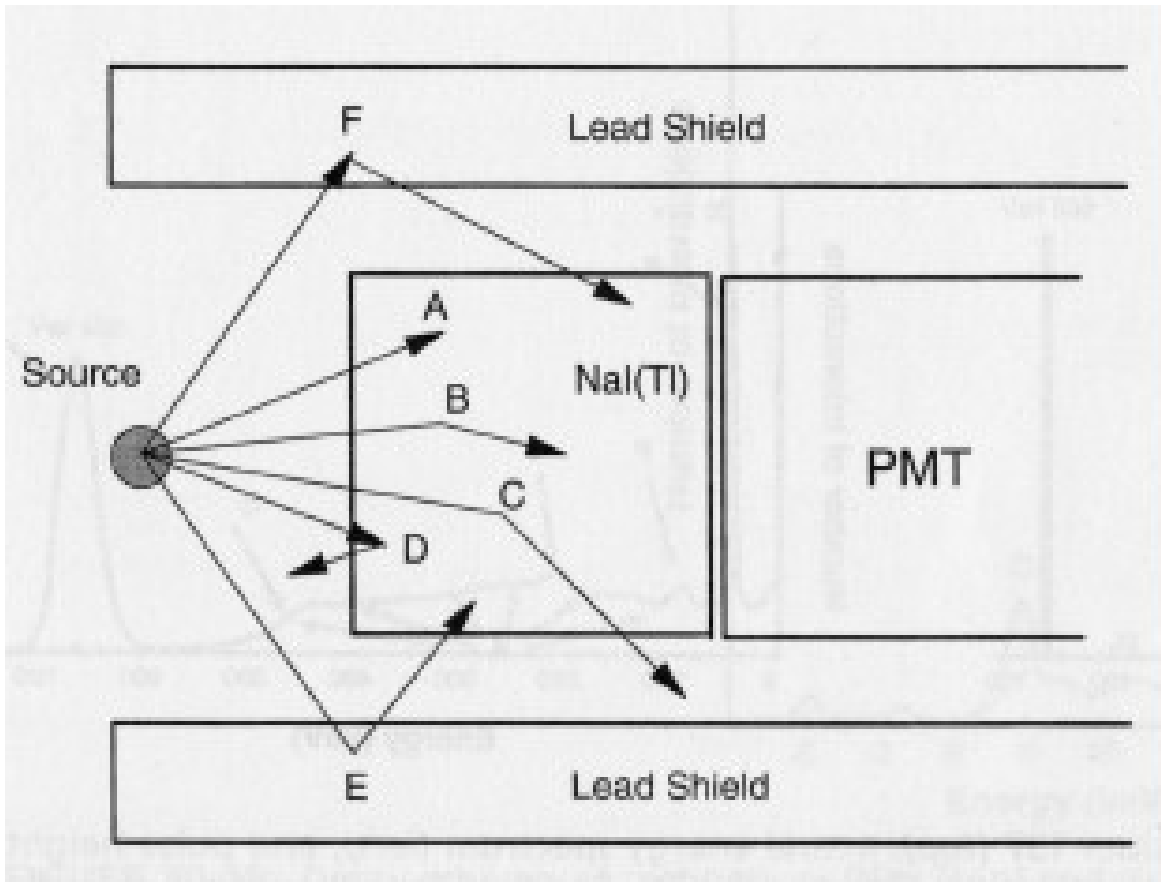
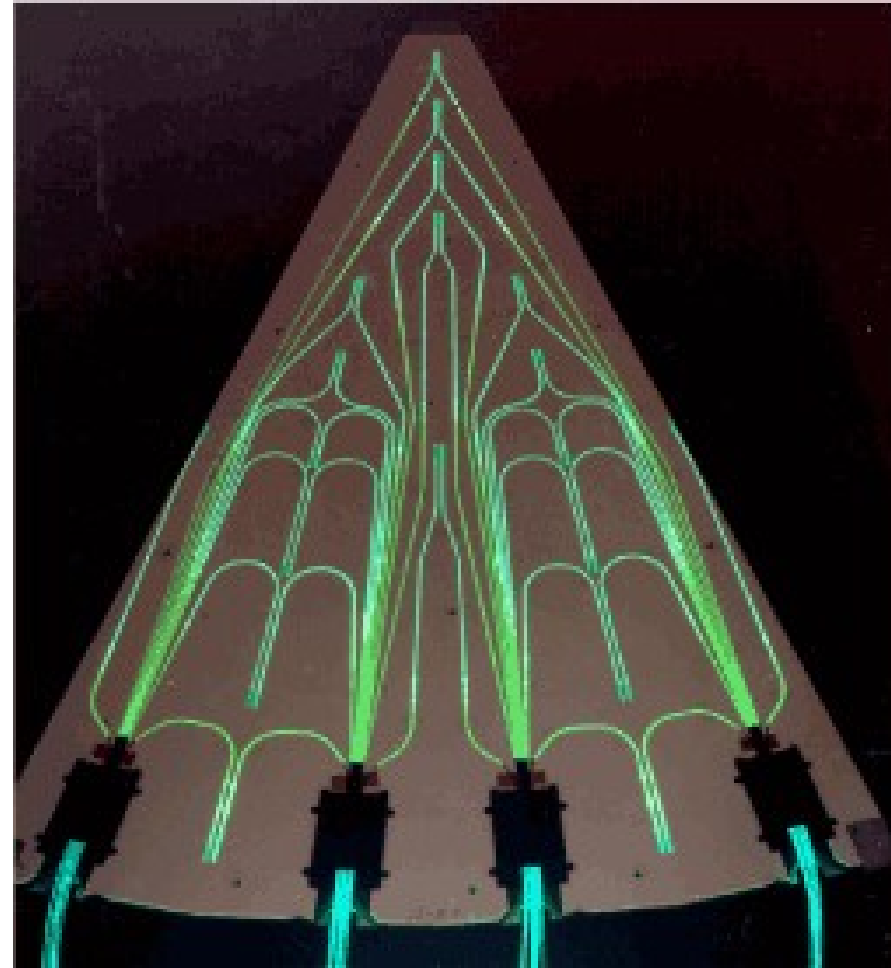
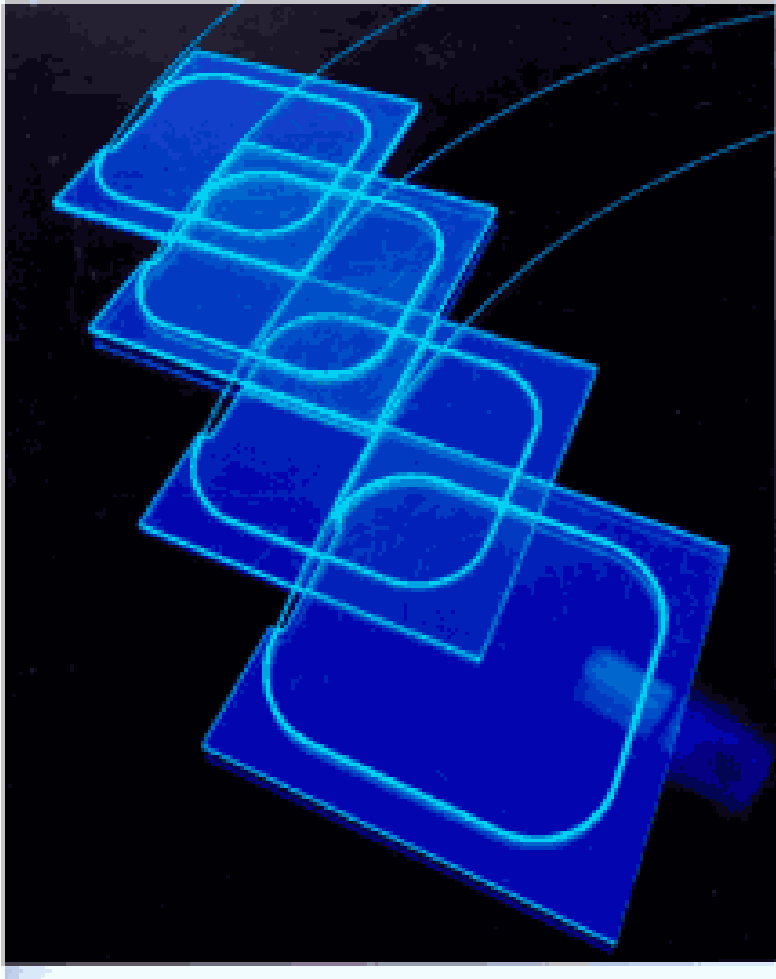
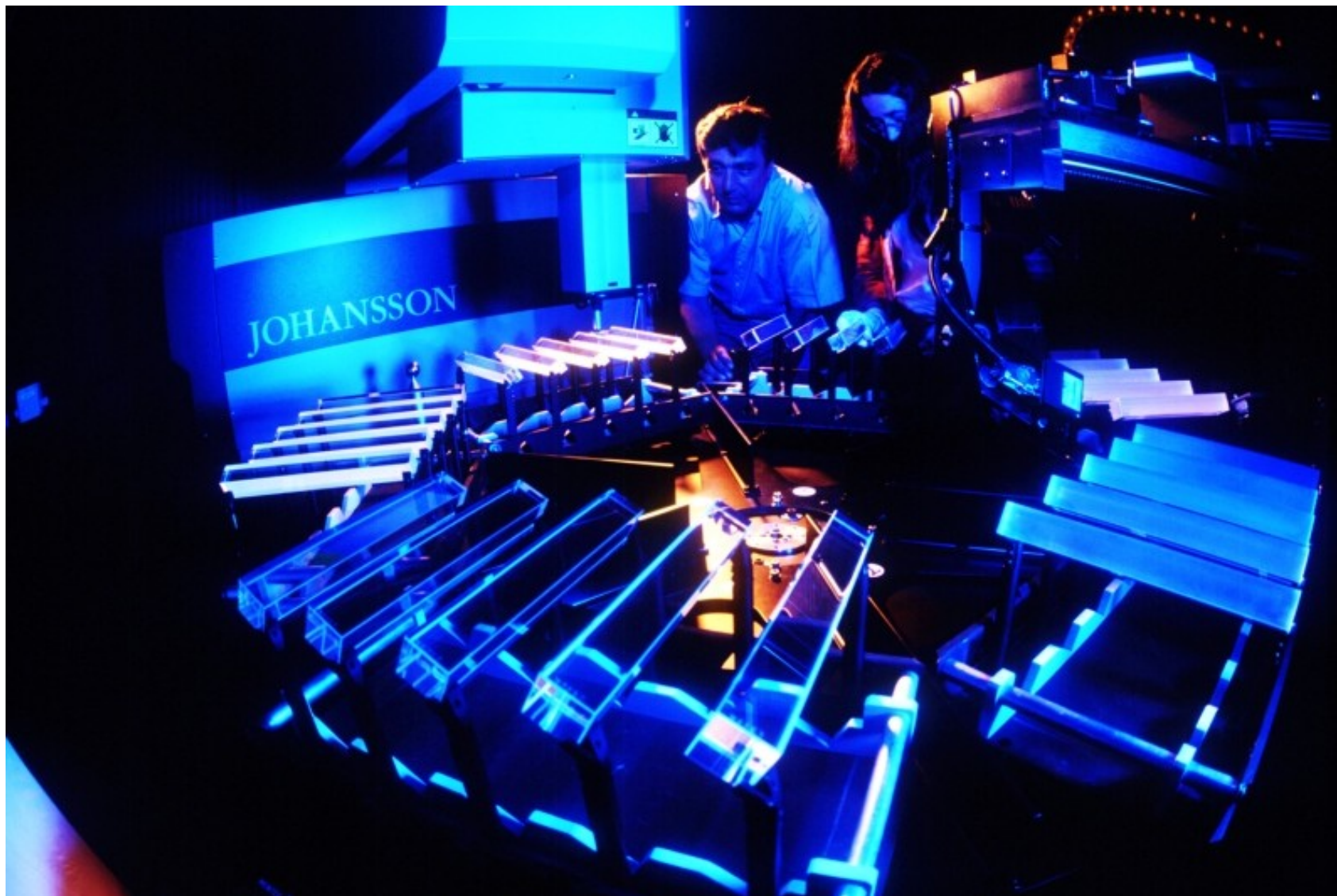


Fig. 11-11. Calculation of FWHM energy resolution of a NaI(Tl) detector for ^{137}Cs 662 keV γ rays.

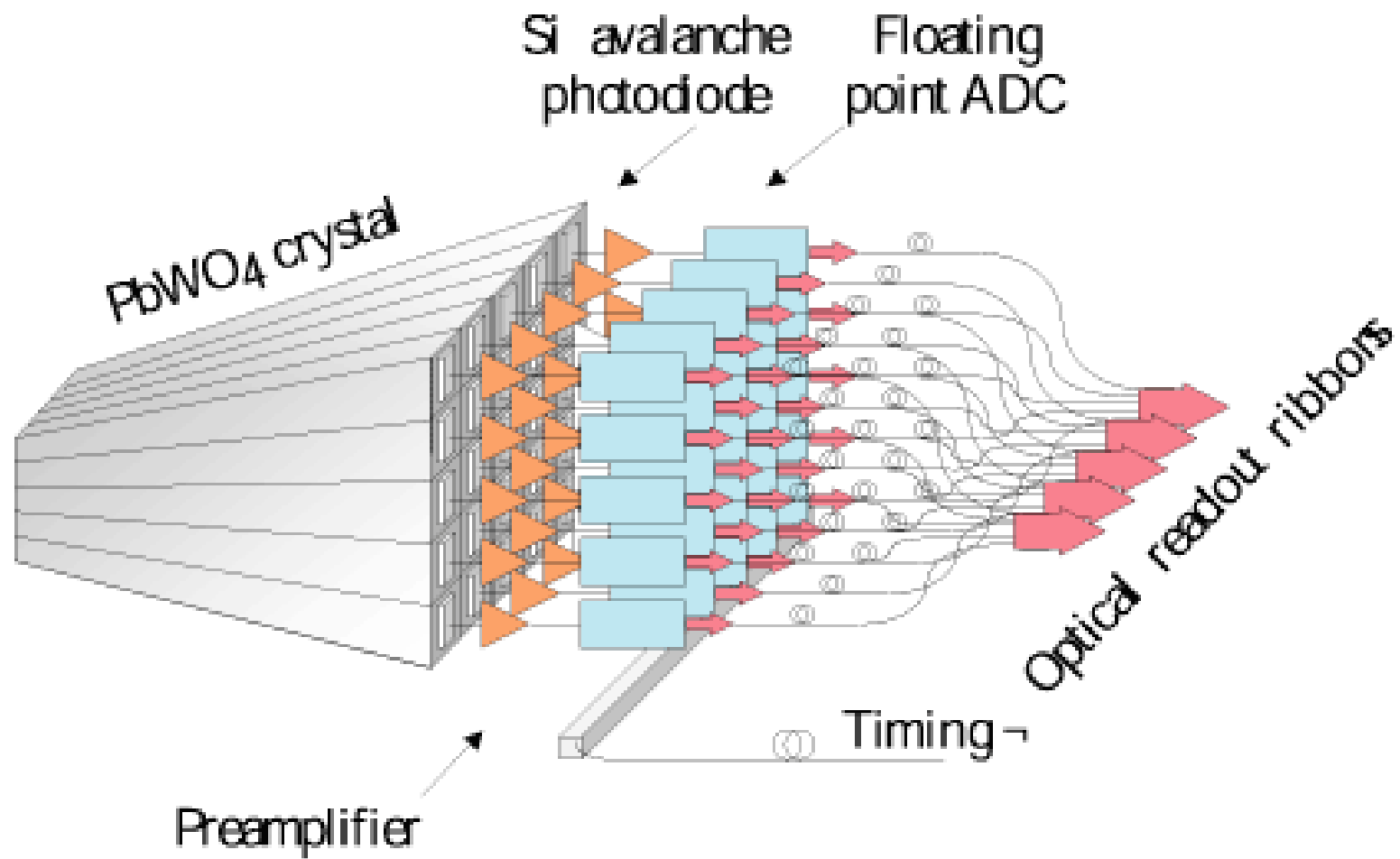
Пластмасови сцинтилатори



Сцинтилатори кристали $PbWO_4$

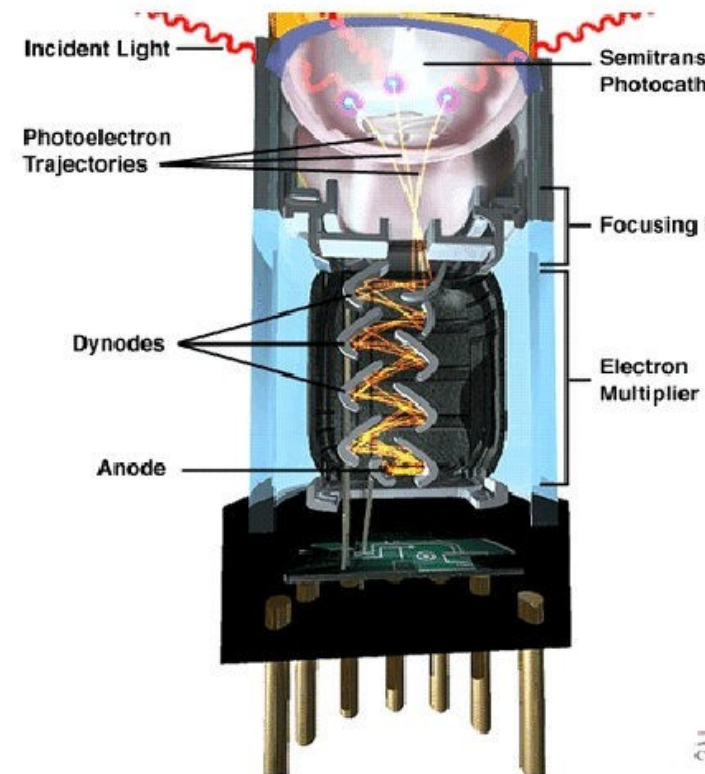
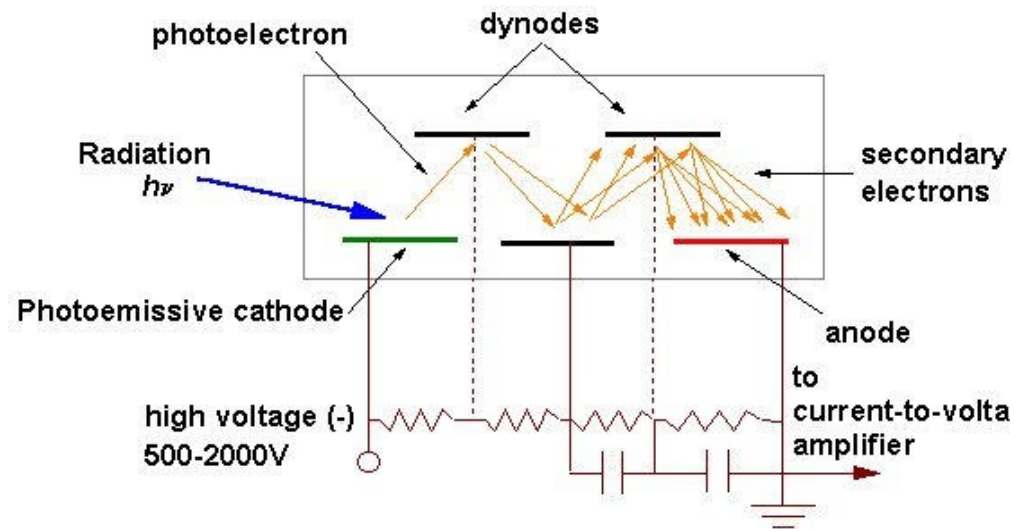


Сцинтилатори кристали $PbWO_4$



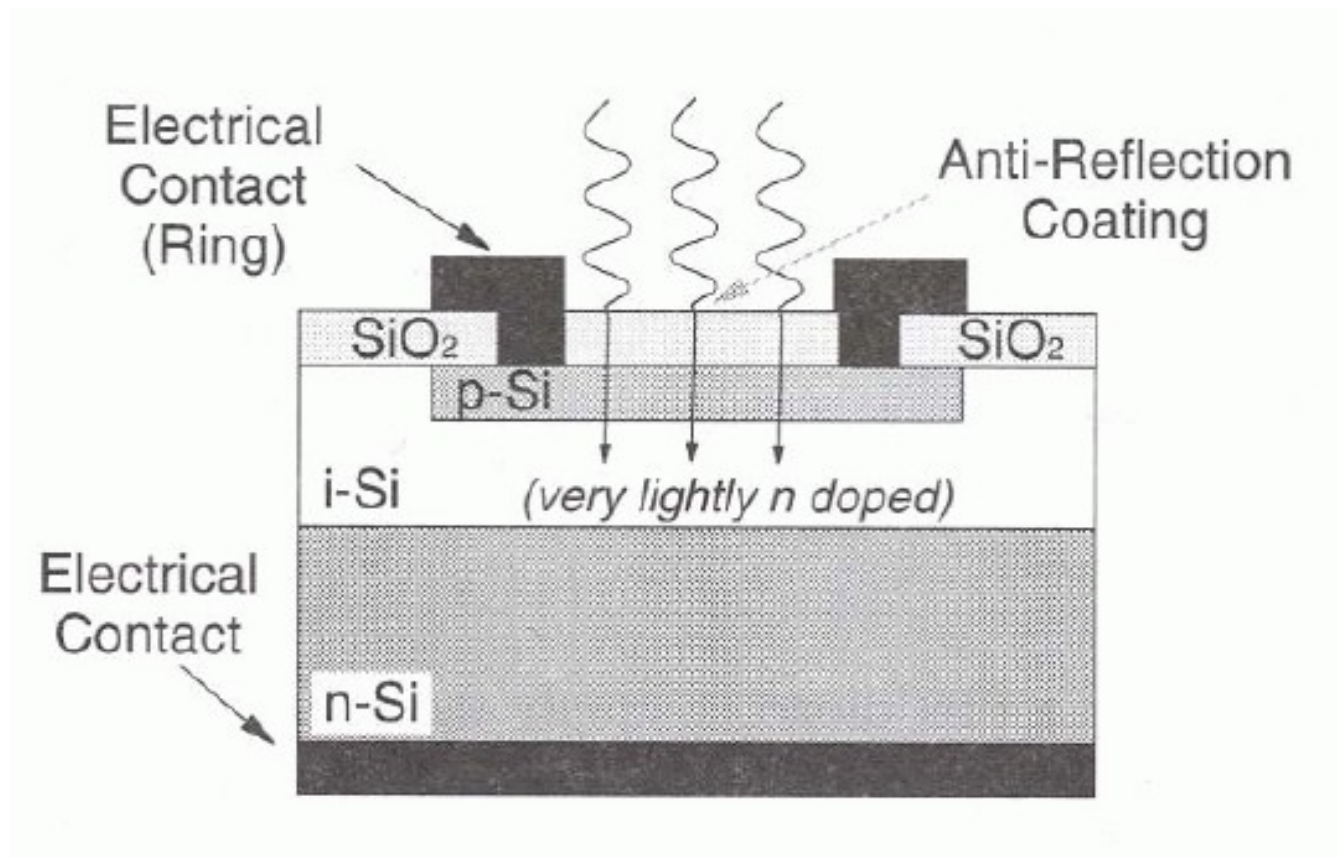
Фотодетектори - фотоумножители

- Фотоумножители
- Фотокатод и система от ускоряващи диноди
- Коефициент на усилване $10^6 - 10^7$
- Многоканални фотоумножители
- Не могат да работят в магнитни полета



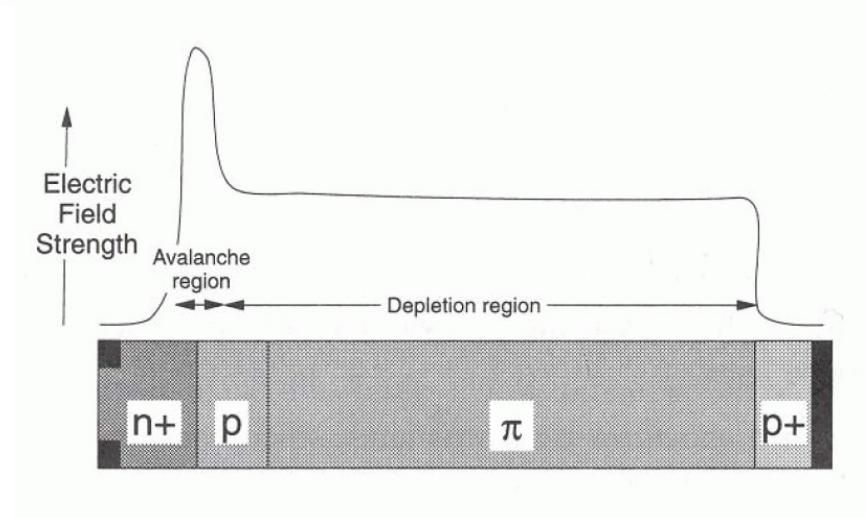
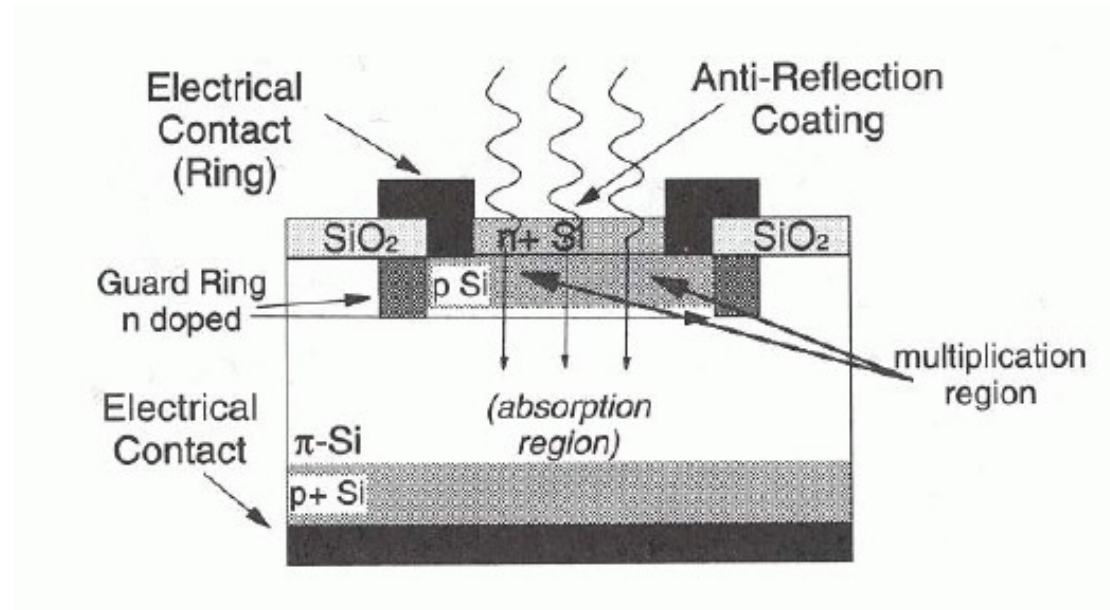
Фотодетектори - PIN диоди

- Допълнителен нелегиран (intrinsic) слой между p и n областите
- Разширява се обеднената зона
- Повишава се квантовата ефективността



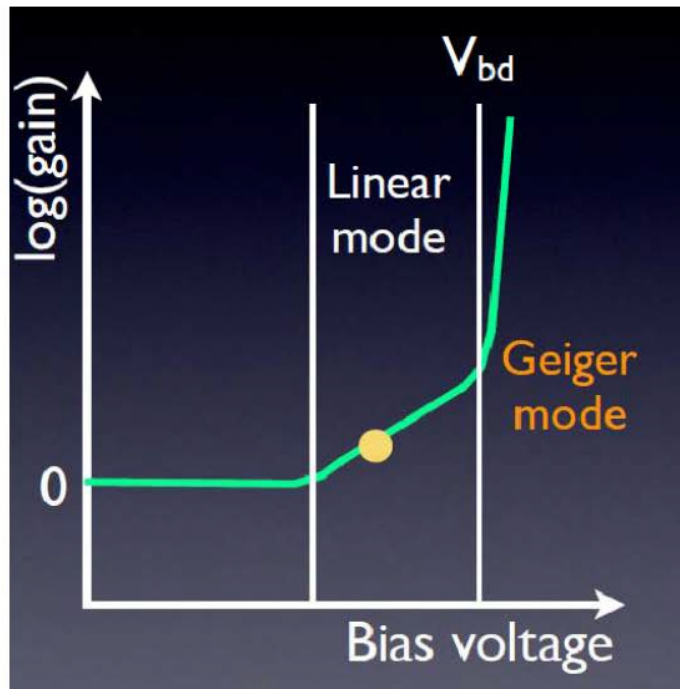
Фотодетектори - Лавинни фотодиоди (APD)

- Лавинни фотодиоди
- В областта на p - n се формира висок ускоряващ потенциал (ударна йонизация)
- Коефициент на усилване 50 - 100
- По висока ефективност
- Работят в силни магнитни полета

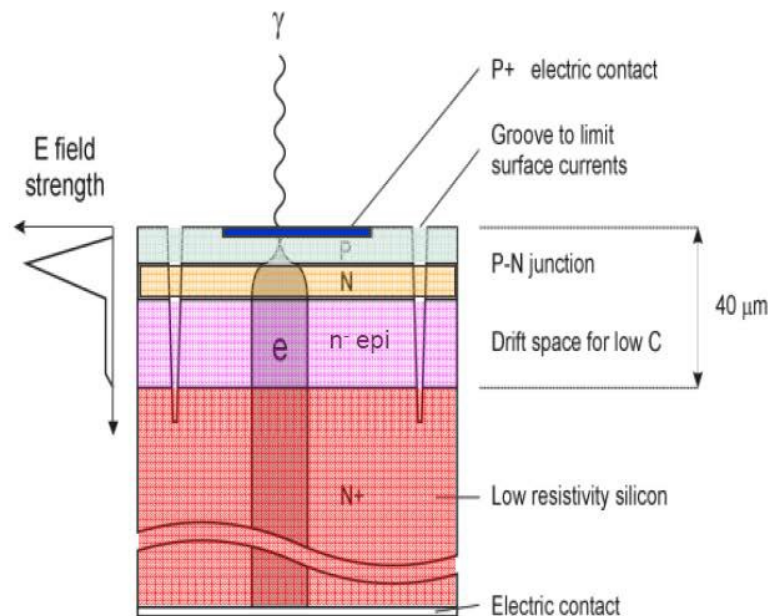


Фотодетектори - SiPM

- APD работещ в Гайгеров режим
- Усилване до 10^6

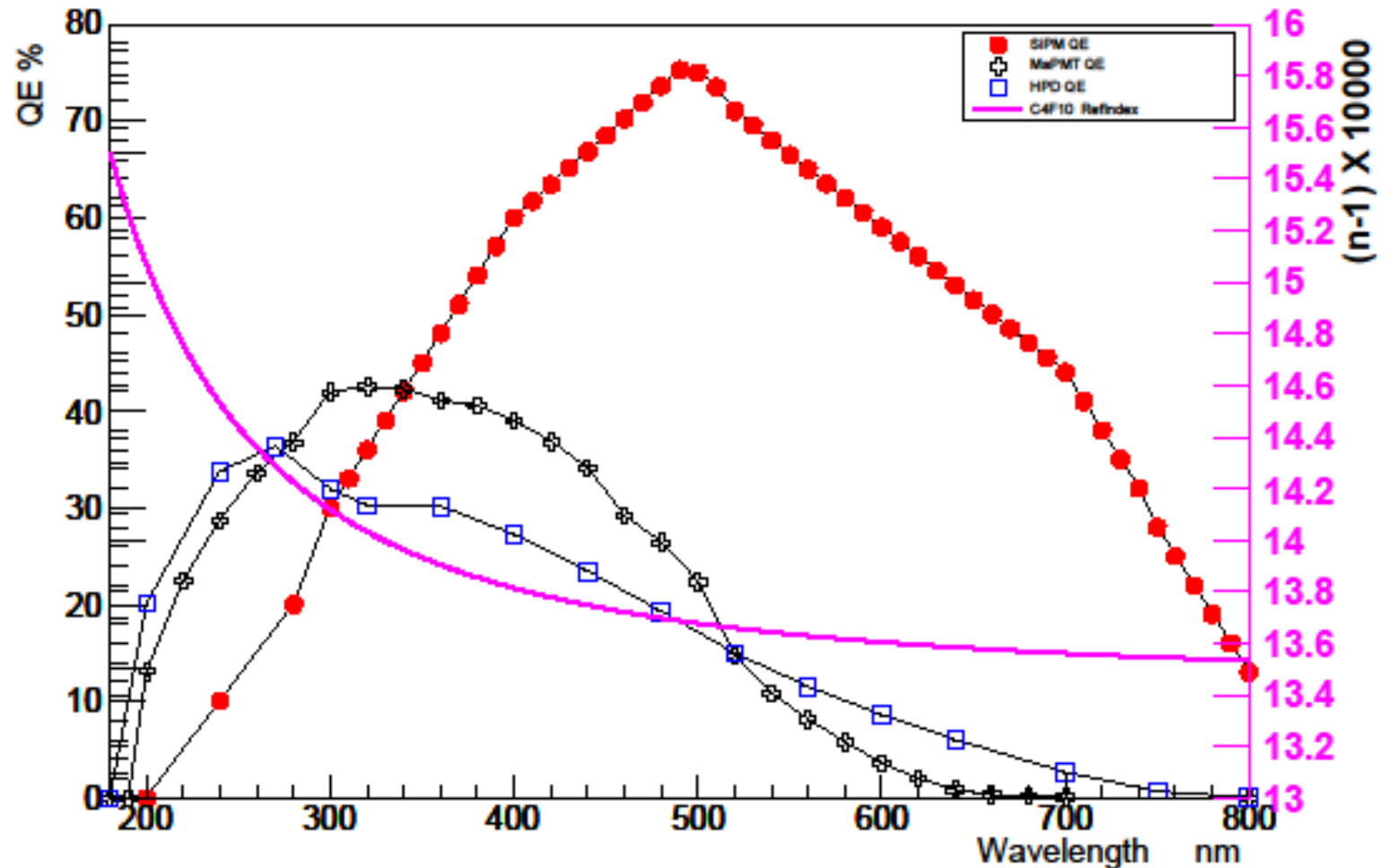


- Primary building block, GM-APD.

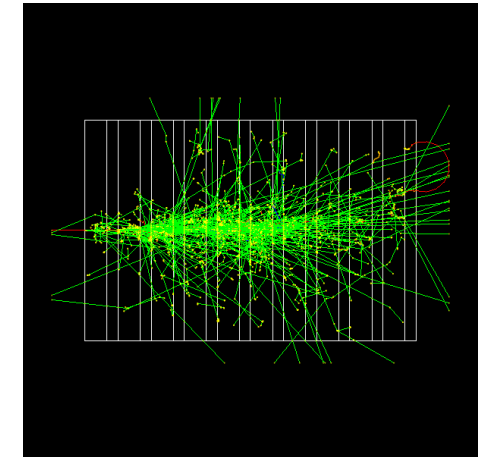
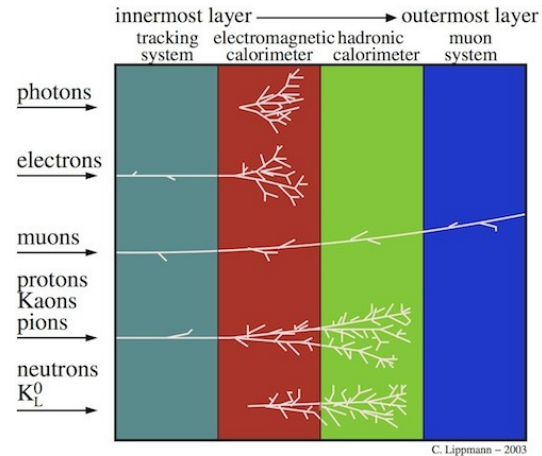
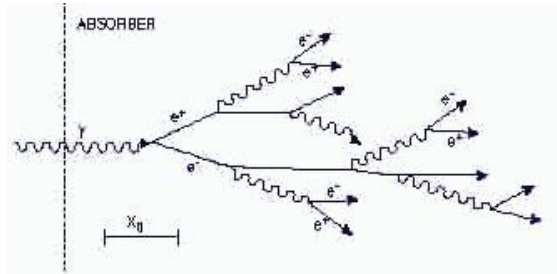


Фотодетектори - SiPM

- Висока ефективност за регистрация на фотони
- Разделителна способност по време ~ 100 ps
- Необходимо е допълнително да се редуцира шума
- Проблем - детектиране на единичен фотон



Електромагнитен калориметър



1 GeV енергия в ЕМ калориметър



Енергията на ЕМ струя се отделя на максималното разстояние на развитие на струята – t_{max} , броят на йоните N_{max} е пропорционален на отделената енергия.

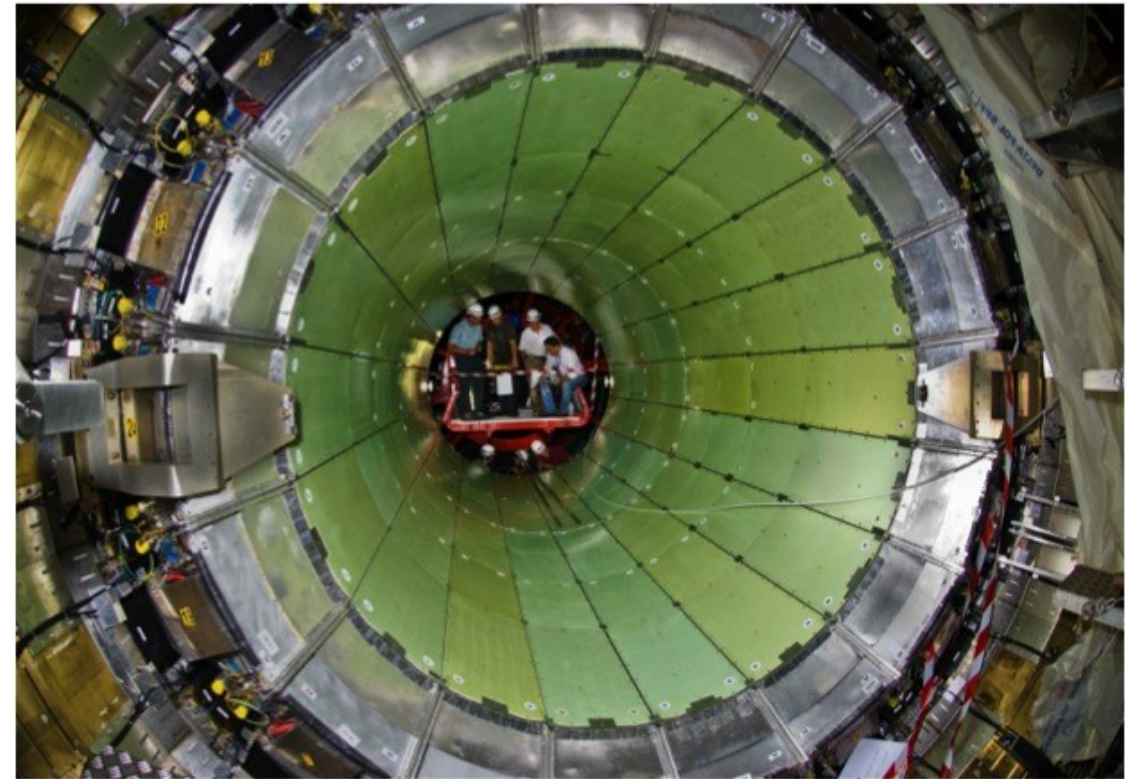
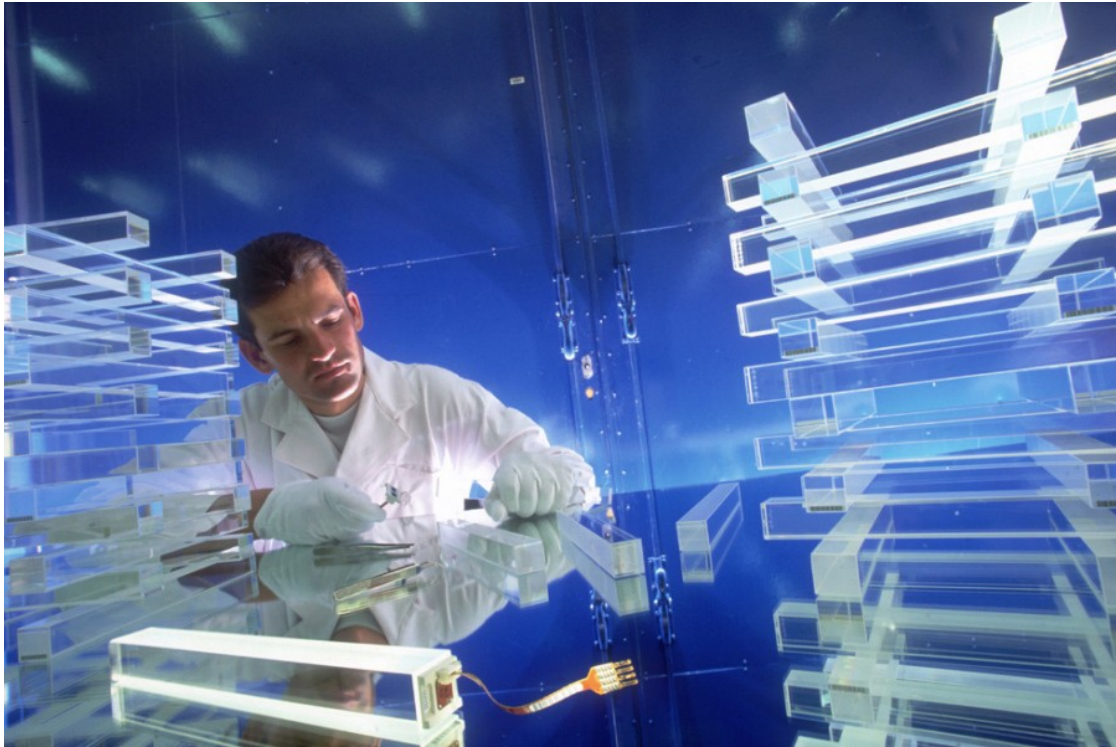
Отдадената в ЕМ калориметър енергия е пропорционална на \sqrt{E} от енергията на началната частица.

$$t_{max} = \frac{\ln(E_0/E_c)}{\ln 2}$$

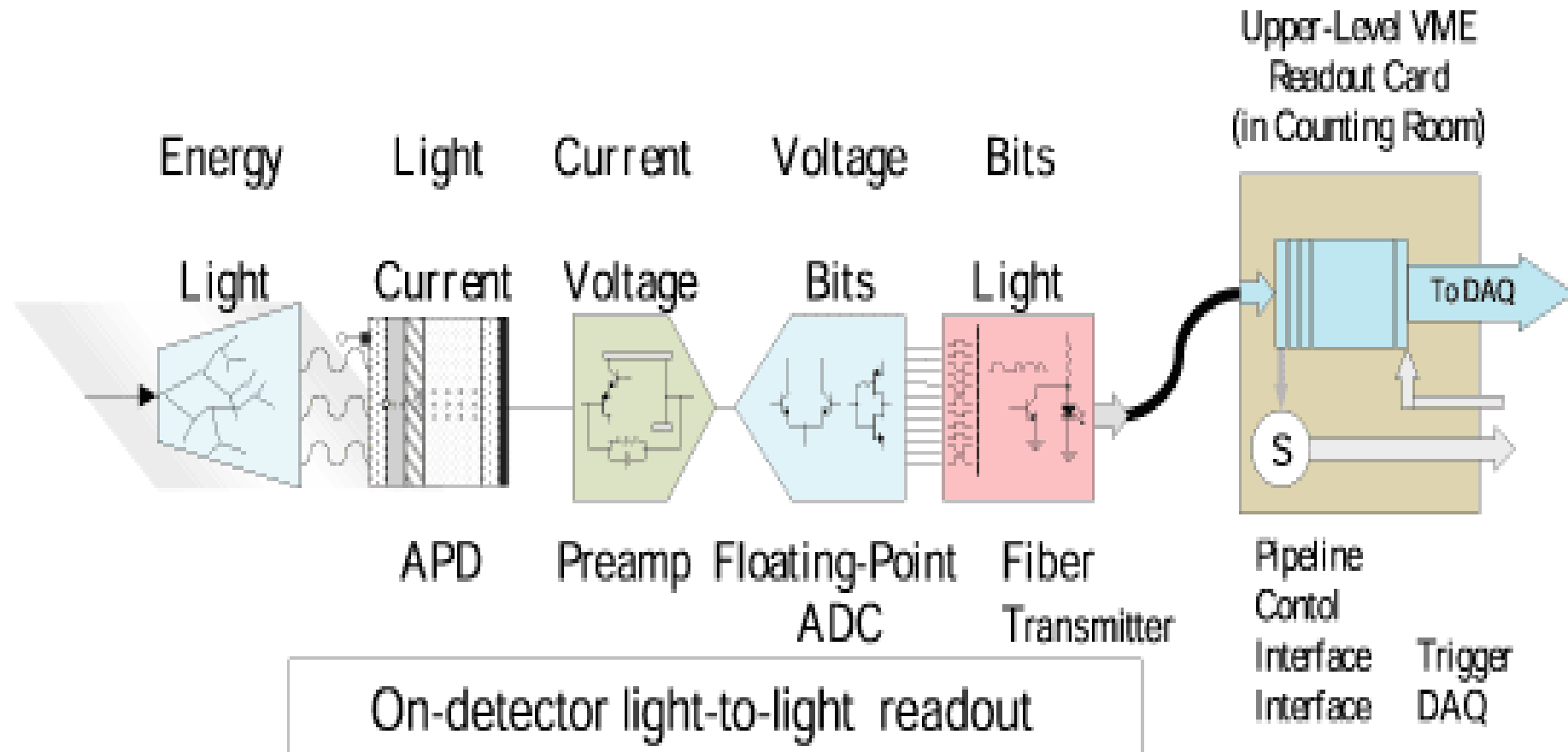
$$N_{max} = e^{t_{max} \ln 2} = E_0/E_c$$

$$\frac{\sigma(E)}{E} \propto \frac{1}{\sqrt{E}}$$

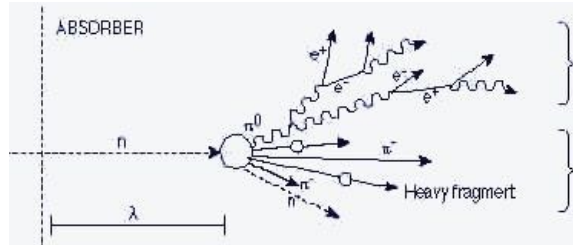
Електромагнитен калориметър - CMS



ECAL readout



Адронен калориметър



ЕМ каскад

Адронен каскад

В адронният калориметър се получава отдаване на енергията от адрони, като има и част от енергията свързана с електромагнитната компонента на взаимодействие с веществото на детектора.

Отдадената от заредени пиони енергия може да бъде описана като

$$\pi^{\pm} = f_{em} e + f_h h$$

$$f_h = 1 - f_{em}$$

Където π^{\pm} е енергията от заредените пиони,

e – енергията от електромагнитното взаимодействие,

h – енергията на адроните,

f_h – част от енергията на свързана с адроните,

f_{em} – част от енергията свързана с електромагнитното взаимодействие - около 30% от общата енергия,

Електромагнитната част флукутира значително и е зависима от енергията на началната частица,

в следствие на тези особености на отдадената енергия в адронния калориметър

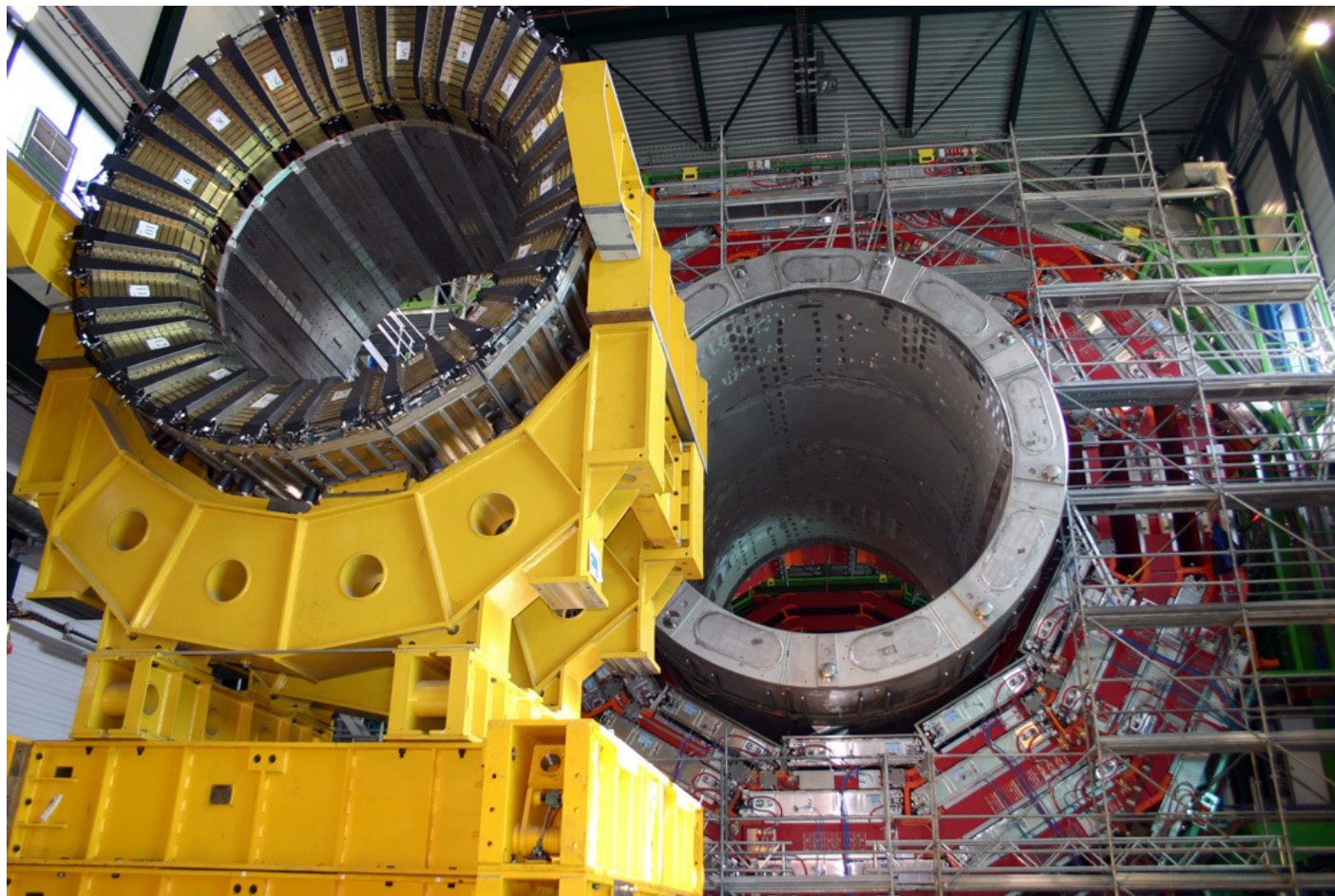
-> $\frac{\sigma(E)}{E}$ не е пропорционална на $\frac{1}{\sqrt{E}}$,

-> отдадената от адроните енергия не е линейно зависима от енергията на частиците,

-> разпределението на енергията не е поасоново.



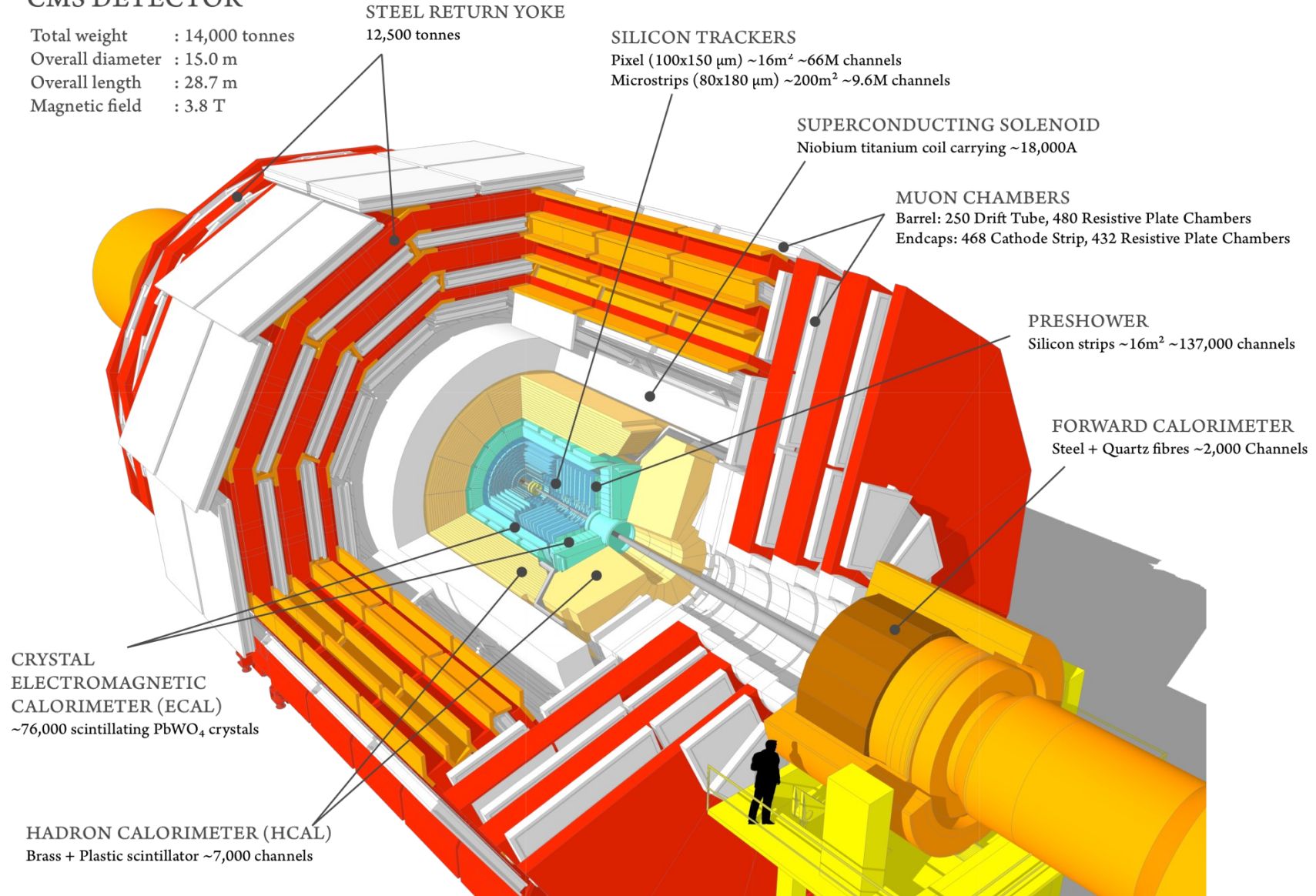
Адронен калориметър - CMS



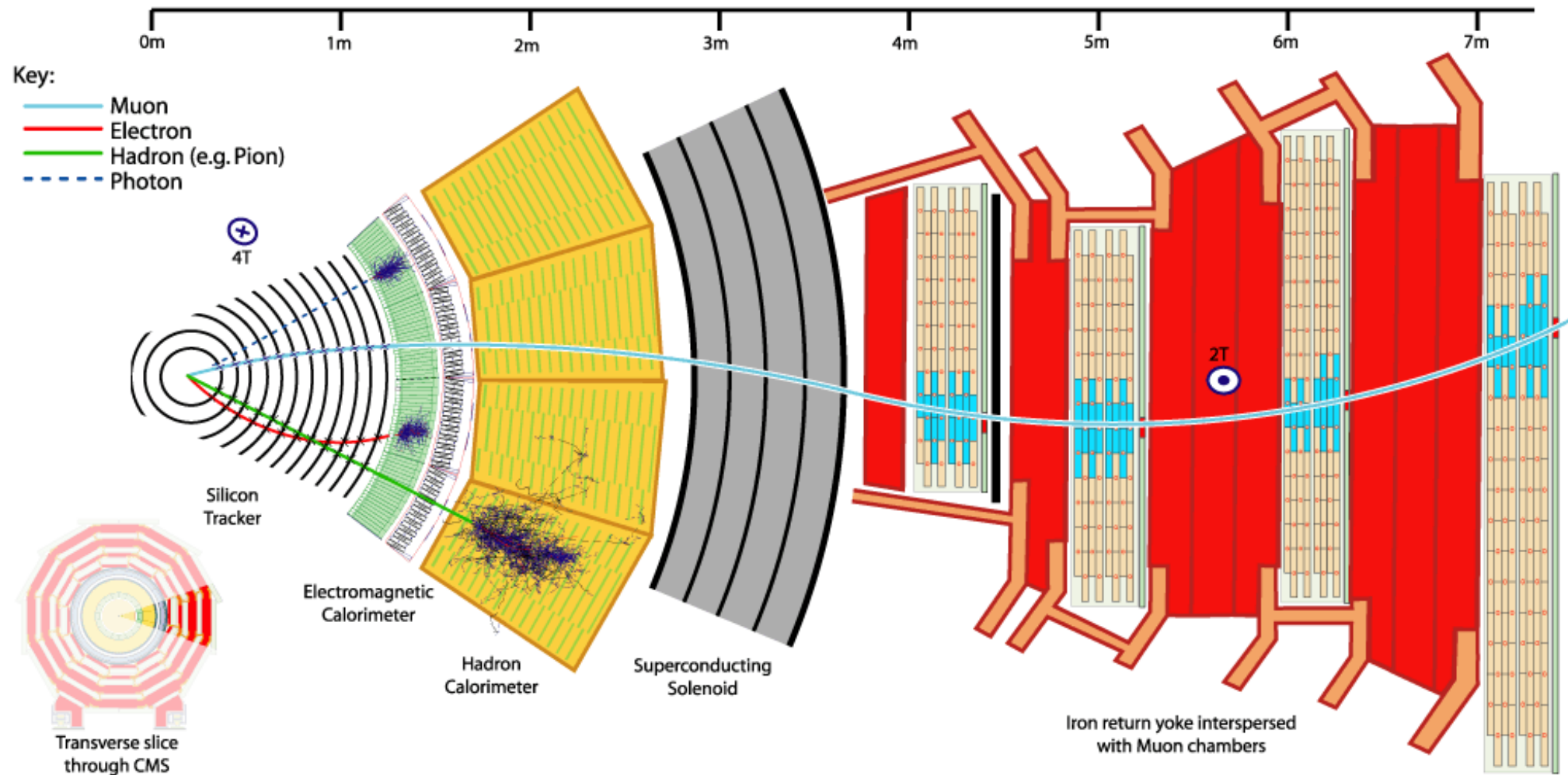
CMS

CMS DETECTOR

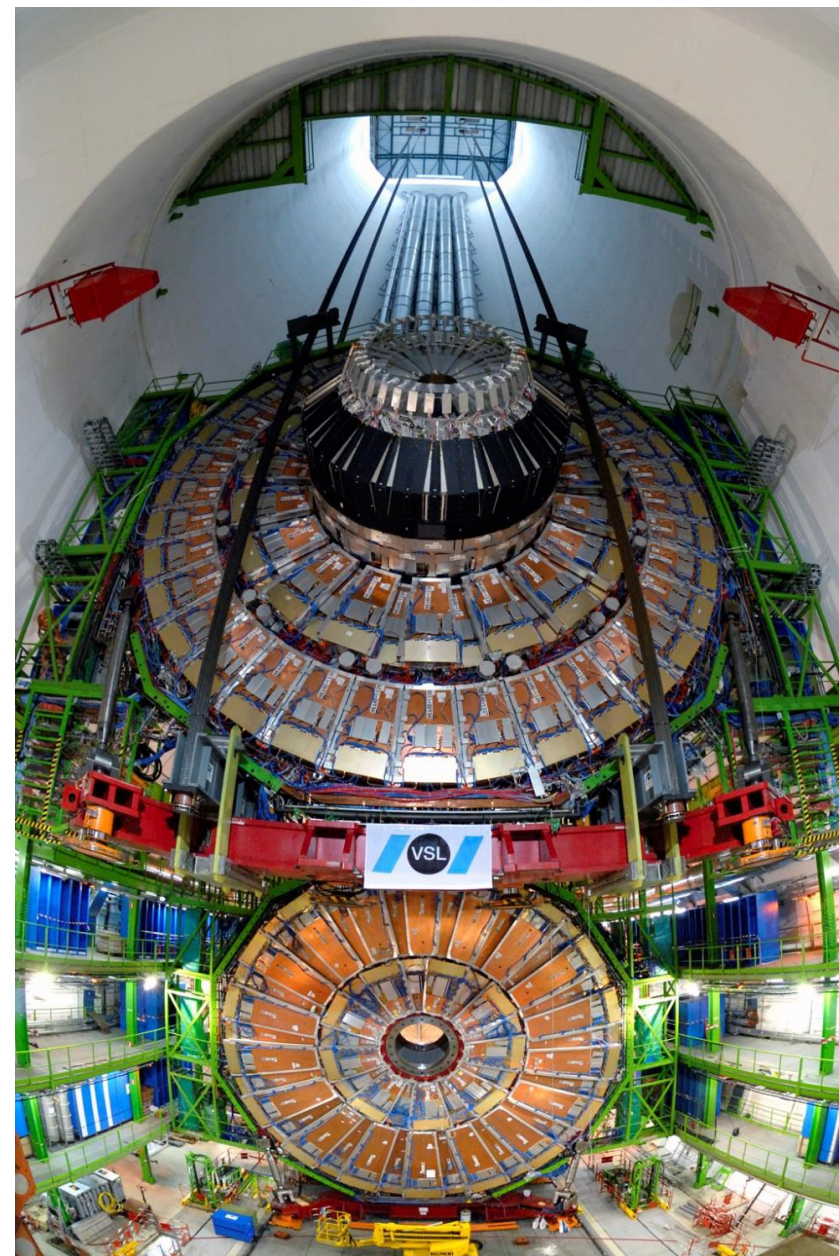
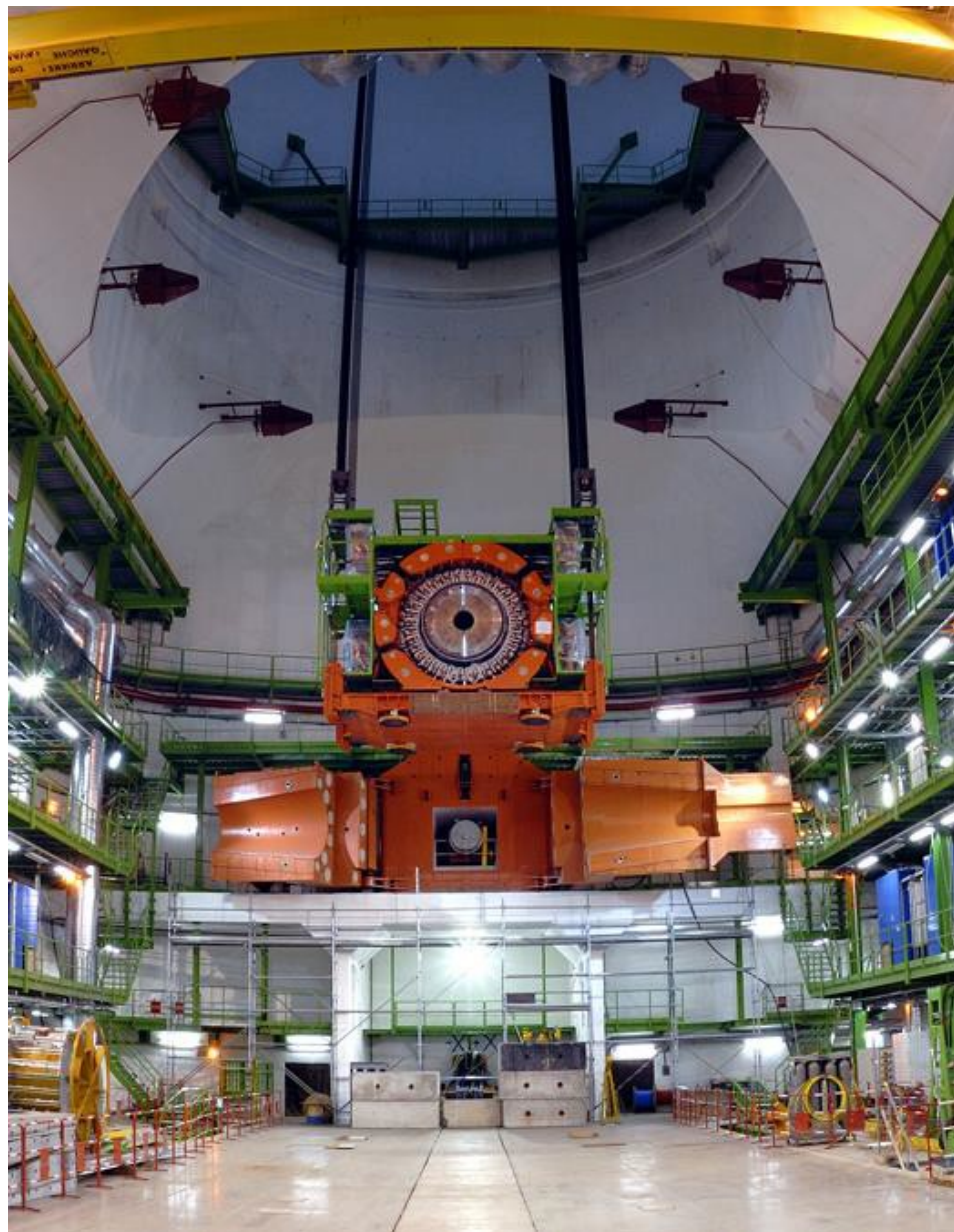
Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T



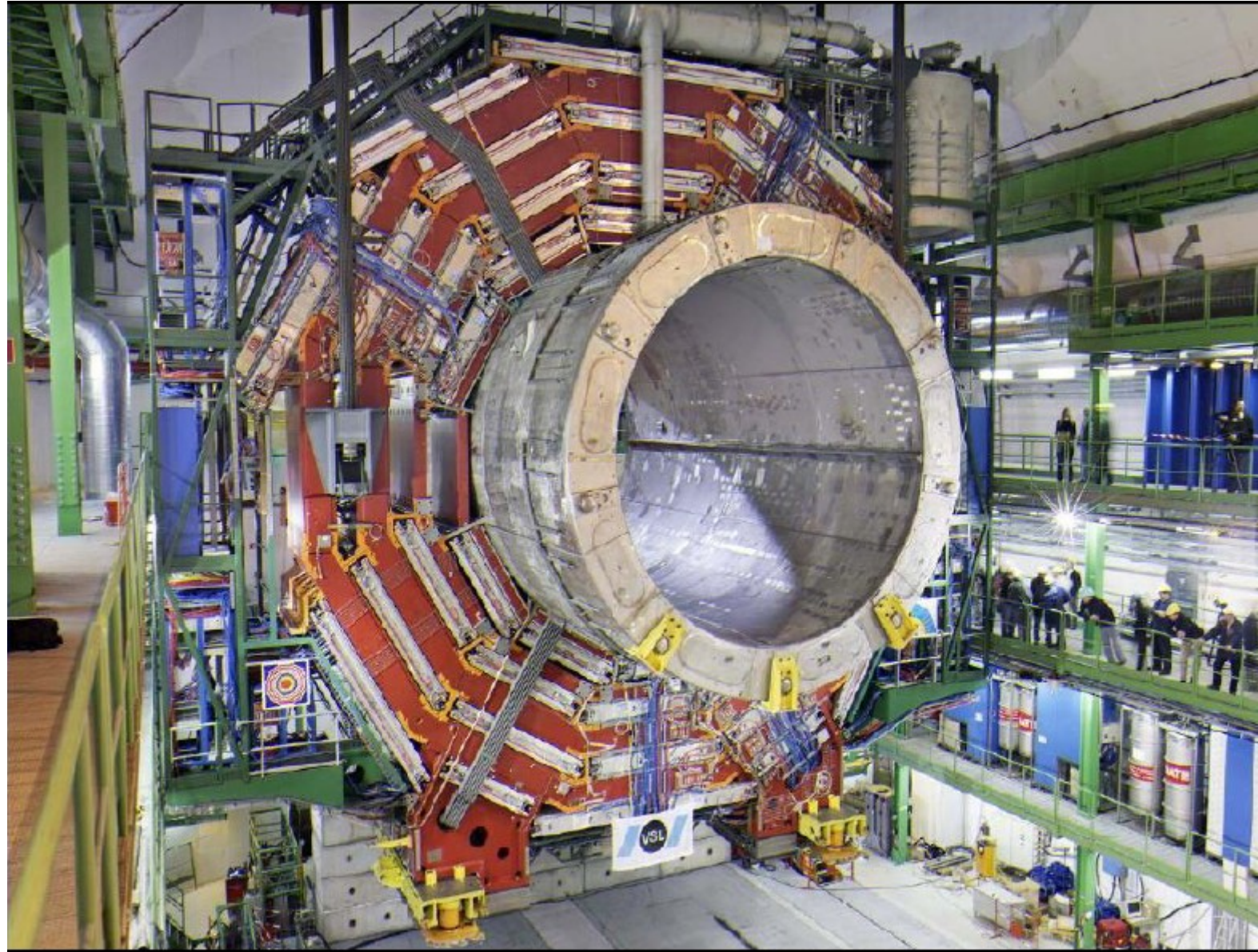
Идентификация на частици



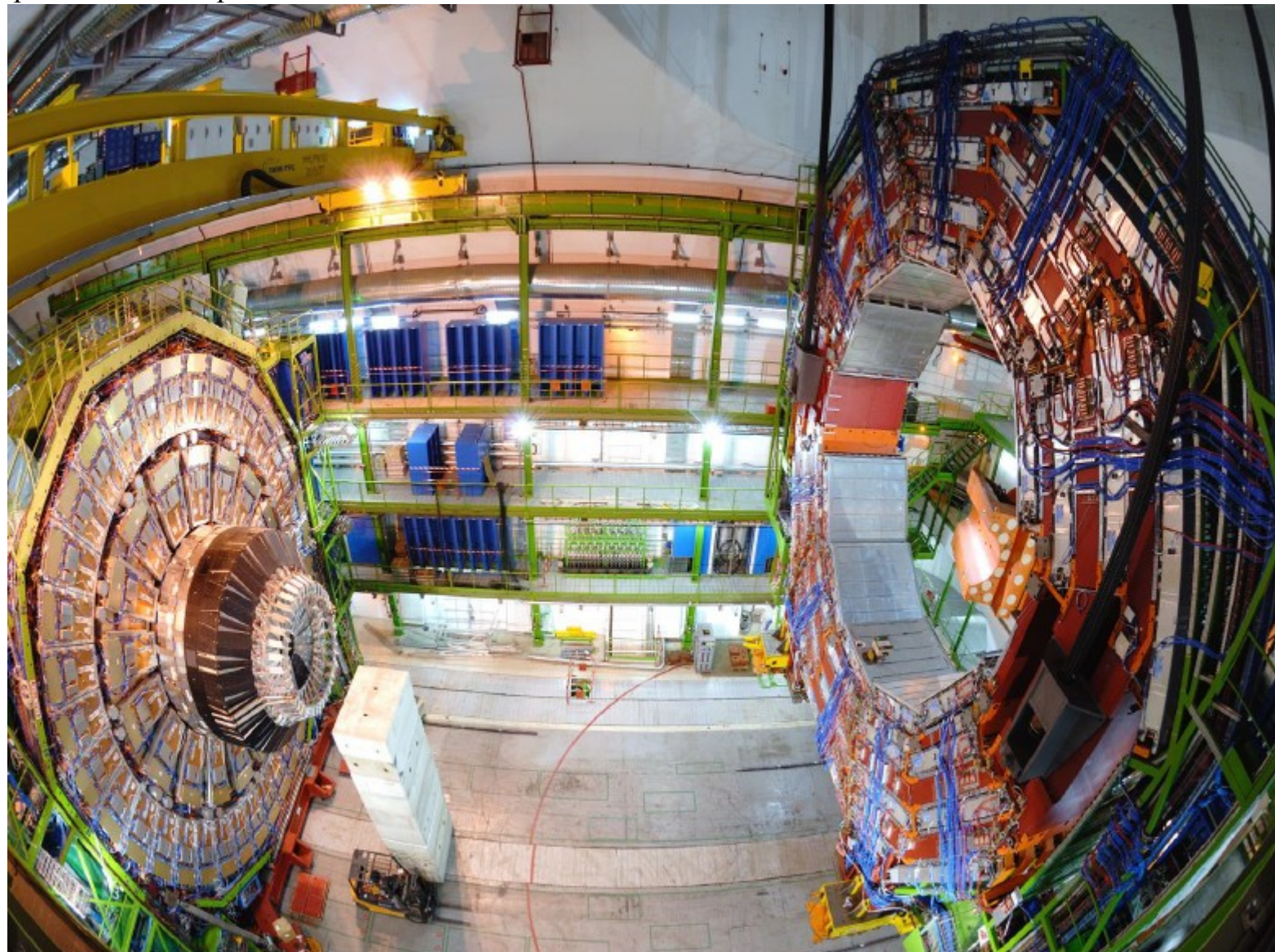
Инсталиране на детектора CMS



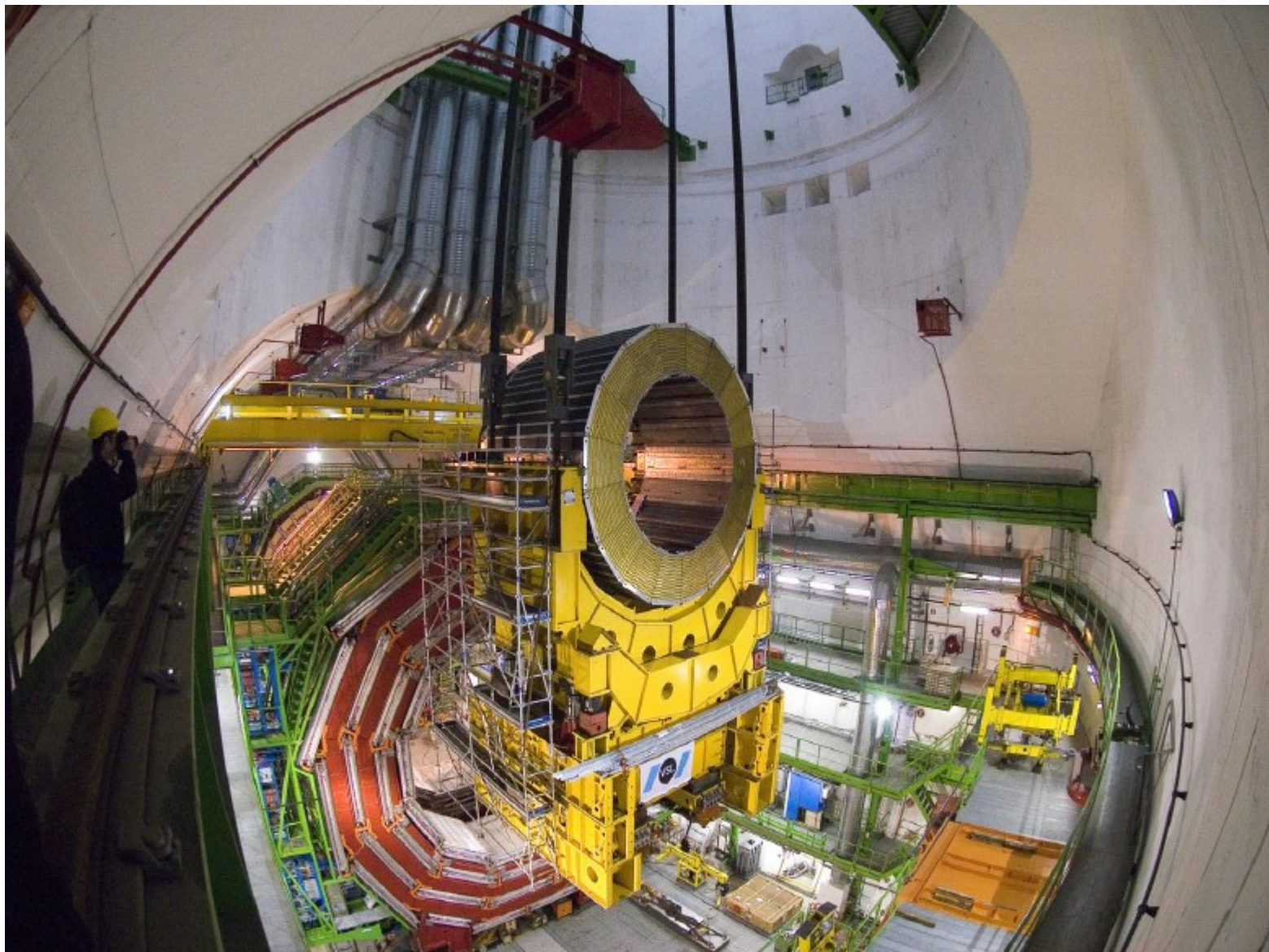
Инсталиране на детектора CMS



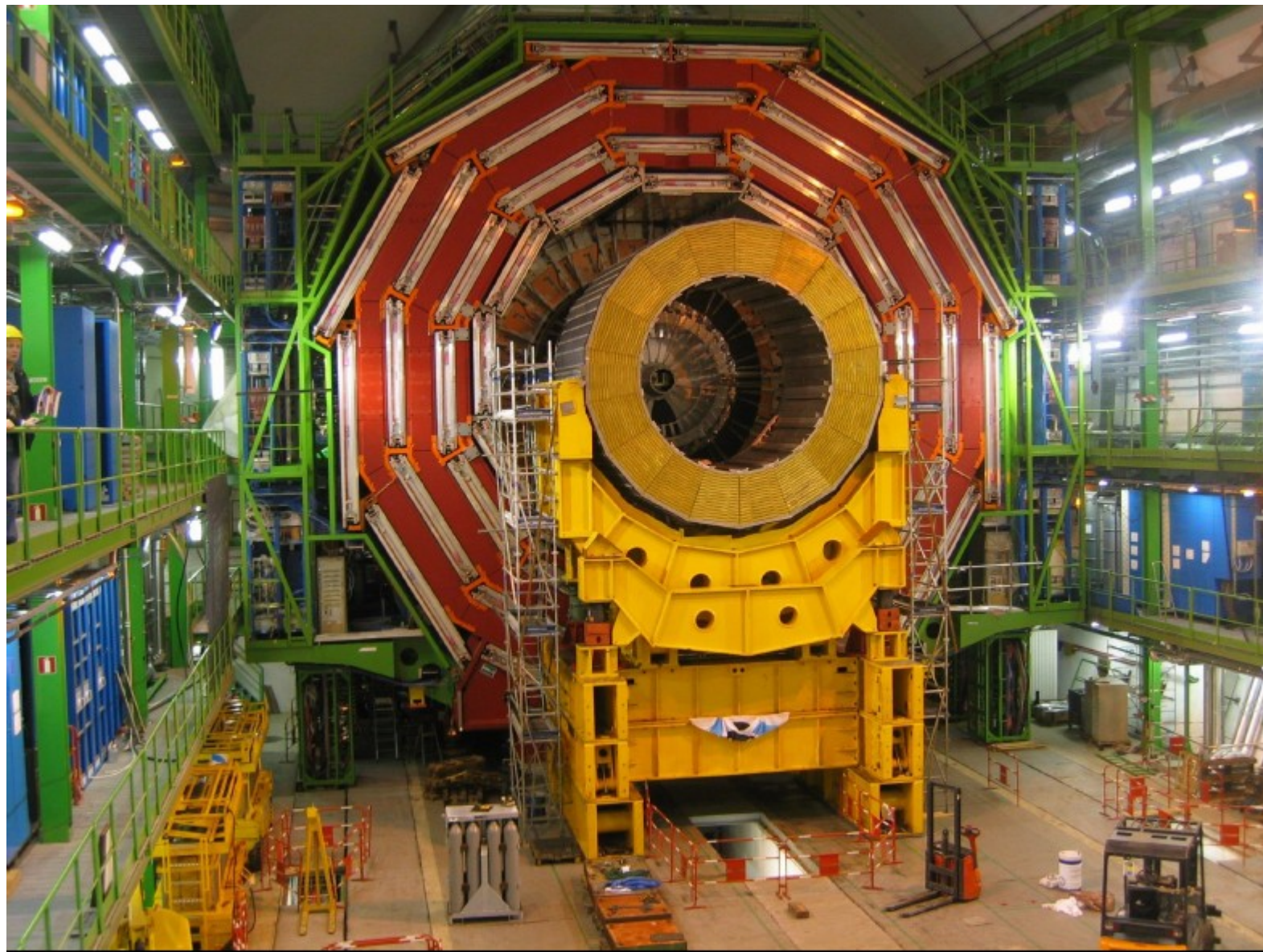
Инсталиране на детектора CMS

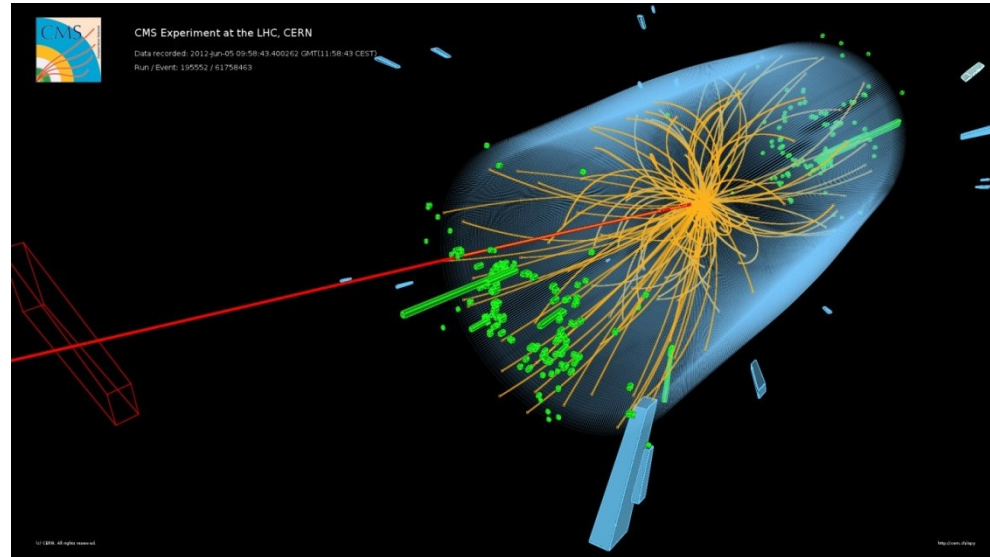
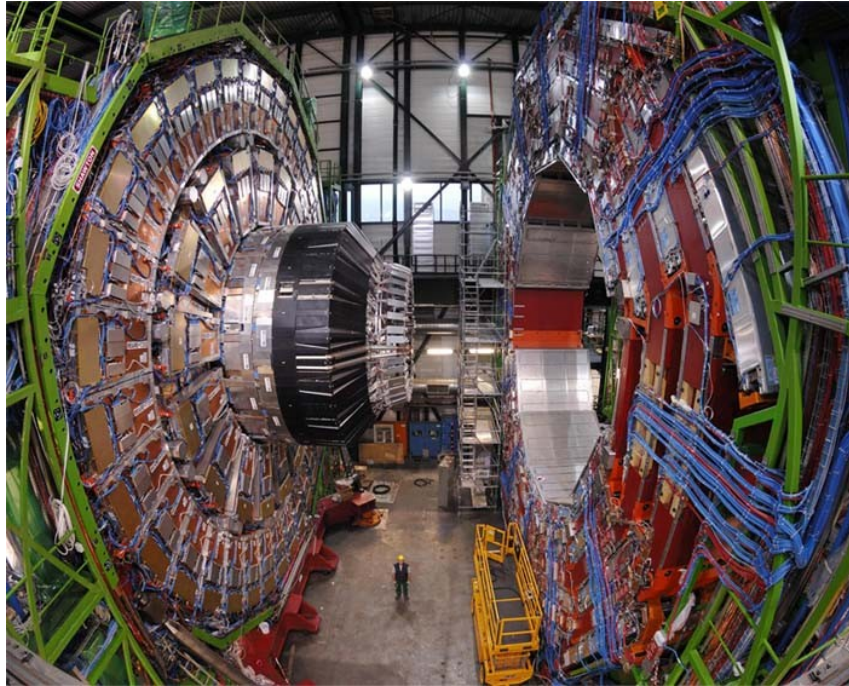


Инсталиране на детектора CMS

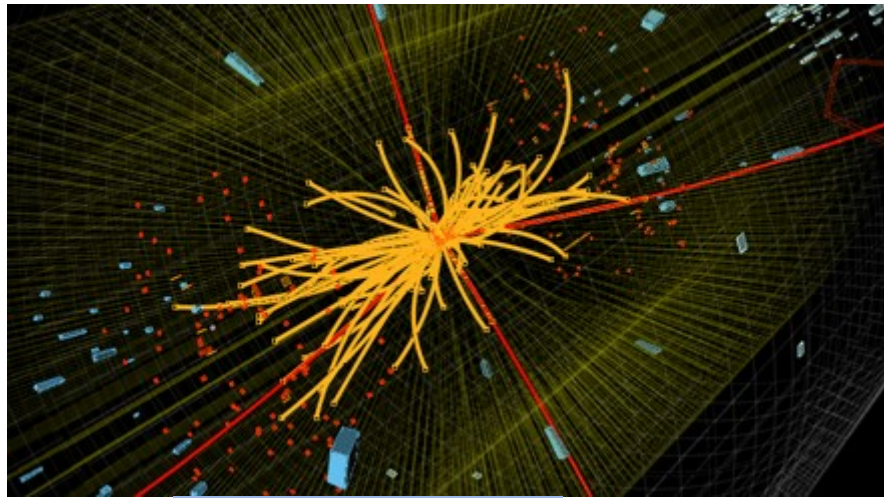


Инсталиране на детектора CMS

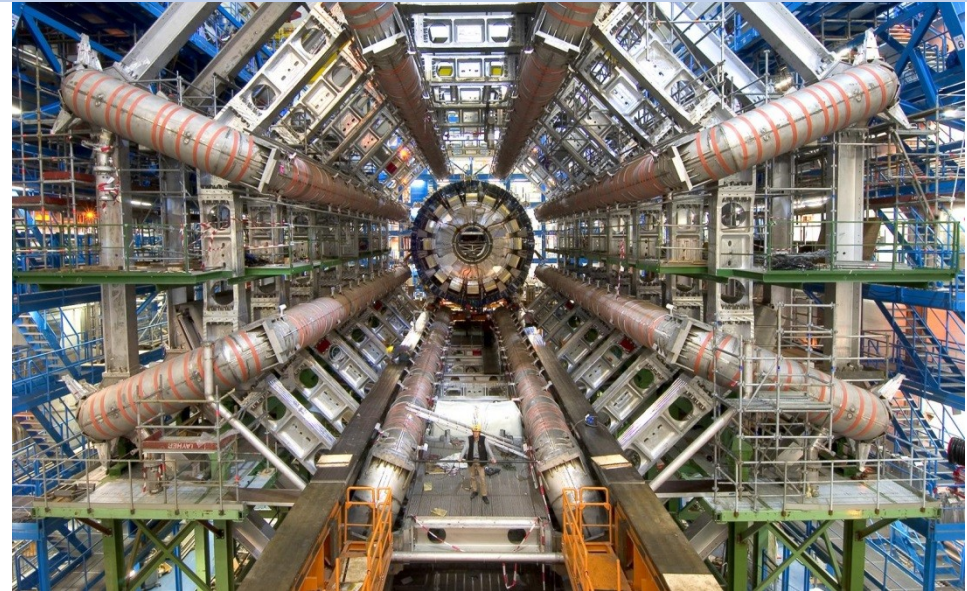




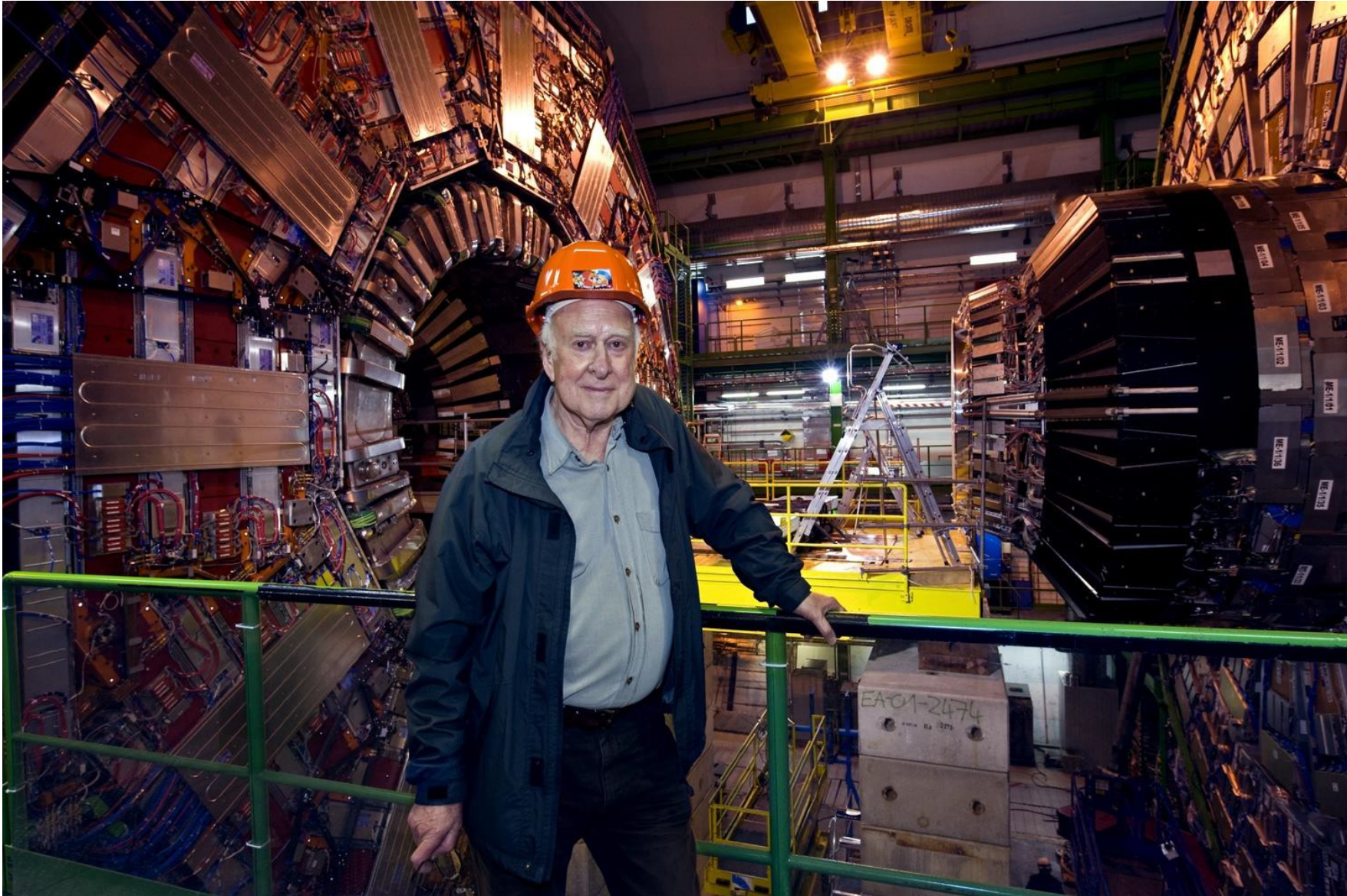
CMS-разпад на Хигс бозон на 2 тау лептона, един лептон се разпада на мюон и невидима следа от неутрино, а вторият лептон на зарядени адрони и неутрино.

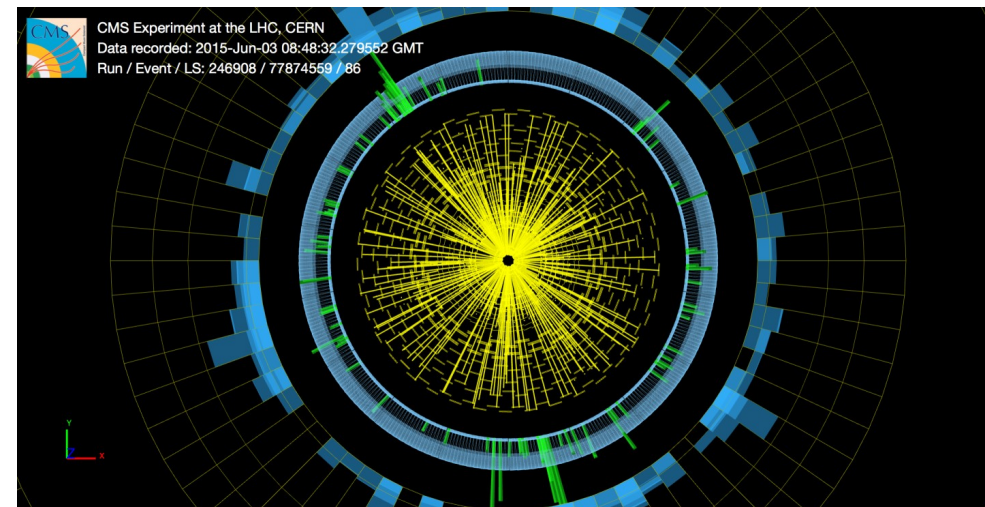
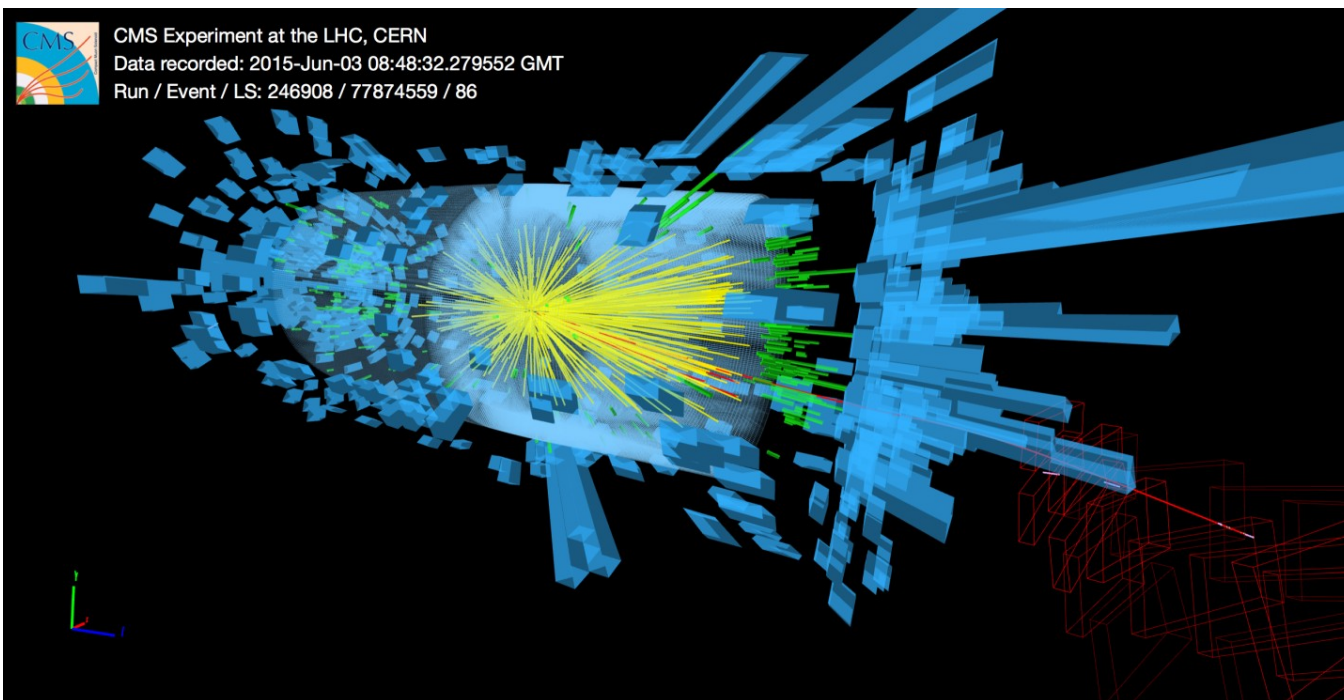


$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu\mu\mu$ reaction

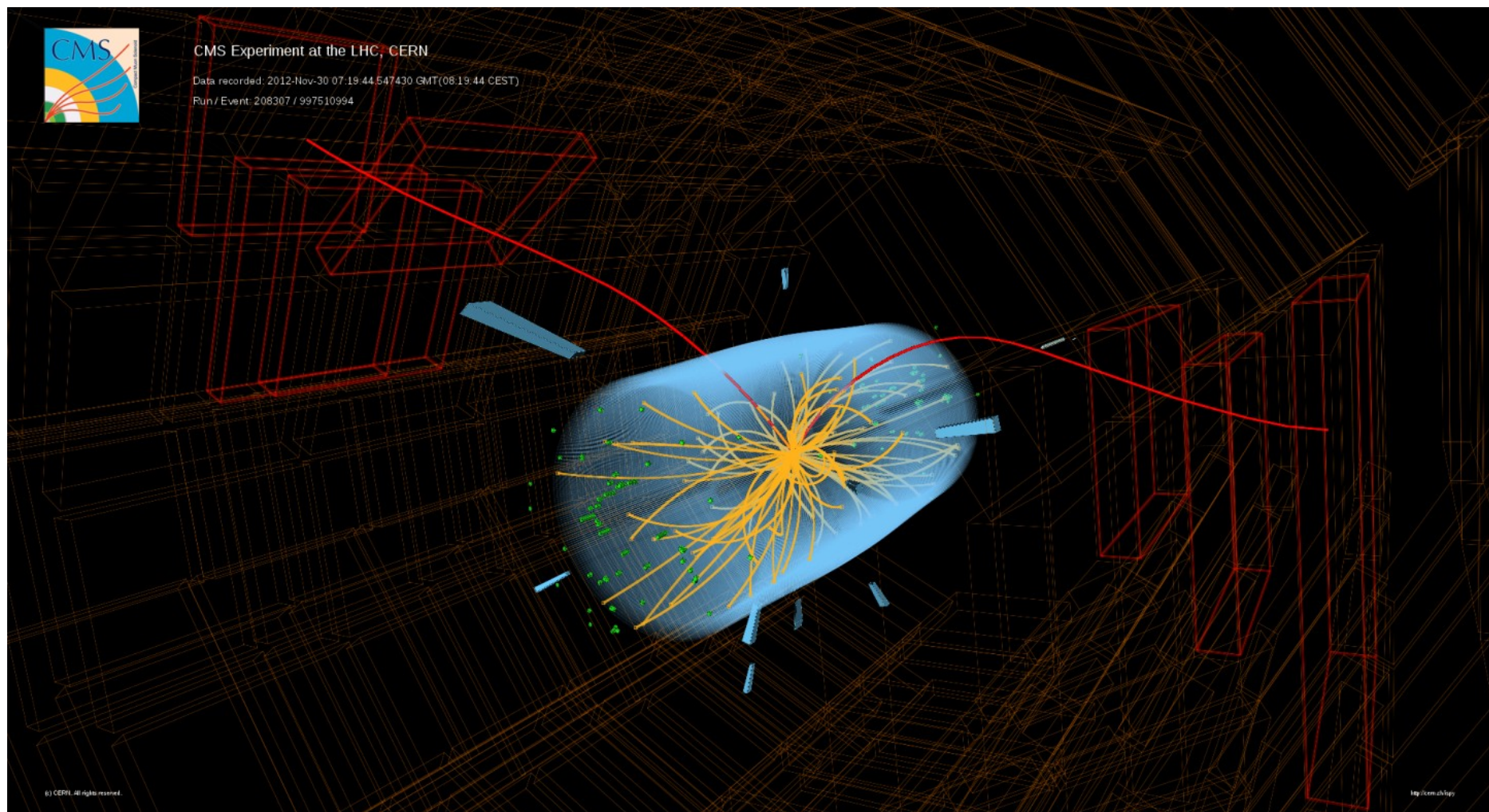


2010 - Higgs на CMS





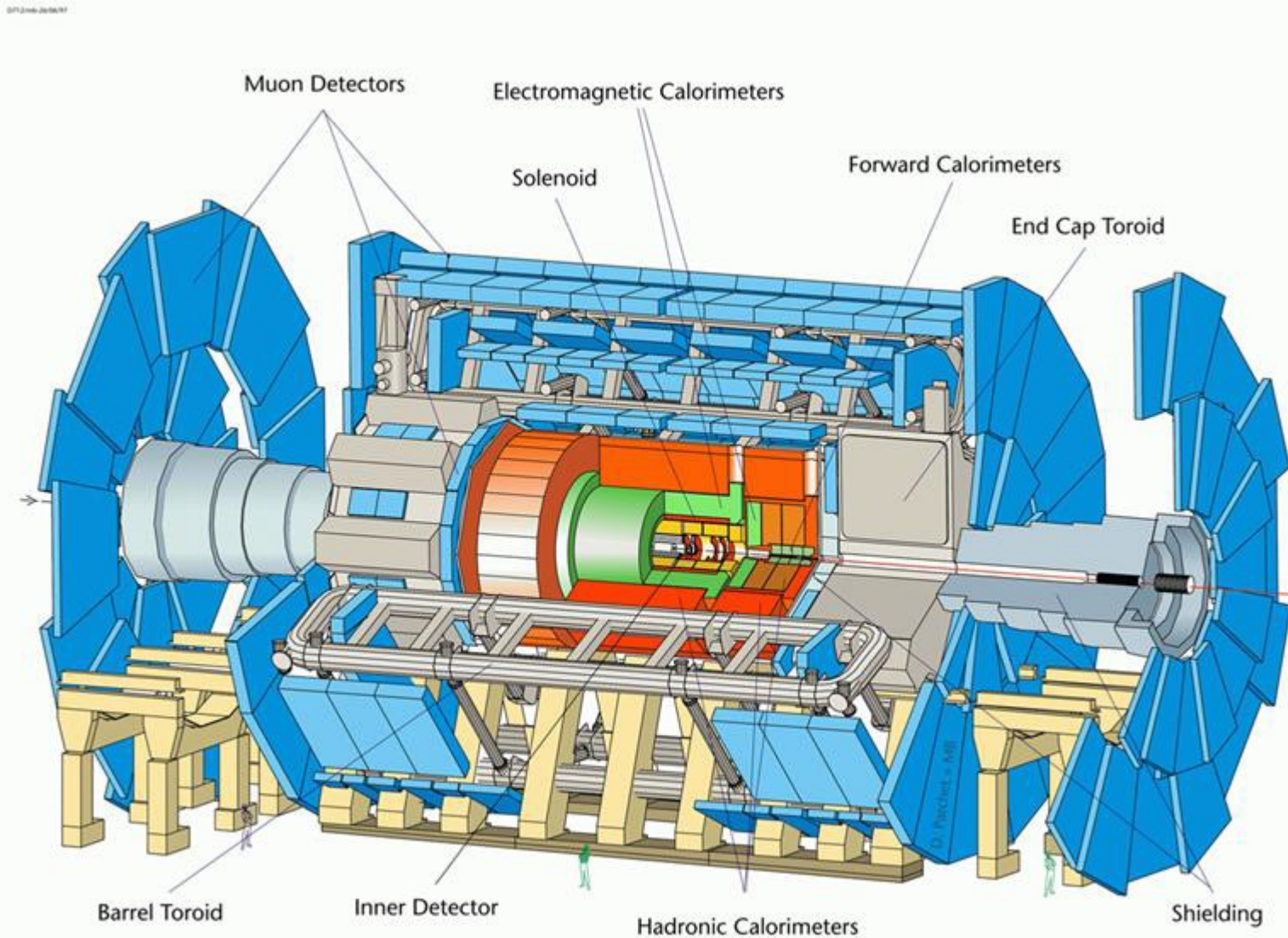
Регистрация на събития в CMS при 8 TeV 2010 – 2012 г. Илюстрация на работата на мюонния детектор



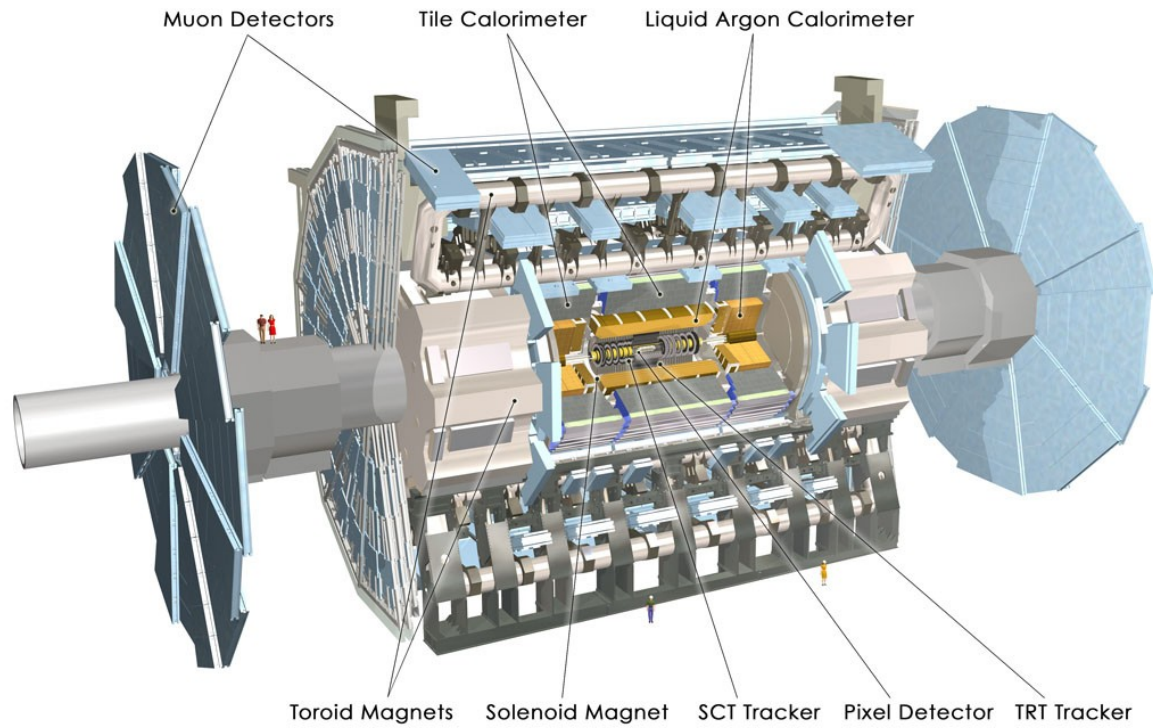
A candidate " $B_s \rightarrow \mu\mu$ " event recorded in the CMS detector in 2012, produced in proton-proton collisions at 8 TeV

ATLAS

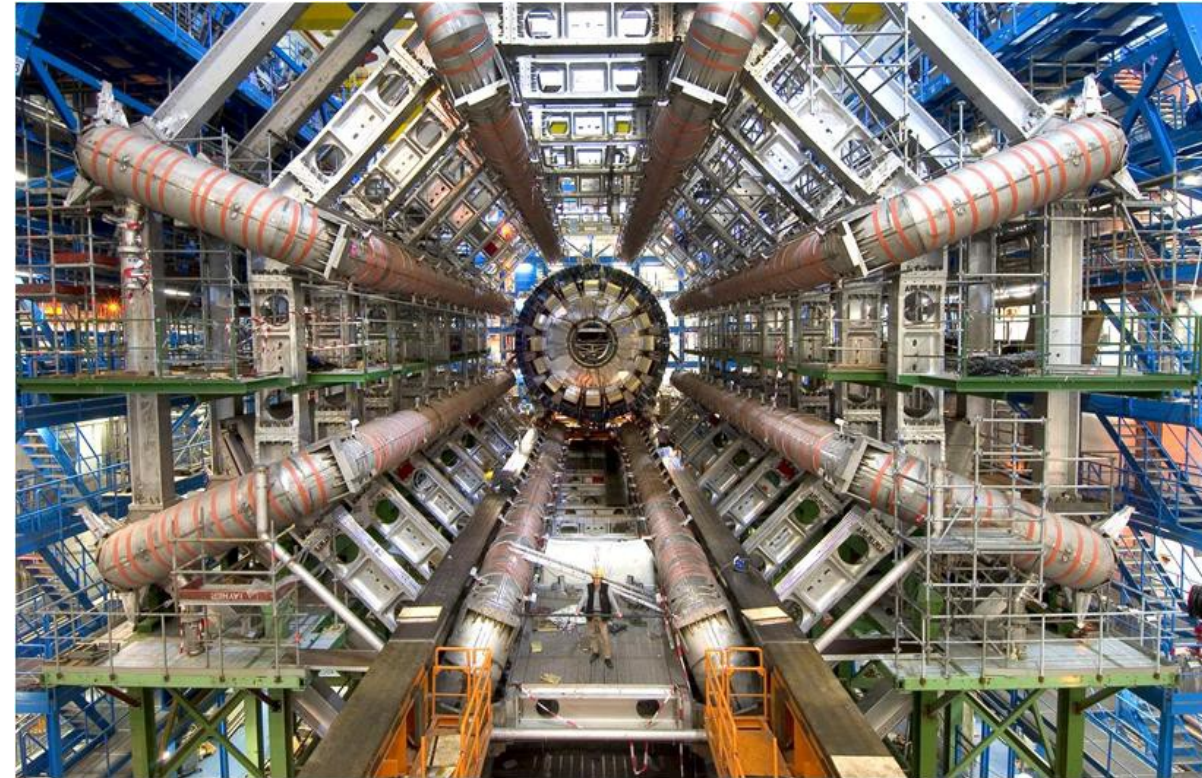
38 страни, 177 Института, 2800 учени и инженери, 1000 студенти



ATLAS

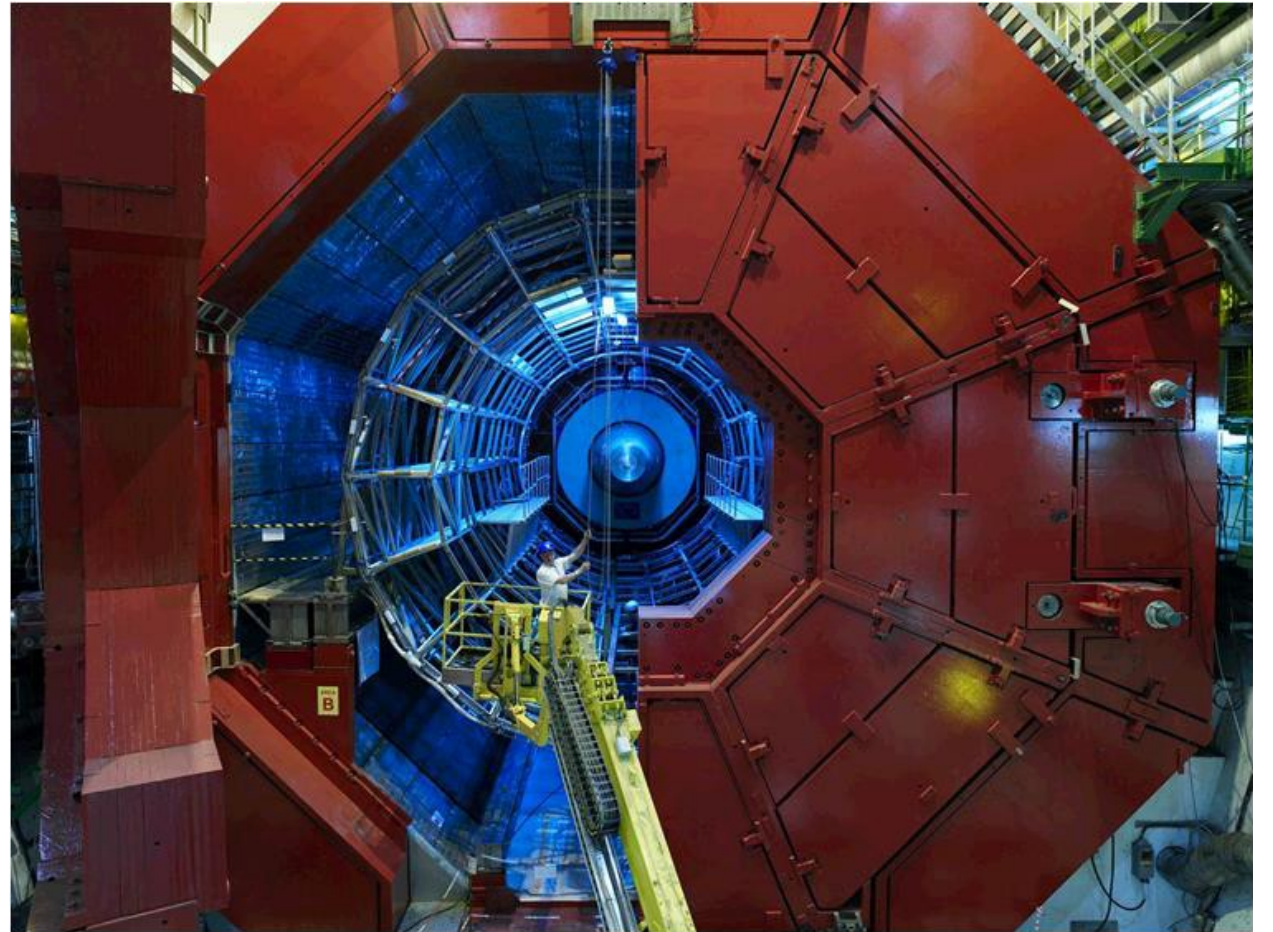
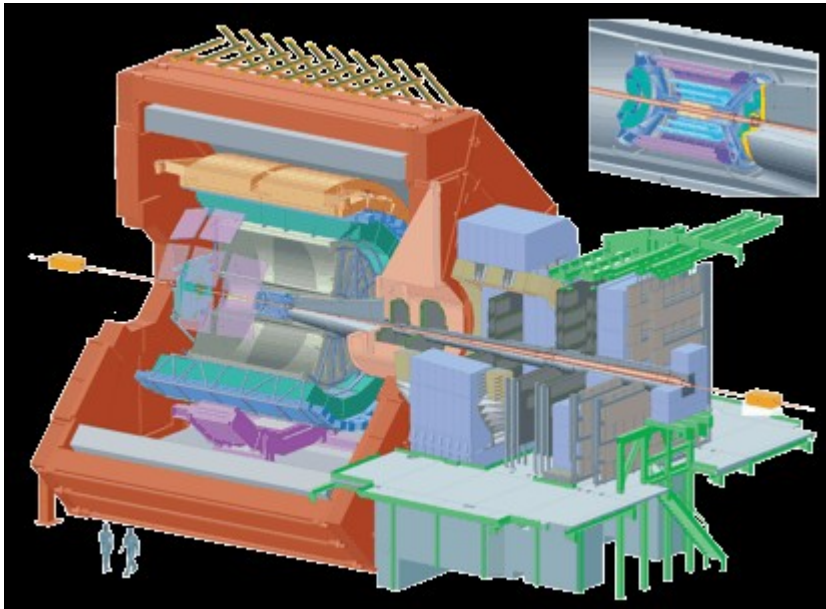


A Toroidal LHC ApparatuS

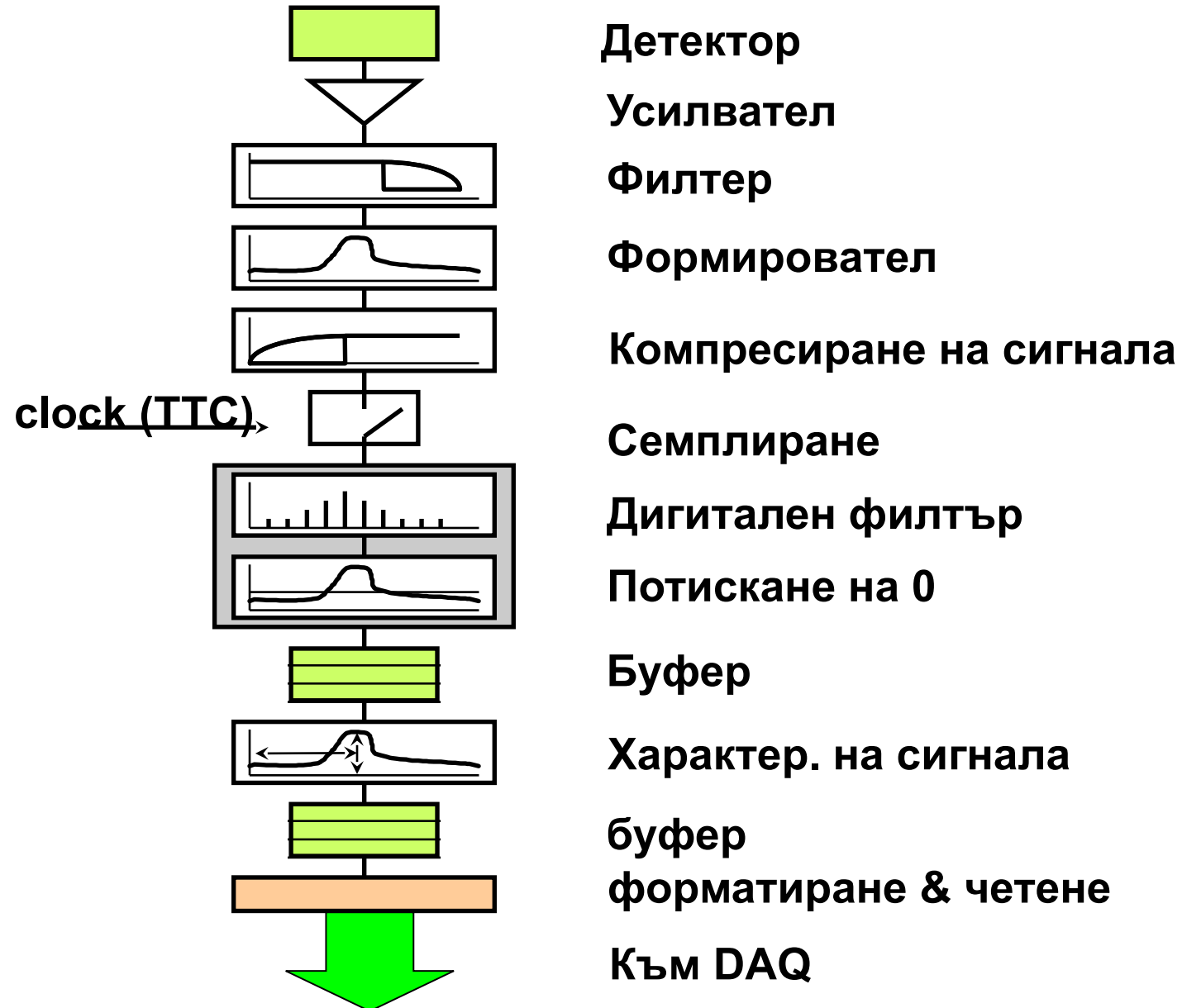


ALICE

A
Large
Ion
Collider
Experiment



Поток на данните



Заклучение

- Голямо разнообразие от детектори на йонизиращо лъчение
- Много бързо развиваща се област
- Водещи са научните изследвания в областта на ядрената физика и физиката на високите енергии
- Имат широко приложение
 - Контрол на околната среда
 - Енергетиката
 - Медицината
 - Диагностика
 - Лечение
 - Космически изследвания
- Бързо развитие на електрониката и системите събиране и анализ на данни