

Въведение в детектори на елементарни частици

Мариана Шопова

ИЯИЯЕ, Българска академия на науките
Пловдивски Университет „Паисий Хилендарски“

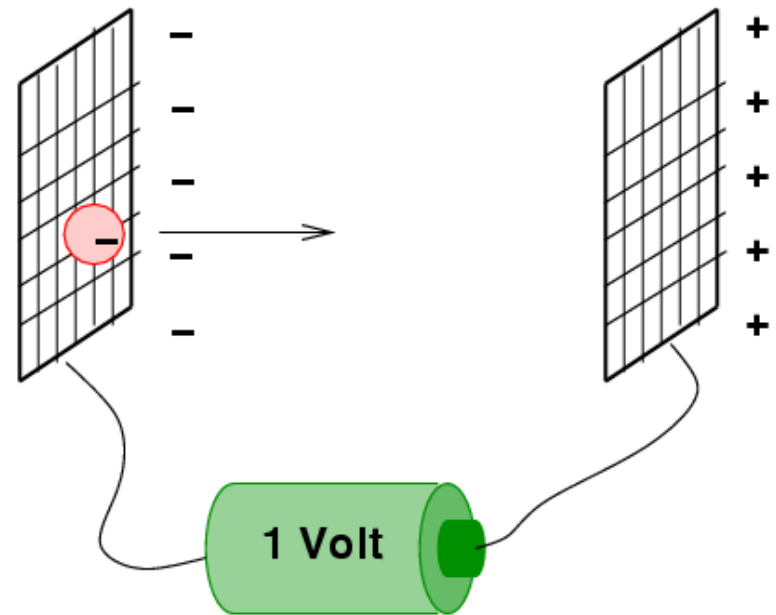
Мерни единици и какво е един електрон-волт [eV]?

Електронволт е кинетичната енергия, която е придобита от електрон при преминаването му през потенциална разлика от 1 волт във вакуум.

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}; 1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}; 1 \text{ KeV} = 1000 \text{ eV}$$

Системи от мерни единици

Величина	SI	NU $c=\hbar=1$
Дължина	[m]	[1/eV]
Време	[s]	[1/eV]
Енергия	[J]	[eV]
Импулс	[kg.m/s]	[eV/c]
Маса	[kg]	[eV/c ²]
....		



$$E = qU = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ J/C} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Мерни единици и какво е един електрон-волт [eV]?

Електронволт е кинетичната енергия, която е придобита от електрон при преминаването му през потенциална разлика от 1 волт във вакуум.

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}; 1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}; 1 \text{ KeV} = 1000 \text{ eV}$$

Системи от мерни единици

Величина	SI	NU $c=\hbar=1$
Дължина	[m]	[1/eV]
Време	[s]	[1/eV]
Енергия	[J]	[eV]
Импулс	[kg.m/s]	[eV/c]
Маса	[kg]	[eV/c²]
....		

$$E = mc^2 \rightarrow c=\hbar=1 \rightarrow E = m$$



$$(e^-) \quad 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.511 \text{ MeV}/c^2$$



$$p (uud) \quad 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg} = 0.9383 \text{ GeV}/c^2$$

$\sim 10^{33} \text{ years}$

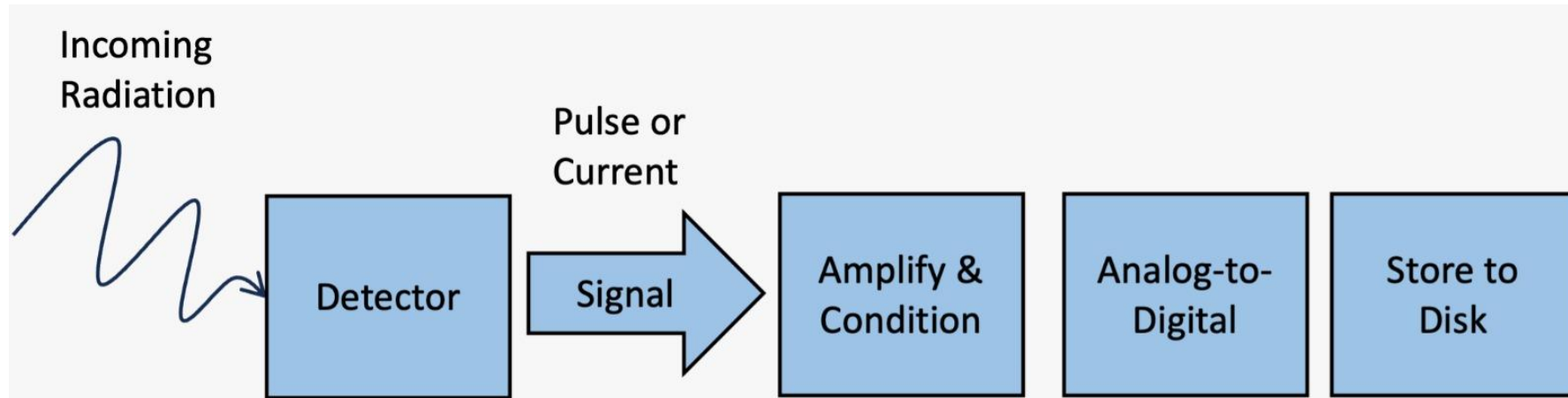
Детектори на частици

Принципът на детектора за частици е прост. Той никога няма да „види“ частица директно, но показва къде е пътувала, какви следи оставя след себе си и ефекта, който има върху детектора, когато бъде спряна, докато излита от сблъсъка.

Детекторите се състоят от слоеве от различни видове материал, които се използват или да ни покажат пътя на частицата, докато се движи, или да я абсорбират, за да накарат частицата да спре.

Можем да идентифицираме различни видове частици в зависимост от това къде спират в детектора и как изглежда пътят им.

Детектори на частици



Какво можем да измерим:

- **Енергия**
- **Импулс**
- **Заряд**
- **Позиция**
- **Количество**

Основни характеристики:

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

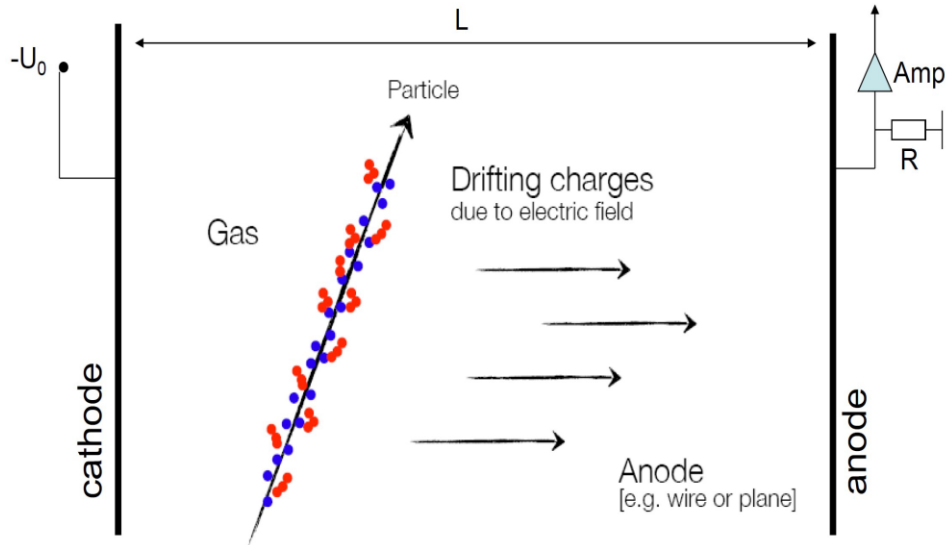
Видове детектори – метод на регистрация

- Газонапълнени детектори
- Твърдотелни детектори (полупроводникови)
- Сцинтилатори
- Фотодетектори (спомагат работата на сцинтилаторите)

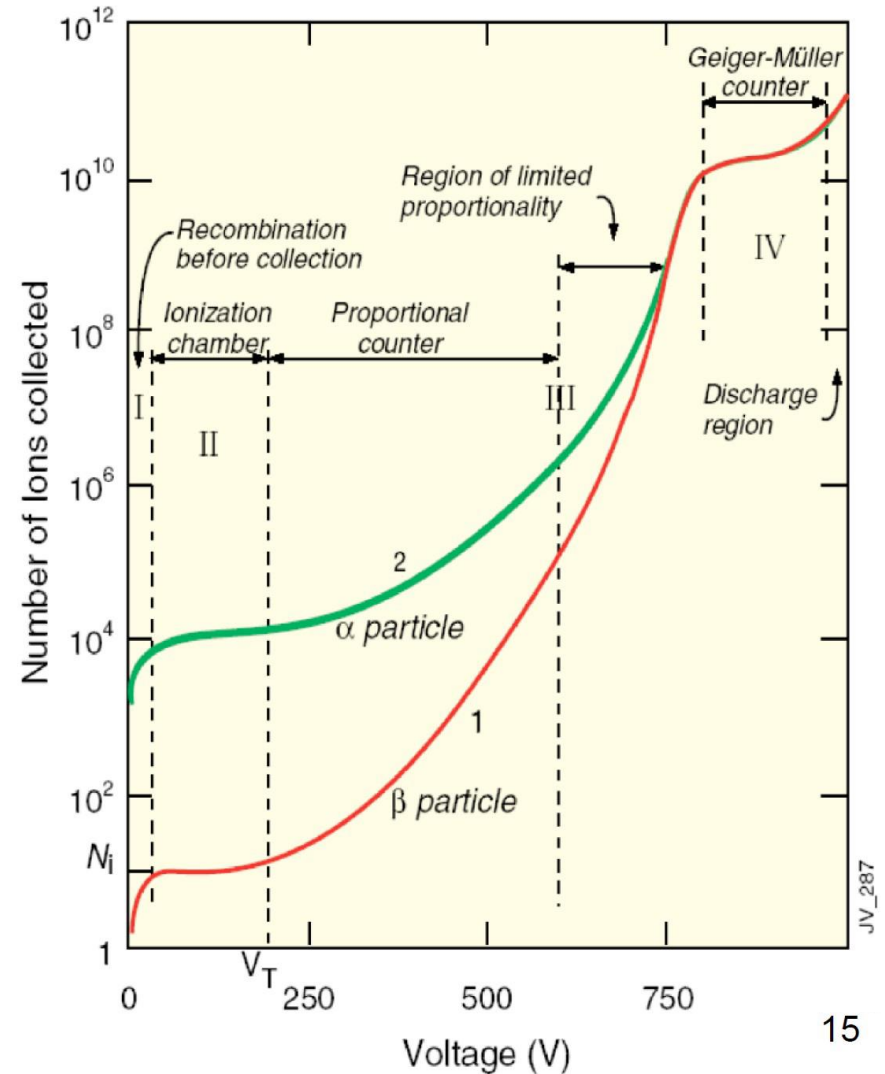
Видове детектори – метод на регистрация

➤ Газонапълнени детектори

- ✓ **Йонизационни камери**
- ✓ **Пропорционални броячи**
- ✓ **Гайгер-Мюлерови броячи**

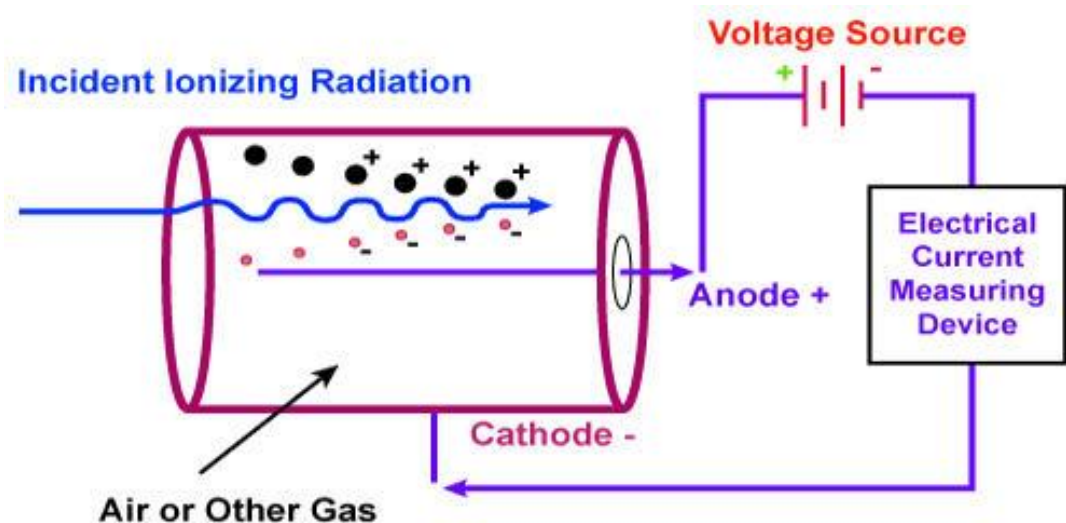
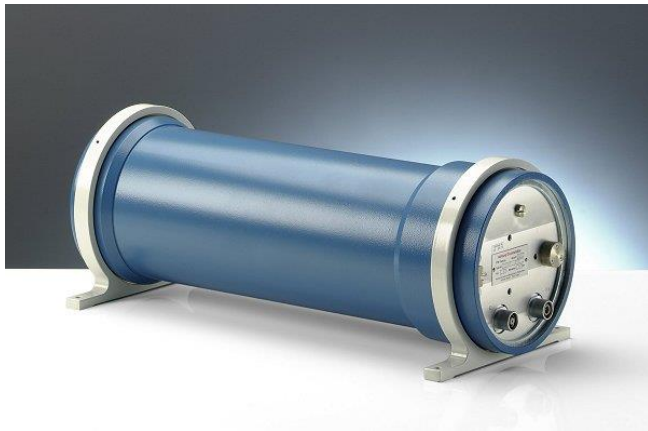


- Primary Ionization
- Secondary Ionization (due to δ -electrons)

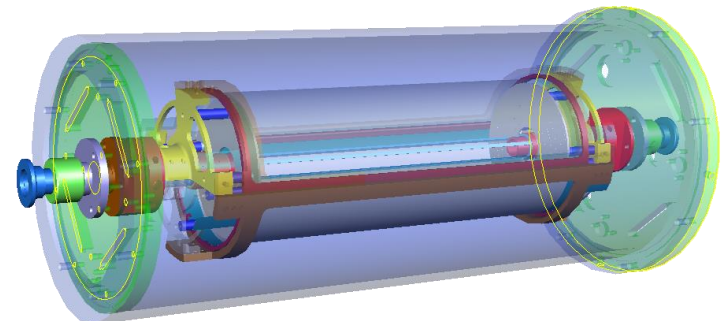


Йонизационна камера

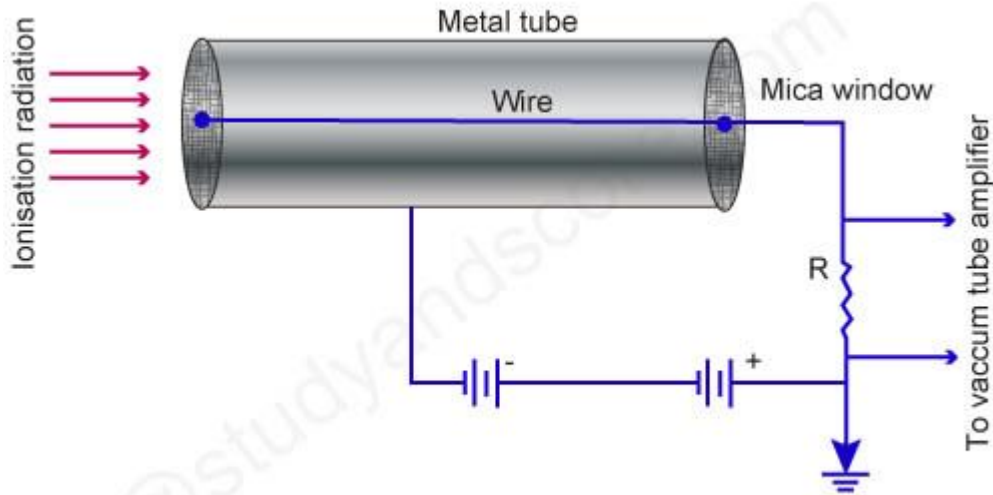
<https://assignmentpoint.com/gaseous-ionization-detectors/>



- Няма умножение
- Няма мъртво време
- Сигнал = отделения заряд



Гайгер-Мюлеров брояч

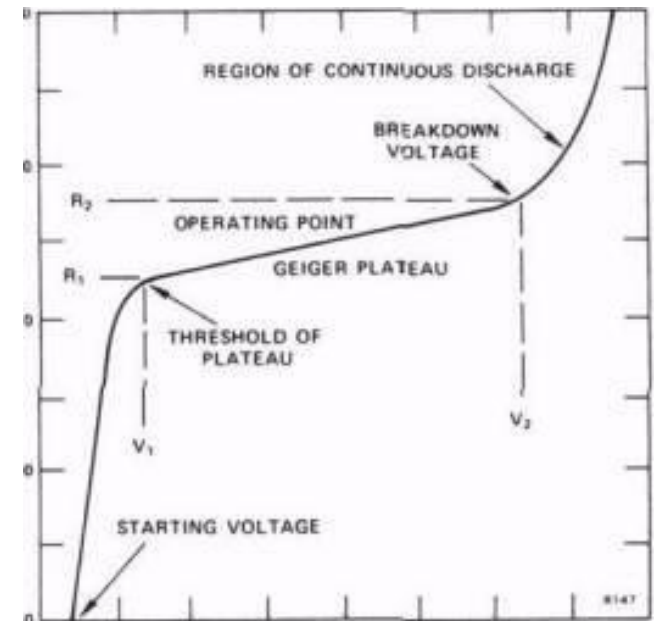


GEIGER-MULLER COUNTER

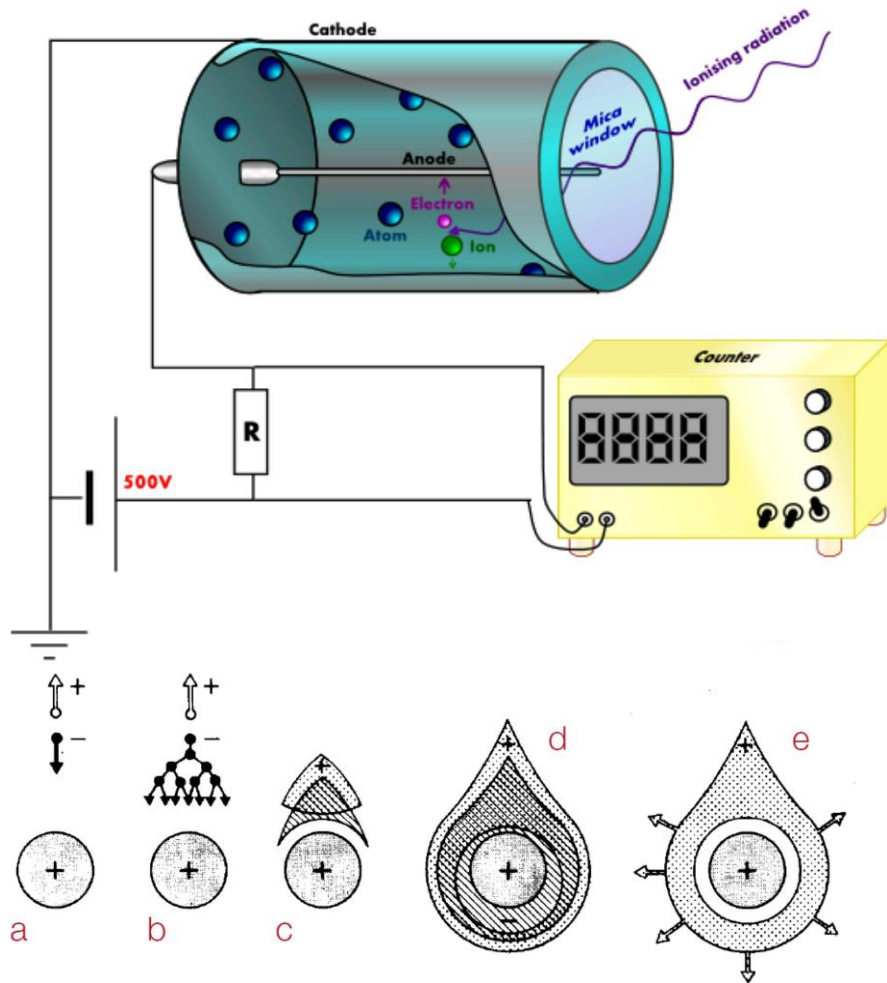
© studyandscore.com



- Няма информация за вида на частиците
- Няма информация за енергията
- Голямо мъртво време



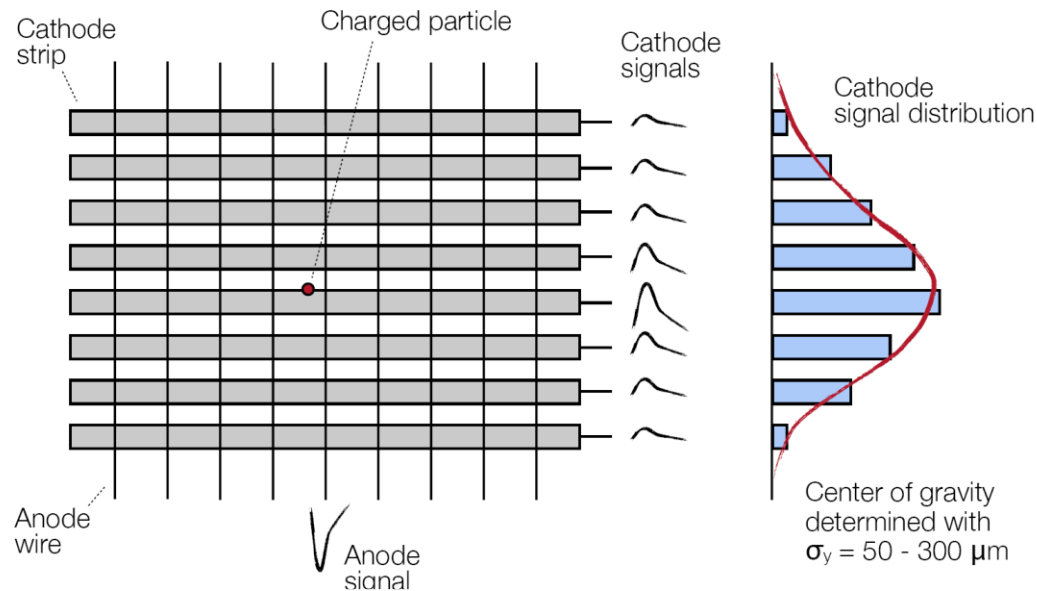
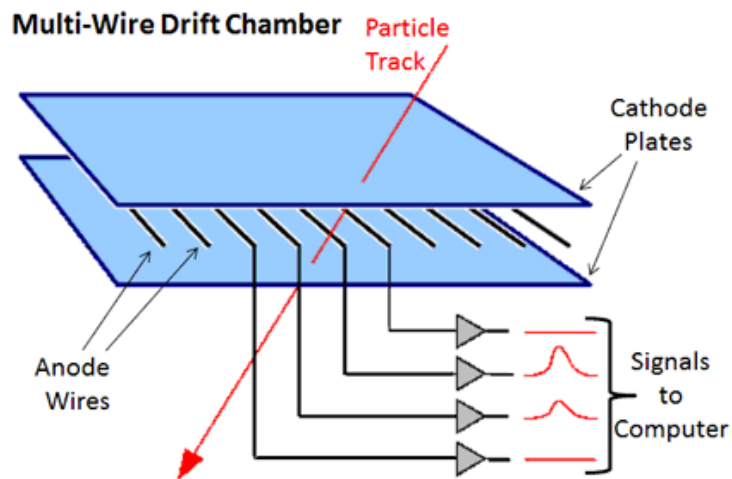
Пропорционален брояч



- Единична анодна нишка
- Цилиндричен катод
- $E \sim 1/R$

- Газово усилване около анода
- Електроните се събират за ~ 1 ns

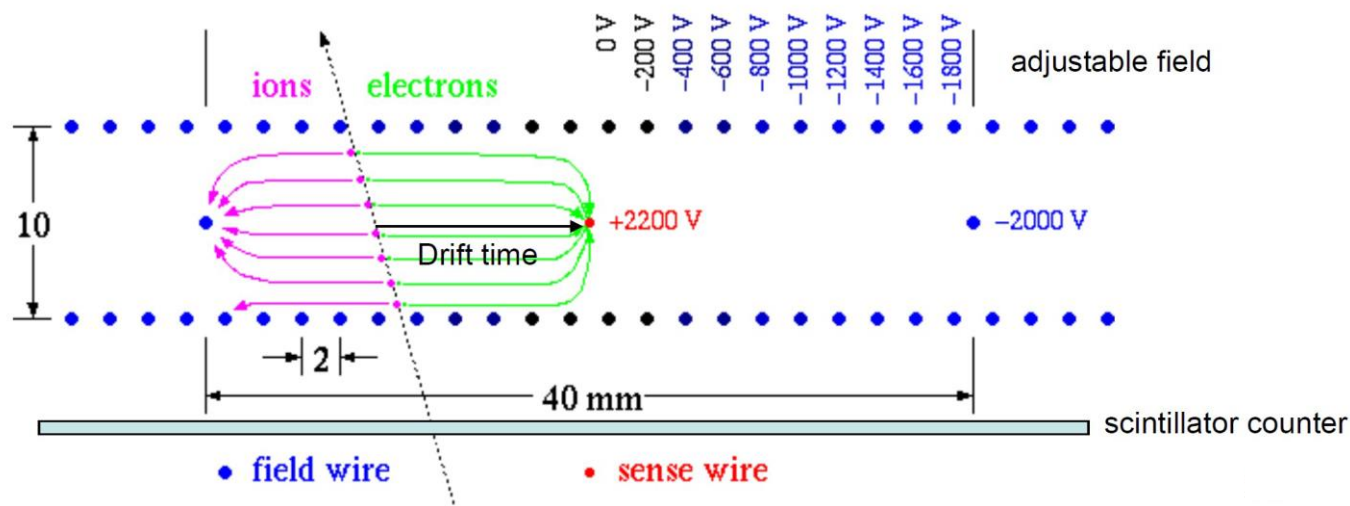
Многоишкова пропорционална камера



- Революция във физиката на високите енергии
- Позволява изграждане на системи за проследяване на следите на заредени частици

- Разделителна способност
 $\sigma_x = d/\sqrt{12}$ [d=2-4 mm, $\sigma_x \sim 0.6-1\text{mm}$]
- Подобрения – сменя се сигнала и от катодните плоскости
- Катода се оформя във вид на стрипове

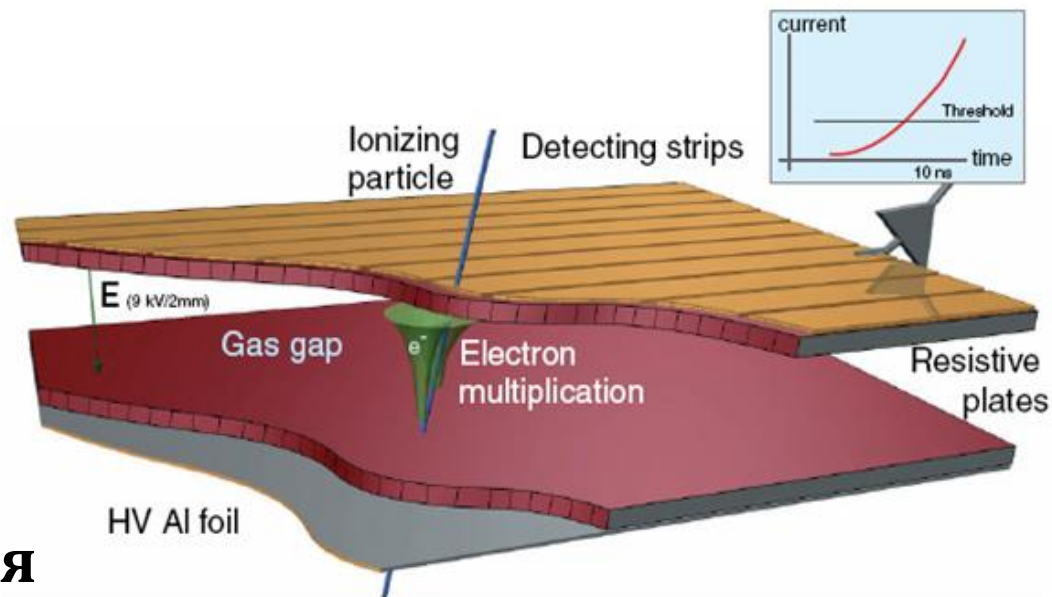
Дрейфови камери - DT



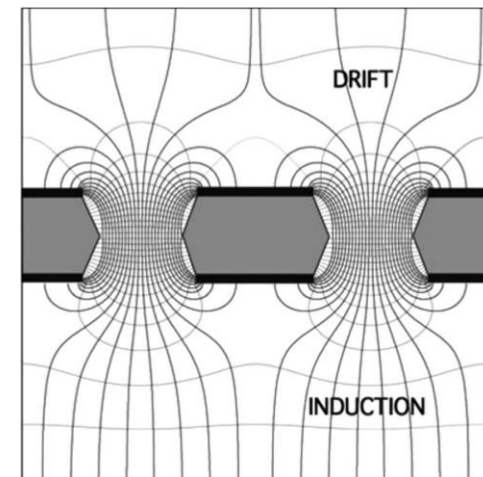
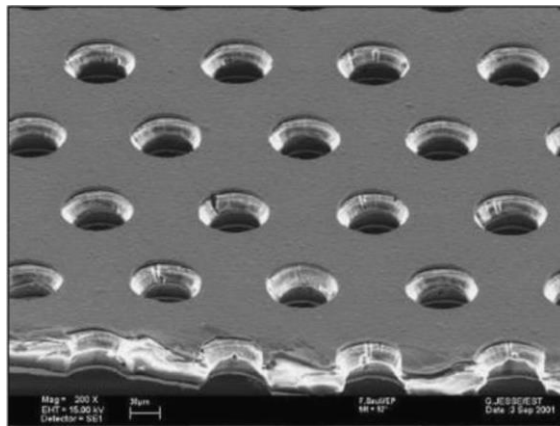
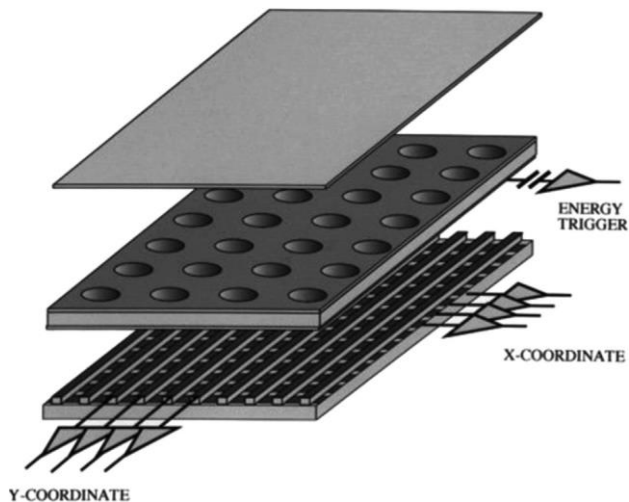
- Полето осигурява постоянна скорост на дрейф на електроните
 - Измерва се времето за достигане на електроните до анодните нишки

Камери със съпротивителна плоскост - RPC

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



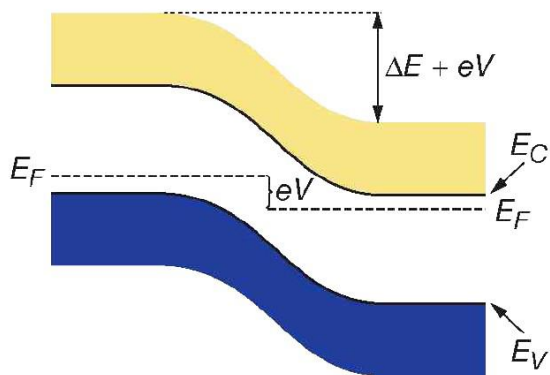
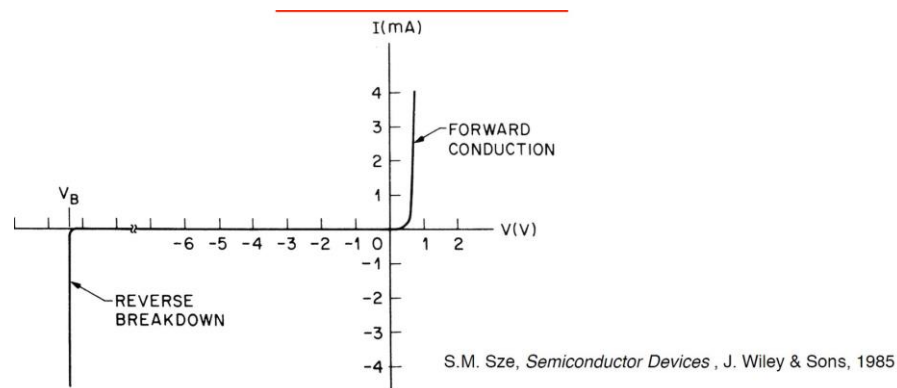
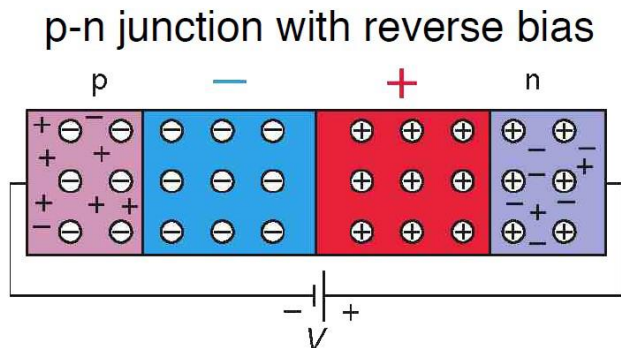
Газово-електронни умножители - GEM



- 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 $\sim 100 \text{ mm}$, време $\sim 5 \text{ ns}$

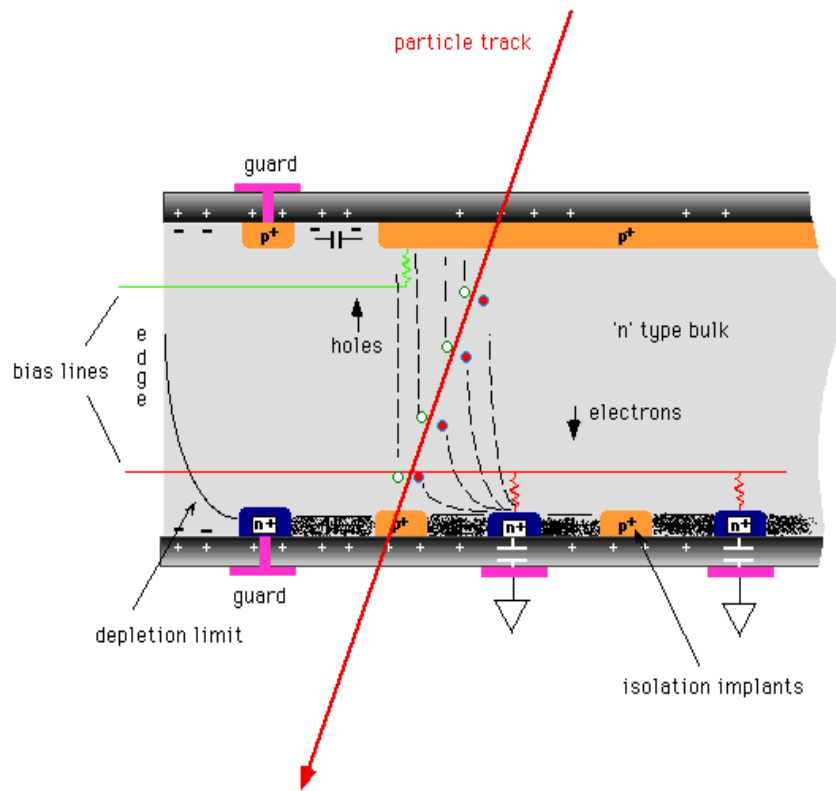
Видове детектори – метод на регистрация

➤ Твърдотелни (полупроводникови) детектори



- Принцип на работа – 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

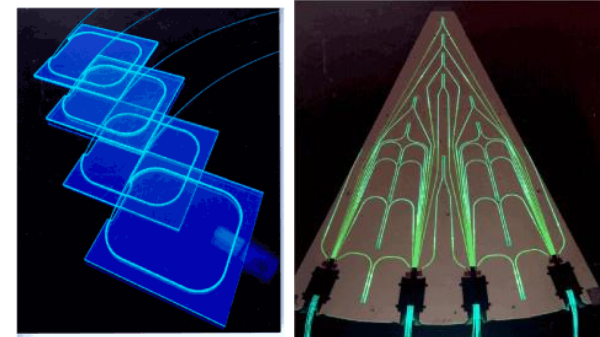
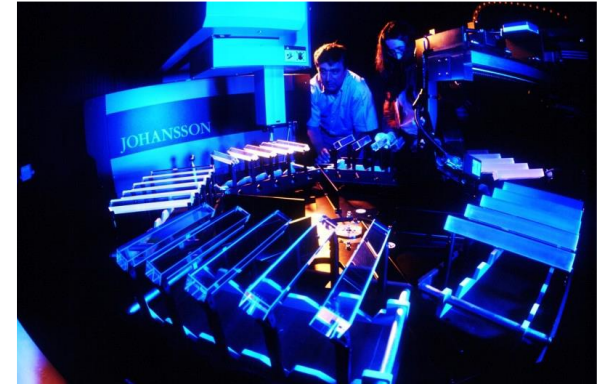
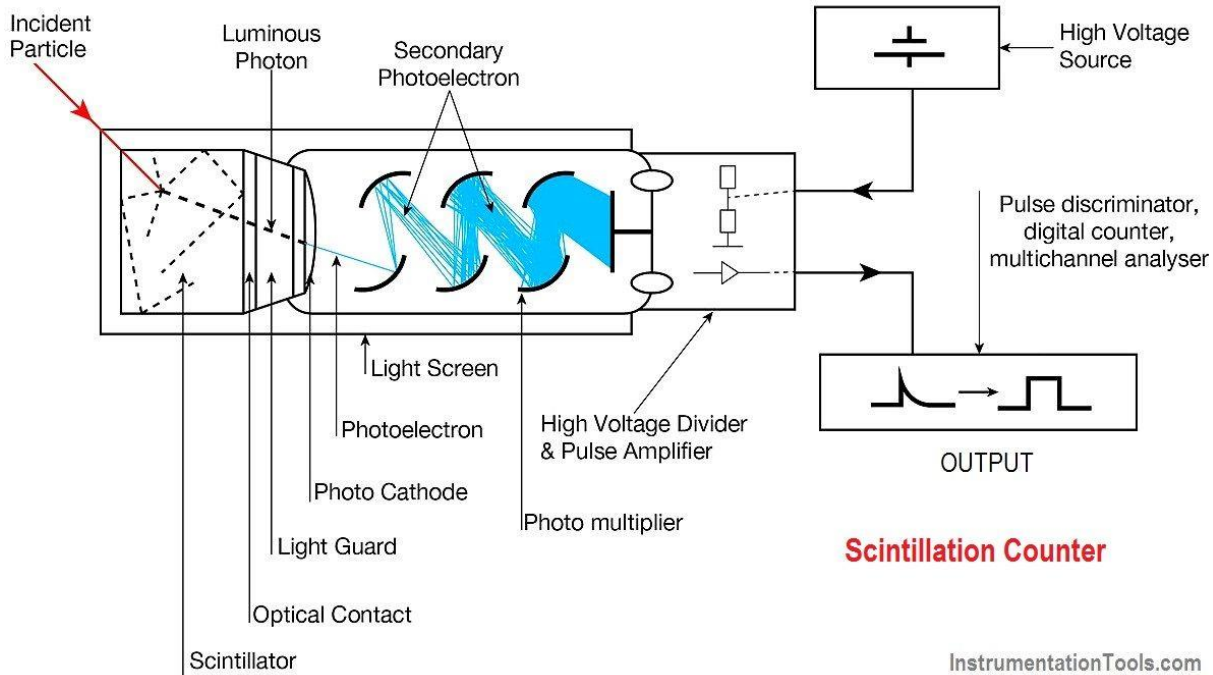
Полупроводникови детектори - Si



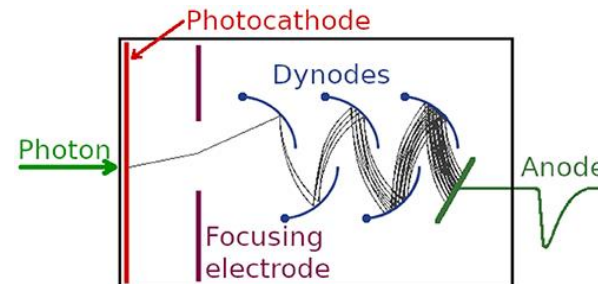
- Микрострипови детектори
- Заряд отделен в обеднената зона
- Дебелина – 300 μm
- Напрежение < 200 V
- n+ слой за подобряване на омичния контакт
- Алуминиево покритие
- Отделя се малко количество енергия (около 78 keV за 300 μm)

Видове детектори – метод на регистрация

➤ Сцинтилационни детектори

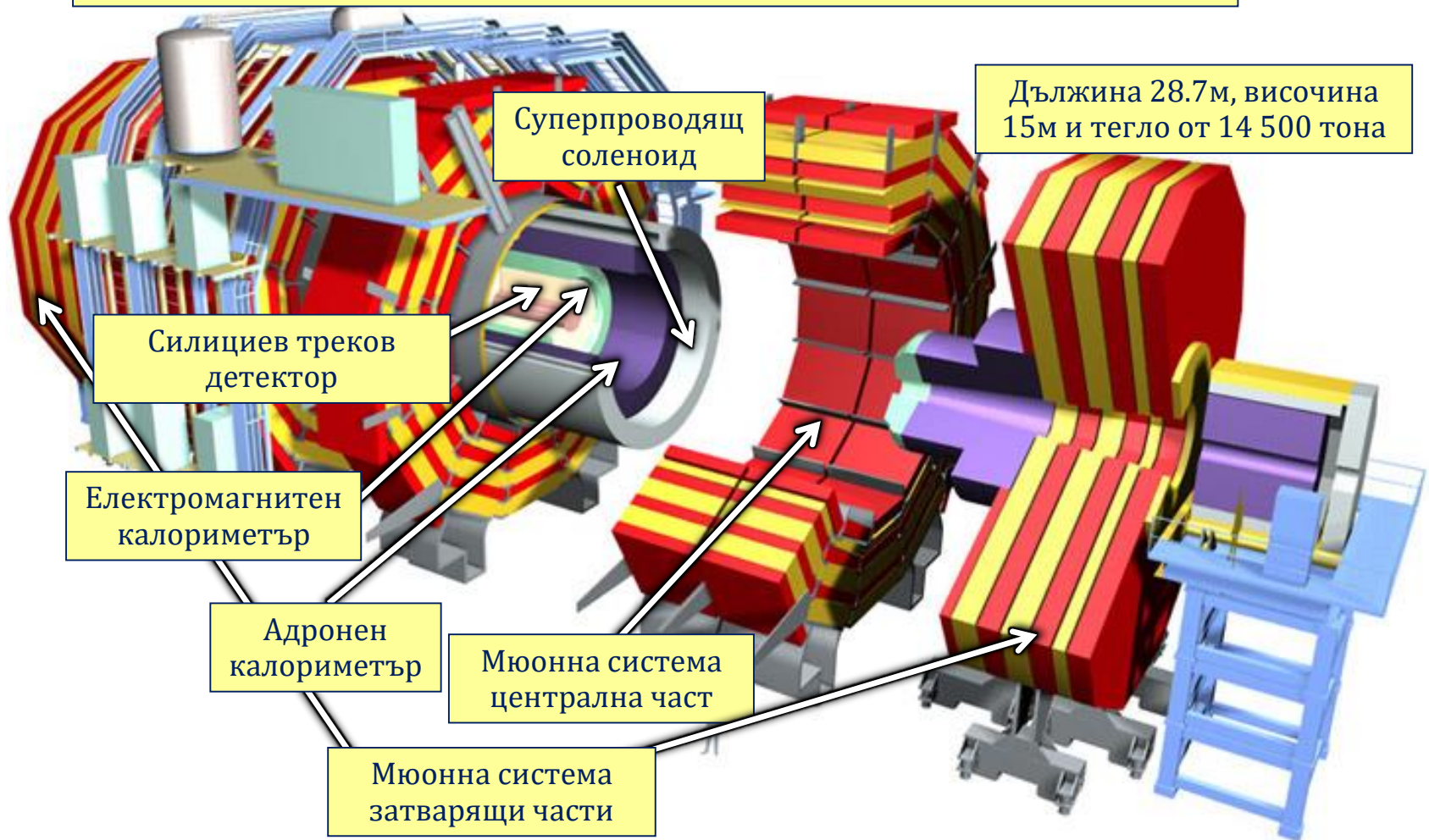


➤ Фотоумножители

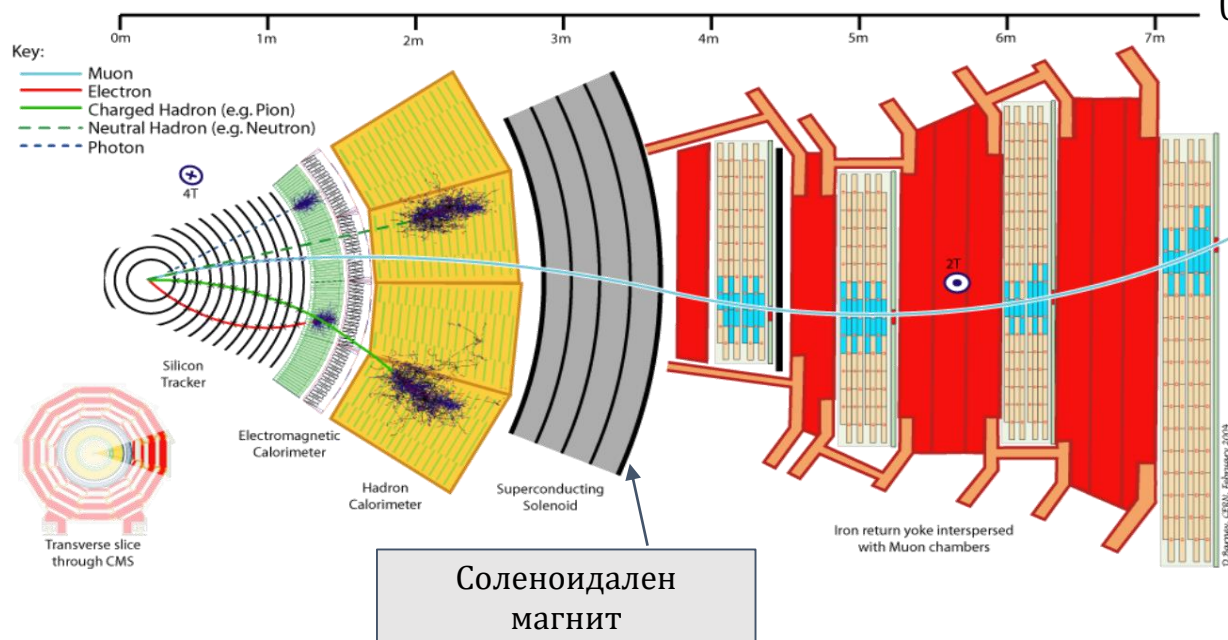


Експериментът CMS

Компактният мюонен соленоид (Compact Muon Solenoid – CMS) е един от двата мултифункционални детектори, разположени на Големият Адронен Колайдер (LHC) в ЦЕРН, Швейцария



Как се регистрират частици със CMS



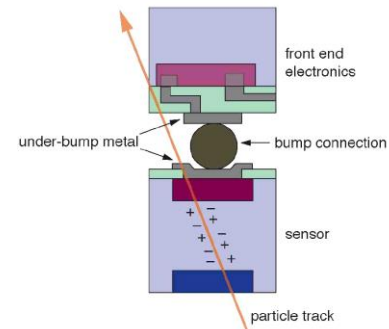
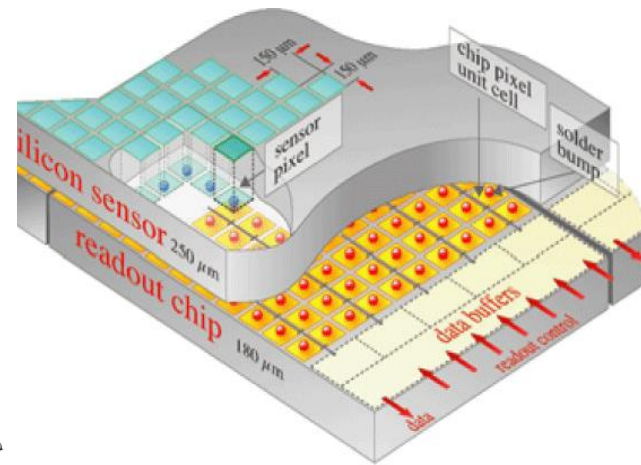
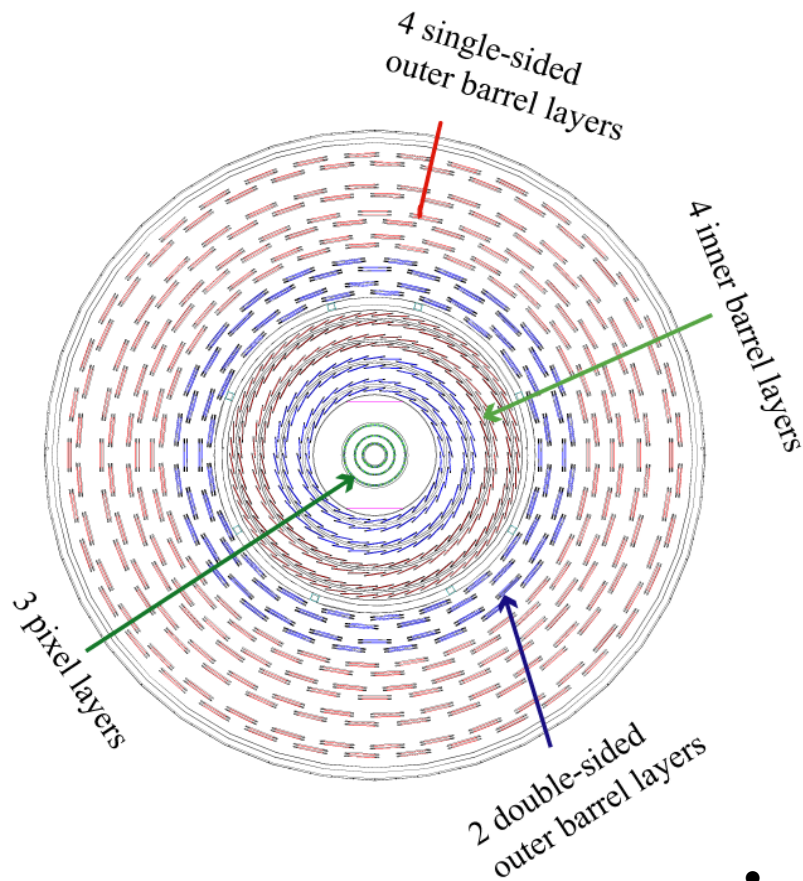
В обема, затворен от магнита ($B=3.8\text{ T}$)

- Силициев детектор:
 - Регистрира попадения на електрически заредени частици.
- Електромагнитен калориметър:
 - Регистрира електрони, позитрони и фотони
 - Те отлагат пълната си енергия в него
- Адронен калориметър
 - Регистрира адрони, които отлагат пълната си енергия в него

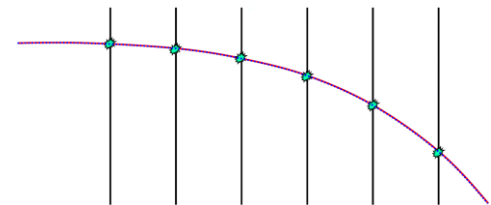
- Мюонна система (извън магнита, $B = 1.8\text{ T}$)
 - Регистрира електрически заредени частици, преминали през всички останали системи и магнита.
 - Ние предполагаме, че в CMS такива могат да бъдат само мюоните

Комбиниране информацията от отделните детекторни системи!

Определяне на импулс и заряд – Въртешен треков детектор



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



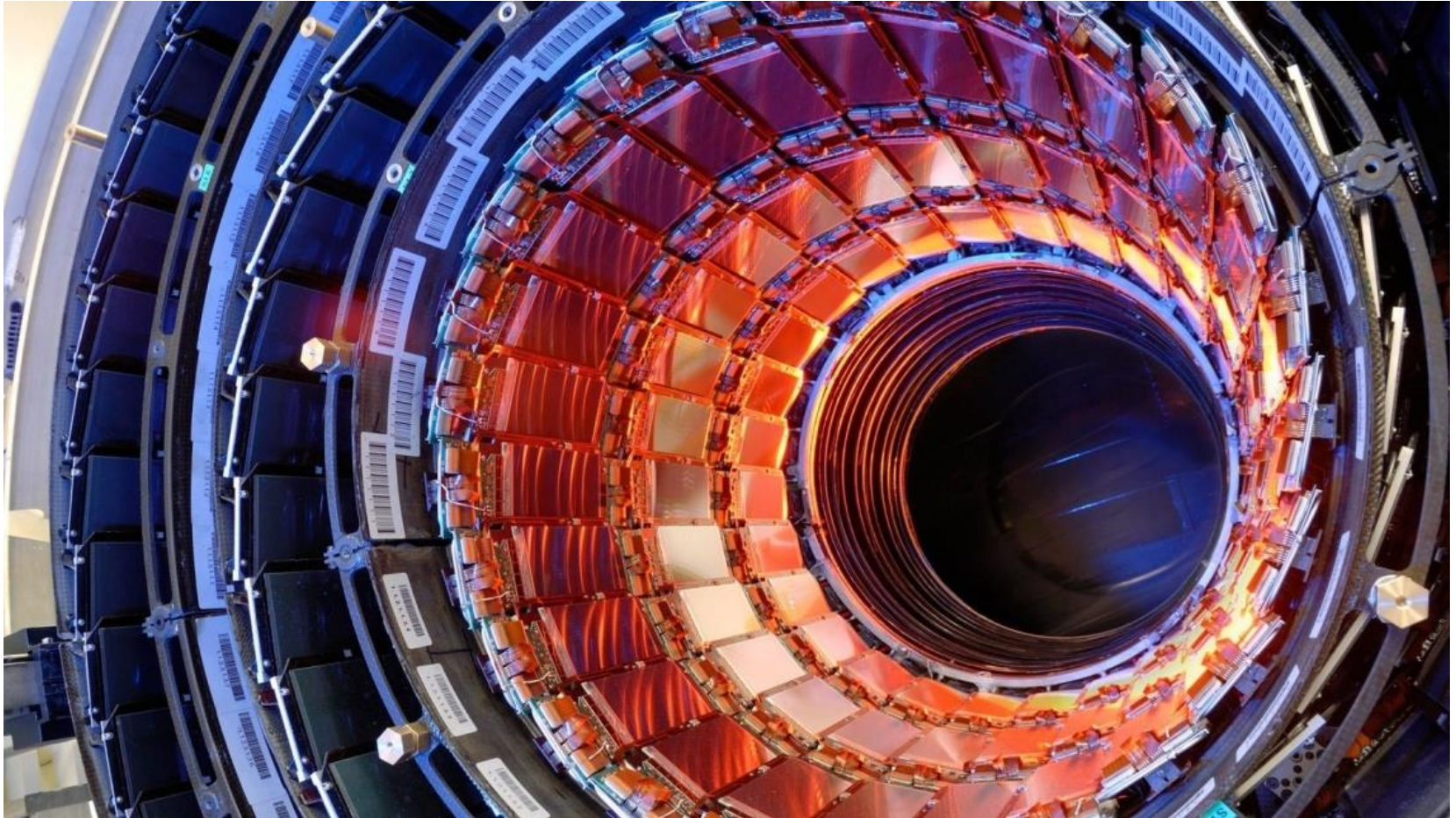
- Сигналите от вътрешния треков детектор, позволяват да се **реконструират техните траектории**.

- Големината на закривяване на техните траектории позволяват определянето на техния импулс по формулата **$r \sim p/B$** , където r [m] е радиусът на кривината, p [GeV/c] – импулсът на електрона, а B [T] е магнитното поле.

The World's largest Silicon Tracker = 250 m² !

- Колкото по-голям е импулсът на частицата, толкова по изправена е неговата траектория.

Определяне на импулс и заряд - Въртешен треков детектор



<http://cms.cern/detector/identifying-tracks>

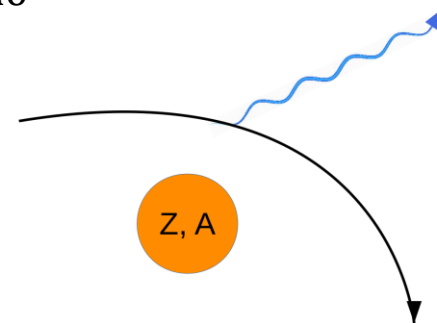
The World's largest Silicon Tracker = 250 m² !

Детектиране на електрони, позитрони и фотони

Електромагнитна лавина във веществото

Два процеса на загуба на енергия в плътна среда за e^\pm с $E > 1 \text{ GeV}$ или фотони:

- **излъчване на фотон от заредена частица** (примерно e^+ или e^-) при движение в полето на ядро от средата
 - **радиационна дължина $X_0 \sim 180 A/Z^2 \text{ [g.cm}^{-2}\text{]}$**
 - енергията намалява като: $E = E_0 e^{-x/X_0}$, т.е. е (2.71) пъти за една X_0
 - пример: в олово ($Z=82$), $X_0 \sim 5.6 \text{ mm}$
 - **енергийните загуби $dE/dX \sim (E.Z^2)/m^2$** , затова мюоните излъчват едва при енергии над 1 TeV



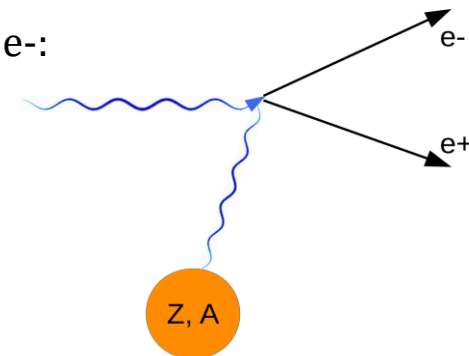
- **раждане на e^+e^- двойки от фотон, в полето на ядро от средата**

- **дължина на свободен пробег** преди раждане на двойка e^+e^- :

$$\Lambda_{\text{pair}} = 9/7 X_0$$

- в олово $\Lambda_{\text{pair}} \sim 7.2 \text{ mm}$

- **Интензитета на лъчението намалява: $I = I_0 \exp(-7x/9X_0)$**



Детектиране на електрони, позитрони и фотони

Електромагнитна лавина във веществото

- Да предположим: $X_0 = \Lambda_{\text{pair}}$ и на всяка стъпка броят частици нараства два пъти.
- Брой частици след t радиационни дължини:

$$N(t) = 2^t \Rightarrow E(t) = E_0 \cdot 2^{-t}$$

- Процесът протича до $E(t) < E_c$ (E_c - критична енергия)

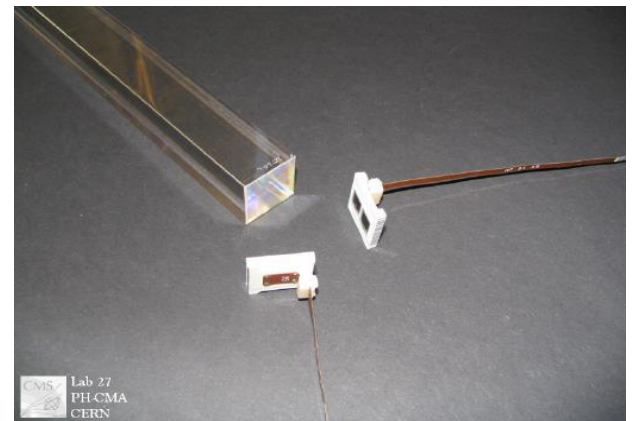
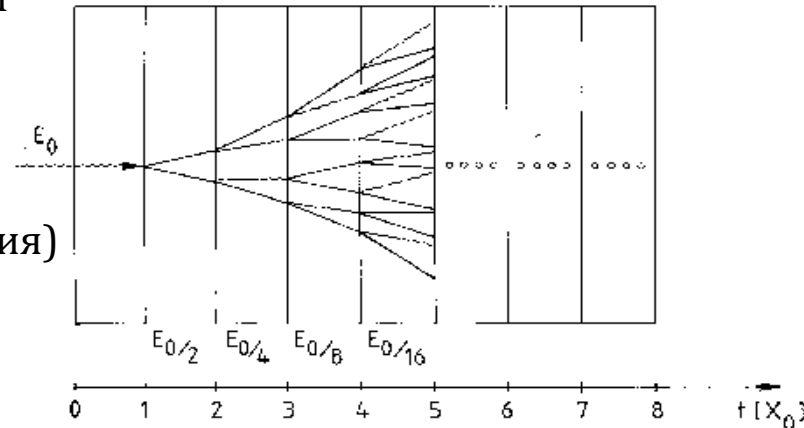
$$\Rightarrow t_{\text{max}} = \frac{\ln E_0 / E_c}{\ln 2}$$

$$\Rightarrow N^{\text{Total}} = \sum_{t=0}^{t_{\text{max}}} 2^t = 2^{(t_{\text{max}}+1)} - 1 \approx 2 \cdot 2^{t_{\text{max}}} = 2 \frac{E_0}{E_c}$$

$$\Rightarrow N^{\text{total photons}} \sim E_0$$

- Регистрирането на фотони - чрез подходящи фотодетектори
- Оценка на необходимата дължина на средата:
- Пример за електрон с енергия 50 GeV:

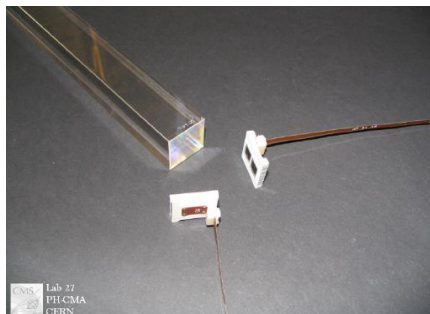
$$N^{\text{total}} \sim 14000 \text{ частици, а } t_{\text{max}} \sim 13 X_0 \sim 72.8 \text{ mm}$$



Кристал от оловен волфрамат и лавинни фотодиоди, използвани в ECAL на CMS

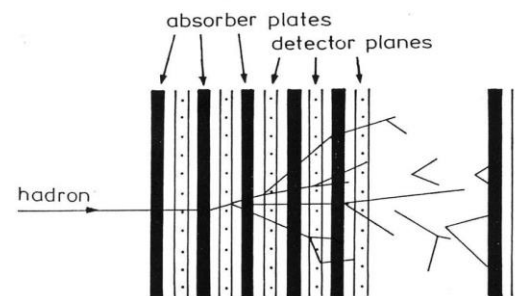
ECAL – електромагнитен калориметър на CMS

Кристал от оловен волфрамат и лавинни фотодиоди, използвани в ECAL на CMS

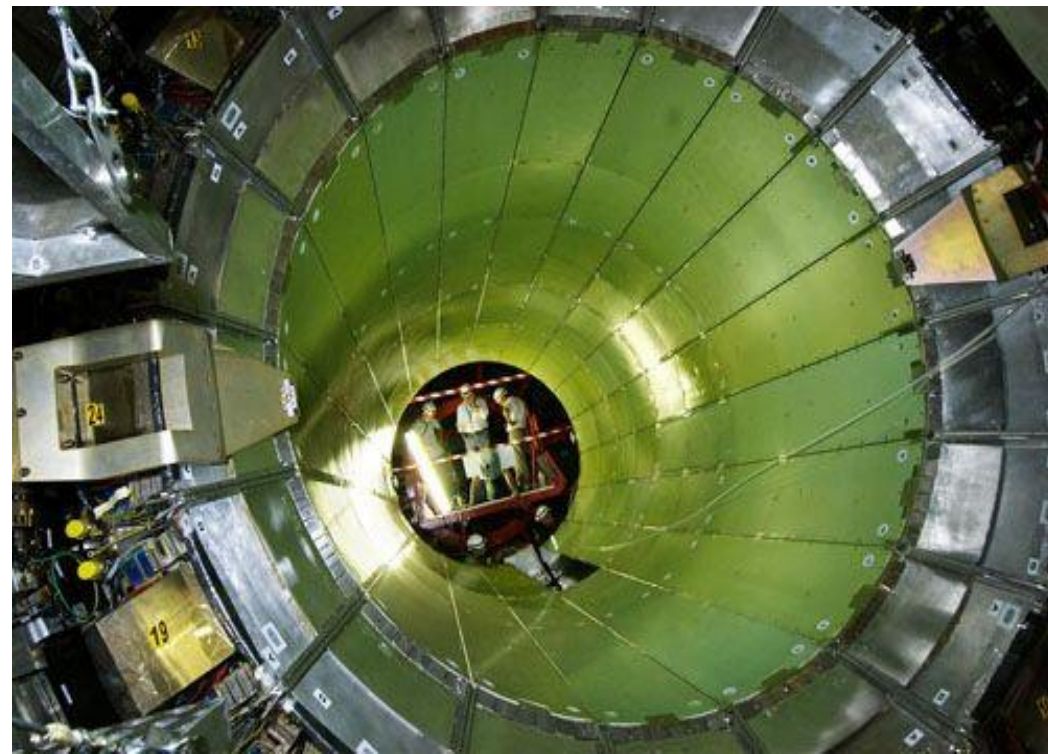


HCAL – адронен калориметър на CMS

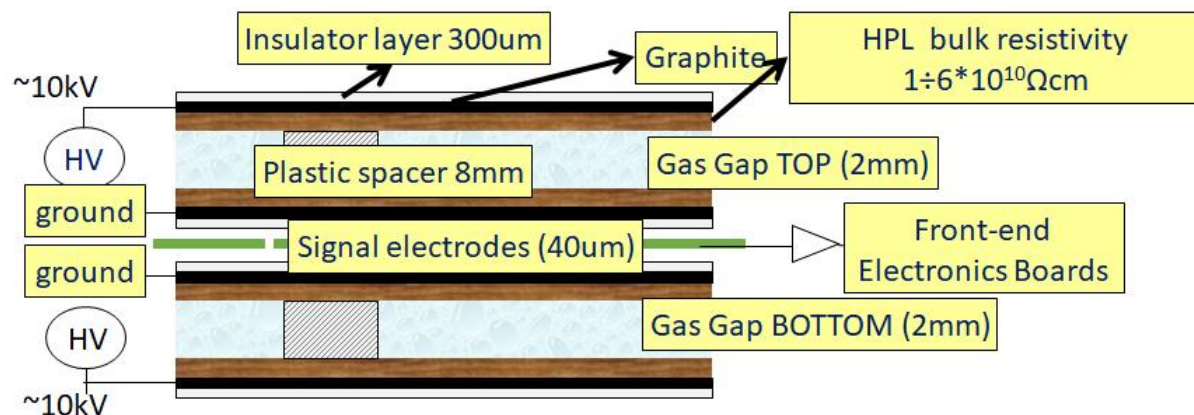
Sampling Calorimeter



R.S. Orr 2009 TRIUMF Summer Institute



Камери със съпротивителя плоскост на CMS



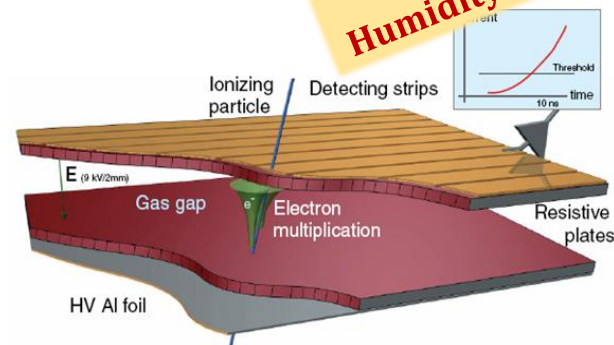
RPC present system

- Covers $|\eta| < 1.9$
- Total number of **1056 chambers** (480 in barrel and 576 in endcap)
- More than **110000 electronic channels**
- Strip width: **1 – 4 cm**.
- Operated in **avalanche mode**

CMS Standard Gas Mixture:

- **95.2% $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ (Freon)**
- **4.5% iC_4H_{10} (Isobutene)**
- **0.3% SF_6 (Sulfur hexafluoride)**

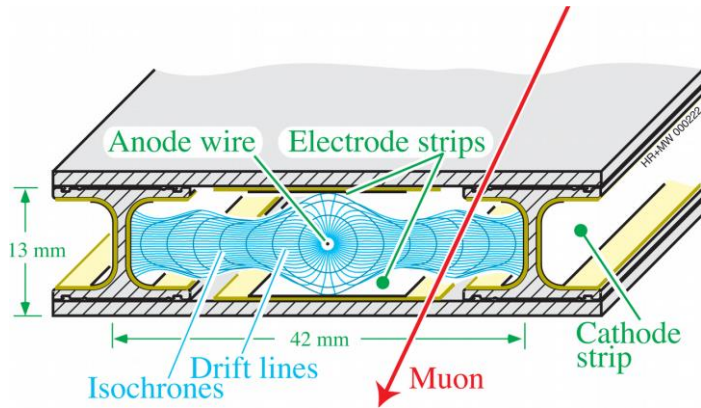
Relative Humidity 40%



Requirement of RPC system:

- High rate capability ($\sim 300 \text{ Hz/cm}^2$)
- High detection efficiency $> 95\%$
- Intrinsic time resolution $< 1.6 \text{ ns}$ (BX identification)
- Ability to withstand in long term operation and high background radiation
- Intrinsic Noise $< 5 \text{ Hz/cm}^2$
- Average cluster size ~ 2 strips
- Spatial resolution $\approx 10 \text{ mm}$

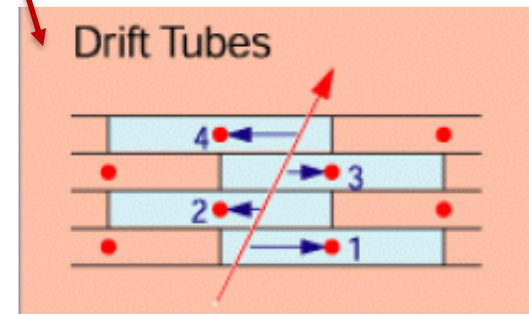
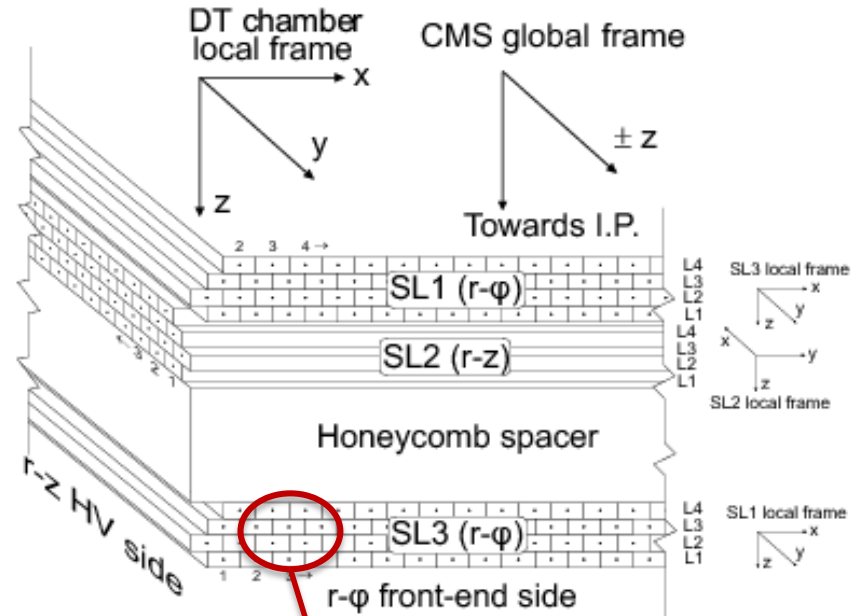
Дрейфови тръби на CMS



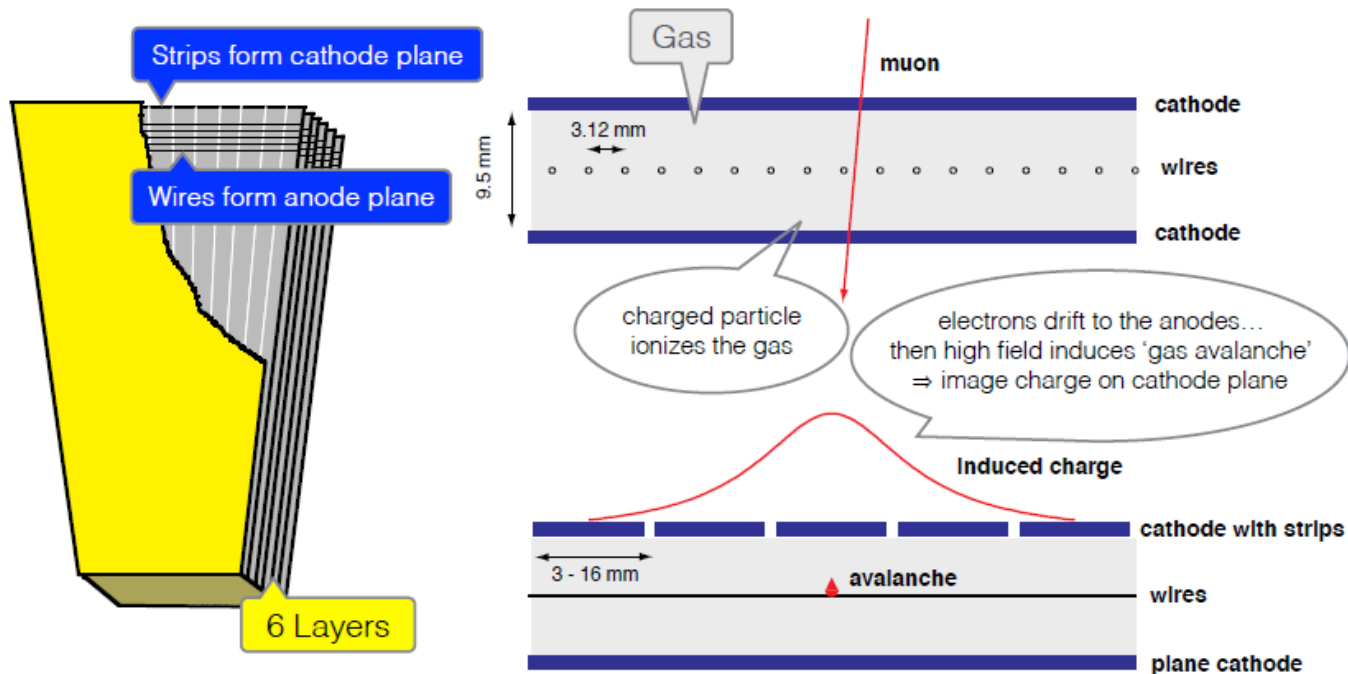
- Drift cell - $42 \times 13 \text{ mm}^2$
- Gas mixture – 85% Ar, 15% CO₂
- Max drift time $\sim 400 \text{ ns}$
- Time resolution $\sim 5 \text{ ns}$
- Length $\sim 2.5 \text{ m}$

- Alternating layers oriented perpendicular to each other give measurement in 2 dimensions

- 8 layers in the $(r-\phi)$ plane at $\sim 100 \mu\text{m}$ spatial resolution
- 4 layers in the $(r-z)$ plane at $\sim 150 \mu\text{m}$ spatial resolution



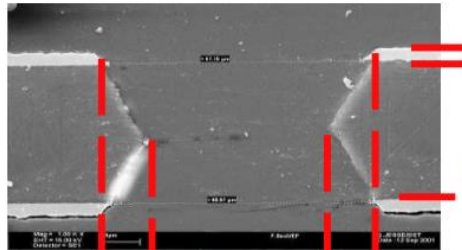
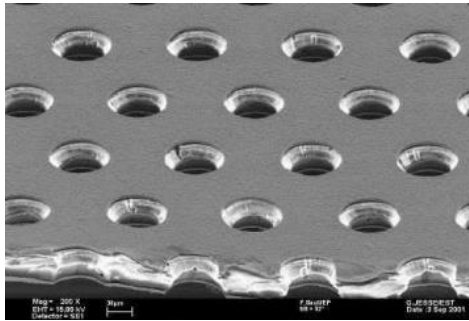
Катодно стрипови камери на CMS



- 4 stations per Endcap
- 80 cathode strips per layer
- Gas gaps – 6 mm (for the ME1/1 chambers) and 9.5 mm (for the rest of the chambers)
- Azimuthal coverage - 20° (inner rings of stations 2, 3, 4) and 10° (all other rings)

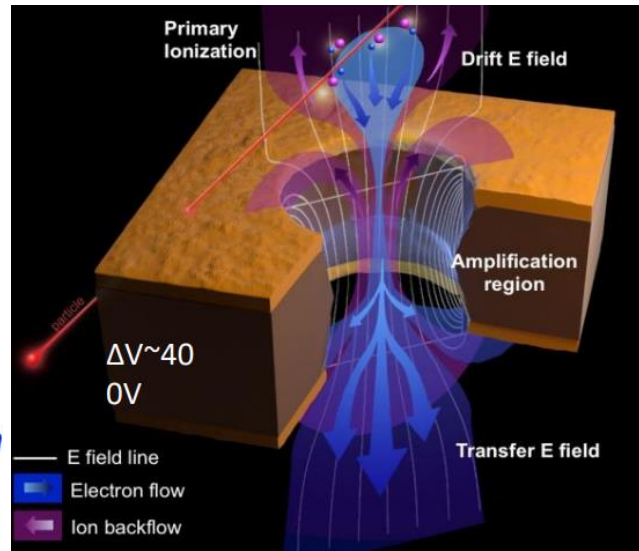
- Gas mixture – 50% CO_2 , 40% Ar, and 10% CF_4
- Chamber length – from 1.7 m to 3.4 m
- Spatial resolution of 75 to 150 μm
- Cathode strips measure of the azimuthal coordinate while Anode wires provide the radial coordinate of passing muos

Газово-електронни умножители на CMS

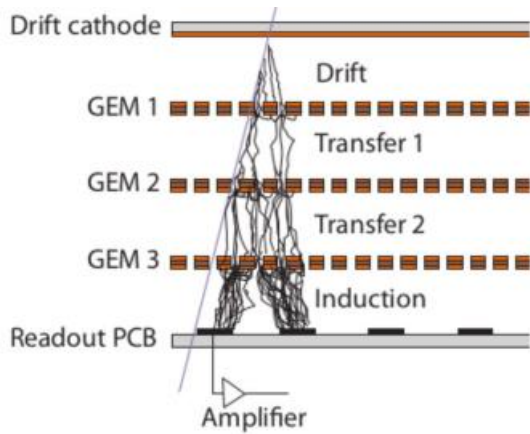
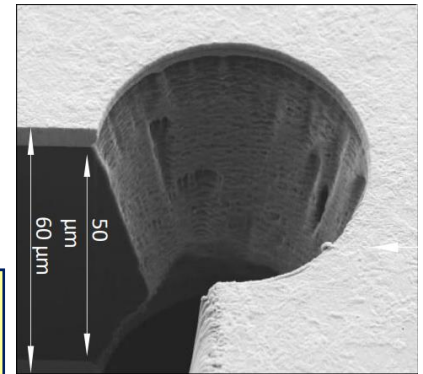


5 μm
50 μm

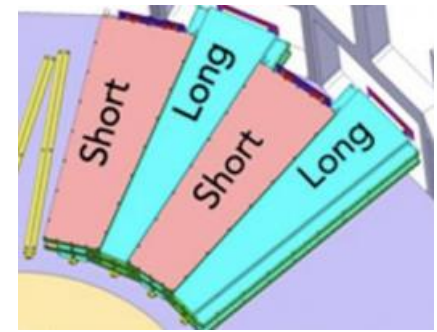
55 μm
70 μm

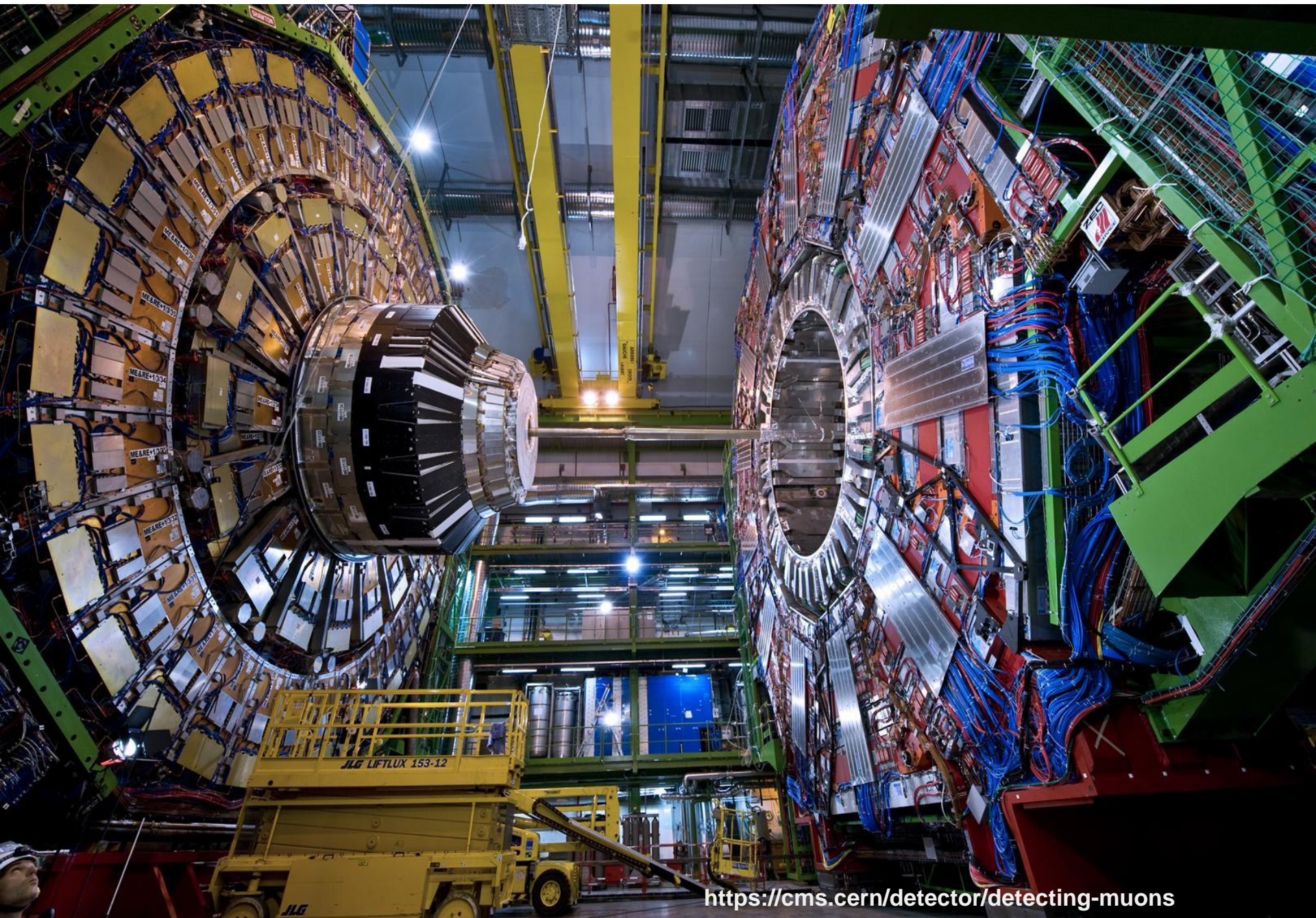


Gas Electron Multiplier electrode is a thin polymer foil, metal-coated on both sides and pierced with a high density of holes, typically 50-100 μm



- Triple-GEM trapezoidal chambers
- Gas mixture – 70% Ar and 30% CO₂
- GE1/1 Chamber length – from 1.06 m (short) to 1.2 m (long)
- Thickness – 3.5 cm
- Azimuthal coverage - 10°
- Active readout area – from 0.345 m² (short) to 0.409 m² (long)
- Multiplication: 1 e⁻ input to > 1000 e⁻ output (as a function of gas and HV)





<https://cms.cern/detector/detecting-muons>

Благодаря за вниманието!!!