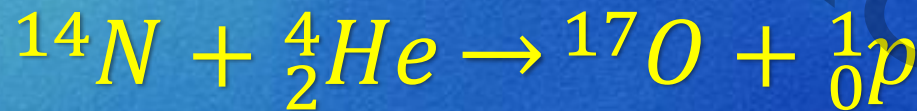


Акцелератори честица

A futuristic particle accelerator facility. The central feature is a large, circular ring structure with a glowing, multi-colored particle path (red, blue, green, yellow) spiraling inward. The facility is filled with complex machinery, pipes, and control panels. Several people are visible on platforms, interacting with large, glowing digital displays that show technical data and diagrams. The overall atmosphere is high-tech and scientific.

Принципи

- Акцелератори су уређаји за убрзавање наелектрисаних честица.
- Да би честица продрла у језгро неопходно је да има енергију
 - већу од висине баријере или
 - нешто нижу од висине баријере (тунел ефекат)
- Ратерфордови експерименти са трансмутацијама јегра азота

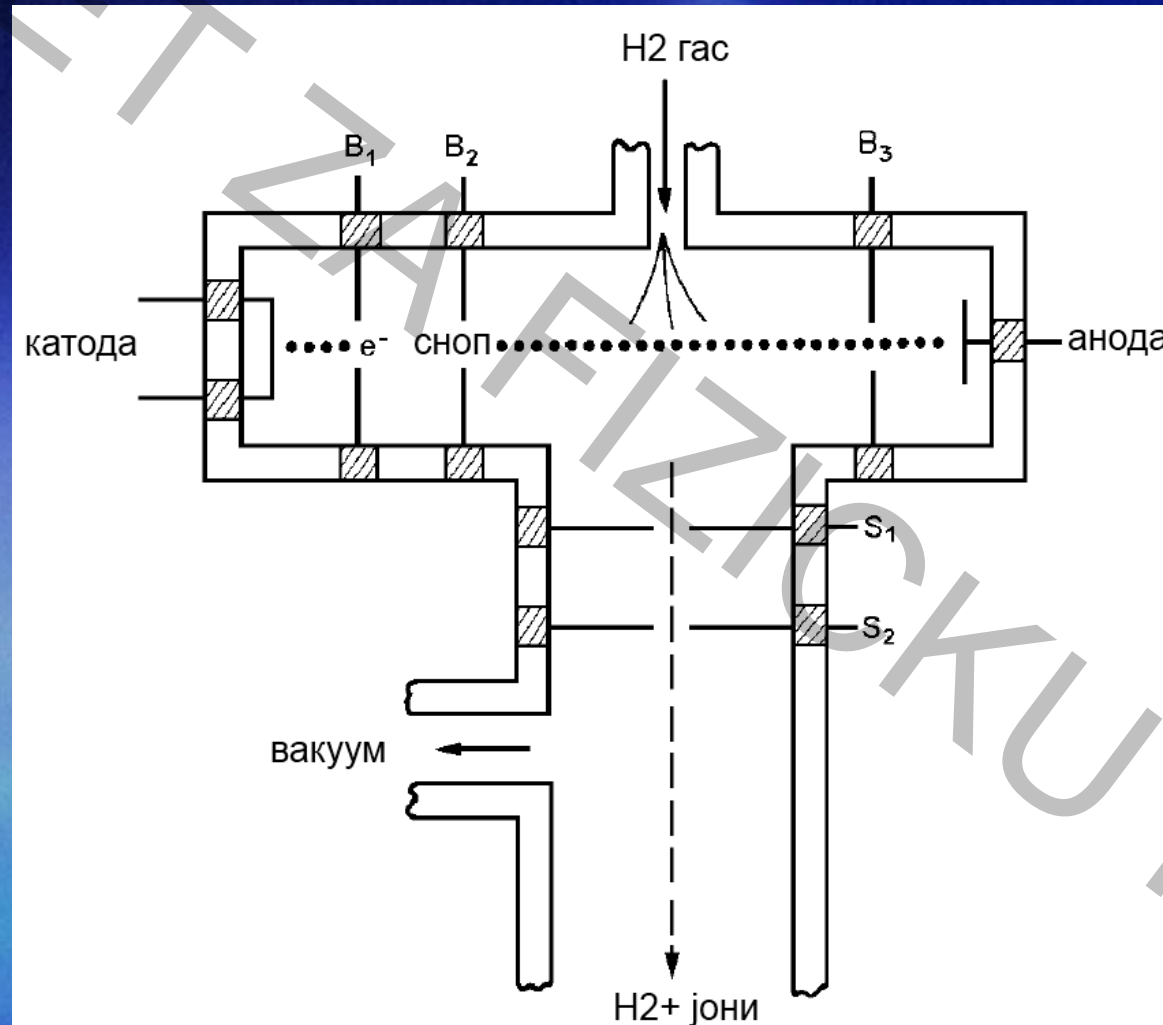


- Али...
 - енергија алфа-честица је довољна за „прескакање“ баријере само код најлакших елемената

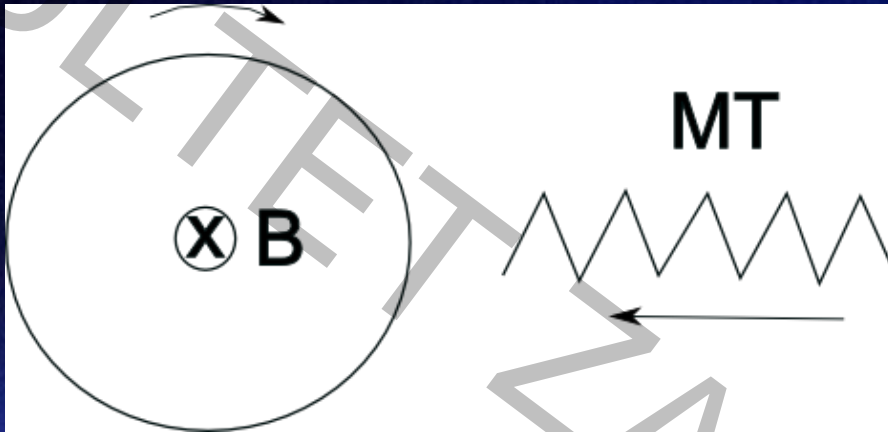
- Houtermans - обрнути тунел ефекат
 - За нека језгра могуће је чак и са енергијама честица од 100 keV
 - Cockcroft & Walton 1932 – први акцелератор честица
- Шта је неопходно?
 - Јонски извор
 - Машина за убрзавање честица

Јонски извори

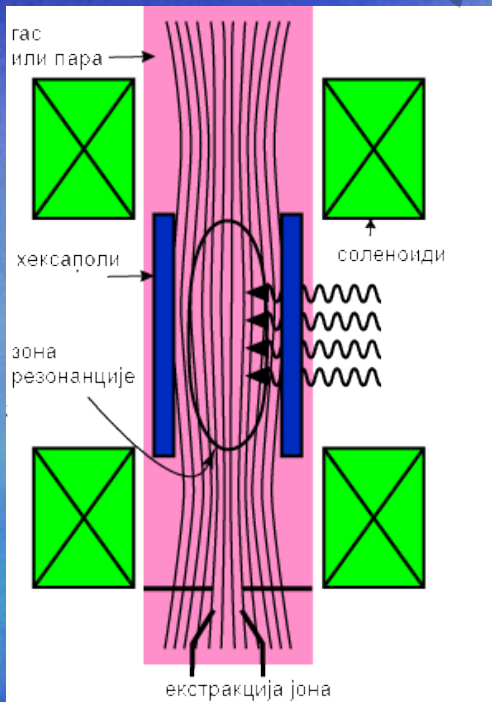
- Класични извори –бомбардовање снопом високоенергетских електрона



ECR јонски извор

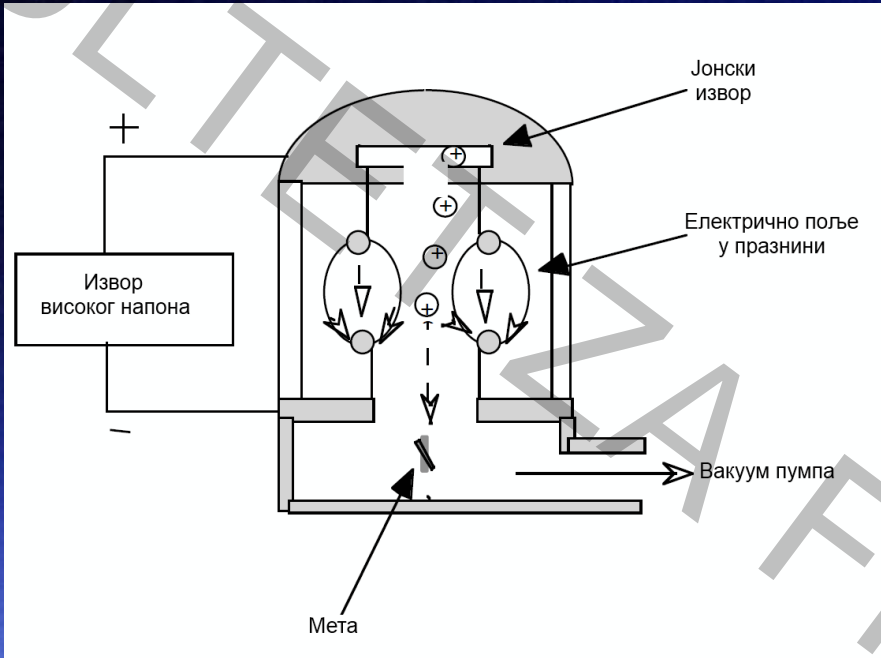


$$\frac{mv^2}{r} = qv \times B$$
$$\omega_{cf} = \frac{v}{r} = \frac{q}{m} B$$



$$E_{mt} = E_0 \sin(\omega_{cf} t)$$

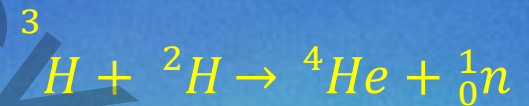
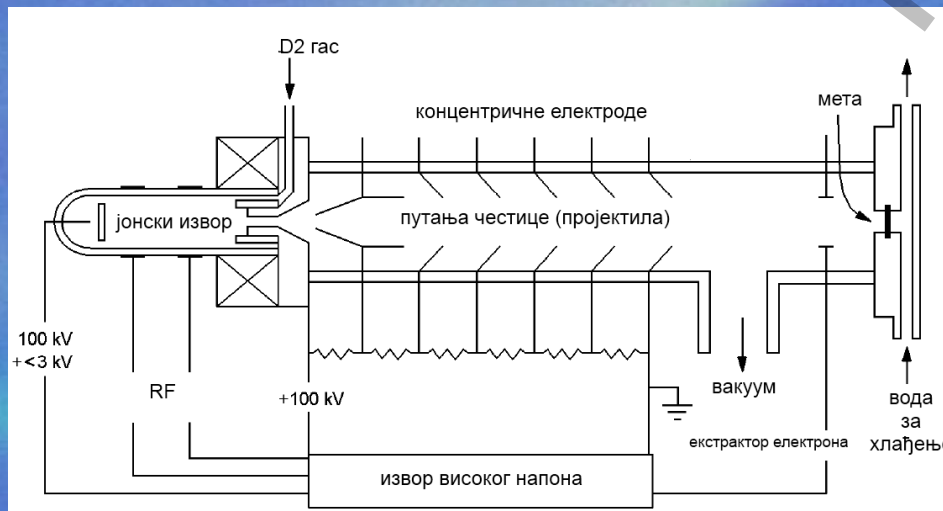
Cockcroft-Walton-ов акцелератор



$$E_k = nqV$$

$$E_k(max) \sim 4 \text{ MeV}$$

- Посредна производња брзих неутрона
- тунел ефекат

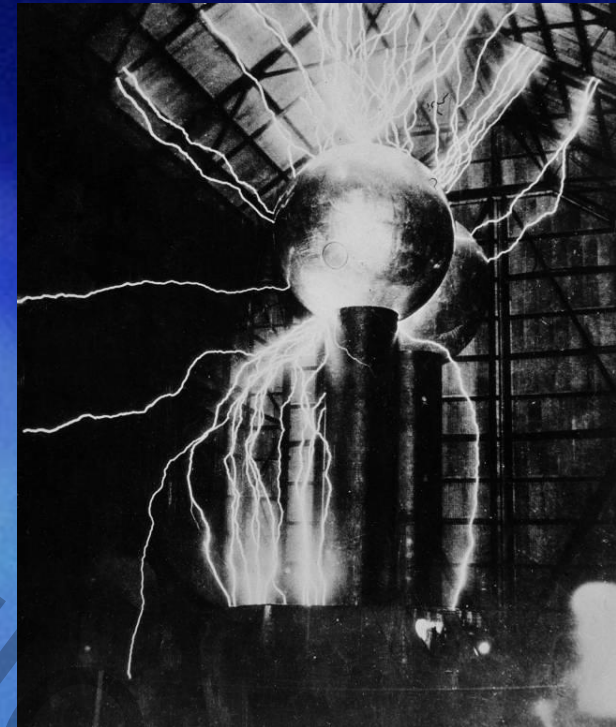
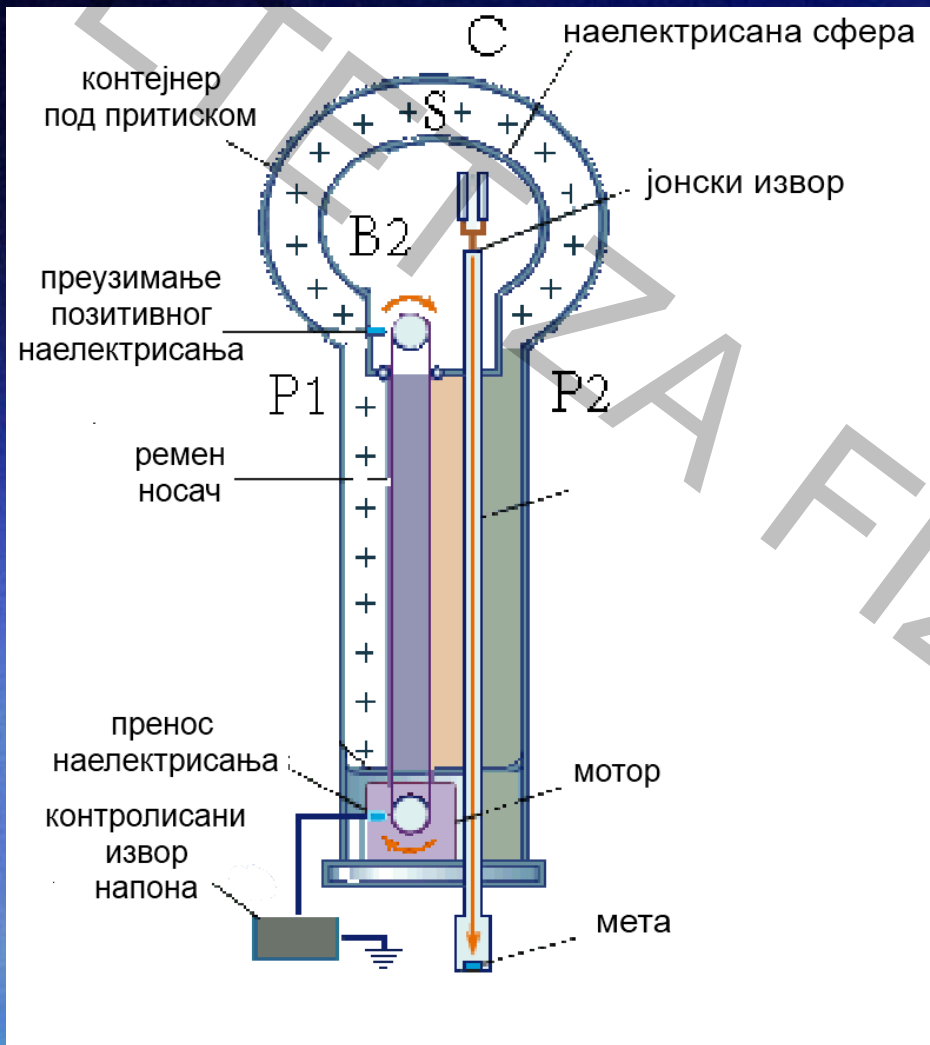


100 kV, 0,5 mA

$\Phi_n \sim 10^{10} \text{ n/s}$

$E_n \sim 14 \text{ MeV}$

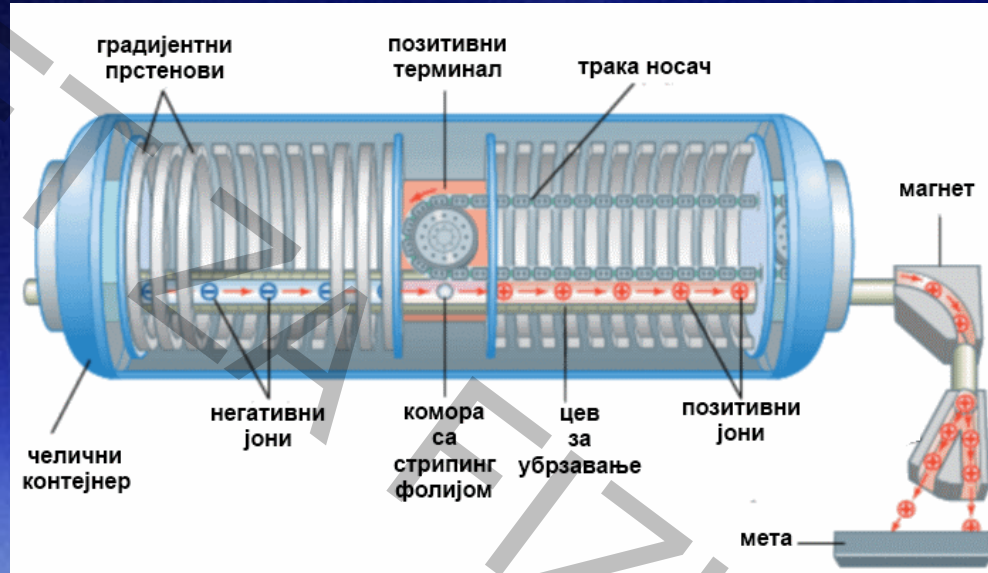
van der Graaf-ов акцелератор



- Максимална кинетичка енергија честица $\sim 15 \text{ MeV}$ (уз коришћење изолаторских гасова $\text{N}_2, \text{CO}_2, \dots$)
- $10\text{-}100 \mu\text{A}$

Предност: прецизна контрола енергије честица

Тандем van der Graaf акцелератор



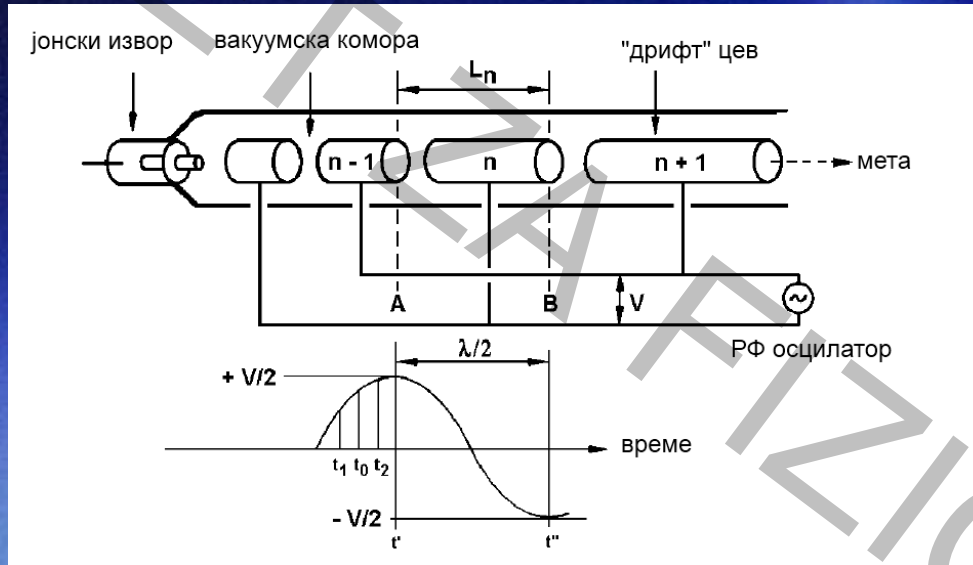
Ефективно наелектрисање после стрипинг фолије

$$z = Z \left[1 + \left\{ v / (3.6 \times 10^6 \text{ (m/s)} Z^{0.45}) \right\}^{-1.67} \right]^{-0.6}$$

Енергија честица 20-50 MeV

Вишестепени линейарни акцелератори (LINAC)

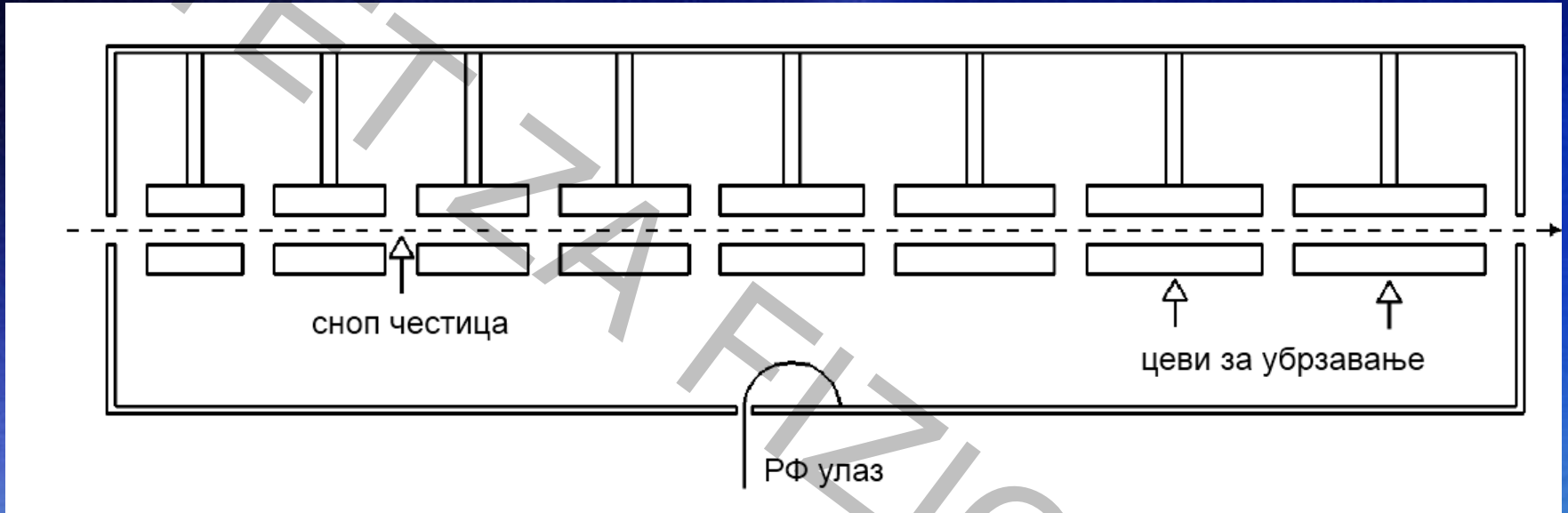
- Wilderöe-ов акцелератор



$$\frac{L_n}{v} = \frac{\lambda}{2c}$$
$$v \rightarrow c, L_n \rightarrow \frac{\lambda}{2}$$

- Фазна стабилност (Veksler & McMillan)
- Повећање дужине „дрифт“ цеви да би се очувао фазни услов
- $E > 10 \text{ MeV}$ присутни релативистички ефекти (код протона и деутерона)

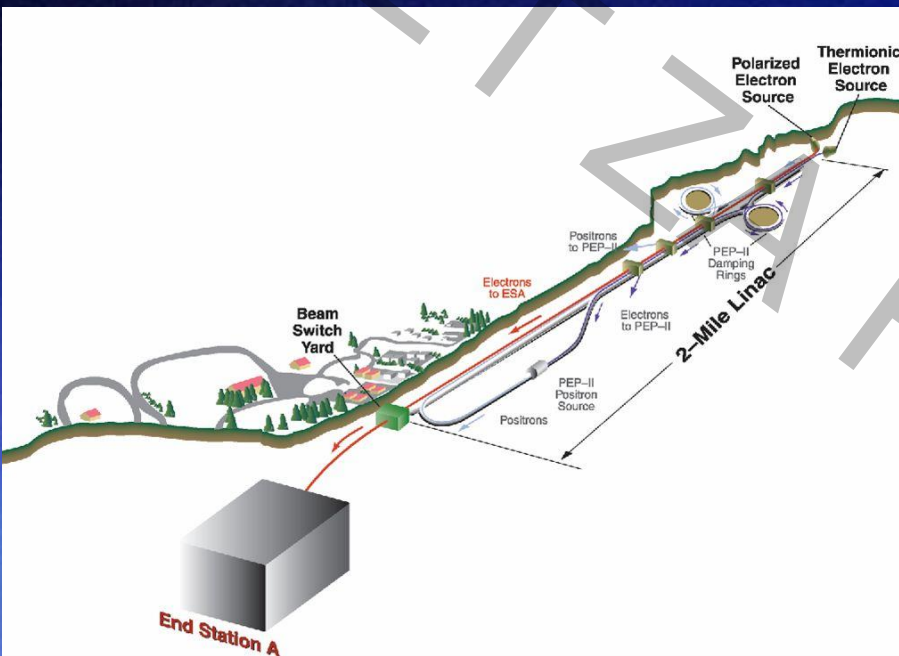
Alvarez-ov LINAC



- Већа разлика потенцијала између цеви него код Wilderöe-овог акцелератора

LINAC пример

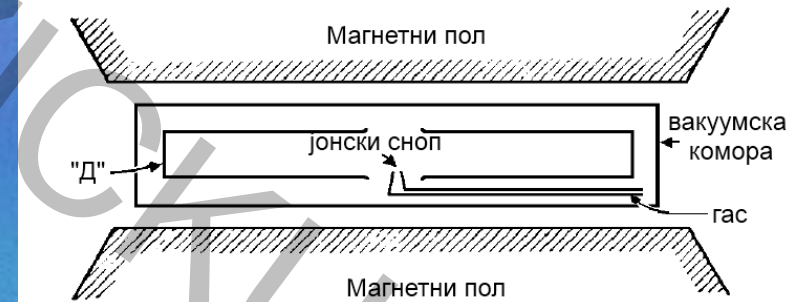
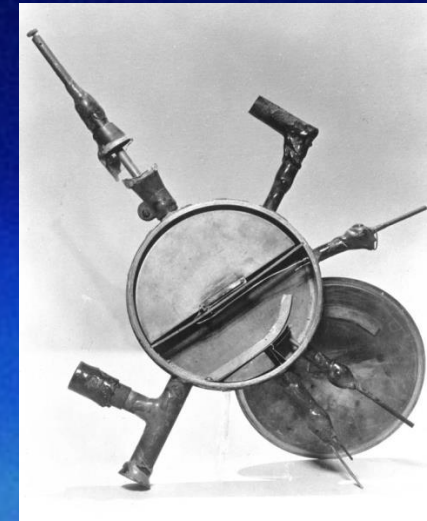
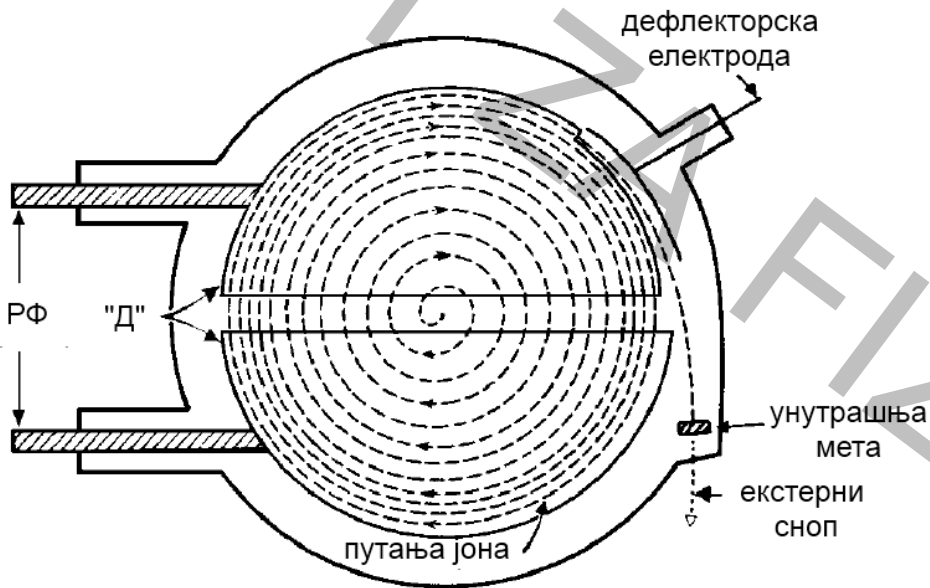
- Stanford linear accelerator – SLAC



- Укупна дужина 3,2 km, дијаметар 0,1 m
- Убрзава електроне и позитроне до 20 GeV (0,99999999997c)

Циклотрон

- Lawrence & Livingston (1931)



$$\frac{mv^2}{r} = qv \times B$$
$$\omega_{cf} = \frac{v}{r} = \frac{q}{m} B = \text{const}$$

- Симулација рада циклотрона

Карактеристике циклотрона

- У сваком циклусу честица повећава своју енергију за константну вредност

$$E_{kin} = \frac{q^2 r^2 B^2}{2m} \quad (\text{нерелативистичка формула})$$

- У класичним условима рада максимална енергија честица на излазу је око 25 MeV за протоне и деутероне, односно 50 MeV.
- Циклотроне карактерише релативно јака струја излазног снопа
- За циклотроне тешких јона однос излазне енергије по нуклеону је

$$\frac{E}{A} = K \left(\frac{Z}{A} \right)^2 \quad K - \text{фактор је карактеристика циклотрона}$$

Карактеристике циклотрона

- Шта ако желимо веће енергије?

- $\omega_{cf} = \frac{v}{r} = \frac{q}{m} B = \frac{q}{\gamma m_0}$

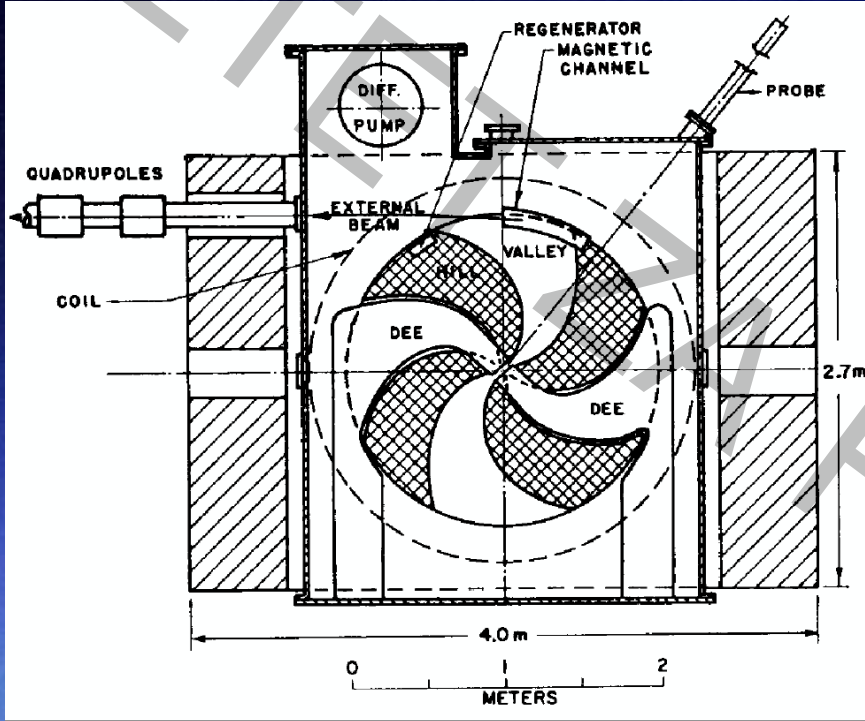
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

- Мењати

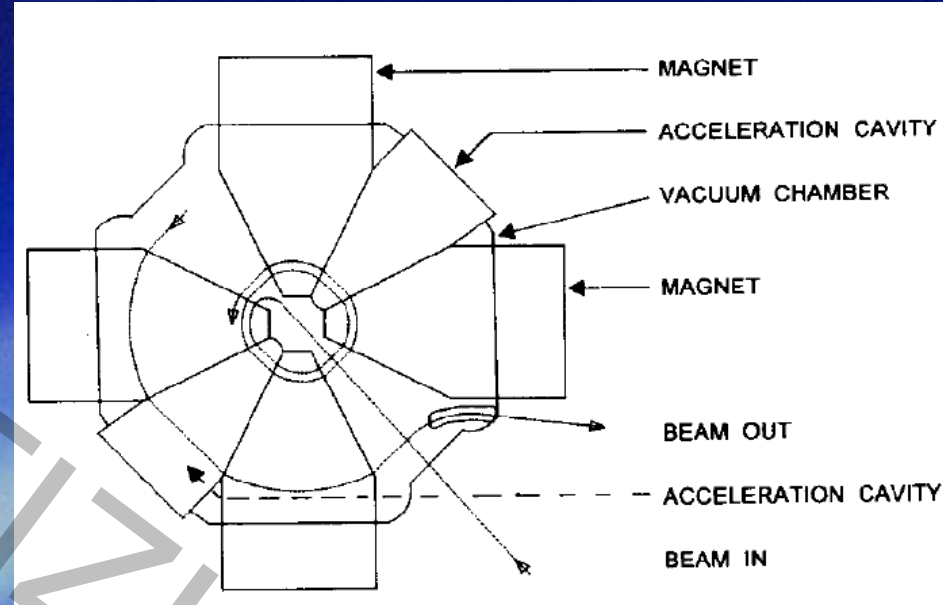
- Фреквенцију
- Магнетно поље
- Обоје

- Секторски фокусирани циклотрони (промена B)
- Синхроциклотрони (промена ω)
- Синхротрони (промена ω и B)

Решења



max убрзања протона до
 $m_p = 2m_0$



Секторски раздвојен циклотрон

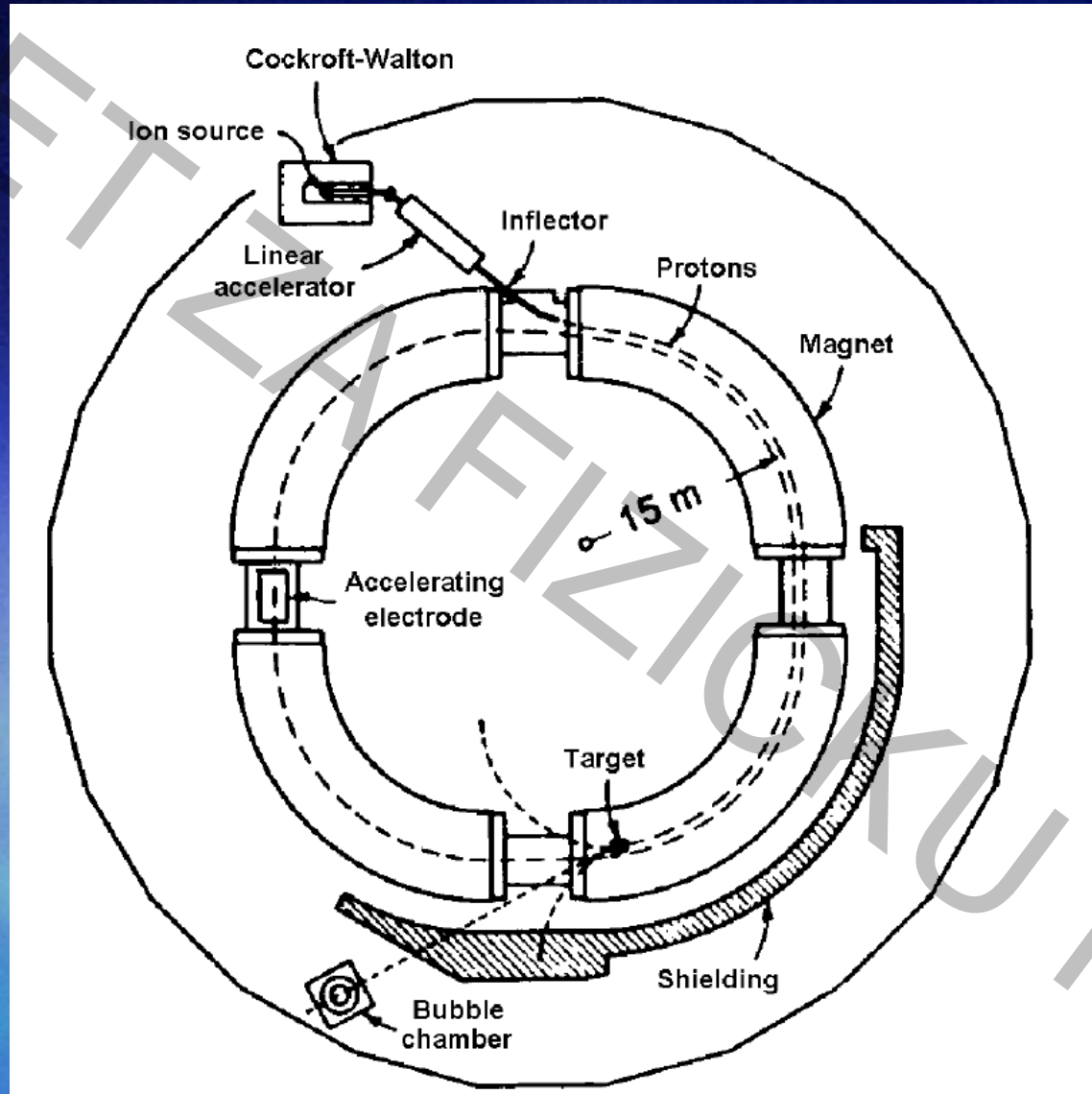
Синхроциклотрони и синхротрони

- Синхроциклотрони задржавају оригинални принцип циклотрона уз варирање фреквенције
- Синхротрон убрзава честице дуж фиксиране путање при чему се одржава баланс V и ω

$$E_k = v\pi r^2 Bq$$

- Синхротрони обично раде у пулсевима и само честице у пулсу су у синхронизацији са променом фреквенције у делу за убрзавање
- То значи и мање излазне струје
- Обично као улаз има снап из линеарног акцелератора
- Сваки ступањ у савијању снопа прати закочно x -зрачење (синхротронско зрачење) што захтева адекватну заштиту

Синхротрон



Складишћење снопова

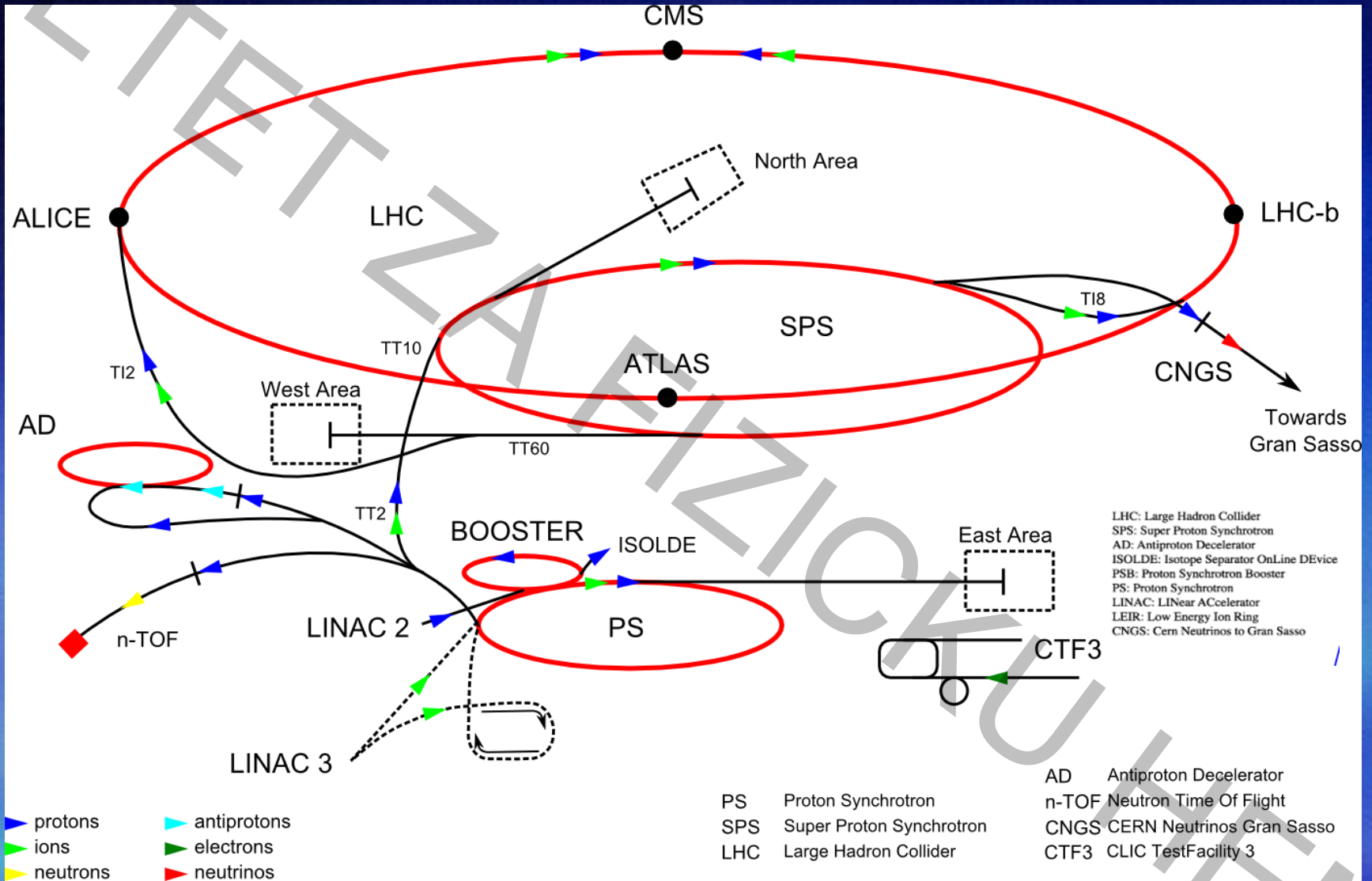
- Варијанта синхротрона која служи за „чување“ (неколико сати) најчешће лептона и лакших хадрона до употребе
 - Експерименти са синхротронским зрачењем
 - Експерименти у сударачима (LHC...)
- Колајдери су такође синхротрони



Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN)



Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

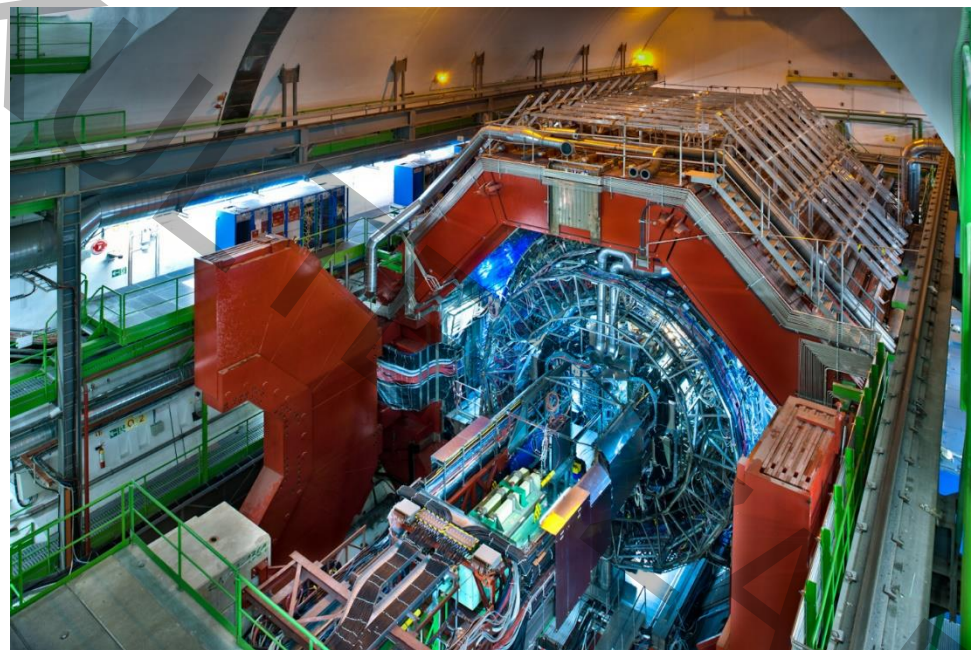


Делови CERN-а

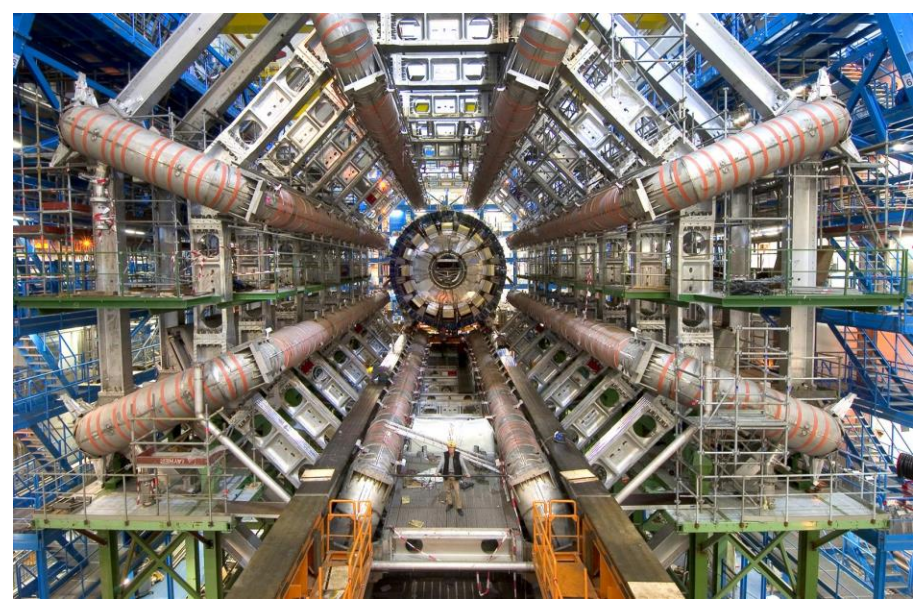
- Извор протона
- Линеарни акцелератор (LINAC2) $E_p = 50$ MeV
- Синхротронски “booster” $E_p = 1,4$ GeV
- Протонски синхротрон $E_p = 25$ GeV
- Супер протонски синхротрон $E_p = 450$ GeV
- Large Hadron Collider 6,5 TeV



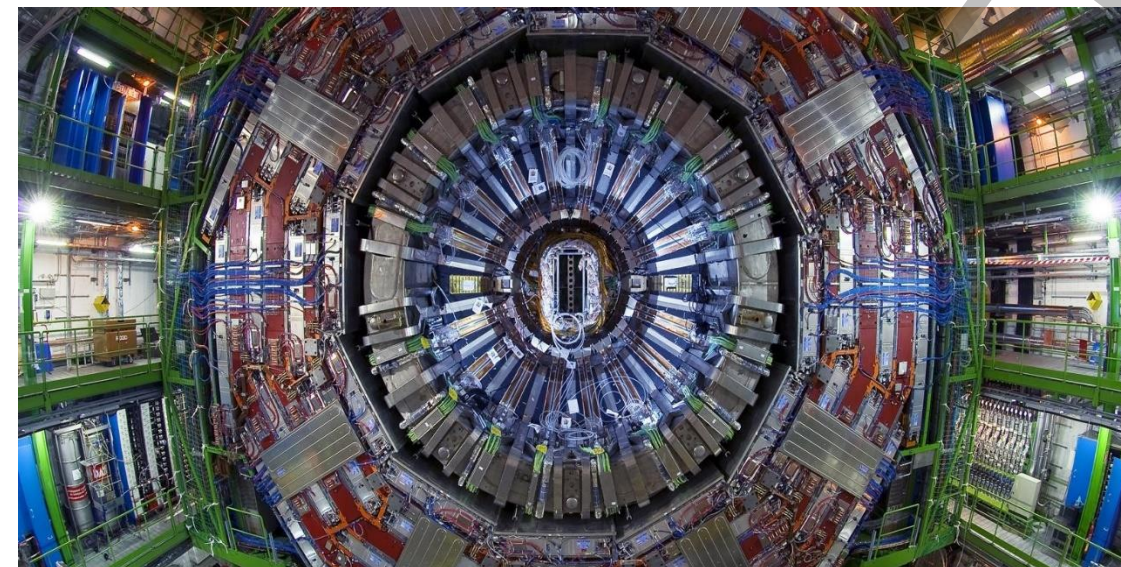
U
L
E
T
E
T
A
V
A
E
N
I
C
K
A
D
H
E
M



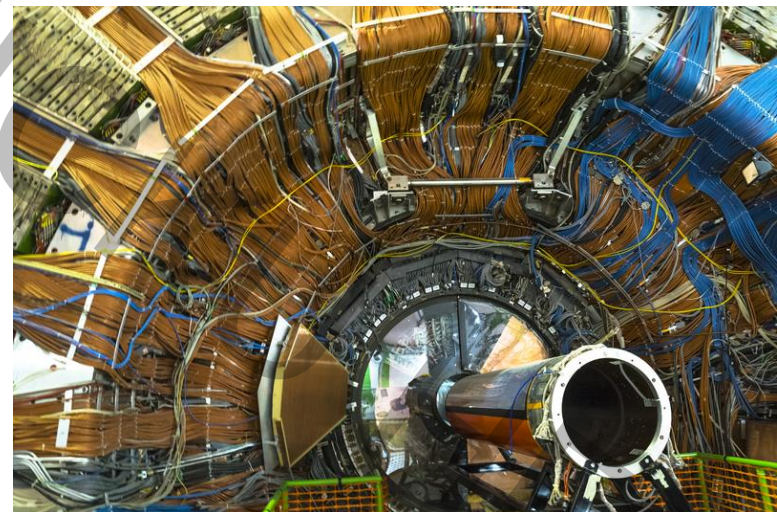
ALICE



ATLAS



CMS



LHCb

Детектори честица

