



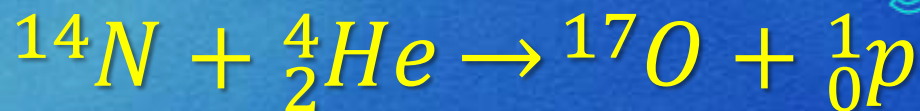
Факултет

Акцелератори честица

Физички
хемију Београд

Принципи

- ▶ Акцелератори су уређаји за убрзавање наелектрисаних честица.
- ▶ Да би честица продрла у језгро неходно 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

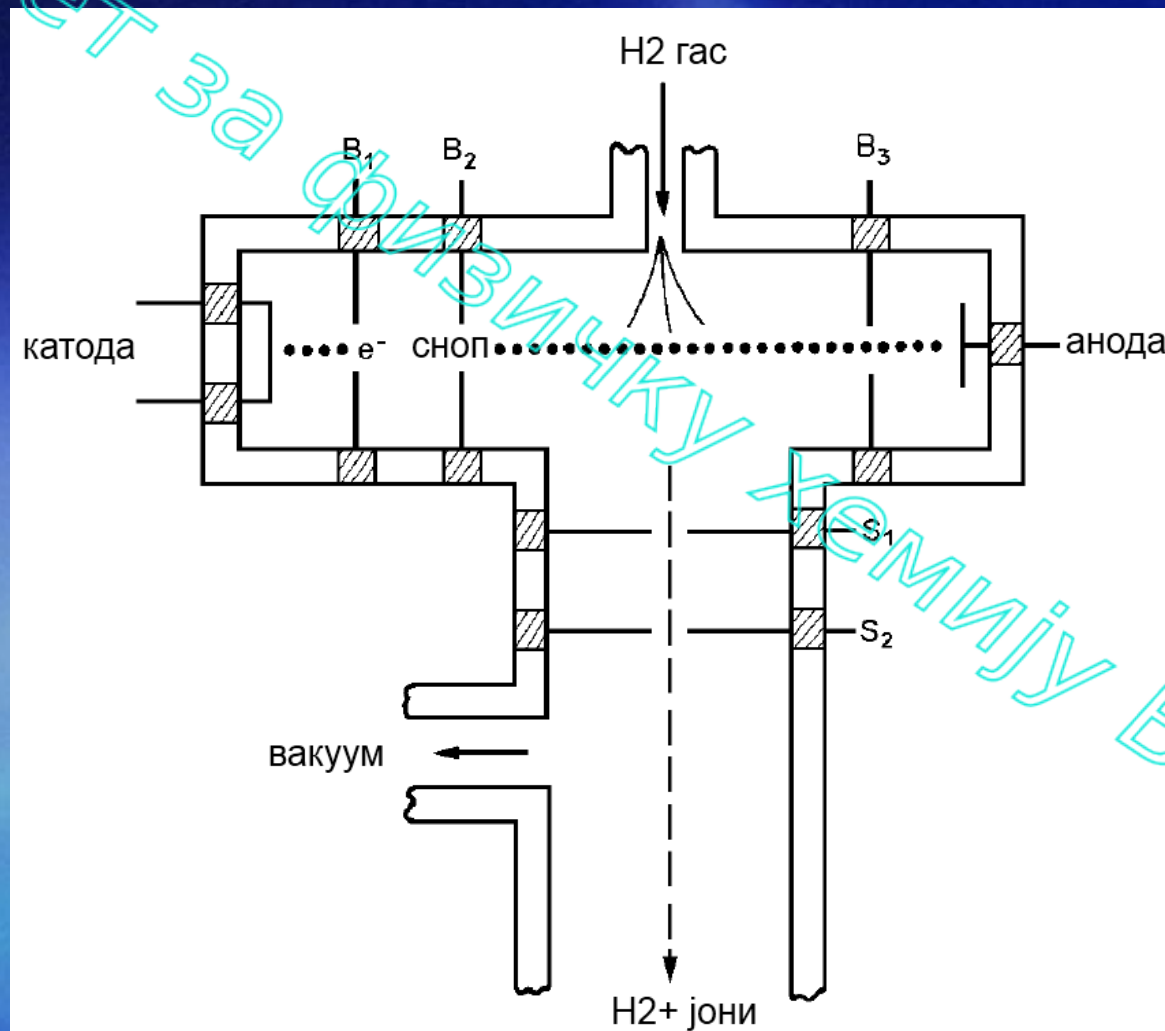
- За нека језгра могуће је чак и са енергијама честица од 100 keV

► Шта је неопходно?

- Јонски извор
- Машина за убрзавање честица
- Cockcroft & Walton 1932 – први акцелератор честица

Јонски извори

- Класични извори –бомбардовање снопом високоенергетских електрона



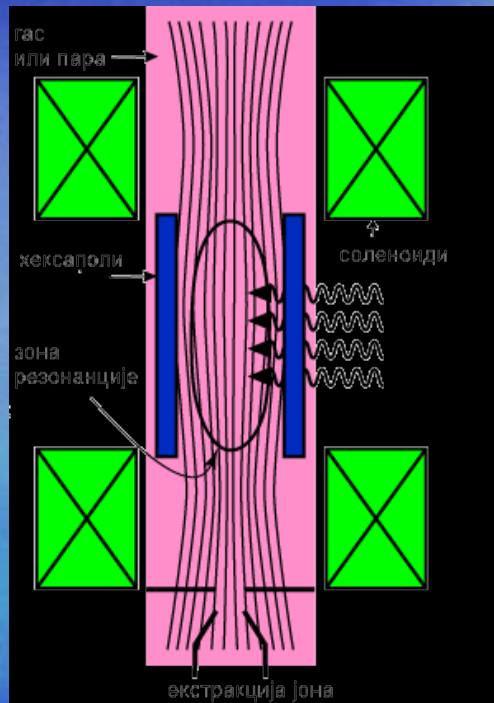
ECR јонски извор



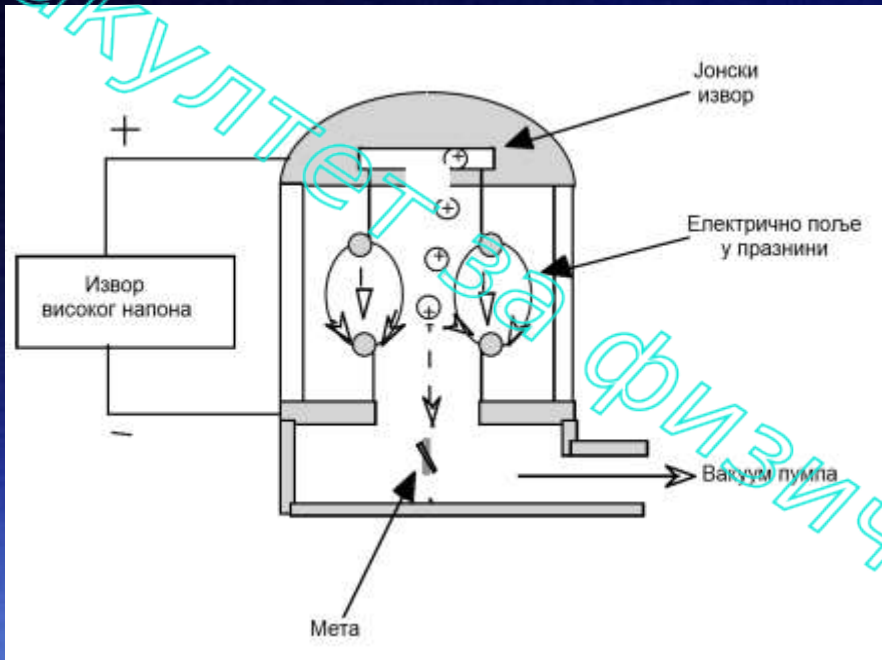
$$\frac{mv^2}{r} = qv \times B$$

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

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



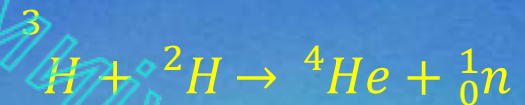
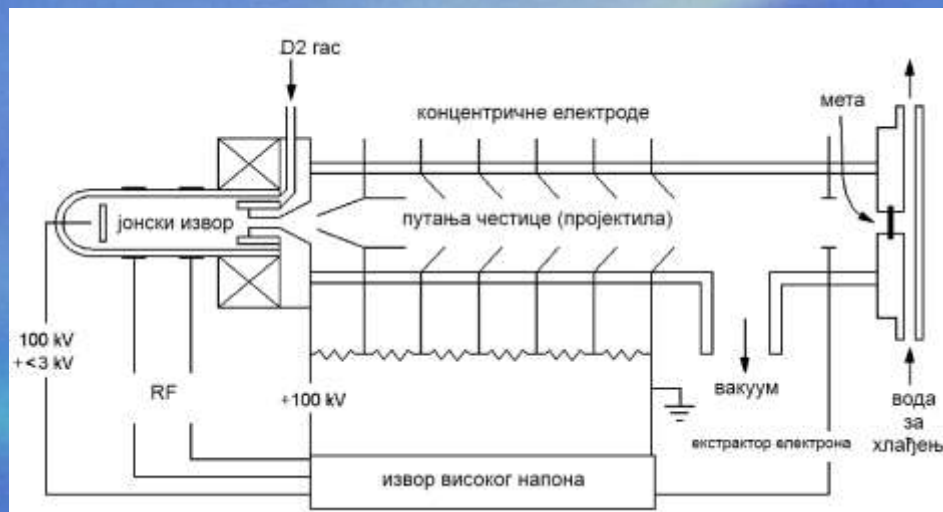
Cockcroft-Walton-ов акцелератор



$$E_k = nqV$$

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

- Посредна производња брзих неутрона
- тунел ефекат

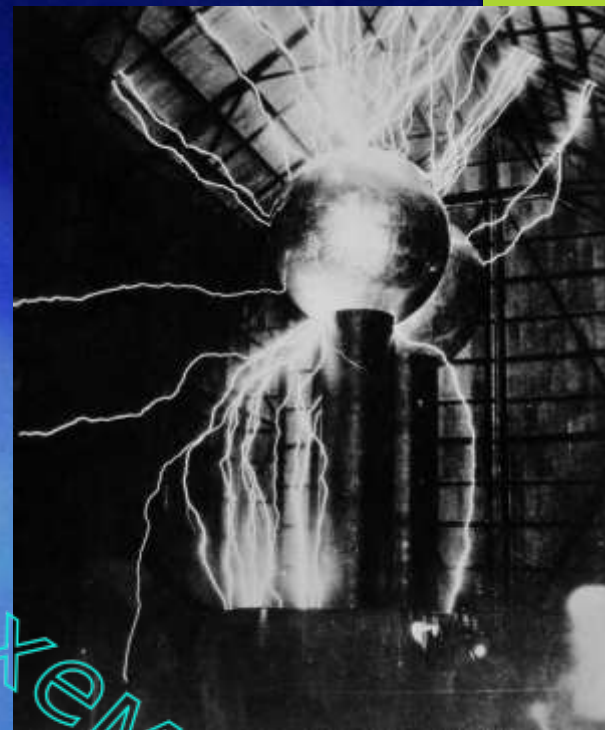
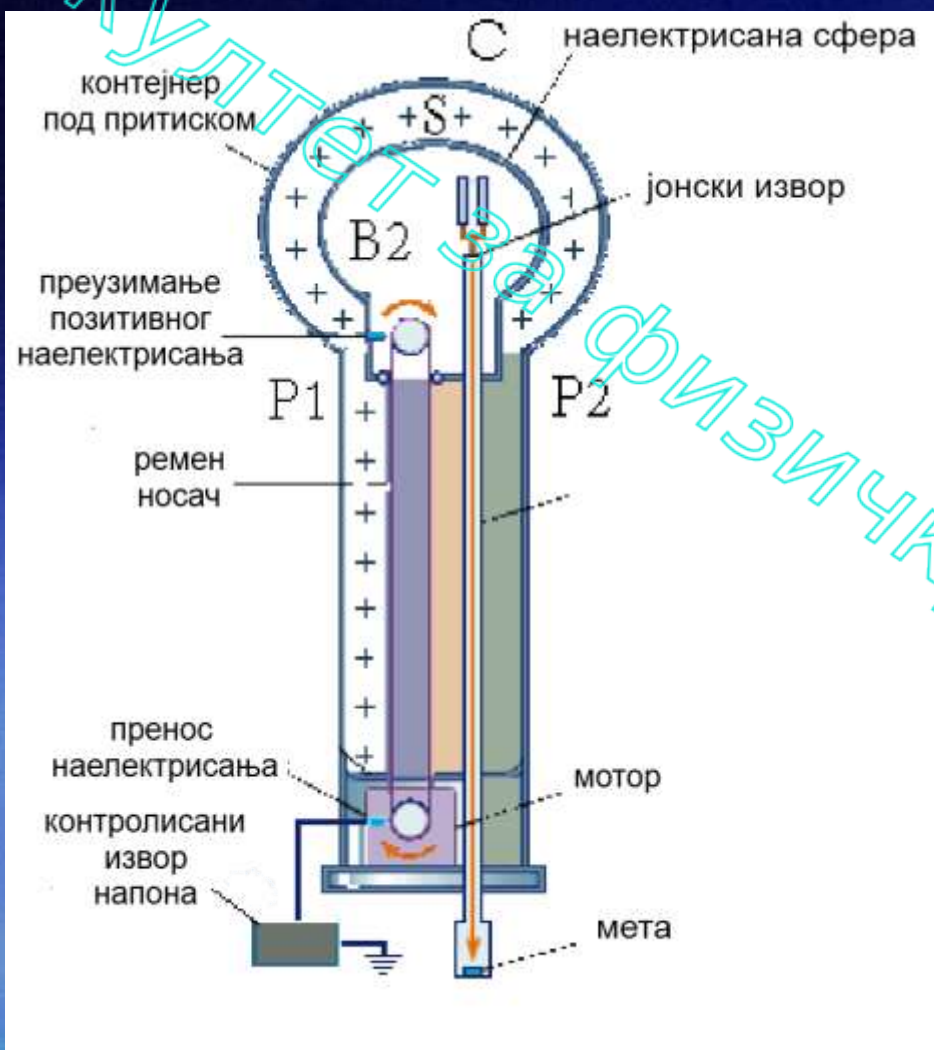


$$100 \text{ kV}, 0,5 \text{ mA}$$

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

$$E_n \sim 14 \text{ MeV}$$

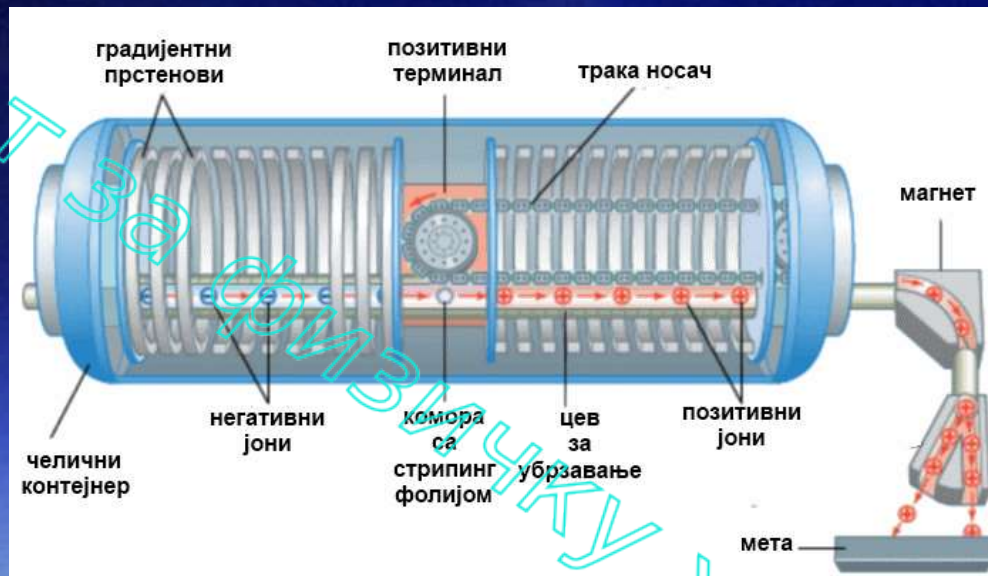
van der Graaf-ов акцелератор



- Максимална кинетичка енергија честица $\sim 15 \text{ MeV}$ (уз коришћење изолаторских гасова N_2 , CO_2 ...)
- $10\text{-}100 \mu\text{A}$

Предност: прецизна контрола енергије честица

Тандем van der Graaf акцелератор



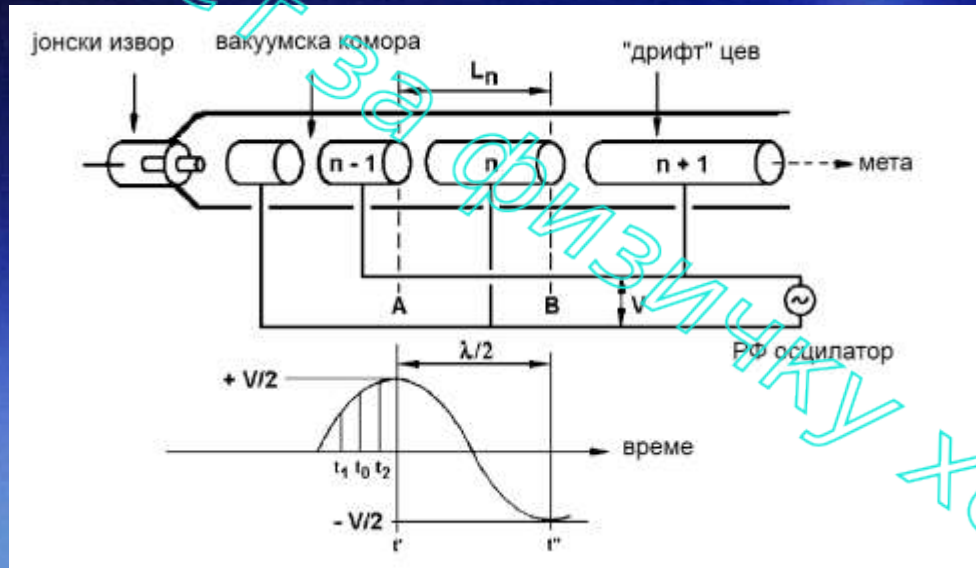
Ефективно наелектрисање после стрипинг фолије

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

Енергија честица 20-50 MeV

Вишестепени линеарни акцелератори (LINAC)

► Wideröe-ов акцелератор

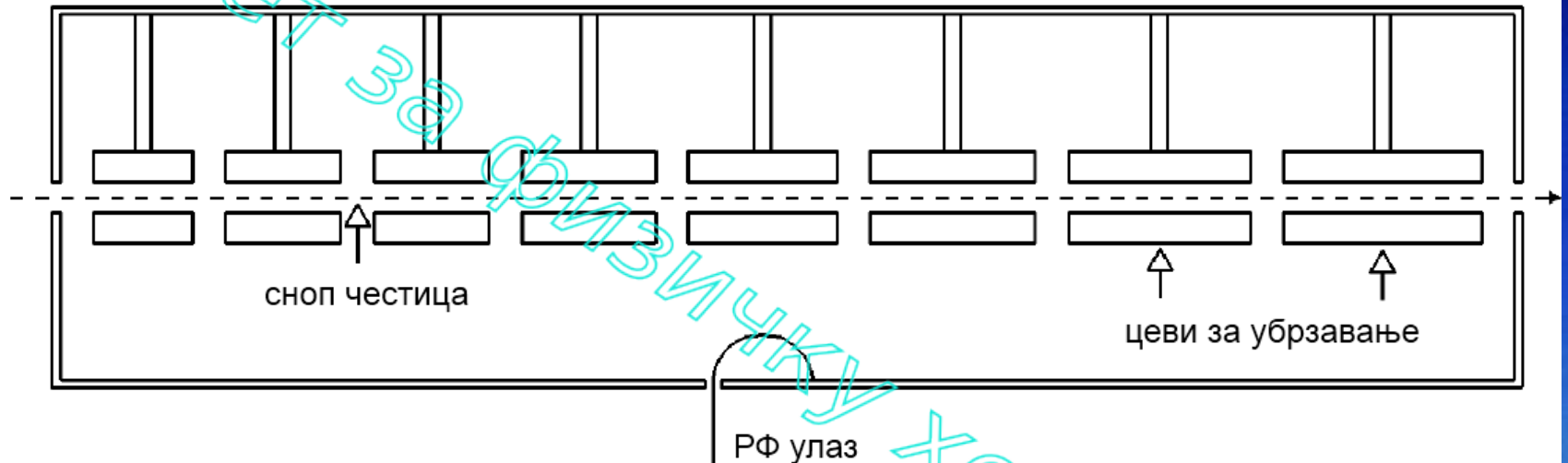


$$\frac{L_n}{v} = \frac{\lambda}{2c}$$

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

- 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-ов LINAC



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

LINAC пример

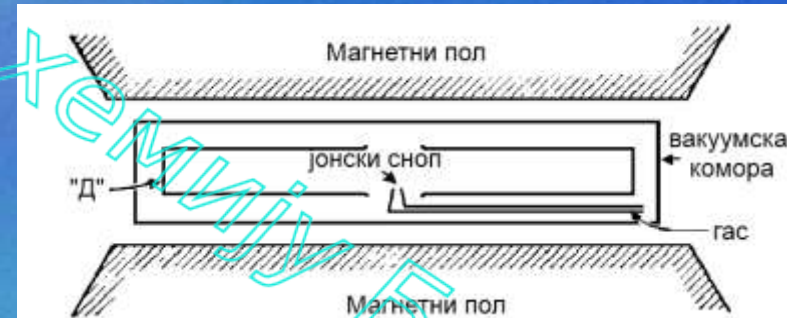
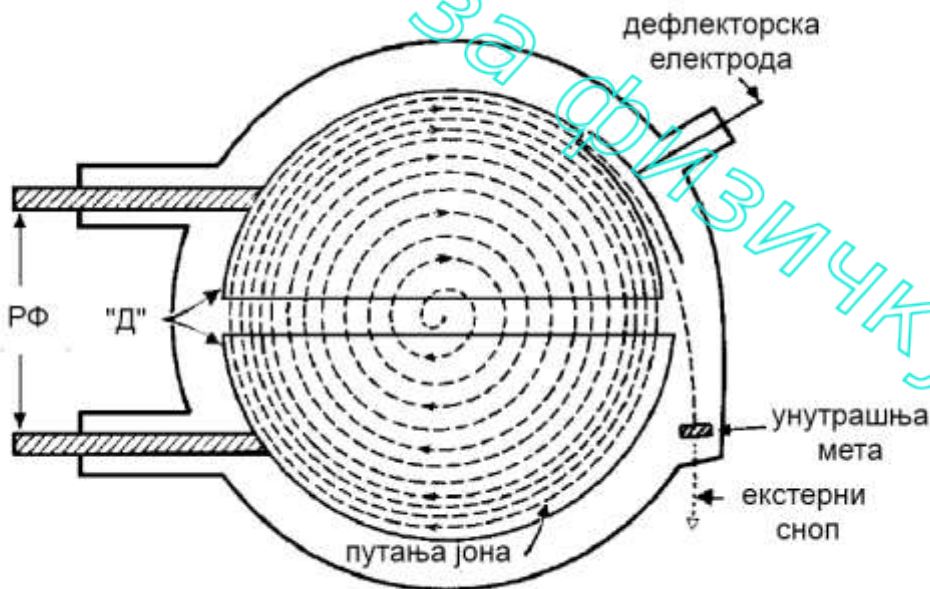
- ▶ Stanford linear accelerator – SLAC



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

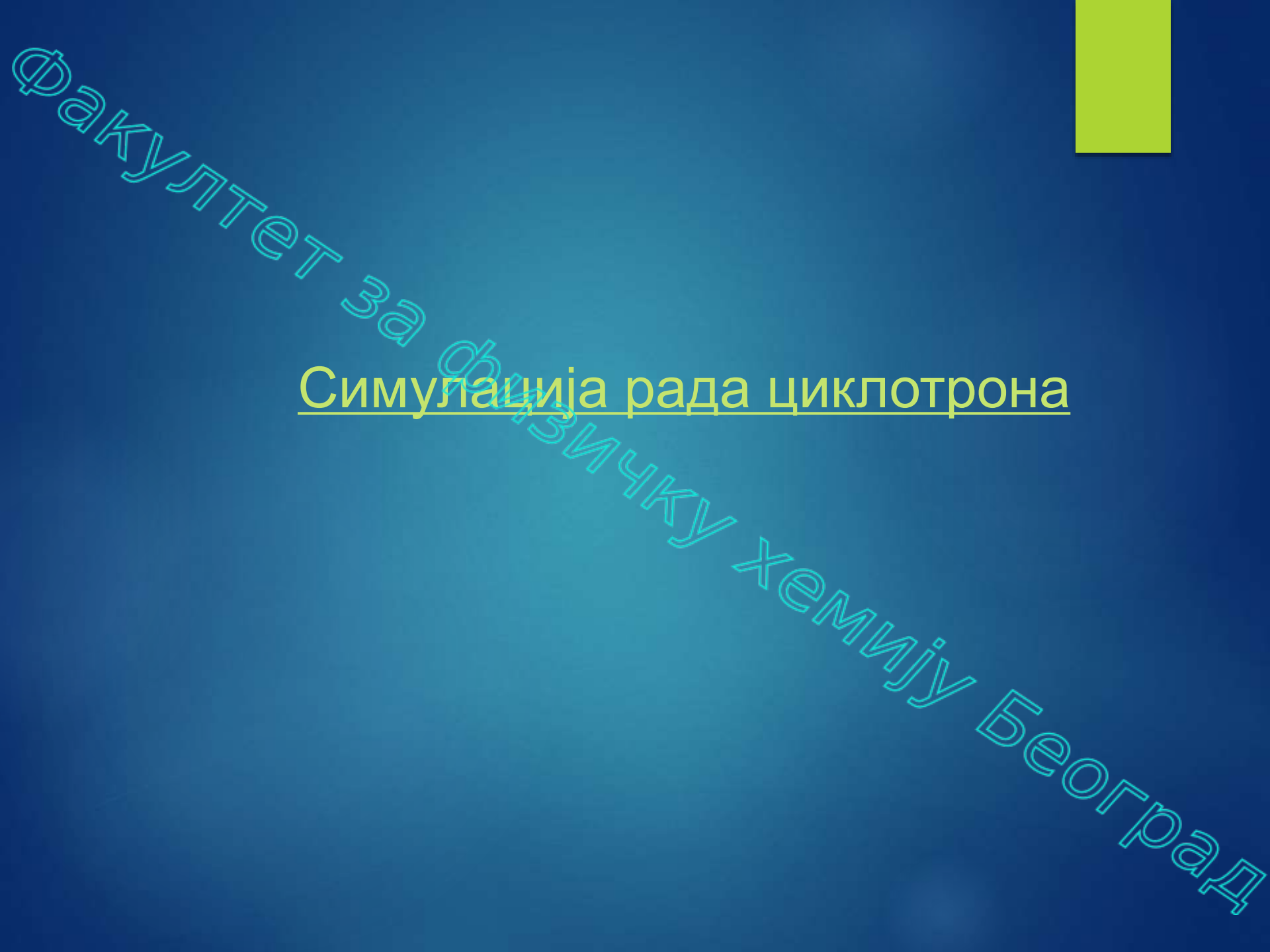
Циклотрон

- Lawrence & Livingston (1931)



$$\frac{mv^2}{r} = qv \times B$$

$$\omega_{cf} = \frac{v}{r} = \frac{q}{m} B = \text{const}$$



Симулација рада циклотрона

Факултет за физичку хемију Београд

Карактеристике циклотрона

- ▶ У сваком циклусу честица повећава своју енергију за константну вредност

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

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

Карактеристике циклотрона

- ▶ Шта ако желимо веће енергије?

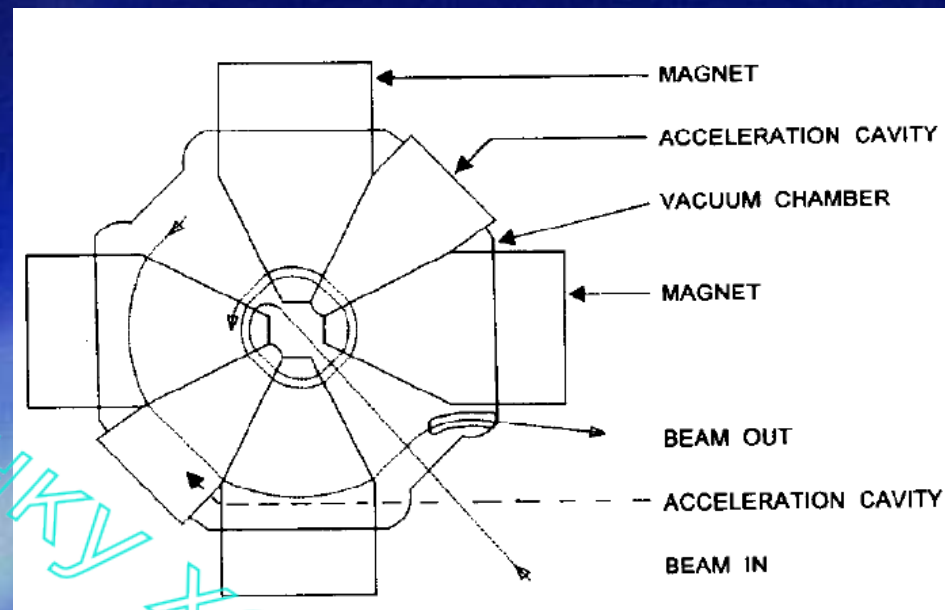
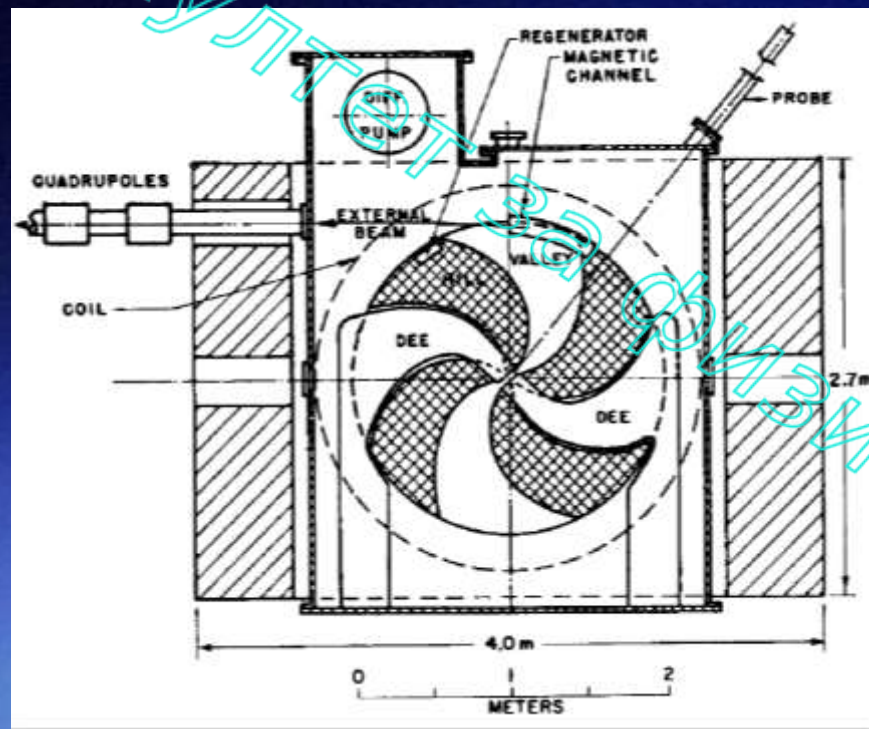
$$\omega_{cf} = \frac{v}{r} = \frac{q}{m} B = \frac{q}{\gamma m_0}$$

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

- 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

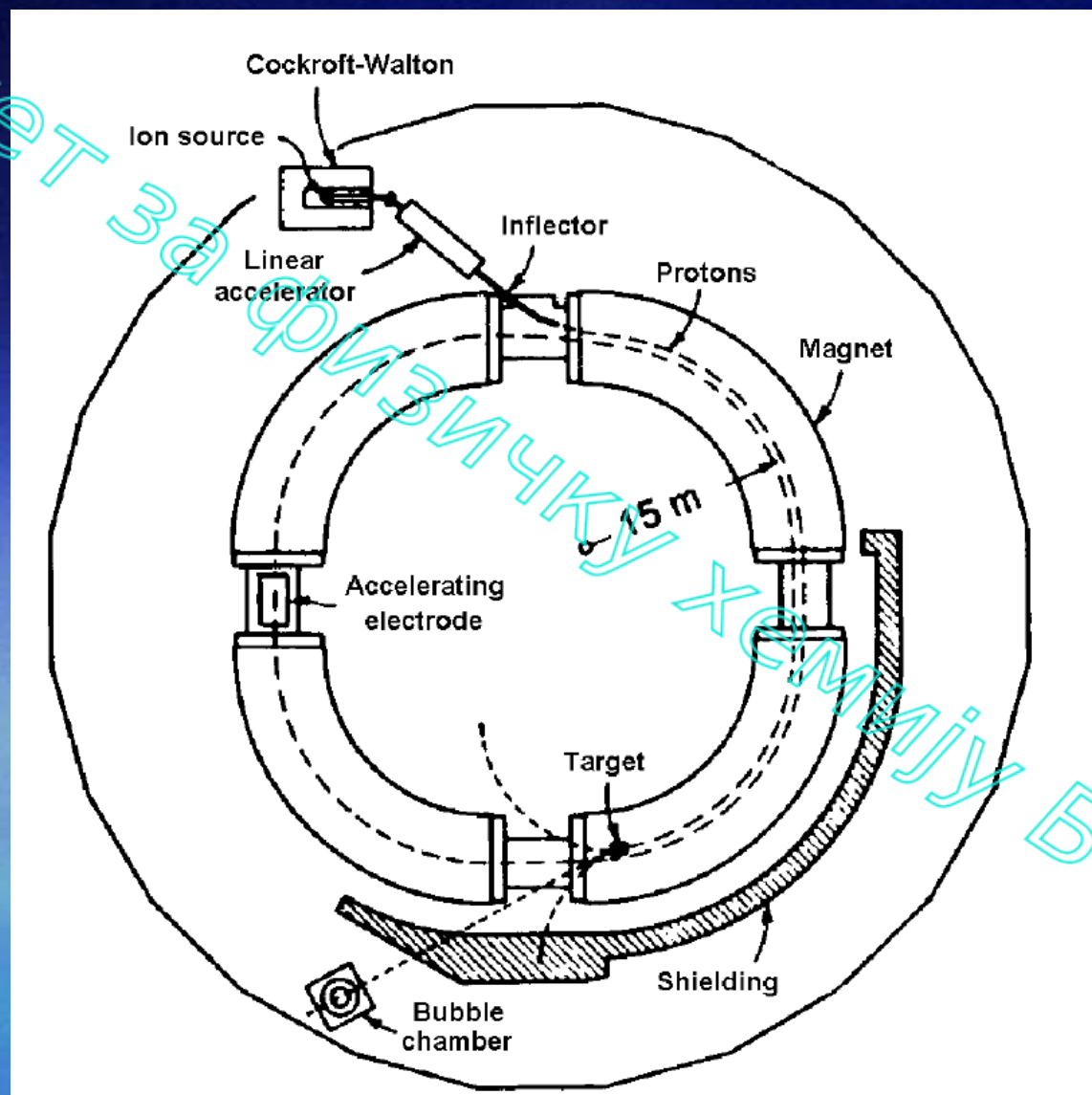
Синхроциклотрони и синхротрони

- ▶ Синхроциклотрони задржавају оригинални принцип циклотрона уз варирање фреквенције
- ▶ Синхротрон убрзава честице дуж фиксиране путање при чему се одржава баланс B 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 сноп из линеарног акцелератора
- ▶ Сваки ступањ у савијању снопа прати заочно x -зрачење (синхротронско зрачење) што захтева адекватну заштиту

Синхротрон



Складишћење снопова

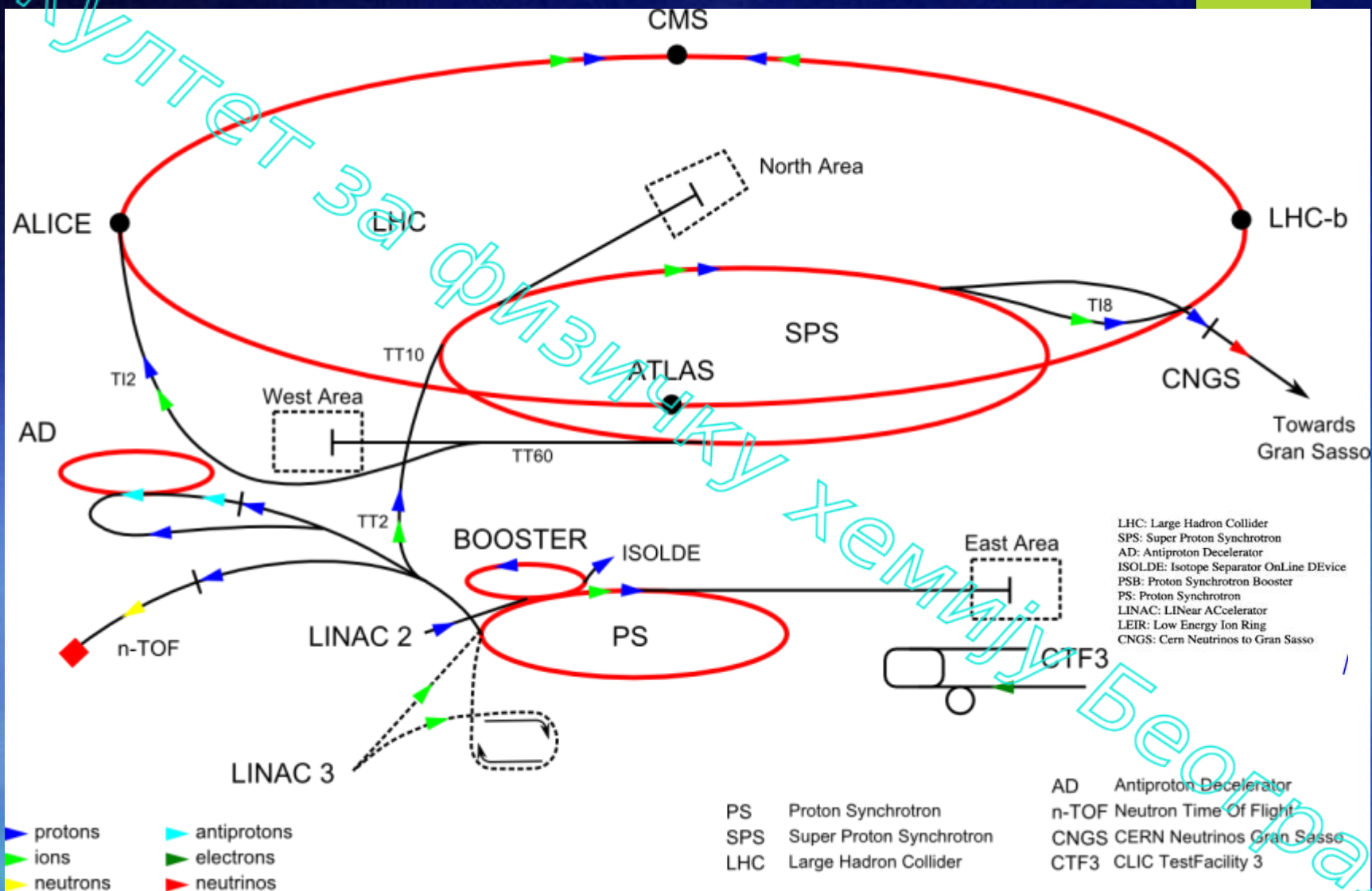
- ▶ Варијанта синхротрона која служи за „чување“ (неколико сати) најчешће лептона и лакших хадрона до употребе
 - ▶ Експерименти са синхротронским зрачењем
 - ▶ Експерименти у сударачима (LHC...)
- ▶ Колајдери су такође синхротрони



Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN)



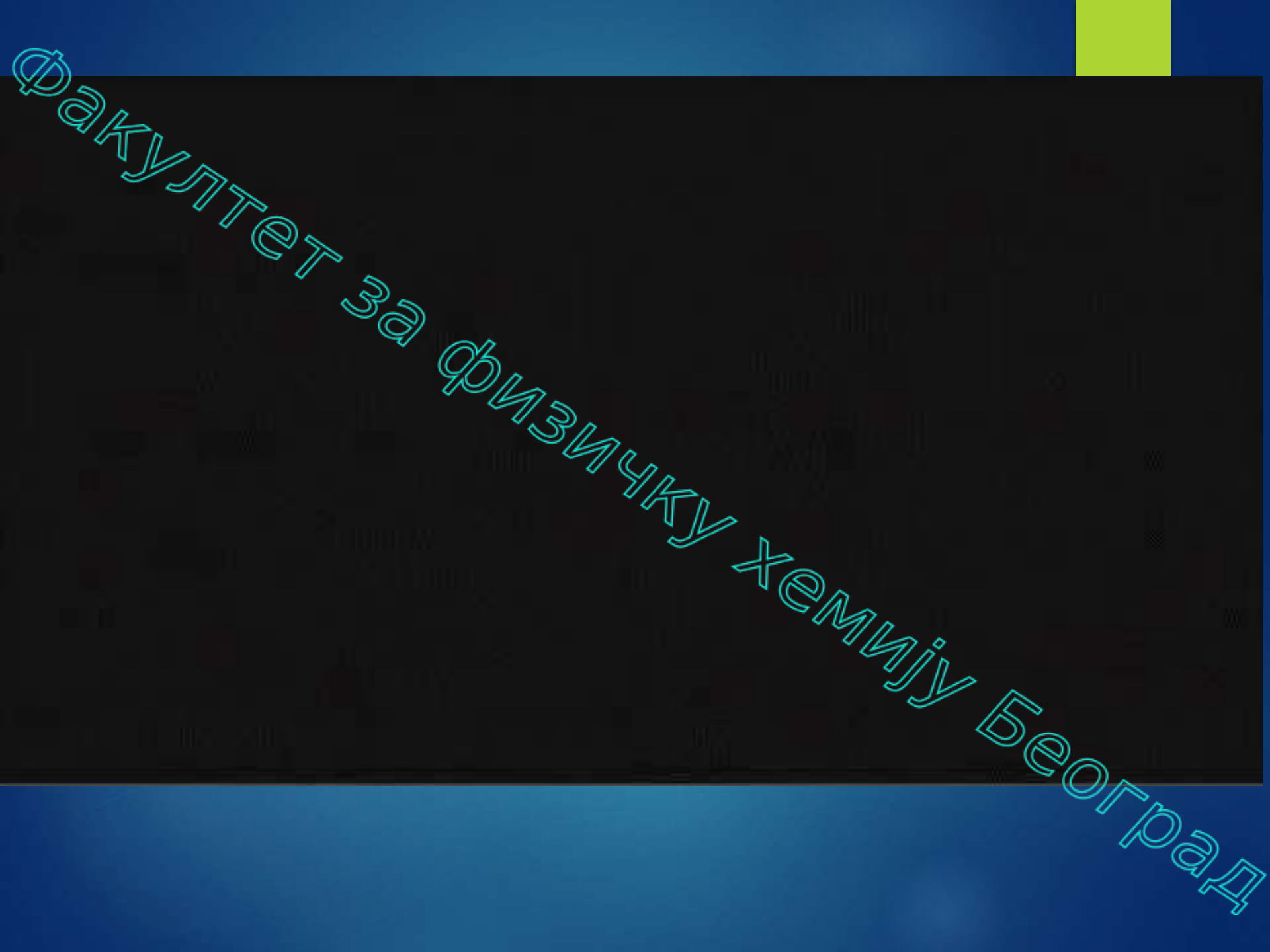
Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire



Делови CERN-а



- ▶ Извор протона
- ▶ Линеарни акцелератор (LINAC2) ($\rightarrow$ 2017 биће замењен са LINAC4) $E_p = 50 \text{ MeV}$
- ▶ Синхротронски “booster” протона $E_p = 1,4 \text{ GeV}$
- ▶ Протонски синхротрон $E_p = 1,4 \text{ GeV}$
- ▶ Супер протонски синхротрон $E_p = 450 \text{ GeV}$
- ▶ Велики хадронски сударач – LHC $E_p = 7 \text{ TeV}$



Факултет за физичку хемију Београд



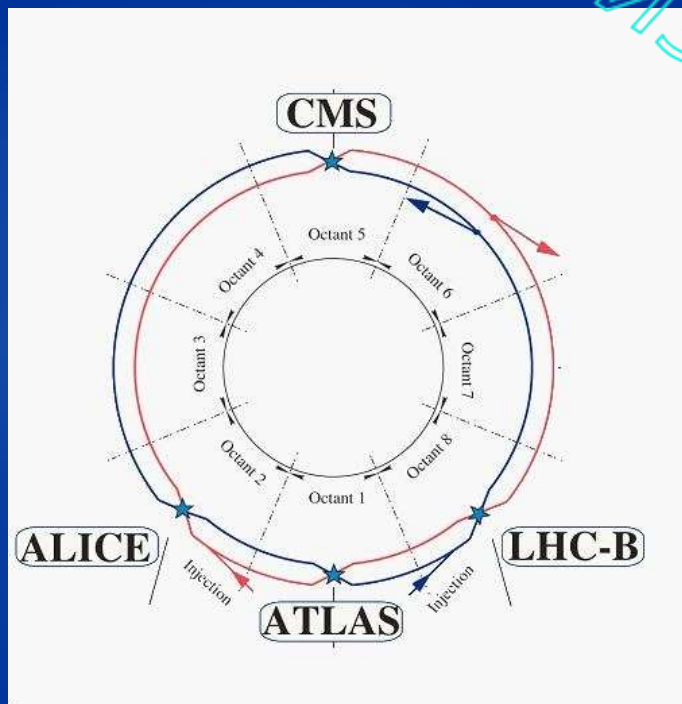
LINAC 2 (1972)



Синхротронски "booster" протона



Протонски синхротрон



LHC



Супер-протонски синхротрон

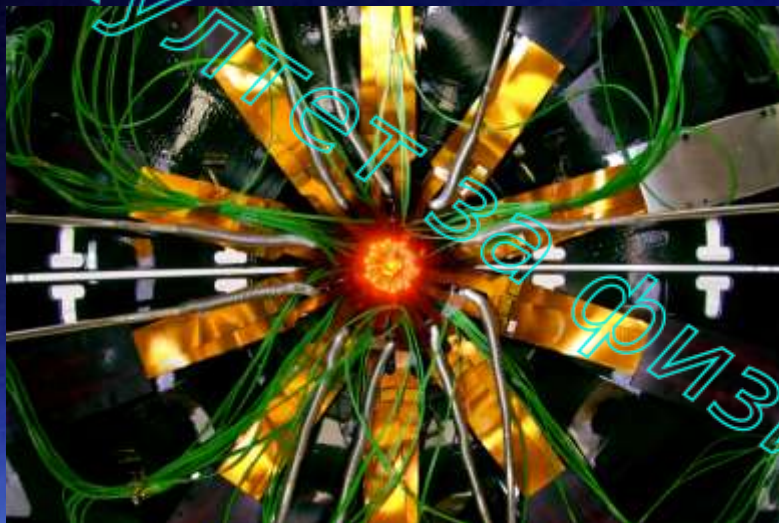
LHC

LHC

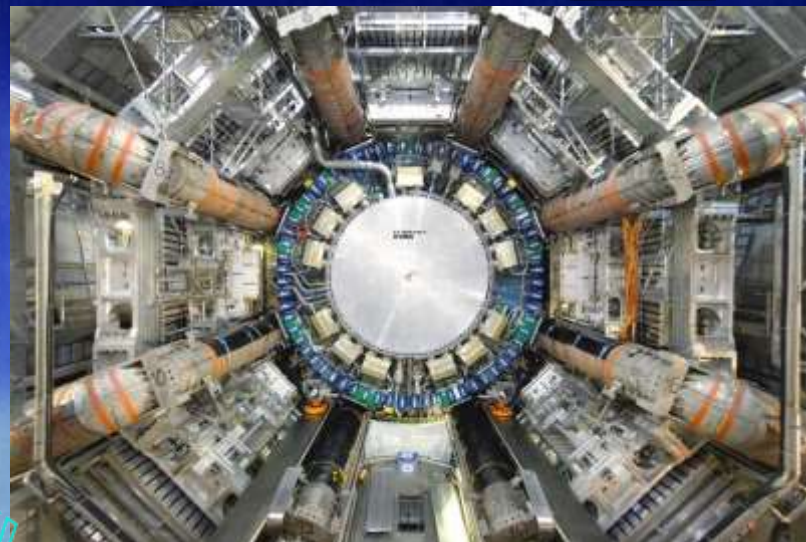
Факултет за физику хемију Београд

Детектори на LHC-у

A
L
I
C
E



A
T
L
A
S



C
M
S



L
H
C

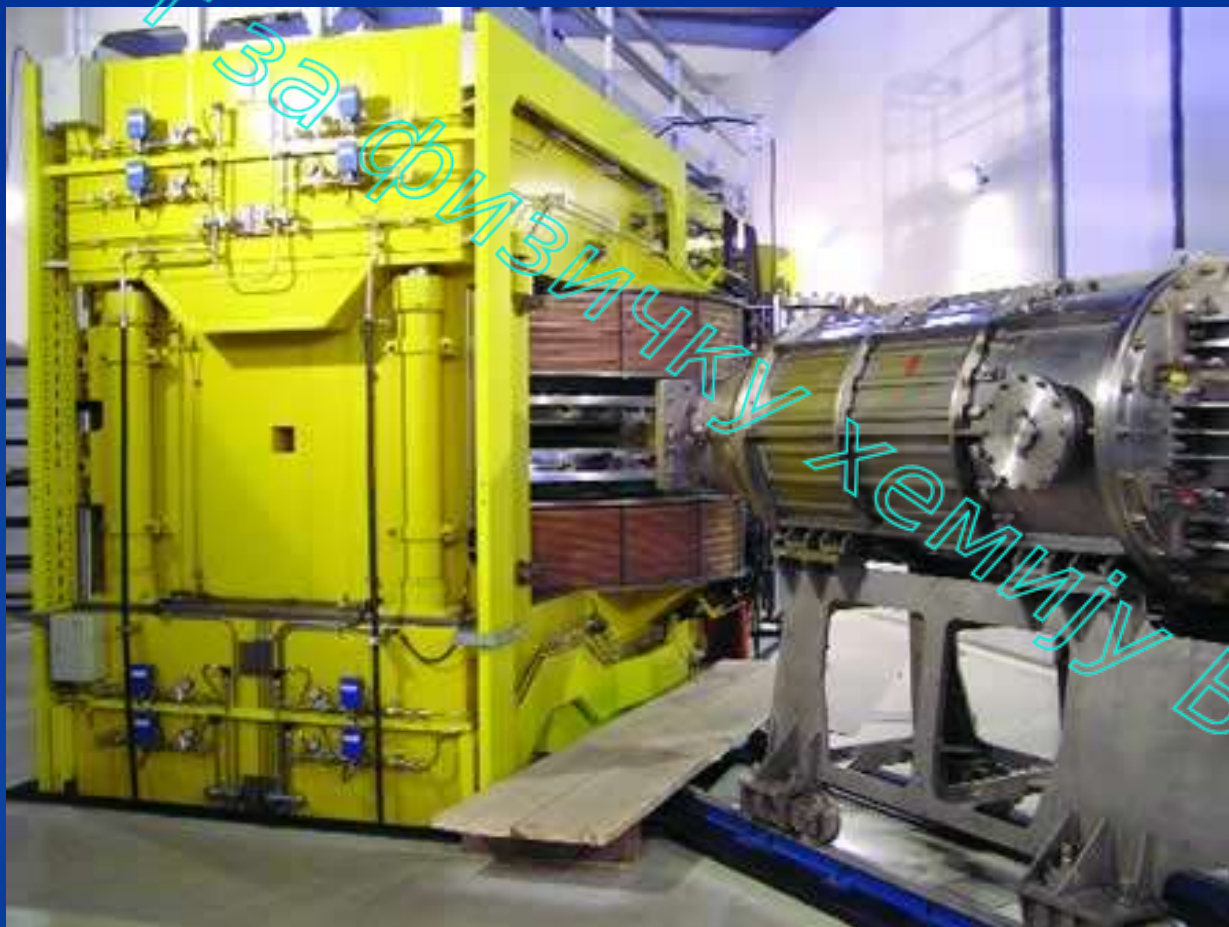


Примене циклотрона

Зрачна терапија

- ▶ Акцелератори електрона/генератори X-зрачења
- ▶ Акцелератори протона-протонска терапија
- ▶ Производња радиоизотопа за комерцијалне и медицинске примене

Додатак- Акцелераторска инсталација ТЕСЛА



Планирани канал за производњу радиоизотопа

