Акцелератори честица

Факултет за физичку хемију Београд

Принципи

- Акцелератори су уређаји за убрзавање наелектрисаних честица.

- Да би честица продрла у језгро неоходно је да има
  енергију
  - већу од висине баријере или
  - нешто нижу од висине баријере (тунел ефекат)

- Ратерфордови експерименти са трансмутацијама језгра азота

$$^{14}N + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{17}O + {}^{1}_{0}p$$

- Али...

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

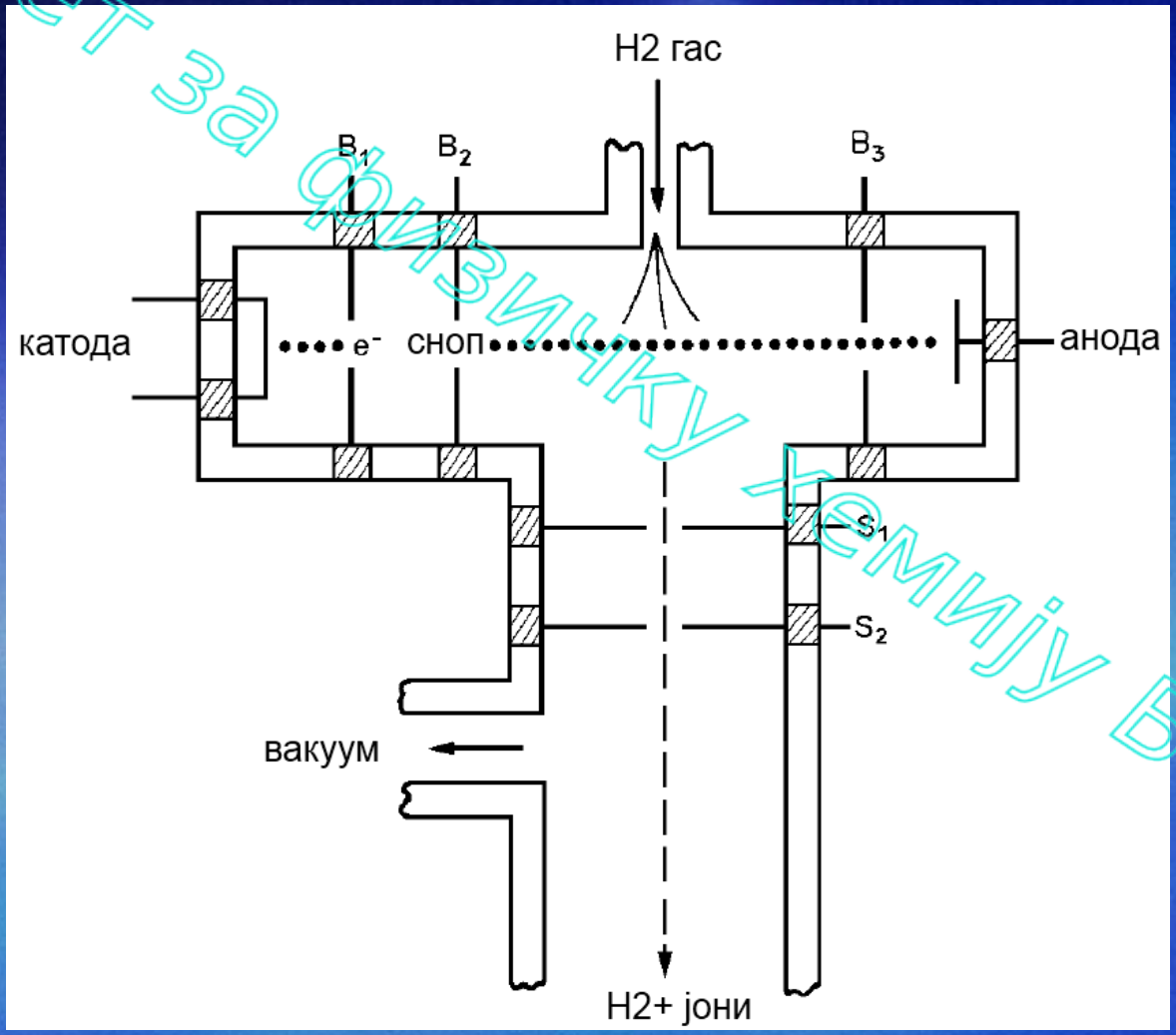
Факултет за физичку хемију Београд

Факултет за физичку хемију Београд

- 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

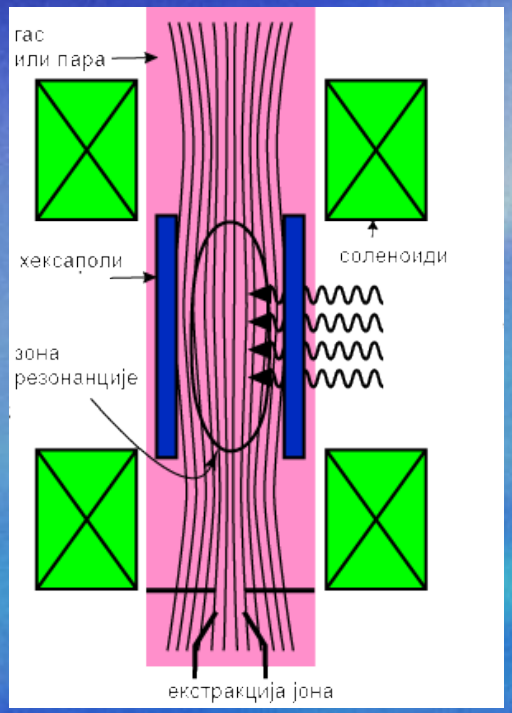
- Класични извори –бомбардовање снопом високоенергетских електрона



Факултет за физичку хемију Београд

ECR јонски извор





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

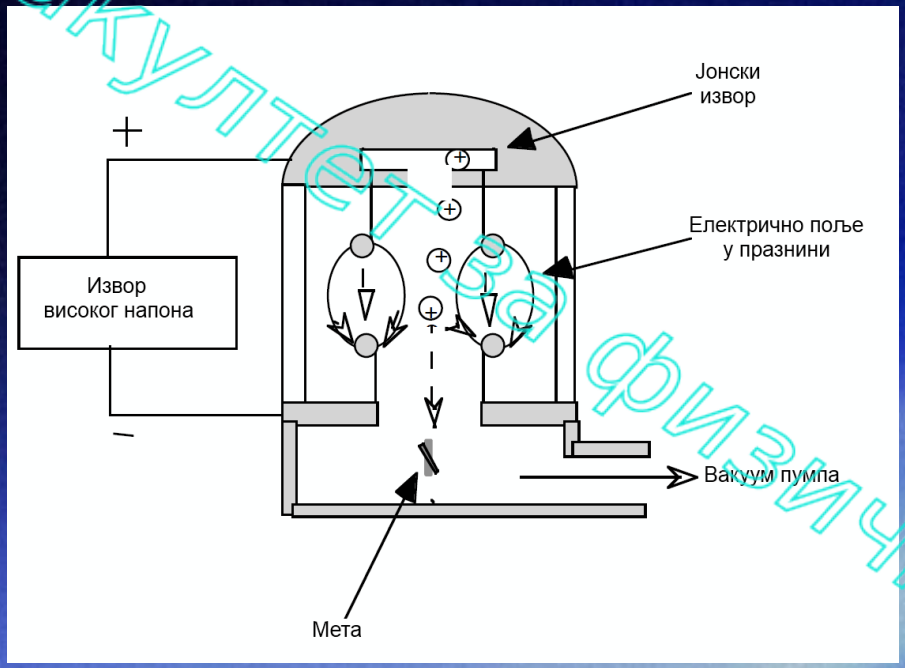
$$\omega_{cf} = \frac{v}{r} = \frac{q}{m}B$$

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

Факултет за физичку хемију Београд

Cockcroft-Walton-ов акцелератор

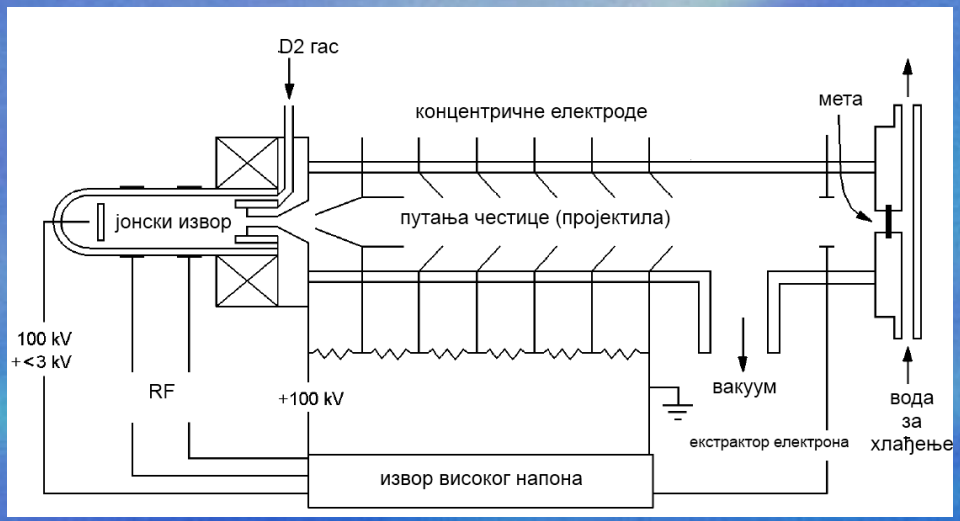
Факултет за физичку хемију Београд



$$E_k = \mathrm{nqV}$$
$$E_k(max) \sim 4\ MeV$$

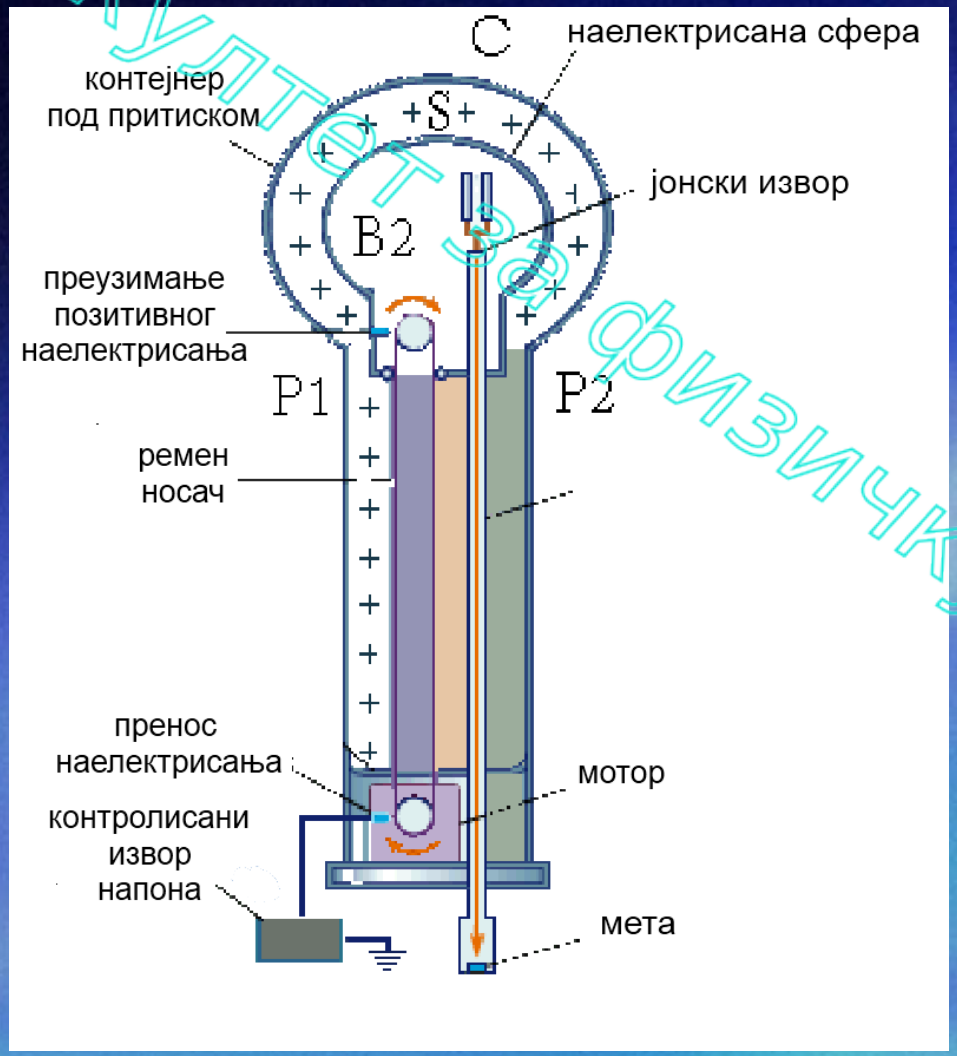
-Посредна поизводња брзих неутрона
-тунел ефекат

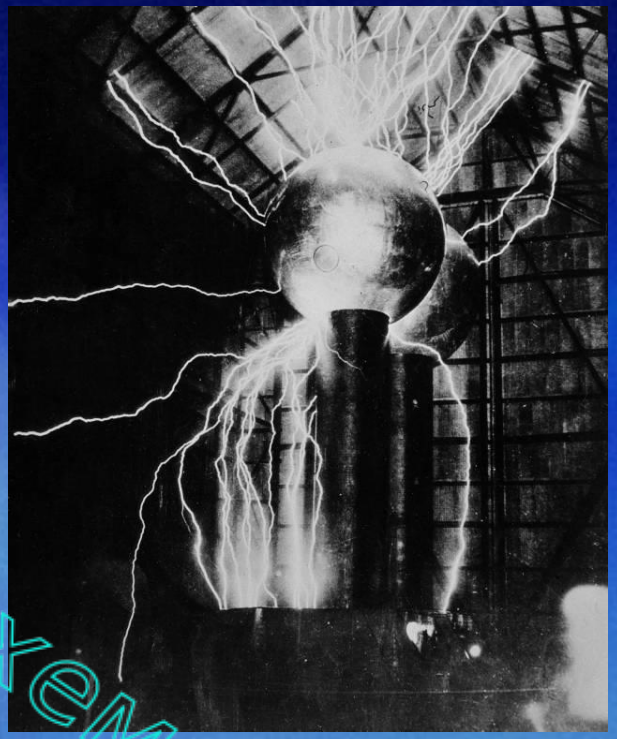
$$^3H + {}^2H \rightarrow {}^4He + {}^1_0n$$



$$100\ kV, 0{,}5\ mA$$
$$\Phi_n \sim 10^{10} n/s$$
$$E_n \sim 14\ MeV$$

van der Graaf-ов акцелератор



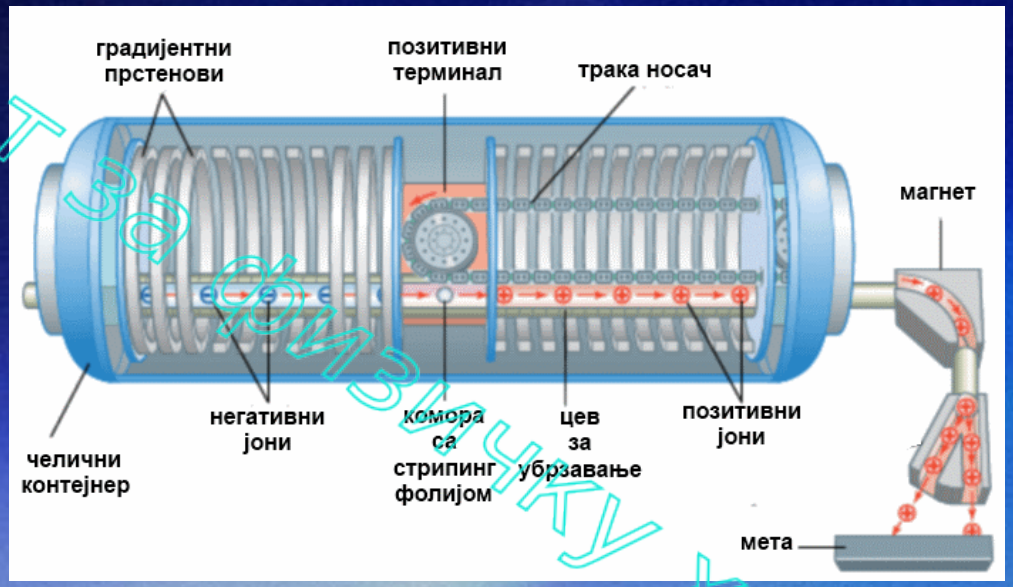


- Максимална кинетичка енергија честица ~15 MeV (уз коришћење изолаторских гасова N_2, CO_2…)
- 10-100 μA

Предност: прецизна контрола енергије честица

Факултет за физичку хемију Београд

Тандем van der Graaf акцелератор



Ефективно наелектрисање после стрипинг фолије

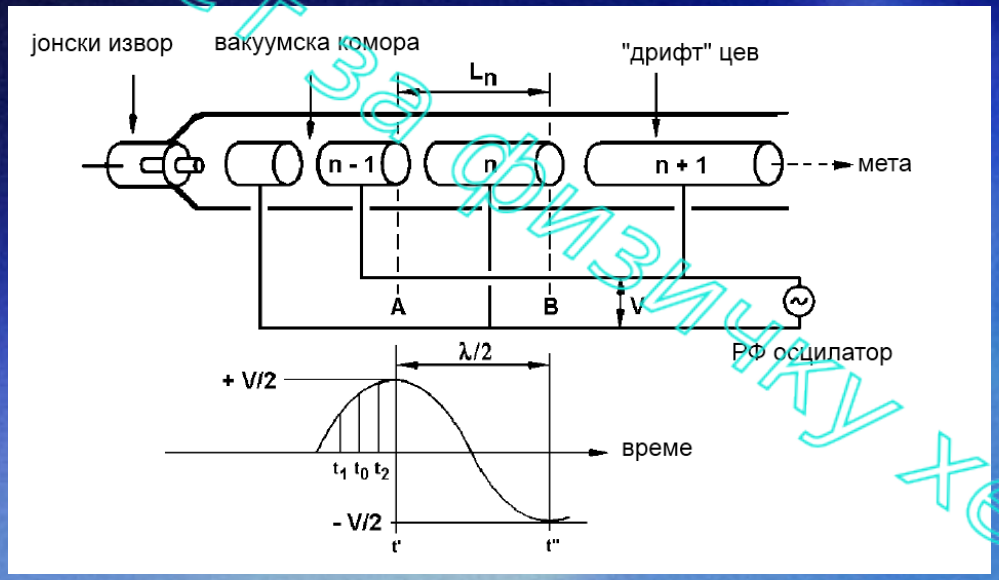
$$z = Z\,[\,1 + \{v/(3.6\times10^{6}\ (\mathrm{m/s})\ Z^{0.45})\}^{-1.67}\,]^{0.6}$$

Енергија честица 20-50 MeV

Факултет за физичку хемију Београд

Вишестепени линеарни акцелератори (LINAC)

- Wilderöe-ов акцелератор



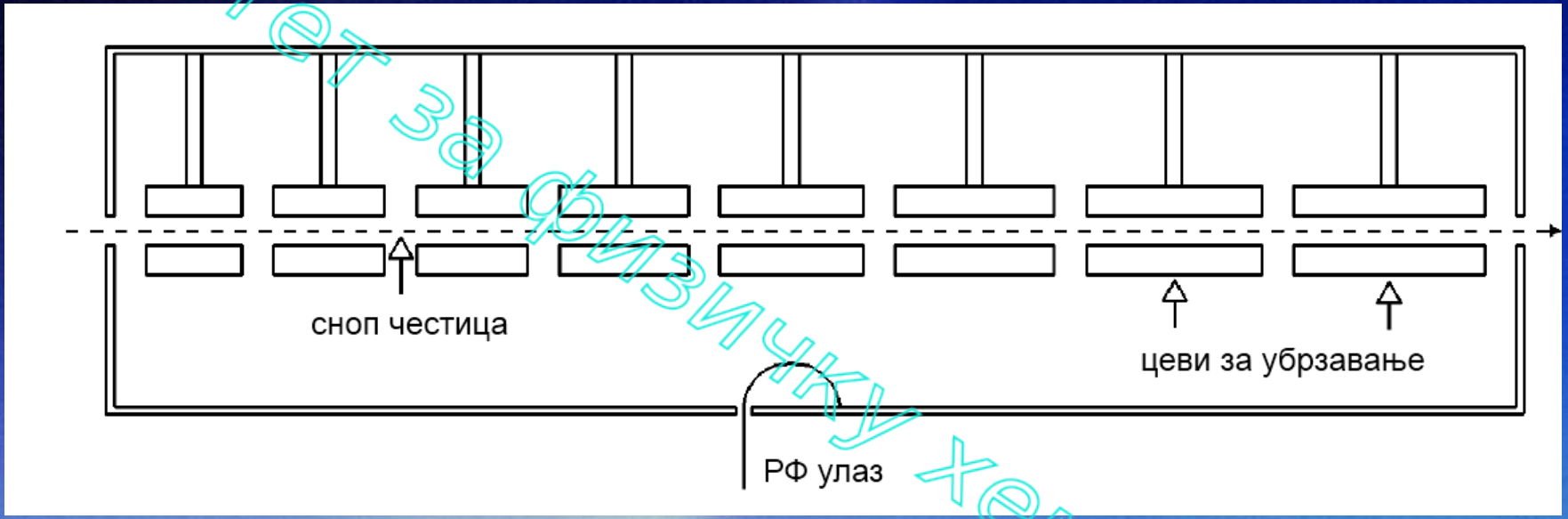
$$\frac{L_n}{v} = \frac{\lambda}{2c}$$

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

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

Факултет за физичку хемију Београд

Alvarez-ов LINAC



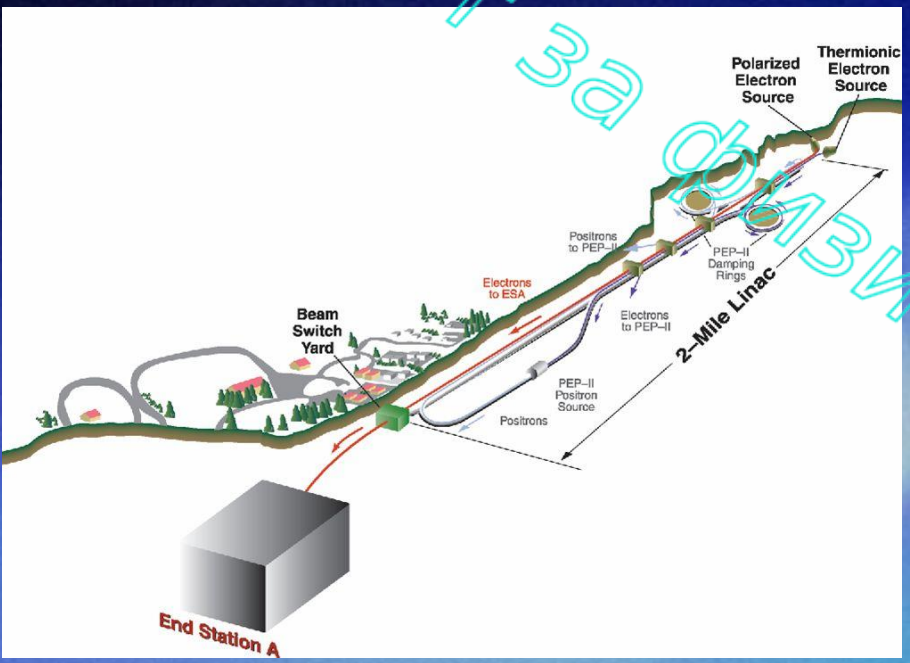
- Већа разлика потенцијала између цеви него код Wilderöe-овог акцелератора

Факултет за физичку хемију Београд

LINAC пример

Факултет за физичку хемију Београд

- Stanford linear accelerator – SLAC

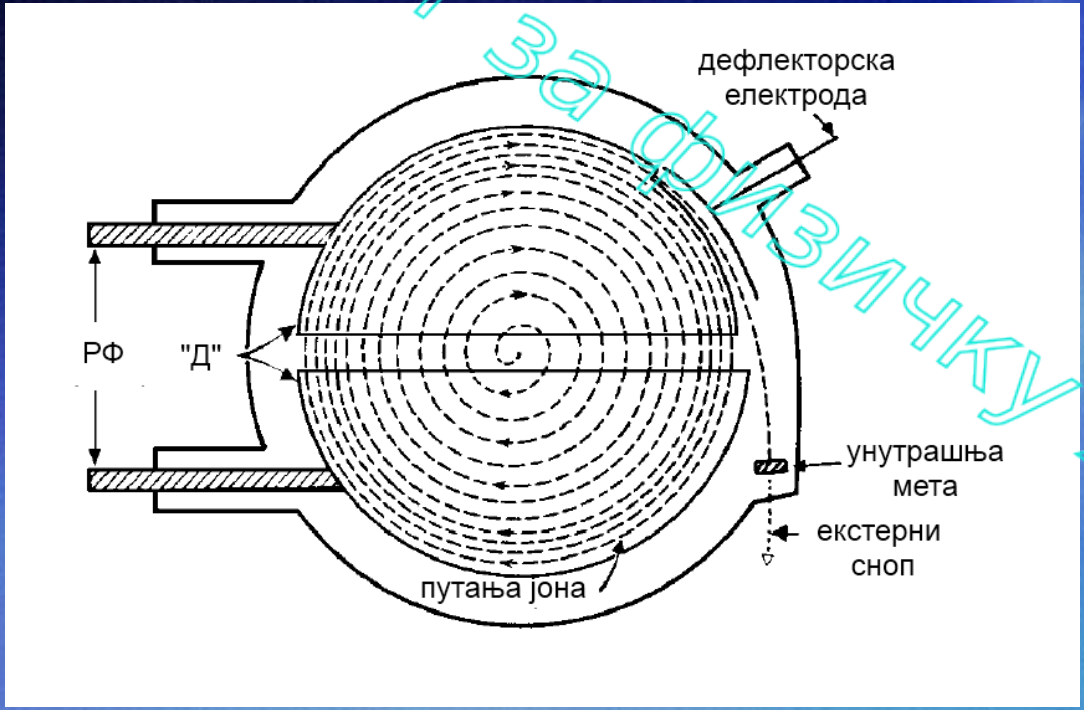




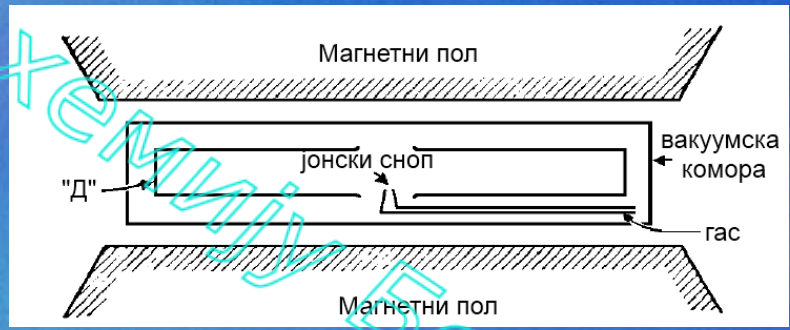
- Укупна дужина 3,2 km, дијаметар 0,1 m
- Убрзава електроне и позитроне до 20 GeV (0,9999999997 c)

Циклотрон

- Lawrence & Livingston (1931)







$$\frac{m\boldsymbol{v}^2}{r} = q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$$

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

Факултет за физичку хемију Београд

Карактеристике циклотрона

- У сваком циклусу честица повећава своју енергију за константну вредност

$$E_{kin} = \frac{q^2 r^2 B^2}{2m}$$ (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

Факултет за физичку хемију Београд

Карактеристике циклотрона

- Шта ако желимо веће енергије?
- $\omega_{cf} = \frac{v}{r} = \frac{q}{m}B = \frac{q}{\gamma m_0}$

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

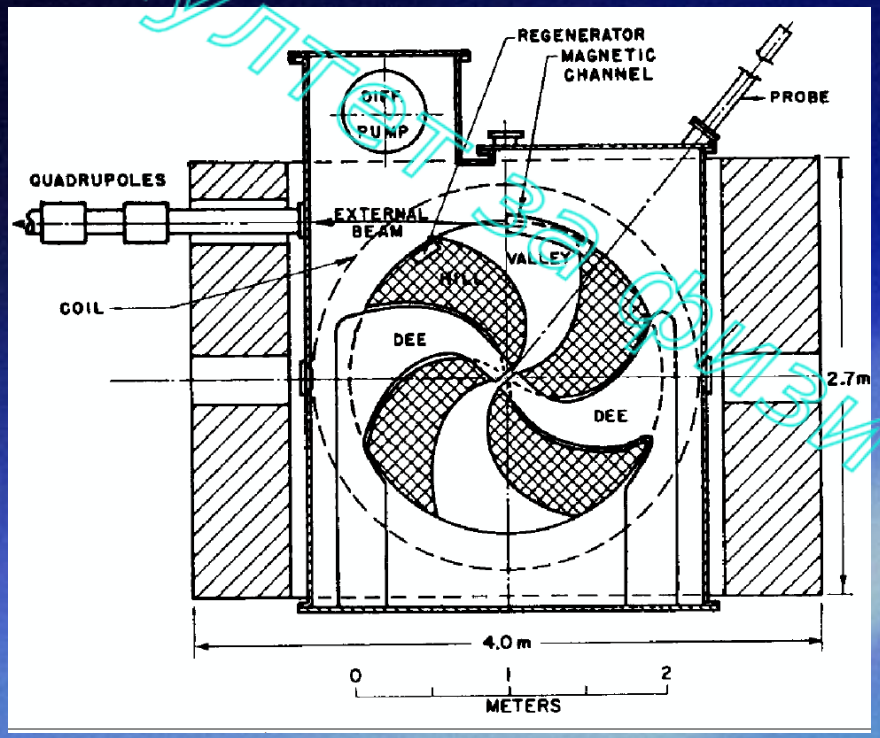
- Мењати
  - Фреквенцију
  - Магнетно поље
  - Обоје

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

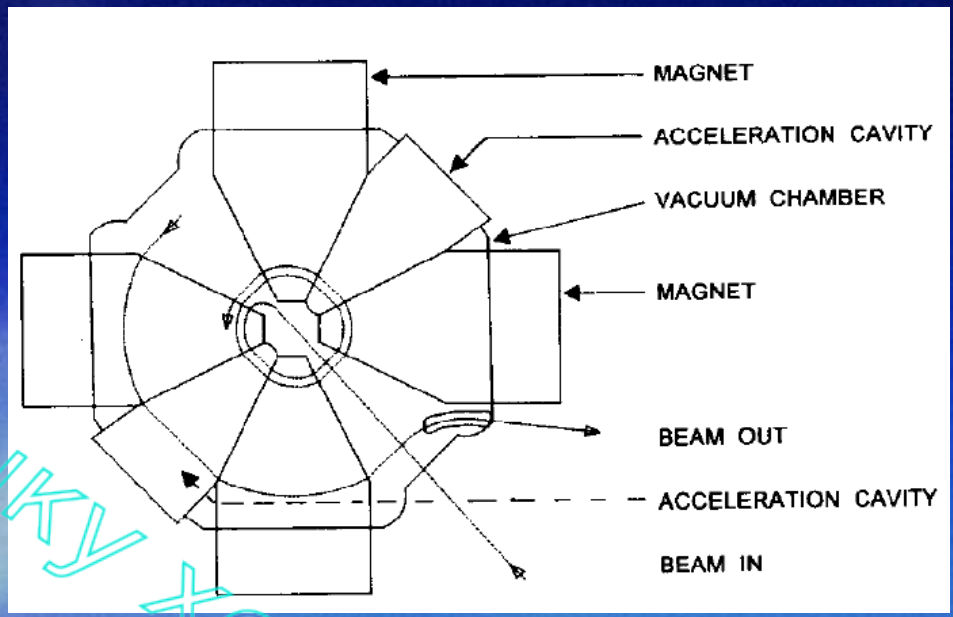
Факултет за физичку хемију Београд

Решења

Факултет за физичку хемију Београд



max убрзања протона до $m_p=2m_0$



Секторски раздвојен циклотрон

Синхроциклотрони и синхротрони

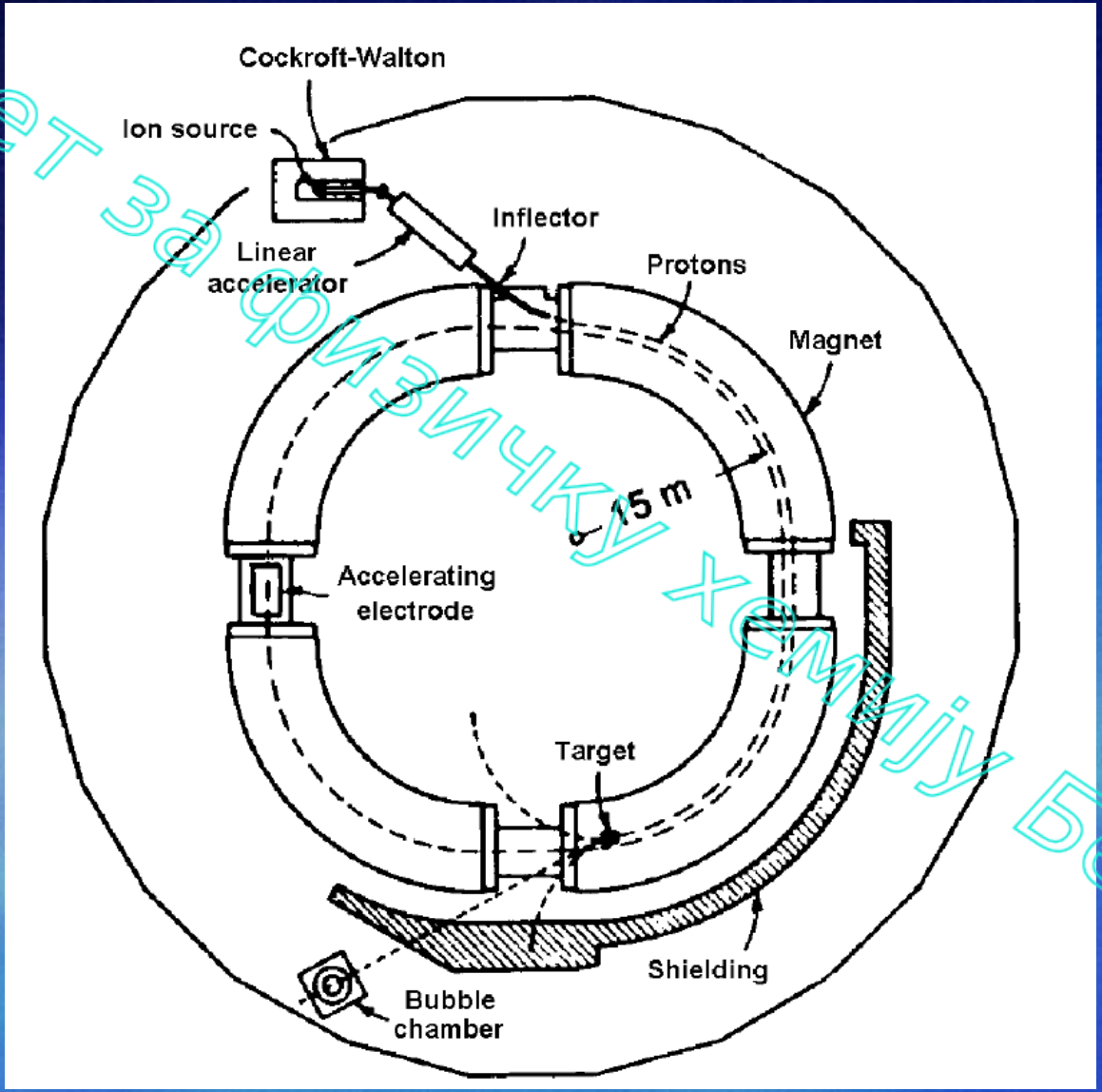
- Синхроциклотрони задржавају оригинални принцип циклотрона уз варирање фреквенције
- Синхротрон убрзава честице дуж фиксиране путање при чему се одржава баланс B и ω

$$E_k = \nu\pi r^2 \mathrm{Bq}$$

- 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 закочно х-зрачење (синхротронско зрачење) што захтева адекватну заштиту

Факултет за физичку хемију Београд

Синхротрон



Факултет за физичку хемију Београд

Складиштење 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



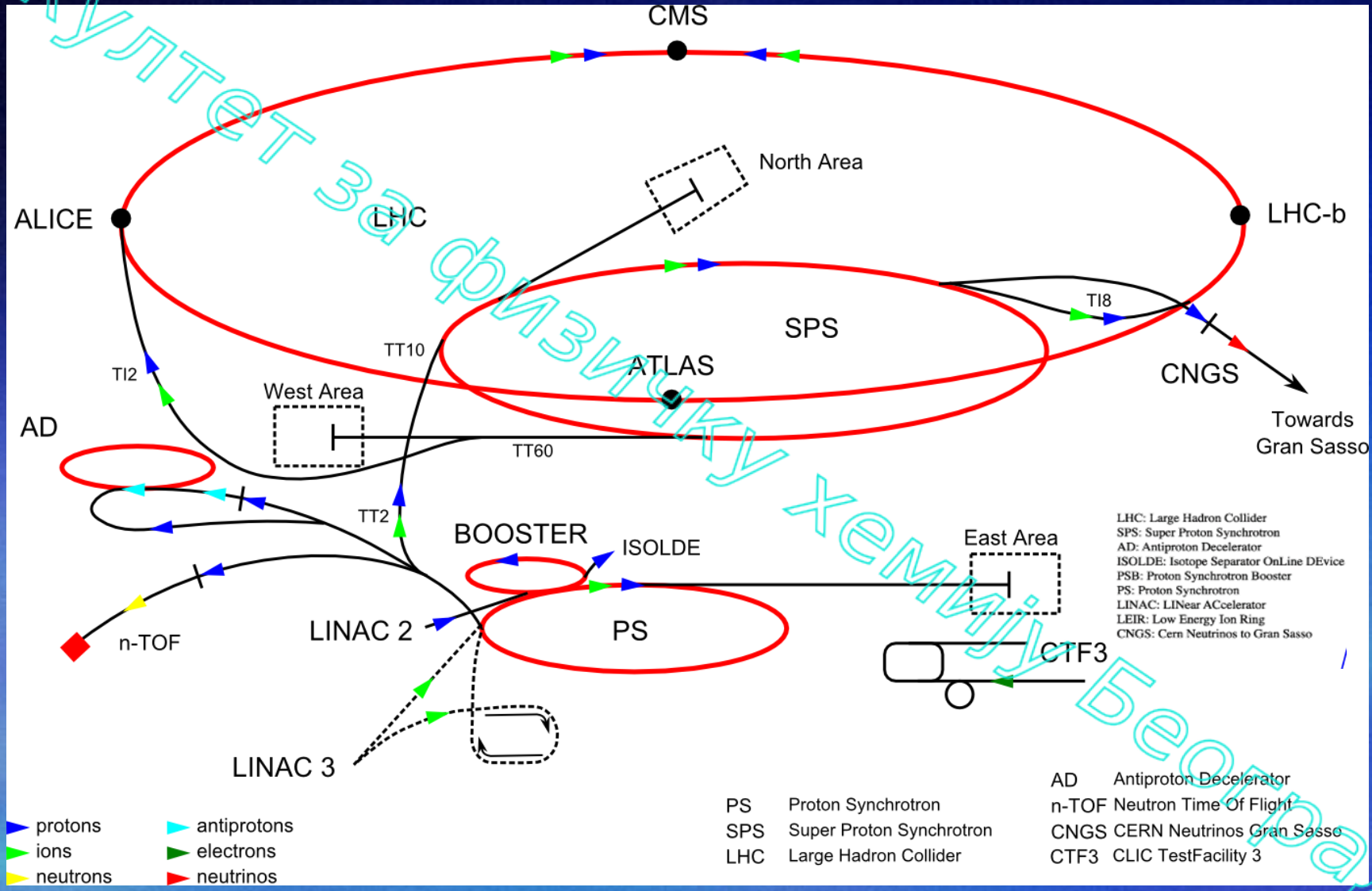
Факултет за физичку хемију Београд

Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN)

Факултет за физичку хемију Београд



Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire



Факултет за физичку хемију Београд

Делови CERN-a



- Извор протона
- Линеарни акцелератор (LINAC2) (→2017 биће замењен са LINAC4) Ep = 50 MeV
- Синхротронски “booster” протона Ep = 1,4 GeV
- Протонски синхротрон Ep = 1,4 GeV
- Супер протонски синхротрон Ep = 450 GeV
- Велики хадронски сударач – LHC Ep = 7 TeV

Факултет за физичку хемију Београд



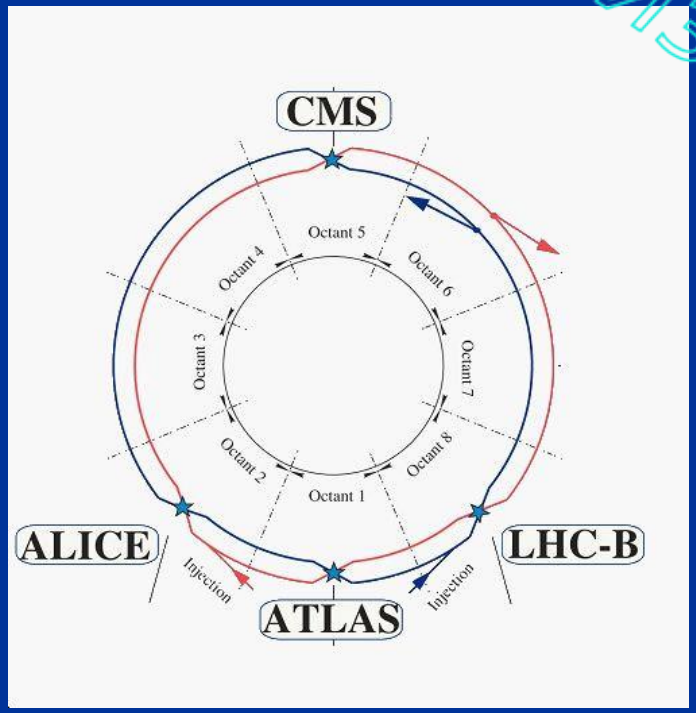
LINAC 2 (1972)



Синхротронски “booster” протона



Протонски синхротрон



LHC



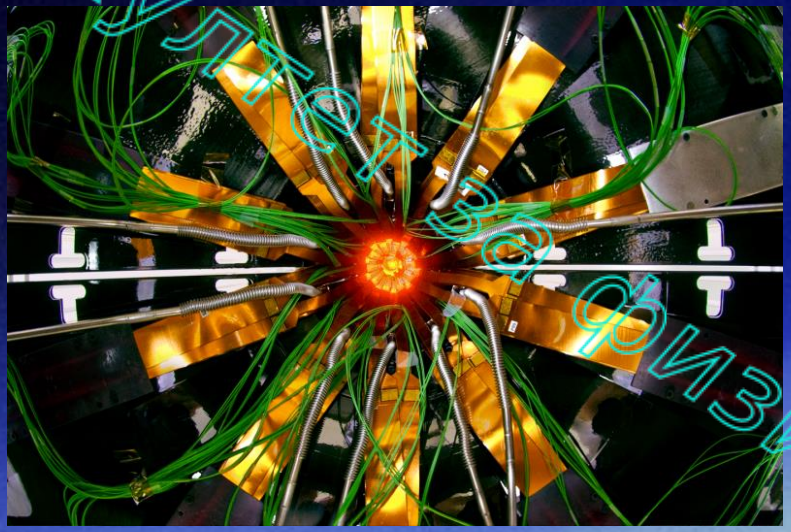
Супер-протонски синхротрон

факултет за физичку хемију, Београд

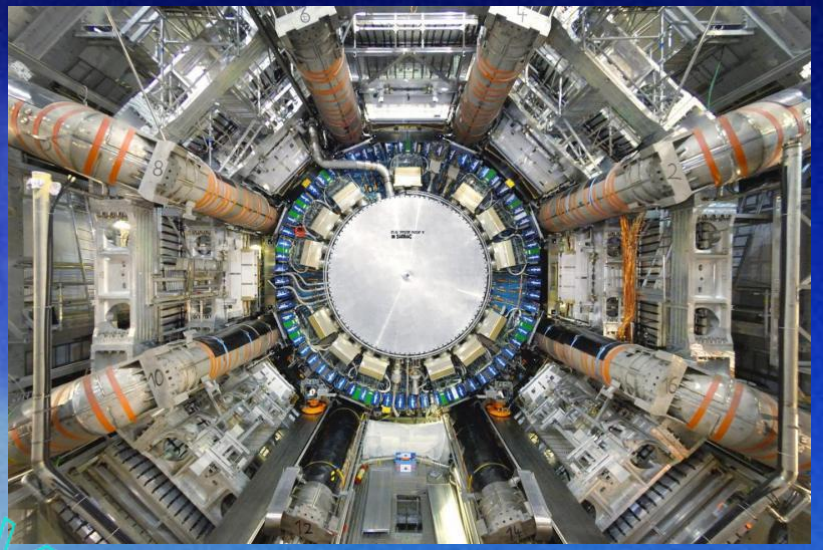
Детектори на LHC-у

Факултет за физичку хемију Београд

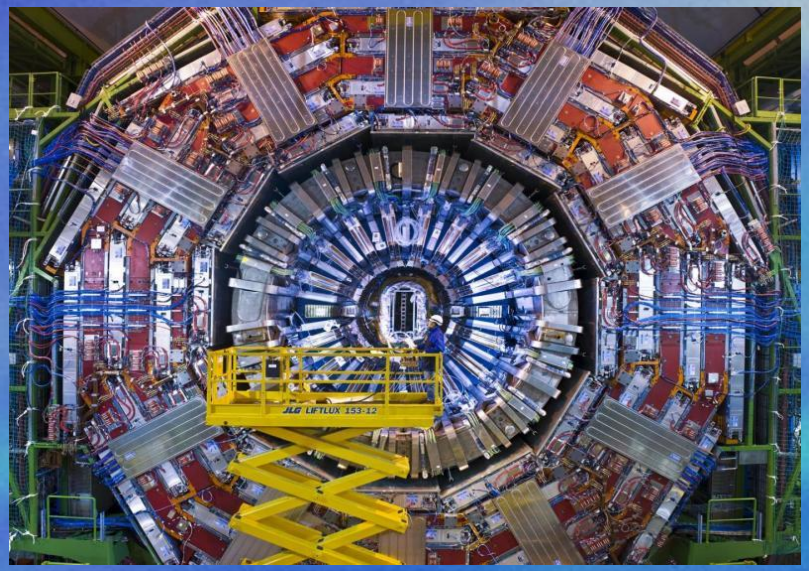
ALICE



ATLAS



CMS0



LHCb



Примене циклотрона

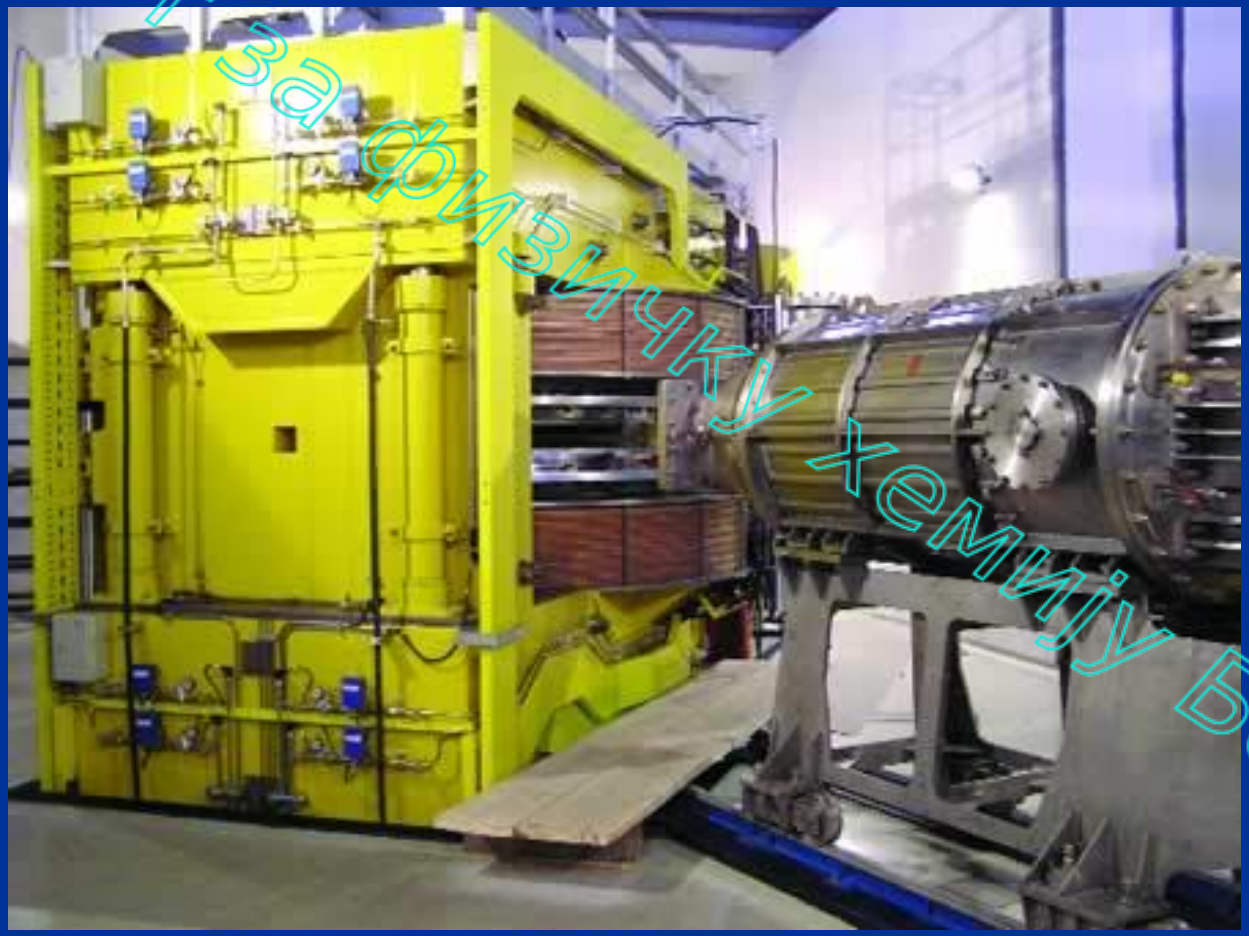
Зрачна терапија

- Акцелератори електрона/генератори X-зрачења
- Акцелератори протона-протонска терапија

Производња радиоизотопа за комерцијалне и медицинске примене

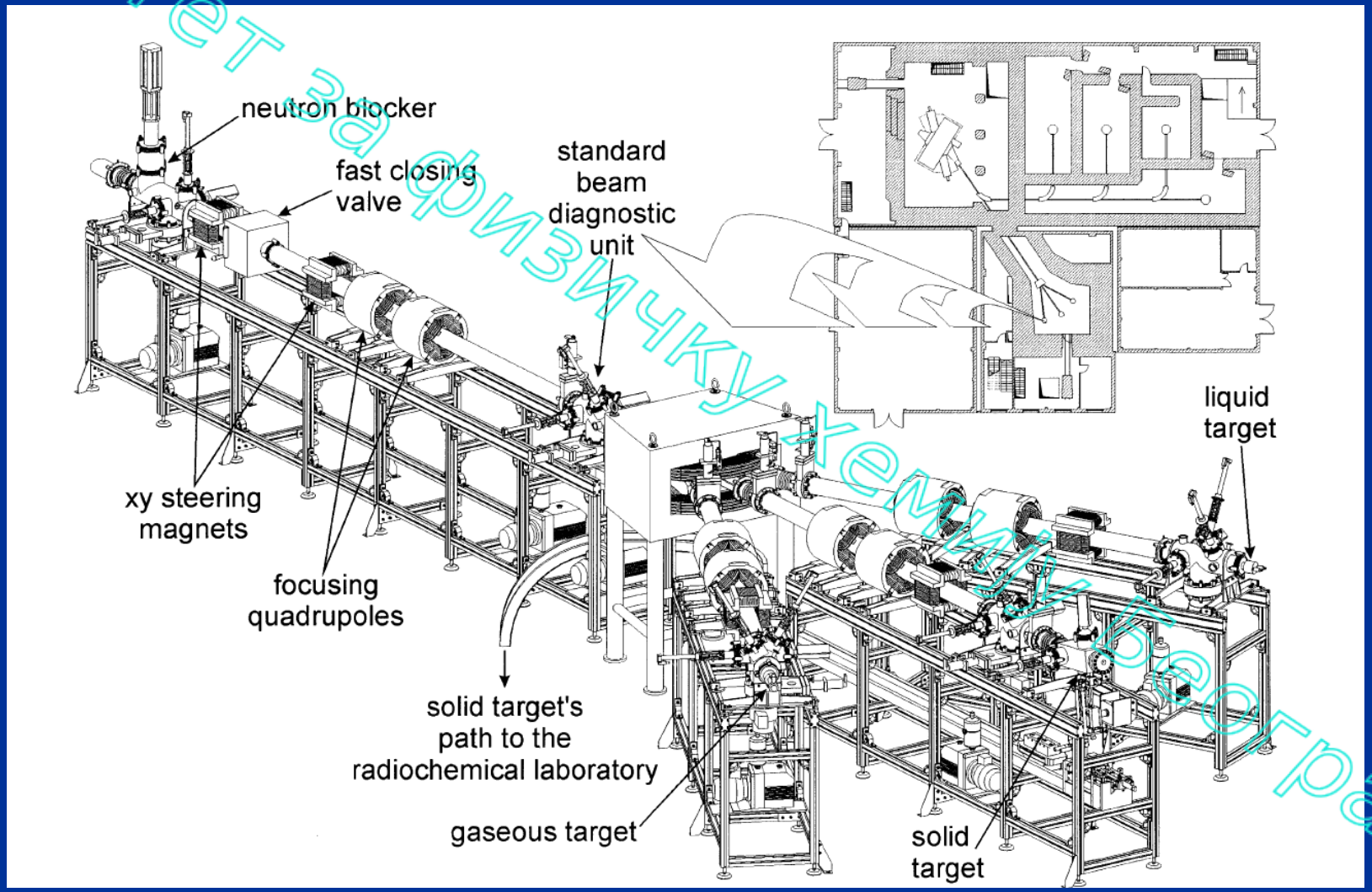
Факултет за физичку хемију Београд

Додатак- Акцелераторска инсталација ТЕСЛА



Факултет за физичку хемију Београд

Планирани канал за производњу радиоизотопа



Факултет за физичку хемију Београд