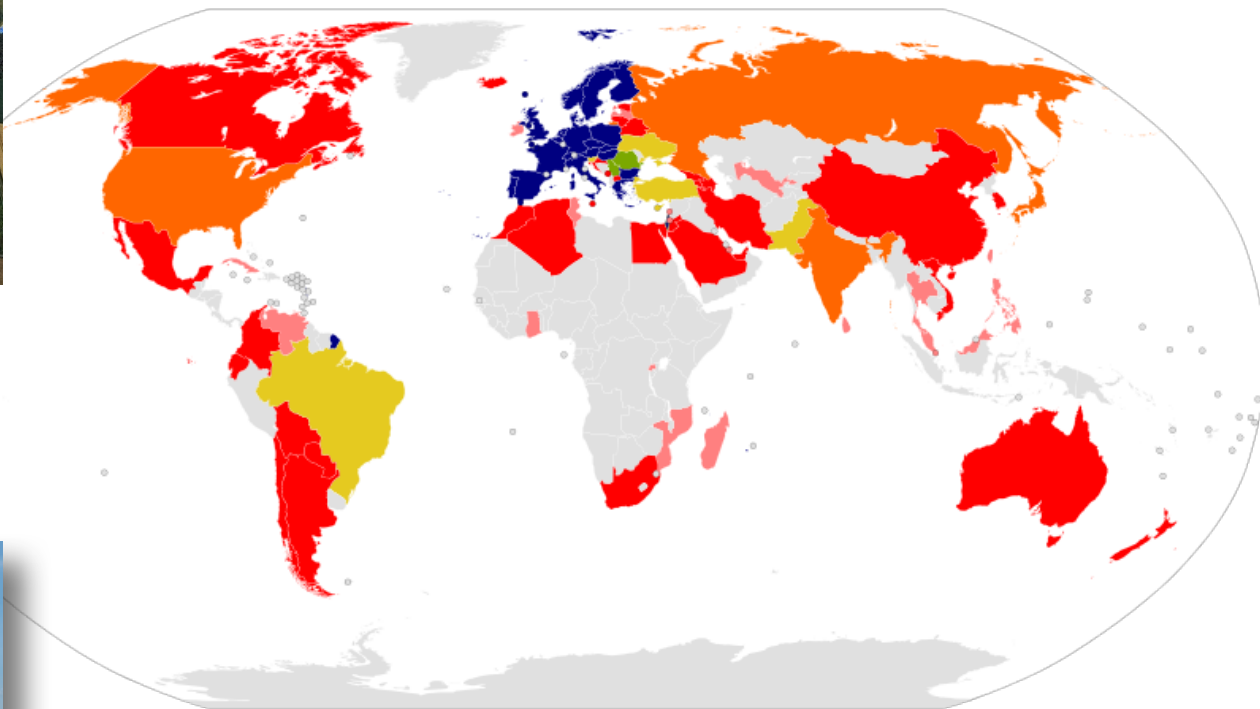




hands on particle physics

# Велики хадронски сударач и експерименти на њему

*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire  
Европски центар за нуклеарна истраживања*



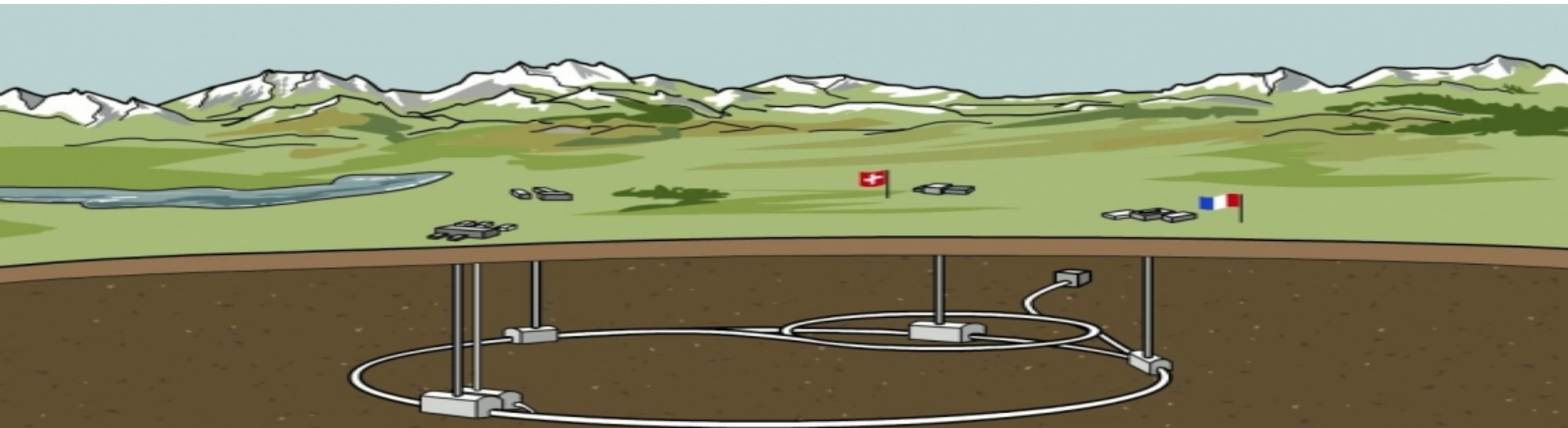
← *Летњи студенти из преко 100 земаља*

*ЦЕРН је основан 1952. године.*

# Велики хадронски сударач

## *Large Hadron Collider - LHC*

- **Велики** јер је највећи експеримент у физици честица.
- **Сударач** јер судара снопове честица.
- **Хадронски** јер судара хадроне (протоне и језгра олова)
- Ко је направио ЛХЦ? → ЦЕРН у сарадњи са преко 100 земаља.
- ЛХЦ је кружни акцелератор обима од приближно 27 км.
- Налази се испод површине Земље (средња дубина је око 100 м)



# Главни циљеви ЛХЦ-а

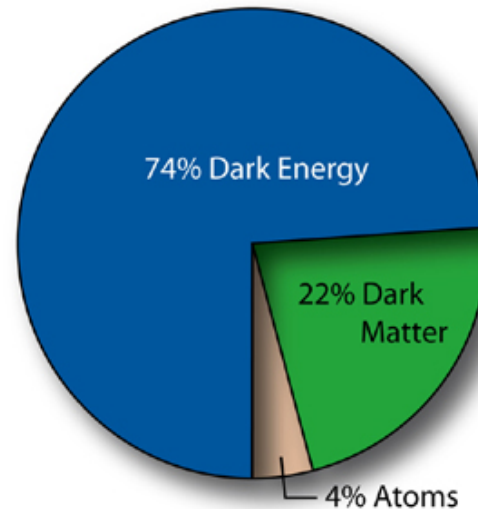
- **Потрага за Хигсовим бозоном.** ✓

*Хигсов бозон је честица која даје масу другим честицама.*

- **Потрага за суперсиметричним честицама.**

*Нова физика је неопходна да објасни резултате разних експеримената.*

- **Потрага за тамном материјом.**



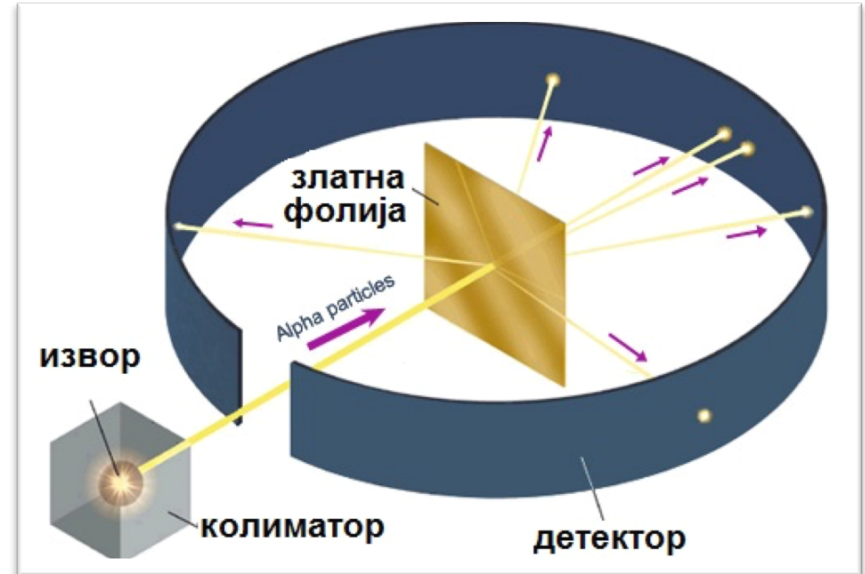
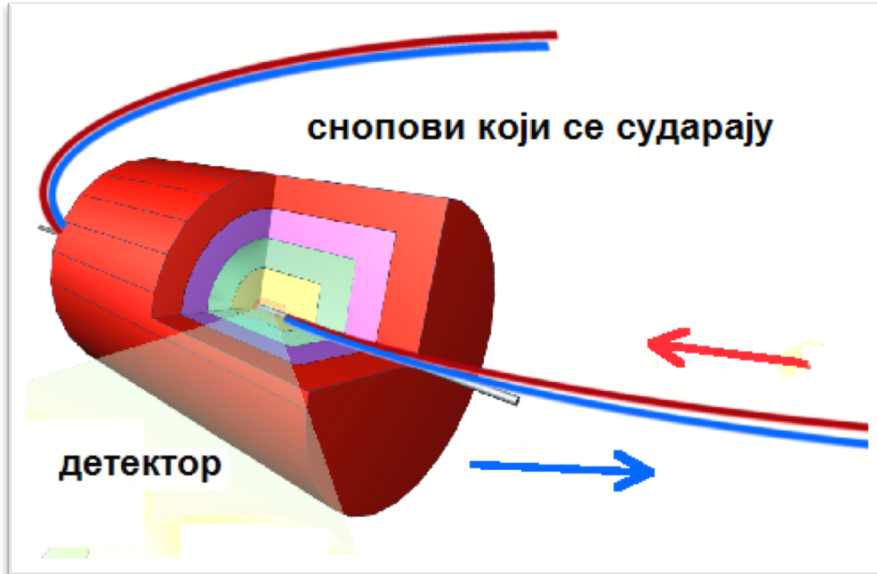
- **Објаснити зашто има више материје него антиматерије.**

- **Проучавање кварк-глуонске плазме.**

*У сударима језгара олова проучава се ово специфично стање материје.*

# Сударии или стационарна мета

## Радерфордов експеримент



## Сноп протона који удара у протонску мету

$$\begin{aligned}
 E_{CM} &= 2E = \\
 &= 7 \text{ TeV} + 7 \text{ TeV} = \\
 &= 14 \text{ TeV}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{CM} &= \sqrt{2m^2 + 2mE} = \\
 &= \sqrt{2(0.938 \text{ GeV})^2 + 2(0.938 \text{ GeV})(7000 \text{ GeV})} = \\
 &= 114.6 \text{ GeV}
 \end{aligned}$$

# Главни делови акцелератора

## Акцелераторске шупљине

Два снопа се крећу  
у супротним  
смеровима

Магнети за  
савијање снопа

- Вакуумска цев.
- Систем за инјекцију снопа.
- Систем за убрзавање снопа.

*Електрично поље убрзава снопове (касније одржава њихову брзину константном – надокнађује губитке енергије).*

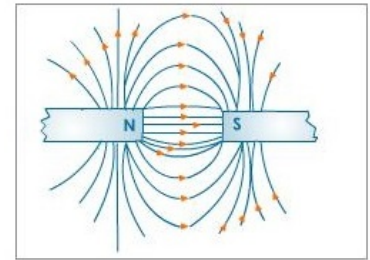
- Диполни магнети држе сноп на приближно кружној путањи.
- Систем за колимацију снопа.

*Квадруполни магнети фокусирају сноп.*

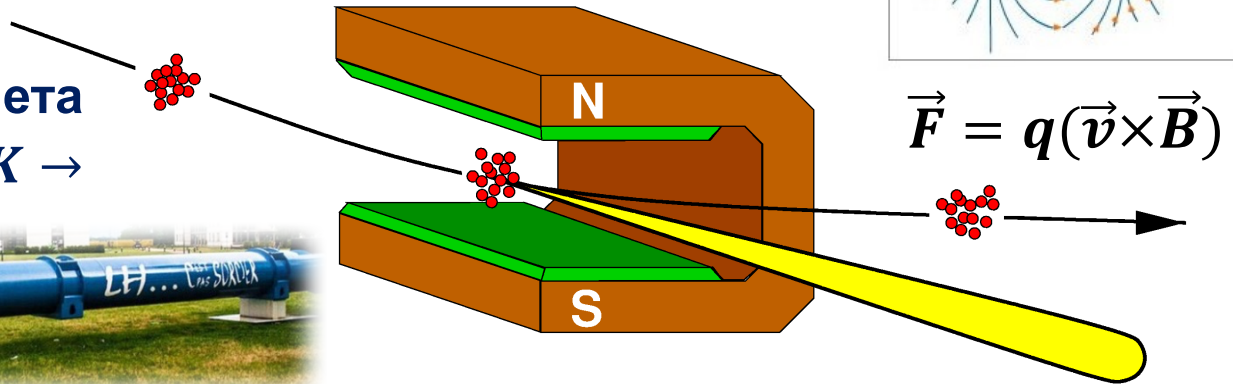
Магнети за  
фокусирање

# Магнетни систем

- Укупно 9 593 магнета (53 различита типа).
- Диполни магнети усмеравају снопове по кружној путањи.



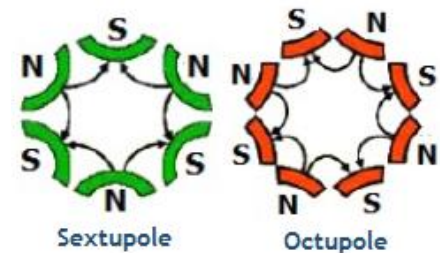
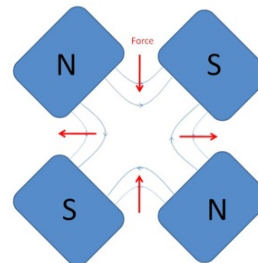
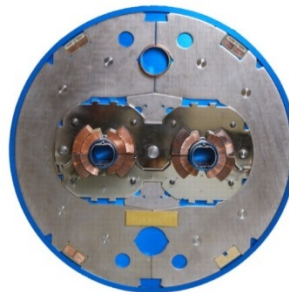
**1232 диполна магнета**  
 $p = p_{atm}$  и  $T = 1.9K \rightarrow$



- Суперфлуидни хелијум обезбеђује довољно ниску температуру.
- Сваки диполни магнет је 15 метара дугачак и 35 тона тежак!

**Магнетно поље дипола = 100000 × Магнетно поље Земље.**

- Квадруполни магнети колимишу снап, 6,8,10-полни магнети врше додатне корекције.



# Импресивни бројеви



Температура на кој раде диполни магнети

$$T = 1.9K = -271.3^{\circ}C$$

Средња температура у међузвезданом простору

$$T = 2.7K = -270.5^{\circ}C$$

Притисак у вакуумским цевима

$$100 \text{ nPa} > p > 1 \text{ nPa}$$

Притисак у међузвезданом простору

$$100 \text{ }\mu\text{Pa} > p > 3 \text{ fPa}$$

При сударима снопова може се достићи температура и до

$$T = 10 \text{ милиона милијарди } ^{\circ}C$$



Температура језгра Сунца је близу

$$T = 20 \text{ милиона } ^{\circ}C$$





# Судари снопова протона

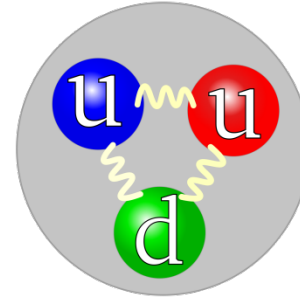
Снопови се састоје из низа банчева („пакета“ протона)



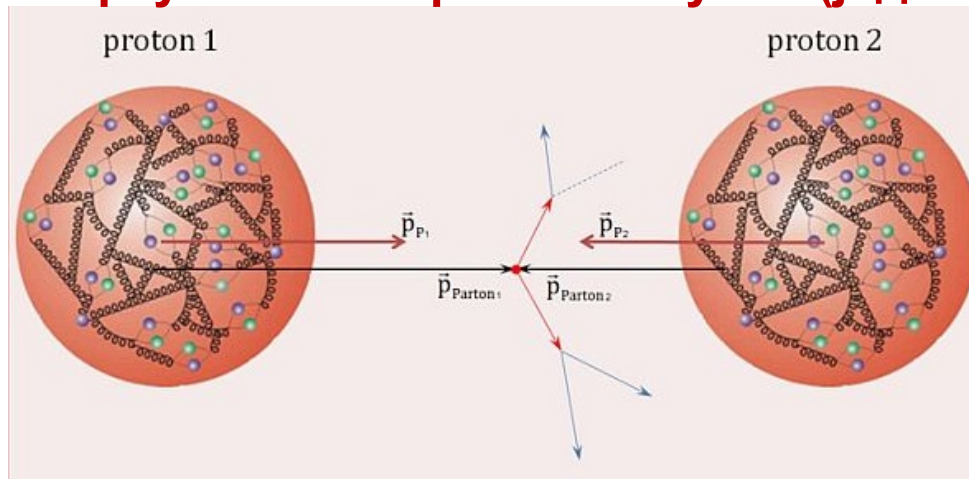
**Потребно је издвојити 1 догађај из 10,000,000,000,000 догађаја!**

# Судары протона

- Протони су композитне честице!
- Масе  $m(u) = 0.003 \text{ GeV}/c^2$   
 $m(d) = 0.006 \text{ GeV}/c^2$   
 $m(p) = 0.938 \text{ GeV}/c^2$



- Осим валентних (uud) кваркова, у протону се налази и море виртуелних кваркова и глюона (једним именом – партона)!



- При судару два протона дешава се интеракција између њихових конституената (партона једног протона са партоном другог протона)!

Поред енергије луминозност представља најважнији параметар судара снопова протона.

$$L = \frac{N_1 N_2 f n_b}{A} \quad [cm^{-2} s^{-1}]$$

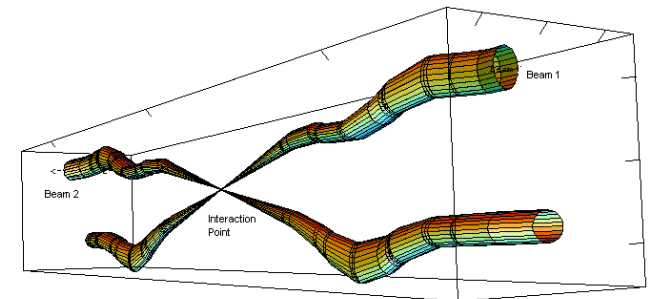
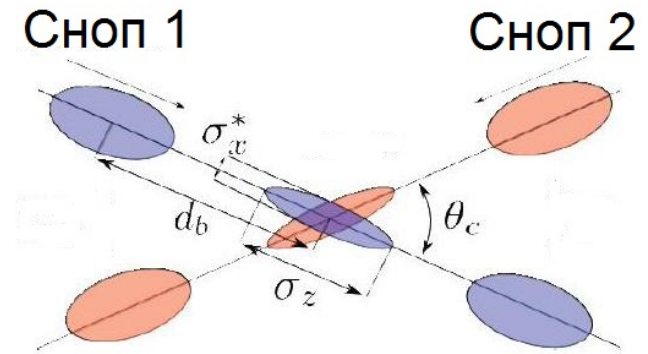
$N_1, N_2$  - број протона у банчу

$f$  - фреквенција судара

$n_b$  - број банчева

$A$  - попречни пресек снопова

$N = L \times \sigma \Rightarrow$  Потребна висока луминозност за ретке догађаје!

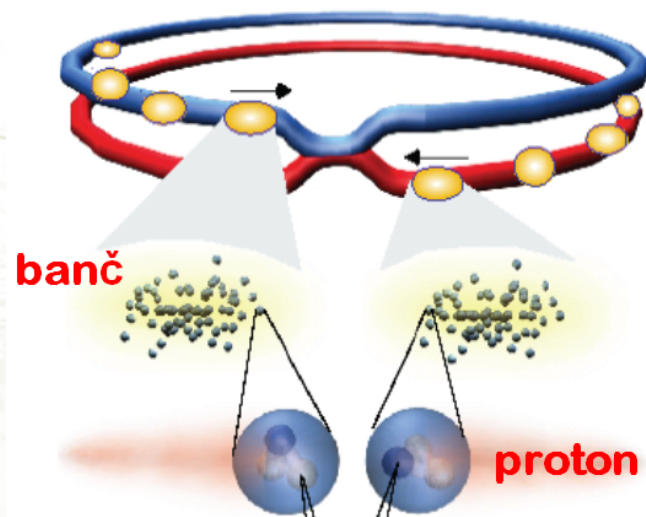


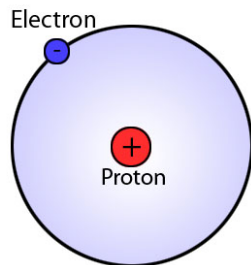
Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

Дизајнирана луминозност ЛХЦ-а:  $L = 10^{34} cm^{-2} s^{-1}$

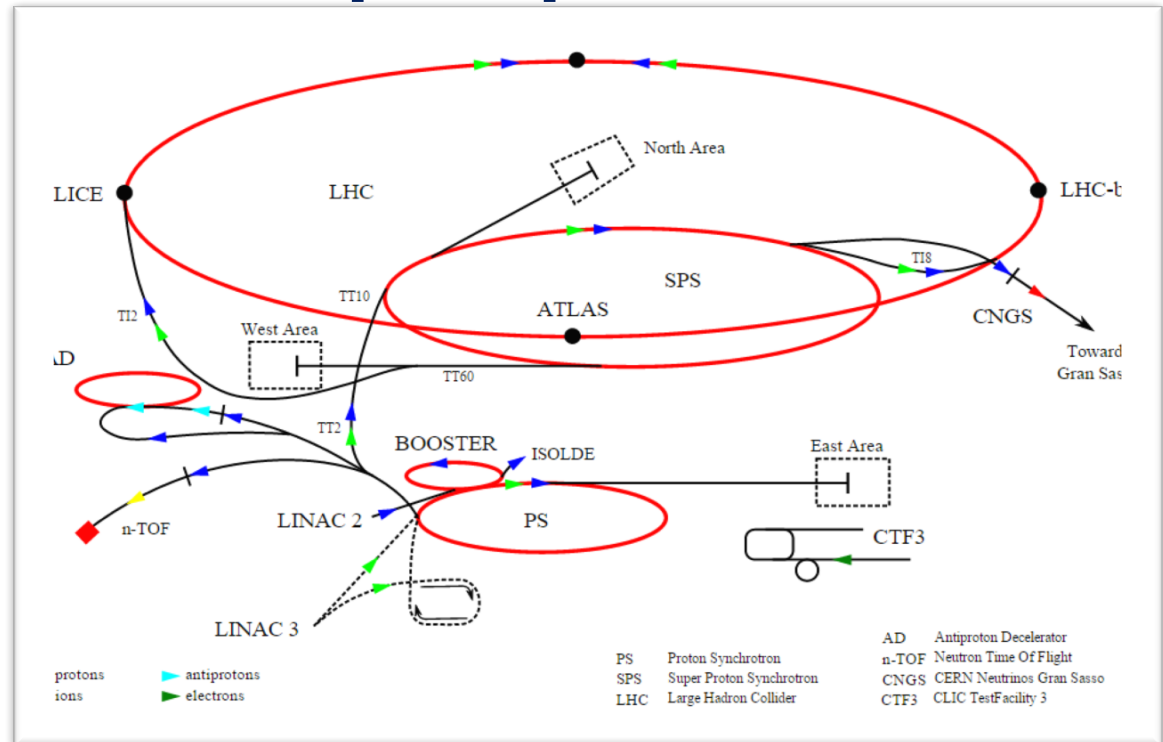
# Параметри ЛХЦ-а

Особине ЛХЦ-а:	
Обим	26 659 m
Температура на којој раде диполи	1.9 K
Број магнета	9 593
Број диполних магнета	1 232
Број квадруполних магнета	392
Број система за убрзавање	8 по снопу
Номинална енергија, протони	7 TeV
Номинална енергија, јони	2.76 TeV
Јачина магнетног поља дипола (мах)	8.33 T
Мин. растојање између банчева	7 m
Број банчева по снопу	2 808
Број протона по банчу (на почетку)	$1.1 \times 10^{11}$
Број кругова у секунди	11 245
Број судара по секунди	600 милиона





# Акцелераторски комплекс

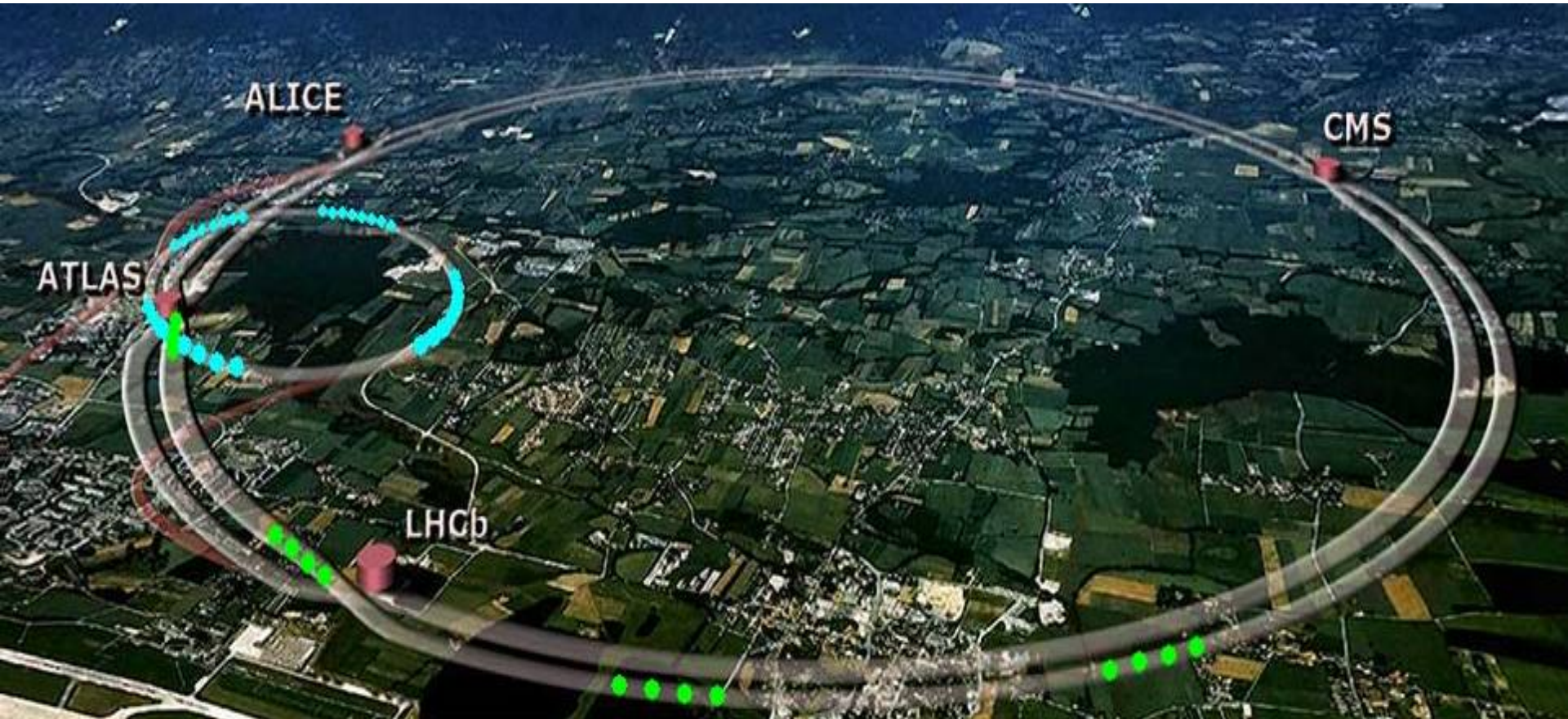


- Протони се добијају тако што се електричним пољем код атома водоника уклањају електрони.
- Пре убацавања у ЛХЦ, протони се до одређене мере морају убрзати!
- **Највећа могућа брзина у Свемиру је брзина светлости ( $c=299\,792\,458\text{ m/s}$ )**

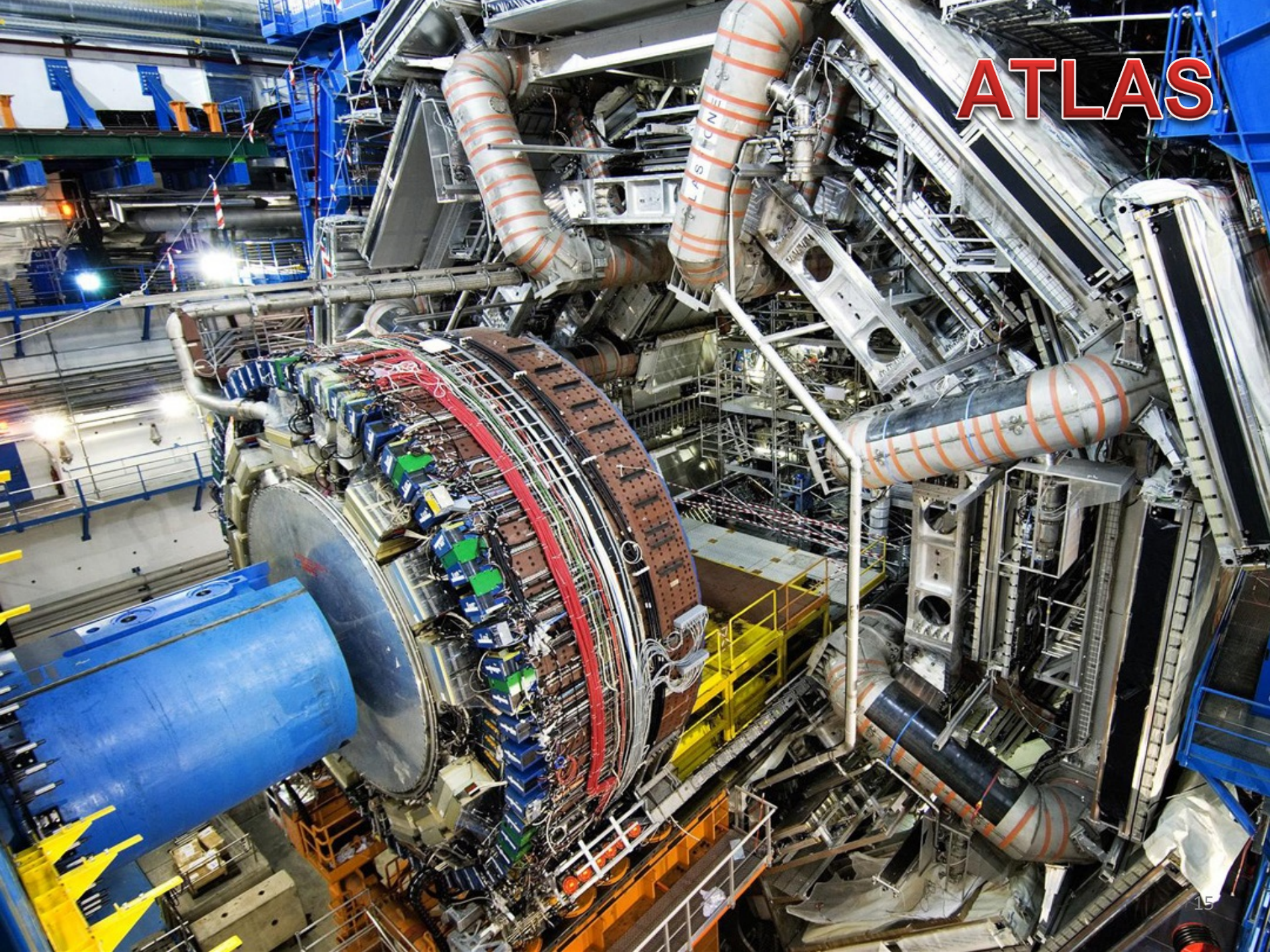
# Тачке судара снопова

- Четири велика експеримента:

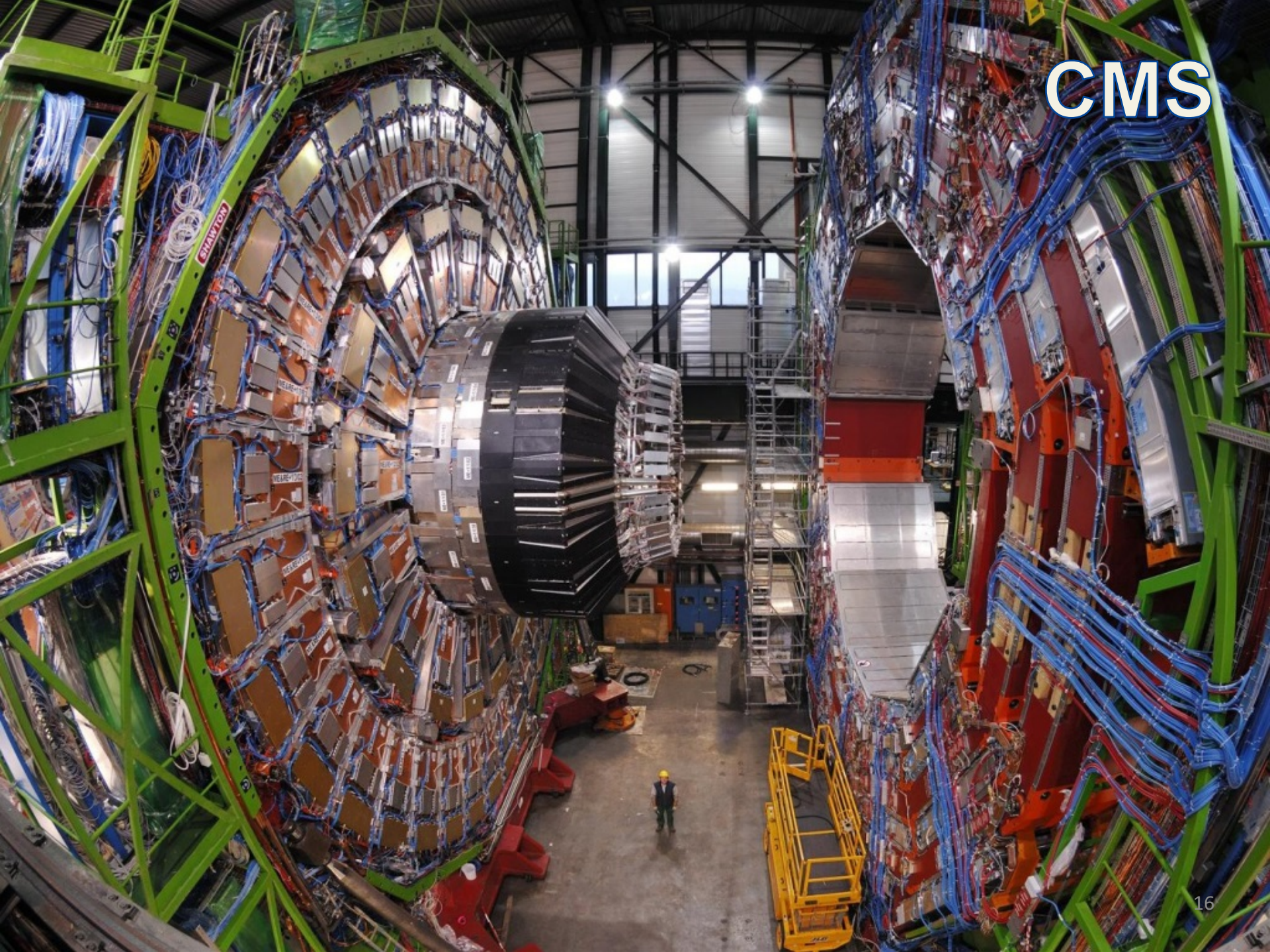
ATLAS; CMS; ALICE; LHCb



# ATLAS

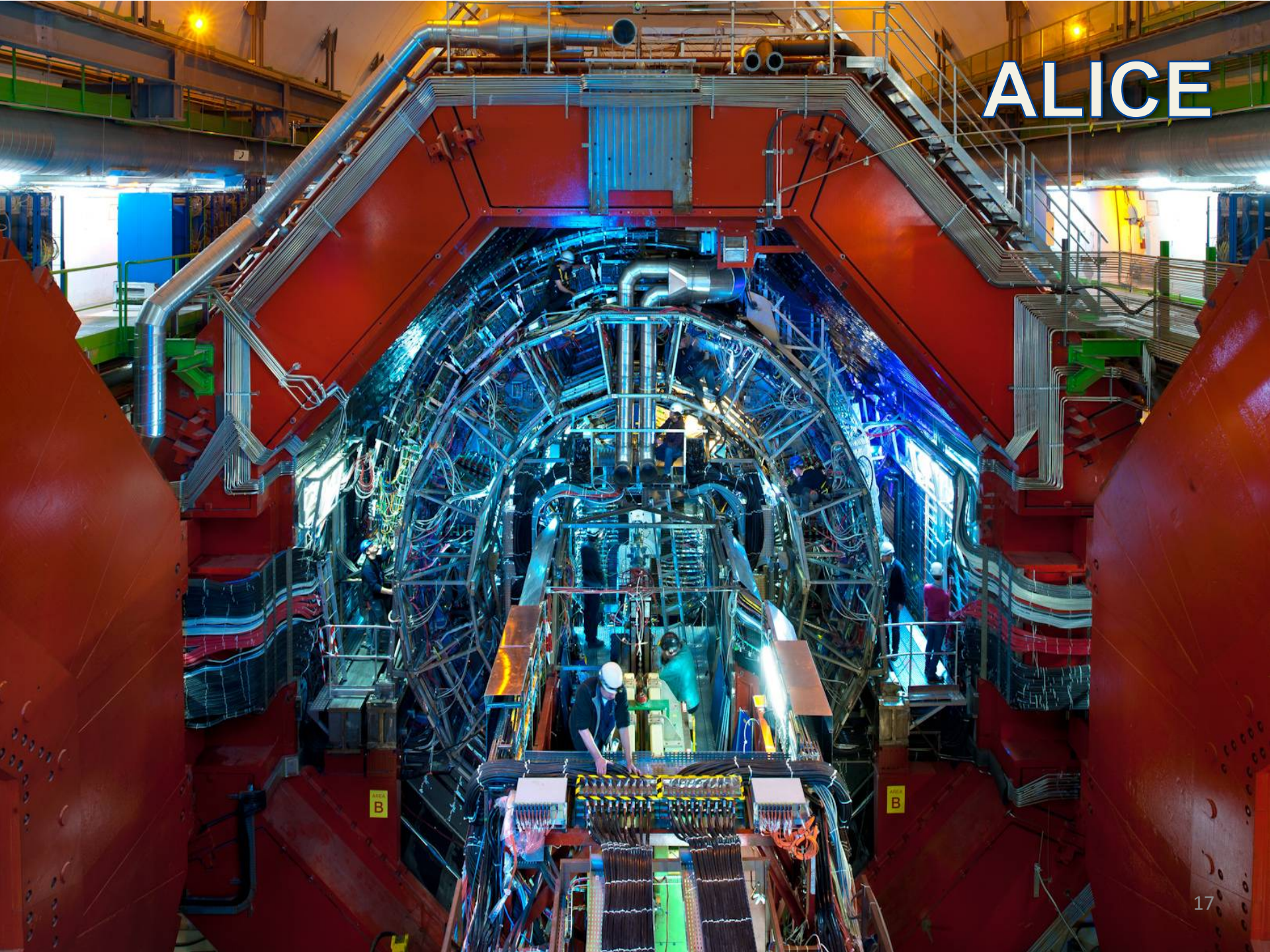


CMS





# ALICE



# LHCb

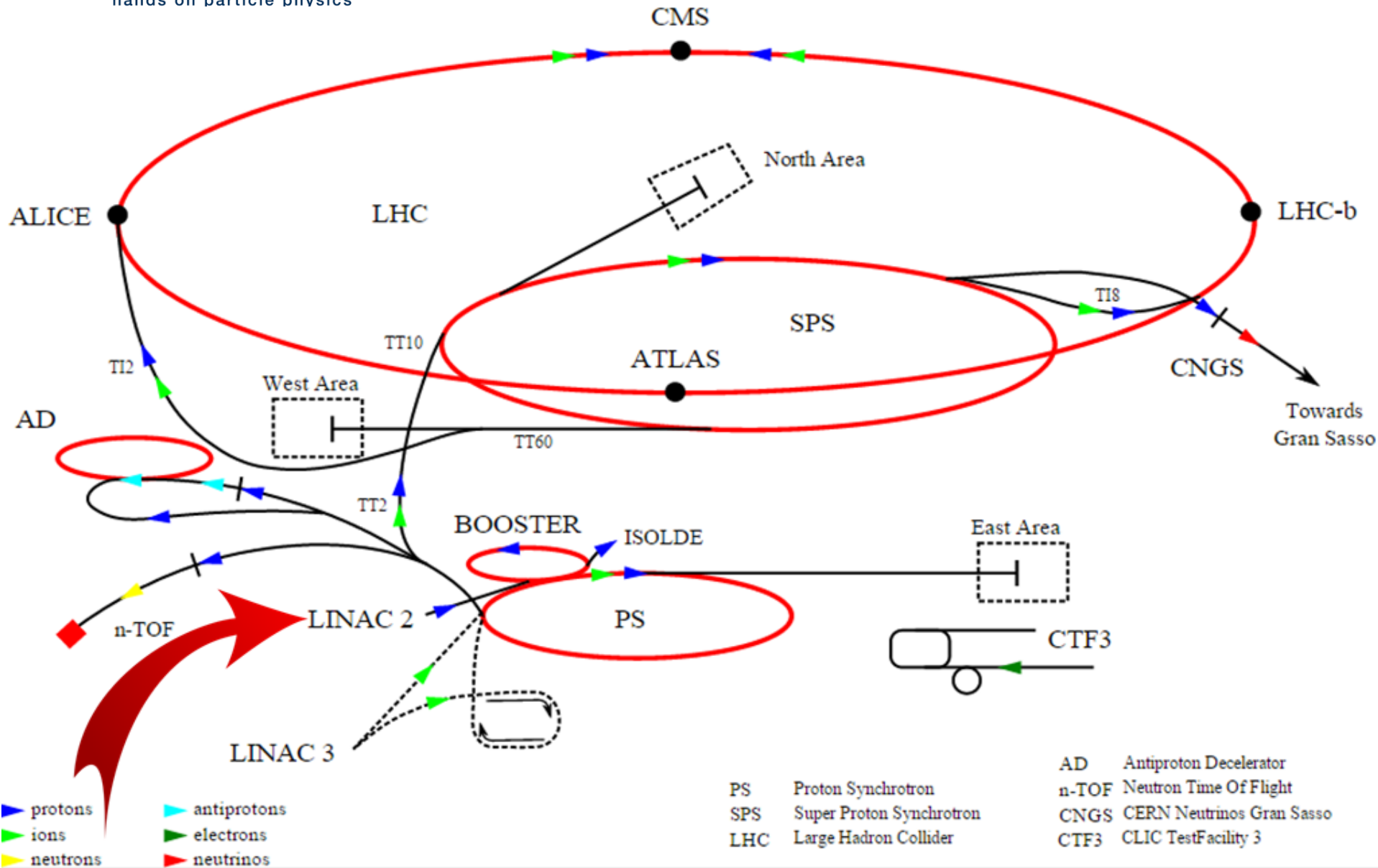




Март 2016: У току је друга фаза рада ЛХЦ-а (RUN II)

# Акцелераторски комплекс

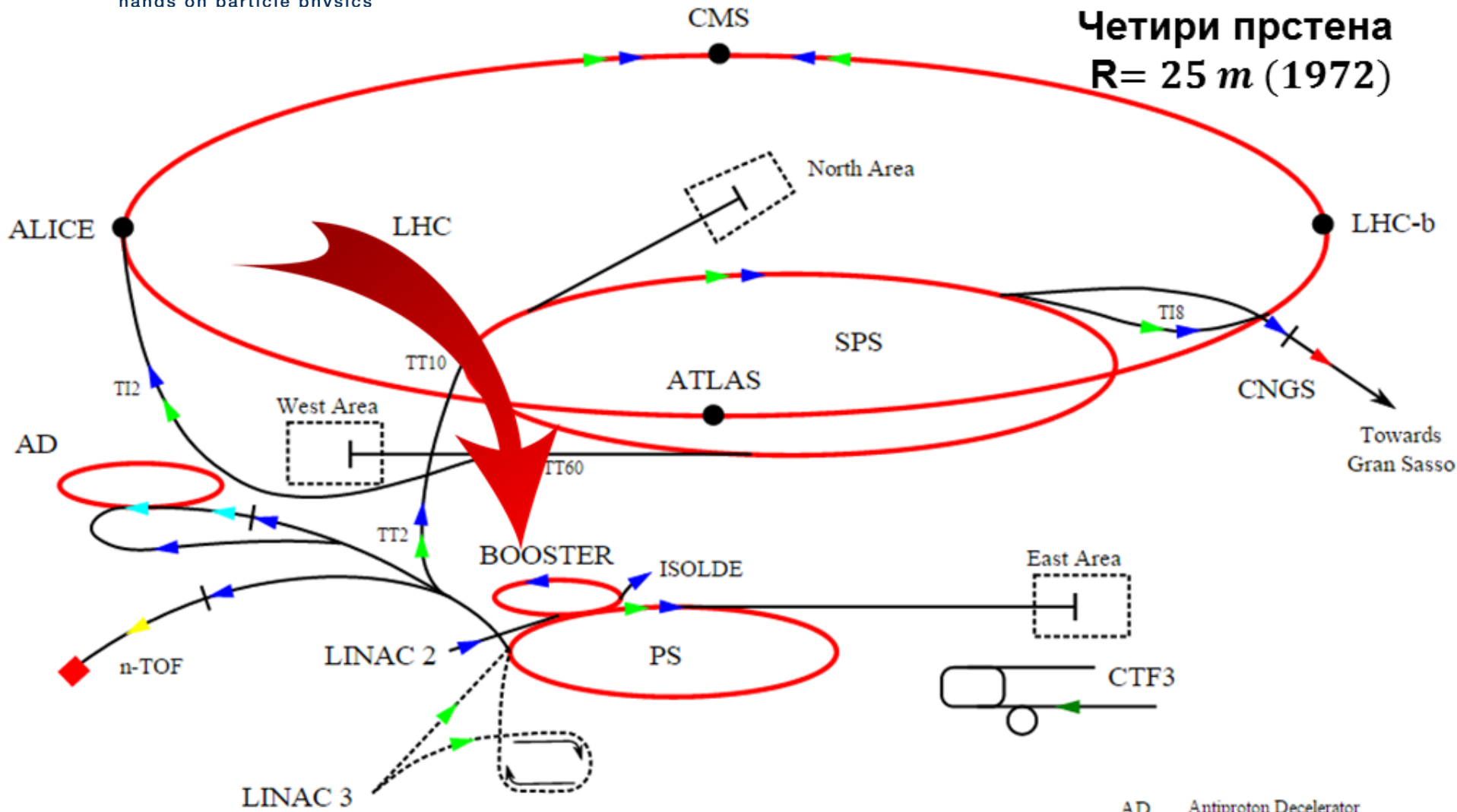
I: LINAC 2 (до  $v = c/3$ ;  $E = 50 \text{ MeV}$ )



# Акцелераторски комплекс

II: BOOSTER ( $v = 0.93c$ ;  $E = 1.4 GeV$ )

Четири прстена  
 $R = 25 m$  (1972)



▶ protons  
▶ antiprotons  
▶ ions  
▶ neutrons  
▶ neutrinos  
▶ electrons

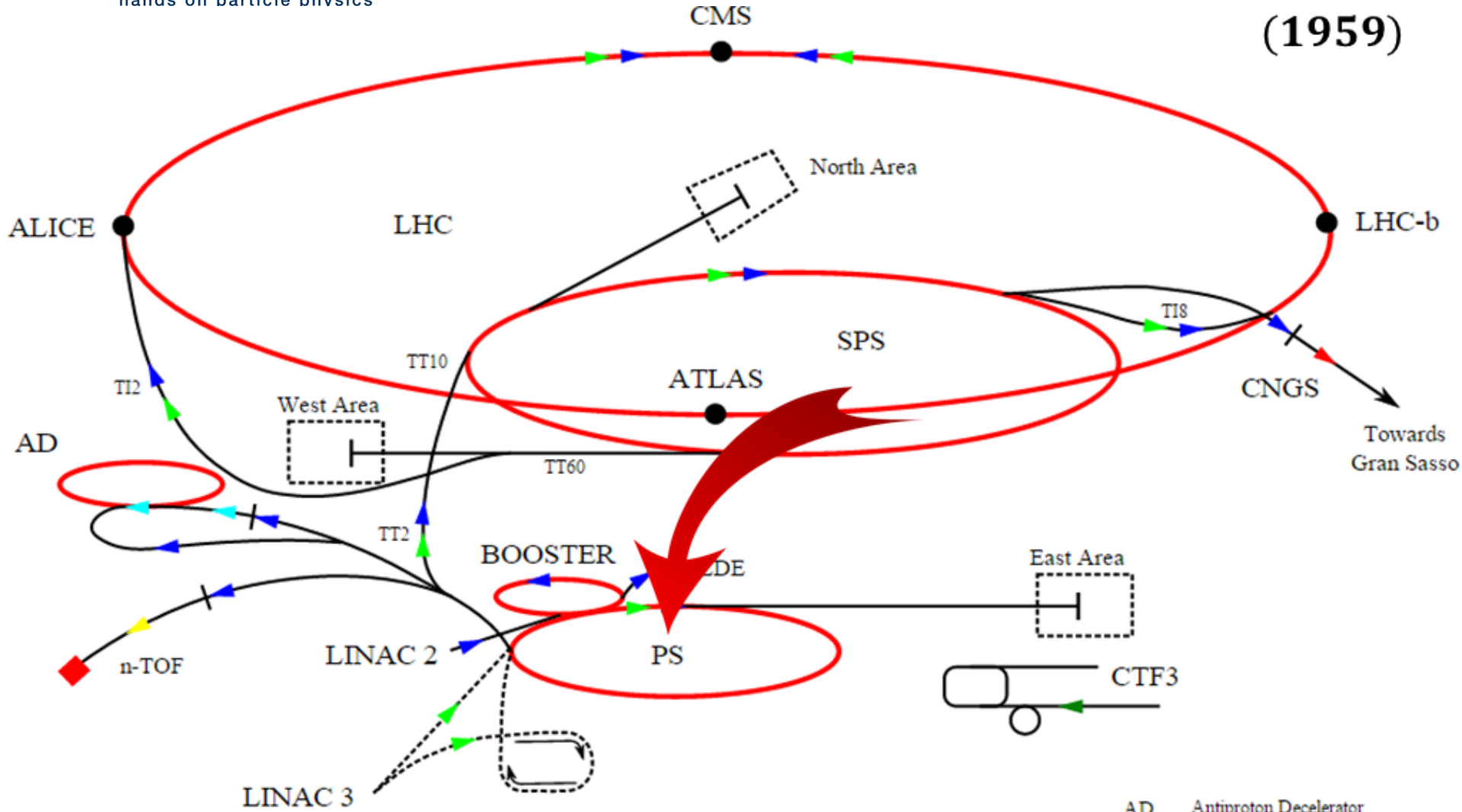
PS Proton Synchrotron  
 SPS Super Proton Synchrotron  
 LHC Large Hadron Collider

AD Antiproton Decelerator  
 n-TOF Neutron Time Of Flight  
 CNGS CERN Neutrinos Gran Sasso  
 CTF3 CLIC Test Facility 3

# Акцелераторски комплекс

## III: Proton Synchrotron ( $v = 0.99c$ ; $E = 25 GeV$ )

(1959)



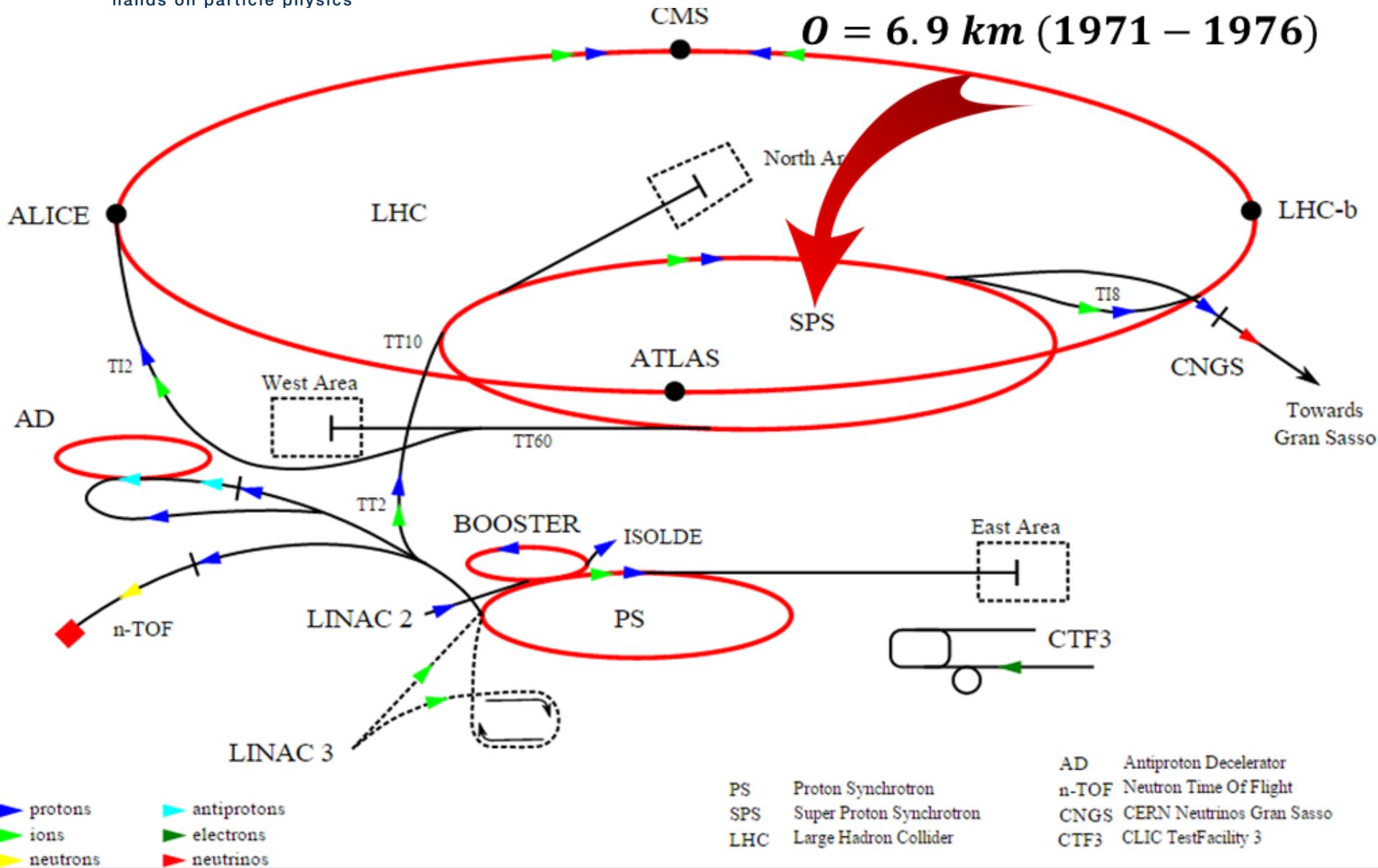
- ▶ protons
- ▶ antiprotons
- ▶ ions
- ▶ electrons
- ▶ neutrons
- ▶ neutrinos

- PS Proton Synchrotron
- SPS Super Proton Synchrotron
- LHC Large Hadron Collider
- AD Antiproton Decelerator
- n-TOF Neutron Time Of Flight
- CNGS CERN Neutrinos Gran Sasso
- CTF3 CLIC Test Facility 3

# Акцелераторски комплекс

## IV: Super Proton Synchrotron ( $E = 450 GeV$ )

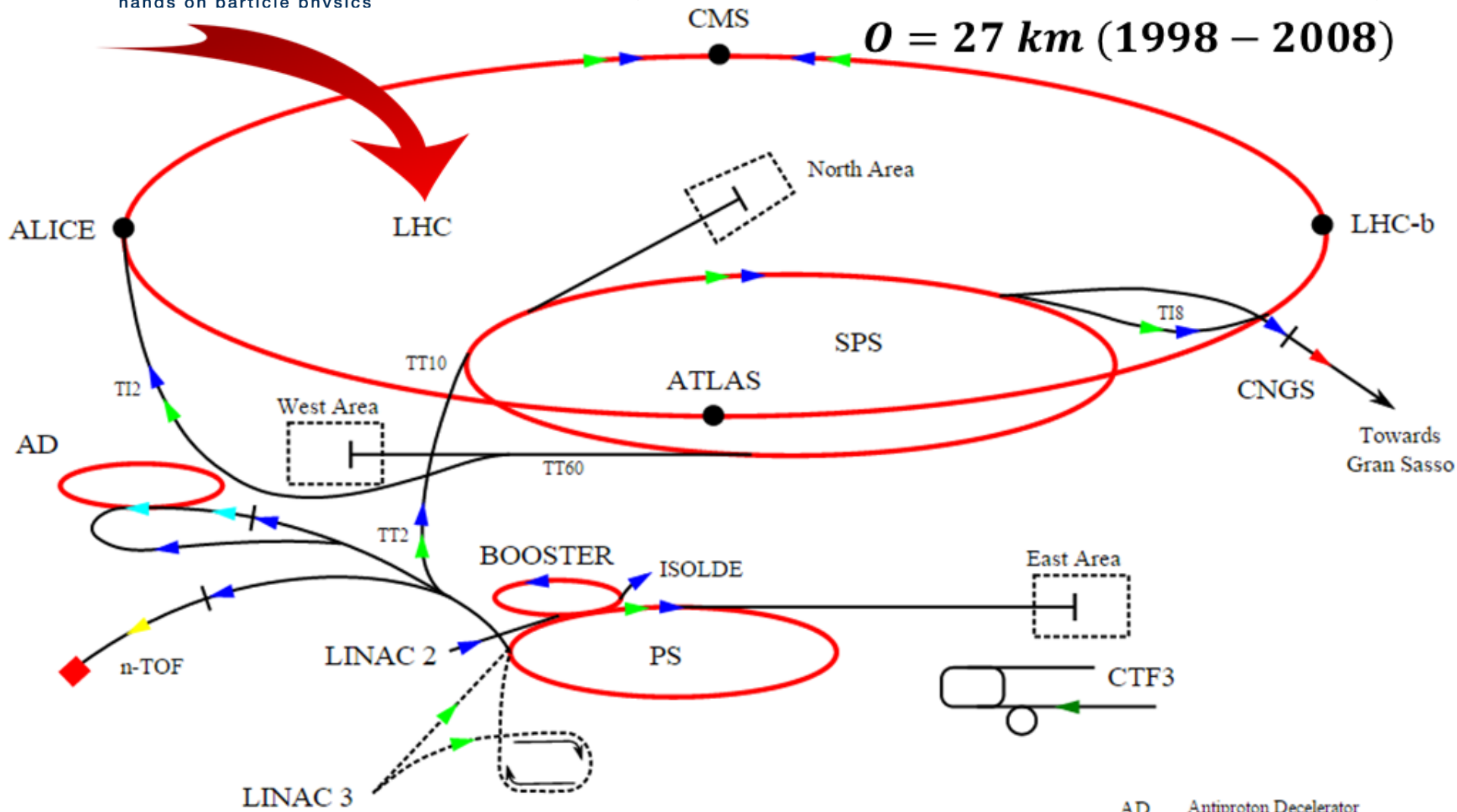
$O = 6.9 km$  (1971 – 1976)



# Акцелераторски комплекс

LHC ( $v = 0.999999991c$ ;  $E = 6.5 - 7 TeV$ )

$O = 27 km$  (1998 - 2008)



- ▶ protons
- ▶ antiprotons
- ▶ ions
- ▶ electrons
- ▶ neutrons
- ▶ neutrinos

- PS Proton Synchrotron
- SPS Super Proton Synchrotron
- LHC Large Hadron Collider
- AD Antiproton Decelerator
- n-TOF Neutron Time Of Flight
- CNGS CERN Neutrinos Gran Sasso
- CTF3 CLIC Test Facility 3



# Акцелераторски комплекс

Потребна су 4 минута и 20 секунди да протони испуне ЛХЦ и још 20 минута да достигну максималну енергију.

Затим је потребно додатно време да би се снопови колимисали и да би се постигли судари.

# Радиофреквентни систем за убрзавање



$$\vec{F} = q\vec{E}$$

За убрзавање честица користе се радиофреквентне шупљине (8 по снопу) које раде на 4.5 К.

Јачина електричног поља достиже **5 MV/m**.

Фреквенција: **400 MHz**

Акумулатор аутомобила – 12 V  
(1.17 трилиона акумулатора ~ ЛХЦ)



# Енергија при судару

Енергију највише лимитирају:

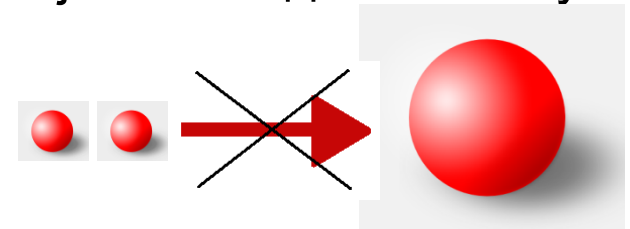
1. Могућност убрзавања
2. Величина акцелератора и снага диполних магнета

$$m \frac{v^2}{r} = evB$$

$$\frac{p}{e} = Br$$

## Зашто је потребна велика енергија?

Да би се произвеле „тешке“ честице неопходно је обезбедити велику енергију у систему центра масе!



Енергија партона?

Треба имати на уму да се при судару не користи целокупна енергија протона, већ само **фракција енергије коју носи партон** који учествује у примарној интеракцији!