

Large Hadron Collider

Մեծ Հադրոնային Բախիչ

Used and useful materials / Օգտագործված և օգտակար նյութեր

R. STEERENBERG [Accelerators for Beginners and the CERN Complex](#)

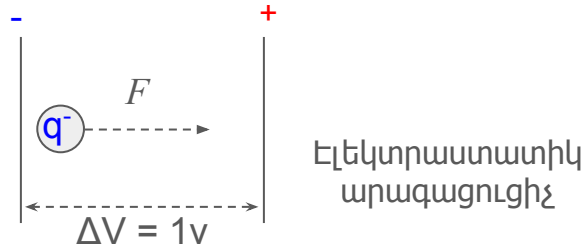
F. Asvesta [Accelerators and Beam Dynamics: 1,2,3](#)

J. Uythoven [Dutch Language Teacher Programme \(2023\)](#)

[Taking a closer look at LHC](#)

[CERN Experiments](#)

Լիցքերի արագացումը



Լորենցի ուժ
$$\vec{F} = q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

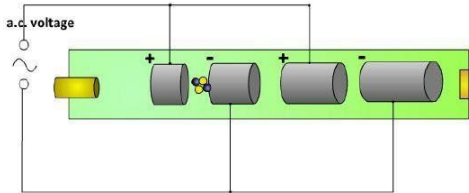
Միայն էլեկտրական դաշտը կարող է արագացնել մասնիկը, հաղորդելով 1 eV էներգիա ամեն 1 V անցած պոտենցիալների տարբերությունը անցնելիս ($= 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$)

Մագնիսական դաշտի ուժը մասնիկի ուղղությանը միշտ ուղղահայաց լինելով, աշխատանք չի կատարում
 → չի կարող փոխել մասնիկի էներգիան

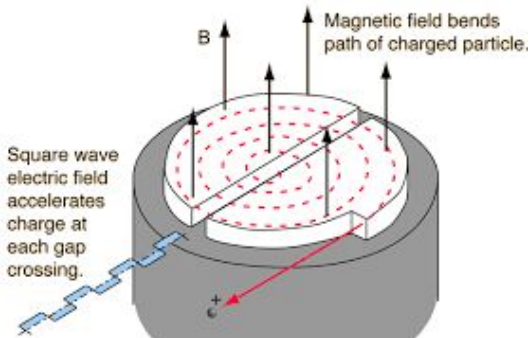
Սակայն այն կարող է շեղել մասնիկը, և թեքող ուժը աճում է մասնիկի արագության հետ!

Օգտագործվում է շրջանային արագացուցիչներում շարունակական արագացման համար՝

նույն էլեկտրական դաշտի տիրույթը բազմակի օգտագործմամբ:

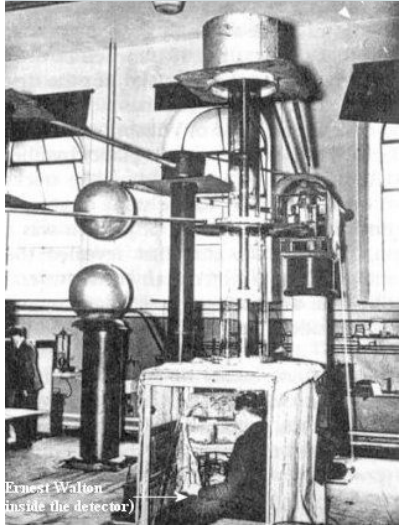


LINAC, Linear Accelerator
 Գծային արագացուցիչ

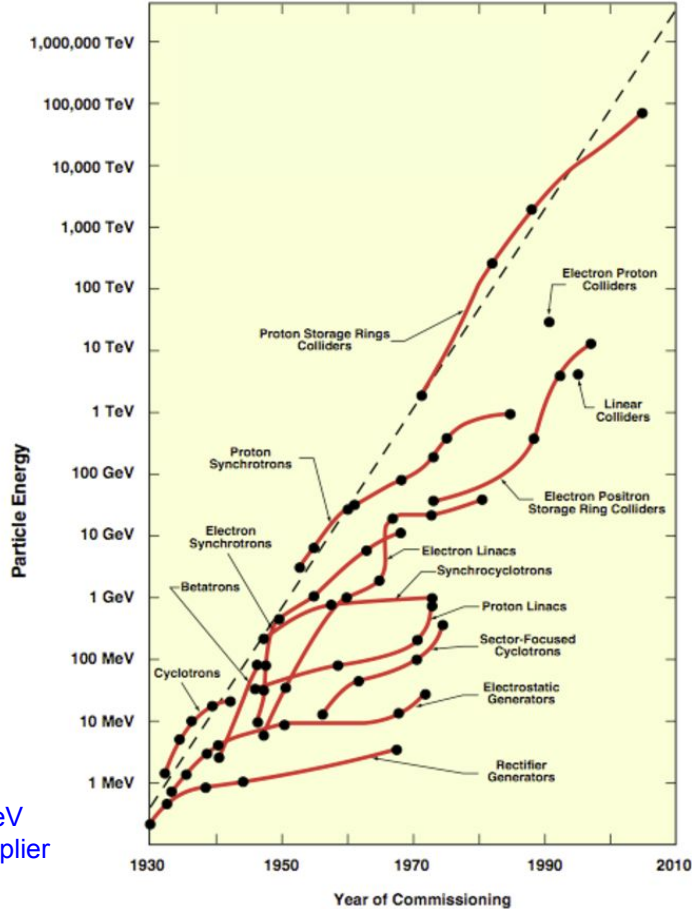


[cyclotron](#) → ... → [synchrotron](#)

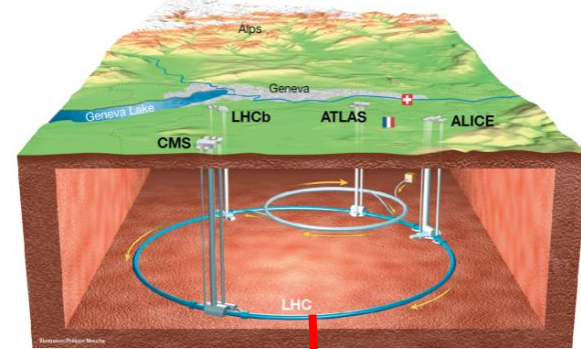
Արագացուցիչների զարգացումը



1932, 700 KeV
Voltage multiplier
D. Cockroft
J. Walton

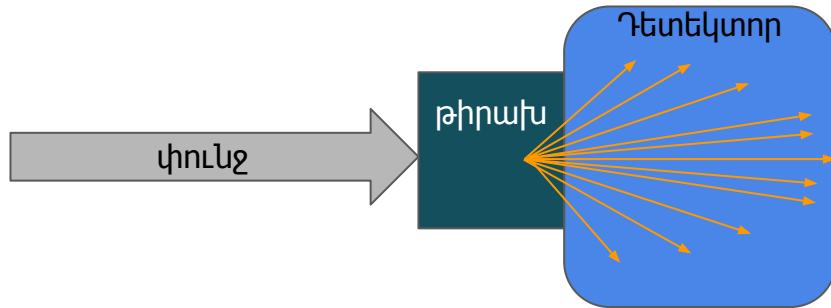


Chau, A. W. and Tigner, M.,
Handbook of Accelerator Physics and Engineering



Ինչու՞ է անհրաժեշտ բախիչը

Անշարժ թիրախ



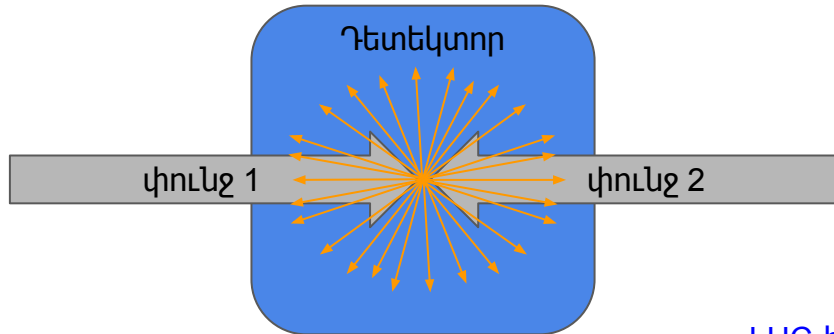
👍 Բարձր լուսատվություն (պնջի ավելի բարձր տոկոսն է պոխագրում տիրախով անցնելիս)

🗨️ Փնջի էներգիայի միայն փոքր մասն է հասանելի բախմանը

$$E_{CM} = \sqrt{m_{\phi}^2 + m_p^2 + 2m_p E_{\phi}} \quad (\text{SPS: } p_{\text{փունջ}} 450 \text{ GeV} \Rightarrow \sim 30 \text{ GeV})$$

մեծ մասը օգտագործվում է բախման արդյունքները առաջ մղելու համար (իմպուլսի պահպանում):

Կոլայդեր (բախիչ)



🗨️ Փնջերի նոսրությունը բերում է ավելի ցածր լումինոսություն

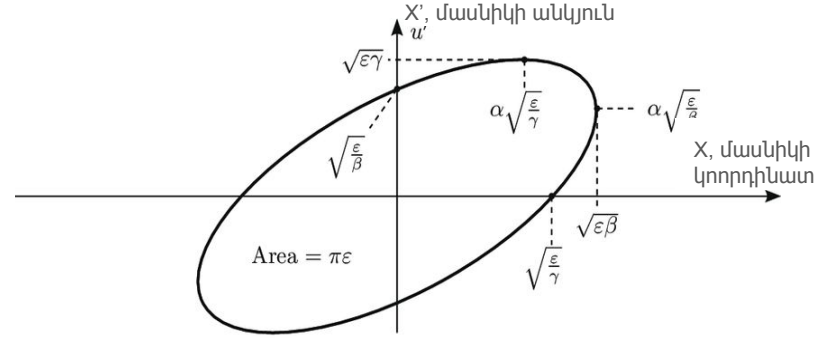
👍 Փնջերի ամբողջ էներգիան հասանելի է բախմանը (սիմետրիկ փնջերի համար) $E_{cm} = 2E_{\phi}$

👍🗨️ Շնված մասնիկները արձակվում են բոլոր ուղղություններով

LHC-ի 13 TeV p-p բախման էներգիային հասնելու համար, ֆիքսված թիրախով էքսպերիմենտը կպահանջեր ~85 TeV փունջ

Փնջի Էմիտանս (emittance)

- Փնջի մասնիկները ունեն որոշակի կոորդինատների և իմպուլսի (կամ անկյան) բաշխում:
Լիովիլիի ֆազային տարածության պահպանման թեորեմի համաձայն, այս խտության ինտեգրալը (մակերեսը) պահպանվում է (փոխազդեցությունների բացակայության դեպքում):
- Այս մակերեսը, որը կոչվում է «փնջի էմիտանս»:



$$\gamma x^2 + 2\alpha x x' + \beta x'^2 = \epsilon$$

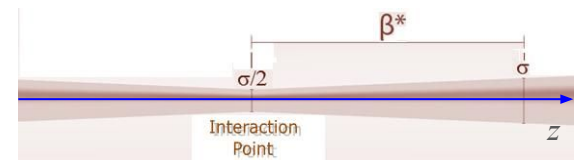
$$\epsilon_{\text{RMS}} = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle x \cdot x' \rangle^2}$$

արագացուցիչի կարևոր պարամետր է, որը ցույց է տալիս, թե որքան խիտ և միօրինակ իմպուլսով կարող է լինել փնջը տվյալ պահին:

- Փնջի պրոֆիլը կոնստանտ չէ, սովորաբար մենք ֆոկուսացնում ենք այն փոխազդեցության կետում՝ փոխազդեցության հավանականությունը առավելագույնի հասցնելու համար:
Փնջի չափսը տվյալ կետում: $\sigma(z) = \sqrt{\epsilon \beta(z)}$

Փոխազդեցության կետում ($z=0$) $\beta(z)$ ֆունկցիայի արժեքը կոչվում է β^* :

$$\beta(z) = \beta^* + z^2 / \beta^*$$

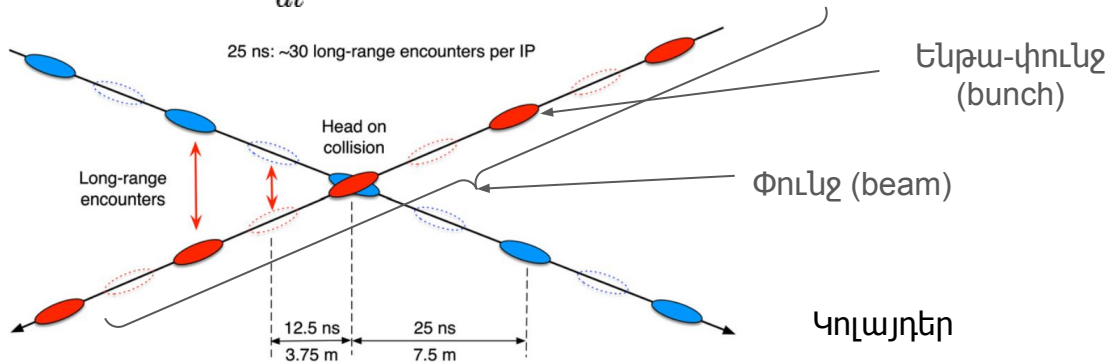


հավասար է հեռավորությանը, որի ընթացքում փնջի չափսը կրկնապատկվում է

Լումինոսություն (լուսատվության, luminosity)

Իրադարձությունների թիվը վայրկյանում:
 σ պրոցեսի կտրվածքը

$$\frac{dR}{dt} = L\sigma$$



Անշարժ թիրախ

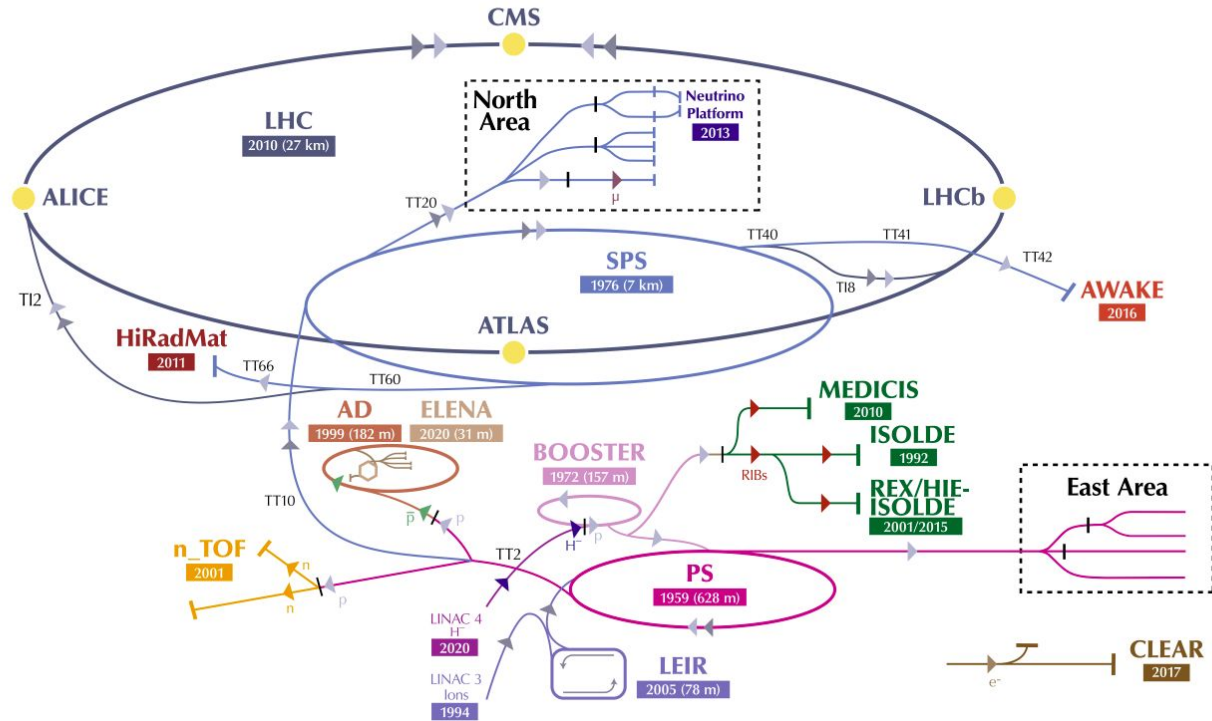
$$L = \Phi \rho_T l$$

- Φ հոսքը (մասնիկների թիվը վայրկյանում)
- ρ_T թիրախի խտությունը
- l թիրախի երկարությունը

$$L = \frac{N^2 n_b f}{4\pi \sigma_x^* \sigma_y^*} F = \frac{N^2 n_b f}{4\pi \epsilon_n \beta^*} F$$

- N մասնիկների քանակը մեկ (ենթա-)փնջում
- n_b (ենթա-)փնջերի քանակը
- f շրջանառման հաճախականությունը
- σ^* փնջի չափը բախման կետում
- $F < 1$ գործակից բախման անկյան պատճառով
- ϵ Էմիտանս
- ϵ_n նորմացված Էմիտանս
- β^* բետա ֆունկցիան բախման կետում

CERN-ի արագացուցիչների համալիր և Մեծ Հադրոնային Կոլայդեր (LHC)

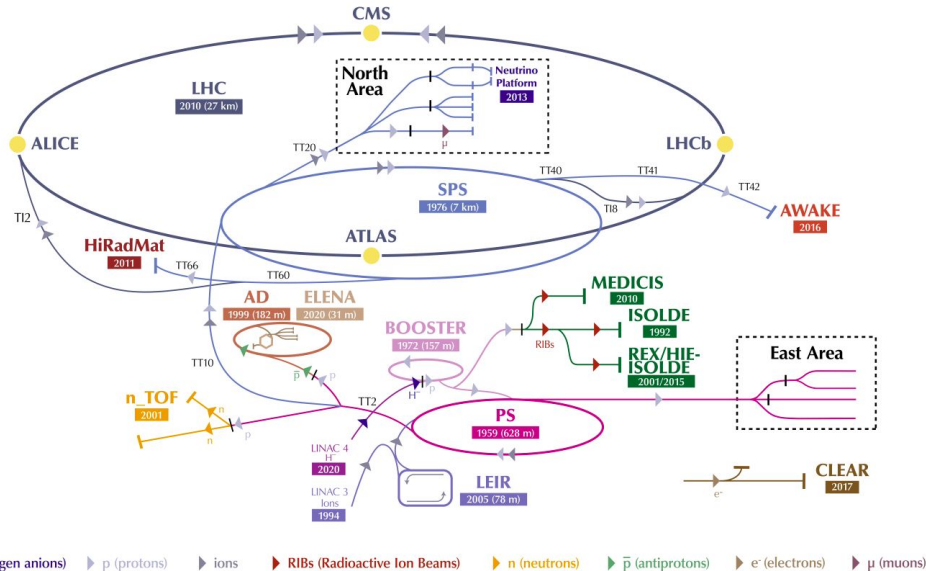


- ▶ H^- (hydrogen anions)
- ▶ p (protons)
- ▶ ions
- ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams)
- ▶ n (neutrons)
- ▶ \bar{p} (antiprotons)
- ▶ e^- (electrons)
- ▶ μ (muons)

LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE-ISOLDE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // MEDICIS // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINear ACcelerator // n_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // Neutrino Platform

CERN-ի արագացուցիչների համալիր և Մեծ Հադրոնային Բախիչ (LHC)

The CERN accelerator complex
Complexe des accélérateurs du CERN



Պրոտոնային փնջեր

LINAC-4	(H-) 160 MeV
PSB: Պրոտոնային սինքրոտրոն բուստեր	2 GeV
PS: Պրոտոնային սինքրոտրոն	26 GeV
SPS: Գերհզոր պրոտոնային սինքրոտրոն	450 GeV
LHC: Մեծ Հադրոնային Բախիչ	6.8 TeV

Իոնային փնջեր (^{208}Pb , $Z=82$)

ECR: Իոնների (27+) աղբյուր	2.5 keV/n
LINAC-3 (27+ \rightarrow 54+)	4.2 MeV/n
LEIR: Ցածր էներգիայի իոնային օղակ (54+ \rightarrow 82+)	72.2 MeV/n
PS: Պրոտոնային սինքրոտրոն (54+ \rightarrow 82+)	5.9 GeV/n
SPS: Գերհզոր պրոտոնային սինքրոտրոն	177 GeV/n
LHC: Մեծ Հադրոնային Կոլապեր (82+)	2.28 TeV/n

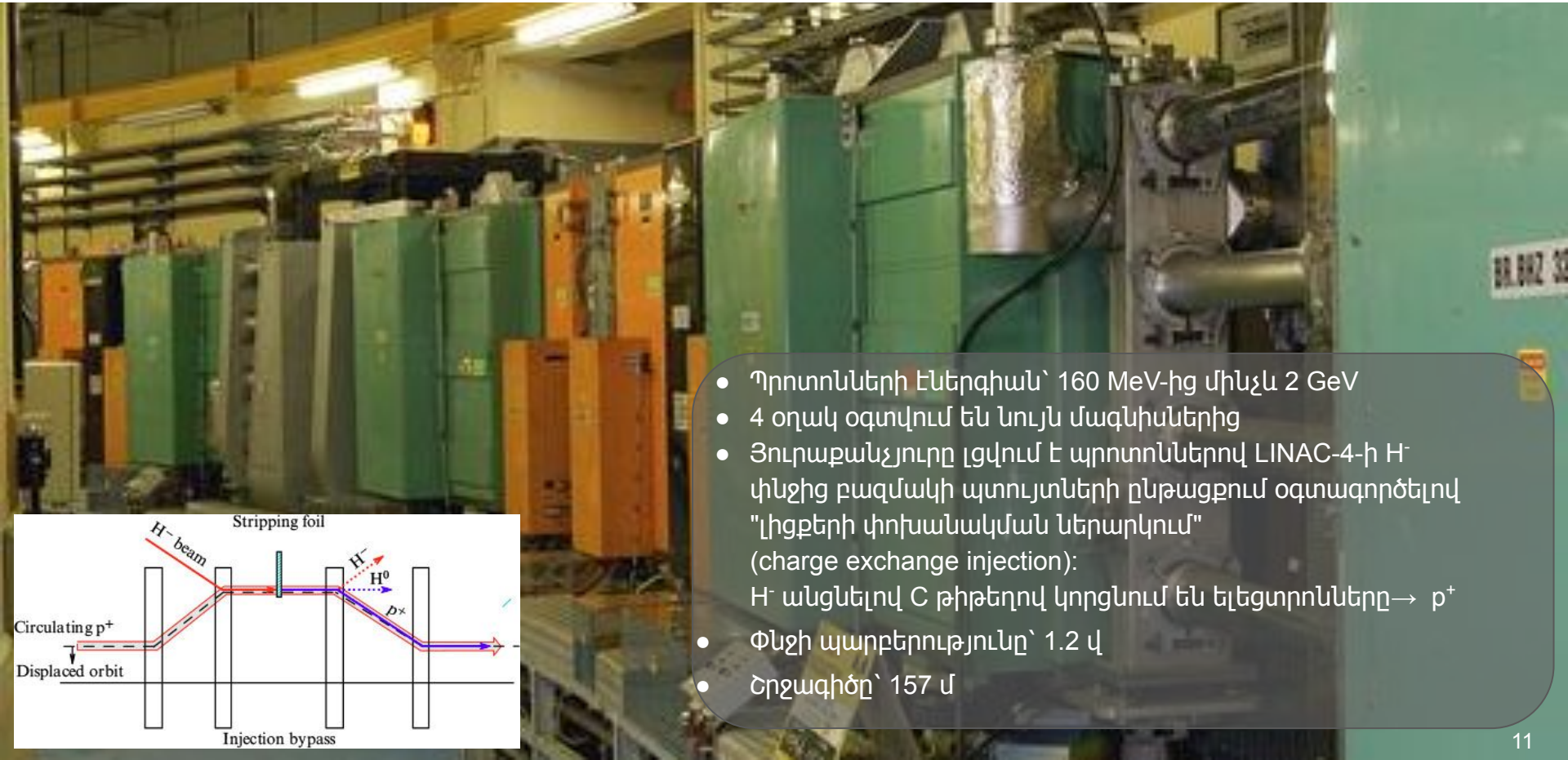
LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE-ISOLDE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // MEDICIS // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LInear ACcelerator // n_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // Neutrino Platform

LINAC 4 (2019)

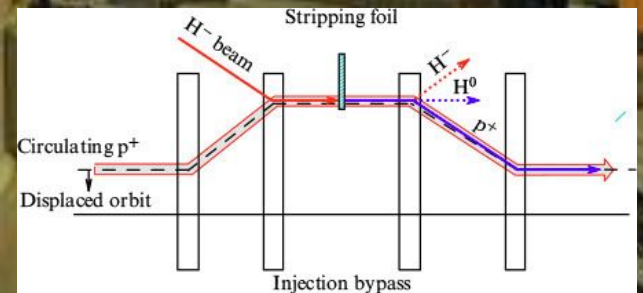


- H⁻ իոնների աղբյուր՝ 45 keV
- Փունջը արագացվում է մինչև 160 MeV
- Փնջի պարբերությունը՝ 1.2 ս
- 86 մ երկարություն

PSB: Proton Synchrotron Booster (1972) պրոտոնային սինքրոտրոն բուստեր

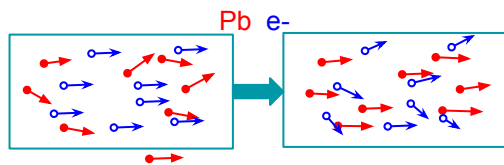
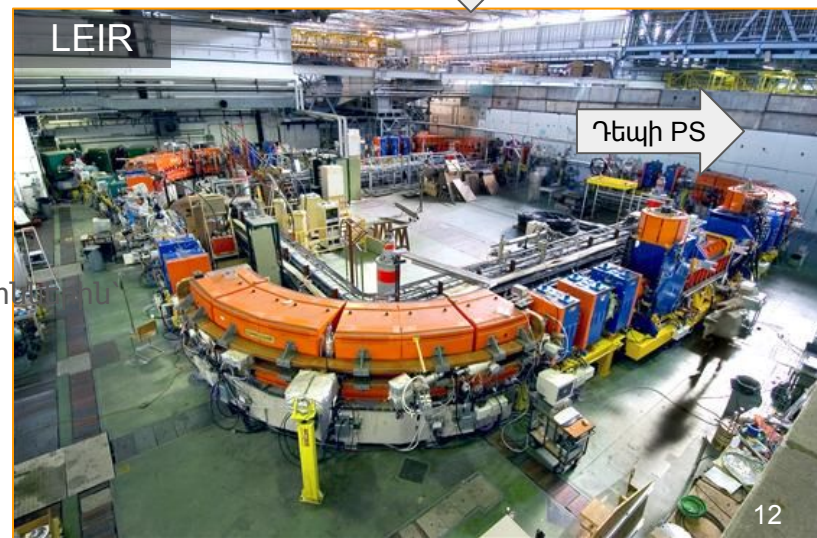
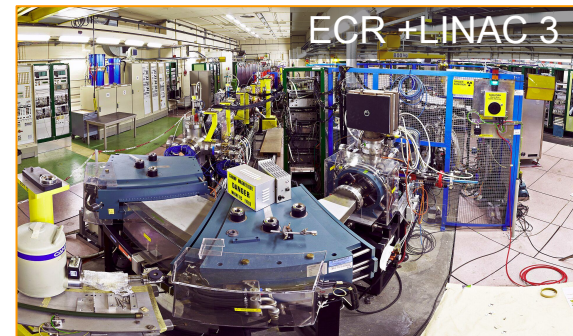


- Պրոտոնների էներգիան՝ 160 MeV-ից մինչև 2 GeV
- 4 օղակ օգտվում են նույն մագնիսներից
- Յուրաքանչյուրը լցվում է պրոտոններով LINAC-4-ի H^- փնջից բազմակի պտույտների ընթացքում օգտագործելով "լիցքերի փոխանակման ներարկում" (charge exchange injection):
 H^- անցնելով C թիթեղով կորցնում են էլեկտրոնները $\rightarrow p^+$
- Փնջի պարբերությունը՝ 1.2 μ
- Շրջագիծը՝ 157 մ



Իոնային փնջի պատրաստում: LINAC3 → LEIR

- ECR, Electron cyclotron resonance source (Էլեկտրոնների ցիկլոտրոնային ռեզոնանսի) իոնների աղբյուր:
 - Գոլորշիացված Pb ատոմները մասնակիորեն զրկվում են Էլեկտրոններից (մինչև +27 լիցք) Էլեկտրոնային պլազմայի հետ փոխազդեցության արդյունքում
 - ~0.5 գ կապար է օգտագործվում երկու շաբաթում
- LINAC 3: Իոնները արագացվում են մինչև 4.2 MeV/և, Էլքին զրկվում են Էլեկտրոններից` (մինչև +54 լիցք)
- LEIR, Low-Energy Ion Ring (Ցածր Էներգիայի Իոնային Օղակ)
 - ECR-ից մտած երկար փունջը բաժանում է 4 փնջի և արագացնում մինչև 72 MeV/և
 - Pb փնջի «սառեցումն» է` դրա Էմիտանսը նվազեցնելու (իմպուլսները դարձնել ավելի համասեռ) նպատակով`
 - Pb փունջը միացվում է Նույն երկայնական արագության մոնիտորմատիկ Էլեկտրոնային փնջին
 - Pb իոնները իրենց լայնական իմպուլսը փոխանցում են «սառը» Էլեկտրոն Կուլոնի ցրման միջոցով

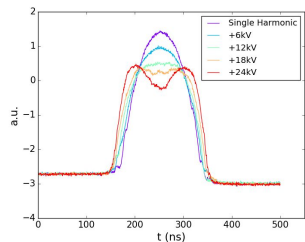


PS: Proton Synchrotron (1959) պրոտոնային սինքրոտրոն

- CERN-ի առաջին սինքրոտրոնը
- Արագացնում է պրոտոնները 2 GeV-ից մինչև 26 GeV
- 277 մագնիս (100 դիպոլ որոնք նաև ֆոկուսացնում են)
- Ֆիկլի տևողությունը՝ 1.2-ից մինչև 3.6 μ
- Շրջագիծը՝ 628 մ



PS-ը սահմանում է ենթա-փնջերն հետագա արագացման փուլերում



- PSB-ից 4 փունջ է ներարկվում



- 1.2 վայրկյան PSB ցիկլից հետո ևս 2 փունջ



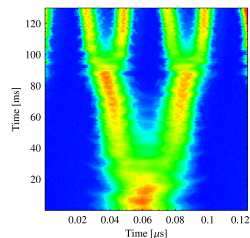
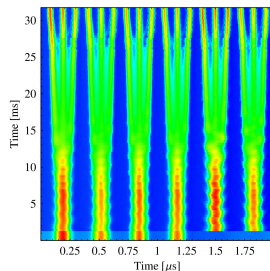
- Յուրաքանչյուր փունջ բաժանվում 3 փնջի → 18



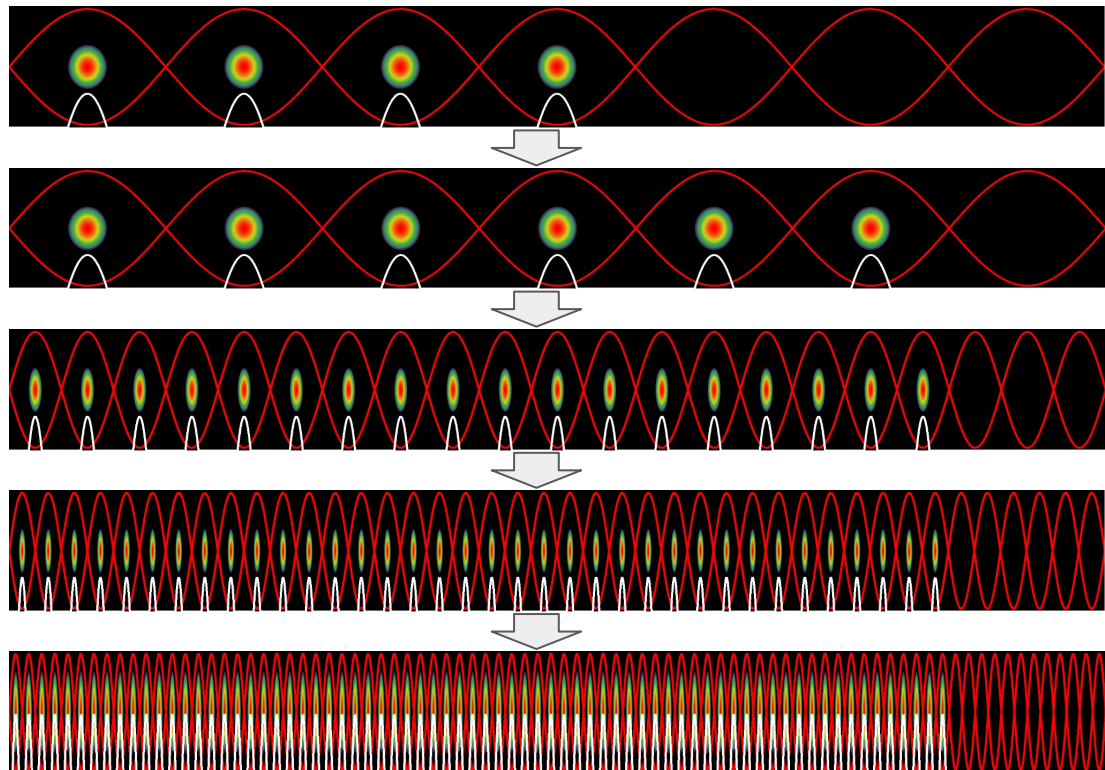
- Յուրաքանչյուրն բաժանվում է 2-ի → 36



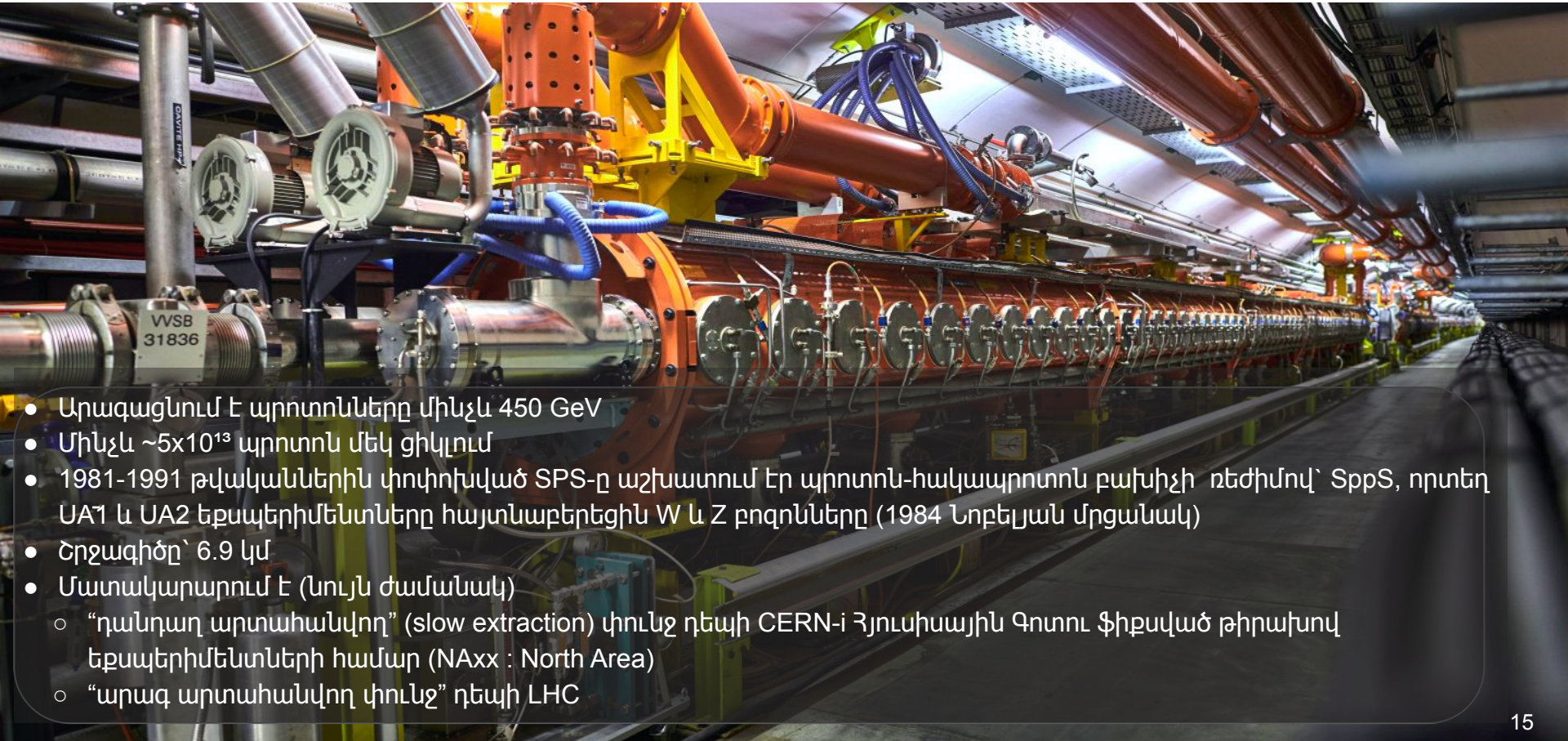
- Եվս մեկ անգամ → 72



Օգտագործելով ավելի բարձր RF հարմոնիկներ

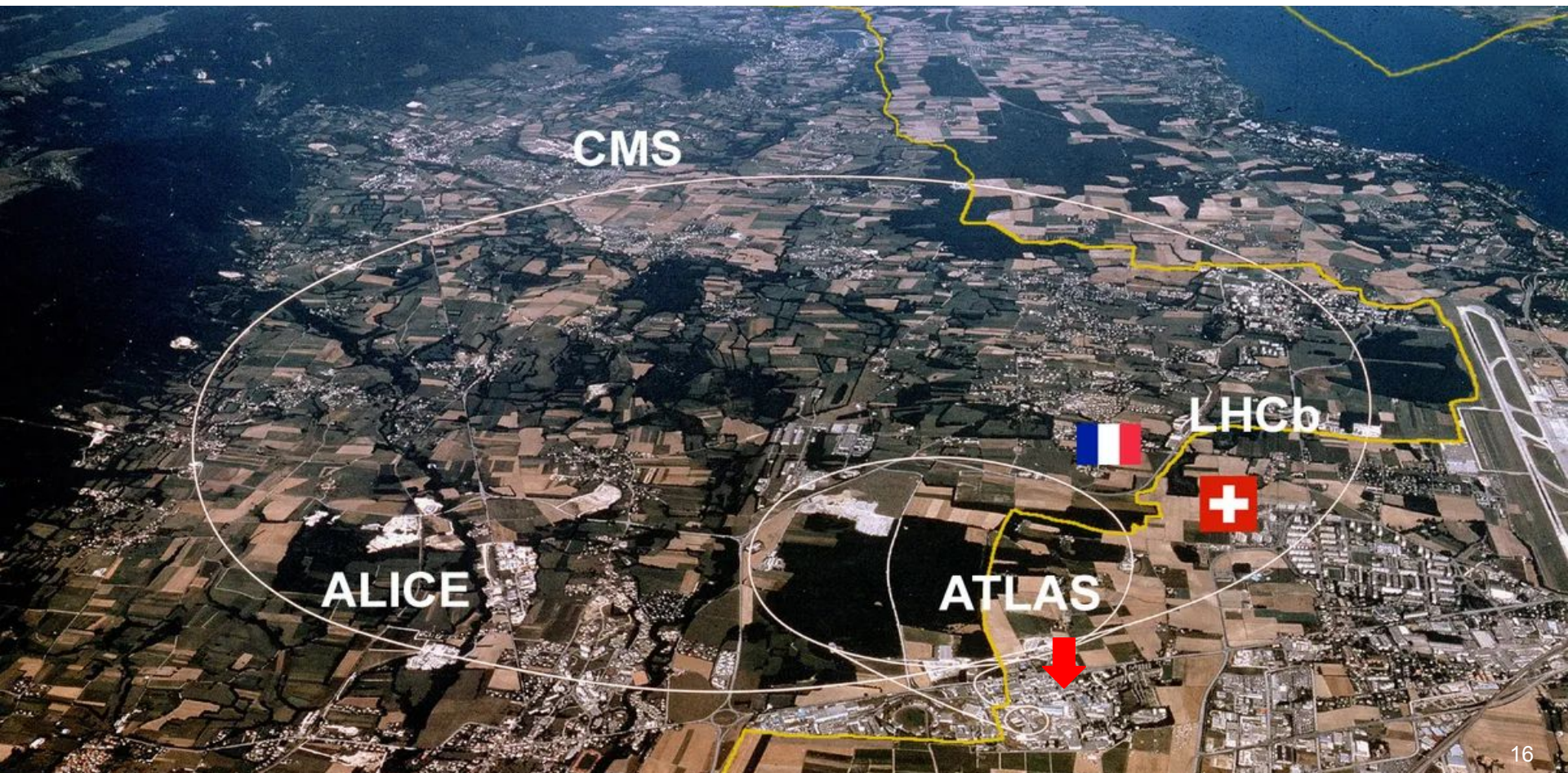


SPS: Super Proton Synchrotron (1976) Գերհզոր պրոտոնային սինքրոտրոն



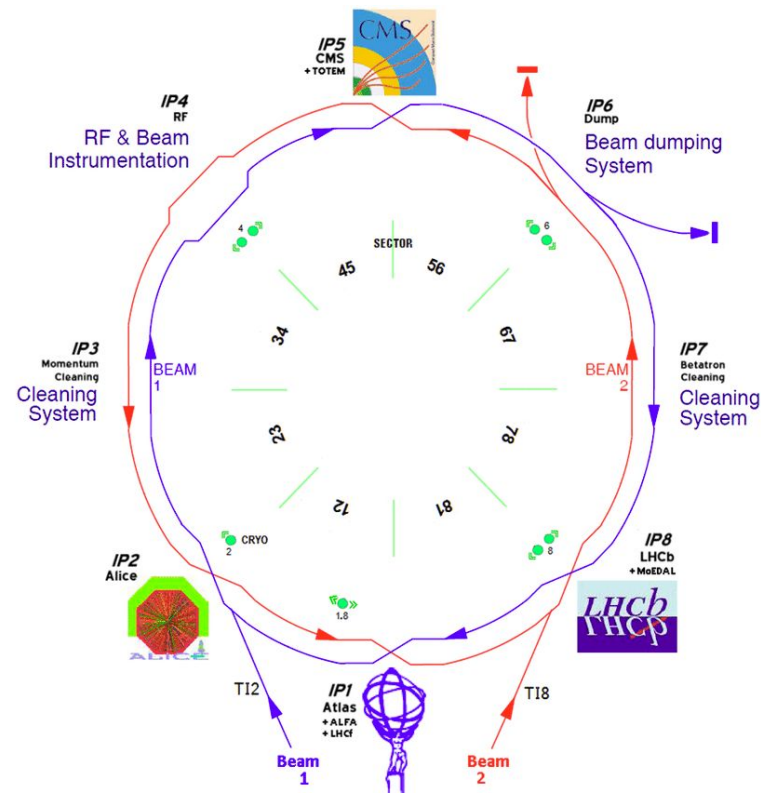
- Արագացնում է պրոտոնները մինչև 450 GeV
- Մինչև $\sim 5 \times 10^{13}$ պրոտոն մեկ ցիկլում
- 1981-1991 թվականներին փոփոխված SPS-ը աշխատում էր պրոտոն-հակապրոտոն բախիչի ռեժիմով՝ SppS, որտեղ ՍՊ1 և ՍՊ2 եքսպերիմենտները հայտնաբերեցին W և Z բոզոնները (1984 Նոբելյան մրցանակ)
- Շրջագիծը՝ 6.9 կմ
- Մատակարարում է (սույն ժամանակ)
 - “դանդաղ արտահանվող” (slow extraction) փունջ դեպի CERN-ի Հյուսիսային Գոտու ֆիքսված թիրախով եքսպերիմենտների համար (NAxx : North Area)
 - “արագ արտահանվող փունջ” դեպի LHC

LHC: Large Hadron Collider
Մեծ հադրոնային բախիչ



LHC՝ փաստեր...

- 26.7 կմ սրջանագիծ 50-175 մ խորության վրա
- Մինչև 2808 պրոտոնային ենթա-փունջ (bunch)՝ (յուրաքանչյուրում $\sim 1.2 \times 10^{11}$ p) կամ 1248 կապարի իոնային ենթա-փունջ (յուրաքանչյուրում $\sim 7 \times 10^7$ իոնով)
- 25 նանովայրկյան բաժանման հեռավորությամբ և 11245 Hz պտտման հաճախությամբ:
- Բախման էներգիա՝ մինչև 13.6 TeV p-p, 5.36 TeV Pb-Pb
- Բախման հաճախականություն՝ մինչև 600 MHz p-p, 50 kHz Pb-Pb
- Լումինոսություն: մինչև 2×10^{34} սմ⁻² վ⁻¹ պրոտոն-պրոտոն, 6×10^{27} սմ⁻² վ⁻¹ Pb-Pb
- 8 մուտքի և փնջերի հատման կետեր՝ 4 տեխնիկական և 4-ը որտեղ տեղակայված են եքսպերիմենտները՝ ALICE, CMS, LHCb, ATLAS
- LHC-ի գործողության ժամանակ (մայիս-դեկտեմբեր) CERN-ը օգտագործում է ~ 200 MW էլեկտրաէներգիա (ժնկի էներգիայի մեկ երրորդը): Ձմեռվա ամիսներին՝ ~ 80 MW::



Source: [Machine Protection and Operation for LHC](#)



LHC-ի հիմնական բաղադրիչներ

- Գերհաղորդական Մագնիսներ`

- Փնջերը պահվում են 26.7 կմ օղակձև ճանապարհի վրա 1232 գերհաղորդական դիպոլ մագնիսներով (14.3 մ, ~8 Տեսլա)
- Բվադրուպոլ մագնիսները օգտագործվում են փնջի ֆոկուսացման համար

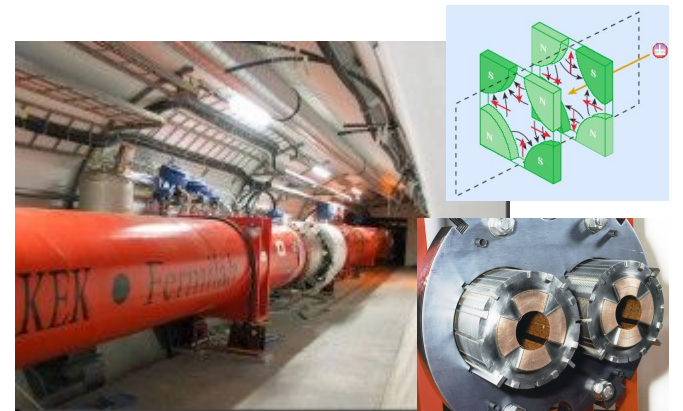
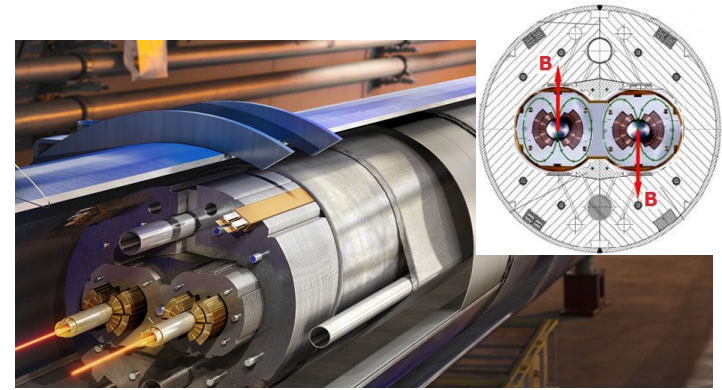
- Կրիոգենիկ Յամակարգ`

Յեղուկ հելիումի շրջանառությամբ մագնիսները սառեցվում են գերհաղորդականության համար պահանջվող 1.9 K (-271°C) ջերմաստիճանին

- Փնջի խողովակներ և Վակուումային Յամակարգ

- Մասնիկները շարժվում են գերբարձր 10^{-7} Պասկալ (10^{-12} մթ) և սառը 5 K վակուում ունեցող խողովակներում` փնջի օդի հետ փոխազդեցությունները նվեզեցնելու համար
- Փոխազդեցության կետերի տիրույթում վակուումը հասնում է 10^{-9} Պասկալի, չափումների աղմուկը նվեզեցնելու համար

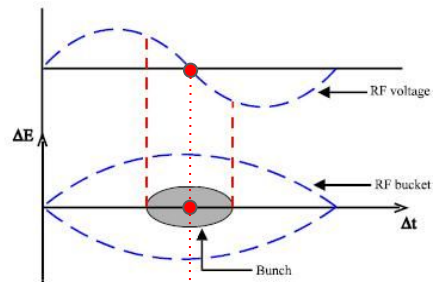
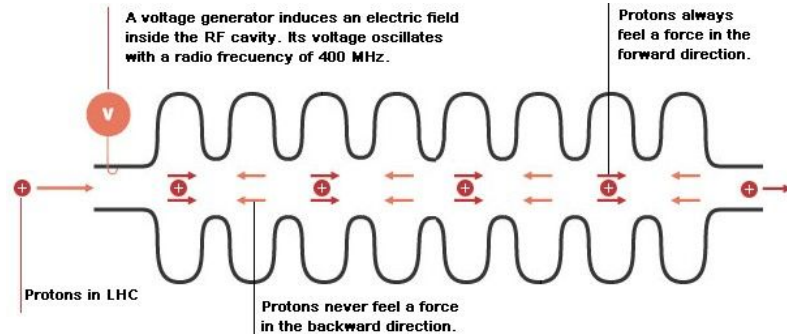
- Մոնիտորինգի և հետադարձ կապի համակարգեր



LHC-ի հիմնական բաղադրիչներ

- Ռադիոհաճախային խոռոչներ (RF cavities)

- 8 գերհաղորդիչ 400 MHz 2 MV խոռոչ ամեն փնջի համար:
- RF-իզոլյուցիոն են մատակարարում փնջին մինչև առավելագույն էներգիայի արագացման ընթացքում (~20 րոպե):
- Ապահովում են 2808 (ենթա-)փնջերը խիտ փնջավորումը բախման կետերում բարձր լյումինոսություն ապահովելու նպատակով:



սինքրոնային մասնիկ՝ (RF 0 էլ. դաշտի ֆազաի հետ)

Ավելի արագ կամ դանդաղ մասնիկները կտեսնեն համապատասխան արգելակող կամ արագացնող էլ. դաշտ.

⇒ Փնջի մասնիկները տատանվում են հետ ու առաջ սինքրոնային օրբիտի շուրջ՝ սինխրոտրոնային տատանումներ:

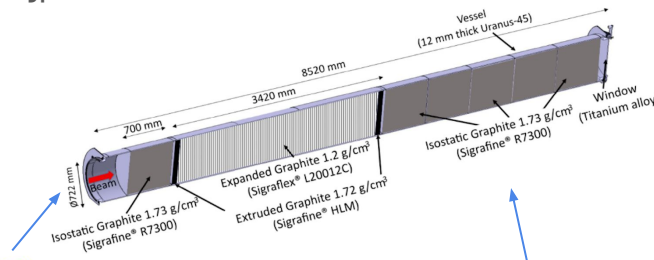
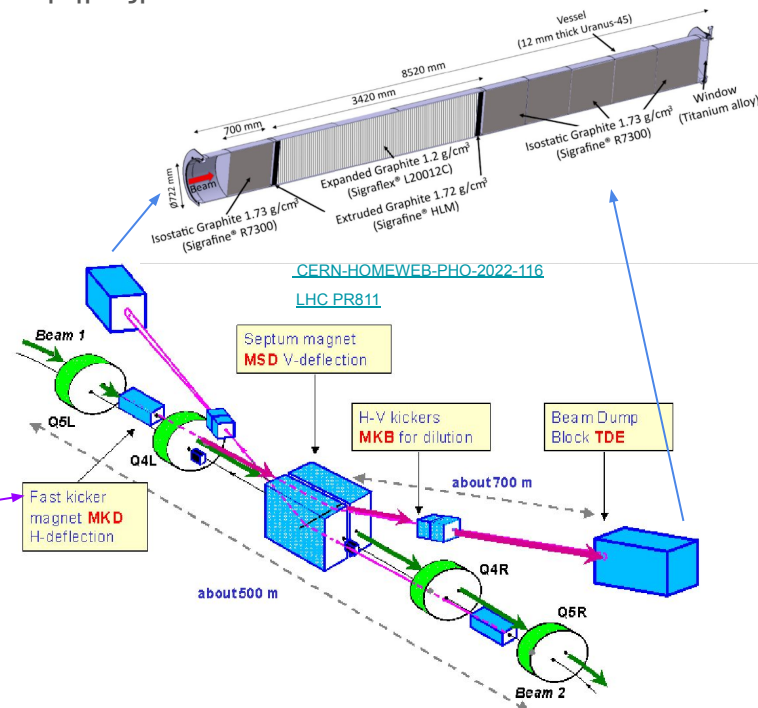
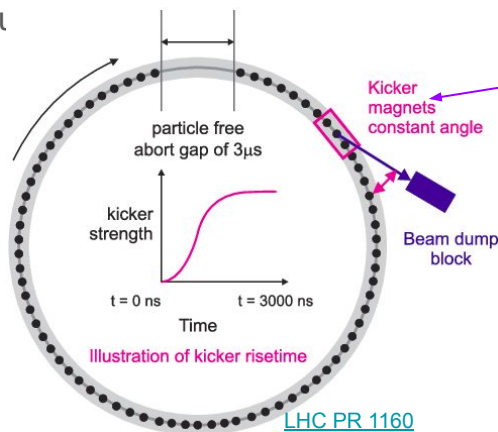
Փնջի դուրսբերման համակարգ

- Չնայած յուրաքանչյուր փնջի ընդհանուր կշիռը մոտ 0.5 տոնոգրամ է (մրջյունից 2×10^6 անգամ թեթև), դրա էներգիան $360 \text{ ՄՋ է} \Leftrightarrow 150 \text{ կմ/ժ}$ արագությամբ 400 տոննա զնացքի էներգիայի:

- Փնջի դուրսբերման համակարգը ապահովում են մասնիկների անվտանգ հեռացումը անհրաժեշտության դեպքում՝ նոսրացած փունջը "մարելու" կամ արտակարգ իրավիճակներում՝ ուղղելով փունջը հատուկ կլանիչ (beam dump)

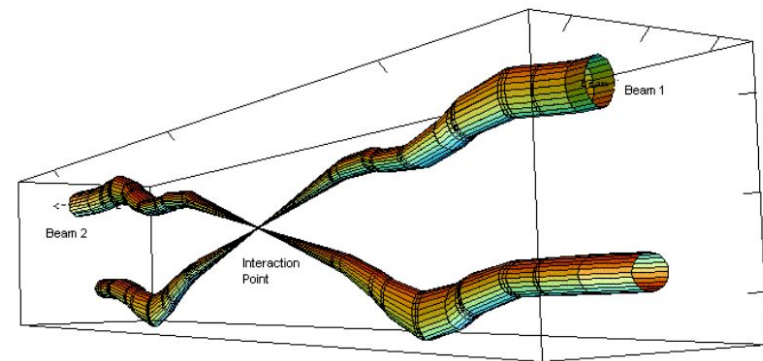
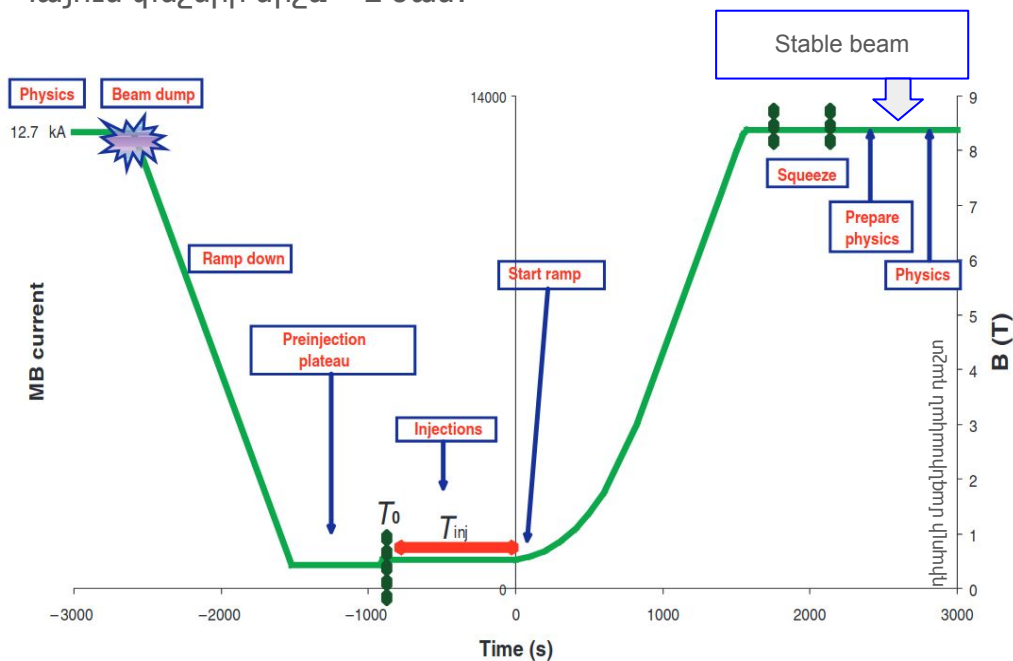
- Պահանջվող պահին հատուկ մագնիսային հարվածիչը (kicker magnet) փունջը հրում է դեպի ավելի հզոր մագնիս, որը այն թեքում է դեպի փնջի կլանիչ

- LHC-ի օրբիտի մի մասը թողնվում է առանց լցված ենթա-փնջերի՝ թույլ տալու համար հարվածիչ մագնիսը հասնի հարկավոր դաշտին



LHC-ի աշխատանքի ցիկլ

- Բախումները տեղի են ունենում միայն կայուն փնջի (stable beam) ժամանակահատվածում (մինչև 30 ժամ):
- Երբ փնջի ինտենսիվությունը ընկնում է որոշ շեմից ցածր, այն դուրս է բերվում (dump) և նոր լիցքավորման (fill) ցիկլ է սկսվում:
- Կայուն փնջերի միջև՝ ~2 ժամ:



[Protection of the CERN Large Hadron Collider](#)

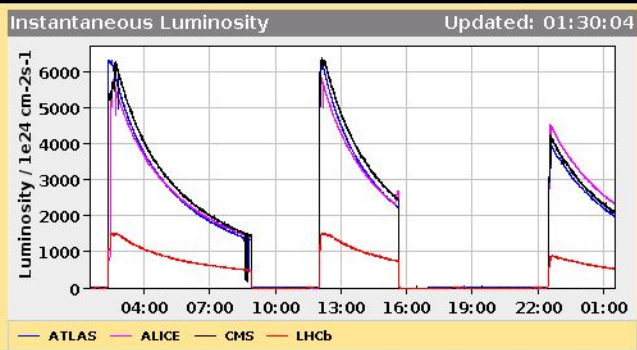
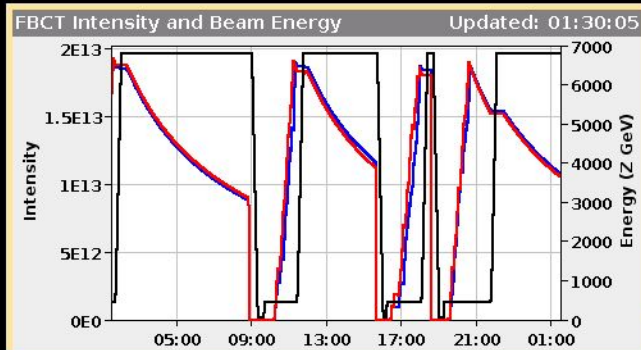
LHC Page1 Fill: 10348 E: 6799 Z GeV t(SB): 02:56:43 11-11-24 01:30:06

ION PHYSICS: STABLE BEAMS

Energy: **6799 GeV** I B1: **1.14e+13** I B2: **1.13e+13**

Beta* IP1: **0.50 m** Beta* IP2: **0.50 m** Beta* IP5: **0.50 m** Beta* IP8: **1.50 m**

Inst. Lumi [(b.s)⁻¹] IP1: 1984.24 IP2: 2330.90 IP5: 2063.56 IP8: 528.19



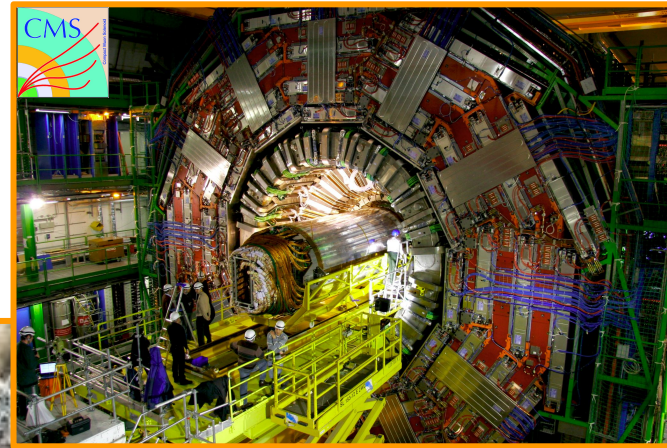
Comments (11-Nov-2024 01:21:48)
 1240b fill for physics
 plan to dump at ~3:30am

BIS status and SMP flags	B1	B2
Link Status of Beam Permits	true	true
Global Beam Permit	true	true
Setup Beam	false	false
Beam Presence	true	true
Moveable Devices Allowed In	true	true
Stable Beams	true	true

AFS: 50ns_1240b_1032_1032_557_56bpi_PbPb

PM Status B1 ENABLED PM Status B2 ENABLED

LHC-ի մեծ երապերիմենտները

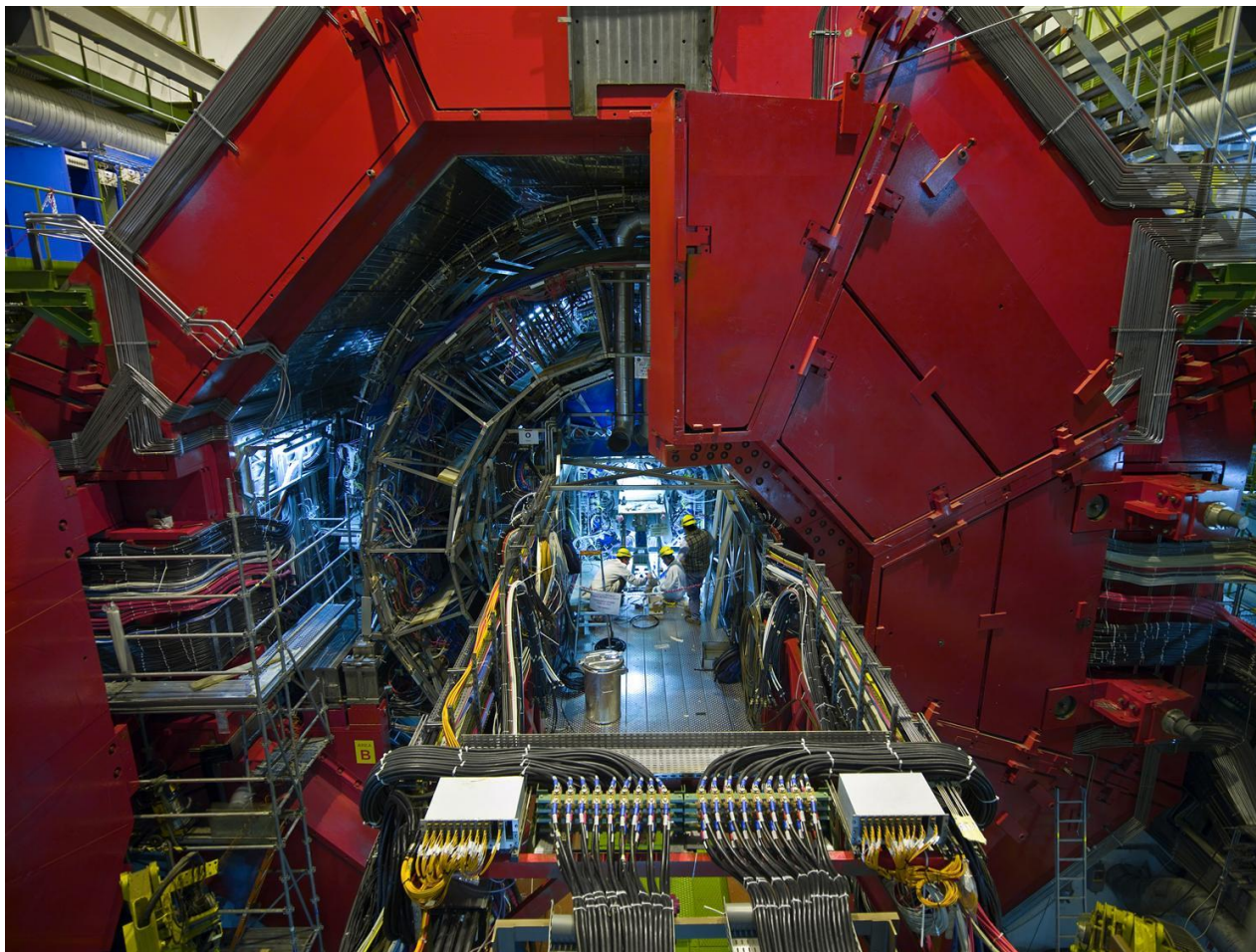




ALICE

ALICE

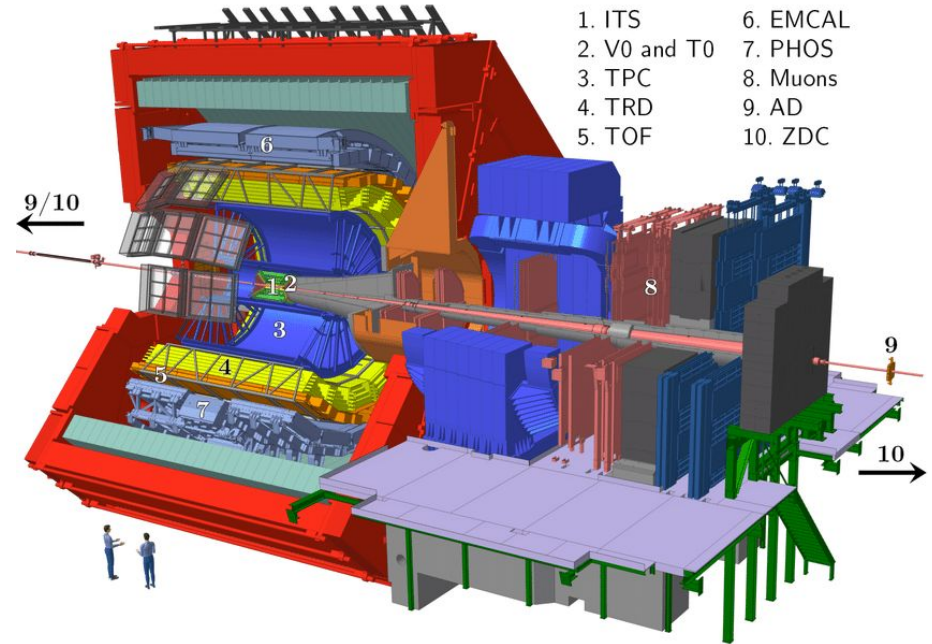
A Large Ion Collider Experiment



CERN-ի հիմնական ծանր իոնների էքսպերիմենտն է, բայց ուսումնասիրում է նաև պրոտոնների բախումներ:

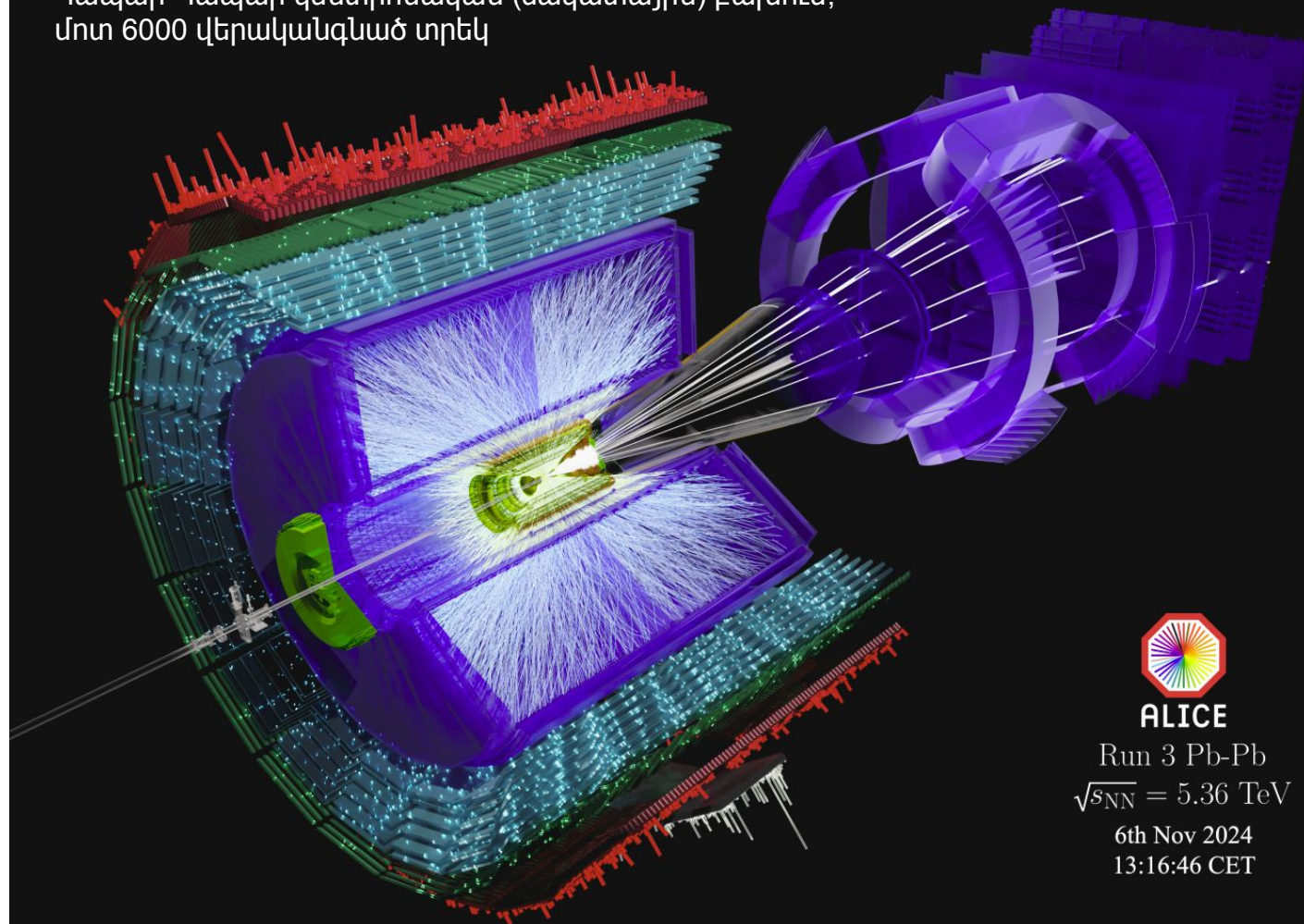
Գլխավոր նպատակը Քվարկ-Գլյուոնային Պլազմայի (QGP) որոնումն է՝ նյութի այն վիճակը, որը գոյություն է ունեցել Մեծ Պայթյունից $\sim 10^{-5}$ վայրկյան անց:

- ITS: ներքին տրեկերի 7 Si պիքսելային շերտեր
- TPC: 90 մ³ ծավալով ժամանակի Պրոյեկցիայի խցիկ (աշխարհում ամենամեծը)
- TRD: 6 Անցումային ճառագայթման շերտ
TOF: 1 շերտ թռիչքի ժամանակի չափման դետեկտոր
- EMCAL, PHOS: երկու էլեկտրամագնիսական կալորիմետր
- MS/MD: Առաջային Մյուոնային Սպեկտրոմետր





Կապար-Կապար կենտրոնական (ճակատային) բախում,
մոտ 6000 վերականգնած տրեկ



ALICE

Run 3 Pb-Pb

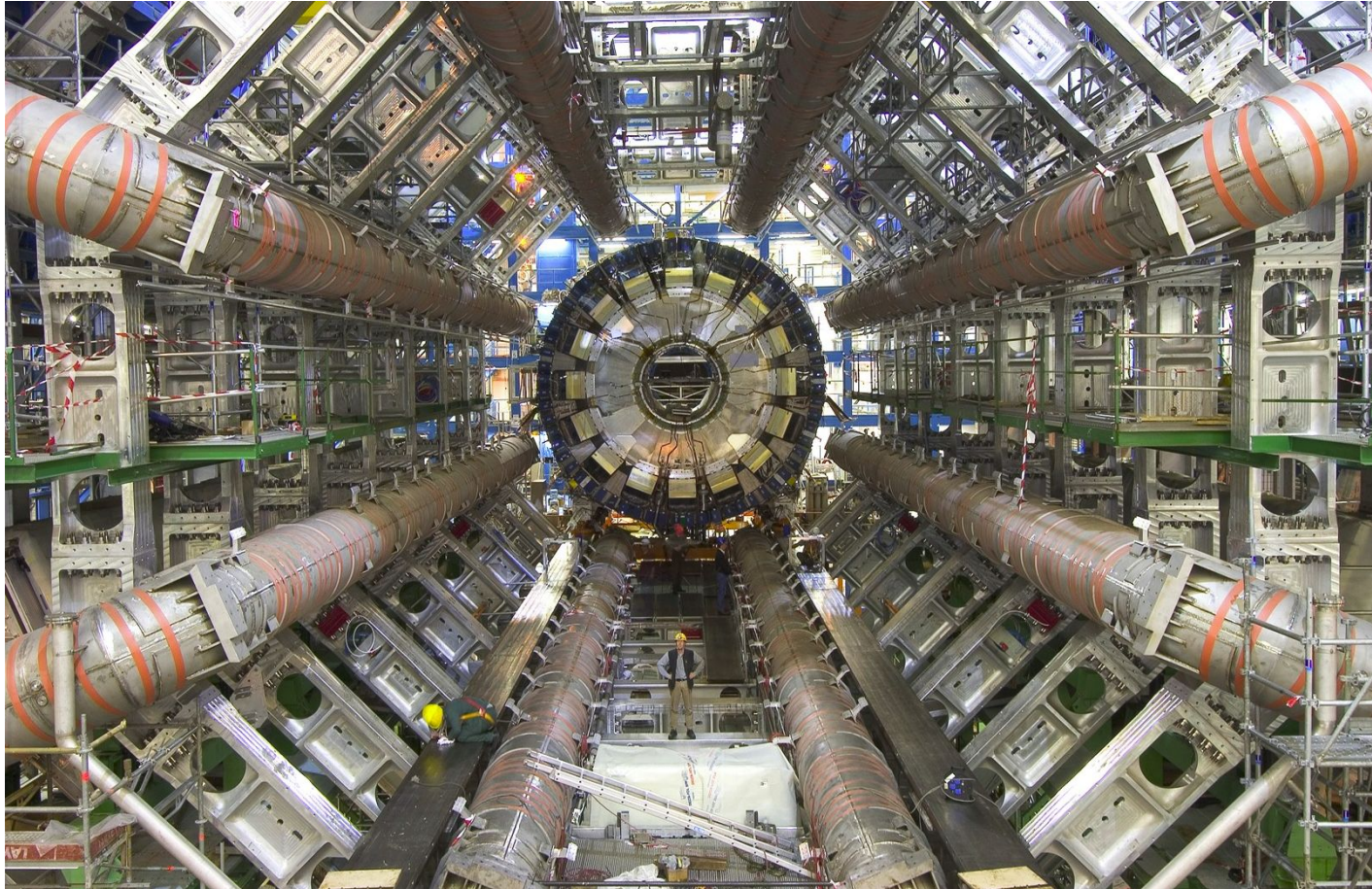
$\sqrt{s_{NN}} = 5.36$ TeV

6th Nov 2024

13:16:46 CET

ATLAS

A Toroidal LHC Apparatus



- CERN-ի ամենամեծ էքսպերիմենտն է
- Ընդհանուր նշանակության դետեկտոր, հայտնի է (CMS-ի հետ համատեղ) Յիգսի բոզոնի հայտնաբերումով՝
 - H-բոզոնը պատասխանատու է Ստանդարտ Մոդելի մասնիկների ոչ-զրո զանգվածների և թույլ և էլեկտրամագնիսական ուժերի տարանջատման համար:
- Իրականացնում է Ստանդարտ Մոդելի պարամետրերի ճշգրիտ չափումներ և փնտրում է այդ մոդելով չնկարագրվող ազդանշաններ:

- 5 գլանաձև պիքսելային և 4 միկրոսթրիպ շերտեր ներքին տրեկինգի համակարգում՝ գերհաղորդիչ 2 T սուլենոիդ մագնիսում
- Անցումային ճառագայթման տրեկինգի համակարգ՝ էլեկտրոնների նույնականացման համար
- Հադրոնային և էլեկտրամագնիսական կալորիմետրեր
- Ամբողջ համակարգը տեղադրված է գերհաղորդիչ տորոյիդալ մագնիսի դաշտում
- շրջապատված է մուոնային խցիկներով, օգտագործելով 5 տարբեր տեխնոլոգիաներ՝ կախված դրանց տեղակայումից:

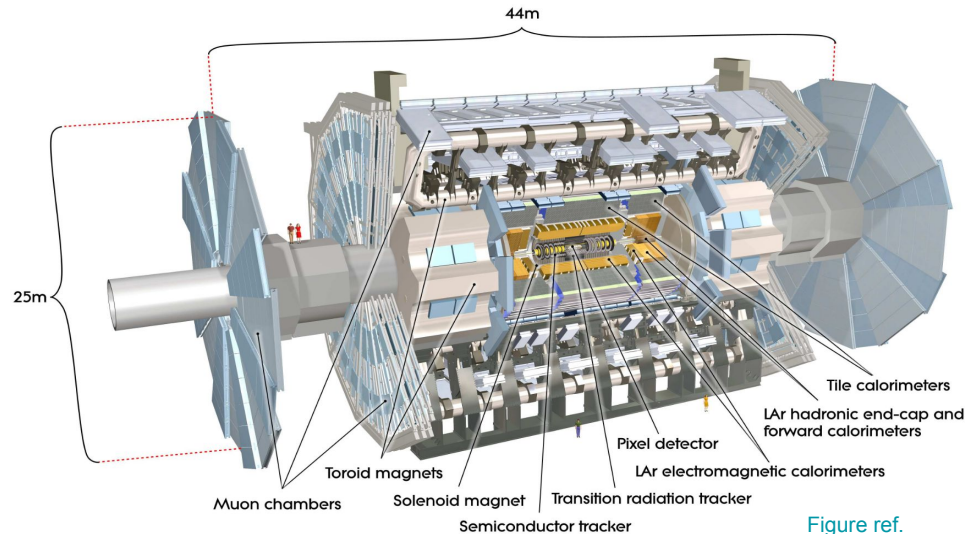
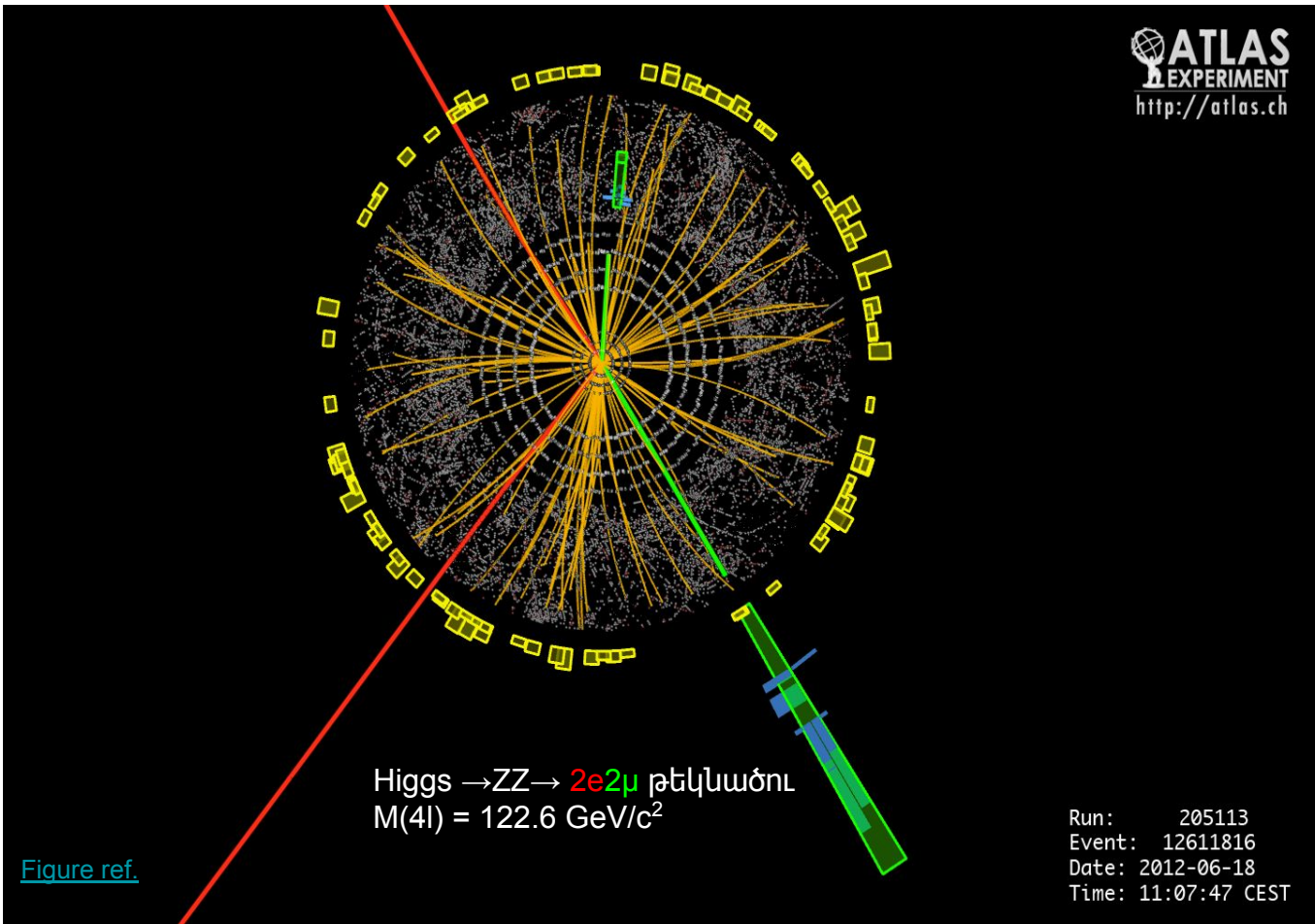


Figure ref.



[Figure ref.](#)

CMS

Compact Muon Solenoid

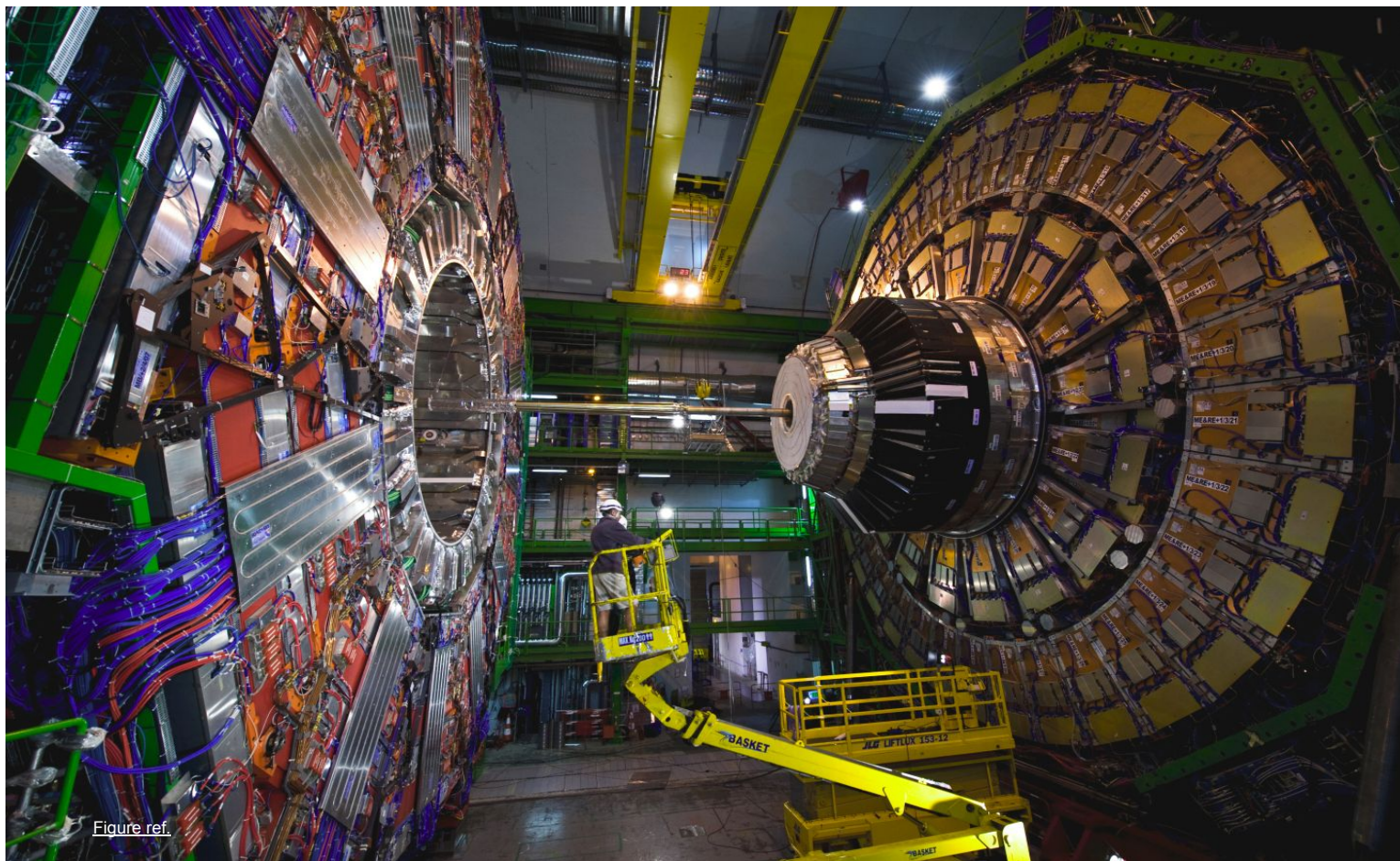
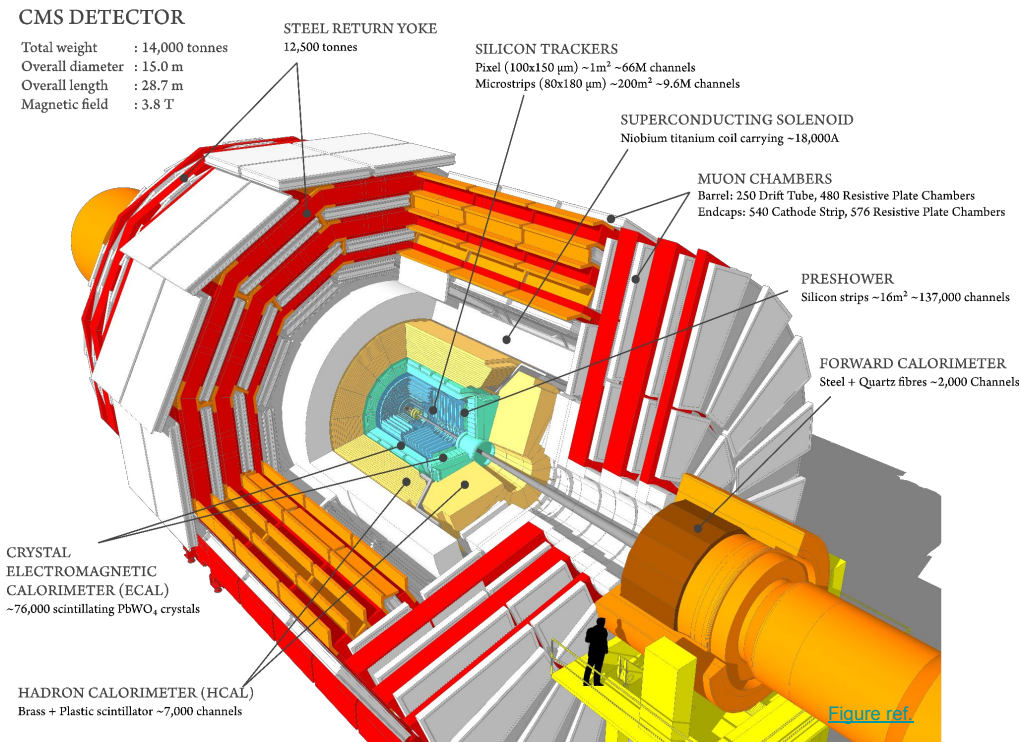
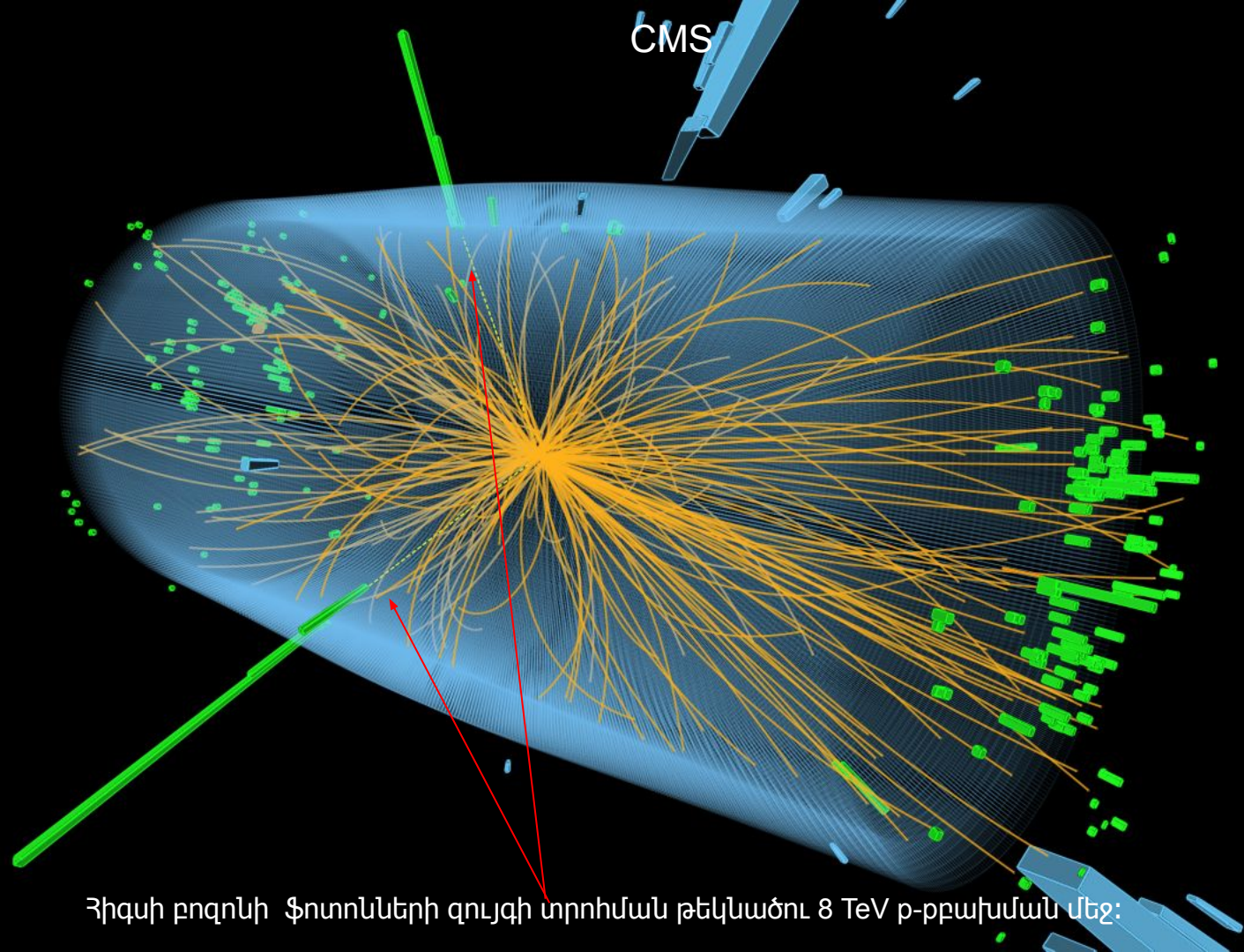


Figure ref.

Երկրորդ ամենամեծ էքսպերիմենտն է ATLAS-ի հետ կիսում է Հիգսի բոզոնի հայտնաբերման համբավը:
Ուսումնասիրում է նույն ֆիզիկան, ինչ ATLAS-ը, բայց այլ տեխնիկայով:

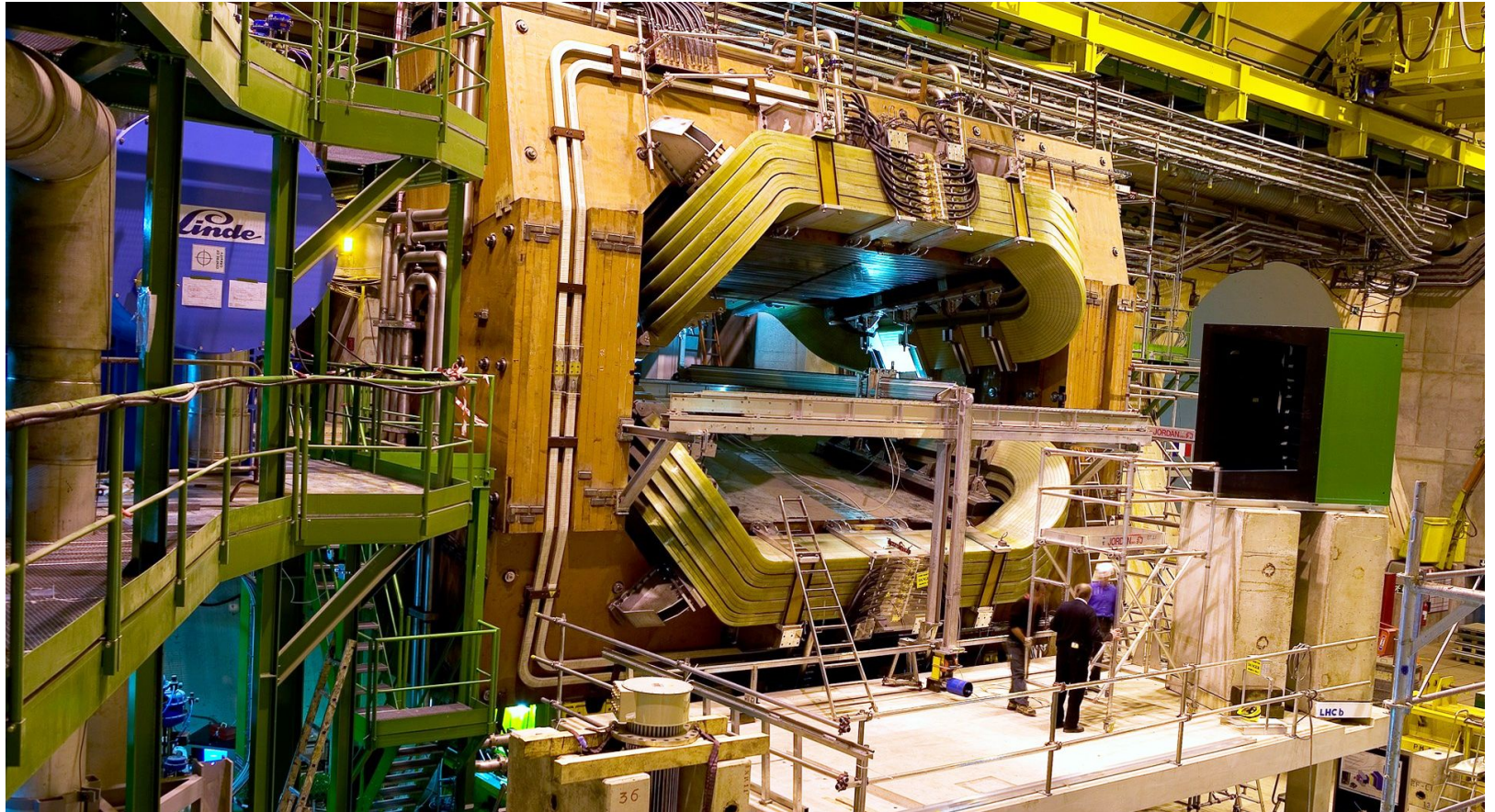
- 4 Տեսլա գերհաղորդիչ սուլենոիդ մագնիս
- Սիլիկոն տրակերներ՝ 4 շերտ պիքսելների և 10 միկրոսթրիպ գլանավոր շերտեր, 15 էնդկապի շերտեր
- Էլեկտրամագնիսական կալորիմետրը ֆոտոնների և էլեկտրոնների չափման համար (PbWO₄ կրիստալներ):
- Հադրոնային կալորիմետր:
- Մյուոնային դետեկտորներ:





[Figure ref.](#)

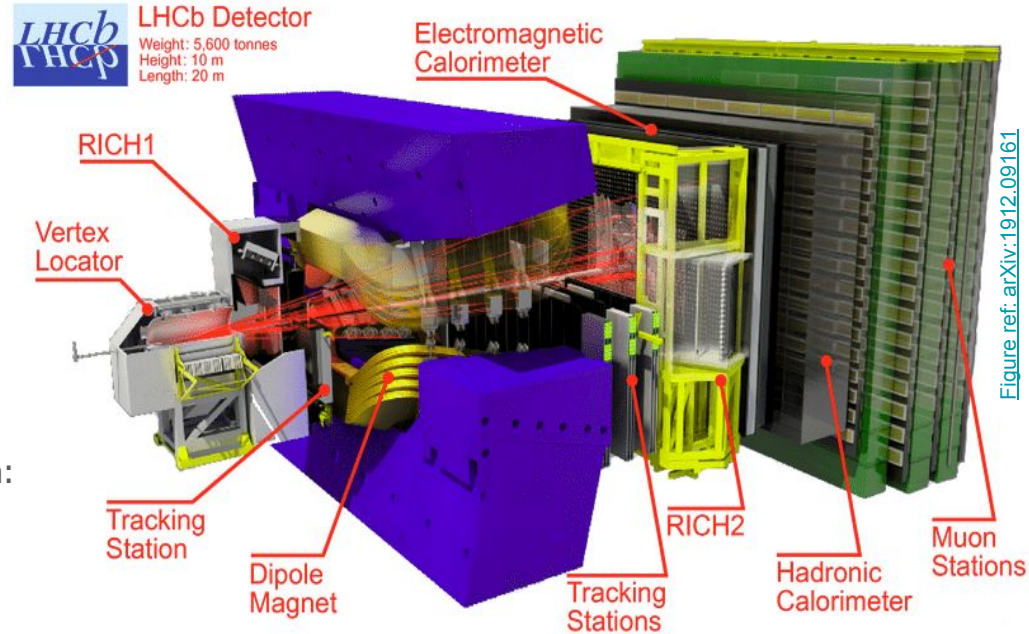
Յիգսի բողոնի ֆոտոնների զույգի տրոհման թեկնածու 8 TeV p-բբախման մեջ:

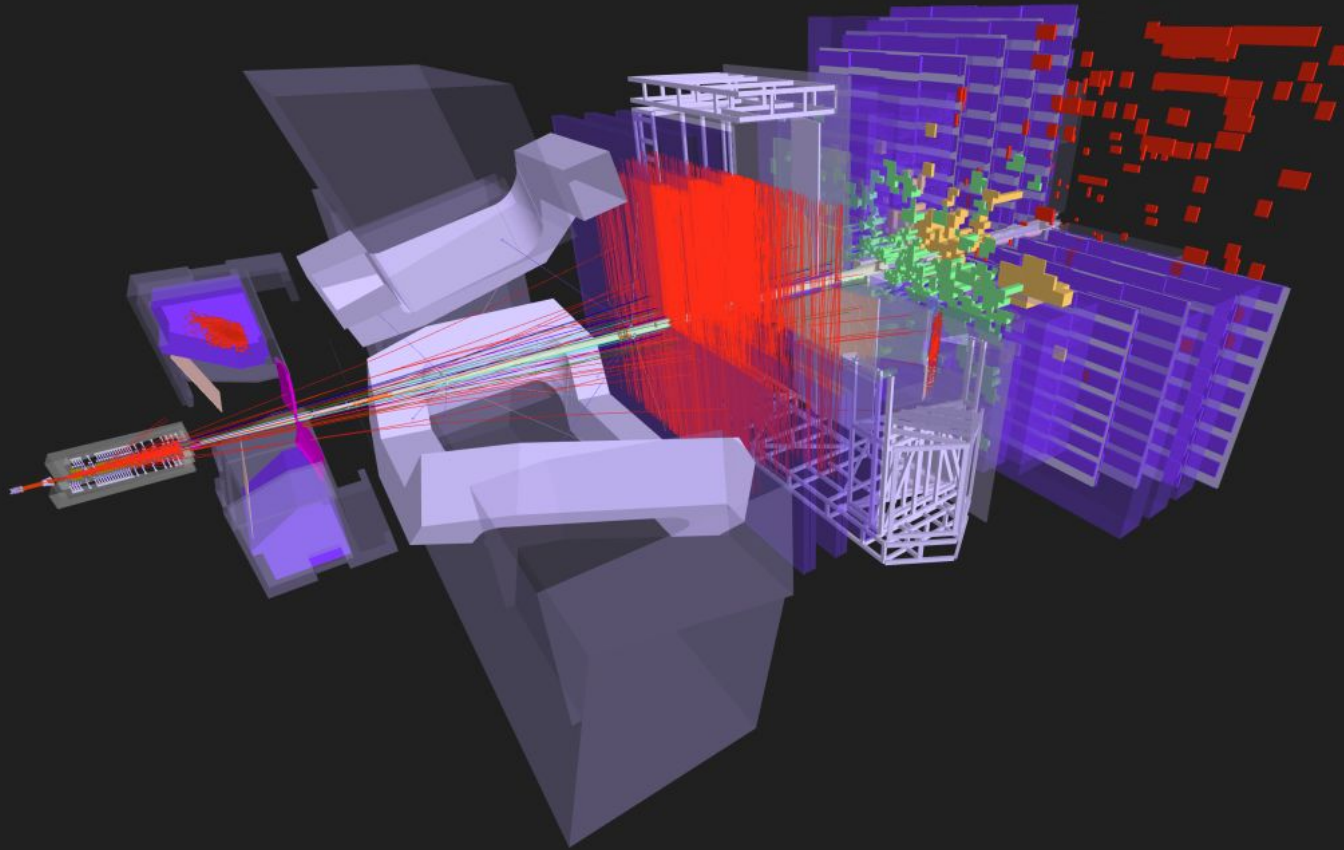


Հիմնականում հետազոտում է նյութի և հականյութի միջև ասիմետրիան (CP խախտում) “գեղեցիկ” քվարկերի (b-quarks) տրոհումների միջոցով

Ունի էլեկտրաթույլ և քվանտային քրոմադինամիկայի (QCD) ֆիզիկաի լայն ծրագիր, ներառյալ ծանր իոնների բախումներում:

- Փոխազդեցության գագաթի տեղորոշիչ (Vertex Locator)՝ Si պիքսելային կայաններ, փնջից 5 մմ հեռավորության վրա
- 2 Չերենկովյան (RICH) դետեկտորներ՝ ցածր և բարձր իմպուլսով տրեկերի նույնականացման համար (PID):
- Տրեկերի վերականգնման Si միկրոստրիպերի, սկինցիլյատորային մանրաթելերի և գազային դետեկտորների (straw tube) բազմաթիվ կայաններ
- Հադրոնային և էլեկտրամագնիսական կալորիմետրեր:
- Մուոնների տրիգերային կայաններ (թելային կամերաներ, MWPC)

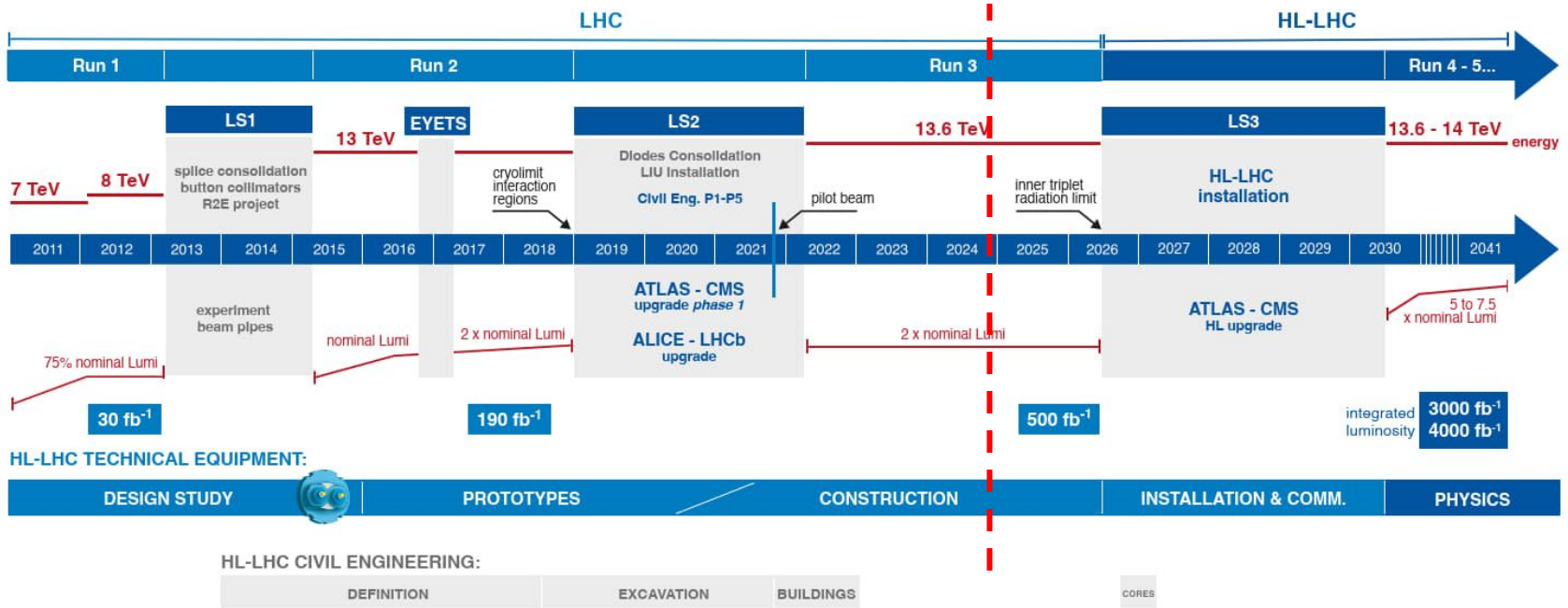




Ապագան ...

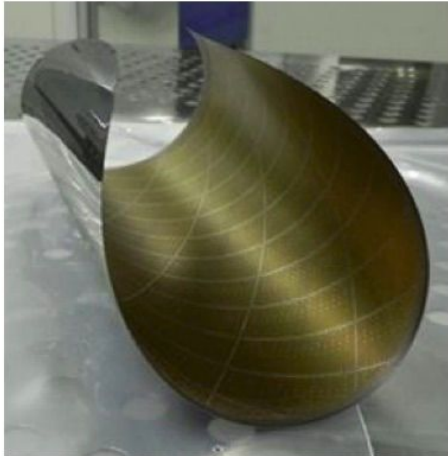


LHC / HL-LHC Plan



ALICE-ը Run 4-ում

Ներքին տրեկերի արդիականացում նոր սերնդի կիսաալանաձև մոնոլիտիկ սենսորներով



ITS3 :
curled and lightweight wafer-scaled
CMOS active silicon sensor
Active surface 0.12 m²

$$r_0 = 1.8 \text{ cm}$$

$$r_1 = 2.4 \text{ cm}$$

$$r_2 = 3.0 \text{ cm}$$

1. (\approx preserved) keys :

- $|\eta| < 2.2$
- spatial resolution/layer $\approx 5 \mu\text{m}$
- time resolution $\leq 2\text{-}5 \mu\text{s}$
- Radiation hardness : NIEL: $>3 \times 10^{12} \text{ 1-MeV } n_{\text{e}^{-}} \cdot \text{cm}^{-2}$ // TID: $>0.3 \text{ Mrad}$

Fig.5.8 TDR ITS2
CERN-LHCC-2013-024

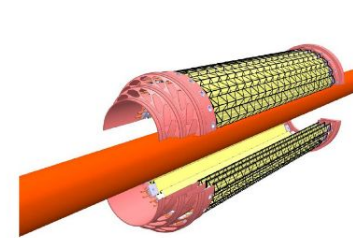
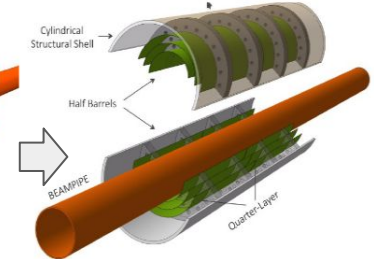


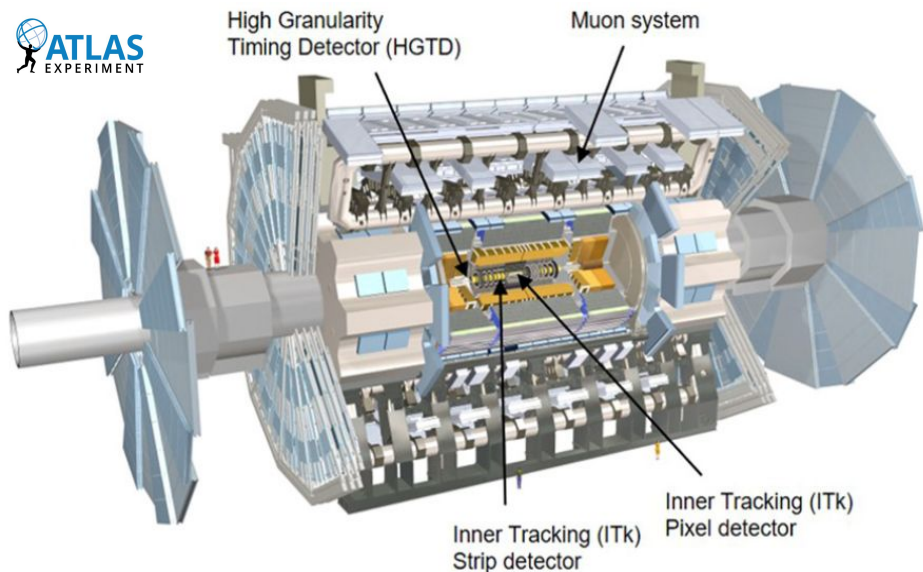
Fig.7 EoI ITS3
ALICE-PUBLIC-2018-013



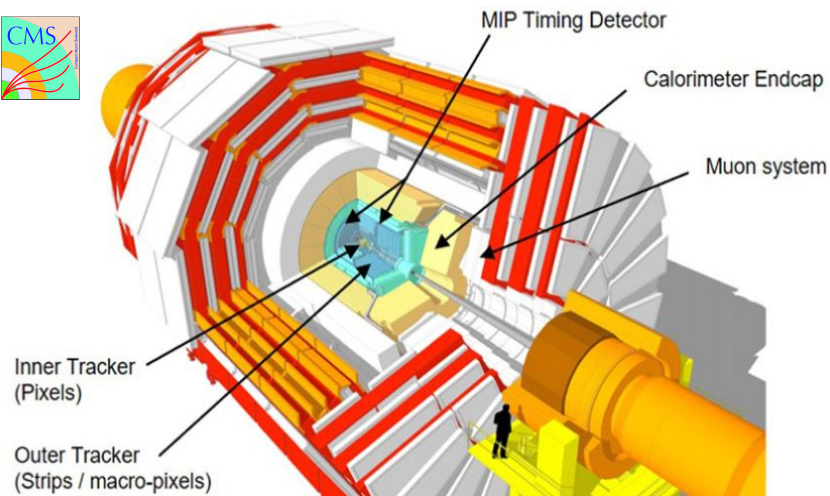
2. NEW keys	ITS2 IB	ITS3
Technology	180 nm	65 nm
Chips	432	6
Pixel size	27 x 29 μm^2	$\approx 20 \times 20 \mu\text{m}^2$
Material /layer	0.35 % x/X ^o	$\approx 0.05 \text{ \% } x/X^{\circ}$
r_{L0}	2.24-2.67 cm	1.80 cm
$r_{\text{Beryllium pipe}}$	1.82+0.08 cm	1.6+0.05 cm

ATLAS-ը և CMS-ը Run 4-ում

Մինչև 200 բախում ամեն 25 նանոպարկյան պնջում !



<https://cds.cern.ch/record/2872435?ln=en>



[https://cds.cern.ch/record/2776511/files/jpscp.34.010006%20\(1\).pdf](https://cds.cern.ch/record/2776511/files/jpscp.34.010006%20(1).pdf)