

CERN dalelių greitintuvų kompleksas

Metodinę medžiagą parengė Georgij Bagašvili

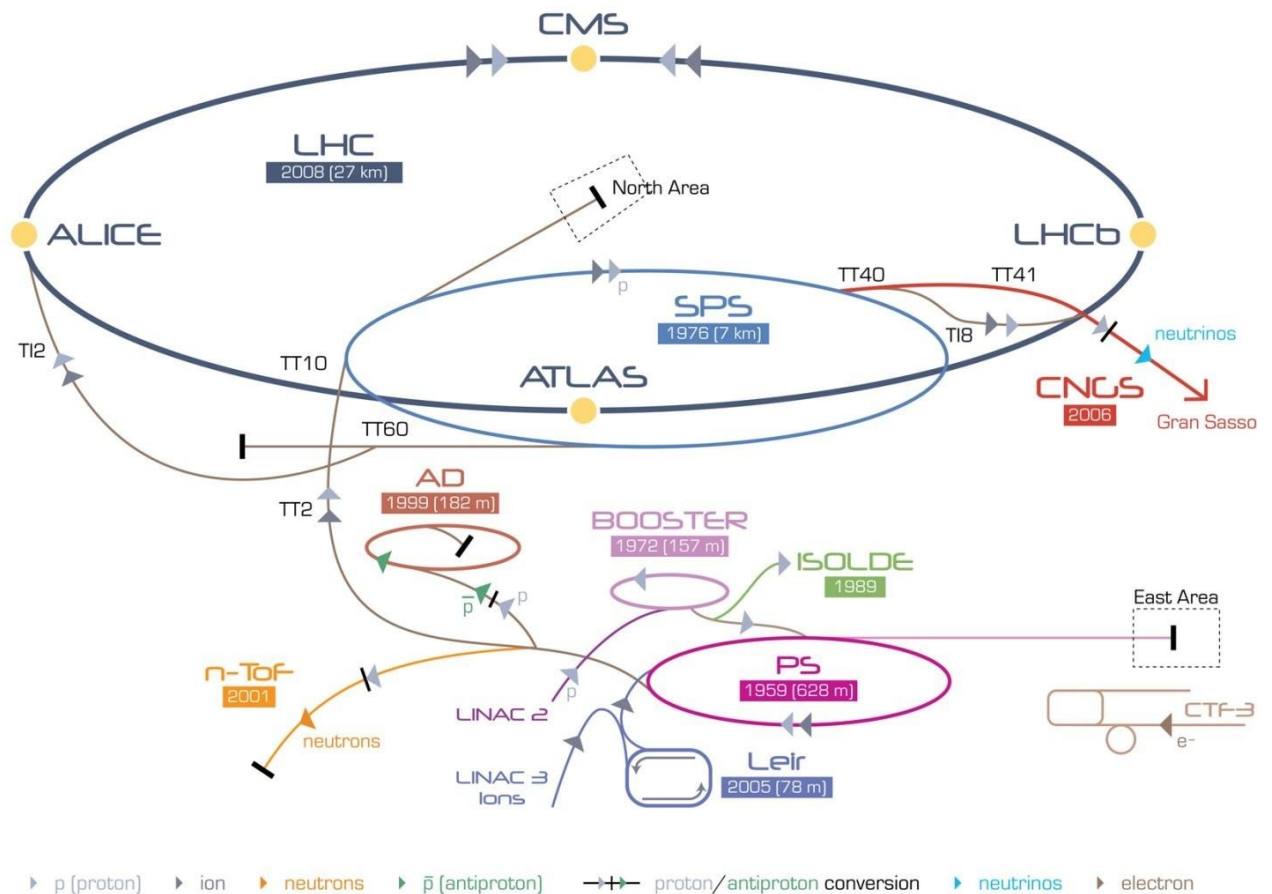
Didžiausias pasaulyje dalelių greitintuvų kompleksas išsikūręs į šiaurės vakarus nuo Ženevos Šveicarijos ir Prancūzijos teritorijose. Tai didžiausia dalelių fizikos laboratorija pasaulyje. Europos branduolinių tyrimų organizacijai (CERN) priklausantis dalelių greitintuvų kompleksas pritaikytas suteikti dalelėms didžiulį energijos kiekį. Dabartiniai greitintuvų pasiekiami energijos kiekiai dar visai neseniai buvo tik teoriniuose skaičiavimuose bei modeliuose. CERN laboratorijos funkcija yra parengti dalelių greitintuvus ir kitą įrangą dalelių fizikos moksliniams tyrimams. Šios metodinės medžiagos paskirtis – supažindinti su greitintuvų veikimo principais ir atsakyti į klausimus:

Kokie fizikiniai prietaisai naudojami greitintuvuose?

Kas vyksta greitintuvuose ir kaip tai paaiškinti remiantis fizikos dėsniais?

Pradėkime nuo dalelių greitintuvų išsidėstymo CERN schemos (1 pav.). Greitintuvų išsidėstymas yra neatsitiktinis. Greitintuvai veikia tokia eilės tvarka:

LINAC 2 → PSB → PS → SPS → LHC arba LINAC 3 → Leir → PS → SPS → LHC.



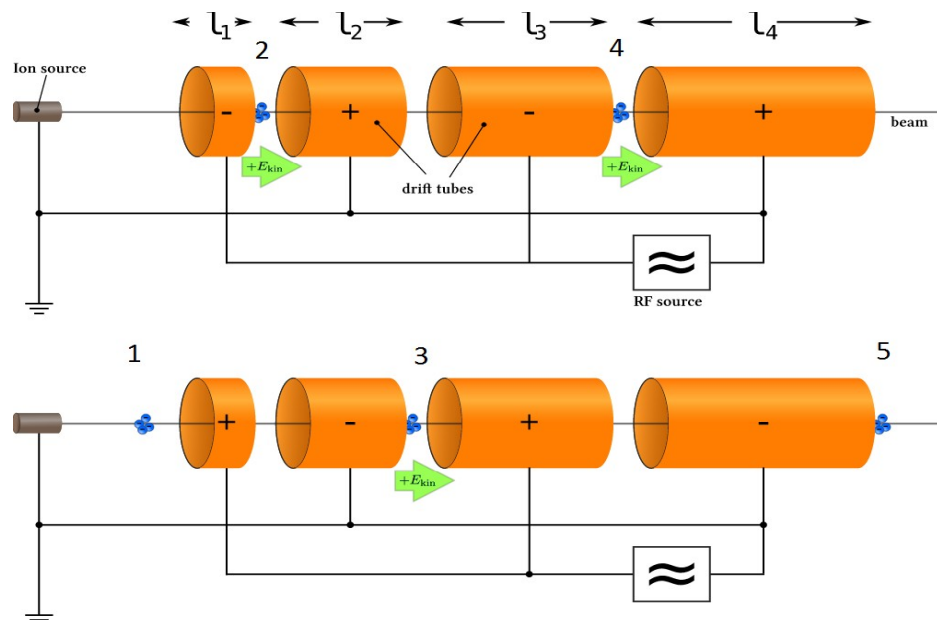
LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron
 AD Antiproton Decelerator CTF-3 Clic Test Facility CNCS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LInear ACcelerator n-TOF Neutrons Time Of Flight

1 pav. CERN dalelių greitintuvų kompleksas.

Schemoje prie kiekvieno greitintuvo yra pateikti jo paleidimo metai ir ilgis, todėl galima matyti, kaip vystėsi CERN greitintuvų kompleksas.

Aptarsime pirmą minėtą schemą.

LINAC 2 (angl. k. *Linear Particle Accelerator*), kaip ir visi greitintuvai, yra skirtas subatominių dalelių bei jonų kinetinei energijai didinti. Genialų greitintuvo modelį pasiūlė Gustavas Insingas 1924 m., po to jį aktyviai tobulino Leo Scilaradas, Rolfas Wideroe ir kiti mokslininkai.



2 pav. Tiesinio dalelių greitintuvo schema.

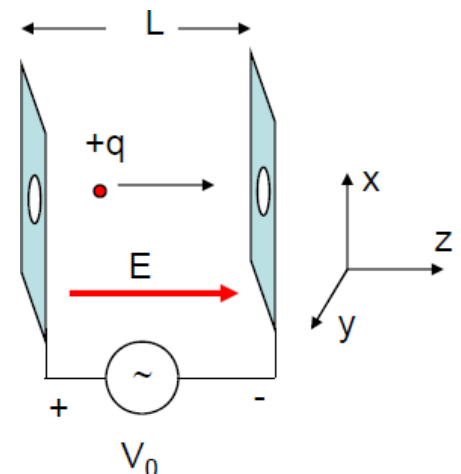
Protonai LINAC 2 greitintuvui gaunami elektriniu lauku jonizuojant vandenilio dujas. Kaip mėgsta juokauti CERN darbuotojai: „Viskas prasideda nuo vandenilio butelio“. Greitintuvus susideda iš vamzdžio, kuriame yra skirtingo ilgio cilindro formos elektrodai. Juose sukuriamas kintantis elektrinio lauko potencialas. Laukas kinta tam tikru dažniu keičiant lauko poliškumą. Kiekviename ruože dalelių kinetinė energija didėja dydžiu $q + V_n$, kur V_n yra n-ojo vamzdžio dalies potencialų skirtumas, $q^+ = Nq_0$ – protonų srauto krūvis (N – protonų skaičius, pereinantis pro tam tikrą

vamzdžio dalį). Perėjęs pro visą greitintuvą protonų debesėlis idealiu atveju įgauna $E_k = \sum m q^+ V_n$,

yra greitintuvo atskirų dalių, kuriose sukuriamas kintantis laukas, skaičius. Schemoje tos dalys pavaizduotos cilindrinėse elektrodų pavidalu, jų ilgis didėja palaipsniui didinant dalelių kinetinę energiją. Cilindriniuose elektroduose vykstantis elektrinio lauko poliškumo pokytis schemoje pažymėtas skaičiais eiliškumo tvarka. Prieš tai buvęs elektrodas stumia daleles, o priekyje esantis – traukia. LINAC 2 greitina protonus iki 50 MeV energijos. Reikia atkreipti dėmesį į tai, kad dalelės yra greitintos ne pačiuose elektroduose, o tarpuose tarp jų.

Tikro greitintuvo nuotrauka parodyta 4 pav.

Galima paskaičiuoti dalelės įgautą kinetinę energiją. Tarkime, kad atstumas tarp dviejų plokštelių yra L (3 pav.).



3 pav. Dviejų elektrodų schema, kurioje dalelę žymi raudonas taškas.

Elektrinis laukas yra nukreiptas dalelės judėjimo kryptimi, t. y. z ašies kryptimi:

$$E_z = E_z(t) = E_0 \cos(\omega t + \varphi),$$

kai $t = 0$, dalelė yra tarpo centre ($z = 0$), φ yra pradinė fazė. Elektrinis laukas keičiasi laikui bėgant, todėl lauko stipris yra funkcija ir priklauso nuo laiko. O ir pats laikas yra funkcija ir priklauso nuo dalelės padėties:

$$t(z) = \int_0^z \frac{dz}{v(z)}.$$

Dalelės gautas energijos kiekis gali būti skaičiuojamas kaip elektrinio lauko atliktas darbas pernešant dalelę atstumu L :

$$\Delta W = q \int_{-L/2}^{L/2} E_z dz = q E_0 \int_{-L/2}^{L/2} \cos(\omega t + \varphi) dz.$$

Suintegravę ir atlikę matematinius veiksmus, gauname dalelės įgytą energijos kiekį:

$$\Delta W = q E_0 \frac{\sin(\pi L / \beta \lambda)}{\pi L / \beta \lambda} L \cos \varphi,$$

čia $\beta = v/c$ yra dalelės greičio ir šviesos greičio santykis, λ – dalelės bangos ilgis. Toliau galime išskirti laiką, per kurį keičiasi elektrinis laukas, pereinant dalelei pro plyšį:

$$T = \frac{\sin(\pi L / \beta \lambda)}{\pi L / \beta \lambda}.$$

Tada dalelės gauto energijos kiekio formulę galime užsirašyti taip:

$$\Delta W = q V_0 T \cos \varphi.$$



4 pav. LINAC 2 greitintuvas (<http://home.web.cern.ch/about/accelerators/linear-accelerator-2>).

PSB (angl. k. *Proton Synchrotron Booster*) yra antrasis greitintuvas, susidedantis iš keturių žiedų, sumontuotų vienas virš kito (5 pav.). Tai pirmasis žiedinis greitintuvas visame greitintuvų komplekse. Iš LINAC 2 PSB gauna 50 MeV energijos protonus ir greitina juos iki 1,4 GeV



energijos.

5 pav. Protonų sinchrotrono stiprintuvas iš vidaus (<http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=psb>).

Protonai, judantys žieduose, yra išlaikomi magnetiniu lauku, kartu magnetinis laukas dalinai suteikia dalelėms pagreitį. Greitintuvas pritaikytas 10^{13} protonų srovei per vieną impulsą, paleidžiant daleles toliau į PS greitintuvą. Kiekvieno žiedo spindulys siekia 25 m. Protonų srautas, ateinantis iš LINAC 2, tolygiai pasiskirsto į 4 žiedus, kur pagreitinimas vyksta sinchroniškai. PSB įmontuoti 32 dipoliniai ir 48 kvadrupoliniai magnetai. Dalelės, kaip ir tiesiniame greitintuve, yra greitamos radijo dažnio lauke. Dalelių rezonansinis dažnis yra:

$$f = \frac{qB}{2\pi m}$$

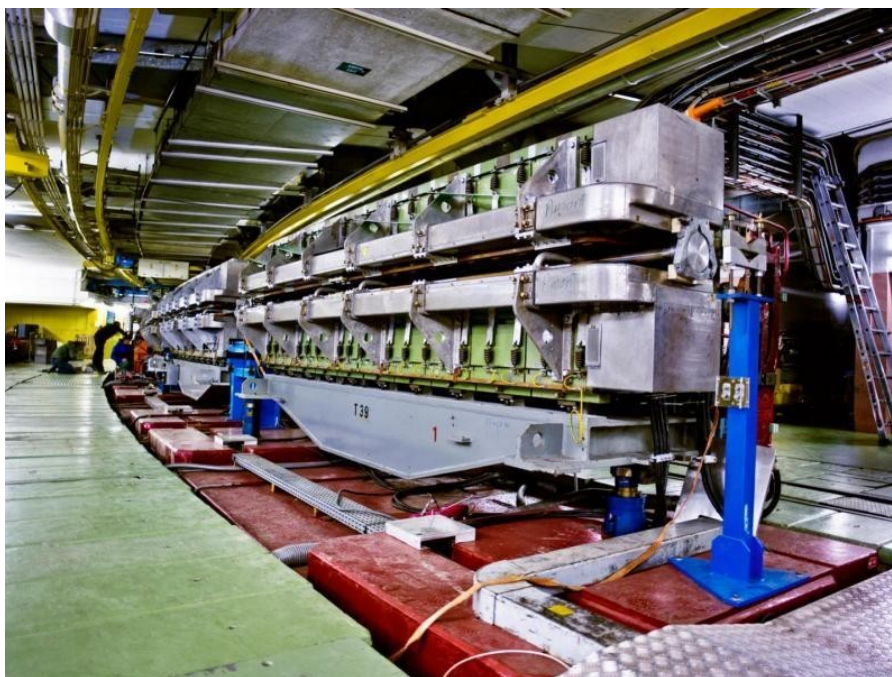
kur q – dalelės krūvis, B – magnetinio lauko indukcija, m – dalelės masė. Žiedų vamzdžiuose yra palaikomas apie 10^{-7} Pa slėgis, dalelės yra greitamos 1 keV per apsukimą.

PS (angl. k. *Proton Synchrotron*) yra trečias pagal eiliškumą greitintuvas, į kurį patenka dalelių pluoštas su 1,4 GeV energija, o išeina su 25 GeV. Pirmasis CERN dalelių sinchrotronas nuo 1959 m. yra vienas iš didžiausių greitintuvų pasaulyje. Pagrindinė dabartinė jo funkcija – pagreitinti daleles iki tam tikro energijos ruožo, prieš įleidžiant jas į SPS.

Žiedo ilgis siekia 628 m, elektromagnetai yra laikomi 277 K temperatūroje, 100 dipolinių magnetų laiko dalelių srautus apskritimo formos orbitoje. Protonų sinchrotronas gali greitinti ne tik protonus, bet ir iš LEIR (angl. k. *Low energy ion ring*) ateinančias alfa daleles (helio branduolius), jonizuotą deguonį, sieros branduolį, elektronus, pozitronus, antiprotonus. Nagrinėjant dalelių pluošto energiją, reikėtų atsižvelgti į reliatyvistinius efektus:

$$\text{masės padidėjimą } m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \text{ ilgio sutrumpėjimą } l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{ ir laiko sulėtėjimą } t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Be to, nagrinėjant koordinačių sistemas, įvedama Lorencio transformacija ir reliatyvistinės koordinatės, kur laikas laikomas 4 koordinate.



6 pav. PS greitintuvo fragmentas.

SPS (angl. k. *Super Proton Synchrotron*) greitintuvas pastatytas 1976 m., yra antras pagal dydį visame CERN greitintuvų komplekse. Greitintuvo žiedo ilgis siekia 7 km, dalelės iš protonų sinchrotrono pasiekia šį greitintuvą su 25 GeV energija, o palieka su 450 GeV. SPS padėjo nagrinėjant vidinę protonų struktūrą, pasitaravo antimedžiagos tyrimuose ir pan. Pagrindinis nuopelnas yra *W* ir *Z* bozonų atradimas. 1983 m. Subramanianui Čandrasedkarui (Subramanyan Chandrasekhar) už teorinę fizinių procesų studiją nustatant žvaigždžių struktūrą ir evoliuciją ir Viljamui Alfredui Fauleriui (William Alfred Fowler) už teorinę ir eksperimentinę branduolinių reakcijų tyrimą, svarbų atsižvelgiant į cheminių elementų formavimąsi Visatoje, buvo suteikta Nobelio premija.



7 pav. Superprotonų sinchrotronas.

Palaidant dalelių srautų judėjimą apskritimu, naudojami 1317 magnetų, iš kurių 744 dipoliniai ir 573 kvadrupoliniai. Dalelės, judančios apskritimu, veikia jau anksčiau minėta Lorencio jėga. Kaip ir SP, SPS gali veikti daugelį žinomų dalelių, svarbiausia, kad dalelė turėtų krūvį.

LHC (angl. k. *Large Hadron Collider*) – didžiausia ir sudėtingiausia pasaulyje žinoma veikianti techninė konstrukcija. LHC yra paskutinė CERN greitintuvų komplekso dalis. LHC numatytas greitinti daleles iki 7 TeV energijos. Tai greitintuvas, kurio dėka buvo atrasta paskutinioji Standartinio modelio dalis – Higgso bozonas (dalelė, kurianti masę). Pirmą kartą sėkmingai paleistas 2008 m., vėliau dėl techninių trukdžių buvo kelis kartus uždarytas.

Didysis hadronų kolaidieris yra žiedo formos. Jo apskritimo ilgis siekia 27 km. Greitintuvas yra pastatytas nuo 50 iki 150 m gylyje. Toks sprendimas buvo priimtas kosminės spinduliuotės trikdžiams pašalinti. Kolaidierio tunelis susideda iš dviejų dalelių srautams pritaikytų vamzdžių, kurie susikerta keturiose vietose – detektoriuose (CMS, ATLAS, LHCb, ALICE). Protonų srautai LHC vamzdžiuose skrieja priešpriešiais srautais susidurdami aukščiau minėtuose detektoriuose. Daleles apskritimo formos greitintuve išlaiko Lorencio jėga, sugeneruota 1232 dipolinių ir 392 kvadrupolinių magnetų. Magnetai naudojami protonų judėjimo trajektorijoms valdyti, padarant jas optimalias dviejų pluoštų susidūrimo metu. Elektromagnetų svoris siekia apie 35 tonas. Sugeneruojant reikiamą 8,4 T magnetinio lauko stiprį, jais leidžiama 12 kA stiprio srovė. Tokiai srovei atlaikyti naudojami specialūs niobio-titano laidininkai. Norint užtikrinti jų superlaidumą visa sistema atšaldoma heliu iki $-271,25$ °C temperatūros. Tai didžiausia kriogeninė (labai žemos temperatūros) sistema pasaulyje.

Dalelių srautų susidūrimų metu, greitintuvui veikiant visu galingumu, energija gali siekti 14 TeV. Esant tokiai didžiulei energijai, bandoma atkurti didžiojo sprogimo sąlygas. Dalelių greitis siekia $0.999999991c$, tai tik 3 m/s lėčiau už šviesos greitį vakuume. 27 km žiedą protonų debesėlis apskrieja per 90 mikrosekundes, o per vieną sekundę protonai padaro 11 000 apsisukimų.



8 pav. Didysis hadronų greitintuvas.

Vaizdo medžiaga:

<https://cds.cern.ch/collection/Videos?ln=en>

Literatūros ir šaltinių sąrašas:

1. <http://home.web.cern.ch/topics/large-hadron-collider>
2. <http://press.web.cern.ch/press-releases/2008/09/first-beam-lhc-accelerating-science>
3. http://en.wikipedia.org/wiki/Large_Hadron_Collider
4. The proton synchrotron booster, 1969 IEEE