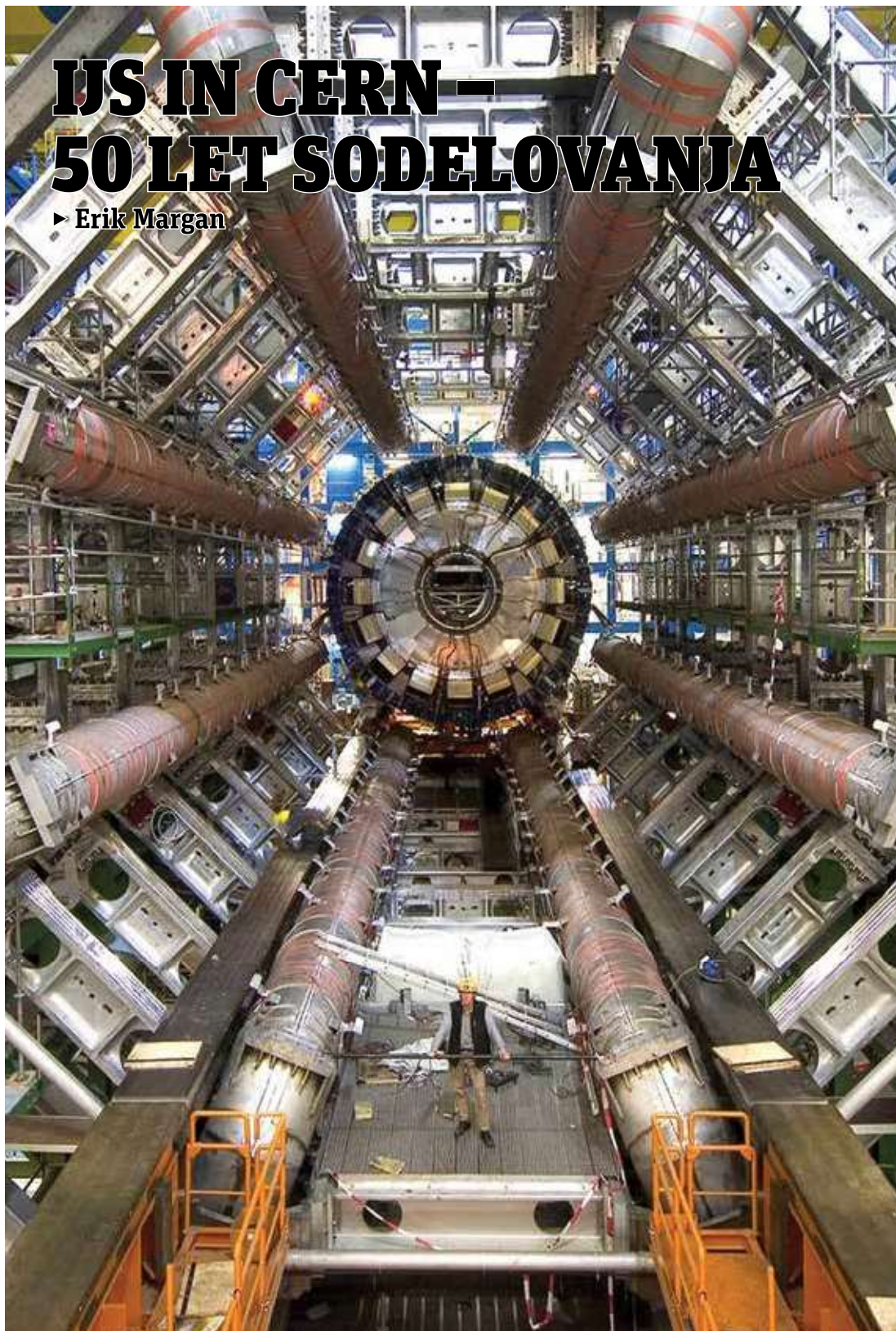


# IJS IN CERN – 50 LET SODELOVANJA

► Erik Margan



📍 Zaznavalo ATLAS velikega hadronskega trkalnik (LHC) med gradnjo leta 2006. Osem supraprevodnih tuljav bo ustvarilo toroidalno (kot svitek oblikovano) magnetno polje. Na fotografiji na njegovo mesto počasti vstavljajo osrednji 'sod' s polprevodniškimi zaznavali. (vir: spletna stran CERN-a)

V začetku junija smo na Inštitutu Jožef Stefan praznovali tri pomembne obletnice: 75 let obstoja, 70 let od ustanovitve Evropske organizacije za jedrske raziskave CERN ter 50 let plodnega medsebojnega sodelovanja. Ob tej priložnosti je bilo organiziranih nekaj zanimivih dogodkov in razstav za javnost, med drugim tudi dve odmevni predavanji, dostopni na prvih dveh spletnih povezavah.

📍 Osrednji 'sod' ATLAS-a s polprevodniškimi zaznavali med končnim sestavljanjem in povezovanjem (vir: spletna stran CERN-a)

ŠIRŠE JAVNOSTI KVANTNA FIZIKA verjetno ne zanima posebno, saj v makro svetu dogodki na kvantni ravni niso neposredno zaznavni, čeprav je makro svet vendarle njihova posledica. K pomanjkanju zanimanja verjetno prispevajo tudi dokaj zahtevna statistična obravnava dogodkov ter z zdravo pametjo skregane kvantne zakonitosti, ki pogosto povzročajo več čudenja kot razumevanja.

Verjetno pa je širši javnosti ostal v spominu medijsko odmeven dogodek 4. julija 2012, ko so v CERN-u razglasili odkritje Higgsovega bozona, delca, katerega obstoj so napovedali že pred kakšnimi šestimi desetletji in ki predstavlja svojevrsten zaključni člen *standardnega modela* (teorije osnovnih delcev in njihovega medsebojnega vpliva), saj je nosilec medsebojnega vpliva delcev, preko katerega nekateri od njih pridobijo maso.

V znanosti pa se pogosto zgodi, da je bolj kot samo znanstveno odkritje zanimiv in razburljiv način, kako je znanstvenikom uspelo prepričati naravo, da razkrije kakšno izmed svojih skrivnosti. Predvsem je to zanimivo s konstruktorskega stališča, saj so v sodobni znanosti vedno pomembnejši inženirji, sposobni izdelave instrumentov, ki nato znanstvenikom omogočajo analiziranje pojavov in odkrivanje





naravnih zakonitosti, na katerih temeljijo. Zato sem pomislil, da bi bralce revije ŽIT zanimalo kaj več o detektorjih (zaznavalnih) in pripadajoči elektroniki, s katerimi je mogoče zajemati signale, ki jih za seboj puščajo kvantni delci.

#### ► FIZIKALNE OSNOVE

Preden pa se tega lotimo, je vendarle potrebno povedati nekaj malega o pospeševalnikih delcev in fizikalnem ozadju njihove uporabe. Angleški fizik J. J. Thomson je leta 1897 odkril, da so katodni žarki v resnici curek elektronov, nosilcev negativnega električnega naboja, Ernest Rutherford pa je leta 1911 odkril, da ima atom znotraj elektronske ovojnice pozitivno nabito jedro. Raziskave atomskega jedra so se začele z njegovim razcepom leta 1938. Prvo cepitev težkega jedra na dva lažja dela sta izvedla kemika Otto Hahn in Fritz Strassmann na preprosti aparaturi, nameščeni na kuhinjski mizi. Lise Meitner in Otto Robert Frisch sta pojav teoretično pojasnila leta 1939. Hahn in Strassmann sta tudi predvidela sproščanje nevtronov med cepitvijo jedra, ter tako odprla pot k vzpostavitvi verižne cepitvene reakcije.

Pri cepitvi jedra se sprosti tudi veliko energije, navadno okoli 200 MeV (milionov elektron voltov; eV ustreza energiji elektrona, ki ga pospešimo v električnem polju z napetostjo 1V). V fiziki osnovnih delcev uporabljamo enoto eV, ker je pripravnejša, sicer pa je pretvorba v *joule* (J) oziroma *watt-sekunde* (Ws) preprosta. Energijo, izraženo v eV, pomnožimo z nabojem elektrona ( $1,602 \times 10^{-19}$  *amper-sekund*, As). Pri tem se je prvič neposredno pokazala

povezava med energijo in maso, kot jo določa najbolj znana enačba vseh časov, Einsteinova  $E = mc^2$ . Postalo je jasno, da je sproščena energija enaka razliki med maso jedra in maso obeh delov, nastalih pri cepljenju, oz. splošneje, vezalna energija jedra je enaka razliki med maso jedra in skupno maso vseh protonov in nevtronov, ki jedro sestavljajo. Gre za vezalno energijo med protoni in nevtroni. Da gre za resnično velikanjske količine energije, nakopičene v zelo majhni prostornini, je postalo splošno znano vsem ob prvi jedrski eksploziji.

Še prej pa je to postalo jasno ob odkritju pozitrona, torej delca enakega elektronu, vendar z nasprotnim električnim nabojem, ki ga je teoretično napovedal Paul Dirac leta 1926, odkril pa Carl Anderson leta 1932. Namreč, ob srečanju delca in anti-delca, kot sta elektron in pozitron, se sprosti energija v obliki dveh fotonov (svetlobnih kvantov,  $\gamma$ ), ki ustreza njunima masama, in sicer  $2 \times 511$  keV, kar lahko zapišemo takole:

$$e^- + e^+ \leftrightarrow \gamma + \gamma$$

Pri tem dvosmerna puščica pomeni, da reakcija lahko poteka v obe smeri, in sicer lahko v posebnih pogojih iz dveh fotonov nastaneta elektron in pozitron, oz. na splošno delec in anti-delec, kar je odvisno od razpoložljive energije. Pri tem je energija fotona določena s frekvenco elektromagnetnega valovanja po Planckovi relaciji  $E = \hbar\omega$ .

Za doseganje visokih energij si pomagamo z Einsteinovo teorijo relativnosti, ki napoveduje dodatno povečanje kinetične energije delca, če ga pospešimo do hitrosti, primerljive s svetlobno:

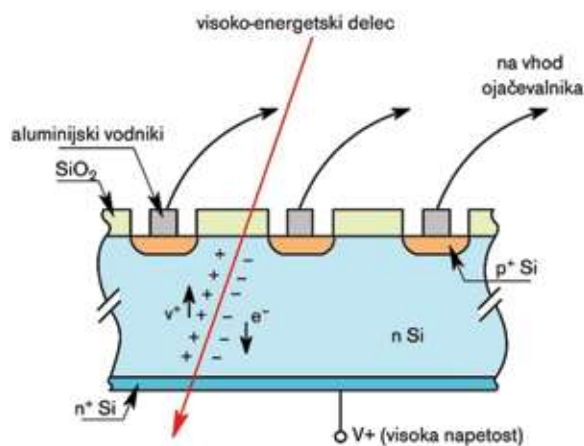
$$E = mc^2 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$$

Če je denimo hitrost  $v = 0,999 c$ , oz. le za tisočinko manjša od svetlobne hitrosti, postane Lorentzov popravek (obratni koren izraza v oklepaju) enak 22,366. Torej bo imel tako pospešen delec za več kot 22-krat večjo gibalno količino. Ob trku dveh tako pospešenih delcev bo skupna energija okoli 44,7-krat večja in ob tem lahko nastanejo tudi težji delci. S tem imamo osnovo za nastanek novih delcev v trkalnikih, ter lahko proučujemo, kaj se je dogajalo v zgodnjem vesolju, ko je bila gostota energije zelo velika.

## ► DETEKTORJI OZ. ZAZNAVALA

Med prvimi zaznavali, s pomočjo katerih je bilo mogoče zaznavati več lastnosti kvantnih delcev hkrati, je bila mehurčna celica. Gre za razmeroma preprosto napravo, ki vsebuje kritično podhlajeno tekočino v magnetnem polju. Delec, ki z visoko hitrostjo prileti v tekočino, pusti za seboj sled mehurčkov, ki jo lahko posnamemo in nato slike analiziramo. Magnetno polje pri tem pomaga razkriti maso delca in njegov naboj. V magnetnem polju električno nabiti delci namreč spreminjajo smer gibanja, in sicer tirnice negativno nabitih delcev zavijajo v eno smer, pozitivno nabitih pa v nasprotno. Iz ustreznih polmerov je mogoče izračunati kinetično energijo, oz. maso delcev, če poznamo hitrost, do katere smo jih pospešili, ter jakost magnetnega polja.

Mehurčne celice so seveda precej okoren pripomoček, zlasti kadar je potrebno za zadovoljivo statistično natančnost analizirati veliko število dogodkov. Z odkritjem polprevodnikov in njihove občutljivosti tako na elektromagnetno sevanje kot na

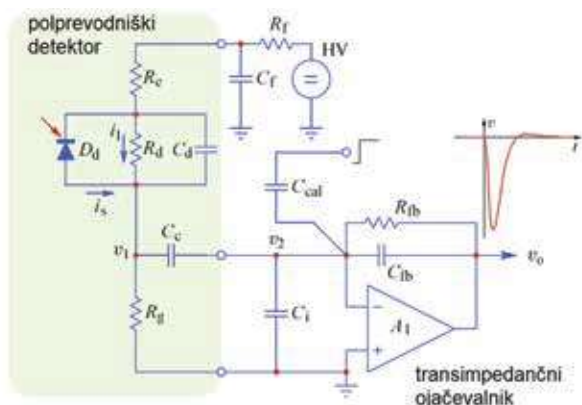


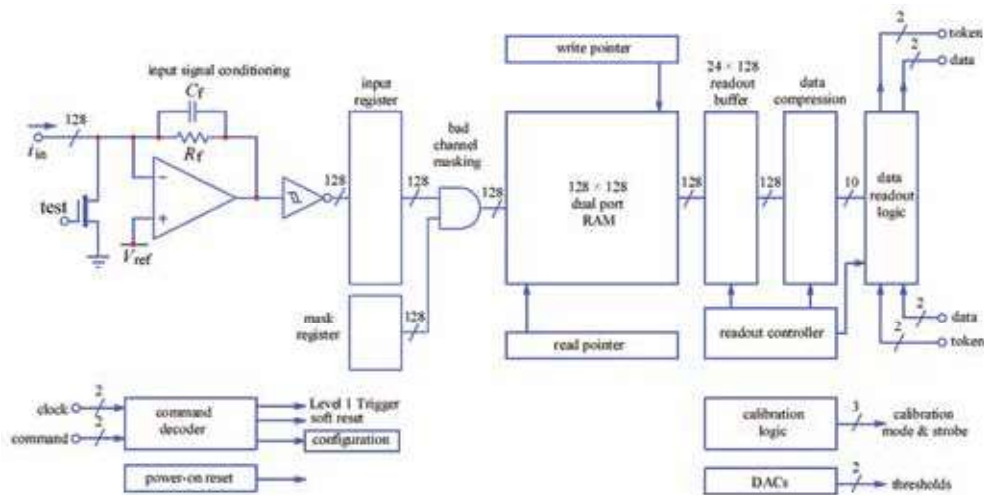
ionizacijo, povzročeno s preletom hitrega delca, smo odkrili način preizkušanja, s katerim je mogoče mnogo hitreje analizirati dogodke in obenem dosegati mnogo večjo natančnost.

Oglejmo si shematski prikaz preseka enega od mnogih različnih večkanalnih silicijevih zaznaval. Ko delec z visoko hitrostjo prileti skozi tenko plast silicija, kateremu so dodane primesi iz III. in V. skupine kemičnih elementov v P-N spoj, pride do ionizacije kristalne strukture silicija vzdolž poti delca. Izbiti elektroni  $e^-$  za seboj pustijo vrzeli  $v^+$ . Ta sproščen električni naboj nato v zapornem električnem polju visoke napetosti pospeši proti nasprotnim

Shematski prikaz preseka tipičnega silicijevega zaznavala (priredil: Erik Margan)

Shema ojačevalnega kanala. Polprevodniški detektor je v resnici le dioda  $D_d$ , polarizirana z visoko napetostjo (HV) v zaporni smeri, transimpedančni ojačevalnik pa signalni tokovni sunek iz zaznavala okrepi in pretvori v napetost. (priredil: Erik Margan)





⚙️ **Blokovna shema celotnega 128-kanalnega čipa z vmesnim pomnilnikom, digitalnimi nastavitvami, ter sistemom odčitavanja** (vir: spletna stran CERN-a)

elektrodam, kjer se na kratko pojavi presežek naboja, ki ga je mogoče z natančnim elektronskim vezjem s hitrim odzivom in nizkim šumom zaznati in ojačati ter pretvoriti v digitalni format, nato pa ga v računalniku avtomatsko analizirati.

Pri tem običajno uporabljamo večkanalna zaznavala za natančno določanje točke prehoda visokoenergetskega delca, saj večino nastalega naboja zajamejo le najbližje elektrode. Sodobna litografija omogoča razmake med elektrodami, manjše od 100  $\mu\text{m}$  oz. desetinke milimetra. Z interpolacijo med signali sosednjih elektrod pa lahko dosežemo krajevno natančnost zadetka okoli 10  $\mu\text{m}$  ali manj. To je pomembno pri določanju poti delca na njegovi poti skozi več plasti zaznaval. Velikost električnega signala je sorazmerna celotni energiji delca. Pri tem je pomembno, da so plasti posameznih zaznaval tenke, da delec med prehodom skozi izgubi čim manj energije in ohrani smer gibanja.

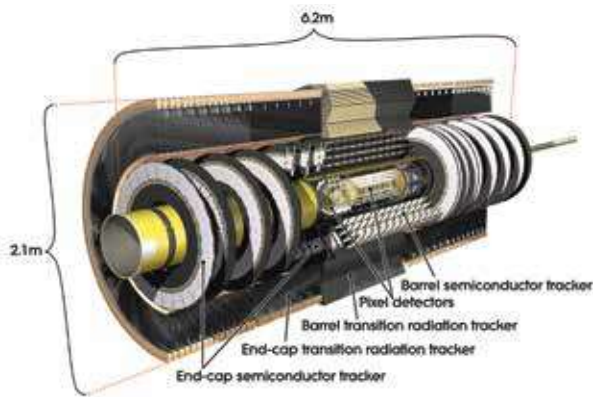
Pomembnih je še nekaj lastnosti polprevodniških zaznaval in pripadajočih elektronskih vezij. Prva je občutljivost, ki jo merimo v *femto-*

*-coulombih* (fC, ali  $10^{-15}$  C; C = As). Druga je nizek termični šum oz. motnje zaradi visoke temperature, amplituda naključnega nihanja pa mora biti velikostnega reda le nekaj sto nabojev elektrona. Tretja, morda najpomembnejša lastnost, je zanesljivost delovanja, predvsem v smislu neobčutljivosti na sevanje. Tako zaznavala kot elektronska vezja so ob pogostih trkih namreč izpostavljena pravemu bombardiranju z nevtroni, ki so najpogostejša posledica trkov. Za zaznavala in vezja, vgrajena v ATLAS (eden od sklopov zaznaval trkalnika LHC), proizvajalci zagotavljajo, da v svojem obratovalnem obdobju prenesejo skupno dozo 10 Mradov, ali okoli  $3 \times 10^{14}$  nevtronov na  $\text{cm}^2$ . Pri tem se občutljivost poslabša le malenkostno, celo ta zelo nizek primanjkljaj pa je mogoče izničiti z nekoliko višjo napetostjo zaznavala.

Polprevodniška zaznavala glede na zgradbo delimo na pasovna (angl. *strip*) in točkasta (angl. *pixel*), tako ena kot druga pa imajo svoje prednosti in pomanjkljivosti. Pri enaki površini morajo imeti točkasta zaznavala veliko več elektronskih

ojačevalnikov in ustreznih povezav, imajo pa zato manjšo kapacitivnost med elektrodami. Posledično je manjši tudi šum, kar omogoča višjo občutljivost. Pasovna zaznavala je potrebno izdelati v obliki sendviča, torej iz dveh sklopov z medsebojno pravokotnimi elektrodami, tako da tvorijo matriko. Zaradi velike dolžine elektrod pa imajo taka zaznavala večjo kapacitivnost in z njo se okrepi tudi šum, po drugi strani pa je za delovanje potreben le en elektronski ojačevalnik za vsako elektrodo. Z ojačevalniki je povezana tudi izguba toplote in segrevanje, kar spet vpliva na termični šum. To povzroča pravo nočno moro konstruktorjem zaznaval, saj jih je treba učinkovito hladiti in kar najhitreje odvajati toploto. A čeprav v tem vesolju ni nič zastoj, je večinoma vendarle mogoče najti ustrezno ravnovesje med nasprotujočimi si zahtevami.

Zgradba posameznega čipa za odčitavanje je dokaj zapletena, saj poleg ojačanja in digitalizacije podatkov omogoča še celo vrsto kontrolnih nastavitev in načinov delovanja, med drugim začasnega spomina, pogojevanja odčitavanja in izbire odčitanih podatkov, ter umerjanja sistema za vsak kanal posebej. To je pomembno, saj je velikost signala sorazmerna energiji delca, ko doseže zaznavalo. To energijo moramo poznati kar se da

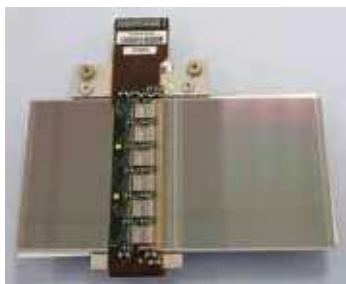
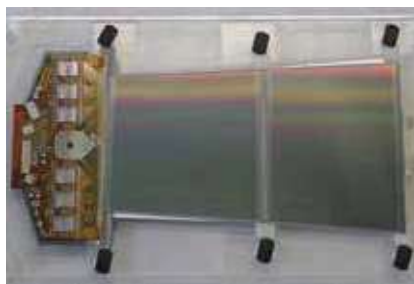


natančno. Digitalni prenos podatkov poteka po optičnih kabljih, kar močno zmanjša sistemske motnje.

Sklopi zaznaval so povezani v večplastne sisteme, kajti delcu je potrebno slediti in iz njegove krivulje v magnetnem polju določiti celotno energijo oz. maso delca. Na sliki si lahko ogledamo prerez zgradbe središčnega 'soda', vgrajenega v ATLAS, z opisom posameznih plasti.

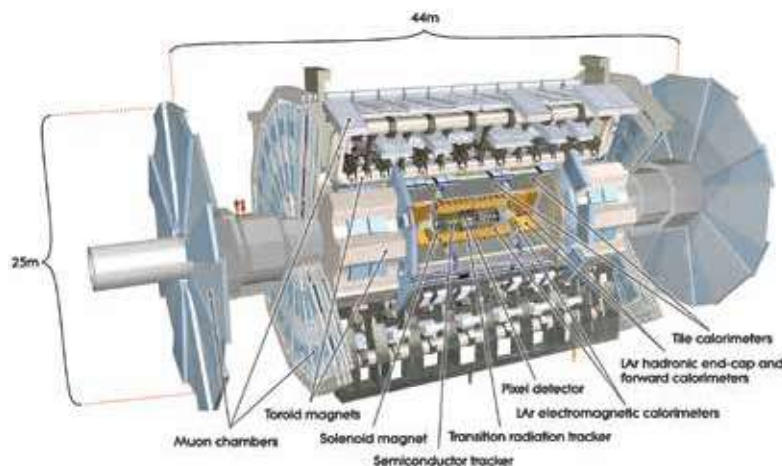
Naslednja slika prikazuje zaznavala na obročih cilindra. Šest čipov s 128 kanali odčitava podatke, ki jih zbirajo zaznavala. Ta so tako razporejena, da se delno prekrivajo, s čimer je omogočeno natančnejše določanje sledi delca. Ker lahko med prehodom skupin protonov druga skozi drugo pride do več trkov hkrati, je potrebno ločiti med posameznimi točkami trka ter pri tem nastalimi razpadnimi produkti.

Prerez polprevodniškega zaznavala, vgrajenega v ATLAS kaže več cilindrično nameščenih plasti zaznaval z devetimi obroči na vsaki strani (vir: spletna stran CERN-a)



Polprevodniška zaznavala s po šestimi čipi, vsak s po 128 ojačevalnimi kanali (vir: spletna stran CERN-a)

➤ **Prerez celotnega sistema (vir: spletna stran CERN-a)**



To določajo z zelo zapletenimi računalniškimi algoritmi, ki iz zadetkov na posameznih zaznavalnih določijo potek dogodkov.

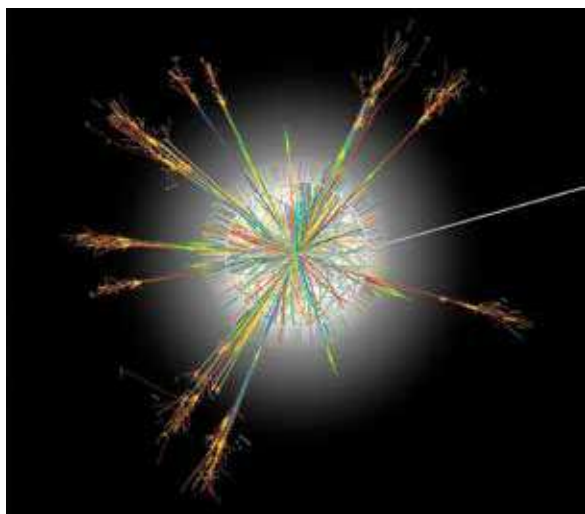
Oglejmo si še presek celotnega sistema. Za boljšo predstavo o njegovi velikosti si lahko pomagamo s človeškimi liki v istem merilu na levem delu sistema ter spodaj pred njim. Poleg osrednjega polprevodniškega zaznavala sistem sestavljajo tudi druga, dodani pa so tudi različni kalorimetri za določanje celotne med trki sproščene energije. Vse skupaj obdajajo mi-

onske komore. Manjkajočo energijo lahko pripišemo nevtrinom, ki z navadno snovjo reagirajo šibko in zelo redko, zato jih ne zaznamo, a kljub temu dopolnjujejo sliko celotnega poskusa.

Na naslednji ilustraciji vidimo eno izmed številnih rekonstrukcij posameznih trkov, v katerih je nastal Higgsov bozon. Samega Higgsovega bozona seveda ne zaznamo, saj obstaja izjemno kratek čas, razpade že kmalu po nastanku, zaznavala pa dosežejo le malce obstojnejši razpadni produkti. Analiza takih dogodkov je zapletena, saj lahko hkrati trči več protonov, zato je potrebno vsemu nastalemu slediti do središča trka in ugotoviti, kaj je posledica katerega trka para protonov. Algoritmi za analizo so zmožni razločiti do 25 hkratnih trkov.

Veliki hadronski (hadron sestavljajo kvarki, povezani z močno jedrsko silo) trkalnik (angl. *large hadron collider* oz. *LHC*) je bil zgrajen v istem 27 km dolgem predoru v Ženevskem podzemlju (kakor nekateri ljubkovalno imenujejo CERN), v katerem je bil že njegov predhodnik *LEP* (angl. *large electron-positron collider*). S tem je bilo prihra-

➤ **Prikaz sledi razpadnih produktov več hkratnih trkov (vir: spletna stran CERN-a)**



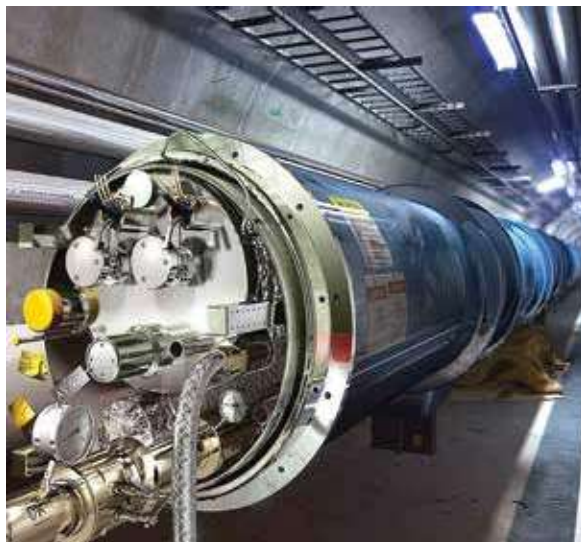


njeno kar nekaj sredstev, vendar je bilo kljub temu potrebno izkopati in izdelati prostore za nove, mnogo večje detektorske sisteme. Poleg že opisanega sklopa zaznaval ATLAS so v LHC vgrajeni tudi sistemi CMS, LHCb in ALICE ter še vrsta pomožnih sistemov.

Protoni, ki drvijo po predoru LHC, imajo 1850-krat večjo maso od elektronov. Zato so bili potrebni veliko zmogljivejši pospeševalniki in magneti, ki gruče protonov, pospešenih do 0.999999990 svetlobne hitrosti ali le 3,1 m/s (11 km/h) počasneje od svetlobne, ženejo po ceveh predora. S tem protoni pridobijo Lorentzov faktor okoli 6930 in je posledično na voljo energija trka 13 TeV ( $13 \times 10^{12}$  eV). Ker pa večinoma trčita med seboj le dva od šestih kvarkov, ki sestavljata protona, doseže razpoložljiva energija za nastanek novih delcev le tretjino navedene ali nekaj nad 4 TeV.

Za en obhod potrebujejo skupine protonov okoli 90  $\mu$ s, torej prepotujejo obseg predora 11.245-krat v sekundi. Največje število skupin je 2808, v vsaki pa je do 115 milijard protonov. Pogostost trkov je tako okoli 40 milijonov na sekundo, torej med trkoma povprečno mine le okoli 25 ns. To zahteva zelo močne niobij-titanove (Nb-Ti) supraprevodne magnetne z jakostjo magnetnega polja okoli 7,7 T, ki jih na temperaturo 1,9 K ( $-271,25^\circ\text{C}$ ) hladi okoli 96 ton supertekočega helija. Nekateri zato LHC imenujejo tudi najbolj *cool* mesto v vesolju (temperatura vesolja znaša okoli 2,7 K).

Dokajšnja pogostost trkov omogoča hitro zbiranje zadostne količine podatkov za statistično obdelavo. To omogoča visoko natančnost analize dogodkov, vendar pa hkrati zahteva

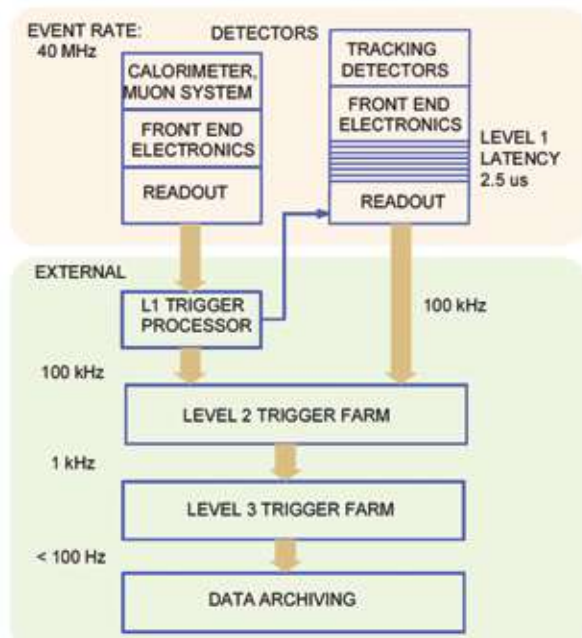


sprotno obdelavo za okoli 140 TB podatkov na dan. Potrebna je torej tudi izredno zmogljiva in obsežna računalniška mreža. Delovanje skupaj zahteva okoli 200 MW električne energije ali tretjino porabe celotne Ženeve. Samo pospeševalnik in zadrževala potrebujejo za delovanje okoli 120 MW.

Oglejmo si še odbiranje podatkov po določenih stopnjah uporabnosti za teoretične analize. Velika večina zajetih podatkov namreč predstavlja že dobro znane fizikalne podatke, ki so sicer nujni za preverjanje delovanja celotnega sistema, vendar s teoretičnega in raziskovalnega stališča niso zanimivi. Končni podatki, ki jih hranijo za kasnejše analize, se povprečno pojavijo do 100-krat na sekundo. To se morda ne zdi veliko, vendar se sčasoma le nabere dovolj podatkov za ustrezno statistično obdelavo, ki zadosti kriteriju znanstvenega odkritja  $5\sigma$ . To pomeni, da je verjetnost, da so zbrani podatki posledica kakšne systemske napake (in torej niso povezani z raziskavo),  $1 : 3.000.000$ .

⚡ Supraprevodni magneti v predoru lahko ustvarijo polje jakosti 7,7 T (vir: spletna stran CERN-a)





☞ Shema odbiranja podatkov na posameznih ravneh sistema (vir: spletna stran CERN-a)

### ▶ SODELOVANJE MED USTANOVAMA IJS IN CERN

Sodelovanje med IJS in CERN-om ima dolgo in bogato zgodovino, ki jo je v svojem predavanju podrobneje opisal prof. dr. Marko Mikuž. Zato

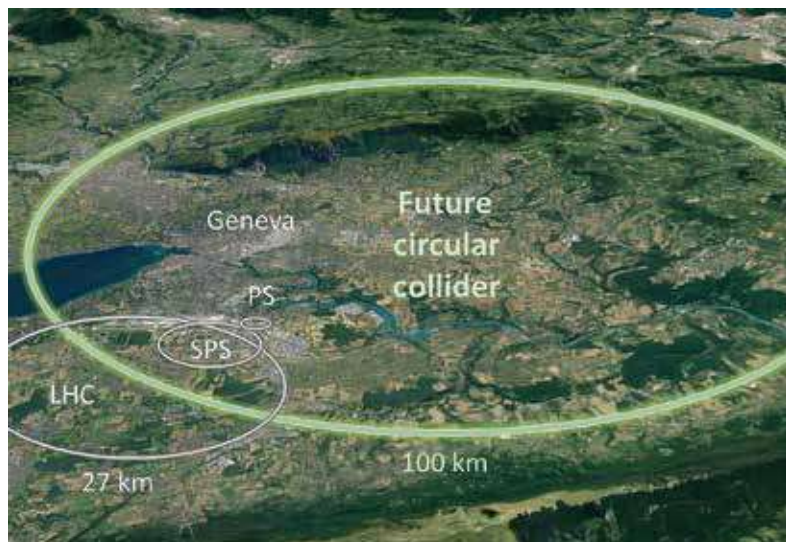
je ne bomo ponavljali, priporočamo pa ogled posnetka predavanja na prvi od spletnih povezav. Privoščili pa si bomo manjši epp (za mlajše bralce: ekonomsko-propagandni program oz. oglas), ki vsekakor zasluzi omembo. Namreč, CERN ni le porabnik proračunskih sredstev držav članic, pač pa poleg ustvarjanja novega temeljnega znanja s področja fizike omogoča industrijskim podjetjem držav članic sodelovanje pri načrtovanju in izdelavi posameznih sistemov. Zbrane izkušnje na področju novih tehnologij lahko ta podjetja nato uporabijo zase in uspešneje tržijo svoje izdelke. CERN je namreč zelo ugledna ustanova in sodelovanje z njo predstavlja visoko cenjeno priporočilo za še tako veliko podjetje. Slovenija je v času, ko še ni bila pridružena članica CERN-a, za zdaj edina uspela pridobiti možnost sodelovanja za podjetje Elgoline iz Cerknice. To je izjemen uspeh in kaže tako na kakovost izdelkov tega podjetja, predvsem za prilagodljiva oz. fleksibilna (pa tudi običajna) tiskana vezja, kaže pa tudi na zaupanje, ki ga v CERN-u uživajo slovenski fiziki.

### ▶ BODOČI KROŽNI TRKALNIK

Za konec se ozrimo še v prihodnost. Teoretični fiziki so danes kar malce razočarani; upali so namreč, da bodo s številnimi izvedenimi poskusi v LHC vendarle zaznali še kaj več kot le Higgsov bozon. Pričakovanja so bila visoka predvsem v povezavi s teorijo strun in supersimetrije, morda tudi odkritja delcev, povezanih s temno snovjo, katere težnostni učinek zaznavajo astronomi. A zaenkrat nič ne kaže, da bodo v do konca življenjske dobe trkalnika



☞ Prilagodljiva tiskana vezja podjetja Elgoline omogočajo povezovanje napajalnih in kontrolnih napetosti zaznaval, pa tudi vzdrževanje stalne temperature celotnega 'soda'. (vir: spletna stran podjetja Elgoline)



📍 Prikaz območja v bližini Ženeve. Manjši krožci označujejo trenutno delujoče pospeševalnike, največji pa prikazuje bodoči stokilometrski FCC. (vir: spletna stran CERN-a)

LHC predvidoma zajetih podatkih še kaj odkrili, čeprav se raziskave lastnosti Higgsovega bozona z večjo natančnostjo meritev, pa tudi drugih delcev standardnega modela, nadaljujejo. Morda se bo kaj pokazalo po predvideni posodobitvi in povečanju zmogljivosti HL-LHC (high-luminosity-LHC, kar bo omogočilo znatno povečanje količine zbranih podatkov) v naslednjih letih. Še do sti obetavnejša pa je naslednja generacija zaznaval, ki jih bodo vgradili v bodoči *Future circular collider* (FCC) oz. bodoči krožni trkalnik. Tega že načrtujejo, zanj pa bodo izkopali nov krožni predor z obsegom okoli 100 km.

#### SPLETNI NASLOVI

- <https://tinyurl.com/3rn5bzkp> posnetek predavanja IJS in CERN: pol stoletja skupne poti; prof. dr. Marko Mikuž, 29. maj 2024, dolžina 56:46  
<https://tinyurl.com/y7xyzsme> Fizika v CERN-u: prvih 70 let in naprej; prof. dr. Jonathan R. Ellis, 5. junij 2024, dolžina 1:01:21  
<https://tinyurl.com/jx6sh2jd>
- <https://tinyurl.com/ya5yabhb> spletna stran in posnetek o ATLAS-u
- <https://tinyurl.com/d4uvfmtm> ATLAS-ove meritve razpada Higgsovega bozona
- <https://tinyurl.com/3yzjrkz> o Higgsovem bozonu
- <https://tinyurl.com/3cy9bjw4> o prenosu tehnologij













Svet elektronike svoje naročnike **BREZPLAČNO PELJE NA OGLED** sejma **electronica 2024** 14. novembra v München!

\* Podrobnosti in prijave na: <https://svet-el.si/sejma/svet-elektronike-brezplačno-ogled-sejma-electronica-munchen-2024/>