

**PREBUJANJE PLEMENITOSTI IN MODROSTI:
3. LETNO SREČANJE ČLANIC IN ČLANOV
SLOVENSKE AKADEMIJE ZNANOSTI IN
UMETNOSTI Z MLADIMI**

Fizika osnovnih delcev

Ljubljana, 14. marec 2019

Slavimo

Evropski dan znanosti za mlade



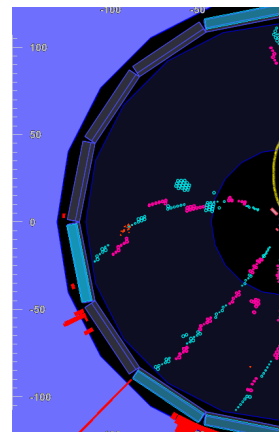
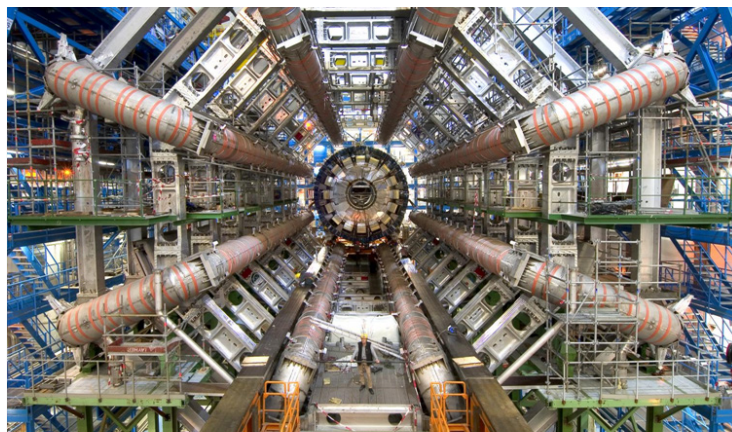
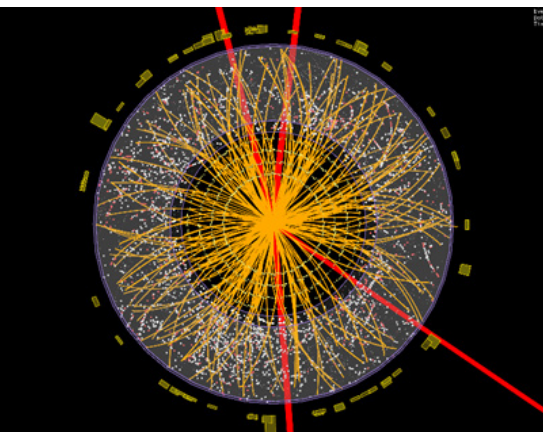
USTANOVA
SLOVENSKA
ZNANSTVENA
FUNDACIJA



**TRETJE LETNO SREČANJE
ČLANIC IN ČLANOV SLOVENSKE
AKADEMIJE ZNANOSTI IN UMETNOSTI
Z MLADIMI**
PREBUJANJE PLEMENITOSTI IN MODROSTI

Fizika osnovnih delcev

14. marec 2019, slavimo Evropski dan znanosti za mlade



VSEBINA

.....2 Uvod

.....3 Dobrodošli na Slovenski akademiji znanosti in umetnosti

Akademik prof. dr. Tadej Bajd, predsednik SAZU

.....6 Nenehno preseganje že doseženega v znanstvenem delovanju

Dr. Edvard Kobal, predsednik uprave SZF

.....9 Izvor mase in nova fizika

Izr. prof. dr. Jernej Fesl Kamenik, vodja Odseka za teoretično fiziko
Instituta »Jožef Stefan«, Ljubljana

..13 Belle II in Super KEKB: s pospeševalnikom na lovu za redkimi procesi

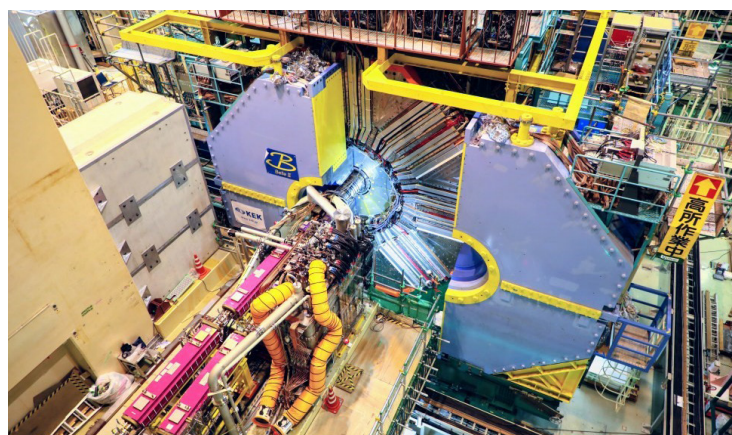
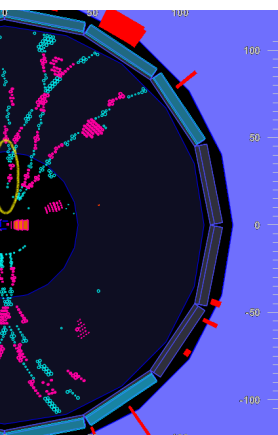
Red. prof. dr. Peter Križan, izredni član SAZU, Fakulteta za matematiko
in fiziko Univerze v Ljubljani in Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana

..19 Detektor ATLAS na Velikem hadronskem trkalniku

Red. prof. dr. Marko Mikuž, Fakulteta za matematiko in fiziko Univerze v
Ljubljani in Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana

..31 Delavnica: Kako potekajo analize podatkov pri eksperimentih v visoki energijski fiziki

Dr. Andrej Gorišek in dr. Rok Pestotnik, Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana



UVOD

Slovenska akademija znanosti in umetnosti (SAZU) s Slovensko znanstveno fundacijo (SZF) organizira tretje srečanje z mladimi v četrtek, 14. marca 2019. Osnovni namen srečanja, ki postaja tradicionalno in smo ga poimenovali Prebujanje plemenitosti in modrosti, je približati najvišjo znanstveno in umetniško ustanovo – njeno poslanstvo, članstvo in dosežke najpomembnejših slovenskih znanstvenikov in umetnikov – mladim, šolajočim se ljudem. V nadaljevanju pa tudi vzpostaviti trajnejše povezave med Akademijo in srednjimi šolami na Slovenskem. Mladim, ki jih zanima znanost in ki so pred odločitvijo o usmeritvi svojega potenciala, želimo na vsakem letnem srečanju predstaviti utrip enega izmed akademijskih razredov. Lani je bilo srečanje na temo slovenskega jezika, zato so pri njem sodelovali člani II. razreda SAZU za filološke in literarne vede, letos pa bo osrednjo vsebino oblikoval III. razred za matematične, fizikalne, kemijske in tehniške vede. Letošnje srečanje z mladimi je v znamenju fizike osnovnih delcev. Znanstveniki, ki ob pospeševalnikih raziskujejo v evropskem raziskovalnem centru CERN in na japonskem inštitutu KEK, bodo dijakom približali to vznemirljivo področje znanosti. Govor bo o kilometre dolgih pospeševalnikih, kot stanovanjski blok velikih detektorjih, o zanimivih rezultatih raziskav in o tem, kaj vse je še neznano. Popoldne se obeta prava poslastica, mladi se bodo lahko preizkusili kot pravi raziskovalci. Z računalniki bodo pregledovali podatke, ki so jih fiziki zajeli v CERN-u na Velikem hadronskem trkalniku (LHC) in pri eksperimentu Belle na Japonskem, in poskušali najti nove delce.

(Povzeto po objavi na www.sazu.si)



DOBRODOŠLI NA SLOVENSKI AKADEMIJI ZNANOSTI IN UMETNOSTI

Akademik prof. dr. Tadej Bajd, predsednik
Slovenske akademije znanosti in umetnosti

Spoštovane dijakinje in dijaki,
cenjene profesorice in profesorji,

dobro se zavedam, da javnost (pa naj bodo to mladi ali stari) prav malo ve, kakšna je vloga akademij v današnjem času. Zato se mi zdi primerno, da za uvod povem nekaj besed o nastanku in o današnji vlogi akademij. Rojstvo prve akademije predstavlja posvečen oljčni gaj, v katerem so pred več kot 2000 leti grški filozofi skozi svoje pogovore postavili temelje vsem znanostim. Akademije so ponovno oživele v renesansi. Humanisti so se zbirali predvsem v Firencah, Rimu, Benetkah in Bologni. V sedemnajstem in osemnajstem stoletju so se akademije razširile po vsej Evropi. Osredotočile so se predvsem na znanost, umetnost in jezikoslovje. V tem času smo dobili tudi prvo akademijo na naših tleh. Academia operosorum, akademija delavnih, je bila ustanovljena v Ljubljani leta 1693. Imela je samo 23 članov. Bili so pravniki, teologi in zdravniki. Njihovo geslo je bilo Nobis et aliis operosi, to je delavni za sebe in za druge. Za simbol so si izbrali čebelo.

Enako kot pred 300 leti je tudi danes delavnost osrednji moto Slovenske akademije znanosti in umetnosti. Slovenska akademija znanosti in umetnosti je bila v današnji obliki ustanovljena leta 1938. S svojimi največ sto člani se posveča glavnemu poslanstvu, to je spodbujanju in pospeševanju znanosti in umetnosti. Dejavnost Akademije poteka v šestih razredih. To so razredi za zgodovinske in družbene vede, filološke in literarne vede, matematične, fizikalne, kemijske in tehniške vede, naravoslovne vede, umetnost in medicino. Akademija ima tudi večje število dopisnih članov iz tujine. Med njimi so nobelovci in znanstveniki ter umetniki, ki so pomembno prispevali k razvoju slovenske znanosti in umetnosti.

Pomembna dejavnost evropskih nacionalnih akademij v enaindvajsetem stoletju je svetovanje politiki. To svetovanje pa mora biti osnovano na znanstvenem premisleku. Najučinkoviteje ga izvedemo z organiziranjem posvetov in simpozijev. S sklepi posvetov Akademija svetuje politikom predvsem na področjih kulture in znanosti. Ugotovitve posvetov pa preko medijev

sporočamo tudi širši javnosti. Na Slovenski akademiji znanosti in umetnosti potekajo številni odmevni posveti. Doslej smo obravnavali različne aktualne teme s področij raziskovanja, visokega in srednjega šolstva, varovanja okolja, prenove Evrope, razvoja Slovenije. Razpravljali smo o človekovih pravicah otrok in migrantov, o sovražnem govoru, o starajoči se družbi, o gozdu in lesu in tudi nevarnostih, ki jih prinašajo internet, umetna inteligenca in robotika. Pripravili smo tudi vrsto posvetov o poučevanju biologije, kemije, fizike, tehnike, književnosti in računalništva v osnovnih in srednjih šolah.

Slovenska akademija posebno pozornost namenja mladim. Zdaj je postal že običaj, da se vsako leto na štefanovo, to je 26. decembra, srečamo z mladimi kolegicami in kolegi, ki bodisi študirajo ali raziskujejo v tujini: na Akademiji se vsako leto sestanemo z društvom VTIS, v tujini izobraženih Slovencev. Vesel sem, da ima Akademija stik z njimi in lahko pozitivno vpliva na kroženje znanja med tujino in Slovenijo. Posebej pa moram omeniti Fundacijo Ivana Vidava, ki je ime dobila šele po smrti skromnega akademika in velikega matematika. Fundacija mnogim mladim matematikom in naravoslovcem pomaga premostiti obdobja pred začetkom ali po koncu doktorskega študija. Akademija ima razvito tudi bogato mednarodno sodelovanje s preko štiridesetimi nacionalnimi akademijami. Preko tega sodelovanja omogočamo predvsem mladim raziskovalcem, da vzpostavijo prve stike s svojimi kolegi na tujih univerzah ali inštitutih. Med najnovejšimi mednarodnimi stiki je podpis sporazuma s Kitajsko akademijo znanosti. Sodelovanje že poteka na področjih krasoslovja in superračunalništva. Kot zanimivost pa naj še povem, da so nam ob prvem obisku podarili kopijo komunikacijskega satelita, katerega razvoj je potekal pod okriljem akademije, ob drugem obisku pa ekvatorialno obročasto kroglo, ko jo je v osemnajstem stoletju v Pekingu razvil slovenski astronom Avguštin Hallerstein. Še več o Akademiji, njenih dogodkih in knjigah, ki jih izdajamo, boste našli na naši spletni strani:

www.sazu.si

Letno srečanje članic in članov Slovenske akademije znanosti in umetnosti z mladimi letos poteka že tretjič. Tema prvega srečanja, ki so ga pripravili člani IV. razreda, sta bila kras in trajnostni razvoj. Člani II. razreda so poskrbeli

za drugo srečanje, ki je bilo posvečeno slovenskemu jeziku. Dopoldanskim predavanjem slovenistov je sledila predstavitev slovarskega portala Fran. Srečanja so se udeležili tudi dijaki gimnazije iz Celovca, ki so se preko svoje spletne strani za povabilo še posebej prijazno zahvalili. Z letošnjim posvetom, ki je v znamenju fizike osnovnih delcev in so ga pripravili znanstveniki, ki raziskujejo v evropskem raziskovalnem centru CERN in na japonskem inštitutu KEK, postaja srečanje z mladimi stalnica Slovenske akademije znanosti in umetnosti.



NENEHNO PRESEGANJE ŽE DOSEŽENEGA V ZNANSTVENEM DELOVANJU

Dr. Edvard Kopal, predsednik uprave Slovenske znanstvene fundacije

Znanstveni dosežki nastajajo daleč stran od okolja, kjer se zgolj razpravlja, sooča ali primerja. Nastajajo le tam, kjer neprekinjeno poteka soočanje z lastnimi dometi raziskovalne ustvarjalnosti ter z dometi kolegov. Raziskovalec-začetnik, izkušen raziskovalec in moder preizkušen raziskovalec se soočajo s pomočjo istega mehanizma. Prizadevajo si napredovati in zato tudi napredujejo, vendar pa jih nobena čast ali priznanje ne osvobodi soočanja s sabo, s svojim razvojem in dosežki ter z dosežki kolegov v znanstveno-raziskovalni dejavnosti.

V čem pa se vrhunski raziskovalci razlikujejo? Razlikujejo se predvsem v intenzivnosti in trajanju »okupiranosti« z določeno idejo in proučevanjem le te. Tudi okoliščine njihovega vstopanja v svet znanosti in raziskav so izjemno pomembne, pogostokrat odločilne za domete, še zlasti za nove poglede na probleme v znanosti. Vrhunski raziskovalci »merijo« svoje domete ustvarjalnega reševanja problemov običajno »od vrha navzdol«, ostali ljudje običajno »od spodaj navzgor«. Izhodiščni položaj in gledišče sta skratka popolnoma različna, zato sta tudi dožemanje napredka in ocena dometa različna.

V veliko zadovoljstvo je tako Slovenski znanstveni fundaciji, kakor tudi meni osebno, da imamo v okviru tretjega zaporednega letnega srečanja članstva Slovenske akademije znanosti in umetnosti z mladimi ter njihovimi profesorji in mentorji z naravoslovnih področij priložnost skupnega spoznavanja osnovne zgradbe vesolja, ki jo človeštvu zagotavlja množica raziskovalcev in inženirjev tako v Evropi, kakor na ostalih celinah.

Kot Evropejci smo izjemno ponosni na znanstveno središče, na evropsko organizacijo za nuklearne raziskave, na CERN. V tem središču nastaja s pomočjo izjemnih znanstvenikov in vrhunsko inovativnih inženirjev ob uporabi naprav ter znanstvenih inštrumentov kompleksne sestave in izjemnih dimenzij znanje o osnovni sestavi snovi, t.j. osnovnih delcev, potrjevanje njihovega medsebojnega delovanja in s tem zagotavljanje popolnejšega poznavanja

osnovnih zakonov narave.

CERN pa ni zgolj posvečen znanosti v ožjem pomenu besede. V CERN-u delujejo številni izjemni raziskovalci in inženirji, ki so tudi izjemne k sočloveku usmerjene osebnosti. V prvi vrsti želijo pomagati-usmeriti k znanosti mlade ustvarjalne ljudi. To za CERN velja že desetletja.

Tako so npr. nekateri znanstveniki že leta 1961 zastavili odpiranje sveta znanosti in raziskav mladim ljudem. Ob povezovalni vlogi tedaj mladega italijanskega fizika prof. dr. Antonina Zichichija (roj. 1929) so ideje znanosti brez ovir in mej za vse, ki jih svet znanosti še posebej privlači, uveljavili v mestu Erice na Siciliji. Tam potekajo že desetletja poletne šole, seminarji in druge oblike pridobivanja znanja in praktičnih izkušenj s pomočjo številnih Nobelovih nagrajencev iz CERN-a in tudi drugih znanstvenih središč. Pred več kot 50 leti je sodelovanje nobelovcev z mladimi predstavljalo pravo revolucijo v znanstveni skupnosti. Tem oblikam so se kmalu pridružile tudi štipendije za mlade raziskovalne upe med doktorskimi študenti in doktorji znanosti na začetku znanstvene kariere.

To priložnost uspešno uporabljamo tudi Slovenci od leta 2002 dalje, ko je Svetovna federacija znanstvenikov, katere formalni sedež je pri CERN-u, podpisala dogovor s Slovensko znanstveno fundacijo. Dogovor omogoča do 10 letnih štipendij slovenskim prosilcem, ki prepoznajo domet svojih raziskovalnih projektov s področja naravoslovja, tehniških, medicinskih ali družbenih ved kot prispevek k boljšemu razumevanju in reševanju problemov planetarnih nujnosti-dejanj, ki jih je ali še bo potrebno storiti, da bo prihodnost za naše znanke ne le znosna, temveč izziv na številnih področjih, v prvi vrsti pa vsekakor prav v znanstvenoraziskovalni dejavnosti.

Za udeležence letnega srečanja je znanost in vse v zvezi z njo velik izziv, zato je vaš odziv ne le zaželen, temveč tudi nujen. Imate priložnost uvida v čudovita znanstvena spoznanja in procese, ki do njih vodijo ob sočasnem potrebnem razvoju tako znanstvenih inštrumentov kakor novih sposobnosti raziskovalcev, ki presegajo tiste, ki so jih zgolj pred enim desetletjem najpogosteje imeli zgolj nobelovci. Znanost je pač tako dinamična, da zahteva pravočasen odziv in to brez kakršnekoli rezerve najboljših ter najbolj drznih, ki zaupajo v svojo ustvarjalnost ter nujnost sodelovanja z drugimi raziskovalci. Želim vam čudoviti letošnji Evropski dan znanosti za mlade!



Slovenska znanstvena fundacija (SZF) je nacionalno pomembna ustanova zasebnega prava za pospeševanje in promocijo znanosti s sedežem v Ljubljani. Ustanovljena je bila maja 1994 s sodelovanjem Vlade Republike Slovenije ter slovenskih znanstvenih, visokošolskih, gospodarskih, denarnih in medijskih organizacij pa tudi nekaterih posameznikov. SZF ima stebre »Ljudje«, »Ideje« in »Orodja«. Njeno poslanstvo je ustvarjanje razmer za neodvisne naložbe v znanost (ljudje, projekti, pripomočki za organiziranje znanstvenoraziskovalne dejavnosti).

SZF je ustanova članica Evropskega združenja organizatorjev znanstvenih dogodkov, Združenja slovenskih ustanov in Hiše eksperimentov. Je soustanoviteljica podpornega okolja »Raziskovalni laboratorij za otroke in mladostnike« ter okolja »IdeaLab«. Je nosilka nacionalnega štipendijskega programa Svetovnega laboratorija v okviru Svetovne federacije znanstvenikov.



IZVOR MASE IN NOVA FIZIKA

Izr. prof. dr. Jernej Fesel Kamenik, vodja Odseka za teoretično fiziko Instituta Jožef Stefan

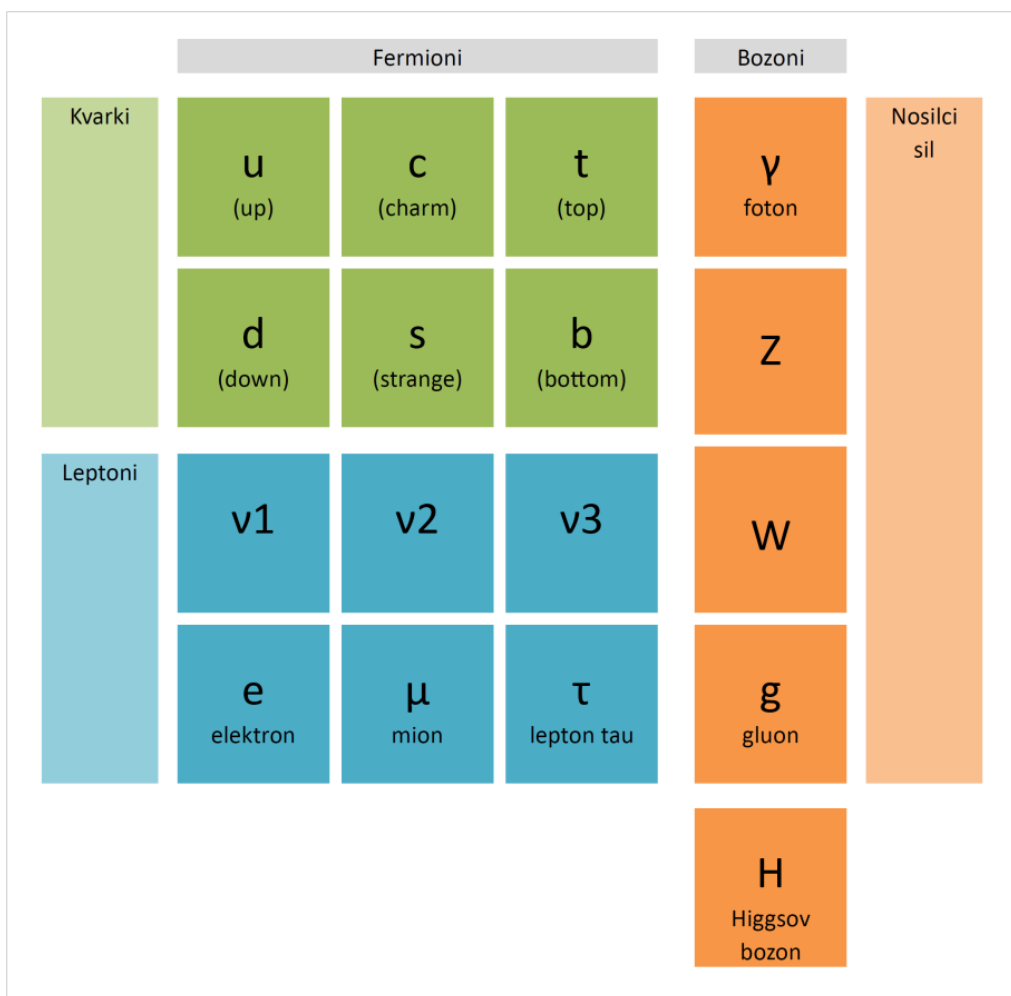
Fizika visokih energij obravnava procese med osnovnimi gradniki snovi, ki so v vesolju prevladovali prvo deset tisočinko po velikom poku pri temperaturah nad biljonom kelvinov.

Ukvarja se z najbolj temeljnimi vprašanji o naravi: Zakaj obstajamo? Danes delci snovi predstavljajo manj kot milijardinko sestave vesolja, ki ga sicer pretežno preveva svetloba prasevanja. Antisnovi pa je še precej manj. Razlogov za to še ne poznamo. Zakaj Sonce sije? Jedrske reakcije znotraj zvezd vzdržuje ravnovesje med gravitacijskim privlakom vseh plinov v njih ter sevalnim tlakom, ki je posledica jedrskih reakcij v zvezdnih sredicah. Šibka jedrska sila, ki povzroča te jedrske reakcije mora biti zato dosti močnejša od gravitacijske, hkrati pa kratkega dosega. Izmerjena razlika v jakosti je kar

Odgovore na ta in podobna vprašanja iščemo z raznolikimi eksperimenti ter opazovanji: na trkalnikih delcev, kot sta veliki hadronski trkalnik (LHC, ang. Large Hadron Collider) v CERNu na švicarsko francoski meji blizu Ženeve ter Super KEKb v Tsukubi na Japonskem; v kozmičnih žarkih s pomočjo detektorja AMS2 na mednarodni vesoljski postaji, nevtrinskega teleskopa IceCube na Antarktiki ali observatorija Pierre Auger v argentinski pampi; ter nenazadnje v podzemnih detektorjih kot so Hyper Kamiokande na Japonskem ali Large Underground Xenon detector v ZDA.

S teoretskega vidika lastnosti in dinamiko vseh poznanih osnovnih delcev izredno uspešno opisuje t.i. standardni model osnovnih delcev in interakcij (Slika 1). Model je bil osnovan na principih kvantne mehanike in Einsteinove relativnostne teorije v šestdesetih in sedemdesetih letih prejšnjega stoletja, za njegovo utemeljitev pa so bile podeljene tudi tri Nobelove nagrade (v letih 1979, 2004 in 2008). V skoraj pol stoletja od njegove zasnove so bili odkriti vsi delci, ki jih je napovedal, prestal pa je tudi vsa druga eksperimentalna preverjanja. Na primer, pogostost različnih procesov na LHC, ki jih napoveduje standardni model, se razteza čez 15 velikostnih redov. Napovedi teorije pa se

ujemajo z eksperimentalnimi meritvami tudi za najredkejše izmed njih. Spet v drugih izredno preciznih meritvah lastnosti delcev so ujemanje potrdili do deset decimalnih mest natančno.



Slika 1: Vsi osnovni delci Standardnega modela

Do sedaj najpomembnejši rezultat na LHC je bilo nedvomno odkritje zadnjega manjkajočega delca standardnega modela - Higgsovega bozona, ki je bilo javnosti predstavljeno junija leta 2012. Kot ostali delci znotraj standardnega modela je tudi Higgsov bozon teoretsko opisan kot kvantni val (Higgsovega) polja, ki sicer preveva ves prostor. Prisotnost Higgsovega polja zastira šibko jedrsko silo in s tem omogoča stabilne jedrske reakcije znotraj zvezd. Hkrati prispeva k masam ostalih delcev. Na primer, prav zaradi prispevka Higgsovega polja je masa protona malce manjša od mase nevtrona. Zato prosti nevtroni razpadajo preko šibke jedrske sile v protone in ne obratno. Povprečen življenjski čas nevtrona je le dobrih 15 minut. Stabilni protoni pa so v zgodnjem vesolju tvorili jedra vodikovega atoma in s tem podlago za razvoj kemije ter kompleksnega življenja.

Prav odkritje Higgsovega bozona na LHC ter meritve njegovih lastnosti so potrdili obstoj Higgsovega polja ter njegove ključne vloge v dinamiki osnovnih delcev. Hkrati pa so ti pomembni eksperimentalni rezultati izostrili

teoretsko uganko povezano obstojem t.i. okusov osnovnih delcev. Znotraj standardnega modela nastopajo osnovni gradniki snovi, kvarki in leptoni, v treh skoraj identičnih kopijah, ki jim pravimo tudi okusi. Med seboj se delci različnih okusov razlikujejo po sklopitvah s Higgsovim poljem. Delci z večjimi sklopitvami so posledično masivnejši, hkrati pa močnejše interagirajo s Higgsovim bozonom, kar je bilo tudi eksperimentalno potrjeno na LHC. Kar nas pri tem, fenomenološko sicer izredno uspešnem in ekonomičnem opisu mas osnovnih delcev bega, je, zakaj se Higgsove sklopitve in posledično mase kvarkov in leptonov raztezajo čez več kot pet velikostnih redov. Na primer, razmerje mas med elektronom in najtežjim delcem standardnega modela, kvarkom t, je primerljivo razmerju med masama planetov Plutona in Jupitra, hkrati pa sta s stališča teorije oba osnovna delca nedeljiva in z enakim izvorom mase. Ob tem naj spomnimo, da večino mase v vesolju sploh ne tvorijo znani gradniki snovi, temveč misteriozna temna snov. Ta predstavlja približno dve tretjini vse mase v vesolju, oziroma skoraj šest krat več kot vsi atomi. Iz takšnih premislekov izhajajo temeljna odprta vprašanja fizike delcev danes: Zakaj se vsa snov pojavlja v treh okusih? Od kod velike masne oziroma okusne hierarhije? Kaj tvori večino mase v vesolju?

Dodatne namige of tako imenovani novi fiziki, ki bi odgovorila na odprta vprašanja in uganke standardnega modela osnovnih delcev iščemo s pomočjo natančnih meritev ali iskanj redkih in prepovedanih procesov kvarkov in leptonov, ter preko preciznih meritev njihovih lastnosti. Na primer, drobna odstopanja med lastnostmi in procesi delcev in anti-delcev bi lahko pojasnila prevlado snovi nad anti-snovjo v zgodnjem vesolju, razlike med delci različnih okusov pa osvetlile opažene masne hierarhije med njimi. Sledi kozmološke temne snovi iščemo v podzemih laboratorijih na Zemlji ter v kozmičnih žarkih. Pomembno vlogo igrajo tudi meritve procesov in lastnosti samega Higgsovega bozona ter neposredna iskanja morebitnih sledi novih delcev na LHC. Zanima nas predvsem ali in kako temna snov interagira z vidno snovjo ter ali tudi temna snov čuti Higgsovo polje.

Kljub temu, da je LHC šele na pol poti svojega delovanja, ter da se obratovanje Super KEKb šele dodobra začneja, pa so v pripravi že predlogi za prihodnje trkalnike. Morda najbolj ambiciozen med njimi, imenovan Prihodnji krožni trkalnik (FCC, ang. Future Circular Collider), naj bi bil po obsegu skoraj štirikrat večji od LHC in dosegal do sedem krat večje energije trkov delcev. V strukturo snovi bi lahko kot mikroskop pogledal do sedemkrat globlje. Konkurenčni predlog linearnega pospeševalnika delcev bi elektrone in njihove anti-delce (pozitrone) pospešil do hitrosti, ki bi od svetlobne odstopala šele na petnajsti decimalki, ter jih nato medsebojno trkal. Omogočal bi izredno natančne meritve lastnosti Higgsovega bozona. Še višje energije trkov delcev

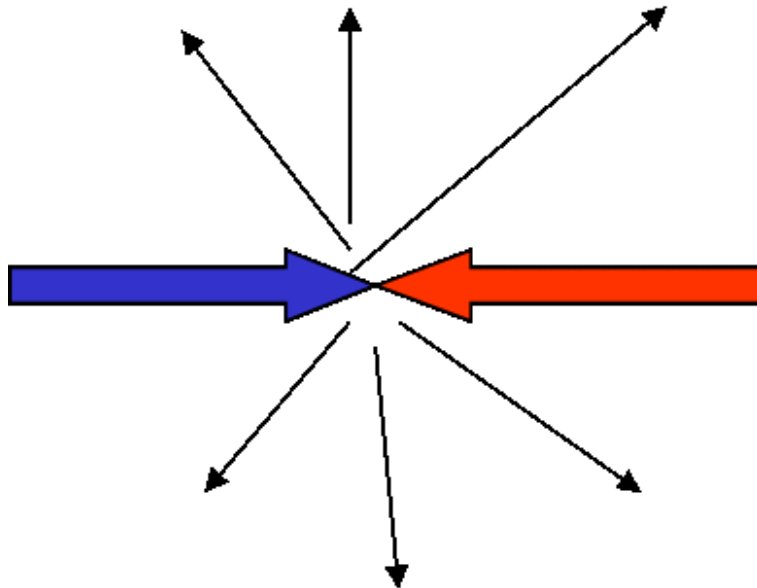
lahko že sedaj opazujemo ob vpadu kozmičnih žarkov v atmosfero in tudi na tem področju se obeta nadgradnja obstoječih in izgradnja novih, zmogljivejših teleskopov in observatorijev, tako v vesolju, kot na Zemlji in pod antarktičnim ledom. Vsekakor bo za razrešitev ugank okusa in temne snovi najverjetneje potreben eksperimentalni ter teoretski preboj prihajajočih generacij fizikov.



BELLE II IN SUPERKEKB: S POSPEŠEVALNIKOM NA LOVU ZA REDKIMI PROCESI

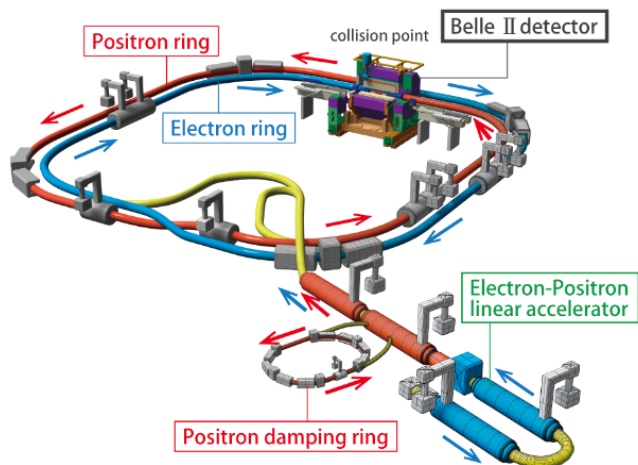
Red. prof. dr. Peter Križan, izredni član Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Fakulteta za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani in institut "Jožef Štefan", Ljubljana

Pospeševalniki so bistveni pri iskanju odgovorov na vprašanja, kaj so osnovni delci in kakšne so sile med njimi, pa tudi kako se je razvijalo zgodnje vesolje. V pospeševalniku pospešimo delce do visokih energij, nato pa jih pustimo, da se zaletijo eni v druge.



Slika 1: V pospeševalniku pospešimo delce do visokih energij

Pri takem trku se sprosti večina njihove energije, del energije pa se lahko pretvori v maso zelo težkih delcev, takih, ki jih običajno v naravi ne najdemo. Ti delci niso obstojni in zato zelo hitro razpadajo, pri tem pa nastane množica lažjih, obstojnih delcev. Te nato prestrežemo z zapletenim sistemom detektorjev, kot je to na primer naš spektrometer Belle II.

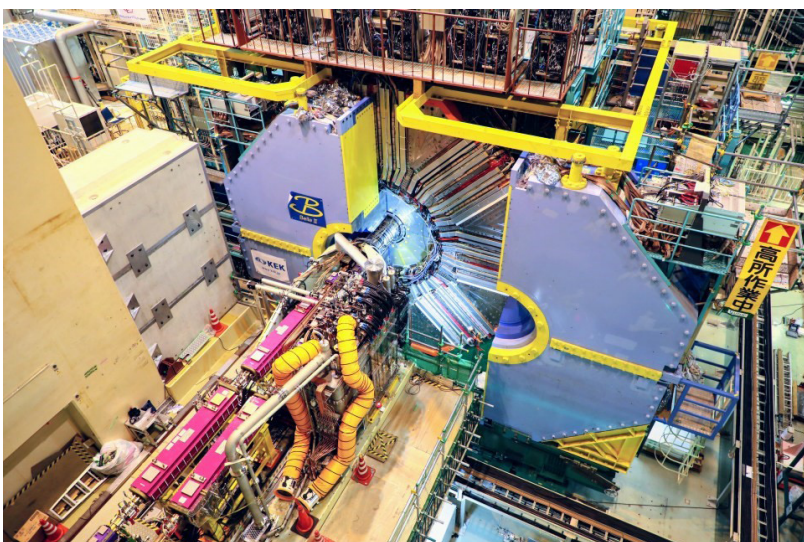


Slika 2: Pospeševalniški kompleks SuperKEKB, zaporedje linearnega pospeševalnika, pozitronskega zbiralnika, glavnega obroča in detektorja Belle II ob točki, kjer trkajo elektroni in pozitroni (levo); desno: 3km dolg tunel pospeševalnika.

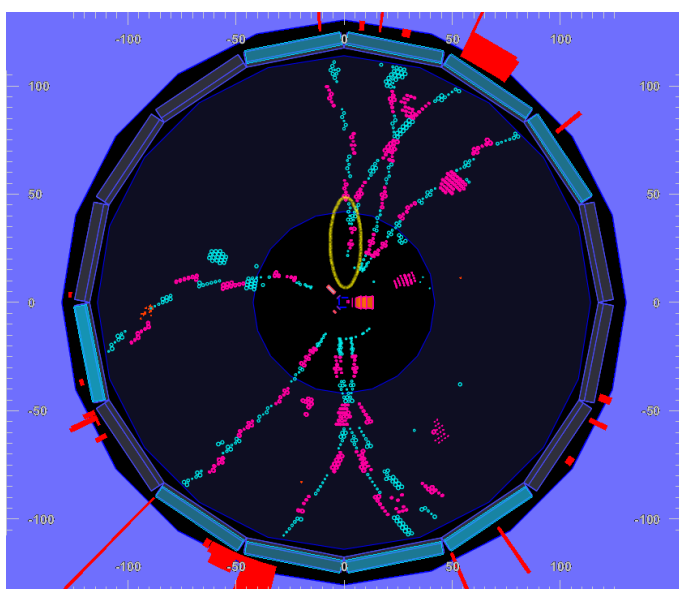
V pospeševalniku SuperKEKB v institutu KEK v Tsukubi trkamo elektrone in pozitroni. Elektrone, ki so del atomov, dobimo tako, da na primerno snov posvetimo z močnim svetlobnim izvorom, recimo laserjem. Paketi (kvanti) svetlobe – fotoni – izbijajo elektrone, ki jih nato v električnem polju pospešimo. Pot do pozitronov, ki so anti-delci elektronov, je bolj zapletena. Pozitronov v naravi ni, potrebno jih je torej ustvariti. Zato uporabimo pospešene elektrone, ki jih pustimo, da trčijo v tarčo iz volframa. Pri tem nastanejo med drugim tudi pozitroni. Te potem pospešimo, podobno kot elektrone, in jih s pomočjo električnih in magnetnih polj vodimo v eno izmed dveh 3km dolgih cevi krožnega dela pospeševalnika (na zgornji sliki je označena z rdečo barvo). Elektroni krožijo v nasprotni smeri po podobni cevi, ta je označena z modro barvo.

Še nekaj zanimivosti pri pospeševalniku SuperKEKB: tunel je dolg 3016 m, nahaja se v globini 11m (štiri nadstropja) pod zemljo. V tunelu krožijo elektroni in pozitroni po dveh vakuumskih ceveh, v katerih je tako dober vakuum kot v medzvezdnem prostoru. Elektroni in pozitroni so razporejeni v 2500 paketih, ki krožijo po obeh obročih v nasprotnih smereh, v vsakem paketu je 100 milijard elektronov oziroma pozitronov. Za pospeševanje v obroču skrbi 38 radiofrekvenčnih votlin (od tega 8 supraprevodnih). Za usmerjanje elektronov in pozitronov po obroču služi 2600 elektromagnetov, večina od njih je dipolnih magnetov za usmerjanje v ovinkih obroča in kvadrupolnih leč za zbiranje žarkov. Elektromagneta, ki fokusirata žarka v točko interakcije na sredini detektorja Belle II, sta sestavljena iz 50 supraprevodnih tuljav iz niobijevega titanata, ki jih hladimo na temperaturo 4 stopinje nad absolutno ničlo (torej na -269 stopinj Celzija). Ko bo pospeševalnik SuperKEKB deloval s polno zmogljivostjo, bo to po gostoti trkov najbolj zmogljiv pospeševalnik na svetu, skoraj stokrat bolj zmogljiv kot LHC v CERNu.

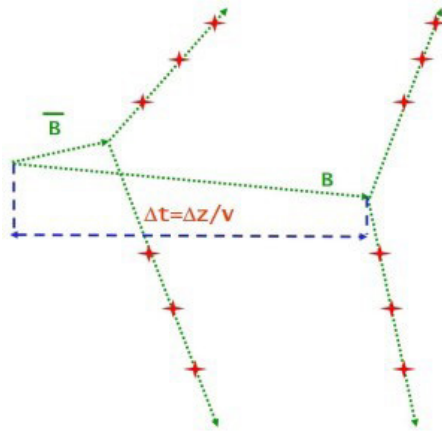
Pri eksperimentu Belle II pri trkih elektronov in pozitronov v trkalniku SuperKEKB nastajajo mezoni B. Ena izmed pomembnejših nalog tega eksperimenta bo raziskava, kako se lastnosti mezonov B spreminjajo s časom. Ker so mezoni B kratkoživi delci, od njihovega nastanka pa do razpada v lažje stabilne delce mine v povprečju dobra bilijoninka sekunde ($1/1000000000000$ s), to ni enostavna naloga. Pomagamo si tako, da za tvorbo mezonov B uporabimo žarka elektronov in pozitronov z rahlo različnima energijama (elektroni bodo imeli energijo 7 GeV, pozitroni 4 GeV). Zaradi te razlike energij se bodo mezoni B gibal v smeri bolj energetskega žarka, torej v smeri elektronov. Ker pa se bodo gibal, bodo v času, preden bodo razpadli, preleteli razdaljo okoli 200 mikrometrov, ki se jo v principu da izmeriti. Če bomo izmerili položaj točke, v kateri je mezon B razpadel, bomo tudi vedeli, koliko časa je do takrat preteklo (hitrost je namreč določena z razliko energij elektrona in pozitrona).



Slika 3: Detektor Belle II in cevi obeh žarkov.

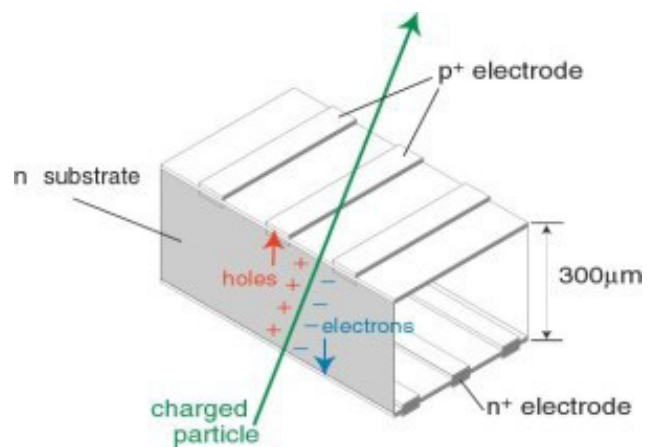
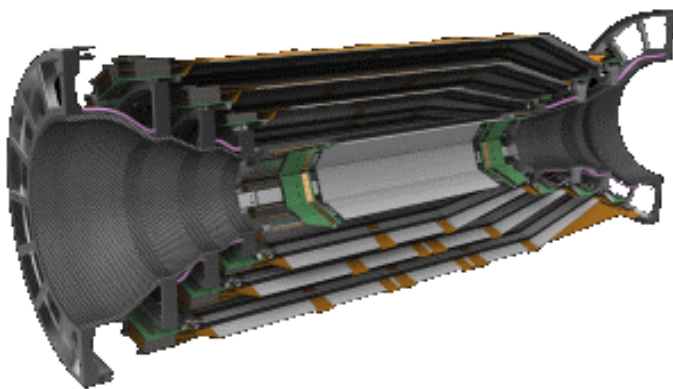


Slika 4: Tipičen dogodek, rezultat trka med elektronom in pozitronom. Ukrivljene sledi nabitih delcev, ki so nastali pri reakciji, zaznamo z velikim sledilnim detektorjem v močnem magnetnem polju



Slika 5: Mezon B in njegov antidelec, ki nastaneta pri trku elektrona in pozitrona, čez čas razpadeta. Če zelo natančno premerimo sledi njunih razpadnih produktov v točkah, ki jih označujejo rdeče zvezdice, lahko ugotovimo, kje sta razpadla.

Točko, v kateri je mezon razpadel, imenujemo verteks. Njen položaj določimo tako, da zelo natančno izmerimo nekaj točk na poti, ki sta jo preletala oba razpadna produkta. Presečišče obeh premic je mesto, kjer je razpadel mezon B. Tej meritvi je namenjen detektor verteksov, o katerem bomo govorili danes. Ta detektorski sklop se nahaja prav v osrčju detektorja Belle II, v neposredni bližini vakuumske cevi, po kateri v pospeševalniku krožijo elektroni in pozitroni.



Slika 5: Mezon B in njegov antidelec, ki nastaneta pri trku elektrona in pozitrona, čez čas razpadeta. Če zelo natančno premerimo sledi njunih razpadnih produktov v točkah, ki jih označujejo rdeče zvezdice, lahko ugotovimo, kje sta razpadla.

Detektor verteksov je sestavljen iz šestih plasti tankih silicijevih plošč, v katerih nabiti delci pri preletu ionizirajo atome. Pri tem nastaneta v kristalu dve vrsti nosilcev naboja, negativni elektroni in pozitivne vrzeli. Z zunanjo napetostjo ustvarimo v ploščici električno polje, ki posrka elektrone na eno elektrodo, vrzeli pa na drugo. Za odlično krajevno ločljivost takega detektorja poskrbimo tako, da obe elektrodi razrežemo na pasove, ki so medsebojno oddaljeni 50 mikrometrov. Položaj pasu, na katerem dobimo signal, nam pove, kje je delec preletel ploščico. Ker so pasovi na zgornji in na spodnji strani ploščice

orientirani pravokotno eni na druge, dobimo z eno samo detektorsko ploščico podatek o obeh koordinatah v ravnini ploščice. Tak detektor imenujemo silicijev mikropasovni detektor, in ga bomo v Belle II uporabili za plasti od tri do šest. Za obe notranji plasti uporabimo še bolj natančen senzor, v katerem imamo namesto dveh pasovnih elektrod eno samo, razrezano na kvadratke, signalne blazinice (ali popularno 'piksle'). Dejansko je tak detektor v sorodu s CCD kamerami, ki jih imamo v digitalnih fotoaparatih in v telefonih, le da je število slik, ki jih z njim lahko posnamemo na sekundo, stotisočkrat večje.

Lansko pomlad so japonski sodelavci v elektronsko-pozitronskem trkalniku najprej uspešno shranili žarek elektronov, ki se gibljejo s hitrostjo, zelo blizu hitrosti svetlobe, nato pa še žarek pozitronov, ki krožijo po obroču magnetov v nasprotni smeri kot elektroni. Slab mesec kasneje je nato sledila zadnja, odločilna stopnja v zagonu pospeševalnika, ko so oba žarka usmerili tako, da sta trčila v sredini detektorja Belle II, delce, ki so nastali pri trkih, pa je zaznal detektor Belle II. Prvi trki so pomemben mejnik za vsak nov pospeševalnik delcev, v primeru SuperKEKB pa je bilo to še posebno pomembno, saj sta oba žarka izredno tanka - tanjša od stotinke človeškega lasu - in enega proti drugemu krmarimo z magnetnim poljem, ne da bi žarka zares videli.

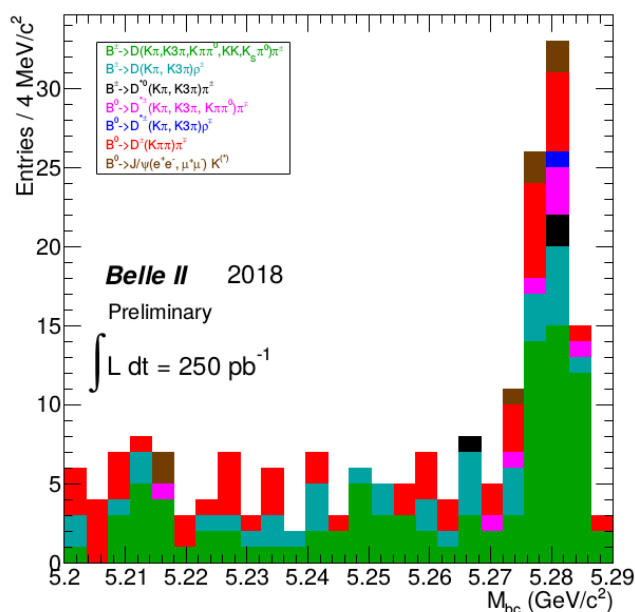
Kot si lahko predstavljate, je bilo v zaključni fazi priprav na prve trke v kontrolnih sobah pospeševalnika in detektorja precej napeto in živahno. 26. aprila kmalu po polnoči po lokalnem času je nato bil na vrsti veliki trenutek, zaznali smo reakcijske produkte prvih trkov elektronov in pozitronov. Kako razgibano pa je bilo v kontrolni sobi pospeševalnika, ko so se pripravljali na veliki dogodek, si lahko ogledate na filmčku na povezavi https://www.youtube.com/watch?v=3fj7_aPR4t8



Slika 7: Veselje ob prvih trkih elektronov in pozitronov, ki smo jih zaznali z detektorjem

Od prvih trkov pa vse do konca julija je nato šlo zares, optimizirali smo delovanje detektorja in pospeševalnika. To iz več razlogov ni bilo niti malo enostavno. Pri tri kilometre dolgem pospeševalnem obroču moramo nastaviti kup parametrov, da se oba žarka vedno znova (dvestomilijonkrat na sekundo) zaletita eden v drugega. Podobno zapleteno je tudi uvodno poganjanje detektorja, ki je sestavljen iz več detektorskih sklopov, od katerih ima vsak svoje značilnosti – in muhe. Ker potekajo meritve dan in noč in ker tudi za konec tedna pospeševalnik ne počiva, smo pri tem popili marsikatero pločevinko kave...

Z umerjenim detektorjem smo nato uspeli med reakcijskimi produkti najti že prve mezone B, s pomočjo katerih bomo pri eksperimentu Belle II iskali nove pojave. Razpade mezonov B smo rekonstruirali v sedmih razpadnih kanalih. Seveda je to šele začetek, do konca eksperimenta čez sedem let bomo nabrali dvestotisočkrat večji vzorec.



Slika 8: Rekonstruirani razpadi mezonov B: iz energije razpadnih produktov lahko izračunamo maso delca, iz katerega so nastali. Mezioni B so zbrani v vrhu okoli energije 5.28 GeV, ostalo so naključne kombinacije.

Pospeševalnik in detektor sta pol leta počivala, sredi marca pa ponovno začneta z delom. Ponovno bo razburljivo in zanimivo. Do poletja nameravamo izvesti prve resne meritve, s katerimi bomo med drugim iskali redke procese, v katerih bi se lahko pokazala tudi skrivnostna temna snov.



DETEKTOR ATLAS NA VELKEM HADRONSKEM TRKALNIKU

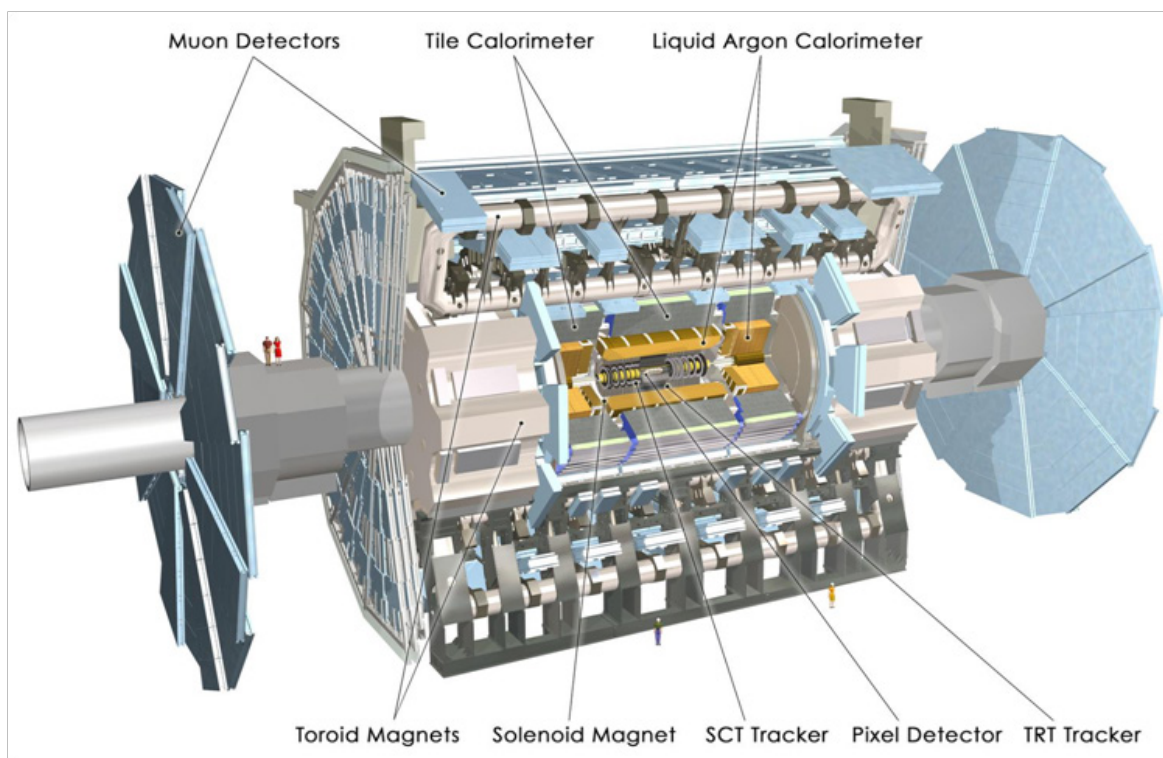
Prof. dr. Marko Mikuž, Fakulteta za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani in Institut "Jožefa Štefan", Ljubljana

Povzetek

Detektor ATLAS je eden obeh vsestranskih detektorjev, ki merijo trke protonov pri visokih energijah na Velikem hadronskem trkalniku. Skupaj z detektorjem CMS sta v letu 2012 odkrila Higgsov bozon, kar predstavlja enega največjih uspehov v znanosti 21. stoletja. Pogledali si bomo, kako z detektorjem izmerimo silno težke in kratkožive osnovne delce, ki nastopajo v Standardnem modelu in napovedih modelov, ki skušajo preseči Standardni model.

V prejšnjem predavanju ste se naučili, kako deluje Veliki hadronski trkalnik. Protoni v njem trkajo v središču velikih detektorjev, kot sta ATLAS (Slika 1) in CMS. Zato da uspemo izmeriti zanimive fizikalne pojave, kot je nastanek Higgsovega bozona ali napovedanih še težjih delcev, poleg velike energije potrebujemo še ogromno, skorajda nepredstavlljivo število trkov protonov. Zato sta dva razloga. Protoni niso osnovni delci, sestavljeni so iz treh kvarkov. Razen tega so pri visokih energijah prisotni še dodatni pari kvark - anti-kvark, vse skupaj pa je povezano z gluoni. Energija protona se tako porazdeli na mnogo delcev in zelo redko se zgodi, da pride do trka kvarkov, ki nosijo znaten delež energije protona. Za nastanek težkih delcev kot je Higgsov bozon pa potrebujemo ravno take, zelo redke trke. Verjetnost za fizikalne procese na nivoju kvarkov in gluonov tudi tipično pada in to s kvadratom energije trka. Po drugi strani pa je celotna verjetnost, da protona trčita, velika. Za silo si lahko predstavljamo, da do trka pride, kadar se protona vsaj dotakneta. Ker je radij protona malo večji kot 1 femtometer (10^{-15} m), lahko velikost tarče ali strokovno presek za trk ocenimo z $\pi(2r)^2 \approx 4 \times 10^{-30}$ m². V resnici je presek še za faktor 2 večji, znaša okoli 8×10^{-30} m² oziroma 80 milibarnov (mb), kar je za fiziko delcev gromozanska številka. Za primerjavo, ustrezna "velikost tarče" za nastanek Higgsovega bozona znaša nekaj 10 pikobarnov (pb = 10^{-12} b), posamični razpadni načini, primerni za prepoznavo, pa celo le nekaj

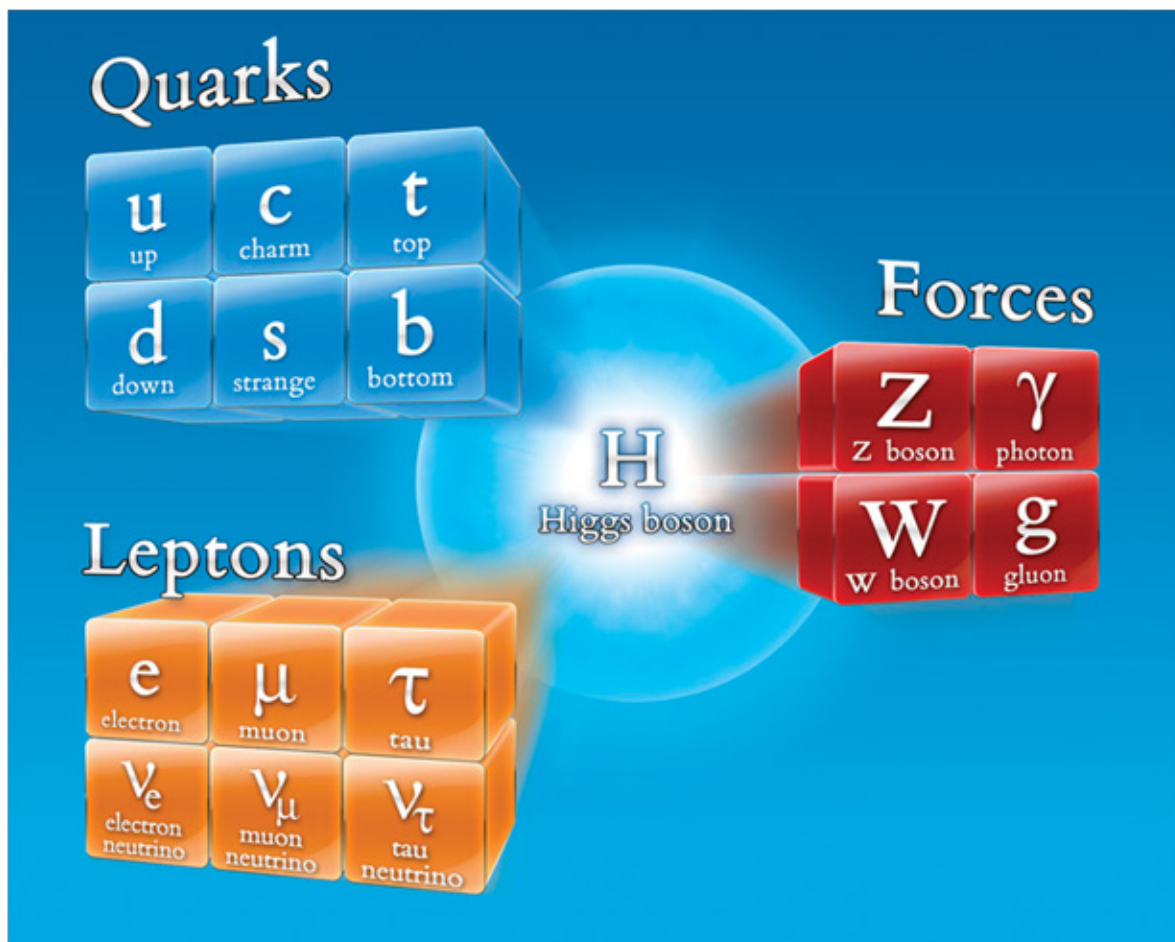
10 femtobarnov ($fb = 10^{-15} b$). Higgsov bozon nastane torej le enkrat na več milijard trkov, proces, kjer ga zaznamo, pa se zgodi le enkrat na biljon trkov.



Slika 1: Shematski prikaz detektorja ATLAS. Od sredine navzven si sledijo: notranji detektor z blaziničastim (pixel) in pasovnim (SCT) silicijevim ter plinskim (TRT) detektorjem v tuljavi (solenoid), elektromagnetni (liquid argon) in hadronski (tile) kalorimeter, magnetni svitek (toroid) z detektorji mionov.

Veliki hadronski trkalnik je prilagojen tem številkam. V središču detektorjev ATLAS in CMS pride vsakih 25 milijardink sekunde (25 ns) do prehoda ene gruče protonov skozi drugo in pri tem se zgodi do okoli 50 trkov. V detektorju torej poka več kot milijardo krat na sekundo! Toda le na ta način vsakih nekaj sekund nastane Higgsov bozon in vsak dan morebiti nastane nekaj deset razpadov, ki smo jih sposobni zaznati.

Kaj pa v detektorjih sploh zaznamo? Higgsov bozon denimo živi le 2×10^{-22} s, v tem času bi prepotoval 60 fm, če bi se gibal s svetlobno hitrostjo. Mnogo prekratka pot, da bi bi jo bili sposobni izmeriti. Pravzaprav od vseh delcev, ki sestavljajo osnovni nabor v Standardnem modelu ([Slika 2](#)), v detektorju lahko neposredno izmerimo le tri: elektron, mion in foton. Prvi in zadnji sta stabilna, drugi, težji brat elektrona pa živi nekaj mikrosekund in tako prepotuje okoli 100 m, preden razpade.

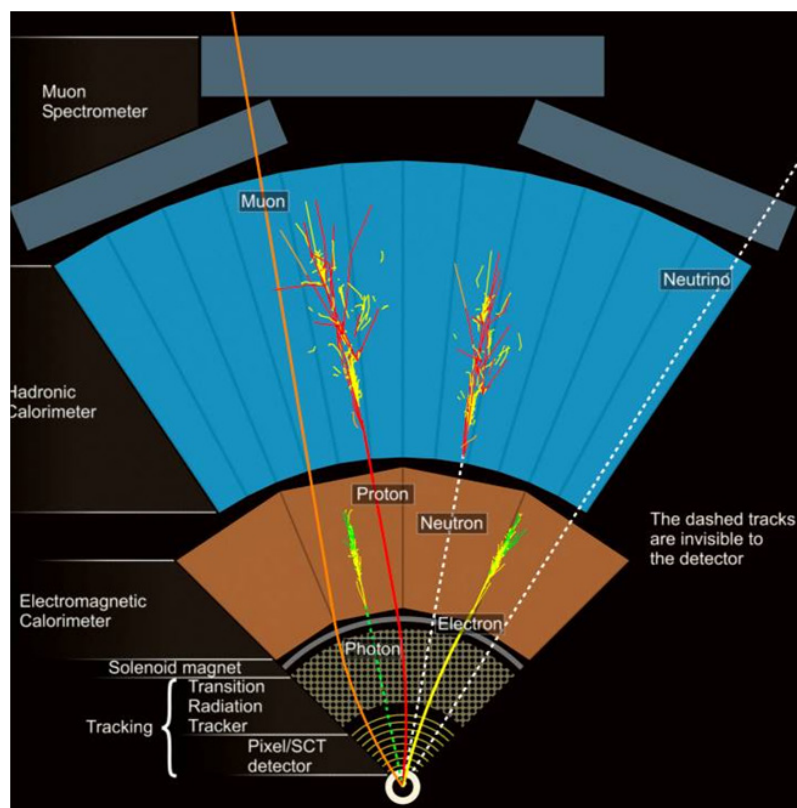


Slika 2: Gradniki Standardnega modela. Delci snovi, kvarki in leptoni, nastopajo v parih treh generacij, ki se razlikujejo po masi. Posredniki sil so gluoni za močno, bozona W in Z za šibko ter foton za elektromagnetno. Vse povezuje Higgsov bozon, ki delcem preskrbi maso.

Kaj pa se zgodi s preostalimi delci? Kvarki in gluoni, ki jih veže močna sila, zaradi nje ne pridejo daleč od mesta, kjer so nastali. Med njimi namreč nastajajo vedno novi kvarki in gluoni, pari kvark – anti-kvark se povežejo v mezone, trojice kvarkov pa v barione, kot sta denimo proton in nevtron. Mezonom in barionov s skupnim imenom pravimo hadroni, delci, na katere deluje močna sila. Razen tega težji kvarki razpadajo v lažje, tudi težki lepton tau hitro razpade. Od mezonov je najlažja trojica pionov, ki jih sestavljajo pari najlažjih kvarkov u in d . Od teh oba nabita, pozitivni in negativni pion, živita nekaj 10 ns, oziroma prepotujeta okoli 10 m. Naslednji, težji mezoni, imenovani kaoni, so sestavljeni iz kvarka s in lahkega kvarka. Od štirih kombinacij sta dve nabiti, ki živita okoli 10 ns oziroma prepotujeta nekaj metrov. Če imata prvotni kvark ali gluon zadosti energije, je nastalih hadronov, med njimi prevladujejo pioni, lahko nekaj 10 in vsi potujejo znotraj ozkega stožca v smeri kvarka – v detektor leti hadronski pljusk (angl. jet).

Večina trkov protonov poteka pri relativno nizkih energijah sestavnih kvarkov in gluonov. Nastali hadroni so zato zvezno porazdeljeni po detektorju. Zaradi manjše verjetnosti, da so bili deleži energij kvarkov ali gluonov, ki so trčili, enaki, so hadroni bolj pogosti v smereh vzdolž protonskih curkov kot v transverzalni ravnini detektorja. Pri povprečnem trku v detektor leti okoli 30 hitrih nabitih hadronov, torej imamo pri vsakem prehodu grušč nad 1000 delcev, ki se nam podijo po detektorju in predstavljajo ozadje za zanimive, redke procese, ki jih želimo izmeriti.

Kaj želimo izmeriti delcem v detektorju (**Slika 3**)? Pri običajnih telesih, recimo planetih, z opazovanji izmerimo tir in iz tega izluščimo maso planeta in njegovo hitrost. Naši delci so večinoma zelo hitri in se skorajda vsi gibljejo s hitrostjo blizu svetlobne. Namesto Newtonove mehanike zanje veljajo zakoni Einsteinove posebne teorije relativnosti (PTR) in, ker gre za pojave na majhnih dimenzijah, kvantne mehanike. Zato sta osnovni merjeni fizikalni lastnosti gibalna količina in energija delcev, ki sta v PTR povezani s hitrostjo in maso delcev. Med njima velja zveza $E^2 - P^2c^2 = (mc^2)^2$, kjer smo s P označili velikost vektorja gibalne količine. Enačba velja v poljubnem inercialnem opazovalnem sistemu; v tistem, v katerem delec miruje, je $P=0$ in v enačbi prepoznamo znano Einsteinovo enačbo $E=mc^2$.

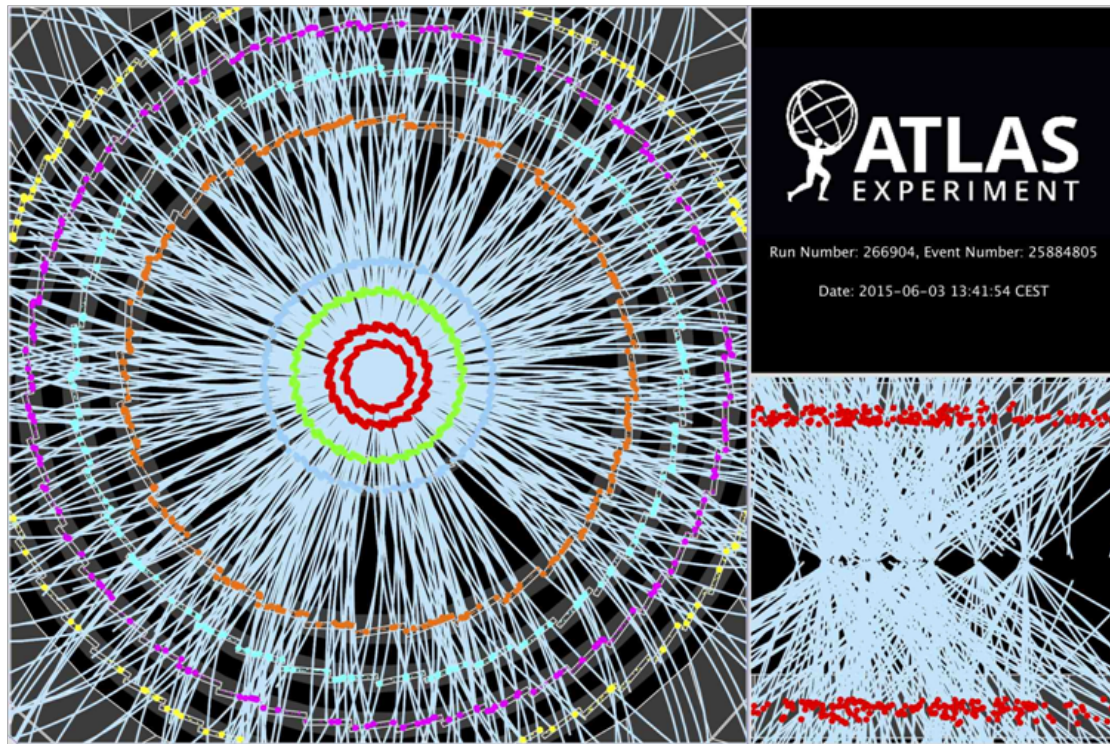


Slika 3: Transverzalni izsek detektorja ATLAS s prikazom odziva posamičnih delov na različne vrste delcev. Črtkanih sledi detektor ne zaznava. Prikazana sta primera elektromagnetnega (elektron, foton) in hadronskega (pion, kaon, nevtron, proton) plazmu.

Nabiti delci pri prehodu skozi snov le-to ionizirajo, nastali naboj pa lahko pretvorimo v električni signal, ki ga obdelamo s hitro elektroniko in procesorji. Ta postopek znamo izvesti zadosti hitro, da uspemo slediti posamičnim trkom gruč vsakih 25 ns.

Vektor gibalne količine izmerimo iz ukrivljenosti tira delca v magnetnem polju preko enačbe $P = eBr$, kjer je e naboj delca, B gostota magnetnega polja in r polmer tira. Ker nas zanima smer gibalne količine delca ob nastanku, moramo iz presečišča več sledi določiti še mesto nastanka, tako imenovani verteks. Pravzaprav tako določimo le komponenti v transverzalni ravnini, pravokotni na magnetno polje oziroma smer curkov protonov, vzdolžno komponento pa iz strmine vijačnice, ki jo opisuje pot delca v prostoru.

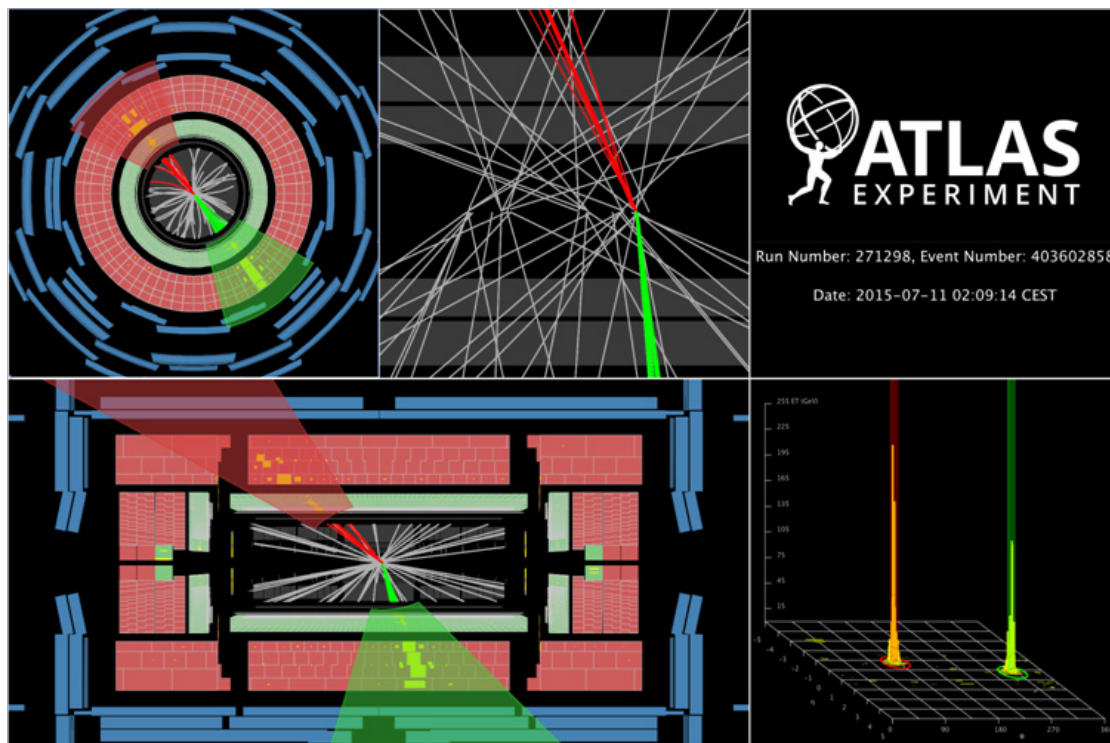
Tir so včasih merili z meglično ali mehurčno celico, kjer so fotografirali mehurčke, nastale vzdolž ionizacije. V ATLASu tir vzorčimo v tankih plasteh pozicijsko občutljivih silicijevih in plinskih detektorjev notranjega dela detektorja, sledilnika, ki je v supraprevodni tuljavi premera $2,4\text{ m}$ z $B = 2\text{ T}$ vzdolž curka protonov. Velikost posamičnih detektorjev je prilagojena gostoti sledi: notranji del je razdeljen na blazinice dimenzij $50\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$, srednji na pasove $80\ \mu\text{m} \times 2000\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$, v zunanem delu pa so cevke s plinom premera 4 mm. Vzorčevalne plasti so tanke, tako da delec na svoji poti skozi notranji del detektorja ne izgubi skoraj nič energije. Vsaka vzorčevalna plast nam priskrbi tridimenzionalno informacijo o prehodu delca. Iz teh s pomočjo programskih orodij za prepoznavo sledi uspemo rekonstruirati tudi preko 1000 sledi, ki izhajajo iz več deset verteksov, ki predstavljajo posamične trke protonov ob prehodu gruč ([Slika 4](#)).



Slika 4: Sledi delcev v notranjem detektorju pri enem prvih trkov protonov energije 13 TeV. Sledi dobimo z rekonstrukcijo iz zadetkov v koncentričnih plasteh (4 blaziničasti, 4 pasovni) detektorjev. Gostota na prečnem preseku vara, v resnici so sledi porazdeljene vzdolž detektorja in se gostijo proti središču. Na povečavi desno so vidni zadetki v notranji plasti blaziničastega detektorja in obilica rekonstruiranih verteksov, porazdeljenih po približno 5 cm vzdolž curka protonov.

Z ionizacijo v snovi zelo hitri delci le počasi izgubljajo energijo, veliko hitreje jo izgubljajo preko interakcij s snovjo, kjer nastanejo dodatni delci. Tu se razlikujejo elektroni, mioni in hadroni. Elektroni v snovi sevajo fotone, podobno, kot v rentgenski cevi. Fotoni pa tvorijo pare elektron-pozitron. Ta procesa, zavorno sevanje in tvorba parov, sta mnogo bolj pogosta, če so v snovi atomi z velikim vrstnim številom, tipično svinec. Tako se število elektronov vzdolž poti eksponentno pomnožuje, v snovi dobimo elektromagnetni plaz. Sčasoma imajo elektroni v plazmu premajhno energijo, plaz ugasne in elektroni preostalo energijo izgubijo z ionizacijo. Celoten naboj v plazmu, nastal z ionizacijo, je sorazmeren z energijo prvotnega elektrona ali fotona.

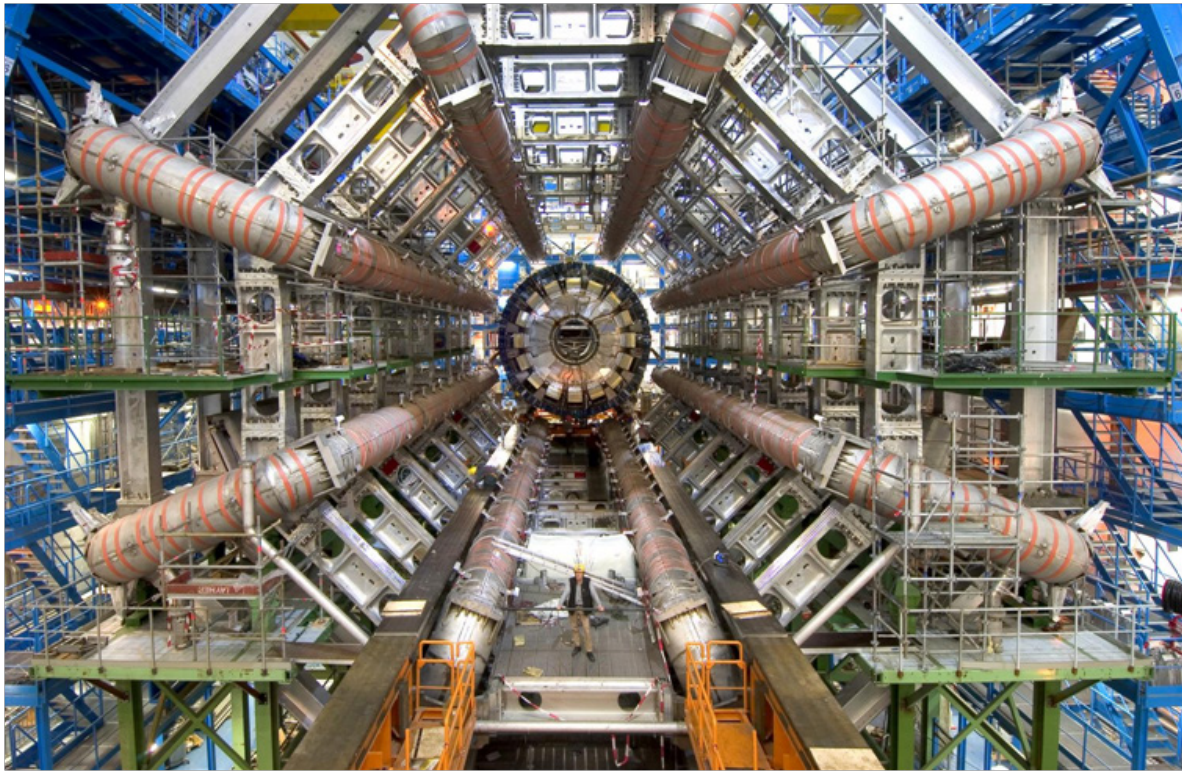
Hadroni (pioni, kaoni, protoni, nevtroni) v snovi ne sevajo fotonov, z jedri snovi interagirajo z močno silo in pri tem nastajajo dodatni hadroni, predvsem pioni. Le-ti spet interagirajo s snovjo, število delcev eksponentno narašča in dobimo hadronski plaz (Slika 5). Spet je ionizacija v plazmu sorazmerna z energijo prvotnega hadrona. Pogostost interakcij je sorazmerna s številom protonov in nevtronov v jedrih, zato se dobro obnese vsaka gosta snov, tipično iz cenovnih razlogov uporabimo železo. V svincu je elektromagnetnih interakcij bistveno več kot hadronskih, zato se elektromagnetni plaz razvije pred hadronskim.



Slika 5: Rekonstrukcija dogodka z dvema hadronskima pljuskoma v detektorju ATLAS. Lepo sta vidna v kalorimetru (zeleno – elektromagnetni, roza – hadronski), pripadajoče sledi v notranjem detektorju so obarvane rdeče in zeleno.

Detektorjem, ki izmerijo energijo plaz, pravimo kalorimetri. Tipično sta v detektorju dva, prvi, notranji, elektromagnetni kalorimeter zadrži elektromagnetni plaz, drugi, zunanji, hadronski kalorimeter pa hadronski plaz. Če dobimo v kalorimeter pljus hadronov, njihove energije seštejemo in s tem izmerimo energijo prvotnega kvarka ali gluona. Os plaz posamičnega delca ali pljuska nam pove smer prvotnega delca, tudi fotona in nevtrona, pri katerih nimamo informacije o tiru iz sledilnika.

Mioni na poti skozi snov le ionizirajo, zato so njihove izgube energije majhne in pri visokih energijah zlahka preletijo sledilnik in kalorimetra. Njihovo gibalno količino ponovno izmerimo v mionskem sistemu, ki predstavlja največji del detektorja ATLAS. Sestavlja ga orjaški magnet v obliki svitka, ki je v osrednjem delu sestavljen iz osmih superprevodnih navitij dolžine 25 m in z zunanjim premerom 20 m, po katerih teče tok 20000 A in ustvarja magnetno polje do 4 T (**Slika 6**). Tire mionov v svitku vzorčimo trikrat v ogromnih mionskih detektorjih, ki prekrivajo celoten detektor ATLAS preko dolžine 44 m in premera 25 m. Kljub tem dimenzijam pa poznamo njihovo lego na okoli 20 μm natančno.



Slika 6: Osem navitij magnetnega svitka centralnega dela mionskega sistema med gradnjo detektorja ATLAS. Dimenzije podaja oseba na platformi.

Od vseh delcev ostanejo neopaženi le nevtrini, ki s snovjo praktično ne reagirajo, ravno tako kot nabiti leptoni pa nastopajo v nekaterih zanimivih procesih. Ker se pri trkih ohranjata energija in gibalna količina in smo izmerili vse preostale delce, se prisotnost visokoenergijskih nevtrinov kaže kot primanjkljaj energije v določeni smeri. Ta manjkajoča energija kot znanilec nevtrinov je dobro izmerjena v transverzalni ravnini, saj vzdolž protonskih curkov zaradi žarkovne cevi ne moremo meriti delcev.

Zdaj, ko imamo podatke o gibalni količini in energiji delcev, ki so nastali ob prehodu gruč in 50 trkih protonov med prehodom, nas čaka naslednja težava. Teh podatkov je nekaj MBytov in ob frekvenci 40 MHz to predstavlja podatkovni tok nad 100 TBy/s, kar je nemogoče z obstoječo tehnologijo spravljati za kasnejšo obdelavo. Pravzaprav, tudi če bi lahko, bi bilo to nesmiselno, saj je velika večina dogodkov povsem nezanimivih. Reši nas prožilni sistem, ki je pravzaprav sprotna obdelava podatkov v več stopnjah. Že na detektorjih samih v bralni elektroniki podatke razredčimo in zakodiramo, saj bi morali drugače prebrati recimo informacijo iz vseh 80 milijonov blazinic notranjega detektorja. Zgoščeno informacijo iz kalorimetrov in mionskega sistema grobo obdelamo v posebnih hitrih procesorjih, pri čemer iščemo elektrone, fotone, mione in pljuske z veliko energijo, ki so znanilci zanimivih procesov. Tudi manjkajočo energijo kot znanilko nevtrinov grobo rekonstruiramo na tej stopnji. Vsakemu izmed znanilcev lahko določimo prag za zaznavo, tipične

vrednosti zahtevanih energij so nad nekaj deset GeV. Skupaj tako zmanjšamo pogostost dogodkov iz 40 MHz na pod 100 kHz (za faktor okoli 500) in le za te preberemo polno informacijo iz celotnega detektorja. Ta informacija se prenese na računsko farmo z okoli 100000 procesorji, ki te dogodke v celoti obdelajo s programi za rekonstrukcijo in fizikalno analizo. Informacija o okoli 1000 dogodkih na sekundo se končno shrani na diske za nadaljnjo obdelavo. Prožilni sistem torej vsako sekundo izmed nad milijardo trkov izbere tisoč, ki jih je vredno shraniti za nadaljnjo obdelavo.

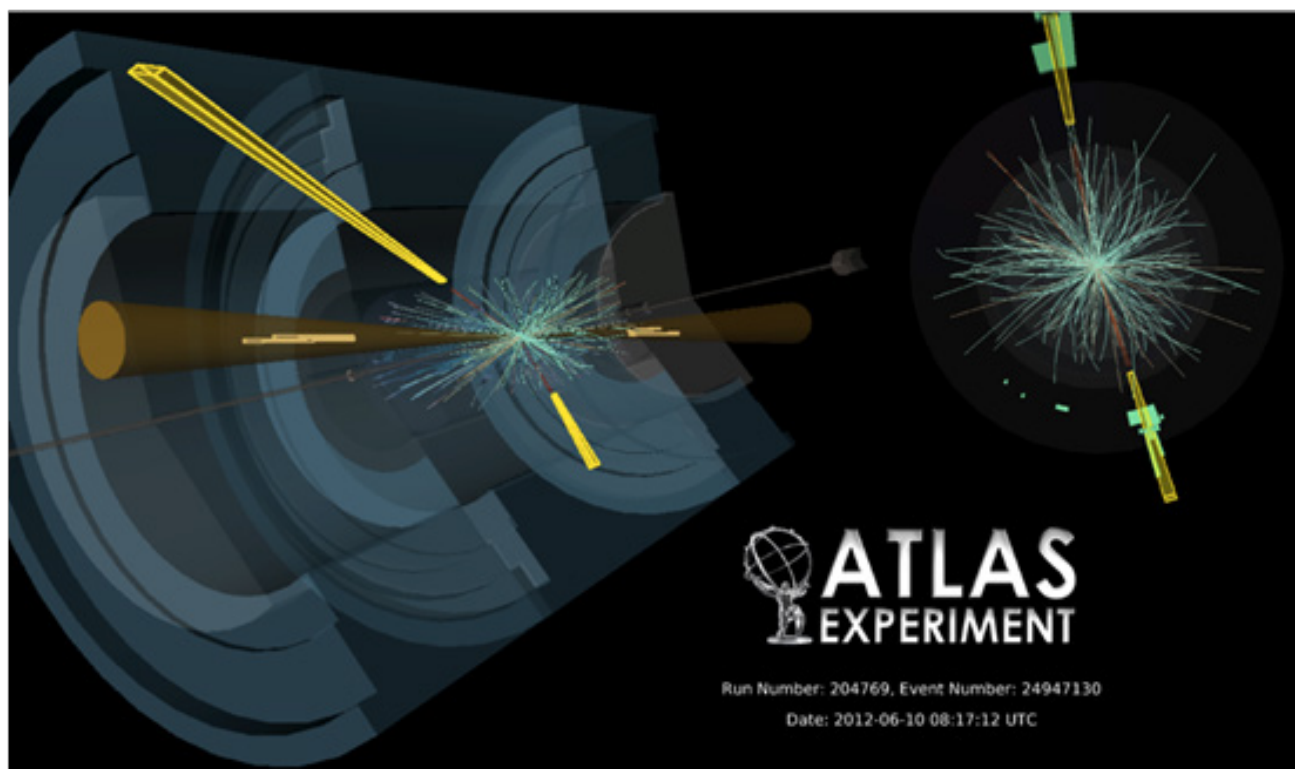


Slika 7: Sestavljanje pasovnega silicijevega detektorja. Napajalni gibljivi kabli, ki jih pregledujeta inženirja, so bili narejeni v Sloveniji.

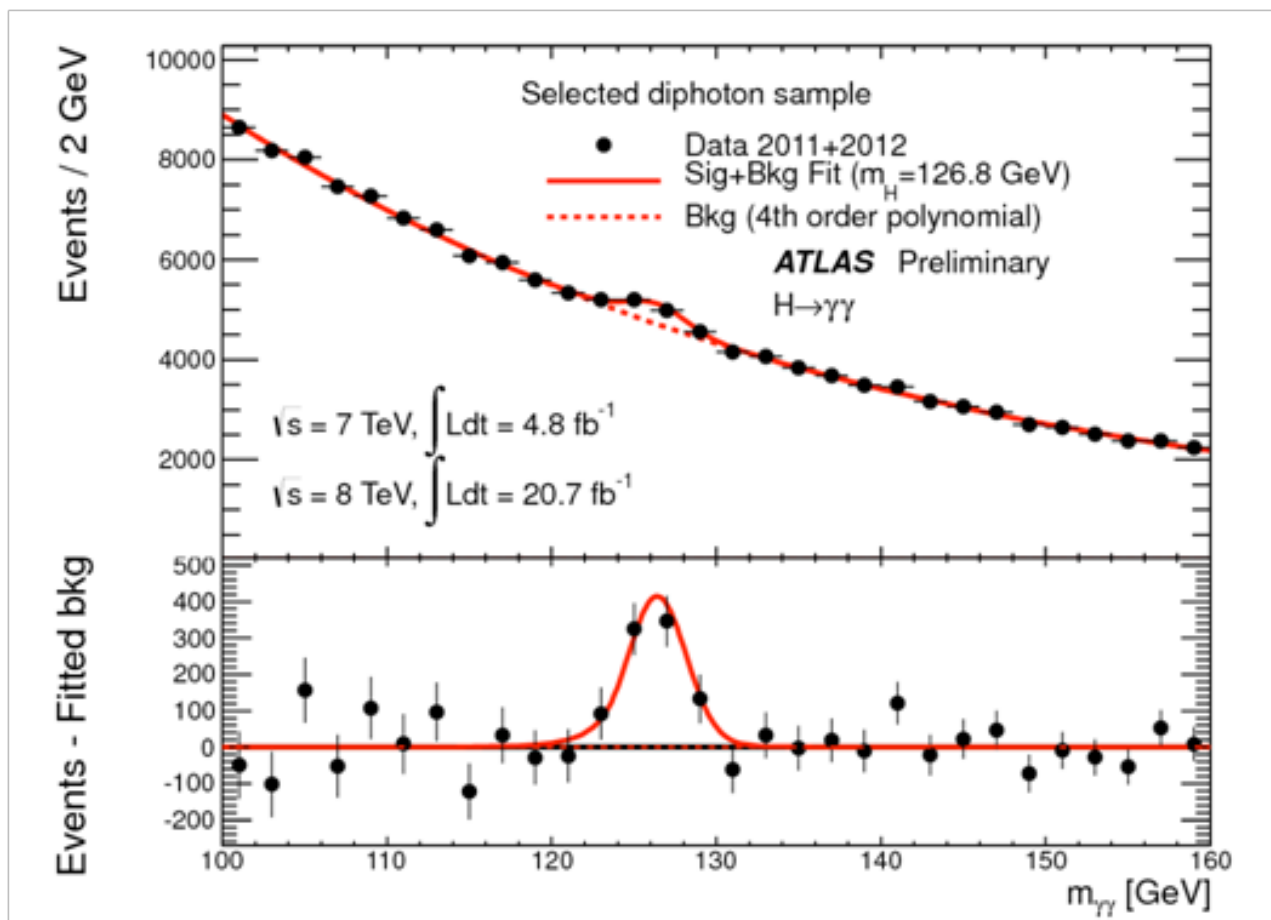
Kot primer uspešne meritve si oglejmo, kako smo v podatkih našli Higgsov bozon. O Higgsovem bozonu v okviru Standardnega modela smo vnaprej vedeli praktično vse, razen njegove mase in seveda, če v napovedani obliki zares obstaja. Območje mas, kjer smo ga iskali je znašalo od 100 do 1000 GeV, pri čemer so prejšnje meritve nakazovale, da so manjše mase bolj v skladu s Standardnim modelom. Omenili smo, da pri masi 125 GeV nastane Higgsov bozon vsakih nekaj milijard trkov, torej sorazmerno pogosto. Vendar v dveh tretjinah primerov ta razpade v par težkih kvarkov b, ki nadalje razpadajo na veliko različnih načinov, ki vključujejo več hadronskih pljuskov. Take značilnosti dogodkov pa so prisotne tudi pri drugih trkih, ki niso povezani z nastankom Higgsovega bozona. Pravimo, da je signal, tvorbo Higgsovega bozona, težko ločiti od ostalih procesov, ki jim pravimo ozadje.

Zaradi kvantomehanske narave procesov so le-ti naključni in prisotnost signala lahko le statistično ovrednotimo. Pri tem pomaga veliko število dogodkov in dobro poznavanje tako signala kot ozadja. Razpad Higgsovega bozona v par kvarkov b smo tako z zadostno gotovostjo opazili šele lani.

Za odkritje so bili bistveni trije razpadni načini, ki so 4. julija 2012 skupno omogočili razglasitev odkritja Higgsovega bozona v trkih protonov energij 7 in 8 TeV. Eden izmed njih je razpad v dva fotona (**Slika 8**). Na ta način razpadeta le dva od tisočih nastalih Higgsovih bozonov, vendar lahko izmerimo oba fotona in ju preko enačbe $(mc^2)^2 = E^2 - P^2c^2 = 2E_1E_2\cos\theta$ povežemo z maso delca, iz katerega morebiti izvirata. Pri tem sta E_1 in E_2 energiji fotonov, izmerjeni z elektromagnetnim kalorimetrom, θ pa kot med fotonoma, ki je kot med povezavama med verteksom in začetkoma obeh elektromagnetnih plazov. Če si ogledamo spekter tako izračunanih mas (**Slika 9**), vidimo vrh pri masi okoli 125 GeV, ki pripada razpadom Higgsovega bozona, naložen na zvezno, padajoče ozadje. Vrh je zadosti značilen, da ga fluktuacije ozadja ne morejo potvoriti. Ocenjena verjetnost za to, da bi nam ozadje slučajno potvorilo tak vrh je konec 2012 znašala le 10^{-13} . Za ilustracijo te verjetnosti: če bi vsak dan od nastanka vesolja izvedli tak poskus brez prisotnosti Higgsovega bozona, bi morebiti eden izmed njih kazal tak rezultat.

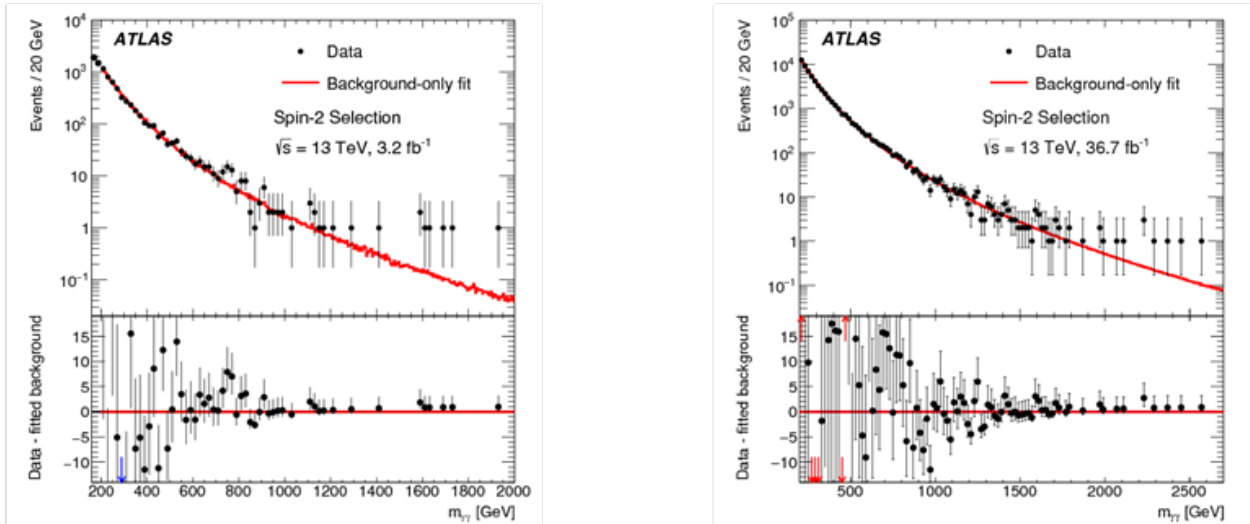


Slika 8: Tridimenzionalni prikaz enega izmed kandidatov za razpad Higgsovega bozona v dva fotona pri trkih protonov energije 8 TeV leta 2012. Vsak izmed fotonov sproži plaz v elektromagnetnem kalorimetru. V spektru na sliki 9 je zbranih okoli 150000 takih dogodkov.



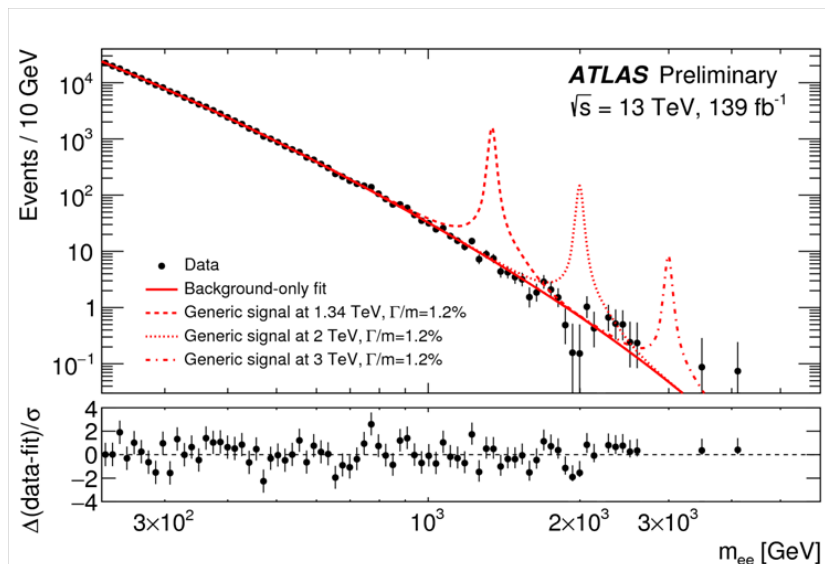
Slika 9: Spekter mase, ki ustreza parom fotonov iz podatkov do konca leta 2012. V spektru je lepo viden vrh okoli 1000 dogodkov signala okoli 127 GeV, ki ustreza razpadom Higgsovega bozona. Na spodnji sliki je odšteto zvezno ozadje, lepo so vidne naključne fluktuacije le-tega okoli ničle in presežek v štirih kanalih okrog mase Higgsovega bozona. Širina vrha je rezultat ločljivosti meritve fotonov.

Na enak način lahko izmerimo prisotnost kateregakoli delca, ki razpade v dva fotona. Različne nadgradnje Standardnega modela obstoj takih delcev predvidevajo. Zato ni čudno, da že majhni presežki v spektru pri večjih masah vzbudijo precejšnje zanimanje, četudi se kasneje, z več izmerjenimi trki izkaže, da gre le za statistično igro ozadja (**Slika 10**). Lep tak primer se je zgodil konec leta 2015, ko sta tako ATLAS kot CMS opazila presežka pri masi 750 GeV. Verjetnosti za fluktuacijo ozadja sta bili sicer znatni, ob konzervativnem pristopu okoli nekaj odstotkov. Pozimi LHC miruje, tako da smo dodatne podatke pridobili šele naslednjo pomlad in do poletja 2016 je presežek izginil. V vmesnem času pa je bilo objavljenih preko 600 znanstvenih člankov, ki so ponujali različna tolmačenja tega "odkritja".



Slika 10: Levo: presežek pri 750 GeV v spektru mase dveh fotonov iz leta 2015. Čeprav zgleda vrh okoli 750 GeV znaten, so fluktuacije ozadja bistveno večje kot na sliki 8. Desno: enak spekter z dodanimi podatki iz leta 2016. Skupnih podatkov je desetkrat več, vrh pri 750 GeV je izginil.

Danes imamo preko desetkrat več podatkov in to pri skorajda dvakrat višji energiji (13 TeV) trkov kot leta 2012, vendar novih delcev, ki presegajo napovedi Standardnega modela, še nismo zaznali (**Slika 11**). Odsotnost zaznave je mogoče v okviru modelov statistično ovrednotiti s spodnjo mejo za maso napovedanih delcev. Tako dobljene meje danes znašajo tudi do 10 TeV. Torej delcev, ki jih napovedujejo določeni modeli, v Naravi ni do mase, ki do stokrat presega maso Higgsovega bozona.



Slika 11: Masa parov elektron-pozitron na celotnih podatkih pri energiji 13 TeV. V spektru ni opaziti nikakršnega presežka nad zveznim ozadjem. Za primer so črtkano vrisani signali, kot bi jih povzročil razpad težkega nevtralnega šibkega bozona Z' z masami do 3 TeV.

DELAVNICA: KAKO POTEKAJO ANALIZE PODATKOV PRI EKSPERIMENTALNIH V VISOKO ENERGIJSKI FIZIKI

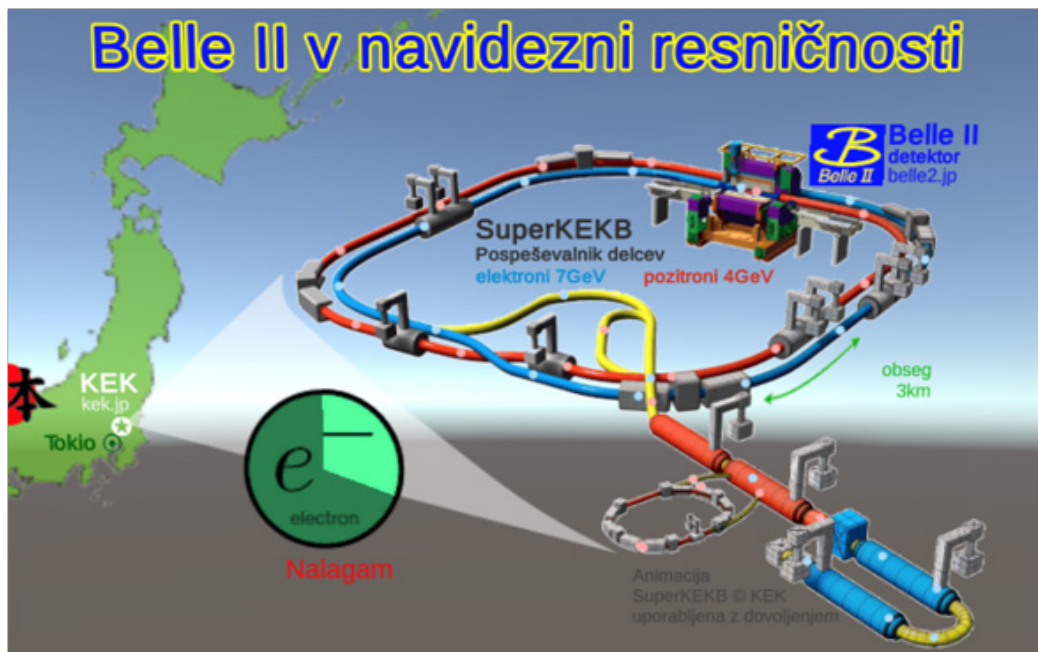
dr. Andrej Gorišek in dr. Rok Pestotnik, Institut "Jožefa Štefan", Ljubljana

Pri trkih curkov v pospeševalniku nastanejo visokoenergijski osnovni delci. Ti so kratkoživi in večinoma razpadejo zelo blizu mesta nastanka na lažje delce, ki jih lahko zaznamo v detektorjih za osnovne delce. Milijone električnih signalov iz detektorja je potrebno najprej pretvoriti v digitalno obliko, zato da jih lahko potem z računalniškimi algoritmi obdelujemo. Iz zajetih podatkov na prvi stopnji analize rekonstruiramo sledi, izmerimo gibalno količino, določimo naboj in identiteto zaznanih delcev. Tako rekonstruirane delce lahko potem z različnimi metodami kombiniramo med sabo in pogledamo, iz katerega visokoenergijskega delca so nastali.

Iskanje delcev pri spektrometru Belle II

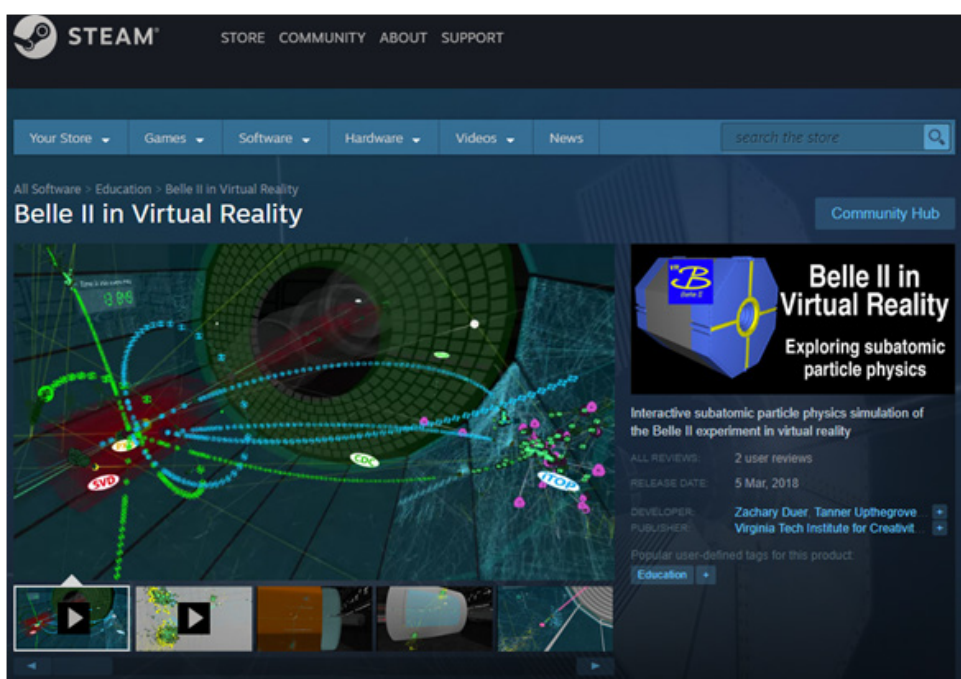
Znanstvena raziskovalna skupina Belle II (<http://belle2.jp>) v inštitutu KEK v Tsukubi na Japonskem raziskuje redke razpade mezonov B in D in leptonov tau, ki nastanejo pri trkih visokoenergijskih trkih elektronov in njihovih antidelcev elektronov v pospeševalniku SuperKEKB (**slika 1**). Na mestu kjer se križata curka delcev, je postavljen detektor osnovnih delcev, ki ga sestavljajo sistemi za sledenje delcev in za njihovo identifikacijo. Nastali delci odletijo na vse strani, zato je detektor podoben čebuli, detektorski sistemi pa si tesno eden za drugim sledijo v lupinah. Notranje lupine detektorja obdaja močan supraprevodni magnet, ki poskrbi, da se pot nabitih delcev ukrivi in da lahko iz nje določimo gibalno količino in naboj delcev.

Ker pri trkih visokoenergijskih delcev nastaja ionizirajoče sevanje, je dostop do detektorja med delovanjem pospeševalnika prepovedan. Za kontrolo delovanja vseh detektorskih sklopov skrbijo kontrolni sistemi, ki omogočajo oddaljeno priklapljanje in odklapljanje delov detektorja in nadzor napajalnih napetosti in



Slika 1: Detektor Belle II je postavljen na interakcijski točki, kjer se križata pozitronski in elektronski curek delcev.

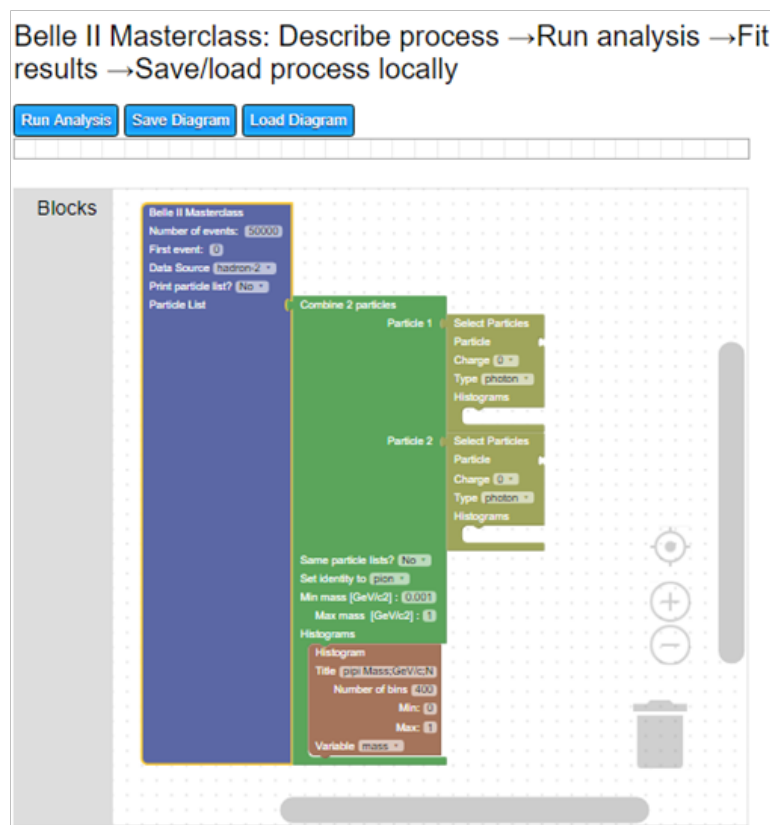
tokov. Šele ko vsi sistemi usklajeno delujejo, je mogoč zajem podatkov. Za lažjo predstavo, kaj se dogaja v pospeševalniku, smo pripravili interaktivno igro (https://store.steampowered.com/app/810020/Belle_II_in_Virtual_Reality/), ki omogoča sprehod v notranjost detektorja s pomočjo očal za navidezno resničnost (slika 2). Med sprehodom lahko podrobno preučite detektorske sisteme in senzorje in si ogledate nekaj zanimivih dogodkov, pri katerih so pri trkih elektronov in pozitronov nastali različni delci. Za vsak delec si lahko pogledate, kakšne so njegove lastnosti in kakšen odziv pusti v detektorju.



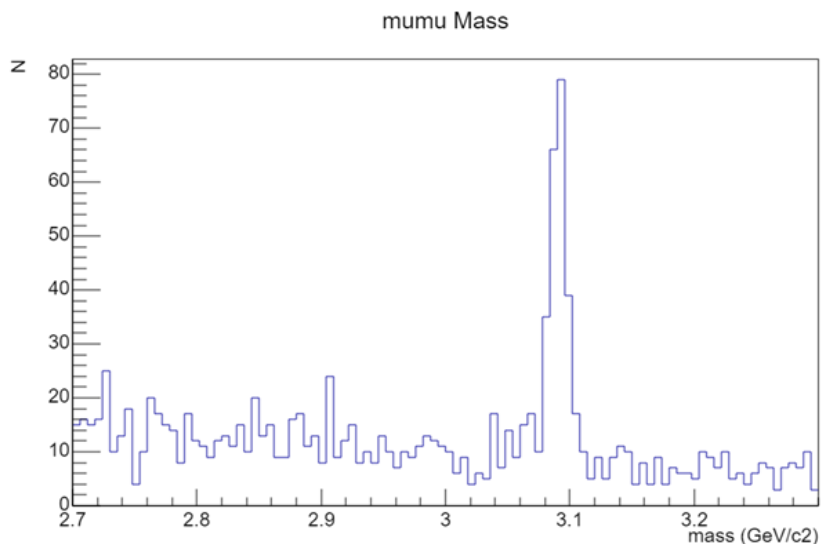
Slika 2: Virtualni sprehod po detektorju Belle II omogoča pogled v notranjost detektorja in opazovanje trkov elektronov in pozitronov.

Za analizo dogodkov v raziskovalni skupini uporabljamo računalniški program, ki vključuje različne algoritme za prepoznavanje sledi in njihovo kombinacijo. Analiza podatkov izvedemo v več stopnjah. Na začetku z rekonstrukcijo signalov prepoznamo zaznane delce in določimo njihove kinematične lastnosti in s tem bistveno zmanjšamo količino podatkov. Delce v naslednji stopnji med sabo kombiniramo in s pomočjo različnih porazdelitev ugotovimo, s kakšno kombinacijo in s kakšnimi rezi na spremenljivkah signalni dogodki najbolj izstopajo iz ozadja.

Del podatkov, ki jih pri eksperimentih zajamemo, je javno dostopnih. Pri eksperimentu Belle II smo pripravili 6 milijonov zanimivih dogodkov, ki smo jih že rekonstruirali. Za vsak dogodek imamo na voljo seznam delcev, ki vsebujejo podatke o gibalni količini, energiji, električnem naboju in identiteti delcev. V delavnici, ki smo jo pripravili, boste lahko s kombiniranjem različnih delcev med sabo »odkrili« nove delce. Za poenostavljeno analizo smo pripravili uporabniški vmesnik (Slika 3), s pomočjo katerega lahko z uporabo grafičnih blokov sestavite iskani razpad in si pogledate porazdelitve različnih količin. Če na primer združimo dva različno nabita miona, opazimo v porazdelitvi po invariantni masi obeh mionov vrh, ki ustreza delcu J/Psi (Slika 4). Orodje je javno dostopno na naslovu <http://belle2.ijs.si/masterclass>.



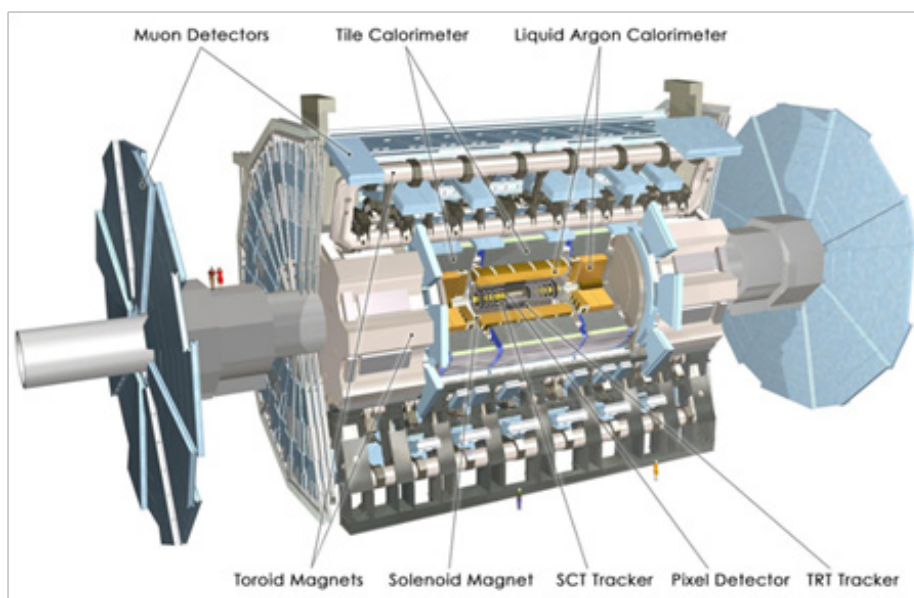
Slika 3: Grafični vmesnik omogoča enostavno analizo podatkov, ki jih je mednarodna raziskovalna skupina Belle II dala v javno uporabo.



Slika 4: Razpad delca J/Psi v dva nasprotno nabita miona. Porazdelitev po invariantni masi dveh mionov.

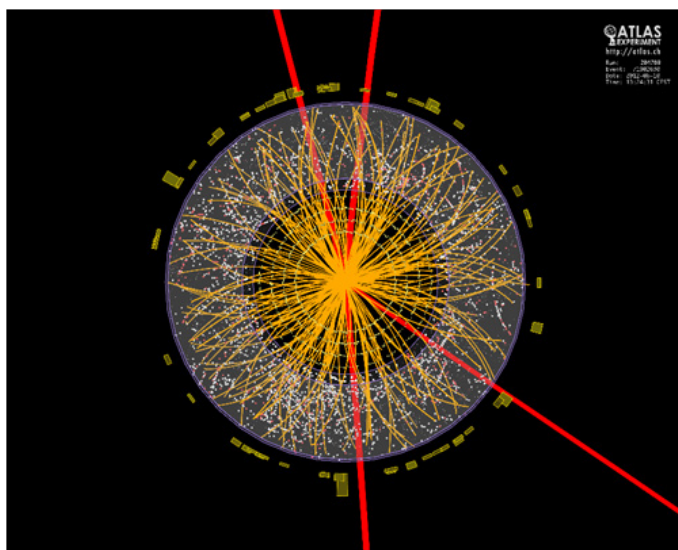
Iskanje delcev na Velikem hadronskem trkalniku

Veliki hadronski trkalnik (Large Hadron Collider, LHC) je največji in najmočnejši pospeševalnik delcev na svetu. Zgrajen je bil za raziskovanje pojavov, ki jih ne vsebuje trenutni najboljši opis osnovnih delcev in njihovih interakcij, tako imenovani Standardni model. Kljub velikemu uspehu pri razlagi gradnikov in sil našega vesolja in zelo trdni eksperimentalni potrditvi, Standardni model ni popoln in nima razlage za nekatere opažene "skrivnosti". Poskusi na LHC-ju lahko zagotovijo odgovore na nekatera pereča vprašanja, kot je, kako delci pridobijo maso ali zakaj ima vesolje več snovi kot anti-snovi.



Slika 5: Spektrometer ATLAS ob Velikem hadronskem trkalniku.

Med začetno fazo delovanja LHC so fiziki preverili vse že znane osnovne delce, npr. vezane sisteme kvarkov in antikvarkov (čarmonij in botomonij, prvotno odkrita leta 1974 in 1977), nevezane težke kvarke t (prvič odkrite leta 1995) in šibke bozone W in Z (odkrita v CERNu leta 1983). Za zanesljivo odkrivanje novih delcev v trkih protonov je potrebno nedvoumno identificirati znane delce v podatkih, ki so jih zajeli na LHC. Ko te že znane delce v podatkih odkrijemo in identificiramo, jih uporabimo ne samo za potrjevanje ne samo predhodnih rezultatov, temveč tudi za razumevanje, kako izgleda že znana fizika v novem okolju LHC pri novih, prej še nedoseženih energijah. To je namreč ključ do odkrivanja nove fizike.



Slika 6: Razpad Higgsovega bozona v štiri mione. Ob tej reakciji je v detektorju ATLAS nastalo še veliko število drugih delcev.

Pri tej vaji, ki jo imenujemo Z-poti in je nastala v okviru sheme »International Masterclasses«, programa za gimnazijce po celem svetu, imamo priložnost iskati šibki bozon Z - enega izmed nosilcev šibke interakcije. Na Z-poti bodo dijaki spoznali nekaj delcev, kot so bozon Z in Higgsov bozon, ter njihov pomen za razumevanje narave. V tem iskanju bodo uporabili prave podatke iz detektorja ATLAS na trkalniku LHC. Videli bomo, kako lahko nastanejo v trkih protonov v LHC, in spoznali, kako identificirati osnovne delce z detektorji. Izvedli bodo resnično fizikalno meritev na svežih podatkih detektorja ATLAS, prepoznali bozon Z in druge lažje delce ter izmerili njihove lastnosti. Imeli bodo priložnost iskati Higgsov bozon na podoben način, kot so to počeli fiziki pri eksperimentu ATLAS. Potem bodo spoznali, da so obvladali orodje za odkrivanje neznanega!

Več o Z-poti najdete na povezavi <https://atlas.physicsmasterclasses.org/en/zpath.htm>.

Izdajatelja informacijskega gradiva

Slovenska akademija znanosti in umetnosti in
Slovenska znanstvena fundacija

Zanju

Akad. prof. dr. Tadej Bajd, predsednik Slovenske akademije
znanosti in umetnosti, in
dr. Edvard Kobal, predsednik uprave Slovenske znanstvene
fundacije

Koncept in koordinacija

dr. Edvard Kobal

Oblikovanje

Tina Kobal

Naklada

100 izvodov

Ljubljana, marec 2019