

# FIZIKA OKUSOV IN NADGRADNJA DETEKTORJA LHCb

MIHA DAGARIN

Fakulteta za matematiko in fiziko  
Univerza v Ljubljani

LHCb je eden izmed štirih detektorjev, ki so postavljeni na Velikem hadronskem trkalniku. Članek obravnava, kakšne eksperimente na njem izvajajo in kako detektor deluje. Za izvedbo naslednje generacije eksperimentov in za povečanje vzorca podatkov bodo raziskovalci v CERN-u pospeševalnik nadgradili, za kar pa bo potrebna tudi nadgradnja merilnih naprav. V članku predstavljamo sestavne dele LHCb spektrometra s poudarkom na njegovih nadgradnjah.

## FLAVOUR PHYSICS AND LHCb UPGRADE

LHCb is one of the four detectors placed on the Large Hadron Collider (LHC). This article deals with the experiments carried out on LHCb and the functioning of the detector itself. In order to be able to conduct a new generation of experiments and to increase sample data the accelerator is to be upgraded, which will require an update of the measuring systems as well. The article presents the components of the LHCb spectrometer, focusing on its upgrades.

### 1. Uvod

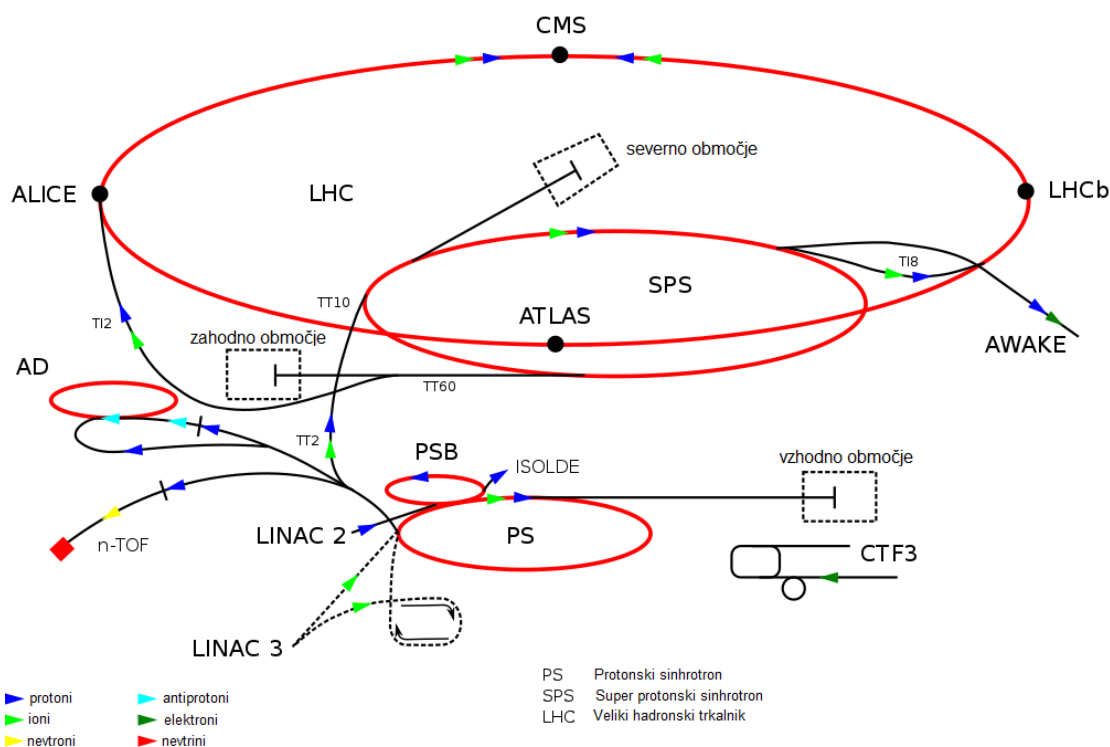
Evropska organizacija za jedrske raziskave (CERN) v Ženevi že od ustanovitve leta 1954 dalje premika meje sodobne fizike. V organizaciji so odkrili kvarke, bozone in druge delce, ki jih je napovedoval Standardni model. Standardni model osnovnih delcev opisuje interakcije med delci in določa njihove mase, žal pa ne pojasnjuje obstoja vse snovi, ki je prisotna v vesolju (npr. temna snov). Opisuje, kako se kvarki (npr.  $u$ ,  $d$ , ...) združujejo v hadrone. Trije kvarki skupaj tvorijo barion (npr.  $p - uud$ ), par kvark-antikvark pa tvori mezon (npr.  $\pi^+ - u\bar{d}$ ). S projektom LHCb želijo raziskovati odstopanja od Standardnega modela pri redkih razpadih mezonov  $B$  in  $D$  ter leptonov  $\tau$ , pri katerih opazujejo prehode med različnimi kvarki in leptoni. Ta obstajajo, a so večinoma primerljiva z mersko napako meritve, opazimo pa jih na kozmološkem področju – v vesolju je veliko več temne energije, kot je Standardni model napoveduje. Procesi, ki bi nam pomagali pri razumevanju tega, so zelo redki in jih zaznamo le malokrat.

CERN predstavlja za sodobni svet znanosti eno izmed najnaprednejših (in tudi najdražjih) svetovnih raziskovalnih dejavnosti. Delo na trkalniku združuje ljudi iz več različnih držav in različnih področij, od tehnikov do znanstvenikov. V tem mednarodnem centru Slovenija sodeluje že več let, z julijem 2017 pa je tudi uradno vstopila v t. i. the pre-stage to membership – predfazo članstva.

### 2. Veliki hadronski trkalnik

Veliki hadronski trkalnik (Large Hadron Collider – LHC), je največji trkalnik (in naprava nasploh [8]) na svetu; dokončan je bil leta 2008. Prve meritve na njem so opravili leta 2010 pri energijah 3,5 TeV, kar je bila štirikratna vrednost takratnega svetovnega rekorda. Na trkalniku so štiri interakcijske točke, kjer so postavljeni detektorji: ALICE, ATLAS, CMS in LHCb, vzporedno z njimi pa se izvajajo še trije manjši eksperimenti: LHCf, MoEDAL in TOTEM. V članku se bomo omejili na obravnavo detektorja LHCb (Large Hadron Collider beauty).

Delce, ki jih želijo trkati v pospeševalniku, pospešijo v več stopnjah – z vsako stopnjo delcem dodajo energijo. V vsakem krogu se nahajajo pospeševalne komore, ki nabite delce pospešijo z električnim poljem, in magneti, ki z magnetnim poljem (od 0,54 do 7,7 T) ukrivljajo trajektorije delcev, da se lahko gibljejo v krogu. Najprej delce generirajo; najpogosteje ionizirajo vodikove



Slika 1. Pospeševalnik LHC s svojimi eksperimenti [8].

atome in tako proizvedejo protone z energijo 50 MeV, ki jih pospešijo na linearnem pospeševalniku LINAC 2 (glej Sliko 1). Ta izstreljuje delce v PSB (Proton synchrotron booster) in tu protoni dosežejo energijo 1,4 GeV. Nato jih izstreljuje v PS (Proton synchrotron), kjer jih pospešijo do 26 GeV, in nazadnje še v SPS (Super proton synchrotron), kjer dosežejo energijo 450 GeV. SPS protone izstreljuje v glavni pospeševalnik LHC, kjer protoni dosežejo svojih končnih 6,5 TeV. Pri tej energiji imajo protoni hitrost za približno 3,1 m/s manjšo od svetlobne hitrosti [8].

Protoni se v pospeševalniku zbirajo v gruče, ki jih potem trkajo med seboj. Pri teh trkih zaradi ogromnega presežka energije nastanejo novi težki delci, ki pa zelo hitro razpadejo. Tudi ti razpadni produkti razpadajo naprej in tako je na koncu z detektorji mogoče izmeriti le določene delce, v glavnem elektrone  $e^-$ , mione  $\mu$ , pione  $\pi$ , kaone  $K$ , protone  $p$  in fotone  $\gamma$ . Podatke o nastalih delcih izluščijo iz izmerjenih podatkov, nato pa analizirane procese primerjajo s teoretičnimi napovedmi.

Ena izmed lastnosti pospeševalnika se opisuje s količino imenovano luminoznost  $L$ . Ta količina opisuje število dogodkov (trkov) na časovno enoto ( $\frac{dN}{dt}$ ), normirano na določen sipalni presek  $\sigma$ . Njena enota je  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

$$L = \frac{1}{\sigma} \frac{dN}{dt} \quad (1)$$

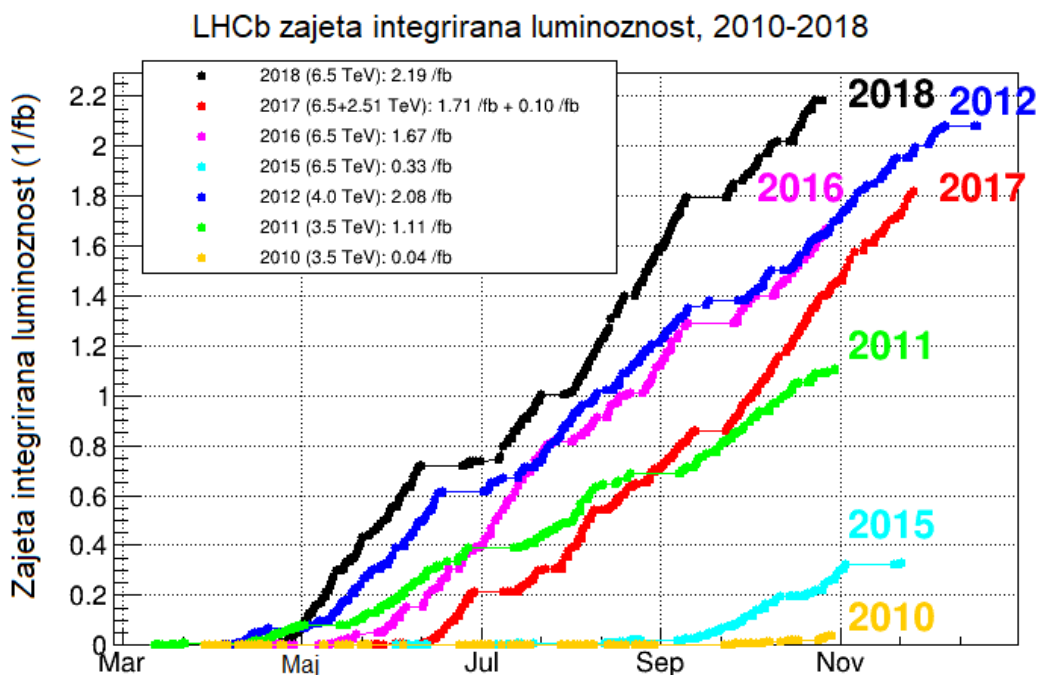
Meriti je mogoče tudi integrirano luminoznost, ki predstavlja integral luminoznosti v določenem meritvenem času. Integrirano luminoznost izražamo v  $fb^{-1}$  ( $1 fb^{-1}$  je enak  $10^{39} \text{cm}^{-2}$ ).

$$L_{int} = \int L dt \quad (2)$$

Primer: Luminoznost  $4 \times 10^{32} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  je trenutna vrednost luminoznosti, pri kateri obratuje LHC [4]. To pomeni, da imamo vsako sekundo na enem  $\text{fm}^2$   $4 \times 10^6$  dogodkov. Če se vzdržuje tolikšno konstantno luminoznost v pospeševalniku 8 ur, potem to zneso  $0,01152 fb^{-1}$  zajetih podatkov.

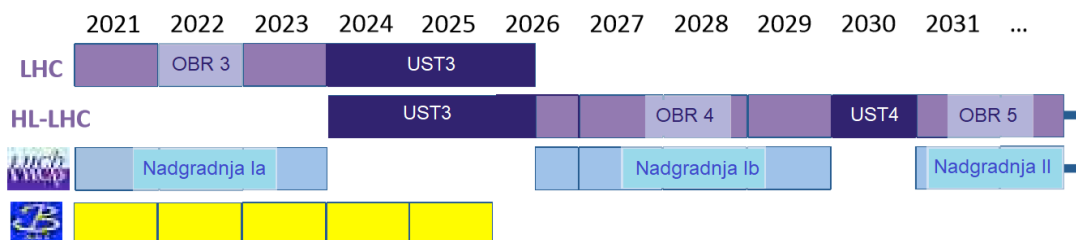
Večja luminoznost torej pomeni večji vzorec zajetih podatkov. Raziskovalci se zato trudijo vzpostaviti sisteme, ki bi jim omogočali visoke luminoznosti (high luminosity – HL), kar bi pomenilo, da

bi lahko zajeli več podatkov in tako izmerili tudi manjše sipalne preseke [1]. S povečanjem luminoznosti bi povečali možnost za nastanek redkih delcev, ki bi jih želeli zajeti (npr. na detektorju LHCb bi radi dobili čim več reakcij razpadov kvarkov  $b$  in leptonov  $\tau$ ). Luminoznost je odvisna od nastavitve pospeševalnika. Pri povečanju energije je treba ponovno spremeniti konfiguracije aparatov. Raziskovalci najprej priredijo pospeševalne komore in magnete ter s tem povečajo luminoznost na pospeševalniku. Potem lahko začnejo z umerjanjem merilnih sistemov na detektorju, kar preprečuje, da bi detektorji zaradi preobremenitve merili konstantno. Velika naprava pomeni daljši zagonski čas (čas, ki ga naprava potrebuje, preden lahko stabilno obratuje), zato po spremembi konfiguracij podatke pridobivajo počasneje.



Slika 2. Graf integrirane luminoznosti skozi leta od začetka opravljanja meritev 2010 [6].

Prilagajanje detektorjev na večje luminoznosti se rešuje z nadgradnjami merilnih sistemov, ki potekajo v času, ko se meritve ne izvajajo (ustavitve – UST). Trenutno (julij 2019) smo v času druge ustavitve, nato pa bo od leta 2021 tretje obdobje meritev, ki mu bo sledilo obdobje UST 3. Takrat bodo LHC nadgradili na HL-LHC (slika 3).



Slika 3. Prikaz obratovanj (OBR) in ustavitve (UST) LHC-ja [2]. Opomba: V začetku letošnjega leta so v KEK-u napovedali, da projekta Belle-II leta 2025 še ne bodo ustavili in da tudi zanj načrtujejo nadgradnjo.

Nadgradnja sistemov na LHCb-ju in povečanje luminoznosti sta pomembna zato, ker sta CERN in pospeševalnik KEK (v Tsukubi na Japonskem) trenutno edina centra, v katerih lahko raziskujejo razpade mezonov  $B$  (to so mezoni, ki vsebujejo vsaj en  $b$  (bottom/beauty) kvark). V CERN-u na

LHCb-ju trkajo  $p$  na mirujoče plinaste tarče (več o tem v poglavju Detektor LHCb), medtem ko v KEK-u na detektorju Belle-II trkajo  $e^+e^-$ . Eksperimenta LHCb in Belle-II sta sicer komplementarna – na LHCb-ju trkajo hadrone in dosegaajo veliko večje energije, kar pomeni, da nastane več delcev in s tem več sledi, na Belle-II pa dosegaajo večjo gostoto curka (luminoznost), kar pomeni, da lahko merijo procese izredno natančno (dobijo manj sledi, ki jim nato lažje določijo velikosti količin).

	LHC obratovanje	Čas zajemanja podatkov	Maksimum $\mathcal{L}$ [ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	Integrirana $\int \mathcal{L} dt$ [ $\text{fb}^{-1}$ ]
Trenutni detektor	1 & 2	2010–2012, 2015–2018	$4 \times 10^{32}$	8
Nadgradnja I	3 & 4	2021–2023, 2026–2029	$2 \times 10^{33}$	50
Nadgradnja II	5 $\rightarrow$	2031–2033, 2035 $\rightarrow$	$2 \times 10^{34}$	300

Slika 4. Povečevanje luminoznosti v dveh stopnjah [1].

Nadgradnja detektorja bo omogočila meritve pri luminoznostih, ki bodo za dva velikostna reda večje od sedanje – na približno  $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  (slika 4). Za boljše predstavbo: taka luminoznost pomeni, da bi pri trkanju protonov prišlo do približno 56 interakcij na en trk gruč, vendar je le nekaj od pri tem nastalih delcev težkih. Razpadi teh delcev bi povzročili nastanek  $\sim 2500$  nabitih delcev, ki jih je treba zaznati z detektorjem LHCb. Ker se trki takih gruč dogajajo na vsakih 25 ns, bi to proizvedlo 400–500 Tb podatkov na sekundo [2].

### 3. Fizika okusov – reakcije

Kaj pravzaprav merimo? Za razliko od detektorjev ATLAS in CMS ( $\sim 13$  TeV) je bil LHCb ustvarjen za beleženje eksperimentov pri nižjih energijah [1], kar predstavlja boljše možnosti za rekonstruiranje razpadnih produktov. V fiziki okusov raziskujemo, kaj se v reakcijah dogaja s kvantnim številom okusa. Okus se lahko ohranja (v reakciji imamo na koncu enake vrste delcev kot na začetku) ali pa ne. Ena izmed pomembnejših simetrij narave je simetrija CP (C – konjugacija naboja, P – parnost), kršitev le te pa bi lahko pomagala razložiti asimetrijo materija – antimaterija v vesolju. To lahko opazujemo v šibkih razpadnih sistemih težkih mezonov, npr. mezonov  $B$  ( $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ), kaonov  $K$  ( $K_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ) in mezonov  $D$  ( $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ ) [1].

Raziskovalci odkrivajo, da je za raziskovanje nove fizike – fizike, ki presega Standardni model – pomembno opazovanje težkih bozonov in  $\tau$  leptonov, torej težkih delcev. Ker so dogodki, ki obsegajo interakcijo omenjenih težkih delcev, zelo redki, je povečanje luminoznosti eden izmed ključnih dejavnikov za izboljšano eksperimentiranje v prihodnjih stopnjah. Tudi pri opazovanju razpadov lažjih delcev, ki niso omejeni zaradi sistematskih napak, bo po nadgradnji mogoča večja natančnost.

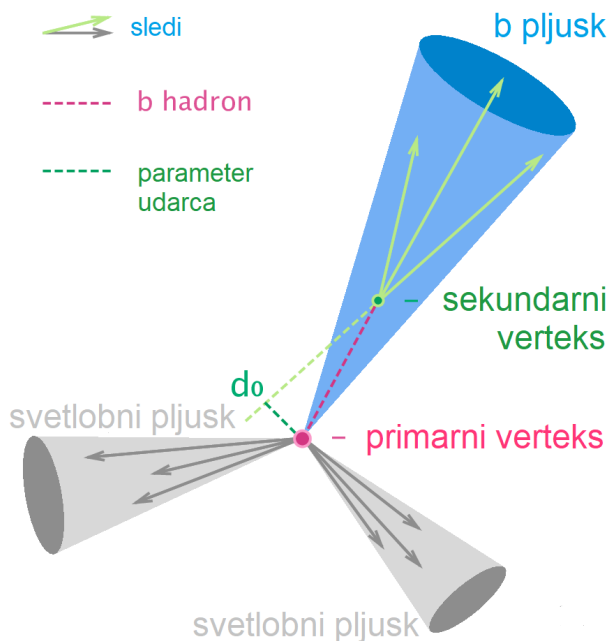
Na detektorju lahko opazujemo kar nekaj reakcij, kot na primer pretvorbi kvarka  $b$  v kvarka  $s$  ali  $d$  ob dodatno izsevanih leptonih ( $B_s^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$  in  $B^0 \rightarrow K^0 e^+ e^-$ ) in razpad kvarka  $b$  v kvark  $s$  ob dodatno izsevanem fotonu ( $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda^0 \gamma$ ) [1].

Na področju nizkih energij, je glavni motiv iskanje temne snovi in njenih predstavnikov. Po eni izmed teorij naj bi bila za temno snov odgovorna temni foton in masivni delec s šibko interakcijo (WIMP – Weakly interacting massive particle). Kar še lahko iščemo, je delec, ki je hkrati sam sebi antidelec – Majoranov fermion.

Že na začetku delovanja so na detektorju LHCb zaznali nestandardne hadrone, ki niso nujno sestavljeni iz treh kvarkov – tetrakvarkovsko resonanco  $Z_c^+(4430)$  ter pentakvarkovski stanji  $P_c^+(4380)$  in  $P_c^+(4450)$ ; številke v oklepajih pomenijo maso delca v MeV [1]. Ti primeri potrjujejo potrebo po kritični masi in s tem povečanju velikosti vzorca, ki je pomembna za razumevanje in zmanjšanje

napake pri meritvah. V prihodnje bi želeli izmeriti veliko število eksotičnih multipletov, ki bi lahko vsebovali zadostno število pentakvarkovskih stanj, zato je povečanje števila dogodkov korak v pravo smer.

Na področju visokih energij je medtem trenutno največji dosežek razlikovanje med določanjem pljuskov za  $b$  in  $c$  kvarke ( $b$ ,  $c$ -jets). Pričakujejo, da se bodo algoritmi za določanje pljuskov v naslednjih letih izboljševali.



Slika 5. Primer  $b$  pljuska [12].

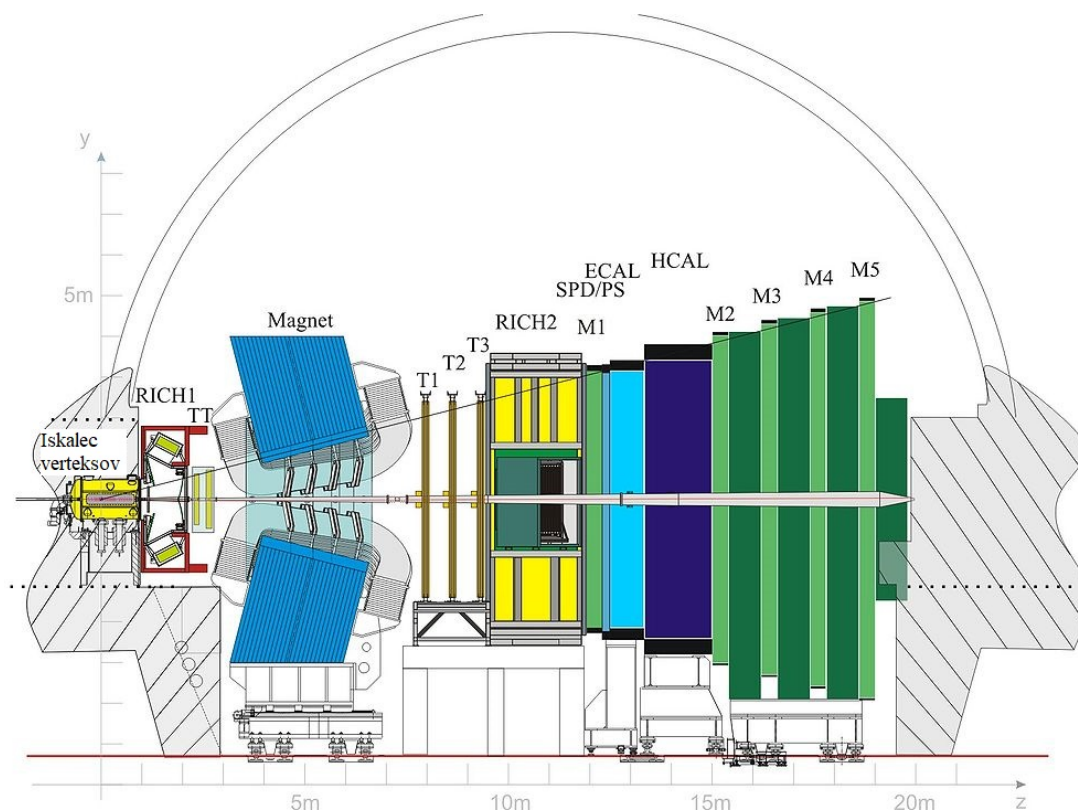
Obstaja možnost, da bi po nadgradnji lahko opazovali tudi razpad Higgsovega bozona  $H^0 \rightarrow c \bar{c}$  in nastanek  $t$  (top) kvarke, dveh zelo masivnih delcev (red velikosti  $\sim 100$  GeV). Z boljšimi merilniki bi lahko določili sipalne preseke pri njihovih razpadih.

To je le nekaj izmed številnih procesov, ki jih opazujejo in iščejo na LHCb-ju.

#### 4. Detektor LHCb

Meritve na LHCb-ju potekajo s pomočjo uporabe sistema plinskega vpihavanja, imenovanega SMOG (System for measuring overlap with gas). Ta sistem najdemo samo na tem detektorju, vendar se v članku v njegovo sestavo ne bomo spuščali podrobneje. Za razliko od ATLAS-a tukaj trkajo gibajoče se delce, navadno protone, v mirujoče tarče izbranega plina, zato je geometrija detektorja nesimetrična. Ko pride do trka, kjer se tvorijo novi delci, ti vedno nastanejo v paru delec – antidelec. Oba razpadeta, izmerijo pa njune razpadne produkte. Enemu izmed delcev lahko glede na njegove razpadne produkte določijo okus; s tem hkrati izvejo okus drugega delca in nato analizirajo njegove razpadne produkte.

Glavni namen nadgradnje je povečati luminoznost in s tem količino zajetih podatkov. Za primerjavo, prvo leto obratovanja (leta 2011) so zabeležili  $1 \text{ fb}^{-1}$  integrirane luminoznosti; po nadgradnji pričakujejo, da bodo dosegali minimalno vrednost  $300 \text{ fb}^{-1}$ . Za lažjo predstavbo si oglejmo razpad  $D^+ \rightarrow K^- K^+ \pi^+$ ; v prvih dveh merilnih obdobjih (Run 1 & 2) so prebrali skupaj 200 razpadov. Po koncu meritvenega obdobja 6 pri končni luminoznosti  $300 \text{ fb}^{-1}$  predvidevajo, da bodo imeli prebranih  $\sim 17\,000$  dogodkov tega razpada. Drug primer je razpad bariona  $\Xi_{cc}^{++}$ ; leta 2016, ko so ga odkrili ob zbrani luminoznosti  $1,7 \text{ fb}^{-1}$ , so zajeli približno 313 dogodkov. Pričakuje se, da bo ta številka pri  $300 \text{ fb}^{-1}$  presegla 100 000 [2].



**Slika 6.** Detektor LHCb z sestavnimi deli: Iskalec verteksov (VELO) – postavljen je blizu interakcijske točke in je namenjen določanju primarnih in sekundarnih verteksov; Ring imaging Cherenkov detektor (RICH) – detektor za določanje obrocev Čerenkova. Prvi je za delce z manjšimi energijami, drugi pa za tiste z večjimi; Magnet – dipolni magnet, za usmerjanje trajektorij; Sledilni sistem (tracking system) – sestavljen iz treh delov: prva silikonska plast (TT) se nahaja pred magnetom, drugi sklop detektorjev (T 1–3) je postavljen na notranjo stran sprejemnega detektorja in ima silikonsko plastovito osnovo, tretji (SPD/PS) pa je postavljen na njegovo zunanjo stran in ima cevasto osnovo; Elektromagnetni (ECAL) in hadronski (HCAL) kalorimeter – merita energije elektronov, fotonov in hadronov; M 1–5 – zaznavajo pri eksperimentu nastale mione [9].

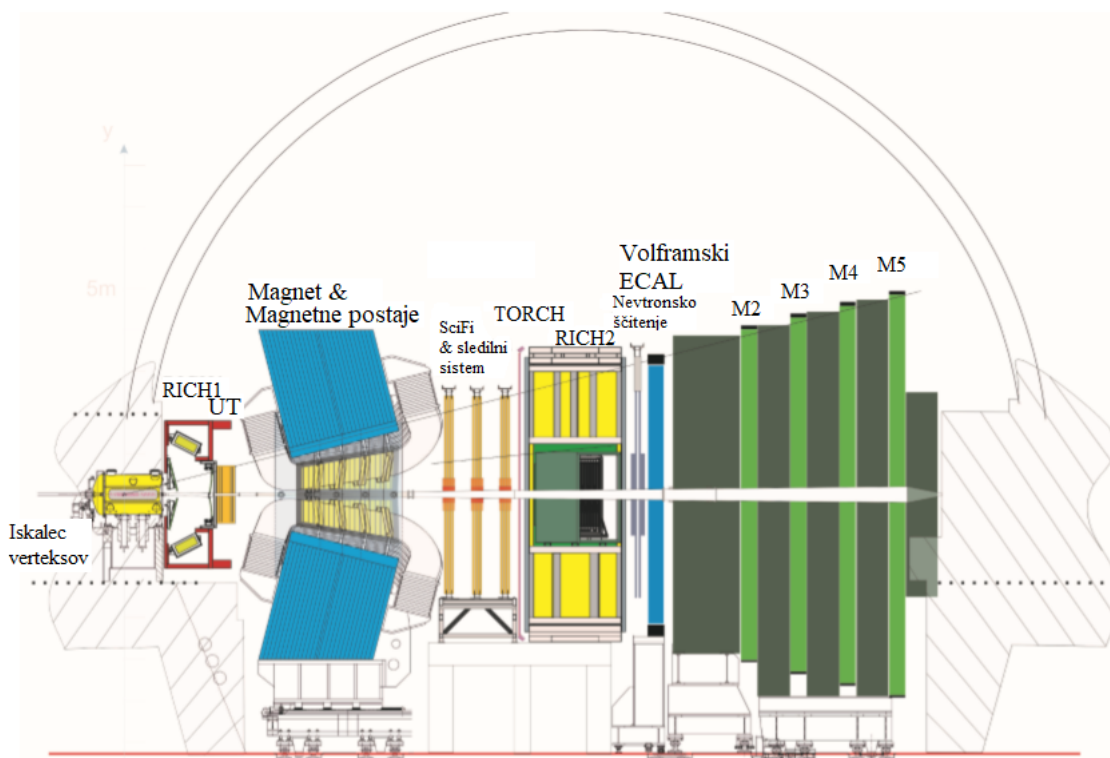
Povečanje števila interakcij za material vsekakor pomeni tudi povečano količino prejetega sevanja, zato je razumljivo, da morajo biti komponente vseh merilnih sistemov na sevanje dobro odporne.

V nadaljevanju si bomo ogledali predlagane izboljšave na merilnikih.

#### 4.1 VELO – Vertex Locator

Iskalec verteksov je sistem z zelo visoko prostorsko ločljivostjo za iskanje točk razpada. Detektor je sestavljen iz več merilnih ravnin silicijevih detektorjev. Ko delec preleti to ravnino, določimo točko v prostoru, iz več dobljenih točk pa je mogoče rekonstruirati sled. Sledi nato ekstrapolirajo in tako izračunajo točko razpada, tj. verteksa. Razpade delimo na primarne in sekundarne. V točki primarnega razpada delec, ki je nastal v pospeševalniku, v sekundarnih pa razpadni produkti tega delca. S pomočjo VELO-ja se določa tudi pljuske. Pri procesu tvorbe hadronov zaradi barvne interakcije nastali delec razpade na kvarke, ki so vezani v hadrone. Ker je na razpolago presežek energije, lahko nastane več novih delcev, vendar večina zaradi ohranitve gibalne količine leti v omejen prostorski kot.

Detektor se mora odzvati hitro (50–100 ps), imeti zmožnosti prepoznave določenih stalnih vzorcev (oblika pljuskov) in visoko resolucijo (prostorsko – dosežemo jo z gosto granulacijo pikslov; načrtujejo, da bi mu dodali tudi časovno ločljivost, saj bo lahko detektor zaradi prevelikega števila hkratnih dogodkov prezaseden). Vsekakor je pomembna tudi geometrijska oblika detektorja. Prav



**Slika 7.** Detektor LHCb po II. fazi nadgradnje. Odstranjena bosta hadronski kalorimeter in prvi mionski sistem, dodana pa bosta sistem TORCH in nevtronski ščit, mogoče še dodatne ravnine sledilnega sistema ob magnetu (Magnetne postaje) [1].

na tem področju in pri granulaciji raziskovalci menijo, da obstaja še največ možnosti za izboljšave [1]. En piksel bodo zmanjšali za polovico (s  $55$  na  $27,5 \mu\text{m}$ ), prav tako debelino silicijevih senzorjev (z  $200$  na  $100 \mu\text{m}$ ).

Naslednjo izboljšavo bi lahko predstavljala zmanjšana količina materiala. Vsi merilni sistemi, ki se nahajajo pred kalorimetrom, morajo biti lahki. Delci v njih ne smejo izgubljati preveč energije, ker to vpliva na natančnost meritev energije v ECAL-u (več v poglavju Kalorimetrija).

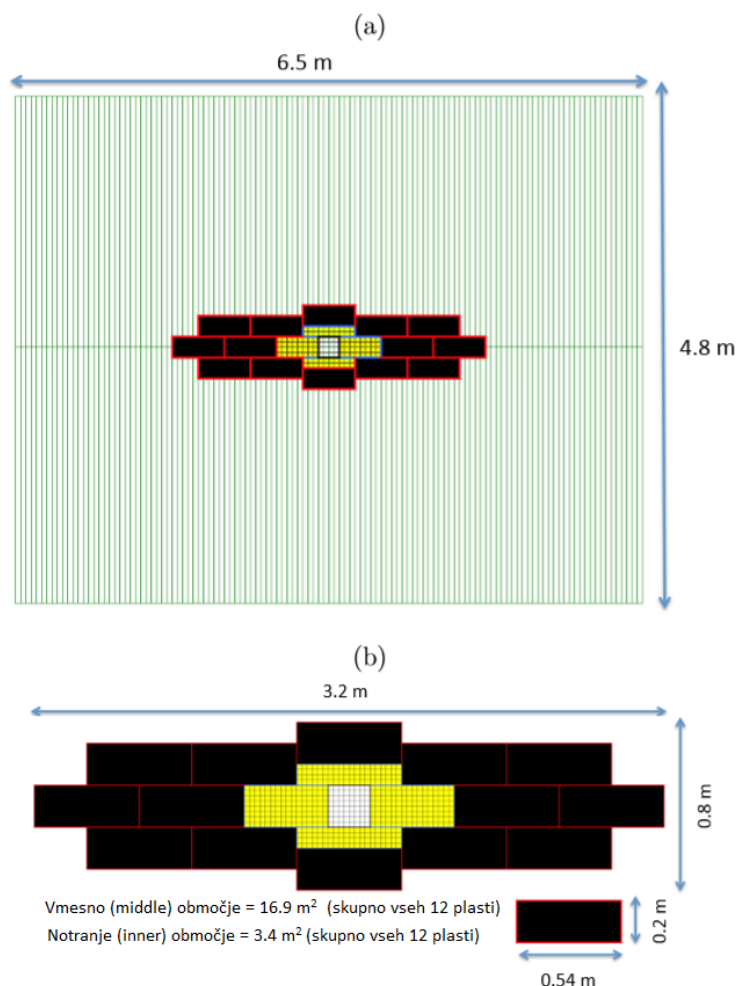
Senzor se nahaja v območju močne izpostavljenosti sevanju, zato je silicijeve senzorje pomembno zaščititi, saj se lahko njihovo razmerje signala glede na ozadje izrazito poslabša. Če ne gre drugače, morajo biti senzori postavljeni vsaj tako, da se bo dalo do njih fizično dostopati in jih po potrebi zamenjati, ko bodo preveč poškodovani; take menjave bi seveda potekale, ko se na pospeševalniku eksperimenti ne izvajajo, samo menjavo pa bi zaradi visoke količine obsevanega materiala opravljal robot.

## 4.2 Sledilni sistem

Sledilni sistem prav tako sestavlja več ravnin silicijevih detektorjev, ki ob preletu delca določijo točko v prostoru. Iz več teh točk se nato rekonstruira sled. Po novem bosta ta del sestavljata samo dva merilna sistema: UT – upstream tracker, ki se nahaja na zgornji strani magneta, in tri sledilne ravnine T 1–3 – downstream trackers, postavljene na spodnji strani. Sledilni sistem natančno meri gibalno količino nabitih delcev, kar je uporabno za določanje mas pri rekonstrukcijah hadronskih razpadov; pomaga tudi pri določanju same vrste delcev, saj je meritev gibalne količine predpogoj za identifikacijo, ki pa poteka v sistemu RICH (glej poglavje RICH). Za boljše zajemanje nizkoenergijskih delcev je načrtovana postavitev še dodatnih merilnikov na strani magneta.

UT ima zelo pomembno vlogo, saj se trajektorije nastalih delcev začnejo v VELO-ju in nadalju-

jejo v spodnjih sledilnih ravninah T 1–3, kar pa predstavlja pot vsaj 7 metrov. Tako je možnih kar nekaj poti, ki jih lahko opazovani delec izbere. UT zagotavlja vmesne točke v prostoru, kjer bi delec lahko potoval – tako je lažje ovreči napačne trajektorije, in pripomore k večji natančnosti. Pomaga pri določanju sledi delcev, ki razpadejo kmalu po tem, ko pridejo iz detektorja VELO (npr.  $K_s^0$  in  $\Lambda$ ), in tako prispeva k boljšemu opazovanju teh razpadnih kanalov [1]. Detektor UT bo pokrival površino približno  $2 \text{ m}^2$  in je sestavljen iz štirislojnih enostranskih silicijevih detektorjev.



**Slika 8.** Razporeditev SiPM kanalov v sledilnem sistemu. (a) predstavlja celotno ravnino, (b) pa poglobljen notranji del [1].

Glavni sledilni sistem je sestavljen iz treh ločenih štirislojnih detektorjev in predstavlja najpomembnejši del za določanje trajektorij delcev in gibalne količine. Posamezna plast pokriva  $30 \text{ m}^2$ , zato pri njej predstavlja velik izziv, kako zagotoviti najboljše delovanje za ne previsoke stroške. Kot trenutna tehnologija se uporablja mešanica silicijevih na notranjih in cevkastih detektorjev na zunanji strani. Za nadgradnjo bodo najprej uporabljena optična vlakna (scintillating fiber – SciFi), dolžine 2,5 m in premera  $250 \mu\text{m}$ , ter silicijeve fotopomnoževalke (silicon photomultipliers – SiPM) [1]. Na ravninah bodo meritve zajemale optična vlakna, ki bodo signal pošiljala do SiPM-ov na robu plasti. Posamezna plast naj bi bila razdeljena na tri dele: notranji (inner), vmesni (middle) in zunanji (outer) del, pri čemer bo vsak del imel drugačno granulacijo detektorjev. Vsak detektor bo poleg tega razdelejen na še manjše piksele. Zunanji del naj bi sestavljala optična vlakna, vmesni del detektorji velikosti  $540 \times 200 \text{ mm}^2$  in notranji del detektorji velikosti  $25 \times 25 \text{ mm}^2$ . Na sredini vsake plasti je seveda predvidena odprtina za pospeševani curek premera 23 cm. Skupne površine posameznih delov vseh 12 ravnin bodo nanesele na notranji del  $3,4 \text{ m}^2$ , vmesni  $16,9 \text{ m}^2$  in zunanji



340 m<sup>2</sup> (slika 8).

Podobno kot pri VELO-ju največji problem predstavlja količina prejetega sevanja, ki bi lahko poškodovala senzorje, vendar se pričakuje, da bodo našli rešitev za ta problem. Eden od možnih korakov v smeri njegovega reševanja je npr. zmanjšanje premera SciFi-jev na 200  $\mu\text{m}$ .

Ena od možnih nadgradenj sistema sledenja je tudi postavitve dodatnih ravnin ob dipolni magnet (Magnet Stations). Prednost takega dodatnega detektorja je povečanje zmožnosti zaznavanja nizkoenergijskih delcev, saj magnet delce z momentu pod  $\sim 1 \text{ GeV}/c$  iz LHCb-ja odnese ven. Tako ti delci pustijo svoje sledi samo v VELO-ju in UT-ju, kar vpliva na relativno napako meritve gibalne količine, ki znaša nad 15 %. Vsak izmed teh štirih detektorjev (desno zgoraj in spodaj ter levo zgoraj in spodaj) bi bil velikosti približno 2 m<sup>2</sup>, vendar njihova namestitve še ni dokončno določena. Največji problem predstavlja ozadje (šum), ki bi v veliki meri zadušilo meritev.

S štirimi detektorji, ki jih predstavljamo v nadaljevanju, bo potekala identifikacija delcev.

### 4.3 RICH – Ring imaging Cherenkov detector

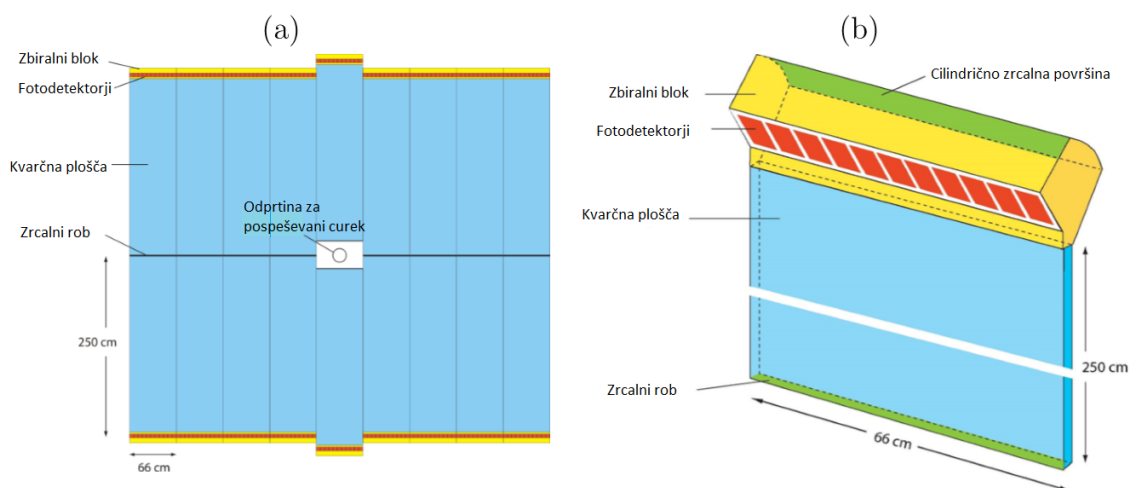
Detektor za določanje obročev Čerenkova igra glavno vlogo pri določanju vrste razpadlih delcev. Gre za uporabo pojava Čerenkovega sevanja. Delec v snovi lahko potuje hitreje od hitrosti svetlobe v tej snovi. Pri tem oddaja Čerenkove fotone pod določenim (Čerenkovim) kotom glede na smer potovanja v odvisnosti od svoje hitrosti. Fotoni so s sferičnimi in ravnimi zrcali usmerjeni na fotonske detektorje. Ti zaznajo svetlobni signal, z rekonstrukcijo fotonov pa dobimo obroč. Iz polmera kroga in števila zaznanih fotonov lahko identificiramo delec.

LHCb ima dva sistema RICH. Prvi je nameščen takoj za VELO-jem in je namenjen zaznavanju nizkoenergijskih delcev (kot medij uporablja aerogel – trdna snov, podobna gelu, v kateri je namesto tekoče komponente plin), drugi pa je nameščen za spodnjim sledilnim sistemom in zajema visokoenergijske delce (kot medij uporablja kombinacijo plinov C<sub>4</sub>F<sub>10</sub> in CF<sub>4</sub>) [7].

Pri nadgradnji sistema RICH bodo spremenili vse sestavne dele, vključno s povečanjem granulacije svetlobnih senzorjev, da bo identifikacija učinkovitejša. Dosedanje večanodne fotopomnoževalke, ki predstavljajo velikosti enega piksla približno  $3 \times 3 \text{ mm}^2$ , bi lahko zamenjali s SiPM-i površine  $\sim 1 \text{ mm}^2$ , kar bi pomenilo boljšo resolucijo. Da bi se izognili prevelikemu številu kanalov, potrebnih za branje, bi lahko izven pomembnejših področij pustili detektorje z večjimi piksli. Dodatno bi lahko goriščno razdaljo povečali z 1,9 na 2 m, kar sicer glede na razpoložljiv prostor v detektorju LHCb predstavlja maksimum. Velja poudariti, da imajo SiPM-i veliko prednosti (so majhni, učinkoviti, poceni), a tudi veliko slabost – so zelo neodporni na nevtronsko sevanje. Zaradi tega bodo po novem za sistemom RICH 2 postavili nevtronski ščit.

### 4.4 TORCH – Time of interally reflected Cherenkov light detector

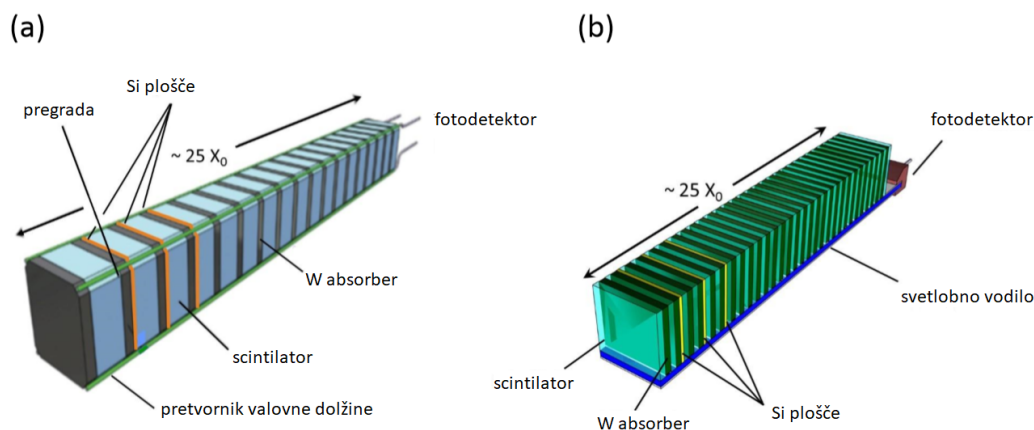
To je povsem nov merilni sistem, ki bo nameščen pred merilnikom RICH 2 in tako od interacijske točke oddaljen približno 9,5 m. Deluje na enak način kot RICH (z uporabo Čerenkovega sevanja), le da je v slednjem sredstvo tvorjenja fotonov plin in je zato večji, TORCH pa bo manjši, ker bodo delci potovali skozi kvarčne plošče (slika 9). Delec bo ob prehodu skozi kristal, ki je širok le nekaj cm, oddajal fotone. Čerenkov kot bo dovolj velik, da se bodo fotoni popolno odbili na mejnih ploskvah kristala. Tako se bodo odbijali vse do konca kristala, kjer jih bo zaznal fotodetektor. Za ta detektor je zelo pomembno, da je hiter, saj bo lahko zaznaval veliko delcev v majhnih časovnih razmikih. Ker standardni senzorji (npr. fotopomnoževalke) niso dovolj hitri, bodo uporabili fotopomnoževalke z mikrokanalnimi ploščami (micro-channel-plate photomultiplier tube – MCP PMT), ki imajo odzivni čas  $\sim 30 \text{ ps}$  [14].



Slika 9. Izgled sistema TORCH: (a) pogled na cel detektor, (b) povečana ena kvarčna plošča [1].

#### 4.5 Kalorimetrija

LHCb je opremljen z dvema kalorimetroma – hadronskim (HCAL) in elektromagnetnim (ECAL). Temeljni princip delovanja je, da delci v kalorimetrih deponirajo energijo, ki jo je nato mogoče izmeriti in tako ugotoviti, kolikšna je energija delca. Primarna naloga pri nadgradnji teh merilnih sistemov bo vgraditi boljši ECAL in ga prilagoditi na večje število dogodkov. Tako bo mogoče zaznati nevtralne mezone  $\pi$ , elektrone in fotone ter hkrati raziskovati kršenje CP simetrije, izvajati izospinske analize in opaziti mnoge razpade, ki jih do sedaj na LHCb ni bilo mogoče opazovati.



Slika 10. Dva možna izgleda enote kalorimetra. (a) povzet po primeru volfram-scintilatorskega kalorimetra, razvitega za CMS, (b) kalorimeter s svetlobnim vodilom [1].

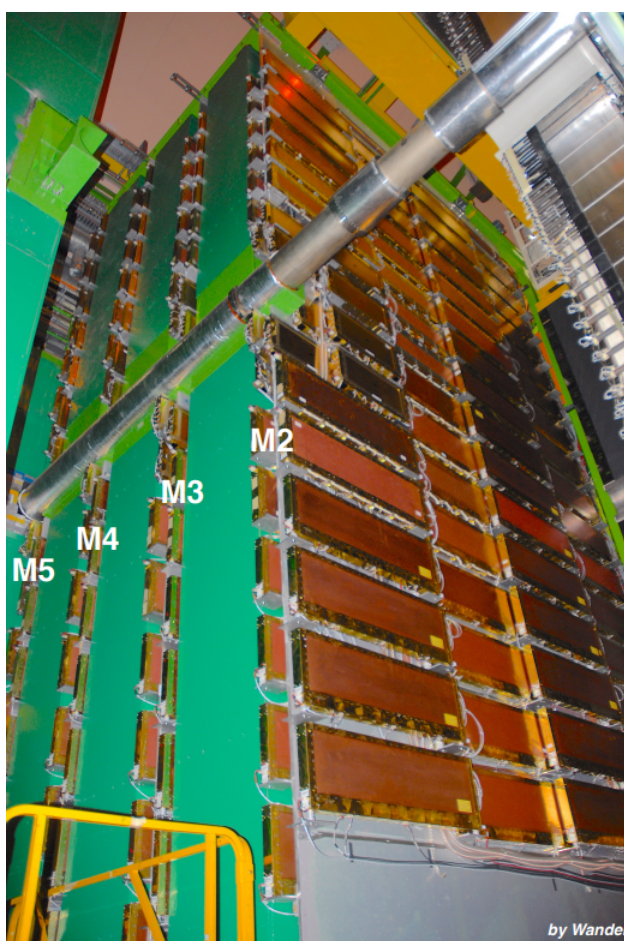
ECAL uporablja metodo vzorčevanja s svincem kot glavnim absorberjem (glej poglavje Mionski sistem). Sensor je zgrajen iz podolgovatih delov, na kateri se izmenjujeta scintilator in absorber. Vloga absorberja je, da postopoma ustavlja delec, scintilator pa ob prehodu delca sproži plaz fotonov, ki ga preko optičnega vlakna pripeljejo do fotodetektorja (verjetno SiPM-a) na koncu enote. Velikost posamezne merilne enote je približno 25 podenot scintilator + absorber (slika 10). Ker se lahko pri preveč hkratnih dogodkih signali (plazovi) medsebojno prekrivajo, je smiselno za absorber vzeti snov, kjer se bo energija deponirala na manjšem območju. Če to območje omejimo z valjem tako, da zavzamemo vsaj 90 % vse razpršene energije, polmer tega valja imenujemo Molierov polmer

[16]. Najverjetnejši kandidat za zamenjavo svinca kot absorberja je volfram, ki ima enega izmed najmanjših Molierovih polmerov ( $\sim 2$  cm).

Tako kot pri sledilnem sistemu je tudi tukaj ravnina razdeljena na tri dele: notranji, vmesni in zunanji. Za še boljši učinek bi lahko zmanjšali dimenzije posameznega detektorja. Površina notranjega dela se lahko zmanjša s  $4 \times 4$  na  $2 \times 2$  cm<sup>2</sup>, za vmesnega (s  $6 \times 6$ ) in zunanjega (z  $12 \times 12$ ) pa še izvajajo meritve in iščejo optimalno velikost [1]. Manjša velikost pomeni tudi manj škode zaradi sevanja.

HCAL je po osnovi podoben kot ECAL, le da je večji. Hadroni imajo namreč drugačno obliko plazmu, kot jo imajo nabiti delci, in zato je pomembno, da se delec ustavi na kalorimetru ter deponira vso svojo energijo. HCAL bo sicer med nadgradnjo v fazi II iz LHCb odstranjen, ker raziskovalcem povzroča več problemov, kot pa pripomore k izboljšanju meritev.

#### 4.6 Mionski sistem



Slika 11. Izgled mionskega sistema na LHCb [15].

Mionskemu sistemu bodo prvo ravnino odstranili, tako da ga bodo sestavljale štiri ravnine detektorjev, s katerimi merijo sledi mionov  $\mu$  (slika 11). Ker v fazi II nadgradnje LHCb-ja ne bo več HCAL-a, ga bodo nadomestili z železnimi ploščami skupne debeline 1,7 m za upočasnjevanje in absorbiranje ostalih delcev,  $\mu$  pa bodo šli skozi, ker le šibko interagirajo [15]. Po preletu železnih plošč potuje  $\mu$  čez štiri plinske komore (med katerimi so prav tako postavljene absorpcijske ravnine), v katerih ionizira plin; tako se določijo točke v prostoru, s katerimi potem rekonstruirajo njegovo sled. Vsaka ravnina je razdeljena na štiri dele (od znotraj navzven), kar je pomembno, saj se bo pri

nadgradnji glede na lego spremenila količina dodatne zaščite pred sevanjem pospeševanega curka, ki pada z oddaljenostjo od curka.

#### 4.7 Prožilni sistem in zbiranje podatkov

Vsi merilni sistemi na LHCb-ju potrebujejo proženje; konstantno zajemanje podatkov ni smiselno, saj bi jih bilo preveč. Trki gruč namreč potekajo v razmiku 25 ns. Iščejo se le določeni razpadni kanali – s prožilci (triggerji) je mogoče omejiti zajem le na zanimive tipe dogodkov. Do sedaj je bila večina proženja strojnega, po nadgradnji bo proženje v celoti programsko. To bo pomenilo znatno izboljšano prilagodljivost in učinkovitost [1]. Merilniki bodo zbirali vse podatke, ki jih bodo poslali v računalnik – ta jih bo s poenostavljenim algoritmom takoj obdelal in izbral, kateri dogodki so zanimivi (ti se pošljejo naprej v shranjevanje), ostale bo zavrgel. Vsi izbrani podatki se bodo pošiljali na medmrežje.

### 5. Zaključek

LHCb predstavlja pomemben eksperiment za raziskave na področju fizike mezonov  $B$ , zato njegova nadgradnja pomeni velik korak naprej. Zmožljivosti eksperimenta bodo nekajkrat večje, kar pomeni povečanje možnosti za nova odkritja. Zavedati se moramo, da razvoj tehnike ne dohiteva vseh zastavljenih ciljev in želja. Večina od zgoraj naštetih izboljšav bo na voljo šele v II. fazi nadgradnje, kar pomeni, da jih bodo pri dejanskih meritvah lahko uporabili šele leta 2031 [1], [2].

### 6. Zahvala

Rad bi se zahvalil mentorju dr. Roku Pestotniku za pomoč pri virih in razumevanju teorije ter za vse popravke in ostale dobrodošle komentarje.

### LITERATURA

- [1] N.Grub, LHCb Collaboration, *Expression of Interest for a Phase-II LHCb Upgrade: Opportunities in flavour physics, and beyond, in the HL-LHC era*, <https://cds.cern.ch/record/2244311> (Feb 2017).
- [2] C. Denis, LHCb Collaboration, *Physics case for an LHCb Upgrade II*, <https://cds.cern.ch/record/2320509> (May 2018).
- [3] <https://en.wikipedia.org/wiki/CERN> (20.4.2019).
- [4] [https://en.wikipedia.org/wiki/Luminosity\\_\(scattering\\_theory\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Luminosity_(scattering_theory)) (20.4.2019).
- [5] <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Cern-accelerator-complex.svg> (25.4.2019).
- [6] <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/> (29.4.2019).
- [7] <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/en/Detector/RICH2-en.html> (29.4.2019).
- [8] [https://en.wikipedia.org/wiki/Large\\_Hadron\\_Collider](https://en.wikipedia.org/wiki/Large_Hadron_Collider) (30.4.2019).
- [9] [https://en.wikipedia.org/wiki/LHCb\\_experiment](https://en.wikipedia.org/wiki/LHCb_experiment) (17.4.2019).
- [10] [https://en.wikipedia.org/wiki/CP\\_violation](https://en.wikipedia.org/wiki/CP_violation) (3.5.2019).
- [11] [https://en.wikipedia.org/wiki/Bottom\\_quark](https://en.wikipedia.org/wiki/Bottom_quark) (3.5.2019).
- [12] <https://en.wikipedia.org/wiki/B-tagging> (3.5.2019).
- [13] [https://en.wikipedia.org/wiki/Barn\\_\(unit\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Barn_(unit)) (5.5.2019).
- [14] <https://slideplayer.com/slide/8668278/> (6.5.2019).
- [15] <https://indico.cern.ch/event/790856/contributions/3368511/attachments/1826640/2989704/muon-amsterdam.pdf> (6.5.2019).
- [16] [https://en.wikipedia.org/wiki/Moliere\\_radius](https://en.wikipedia.org/wiki/Moliere_radius) (10.5.2019).