

UNIVERZA V NOVI GORICI  
FAKULTETA ZA APLIKATIVNO NARAVOSLOVJE

Seminar pri predmetu Eksperimentalne metode in  
detektorji I

# Detektorji Čerenkove svetlobe in njihova uporaba

**Gašper Kukec Mezek**

Eksperimentalna fizika  
Študijsko leto 2011/2012

Nosilec predmeta: prof. dr. Samo Stanič

# Kazalo

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Teoretski opis sevanja Čerenkova</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Zgradba detektorjev Čerenkove svetlobe</b>	<b>5</b>
3.1	Sevalec . . . . .	5
3.2	Fotopomnoževalke . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Uporaba v fiziki osnovnih delcev</b>	<b>7</b>
4.1	Pragovni detektorji . . . . .	8
4.2	Detektorji Čerenkovih obročev . . . . .	9
4.3	Detekcija kozmičnih žarkov . . . . .	12
4.4	Detekcija s popolnim notranjim odbojem Čerenkove svetlobe (DIRC)	14
	<b>Literatura</b>	<b>15</b>

# 1 Uvod

Sevanje Čerenkova oziroma Čerenkova svetloba je elektromagnetno valovanje, ki ga oddaja nabit delec z nadsvetlobno hitrostjo v snovi. Celoten pojav je mogoče pojasniti podobno kot pri nadzvočnem potovanju letala, kjer se za njim pojavi tako imenovani Machov stožec — zgoštev zvočnih front, ki jih slišimo kot pok. V primeru Čerenkove svetlobe gre za stožec elektromagnetnega valovanja, ki je odvisno od sevalca lahko opazen tudi v vidnem delu spektra.

Zgodovina sevanja Čerenkova se začne leta 1888, ko angleški fizik Heaviside prvi teoretsko opiše elektromagnetno sevanje nadsvetlobnega delca v mediju. Odločen korak k opisu pojava naredita tudi Ilya Frank in Igor Tamm, ki razvijeta večino še danes uporabljene fizikalne osnove pojava Čerenkova. Zaradi značilne izsevane svetlobe v modrem območju vidnega dela spektra se je dolgo časa Čerenkovo svetlobo obravnavalo skupaj z luminescenco, čemur sta verjela tudi Pierre in Marie Curie, ki sta med prvimi opazila sevanje Čerenkova. Leta 1936 pa se teoretski opis nadgradi še s praktično potrditvijo s strani ruskega fizika Pavla Čerenkova (na sliki 1), po katerem se sevanje tudi imenuje. V svojem poskusu je s pomočjo različnih



Slika 1: Ruski fizik Pavel Čerenkov, po katerem se sevanje Čerenkova tudi imenuje [1].

radioaktivnih izvorov in sevalcev opazil, da je kot, pod katerim je izsevana svetloba, odvisen le od lomnega količnika sevalca in hitrosti z gama žarki izbitih Comptonovih elektronov. S tem opisom se tudi prvič loči luminescenco in sevanje Čerenkova, leta 1958 pa Čerenkov, Tamm in Frank prejmejo Nobelovo nagrado za fiziko za njihov obširen prispevek k opisu sevanja [1]. V letih, ki sledijo, ta povsem novi princip detektiranja delcev, s pomočjo fotopomnoževalk, prinese dodaten način zaznave k takrat že uveljavljenimi ionizacijskimi detektorji. Njihova uporaba je predvsem opazna v fiziki osnovnih delcev in astrofiziki, saj omogoča detekcijo tudi tistih delcev, ki bi jih bilo z ostalimi detektorji težko zaznati (kot so naprimer nevtrini) ali bi za to potrebovali obširne detektorske sisteme.

## 2 Teoretski opis sevanja Čerenkova

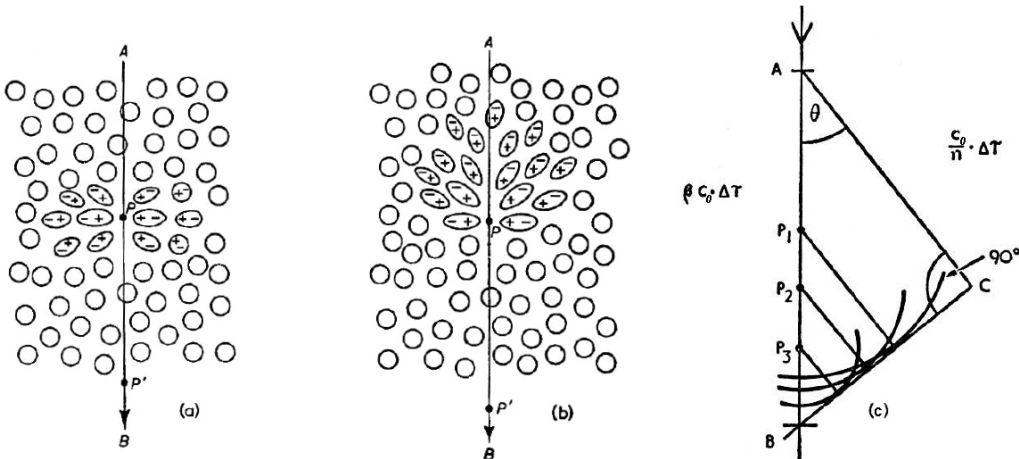
V vakuumu je hitrost elektromagnetnega valovanja enaka hitrosti svetlobe  $c_0 = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ , kjer je  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ AsV}^{-1}\text{m}^{-1}$  dielektrična konstanta,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ VsA}^{-1}\text{m}^{-1}$  pa magnetna permeabilnost vakuumu. Ko pa se elektromagnetno valovanje razširja v snovi, je ta hitrost manjša, ter je za različne medije odvisna od njihove elektronske konfiguracije. Dielektričnost  $\epsilon_{snov} = \epsilon_0\epsilon$  in permeabilnost  $\mu_{snov} = \mu_0\mu$ , ki sta v snovi različni od vrednosti v vakuumu, tako določita hitrost valovanja v snovi

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\epsilon\mu_0\mu}} = c_0 \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (1)$$

kjer sta  $\epsilon$  in  $\mu$  relativni vrednosti prej omenjenih parametrov snovi. Ta zapis lahko poenostavimo, tako da definiramo lomni količnik  $n(\omega) = c_0/c = \sqrt{\epsilon(\omega)\mu(\omega)}$ , ki je odvisen od frekvence svetlobe. Zgornji zapis velja za potovanje svetlobe v mediju, medtem ko se hitrost delca zmanjšuje preko interakcij s snovjo. Ko delec prehaja skozi snov, ta polarizira okoliške molekule, ki nato kot dipoli oddajo elektromagnetno valovanje in se vrnejo nazaj v začetno stanje. V primeru, ko vpadni delec potuje z nizko hitrostjo (slika 2a) se, zaradi simetričnosti polarizacije okoli poti delca, elektromagnetni pulz hitro destruktivno odšteje. V nasprotnem primeru, se pri nadsvetlobni hitrosti (slika 2b) oblika polarizacije spremeni in okoliška snov oddaja valovanje. Za delec, ki ima že na začetku hitrost blizu hitrosti svetlobe v vakuumu, potem v optično gostejši snovi velja

$$v > \frac{c_0}{n(\omega)}, \quad (2)$$

kjer je  $c_0$  hitrost svetlobe v vakuumu,  $n$  pa lomni količnik snovi. Tako mora biti



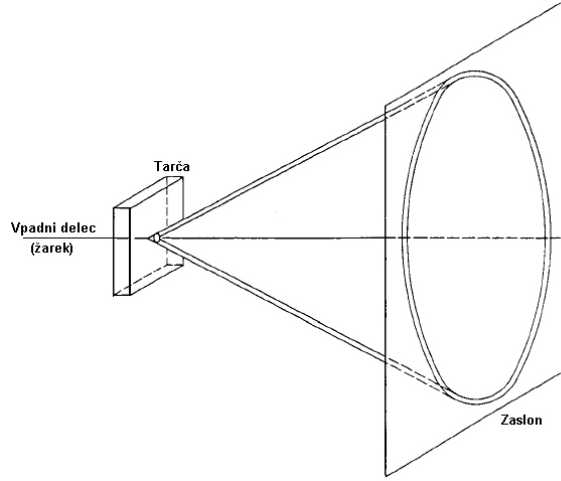
Slika 2: Polarizacija medija pri a) nizki hitrosti in pri b) visoki hitrosti. c) Valvna fronta Čerenkove svetlobe zaradi nadsvetlobne hitrosti delca v snovi. V času  $\Delta\tau$  delec prepotuje pot  $\beta c_0 \Delta\tau$ , medtem ko svetloba, ki jo na sliki predstavljajo valovne fronte, prepotuje pot  $\frac{c_0}{n} \Delta\tau$  [2].

naprimer relativna hitrost  $\beta = v/c_0$  delca v vodi ( $n \approx 1.333$ ) večja od  $\beta = 0.75$ ,

da pride do Čerenkovega pojava. Iz vrednosti prikazanih na sliki 2c in pogojem (2) lahko določimo Čerenkov kot  $\theta_C$

$$\cos \theta_C = \frac{c_0}{v n(\omega)}, \quad (3)$$

pod katerim se premika nastala valovna fronta, glede na smer gibanja. Oddana svetloba nato na zaslonu za tarčo zariše obroč (slika 3) in nam s tem poda nekaj namigov o identifikaciji delca in njegovi začetni energiji. Ravno na ta način delujejo detektorji Čerenkovih obročev, ki so opisani v poglavju 4.2. V realnem primeru je



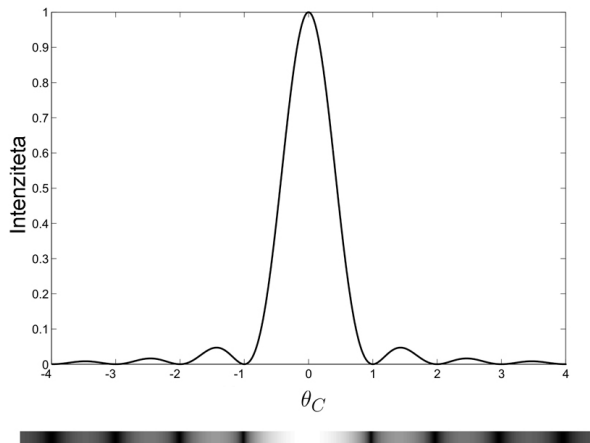
Slika 3: Vpadni delec ali žarek potuje skozi tarčo (snov) in pri tem oddaja Čerenkovo svetlobo pod kotom kot je določeno z enačbo (3). Zaradi simetričnosti nato svetloba na zaslonu zariše obroč [3].

pri obravnavi sevanja pomembna tudi debelina snovi skozi katero prepotuje delec, saj velja da oddana svetloba v tem primeru tvori interferenčne pasove. Frekvenčna in prostorska razporeditev Čerenkove svetlobe pri delcu, ki preleti skozi  $L$  debel kos materiala, je

$$\frac{d^2 E}{d\omega d\Omega} = \frac{z^2 \alpha \hbar}{c_0} n \beta^2 \sin^2 \theta \left| \frac{\omega L}{2\pi \beta c_0} \frac{\sin \xi(\theta)}{\xi(\theta)} \right|^2, \quad \xi(\theta) = \frac{\omega L}{2\beta c_0} (1 - \beta n \cos \theta), \quad (4)$$

kjer je  $\alpha \approx \frac{1}{137}$  konstanta fine strukture,  $z$  pa naboj delca. Člen  $(\frac{\sin \xi(\theta)}{\xi(\theta)})^2$  je enak kot pri uklonu svetlobe na uklonski mrežici in določa interferenčne pasove (slika 4). Glavna ojačitev je pod kotom  $\theta_C$ , ki ga narekuje enačba (3), ostale, vedno šibkejše ojačitve, pa opisujejo kote okoli te glavne vrednosti. V primeru ko je debelina materiala v primerjavi z valovno dolžino izsevane svetlobe neprimerljivo večja, se uklonski člen približuje delta funkciji  $\delta(1 - \beta n \cos \theta)$ , ojačitve višjega reda izginejo in Čerenkov efekt lahko brez večjih napak opišemo z enačbo (3). Lomni količnik snovi je odvisen od frekvence svetlobe  $\omega$ , tako da se ojačitve izsevane svetlobe razširijo in spektralno razporedijo:  $\theta_{\text{modra}} < \theta_{\text{rdeča}}$ . Če hočemo izvedeti kakšna je energija oddane svetlobe na enoto dolžine, je potrebno enačbo (4) integrirati po prostorskem kotu  $d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$  in frekvencah  $d\omega$ . Tako dobimo

$$- \frac{dE}{dx} = \frac{z^2 \alpha \hbar}{c_0} \int \omega \sin^2 \theta_C d\omega = \frac{z^2 \alpha \hbar}{c_0} \int \omega \left( 1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\omega)} \right) d\omega, \quad (5)$$



Slika 4: Primer uklona svetlobe na uklonski mrežici. Funkcija na zgornjem grafu je v osnovi  $(\frac{\sin x}{x})^2$ , ki ga v primeru Čerenkove svetlobe najdemo v enačbi (4). Spodnji trak prikazuje kako izgleda uklonski vzorec. Pri sevanju Čerenkova bi najmočnejša ojačitev ustrezala obroču na sliki 3 [4].

(Frank–Tamm [5]) in velja za delce z  $\beta > 1/n(\omega)$ . Energija, ki jo delec izgubi s tem ko seva Čerenkovo svetlobo je nekje med  $10^{-3}$  in  $10^{-1}$  MeV cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, odvisno od tipa sevalca. Še vedno pa je ta vrednost v primerjavi z izgubo energije zaradi trkov z atomi sevalca vsaj za faktor  $10^3$  manjša in zato tudi zanemarljiva. Potrebno je še določiti število fotonov, ki pri reakciji nastanejo, tako da najprej definiramo nekaj relacij

$$dN = \frac{dE}{\hbar\omega}, \quad \omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi c_0}{\lambda} \quad \rightarrow \quad d\omega = -\frac{2\pi c_0}{\lambda^2} d\lambda, \quad (6)$$

kjer je  $N$  število fotonov,  $E$  njihova energija,  $\lambda$  pa valovna dolžina. Enačbo (5) normiramo na energijo enega fotona ( $\hbar\omega$ ) in z uporabo relacij (6) dobimo enačbo za število izsevanih fotonov na enoto dolžine znotraj Čerenkovega obroča

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi z^2 \alpha \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sin^2 \theta_C \frac{d\lambda}{\lambda^2} = 2\pi z^2 \alpha \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)}\right) \frac{d\lambda}{\lambda^2}. \quad (7)$$

### 3 Zgradba detektorjev Čerenkove svetlobe

Detektor Čerenkove svetlobe je sestavljen iz mnogih komponent, vendar sta v vseh detektorjih najbolj pomembna in vedno prisotna sevalec in svetlobno občutljiv detektor. Sevalec ima, zaradi različne hitrosti v posameznih medijih, glavno vlogo pri določanju ali bo vpadni delec sploh oddal Čerenkovo svetlobo in z njim lahko po potrebi izločimo tiste delce, ki jih ne želimo zaznati. Druga komponenta, svetlobno občutljiv senzor, pa mora biti zmožna zaznati majhno število fotonov (nekaj deset), to vrsto signala pretvoriti v električni signal in ga ojačati s čim manj dodanega šuma.

#### 3.1 Sevalec

Sevalec v katerem bomo opazovali Čerenkov efekt je lahko trdnina, kapljevina ali plin. Med bolj uporabljenimi materiali so fluoro–ogljiki (npr. CF<sub>4</sub>, C<sub>4</sub>F<sub>10</sub>, ...), aero-

geli in  $\text{SiO}_2$  (kvarc). Kjer pa je potrebna dosti večja količina sevalca, se v ta namen še vedno najbolj uporablja visoko filtrirana in deionizirana voda. Preko enačbe (7) hitro opazimo, da je pri tankih sistemih potrebno izbrati sevalec, ki ima večji lomni količnik, kot pri prostorsko manj omejenih sistemih.

Plinasti sevalci, s svojim nizkim lomnim količnikom, zagotavljajo majhno disperzijo oddane svetlobe in omogočajo delovanje detektorja pri sobni temperaturi. Njihov lomni količnik je odvisen od tlaka in temperature, potrebna pa je debelejša plast, da prejmemo zadostno število izsevanih fotonov. Sevalec se v tem primeru nahaja v neposredni okolici fotoobčutljive detektorske mreže, zato pri določanju Čerenkovega kota ni treba upoštevati loma svetlobe kot je to potrebno pri trdnih sevalcih.

Aerogel je trden material, ki se ga ustvari s procesom superkritičnega sušenja, kjer kapljevino v gelu zamenjamo s plinskimi molekulami. To mu zagotovi izjemno visoko poroznost in zato nizko gostoto, v nasprotju z osnovnim mišljenjem pa poroznost pripomore tudi k izjemni trdnosti materiala. V detektorjih Čerenkove svetlobe je zaradi svoje nastavljive narave uporaben za pokrivanje območja lomnega količnika med plinskimi in tekočimi sevalci. Tako se lahko, z različnim proizvodnim postopkom, ustvari aerogel z lomnim količnikom nekje med 1.01 in 1.10, kar je idealno za detekcijo delcev z gibalno količino nekaj  $\text{GeV}/c$ . Nekajcentimeterski aerogel z lomnim količnikom  $n = 1.03$  s Čerenkovim efektom proizvede okoli 6 fotonov.

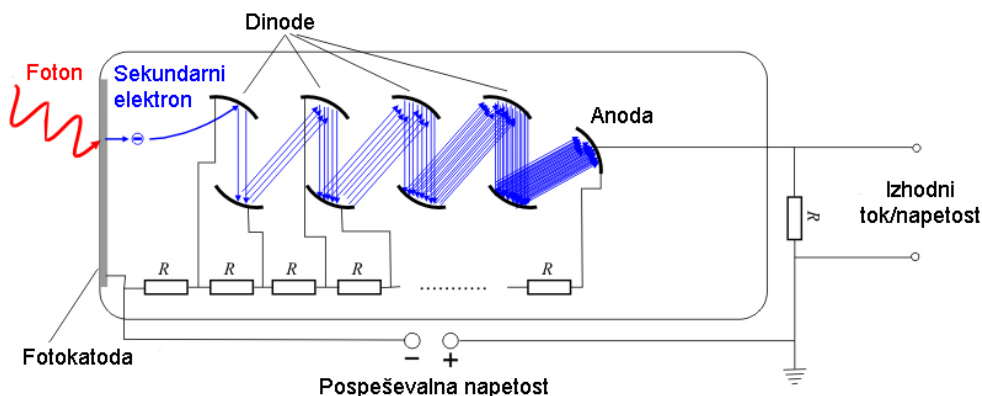
Tekoči sevalci z malo večjim količnikom so večinoma uporabni za večje detektorske sisteme, kjer celoten zadrževalnik zapolnimo z veliko količino sevalca. Ta način nam omogoča da detektiramo tudi manj pogoste delce, s tem da jim zagotovimo večjo verjetnost, da interagirajo s snovjo. Zaradi očitne težave pri zadrževanju tekočih sevalcev, se ti ne uporabljajo pri trkalnikih in pospeševalnikih.

Trdni sevalci imajo največji lomni količnik in posledično tudi največjo količino oddanih fotonov glede na dolžino sevalca. Ravno zaradi te lastnosti so uporabni pri trkalnikih in pospeševalnikih, saj omogočajo tanko zasnovo. Zaradi svojega velikega lomnega količnika pa se oddana svetloba lahko popolno odbije od meje med sevalcem in okolico kar je lahko tudi zaželjena lastnost. Detektorji, ki delujejo na ta način so DIRC (Detection of Internally Reflected Cherenkov light), opisani v poglavju 4.4.

## 3.2 Fotopomnoževalke

Oddano svetlobo Čerenkova moramo nekako izmeriti in pretvoriti v tip signala, ki bo z merjeno količino najenostavneje povezan. V ta namen se najpogosteje uporabljajo fotopomnoževalke. Fotopomnoževalke so naprave, ki merijo vpadno svetlobo in jo spremenijo v električni signal. Slika 5 predstavlja njen shematični prikaz. Glavni sestavni deli fotopomnoževalk so:

- Fotokatoda: Negativno nabita elektroda, prevlečena s fotoobčutljivim premazom. Vpadni foton, preko fotoefekta, izbije elektron v katodi in ga nato pospeši, zaradi visoke napetosti (1–2 kV). Kinetična energija izbitega elektrona je odvisna od frekvence valovanja  $\nu$  in vezavne energije  $\phi$ , ter je enaka  $E = h\nu - \phi$ . Fotokatodi lahko določimo izkoristek  $\eta(\lambda)$ , ki nam pove koliko je število oddanih fotoelektronov napram številu vpadnih fotonov in nam poda direktno povezavo med vhodno in izhodno mersko količino.



Slika 5: Shematični prikaz fotopomnoževalke. Foton iz fotokatode izbije fotoelektron, ki je nato pospešen proti prvi dinodi, kjer izbije nove elektrone. Pomnoževanje sekundarnih elektronov se nadaljuje dokler ti ne zadanejo anode in ustvarijo izhodni tok, proporcionalen s številom vpadnih fotonov. Izhodni tokovi za posamezne vpadne fotone znašajo že okoli mA [6].

- Dinode: Fotoelektrone nato z električnim poljem fokusiramo na prvo dinodo, kjer izbijajo nove elektrone. Ti so nato pospešeni proti naslednji dinodi in spet izbijajo nove sekundarne elektrone. Postopek pomnoževanja se nadaljuje, dokler ne pridemo do anode.
- Anoda: Pozitivno nabita elektroda privlači sekundarne elektrone iz katerih dobimo električni signal. Glavni razlog za pomnoževanje elektronov je, da na anodi dobimo izmerljiv signal, ki ni prežet s šumom.

Pri takšnem merjenju svetlobe delujemo v linearnem območju fotopomnoževalk, tako da je izhodni tok proporcionalen z vpadnimi fotoni. Fotopomnoževalke so najbolj učinkovite pri valovni dolžini 400 nm in je zato njihovo tipično delovno območje nekje med 350 nm in 550 nm. Z uporabo enačbe (7) in predpostavkom, da  $\theta_C$  na tem območju ni odvisen od valovne dolžine, dobimo približno količino izsevanih fotonov na enoto dolžine sevalca za fotopomnoževalke

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi z^2 \alpha \sin^2 \theta_C (\lambda_1^{-1} - \lambda_2^{-1}) \approx 475 z^2 \sin^2 \theta_C \frac{\text{fotonov}}{\text{cm}}. \quad (8)$$

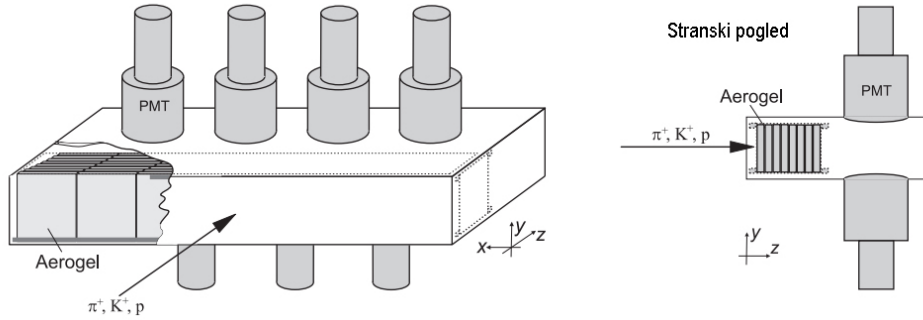
## 4 Uporaba v fiziki osnovnih delcev

Čeprav so glavne komponente detektorjev Čerenkove svetlobe podobne, je sama zasnova in razporeditev močno odvisna od tipa eksperimenta. Pri eksperimentih, kjer je vir delcev pospeševalnik ali trkalnik, smo predvsem omejeni s prostorom okoli interakcijske točke, kar pomeni da mora biti detektor kar se da tanek. V nasprotju se pri detekciji delcev iz okolice (sevanje, kozmični žarki) zagotovi čim večjo površino detektorja, da vpadni delec sploh ujamemo. Posebni primer so tako še delci, ki slabo interagirajo z ostalimi delci, kjer moramo zagotoviti še dovolj velik volumen sevalca, da do te interakcije sploh pride.



## 4.1 Pragovni detektorji

Pragovni detektorji so najosnovnejši detektorji Čerenkove svetlobe in ločijo delce po njihovi energiji oziroma gibalni količini. Pri njih izberemo sevalec, ki omogoča le nekaterim delcem, da pri prehodu oddajo fotone, medtem ko ostali ne sevajo.

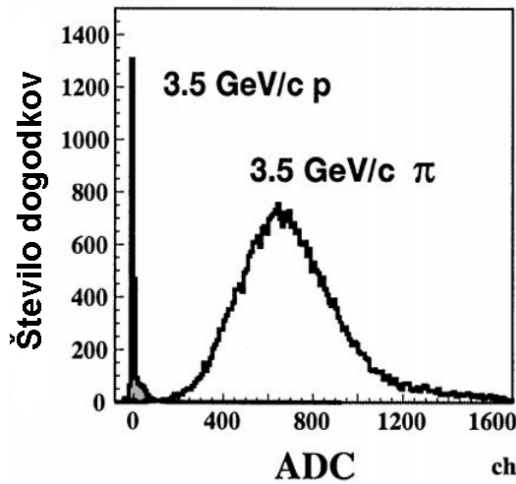


Slika 6: Shematski prikaz pragovnega detektorja. PMT označuje fotopomnoževalko [7].

Prag gibalne količine delca nad katerim opazimo Čerenkov efekt je

$$p_t = m\gamma_t v_t = m\gamma_t \beta_t c_0 = \frac{mc_0}{\sqrt{n^2 - 1}}, \quad (9)$$

kjer je  $m$  masa delca, relacija  $\beta_t = 1/n$  pa sledi iz enačbe (2). Tako delci, ki imajo manjšo gibalno količino kot  $p_t$ , ne oddajajo sevanja Čerenkova, kar je prikazano tudi na sliki 7. Pioni  $\pi$  so namreč pri gibalni količini  $p = 3.5 \text{ GeV}/c$  že nad pragom, medtem ko so protoni  $p$  še pod pragom.

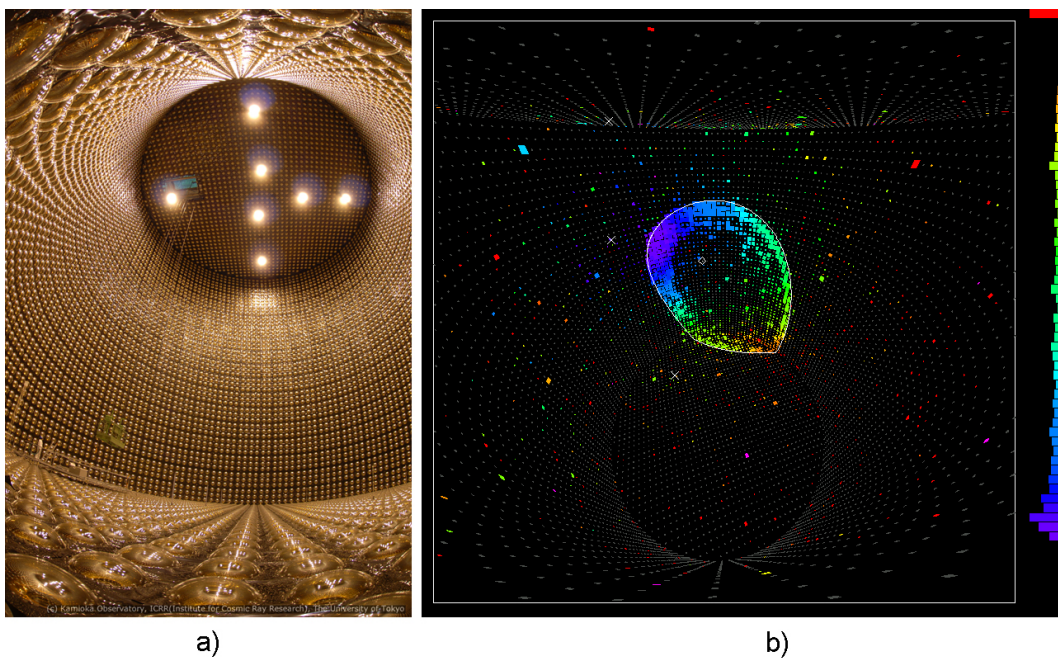


Slika 7: Merjenje števila dogodkov pri gibalni količini  $p = 3.5 \text{ GeV}/c$ . Sevalec je bil v tem primeru aerogel z lomnim količnikom  $n = 1.015$ . Pri tej vrednosti  $n$  je prag gibalne količine, izračunan z enačbo (9), za pione  $p_t(\pi) \approx 0.8 \text{ GeV}/c$ , za protone pa  $p_t(p) \approx 5.4 \text{ GeV}/c$  [8].

## 4.2 Detektorji Čerenkovih obročev

Detektor Čerenkovih obročev ali RICH (Ring Imaging CHerenkov detector) je tip detektorja, s katerim preko Čerenkovega kota  $\theta_C$  določimo hitrost in maso delca, kar nam predvsem pomaga pri identifikaciji fizikalnih delcev. V primerjavi s pragovnimi detektorji je njihovo merjenje dosti bolj zvezno, saj so zmožni med sabo ločiti večje število delcev hkrati (pragovni loči le tiste nad in pod pragom). Njihova sestava se močno razlikuje od tipa eksperimenta, saj lahko izsevane fotone zajamemo na planarnem detektorskem sistemu ali pa jih fokusiramo s sferičnim zrcalom.

Planarni detektorski sistemi so sestavljeni enako kot prikazuje slika 3 in so predvsem uporabni pri mirujočih tarčah. Tam namreč večina delcev, ki nastane pri interakciji, nadaljuje pot v smeri vpadnega žarka. Izsevani fotoni zadanejo svetlobno občutljivo detektorsko polje, ki zazna obroč svetlobe. Podoben sistem merjenja uporabljamo tudi pri detekciji delcev, ki so posledica naravnih pojavov in zanje ni možno določiti interakcijske točke. Nevtrini sicer ne nosijo naboja in zelo slabo interagirajo z

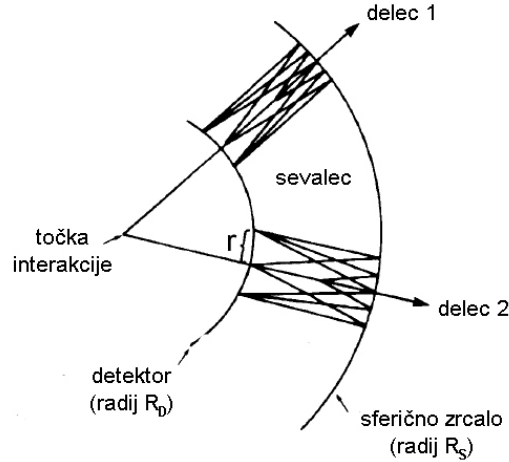


Slika 8: a) Notranjost detektorja nevtrinov Super-Kamiokande. Zbiralnik je 1 km pod zemljo, meri 41.4 m v višino in ima premer 39.3 m, stene pa so opremljene s poljem več kot 11000 fotopomnoževalk [9]. b) Čerenkov obroč, ki ga je v detektorju Super-Kamiokande ustvaril nevtrino z energijo 1063 MeV. Barvna skala predstavlja čas, ko fotoni zadanejo posamično fotopomnoževalko, kjer vijolična barva predstavlja dogodek, ki se je zgodil prej [10].

delci v snovi, vendar če detektor zaščitimo pred ostalimi delci (postavimo globoko pod zemljo), potem samo nevtrini izbijejo elektrone v snovi, ki posledično oddajo Čerenkovo svetlobo. Na sliki 8a je prikazan japonski detektor nevtrinov Super-Kamiokande, slika 8b pa prikazuje enega izmed Čerenkovih obročev, ki ga je ta detektor zabeležil. Obroč sicer ne izgleda kot obroč, vendar je to le vprašanje projekcije, ki ga popravimo z uporabo cilindrične projekcije. V tem primeru je nevtrino

z energijo 1063 MeV zadel prosti proton in tako ustvaril mion z energijo 1032 MeV. Ta je potem seval Čerenkovo svetlobo in pustil sled na mnogih fotopomnoževalkah detektorja.

Drug tip detektiranja Čerenkovih obročev je preko zrcaljenja izsevanih fotonov na detektorsko mrežo. Ta način se predvsem uporablja pri detektorjih, kjer moramo čimbolj zaobjeti okolico interakcijske točke kot naprimer pri trkalnikih. Detektorski



Slika 9: Shematični prikaz delovanja detektorja Čerenkovih obročev [11].

sistem je tako sestavljen iz sferičnega zrcala z radijem  $R_S$ , detektorjem z radijem  $R_D$  in sevalcem Čerenkove svetlobe med njima (slika 9). Ko delec prileti v sevalec, seva fotone, katere zrcalo fokusira na detektorsko površino. Razlika med delci in kot  $\theta_C$  sta tako razvidna iz razdalje

$$r = f\theta_C = \frac{R_S}{2}\theta_C, \quad (10)$$

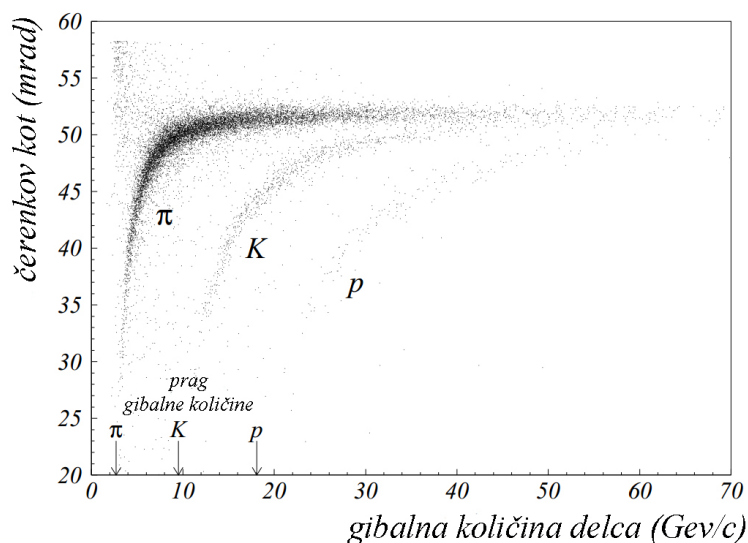
kjer je  $f$  fokus in je enak radiju detektorja  $f = R_D$ . Iz enačb (3) in (10) je potem enostavno določiti hitrost

$$\beta = \frac{1}{n \cos\left(\frac{2r}{R_S}\right)} \quad (11)$$

in maso delca

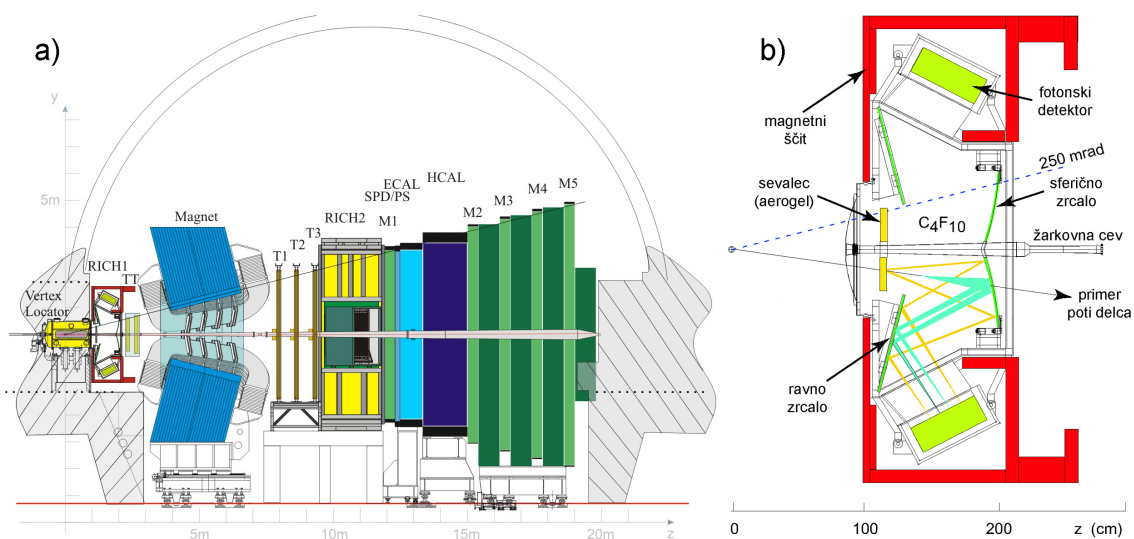
$$p = m_0\gamma v = m_0\gamma\beta c_0 \implies m_0 = \frac{p\sqrt{1-\beta^2}}{\beta c_0}, \quad (12)$$

kjer je  $m_0$  mirovna masa delca,  $p$  pa njegova gibalna količina. Gibalno količino delca je možno določiti s pomočjo ostalih komplementarnih detektorskih sistemov kot je naprimer odklon delca v magnetnem polju. Slika 10 prikazuje odvisnost med Čerenkovim kotom  $\theta_C$  in gibalno količino delca.



Slika 10: Graf Čerenkovih kotov  $\theta_C$  v odvisnosti od gibalne količine kot jih je zabeležil detektor Čerenkovih obročev HERA-B. Preko zbranih podatkov in relacije (12) tako tudi identificiramo posamezne delce [12].

Eden izmed detektorskih sistemov, ki vsebuje, poleg detektorja Čerenkovih obročev, še ostale tipe detektorjev, je LHCb v CERNu. S skupnim delovanjem omogoča boljše identifikacijo delcev in s tem tudi bolj zanesljive rezultate. Kot prikazuje slika 11a se za interakcijsko točko detektorja nahajajo (po vrstnem redu): nizkoenergijski detektor Čerenkovih obročev (RICH1), detektorji trajektorije delcev pred in za magnetom (T), visokoenergijski detektor Čerenkovih obročev (RICH2), kalorimetri (ECAL) in mionski detektorji (M). Nizkoenergijski detektor Čerenkovih obročev,



Slika 11: a) Prečni prerez celotnega detektorskega sistema in b) prečni prerez nizkoenergijskega detektorja Čerenkovih obročev (RICH) pri LHCb. Aerogel ima lomni količnik  $n \approx 1.03$ , plinski sevalec  $C_4F_{10}$  pa  $n = 1.0014$  [13].

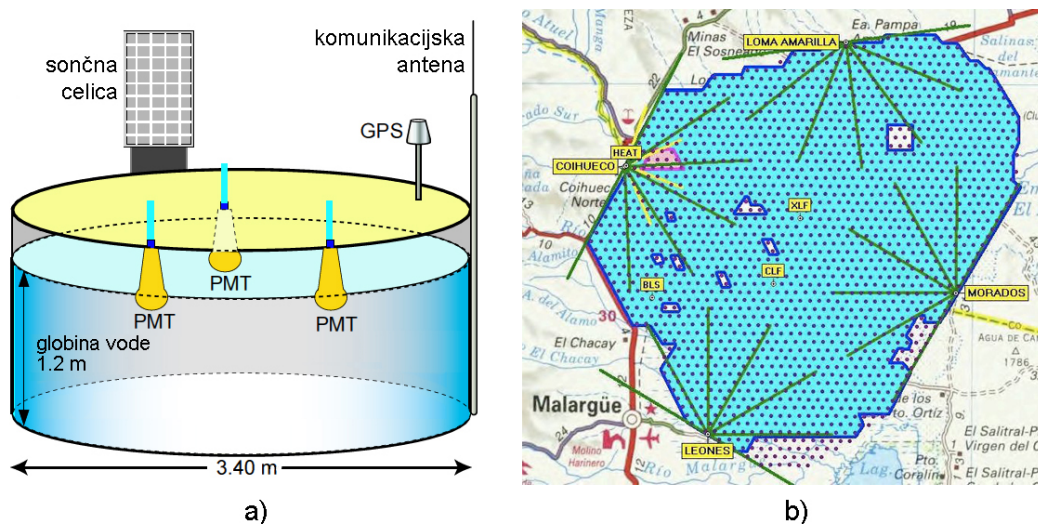
prikazan na sliki 11b, deluje na območju med  $\sim 1\text{--}60$  GeV/c, izkorišča pa kar dva sevalca. Prvi je aerogel z lomnim količnikom  $n = 1.03$  (pri  $\lambda = 400$  nm), drugi pa

plinski sevalec  $C_4F_{10}$  z lomnim količnikom  $n = 1.0014$  (pri  $\lambda = 400$  nm) [18]. Razlika v delovanju, prikazanem na sliki 9, je le ta, da v primeru LHCb sferična zrcala fokusirajo Čerenkovo svetlobo na ravno zrcalo, ta pa naprej na detektor. S takšno postavitvijo manj omejujemo delce na svoji poti in zagotovimo večji prostorski kot celotnega detektorskega sistema. Celoten detektor Čerenkovih obročev je zaprt še v magnetni ščit, ki preprečuje, da bi se delci odklonili od svoje prvotne smeri in otežili detekcijo Čerenkove svetlobe.

Visokoenergijski detektor Čerenkovih obročev pri LHCb, ki deluje podobno kot nizkoenergijski, pa omogoča detektiranje delcev od 15 GeV/c pa tudi nad 100 GeV/c. Plinski sevalec znotraj detektorja je  $CF_4$  z lomnim količnikom  $n = 1.0005$  (pri  $\lambda = 400$  nm).

### 4.3 Detekcija kozmičnih žarkov

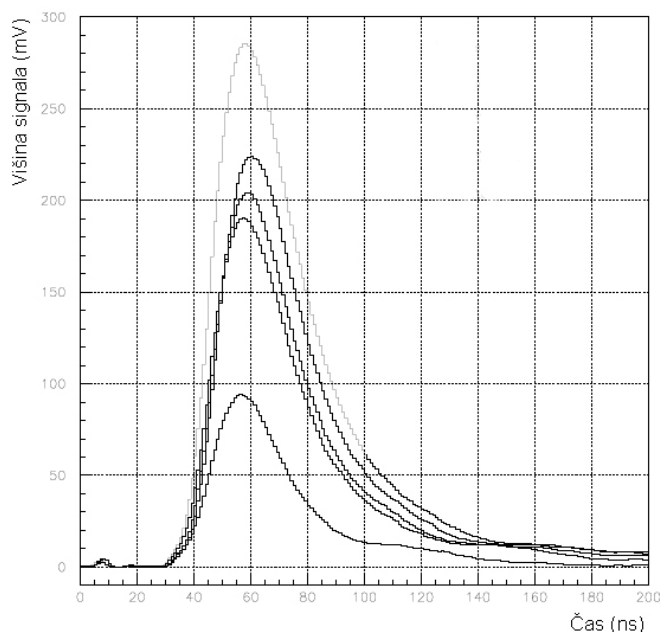
Visokoenergijski kozmični žarki prispejo do Zemeljske površine le poredko, vendar njihove energije, ki dosegajo tudi  $10^{20}$  eV, kar za več kot  $10^7$  eV presegajo vse omejitve trenutnih pospeševalnikov in trkalnikov. Primarni delci pri trkih z atomi atmosferskih plinov ustvarjajo nove delce, ti pa lahko potem ponovno trčijo v atome, ter tako ustvarijo vedno večji plaz delcev. Delci, ki prispejo do Zemeljske površine, so razporejeni po velikem območju in nosijo večino energije celotnega plaz. Ravno v ta namen in zaradi majhne pogostosti primarnih delcev mora naš detektorski sistem pokrivati dovolj veliko območje. Kot najbolj cenovno ugoden in zanesljiv način detekcije se je izkazal detektor Čerenkove svetlobe. Kot primer je na sliki 12 prikazan en izmed vodnih zadrževalnikov in razporeditev površinske detektorske mreže observatorija Pierre Auger v Argentini.



Slika 12: a) Shematski prikaz vodnega zadrževalnika površinske detektorske mreže z označenimi glavnimi komponentami in b) pokritost observatorija Pierre Auger, kjer modre točke predstavljajo posamezne vodne zadrževalnike površinske detektorske mreže [14].

Vsak izmed vodnih zadrževalnikov vsebuje 12 ton visoko filtrirane in deionizirane vode, ki deluje kot sevalec Čerenkove svetlobe, in tri svetlobno občutljive fotopo-

množevalke. Fotopomnoževalke so pritrjene na zgornji del zadrževalnika in obrnjene navzdol, saj bi pri direktni osvetlitvi lahko prišlo do nenavadno visokih signalov, kar je posledica Čerenkovega pojava v steklu fotopomnoževalk. Voda, ki je zaradi mnogo večjega števila izsevanih fotonov filtrirana preko mikronskega filtra in nato deionizirana, zapolnjuje celotni zadrževalnik, njena čistost pa pripomore k dolgi življenjski dobi detektorja. Na sliki 13 je prikazana višina signala sevanja Čerenkova za vodo pri različnih načinih prečiščevanja. Med glavni problematikami pri načrtovanju takšnih detektorskih sistemov sodita nastajanje rje in bakterijsko onesnaževanje, kar s časom poslabša občutljivost celotnega sistema.

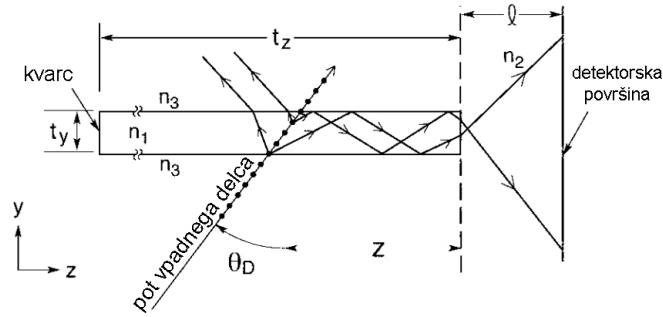


Slika 13: Graf odvisnosti višine signala sevanja Čerenkova od načina čiščenja vode (sevalca). Najnižji signal ustvari nefiltrirana voda, naslednja dva signala sta posledica filtriranja vode skozi različne filtre ( $3\ \mu\text{m}$  in  $1\ \mu\text{m}$  filter), najvišja signala pa predstavljata destilirano vodo [15].

Preko Čerenkovega efekta v sevalcu dobimo podatek o energiji le tistega delca v plazju, ki je prešel skozi zadrževalnik in njegov čas preleta. Ker pa je v detekciji kozmičnih žarkov pomembna smer iz katere je primarni delec priletel, saj nas zanima njegov izvor, je potrebno poiskati način s katerim bomo vpadni kot določili. Odgovor leži že v sami postavitvi detektorskega sistema. Okoli 1600 vodnih zadrževalnikov smo razporedili na dovolj veliki površini, da kakšnega izmed plazov kozmičnega žarka sploh ujamemo, vendar če jih razporedimo še v enakomerni mreži, nam geometrija omogoča določiti smer iz katere je kozmični žarek najverjetneje prišel. Površinski detektorji imajo trikotno razporeditev v mrežo in preko časa preleta delcev skozi priležne detektorje, s pomočjo simulacij, izračunamo vpadni kot primarnega delca — kozmičnega žarka.

## 4.4 Detekcija s popolnim notranjim odbojem Čerenkove svetlobe (DIRC)

Med Čerenkove detektorje, ki uporabljajo trdne sevalce, sodijo detektorji popolnega notranjega odboja Čerenkove svetlobe ali Detection of Internally Reflected Cherenkov light (DIRC). DIRC deluje podobno kot optični vodniki. Delec ob prehodu skozi kvarčno palico seva Čerenkovo svetlobo, ta pa se potem popolno zrcali znotraj sevalca, zaradi razlike v lomnih količnikih kvarca in okolice, in potuje po palici. Za plin okoli kvarčnih celic se uporablja dušik, saj ima nizek lomni količnik ( $n \sim 1$ ) in onemogoča da bi se vodna para kondenzirala na kvarčnih palicah. Zaradi kvadraste zasnove kvarčne palice, se vsa odbita svetloba popolno odbija pod Čerenkovim kotom  $\theta_C$ . Na sliki 14 je shematski prikaz kako pride do Čerenkovega pojava v DIRC detektorjih. Na enem koncu palice je postavljena mreža fotopomnoževalk, ki zajame vso tako vodeno svetlobo. Na drugem koncu je postavljeno zrcalo, ki pre-



Slika 14: Shematski prikaz delovanja DIRC detektorja na trkalniku PEP-II. Povprečni lomni količnik kvarčne palice je  $n_1 = 1.474$ , material v okolici ima nizek lomni količnik ( $n_3 \sim 1$ ). Na enem koncu palice je visoko prečiščena voda z lomnim količnikom  $n_2 \approx 1.34$ , ki prepreči popolne odboje na tej meji. [16].

usmeri vso svetlobo proti detektorski mreži. Fotopomnoževalke so postavljene malo več kot meter stran od konca palice, področje med koncem palice in detektorsko mrežo pa je zapolnjeno z visoko prečiščeno vodo. Ta ima lomni količnik  $n \approx 1.34$  in omogoča, da se čim manj Čerenkove svetlobe odbije na tej meji. Debelina kvarčnih palic je okoli 1.7 cm, širina 3.5 cm, dolžina pa 490 cm. Za najboljšo pokritost detektorskega sistema okoli interakcijske točke uporabimo dvanajstkotno razporeditev iz več kot 100 kvarčnih palic. Prednost v zasnovi se pozna predvsem pri asimetričnih trkalnikih, kjer delci z večjo gibalno količino ustvarijo večji signal.

## Literatura

- [1] The Nobel Prize in Physics 1958, [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1958](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1958), (2.6.2012).
- [2] F. Nerling, *Description of Cherenkov light production in extensive air showers*, Ph.D. dissertation.
- [3] Pavel A. Čerenkov, *Radiation of particles moving at a velocity exceeding that of light, and some of the possibilities for their use in experimental physics*, Nobel lecture (11.12.1958).
- [4] [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/51/Diffraction\\_par\\_une\\_fente.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/51/Diffraction_par_une_fente.png), (3.6.2012).
- [5] I.M. Frank, I.E. Tamm, Dokl. Akad. Nauk, SSSR, 14, 107, (1937).
- [6] <http://withfriendship.com/images/j/45080/Photomultiplier-image.jpg>, (4.6.2012).
- [7] R. Siudak et.al., *A threshold Cherenkov detector for  $K^+/\pi^+$  separation using silica aerogel*, Nucl. Instr. and Meth. A, **596** (2008), 311 — 316.
- [8] T. Sumiyoshi et.al., *Silica aerogel Cherenkov counter for the KEK B-factory experiment*, Nucl. Instr. and Meth. A, **433** (1999), 385 — 391.
- [9] Super-Kamiokande, <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html>, (10.6.2012).
- [10] Super-Kamiokande event, <http://www.ps.uci.edu/~tomba/sk/tscan/pictures.html>, (17.6.2012).
- [11] C. Grupen, B. Schwartz, *Particle detectors*, Cambridge University Press, Second Edition (2009).
- [12] I. Ariño et.al., *The HERA-B Ring Imaging Čerenkov Counter*, Nucl. Instrum. Meth. A **516** (2004), 445 — 461.
- [13] LHCb, <http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/>, (11.6.2012).
- [14] Pierre Auger Observatory, <http://www.auger.org>, (10.6.2012).
- [15] Pierre Auger Project Design Report, <http://www.auger.org/admin/DesignReport/>, (3.7.2012).
- [16] I. Adam et al., *DIRC, the internally reflecting ring imaging Cherenkov detector for BABAR*, IEEE Trans. Nucl. Sci., **45** (1998), 657 — 664.
- [17] W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and particle physics experiments*, Springer-Verlag (1994).
- [18] The LHCb Collaboration et.al., *The LHCb Detector at the LHC*, JINST **3** (2008), S08005.



- [19] Particle Physics Division lectures, [http://www-ppd.fnal.gov/eppoffice-w/Academic\\_Lectures/newsheaff.pdf](http://www-ppd.fnal.gov/eppoffice-w/Academic_Lectures/newsheaff.pdf), (2.6.2012).
- [20] B. Wogsland, *Cherenkov detectors in particle physics*, [http://wogsland.org/physics/present/cherenkov\\_detectors\\_06.pdf](http://wogsland.org/physics/present/cherenkov_detectors_06.pdf), (2.6.2012).