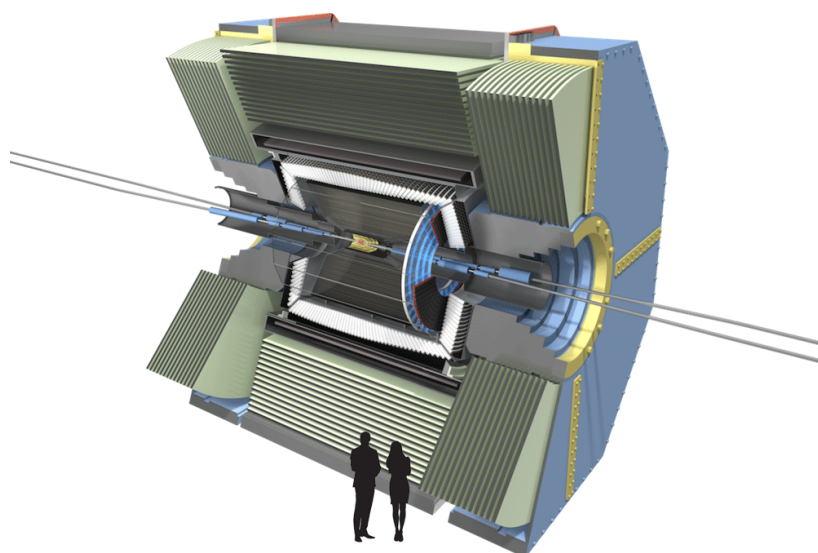


Belle II International Masterclasses

Navodila za dijake

Koliko barv ima kvark?

Pripravil: dr. Luka Šantelj



Ta knjižica predstavlja Standardni model osnovnih delcev, eksperiment Belle II in dejavnost v okviru delavnice, pri kateri iz podatkov o trkih določite število barv kvarkov.

Pripravljeno za nalogo delavnice Belle II o vrednosti R

Kazalo

1 Zakaj fizika delcev?	2
2 Standardni model osnovnih delcev	2
2.1 Delci snovi	2
2.2 Prenašalci sil	3
2.3 Kaj Standardni model pojasni dobro — in česa ne	4
3 Kvarki, gluoni in barvni naboj	4
4 Zakaj so trki elektron–pozitron tako uporabni	5
5 Eksperiment Belle II	5
5.1 Fizikalni cilji eksperimenta Belle II	5
5.2 SuperKEKB: kako ustvariti veliko trkov	5
5.3 Kako deluje detektor Belle II	6
6 Kaj lahko pri trkih nastane?	7
7 Prikazi dogodkov: kako fiziki “vidijo” trk	7
8 Vrednost R	8
8.1 Zakaj je električni naboj pomemben	8
8.2 Od nabojev do vsote prispevkov kvarkov	9
9 Kaj počnete v nalogi delavnice	9
10 Kako prepoznati različne vrste dogodkov	10
10.1 Dogodki s parom mionov	10
10.2 Dogodki s parom tau	10
10.3 Hadronski dogodki iz parov kvarkov	10
10.4 Hitra pregledna tabela	11
11 Zakaj je ta meritev zanimiva	11
12 Navodila po korakih za vašo meritev	11
13 Strani delovnega lista	12
14 Vprašanja za razpravo	13
15 Zaključek	14
16 Primeri vzorčnih dogodkov	15

1 Zakaj fizika delcev?

Fizika delcev se zelo starega vprašanja loteva na zelo sodoben način: *iz česa je zgrajen svet?* Ljudje že tisočletja poskušajo razumeti, ali je snov zvezna ali pa je sestavljena iz vse manjših gradnikov. Danes vemo, da so molekule zgrajene iz atomov, atomi vsebujejo jedra in elektrone, jedra pa so sestavljena iz protonov in nevtronov. Tudi protoni in nevtroni niso osnovni delci: zgrajeni so iz kvarkov.

Toda fizika delcev ni le zgodba o vedno manjših gradnikih. Je tudi zgodba o pravilih, ki urejajo naravo. Zakaj se nekateri delci privlačijo ali odbijajo? Zakaj so nekateri delci stabilni, drugi pa razpadejo skoraj takoj? Zakaj je vesolje pretežno iz snovi, čeprav fizikalni zakoni snov in antimaterijo obravnavajo skoraj enako? Ta vprašanja povezujejo zelo majhno z zelo velikim: obnašanje osnovnih delcev je povezano tudi z zgodovino vesolja.

Za raziskovanje takih vprašanj fiziki uporabljajo pospeševalnike in detektorje. V pospeševalniku delce pospešijo do zelo visokih energij in jih nato trčijo med seboj. Energija trka se lahko pretvori v maso in tako nastanejo novi delci v skladu z Einsteinovo zvezo

$$E = mc^2.$$

Detektor, ki obdaja točko trka, zabeleži sledi in energije nastalih delcev. Iz teh signalov fiziki rekonstruirajo, kaj se je zgodilo v trku, in preverjajo teoretične zamisli na resničnih podatkih.

V tej delavnici boste sodelovali v poenostavljeni različici tega procesa. Opazovali boste dogodke iz trkov elektronov in pozitronov, ugotavljali, kateri fizikalni proces se je zgodil, in iz števila razvrščenih dogodkov ocenili vrednost R . Iz te količine lahko sklepate, koliko barvnih nabojev imajo kvarki.

2 Standardni model osnovnih delcev

Trenutna teorija, ki opisuje znane osnovne delce in tri od štirih temeljnih sil, se imenuje **Standardni model**. Preizkušen je bil v številnih poskusih in je z izjemno natančnostjo napovedal veliko pojavov. Kljub temu ni zadnja beseda o naravi; številna pomembna vprašanja pušča odprta. Prav zato sodobni eksperimenti Standardni model preverjajo čim bolj natančno.

2.1 Delci snovi

Standardni model delce snovi razdeli v dve družini: **kvark** in **lepton**. Razporejeni so v tri generacije, kot prikazuje slika 1. Prva generacija tvori običajno stabilno snov, druga in tretja pa vsebujeta težje sorodnike, ki nastajajo predvsem pri visokoenergijskih procesih in hitro razpadajo.

tri generacije
snovi (fermioni)

	I	II	III	
masa →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
naboj →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
ime →	u gor	c čar	t vrh	γ foton
kvarki	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d dol	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s čudnost	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b dno	0 0 1 g gluon
leptoni	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e elektronski neutrino	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ mionski neutrino	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tauonski neutrino	91.2 GeV ⁰ 0 1 Z šibka sila
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e elektron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ mion	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tauon	80.4 GeV ± 1 1 W[±] šibka sila
				bozoni (sile)

Slika 1: Osnovni delci v Standardnem modelu.

Kvarki se povezujejo v večje delce, ki jim pravimo **hadroni**. Najbolj znana hadrona sta proton in nevtron:

$$\text{proton} = uud, \quad \text{nevtron} = udd.$$

Ker protoni in nevtroni sestavljajo atomska jedra, sta kvarka *gor* in *dol* del snovi okoli nas. Leptoni pa ne čutijo močne interakcije. Najbolj znan lepton je elektron, ki obdaja jedro v atomih in je odgovoren za elektriko, kemijo in velik del vsakdanje tehnologije.

Mion in tau sta težja sorodnika elektrona. Nosita enak električni naboj, vendar sta nestabilna. Njuna pripadajoča nevtrina sta električno nevtralna in z snovjo sodelujeta le prek šibke interakcije, zato ju je zelo težko zaznati.

2.2 Prenašalci sil

Standardni model vsebuje tudi delce, ki posredujejo interakcije:

Sila	Prenašalec
Elektromagnetna sila	foton (γ)
Šibka sila	bozona W^+ , W^- in Z
Močna sila	gluoni (g)

Dodaten delec, **Higgsov bozon**, je povezan s Higgsovim poljem, ki pomaga pojasniti, zakaj imajo številni delci maso. Higgsov bozon so odkrili v CERN-u leta 2012 in s tem potrdili enega zadnjih manjkajočih delov Standardnega modela.

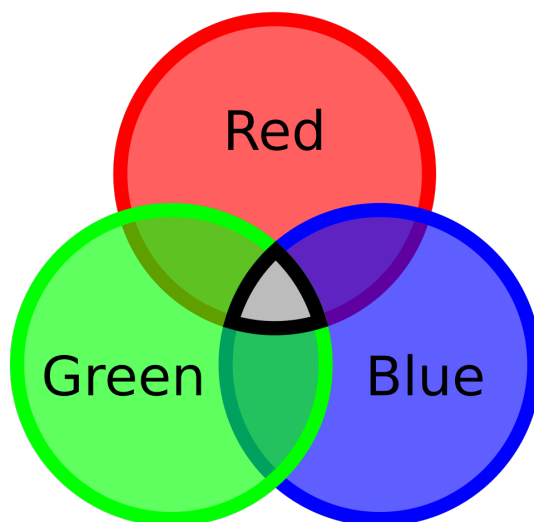
2.3 Kaj Standardni model pojasni dobro — in česa ne

Standardni model uspešno opisuje ogromno količino podatkov. Pojasni na primer, kako medsebojno delujejo elektroni in fotoni, zakaj prihaja do radioaktivnih razpadov in kako so kvarki razporejeni znotraj hadronov. Vendar je nepopoln. Ne pojasni temne snovi, temne energije ali tega, zakaj imajo nevtrini maso. Prav tako ne zna v celoti razložiti opažene prevlade snovi nad antimaterijo v vesolju. To je eden ključnih razlogov za eksperimente, kot je Belle II: z zelo natančnimi meritvami znanih procesov lahko odkrijejo majhna odstopanja od Standardnega modela in morda nakažejo novo fiziko.

3 Kvarki, gluoni in barvni naboj

Močno interakcijo opisuje teorija, imenovana **kvantna kromodinamika** (QCD). V QCD kvarki nosijo vrsto naboja, ki ji pravimo **barvni naboj**. Ime je le oznaka: z vidno svetlobo ali dejanskimi barvami nima nič skupnega. Gre za priročen način opisa tega, kako kvarki sodelujejo prek močne sile.

Za kvarke obstajajo tri možna barvna stanja, ki jih tradicionalno imenujemo rdeča, zelena in modra. Antikvariki nosijo ustrezne protibarve. Gluoni, prenašalci močne sile, se sklapljajo na barvni naboj. Za razliko od fotonov, ki so električno nevtralni, tudi gluoni sami nosijo barvno informacijo, zaradi česar je močna sila še posebej bogata in zapletena.



Slika 2: Pogosta ilustracija treh barvnih stanj v QCD. To so oznake za močni naboj, ne pa vidne barve.

Ena najpomembnejših lastnosti QCD je, da morajo biti prosti delci **barvno nevtralni**. Zato ne opazimo izoliranih kvarkov. Namesto tega so kvarki ujeti znotraj hadronov:

- **Barioni**, kot sta proton in nevtron, vsebujejo tri kvarke v barvno nevtralni kombinaciji.
- **Mezoni** vsebujejo en kvark in en antikvark.

Naloga v tej delavnici se osredotoča na elegantno posledico te slike. Čeprav posameznih kvarkov po nastanku ne moremo opazovati ločeno, je verjetnost, da pri trku elektrona in pozitrona nastane par kvark–antikvark, odvisna od tega, koliko barvnih stanj je na voljo. To pomeni, da lahko število barv določimo eksperimentalno.

4 Zakaj so trki elektron–pozitron tako uporabni

V eksperimentu Belle II elektrone in pozitrone pospešijo v nasprotnih smereh in jih nato pripeljejo do trka. Tak tip trkalnika je v primerjavi s trki proton–proton še posebej čist. Proton je namreč sestavljen delec, ki vsebuje kvarke in gluone, zato je protonski trk zelo neurejen: medsebojno lahko sodelujejo številne različne kombinacije njegovih gradnikov. Elektron in pozitron pa sta osnovna delca, zato je začetno stanje trka znano zelo natančno.

V preprosti sliki elektron in pozitron anihilirata in tvorita navidezni foton (pri ustreznih energijah pa lahko prispeva tudi bozon Z). To vmesno stanje lahko nato tvori par delec–antidelec:

$$e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow P\bar{P}.$$

Nastali par je lahko mionski, tauovski ali pa par kvark–antikvark. Če nastanejo kvarki, ne morejo ostati izolirani. Namesto tega tvorijo hadrone, ki se v detektorju pokažejo kot curki oziroma skupek številnih delcev.

Ključna prednost take postavitve je, da lahko verjetnosti za različna končna stanja primerjamo zelo neposredno. Prav ta primerjava pripelje do vrednosti R , ki jo merite v tej delavnici.

5 Eksperiment Belle II

Belle II se nahaja ob pospeševalniku SuperKEKB v Tsukubi na Japonskem. Gre za veliko mednarodno sodelovanje raziskovalcev iz številnih držav. Eksperiment sledi zelo uspešnemu eksperimentu Belle in je zasnovan za natančne študije fizike težkih okusov, predvsem delcev, ki vsebujejo kvark *dno*.

5.1 Fizikalni cilji eksperimenta Belle II

Pomemben cilj Belle II je preučevanje delcev, ki vsebujejo kvark *dno* (bottom), pogosto imenovan tudi *beauty* kvark. Ti delci so zelo zanimivi, ker so njihovi razpadi lahko občutljivi na težke navidezne delce, ki so pretežki, da bi jih lahko ustvarili neposredno. Tako lahko natančne meritve nakažejo novo fiziko, tudi če nobenega novega delca ne opazimo neposredno.

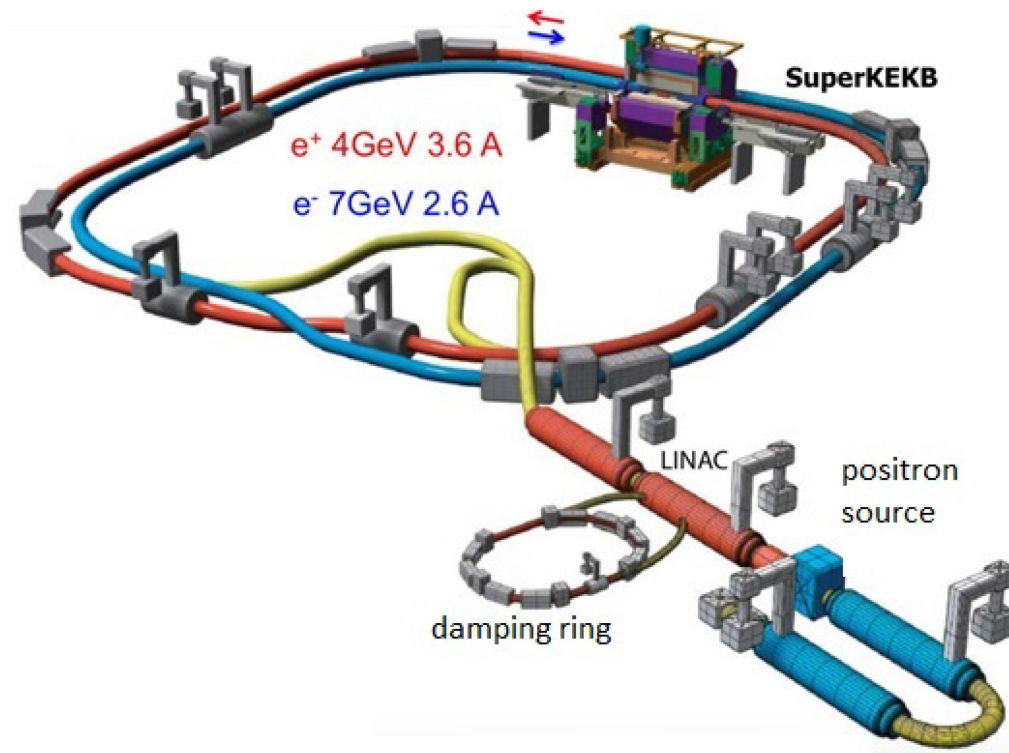
Druga velika tema je **kršitev CP**, torej majhne razlike med obnašanjem snovi in antimaterije. Takšne razlike so bistvene, če želimo razumeti, zakaj je v današnjem vesolju mnogo več običajne snovi kot antimaterije. Eksperimenta Belle in Belle II sta bila zgrajena prav zato, da ta pojav podrobno preučujeta prek razpadov mezonov B in sorodnih delcev.

Belle II preučuje tudi tau leptone, hadrone s t.i. *čarobnim* kvarkom, stanja kvarkonija in redke procese, ki omogočajo zelo natančne preizkuse Standardnega modela. Ker eksperiment zabeleži ogromno število trkov elektron–pozitron, lahko zelo natančno meri redke razpade in subtilne učinke.

5.2 SuperKEKB: kako ustvariti veliko trkov

Pospeševalnik na katerem deluje eksperiment Belle II, se imenuje **SuperKEKB**. Njegova najpomembnejša lastnost je zelo visoka **luminoznost**. Luminoznost je mera za to, koliko možnosti za trk pospeševalnik ustvari v eni sekundi. Večja luminoznost pomeni več podatkov, več podatkov pa pomeni, da postanejo dostopni tudi redki procesi. Za natančne meritve ni dovolj, da nastane nekaj

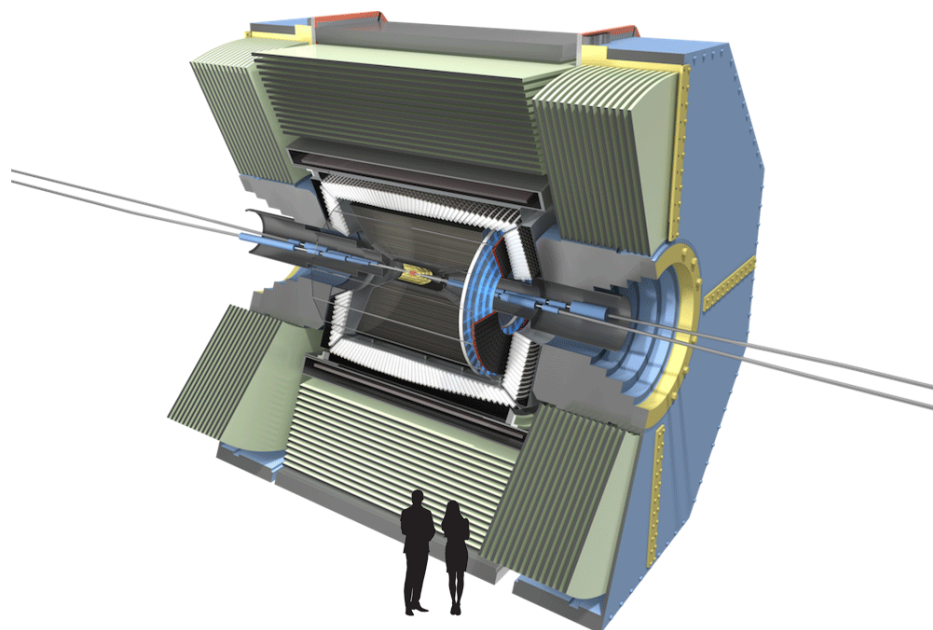
dogodkov; potrebujemo jih na tisoče ali milijone.



Slika 3: Pospeševalnik SuperKEKB, ki zagotavlja elektronski in pozitronski curek za Belle II.

5.3 Kako deluje detektor Belle II

Detektor Belle II obdaja točko trka kot večplastna elektronska kamera. Vsak podsistem je zasnovan tako, da meri drugo lastnost delcev, ki izletijo iz trka.



Slika 4: Detektor Belle II. Različni poddetektorji merijo tirnice, energije in identiteto delcev.

Detektor razpadnih verteksov

Meri sledi delcev zelo blizu točke interakcije. Ključen je za iskanje zamaknjenih razpadnih

verteksov kratkoživih delcev.

Centralna sledilna komora

Rekonstruira ukrivljene poti nabitih delcev v magnetnem polju. Iz ukrivljenosti lahko določimo gibalno količino.

Sistemi za identifikacijo delcev

Pomagajo ločiti med pioni, kaoni in drugimi nabitimi delci.

Elektromagnetni kalorimeter

Meri energijo elektronov in fotonov tako, da jih absorbira in zabeleži nastali plaz sekundarnih delcev.

Detektor mionov in K_L

V zunanjih plasteh detektorja prepoznava prodorne delce, kot so mioni.

S kombiniranjem informacij iz vseh teh podsistemov lahko fiziki rekonstruirajo, kakšni delci so nastali in kako so razpadli.

6 Kaj lahko pri trkih nastane?

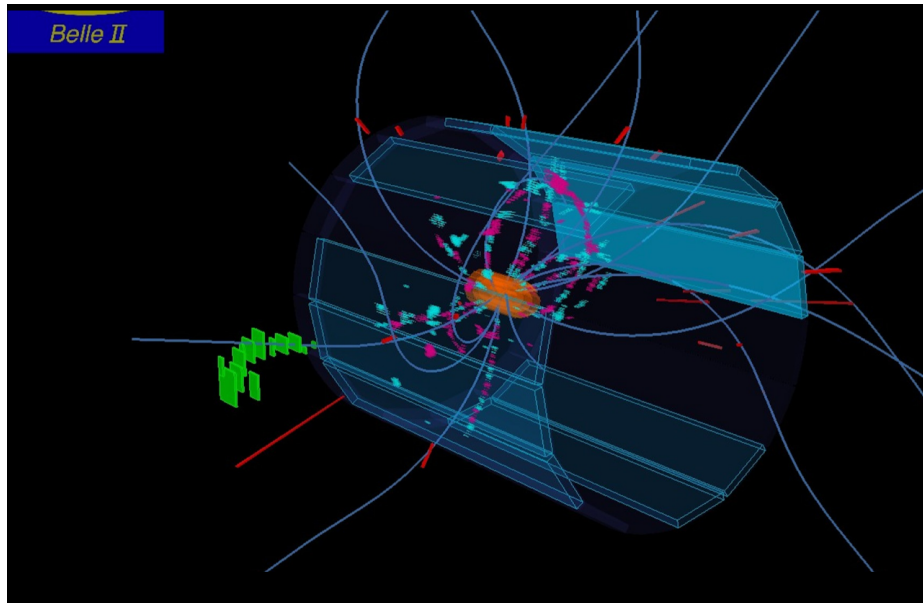
Če je energija trkov dovolj velika, lahko na primer nastanejo

$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-, \quad e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-, \quad e^+e^- \rightarrow q\bar{q}.$$

Pri leptonih detektor pogosto pokaže razmeroma preproste topologije. Pri hadronskih dogodkih, ki izvirajo iz kvarkov, pa običajno nastane veliko delcev, ker kvark in antikvark hadronizirata, nastali hadroni pa lahko nato še naprej razpadejo. Dostopna končna stanja so odvisna od energije trka. Pri nižjih energijah lahko nastanejo le najlažji pari delcev. Ko energija narašča, postanejo kinematsko možni tudi težji okusi.

7 Prikazi dogodkov: kako fiziki “vidijo” trk

Dogodka trka ne fotografiramo v običajnem pomenu besede. Namesto tega detektor zabeleži signale v številnih elektronskih kanalih. Programska oprema nato iz teh signalov rekonstruira sledi in energijske depozite ter jih prikaže v poenostavljeni vizualni obliki. Takšni vizualizaciji pravimo **prikaz dogodka**.



Slika 5: Primer prikaza dogodka iz Belle II. Prikazi dogodkov pomagajo dijakom in fizikom pri razvrščanju topologij trkov.

V prikazu dogodka dolge ukrivljene črte običajno predstavljajo nabite delce, ki se gibljejo skozi magnetno polje. Grozdi v kalorimetru kažejo, kje so delci odložili energijo. Manjkajoča energija ali gibalna količina lahko namiguje na delce, kot so nevtrini, ki uidejo iz detektorja, ne da bi pustili neposreden signal.

Ko v delavnici razvrščate dogodke, uporabljate enako osnovno strategijo kot poklicni fiziki: prepoznate vzorce, jih primerjate s pričakovanimi podpisi in na podlagi informacij iz detektorja poskusite čim bolj določiti do katerega procesa je v dogodku prišlo.

8 Vrednost R

Osrednja opazovana količina v tej nalogi je **vrednost** R . Definiramo jo kot primerjavo med nastajanjem kvarkov in nastajanjem leptonov pri trkih elektrona in pozitrona. Ker se neznani skupni faktor v razmerju izniči, se lahko o naravi nastalih delcev veliko naučimo že samo s štetjem, kako pogosto se pojavijo različne vrste dogodkov.

V zapisu fizike delcev zapišemo vrednost R kot

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadroni})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}.$$

Tukaj σ predstavlja t.i. presek, torej verjetnost, da se proces zgodi. Pri vaši nalogi absolutnih presekov ne določimo neposredo, ampak določimo vrednost R s pomočjo štetja razvrščenih dogodkov.

8.1 Zakaj je električni naboj pomemben

V okviru Standardnega modela je pogostost nastajanja posameznega para delcev pri procesu, posredovanem s fotonom, sorazmerna s kvadratom električnega naboja nastalega delca. Če ima delec P

naboj Q_P , potem velja

$$N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow P\bar{P}) \propto Q_P^2.$$

Za relevantne kvarke in leptone imamo

$$Q_u = Q_c = +\frac{2}{3}, \quad Q_d = Q_s = Q_b = -\frac{1}{3}, \quad Q_\mu = Q_\tau = -1.$$

Torej, če za trenutek zanemarimo vse zaplete razen naboja, nastane par kvarkov *gor* štirikrat pogosteje kot par kvarkov *čudnost*, saj

$$\left(\frac{2}{3}\right)^2 = \frac{4}{9}, \quad \left(\frac{1}{3}\right)^2 = \frac{1}{9}.$$

8.2 Od nabojev do vsote prispevkov kvarkov

Predpostavimo, da je energija trka dovolj visoka za nastanek štirih okusov u , d , s in c . Potem je skupni prispevek kvarkov sorazmeren z

$$\left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{2}{3}\right)^2 = \frac{4}{9} + \frac{1}{9} + \frac{1}{9} + \frac{4}{9} = \frac{10}{9}.$$

V Standardnem modelu kvarki obstajajo v več barvah (kot predstavljeno v poglavju 3), elektromagnetna interakcija pa je na barvo "slepa". To pomeni, da lahko isti okus kvarka nastane v vsakem možnem barvnem stanju, zato se hitrost nastajanja kvarkov pomnoži s številom barv. Če označimo to število z N_c dobimo

$$R = N_c \left[\left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{2}{3}\right)^2 \right] = N_c \cdot \frac{10}{9}.$$

Če so barve tri, potem

$$R = 3 \cdot \frac{10}{9} = \frac{10}{3} \approx 3.3.$$

To je ključna teoretična zveza za meritve v tej delavnici.

9 Kaj počnete v nalogi delavnice

V praksi je vaša naloga pregledati prikaze dogodkov in vsakemu pripisati najverjetnejši fizikalni proces. V tej vaji so najpomembnejše kategorije:

- dogodki s parom mionov,
- dogodki s parom tauov,
- hadronski dogodki, ki izvirajo iz nastanka para kvark–antikvark.

Ko razvrstite vse dodeljene dogodke, preštejete, koliko jih spada v posamezno kategorijo. V poenostavljeni obliki velja

$$R \approx \frac{N(\text{hadronski dogodki})}{\frac{1}{2}[N(\mu^+\mu^-) + N(\tau^+\tau^-)]}.$$

Povprečenje prek obeh leptonov zmanjša vpliv napačne razvrstitve in upošteva dejstvo, da naj bi v tej poenostavljeni sliki pari mionov in pari tauov pri ustreznih energijah nastajali enako pogosto.

10 Kako prepoznati različne vrste dogodkov

Noben prikaz dogodka ni popolnoma preprost in resnični podatki vedno vsebujejo nekaj dvoumnosti. Kljub temu je nekaj značilnih vzorcev zelo uporabnih.

10.1 Dogodki s parom mionov

Mionski pari so običajno videti čisti. Ker sta v končnem stanju le dva nabita delca, pogosto vidimo dve približno nasprotno usmerjeni sledi. Mioni so prodorni delci, zato v elektromagnetnem kalorimetru običajno pustijo razmeroma malo energije v primerjavi z elektroni.

Značilni znaki:

- dve jasni, nasprotni sledi;
- malo dodatne aktivnosti v detektorju;
- ne veliko manjkajoče gibalne količine.

10.2 Dogodki s parom tau

Tau leptoni razpadejo zelo hitro, pogosto na enega ali več lažjih delcev ter nevtrine. Ker nevtrini uidejo iz detektorja, imajo tauovski dogodki lahko manjkajočo energijo ali manjkajočo gibalno količino. Vidna aktivnost je lahko še vedno precej skromna v primerjavi s hadronskimi dogodki, vendar manj čista kot pri preprostemu paru mionov.

Značilni znaki:

- majhno število vidnih sledi, pogosto dve do štiri;
- navidezno neravnovesje, ker nevtrinov ne zaznamo;
- oblika dogodka je manj preprosta kot pri čistem dvoslednem mionskem dogodku.

10.3 Hadronski dogodki iz parov kvarkov

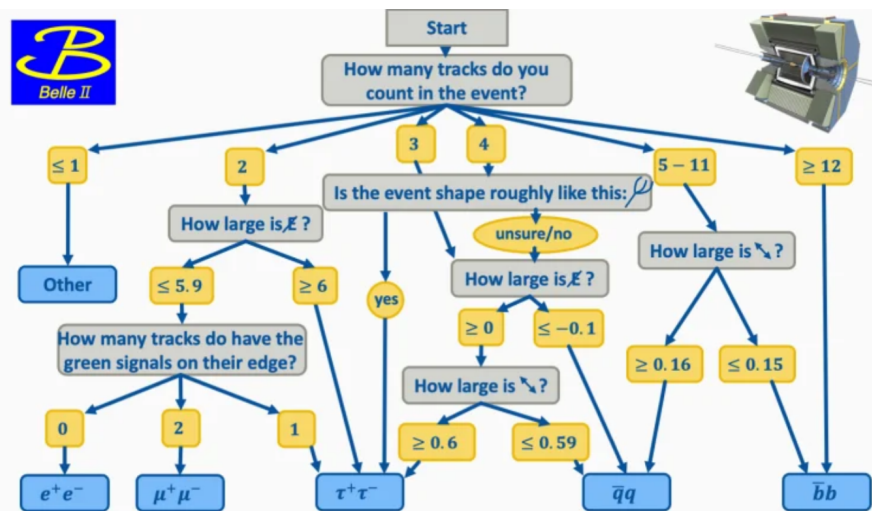
Ko nastane par kvark–antikvark, kvarka hadronizirata v veliko hadronov. Zato imajo hadronski dogodki običajno veliko sledi in energijskih depozitov. Glede na dogodek lahko vidimo dva širša curka delcev ali pa bolj zapleteno topologijo.

Značilni znaki:

- veliko sledi;
- opazna aktivnost v kalorimetru;
- splošen videz je precej bolj “zaposlen” kot pri preprostemu leptonskem dogodku.

10.4 Hitra pregledna tabela

Vrsta dogodka	Kaj pogosto vidite	Na kaj bodite pozorni
$\mu^+\mu^-$	Dve nasprotno usmerjeni sledi, malo dodatne aktivnosti	Lahko ga zamenjamo s preprostim elektronskim ali tauovskim dogodkom
$\tau^+\tau^-$	Malo vidnih sledi, pogosto manjkajoča energija zaradi nevtrinov	Deluje manj uravnoteženo kot mionski pari
Hadronski $q\bar{q}$	Veliko sledi in gruč, živahen dogodek	Tudi nekateri manj številčni hadronski dogodki so lahko zahtevni



Slika 6: Odločitveni diagram za razvrščanje dogodkov.

11 Zakaj je ta meritev zanimiva

Število barv kvarkov ni le podrobnost. Gre za temeljno lastnost močne interakcije. Če bi kvarki imeli le eno barvo, bi bile opažene pogostosti v trkih elektron–pozitron zelo drugačne. Če bi jih imeli pet, bi bila vrednost R večja od tiste, ki jo kažejo eksperimenti.

To je lep primer, kako fizika delcev pogosto deluje. Barve ne “vidimo” neposredno. Namesto tega izmerimo skrbno izbrano opazovano količino in za razlago uporabimo teorijo. Kombinacija preprostega štetja odzivov v detektorju in jasnega teoretičnega argumenta naredi nalogo z vrednostjo R zelo močan uvod v resnično eksperimentalno razmišljanje.

12 Navodila po korakih za vašo meritev

- Oglejte si en prikaz dogodka naenkrat.
- Odločite se, ali je dogodek bolj podoben leptonskemu ali hadronskemu dogodku.
- Če je bolj podoben leptonskemu dogodku, se odločite, ali je bolj skladen s parom mionov ali parom tauov.
- Svojo odločitev zapišite v delovni list.

5. Ponovite za vse dodeljene dogodke.
6. Preštejte skupno število hadronskih, mionskih in tauovskih dogodkov.
7. Izračunajte eksperimentalno vrednost R z izrazom

$$R \approx \frac{N(\text{hadronski})}{\frac{1}{2} [N(\mu^+\mu^-) + N(\tau^+\tau^-)]}$$

8. Primerjajte izmerjeno vrednost s teoretičnim pričakovanjem

$$R = N_c \cdot \frac{10}{9}.$$

9. Izrazite N_c in se pogovorite, ali je vaš rezultat skladen s tremi barvami.

13 Strani delovnega lista

Uporabite spodnje tabele za zapisovanje svojih razvrstitev. Dodajte kratke opombe, če je bil dogodek težaven ali dvoumen.

Zapisnik dogodkov, stran 1

Dogodek	Razvrstitev	Opombe
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		

23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40

Povzetek in račun

Skupno število hadronskih dogodkov: _____

Skupno število mionskih dogodkov: _____

Skupno število tauovskih dogodkov: _____

Eksperimentalna vrednost R :

$$R \approx \frac{N(\text{hadronski})}{\frac{1}{2} [N(\mu^+\mu^-) + N(\tau^+\tau^-)]} = \underline{\hspace{10em}}$$

Ocenjeno število barv kvarkov:

$$N_c \approx \frac{9}{10} R = \underline{\hspace{10em}}$$

14 Vprašanja za razpravo

Ko vse skupine končajo, primerjajte svoje rezultate.

- Kako blizu je vaša izmerjena vrednost R teoretičnemu pričakovanju za tri barve?
- Katere dogodke je bilo najtežje razvrstiti in zakaj?
- Bi združevanje rezultatov številnih skupin izboljšalo meritev? Zakaj?
- Katere predpostavke smo uporabili v preprosti izpeljavi vrednosti R v tej vaji?
- Zakaj je znanstveno smiselno iz razmerja med številom dogodkov sklepati na nevidno lastnost,

kot je barvni naboj?

15 Zaključek

V tej delavnici uporabite resnično idejo iz eksperimentalne fizike delcev: primerjate pogostosti dogodkov, jih povežete s teoretično napovedjo in iz tega sklepate o temeljni lastnosti narave. Rezultat je eden klasičnih uspehov Standardnega modela in kvantne kromodinamike. Kvarci imajo tri barve. Teh barv v detektorju ne opazite neposredno, vendar njihov obstoj spremeni število hadronskih dogodkov, ki se pojavijo pri trkih elektron–pozitron. To je močna lekcija o tem, kako deluje fizika: skrbna meritev v kombinaciji z jasno teorijo lahko razkrije lastnosti sveta, ki bi sicer ostale skrite.

16 Primeri vzorčnih dogodkov

Ostale dogodke najdete v priloženih prosojnicah.

