

Belle II International Masterclasses

3.3.2021

Institut Jožef Stefan – preko ZOOM povezave

Analiza podatkov v fiziki osnovnih delcev

Iskanje novih delcev z detektorjem Belle II

dr. Rok Pestotnik,

Institut Jožef Stefan, Odsek za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev, Ljubljana

Kazalo

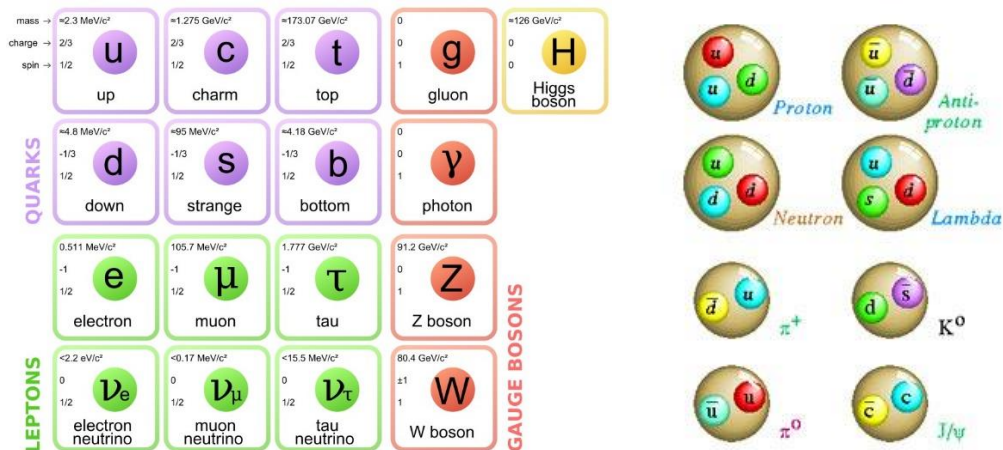
Uvod	1
Naloge.....	4
1. naloga – kakšne delce imamo v vzorcu	4
2. naloga – porazdelitve po masah osnovnih delcev.....	6
3. naloga – dvodelčni razpad na dva fotona.....	6
4. naloga – dvodelčni razpad na dva piona	7
5. naloga – dvodelčni razpad na dva kaona	7
6. naloga – dvodelčni razpad na elektron in pozitron oziroma na dva miona	8
7. naloga – dvodelčni razpad na kaon in pion	8
8. naloga – razpad nabitega mezona B.....	8
9. naloga – razpad vzbujenega mezona D*	8
Delovni list	9
Seznam najpogostejših osnovnih delcev z masami.....	10

Uvod

Fizika osnovnih delcev preučuje, kaj so osnovni gradniki našega vesolja in kakšne so osnovne sile, ki delujejo med njimi. Odgovore na ta vprašanja iščemo fiziki tudi na eksperimentih, ki jih izvajamo na pospeševalnikih.

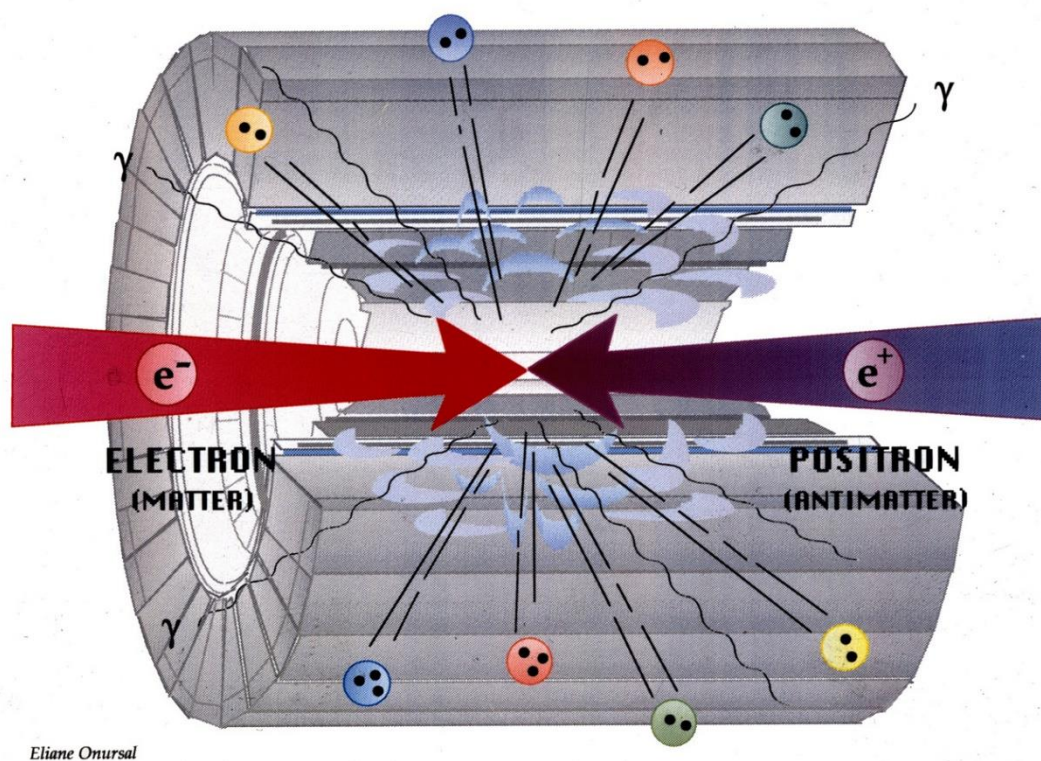
Osnovni gradniki narave so po Standardnem modelu, danes veljavni teoriji, kvarki in leptoni, sile med njimi pa prenašajo umeritveni bozoni. Delec opišemo z njegovo maso, električnim nabojem in spinom, notranjo vrtilno količino, ki jo lahko v makroskopskem svetu ponazorimo z vrtenjem okoli

svoje osi. Vsakemu delcu ustreza antidelec, ki se od delca razlikuje po nasprotnem električnem naboju in spinu. Tako elektronu ustreza antidelec pozitron, kvarku antikvark, nekateri delci, na primer foton pa so sami sebi antidelci. Kvarkov samih v naravi ne najdemo, vedno se združijo po dva ali pa trije v težje delce – hadrone. Hadrone s tremi kvarki imenujemo barione, z dvema pa mezone. Tudi ti delci imajo svoje partnerje iz anti snovi, tako na primer protonu ustreza antiprotion in pozitivnemu pionu negativni pion. Težji delci so nestabilni in hitro razpadajo v lažje.

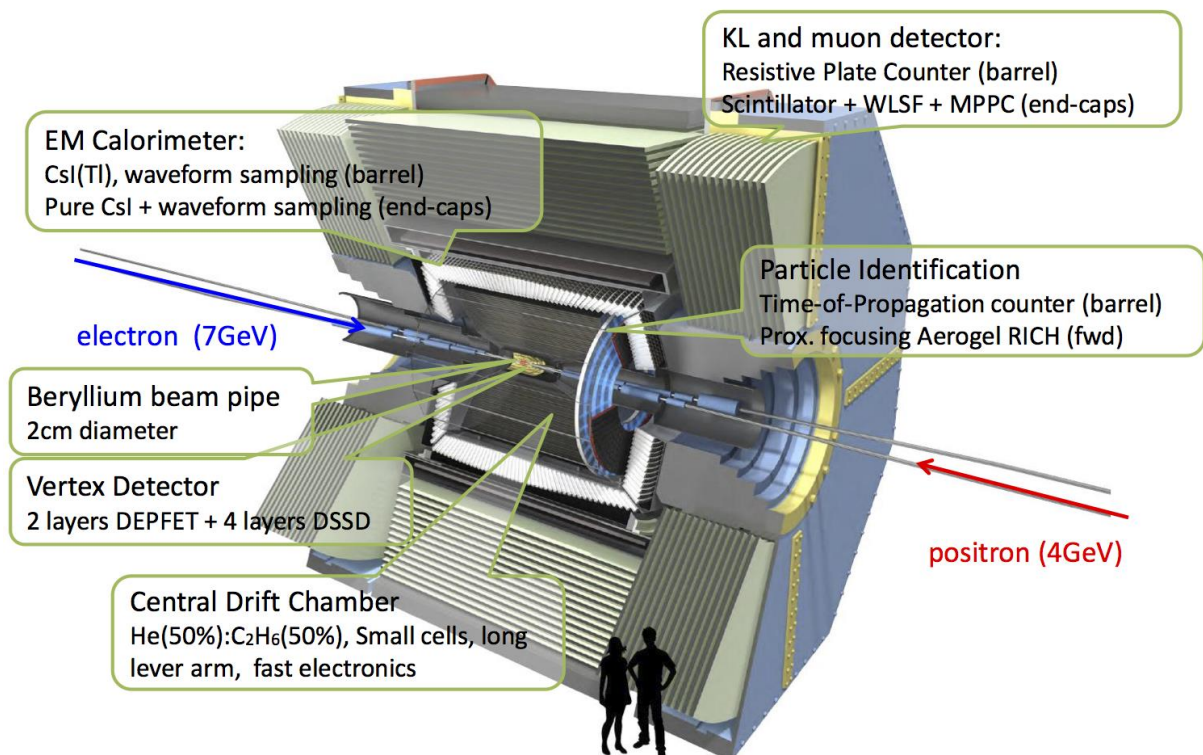


V današnji delavnici si bomo pogledali, kako v fiziki osnovnih delcev poteka analiza podatkov, ki jih izmerimo pri trkih visokoenergijskih delcev. Kot primer si bomo ogledali podatke z eksperimenta Belle, ki je v preteklem desetletju s detektorjem Belle zajemal podatke na pospeševalniku KEKB v Cukubi na Japonskem.

V pospeševalniku v nasprotnih smereh v curkih s skoraj svetlobno hitrostjo krožijo elektroni in njihovi antidelci pozitroni. Curka se v interakcijski točki križata, pri tem pa prihaja do trkov elektronov in pozitronov. Delca pri tem reagirata, se izničita – reakciji pravimo anihilacija, iz razpoložljive energije nastanejo novi delci, ki odletijo v različnih smereh, težji delci pa hitro razpadejo. Najbolj enostaven je dvodelčni razpad, pri čemer delec razpade na dva delca. Tem razpadom se bomo posvetili danes.



Belle II Detector



Detektor Belle je postavljen okoli interakcijske točke. Sestavlja ga velikanska tuljava, ki v notranjosti ustvarja magnetno polje z gostoto 1.5 T in več sistemov, ki zaznajo prelet delcev. Magnetna sila, ki deluje na nabite delce, sledi nabitih delcev ukrivi. Če na pot delcev postavimo detektor, kjer z veliko natančnostjo zaznamo koordinato preleta delca, lahko iz ukrivljenosti na ta način določimo gibalno količino delcev. Zato takemu detektorju pravimo tudi spektrometer. Poleg sledilnih sistemov se v spektrometru nahajajo še sistemi za identifikacijo delcev, ki preko značilnih fizikalnih procesov določijo maso delcev.

Z detektorjem lahko neposredno zaznamo samo delce, ki so dovolj dolgoživi, da letijo ven iz detektorja. Sem spadajo 5 vrst električno nabitih delcev: elektron (e), mion (μ), pion (π), kaon (K) in proton (p), njihovi antidelci in nevtralni delec foton (γ). Preostale delce, ki so nastali ob trku moramo rekonstruirati (sestaviti) iz njihovih razpadnih produktov. Delec opišemo z njegovo maso in električnim nabojem, njegovo gibanje pa s hitrostjo, gibalno količino oziroma energijo. Količine izračunamo iz izmerjenih električnih signalov, ki jih delci pustijo v spektrometru.

Danes si bomo ogledali, kako poteka iskanje novih delcev. Uporabili bomo del podatkov, ki smo jih izmerili z detektorjem Belle. Podatki so že delno prebavljeni, električni signali, ki smo jih zaznali z detektorjem, so že pretvorjeni v podatke delce. Na razpolago imate dva vzorca podatkov: v prvem [hadron-1.root](#) z velikostjo 193MB je shranjenih 629.000 dogodkov, v drugem [hadron-2.root](#) z velikostjo 1.6 GB pa 5.6 milijona dogodkov. Med vami in podatki bo vmesnik, ki omogoča, da iz podatkov izberete eno vrsto delcev in po dva združite v novega. Za vsakega od delcev lahko narišite različne porazdelitve.

S pravilnim opisom razpada boste na ta način lahko našli delce, ki jih z detektorjem nismo neposredno zaznali, smo pa zaznali njihove razpadne produkte.

Vmesnik se nahaja na naslovu <http://belle2.ijs.si/masterclass>, ker pa bi bila analiza prepočasna, če bi jo na strežniku vsi udeleženci poganjali hkrati, smo za delo v skupini pripravili virtualni računalnik, ki vam omogoča izvedbo analize na vašem računalniku. Za delovanje moramo na računalniku pognati VirtualBox in s pritiskom na gumb Start pognati virtualni računalnik Belle2Lab. Potem z iskalnikom Firefox znotraj virtualnega računalnika odpremo stran <http://localhost> in pričnemo z delom.

Naloge

1. naloga – kakšne delce imamo v vzorcu

Različni delci imajo različne mase. Maso visoko energijskega delca lahko izračunamo iz energije delca (E) in gibalne količine delca (p), ki smo ju izmerili v detektorju in sta zapisani v podatkih:

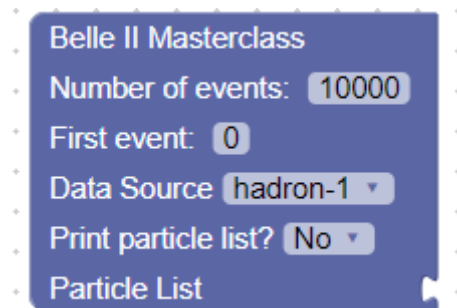
$$mc^2 = \sqrt{E^2 - p^2 c^2}$$

Na ta način nam maso delca izračuna iz podatkov tudi naš program.

Najprej si bomo pogledali, kakšni so delci, ki smo jih zaznali v detektorju. Za vsak dogodek bomo izpisali listo nastalih delcev in nato narisali frekvenčno porazdelitev (temu fiziki rečemo histogram) po njihovi masi. Iz porazdelitve lahko vidimo, kakšne delce, ki so nastali ob trku, smo zaznali in kako pogosto se pojavljajo.

Kako to naredimo? Za začetek moramo z bloki opisati, kaj želimo narediti.

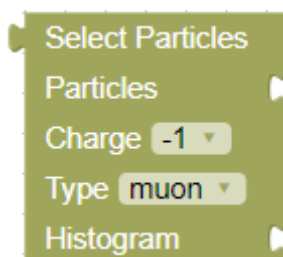
S krovnim blokom BelleII Masterclass kontroliramo osnovne parametre. Iz zavihka iz zavihka Analysis z miško povlečemo blok **Belle II Masterclass** na glavno polje. Analizo poženemo s pritiskom na gumb Run Analysis. Analiza se izvede na strežniku oziroma na domačem računalniku.



Bloku določimo podatkovni vzorec in število dogodkov, ki jih želimo pregledati. Ker je pregledovanje več dogodkov časovno zamudno, na začetku vedno preizkusimo naš proces na manj dogodkih.

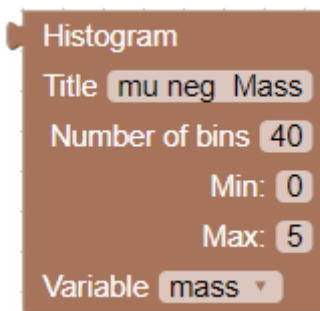
- A) Za začetek poženemo z ukazom Run Analysis prazen blok. Vrnem nam število sprocesiranih dogodkov in delcev v podatkih in povprečno število delcev na dogodek.
- B) Če vključimo še Print particle list, dobimo za prvih 100 dogodkov izpis osnovne liste rekonstruiranih delcev za vsak dogodek. Poskusi! Poleg liste delcev dobimo v tem primeru še porazdelitev po številu rekonstruiranih delcev za vsak dogodek. Narisan histogram ima funkcijo povečave, ki omogoča, da zanimivo območje na njem povečate. Sliko histograma lahko tudi shranite.

Osnovnemu bloku pripnemo listo delcev. Zanko preko te liste bo analizni proces naredil za vsak dogodek. Iz zavihka Particles z miško povlečemo na polje blok **Select Particles**, ki nam omogoča izbiro vrste in naboja delcev z vhodnega seznama delcev.

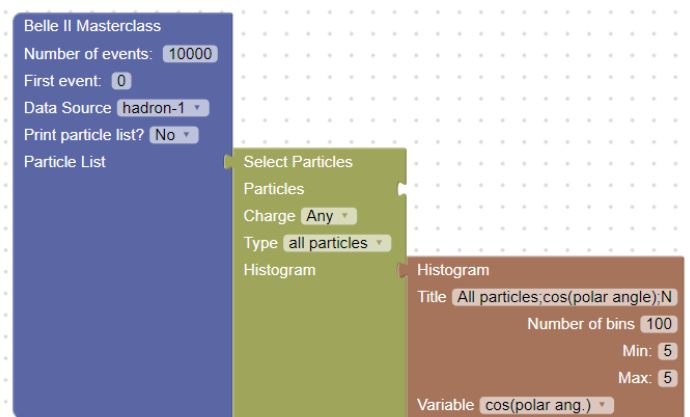


Če bloku ne pripnemo nobenega posebnega seznama, izbiramo delce iz osnovnega seznama. Če kot tip delcev izberemo all particles, s tem izberemo katerikoli delec s seznama. V osnovnem seznamu delcev se ne nahajajo vsi delci, ki jih lahko izberete v **Select Particles**. Te bomo dobili s kombinacijami več delcev.

Bloku lahko pripnemo blok **Histogram**, ki nam omogoča risanje frekvenčnih porazdelitev različnih količin delcev. Histogramu lahko nastavimo naslov, število frekvenčnih razredov, interval, na katerem vzorčimo in spremenljivko, ki jo vzorčimo. Če sta zgornja in spodnja meja enaki, bo program sam izbral mejo tako, da bodo vsebovani vsi podatki.



Histogramu lahko prilagodite tudi funkcijo. S pritiskom na **Show fit panel** se vam odprejo polja, kamor vpišete funkcijo, meje območja za prilagajanje (če je max manjši ali enak min, program prilagaja funkcijo na celotnem območju) in začetne vrednosti parametrov (neobvezno).



V tej nalogi si pogledj, kakšni delci se nahajajo v listi v podatkih. Za to vzemi osnovno listo in jo umesti v blok **Belle II Materclass**, podobno kot v zgornjem primeru. Nariši porazdelitev vseh delcev po njihovi masi oziroma identiteti (izberi tip delcev all particles). Potem spreminjaj vrsto delcev in si pogledj porazdelitve na območjih od 0 GeV/c² do 3 GeV/c² in od 0 GeV/c² do 0.0005 GeV/c², ki ustreza fotonu in elektronu.

2. naloga – porazdelitve po masah osnovnih delcev

Nariši porazdelitve po masi delcev za: a) pione , b) nevtralne pione in c) nabite pione . Poskusi pognati analizo za različno število dogodkov.

3. naloga – dvodelčni razpad na dva fotona

Pri prejšnjih dveh nalogah smo maso delcev izračunali iz energije in gibalne količine. Pri eksperimentu izmerimo gibalno količino delcev, energijo pa izračunamo iz mase delca. Pri tej nalogi si bomo ogledali iskanje delcev, ki razpadejo v dva delca. V tem primeru lahko maso (m) delca, ki je razpadel, izračunamo iz gibalne količine in energije nastalih delcev (indeksi označujejo prvi oziroma drugi delec):

$$mc^2 = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (p_1 + p_2)^2 c^2}$$

Analizni program bo za dva delca sam izračunal maso, tako da vam ne bo treba računati.

Primer dvodelčnega razpada je razpad nestabilnega nevtralnega piona π_0 , ki takoj razpade v dva fotona γ . Da ga najdemo, narišemo porazdelitev po masi za kombinacijo dveh fotonov. V porazdelitvi opazimo vrh pri masi 0.135 GeV/c², ki ustreza masi nevtralnega piona.

S pomočjo bloka **Combine 2 particles** nariši porazdelitev po masi za dva fotona γ . S spreminjanjem masnega intervala povečaj območje okoli vrha. Ker vemo, da sta obe listi delcev enaki in je izračunana masa enaka (kombinaciji x_1x_2 in x_2x_1 sta enaki), upoštevamo vsak par delcev s seznama samo enkrat. To naredimo z izbiro Same particle lists? Yes.

Masa nevtralnega piona pri prvih dveh nalogah je bila konstantna, pri tej pa ima končno širino zaradi napake pri meritvi gibalne količine fotona. Ker vemo, da je masa nevtralnega piona konstantna, lahko po identifikaciji nevtralnega piona izračunamo njegovo energijo.

Vrh nevtralnega piona je naložen na ozadje. Fotoni, ki smo jih identificirali kot otroke nevtrálnih pionov, ostanejo v podatkih in se pojavijo tako v listi fotonov in v listi nevtrálnih pionov.

4. naloga – dvodelčni razpad na dva piona

Nevtralni mezon K_s (kaon) ima maso 0.498 GeV and razpade na dva nabita piona (π^+ in π^-). Na isti način kot pri prejšnji nalogi, nariši porazdelitev po masi delca, ki ga dobiš s kombinacijo pozitivnega in negativnega nabitega piona. Poišči vrh pri energiji 0.498 GeV. V tem primeru listi delcev nista enaki, zato seveda izberemo same particle list No.

Nevtralni kaon v rekonstruiranih podatkih, ki jih uporabljaš, je bil identificiran na ta način. V pravi analizi lahko z uporabo drugih zahtev še bolj znižaš nivo ozadja. Nabitih pionov, ki smo jih identificirali kot otroke kaonov, v naši analizi ne odstranimo s seznama nabitih pionov. Na ta način jih registriramo dvakrat.

5. naloga – dvodelčni razpad na dva kaona

Nekateri mezoni imajo večjo maso kot mezon K (kaon). Primer je mezon ϕ z maso 1.02 GeV/c². Delec je sestavljen iz kvarka s in anti kvarka s in razpade v dva nabita kaona (K^+ and K^-). Podobno kot pri prejšnji nalogi nariši porazdelitev po masi za kombinacije dveh kaonov K^+ in K^- in poišči mezon ϕ .

6.naloga – dvodelčni razpad na elektron in pozitron oziroma na dva miona

Delec J/ψ je sestavljen iz kvarka c in anti-kvarka $\bar{c}$ in ima maso $3.10 \text{ GeV}/c^2$. J/ψ razpade na pozitron in elektron ali pa na pozitivni in negativni mion μ ($J/\psi \rightarrow e^+ e^-$ ali $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$). V podatkih poišči delce J/ψ . Ker je verjetnost za nastanek delca J/ψ majhna, boš moral pregledati vsaj 100,000 dogodkov.

7.naloga – dvodelčni razpad na kaon in pion

Čarobni kvark c in lahki kvarki (u in d) sestavljajo mezone D z maso of $1.86 \text{ GeV}/c^2$. Nevtralni mezon D^0 mezon razpade na nabite kaone K in na nabite pione π . Poišči v podatkih nevtralne mezone D^0 . Zaradi ohranitve naboja je vsota naboja pred in po interakciji enaka. Ker je začetni mezon D^0 nevtralen, sta možni kombinaciji pred in po razpadu $K^+\pi^-$ in $K^-\pi^+$.

8. naloga – razpad nabitega mezona B

Pri eksperimentu Belle smo študirali različne razpade mezonov B . Mezoni B lahko razpadejo na več sto različnih načinov. V tej nalogi si bomo pogledali razpad nabitega mezona B v delec J/ψ in mezon K ($B^+ \rightarrow J/\psi K^+$). Tako kot pri 6.nalogi, J/ψ razpade na pozitron e^+ and elektron e^- oziroma na pozitivni in negativni mion μ^+ in μ^- . S kombinacijo J/ψ s kaonom K^+ bomo poskusili odkriti mezon B . Pri izbiri delcev, ki so nastali iz J/ψ moramo biti pozorni, da izberemo le tiste kombinacije, ki imajo invariantno maso v okolici prave mase J/ψ . To dosežemo s primerno nastavitvijo parametrov Min mass in Max mass v bloku **Combine 2 particles**.

Pri študiju razpada $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ si poglej še razpad $B^- \rightarrow J/\psi K^-$ in si poglej porazdelitev po invariantni masi.

9.naloga – razpad vzbujenega mezona D^*

V 7. nalogi smo iskali delec D^0 . $D^*(2010)$, ki je sestavljen is čarobnega kvarka c in u in d kvarka in ima pozitivni oz negativni naboj. Je težji od mezonov d . Njihova masa je $2.01 \text{ GeV}/c^2$ in hitro razpadejo na nevtralne mezone D (D^0) in nabite pione π .

$$\begin{aligned} D^{*+} &\rightarrow D^0 \pi^+ \\ D^{*-} &\rightarrow D^0 \pi^- \\ D^0 &\rightarrow K^+\pi^- / K^-\pi^+ \end{aligned}$$

S kombinacijo treh delcev poiščite delec D^* . Analiza je podobna kot pri nalogi 8.

Delovni list

- Za vsak delec določi njegovo maso iz vrha v porazdelitvi po invariantni masi.
- Zapiši si število dogodkov, ki si jih pregledal.
- Število delcev oceni iz števila zadetkov v vrhu (seštej število zadetkov v kanalih, ki se nahajajo v območju ± 3 sigma od vrha)
- Širino vrha oceniš z širino vrha na polovični višini.

Delec	Ime delca	Kvarkovska sestava	Proces	Masa (GeV/c ²)	Število pregledanih dogodkov	Število zaznanih delcev	Širina vrha (GeV)
π^0		$\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$	$\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$				
Ks		$\frac{1}{\sqrt{2}}(d\bar{s} + \bar{d}s)$	$K_s \rightarrow \pi^+ \pi^-$				
ϕ		$s\bar{s}$	$\phi \rightarrow K^+ K^-$				
J/ ψ		$c\bar{c}$	$J/\psi \rightarrow e^+ e^-$				
			$J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$				
D ⁰		$c\bar{u}$	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$				
			$D^0 \rightarrow K^- \pi^+$				
D ^{*+}		$c\bar{d}$	$D^{*+} \rightarrow D^0 \pi^+$				
D ^{*-}		$d\bar{c}$	$D^{*-} \rightarrow D^0 \pi^-$				
B ⁺		$u\bar{b}$	$B^+ \rightarrow J/\psi K^+$				
B ⁻		$\bar{u}b$	$B^- \rightarrow J/\psi K^-$				
Λ		uds	$\Lambda \rightarrow p \pi^-$				
Σ^+		uus	$\Sigma^+ \rightarrow p \pi^0$				

Seznam najpogostejših osnovnih delcev z masami

Current values for elementary fermion masses

Particle Symbol	Particle name	Mass Value	Quark mass estimation scheme (point)
ν_e, ν_μ, ν_τ	Neutrino (any type)	unknown	
e^-	Electron	0.511 MeV/c ²	
u	Up quark	1.9 MeV/c ²	MSbar scheme ($\mu_{\overline{MS}} = 2 \text{ GeV}$)
d	Down quark	4.4 MeV/c ²	MSbar scheme ($\mu_{\overline{MS}} = 2 \text{ GeV}$)
s	Strange quark	87 MeV/c ²	MSbar scheme ($\mu_{\overline{MS}} = 2 \text{ GeV}$)
μ^-	Muon (Mu lepton)	105.7 MeV/c ²	
c	Charm quark	1 320 MeV/c ²	MSbar scheme ($\mu_{\overline{MS}} = m_c$)
τ^-	Tauon (tau lepton)	1 780 MeV/c ²	
b	Bottom quark	4 240 MeV/c ²	MSbar scheme ($\mu_{\overline{MS}} = m_b$)
t	Top quark	172 700 MeV/c ²	On-shell scheme

Pions

Particle name	Particle symbol	Antiparticle symbol	Quark content ^[10]	Rest mass (MeV/c ²)	I^G	J^{PC}	S	C	B'	Mean lifetime (s)	Commonly decays to (>5% of decays)
Pion ^[8]	π^+	π^-	$u\bar{d}$	$139.570\,18 \pm 0.000\,35$	1^-	0^-	0	0	0	$2.6033 \pm 0.0005 \times 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu_\mu$
Pion ^[11]	π^0	Self	$\frac{u\bar{u} - d\bar{d}}{\sqrt{2}}$ [a]	$134.976\,6 \pm 0.000\,6$	1^-	0^{++}	0	0	0	$8.4 \pm 0.6 \times 10^{-17}$	$\gamma + \gamma$

Properties of kaons

Particle name	Particle symbol	Antiparticle symbol	Quark content	Rest mass (MeV/c ²)	I^G	J^{PC}	S	C	B'	Mean lifetime (s)	Commonly decays to (>5% of decays)
Kaon ^[1]	K^+	K^-	$u\bar{s}$	493.677 ± 0.016	$\frac{1}{2}$	0^-	1	0	0	$(1.2380 \pm 0.0021) \times 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu_\mu$ or $\pi^+ + \pi^0$ or $\pi^+ + \pi^+ + \pi^-$ or $\pi^0 + e^+ + \nu_e$
Kaon ^[2]	K^0	$\bar{K}^0$	$d\bar{s}$	497.611 ± 0.013	$\frac{1}{2}$	0^-	1	0	0	[a]	[a]
K-Short ^[3]	K_S^0	Self	$\frac{d\bar{s} + s\bar{d}}{\sqrt{2}}$ [a]	497.611 ± 0.013 [c]	$\frac{1}{2}$	0^-	(*)	0	0	$(8.954 \pm 0.004) \times 10^{-11}$	$\pi^+ + \pi^-$ or $\pi^0 + \pi^0$
K-Long ^[4]	K_L^0	Self	$\frac{d\bar{s} - s\bar{d}}{\sqrt{2}}$ [a]	497.611 ± 0.013 [c]	$\frac{1}{2}$	0^-	(*)	0	0	$(5.116 \pm 0.021) \times 10^{-8}$	$\pi^\pm + e^\mp + \nu_e$ or $\pi^\pm + \mu^\mp + \nu_\mu$ or $\pi^0 + \pi^0 + \pi^0$ or $\pi^+ + \pi^0 + \pi^-$

D mesons

Particle name	Particle symbol	Antiparticle symbol	Quark content ^[3]	Rest mass (MeV/c ²)	I^G	J^{PC}	S	C	B'	Mean lifetime (s)	Commonly decays to (>5% of decays)
D meson ^[4]	D ⁺	D ⁻	c $\bar{d}$	1 869.62 ± 0.20	$\frac{1}{2}$	0 ⁻	0	+1	0	(1.040 ± 0.007) × 10 ⁻¹²	See D ⁺ decay modes [4]
D meson ^[5]	D ⁰	$\bar{D}^0$	c $\bar{u}$	1 864.84 ± 0.17	$\frac{1}{2}$	0 ⁻	0	+1	0	(4.101 ± 0.015) × 10 ⁻¹³	See D ⁰ decay modes [5]
Strange D meson ^[6]	D _s ⁺	D _s ⁻	c $\bar{s}$	1 968.47 ± 0.33	0	0 ⁻	+1	+1	0	(5.00 ± 0.07) × 10 ⁻¹³	See D _s ⁺ decay modes [6]
D meson ^[7]	D ⁺⁺ (2010)	D ⁺⁻ (2010)	c $\bar{d}$	2 010.27 ± 0.17	$\frac{1}{2}$	1 ⁻	0	+1	0	(6.9 ± 1.9) × 10 ⁻²¹ ^[a]	D ⁰ + π^+ or D ⁺ + π^0
D meson ^[8]	D ⁺⁺⁰ (2007)	$\bar{D}^{+0}$ (2007)	c $\bar{u}$	2 006.97 ± 0.19	$\frac{1}{2}$	1 ⁻	0	+1	0	>3.1 × 10 ⁻²² ^[a]	D ⁰ + π^0 or D ⁰ + γ

B mesons

Particle	Symbol	Anti-particle	Quark content	Charge	Isospin (I)	Spin and parity (J ^P)	Rest mass (MeV/c ²)	S	C	B'	Mean lifetime (s)	Commonly decays to
B meson	B ⁺	B ⁻	u $\bar{b}$	+1	$\frac{1}{2}$	0 ⁻	5 279.29 ± 0.15	0	0	+1	(1.638 ± 0.004) × 10 ⁻¹²	See B ⁺ decay modes [4]
B meson	B ⁰	$\bar{B}^0$	d $\bar{b}$	0	$\frac{1}{2}$	0 ⁻	5 279.61 ± 0.16	0	0	+1	(1.520 ± 0.004) × 10 ⁻¹²	See B ⁰ decay modes [4]
Strange B meson	B _s ⁰	$\bar{B}_s^0$	s $\bar{b}$	0	0	0 ⁻	5 366.79 ± 0.23	-1	0	+1	(1.510 ± 0.005) × 10 ⁻¹²	See B _s ⁰ decay modes [4]
Charmed B meson	B _c ⁺	B _c ⁻	c $\bar{b}$	+1	0	0 ⁻	6 275.1 ± 1.0	0	+1	+1	(0.507 ± 0.009) × 10 ⁻¹²	See B _c ⁺ decay modes [4]

Particle name	Particle symbol	Antiparticle symbol	Quark content	Rest mass (MeV/c ²)	I^G	J^{PC}	S	C	B'	Mean lifetime (s)	Commonly decays to (>5% of decays)
Phi meson ^[1]	ϕ (1020)	Self	s $\bar{s}$	1,019.461 ± 0.020	0 ⁻	1 ⁻⁻	0	0	0	1.55 ± 0.01 × 10 ⁻²² ^[7]	K ⁺ + K ⁻ or K _S ⁰ + K _L ⁰ or (ρ + π) / (π^+ + π^0 + π^-)

$J^P = \frac{1}{2}^+$ baryons

Particle name	Symbol	Quark content	Rest mass (MeV/c ²)	I	J^P	Q (e)	S	C	B'	Mean lifetime (s)	Commonly decays to
proton ^[8]	$p / p^+ / N^+$	uud	938.272 046(21) ^[a]	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	+1	0	0	0	Stable ^[b]	Unobserved
neutron ^[9]	$n / n^0 / N^0$	udd	939.565 379(21) ^[a]	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	0	0	0	0	$(8.800 \pm 0.009) \times 10^{-26}$ ^[c]	$p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
Lambda ^[10]	Λ^0	uds	1 115.683 $\pm$ 0.006	0	$\frac{1}{2}^+$	0	-1	0	0	$(2.632 \pm 0.020) \times 10^{-10}$	$p^+ + \pi^-$ or $n^0 + \pi^0$
charmed Lambda ^[11]	Λ_c^+	udc	2 286.46 $\pm$ 0.14	0	$\frac{1}{2}^+$	+1	0	+1	0	$(2.00 \pm 0.06) \times 10^{-13}$	See Λ_c^+ decay modes [d]
bottom Lambda ^[12]	Λ_b^0	udb	5 619.4 $\pm$ 0.6	0	$\frac{1}{2}^+$	0	0	0	-1	$(1.429 \pm 0.024) \times 10^{-12}$	See Λ_b^0 decay modes [d]
Sigma ^[13]	Σ^+	uus	1 189.37 $\pm$ 0.07	1	$\frac{1}{2}^+$	+1	-1	0	0	$(8.018 \pm 0.026) \times 10^{-11}$	$p^+ + \pi^0$ or $n^0 + \pi^+$
Sigma ^[14]	Σ^0	uds	1 192.642 $\pm$ 0.024	1	$\frac{1}{2}^+$	0	-1	0	0	$(7.4 \pm 0.7) \times 10^{-20}$	$\Lambda^0 + \gamma$
Sigma ^[15]	Σ^-	dds	1 197.449 $\pm$ 0.030	1	$\frac{1}{2}^+$	-1	-1	0	0	$(1.479 \pm 0.011) \times 10^{-10}$	$n^0 + \pi^-$
charmed Sigma ^[16]	Σ_c^{++}	uuc	2 453.98 $\pm$ 0.16	1	$\frac{1}{2}^+$	+2	0	+1	0	$(2.91 \pm 0.32) \times 10^{-22}$ ^[d]	$\Lambda_c^+ + \pi^+$
charmed Sigma ^[16]	Σ_c^+	udc	2 452.9 $\pm$ 0.4	1	$\frac{1}{2}^+$	+1	0	+1	0	$> 1.43 \times 10^{-22}$ ^[d]	$\Lambda_c^+ + \pi^0$
charmed Sigma ^[16]	Σ_c^0	ddc	2 453.74 $\pm$ 0.16	1	$\frac{1}{2}^+$	0	0	+1	0	$(3.05 \pm 0.37) \times 10^{-22}$ ^[d]	$\Lambda_c^+ + \pi^-$
bottom Sigma ^[17]	Σ_b^+	uub	5 811.3 $^{+0.9}_{-0.8} \pm 1.7$	1	$\frac{1}{2}^+$	+1	0	0	-1	$6.8^{+2.7}_{-3.5} \times 10^{-23}$ ^[d]	$\Lambda_b^0 + \pi^+$
bottom Sigma [†]	Σ_b^0	udb	Unknown	1	$\frac{1}{2}^+$	0	0	0	-1	Unknown	Unknown
bottom Sigma ^[17]	Σ_b^-	ddb	5 815.5 $^{+0.6}_{-0.5} \pm 1.7$	1	$\frac{1}{2}^+$	-1	0	0	-1	$1.34^{+0.87}_{-1.15} \times 10^{-22}$ ^[d]	$\Lambda_b^0 + \pi^-$
χ_i ^[18]	Ξ^0	uss	1 314.86 $\pm$ 0.20	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	0	-2	0	0	$(2.90 \pm 0.09) \times 10^{-10}$	$\Lambda^0 + \pi^0$
χ_i ^[19]	Ξ^-	dss	1 321.71 $\pm$ 0.07	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	-1	-2	0	0	$(1.639 \pm 0.015) \times 10^{-10}$	$\Lambda^0 + \pi^-$
charmed χ_i ^[20]	Ξ_c^+	usc	2 467.8 $^{+0.4}_{-0.6}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	+1	-1	+1	0	$(4.42 \pm 0.26) \times 10^{-13}$	See Ξ_c^+ decay modes [d]
charmed χ_i ^[21]	Ξ_c^0	dsc	2 470.88 $^{+0.34}_{-0.80}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	0	-1	+1	0	$1.12^{+0.13}_{-0.10} \times 10^{-13}$	See Ξ_c^0 decay modes [d]
charmed Xi prime ^[22]	Ξ_c^+	usc	2 575.6 $\pm$ 3.1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	+1	-1	+1	0	Unknown	$\Xi_c^+ + \gamma$ (seen)

 $J^P = \frac{1}{2}^+$ baryons

Particle name	Symbol	Quark content	Rest mass (MeV/c ²)	I	J^P	Q (e)	S	C	B'	Mean lifetime (s)	Commonly decays to
proton ^[8]	$p / p^+ / N^+$	uud	938.272 046(21) ^[a]	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	+1	0	0	0	Stable ^[b]	Unobserved
neutron ^[9]	$n / n^0 / N^0$	udd	939.565 379(21) ^[a]	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	0	0	0	0	$(8.800 \pm 0.009) \times 10^{-26}$ ^[c]	$p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
Lambda ^[10]	Λ^0	uds	1 115.683 $\pm$ 0.006	0	$\frac{1}{2}^+$	0	-1	0	0	$(2.632 \pm 0.020) \times 10^{-10}$	$p^+ + \pi^-$ or $n^0 + \pi^0$
charmed Lambda ^[11]	Λ_c^+	udc	2 286.46 $\pm$ 0.14	0	$\frac{1}{2}^+$	+1	0	+1	0	$(2.00 \pm 0.06) \times 10^{-13}$	See Λ_c^+ decay modes [d]
bottom Lambda ^[12]	Λ_b^0	udb	5 619.4 $\pm$ 0.6	0	$\frac{1}{2}^+$	0	0	0	-1	$(1.429 \pm 0.024) \times 10^{-12}$	See Λ_b^0 decay modes [d]
Sigma ^[13]	Σ^+	uus	1 189.37 $\pm$ 0.07	1	$\frac{1}{2}^+$	+1	-1	0	0	$(8.018 \pm 0.026) \times 10^{-11}$	$p^+ + \pi^0$ or $n^0 + \pi^+$
Sigma ^[14]	Σ^0	uds	1 192.642 $\pm$ 0.024	1	$\frac{1}{2}^+$	0	-1	0	0	$(7.4 \pm 0.7) \times 10^{-20}$	$\Lambda^0 + \gamma$
Sigma ^[15]	Σ^-	dds	1 197.449 $\pm$ 0.030	1	$\frac{1}{2}^+$	-1	-1	0	0	$(1.479 \pm 0.011) \times 10^{-10}$	$n^0 + \pi^-$
charmed Sigma ^[16]	Σ_c^{++}	uuc	2 453.98 $\pm$ 0.16	1	$\frac{1}{2}^+$	+2	0	+1	0	$(2.91 \pm 0.32) \times 10^{-22}$ ^[d]	$\Lambda_c^+ + \pi^+$
charmed Sigma ^[16]	Σ_c^+	udc	2 452.9 $\pm$ 0.4	1	$\frac{1}{2}^+$	+1	0	+1	0	$> 1.43 \times 10^{-22}$ ^[d]	$\Lambda_c^+ + \pi^0$
charmed Sigma ^[16]	Σ_c^0	ddc	2 453.74 $\pm$ 0.16	1	$\frac{1}{2}^+$	0	0	+1	0	$(3.05 \pm 0.37) \times 10^{-22}$ ^[d]	$\Lambda_c^+ + \pi^-$
bottom Sigma ^[17]	Σ_b^+	uub	5 811.3 $^{+0.9}_{-0.8} \pm 1.7$	1	$\frac{1}{2}^+$	+1	0	0	-1	$6.8^{+2.7}_{-3.5} \times 10^{-23}$ ^[d]	$\Lambda_b^0 + \pi^+$
bottom Sigma [†]	Σ_b^0	udb	Unknown	1	$\frac{1}{2}^+$	0	0	0	-1	Unknown	Unknown
bottom Sigma ^[17]	Σ_b^-	ddb	5 815.5 $^{+0.6}_{-0.5} \pm 1.7$	1	$\frac{1}{2}^+$	-1	0	0	-1	$1.34^{+0.87}_{-1.15} \times 10^{-22}$ ^[d]	$\Lambda_b^0 + \pi^-$
χ_i ^[18]	Ξ^0	uss	1 314.86 $\pm$ 0.20	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	0	-2	0	0	$(2.90 \pm 0.09) \times 10^{-10}$	$\Lambda^0 + \pi^0$
χ_i ^[19]	Ξ^-	dss	1 321.71 $\pm$ 0.07	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	-1	-2	0	0	$(1.639 \pm 0.015) \times 10^{-10}$	$\Lambda^0 + \pi^-$
charmed χ_i ^[20]	Ξ_c^+	usc	2 467.8 $^{+0.4}_{-0.6}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	+1	-1	+1	0	$(4.42 \pm 0.26) \times 10^{-13}$	See Ξ_c^+ decay modes [d]
charmed χ_i ^[21]	Ξ_c^0	dsc	2 470.88 $^{+0.34}_{-0.80}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	0	-1	+1	0	$1.12^{+0.13}_{-0.10} \times 10^{-13}$	See Ξ_c^0 decay modes [d]
charmed Xi prime ^[22]	Ξ_c^+	usc	2 575.6 $\pm$ 3.1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	+1	-1	+1	0	Unknown	$\Xi_c^+ + \gamma$ (seen)