

Poglavje 1

Povzetek doktorskega dela

1.1 Uvod

Fizika delcev je eden od stebrov fizike, z močnimi koreninami, ki segajo vse do začetka 20. stoletja. Natančni eksperimenti in preverljiva teorija so pokazali, da vesolje sestoji iz osnovnih delcev in nosilcev interakcij. Osnovne delce delimo na kvarke (u, d, s, c, b, t) in leptone, ki so nadaljnje razdeljeni na nabite leptone (e, μ, τ) in pa nevtrine (ν_e, ν_μ, ν_τ). Nosilci treh (od štirih) osnovnih interakcij, s katerimi se ukvarjamo na tem področju, so fotoni (γ) za elektromagnetno, gluoni (g) za močno in nabiti- (W^\pm) ter nevtralni (Z^0) bozoni za šibko interakcijo. Vsi delci in njihovi zrcalni partnerji, antidelci (označeni z $\bar{}$), imajo maso, ki jim jo določa Higgsov bozon (H). Vse delce ter interakcije med njimi opisuje Standardni model, ki je osrednja teorije fizike visokih energij. Kvarke lahko združujemo v kombinacije oblike $q_1 q_2 q_3$ (hadroni) ali pa $q_1 \bar{q}_2$ (mezoni), med katere sodijo tudi protoni in nevtroni, ki jih opazimo v naravi. Poleg omenjenih dolgo-živečih delcev pa obstajajo tudi težji, manj stabilni delci, ki preko zgoraj naštetih interakcij razpadejo v lažje, stabilnejše. Raziskovanje takšnih procesov s pomočjo pospeševalnikov in trkalnikov nam omogoča spoznavanje zakonov vesolja danes pa vse do njegovega začetka.

Osrednji del doktorske disertacije predstavljajo meritve razpadov mezonov B , delcev, ki so sestavljeni iz težkega kvarka b in enega od lahkih kvarkov u ali d . Ena bolj presegajočih lastnosti vesolja je kršitev simetrije CP , t.j. kombinacije simetrij konjugacije naboja (C) in prostorske inverzije (P). Simetrija CP nakazuje, da so fizikalni procesi delcev in zrcalni procesi antidelcev enaki, kar pa danes vemo, da ne drži v celoti in poznamo procese, ki to simetrijo kršijo. Kršitev simetrije CP je tesno povezana s šibko interakcijo, to pa predstavlja našo motivacijo za študijo mezonov B , saj šibki razpadi predstavljajo večji del vseh razpadov mezonov B .

Edinstvena lastnost šibke interakcije je, da lahko spreminja tip oziroma t.i. okus kvarkov, medtem ko ga ostale interakcije ohranjajo. Takšni procesi so opisani s prehodno matriko

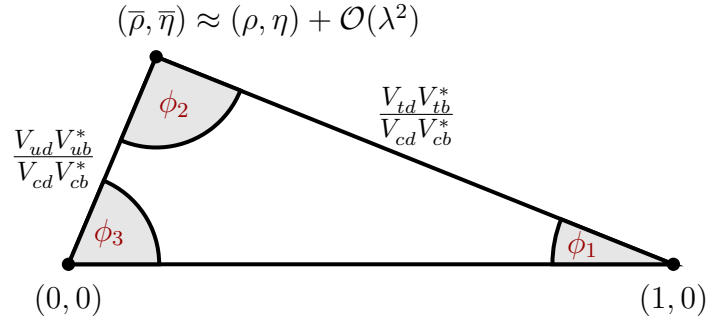
28 CKM (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa) [1, 2]

$$V_{CKM} = \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix}. \quad (1.1)$$

29 Unitarnost matrike CKM nam omogoča, da iz nje izluščimo matematične identitete, od
30 katerih je ena pomembnejših

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0, \quad (1.2)$$

31 poznana pod imenom unitarni trikotnik, saj predstavlja zaključen vektor treh točk v
32 kompleksni ravnini, kot prikazuje Slika 1.1. Parametri matrike CKM niso določljivi
33 s strani teorije, temveč jih moramo določiti z eksperimentalnimi meritvami tako, da
34 najdemo procese, ki so tesno povezani s stranicami in koti unitarnega trikotnika. Na
35 tak način lahko preverimo, če je oblika trikotnika konsistentna, kar predstavlja dober
36 test Standardnega modela, oziroma če so potencialno prisotni kakšni novi procesi, ki
37 jih še ne poznamo, in jih kolektivno imenujemo "nova fizika". Dodatna motivacija za
38 študijo mezonov B je ta, da velik delež njihovih razpadov predstavlja koristne procese
39 za meritev unitarnega trikotnika.



Slika 1.1: Unitarni trikotnik s parametri λ , η , ρ and A (slednji ni prikazan), ki predstavljajo proste parametre matrike CKM.

40 Procesi, ki jih študiramo v tej analizi, so tesno povezani z elementom V_{ub} matrike CKM,
41 saj le-ta opisuje prehode kvarkov $b \rightarrow c$. Od vseh elementov, je absolutna vrednost
42 tega elementa najmanjša, relativna napaka pa največja, zato meritve iz tega področja
43 potencialno omogočajo največ izboljšave. Takšni prehodi kvarkov so prisotni v nearobnih
44 (t.j. brez kvarkov c) semi-leptonskih razpadih mezonov B oblike

$$B^+ \rightarrow X_u^0 \ell^+ \nu_\ell, \quad (1.3)$$

45 kjer X_u^0 predstavlja nečarnobne mezone, ℓ pa je eden od nabitih leptonov. Frekvenco
46 razpadov, ki je tesno povezana z elementom V_{ub} , opišemo z enačbo

$$d\Gamma \propto G_F^2 |V_{ub}|^2 |L^\mu \langle X_u | \bar{u} \gamma_\mu \frac{1}{2} (1 - \gamma_5) b | B \rangle|^2, \quad (1.4)$$

47 kjer G_F predstavlja Fermijevo konstanto, L^μ leptonski tok, izraz v Diracovih oklepajih
 48 pa hadronski tok. V takšnih prehodih $|V_{ub}|^2$ predstavlja verjetnost za prehod $b \rightarrow u$.

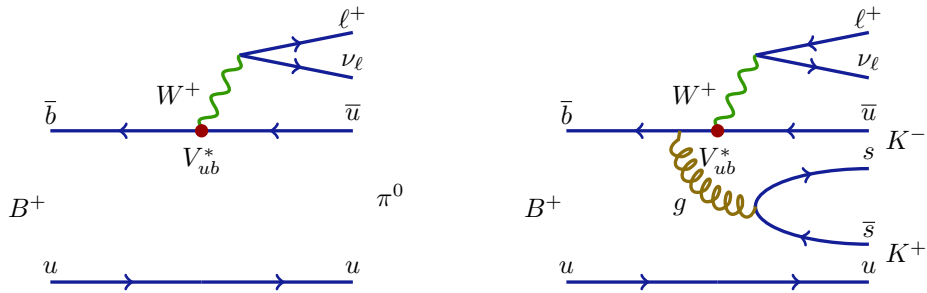
Meritev elementa V_{ub} je možna na ekskluziven in inkluziven način, kjer pri prvi metodi opravljamo meritve v specifično definirana končna stanja, kot na primer $B \rightarrow \pi \ell \nu$, pri drugi metodi pa opravljamo meritev s kupno končno stanje oblike $B \rightarrow X_u \ell \nu$. Obe metodi potekata preko različnih pristopov in se soočata z različnimi težavami, kar pomeni, da sta oba končna rezultata nekorelirana. Rezultata obeh meritev imata tudi zelo podobno natančnost, medtem ko se srednja vrednost le deloma ujema. Rezultata se razlikujeta s signifikanco 3σ , kar predstavlja večjo težavo znotraj področja. Trenutni svetovni povprečji [3] ekskluzivne (iz razpadov $B^0 \rightarrow \pi^- \ell^+ \nu$) in inkluzivne meritve (GGOU kolaboracija [4]) sta

$$|V_{ub}|_{\text{e.}} = (3.65 \pm 0.09 \pm 0.11) \times 10^{-3}, \quad (1.5)$$

$$|V_{ub}|_{\text{i.}}^{\text{GGOU}} = (4.52 \pm 0.15 \pm_{-0.14}^{+0.11}) \times 10^{-3}, \quad (1.6)$$

49 kjer prva in druga napaka predstavljata eksperimentalno in teoretsko napako. Rezultati
 50 inkluzivnih meritev so praviloma večji kot rezultati ekskluzivnih. Razlogov za neujema-
 51 nje je lahko več, od nepoznanih napak pri eksperimentu ali teoriji, do prispevkov nove
 52 fizike.

53 V tej analizi se osredotočamo na enega od možnih razlogov za zgoraj omenjeno neujema-
 54 nje, konkretnije za razpad $B^+ \rightarrow K^+ K^- \ell^+ \nu$, ki je strukturno precej podoben razpadu
 55 $B \rightarrow \pi \ell \nu$ za razliko produkcije para kvarkov $s\bar{s}$ ki se potem hadronizira v nove delce, kot
 56 prikazuje Slika 1.2. V inkluzivnih meritvah nečarobnih semi-leptonskih razpadov me-
 57 zonov B se standardno uporablja K -veto, t.j. selekcija, kjer zahtevamo, da v končnem
 58 stanju nimamo mezonov K (sestava $q\bar{s}$, $q \in [u, d]$), poznanih tudi pod imenom kaoni.
 59 Kaoni v končnem stanju nakazujejo na pogost prehod kvarkov $b \rightarrow c \rightarrow s$, ki pa jih
 60 hočemo v analizah prehodov $b \rightarrow u$ zatreti. V primeru naše analize imamo v končnem
 61 stanju 2 kaona s preходом $b \rightarrow u$, kar pomeni, da takšni razpadi niso upoštevani v
 62 inkluzivnih meritvah, čeprav bi morali biti. Cilj študije je določiti pogostost razpadov
 63 $B^+ \rightarrow K^+ K^- \ell^+ \nu$ s preходом $b \rightarrow u$ in s tem oceniti, kakšen potencialen efekt ima
 64 lahko neupoštevanje teh razpadov na inkluzivno meritev elementa V_{ub} . V nadaljevanju
 65 bo razpad $B^+ \rightarrow K^+ K^- \ell^+ \nu$ zaradi enostavnosti zapisan kot $B \rightarrow K K \ell \nu$.



Slika 1.2: Feynmanovi diagrami za razpada $B^+ \rightarrow \pi^0 \ell^+ \nu_\ell$ (levo) in $B^+ \rightarrow K^- K^+ \ell^+ \nu_\ell$ (desno).

⁶⁶ **1.2 Experimentalna postavitve**

⁶⁷ **1.2.1 Trkalnik KEKB**

⁶⁸ **1.2.2 Detektor Belle**

⁶⁹ **1.3 Postopek analize**

⁷⁰ **1.4 Sistematske negotovosti**

⁷¹ **1.5 Končni rezultat**