

# Oponentský posudek na disertační práci Mgr. Michala Zamkovského

Study of the extremely rare decay  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  with the NA62 experiment at CERN

předložené na Matematicko-fyzikální fakultě  
Univerzity Karlovy

Disertační práce se zabývá analýzou vzácných rozpadů nabitých kaonů na pion, neutrino a antineutrino ( $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ ), konkrétně měřením relativní četnosti (BR) tohoto rozpadu na experimentu NA62. Podle výpočtů ve Standardním Modelu (SM) elementárních částic je relativní četnost zmíněného rozpadu předpovězena na řádově  $10^{-10}$ , ovšem případná Nová Fyzika (NP) může tuto předpověď, na rozdíl od jiných rozpadů, výrazně změnit. Teoretické výpočty  $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$  v SM jsou zatíženy poměrně malou chybou (pod 10%). Experimentální ověření této předpovědi je proto jednou z nadějných cest v hledání projevů NP. Měření se řadí k nepřímým způsobům hledání NP, specifickým pro fyziku "vůní" (flavor physics). V této oblasti se posledních letech objevilo několik výsledků, které se mírně (těsně za hranicí chyby) odlišují od předpovědi SM. Prověření  $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$  tak může být dalším důležitým výsledkem.

Experiment NA62 využívá svazku protonů z urychlovače SPS v CERN, kdy studované kaony vznikají při interakci svazu s beryliovým terčem. V nedávné minulosti se podařilo vytvořit experimenty, které pozorovaly několik jednotlivých kandidátů na zmíněný vzácný rozpad  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ . Experimentální chyba měření  $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$  je však zatím velmi velká, prakticky na úrovni 100%. NA62 již dříve publikovalo analýzu dat nabíraných v roce 2016. Práce doktoranda Michala Zamkovského spočívá v analýze většího datasetu, nabraného v roce 2017.

Disertační práce je rozdělena do 7 kapitol a několika krátkých dodatků, přičemž popisuje celý řetězec kroků měření  $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$ . Úvodní sekce přehledně shrnuje současné výsledky z měření toho rozpadového kanálu v různých experimentech.

V první kapitole je rozvedena motivace (viz. také výše) proto tuto analýzu. Autor zde rozvádí způsob výpočtu  $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$  v SM, ale i možnosti, jak by se větvcí poměr mohl změnit, pokud by platily některé konkrétní scénáře NP.

Druhá kapitola popisuje experimentální uspořádání NA62. Detailně je zde vylíčen způsob, jak se vytváří primární svazek nabitých kaonů a jak je veden skrz experiment. Pro každý sub-detektor je popsána jeho konstrukce, způsob rekonstrukce signálu, základní informace o přesnosti měření a za jakým účelem se v analýze používá (detekce signálu, veto nežádoucích událostí). Dále popisuje způsob filtrování dat (trigger), kalibrace a korekce.

Kapitola 3 uvádí základní body analýzy: zaslepení signální oblasti, použití kontrolních kanálů a přesnost měření klíčových proměnných. Navazuje kapitola čtvrtá, shrnující výběrová pravidla pro signál, identifikaci částic, veta pro potlačení pozadí, a propojení signálů z jednotlivých detektorů pro rekonstrukci kandidátů na pionovou dráhu.

Vzhledem k velmi malému větvcímu poměru signálního rozpadu je nutné mít pod kontrolou možná pozadí (falešný signál). Ta jsou rozepsána v kapitole 5 a zahrnují jak jiné rozpady  $K^+$ , tak možné náhodné kombinace nesouvisejících rekonstruovaných drah. Autor zde uvádí způsob měření jednotlivých typů pozadí v kontrolních oblastech a jejich extrapolaci do oblastí signálu.

Kapitola 6 pak popisuje finální část analýzy: určení očekávaného počtu signálních událostí z normalizačních rozpadových kanálů. Tato část analýzy tedy zahrnuje výběrová pravidla pro normalizační rozpadové kanály a určení účinnosti rekonstrukce a selekce jak signálního, tak normalizačních kanálů. Výsledky jsou shrnuty v kapitole poslední, kdy je signální oblast odmaskována. Počet naměřených událostí se v rámci chyby shoduje s očekávaným počtem signálních + pozadíových událostí. Vzhledem k tomu, že očekávány byly pouze jednotky událostí v signální oblasti, výsledný  $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$  je v rámci chyby kompatibilní s nulou. Je proto také určen horní limit pro  $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$ . Dosažená hodnota je téměř o řád nižší, než v předchozím měření experimentu NA62 s daty z roku 2016. Výsledky obou měření jsou v poslední kapitole také statisticky zkombinovány.

Po formální stránce je práce prakticky v pořádku, napsána přehledně, dobrou angličtinou a minimem překlepů. Analýza, která je velmi komplexní, je provedená pečlivě. Analýza je výsledkem práce většího týmu, ovšem autorův příspěvek byl podstatný. V práci však není přímo specifikován (viz. níže otázky k obhajobě), což by bylo bývalo vhodné pro závěrečnou kapitolu. Dále by v poslední části mohlo být přiblíženo, jak se analýza změnila vůči starší analýze dat nabraných v roce 2016, a případně co se očekává od budoucí analýzy dat z roku 2018. Autor prezentoval výsledky NA62 analýz na několika konferencích (z některých těchto příspěvků vznikly proceedings), což svědčí o jeho hlubším zapojení do NA62 kolaborace. Jsem přesvědčen, že Mgr. Michal Zamkovský prokázal schopnost samostatné vědecké práce a proto doporučuji tuto práci přijmout jako práci disertační a po úspěšné obhajobě, především uspokojivém zodpovězení otázek, mu udělit titul Ph.D.

### Otázky k obhajobě:

- V práci není uvedeno, do kterých částí analýzy autor přispěl. Bylo by možné toto specifikovat na obhajobě ?
- Vzhledem k tomu, že stejné měření, ale s jinými daty, bylo již na experimentu NA62 provedeno, mohl by autor přiblížit, jestli byly mezi analýzami nějaké výraznější rozdíly ? (vylepšení odhadu pozadí, měření účinností apod.)
- Podobně, očekávají se nějaké změny v budoucí analýze dat z roku 2018 ? V kapitole 5.8 je zmíněno, že se pracuje na potlačení tzv. "upstream background", které je v disertační práci popsáno jako dominantní. Mohl by autor naznačit, jakým směrem se má toto vylepšení ubírat ? Dále při určování akceptance z MC poukazujete na diskrepanci data vs. MC v talech  $m_{\text{miss}}^2$  kvůli simulaci rozptylu v STRAW detektoru a zjednodušením v pile-up generátoru. Pracuje se na nějakém vylepšení ? Zahrnují simulace také problémy detektorů (např. nefunkční buňky LKr) ?
- Jaká byla motivace změny L0 triggeru (vynechání veta LAV12) po runu 7980 ?
- Mohl byste vysvětlit, co se přesně se myslí výrazy *before/after fit* v souvislosti s měřením hybnosti ve STRAW detektoru (str. 37) ?
- Sekce o *beam parameters* a *bad-burst* je velmi stručná. Co se vše se sleduje v *data quality analyzéch* ? Jaké je rozdělení hybnosti analyzovaných  $K^+$  mezonů ?
- Jak často se vyskytuje pile-up ? Tedy současný výskyt sledovaných rozpadů  $K^+$  a jiných částic, případně současný výskyt svou  $K^+$  rozpadů ?
- Má trigger nějakou mrtvou dobu, po kterou není schopen detekovat dva za sebou jdoucí  $K^+$  rozpady ? Je s tím spojená nějaká měřitelná neúčinnost ?
- Jaké MC se používá na popis rozpadů částic ? EVTGEN, beroucí v úvahu správná úhlová rozdělení, nebo něco jednoduššího (rozpady jen podle fázového prostoru) ? V obrázcích 5.2 apod. je zmíněna systematika na MC. Z jakých efektů pochází ?
- U některých typů pozadí ( $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi_D^0$ ,  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu (e^+ \nu \bar{\nu})$ ) je celková akceptance tak malá, že bylo nutné faktorizovat efekt jednotlivých složek účinností. Pokusili jste se studovat korelace mezi těmi faktorizovanými účinnostmi ?
- Není mi úplně jasné, jak se ze obecného vztahu pro single-event-sensitivity (eq. 6.1 a 6.10) dojde ke vztahům 6.19 a 6.22. Neměl by tam např. vystupovat BR normalizačního kanálu a jeho akceptance ?