

Oponentský posudek doktorské práce Mgr. Michaely Mlynárikové *Cross-section measurements of the Higgs boson decaying into a pair of tau leptons with the ATLAS detector*

Uchazečka Mgr. Michaela Mlynáriková se ve své práci zabývá dvěma tématy - studiu rozpadu Higgsova bosonu na dva tau leptony a časové kalibraci hadronového kalorimetru TileCal. K analýze použila data ze srážek protonů při energii $\sqrt{s} = 13$ TeV získaná experimentem ATLAS na urychlovači LHC v CERN. Předložená práce, napsaná v anglickém jazyce, se kromě Úvodu a Závěru skládá z 5 kapitol a 4 dodatků. První kapitola je věnována produkci Higgsova bosonu v rámci Standardního Modelu (SM), druhá popisuje detektor ATLAS, ve třetí kapitole je podrobně popsán hadronový kalorimetr TileCal. Kapitola 4 shrnuje postupy při statistické analýze ve fyzice vysokých energií. Hlavní částí disertace je 5. kapitola, která je věnována měření účinného průřezu $H \rightarrow \tau\tau$.

Výsledky prezentované v dizertaci jsou založena na jedné publikaci v oponentovaném časopise, M. Aaboud, *et al.* [ATLAS Collaboration]: *Cross-section measurements of the Higgs boson decaying into a pair of τ -leptons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector*, Phys. Rev. D99(2019)072001 a na jedné teprve připravované publikaci. Výsledky své práce prezentovala uchazečka na třech významných mezinárodních konferencích (ICHEP2018, ALPS2018 a 5th Ann. Conf. on LHC Physics). Dvě její vystoupení se týkala studia rozpadu $H \rightarrow \tau\tau$ a dvě kalorimetru TileCal. Uchazečka též publikovala tři *Conference Notes* (v seznamu publikací nesprávně uvedených bez čísla publikace ATLAS) a jednu tzv. *Publication Note*.

Téma doktorské práce

Standardní Model částicové fyziky patří mezi základní pilíře moderní vědy. Jeho konečným experimentálním potvrzením byl objev Higgsova bosonu experimenty ATLAS a CMS na LHC v CERNu v roce 2012. Jediným doposud známým jevem ukazujícím na novou fyziku v oblasti za SM jsou pozorované oscilace neutrin - jejich velmi malé hmoty se však doposud nepodařilo změřit. Pro $m_\nu \sim 10^{-1}$ eV je hmotová škála odpovídající za novou fyziku $M \sim 10^8$ GeV daleko za možnostmi současných, ale i budoucích urychlovačů. Již tato skutečnost dostatečně podtrhuje nakolik je důležité testovat na LHC i ty nejmenší odchylky od předpovědí SM.

Zde mezi nejdůležitější patří analýza rozpadových kanálů Higgsova bosonu. Cílem předložené dizertační práce bylo studovat rozpad $H \rightarrow \tau\tau$, druhý nejčtenější rozpadový kanál Higgsova bosonu na fermiony. Druhé téma, kterým se uchazečka ve své práci zabývala je kalibrace hadronového kalorimetru TileCal, který je důležitým při rekonstrukci energie jetů a chybějící příčné hybnosti.

Metodika zpracování

Metodika zpracování odpovídá postupům používaným při řešení fyzikálního tématu, tedy analýze dat z experiment ATLAS. Autorka použila standardní metodiky používanou ve velkých kolaboracích, kdy měla k dispozici předzpracovaná experimentální a simulovaná data. Konkrétně analyzovala data ze srážek pp při energii $\sqrt{s} = 13$ TeV. Její hlavní role v provedené analýze spočívala v implementaci systematických neurčitostí do použitého modelu, kontrole a provádění fitů na tomto modelu založených (viz. strana 45 dizertace). Výsledkem provedené analýzy je nejen změřený totální účinný průřez reakce $pp \rightarrow H \rightarrow \tau\tau$ (po kombinaci s daty při $\sqrt{s} = 7$ a 8 TeV na úrovni 6.4 standardní odchylky), ale též jeho rozdělení na dvě komponenty – produkce Higgsova bosonu pomocí fúze dvou vektorových bosonů (VBF) a fúze dvou gluonů (ggF). Všechna tato měření jsou konzistentní se SM.

Za velmi přínosné považuji zařazení kapitoly 4 *Statistical data analysis in high energy physics* doplněné řadou citací původní literatury ([59]-[70]). Jednak proto, že ukazuje hlubší vhled uchazečky do této experimentální často opovrhované disciplíny a též kvůli nezanedbatelné roli, které hraje statistické zpracování naměřených dat v následné kapitole věnována měření účinného průřezu $H \rightarrow \tau\tau$.

Práce je napsána anglicky, bez větších gramatických chyb. Pouze s několika překlepy či opomenutími (např. *The two NPs result are (anti-)correlated in the fit when the corresponding variations have similar effect ...* na

str.72). Zpracování dizertace ukazuje jednak na velmi dobré porozumění použitým v ní metodám a celé v ní prezentované tématice a též na správně zvolenou metodu jejího výkladu.

Práce obsahuje poměrně značný počet zkratk jejichž seznam je umístěn až daleko vzadu na stranách 111-112 (mezi *Seznamem použité literatury* a *Seznamem autorčiných publikací*). To částečně ztěžuje její plynulé čtení. Tento seznam totiž obvykle bývá umístěn na začátku dizertace, buď těsně před nebo těsně za obsahem práce. Poněkud pracnější, ale velmi efektivní možnost je psát zkratky vždy formou hypertextových odkazů a to nikoliv pouze jedenkrát, při jejich zavedení, jak to dělá autorka práce. Jinak nemám ke stylu a metodice předkládané dizertace žádné další připomínky.

K práci, kterou považuji za nadprůměrně dobře vypracovanou mám několik otázek:

1. Můžete nějak podpořit/ilustrovat své tvrzení uvedené na str.46: *Usually, a tau-jet originates from one or three charged hadrons and none, one or two neutral pions emitted close to the direction of the tau lepton. On the other hand, a QCD jet has on average higher multiplicity of hadrons than a tau-jet and it is emitted in a wider cone around the jet axis.* Jak jste toto kritérium použila při výběru případů?
2. Dole na str.73 píšete: *Due to the limited statistics in this sample, we assumed that this background sample contains 50% of quark-originate jets and 50% of gluon-originate jets with 100% uncertainty.* Zdůvodněte tento předpoklad. Jak závisí na kinematice a energii *pp* srážky?
3. Fig.5.18: Nakolik je až neuvěřitelná shoda mezi nejlepším fitem a předpovědí SM dílem náhody a nakolik důsledkem Vámi použitého postupu statistické analýzy, viz. str.79?

Závěrem chci stručně shrnout, že předloženou doktorskou práci Mgr. Michaely Mlynárikové považuji za přesvědčivé svědectví samostatné vědecké práce kandidáta. Proto doporučuji, aby jí byl po úspěšné obhajobě udělen titul Ph.D.

V Praze 20.6. 2019

doc. Michal Šumbera, CSc., DSc.
Ústav jaderné fyziky AV ČR v.v.i.