

Ing. Zdeněk Hubáček, Ph.D.  
FJFI ČVUT  
BŘEHOVÁ 7  
115 19 PRAHA 1

V Praze dne 3. července 2019

### **Oponentský posudek na disertační práci**

Název: Cross-section measurements of the Higgs boson decaying into a pair of tau leptons with the ATLAS detector

Autor: Mgr. Michaela Mlynáriková

Předložená disertační práce Mgr. Michaely Mlynárikové se zabývá měřením účinného průřezu produkce Higgsova bosonu v rozpadovém kanálu  $H \rightarrow \tau\tau$  v experimentu ATLAS na urychlovači Large Hadron Collider (LHC).

### **Aktuálnost řešené problematiky**

Objev Higgsova bosonu roku 2012 v experimentech ATLAS a CMS na LHC byl jedním z cílů experimentálního programu tohoto urychlovače. V současné době probíhají další měření, která systematicky měří jeho vlastnosti. Pozorování produkce Higgsova bosonu v rozpadovém kanálu  $H \rightarrow \tau\tau$  prezentované v této disertační práci je příkladem tohoto zkoumání.

Při prvním objevu byl Higgsův boson experimentálně potvrzen v rozpadech na vektorové bosony. V současné době je Higgsův boson potvrzen v několika různých rozpadových kanálech. Potvrzení jeho rozpadu na pár fermionů  $\tau\tau$  tak potvrzuje platnost Standardního modelu fyziky elementárních částic. Měření z experimentu ATLAS popsané v této práci je vysoce aktuální a je dalším střípkem do skládačky při zkoumání vlastností mikrosvěta.

### **Cíle práce**

Cílem práce bylo změřit účinný průřez produkce Higgsova bosonu v rozpadu na pár tau leptonů. Tento proces už byl dříve pozorován v rámci statistické kombinace analýz dat z experimentů ATLAS a CMS. Novější data a snížení experimentálních a teoretických chyb by měla postačovat

k objevu tohoto kanálu v rámci dat z jediného experimentu.

### Metodika práce

Současná práce v rámci velkých experimentálních kolaborací je velmi specifická. Zvládnout celý výsledek měření již není v silách jediného člověka, a proto je důležitá kooperace v rámci celé pracovní skupiny. V dnešní době platí, že práce na jednom experimentálním výsledku se účastní tým i několika desítek lidí (a spoluautory článků je celá kolaborace čítající stovky až tisíce vědců). V takových týmech je důležité vymezit, kdo a jakým dílem přispěl do celkového výsledku. Autorka dizertační práce jasně popisuje, co bylo jejím hlavním přínosem v tomto měření. Šlo o statistické testování hypotéz a změření účinného průřezu produkce  $H \rightarrow \tau\tau$  pomocí nejlepšího statistického fitu v rámci experimentálních a teoretických neurčitostí.

### Struktura práce

Disertační práce je rozdělena do pěti hlavních kapitol, závěru a tří dodatků. První kapitola vcelku zdařile popisuje zkoumanou problematiku Higgsova bosonu. Obrázky 1.4 (měření hmoty Higgsova bosonu) a 1.5 (měření účinného průřezu v různých rozpadových kanálech) shrnují současný stav (2019) zkoumané problematiky. Druhá kapitola se věnuje popisu experimentálního uspořádání. Je zde stručně popsán urychlovač LHC a detektor ATLAS. Třetí část se věnuje popisu Tile kalorimetru detektoru ATLAS. Autorka se věnovala časové kalibraci tohoto kalorimetru v průběhu své servisní práce v kolaboraci, proto je mu věnována větší pozornost. Časová kalibrace je důležitá, protože nabírání celkové statistiky pro samotné měření zabírá i několik let (v dizertaci jsou použita data z let 2015 a 2016, ale např. celkový vzorek nabraných dat z tzv. Run2 obsahuje data z období 2015 až 2018). Servisní práce je rovněž nezbytná, aby se člověk mohl stát spoluautorem všech experimentálních výsledků kolaborace ATLAS.

Čtvrtá kapitola se zabývá statistickou analýzou dat od popisu pravděpodobnosti až po testování statistických hypotéz. Tato kapitola je nezbytnou součástí dizertace, protože hlavní autorčin příspěvek, uvedený v páté, hlavní kapitole, se zabýval právě touto interpretací naměřených dat. Kapitoly 5.1–5.5 stručně uvádí samotné měření produkce Higgsova bosonu v rozpadovém kanálu  $H \rightarrow \tau\tau$ . Hlavní část pak tvoří kapitoly 5.6–5.8, popisující vlastnosti hlavního fitu a testování vlastností systematických neurčitostí, které ho ovlivňují. Pozorovaná signifikance ve vzorku dat nabraných v letech 2015–2016 je  $4.4\sigma$ , v kombinaci se vzorky dat nabranými při nižší těžišťové energii pak  $6.4\sigma$ . Ve standardní konvenci používané v částicové fyzice to znamená objev Higgsova bosonu v kanálu  $H \rightarrow \tau\tau$  v experimentu ATLAS (pravděpodobnost, že by pozorování bylo

způsobeno jen náhodnou fluktuací je menší než 1:3500000). Naměřený účinný průřez produkce je v souladu s předpovědí Standardního modelu.

Struktura rozdělení práce je velmi vhodně zvolena. Jednotlivé kapitoly shrnují dílčí kroky vedoucí k hlavnímu výsledku, kterým je změření účinného průřezu produkce. Měl bych výhradu k zvolenému popisu samotného měření. Je až příliš stručný a odpovídá spíše článku ve vědeckém časopise, kde se u řady detailů dá odkázat na předchozí publikace. V rámci dizertační práce bych uvítal více detailů k jednotlivým krokům analýzy. Chybí v ní například cutflow tabulky popisující počty pozorovaných událostí v jednotlivých studovaných kanálech, a je tak potřeba vycházet z jednotlivých obrázků. Hlavní obrázky vstupů (výstupů) do statistického fitu jsou uvedeny až v obr. 5.19 a 5.20.

Po formální a jazykové stránce je práce velmi kvalitní. Obsahuje jen zanedbatelné množství překlepů a jazykových chyb, ale přesto musím poukázat na dvě pochybení. Jedním z nich je překlep v hlavním výsledku v kapitole 5.7.6 a v závěru – měření účinného průřezu  $H \rightarrow \tau\tau$  v kanálech VBF a ggF, jeho hodnota ve VBF kanálu by měla být 0.28 (místo 0.38), aby odpovídala obr. 5.18. Druhým je jednotný styl v citacích. Například citované články kolaborace ATLAS mají nejméně čtyři různá formátování. Tomu by se dalo předejít použitím jednotného citačního stylu, například s využitím bibtex/biblatex. Hlavní výsledky [22] předložené v této dizertaci jsou v seznamu citací prezentovány jako odeslané k publikaci, ale v seznamu příspěvků autorky již tato publikace vyšla ve Phys. Rev. D.

### **Výsledky práce a jejich význam**

Výsledky prezentované v této práci jsou vysoce originální a rozšiřují naše znalosti o vlastnostech Higgsova bosonu v rámci Standardního modelu mikrosvěta. Autorka k nim přispěla svou vlastní prací při statistické analýze naměřených dat. Hlavní článek [22] byl již publikován a další je v přípravě. Autorka rovněž referovala o těchto výsledcích na mezinárodních konferencích.

### Otázky k obhajobě

- Výsledky dizertace podporují hypotézu, v níž se Higgsův boson rozpadá podle předpokladů Standardního modelu. Existují i jiné BSM modely, které by mohly být testovány?
- Co se očekává od výsledku získaného z celého vzorku dat z Run2? Jaká systematická neurčitost by mohla být snížena a jaká je očekávaná přesnost výsledku?
- Využívá celá ATLAS Higgs pracovní skupina stejné nástroje pro statistickou analýzu? Jak probíhá kombinace s ostatními kanály?

Předložená práce splňuje požadavky kladené na vědecké práce tohoto typu a potvrzuje předpoklady autorky k samostatné tvůrčí práci. Doporučuji ji tedy k obhajobě a navrhuji, aby po úspěšné obhajobě byl autorce přiznán vědecký titul „doktor“ (ve zkratce Ph.D.)

V Praze 3.července 2019

Ing. Zdeněk Hubáček, Ph.D.