

Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

Fyzikální praktikum



Úloha č. A1

Název úlohy: Objevování částic v detektoru ATLAS v CERN

Jméno: Michal Grňo

Obor: FOF

Datum měření: 18. 11. 2020

Datum odevzdání: 2. 12. 2020

Připomínky opravujícího:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Práce při měření	0-3	
Teoretická část	0-2	
Výsledky a zpracování měření	0-9	
Diskuse výsledků	0-4	
Závěr	0-1	
Použitá literatura	0-1	
Celkem	max. 20	

Posuzoval:

dne:

1 Pracovní úkoly

1. Zpracujte přibližně 50 událostí z detektoru ATLAS programem HYPATIA.
2. Pomocí programu ROOT zobrazte histogram invariantních hmotností pro různě velké statistické soubory.
3. Identifikujte výrazné píky a přiřaďte je očekávaným částicím.
4. Zjistěte chybu střední hodnoty invariantní hmotnosti Z bosonu pro různě velké statistické soubory.
5. Vyneste zjištěné chyby do grafu jako funkci počtu událostí a srovnajte je s očekávanou závislostí.
6. Interpretujte výsledky statistického testu pro nové částice a rozhodněte, jestli byl učiněn objev.

2 Teoretická část

Úloha A1 spočívá v analýze dat ze simulace detektoru ATLAS Velkého hadronového urychlovače (*LHC*). V *LHC* dochází k vysokoenergetickým srážkám dvou částic, jejichž interakce může produkovat exotické částice s velkou hmotností a krátkou dobou rozpadu. Přestože životnost takových částic typicky nestačí ani na to, aby doletěly z místa srážky do detektoru, můžeme je identifikovat podle jejich specifických rozpadových produktů a klidových hmotností.

2.1 Bosony Z , H

Nás budou zajímat především bosony Z^0 a H^0 , jejichž typické rozpady jsou následující:

$$Z^0 : e^- + e^+$$

$$Z^0 : \mu^- + \mu^+$$

$$H^0 : 2 Z^0$$

$$H^0 : 2 \gamma$$

Toto nejsou zdaleka jediné možné rozpady, ale jsou pro nás nejsnáze detekovatelné. Klidové hmotnosti těchto bosonů jsou [1]:

$$m(Z^0) = (91.188 \pm 0.002) \text{ GeV}/c^2$$

$$m(H^0) = (125.09 \pm 0.24) \text{ GeV}/c^2$$

Další částice s podobnými rozpady, které budeme schopni detekovat, jsou mezony J/ψ (*charmonium*, vázaný stav $c\bar{c}$) a Υ (*bottomonium*, vázaný stav $b\bar{b}$). Jejich klidové hmotnosti jsou [1]:

$$m(J/\psi) = (3.096900 \pm 0.000006) \text{ GeV}/c^2$$

$$m(\Upsilon) = (10.5794 \pm 0.0012) \text{ GeV}/c^2$$

2.2 Klidová hmotnost

Z předchozího je zřejmé, že pro rozlišení těchto částic z rozpadových produktů bude důležité určit klidovou hmotnost. Protože se ale částice pohybují relativistickými rychlostmi, nestačí pouze sečíst klidové hmotnosti produktů. Místo toho máme k dispozici vztah ze speciální relativity:

$$E^2 = (pc)^2 + (m_0 c^2)^2, \quad (1)$$

kde E je energie částice, p její hybnost a m_0 klidová hmotnost. V případě rozpadových produktů umíme jejich energii přímo změřit a jejich klidovou hmotnost určíme z toho, o jaký druh částice se jedná. Z (1) tedy umíme dopočítat hybnost rozpadové částice. Díky zákonům zachování energie a hybnosti potom z těchto rozpadových produktů můžeme rekonstruovat klidovou hmotnost původní částice. Pro mnohočásticový systém totiž platí:

$$\left(\sum_n E_n \right)^2 = \left(\sum_n p_n c \right)^2 + (M_0 c^2)^2,$$

kde E_n jsou energie jednotlivých částic, p_n jsou jejich hybnosti a M_0 je klidová hmotnost celého systému, a tedy i původní částice. Snadnou úpravou dostáváme:

$$M_0 = \frac{1}{c^2} \sqrt{\left(\sum_n E_n\right)^2 - \left(\sum_n p_n c\right)^2}. \quad (2)$$

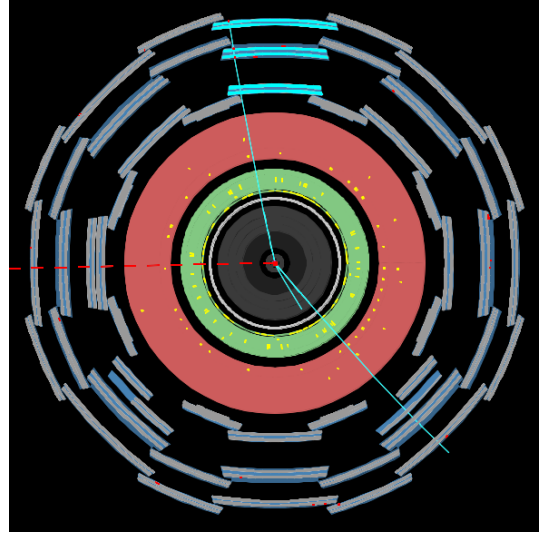
Ačkoliv rovnice (2) umožňuje rekonstrukci z obecného mnohačásticového rozpadu, nejspolehlivější je určení původní částice z páru rozpadových částic.

2.3 Identifikace částic

Data z detektoru budeme analyzovat v programu HYPATIA, který nám umožňuje zobrazit dráhy detekovaných částic na příčném a podélném řezu detektoru. Příčný řez je možné vidět na obrázku 1.

Detektor se skládá ze čtyř podstatných částí: vnitřní části (na obrázku šedá) s magnetickým polem, které zakřivuje dráhu nabitých částic, elektromagnetického kalorimetru (na obrázku zelená), kde je absorbována energie elektromagnetických spršek, hadronový kalorimetr (na obrázku červená) a nakonec mionová komora (na obrázku šedomodrá¹), do které z detekovatelných částic doletí pouze miony.

My se budeme pokoušet pouze o identifikaci párů elektron-pozitron, jejichž dráha typicky končí už v rámci vnitřní části, foton-foton, které byly detekovány v elektromagnetickém kalorimetru, a mion-antimion, které proletěly celým detektorem až do mionové komory.



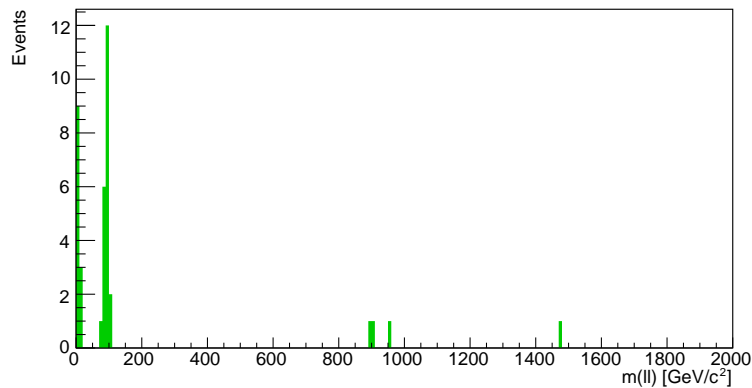
Obrázek 1: Příčný řez detektorem ATLAS

3 Výsledky měření

3.1 Události identifikované autorem

Z dostupných dat se nám podařilo identifikovat celkem 47 rozpadů na $e^- + e^+$, $\mu^- + \mu^+$ nebo 2γ . Kritériem při určování bylo, zda je možné jednoznačně identifikovat, že obě částice vylétají z jednoho bodu, a tedy mohou být produktem jednoho rozpadu. Pokud z jednoho bodu vylétaly tři částice a nebylo zřejmé, které patří do jednoho rozpadového páru, tuto událost jsme přeskočili. Podařilo se také identifikovat celkem tři čtyřčásticové rozpady.

Z identifikovaných srážek jsme vypočítali invariantní hmotnosti potenciálních rozpadlých částic. Jak je vidět z obrázku 2, počty událostí jsou v řádu jednotek a většina energetického spektra má pouze osamocené události. Jediný zajímavý pík je kolem ~ 100 GeV, detailnější histogram tohoto píku najdeme na obrázku 3.



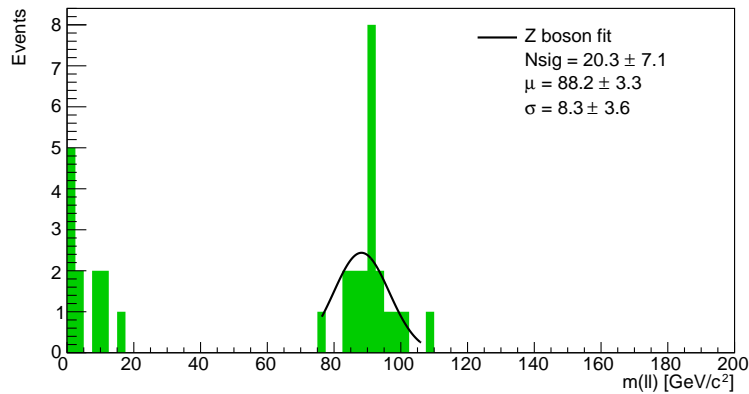
Obrázek 2: Histogram všech vypočítaných M_0 z autorem identifikovaných srážek.

Fitem tohoto píku jsme získali invariantní hmotnost

$$M_0 = (88.2 \pm 3.3) \text{ GeV}/c^2,$$

¹Jsou-li ve vašem prohlížeči PDF jiné barvy, než jaké jsou zde uvedeny, autor se vám omlouvá. Jedná se o technický problém, který se mu ani přes vynaloženou snahu nepodařilo eliminovat. Pokud jsou barvy tak moc k nepoznání, že vám to znemožňuje identifikaci jednotlivých částí, vězte, že jsou části detektoru vyjmenovávány v pořadí ze středu směrem ven. Pokud je jedna z barev, které vidíte, oktarínová, kontaktujte prosím autora a jako přílohu mu zašlete detailní informace o vašem systému a fyzickou fotografii monitoru.

což je v souladu s hmotností Z bosonu. Také jsme detekovali vyšší množství událostí v oblasti jednotek GeV – ty pravděpodobně pochází z rozpadů mezonů J/ψ a Υ , počet událostí je ovšem příliš nízký na to, aby se dal rozumně proložit fitem.

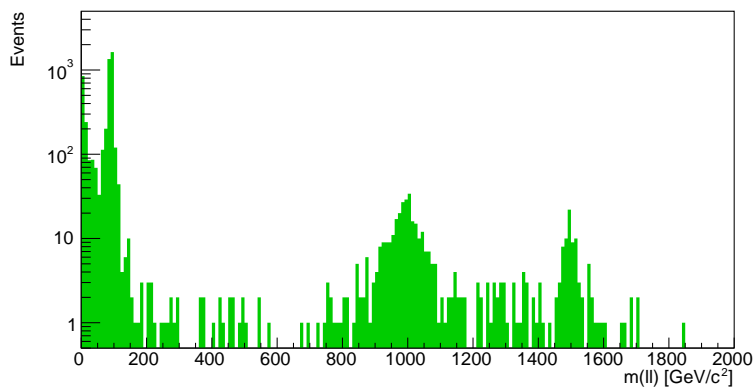


Obrázek 3: Histogram vypočítaných M_0 v okolí píku.

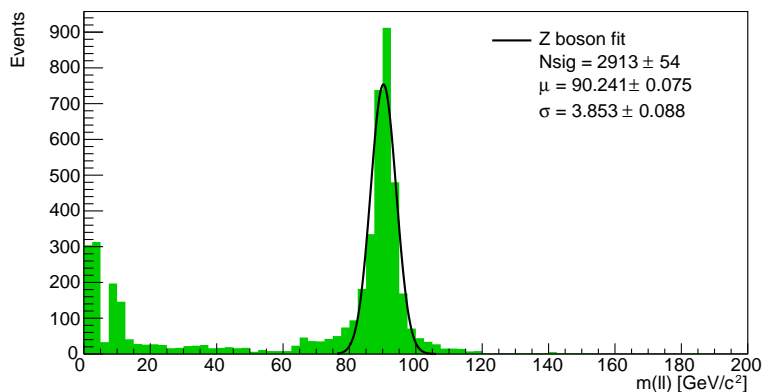
3.2 Soubor dat od různých autorů

V rámci praktika se shromažďují události identifikované všemi studenty, kteří se úlohy A1 účastní. Tento soubor obsahuje o několik řádů vyšší počet identifikovaných událostí, proto umožňuje identifikaci píků, které jsme ve vlastních datech nemohli pozorovat.

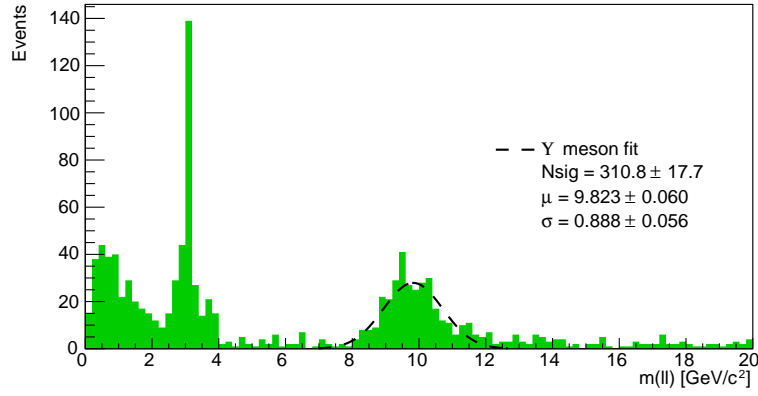
Na obrázku 4 vidíme všechna data odpovídající rozpadům na leptonové páry (tj. $e^- + e^+$ a $\mu^- + \mu^+$). Kromě píku kolem $100 \text{ GeV}/c^2$ vidíme i píky na $1 \text{ TeV}/c^2$, což je přibližně kinetická energie letícího komára [2], a $1.5 \text{ TeV}/c^2$. Na obrázku 5 vidíme detail píku Z bosonu a na obrázku 6 potom detail píku, který jsme dříve neidentifikovali a který odpovídá mezonu Υ .



Obrázek 4: Histogram všech M_0 vypočítaných z leptonových párů.



Obrázek 5: Detail píku Z bosonu, leptonové páry.



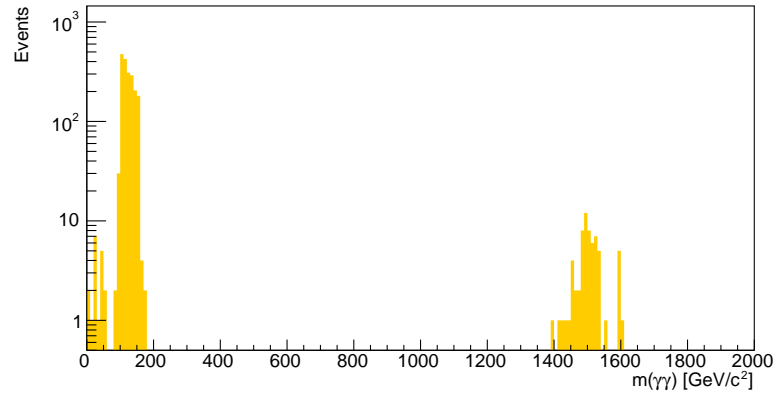
Obrázek 6: Detail píku mezonu Υ , leptonové páry.

Pro píky odpovídající Z a Υ jsme provedli fit, střední hodnoty vyšly:

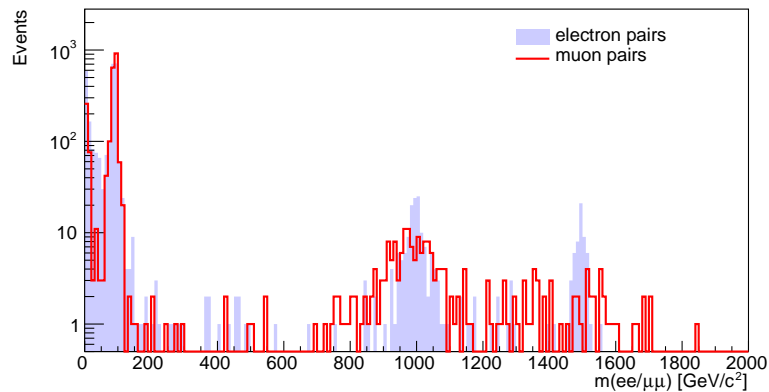
$$M_0(Z) = (90.24 \pm 0.08) \text{ GeV}/c^2 ,$$

$$M_0(\Upsilon) = (9.82 \pm 0.06) \text{ GeV}/c^2 .$$

Porovnáme-li obrázek 4 odpovídající leptonovým rozpadům s obrázky 7 (fotonové rozpady) a 8 (pouze rozpady na elektron-pozitron), můžeme pozorovat několik kvalitativních rozdílů. Píku bosonu Z je v leptonových a elektronových datech velmi podobný, v datech k fotonům je výrazně širší a posunutý k vyšším energiím. Částice s hmotností $1 \text{ TeV}/c^2$ vůbec nemá fotonový pík a částici s hmotností $1.5 \text{ TeV}/c^2$ zase chybí elektronový pík.



Obrázek 7: Histogram všech M_0 vypočítaných z párů fotonů.

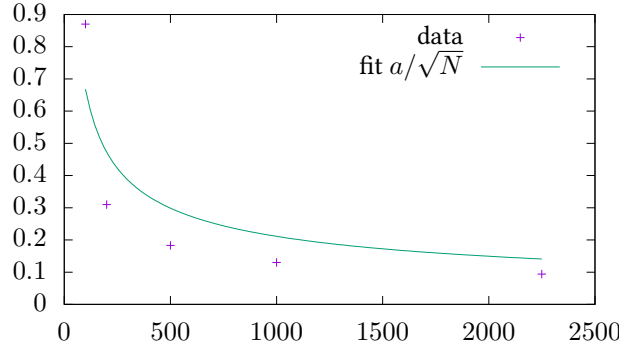


Obrázek 8: Histogram všech M_0 vypočítaných z párů elektron-pozitron.

Porovnali jsme statistiku z různě velkých souborů. Předpokládáme, že střední hodnota fitů bude mít chybu nepřímo úměrnou odmocnině z počtu událostí [1]. Skutečnou závislost chyby na počtu událostí jsme vypsali do tabulky 1 a vynesli do grafu v obrázku 9 společně s fitem předpokládanou závislosti.

N	chyba [GeV]
100	0.87
200	0.31
500	0.183
1000	0.130
2249	0.094

Tabulka 1: Chyby maxima píku pro Z boson.



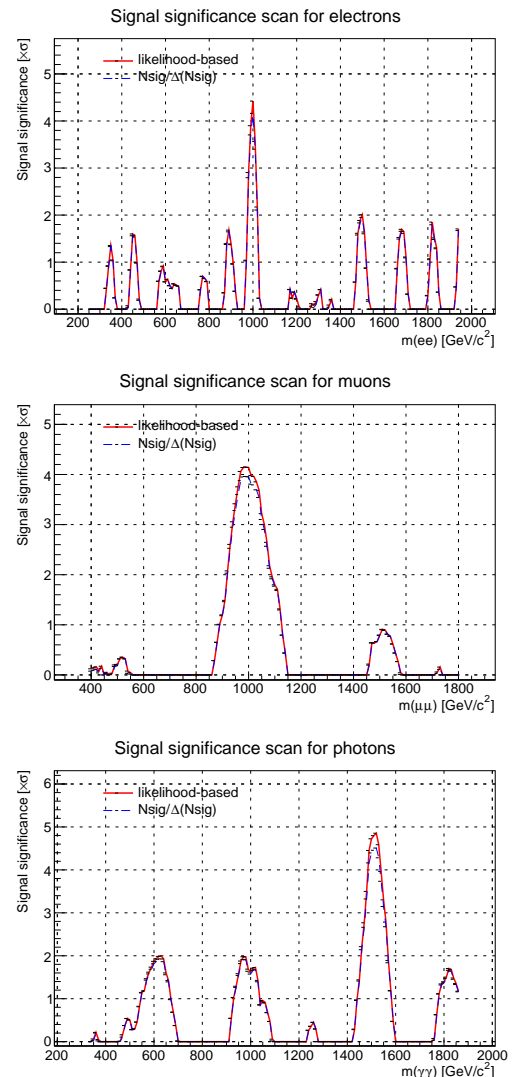
Obrázek 9: Chyba střední hodnoty píku Z bosonu vs. počet událostí.

Nakonec jsme zkoumali signifikanci naměřených peaků 1 TeV a 1.5 TeV. Nulovou hypotézu jsme formulovali tak, že peaky byly způsobeny pouze šumem, ne skutečnou částicí. Standardně se v částicové fyzice požaduje signifikance 5-sigma. Jak je vidět v grafech na obrázku 10, této signifikance se nepodařilo dosáhnout ani v jednom případě, ačkoliv pik odpovídající rozpadu foton-foton na 1.5 TeV se této signifikanci blíží. Nulovou hypotézu se tedy nepodařilo vyvrátit a naše data tedy dostatečně neprokázala, že píky nejsou pouze náhodnou fluktuací.

4 Diskuse

V datech se podařilo identifikovat dva píky, které neodpovídaly známým částicím. Ačkoliv se nejedná o signifikantní objev podle standardu 5-sigma, je to přesto poměrně přesvědčivá evidence, že by mohly existovat částice s klidovou hmotností 1 TeV/ c^2 a 1.5 TeV/ c^2 . Lehčí z těchto částic by se rozpadala výhradně na pár lepton-antilepton, těžší z těchto částic na mion-antimion nebo foton-foton. Protože máme o těchto hypotetických částicích pouze velmi málo informací, není snadné určit, jestli odpovídají nějaké teoretické předpovědi. Mohlo by jít o Z' boson a graviton. Nebo by mohlo jít o částice supersymetrické teorie, které mají srandovná jména: třeba smeson tvořený sstrange squarkem a jeho antičásticí, nebo například gaugino bosino wino, což je jedno ze tří hypotetických electroweakin².

V grafu 9 skutečná data neodpovídala přesně teoretické závislosti. To mohlo být způsobeno například tím, že jsme nepočítali jenom události v píku, ale i v šumu kolem.



Obrázek 10: Signifikance jednotlivých píků.

²Autorův skromný názor je, že částice s takovými názvy by nikdy neměly existovat, a tudíž je neúspěch SUSY pro částicovou fyziku dobrý.

5 Závěr

Podařilo se zpracovat události ze simulace detektoru ATLAS a ze zpracovaných dat se podařilo určit invariantní hmotnost bosonu Z jako:

$$m(Z) = (88.2 \pm 3.3) \text{ GeV}/c^2.$$

Dále se ze souboru dat od různých autorů podařilo zpřesnit hmotnost Z a určit hmotnost Υ :

$$m(Z) = (90.24 \pm 0.08) \text{ GeV}/c^2,$$

$$m(\Upsilon) = (9.82 \pm 0.06) \text{ GeV}/c^2.$$

Také se podařilo identifikovat dvě potenciální neznámé částice, ačkoliv se nejedná o objev se signifikancí 5-sigma.

6 Literatura

[1] Praktikum částicové a jaderné fyziky. Objevování částic v detektoru ATLAS v CERN. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_401.pdf. 26. září 2019

[2] Příspěvatelé Wikipedie. Electronvolt. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Citováno 2. 12. 2020. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Electronvolt>