

UNIVERZITA KARLOVA

ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM IV.
PRO OBOR OBECNÁ FYZIKA

I. Objavovanie častíc v detektore ATLAS v CERN

Autor:
Samuel Kočiščák

20. januára 2018

1 Pracovné úlohy

1. Spracujte približne 50 udalostí z detektoru ATLAS programom Hypatia.
2. Pomocou programu ROOT zobrazte histogram invariantných hmotností pre rôzne veľké štatistické súbory.
3. Identifikujte výrazné peaky a priradte ich očakávaným časticiam.
4. Zistite chybu strednej hodnoty invariantnej hmotnosti pre nájdené častice pre rôzne veľké štatistické súbory.
5. Vyneste zistené chyby do grafu ako funkciu počtu udalostí a porovnajte ich s Poissonovým rozdelením.

2 Teoretická časť

2.1 Rozpoznanie častíc

V LHC sa pri vysokých energiách zrážajú dvojice protónov s opačnou hybnosťou. Pri takejto zrážke môžu vzniknúť exotické častice s vysokou hmotnosťou, oveľa vyššou, než pokojová hmotnosť dvoch elektrónov. Ak vznikne častica s veľmi krátkou dobou života, nie je možnosť detekovať ju priamo, ale len skrz detekciu častíc, na ktoré sa rozpadne.

Detektor ATLAS pozostáva z niekoľkých vrstiev detektorov. Najbližšie k miestu zrážky je tzv. dráhový detektor, ktorý zaznamenáva polohu častíc, ktoré ním prelietajú, pričom s nimi príliš neinteraguje a teda im neodoberá významné množstvo energie. Dráhový detektor sa nachádza v homogénnom magnetickom poli, vďaka čomu vidno na zázname z neho odklon nabitých častíc.

Okolo dráhového detektora sa nachádza elektromagnetický kalorimeter, ktorý je schopný detekcie elektromagneticky interagujúcich častíc, najmä elektrónov (ktoré sú v ňom typicky zastavené) a fotónov. Elektromagnetický kalorimeter meria energiu častice v ňom zachytenej.

Hadrónový kalorimeter obklopuje elektromagnetický kalorimeter a zachytáva silno interagujúce častice zložené z kvarkov. Formát poskytnutej informácie je analogický informácii z elektromagnetického kalorimetra.

Miónové komory obklopujú v niekoľkých vrstvách hadrónový kalorimeter a aj keď nedokážu mióny zastaviť, dokážu určiť ich hybnosť oveľa presnejšie, než dráhový detektor. Podľa náboja častice a toho, ktorou vrstvou (ak nejakou) bola zastavená možno určiť, o akú časticu sa jednalo a akú mala energiu.

2.2 Z bozóny a Higgsove bozóny

Ako Z bozóny, tak Higgsove bozóny sú krátko žijúce neutrálne ťažké častice. Z prírodných zákonov vyplývajú obmedzenia na to, na aké častice sa môžu tieto bozóny rozpadáť. Spomedzi všetkých sú dostatočne početnými a dobre detekovateľnými rozpady $Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$, $Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$, $H^0 \rightarrow 2Z^0 \rightarrow 2l^+ + 2l^-$, $H^0 \rightarrow 2\gamma$. Budeme

sa teda snažiť identifikovať dvojice $e^+ + e^-$, $\mu^+ + \mu^-$ a 2γ a z ich invariantných hmotností určovať, z akých častíc pochádzajú.

2.3 Invariantná hmotnosť

Zo špeciálnej teórie relativity vieme, že pokojová hmotnosť m_0 častice je invariantom. Možno ju určiť ako

$$m_0 = \sqrt{\left(\frac{E}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{|\vec{p}|}{c}\right)^2}, \quad (1)$$

čo platí pre dvojicu častíc pochádzajúcich z rozpadu inej v tvare

$$m_0 = \sqrt{\left(\frac{E_1 + E_2}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{|\vec{p}_1 + \vec{p}_2|}{c}\right)^2}, \quad (2)$$

kde m_0 je v našom prípade pokojová hmotnosť materskej častice. Energie a hybnosti častíc zmeria a výpočet prevedie detektor ATLAS, naša úloha sa teda redukuje na identifikáciu dvojice častíc z jedného rozpadu.

Nasleduje tabuľka pokojových hmotností m_0 pre niektoré vybrané častice.

Tabuľka 1: Pokojové hmotnosti niektorých vybraných bozónov

častica	m_0 [GeV/c ²]	rozpadová šírka [GeV/c ²]
J/ψ	3,1	$9 \cdot 10^{-5}$
$\Upsilon(1S)$	9,5	$5 \cdot 10^{-5}$
Z	91,2	2,5
H	125,1	< 0,013
Z'	$\gg m_0(Z)$??

2.4 Chyba a Poissonovo rozdelenie

Podľa teórie^[St] zo štatistiky predpokladáme, že chyba určenia jednotlivých veličín fitovaním bude klesať ako prevrátená hodnota odmocniny – podľa Poissonovho rozdelenia. Predpokladáme teda závislosť

$$\sigma(n) = A/\sqrt{n}, \quad (3)$$

kde A je konštanta rozmeru chyby σ .

3 Výsledky merania

3.1 Ručné spracovanie

Spracovali sme dátové súbory 0,1 a časť súboru 2, spolu sme ručne analyzovali 125 zdrážok. V programe Hypatia sme nastavili pobmedzenia na minimálnu hybnosť častice, aby sme pri väčšine rozpadov videli len zopár častí. Keďže častice z rozpadu

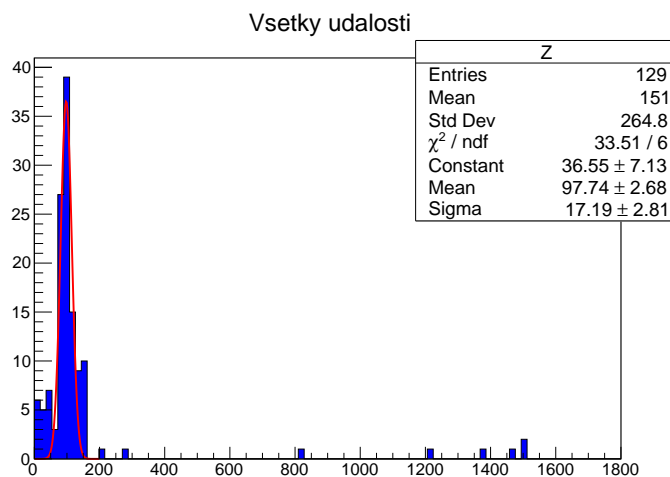
niektorého z ťažkých bozónov majú vysokú energiu, jedná sa typicky o najenergetickejšiu dvojicu častíc v udalosti.

Pozreli sme si záznam každej zrážky a určovali sme dvojice $e^+ + e^-$, $l^+ + l^-$ a $\gamma + \gamma$ tak, že sme do dvojice zahrnuli dve najenergetickejšie vyhovujúce častice. Aby boli vyhovujúce, museli byť jedného typu a pochádzať z jedného miesta – z toho istého rozpadu. Aj keď sme to a priori nepožadovali, pozorovali sme, že častice z páru, minimálne ak sa v zrážke vyskytlol práve jeden vysokoenergetický pár, mali približne opačný smer. To dáva zmysel, keďže častice odnesú veľa energie, nemôže sa ich hybnosť sčítať, pretože v rozpade by už neostalo dosť energie, aby ostatné častice vykompenzovali hybnosť tohto páru.

Po označení dvojice častíc program Hypatia dopočítal pokojovú hmotnosť materskej častice. Ak sa v zrážke vyskytli dva leptón-antileptónové páry, systém vypočítal aj pokojovú hmotnosť častice, z ktorej mohli vzniknúť dva Z bozóny rozpadujúce sa na zmienené dva leptón-antileptónové páry. Po spracovaní určeného množstva dátových súborov sme sa zaoberali už len štatistikou pokojových hmotností kandidátov na niektorý z bozónov z tabuľky 1.

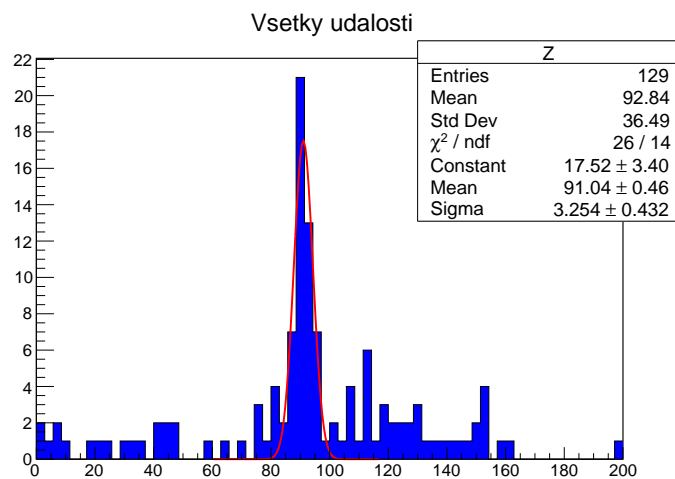
3.2 Pokojové hmotnosti materskej častice – naše spracovanie

Graf na obrázku 1 je histogramom invariantných hmotností za predpokladu, že nami identifikované dvojice častíc pochádzajú z dvojčasticového rozpadu jednej častice.



Obr. 1: Histogram invariantných hmotností materskej častice - fit na Z bozón

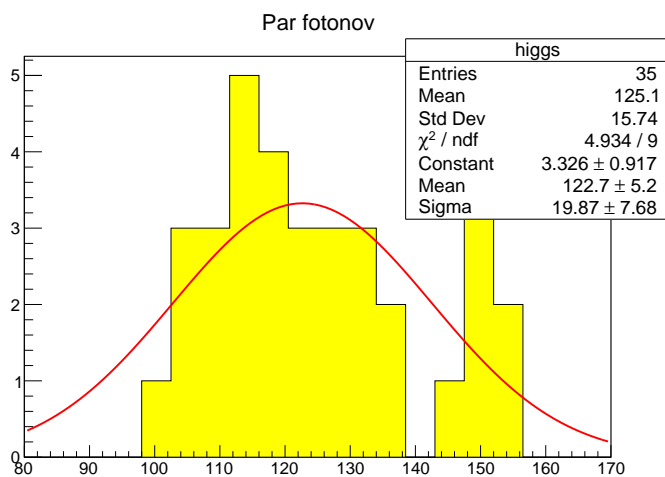
Až na zopár rozpadov v okolí $1500 \text{ GeV}/c^2$ zodpovedajú všetky hmotnostiam materskej častice okolo $100 \text{ GeV}/c^2$. Tento región je približený v grafe na obrázku 2.



Obr. 2: Histogram invariantných hmotností matersekj častice - fit na Z bozón

V grafe na obr. 2 vidno výrazný peak hmotnosťou zodpovedajúci Z bozónu ($91,2(25) \text{ GeV}/c^2$ podľa tabuľky, $91(3) \text{ GeV}/c^2$ nafitované). Objavuje sa aj náznak peaku v okolí $120 \text{ GeV}/c^2$, ktorý by mohol zodpovedať Higgsovmu bozónu, no pri tomto pohľade je to skutočne nepriekazné. Kvôli hrubému binningu a malému počtu udalostí nevidno žiadne peaky, ktoré by sme mohli stotožniť s J/ψ alebo Υ .

Aby sme mohli lepšie študovať nevýrazný peak Higgsovho bozónu, vyfiltrujeme iba $\gamma + \gamma$ udalosti. Tieto približené na oblasť okolo $120 \text{ GeV}/c^2$ vidno v histograme na obrázku 3.

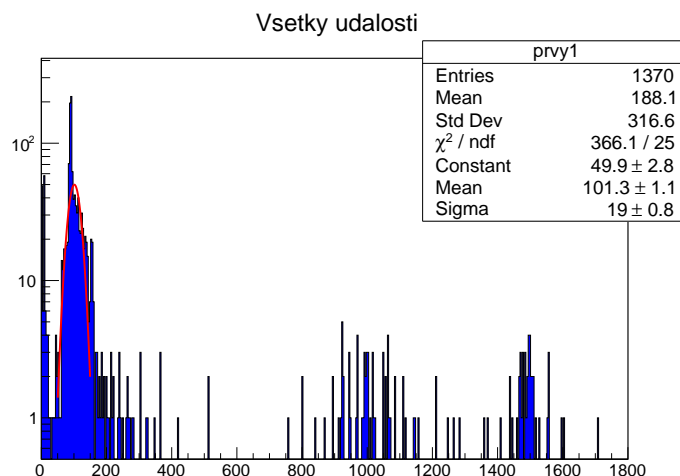


Obr. 3: Histogram invariantných hmotností materskej častice z fotónových rozpadov - fit na H bozón

V histograme na obrázku 3 už vindo, jasný peak na správnom mieste ($125,1 \text{ GeV}/c^2$ podľa tabuľky, $120(20) \text{ GeV}/c^2$ naftované).

3.3 Ďalšie dáta

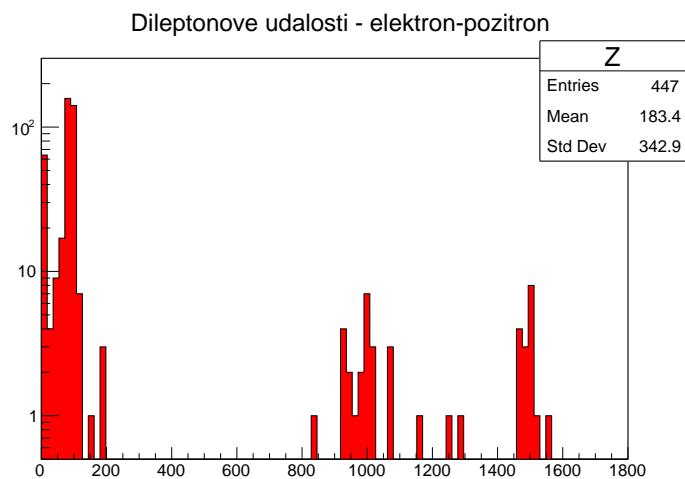
V tejto sekcii budeme interpretovať väčšie množstvo dát, ktoré sme dostali už spracované. Ide o rovnaké dáta, ako sme spracovávali v stati 3.2, ale k našim 129 rozpadom sme pre lepšiu štatistiku pridali 1241 cudzích. Obdobou nášho grafu 1 je graf 4.



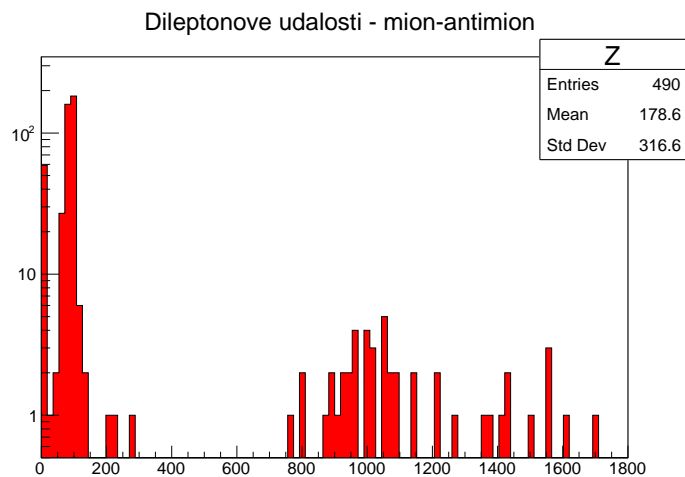
Obr. 4: Histogram invariantných hmotností matersekj častice - fit na Z bozón

Aj v histograme na obrázku 4 vidno veľmi výrazný peak okolo $100 \text{ GeV}/c^2$ (graf v logaritmickej mierke). Okrem toho pozorujeme peak na nízkych energiách (tomu sa ešte budeme venovať), peak okolo $1500 \text{ GeV}/c^2$ a náznak niečoho ako peak okolo $1000 \text{ GeV}/c^2$. Tieto dva peaky pravdepodobne zodpovedajú dvom ťažkým časticiam, ktoré sme nepredpokladali. Nevieime o nich povedať veľa, iba toľko, že niektorá z nich môže byť napríklad nepotvrdený Z' bozón.

V histogramoch na obrázkoch 5 a 6 pozorujeme, že rozloženie dvojleptónových udalostí je podobné rozdeleniu všetkých častíc, najmä preto, že dvojleptónové udalosti sú najpočetnejšie. Vidno však nižší počet udalostí v okolí $1500 \text{ GeV}/c^2$.

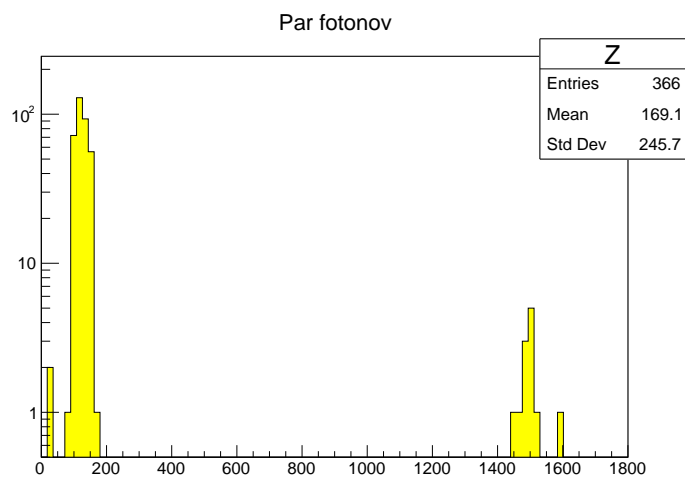


Obr. 5: Histogram invariantných hmotností materskej častice - elektrón pozitronové udalosti



Obr. 6: Histogram invariantných hmotností materskej častice - mión antiniónové udalosti

V histograme na obrázku 7 vidno rozdelenie pokojových hmotností pre dvojfotónové udalosti. Po odstránení leptónových udalostí jasne zmizol peak na nízkych energiách a peak okolo $1000 \text{ GeV}/c^2$. Vymizol taktiež peak v okolí $90 \text{ GeV}/c^2$.

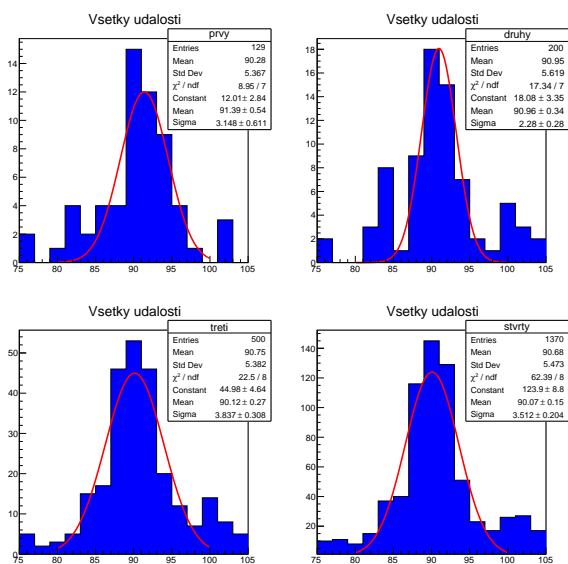


Obr. 7: Histogram invariánntých hmotností materskej častice - dvojfotónové udalosti

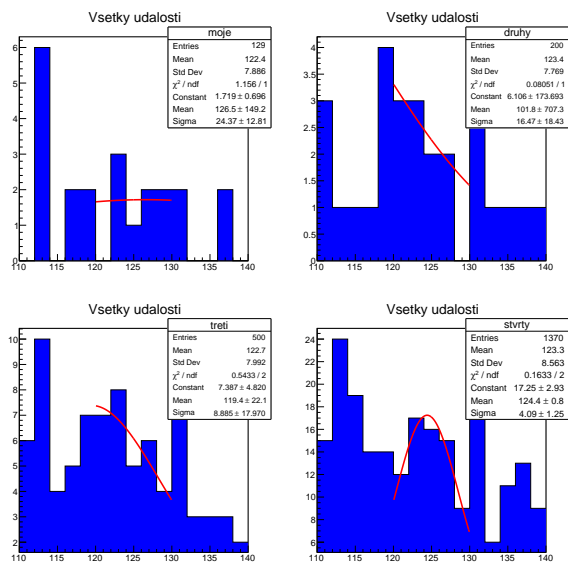
Z histogramov na obrázkoch 5, 6 a 7 možno teda robiť závery, že častice v okolí $<10 \text{ GeV}/c^2$ (J/ψ a Υ) a $90 \text{ GeV}/c^2$ (Z bozóny) sa rozpadávajú dvojleptónovo, častice okolo $120 \text{ GeV}/c^2$ (H bozóny) sa rozpadávajú fotónovo, neidentifikované častice okolo $1000 \text{ GeV}/c^2$ sa rozpadávajú leptónovo a neidentifikované častice okolo $1500 \text{ GeV}/c^2$ sa rozpadávajú fotónovo.

3.4 Konvergencia rozdelenia a chyby

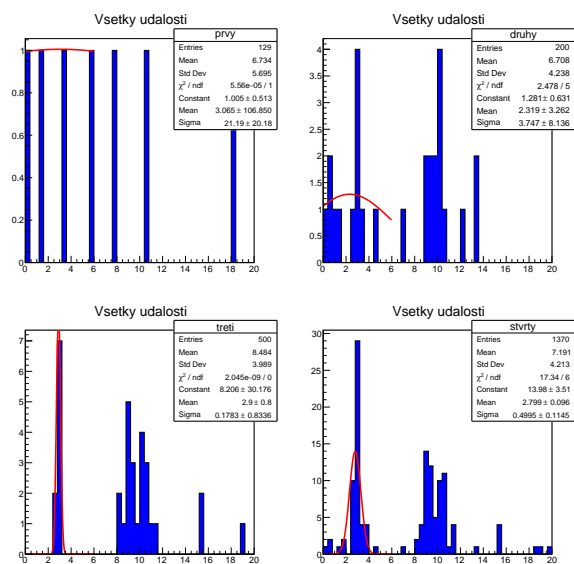
Na obrázkoch 8 až 11 vidno vývoj polohy a chyby určenia polohy prislúchajúcich peakov.



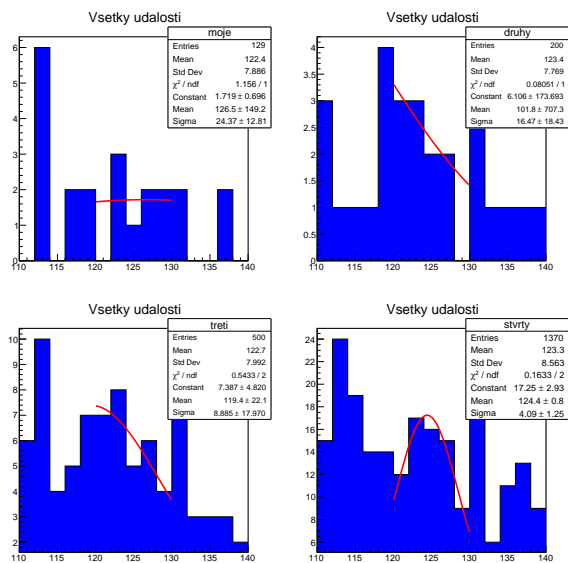
Obr. 8: Vývoj histogramu peku Z bozónu so zvyšujúcim sa počtom preskúmaných udalostí



Obr. 9: Vývoj histogramu peku H bozónu so zvyšujúcim sa počtom preskúmaných udalostí

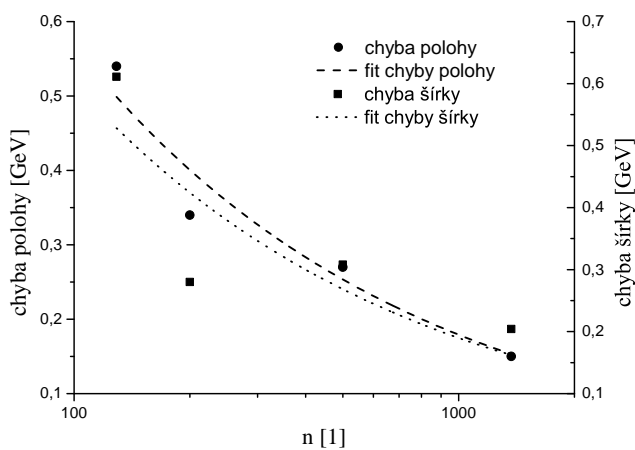


Obr. 10: Vývoj histogramu peku J/ψ bozónu so zvyšujúcim sa počtom preskúmaných udalostí

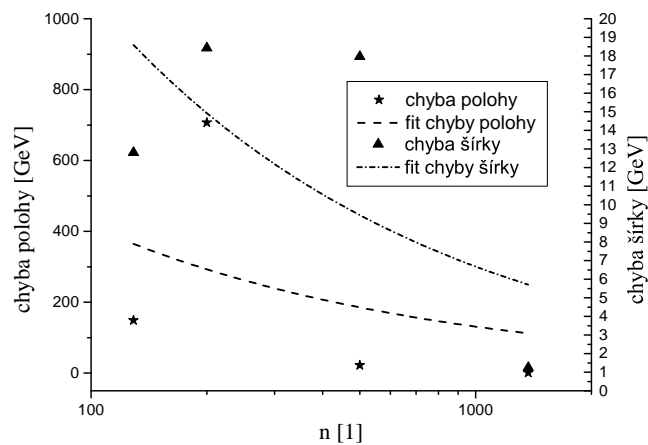


Obr. 11: Vývoj histogramu peku Υ bozónu so zvyšujúcim sa počtom preskúmaných udalostí

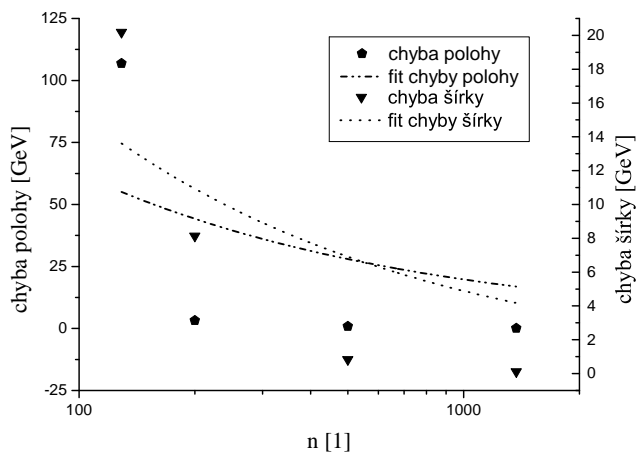
Vo všetkých 4 obrázkoch 8 až 11 je jasná tendencia konvergencie stredu peaku, znižujúcej sa chyby polohy a konvergencie šírky peaku. Nasledujú grafy závislostí chyby stredu a chyby šírky pre jednotlivé častice.



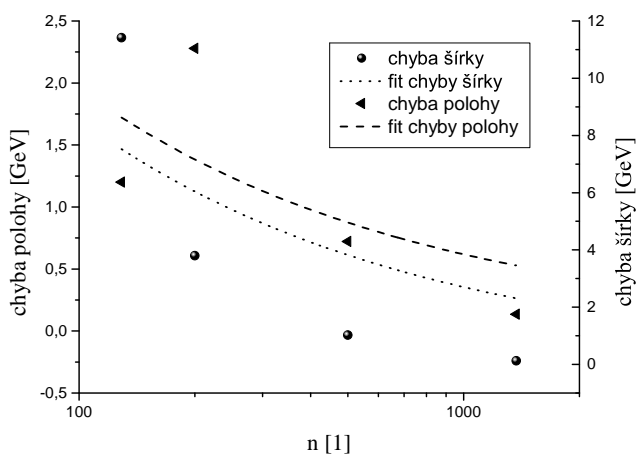
Obr. 12: Graf chyby polohy stredu a chyby šírky pre Z bozón



Obr. 13: Graf chyby polohy stredu a chyby šírky pre H bozón



Obr. 14: Graf chyby polohy stredú a chyby šírky pre J/ψ bozón



Obr. 15: Graf chyby polohy stredú a chyby šírky pre Υ bozón

Všetky z grafov na obrázkoch 12 až 15 sú fitované funkciou predpisu 3. V tabulke 2 sú zapísané jednotlivé nafitované hodnoty parametra A .

Tabuľka 2: Pokojové hmotnosti niektorých vybraných bozónov

častica	veľičina	$A \text{ GeV}/c^2$	neurčitosť $A \text{ GeV}/c^2$
Z	chyba stredu	5,7	0,3
Z	chyba šírky	6,0	0,8
H	chyba stredu	210	50
H	chyba šírky	4100	2400
J/ψ	chyba stredu	150	50
J/ψ	chyba šírky	630	340
$\Upsilon(1S)$	chyba stredu	20	5
$\Upsilon(1S)$	chyba šírky	90	30

Niektoré z grafov na obrázkoch 12 až 15 sú v súlade s teóriou – fit dobre sedí. To je prípad obrázka 12 a povedzme, že aj 15. Niektoré nesedia vôbec. Keďže najlepšiu štatistickú vzorku máme práve pre Z pozón, prikloníme sa k výsledku v obrázku 12 a povieme, že chyba skutočne klesá približne ako prevrátená hodnota odmocniny.

4 Diskusia výsledkov

Vysokú chybu (rozmazaný peak) v histograme na obrázku 3 možno prisúdiť zlému rozlíšeniu detektora. Keďže sa jedná o $\gamma + \gamma$ rozpad, informáciu o smere (a teda hybnosti) fotónov máme v podstate len z elektromagnetického kalorimetra, v kontraste s presnejšou informáciou z dráhového detektora, ktorú máme pre leptóny.

Nie vo všetkých grafoch na obrázkoch 8 až 11 sadol fit pekne, dôvodom je hlavne malá štatistická vzorka a pomerne vysoké pozadie. To možno opraviť spracovaním väčšieho množstva dát a vylepšením (sprisnením) algoritmu na určovanie leptónových a fotónových párov.

Pozorovali sme veľmi málo štvorčasticových rozpadov na to, aby sme mohli urobiť nejakú rozumnú štatistiku $H \rightarrow Z + Z$ rozpadov. Opäť, toto možno napraviť spracovaním výrazne väčšieho počtu udalostí.

5 Záver

Spracovali sme 125 zrážok a získali sme údaje o 129 rozpadoch.

Zobrazili sme histogramy pokojových hmotností materských častíc diskutovali sme pozorované peaky a priradzovali sme im najpravdepodobnejšie zdroje (materské častice).

Pozorovali sme vývoj chyby určenia stredu a šírky peakov zodpovedajúcich jednotlivým materským časticiam a konštatujeme, že chyby skutočne klesajú so zvyšujúcim sa počtom udalostí ako prevrátená hodnota odmocniny počtu sledovaných udalostí.

6 Zoznam použitej literatúry

- [St] Kolektív ZFP KVOF MFF UK. *Študijný text k meraniu: Objavovanie častíc v detektore ATLAS v CERN*. [cit. 2017-12-08]. URL: <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_401.pdf>.
- [Wi] Kolektív WIKIMEDIA project. *Wikipedia: Rydberg Constant* [cit. 2017-12-05]. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Rydberg_constant>.