

Objevování částic na detektoru ATLAS

Abstrakt: Při srážkách protonů na urychlovači LHC v laboratoři CERN vzniká velké množství částic, které jsou zachyceny různými typy detektorů. V této úloze se naučíte zpracovávat reálná data nasbíraná na experimentu ATLAS. V těchto datech se pak pokusíte najít vzácné částice, které ve srážkách protonů vznikají a změřit jejich základní vlastnosti.

1 Pracovní úkoly

1. DÚ: spočítejte p-value nutnou pro uznání objevu částice.
2. Zpracujte aspoň 100 událostí z detektoru ATLAS pomocí programu HYPATIA.
3. Zobrazte spektrum invariantní hmotnosti dileptonových párů pro různě velké statistické soubory. Identifikujte ve spektru pík odpovídající bosonu Z^0 .
4. Zjistěte střední hodnotu invariantní hmotnosti Z^0 bosonu a šířku jeho píku pro různě velké statistické soubory. V diskuzi srovnajte s tabulkovými hodnotami.
5. Vyneste zjištěné chyby měření do grafu jako funkci počtu událostí a srovnajte je s očekávanou závislostí.
6. Komentujte očekávání/přítomnost dalších píků ve spektru.
7. Proveďte statistický test pro Higgsův boson pro několik hodnot m_H a vyneste do grafů závislost signifikance a p-value na m_H .
8. Interpretujte výsledky statistického testu pro Higgsův boson, a rozhodněte, jestli byl učiněn objev. Srovnajte výsledek s tabulkovou hodnotou.

2 Pomůcky

Počítač s nainstalovaným programem HYPATIA.

3 Základní pojmy a vztahy

3.1 Standardní model

Svět elementárních částic je s velkým úspěchem popisován tzv. Standardním modelem částic a jejich interakcí (SM). Základními stavebními kameny hmoty jsou kvarky a leptony. Mají spin $1/2$ a jsou to tedy fermiony. SM zahrnuje tři ze čtyř základních interakcí, které jsou zprostředkovány výměnou tzv. intermediálních částic s celočíselným spinem - bosonů: fotonů pro elektromagnetickou, gluonů pro silnou a bosonů W^\pm a Z^0 pro slabou interakci. Elektromagnetická interakce působí na všechny elektricky nabitě částice, silná interakce působí jen na „barevně nabitě“ částice

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)				interactions / force carriers (bosons)	
I		II		III	
mass charge spin	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	0 0 1 g gluon	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 0 H higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 γ photon	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e electron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Z boson	
$< 1.0 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W boson		
QUARKS				GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS	SCALAR BOSONS
LEPTONS					

Obr. 1: Elementární částice ve Standardním modelu, převzato z [2].

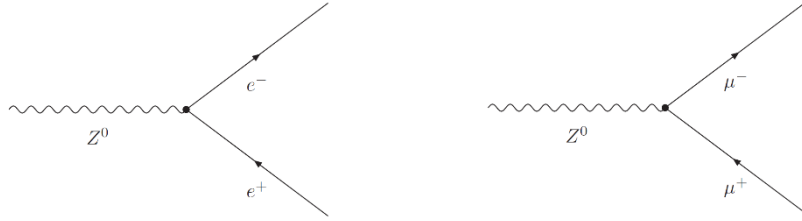
- kvarky a gluony - a slabá interakce působí na všechny známe fermiony a hmotné bosony. Na Obr. 1 lze vidět tabulku všech známých elementárních částic, jejich vlastnosti jsou shrnuty v [1]. Ke každé částici také existuje antičástice, která má stejné vlastnosti a liší se pouze opačným nábojem.

Z boson

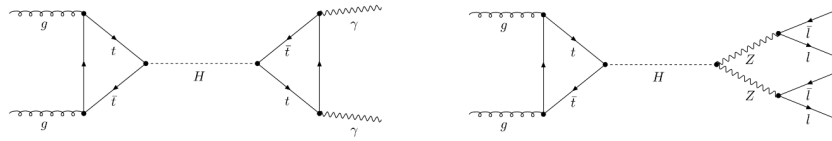
Elektricky neutrální boson Z^0 zprostředkovává slabou interakci. Jeho klidová hmotnost je přibližně $m_Z \approx 91 \text{ GeV}/c^2$ ($1 \text{ eV} \doteq 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$) a má velmi krátkou střední dobu života ($\sim 10^{-25} \text{ s}$). Nelze ho tudíž pozorovat přímo, ale pouze detekovat jeho rozpadové produkty. Z^0 boson se rozpadá mnoha způsoby, ale pro nás jsou nejzajímavější rozpady na páry elektron-pozitron nebo mion-antimion, souhrnně dileptony. Schématické zobrazení těchto rozpadů je na Obr. 2.

Higgsův boson

Higgsův boson je poslední objevenou částicí SM. Je projevem tzv. Higgsova pole a díky interakci s ním získávají všechny ostatní elementární částice svou hmotnost. Nehmotné částice (jako například fotony) s Higgsovým bosonem přímo neinteragují. Jeho klidová hmotnost je přibližně $m_H \approx 125 \text{ GeV}/c^2$ a stejně jako Z^0 boson je elektricky neutrální a má velmi krátkou střední dobu života (zhruba 10^{-22} s). Opět lze tedy detekovat pouze produkty jeho rozpadu. Experimentálně důležité jsou například rozpadové kanály Higgsova bosonu na dva fotony nebo na dva Z^0 bosony, po kterém následuje opět rozpad každého Z^0 bosonu na dileptony. Tyto rozpady jsou schématicky znázorněny na Obr. 3.



Obr. 2: Rozpad Z^0 bosonu na elektron-pozitron (vlevo) a mion-antimion (vpravo), převzato z [3].



Obr. 3: Rozpad Higgsova bosonu na dva fotony (vlevo) a dva Z^0 bosony (vpravo), převzato z [3].

3.2 Určení invariantní hmotnosti

Jak již bylo zmíněno výše, Z^0 boson i Higgsův boson mají svoje specifické klidové hmotnosti m_0 . Tuto hmotnost je možné určit z Einsteinovy relativistické formule pro energii:

$$E = \sqrt{(\vec{p} \cdot c)^2 + (m_0 \cdot c^2)^2}, \quad (1)$$

kde \vec{p} je hybnost částice a c rychlost světla ve vakuu. Jelikož Z^0 i Higgsův boson mají příliš krátké doby života, aby je bylo možné detekovat, měří se pouze vlastnosti jejich rozpadových produktů. Uvažujeme-li například rozpad Z^0 bosonu na pár elektron (e^-) a pozitron (e^+), pak pro invariantní hmotnost tohoto páru $m_{inv}^{(Z)}$ lze z rovnice 1 odvodit vztah:

$$m_{inv}^{(Z)} = \sqrt{\left(\frac{E_{e^-} + E_{e^+}}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{\vec{p}_{e^-} + \vec{p}_{e^+}}{c}\right)^2}, \quad (2)$$

přičemž bylo využito zákonů zachování energie ($E_Z = E_{e^-} + E_{e^+}$) a hybnosti ($\vec{p}_Z = \vec{p}_{e^-} + \vec{p}_{e^+}$). Energie a hybnosti rozpadových produktů lze přímo měřit pomocí detektorů. Pokud dileptony skutečně pochází z rozpadu Z^0 bosonu, bude platit $m_{inv}^{(Z)} \simeq m_0^{(Z)}$.

3.3 Analýza událostí z experimentu ATLAS

V této úloze budete zpracovávat reálná data naměřená experimentem ATLAS (viz příloha A), který se nachází na urychlovači LHC v laboratoři CERN. Skládá se z několika detektorů, které jsou navrženy tak, aby byly schopny detekovat částice produkované ve srážkách protonů a měřit jejich vlastnosti.

V programu HYPATIA je možné vidět zjednodušený model nejdůležitějších částí detektoru ATLAS a zobrazit vizualizaci událostí. Po zpracování většího množství událostí a uložení

výsledků lze vykreslit spektrum invariantní hmotnosti. Píky v tomto spektru odpovídají známým nebo hledaným částicím. Jejich klidová hmotnost je přibližně rovna střední hodnotě píku. Naměřené hodnoty fluktuují kolem střední hodnoty zejména kvůli konečnému rozlišení detektoru, době života částice nebo efektům pozadí. V běžné praxi se zjišťuje střední hodnota píku a jeho šířka naitováním daného píku Gaussovým rozdělením:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}. \quad (3)$$

Z tohoto fitu lze pak dostat odhad střední hodnoty píku $\hat{\mu}$ a jeho šířky $\hat{\sigma}$. Pro neurčitost odhadu střední hodnoty pak z analytického výpočtu pomocí vztahu (3) plyne

$$\sigma_{\hat{\mu}} = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{N}}, \quad (4)$$

kde N je počet zpracovaných událostí. Z tohoto vztahu plyne, že se zvyšující se statistikou (množstvím zpracovaných událostí) se příliš nemění šířka píku ani jeho tvar, ale zvyšuje se spolehlivost jejich určení.

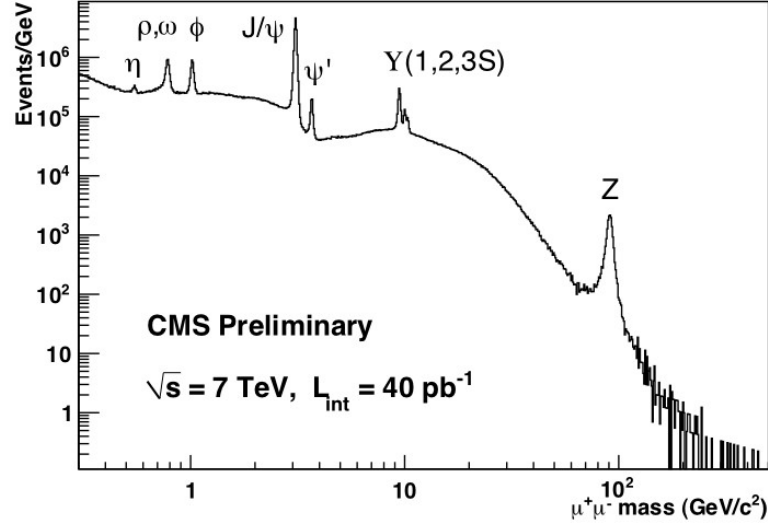
3.4 Statistické testování

Každý proces měřený na LHC má své pozadí. To vzniká například náhodnými kombinacemi rozpadových produktů, které ovšem pochází z jiných procesů. Jak rozlišit, zda se jedná o signál či pozadí? Jednou z metod, kterou lze využít i v tomto měření, je právě spektrum invariantní hmotnosti rozpadových produktů studované částice. Pokud tyto rozpadové produkty opravdu pochází z rozpadu studované částice, budou dávat vždy podobnou hodnotu invariantní hmotnosti a vytvoří pík ve spektru. V opačném případě dají náhodné kombinace pokaždé jinou hodnotu a vytvoří ve spektru spojitě rozložené pozadí. Pokud je pravděpodobnost našeho procesu dostatečně velká v porovnání s pravděpodobností vzniku pozadí, bude pík ve spektru snadno pozorovatelný, viz spektrum dimionového kanálu naměřené experimentem CMS na Obr. 4. Pokud je proces extrémně vzácný (například produkce Higgsova bosonu) bude spektrum dominováno pozadím a signál se projeví jen jako drobné navýšení počtu případů v okolí očekávané invariantní hmotnosti, které je ovšem obtížné odlišit od náhodné fluktuace pozadí (viz horní panel Obr. 5). Aby bylo možné rozhodnout, že jde skutečně o signál pocházející z rozpadu studované částice a ne pouze náhodnou fluktuaci pozadí, musí být provedeno statistické testování.

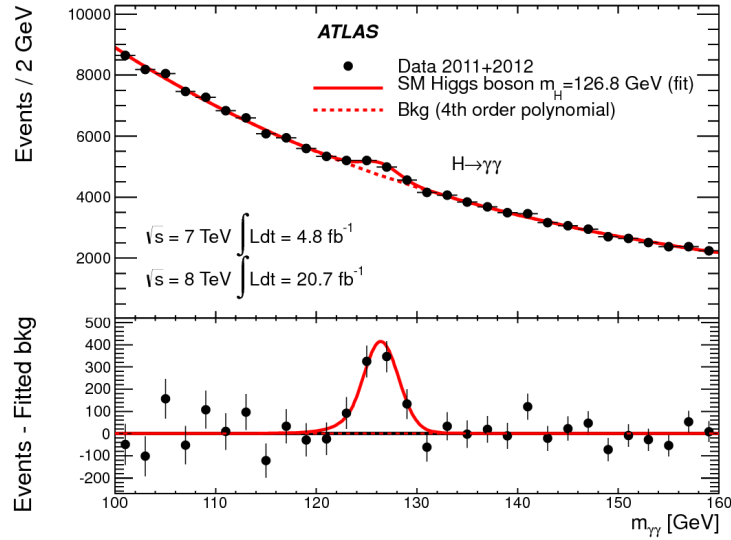
Koncept statistického testování hypotéz je velmi rozsáhlou a neustále se vyvíjející kapitolou v matematickém oboru pravděpodobnosti a statistiky a není třeba se jím zde dopodrobna zabývat. Pro objevy nových částic se na LHC většinou používá test zvaný „podíl profilovaných věrohodností“ (v angličtině „profile likelihood ratio test“). V našem měření musíme jako první krok zvolit takové rozdělení pravděpodobnosti, které dobře popíše námi naměřené spektrum. K popisu signálu se v našem případě bude hodit Gaussovské rozdělení a na popis pozadí použijeme exponenciální funkci. Hustota pravděpodobnosti pro testovanou hodnotu hmotnosti m tedy bude v našem případě vypadat takto:

$$f(m, S, B) = \frac{S}{S+B} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(m-m_0)^2}{2\sigma^2}} + \frac{B}{S+B} \frac{e^{-Am}}{(e^{-Am_{min}} - e^{-Am_{max}})}, \quad (5)$$

kde S a B jsou neznámá množství signálu a pozadí, m_0 a σ jsou střední hodnota a šířka píku, které pro jednoduchost zafixujeme dle tabulkových hodnot, a druhý člen odpovídá velikosti pozadí ve zkoumaném intervalu hmotností, kde A je parametr fitu pozadí. V dalším kroku sestavíme



Obr. 4: Spektrum invariantní hmotnosti dimionů měřené experimentem CMS. Ve spektru lze vidět několik píků odpovídající známým částicím. Převzato z [5].



Obr. 5: Spektrum invariantní hmotnosti fotonových párů v okolí hmotnosti Higgsova bosonu naměřené experimentem ATLAS. Převzato z [6].

funkci věrohodnosti (anglicky "likelihood function"). Jde o produkt hustoty pravděpodobnosti 5 pro všechny změřené hodnoty m_i a Poissonova rozdělení pro součet parametrů S a B , tedy:

$$L(S, B) = \frac{(S + B)^n \cdot e^{-(S+B)}}{n!} \prod_{i=1}^n f(m_i, S, B), \quad (6)$$

kde n je počet naměřených hodnot. Tuto funkci věrohodnosti poté použijeme k odhadu hodnot

S a B tak, že nalezneme hodnoty S' a B' , které maximalizují $L(S, B)$, případně minimalizují $-\log L(S, B)$ (oba postupy jsou ekvivalentní). Maximalizace/minimalizace funkce se provádí numericky. Metoda maximální věrohodnosti umí také odhadnout neurčitost zjištěných hodnot a proto se typicky výsledky fitů uvádějí i s příslušnými chybami. Pokud vám toto připomíná známé fitování pomocí metody nejmenších čtverců, je to proto, že metoda nejmenších čtverců je speciálním případem metody maximalizace věrohodnosti, kterou používáme v případě, že můžeme uvažovat Gaussovské rozdělení fluktuací náhodné veličiny (tj. máme k dispozici dostatek dat).

Pokud je hodnota chyby parametru podobná samotné velikosti parametru, nemůžeme si být jisti, že naměřená hodnota není způsobena pouze náhodnými fluktuacemi. Pokud chceme být precizní, musíme formulovat statistický test. Jak jsme již zmiňovali na začátku této sekce, zvolíme test "profile likelihood ratio", ke kterému už máme k dispozici vše potřebné. Na tomto místě je nutné zmínit, že statistické testy mohou hypotézy pouze vyvracet a ne potvrzovat. Pokud chceme potvrdit objev částice, snažíme se vyvrátit hypotézu, která tvrdí, že částice neexistuje, s dostatečnou přesností. V našem modelu bude tato nulová hypotéza odpovídat situaci $S = 0$. Jakýkoliv jiný výsledek je pro nás příznivý - částice existuje. Pro náš test zvolíme veličinu q_0 , kterou definujeme následovně:

$$q_0 = -2 \log \frac{L(0, B')}{L(S', B')}. \quad (7)$$

Pokud bude v datech málo signálu, bude podíl v logaritmu blízký 1 a tedy hodnota q_0 se bude blížit 0, pokud bude v datech signálu hodně, bude se podíl blížit 0 a q_0 bude růst nade všechny meze a pravděpodobnost, že platí nulová hypotéza bude nízká. Pokud statisticky zpracujeme naše data a zjistíme q_0^{obs} , můžeme definovat veličinu zvanou signifikance, která bude v našem případě rovna

$$z = \sqrt{q_0^{obs}}. \quad (8)$$

Pro uznání objevu nové částice je v komunitě částicových fyziků nutné, aby byla signifikance vyšší než 5 (to odpovídá pravděpodobnosti vyšší než cca 99,99995 %). Ekvivalentní výpočtu signifikance je výpočet takzvané "p-value", definované jako

$$p = \int_{q_0^{obs}}^{+\infty} \chi^2(x, 1) dx, \quad (9)$$

kde $\chi^2(x, 1)$ je χ^2 -pravděpodobnostní rozdělení s jedním stupněm volnosti. V našem testu jsme předpokládali, že známe hmotnost částice m_0 i šířku jejího píku σ . Vzhledem k tomu, že šířka píku je většinou dominována rozlišením detektoru, je parametr σ možno spolehlivě odhadnout pomocí simulací. Pokud se snažíme objevit novou částici a teorie její hmotnost nepředpovídá (jako tomu bylo například při objevování Higgsova bosonu), parametr m_0 odhadnout nedokážeme. V takovém případě se provádí velké množství testů pro různé hodnoty m_0 a hledá se velký nárůst signifikance, případně výrazné minimum v grafu závislosti p na m_0 .

4 Postup měření

4.1 Zpracování událostí pomocí programu HYPATIA

Detailní popis zpracování událostí detekovaných experimentem ATLAS pomocí programu HYPATIA můžeme najít v příloze B.

4.2 Zobrazení histogramů invariantních hmotností

Po zpracování dostatečného množství událostí (cca 100 = dva datasety), budeme mít k dispozici *.txt* soubor s jednotlivými hodnotami. Tyto můžeme vynést do histogramu v jakémkoliv nástroji na zpracování dat (Excel, ROOT, ...). Oblast, ve které očekáváme pík příslušící bosonu Z^0 , nafitujeme vhodnou funkcí (například Gaussovou) a z parametrů fitu určíme hmotnost bosonu Z^0 a jeho pozorovanou šířku a jejich chyby. Toto provedeme pro několik různých velikých souborů dat (například 25 %, 50 %, 75 % a 100 % celkového počtu zpracovaných událostí), abychom získali závislost parametrů a jejich chyb na počtu analyzovaných událostí.

4.3 Statistický test objevu Higgsova bosonu

Přestože v datech, která analyzujeme v první části úlohy, lze najít vhodné kandidáty na Higgsovu boson, není jich k dispozici dostatek na statistické zpracování. Je to způsobeno extrémní vzácností produkce Higgsova bosonu. Proto máme na webu praktik k dispozici nasimulovaná data (soubor *data/data_real.txt*), která svou velikostí zhruba odpovídají datasetu, na kterém byl učiněn objev Higgsova bosonu na experimentech ATLAS a CMS. Soubor obsahuje hodnoty invariantních hmotností, z nichž jen některé pocházejí z „rozpadu“ Higgsova bosonu (signál), zatímco většina je pouze pozadí. Je potřeba tedy oddělit od sebe signál a pozadí, respektive ověřit, zda je pozorovaný přebytek signálních událostí nad pozadím statisticky významný. Na provedení testu můžeme použít program *likelihood-students.py* (viz příloha C), pomocí kterého můžeme dostat závislost signifikance/p-value na různých odhadech hmotnosti Higgsova bosonu m_H . Ze závislosti můžeme určit hodnotu m_H , kterou data preferují jako nejpravděpodobnější a zároveň můžeme určit, zda byl na našich datech učiněn objev Higgsova bosonu. Test je velmi citlivý na počáteční odhad m_H a daleko od správné hodnoty nemusí být signifikance dobře definována. Hmotnost m_H určíme s přesností na jedno desetinné místo.

5 Poznámky

1. Program HYPATIA spustíte kliknutím na soubor „Hypatia.7.4.Masterclass.jar“. Pokud vše proběhlo v pořádku, otevřou se vám čtyři okna.
2. Data pro analýzu stáhněte na následujícím odkazu <https://cernmasterclass.uio.no/datasets/>, kde si vyberete jednu instituci a stáhněte z její nabídky datasety, např. *Pisa* → 5 → *groupP.zip*. Jeden dataset obsahuje 50 událostí, takže byste měli bez problémů stihnout zanalyzovat dva datasety. Ty volte dle vašeho uvážení, do protokolu vždy uveďte, které konkrétní datasety jste analyzovali.
3. Cvičnou analýzu dat si můžete vyzkoušet na následující stránce: http://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath_exercise2.htm.
4. Video, ve kterém najdete detailní popis práce s programem HYPATIA, najdete na <https://youtu.be/nEbTBEmg4Gg>.
5. Hodnoty p-value se v okolí hledané hmotnosti mění o mnoho řádů. Zohledněte to při jejím zobrazování.
6. Šířkou píku, kterou v úkolu č. 4 zjišťujete, je myšlena přesnost určení hmotnosti Z^0 bosonu. Neplést s rozpadovou šířkou - ta souvisí s přirozenou dobou života tohoto kvantového stavu a její zjišťování je mnohem komplexnější úloha. Se šířkou píku také souvisí

veličina FWHM, která určuje rozlišení detektoru. Speciálně pro Gaussovo rozdělení platí $\text{FWHM} = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma \simeq 2.355\sigma$.

7. Jde o novou úlohu, vaše názory a (pokud možno konstruktivní) kritiku prosím směřujte na adresu garanta úlohy licenrob@fjfi.cvut.cz.

6 Otázky

1. Jaká další známá veličina (kromě energie, hybnosti a hmotnosti) se dá vyjádřit v elektronvoltech? Jak?
2. Jaký je hlavní rozdíl mezi fotony a gluony?
3. Proč je ve fyzice vysokých energií důležitá příčná hybnost (p_T) místo celkové hybnosti p ?
4. Proč nejsou miony pohlceny v kalorimetrech jako např. elektrony nebo hadrony?
5. Jaké faktory ovlivňují pozorovanou šířku píku částice?
6. Statistické testy nemohou žádnou hypotézu potvrdit. Jak tedy použijeme statistický test k potvrzení existence Higgsova bosonu?
7. Jak z grafu, který vypracujete v posledním úkolu, poznáte, kterou hodnotu m_H data preferují?

Poděkování

Tato úloha je částečně založena na úloze Varianta Z vytvořené v rámci popularizační akce MasterClasses [4] a dále zpracované kolegy z MFF UK [3].

Reference

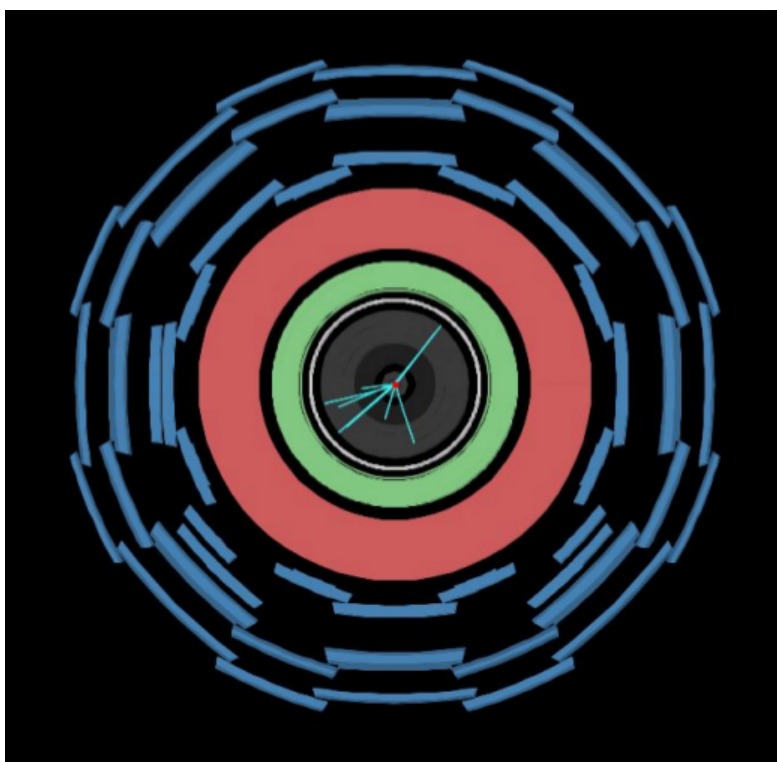
- [1] P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020).
- [2] Wikimedia commons - volné dílo.
- [3] Kolektiv Praktika částicové a jaderné fyziky, MFF UK, "A1: Objevování částic v detektoru ATLAS v CERN", 2019.
- [4] International Masterclasses, "Z-path analýza" [online, cit. 11. 10. 2020], <http://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath.htm>.
- [5] Jenni, Peter, "Early physics results", Philosophical transactions, Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences, 370, 933-49, 10.1098/rsta.2011.0463.
- [6] ATLAS Collaboration, "Measurements of Higgs boson production and couplings in diboson final states with the ATLAS detector at the LHC", Phys. Lett. B 726 (2013) 88.

A Identifikace částic

Detektor ATLAS

Vnitřní detektor

Vnitřní detektor je na Obr. 6 znázorněný šedou barvou. Jedná se o dráhový detektor, který určuje polohu elektricky nabitých částic v různých časech. Nacházejí se v homogenním magnetickém poli, které způsobuje zakřivení dráhy nabitých částic. Z něj je možné vypočítat hybnost a určit elektrický náboj částice. Interakce mezi částicemi vyprodukovanými při srážce a materiálem dráhových detektorů je velmi malá, proto tu částice zanechávají jen malé množství energie.



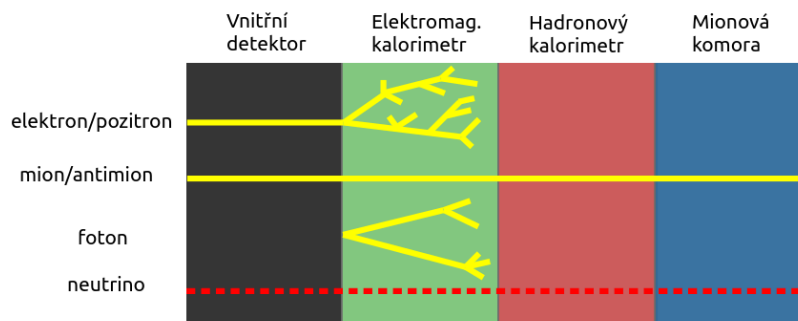
Obr. 6: Schématický průřez detektoru ATLAS zobrazený v programu HYPATIA. Jednotlivé části detektoru jsou barevně rozlišeny, převzato z [4].

Elektromagnetický kalorimetr

Elektromagnetický kalorimetr je na Obr. 6 znázorněný zelenou barvou. Je tu detekována energie částic, které interagují elektromagneticky, zejména elektronů a fotonů. Energie uložená v kalorimetru je převedena na elektrický signál.

Hadronový kalorimetr

Hadronový kalorimetr je na Obr. 6 znázorněný červenou barvou. Jsou tu detekované silně interagující částice, složené z kvarků, resp. antikvarků (hadrony). Princip detekce částic je analogický



Obr. 7: Schéma průletu jednotlivých částic detektorem ATLAS, převzato a upraveno z [4].

jako v případě elektromagnetického kalorimetru s tím rozdílem, že v hadronovém kalorimetru jsou použité materiály s vyšší hustotou, které jsou nezbytné k absorpci hadronů.

Mionové komory

Na Obr. 6 jsou znázorněny modrou barvou. Miony zanechávají jen malou část své energie v kalorimetrech, jelikož interagují pouze elektromagneticky a zároveň jsou mnohem těžší než elektrony, a jsou jedinými „viditelnými“ částicemi (viz následující podsekce), které projdou každou vrstvou detektoru ATLAS. Mionové komory jsou proto umístěny ve vnější části ATLASu v přídavném magnetickém poli, díky čemuž je možné přesnější určení hybnosti mionů než v dráhových detektorech. Detekce je založena na ionizaci plynu, která vytváří elektronicky zpracovatelný signál.

Identifikace částic

K analýze událostí je třeba identifikovat produkty srážek. Na obrázku 7 je schematicky znázorněn průlet jednotlivých částic detektorem ATLAS.

Elektron (resp. pozitron) vytvoří stopu ve vnitřním detektoru, protože je elektricky nabitý, a uloží svou energii v elektromagnetickém kalorimetru. V hadronovém kalorimetru ani v mionové komoře stopu nezanechá, jelikož do nich nedoletí. Principiálně stejnou stopu vytvoří pozitron. Tyto dvě částice od sebe odlišíme na základě znaménka náboje, jež se projeví opačným zakřivením dráhy ve vnitřním detektoru.

Mion (resp. antimion) vytvoří stopu ve vnitřním detektoru, protože je elektricky nabitý. Dále uvolní malé množství energie v elektromagnetickém a hadronovém kalorimetru i v mionové komoře. Jako jediná částice zanechá stopu ve všech částech detektoru. Mion a antimion opět rozlišíme na základě opačného náboje.

Foton uloží veškerou energii v elektromagnetickém kalorimetru. V dráhovém detektoru, hadronovém kalorimetru ani v mionové komoře stopu nezanechá. Vidíme jej v kartě Fyzikální objekty jako zrekonstruovaný objekt. V případě, že je v dráhovém detektoru zaznamenaných příliš mnoho drah na rozlišení toho, zda se jedná o elektron nebo foton, nastavíme vyšší omezení na filtr („cut“). Pokud máme stále uloženou energii v elektromagnetickém kalorimetru a žádná ze zbývajících drah v dráhovém detektoru k němu nesměruje, jedná se pravděpodobně o foton.

Neutrína neinteragují s žádnou částí detektoru ATLAS, nejsou přímo detekovatelná. Je však možné je detekovat z naměřených dat na základě zákona zachování hybnosti. Jelikož hybnost všech kvarků a gluonů je před srážkou rovnoběžná s osou urychlovací trubice, je jejich celková příčná hybnost p_T nulová. Ze zákona zachování hybnosti tedy vyplývá, že celková příčná hybnost po srážce musí být také nulová.

$$\Sigma p_T|_{\text{pred}} = \Sigma p_T|_{\text{po}} = 0 \quad (10)$$

Pokud po srážce naměříme nenulovou příčnou hybnost, existují buď produkované částice, které detektor nezaregistroval (například jedno nebo více neutrin) nebo je to následek nepřesnosti měření. V detektoru ATLAS je chybějící příčná hybnost určena energií uloženou v kalorimetrech. Ze zákona zachování energie je možné určit chybějící příčnou energii (MET), což naznačuje že během srážky vzniklo jedno nebo více neutrin. V programu Hypatia máme dva způsoby zobrazení:

1. hodnota chybějící příčné hybnosti (MET) na kartě Output Display v Control Window,
2. a červená přerušovaná čára zobrazující směr nerovnováhy energie; její tloušťka je úměrná MET.

Menší množství chybějící energie, 10–20 GeV (zobrazené tenkou červenou přerušovanou čarou), mohou být způsobeny nejistotou měření detektoru.

Příklady událostí k identifikaci částic

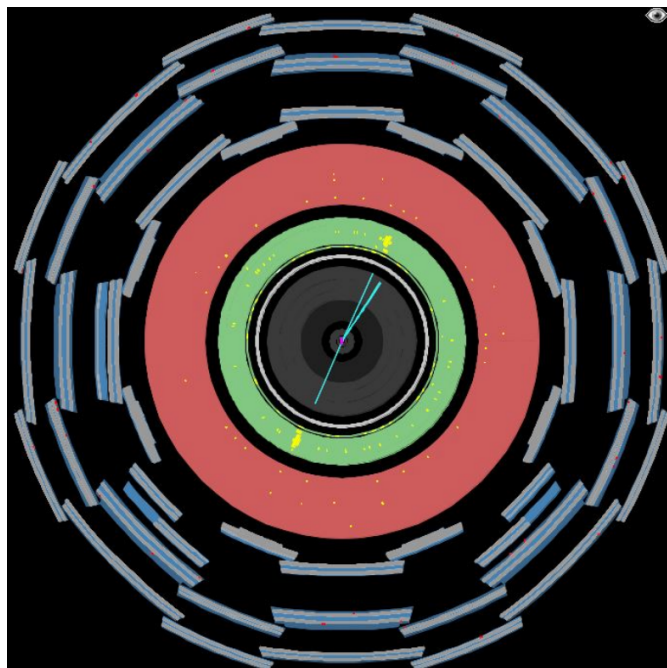
Před samotným používáním programu Hypatia a měřením úlohy je důležité si uvědomit, jak budou prakticky vypadat stopy jednotlivých částic zobrazené v tomto programu.

Elektron-pozitronová událost

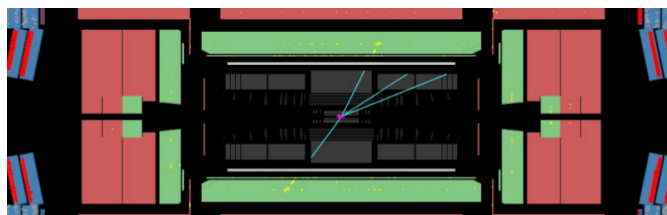
Jak vidíme na Obr. 8 a 9, ve vnitřním detektoru máme zobrazených několik drah, z čehož právě dvě dráhy míří k výrazným žlutým polím (detekované energii) v elektromagnetickém kalorimetru. Ze zaznamenané trajektorie ve vnitřním detektoru vyplývá, že se jedná o nabitě částice. Z množství odevzdané energie v elektromagnetickém kalorimetru zase vyplývá, že se jedná o částice vytvářející elektromagnetické spršky. Z Obr. 7 vidíme, že se pravděpodobně jedná o elektron a pozitron. V okně Control Window na kartě Output Display ověříme, že jedna z těchto drah odpovídá částici s kladnou a druhá se zápornou příčnou hybností, což odpovídá opačnému elektrickému náboji. V podélném průřezu detektoru ověříme, že obě dráhy pocházejí z jediné srážky dvou protonů, neboli po zvětšení vycházejí z jedné společné fialové elipsy. Tyto elipsy reprezentují zrekonstruovaný primární vertex (bod, ze kterého vychází mnoho drah zrekonstruovaných vnitřním detektorem) a jeho neurčitost. Ve výsledku tedy dostáváme, že se pravděpodobně jedná o elektron-pozitronový pár.

Mion-antimionová událost

Jak vidíme na Obr. 10 a 11, ve vnitřním detektoru máme zobrazených několik drah, z čehož právě dvě dráhy procházejí všemi částmi detektoru a jsou zaznamenány v mionových komorách. Ze zaznamenané trajektorie ve vnitřním detektoru a mionové komoře vyplývá, že se jedná o nabitě částice. Z minimálního množství odevzdané energie v kalorimetrech zase vyplývá, že se jedná o málo interagující částice. Z Obr. 7 vidíme, že se pravděpodobně jedná o mion a antimion. V okně Control Window na kartě Output Display ověříme, že jedna z těchto drah odpovídá



Obr. 8: Elektron-pozitronová událost - příčný průřez detektoru, převzato z [4].

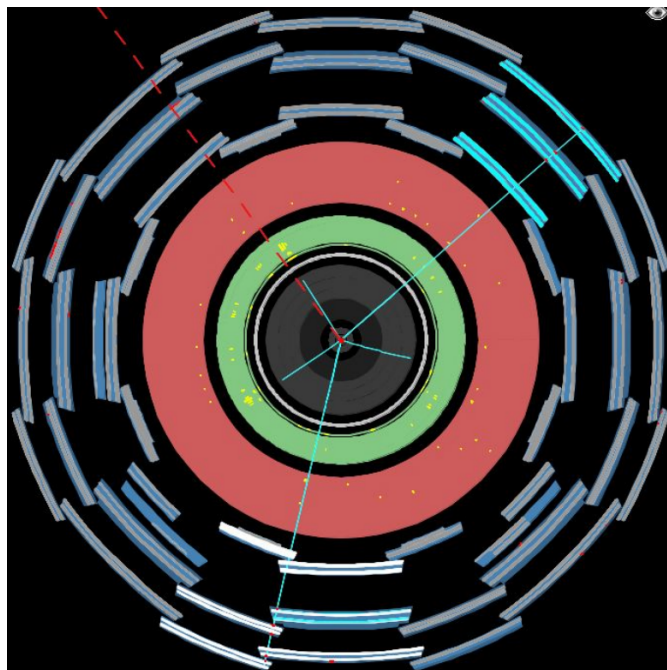


Obr. 9: Elektron-pozitronová událost - podélný průřez detektoru, převzato z [4].

částici s kladnou a druhá se zápornou příčnou hybností, což odpovídá opačnému elektrickému náboji. V podélném průřezu detektoru podobně jako v případě elektron-pozitronové události ověříme, že obě dráhy pocházejí z jediné srážky dvou protonů. Ve výsledku tedy dostáváme, že se pravděpodobně jedná o mion-antimionový pár.

Fotonová událost

Jak vidíme na Obr. 12 a 13, ve vnitřním detektoru máme zobrazených několik drah, ale žádná z nich nesměruje k žlutým polím v elektromagnetickém kalorimetru. Z toho vyplývá, že se jedná o elektricky neutrální částice. Z množství odevzdané energie v elektromagnetickém kalorimetru zase plyne, že jde o elektromagneticky interagující částice. Z Obr. 7 vidíme, že se pravděpodobně jedná o dva fotony. V okně `Track Momenta Window` na kartě `Physics Objects` ověříme, že nám program zrekonstruoval dva fyzikální objekty (reprezentují energii deponovanou v kalorimetrech, kde neexistuje spojení s jakoukoli dráhou ve vnitřním detektoru). Při zvolení této karty se nám tyto zrekonstruované objekty zobrazí, viz Obr. 12.



Obr. 10: Mion-antimionová událost - příčný průřez detektoru, převzato z [4].

Neutrino

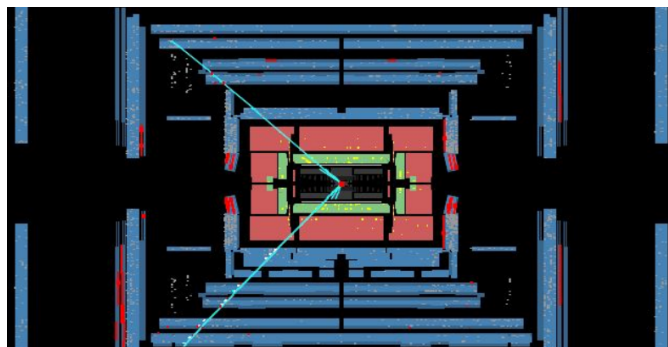
Jak je uvedeno výše, neutrino nejsou přímo detekovatelná, protože neinteragují s žádnou částí detektoru ATLAS (viz Obr. 7). Dokážeme je však detekovat na základě zákona zachování hybnosti. Chybějící příčná energie, jež může být indikátorem právě neutrin, je znázorněna v programu Hypatia červenou přerušovanou čarou - viz Obr. 10.

B Zobrazování pomocí programu HYPATIA

Elektronické signály zaznamenané během srážek jednotlivými částmi detektoru ATLAS mohou být znázorněny pomocí programu Hypatia. Po spuštění programu se zobrazí čtyři okna, viz Obr. 14.

Canvas Window

Canvas Window (modrý rám na Obr. 14) zobrazuje vizualizaci událostí. Události jsou zobrazené v dvou navzájem kolmých průmětech detektoru do roviny. V horní části je průmět detektoru do roviny kolmé na osu svazku – příčný pohled. Ve spodní části je průmět detektoru do roviny rovnoběžné s osou svazku – podélný pohled. Různými barvami jsou znázorněny jednotlivé části detektoru, viz výše. V těchto průřezech se znázorňují dráhy detekovaných částic, které jsou rekonstruovány ze signálů v detektoru.



Obr. 11: Mion-antimionová událost - podélný průřez detektoru, převzato z [4].

Track Momenta Window

Track Momenta Window (žlutý rám na Obr. 14) tvoří dvě karty: **Tracks** a **Physics Objects**, kde se zobrazují informace o hybnosti zrekonstruovaných částic.

- Šipkami **Previous Event** nebo **Next Event** se přepíná mezi jednotlivými událostmi.
- Tlačítka **Electron** nebo **Muon** na kartě **Tracks**, nebo **Photon** na kartě **Physics Objects**, se vloží vybraná dráha do okna invariantních hmotností.
- Pod tlačítka je uvedena hodnota chybějící příčné energie $ETMis$.

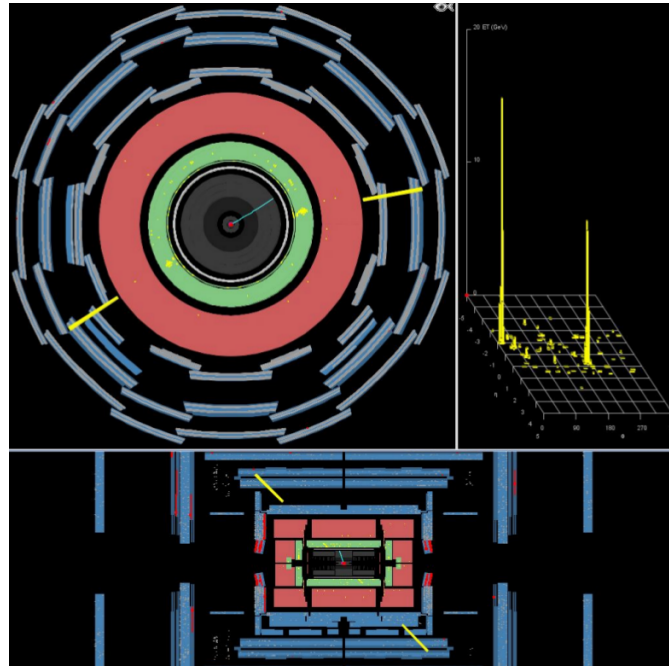
Control Window

Control Window (zelený rám na Obr. 14) je hlavní kontrolní prvek vizualizace událostí. Okno má tři záložky **Parameter Control**, **Interaction and Window Control** a **Output Display**.

- Na pravé straně okna (viz Obr. 15) jsou dvě nejdůležitější tlačítka: zoom (lupa) a výběr (ruka).
- V záložce **Parameter Control** je možné zapínat a vypínat ukázané objekty.
 - Kliknutím na kartu **Cuts** je možné definovat speciální kritéria na částice zobrazené v okně **Canvas Window**.
- V záložce **Interaction and Window Control** je možné nastavit různé zobrazování v okně **Canvas Window** od zoomování až po změnu projekce.
- V záložce **Output Display** jsou uvedené detailní informace o vybraném objektu. Například je tu uvedena hodnota příčné hybnosti p_T , jejíž znaménko určuje znaménko elektrického náboje vybrané částice.

Invariant Mass Window

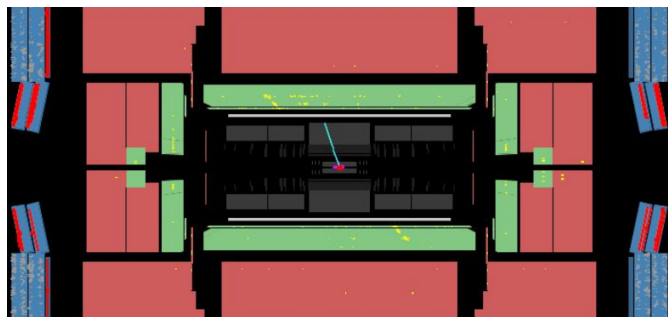
Okno s invariantní hmotností (červený rám na Obr. 14) zobrazuje invariantní hmotnost vybraných drah. Pokud budou dráhy přidávány v nesprávném pořadí (vždy přidáváme dvojice částic: elektron-pozitron, mion-antimion), program vypíše chybovou hlášku.



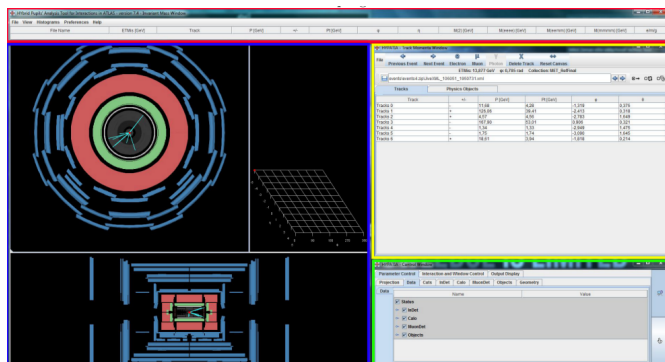
Obr. 12: Fotonová událost - příčný a podélný průřez detektoru, fyzikální objekty, převzato z [4].

Pracovní postup

1. Načteme .zip soubor s daty: *File* → *Read Event Locally* (to může chvíli trvat).
 - V **Canvas Window** se zobrazilo množství stop, ale většinou jde o události pozadí. Je proto kvůli přehlednosti rozumné nastavit omezení na příčnou hybnost, částice s vysokou příčnou hybností jsou pro nás nejzajímavější.
2. **Control Window** → záložka **Parameter Control** → karta **Cuts** zaškrtneme položku $[Pt]$ a zvýšíme její hodnotu (na 5.0 GeV/c), viz Obr. 15. Pokud vidíte příliš mnoho nebo málo drah částic, můžete hodnotu mírně upravit.
3. Nástrojem výběru (viz Obr. 15) můžeme zvolit jednotlivé dráhy. S použitím příčné hybnosti zvolené dráhy: **Control Window** → záložka **Output Display** → hodnota p_T , rozhodneme o jakou částici se jedná a v okně **Track Momenta Window** klikneme na příslušné tlačítko: v případě elektronu nebo pozitronu na **Electron** a v případě mionu nebo antimionu na **Muon**. Tím jsme dráhu přidali do okna **Invariant Mass Window**.
 - Částice přidáváme v párech elektron-pozitron nebo mion-antimion a program automaticky spočítá invariantní hmotnost páru, v opačném případě vypíše chybovou hlášku.
 - Vzpomeňte si, že boson Z^0 má hmotnost přibližně 91 GeV/c², takže se bude rozpadat velmi pravděpodobně na dileptony s vysokou příčnou hybností.
4. V některých událostech můžete najít i dva Z^0 bosony (poté se spočítá také invariantní hmotnost všech 4 leptonů a možná jste našli Higgsův boson). Také se může stát, že v události žádný Z^0 boson není - je na vás, jakou toleranci pro $m_{inv}^{(Z)}$ si zvolíte.



Obr. 13: Fotonová událost - podélný průřez detektoru, převzato z [4].

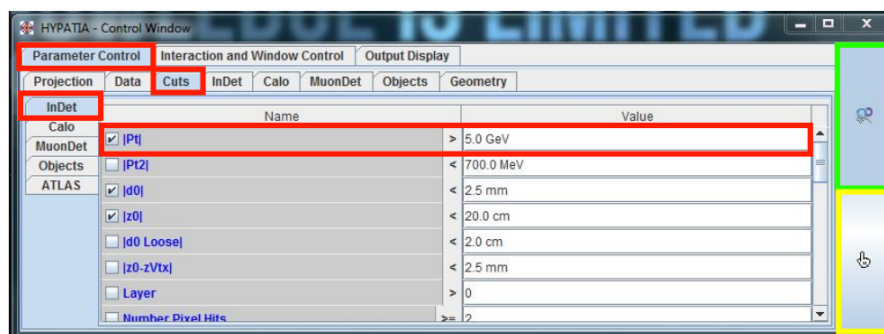


Obr. 14: Okna programu HYPATIA, převzato z [4].

5. Po nalezení všech párů v dané události přepneme na další událost šipkami Previous Event nebo Next Event v okně Track Momenta Window.
6. Po projití všech událostí exportujeme data: *Invariant Mass Window* → *File* → *Export Invariant Masses* a uložíme jako soubor ve formátu *.txt*.

C Statistický test - návod ke kódu

Statistický test, který potvrdí či vyvrátí objev Higgsova bosonu, lze naprogramovat v mnoha různých jazycích. Komunita částicových fyziků velmi často používá soubor C/C++ knihoven ROOT. V současné době se také prosazuje jazyk Python. Vzhledem k tomu, že instalace ROOTu může být poněkud složitá, budete mít k dispozici kostru kódu v jazyce Python *likelihood-students.py*, jehož použití ovšem není povinné. V tomto kódu najdete detailně popsané jednotlivé kroky testu, nicméně na některých vyznačených místech je potřeba kód doplnit. V kódu je také potřeba zkontrolovat nastavení cesty k souboru s daty (invariantní hmotnosti) *data-real.txt*. Kód byl napsán ve verzi Python 3, takže doporučujeme použít stejnou verzi i na spuštění kódu. Pro jistotu připojujeme návod na instalaci a spuštění kódu pro platformy Windows 10, Linux (Ubuntu a příbuzné distribuce) a Mac OS.



Obr. 15: Nastavení omezení příčné hybnosti eventů (červená), nástroje zoom (zelená) a výběr (žlutá).

Windows 10

Windows 10 nemá standardně Python k dispozici a je třeba jej doplnit. Zdarma je k dispozici v Microsoft Store, kde stačí vyhledat např. „Python 3.8“ a standardním způsobem stáhnout a nainstalovat. Poté bude třeba manuálně doinstalovat knihovny *matplotlib*, *pandas* a *scipy*. V příkazové řádce (spuštěné jako administrátor) toho docílíme pomocí následujících příkazů:

- `python -m pip install -U pip`
- `python -m pip install -U matplotlib`
- `python -m pip install -U pandas`
- `python -m pip install -U scipy`

Pomocí příkazu `python3 likelihood-students.py m_H` , kde m_H je váš odhad hmotnosti Higgsova bosonu, poté spustíte kód (ve složce, kde jej máte uložený).

Linux

Linuxové distribuce (testováno na xUbuntu a Mint) mají standardně k dispozici Python 2 i Python 3. Možná bude třeba doinstalovat knihovny *matplotlib*, *pandas* a *scipy* pomocí následujících příkazů:

- `sudo apt-get install python3-matplotlib`
- `sudo apt-get install python3-pandas`
- `sudo apt-get install python3-scipy`

Pomocí příkazu `python3 likelihood-students.py m_H` , kde m_H je váš odhad hmotnosti Higgsova bosonu, poté spustíte kód (ve složce, kde jej máte uložený).

Mac OS

Pokud používáte Mac OS, měl by být vybaven novou verzí Python 3. Pokud bude potřeba, doinstalujte knihovny *matplotlib*, *pandas* a *scipy* pomocí následujících příkazů:

- `pip3 install matplotlib`

- `pip3 install pandas`
- `pip3 install scipy`

Pomocí příkazu `python3 likelihood-students.py m_H` , kde m_H je váš odhad hmotnosti Higgsova bosonu, poté spustíte kód (ve složce, kde jej máte uložený).