

A1: Objevování částic v detektoru ATLAS v CERN

Z. Doležal, T. Adámek, D. Vokrouhlický

4.10.2017

UK MFF, Fyzikální praktikum IV

Úkoly

1. Zpracujte ca 50 událostí z detektoru ATLAS programem Hypatia
2. Pomocí programu ROOT zobrazte histogram invariantních hmotností pro různé velké statistické soubory
3. Identifikujte výrazné píky a přiřaďte je očekávaným částicím
4. Zjistěte chybu střední hodnoty invariantní hmotnosti pro různé velké statistické soubory
5. Vyneste zjištěné chyby do grafu jako funkci počtu událostí a srovnejte je s Poissonovým rozdělením

1 Úvod

Svět elementárních částic je s velkým úspěchem popisován tzv. Standardním modelem částic a jejich interakcí (SM). Základními stavebními kameny hmoty jsou kvarky a leptony (viz Obr. 1). Mají spin $1/2$ a jsou tedy fermiony – popisuje je Fermi-Diracovo rozdělení. Na částice působí čtyři druhy interakcí: gravitační, elektromagnetická, silná (ta nepůsobí na leptony) a slabá. Interakce jsou zprostředkovány výměnou bosonů (graviton, foton, gluon a bosony W a Z). Chování bosonů popisuje Bose-Einsteinova statistika.

Boson Z

Elektricky neutrální boson Z a elektricky nabitě bosony W^+ a W^- jsou zprostředkující částice slabé síly. Bosony W mohou za radioaktivitu beta, protože přeměňují

neutrony na protony nebo naopak. Boson Z zase zprostředkovává interakce mezi neutrinami.

Boson Z je velmi těžký ($91 \text{ GeV}/c^2$) a má velice krátkou dobu života, takže urazí jen nepatrnou vzdálenost. Vzniká mj. při vysokoenergetických srážkách a rozpadá se na páry nabitých leptonů (elektron-antielektron nebo mion-antimion). Může se rozpadat i na páry kvark-antikvark nebo na páry neutrino-antineutrino.

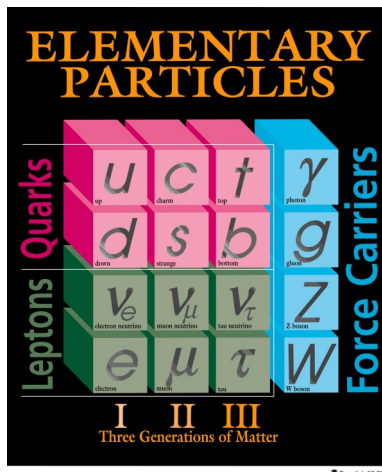
Higgsův boson

Higgsův boson byl poslední z částic Standardního modelu, jejíž existenci zbývalo experimentálně potvrdit. V červenci 2012 ohlásily experimenty ATLAS a CMS v CERN objev nového bosonu s hmotností kolem $125 \text{ GeV}/c^2$ a s vlastnostmi odpovídajícími této tolik očekávané částici.

Ani Higgsův boson nelze zaznamenat v detektoru částic přímo - je velmi těžký, má velice krátkou dobu života a urazí jen nepatrnou vzdálenost před tím, než se rozpadne. Detekují se tedy jeho rozpadové produkty.

Nová fyzika

Tím, že LHC sráží protony při velmi vysokých energiích (7 a 7 TeV) a vyšší frekvenci srážek, umožňuje hledat možné částice s vyšší hmotností a kratší dobou života. Pátrání po nových fyzikálních jevech na LHC zahrnuje boson Z'. Tato částice je jakýmsi hmotnějším partnerem bosonu Z a její existenci předpovídají některé teorie za rámcem Standardního modelu, které vyžadují zavedení další slabé síly.



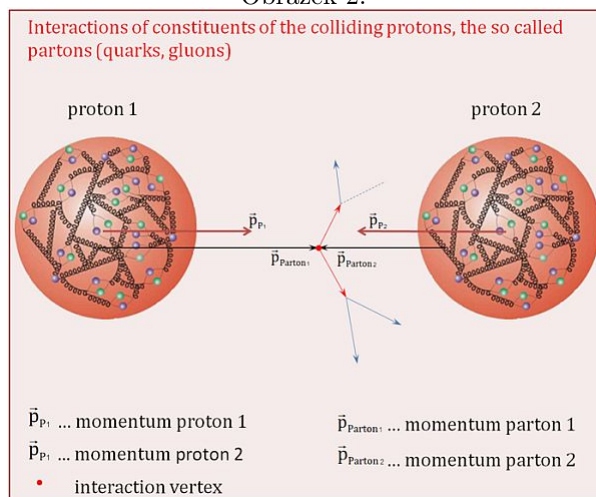
Obrázek 1: Základní stavební kameny hmoty podle Standardního modelu

Rozeznávání událostí

Urychlovač LHC urychluje miliardy protonů a přivádí je ke srážkám s miliardami jiných protonů. Co se děje, když se protony srazí? Protony se skládají z kvarků svázaných prostřednictvím gluonů a to, co se bezprostředně srazí při čelní srážce mezi dvěma protony, jsou jednotlivé konstituenty — kvarky nebo gluony.

Na obrázku 2 vidíme dva protony těsně před srážkou. Každý z nich obsahuje “moře” kvarků a gluonů – proton se totiž skládá ze 3 “valenčních” kvarků, ale také z celé další hromady “mořských” či “virtuálních” kvarků a antikvarků, které neustále vznikají z gluonů a opět se na ně přeměňují.

Obrázek 2:



Když se srážejí protony při tak velkých energiích, jakých dosahuje LHC, vzniká množství částic všech možných druhů, a to jak ty, z nichž se skládá běžná hmota, tak takové, co existovaly jen v prvních okamžicích po velkém třesku.

Nově vzniklé částice jsou většinou mnohem těžší než ty, co se původně srazily, což je možné díky vztahu $E = mc^2$ – energie se může přeměnit na hmotnost! Ve srážkách protonů s protony při této energii mohou vznikat prakticky všechny známé částice, musí být pouze zachovány důležité principy jako zachování energie a hybnosti.

Události s bosonem Z

Pokud ve srážce vznikne boson Z, není možné ho přímo detekovat: jeho doba života je jen 3×10^{-25} sekundy. Musíme tedy detekovat jeho rozpadové produkty. Boson Z se může rozpadnout mnoha způsoby a při jeho rozpadech se pocho-pitelně musí zachovávat přírodní zákony. To znamená, kromě jiného, že jelikož je boson Z neutrální (elektrický náboj = 0), musí být nulový i součet nábojů

rozpadových produktů. Pokud se tedy boson Z rozpadá na dvojici částic, je to vždy pár částice-antičástice.

Všechny dovolené kombinace leptonů nebo kvarků dávají dohromady 24 možností, při našem měření se ovšem soustředíme pouze na dva “nejsnáze” detekovatelné produkty rozpadu, a to

- pár elektron-pozitron
- pár mion-antimion

Elektrony a miony (i jejich antičástice) žijí dostatečně dlouho, aby je detektor zaregistroval.

Události s Higgsovým bosonem

Stejně jako boson Z je i Higgsův boson elektricky neutrální. My se soustředíme na dva rozpadové kanály, které jsou z hlediska detekce “nejsnazší”, konkrétně

- ZZ , následovaný rozpadem každého Z na pár lepton-antilepton
- $\gamma\gamma$

I zde využíváme faktu, že leptony z rozpadů Z i fotony jsou natolik stabilní (žijí dostatečně dlouho), že je detektor dokáže zaregistrovat.

Události tvořící pozadí

Při srážkách protonů vznikají nejrůznější částice, nejenom Z nebo Higgsovy bosony. V události se může objevit třeba i boson W nebo top kvark. Tyto částice se také rozpadají okamžitě po produkci, protože jsou stejně jako boson Z nebo Higgsův boson velmi těžké. Všechny tyto události vytvářejí pozadí. Od rozpadů Z a H je odlišíme pomocí celkového náboje: W i top kvark nesou nenulový elektrický náboj a tak se nemohou rozpadat na pár nabitá částice a její antičástice.

Určení hmotnosti mateřské částice

Abychom se ujistili o tom, že při srážce skutečně vznikla určitá částice a detekované částice pocházejí z jejího rozpadu, nebudeme jenom určovat rozpadové produkty jako páry mion-antimion, elektron-pozitron nebo foton-foton, ale budeme také rekonstruovat hmotnost rozpadající se částice. Hmotnost je totiž unikátní vlastností každé částice a lze ji, spolu s dalšími vlastnostmi, využít k její jednoznačné identifikaci.

Použijeme obecnější formu Einsteinova vztahu mezi hmotností a energií a budeme ji upravovat s využitím některých základních přírodních zákonů: Energie a hybnost se při jakémkoli procesu v přírodě zachovávají. Jejich celková hodnota před srážkou a po ní musí být stejná.

V úplné verzi Einsteinova vztahu pro energii $E = \sqrt{(\vec{p} \cdot c)^2 + (m_0 \cdot c^2)^2}$ je E energie částice, p označuje její hybnost a m_0 je hmotnost částice v klidu. Takto definovaná (klidová) hmotnost je vlastnost částice, a zůstává proto stále stejná, v přírodě se zachovává. Nazývá se „invariantní hmotnost“. Po úpravě dostaneme:

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

Protože víme, že se tato veličina zachovává, můžeme ji využít k odvození vztahu pro hmotnost mateřské rozpadající se částice. Změří se energie a hybnosti rozpadových produktů a jejich součty musí být stejné jako energie a hybnost původní mateřské částice, protože platí zákony zachování - co jde dovnitř, musí jít i ven. Z energie a hybnosti částice Z umíme spočítat její klidovou hmotnost.

Pokud se boson Z rozpadl na pár elektron (e^-) a pozitron (e^+), lze vyjádřit hmotnost bosonu Z pomocí součtů energií a hybností elektronu a pozitronu následujícím způsobem:

$$m_0^{(Z)} = \sqrt{\left(\frac{E_{e^-} + E_{e^+}}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{\vec{p}_{e^-} + \vec{p}_{e^+}}{c}\right)^2}$$

Energii a hybnost bosonu Z , $E_Z = E_{e^-} + E_{e^+}$ a $\vec{p}_Z = \vec{p}_{e^-} + \vec{p}_{e^+}$, ovšem známe, protože detektor ATLAS umí změřit energii a hybnost produktů rozpadu. To znamená, že máme pohromadě všechno potřebné pro stanovení hmotnosti bosonu Z nebo dalších částic. Při zpracování velkého množství událostí plníme histogram (spektrum) invariantní hmotnosti a často se vyskytujícím hodnotám (píkům) se snažíme přiřadit známé či hledané částice.

Tuto tzv. metodu invariantní hmotnosti lze použít pro nejrůznější kombinace rozpadových produktů jako $\gamma\gamma$, $\ell^+\ell^-$ ($\ell = e, \mu$), $\ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$ a další.

Analýza událostí z experimentu ATLAS

Experiment ATLAS je jedním z experimentů instalovaných na urychlovači LHC v CERN. Využívá detektor navržený tak, aby registroval částice produkované ve srážkách protonů, změřil jejich vlastnosti (typ, náboj, dráhy, hybnosti a energie) a pokryl přitom co největší prostorový úhel. Protože částice interagují s prostředím různým způsobem, je detektor tvořen několika specializovanými systémy (viz příloha A). V úloze budeme pomocí programu Hypatia [2] (viz příloha B) zobrazovat skutečné události registrované detektorem ATLAS a hledat ty z nich, které by mohly obsahovat rozpadové produkty bosonů Z a H . Z výsledků zobrazíme histogram invariantních hmotností a budeme v něm hledat zajímavé struktury. Ty porovnáme s výsledky z většího souboru dat a budeme studovat závislost určené hmotnosti a její chyby na počtu událostí.

Hmotnost částice zjistíme ze střední hodnoty jejího píku. Měřená hodnota fluktuuje kolem této střední hodnoty kvůli několika faktorům (rozlišení detektoru, nesprávné započítání pozadových signálů, ap.). Proto se se zvyšující statistikou šířka píku prakticky nemění, mění se ale jeho tvar a počet událostí a s ním

i spolehlivost určení jeho střední hodnoty. Procesy v jaderné a subjaderné fyzice jsou většinou popsány Poissonovou statistikou, kdy variance počtu částic N je rovna střední hodnotě N . Chyba tedy klesá úměrně $1/\sqrt{N}$. V praxi většinou střední hodnotu i její chybu zjišťujeme z fitu píku Gaussovou křivkou.

Postup měření

1. V programu Hypatia si otevřete datový soubor dle pokynů dozoru.
2. Analyzujte jednotlivé události a hledejte v nich páry opačně nabitých leptonů které by mohly pocházet z rozpadu jedné částice a páry fotonů. V jedné události se často vyskytuje více procesů, my ale vybíráme jen zjevné páry.
3. Po zpracování celého souboru (ca 50 událostí) uložte výsledky do souboru.
4. Spusťte program ROOT a v něm makro na zobrazení histogramů.
5. Kliknutím na tlačítko MY DATA –Z zobrazte histogram naměřených invariantních hmotností a studujte píky ve spektru (tento graf přiložte do protokolu).
6. Kliknutím na tlačítko ALL DATA –Z zobrazte histogram naměřených invariantních hmotností z velkého souboru událostí. Porovnejte zřetelnost jednotlivých píků s vaším souborem. Hledejte v histogramu píky, které by mohly odpovídat očekávaným částicím (viz tabulka 1). Je vhodné použít logaritmické měřítko na ose y (tento graf přiložte do protokolu).
7. Zobrazujte si histogramy jednotlivých rozpadových kanálů a porovnejte hmotnosti s hypotézou druhu mateřské částice.
8. Kliknutím na tlačítko COMPARE – Z zobrazte histogramy oblasti kolem píku Z pro 4 různé velké statistické soubory. Porovnejte zřetelnost struktur ve spektru.
9. Zapište si výsledky fitů Gaussovou křivkou pro boson Z (střední hodnotu a její chybu σ).
10. Vyneste tyto výsledky grafu jako funkci počtu událostí pro jednotlivé identifikované částice a diskutujte průběh grafů
11. Porovnejte graf chyby určení střední hodnoty se závislostí $1/\sqrt{N}$ (tento graf přiložte do protokolu)

Poděkování

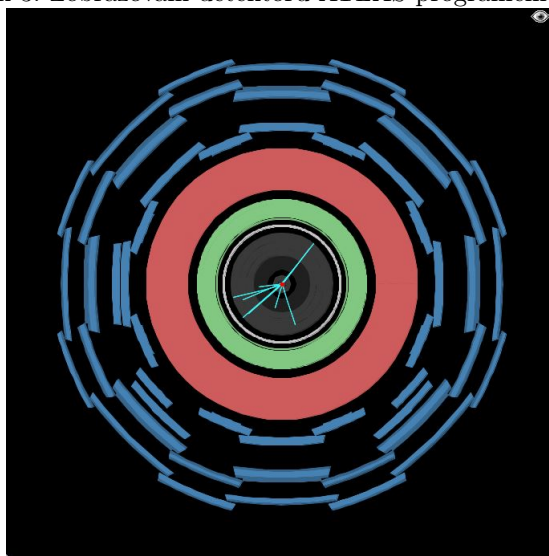
Tato úloha je založena na úloze ATLAS Z-path [3] vyvinuté v rámci popularizační kampaně Physics Masterclasses [4].

Částice	Popis	Hmotnost [GeV/c ²]	Rozpadová šířka [GeV]
J/Ψ	Vázaný stav kvarků $c\bar{c}$	$3,096900 \pm 0,000006$	9×10^{-5}
$\Upsilon(1S)$	Vázaný stav kvarků $b\bar{b}$	$9,4603 \pm 0,0003$	5×10^{-5}
Z	Boson Z	$91,188 \pm 0,002$	2,5
H	Higgsův boson	$125,09 \pm 0,24$	$< 0,013$

Tabulka 1: Přehled částic rozpadajících se na páry leptonů a fotonů [1]

A Identifikace částic

Obrázek 3: Zobrazování detektoru ATLAS programem Hypatia



Detektor ATLAS

Na obrázku 3 je schematicky naznačený průřez detektoru ATLAS tak, jako ho zobrazuje program HYPATIA. Jednotlivé části detektoru jsou barevně rozlišené.

Vnitřní detektor

Vnitřní detektor je na obrázku 3 znázorněný šedou barvou. Jedná se o dráhový detektor. Detektory tohoto typu určují polohu elektricky nabitých částic v různých časech. Nacházejí se v homogenním magnetickém poli, které způsobuje odklon nabitých částic. Ze zakřivení dráhy 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.

Elektromagnetický kalorimetr

Elektromagnetický kalorimetr je na obrázku 3 znázorněn zelenou barvou. Jsou tu detekované částice, které interagují elektromagneticky, zejména elektrony a fotony. Celková energie částice procházející elektromagnetickým kalorimetrem je absorbovaná a zpracovaná na výstupní signál, jehož intenzita je mírou energie částice.

Hadronový kalorimetr

Hadronový kalorimetr je na obrázku 3 znázorněn červenou barvou. Jsou tu detekované silně interagující částice, složené z kvarků resp. antikvarků (hadrony). Princip detekce částic je analogický jako v případě elektromagnetického kalorimetru, s tím rozdílem, že v hadronovém kalorimetru jsou použité materiály s vyšší hustotou, které jsou nutné na absorpci hadronů.

Mionová komora

Na obrázku 3 je znázorněná modrou barvou. Miony zanechávají jen malou část svojí energie v kalorimetrech a jsou jedinými „viditelnými” (viz odstavec identifikace částic) částicemi, které projdou každou vrstvou detektoru ATLAS. Mionové komory sloužící k identifikaci mionů jsou kvůli tomu umístěny ve vnější části ATLASu. Jsou v přidavném magnetickém poli, díky čemuž je možné přesnější určení hybnosti než v dráhových detektorech a jsou tvořeny velkým počtem (řádově 10^3) trubic vyplněných plynem, které mají ve svém středu umístěny vodiče. Dopadající miony ionizací plynu vytvářejí volné nosiče náboje, které jsou pod vlivem napětí mezi vodičem a trubicí přitahovány buď k vodiči, nebo k vnější stěně. Toto vytváří elektronicky zpracovatelný signál.

Identifikace částic

K analýze srážek protonů je třeba identifikovat produkty srážek. Na obrázku 4 je schematicky znázorněn průlet jednotlivých částic detektorem ATLAS.

Elektron (resp. pozitron) vytvoří stopu ve vnitřním detektoru, protože je elektricky nabitý a uvolní svoji energii v elektromagnetickém kalorimetru. V hadronovém kalorimetru ani v mionové komoře stopu nezanechá. Principiálně stejnou stopu vytvoří pozitron. Tyto dvě částice od sebe odlišíme na základě zakřivení dráhy ve vnitřním detektoru. To se projeví na znaménku příčné hybnosti. Zápornou hodnotu má částice se záporným elektrickým nábojem.

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 příčné hybnosti.

Foton uvolní energii v elektromagnetickém kalorimetru. V dráhovém detektoru, hadronovém kalorimetru ani v mionové komoře stopu nezanechá. V programu Hypatia na kartě "Physics Objects" vidíme 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.

Neutrino 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 taktéž nulová.

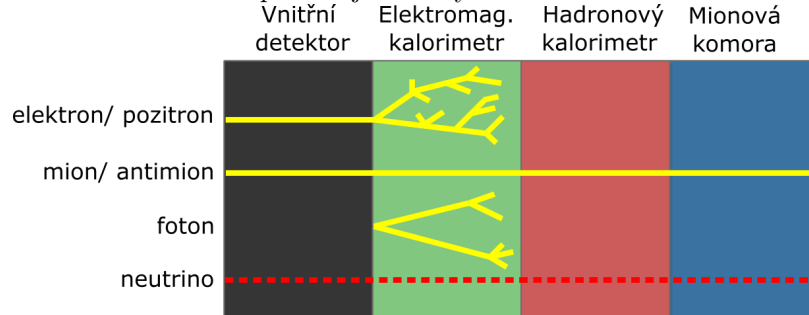
$$\sum p_T \Big|_{\text{před srážkou}} = \sum p_T \Big|_{\text{po srážce}} = 0 \quad (1)$$

Pokud příčnou hybnost po srážce naměříme, existují buď produkované částice, které detektor nezaregistruje (například jedno nebo více neutrin) nebo je to následek nepřesnosti měření. V detektoru ATLAS je chybějící příčná hybnost určená 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 se to zobrazuje dvěma způsoby:

1. pomocí hodnoty chybějící příčné hybnosti (MET) na kartě "Output Display" v "Control Window",
2. červenou přerušovanou čarou, která zobrazuje směr nerovnováhy energie a její tloušťka je úměrná MET.

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

Obrázek 4: Schéma průletu jednotlivých částic detektorem ATLAS

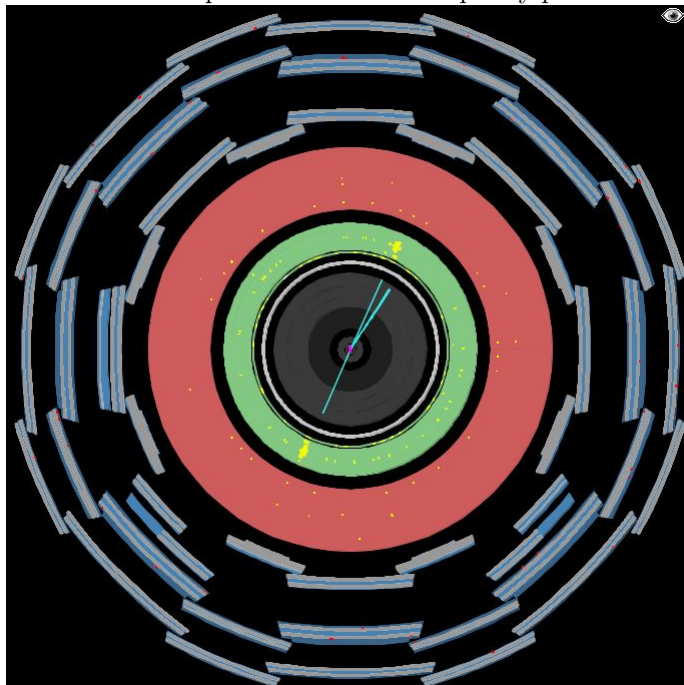


Příklady událostí k identifikaci částic

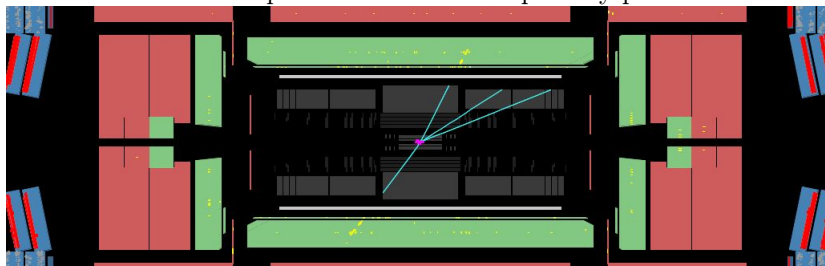
Před samotným používáním programu HYPATIA a měřením úlohy je důležité si uvědomit, jak budou prakticky vypadat stopy jednotlivých částic zobrazené v tomto programu.

Elektron-pozitronová událost

Obrázek 5: Elektron-pozitronová událost - příčný průřez detektoru



Obrázek 6: Elektron-pozitronová událost - podélný průřez detektoru



Jak vidíme na obrázcích 5 a 6, ve vnitřním detektoru máme zobrazených několik drah, z čehož právě dvě dráhy míří k výrazným žlutým polím v elektromagnetickém kalorimetru.

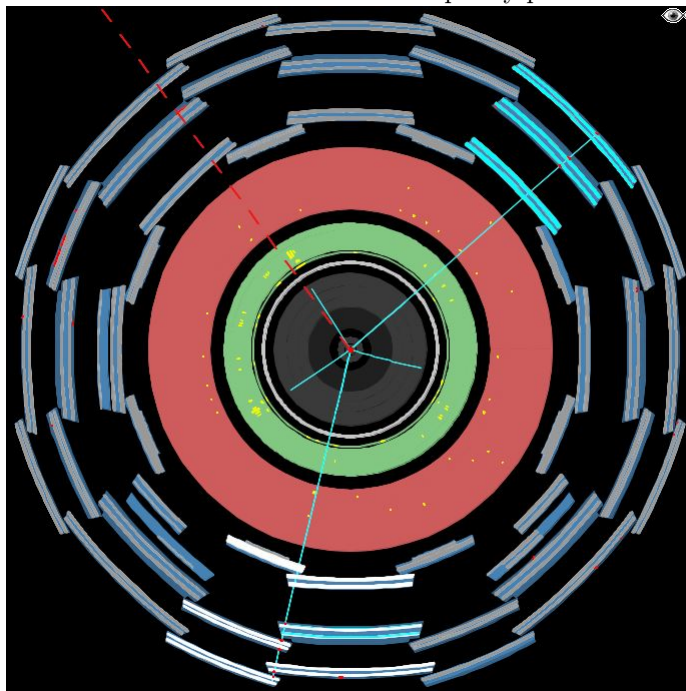
Ze zaznamenané trajektorie ve vnitřním detektoru vyplývá, že se jedná o nabitě částice. Z množství odevzdané energie v elektromagnetickém kalorimetru zase vyplývá, že se jedná o elektromagneticky interagující částice. Za pomoci obrázku 4 vidíme, že se pravděpodobně jedná o elektron a pozitron.

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.

Ve výsledku tedy dostáváme, že se pravděpodobně jedná o elektron-pozitronový pár.

Mion-antimionová událost

Obrázek 7: Mion-antimionová událost - příčný průřez detektoru



Jak vidíme na obrázcích 7 a 8, ve vnitřním detektoru máme zobrazených několik drah, z čehož právě dvě dráhy procházejí všemi částmi detektoru a jsou zachycovány v mionové komoře.

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 elektromagneticky málo interagující částice. Za pomoci obrázku 4 vidíme, že se pravděpodobně jedná o mion a antimion.

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.

Ve výsledku tedy dostáváme, že se pravděpodobně jedná o mion-antimionový pár.

Fotonová událost

Jak vidíme na obrázcích 9 a 10, ve vnitřním detektoru máme zobrazených několik drah, ale žádná z nich nesměruje k žlutým polím v elektromagnetickém kalorimetru.

Z nezaznamenaných trajektorií ve vnitřním detektoru vedoucích k žlutým polím v elektromagnetickém kalorimetru vyplývá, že se jedná o elektricky neutrální částice. Z množství odevzdané energie v elektromagnetickém kalorimetru zase vyplývá, že se jedná o elektromagneticky interagující částice. Za pomoci obrázku 4 vidíme, že se pravděpodobně jedná o dva fotony.

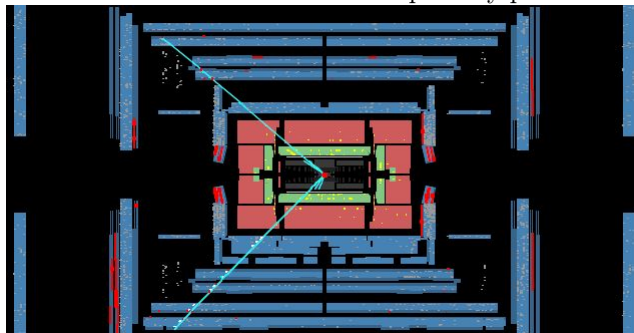
V okně *Track Momenta Window* na kartě *Physics Objects* ověříme, že nám program zrekonstruoval dva fyzikální objekty. Při zvolení této karty se nám tyto zrekonstruované objekty zobrazí, viz obrázek 11.

Ve výsledku tedy dostáváme, že se pravděpodobně jedná o dva fotony.

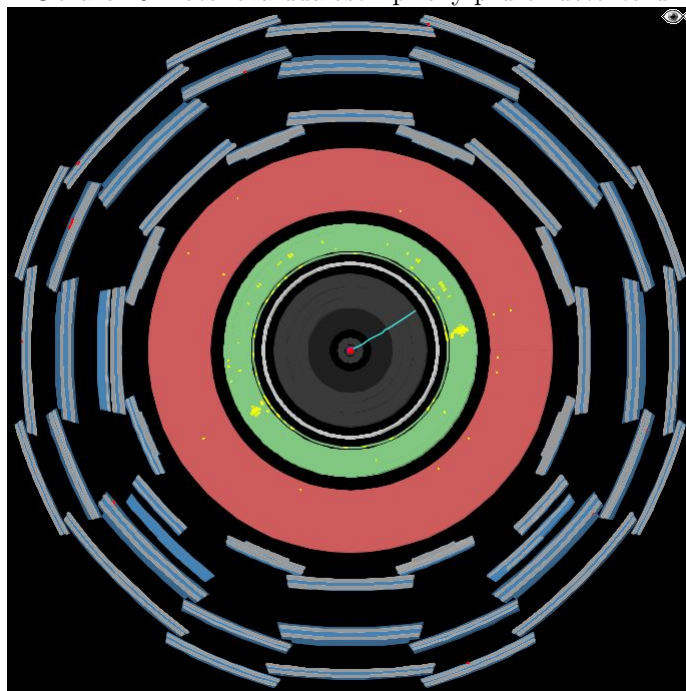
Neutrino

Jak je uvedeno ve studijním textu o identifikaci částic, neutrina nejsou přímo detekovatelná, protože neinteragují s žádnou částí detektoru ATLAS. Dokážeme je však detekovat na základě zákona zachování hybnosti. Takto zrekonstruované neutrino je znázorněno červenou přerušovanou čarou, jako na obrázku 4. HYPATIA neutrino zobrazí jako na obrázku 7.

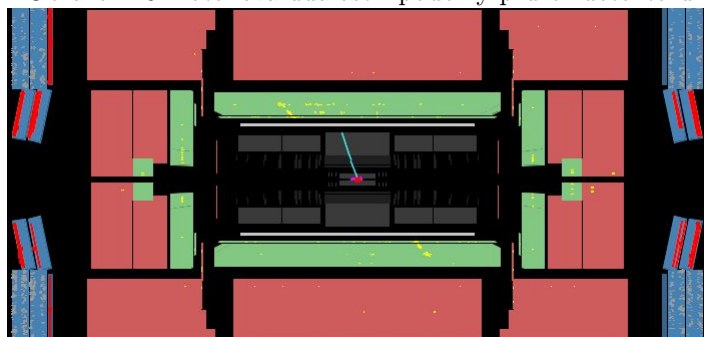
Obrázek 8: Mion-antimionová událost - podélný průřez detektoru



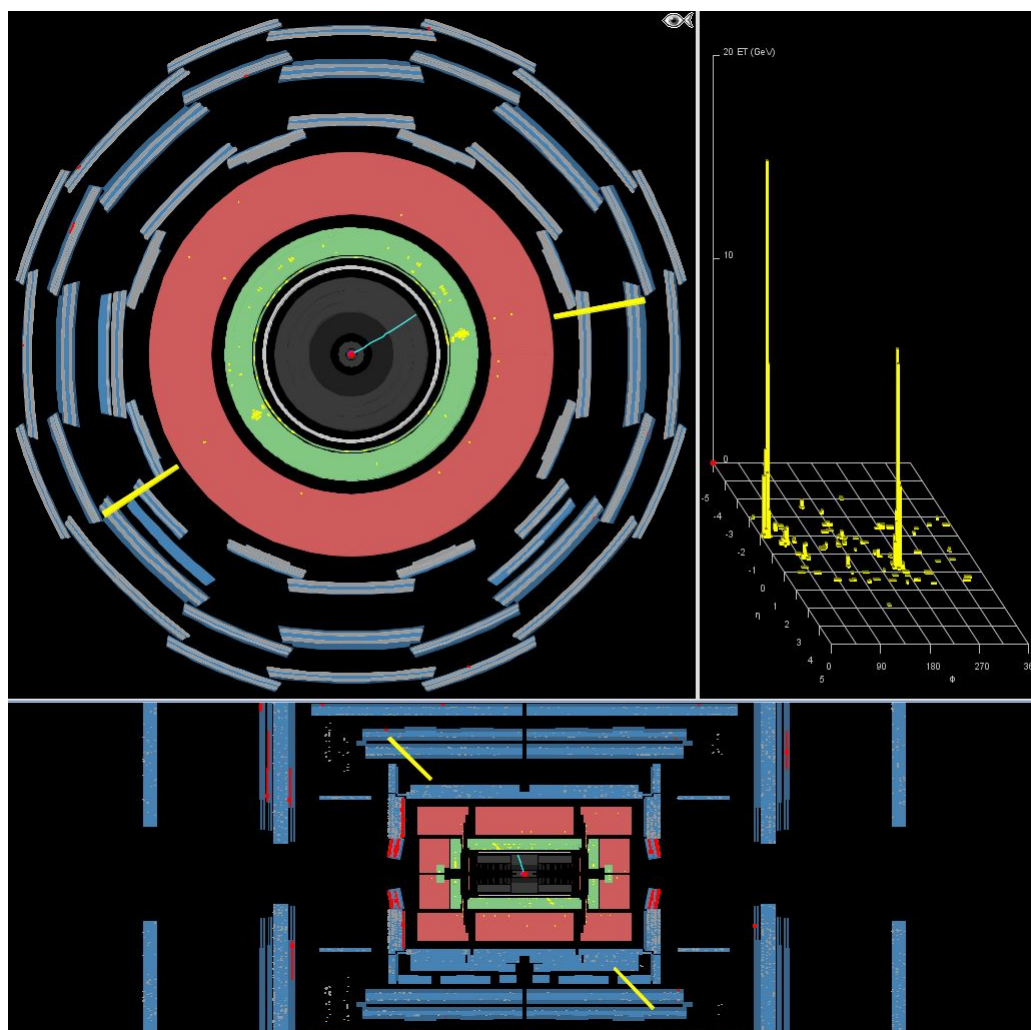
Obrázek 9: Fotonová událost - příčný průřez detektoru



Obrázek 10: Fotonová událost - podélný průřez detektoru



Obrázek 11: Fotonová událost - fyzikální objekty

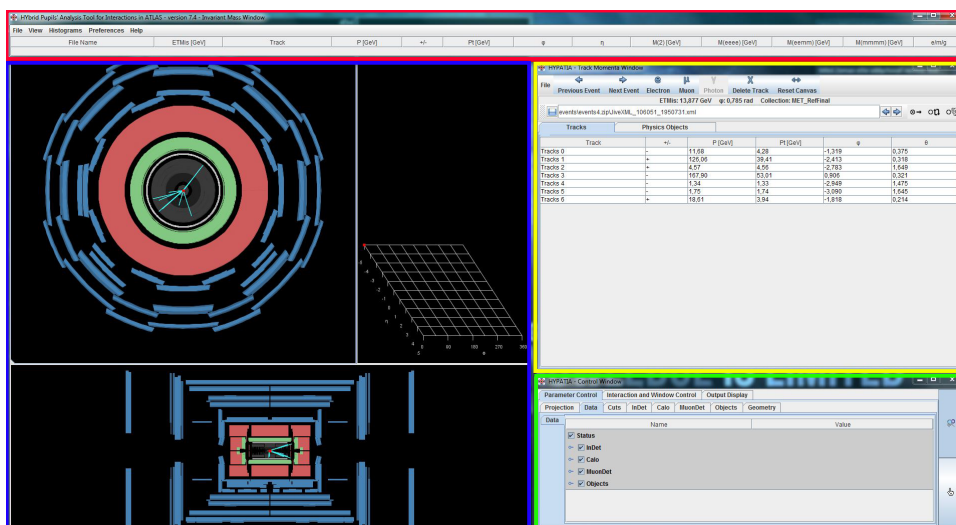


B Zobrazování pomocí programu Hypatia

Elektronické signály zaznamenané jednotlivými částmi detektoru ATLAS během srážky mohou být zviditelněny pomocí programu Hypatia.

Po spuštění programu se zobrazí čtyři okna, viz obrázek 12.

Obrázek 12: Okna programu Hypatia



Canvas Window

Canvas Window (modrý rám na obrázku 12) zobrazuje vizualizaci událostí (eventů). Eventy 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 průřezích se znázorňují dráhy detekovaných částic, které jsou rekonstruovány ze signálů detektoru.

Track Momenta Window

Track Momenta Window (žlutý rám na obrázku 12) tvoří dvě karty: *Tracks* a *Physics Objects*, kde se zobrazují informace o hybnosti zrekonstruovaných částic.

- Šípkami *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 tlačítky je uvedená hodnota chybějící příčné energie $ETMis$.

Control Window

Control Window (zelený rám na obrázku 12) je hlavní ovládací prvek vizualizace eventů. Okno má tři záložky *Parameter Control*, *Interaction and Window Control* a *Output Display*.

- Na pravé straně okna (viz obrázek 13) 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 uvedená hodnota příčné hybnosti p_T , jejíž znaménko určuje znaménko elektrického náboje vybrané částice.

Invariant Mass Window

Okno s invariantní hmotností (červený rám na obrázku 12) zobrazuje invariantní hmotnost vybraných drah. Pokud budou dráhy přidávány v nesprávném pořadí (vždy přidáváme dvojice částic: foton - foton, elektron - pozitron, mion - antimion), program vypíše chybovou hlášku.

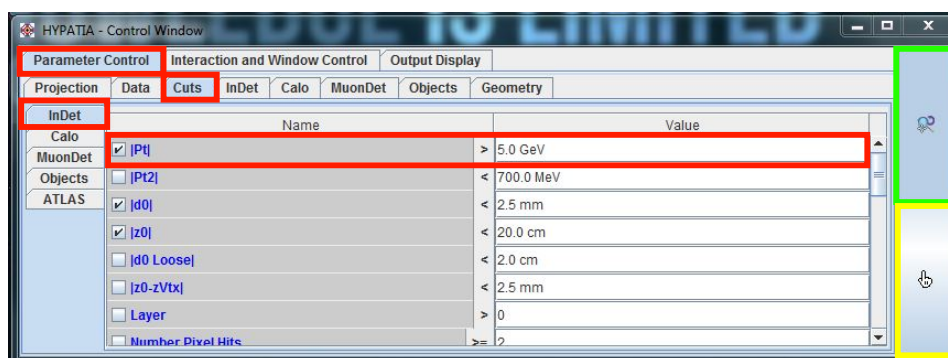
Pracovní postup

1. Načteme soubor s událostmi (eventy): File → Read Event Locally
 - 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. Dále odfiltrujeme dráhy, které nemají dost informací v nejcentrálnější části detektoru (pixelovém detektoru)
 - Zvolíme Control Window → záložka Parameter Control → karta Cuts:
 - zaškrtneme položku $[Pt]$ a zvýšíme její hodnotu (například 5.0 GeV/c), viz obrázek 13.
 - o 7 položek níže zaškrtneme položku Number Pixel Hits
2. Nástrojem výběru (viz obrázek 13) 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

- Obdobně postupujeme v případě fotonů, které vidíme na kartě fyzikální objekty v okně Track Momenta Window.
 - Částice přidáváme v párech foton - foton, elektron - pozitron, mion - antimion, jinak program vypíše chybovou hlášku.
3. Po nalezení všech párů v daném eventu přepneme na další událost šipkami *Previous Event* nebo *Next Event* v okně Track Momenta Window
 4. Po projití všech událostí exportujeme data: Invariant Mass Window → File → Export Invariant Masses
 - Invariantní hmotnosti je kvůli dalšímu zpracování nutné uložit do předem dohodnuté složky, pokud není uvedeno jinak, jsou data ukládána na plochu

Obrázek 13: Nastavení omezení příčné hybnosti eventů (červená), nástroje zoom (zelená) a výběr (žlutá)



Reference

- [1] C. Patrignani et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C, 40, 100001 (2016) and 2017 update, <http://pdg.lbl.gov/index.html>
- [2] Hypatia [online]. Dostupné z: <http://hypatia.phys.uoa.gr>
- [3] <http://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath.htm>
- [4] <http://physicsmasterclasses.org/neu/>