

A1

October 8, 2025

```
[ ]: # TODO: Replace the string "Your Name" with your actual name and "DD.MM.YYYY"
      ↪with the actual measurement date.

from header import header
header(student = "Jonáš Venc", date = "8.10.2025", task_no = 1)
```

1 Fyzika částic na LHC

Standardní model (SM) je naše nejúspěšnější teorie popisující základní stavební kameny vesmíru a jejich vzájemné působení. Základními částicemi jsou kvarky a leptony. Na tyto částice působí čtyři fundamentální síly: elektromagnetická, silná, slabá a gravitační. Kromě gravitace jsou tyto síly zprostředkovány výměnou intermediálních bosonů. Gravituaci SM nepopisuje.

1.1 Bosony Z a Higgs

Z boson je neutrální částice, která spolu s nabitými bosony W^\pm zprostředkovává slabou sílu. Z boson se produkuje ve velkém množství při vysokoenergetických srážkách protonů ve Velkém hadronovém urychlovači (LHC). Má hmotnost $91 \text{ GeV} \cdot c^{-2}$ a velmi krátkou dobu života. Téměř okamžitě se rozpadá na lehčí částice. Tyto lehčí produkty rozpadu, jako jsou páry nabitých leptonů (například elektrony a miony), jsou to, co vědci skutečně detekují.

Higgsův boson je poslední objevenou částicí Standardního modelu. Jeho objev byl ohlášen v roce 2012 experimenty ATLAS a CMS v CERNu. Má hmotnost $125 \text{ GeV} \cdot c^{-2}$ a stejně jako Z boson je vysoce nestabilní, rychle se rozpadá. Higgsův boson nikdy není pozorován přímo. Místo toho jsou detekovány produkty jeho rozpadu.

1.2 Hledání nové fyziky

Vysokoenergetické srážky protonů na LHC otevírají možnost objevit nové částice za hranicemi Standardního modelu. Jednou z teoretických předpovědí je existence těžší verze Z bosonu, nazývané boson Z' . Očekává se, že jeho vlastnosti by byly podobné vlastnostem Z bosonu, jen by měl vyšší hmotnost.

1.3 Pozadí a signál

Při srážkách vysokoenergetických protonů se produkuje mnoho různých částic. Pojmem “signál” označujeme částice, na které se v dané analýze zaměřujeme (např. bosony Z nebo Higgsův boson), zatímco do pojmu “pozadí” zahrnujeme všechny ostatní procesy, které mají podobný konečný stav a je obtížné je odlišit od signálu. Pro separaci signálu a pozadí fyzici používají specifická kritéria,

jako je měření celkového náboje produktů rozpadu. Některé procesy pozadí jsou “neredukovatelné”, což znamená, že nemohou být odstraněny a musí být zahrnuty do statistické analýzy.

2 Analýza událostí ATLAS pomocí programu Hypatia

Experiment ATLAS v CERNu používá velký detektor k registraci částic vzniklých při srážkách protonů. Měří vlastnosti těchto částic - jejich typ, náboj, hybnost a energii. K vizualizaci těchto událostí používáme program nazvaný Hypatia. Hledáme události, které obsahují produkty rozpadu Higgsova nebo Z bosonu. Dané bosony se sice mohou rozpadat na různé částice, ale u Z v této úloze hledáme pouze rozpady na páry nabitých leptonů (elektrony, nebo miony) a u Higgsova bosonu rozpady na pár fotonů. Ještě také hledáme rozpady Higgsova bosonu na čtyři leptony. Tyto kanály rozpadu se snadněji identifikují než jiné a mají nižší pozadí.

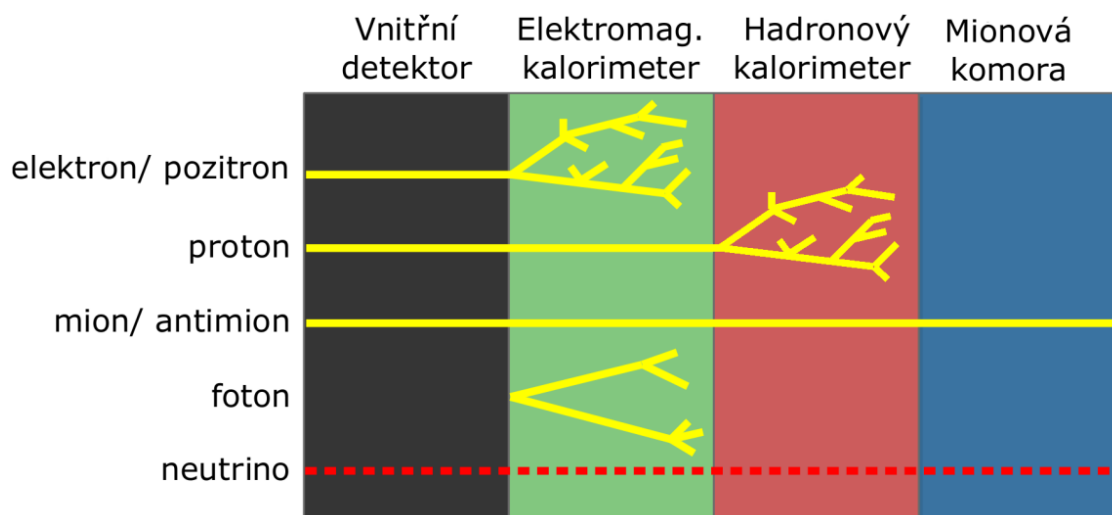
2.1 Uspořádání detektoru ATLAS

Detektor ATLAS je přístroj navržený k zachycení široké škály částic. Sestává z několika navzájem se doplňujících vrstev. Jeho hlavní části jsou:

1. **Vnitřní detektor:** Zde jsou detekovány dráhy nabitých částic. Skládá se z křemíkových pixelových a stripových detektorů a z detektoru na identifikaci vysokoenergetických elektronů založeném na přechodovém záření.
2. **Kalorimetry:** Používají se k měření energie částic. Elektromagnetický kalorimetr je navržen k absorpci fotonů a elektronů, zatímco hadronový kalorimetr (spolu s elektromagnetickým kalorimetrem) absorbuje hadrony.
3. **Mionový systém:** Detekuje miony. Miony interagují s hmotou málo, jejich energetické ztráty jsou v podstatě jen ionizační. To jim umožňuje proniknout vnitřním detektorem a kalorimetry. Mionový systém se nachází vně kalorimetrů a skládá se z několika vrstev detektorů.
4. **Magnety:** Velký supravodivý solenoidní magnet obklopuje vnitřní detektor a vytváří magnetické pole, které ohýbá dráhy nabitých částic. To umožňuje měření jejich hybnosti. Další obrovský magnetický systém, skládající se z toroidních magnetů, obklopuje kalorimetry a mionový systém a ohýbá dráhy mionů.

2.2 Identifikace částic

V experimentu ATLAS vědci identifikují částice pozorováním jejich interakce s různými vrstvami detektoru. Každá částice zanechává jedinečný “podpis”, který nám pomáhá určit její vlastnosti. Následující obrázek ilustruje, jak různé částice interagují s různými částmi detektoru ATLAS:

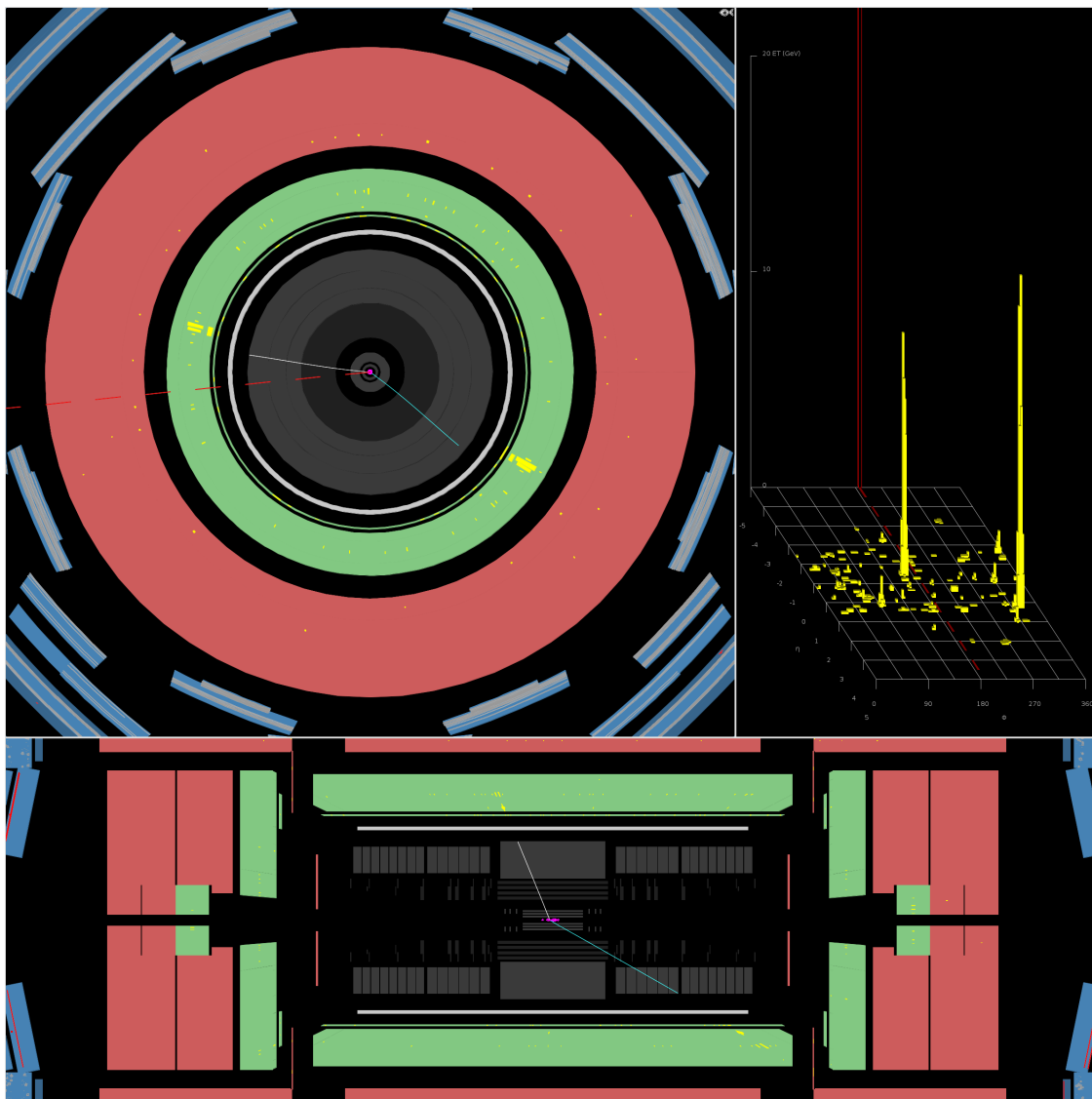


2.2.1 Elektrony a pozitrony

Tyto nabité částice zanechávají stopu ve vnitřním detektoru a deponují veškerou svou energii v elektromagnetickém kalorimetru. Do ostatních vrstev neprojdou, a proto v nich nevzbuzují žádný signál. Mezi elektronem a pozitronem rozlišujeme podle jejich opačného náboje, který způsobuje, že jejich dráhy v magnetickém poli detektoru zahýbají do opačných směrů.

Úkol: Identifikujte páry elektron-pozitron v poskytnutých událostech z detektoru ATLAS zachycujících jednotlivé srážky protonů. Hledejte stopy ve vnitřním detektoru, které míří do shluku energie v elektromagnetickém kalorimetru. Níže vložte jeden obrázek s identifikovaným párem elektron-pozitron:

Řešení:

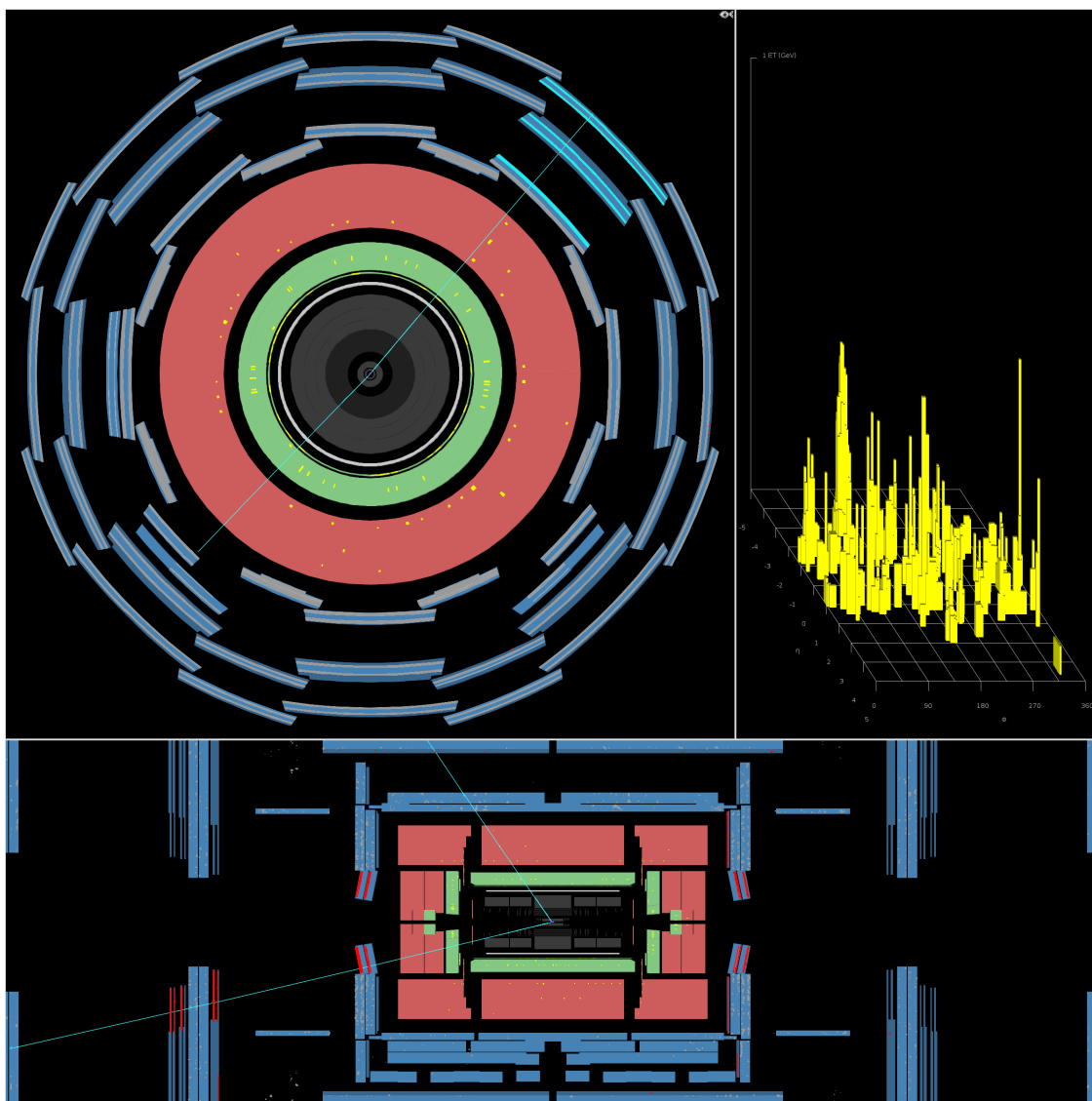


2.2.2 Miony

Miony jsou také nabité částice, a tedy také zanechávají stopu ve vnitřním detektoru. Jsou však mnohem těžší než elektrony, takže ztrácejí pouze malé množství energie v kalorimetrech, a jsou to jediné nabité částice, které doletí až do mionových komor.

Úkol: Identifikujte páry mion-antimion v poskytnutých událostech zachycujících jednotlivé srážky protonů. Hledejte stopy ve vnitřním detektoru, které pokračují skrz kalorimetry a zasáhnou mionové detektory. Níže vložte jeden obrázek s identifikovaným párem mion-antimion:

Řešení:

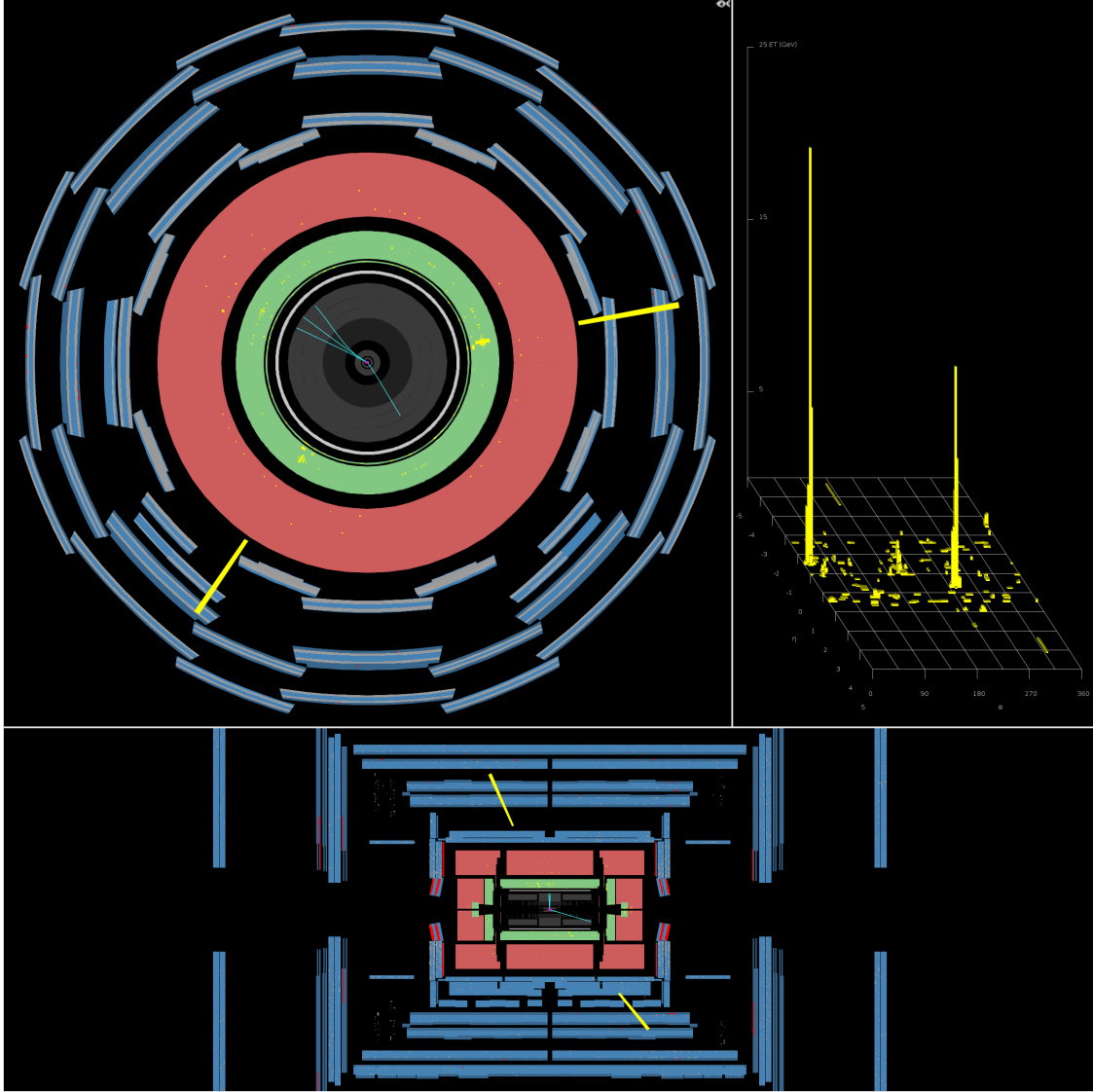


2.2.3 Fotony

Jakožto neutrální částice nezanechávají fotony stopu ve vnitřním detektoru. Identifikovány jsou podle energie, kterou deponují v elektromagnetickém kalorimetru.

Úkol: Identifikujte páry fotonů v poskytnutých obrázcích zachycujících jednotlivé srážky protonů. Hledejte shluky energie v elektromagnetickém kalorimetru bez odpovídajících stop ve vnitřním detektoru. Níže vložte jeden obrázek s identifikovaným párem fotonů:

Řešení:



2.3 Lov bosonů Z a Higgsova bosonu

Protože bosony Z i Higgs žijí příliš krátkou dobu na to, aby byly detekovány přímo, fyzici analyzují produkty jejich rozpadů. Energie a hybnost produktů rozpadu se používají k rekonstrukci hmotnosti původní “mateřské” částice pomocí Einsteinova slavného vztahu $E = mc^2$ a zákonů zachování energie a hybnosti. Vynesením rekonstruované hmotnosti z mnoha událostí do histogramu se může objevit pík na jedinečné hmotnosti mateřské částice, což vědcům umožňuje ji identifikovat. Tato metoda pomáhá potvrdit existenci známých částic a hledat nové, hypotetické částice. Pokud se mateřská částice rozpadne na dvě dceřiné částice, pak lze její hmotnost určit pomocí vzorce:

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

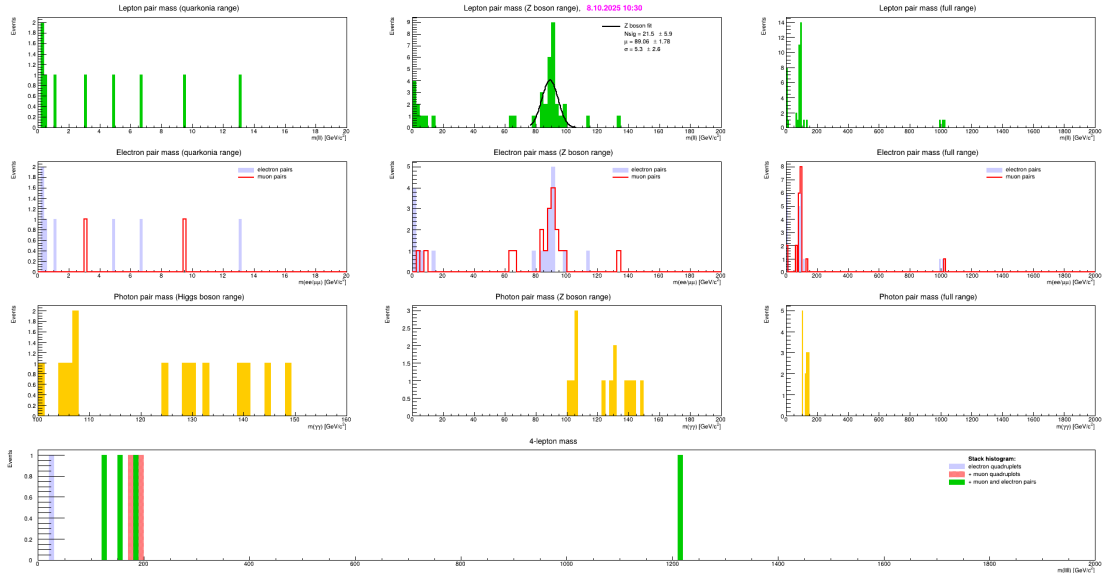
kde m_0 je klidová hmotnost mateřské částice, E_1 a E_2 jsou energie dceřiných částic a \vec{p}_1 a \vec{p}_2 jsou vektory jejich hybností. Veličina m_0 se často označuje jako invariantní hmotnost, když je vyhodnocována pomocí systému dceřiných částic.

Úkol: Zpracujte přibližně 50 událostí a identifikujte ty, které obsahují:

- páry elektronů, nebo mionů (potenciální rozpady Z bosonu)
- páry fotonů (potenciální rozpady Higgsova bosonu)
- $4e$, 4μ nebo $2e2\mu$ (potenciální rozpady Higgsova bosonu)

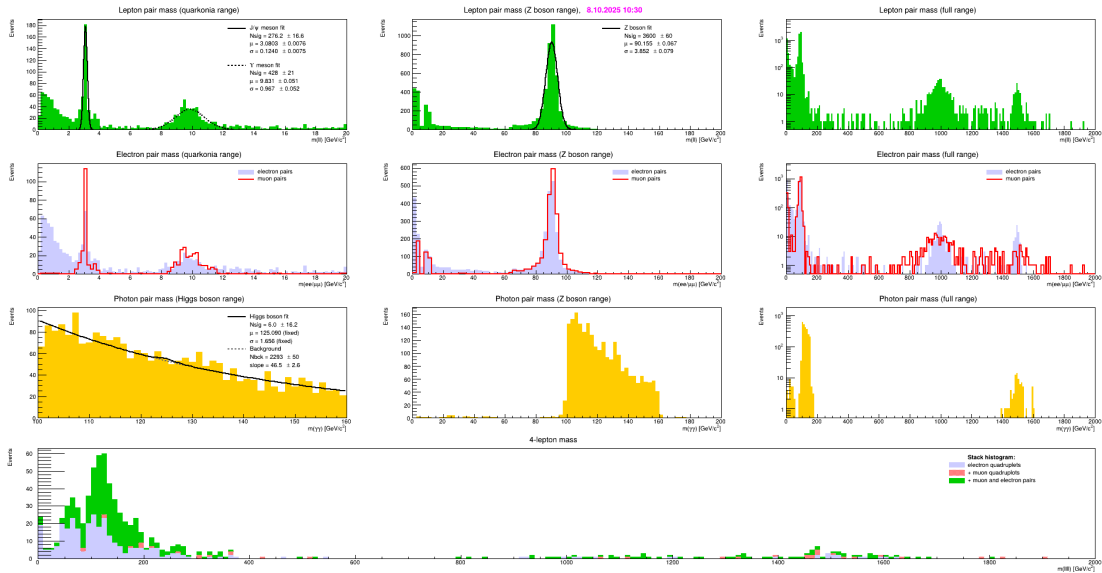
Zobrazte histogramy invariantní hmotnosti pro různé koncové stavy pomocí frameworku ROOT.

Řešení:



Úkol: Zobrazte stejné histogramy jako výše, ale použijte data zanalyzovaná všemi studenty dohromady.

Řešení:



Úkol:

- Popište, co ukazují histogramy výše.
- Diskutujte pozorované píky.
- Identifikujte Z boson a odhadněte jeho hmotnost a šířku pomocí gaussovského fitu.
- Vidíte píky odpovídající některým dalším částicím?
- Pokud ano, jaké jsou to částice a jaké jsou jejich hmotnosti a šířky?
- Je Higgsov pík viditelný v některém z histogramů?
- Pokud v některém z nich není viditelný, vysvětlete proč.

Řešení:

Histogramy ukazují rozložení událostí podle rekonstruované klidové hmotnosti. V případě párů elektronů a leptonů pozorujeme peak kolem hodnoty 90 GeV, který odpovídá Z bosonu s šířkou přibližně 4 GeV. Vidíme, že v našich datech vidíme peaky velmi ostře a můžeme tak částice jednoduše určit. V reálném měření bychom viděli řádově vyšší pozadí (máme ho odfiltrováno). U nižších rozsahů u leptonů jsme pomocí tabulky určili další dvě částice J/ψ meson a Υ meson.

Kolem 0 vidíme také necharakterizované peaky. Jedná se o chybné určení příslušných párů při rekonstrukci událostí. Při výpočtu hmotnosti se takových nepárových dvojic blíží k 0. Přesnou 0 může způsobit rozpad fotonu na elektron a pozitron v pevné látce (v našem případě detektoru), což také napěříme. Protože hmotnost fotonu je nulová dostaneme 0 i pro tento rozpad částic.

Pro fotonové páry jsme určili peak Higgsova bosonu kolem 125 GeV, avšak tento údaj je irelevantní - peak je napatrný a jeho nejistota je více než dvakrát vyšší než jeho samotná hodnota. Tento drobný peak jsme našli, protože jsme věděli, kde hledat a tuto hodnotou zafixovali. Pro vyšší rozsah vidíme jen část exponenciálního pozadí. Tento peak není viditelný na histogramech pro páry elektronů a mionů, protože se na tyto částice nerozpadá, proto ho pozorujeme na histogramu fotonových párů.

V nejvyšších škálách vidíme uměle přidané peaky pro objevení nových částic. Kolem 1 TeV s odhadnutou šířkou 50 GeV vidíme peak příslušející bosonu Z' a kolem 1,5 TeV s odhadnutou šířkou 25 GeV gravitonu (viz. další diskuze).

Nakonec jsme ukázali, že měření pouze 50 událostí naprosto nedostačuje pro většinu závěrů. Dokonce i všechna měření studentů by byla nedostatečná pro reálné použití. Z dat o 50 událostech jsme byli schopni určit poměrně přesně hmotnost Z bosonu, což je dáno nízkým pozadím a vhodnými daty.

2.4 Analýza Z píku

Invariantní hmotnost, kterou měříme, není ve všech událostech identická, ale pohybuje se kolem určité centrální hodnoty. Šířka píku je ovlivněna faktory jako doba života dané částice a rozlišení detektoru. Čím více dat máme, tím je počet událostí v píku vyšší a hmotnost částice můžeme určit s větší jistotou. K hrubému určení hmotnosti můžeme fitovat normální rozdělení (gaussovou křivku) na data v pozorovaném píku (normální rozdělení je velmi zjednodušeným modelem - skutečná křivka fitovaná v reálných experimentech je mnohem složitější). Gaussova křivka je parametrizovaná dvěma parametry: střední hodnotou, μ , a šířkou, σ . Fit nám dává odhady obou parametrů, $\hat{\mu}$ a $\hat{\sigma}$. Jelikož jsou to odhady založené na konečném počtu událostí, jsou zatíženy statistickou

neurčitostí. Neurčitosti obou parametrů můžou být také odhadnuty; klesají s druhou odmocninou počtu událostí:

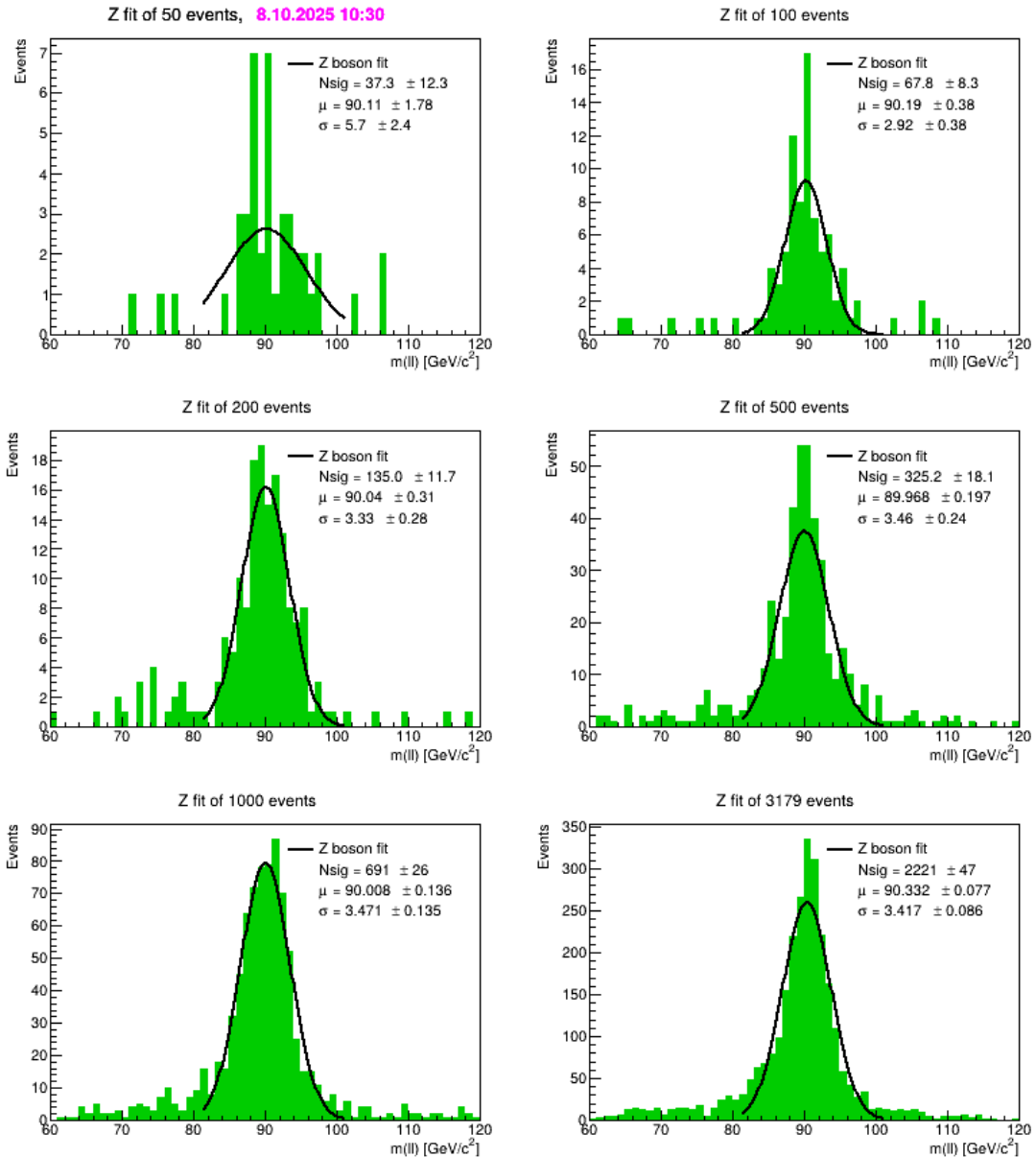
$$\hat{\sigma}_{\hat{\mu}} \propto \frac{1}{\sqrt{N}},$$

$$\hat{\sigma}_{\hat{\sigma}} \propto \frac{1}{\sqrt{2N}},$$

kde $\hat{\sigma}_{\hat{\mu}}$ a $\hat{\sigma}_{\hat{\sigma}}$ jsou neurčitosti hodnot $\hat{\mu}$ a $\hat{\sigma}$, a N je počet událostí v píku.

Úkol: Odhadněte hmotnost Z bosonu m a šířku Γ z histogramu párů leptonů. Použijte gaussovský fit a předpoklady $\hat{m} = \hat{\mu}$, $\hat{\Gamma} = \hat{\sigma}$. Proveďte to šestkrát a použijte vzorky rostoucí velikosti (např. 50, 100, 200, 500, 1000 a všechny dostupné události). Pro každý vzorek uveďte odhadované hodnoty \hat{m} a $\hat{\Gamma}$ spolu s jejich neurčitostmi. Vyneste odhadované hodnoty \hat{m} a $\hat{\Gamma}$ jako funkce počtu událostí použitých ve fitu. Vyneste odhadované neurčitosti jako funkci počtu událostí.

Řešení:



Úkol: Vytvořte pandas DataFrame pro uložení vašich měření hmotnosti a šířky Z bosonu spolu s jejich neurčitostmi.

```
[2]: # Solution.

# TODO: Insert your data to the DataFrame below.
# x stands for a number you should insert.

import pandas as pd

data = pd.DataFrame({
    'N_events': [50, 100, 200, 500, 1000, 3179],
```

```

'N unc': [12.3, 8.3, 11.7, 18.1, 26, 47],
'mass [GeV]': [90.11, 90.19, 90.04, 89.968, 90.008, 90.332],
'mass unc. [GeV]': [1.78, 0.38, 0.31, 0.197, 0.136, 0.077],
'width [GeV]': [5.7, 2.92, 3.33, 3.46, 3.471, 3.417],
'width unc. [GeV]': [2.4, 0.38, 0.28, 0.24, 0.135, 0.086],
})

# Display the DataFrame, skipping the index.
print(data.to_string(index=False))

```

N_events	N unc	mass [GeV]	mass unc. [GeV]	width [GeV]	width unc. [GeV]
50	12.3	90.110	1.780	5.700	2.400
100	8.3	90.190	0.380	2.920	0.380
200	11.7	90.040	0.310	3.330	0.280
500	18.1	89.968	0.197	3.460	0.240
1000	26.0	90.008	0.136	3.471	0.135
3179	47.0	90.332	0.077	3.417	0.086

Úkol:

- Fitujte hmotnost vs. počet událostí konstantní funkcí.
- Fitujte šířku vs. počet událostí konstantní funkcí.
- Fitujte nejistotu hmotnosti vs. počet událostí funkcí $k \times \hat{\Gamma}_{\text{Nmax}}/\sqrt{N}$.

$\hat{\Gamma}_{\text{Nmax}}$ je šířka Z píku odhadnutá pomocí všech dostupných událostí. Extrahujte parametry fitu a jejich nejistoty.

```

[6]: # Solution.

# Fit mass vs. number of events with a constant function, and plot the result.
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit

# Plotting function.
def plot_with_fit(x, y, xerr, yerr, x_fit, y_fit, x_label, y_label, title):
    plt.errorbar(x, y, xerr=xerr, yerr=yerr, fmt='o', label='Data',
        color='black')
    plt.plot(x_fit, y_fit, '-', label="Fit", color='red')
    # Swap the items in the legend to have the Data first.
    handles, labels = plt.gca().get_legend_handles_labels()
    plt.legend(handles[::-1], labels[::-1])
    plt.xlabel(x_label)
    plt.ylabel(y_label)
    plt.title(title)
    plt.show()

# Define the constant function for fitting.

```

```

def constant(x, a):
    return a

# For simple manipulation, create np.arrays from the DataFrame columns.
x = np.array(data['N_events'])
m = np.array(data['mass [GeV]'])
x_unc = np.array(data['N_unc'])
m_unc = np.array(data['mass unc. [GeV]'])
gamma = np.array(data['width [GeV]'])
gamma_unc = np.array(data['width unc. [GeV]'])

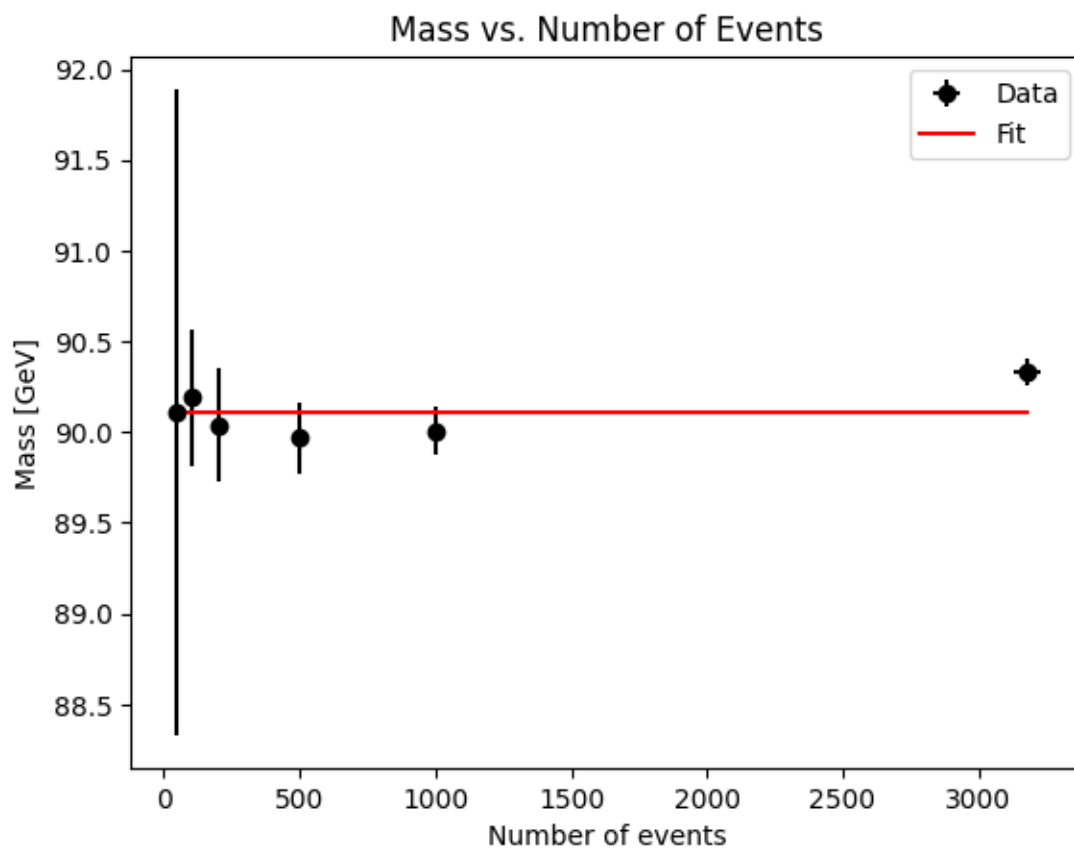
# Prepare common ingredients for fitting and plotting.
x_fit = np.linspace(min(x), max(x), 100)
Gamma_Nmax = gamma[-1] # Using the last value as Gamma_Nmax

# Fit mass vs. number of events with a constant function.
# Plot the results.
popt_mass, pcov_mass = curve_fit(constant, x, m)
y_fit = np.ones_like(x_fit) * popt_mass[0]
plot_with_fit(x, m, x_unc, m_unc, x_fit, y_fit, "Number of events", "Mass_
↳[GeV]", "Mass vs. Number of Events")
print(f"Fitted mass: {popt_mass[0]:.2f} ± {np.sqrt(pcov_mass[0,0]):.2f} GeV")

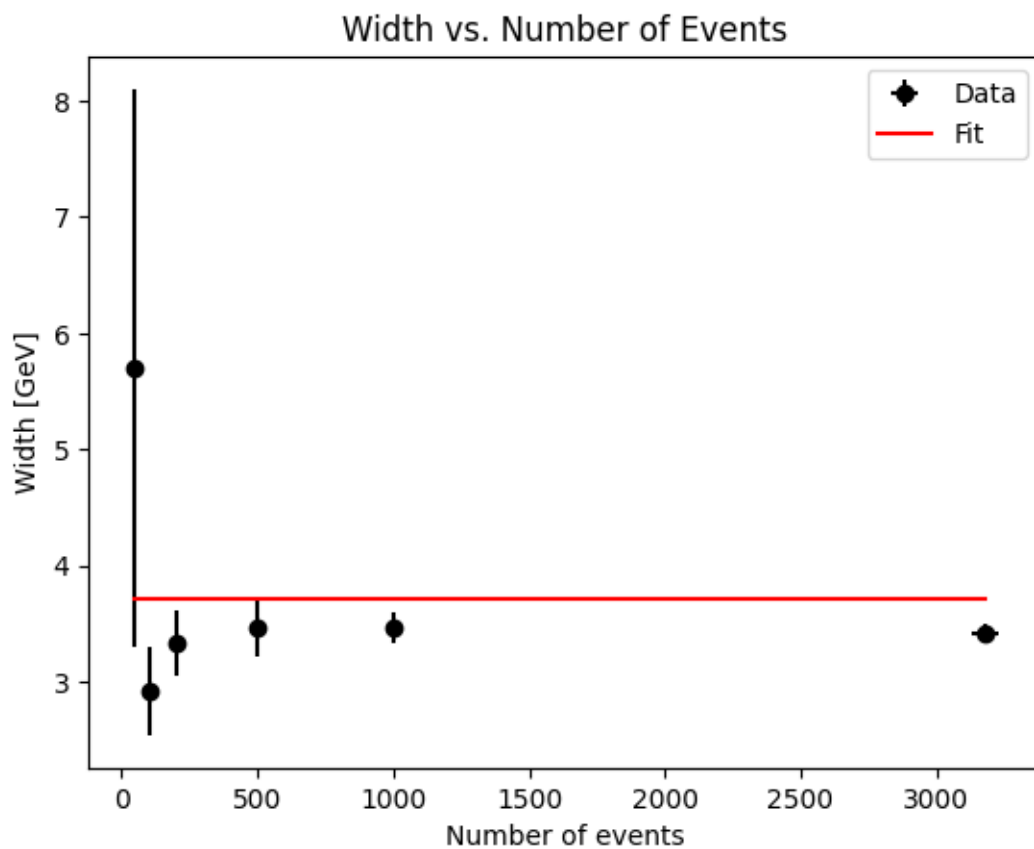
# Fit width vs. number of events with a constant function.
# Plot the results.
popt_width, pcov_width = curve_fit(constant, x, gamma)
y_fit = np.ones_like(x_fit) * popt_width[0]
plot_with_fit(x, gamma, x_unc, gamma_unc, x_fit, y_fit, "Number of events",
↳"Width [GeV]", "Width vs. Number of Events")
print(f"Fitted width: {popt_width[0]:.2f} ± {np.sqrt(pcov_width[0,0]):.2f} GeV")

# Fit mass uncertainty vs. number of events with a  $k * \text{Gamma\_Nmax} / \sqrt{N}$ 
↳function.
# Plot the results.
def mass_uncertainty_func(N, k):
    return k * Gamma_Nmax / np.sqrt(N)
popt_mass_unc, pcov_mass_unc = curve_fit(mass_uncertainty_func, x, m_unc)
y_fit = mass_uncertainty_func(x_fit, *popt_mass_unc)
plot_with_fit(x, m_unc, None, None, x_fit, y_fit, "Number of events", "Mass_
↳Uncertainty [GeV]", "Mass Uncertainty vs. Number of Events")
print(f"Fitted k for mass uncertainty: {popt_mass_unc[0]:.2f} ± {np.
↳sqrt(pcov_mass_unc[0,0]):.2f}")

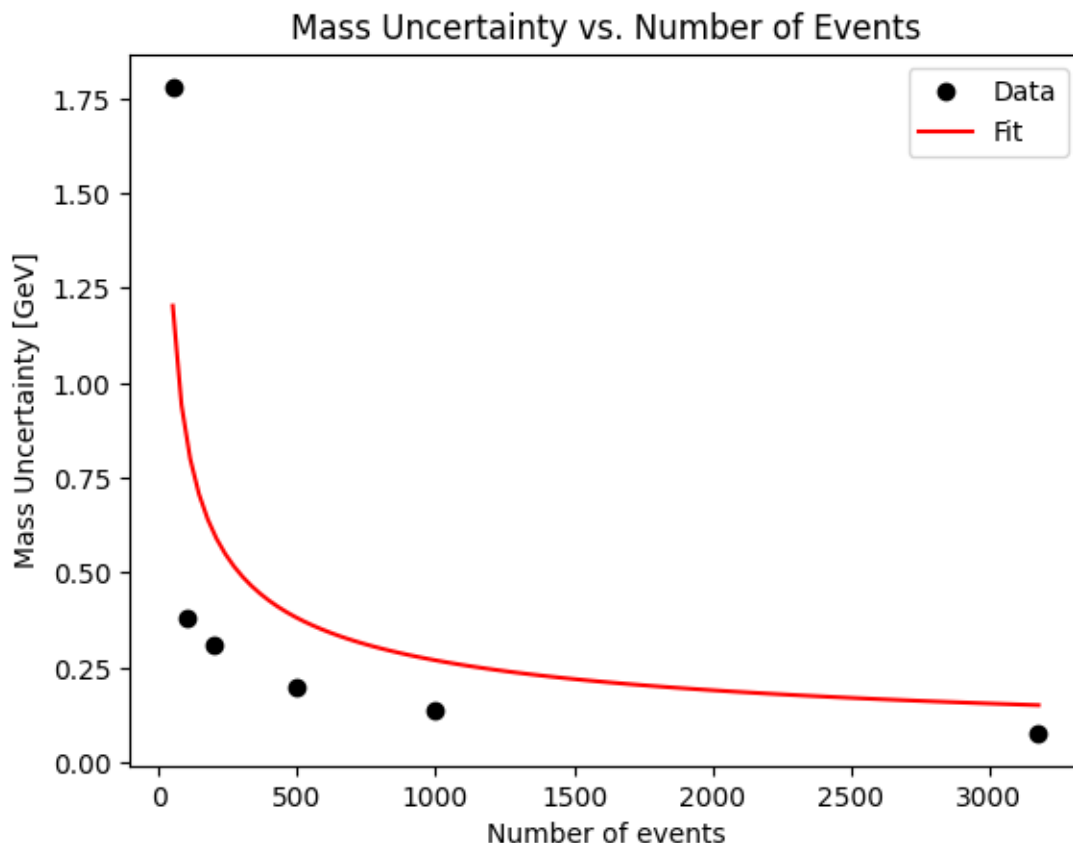
```



Fitted mass: 90.11 ± 0.06 GeV



Fitted width: 3.72 ± 0.41 GeV



Fitted k for mass uncertainty: 2.49 ± 0.56

Úkol: Diskutujte výsledky fitů. Následují data očekávané trendy? Jaká je očekávaná hodnota k ? Souhlasí fitované hodnoty s očekáváním?

Řešení:

Ve skriptu pro plotování grafů jsme přidali nejisototu počtu událostí (osy x).

Vidíme, že poloha střední hodnoty se až na měření s nejvyšším vzorkem shoduje v rámci své chyby. Odlišnost tohoto bodu by mohlo vysvětlovat samotný fit. Fit je vykreslen kolem peaku Gaussovy křivky a je otázka, zda měření mimo tuto oblast ovlivňují tento fit. Pokud by jej neovlivňovali, bylo by rozumné jako celkový počet událostí brát v úvahu pouze signální body, a nikoliv celkový počet včetně pozadí. Tento součet by se více podobal uvažovaným bodům v této oblasti. Navíc nejistota na osách x je počítána jako právě nejistota součtu signálních bodů. Protože to je ale jediná nejistota, kterou máme k dispozici, používáme ji i pro součet všech událostí.

Nejistota šířky je dána dobou života částice a přesností detektoru. S vyšší přesností detektoru jsme schopni přesněji změřit hybnost, ze které poté dopočítáváme zobrazované klidové hmotnosti. Podle teorie by se šířka měla snižovat s počtem měření (nárůst hodnot v peaku). V našem grafu však vidíme podobnou hodnotu pro všechny body. To je způsobeno pravděpodobně ze stejných důvodů jako pro střední hodnotu.

Nejistoty střední hodnoty ale neodpovídají teoretické závislosti ($N^{-1/2}$). To může být určeno špatně zadaným modelem, konkrétní příčinu nejsme schopni z těchto dat určit. Argumentovat by také bylo možné faktem, že se zvyšujícím se počtem událostí nejistota skutečně klesá, my ale nemáme dostatečný počet bodů pro přesnou aproximaci.

Samotná hodnota k odpovídá teoretickému očekávání v řádu jednotek.

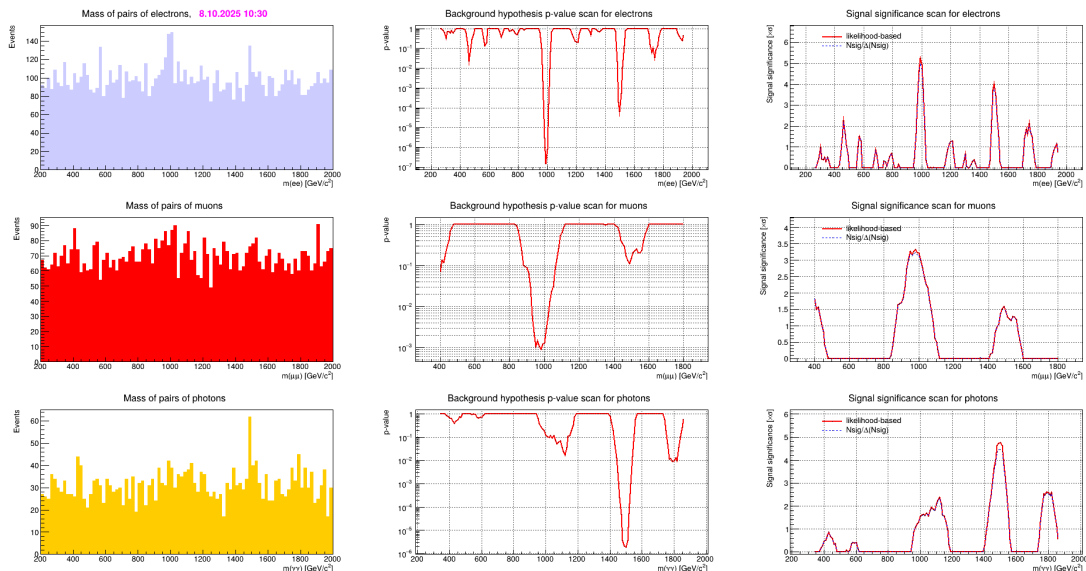
2.5 Objevy částic a testování hypotéz

Ke každému procesu měřenému na LHC existuje určité množství událostí pozadí. Pro rozlišení signálu (částice, které hledáme) od tohoto pozadí často vytváříme histogram invariantní hmotnosti. Události, ve kterých se zrodila studovaná částice vytvářejí na tomto histogramu pík. Procesy pozadí jsou rozptýlené a vytváří hladké spojité rozdělení. Pro běžné částice jako Z boson je signální pík snadno viditelný. Nicméně pro vzácné nebo nové hypotetické částice může být signál pouze malý “výčnělek”, který je těžké rozlišit od náhodné fluktuace pozadí.

Při posuzování statistické významnosti pozorovaného píku používáme metodu nazývanou testování hypotéz. Začínáme s nulovou hypotézou H_0 , která tvrdí, že nová částice neexistuje a data jsou pouze vzorkem procesů pozadí. Máme také alternativní hypotézu H_1 tvrdící, že nová částice existuje. Cílem je shromáždit dostatek důkazů z dat k zamítnutí nulové hypotézy. Definujeme tzv. testovací statistiku, neboli funkci, která je numerickým shrnutím dat a pomáhá nám rozhodnout mezi hypotézami H_0 a H_1 . Jelikož je testovací statistika funkcí dat, jedná se o náhodnou proměnnou. Můžeme vyhodnotit její rozdělení pod nulovou hypotézou, např. simulací mnoha experimentů. Pokud hodnota testovací statistiky padne do extrémního konce tohoto rozdělení, máme silný důkaz proti nulové hypotéze. Vypočítáme “p-hodnotu”, která udává pravděpodobnost, že hodnota testovací statistiky bude přinejmenším tak nekompatibilní s očekáváním nulové hypotézy jako její pozorovaná hodnota. Pro vyhlášení objevu ve fyzice částic musí být p-hodnota extrémně nízká, typicky menší než 3×10^{-7} . To odpovídá takzvané 5σ signifikanci, která je zlatým standardem pro vyhlášení objevu. Při signifikanci rovné 5σ je extrémně nízká pravděpodobnost (3 ku 10 000 000) toho, že pozorovaný signál (pík na hladké křivce) je pouze náhodná fluktuace pozadí. Tato vysoká úroveň jistoty je vyžadována pro to, aby fyzici mohli oznámit objev nové částice.

Úkol: Spustte statistickou analýzu pro hledání hypotetického bosonu Z' a gravitonu v dostupném rozsahu hmotností. Zobraďte výsledky.

Řešení:



Úkol: Diskutujte výsledky statistických testů.

- Našli jste nějaké významné píky, které by mohly indikovat existenci nové částice?
- Jaká je signifikance nejmarkantnějších píků, které jste pozorovali?
- Jakým částicím by tyto píky mohly odpovídat? Proč?

Řešení:

Ano v oblasti kolem $1 \text{ TeV}/c^2$. Tento peak navíc splňuje limit 5σ v elektron-pozitronovém spektru, bylo by proto možné jej označit jako novou částici s dostatečnou přesností. Jedná se o boson Z' , tedy o hmotnější variantu bosonu Z . V mion-antimionovém spektru dosahujeme přesnosti 3σ , což lze označit jako velmi pravděpodobné. Podobně pro fotonové spektrum dostáváme přesnost 2σ , což je také nadějně, ale bylo by třeba provést další měření pro potvrzení.

V okolí $1,5 \text{ TeV}/c^2$ vidíme další peak. Ten by odpovídal gravitonu. Vidíme, že v žádném z grafů nepřekročil limit 5σ , proto by bylo třeba provést další měření.

Úkol: Napište závěr.

Řešení:

3 Závěr

V rámci úlohy jsme analyzovali události z experimentu ATLAS pomocí programu Hypatia a následně provedli statistické zpracování dat. Identifikovali jsme produkty rozpadů bosonů Z a Higgsova bosonu, vytvořili histogramy invariantní hmotnosti a provedli gaussové fitování pro odhad hmotnosti a šířky Z bosonu. Získané hodnoty (hmotnost $90,1 \text{ GeV}$, šířka $3,7 \text{ GeV}$) odpovídají očekávaným teoretickým předpovědím v rámci Standardního modelu. Dále jsme provedli testování hypotéz pro hledání nových částic. V oblasti kolem 1 TeV jsme pozorovali pík s významností 5 v elektron-pozitronovém spektru, což naznačuje možnost existence bosonu Z' , hmotnější varianty bosonu Z . V mionovém spektru jsme dosáhli významnosti 3 a ve fotonovém spektru 2 , což jsou slibné indikace, ale vyžadují další měření. V oblasti kolem $1,5 \text{ TeV}$ byl detekován peak, který

by mohl odpovídat gravitonu, avšak jeho signifikance nedosáhla požadované úrovně pro potvrzení objevu, nzačuje přitom slibnou pravděpodobnost pro další měření. Celkově výsledky potvrzují správnost metod používaných v částicové fyzice a ukazují, že i hypotetické částice mohou být detekovány při dostatečném množství dat a přesné statistické analýze. Navíc simuluje zpracování dat v CERNu s podobnými výsledky.

4 Literatura

[1] Z. Doležal, P. Řezníček, D. Scheirich et al., Studijní text k úloze A1, <https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/zadani/401>, verze z 5.10.2020