

Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta
Katedra experimentální fyziky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Částicová fyzika ve výuce na SŠ



Autor:	Petr Nitsche
Studijní program:	N1701 / Fyzika
Studijní obor:	7504T055 / Učitelství fyziky pro střední školy
Forma studia:	Prezenční
Vedoucí práce:	RNDr. Renata Holubová, CSc.
Termín odevzdání práce:	20. 5. 2022

Poděkování:

Rád bych poděkoval RNDr. Renatě Holubové, CSc., moc si vážím její pomoci, trpělivosti a ochoty při vedení a psaní této práce.

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Renaty Holubové, CSc. a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých pramenů.

V Olomouci

.....

Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení autora	Petr Nitsche
Název práce	Částicová fyzika ve výuce na SŠ
Typ práce	Diplomová
Pracoviště	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce	RNDr. Renata Holubová, CSc.
Rok obhajoby práce	2022
Abstrakt	Tato práce je věnována Částicové fyzice a její výuce na SŠ. V první části práce se nachází teoretické materiály připravené pro výuku na SŠ. V druhé části práce je vypracován podrobný návod na praktické cvičení s využitím výsledků z reálných experimentů na detektoru ATLAS.
Klíčová slova	Částicová fyzika, výuka na SŠ, Standardní model, Higgsův boson, Masterclasses, detektor ATLAS
Počet stran	95
Počet příloh	1
Jazyk	Český

Bibliographical identification:

Author's first name and surname	Petr Nitsche
Title	Particle physics teaching in secondary schools
Type of thesis	Master
Department	Department of Experimental Physics
Supervisor	RNDr. Renata Holubová, CSc.
The year of presentation	2022
Abstract	This thesis deals with particle physics and its teaching at high schools. The first part of the thesis contains theoretical materials prepared for teaching at high schools. In the second part of the work is a detailed guide to practical exercises using the results of real experiments on the ATLAS detector.
Keywords	Particle physics, high school teaching, Standard model, Higgs boson, Masterclasses, ATLAS detector
Number of pages	95
Number of appendices	1
Language	Czech

Obsah

Úvod.....	8
1 Částicová fyzika.....	9
1.1 Zkoumání struktury hmoty rychlými částicemi.....	9
1.1.1 Podstata rozptylových experimentů.....	9
1.1.2 Vlnová délka částic v rozptylových experimentech.....	10
1.1.3 Moderní metody.....	10
1.1.4 Úkoly.....	14
1.2 Kvarky, hmota a antihmota.....	16
1.2.1 Kvarky.....	16
1.2.2 Hmota a antihmota.....	17
1.2.3 Anihilace hmoty a antihmoty.....	17
1.2.4 Kombinace kvarků.....	18
1.2.5 Úkoly.....	19
1.3 Interakce a jejich výměnné částice.....	21
1.3.1 Výměna interagujících částic.....	21
1.3.2 Elektromagnetická a gravitační interakce.....	22
1.3.3 Silná interakce.....	22
1.3.4 Slabá interakce.....	23
1.3.5 Feynmanovy diagramy.....	23
1.3.6 Úkoly.....	24
1.4 Standardní model.....	25
1.4.1 Počátky a vývoj Standardního modelu.....	25
1.4.2 Druhá generace kvarků.....	26
1.4.3 Třetí generace kvarků.....	26
1.4.4 Barva náboje.....	26
1.4.5 Leptony.....	27
1.4.6 Úkoly.....	28
1.5 Higgsův boson.....	29
1.5.1 Hmotnost bosonů W a Z.....	29
1.5.2 Higgsovo pole a hmotnost.....	29
1.5.3 Hledání Higgsova bosonu.....	31
1.5.4 Úkoly.....	32
1.6 Symetrie.....	34
1.6.1 Galileova a Lorentzova invariance.....	34
1.6.2 Symetrie a zákony zachování.....	36
1.6.3 Supersymetrie (SUSY).....	36
1.6.4 Úkoly.....	37
1.7 Sjednocení teorií.....	38
1.7.1 Od starověku po Einsteina.....	38
1.7.2 Teorie Glashowa – Weinberga – Salama.....	38
1.7.3 Teorie velkého sjednocení (GUT – Grand Unification Theory).....	38
1.7.4 Teorie všeho (ToE – Theory of Everything).....	39
1.7.5 Vazbové konstanty.....	40
1.7.6 Částicová fyzika a kosmologie.....	40
1.7.7 Úkoly.....	41

2 Pátrání po částicích	42
2.1 Boson Z	42
2.1.1 Úloha bosonu Z	42
2.2 Higgsův boson	43
2.3 Nová fyzika	45
2.3.1 Boson Z'	45
2.3.2 Graviton	45
2.4 Rozpoznávání částic	47
2.4.1 HYPATIA – program k zobrazení událostí.....	47
2.5 Zobrazování stop částic	60
2.5.1 Elektron a pozitron.....	60
2.5.2 Mion a antimion.....	63
2.5.3 Foton	65
2.5.4 Neutrino	67
2.5.5 Jety	69
2.6 Rozpoznávání událostí	71
2.6.1 Srážka protonů	71
2.6.2 Boson Z v událostech	71
2.6.3 Higgsův boson v událostech.....	73
2.6.4 Události jako pozadí.....	74
2.7 Zobrazování událostí	75
2.7.1 Procesy, které jsou signálem.....	75
2.7.2 Procesy, které jsou pozadím	83
2.8 Hledání a objevování s využitím hmotnosti	87
2.8.1 Identifikování částic s využitím hmotnosti.....	87
2.9 Analýza reálných dat	89
2.9.1 Datové soubory a potřebné nástroje.....	89
2.9.2 Průběh cvičení.....	89
2.9.3 Rozbor výsledků	90
3 Semináře částicové fyziky	92
Závěr	93
Seznam použitých pramenů	94
Seznam literatury	94
Seznam obrázků	94

Úvod

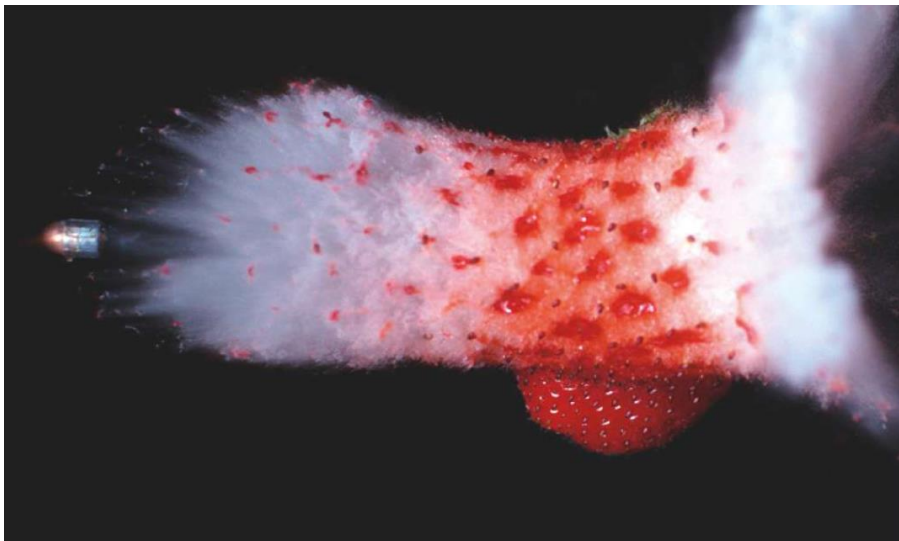
Úkolem mé diplomové práce je příprava materiálů pro výuku částicové fyziky na SŠ a využití výsledků reálných experimentů na detektoru ATLAS pro praktické ověření získaných znalostí. Částicová fyzika nebo přesněji fyzika elementárních částic, kterou se tato práce zabývá, je část fyziky, zkoumající základní částice hmoty. Tyto částice jsou buď nedělitelné, nebo nám zatím jejich další vnitřní uspořádání není známo.

Práce je rozdělena do 2 kapitol, které práci dělí na teoretickou a praktickou část. V teoretické části se věnuji výkladu učiva, které slouží jako materiál k výuce na SŠ. Ze začátku se věnuji podstatě rozptylových experimentů a principu fungování detektoru ATLAS. Dále rozebírám strukturu hmoty a základní interakce částic. Později je podrobněji popsán Standardní model a další teorie, které popisují svět částic.

V praktické části je popsáno cvičení, které slouží k praktickému ověření získaných znalostí. Cvičení vychází z International Physics Masterclasses označené jako Varianta Z, sloužící k získání praktických zkušeností s reálnými daty naměřenými detektorem ATLAS ve výzkumném centru CERN. Naměřená data jsou zobrazována pomocí zobrazovacího programu HYPATIA a dále jsou s využitím uvedeného postupu rozpoznávány jednotlivé události a částice, které byli detektorem zachyceny.

1 Částicová fyzika

1.1 Zkoumání struktury hmoty rychlými částicemi



Obr. 1: Pokud budeme chtít prozkoumat vnitřek jahody, můžeme ji rozříznout nebo rozkousnout. Fyzikové, kteří zkoumají svět částic, ovšem toto udělat nemohou. Drobné objekty, které zkoumají, musí rozbít rychle letícími „projektily“, aby z trajektorií jejich „úlomků“ odvodili vnitřní strukturu. [1]

Pomocí optického mikroskopu je možné zkoumat pouze objekty, jejichž rozměry jsou minimálně v řádech vlnové délky světla, tzn. 380 – 760 nm. Podobně lze říci pro rozptylové experimenty, že energie použité částice, a tedy její vlnová délka de Broglieho vlny, nesmí přesáhnout rozměry zkoumaného objektu. Vlnová délka λ , částice v pohybu, je dána De Broglieho vztahem:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h \cdot c}{E} \quad (1)$$

kde $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ je Planckova konstanta, p je hybnost částice, $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ je rychlost světla ve vakuu a E je energie částice. [1]

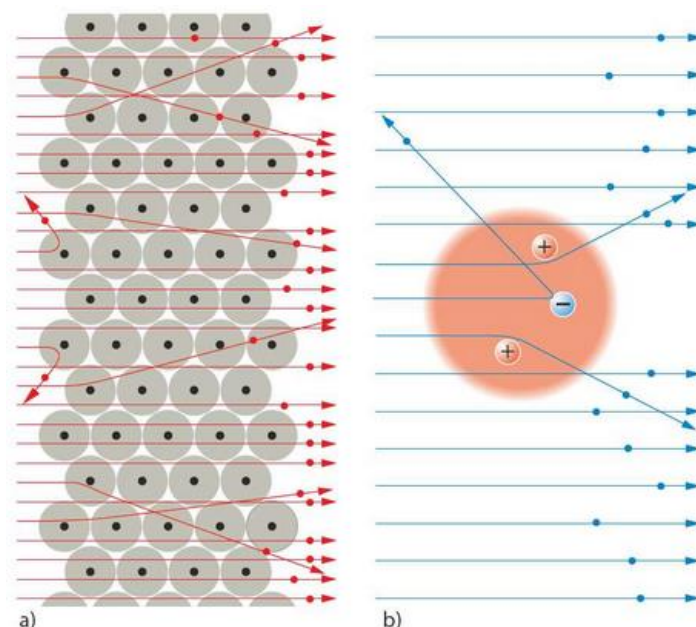
Pro zkoumání atomového jádra nebo jeho nukleonů je potřeba rozlišení 10^{-15} m nebo méně a za použití vztahu (1) můžeme určit, jakou energii má mít částice použitá ke zkoumání těchto struktur. Například elektron s energií 1 GeV má při rychlosti blíží se rychlosti světla De Broglieho vlnovou délku $1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$. [1]

1.1.1 Podstata rozptylových experimentů

Ernest Rutherford ve svém experimentu, kdy zkoumal strukturu atomu, použil alfa částice z radioaktivního zdroje (obr. 2 a)). Skutečnost, že bylo rozptýleno pouze malé množství částic se vysvětlila tím, že uprostřed atomu je relativně malé pozitivně nabitě jádro (Rutherfordův model atomu). [1]

Aby tedy bylo možné prozkoumat vnitřek atomového jádra, nebo dokonce jeho nukleony, je potřeba použít částice s podstatně vyšší energií. Také v těchto rozptylových experimentech

umožňuje směr rozptylu v závislosti na intenzitě rozptýlených částic určit velikost rozptylujících se objektů a povahu interakcí v rozptylu. S výhodou se zde používají elektrony, protony, nebo jiné částice, jejichž energie může být dostatečně zvýšena v urychlovači částic. Obrázek 2 b) ukazuje elektrony, které jsou rozptýleny na protonech. [1]



Obr. 2: Rozptyl alfa částic na atomových jádrech (a) a rozptyl elektronů na protonech (b). [1]

1.1.2 Vlnová délka částic v rozptylových experimentech

Chceme-li zkoumat malé struktury pomocí rychle letící částice, musí energie této částice a tedy i její De Broglieho vlnová délka odpovídat rozměrům zkoumaných objektů. Ke studiu rozložení náboje uvnitř protonu se používají například elektrony s extrémně vysokou rychlostí. [1]

Na základě výsledků z teorie relativity, lze vypočítat hybnost elektronu, jehož celková energie je mnohem větší než klidová energie:

$$p = \frac{E}{c} \quad (2)$$

Z rovnice (1) získáme pro vlnovou délku elektronu s vysokou energií $E = 1 \text{ GeV}$:

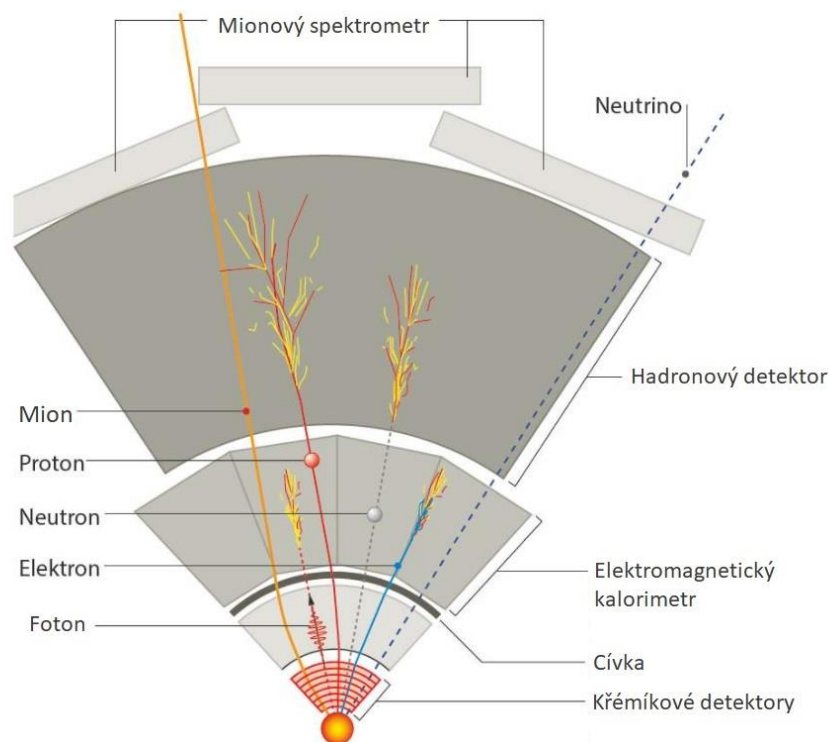
$$\lambda = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1,0 \cdot 10^9 \text{ V} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}} = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m} \quad (3)$$

Tedy s elektrony, které mají energii asi 1 GeV, je možné zkoumat strukturu v nukleonech. [1]

1.1.3 Moderní metody

Moderní částicová fyzika studuje nejen nukleony, ale také objevuje některé nové „exotické“ částice. Za tímto účelem jsou nabitě částice urychlovány a nasměrovány na neutrální objekty,

které jsou v klidu nebo se sráží na protilehlých oběžných drahách, např. jestliže dojde ke střetu dvou protonových paprsků s energií 4 TeV ($\lambda = 3,1 \cdot 10^{-19}$ m), vznikne celá sprška nových částic. K takovým srážkám dochází např. ve velkém hadronovém urychlovači (LHC - Large Hadron Collider) ve výzkumném středisku CERN. Při použití různých detekčních technik pak lze sledovat trajektorie částic v detektoru ATLAS. [1] „*Sprška je částicovými fyziky běžně používaný název. Jde o to, že jedna částice vytvoří řadu dalších částic, které se vzájemnými srážkami buď samy se sebou, nebo s částicemi materiálu detektoru přeměňují na další a další částice.*“ [3]

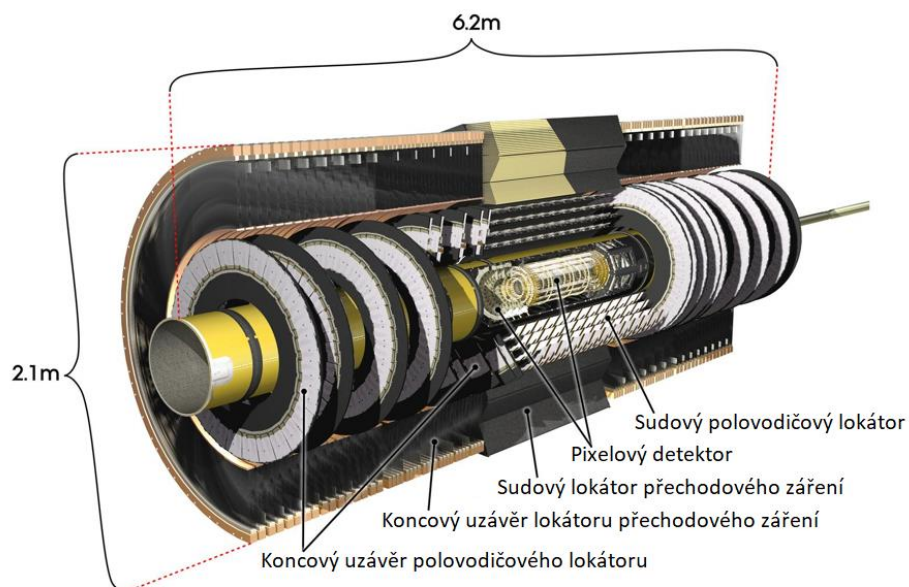


Obr. 3: Konstrukce detektoru ATLAS. [2]

Detektor ATLAS si můžeme představit jako fotoaparát, který zachycuje to, co se dělo po srážce protonů. Zkoumání těchto trajektorií nám umožní zjistit o srážkách bližší informace. Název ATLAS vznikl jako zkratka z angličtiny, A Toroidal LHC AparatuS – v češtině je to Toroidální aparatura na LHC. Jméno vychází z obrovských toroidních magnetů, které obklopují velkou část detektoru. [2]

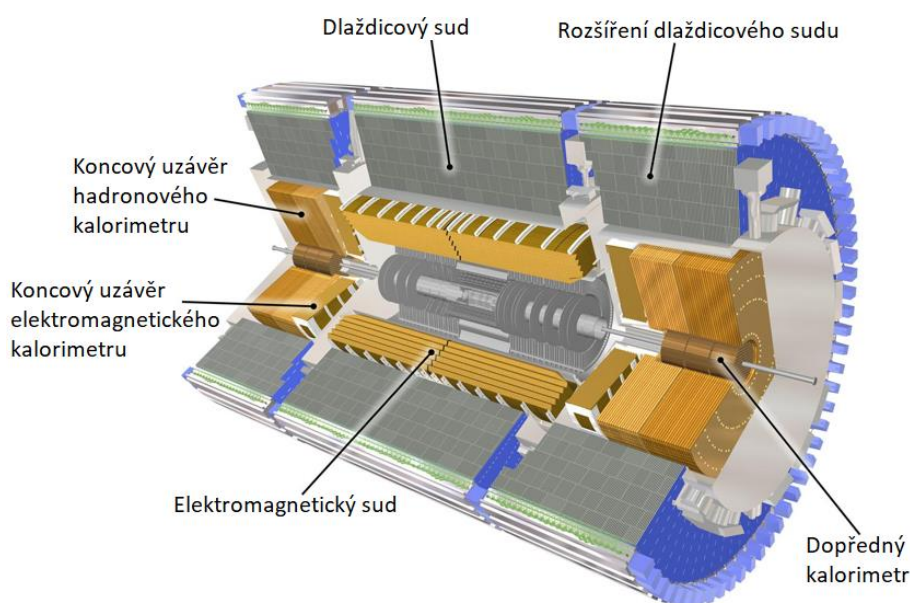
Detektor ATLAS je zkonstruován z několika vrstev. V jádru se nachází, ve vzdálenosti několik cm až 1,2 m od protonového svazku, křemíkové (polovodičové) detektory, tvořící dráhový detektor. Těmito detektory prochází magnetické pole o velikosti 2 T (tesla), které je generováno supravodivými cívkami chlazenými tekutým héliem. Tři různé polovodičové detektory registrují průchod ionizujících částic s rozlišením 6 milionů bodů na 14 μm , čímž je zajištěno dostatečně přesné určení polohy částic. Na základě zakřivení trajektorie jsou určeny náboje a hybnosti původních částic. [1]

Dráhový detektor zaznamenává částice s elektrickým nábojem. Interakce částic s materiálem dráhového detektoru je velmi malá a částice v něm nechávají pouze malou část své energie. [2]



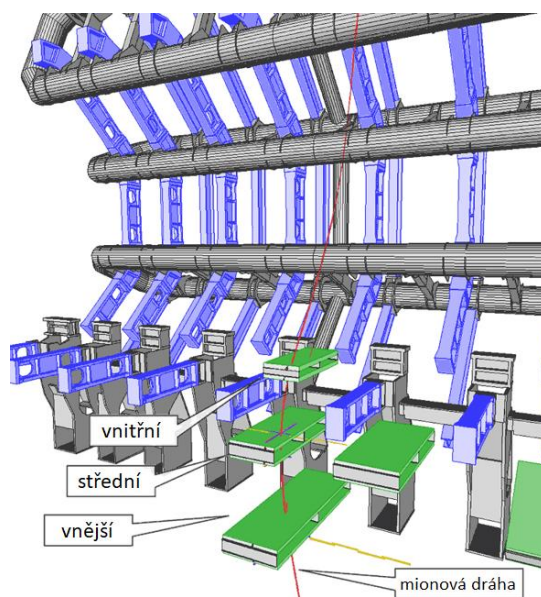
Obr. 4: Dráhový detektor. [3]

Ve střední části jsou dva kalorimetry, elektromagnetický a hadronový kalorimetr sloužící k měření energie nabitých částic s využitím elektromagnetické nebo silné interakce. V elektromagnetickém kalorimetru se měří rychlé elektrony, pozitrony a fotony vyvolávající elektromagnetickou spršku. Ty v absorpčních olověných deskách překrytých nerezovou ocelí (ve tvaru harmoniky) vyvolávají spršky elektron-pozitronových párů, které jsou vychylovány elektrickými poli atomů detektoru. K jejich detekci je použit kapalný argon, ve kterém prolétající částice vyvolávají elektrické impulsy. V hadronovém kalorimetru se měří rychlé piony, protony a neutrony vyvolávající hadronovou spršku. Ty v absorpčních železných vrstvách (prokládaných scintilačními detektory), vyvolávají spršku dalších částic (především elektronů a fotonů), které ionizují atomy detektoru. K jejich detekci jsou použity plastové desky scintilačního detektoru, ve kterých prolétající částice vyvolávají krátké záblesky. [1]



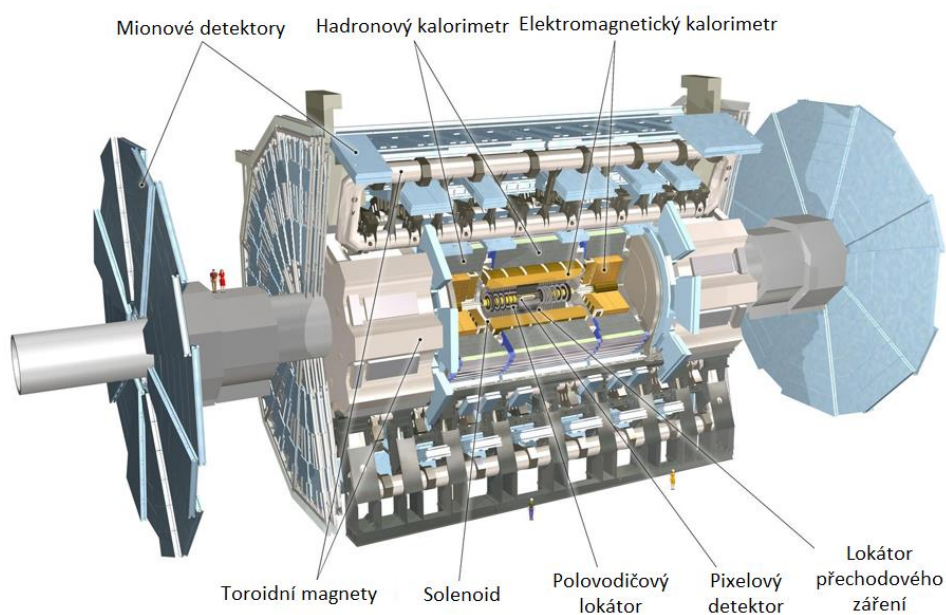
Obr. 5: Elektromagnetický a hadronový kalorimetr. [3]

Nakonec, ve vzdálenosti 11 m od protonového svazku, jsou dva mionové detektory. Miony jsou těžké, záporně nabitě částice, které vznikají v důsledku interakce kosmického záření s atmosférou. Kromě neutrin jsou miony jediné částice, které prochází všemi detektory ven. Několik prstenců vyrobených z celkově 350 000 trubic (sloužících jako komory pro sledování driftu iontů – Geigerův-Mullerův počítač) naplněných směsí argonu a oxidu uhličitého tvoří vnější obvod detektoru. Miony interagují s atomy plynu v jednom detektoru a tím je s velkou přesností zaznamenána trajektorie, ve druhém detektoru jsou přesně měřeny časy průchodu mionu a na základě toho je zjištěna hybnost. Zvláštní zájem je o miony s určitou kombinací energie a hybnosti, při jejichž vzniku hraje roli Higgsova částice. Pouze neutrina opouští detektor bez jakékoliv detekce. [1]



Obr. 6: Mionové komory. [3]

Celý detektor je dlouhý 45 m, více než 25 m vysoký a jeho hmotnost odpovídá hmotnosti Eiffelovy věže; tedy 7000 t. [1]



Obr. 7: Detektor ATLAS. [3]

Ke srážce dochází každých 25 ns a v jednotlivých oblastech detektoru se pak nachází až 1600 nabitých částic. K zaznamenání těchto dat by bylo potřeba uložit 100 TB (terabyte), což odpovídá zhruba 20 000 DVD, za sekundu. Počítačový software tedy v reálném čase rozpoznává asi 10 skutečně zajímavých událostí za sekundu a ty uloží k dalšímu vyhodnocení. [1]

1.1.4 Úkoly

Úkoly:

1. Pomocí rozptylového experimentu lze zkoumat strukturu jader a jejich stavebních prvků. Velikost atomu je asi 10^{-10} m a nukleonu asi 10^{-15} m.
 - a. Ukažte, že Rutherford byl schopen pomocí alfa částic úspěšně studovat atomy.
 - b. Určete, jakou minimální energii musí mít elektron, kterým chceme studovat stavební prvky jádra.
2. Protony s kinetickou energií 590 MeV se používají ke zkoumání struktury atomových jader.
 - a. Určete vlnovou délku takového protonu.
 - b. Určete, zda je tato vlnová délka vhodná pro takové experimenty. [1]

Řešení:

1. Úkol.
 - a. Kinetická energie alfa částice je typicky kolem 5 MeV. Z toho lze vypočítat De Broglieho vlnovou délku:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} \rightarrow \lambda \approx \underline{0,6 \cdot 10^{-12} \text{ m}}$$

To je výrazně menší než průměr atomů (cca 10^{-10} m).

- b. Elektrony musí mít hybnost, která odpovídá vlnové délce asi 10^{-15} m:

$$p = \sqrt{2 \cdot E_{\text{kin}} \cdot m_e}$$

$$E_{\text{kin}} = \frac{h^2}{2 \cdot m_e \cdot \lambda^2}$$

$$E_{\text{kin}} = 2,410 \cdot 10^{-7} \text{ J} = \underline{1500 \text{ GeV}}$$

2. Úkol:
 - a. Pro vlnovou délku platí:

$$\lambda = \frac{h}{m_p \cdot v}$$

$$Z E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \text{ a } v = \sqrt{\frac{2E}{m}} \text{ vyplývá:}$$

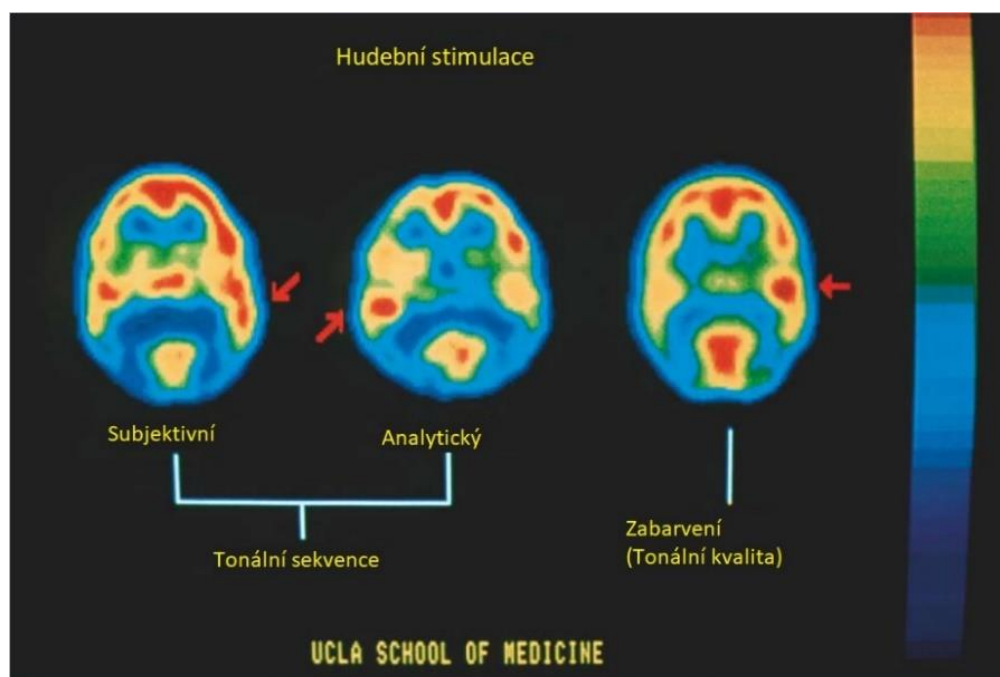
$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{m_p \cdot E}}$$

Vložením hodnot s $E = 590 \cdot 10^6 \text{ eV} = 9,453 \cdot 10^{-11} \text{ J}$ získáme:

$$\lambda = \underline{1,18 \cdot 10^{-15} \text{ m.}}$$

- b. Vlnová délka vypočtená v části a. 2. úkolu je v rozsahu velikosti objektu, proto je vhodná pro zkoumání jader. [7]

1.2 Kvarky, hmota a antihmota



Obr. 8: Zvýšená metabolická reakce v mozku, která je zviditelněna v pozitronové emisní tomografii slabým β^+ zářičem: pozitrony se setkávají se svými antičásticemi – elektrony; navzájem se ničí, anihilují a vznikají fotony γ (gama). [2]

Nukleony jsou složeny z kvarků, které mají zlomky elementárního náboje: $-\frac{1}{3}$ a $+\frac{2}{3}$. Kvarky podle současné teorie představují základní stavební „kameny“ přírody. Kvarky nemohou být pozorovány jako volné částice, ale při rozptylových experimentech s elektrony o vysoké energii můžeme zkoumat rozložení náboje (kvarků) v nukleonech. [1]

Když Paul Dirac hledal rovnice spojující kvantovou mechaniku a Einsteinovu teorii relativity uvědomil si, že ke každé nabitě částici musí existovat antičástice se stejnou hmotností, spinem ale s opačným nábojem. Pak tedy ke každému kvarku existuje antikvark:

	Zkratka	Název	Náboj
Kvark	u	up	$\frac{2}{3} e$
	d	down	$-\frac{1}{3} e$
Antikvark	$\bar{u}$	anti-up	$-\frac{2}{3} e$
	$\bar{d}$	anti-down	$\frac{1}{3} e$

Částice a její antičástice se při kontaktu navzájem zničí (anihilují). Energie je vyzářena ve formě gama záření nebo nových částic. [1]

1.2.1 Kvarky

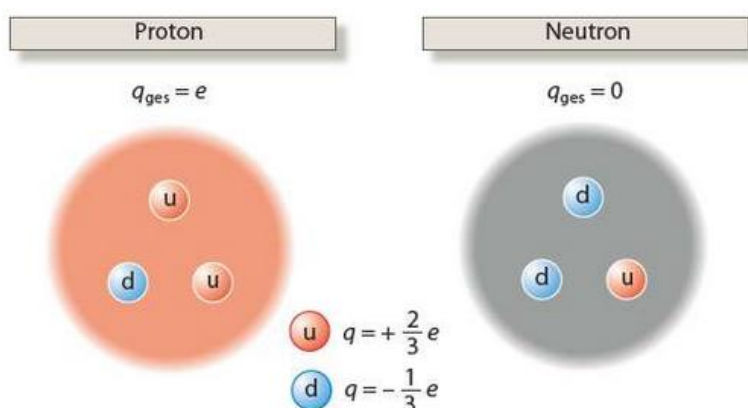
Stejně jako Rutherford v roce 1911 odhalil vnitřní strukturu atomu pomocí rozptylových experimentů s alfa částicemi, ukázali pozdější rozptylové experimenty s využitím elektronů o vysoké energii nerovnoměrné rozložení náboje v nukleonech (konkrétně v protonech). Namísto rovnoměrného rozložení náboje existují tři centra nesoucí náboj: dvě z nich nesou $\frac{2}{3}$

kladného elementárního náboje (up), třetí nese $\frac{1}{3}$ záporného elementárního náboje (down). Dohromady dávají kladný elementární náboj protonu:

$$2 \cdot \frac{2}{3} e - \frac{1}{3} e = 1 e$$

Murray Gell-Mann dal těmto základním nosičům náboje název kvarky (jméno převzal z knihy Jamese Joyce: *Finnigan's Wake* – v češtině *Plačky nad Finneganem*). [1]

Také navenek neutrální neutron má diskrétní rozložení náboje, nicméně celkový náboj je v tomto případě roven nule. Kvarky jsou považovány za hmotné body nesoucí náboj. Nicméně podle současné teorie není možné jeden izolovaný kvark pozorovat. [1]



Obr. 9: Kvarková struktura protonu a neutronu (schéma). [1]

1.2.2 Hmota a antihmota

Paul Dirac v roce 1928 hledal spojení mezi kvantovou mechanikou a teorií relativity. Přišel na řešení, které dovolilo existenci „kladně nabitého elektronu“, tedy částici s hmotností a spinem stejným jako elektron, ale s kladným nábojem. Tyto pozitrony byly v roce 1932 detekovány v kosmickém záření nicméně vznikají také při radioaktivním rozpadu některých nuklidů. [1]

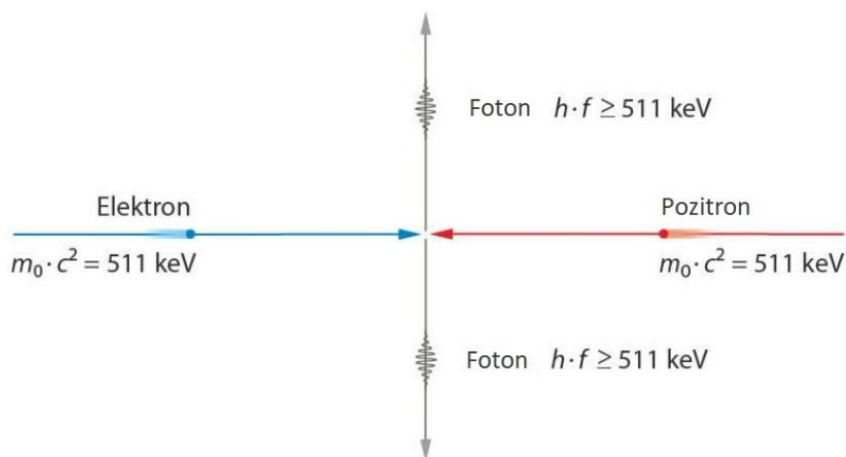
Diracovo matematické řešení umožňuje, aby všechny základní stavební kameny hmoty měly antičástici. V kvarkovém modelu existuje ke každému kvarku také antičástice, jejichž kombinací vznikají antičástice k protonu a neutronu. Tyto částice byly rovněž experimentálně zjištěny v 50. letech 20. století. [1]

Je tedy možné vyrobit antivodík k atomu vodíku skládající se z antiprotonu a pozitronu. Taková antihmota však není trvale stabilní, protože je okamžitě zničena (anihiluje) při kontaktu s obyčejnou hmotou. [1]

1.2.3 Anihilace hmoty a antihmoty

Nejjednodušší způsob, jak prokázat antičástice je při jejich zničení, kdy částice a antičástice anihilují a jejich energie se vyzáří ve formě gama záření. Vyzářená energie odpovídá celkové klidové hmotnosti výchozích částic, za předpokladu, že nejsou vytvořeny žádné další částice. [1]

Obrázek 10 schematicky znázorňuje anihilaci páru elektronu a pozitronu, které se setkají s kinetickou energií E_{kin} . K zachování energie a hybnosti je potřeba, aby se při zničení páru vyzářily dva totožné fotony, které se pohybují v opačném směru. Ve vzácných případech se mohou vyzářit tři fotony. Jejich energie v každém případě odpovídá klidové hmotnosti elektronu nebo protonu plus kinetická energie. [1]



Obr. 10: Anihilace elektronu a pozitronu (elektron-pozitronového páru). [2]

1.2.4 Kombinace kvarků

Kombinace několika kvarků nazýváme hadrony. Existují dvě hlavní rodiny hadronů: baryony a mezony. [1]

Baryony: „Těžké“ částice jádra (protony a neutrony) s klidovou energií kolem 940 MeV, patří do skupiny baryonů (řecky *barys*: těžký). Skládají se ze tří kvarků a jejich antičástice ze tří antikvarků:

Nukleon	Kombinace	Elementární náboj
p proton	uud	$2 \cdot \frac{2}{3} e - \frac{1}{3} e = 1 e$
$\bar{p}$ antiproton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	$2 \cdot \left(-\frac{2}{3}\right) e + \frac{1}{3} e = -1 e$
n neutron	udd	$\frac{2}{3} e - 2 \cdot \frac{1}{3} e = 0 e$
$\bar{n}$ antineutron	$\bar{u}\bar{d}\bar{d}$	$-\frac{2}{3} e + 2 \cdot \frac{1}{3} e = 0 e$

Mezi baryony patří také částice delta ($m_0 \cdot c^2 = 1232 \text{ MeV}$), které byly teoreticky předpovězeny v roce 1961 jako krátkodobě trvající excitované stavy protonu a neutronu a následně detekovány v urychlovači částic. [1]

Delta částice	Kombinace	Elementární náboj
Δ^+ -plus	uud	$2 \cdot \frac{2}{3} e - \frac{1}{3} e = 1 e$
Δ^- -mínus	ddd	$3 \cdot \left(-\frac{1}{3}\right) e = -1 e$
Δ^0 -nula	udd	$\frac{2}{3} e - 2 \cdot \frac{1}{3} e = 0 e$
Δ^{++} -plus-plus	uuu	$3 \cdot \frac{2}{3} e = 2 e$

Mezony: „Středně těžké“ částice (řecky *mesos*: střední). Skládají se pouze ze dvou kvarků, přesněji z páru kvark a antikvark. Nejlehčí mezony mají klidovou energii asi 140 MeV, ale existují takové, které vykazují mnohem vyšší hodnoty energie. Mezony se nachází v kosmickém záření, ale mohou být také uměle vytvořeny v urychlovači částic. [1]

Mezon	Kombinace	Elementární náboj
π^+ -poz. Pion	$u\bar{d}$	$\frac{2}{3} e + \frac{1}{3} e = 1 e$
π^- -neg. Pion	$\bar{u}d$	$-\frac{2}{3} e - \frac{1}{3} e = -1 e$
π^0 -neutr. Pion	$u\bar{u}$	$\frac{2}{3} e - \frac{2}{3} e = 0 e$

1.2.5 Úkoly

Úkoly:

1. Určete energii, která je vyzářena při zániku páru proton a antiproton. V jaké formě bude tato energie vyzářena.
2. Diskutujte původ a zánik pionu v kosmickém záření.
3. V urychlovači částic, jako je CERN, jsou protony vystřelovány s vysokou energií do kovové fólie. Antiprotony vzniklé při jaderné reakci se potom shromažďují do skladovacích prstenců pro další použití.
 - a. Ukažte vnitřní strukturu protonu a antiprotonu v kvarkovém modelu.
 - b. Když dojde ke zničení páru proton a antiproton, nastane úplná přeměna částic na energii. Pro zjednodušení předpokládejme, že částice jsou před zničením v klidu. Ukažte, že když pár zanikne, dojde k vyzáření více než jednoho kvanta gama záření.
4. Představte si atom v takovém měřítku, že protony mají průměr 1 cm. Odhadněte, jak velký by v tomto měřítku byl celý atom, elektron a kvark. [1]

Řešení:

1. Proton a antiproton mají klidovou hmotnost $m = 1,007276 \text{ u}$. V případě vzájemné anihilace protonu a antiprotonu se přemění energie odpovídající klidové hmotnosti částic:

$$E = 2mc^2 = 3,0066 \cdot 10^{-10} \text{ J} = \underline{1,88 \text{ GeV}}.$$

Tato energie je k dispozici pro tvorbu nebo generování nových částic za předpokladu, že nejsou porušeny známé zákony zachování energie, hybnosti, momentu hybnosti, elektrického náboje, baryonového a leptonového čísla atd. Například anihilací protonu a antiprotonu může vzniknout znovu proton a antiproton, ale také elektron-pozitronový pár odpovídající vysoké energii nebo dvěma gama kvantům. [7]

Pozn.

Nejběžnějším reakčním produktem při vzájemné anihilaci protonu a antiprotonu je trojice pionů π^+ , π^- a π^0 . Energetický rozdíl mezi klidovými hmotnostmi protonu a antiprotonu a hmotnostmi pionů $m_\pi \approx 140 \text{ MeV}/c^2$ je rozdělen mezi kinetickou energii pionů. [7]

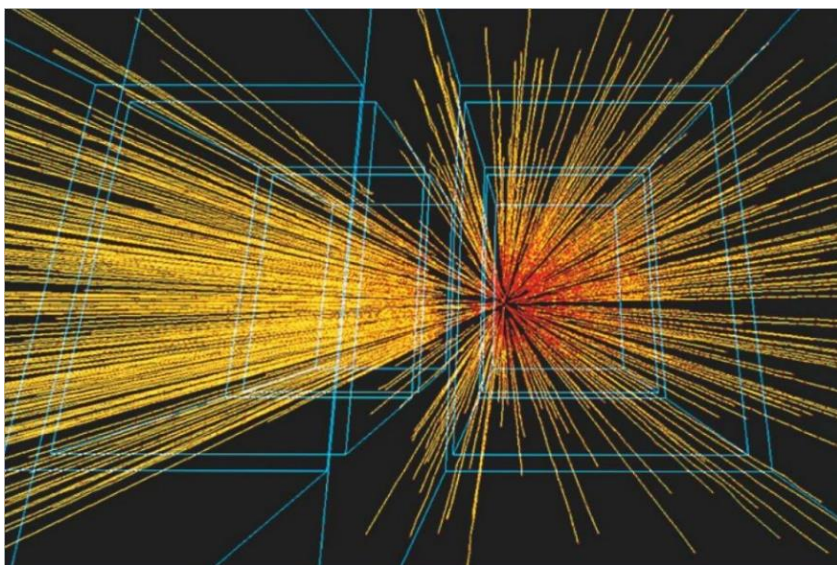
2. Individuální řešení.

3. Úkol:

- a. Proton se skládá z jednoho d-kvarku a dvou u-kvarků a má tedy náboj $1 e$. Antiproton se skládá z jednoho $\bar{d}$ -kvarku a dvou $\bar{u}$ -kvarků a má tedy náboj $-1 e$.
- b. Celková hybnost proton-antiprotonového systému je nulová. Podle zákona zachování hybnosti musí být proto hybnost systému po anihilaci také nulová. Protože rychlost světla je konstantní v každé myslitelné vztažné soustavě, má jediné kvantum gama záření nenulovou hybnost. Nemůže se tedy stát, že by při anihilaci páru došlo k vyzáření pouze jednoho kvanta gama záření. [7]

4. Pokud je atom nakreslen v měřítku – s protony a neutrony o průměru $1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m}$ – odpovídá to zvětšení asi o 10^{13} . Elektrony a kvarky o průměru menším než 10^{-18} m by byly stále tenčí než vlas. Průměr celého atomu by byl 1 km. Atom je téměř úplně prázdný. [7]

1.3 Interakce a jejich výměnné částice



Obr. 11: Goethova postava Faust chtěla před 200 lety pomocí magie zjistit „Co drží svět pohromadě v jádru?“. Určitě nemyslel experimenty jako je tento: protony a těžké ionty se spolu sráží s vysokou energií ve Velkém hadronovém urychlovači. Z kvark-gluonové plazmy vychází sprška nových elementárních částic, jejichž trajektorie umožňují vyvodit závěry o základních stavebních kamenech hmoty. [1]

Pozorování částic a zkoumání jejich vlastností je možné pouze prostřednictvím interakcí částic navzájem nebo s atomy v detektoru. Z Newtonova pohledu jsou změny velikosti a směru rychlosti způsobeny interakcemi. Tento popis zahrnuje všechny známé typy interakcí. Jsou popsány prostřednictvím výměny různých typů detekovatelných částic:

- Silná interakce se vyskytuje výlučně mezi kvarky a částicemi složenými z nich, jako jsou protony nebo neutrony (drží jádro pohromadě). Její dosah je malý (srovnatelný s velikostí jádra). Výměnné částice (nosiče silné interakce) jsou gluony.
- Elektromagnetická interakce působí mezi nabitými částicemi. Její dosah je velký (i mimo jádro, teoreticky nekonečný). Výměnné částice (nosiče elektromagnetické interakce) jsou fotony.
- Slabá interakce spojuje všechny druhy částic mezi sebou navzájem. Její dosah je malý (opět srovnatelný s velikostí jádra). Výměnné částice (nosiče slabé interakce) jsou bosony. Slabá interakce je zodpovědná např. za beta mínus (β^-) rozpad, kdy je neutron přeměněn na proton. V tomto případě se d-kvark stává u-kvarkem:



- Gravitační interakce je nejslabší interakcí a hraje roli pouze v makroskopickém rozsahu. Hypotetické výměnné částice (nosiče gravitační interakce) jsou gravitony, dosud experimentálně nenalezeny. [1]

1.3.1 Výměna interagujících částic

V kovalentní chemické vazbě dvou atomů se v oblasti mezi atomovými jádry pohybuje elektron: zprostředkovává interakci mezi těmito dvěma atomy. Podobně jakákoliv interakce mezi dvěma částicemi hmoty může být popsána výměnou různých druhů částic. [1]

Dosah a trvání interakce: Pomocí Heisenbergovy relace neurčitosti $\Delta E \cdot \Delta t \geq h/(4\pi)$ lze odvodit vzájemný vztah mezi dosahem a dobou trvání interakce. Odhad dosahu R je dán

maximální vzdáleností, kterou částice urazila během interakce trvající Δt . Protože se částice mohou, podle teorie relativity, pohybovat nejvýše rychlostí světla, je možný následující odhad:

$$R \approx c \cdot \Delta t \approx c \cdot \frac{h}{4\pi \cdot \Delta E} \approx c \cdot \frac{h}{4\pi \cdot \Delta m \cdot c^2} \approx \frac{h}{4\pi \cdot \Delta m \cdot c} \quad (4)$$

kde ΔE a Δm představují energii a hmotnost zde uvažované výměnné částice. [1]

1.3.2 Elektromagnetická a gravitační interakce

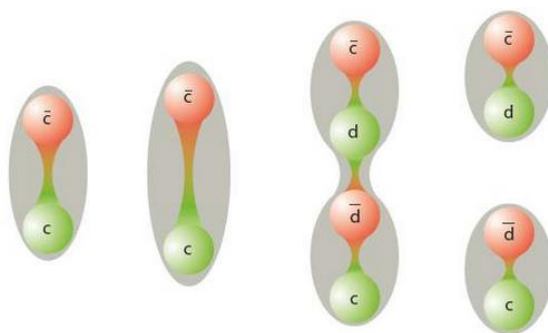
Gravitační a elektromagnetická interakce klesají úměrně s $1/r^2$. I když se s rostoucí vzdáleností stávají slabšími a slabšími, mají nekonečný dosah. Proto částice zajišťující tyto interakce – foton a graviton mají klidovou hmotnost rovnu nule. [1]

1.3.3 Silná interakce

Před zavedením kvarkového modelu byl pojem „silná interakce“ používán k popisu vzájemné interakce nukleonů. Podle současné teorie slouží k soudržnosti kvarků – základních stavebních prvků nukleonů. [1]

V rámci nukleonu se mohou kvarky pohybovat relativně volně, protože při velmi malých vzdálenostech je silná interakce jen nepatrná. S rostoucí vzdáleností je však interakce silnější; zabraňuje vzniku volných kvarků. Kvarky jsou v nukleonech uzavřeny („uvězněny“) a tato vlastnost se nazývá *Confinement*. Pokud se snažíme kvarky oddělit tak, že jim dodáváme energii, abychom je od sebe vzdálili, bude v určitém okamžiku vynaložená energie tak velká, že je dostatečná k vytvoření páru kvark a antikvark. Potom se vytvoří dvě nové částice a zůstanou dva páry kvarků (obr. 12). [1]

U vzdáleností, které jsou mnohem větší, než je poloměr jádra 10^{-15} m, je silná interakce zanedbatelná. Výsledkem je, že přitažlivou interakci nukleonů může vyrušit pouze Coulombické odpuzování protonů při velmi malých vzdálenostech. Extrémně velká jádra už tedy nemají potřebou soudržnost a rozpadají se. [1]



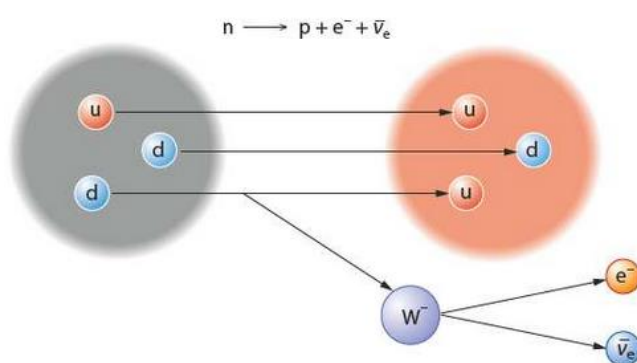
Obr. 12: „Uvěznění“ (vazba) kvarků: Při pokusu o oddělení dvou kvarků se vytvoří nové částice. Kvark neexistuje volně, ale jen ve vázaném stavu. [1]

Gluony: Elektricky neutrální výměnná částice zajišťující interakci mezi kvarky se nazývá gluon. Matematický popis gluonů je komplikovaný tím, že mohou interagovat jak s kvarky, tak i mezi sebou navzájem. Standardní model poskytuje komplexní teorii. [1]

1.3.4 Slabá interakce

Slabá interakce nezajišťuje žádnou vazbu mezi částicemi („nevytváří žádné vázané stabilní systémy částic“ [4]), ale umožňuje přeměnu částic navzájem („projevuje se pouze rozpadem elementárních částic“ [4]). Obrázek 13. ukazuje β^- rozpad, při kterém se neutron mění na proton. V neutronu se změní d-kvark na u-kvark, přičemž vzniká proton a boson. Tento W-boson způsobuje přeměnu d-kvarku na u-kvark a bere s sebou negativní náboj. Ten se rozkládá po 10^{-25} s na elektron a jeho antineutrino. [1]

Existují tři různé částice zajišťující slabou interakci, boson W^- a W^+ , přičemž oba nesou elektrický náboj a neutrální částice boson Z. Na rozdíl od fotonů a gluonů má každý z nich klidovou hmotnost $m_0 = 80,4$ GeV pro bosony W^- a W^+ a $m_0 = 91,2$ GeV pro boson Z. Tomu odpovídá i jejich malý dosah v řádu asi 10^{-17} m. [1]

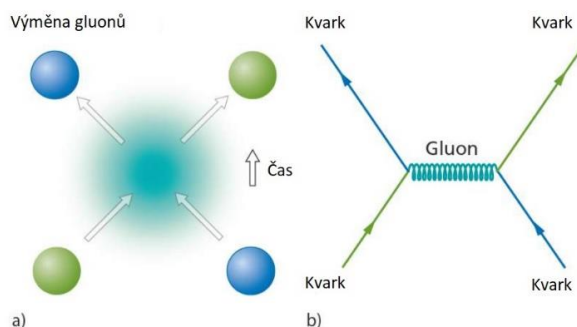


Obr. 13: Znárodnění bosonu W při přeměně neutronu na proton. [1]

To znamená, že částice zajišťující interakce se objevují také jako reálné částice; jejich vznik a zánik pozorujeme v urychlovači částic. Příkladem toho je přeměna elektron-pozitronového páru na pár bosonů W^- a W^+ s následným rozpadem na dva kvark-antikvark páry. [1]

1.3.5 Feynmanovy diagramy

Pro ilustrativní znázornění těchto interakcí zavedl Richard Feynman časoprostorové diagramy, ve kterých probíhá přeměna částic podél vzestupné osy (časová osa směřuje zespoda nahoru). Neustálou výměnou gluonů, mění kvarky svůj barevný náboj (viz. Kapitola 1.4.), a to je drží pohromadě. [1]



Obr. 14: Znárodnění přeměny kvarků (a) a přidružený Feynmanův diagram (b). [2]

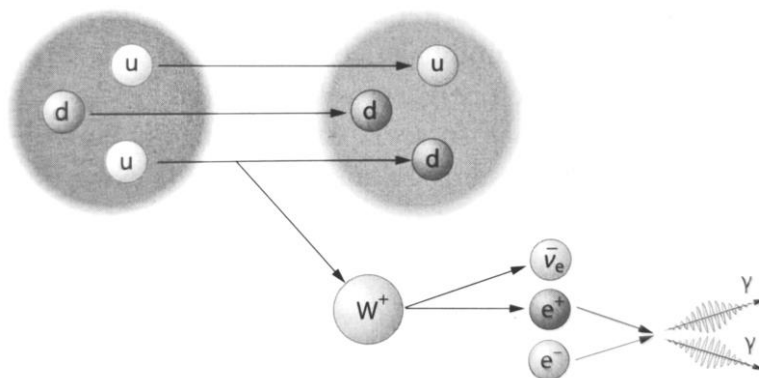
1.3.6 Úkoly

Úkoly:

1. Načrtněte obrázek analogický k obrázku 13 znázorňující beta plus (β^+) rozpad. Mějte na paměti, že výsledný pozitron se následně zničí s elektronem.
2. První reakcí, při které se podařilo detekovat neutrino je: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$.
V okamžiku anihilace pozitronu a elektronu dojde k vyzáření dvou kvant (fotonů) gama záření. Neutron je poněkud později zachycen jádrem a je detekováno třetí kvantum gama záření. Nakreslete Feynmanův diagram této reakce. [1]

Řešení:

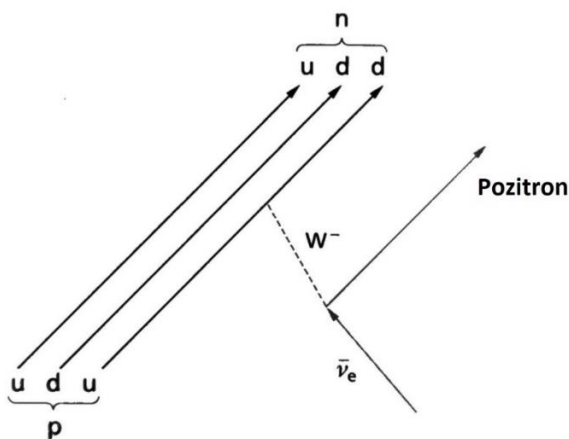
1. Úkol:



Obr. 15: Znázornění β^+ rozpadu. [4]

Zde je u-kvark přeměněn na d-kvark vyzářením bosonu W^+ , který se pak rozpadá na pozitron a neutrino. Pozitron pak obvykle anihiluje s elektronem zvenčí a jsou vyzářena dvě kvanta gama záření. [7]

2. Feynmanův diagram reakce má následující tvar:



Obr. 16: Feynmanův diagram reakce - $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$. [4]

V souladu s nastolenou konvencí je vertikální osa časová a horizontální osa prostorová. [7]

Pozn.

Správná reprezentace Feynmanova diagramu párové anihilace pozitronu a elektronu ve dvou kvantech gama záření vyžaduje tzv. krabicový diagram s virtuálním leptonem. [7]

1.4 Standardní model



Obr. 17: Pokud je k dispozici dostatek stavebních bloků, lze sestavit celou krajinu, města s budovami, vozidly a živými bytostmi. To je také možné, pokud používáte pouze několik různých druhů kamenů. Mohou převzít různé funkce v neustále se měnících kombinacích – a nakonec jsou znovu rozebrány a jsou k dispozici pro nový projekt. [1]

Vysvětlení všech základních stavebních „kamenů“ hmoty pomocí jediné soudržné teorie je dlouhodobým cílem fyziků. Tohoto cíle je do jisté míry dosaženo Standardním modelem elementárních částic. Ten se pokouší vysvětlit všechny v přírodě se nacházející částice – i ty generované v urychlovači částí – jako elementární částice či jejich kombinace. Součástí modelu jsou také interakce mezi částicemi a jejich přeměny. [1]

Jak v teoretickém vývoji, tak při experimentálním ověřování se postupně ukázalo, že musí existovat 12 elementárních částic a jejich příslušné antičástice. Tyto částice jsou historicky rozděleny do tří generací; každá generace ze 2 kvarků a 2 leptonů (dohromady tedy 6 druhů kvarků a 6 druhů leptonů). Podle Standardního modelu se náš hmotný svět skládá z kvarků a leptonů. [1]

Gravitační interakce zaujímá zvláštní místo. Hmotnost a setrvačnost se vysvětluje Higgsovou částicí. [1]

1.4.1 Počátky a vývoj Standardního modelu

Od roku 1930 bylo v kosmickém záření objeveno stále více nových částic. Při hledání dalších částic, vznikajících srážkami s jinými vysoce energetickými částicemi, byly budovány stále větší urychlovače částic a díky tomu také pozorovány nové „elementární částice“. Kolem roku 1960 bylo známo asi 200 takových částic, fyzikové tedy začali hovořit o „částicové zoo“ a vznikly pochybnosti o jejich „elementárnosti“. [1]

Bylo tedy zřejmě potřeba množství elementárních částic interpretovat skrze jejich přeměny pomocí kombinace pouze několika základních stavebních „kamenů“. Řád tomu dal Standardní model dnešní částicové fyziky, který byl v podstatě popsán již roku 1964 kvarkovou teorií Murray Gell-Manna a také prací Kazuhiko Nishijima. [1]

1.4.2 Druhá generace kvarků

Po úspěšném zavedení teorie kvarků pro baryony a mezony, však musel být tento model rozšířen. V kosmickém záření a při experimentech s kolizemi částic v urychlovačích byly objeveny Sigma částice (Σ), jejichž hmotnost a náboj nemohly být vysvětleny pomocí u- a d-kvarků. Gell-Mann navrhl zavedení podivného – kvarku (s) (angl. strange). Objev Ω^- – částice (sss) v roce 1964 potvrdil tuto předpověď kvarkové teorie. O deset let později byl potvrzen také dříve předpokládaný půvabný – kvark (c) (angl. charm). [1]

1.4.3 Třetí generace kvarků

V roce 1977 byla objevena nová částice, která musela obsahovat další, dosud neznámý spodní – kvark (b) (angl. bottom; popř. označován také jako krásný (angl. beauty)). Vzhledem k úvahám o symetrii stále chyběl svrchní – kvark (t) (angl. top; popř. pravdivý (angl. truth)), který byl nakonec potvrzen v roce 1995. To znamená, že všechny známé baryony a mezony, lze vysvětlit dvojkombinací a trojkombinací těchto kvarků. Ovšem částice Ω^- , Δ^- a Δ^{++} , složené ze tří identických kvarků se zdají být v rozporu s Pauliho principem: fermiony, tj. částice s poločíselným spinem, se nemohou všechny nacházet ve stejném kvantovém stavu.

[1]

[illegible]

Obr. 18: Částice hmoty a výměnné částice podle Standardního modelu fyziky elementárních částic.

1.4.4 Barva náboje

K vyřešení tohoto problému, byla navržena další kvantová vlastnost – barva náboje. Tři kvarky stejného typu se liší označením červený, modrý, zelený a mohou se tedy v nukleonu nacházet společně. Samotný nukleon nemá žádnou barvu náboje, protože smísením červené, modré a zelené „barvy“ získáme neutrální „bílou“. Aby bylo možné vysvětlit barevnou neutralitu mezonů, byly kromě těchto tří barev představeny také jejich protějšky „antičervená“, „antimodrá“ a „antizelená“. Barevný náboj se s jeho protějškem neutralizuje. [1]

V souvislosti s interakcemi v kvarkové teorii se gluonům také připisuje vlastnost „barevný náboj“, který se skládá z jedné barvy a antibarvy. Je-li gluon vyměněn v částici mezi dvěma kvarky, změní se barevný náboj kvarků. Gluon nese antibarevný náboj, který kompenzuje původní barevný náboj a barevný náboj nového kvarku. Pro zajištění všech barevných přechodů vyžaduje Standardní model osm různých gluonů. [1]

Baryony (3 kvarky)					
	Symbol	Složení	Náboj e	Hmotnost MeV/c^2	Střední doba života s
Proton	p	uud	1	938,3	stabilní (?)
Neutron	n	udd	0	939,6	886
Λ -Baryon	Λ	uds	0	1115,7	$2,6 \cdot 10^{-10}$
Σ -Baryon	Σ^+	uus	1	1189,4	$8,0 \cdot 10^{-11}$
Σ -Baryon	Σ^0	uds	0	1192,6	$7,4 \cdot 10^{-20}$
Σ -Baryon	Σ^-	dds	-1	1197,4	$1,5 \cdot 10^{-10}$
Ξ -Baryon	Ξ^0	uss	0	1314,9	$2,9 \cdot 10^{-10}$
Ξ -Baryon	Ξ^+	dss	-1	1321,7	$1,6 \cdot 10^{-10}$
Ω -Baryon	Ω^-	ssb	-1	6165	$1,1 \cdot 10^{-12}$
Δ -Baryon	Δ^{++}	uuu	2	1232	$5,6 \cdot 10^{-24}$
Δ -Baryon	Δ^-	ddd	-1	1232	$5,6 \cdot 10^{-24}$

Obr. 19: Baryony mají poločíselný spin ($\pm 1/2$ nebo $\pm 3/2$). Je možných 5^3 kombinací – ne 6^3 protože svrchní – kvark (t) se velmi rychle rozpadá. Do roku 2014 bylo pozorováno 36 kombinací. [2]

1.4.5 Leptony

Kromě šesti kvarků a jejich antičástic, které tvoří hadrony (baryony a mezony), existují také lehké leptony (řeck. *leptos*: světlo). Leptony, stejně jako kvarky, jsou částice bez vnitřní struktury; jsou menší než 10^{-18} m. [1]

Vedle elektronu, jeho antičástice, pozitronu a příslušných neutrin (1. generace) byl nalezen v kosmickém záření mion (2. generace) a v roce 1975 při kolizi mezi elektrony a pozitrony tauon (3. generace). Ačkoli se již nejedná o „lehké částice“, jsou kvůli jejich vlastnostem řazeny k leptonům. [1]

Příslušná neutrina (mionové a tauonové) mají velmi malou hmotnost a zřídka kdy interagují s hmotou. Je proto nesmírně obtížné je dokázat. [1]

Mezony (1 kvark, 1 antikvark)					
	Symbol	Složení	Náboj e	Hmotnost MeV/c^2	Střední doba života s
Pion	π^+	$u\bar{d}$	1	140,6	$2,6 \cdot 10^{-8}$
η -Mezon	$\eta_c(1S)$	$c\bar{c}$	0	2980,3	$3,4 \cdot 10^{-21}$
η -Mezon	$\eta_b(1S)$	$b\bar{b}$	0	9390,9	$2,3 \cdot 10^{-23}$

Obr. 20: Mezony mají celočíselný spin (0 nebo ± 1). Je možných 25 kombinací a také některé stavy superpozice. [2]

1.4.6 Úkoly

Úkoly:

1. Úkol:

- Vysvětlete, jak se elektricky neutrální Δ^0 - baryon (udd) liší od neutronu, který je také bez náboje.
 - Δ^0 - baryon se rozpadá na kladně nabitý proton a záporně nabitý pion. Ukažte tento rozklad v kvarkovém modelu.
2. Nakreslete rozpad kladně nabitého pionu na pozitivní mion a jeho neutrino při slabé interakci ve Feynmanově diagramu. [1]

Řešení:

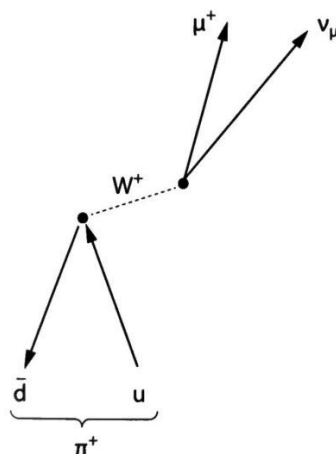
1. Úkol:

- Ačkoli Δ^0 - baryon a neutron mají stejnou strukturu (udd), mají různé hmotnosti: baryon s hmotností $1232 \text{ MeV}/c^2$ je o třetinu těžší než neutron s $940 \text{ MeV}/c^2$. Δ^0 - baryony se téměř okamžitě rozpadají na neutron a pion nebo na proton a negativní pion.

Volný elektron se naproti tomu rozpadá s poločasem rozpadu asi 10 min v β^- rozpadu na proton a elektron a také na neutrino.

- Stejně jako při přeměně neutronů se musí d-kvark změnit na u-kvark. Přeměněná energie je zde však větší a postačuje k vytvoření negativního pionu ($\bar{u}d$), který se pak rozpadá prostřednictvím bosonu W na mion a s ním spojené mionové antineutrino. Viz také obrázek k 2. úkolu; tam jsou však znaménka nábojů opačně. [7]

2. Úkol:



Obr. 21: Feynmanův diagram rozpadu pozitivního pionu na pozitivní mion a jeho neutrino. [4]

1.5 Higgsův boson

V roce 2000 bylo ve výzkumném centru Fermilab v USA objeveno tauonové neutrino jako poslední chybějící částice hmoty Standardního modelu. Standardní model však předpokládal existenci další částice, kterou teoreticky popsal Peter Higgs již v roce 1964. Tato Higgsova částice, také nazývána Higgsův boson, není ani částice hmoty, ani výměnná částice. S Higgsovou myšlenkou, se kterou téměř současně přišli i jiní výzkumníci, lze vysvětlit, jak elementární částice získávají svou hmotnost. Experimentální hledání Higgsova bosonu bylo prováděno s nebývalým úsilím, a i přesto byl prokázán až v roce 2012 – hned poté, v roce 2013, obdrželi Peter Higgs a Francois Englert Nobelovu cenu. [1]

1.5.1 Hmotnost bosonů W a Z

Problém, který Higgs a další vědci touto teorií vyřešili, se týká hmotnosti výměnných částic slabé interakce. Vzhledem k tomu, že dosah slabé interakce je velmi malý, v rozmezí 10^{-17} m, měly by mít výměnné částice W a Z relativně velké klidové hmotnosti:

Tyto výměnné částice jsou virtuální částice, které vznikají z vakua bez vnějšího dodání energie (fluktuace). Požadovaná energie, minimálně $m_0 \cdot c^2$, tedy musí být na krátkou dobu „vypůjčena“ z vakua. V souladu s relací neurčitosti pro energii a čas $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/(4\pi)$ může být zachování energie (mohou vznikat částice o určité energii) na velmi krátkou dobu narušeno a vidíme, že čím kratší dobu takhle částice existuje, tím větší je její klidová hmotnost. Nicméně také vidíme, že čím kratší tato doba je, tím kratší je vzdálenost, kterou částice urazí. Tato vzdálenost odpovídá dosahu interakce. [1]

Experimentálně byla stanovena klidová hmotnost blízká 100 GeV, což téměř 100krát přesahuje klidovou hmotnost protonu. Fyzici zpočátku jednoduše dosadili tyto hmotnosti do rovnic, s nimiž počítali pravděpodobnosti reakcí částic způsobených slabou interakcí. [1]

Při těchto výpočtech však opakovaně dospěli k „nekonečné“ hodnotě, což nelze fyzikálně interpretovat. Higgsem postulovaný mechanismus pravděpodobně poskytuje jediné možné řešení tohoto problému. Proto bylo pozorování Higgsovy částice spojeného s touto teorií pro fyziku částic tak důležité. Na veřejnosti se tak občas pro Higgsovu částici objevovalo označení „božská částice“, ovšem tohle pojmenování většina fyziků odmítá z důvodu, že je zavádějící. [1]

1.5.2 Higgsovo pole a hmotnost

Podle teorie existuje v celém vesmíru Higgsovo pole. Bez tohoto pole by měly všechny částice klidovou hmotnost rovnu nule. Nicméně síla, s jakou částice interagují s Higgsovým polem je různá. Fotony, které neinteragují s Higgsovým polem, prochází beze změny (mají nulovou klidovou hmotnost) a vždy se pohybují rychlostí světla. Částice, které silně interagují s Higgsovým polem, se stávají velmi těžkými nebo pomalými. Příkladem toho je t-kvark s $m_0 \cdot c^2 = 171$ GeV. Pokud částice interagují s Higgsovým polem jen slabě, získají pouze malou klidovou hmotnost, např. elektron s $m_0 \cdot c^2 = 0,0005$ GeV. [1]

Hmotnost nebo setrvačnost tedy nejsou vlastnostmi, které částice mají sami o sobě, ale jsou vyvolány interakcí mezi částicemi a Higgsovým polem. Proč však některé částice interagují s Higgsovým polem silně, jiné slabě a fotony třeba vůbec, na to teorie zatím neodpovídá. [1]

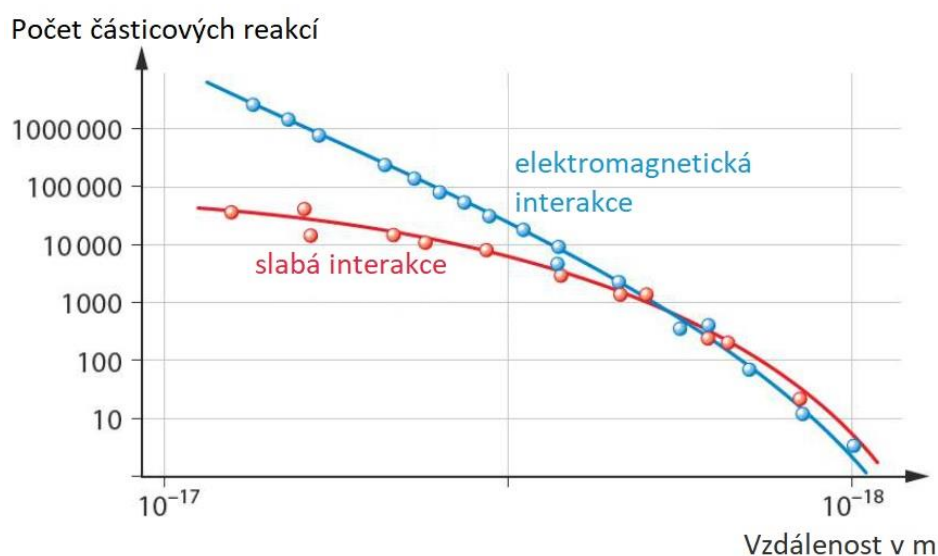
Analogie s koktejlovou party: Následující popis může ilustrovat, jak funguje Higgsovo pole. Na večítku se objeví známá osoba, např. herečka. Ta se po místnosti může pohybovat jen velmi pomalu, protože jí všichni neustále obklopují. Takže „interakcí“ s ostatními hosty získává „setrvačnost“, která brání rychlé změně směru nebo rychlosti jejího pohybu. V této analogii herečka znamená částici, která díky interakci s hosty, kteří představují Higgsovo pole, získává velkou klidovou hmotnost. Naopak neznámého návštěvníka ostatní hosté ignorují, neinteraguje tedy s Higgsovým polem a má nulovou klidovou hmotnost. [1]

Elektroslabé sjednocení: Higgsovo pole má velmi neobvyklou vlastnost: není přítomno při vysokých energiích ($> 100 \text{ GeV}$). V důsledku toho mají všechny částice nulovou klidovou hmotnost. [1]

Dalším důležitým důsledkem je, že vymizí rozdíl mezi elektromagnetickou a slabou interakcí. To je v podstatě založeno na skutečnosti, že foton, výměnná částice elektromagnetické interakce, nemá žádnou klidovou hmotnost, zatímco všechny tři výměnné částice slabé interakce získávají v důsledku interakce s Higgsovým polem velkou klidovou hmotnost. Rozdíl ve hmotnosti má za následek např. různé velikosti dosahu interakcí. Dosah elektromagnetické interakce je nekonečný, naopak dosah slabé interakce je jen jedna setina průměru protonu. [1]

Při energiích vyšších než cca 100 GeV již tedy neexistuje rozdíl mezi těmito interakcemi a mluvíme o elektroslabé interakci. Obrázek 22 ukazuje toto sjednocení na základě naměřených dat získaných v DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron: Německé výzkumné centrum částicové fyziky): při malé vzdálenosti je četnost reakcí částic, ke kterým dochází prostřednictvím slabé interakce stejně velká jako četnost reakcí částic, k nimž dochází v důsledku elektromagnetické interakce. [1]

Na závěr lze o vzdálenosti vzhledem k energii zúčastněných částic, pomocí Heisenbergova principu neurčitosti, říct následující: malé vzdálenosti mezi částicemi odpovídají velkým impulsům a tím i vysokým energiím. [1]

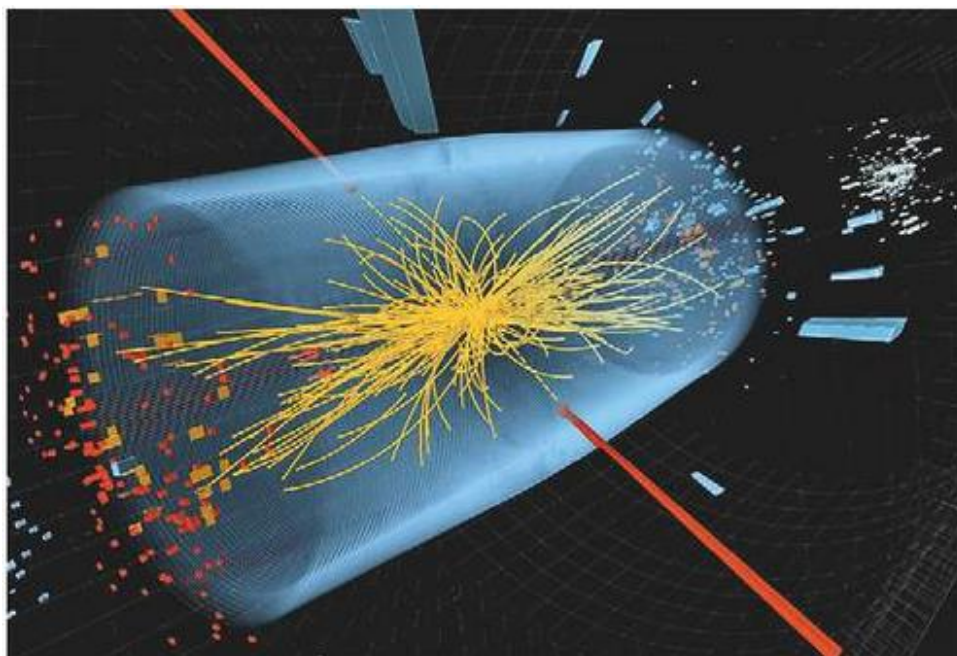


Obr. 22: Elektroslabé sjednocení: při malých vzdálenostech, tj. při vysokých energiích, vymizí rozdíl mezi elektromagnetickou a slabou interakcí. [2]

1.5.3 Hledání Higgsova bosonu

Peter Higgs ukázal, že existence Higgsova pole je spojena s novou částicí. Přesná hmotnost Higgsova bosonu však nemohla být teoreticky předpovězena. [1]

Poté, co celých 45 let neúspěšně hledaly Higgsův boson v rozsáhlých experimentech na urychlovačích v Evropě a USA, přišel v roce 2012 průlom ve velkém hadronovém urychlovači LHC v Evropském výzkumném středisku pro elementární částice CERN: velmi zřídka dochází při vysokoenergetických srážkách protonů také ke vzniku Higgsova bosonu, který se téměř okamžitě, asi po 10^{-22} s, rozpadá na jiné částice (např. na dva fotony, viz. obr. 23). Tyto částice byly pak detekovány v obřích detektorech ATLAS a CMS. Když se srazí dva protony, vznikne Higgsův boson a výsledné fotony je možné detekovat. Stopy zakřivené magnetickým polem patří nabitým částicím, které také vznikají při srážce. Na základě získaných údajů z měření mohla být stanovena hmotnost Higgsovy částice. Výsledkem byla hodnota přibližně 126 GeV. [1]



Obr. 23: Když se střetnou dva protony, vytvoří se Higgsova částice, která se rozpadne na dva vysokoenergetické fotony (červené čáry). [1]

Higgsovo pole a kosmologie: Podle Standardního kosmologického modelu byla ve velmi raném vesmíru, zlomky vteřiny po Velkém třesku, teplota a hustota energie nepředstavitelně vysoká. Higgsovo pole tedy neexistovalo, a proto byla pouze sjednocená elektroslabá interakce. Vzhledem k rychlé expanzi vesmíru došlo k ochlazení a asi 10^{-12} s po Velkém třesku se objevilo Higgsovo pole. V tom okamžiku došlo k oddělení elektromagnetické a slabé interakce, jak to pozorujeme dnes. [1]

1.5.4 Úkoly

Úkoly:

1. Úkol:
 - a. Uveďte hmotnost Higgsova bosonu v kilogramech a vypočítejte hmotnostní poměr Higgsova bosonu a atomu uhlíku ^{12}C .
 - b. Diskutujte: Kde získává Higgsův boson svoji hmotnost?
2. Ve Standardním modelu získávají kvarky svou klidovou hmotnost interakcí s Higgsovým polem. Méně než 5 % klidové hmotnosti protonu lze vysvětlit hmotností jeho tří kvarků. Vysvětlete.
3. Úkol:
 - a. Komáři mají hmotnost 2 – 2,5 mg a pohybují se rychlostí 1,5 – 2,5 km/h. Porovnejte průměrnou hodnotu kinetické energie letícího komára s energií částic při srážkách v LHC (14 TeV).
 - b. Diskutujte o tom, proč je LHC také označován jako „stroj na Velký třesk“.
4. Vztah mezi dosahem R interakce a hmotností m jeho výměnných částic je dán rovnicí:

$$R \approx c \cdot \Delta t \approx c \cdot \frac{h}{4\pi \cdot \Delta E} \approx c \cdot \frac{h}{4\pi \cdot \Delta m \cdot c^2} \approx \frac{h}{4\pi \cdot \Delta m \cdot c}$$

Použijte ji k odhadu hmotnosti bosonů a porovnejte výsledky s experimentálně stanovenými hodnotami. [1]

Řešení:

1. Úkol:
 - a. $E = mc^2$

$$m_{\text{Higgs}} = 126 \frac{\text{GeV}}{c^2} = \frac{126 \cdot 10^9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{\left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2} = \underline{2,24 \cdot 10^{-25} \text{ kg}}$$

Hmotnostní poměr:

$$\frac{m_{\text{Higgs}}}{m_{\text{C}}} = \frac{2,24 \cdot 10^{-25} \text{ kg}}{12 \text{ u}} = \frac{2,24 \cdot 10^{-25} \text{ kg}}{12 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} \approx \underline{11,25}$$

Hmotnost Higgsovy částice je více než 11krát větší než hmotnost atomu uhlíku, i když podle Standardního modelu je Higgsova částice elementární částicí.

- b. Kvarky, leptony a bosony W získávají své hmotnosti prostřednictvím Higgsova mechanismu. Pokud jde o vysvětlení hmotnosti Higgsovy částice, lze nalézt tři základní přístupy:
 - i. Hmotnost Higgsovy částice je danou vlastností vesmíru, kterou nelze vysvětlit.
 - ii. Higgsova částice získává svou hmotnost teoretickým přístupem, který se liší od Higgsova mechanismu.
 - iii. Higgsova částice získává svou hmotnost interakcí s Higgsovým polem. I když to poněkud připomíná barona Prášila, který se vytahuje z bažiny za vlastní vlasy, tato „sebeinterakce“ je v rámci Standardního modelu možná.

Otázka hmotnosti Higgsovy částice je stále nezodpovězena. [7]

2. Tři kvarky nukleonů (protony a neutrony) jsou drženy pohromadě silnou interakcí. Velmi velká vazebná energie mezi kvarky se chová jako hmotnost podle ekvivalence hmotnosti a energie $E = mc^2$. Vzhledem k tomu, že kvarky jsou také „uzamčeny“ v protonu ve velmi malém prostoru, mají podle Heisenbergova principu neurčitosti jejich hybnosti velmi velkou nejistotu. Proto se v nukleonu pohybují velmi vysokou rychlostí. Podle $E = mc^2$ se na hmotnosti nukleonu podílí i odpovídající kinetická energie. Higgsův mechanismus tedy může vysvětlit pouze malou část hmotnosti nukleonu (konkrétně klidovou hmotnost kvarků), většinu toho, co nazýváme hmotností hmoty, která nás obklopuje, nelze vysvětlit bez ekvivalence hmotnosti a energie. [7]

3. Úkol:

a. $E_{\text{kin}}^{\text{Komár}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \approx \frac{1}{2} \cdot 2,25 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \left(\frac{2}{3,6} \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \approx 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ J} \approx 2,2 \cdot 10^{12} \text{ eV} \approx \underline{2 \text{ TeV}}$

Kinetická energie letícího komára je v rozsahu TeV, což je také srážková energie protonů v urychlovači LHC.

- b. Srážková energie 14 TeV je relativně malá ve srovnání s každodenními (makroskopickými) energiemi. Ke zvednutí kuličkového pera o hmotnosti 15 g o pouhých 10 cm je zapotřebí energie asi 100 000 TeV, tj. mnohem více než energie srážek v LHC. Rozhodující však je, že srážková energie je soustředěna do extrémně malých objemů. Hustota energie, tj. energie na objem, je při srážce protonů tak vysoká, že je srovnatelná s hustotou energie ve vesmíru zlomky sekundy po Velkém třesku. [7]

4. Úkol:

$$R = \frac{h}{4\pi \cdot \Delta m \cdot c}$$

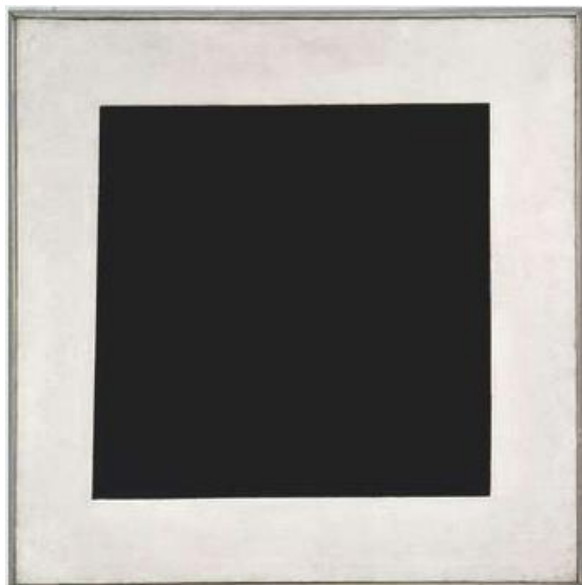
$$\Delta m = \frac{h}{4\pi \cdot R \cdot c} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{4\pi \cdot 10^{-18} \text{ m} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \approx 1,75 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$$

$$E = m \cdot c^2 = 1,75 \cdot 10^{-25} \text{ kg} \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \approx 1,58 \cdot 10^{-8} \text{ J} \approx \underline{99 \text{ GeV}}$$

Odhadovaná hmotnost je v řádku hmotností experimentálně stanovených pro bosony W a Z (hmotnost bosonu Z⁰: cca 91 GeV; hmotnost bosonu W: cca 80 GeV). [7]

1.6 Symetrie

Symetrie (řeck. *symmetria*: rovnoměrnost) je slovo, které si mnoho lidí spojuje s uměním, architekturou nebo případně s hudbou. Tento termín zaujímá ústřední postavení v dnešní fyzice. [1]



Obr. 24: Černý čtverec Kazimira Maleviče (kolem roku 1915, Tretjakova galerie, Moskva). [1]

V matematice a fyzice je pojem symetrie přesně definován. Pokud otočíme čtverec na obr. 24 o 90° kolem osy, která prochází jeho středem, tak vše vypadá jako před otočením: čtverec má rotační symetrii vzhledem k otočení o 90° . Naproti tomu kruh má rotační symetrii pro libovolný úhel otočení. [1]

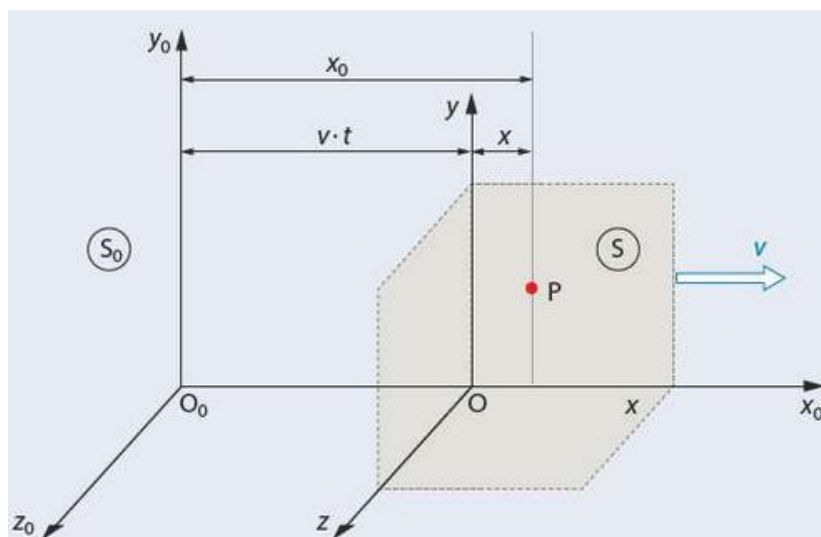
Stejně tak lze zrcadlit čtverec na diagonále, dokonce i tehdy se nic nemění: je zrcadlově symetrický vzhledem k úhlopříčce. Obecně: jestliže při transformaci objektu, např. rotaci, nedojde ke změně, pak u něj existuje symetrie. Mluvíme také o invarianci vůči této transformaci. [1]

Úvahy o symetrii jsou jednou ze Standardních metod moderní fyziky. Avšak zvažované transformace jsou obvykle velmi abstraktní, a ne tak snadno představitelné jako rotace nebo zrcadlení čtverce. [1]

1.6.1 Galileova a Lorentzova invariance

V inerciální vztažné soustavě S_0 je umístění bodu P dáno jeho souřadnicemi $P(x_0; y_0; z_0)$. Jiná inerciální soustava S se pohybuje rychlostí v vzhledem k S_0 (obr. 25). Pak pozorovatel, který se nachází v S , udává podle klasické mechaniky, pro bod P $(x; y; z)$ následující souřadnice:

$$x = x_0 - v \cdot t; \quad y = y_0; \quad z = z_0 \quad (5)$$



Obr. 25: Inerciální systém S se pohybuje vůči S_0 rychlostí v podél osy x . [1]

V klasické mechanice je samozřejmé, že čas je absolutní, tj. stejný v obou referenčních systémech:

$$t = t_0 \quad (6)$$

Rovnice (5) a (6) se nazývají Galileiho transformace.

Pokud je nyní bod P zrychlen podél osy x , pozoruje se v systému S_0 zrychlení a_0 . Je to druhá derivace dráhy podle času:

$$a_0 = \frac{d^2 x_0}{dt_0^2} \quad (7)$$

Zrychlení a , které pozorovatel měří v S , vyplývá z Galileiho transformace:

$$a = \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{d^2 (x_0 - v \cdot t_0)}{dt_0^2} = \frac{d^2 x_0}{dt_0^2} - \frac{d^2 (v \cdot t_0)}{dt_0^2} = a_0 - 0 = a_0 \quad (8)$$

Zrychlení je tedy pro oba pozorovatele stejné. Hmotnost v klasické fyzice, stejně jako čas, není relativní, tzn., že nezávisí na pozici pozorovatele (na vztažné soustavě): $m_0 = m$ a proto $m_0 \cdot a_0 = m \cdot a$. Existuje tedy symetrie – invariance Newtonova zákona vzhledem ke Galileiho transformaci. [1]

Ve speciální teorii relativity je změna referenčního systému popsána prostřednictvím Lorentzovy transformace, ve které je na rozdíl od klasické mechaniky, rychlost světla invariantní, tzn., že je stejná ve všech inerciálních systémech. V moderní fyzice proto požadujeme, aby se přírodní zákony nebo odpovídající rovnice s Lorentzovou transformací neměnily, to znamená, že jsou vůči Lorentzově transformaci invariantní. Zákony klasické mechaniky, např. Newtonovy zákony jsou invariantní vůči Galileiho transformaci, nikoliv však vůči Lorentzově transformaci. Maxwellova teorie elektromagnetického pole je invariantní vůči Lorentzově transformaci. Einsteinovou myšlenkou bylo změnit také mechaniku takovým způsobem, aby Galileiho invariance byla nahrazena za Lorentzovou invariancí. [1]

1.6.2 Symetrie a zákony zachování

V roce 1918 objevila matematicka Emmy Noetherová souvislost mezi symetrií a zákony zachování. Podle Noetherové teóremu každé symetrii fyzikálního systému odpovídá nějaký zákon zachování. Například zákon zachování energie je důsledkem invariance (symetrie) přírodních zákonů vůči časovému posunutí, tzn., že přírodní zákony se v čase nemění. [1]

V myšlenkovém experimentu můžeme předpokládat, že tomu tak není, např. velikost gravitační konstanty by se v průběhu dne změnila: dopoledne by měla gravitační konstanta poloviční hodnotu oproti odpolední. Pak bychom mohli ráno zvednout závaží pomocí motoru, který je poháněn akumulátorem. Ve večerních hodinách můžeme spustit závaží dolů, tak aby se s využitím dynamu akumulátor nabil. Vzhledem k tomu, že by gravitační konstanta, a tedy i gravitační zrychlení, byla ve večerních hodinách dvakrát větší než ráno, získal by akumulátor z dynamu více energie při spuštění závaží, než by využil motor při jeho zvedání.

Tím bychom získali stroj s neustálým pohybem (perpetuum mobile) a došlo by k porušení zákona zachování energie. Pokud by se tedy přírodní zákony v čase měnily, pak by zákon zachování energie nebyl platný.

Kromě toho je také zákon zachování hybnosti důsledkem invariance vůči posunutí a zákon zachování momentu hybnosti důsledkem invariance vůči otočení. [1]

1.6.3 Supersymetrie (SUSY)

Fyzika elementárních částic zná mnoho symetrií, které jsou však v přírodě většinou realizovány pouze přibližně. Velice důležitá je supersymetrie (SUSY). V supersymetrických modelech je každé známé elementární částici přiřazen „superpartner“.

Ke každému známému fermionu, tedy částici s polocíslným spinem (např. elektron nebo kvark), existuje boson (bosonický superpartner), tedy částice s celocíslným spinem. V případě elektronu – selektron a v případě kvarku – skvark. [1] „*Superpartnery k fermionům značíme předponou s-*“. [5]

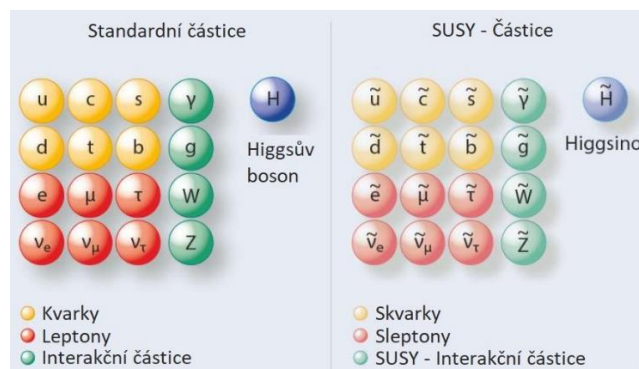
Stejně tak existuje fermion (fermionický superpartner) ke každému známému bosonu (např. foton nebo gluon). V případě fotonu – fotino a gluonu – gluino. Podle toho tedy existuje také fermionický superpartner pro Higgsův boson – higgsino. [1] „*Superpartnery k bosonům označujeme příponou -ino*“. [5]

Počet elementárních částic je tedy v SUSY modelech zdvojnásoben (obr. 26).

Částice SUSY však dosud nebyly pozorovány. Jejich klidové hmotnosti proto musí být relativně velké, pravděpodobně v rozmezí TeV. Pokud by SUSY měla být v přírodě realizována, nemůže to být přesná symetrie. Jinak by např. elektron a selektron museli mít stejné hmotnosti, což vzhledem k povaze částic není možné. Hovoří se tedy o porušení symetrie.

Jelikož stavební částice hmoty – kvarky a elektrony – jsou fermiony, zatímco výměnné částice interakcí – fotony a gluony – jsou bosony, tak SUSY vytváří symetrii mezi hmotou a částicemi interakcí. [1]

Na základě různých pozorování většina kosmologů v současnosti předpokládá, že přibližně 27 % energie ve vesmíru představuje temná hmota, dříve neznámý druh hmoty. Tato temná hmota by mohla být tvořena SUSY částicemi. Mnoho fyziků je přesvědčeno o existenci supersymetrie, proto probíhá v současné době intenzivní hledání SUSY částic, např. v Gran Sasso ve střední Itálii nebo ve výzkumném středisku LHC v CERN. [1]



Obr. 26: Elementární částice dosud známé a jejich hypotetické supersymetrické částice (superpartneři). [2]

1.6.4 Úkoly

Úkoly:

1. Pro situaci na obr. 24 jsou rovnice Lorentzovi transformace:

$$x = k \cdot (x_0 - v \cdot t); y = y_0; z = z_0$$

$$t = k \cdot \left(t - \frac{v}{c^2} \cdot x \right) \text{ kde } k = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2}}$$

Ukažte, že výraz: $(c \cdot t)^2 - x^2$ je lorentzovsky invariantní.

2. Pokud zvětšíte detail obrázku např. pobřežní čáry, bude zvětšená část vypadat jako původní obrázek. Tuto sebepodobnost lze pozorovat i při dalším a dalším přibližování. Vysvětlíte proč i zde je nějaká forma symetrie.
3. Uveďte pět příkladů symetrie v různých oblastech (např. umění, věda, literatura...). [1]

Řešení:

1. Úkol:

$$\begin{aligned} (c \cdot t)^2 - x^2 &= \left(c \cdot k \cdot \left(t_0 - \frac{v}{c^2} \cdot x_0 \right) \right)^2 - \left(k \cdot (x_0 - v t_0) \right)^2 \\ &= k^2 \left(c^2 \left(t_0^2 - 2 \frac{v}{c^2} \cdot t_0 \cdot x_0 + \left(\frac{v}{c^2} \right)^2 \cdot x_0^2 \right) - x_0^2 + 2v \cdot x_0 \cdot t_0 - v^2 \cdot t_0^2 \right) \\ &= k^2 \left(c^2 t_0^2 - 2v \cdot t_0 \cdot x_0 + \left(\frac{v}{c} \right)^2 \cdot x_0^2 - x_0^2 + 2v \cdot x_0 \cdot t_0 - v^2 \cdot t_0^2 \right) \\ &= k^2 c^2 t_0^2 \left(1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right) - x_0^2 \left(1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right) = (c \cdot t_0)^2 - x_0^2 \end{aligned}$$

2. Zvětšení části obrázku je transformací. Pokud zvětšená část obrázku vypadá jako původní obrázek, je v této transformaci invariance. Mluví se také o sebepodobnosti nebo invarianci měřítka. Zvětšený obrázek samozřejmě nevypadá úplně jako původní obrázek, takže tato symetrie se v přírodě realizuje jen přibližně (např. květák, krevní cévy, listy kapradin atd.). V matematice jsou definovány fraktály, ve kterých existuje přesná invariance měřítka (např. Kochova křivka). [7]
3. Individuální řešení.

1.7 Sjedení teorií

V přírodě rozlišujeme čtyři interakce: slabá, silná, elektromagnetická a gravitační. Fyzika usiluje o sjedení teorií, tzn. nalézt společnou příčinu všech jevů. [1]

1.7.1 Od starověku po Einsteina

Většina dnešních fyziků vychází z některých základních předpokladů, které lidé, alespoň v principu, znali již před několika tisíci lety. Ti kolem sebe pozorovali různé jevy a již tušili, že se od sebe liší jen zdánlivě. Nakonec vše mohlo být přisouzeno nějaké „prvotní příčině“, „pralátce“ nebo „prvotní síle“. Nad těmito otázkami spekulovali zejména časní řeční filozofové. Anaximandros například viděl původ všeho v něčem, co nazval Apeiron (nekonečný/neomezený). [1]

Až do raného novověku se však předpokládalo, že zákony na Zemi se liší od nebeských zákonů (ve vesmíru). Teprve Isaac Newton přišel v 17. století s první teorií, která tyto zákony sjednocuje: za pád jablka na Zemi je zodpovědná stejná interakce, která zajišťuje, že se Měsíc pohybuje kolem Země. [1]

V 19. století byli fyzikové schopni prokázat, že jevy elektřiny, magnetismu a světla spolu úzce souvisejí. James Clerk Maxwell shrnul tyto děje do systému rovnic (Maxwellovy rovnice), který komplexně popisuje elektromagnetické jevy. Nakonec podle Einsteinovy teorie relativity je magnetismus založen na interakci nosičů náboje, které jsou v různých vztažných soustavách. [1]

1.7.2 Teorie Glashowa – Weinberga – Salama

Ačkoliv na první pohled mají slabá a elektromagnetická interakce málo společného, podařilo se v 60. letech teoreticky sjednotit tyto interakce do jedné elektroslabé interakce. V roce 1979 obdrželi Sheldon Glashow, Steven Weinberg a Abdul Salam Nobelovu cenu za fyziku. [1]

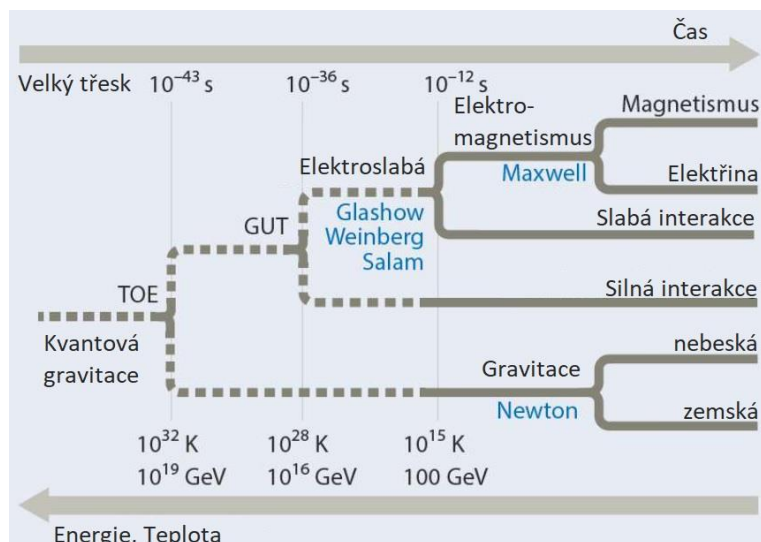
Objev výměnných částic slabé interakce (bosony W^+ , W^- a Z^0) v roce 1983 je považován za experimentální důkaz teorie Glashowa-Weinberga-Salama. Potvrzení této teorie také vyžaduje existenci Higgsova pole, které je všude ve vesmíru a „způsobuje“ hmotnost elementárních částic. Pozorování Higgsova bosonu v roce 2012 lze tedy považovat za další důkaz této teorie. [1]

1.7.3 Teorie velkého sjedení (GUT – Grand Unification Theory)

Poté co se podařilo sjednotit slabou a elektromagnetickou interakci do elektroslabé interakce, obrátila se pozornost teoretických fyziků na možné spojení elektroslabé a silné interakce. Tomuto spojení se říká Velká sjednocená teorie nebo Teorie velkého sjedení (GUT). V roce 1974 Sheldon Glashow a Howard Georgi takovou teorii představili. [1]

Stabilita protonů: Jednou z předpovědí, kterou lze z teorie Georgiho a Glashowa vyvodit, je rozpad protonu, který byl do té doby považován za stabilní částici. Průměrná životnost protonu by však měla být asi 10^{30} let. Pro srovnání – stáří vesmíru se v současné době odhaduje přibližně na $1,4 \cdot 10^{10}$ let. [1]

Na počátku 80. let minulého století bylo zahájeno několik experimentů s cílem zachytit rozpad protonu. Při jednom z experimentů bylo např. po mnoho let pozorováno velké množství látky s 10^{30} protonů nebo více (např. tisíce m^3 vody). Rozpad protonu ovšem nebyl pozorován a to mluví proti teorii Georgiho a Glashowa; dodnes však nebyla formulována GUT, která odpovídá pozorování. [1]



Obr. 27: Sjednocení základních interakcí. [2]

1.7.4 Teorie všeho (ToE – Theory of Everything)

„Teorie všeho“, ToE, přesahuje požadavek na Teorii velkého sjednocení: má za cíl sjednotit všechny známé interakce. Zvláštní obtíž však spočívá v zahrnutí gravitace (gravitační interakce). [1]

Maximální sjednocení všech interakcí se také nazývá teorie kvantové gravitace, protože jde především o spojení zákonů kvantové mechaniky s obecnou teorií relativity a pro kterou v současné době existuje několik přístupů. Nejvíce se proslavil směr, který se rozvíjí od konce 60. let a je souhrnně nazýván teorie strun. V teorii strun elementární částice nepředstavují bodové částice, ale jednorozměrná vlákna (struny) délky asi 10^{-35} m v různém vibračním stavu (ten odpovídá různým částicím). Všechny interakce jsou pak realizovány spojováním a rozpojováním strun. [1]

Kritika sjednocení: Jeden z problémů teorie kvantové gravitace spočívá v tom, že se vztahuje k energiím a rozměrům, kterých v experimentech pravděpodobně nikdy nedosáhneme. V očích kritiků se tedy tyto teorie vyhýbají možnému experimentálnímu vyvrácení. Kromě toho je např. teorie strun velmi abstraktní: pro popis strun nestačí „klasické“ tři prostorové dimenze, ale vyžaduje až 10 prostorových dimenzí. Další rozměry (dimenze) se vysvětlují tak, že struny jsou „srolovány“ (stočeny do klubíčka). Stejně jako zahradní hadice se z dálky jeví jako jednorozměrná a až při blízkém prozkoumání vidíme, že se jedná o trojrozměrný objekt, mohou být další rozměry pozorovány pouze při velmi malých vzdálenostech. [1]

1.7.5 Vazbové konstanty

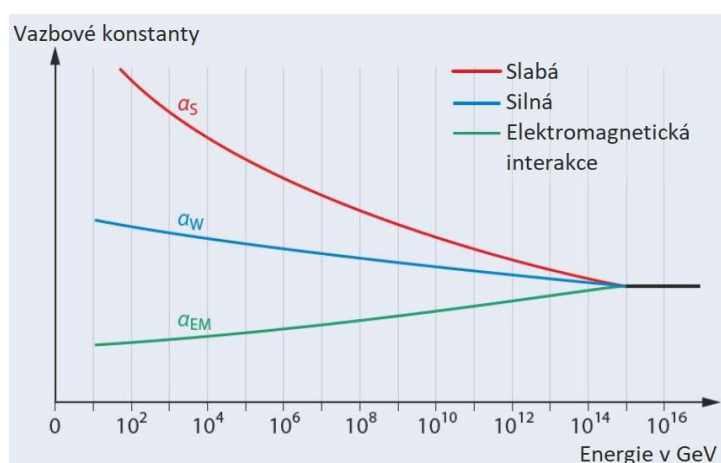
Gravitační síla

$$F_g = \frac{G \cdot m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

závisí na hmotnostech, vzdálenosti a gravitační konstantě G . Ta představuje míru síly gravitační interakce. Síla ostatních interakcí může být podobně vyjádřena vazebnými konstantami α_W , α_S a α_{EM} pro slabou, silnou a elektromagnetickou interakci.

Ukazuje se, že hodnoty vazbových konstant závisí na energii částic v okamžiku interakce. Pokud například změníme energii, s níž se navzájem sráží částice v urychlovači, lze pozorovat, že vazbové konstanty nabývají různé hodnoty pro různé energie srážky. [1]

Z pozorované energetické závislosti lze za vhodných předpokladů vypočítat vazbové konstanty pro energie srážek daleko převyšující možnosti dnešních urychlovačů částic. Při dostatečně vysoké energii srážek to vede k tomu, že vazbové konstanty nabývají stejnou hodnotu (obr. 28). Je proto možné, že při energii řádově 10^{15} GeV jsou slabé, silné a elektromagnetické interakce stejně silné. To lze považovat za náznak toho, že krátce po Velkém třesku, kdy hustota energie vesmíru byla extrémně velká, existovala pouze jedna forma interakce. [1]



Obr. 28: Energetická závislost různých vazbových konstant. [2]

1.7.6 Částicová fyzika a kosmologie

Sjednocení sil se očekává při určitých hodnotách energie respektive teploty: pro GUT je to řádově 10^{24} eV nebo 10^{28} K, v případě ToE je to 10^{28} eV nebo 10^{32} K (obr. 27). Vztah mezi energií a teplotou lze vyjádřit takto:

$$E = k \cdot T$$

kde $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ je Boltzmannova konstanta. [1]

Krátce po Velkém třesku byla hustota energie a teplota vesmíru extrémně vysoká, takže možná existovala pouze jediná interakce až do asi 10^{-43} s po Velkém třesku, kdy se tato interakce rozdělila na gravitační interakci a interakce zahrnuté v GUT. Dále asi 10^{-36} s po Velkém třesku se oddělily elektroslabá a silná interakce a nakonec po 10^{-12} s se elektroslabá interakce rozdělila na elektromagnetickou a slabou interakci. [1]

Podmínek, které převládaly bezprostředně po Velkém třesku nebude v urychlovačích částic nejspíše nikdy dosaženo. Odpovědi na otázky částicové fyziky, jako je sjednocení všech interakcí, je proto třeba hledat ve studiu raného vesmíru. Naopak experimenty s urychlovači částic nám mohou pomoci pochopit vesmír a tím i náš vlastní původ. Objev hypotetických SUSY částic v urychlovačích by mohl objasnit, z čeho se skládá a odkud se bere záhadná temná hmota. Studium toho nejmenšího a největšího – částicová fyzika a kosmologie – jsou v tomhle ohledu neoddělitelně spjatá. [1]

1.7.7 Úkoly

Úkoly:

1. Odvoďte ze základních konstant, h (Planckova konstanta), G (gravitační konstanta) a c (rychlost světla ve vakuu), s využitím odmocňování, násobení a dělení veličinu, která má základní jednotku délky. Ukažte, že to je Planckova délka (asi 10^{-35} m). [1]

Řešení:

1. Úkol:

$$\sqrt{\frac{h \cdot G}{c^3}} \approx \sqrt{\frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 6,67 \cdot 10^{-11}}{(3 \cdot 10^8)^3}} \text{ m} \approx 10^{-35} \text{ m}$$

2 Pátrání po částicích

V této části se podrobněji zaměříme na částice jako boson Z nebo Higgsův boson a na to jakou hrají roli pro porozumění světa kolem nás.

2.1 Boson Z

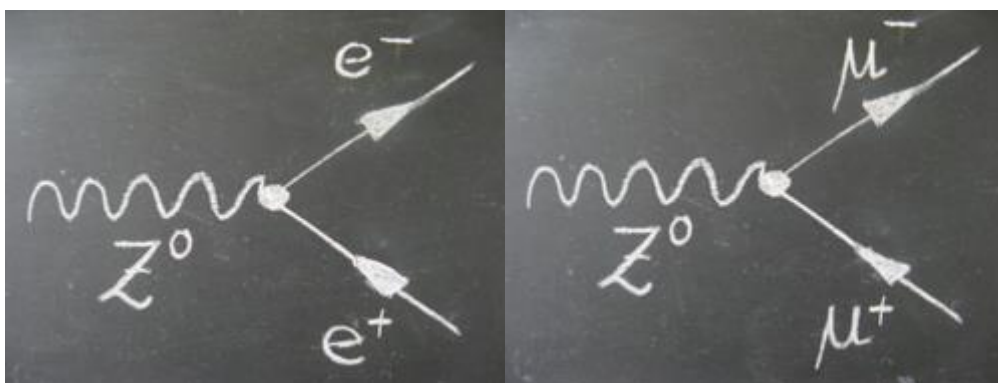
Boson Z s nulovým elektrickým nábojem a bosony W^+ a W^- s kladným a záporným elektrickým nábojem jsou zprostředkujícími částicemi slabé interakce, obdobou je foton zprostředkující elektromagnetickou interakci. Bosony W způsobují přeměnu β , jelikož mohou za přeměnu neutronů na protony a obráceně. [2]

2.1.1 Úloha bosonu Z

Jelikož jsou neutrina elektricky neutrální, tak nemohou vzájemně interagovat s využitím fotonů. Boson Z umožňuje vzájemnou interakci mezi neutrinami a bez něj by nebyla možná.

Oproti fotonu má boson Z velkou hmotnost a velmi krátkou životnost, takže může putovat pouze nepatrnou vzdálenost. To je důvod, proč nemůžeme pozorovat kromě světla tvořeného fotony také „světlo“ složené z bosonů Z. [2]

Další možností vzniku bosonu Z jsou vysokoenergetické srážky, což uvidíme v jedné z úloh, kde si ukážeme rozpad bosonu Z na páry nabitých leptonů (mion-antimion a také elektron-antielektron). Boson Z se dále rozpadá na pár kvark-antikvark nebo také neutrino-antineutrino. [2]

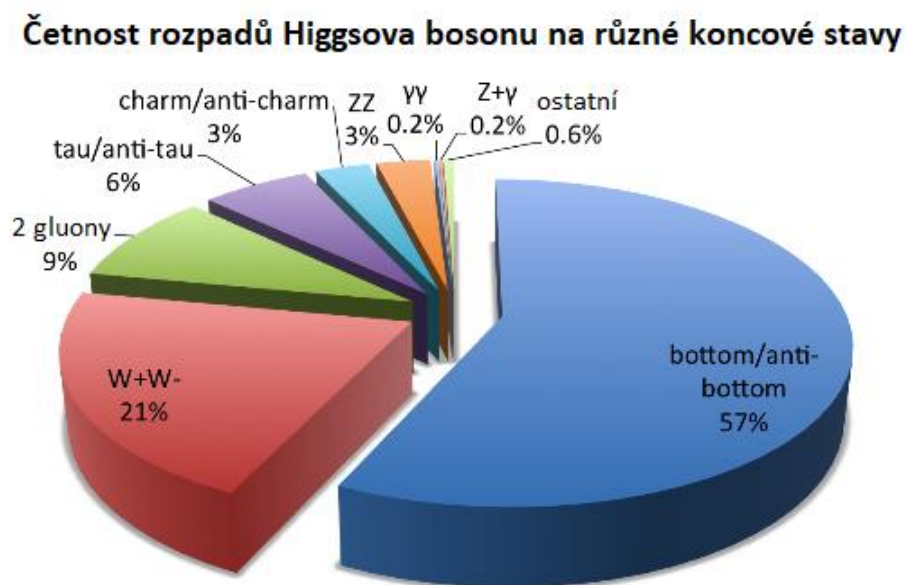


Obr. 29: Feynmanovy diagramy rozpadů bosonu Z. [10]

2.2 Higgsův boson

Poslední částicí ze Standardního modelu částic, která čekala na experimentální potvrzení, byl Higgsův boson. Nový boson s hmotností přibližně 125 GeV a odpovídajícími vlastnostmi potvrdily v červenci 2012 experimenty ATLAS a CMS v CERN. [2]

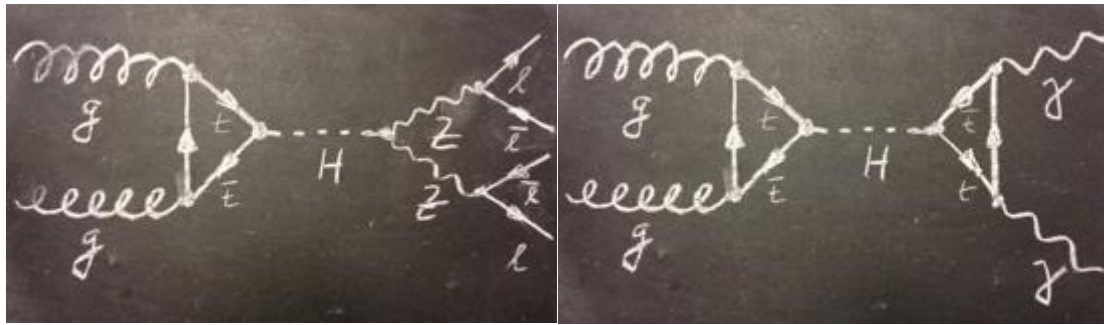
I když z předpovědí Standardního modelu nelze určit hmotnost Higgsova bosonu, umožňuje pro všechny možné hodnoty hmotnosti (které musí být stanoveny experimentálně) přesně určit, jak častý je při srážkách výskyt Higgsova bosonu a s jakou pravděpodobností se rozpadá na další částice (obr. 30). [2]



Obr. 30: Rozpad Higgsova bosonu s hmotností 125 GeV na další částice. [5]

Hmotnost tohoto Higgsova bosonu je velmi velká, dokonce větší než u bosonu Z, to znamená, že má velmi krátkou životnost a před rozpadem zvládne urazit pouze nepatrné vzdálenosti. Z tohoto důvodu nemá detektor jako ATLAS žádnou šanci zachytit Higgsův boson přímo. [2]

Nejlepší možností pro vznik a zkoumání Higgsova bosonu jsou srážky protonů s vysokou energií na LHC. Konkrétně na experimentech ATLAS a CMS také objevily kandidáty na rozpady Higgsova bosonu. První možností je rozpad na dvojici bosonů Z, které se dále rozpadají na nabitě páry lepton-antilepton, druhou možností je rozpad na dvojici fotonů ($\gamma\gamma$) a třetí možností je rozpad na dvojici bosonů W, které se dále rozpadají na 2 nabitě leptony a 2 neutrina. Při dalším zkoumání byl pozorován také rozpad na páry leptonů tau. [2]



Obr. 31: Feynmanovy diagramy rozpadů Higgsova bosonu. [11]

Částici, kterou se podařilo objevit v roce 2012, dnes běžně považujeme za Higgsoův boson. Od té doby se povedlo změřit některé její vlastnosti, jako např. spin a ukázalo se, že odpovídají předpovědím Standardního modelu. V srpnu roku 2018 se také podařilo experimentálně dokázat rozpad Higgsova bosonu na dvojici b-kvarků. [2]

Zvláštností je, že málo pravděpodobné rozpady Higgsova bosonu jako např. jeho rozpad na $\gamma\gamma$, který má pravděpodobnost 0,2 %, jsou pozorovány ale rozpady pravděpodobnější jako např. rozpad na $b\bar{b}$ s pravděpodobností 57 % nikoli. Je to z důvodu, že během tohoto rozpadu vznikají 2 jety (výtrysky) částic, které jsou téměř nerozlišitelné od mnohem častěji se vyskytujících jetů, vznikajících během různých procesů, do kterých se zapojuje silná interakce. [2]

2.3 Nová fyzika

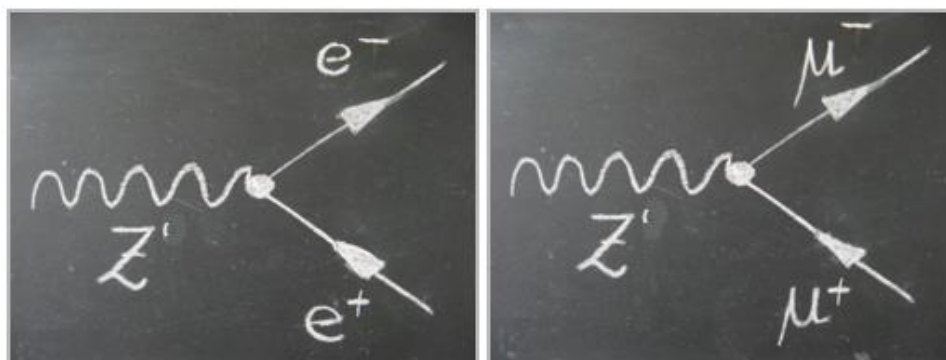
Další částicí, po které se pátrá na LHC je boson Z' . Jde o částici, která by měla být těžším partnerem bosonu Z a její existence vyplývá z předpovědí některých teorií přesahujících Standardní model vyžadujících, aby byla zavedena další slabá síla. [2]

Dvěma největšími záhadami dnešní fyziky jsou podstata temné hmoty a gravitace na kvantové úrovni. Zkoumání gravitačních jevů ve vesmíru odhalilo, že 95 % hmoty a energie, která se zde nachází je „jiná“ a pro nás „obyčejná“ hmota je zastoupena pouze z 5 %. Z těchto 95 % tvoří 25 % to, co nazýváme temnou hmotou a zbylých 70 % představuje ještě tajemnější substance, temná energie. Mezi nejčastější adepty na částice tvořící temnou hmotu patří tzv. částice WIMP (weakly interacting massive particles - slabě interagující hmotné částice). S částicemi, kterými mohou být WIMP, počítá i teorie, jež zobecňuje Standardní model a nazývá se supersymetrie. [2]

2.3.1 Boson Z'

Nové teorie popisující fyziku částic často předpokládají, že existují další velmi hmotné částice. [2]

Mezi částice, které se zatím nepodařilo experimentálně ověřit, patří také boson Z' . Většina teorií počítá s tím, že vznik a zánik této částice je velmi podobný jako u bosonu Z . To by znamenalo, že při hledání bosonu Z' můžeme využít stejné postupy a prostředky, které jsme si již představili. [2]



Obr. 32: Feynmanovy diagramy rozpadů bosonu Z' . [6]

2.3.2 Graviton

Jak již bylo řečeno předpokládá se, že částice a zároveň nosič síly graviton G , je zprostředkovatelem gravitace stejně, jako jsou ostatní síly vyvolány výměnami kalibračních bosonů. [2]

Některé z nových teorií, které sahají za hranice Standardního modelu a přináší další prostorové dimenze, předpovídají gravitonové excitace. [2] „Pokud takové excitace existují, mohly by být vytvářeny na LHC jako těžké resonance a projevit se v rozdělení invariantní hmotnosti svých rozpadových produktů.“ [6] Protože interakce gravitonu nezávisí na hmotnosti ale na energii-

hybnosti, může docházet k jeho rozpadu na páry leptonů, bosonů a kvarků a také fotonové a gluonové páry. [2]

V tomto případě by měly významnou roli hlavně ty rozpady gravitonu, při kterých dochází ke vzniku páru leptonů, fotonů nebo čtveřice leptonů jako koncových stavů, kterých se využívá i k měření bosonu Z , když se hledá Higgsov boson nebo se pátrá po teoretickém kalibračním bosonu Z' . [2]

Když si to shrneme, tak určování bosonů Z a Z' je podobné, přestože jejich hmotnost je velmi rozdílná. Obě částice se rozpadnou na páry leptonů, ale nemohou se rozpadnout na dvojici fotonů. Rozpad Higgsova bosonu je pak na pár fotonů, na ZZ a lze též sledovat i rozpad na páry leptonů tau, zbylé rozpady jsou velmi potlačeny, jelikož jeho vazba je závislá na hmotnosti. [2]

Nyní již víme, že z invariantní hmotnosti můžeme identifikovat již známou částici nebo objevit novou, abychom však určili, co vlastně bylo objeveno, musíme do pátrání zahrnout kromě elektrického náboje a hmotnosti také spin. [2]

Spin 1 nalezneme u fotonu a bosonů Z a Z' , spin 0 u Higgsova bosonu a spin 2 u gravitonu. Rozdíl ve spinu u gravitonu a fotonu je dán tím, že gravitace je oproti elektromagnetické síle vždy přitažlivá. [2]

Spin se také, jako ostatní vlastnosti, se kterými jsme se již seznámili, řídí zákony kvantové fyziky. Při rozpadech částic jsou splňovány zákony zachování jako např. elektrického náboje, energie a hybnosti. Dále ovšem platí také zákony zachování momentu hybnosti a spinu, což přináší některá omezení při rozpadech částic. Rozpad Higgsova bosonu je tedy omezen na dvojici částic se spinem 1 nebo $\frac{1}{2}$. Boson Z a Z' se může rozpadnout na pár částic se spinem $\frac{1}{2}$, ale ne na 2 částice se spinem 1. Graviton se rozpadá na dvojici částic se spinem $\frac{1}{2}$ nebo 1. [2]

2.4 Rozpoznávání částic

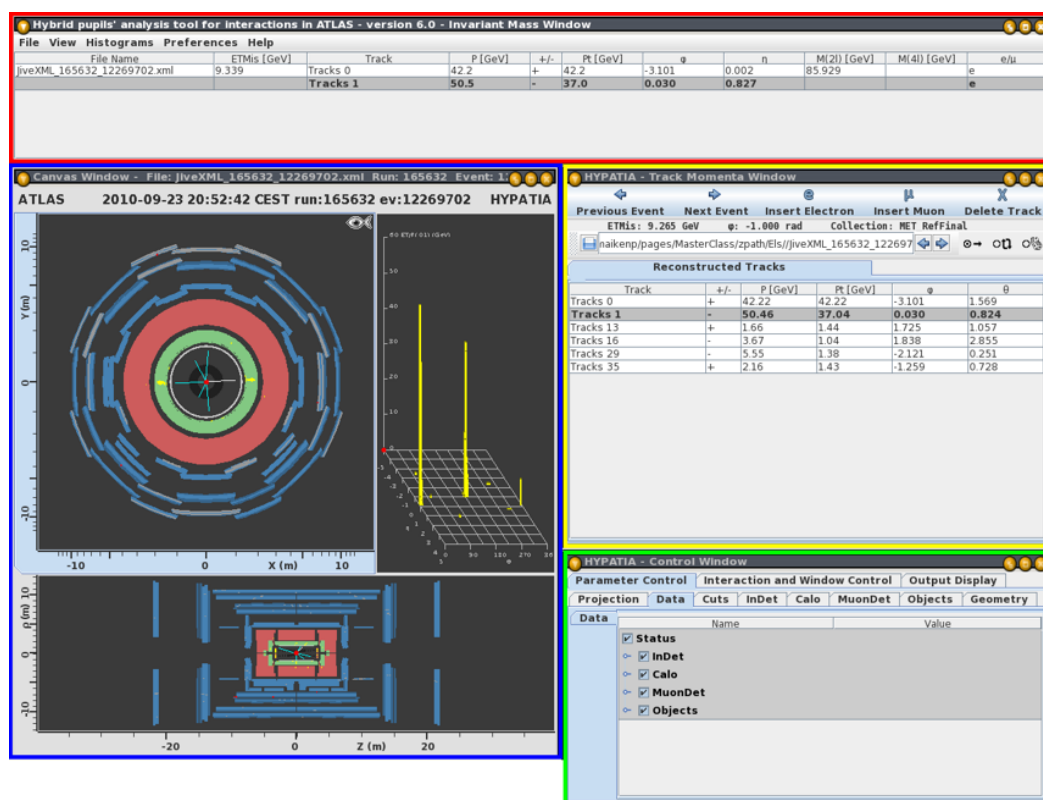
Částice za sebou nechávají při průchodu detektorem elektrické signály, „stopy“. Již dříve jsme seznámili s konstrukcí detektoru ATLAS, jakým způsobem pracuje a jak částice reagují s materiálem detektoru. Nyní si popíšeme, jak lze důsledným vyhodnocováním těchto signálů rozpoznávat různé elementární částice. [2]

2.4.1 HYPATIA – program k zobrazení událostí

Stopy, elektronické signály, které v detektoru zaznamenejeme, nám umožňují zobrazit tzv. zobrazovací programy. Pomocí těchto programů získáváme dynamický obraz částic a jejich cesty detektorem. K zobrazování událostí budeme využívat program HYPATIA, lze stáhnout zde: <http://hypatia.phys.uoa.gr/Downloads/>.

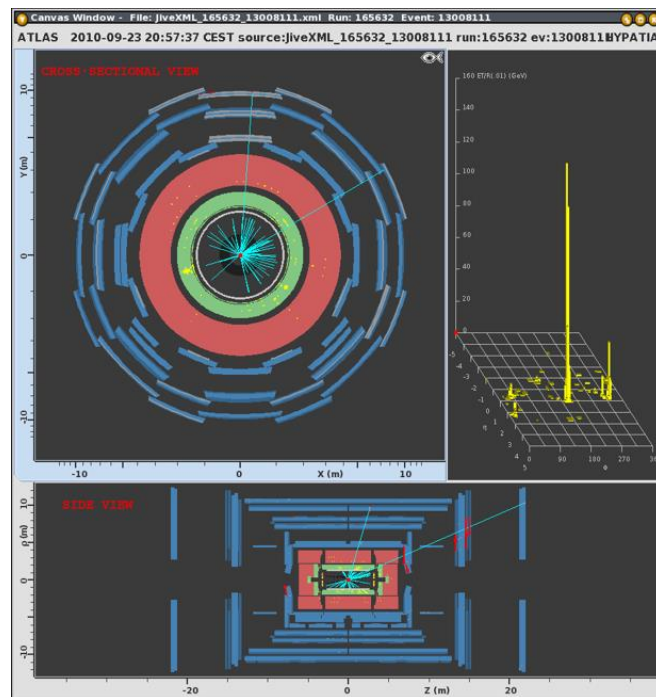
Ke spuštění programu je také potřeba mít nainstalovaný Java Runtime Environment, který je ke stažení zde: https://www.java.com/download/ie_manual.jsp. [2]

Na následujících stránkách se seznámíme s programem a jeho funkcemi.

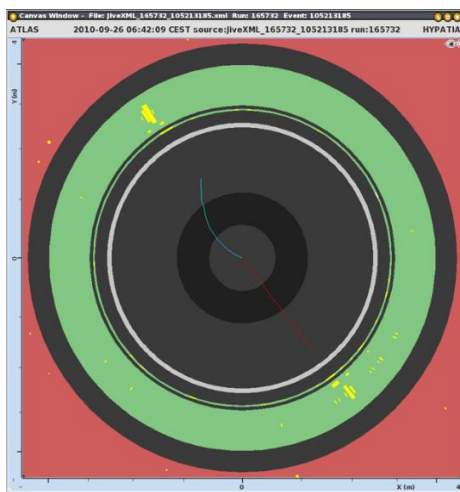


Obr. 33: Úvodní stránka. [7]

Obrázek 33 ukazuje sestavu oken, která se zobrazí po spuštění programu HYPATIA. Tato okna jsou čtyři: „Invariant Mass Window“ – Klidová hmotnost (červeně ohraničené), „Canvas Window“ – Obraz/plátno (modře ohraničené), „Track Momenta Windows“ – Sledování hybnosti (žlutě ohraničené) a „Control Window“ – Ovládání (zeleně ohraničené). V okně Invariant Mass se zobrazí klidové hmotnosti částic, které si zvolíme. V okně Canvas se vizualizuje detektor a události (stopy zanechané částicemi v detektoru) z různého pohledu. V dalším okně Track Momenta jsou ukázány všechny údaje o stopách v detektoru. Nakonec v okně Control můžeme změnit nastavení a vlastnosti zobrazování. [2]



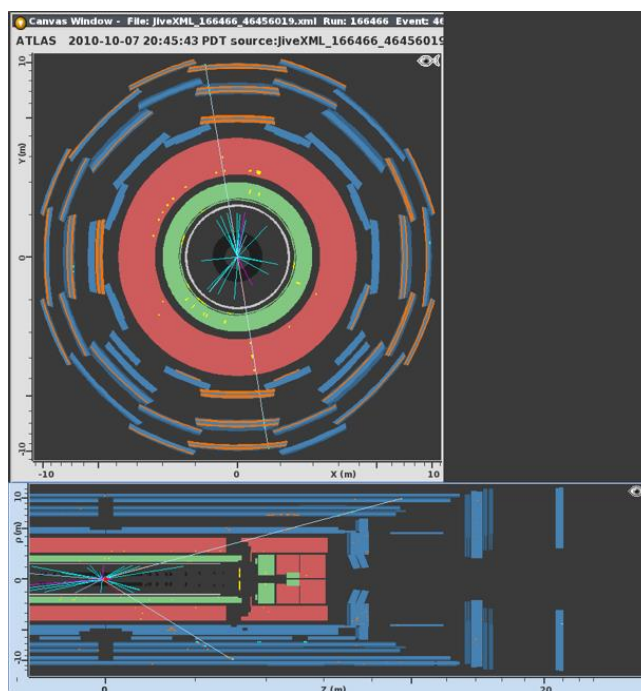
Každá z vrstev detektoru je v obou pohledech zobrazena různou barvou. Vnitřní část je šedou, elektromagnetický kalorimetr zelenou, hadronový kalorimetr červenou a mionové komory modrou barvou. [2]



Obr. 36: Trajektorie. [7]

Barevné čáry na obrázku 36 představují trajektorie elektricky nabitých částic. Tyto trajektorie jsou vykresleny ze zaznamenaných údajů, které naměřil detektor po srážce. Barvy všech stop jsou určeny podle velikosti příčné hybnosti (pro nás významná fyzikální veličina). Příčná hybnost udává složky hybnosti částic, které jsou kolmé na osu svazku. Na obrázku 34 vidíme dvojici stop pocházejících od částic s velkou příčnou hybností (červená stopa) a malou příčnou hybností (modrá stopa). [2]

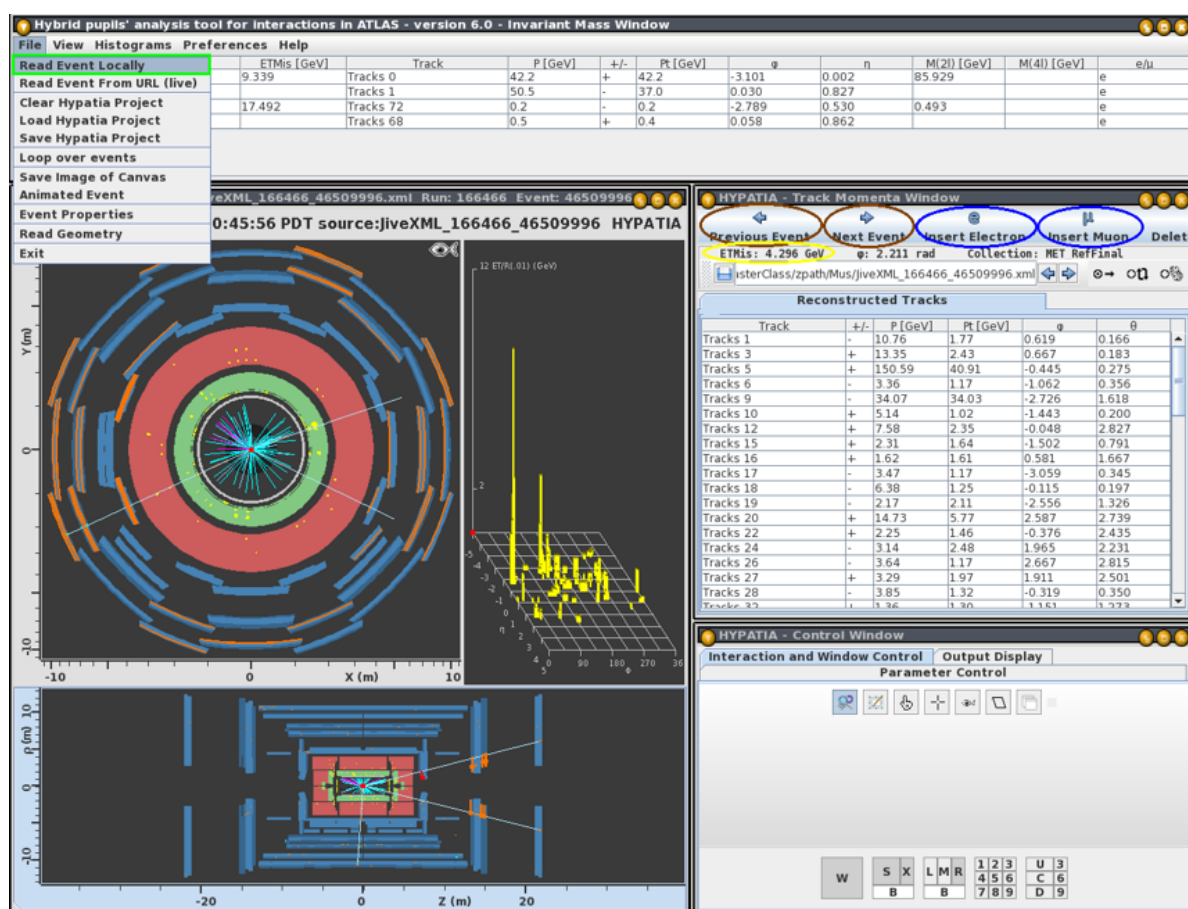
Propojit záznamy o zachycené energii v kalorimetrech s konkrétními trajektoriemi napříč vnitřním detektorem není vždy jednoduché. Ze záznamu této události je evidentní, že není možné přímé spojení stop z dráhového detektoru s údaji v kalorimetrech, které jsou v daných místech zobrazeny jako žluté obdélníky. [2]



Obr. 37: Mionové komory. [7]

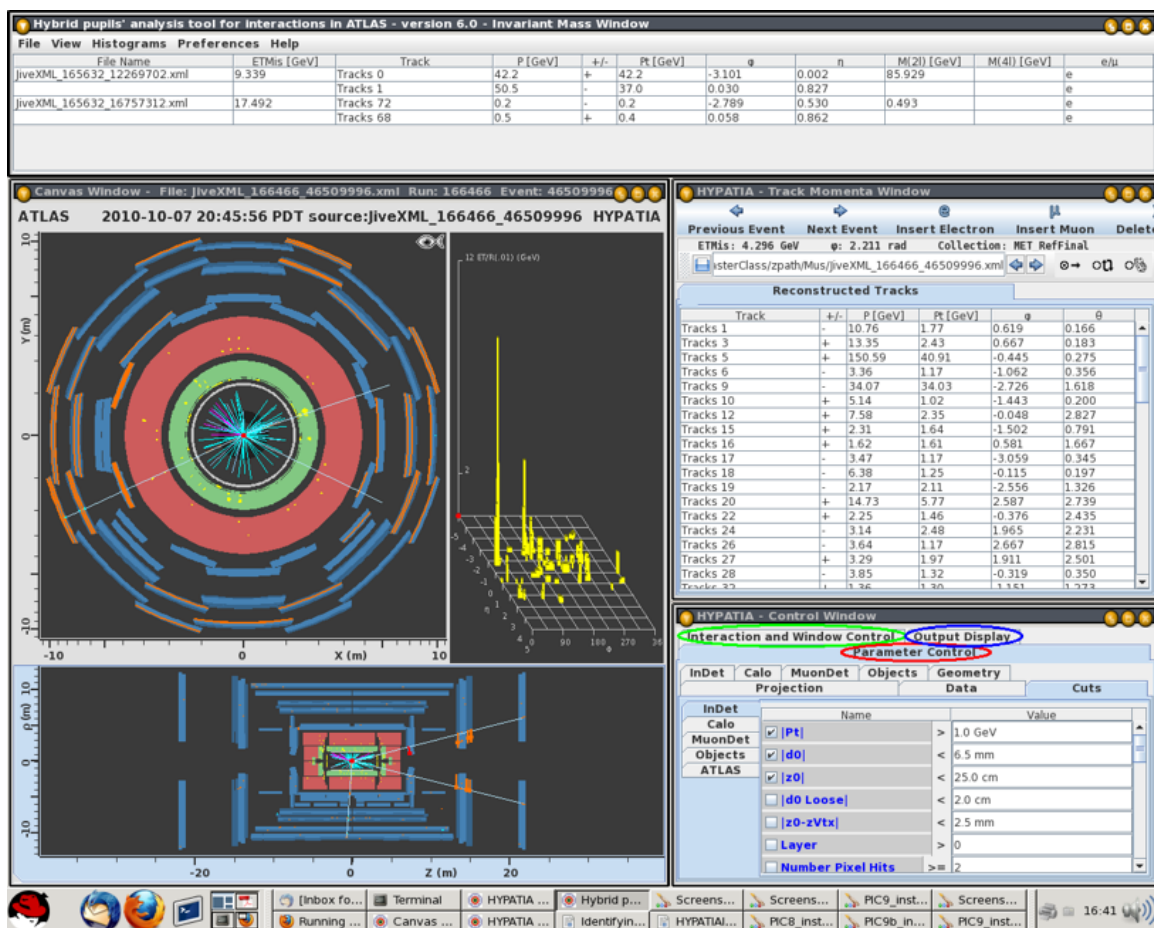
Mion je kromě neutrina (které je pro detektor úplně neviditelné) jedinou částicí, která se dostane z místa srážky až do vnější oblasti detektoru. Modrou barvou označené mionové komory jsou určeny právě k jejich detekování. Komoru, která byla mionem zasažena, program zvýrazní oranžově. Pokud se podíváme na koncový pohled, zjistíme, že jsou oranžově zvýrazněny celé jednotlivé úseky mionového detektoru, kdežto při pohledu z boku, lze vidět pouze oranžové tečky. [2]

Ne všechny zásahy v mionových komorách pocházejí ze „správné“ srážky protonu s protonem. Některé detekce vznikají od „falešných“ částic ze srážek svazků mimo detektor a takové nebereme v úvahu. Částice ze „správných“ srážek se snadno rozliší podle toho, že většinou projdou všemi vrstvami mionových detektorů. [2]



Obr. 38: "Track Momenta Window" - Okno sledování hybností. [7]

Okno sledování hybností se také používá při nahrávání souborů s daty. Data načítáme přes možnost File a Read Event Locally (v zeleném rámečku). Nahraný soubor obsahuje dílčí soubory, které obsahují vždy jednu událost. Mezi jednotlivými událostmi přecházíme volbami Previous Event a Next Event (ve hnědých elipsách). Dále je zde možnost umístit vybranou stopu do tabulky klidových hmotností (Invariant Mass Table) pomocí volby Insert Electron a Insert Muon (v modrých elipsách). Hodnoty chybějících energií jsou uvedeny v okně nahoře (ve žluté elipse). [2]



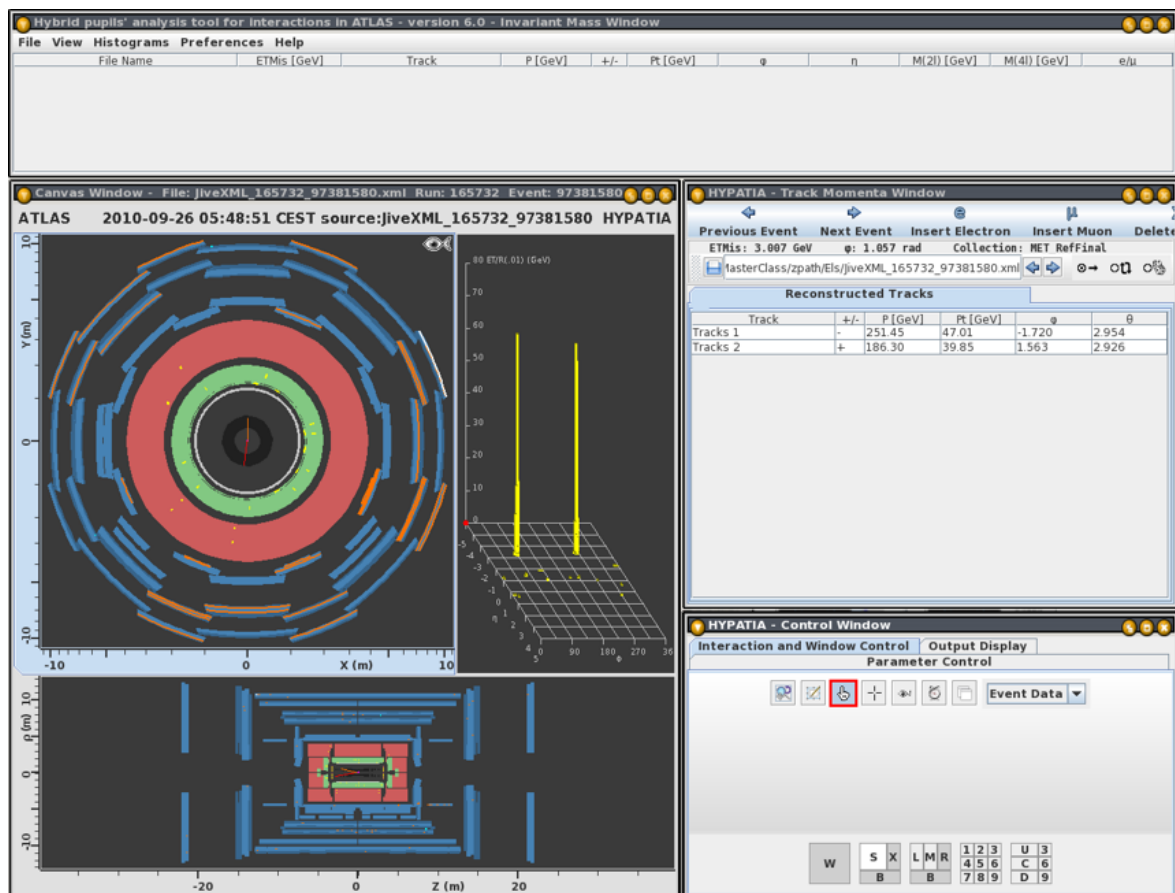
Obr. 39: Popis ovládacího panelu a výběrová kritéria. [7]

Ovládací panel „Control Window“ je hlavním ovládacím oknem zobrazovaných událostí. V okně jsou tři hlavní volby. Volbou Parameter Control (v červené elipse) lze zapínat a vypínat, zobrazované objekty a také jim např. i změnit barvu. Mezi stěžejní však řadíme možnost nastavení prahových hodnot pro různé veličiny, čímž filtrujeme zobrazené události. Další volba Interaction and Window Control (v zelené elipse) dává možnost např. přejít od režimu přiblížení k výběru stop a také přepínání různých projekcí. Poslední volba Output Display (v modré elipse) zobrazuje podrobné údaje o vybraném objektu. [2]

Pokud zvolíme volbu Parameter Control a poté záložku Cuts, lze nastavit speciální výběrová kritéria určující, které částice program zobrazí. [2]

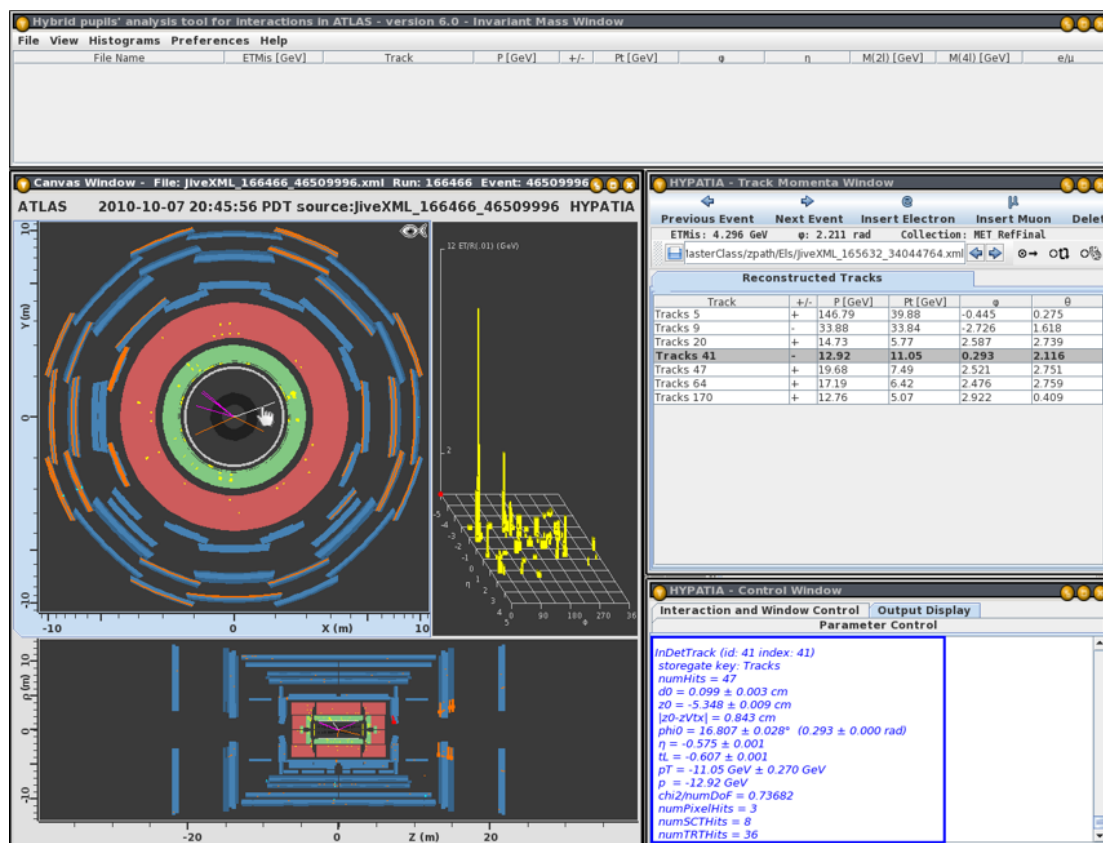
Zobrazená událost ukazuje velké množství dějů. Lze vidět stopy od mnohých částic, přičemž některé jsou pro nás nezajímavé. Důležitými částicemi jsou ty, které mají velkou příčnou hybnost. Zobrazení částic, které mají malou příčnou hybnost lze omezit tím, že zvětšíme hodnoty ohraničení zdola ve volbě Cuts. [2]

Pro zobrazení částic s příčnou hybností, která je vyšší než zvolená hodnota, je potřeba aby tato hodnota byla zadána do příslušného pole (ve žlutém rámečku – zkuste např. hodnotu 5 GeV) a stiskem klávesy Enter ji potvrdíme. Než potvrdíme novou hodnotu řezu, zkontrolujeme, že je před nově zvolenou hodnotou symbol > (lze změnit kliknutím) a také čtvereček, který je ve stejném řádku nalevo musí být zaškrtnutý. Výsledky výše popsanych akcí lze vidět na obrázku 42. [2]



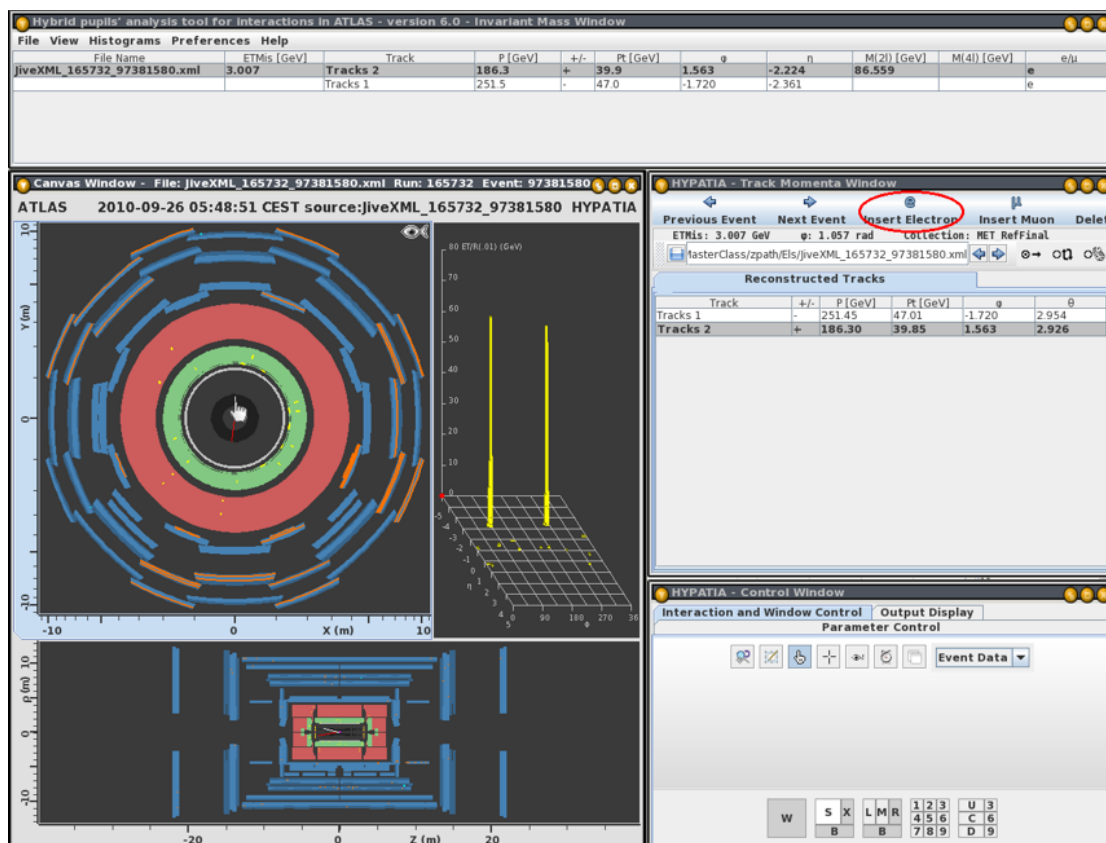
Obr. 42: Výběrová kritéria (2). [7]

Zbývající částice lze prozkoumat výběrem symbolu ruky z nástrojové lišty (v červeném rámečku) a následně stačí kliknout na stopu zvolené částice ve vnitřním detektoru. Tímto výběrem se změní barva čáry a v rámečku s údaji, který najdeme pod Output Display, se zobrazí detailní informace o vybrané částici (obr. 43). [2]



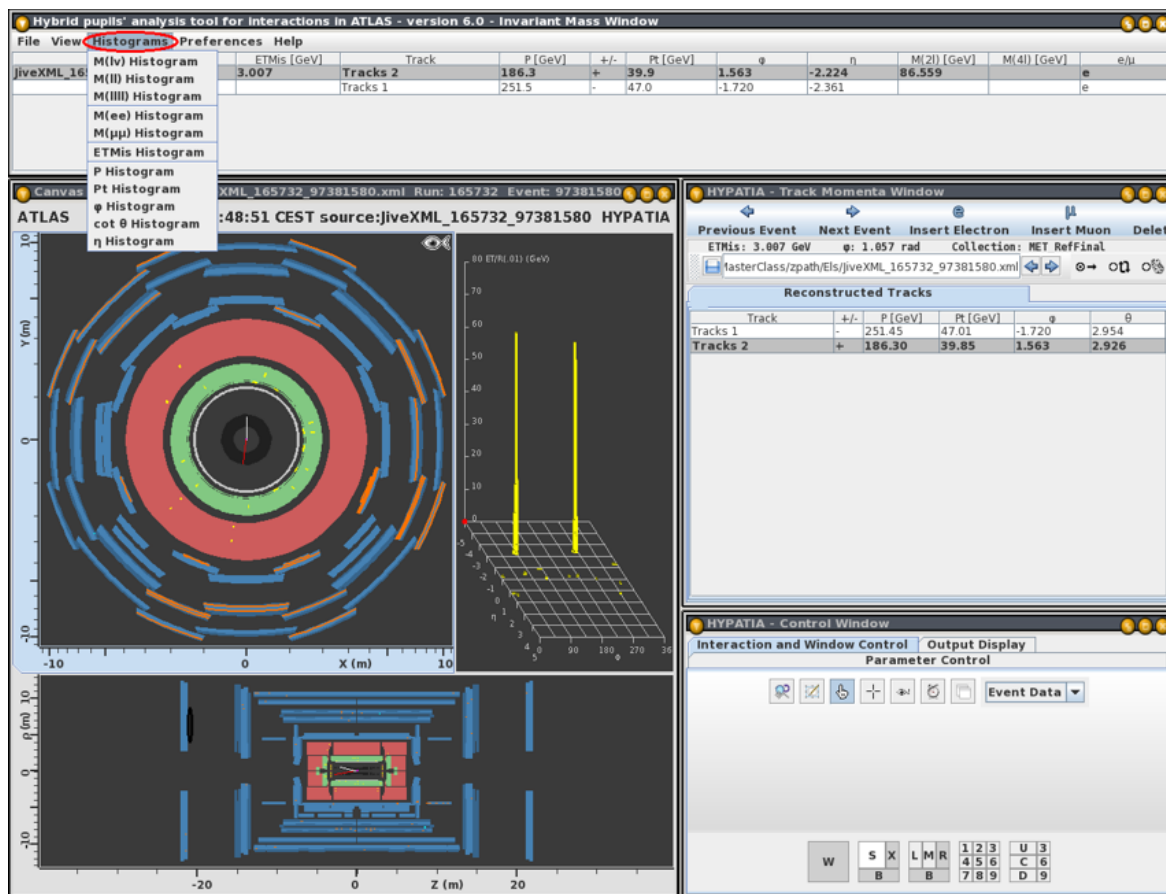
Obr. 43: Výběrová kritéria (3). [7]

Modrý rámeček zobrazuje informace o vybrané častici. [2]



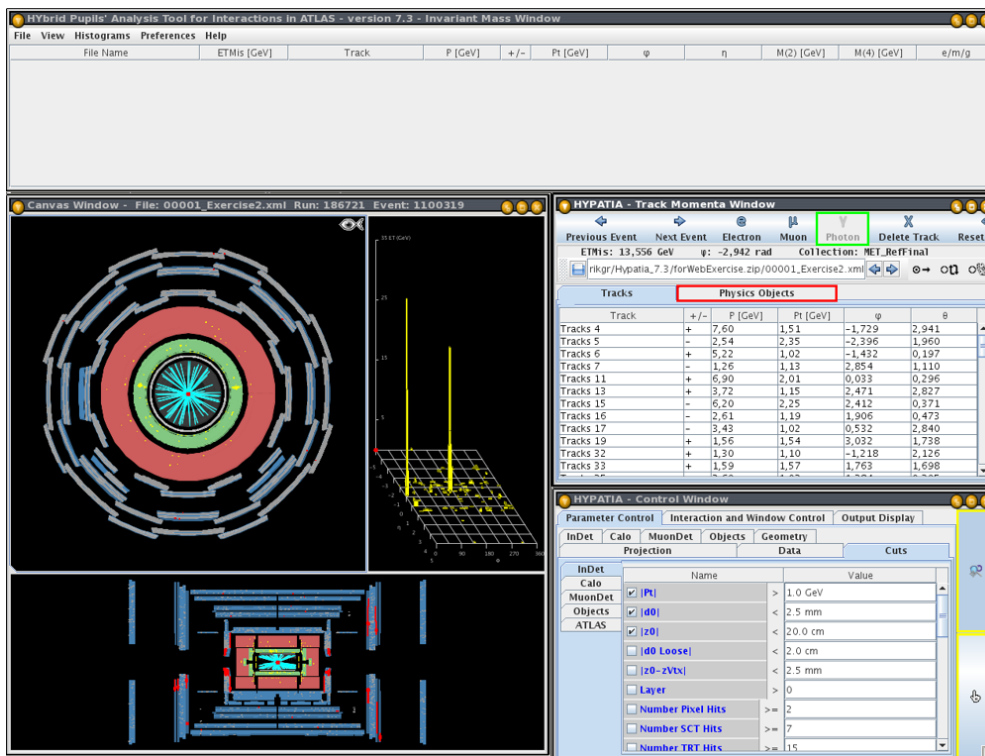
Obr. 44: Klidové hmotnosti. [7]

Vybereme-li některou stopu a poté klikneme na Insert Track (v červené elipse), tak se vybraná stopa zobrazí v horním okně Invariant Mass Window. Tato stopa je též zvýrazněna v okně Track Momenta Window. Jestliže vybereme dvojici stop a obě vložíme do tabulky, tak program sám spočítá klidovou hmotnost obou částic. [2]



Obr. 45: Histogramy. [7]

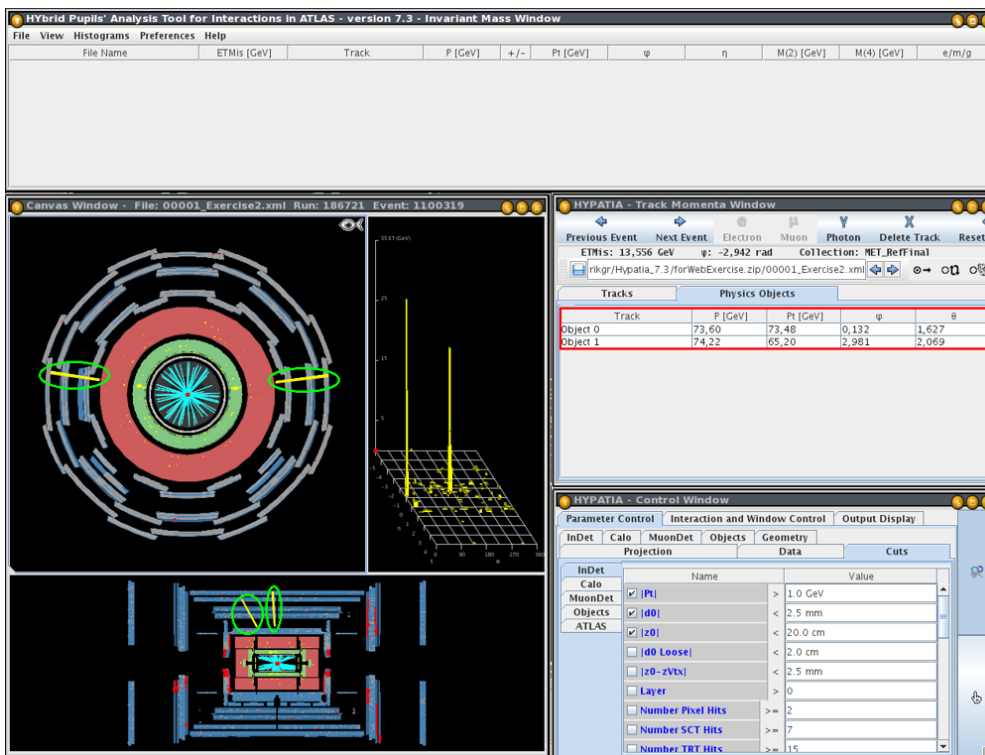
Program HYPATIA umožňuje také vytváření histogramů. V okně Invariant Mass Window zvolíme možnost Histograms (v červené elipse) a vybereme si vhodný histogram. [2]



Obr. 46: Další funkce. [7]

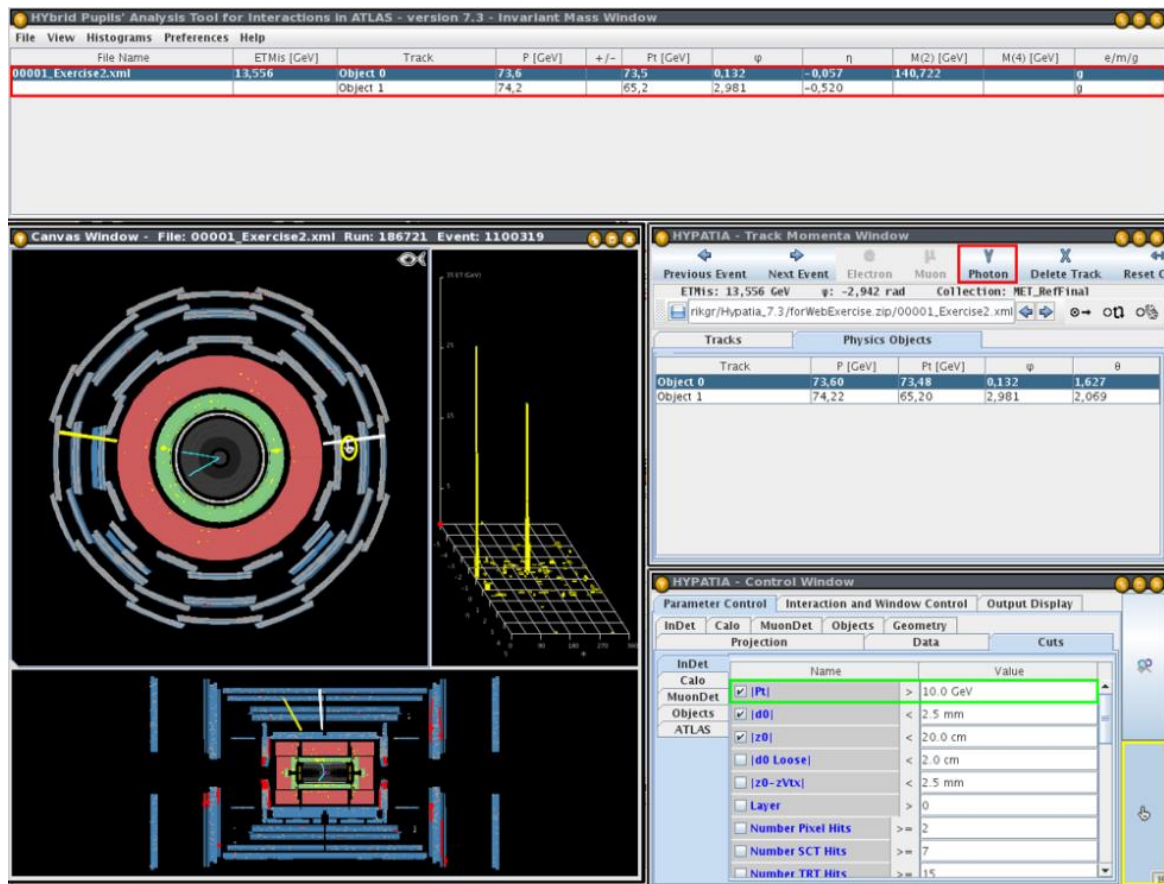
Další možnosti:

1. Snadné přepínání napříč nástroji výběru (select tool) a přiblížení tzv. zoom (ve žlutých rámečcích vpravo dole).
2. Volba Physics Objects (v červeném rámečku).
3. Lze zvolit objekt foton (Photon – v zeleném rámečku). [2]



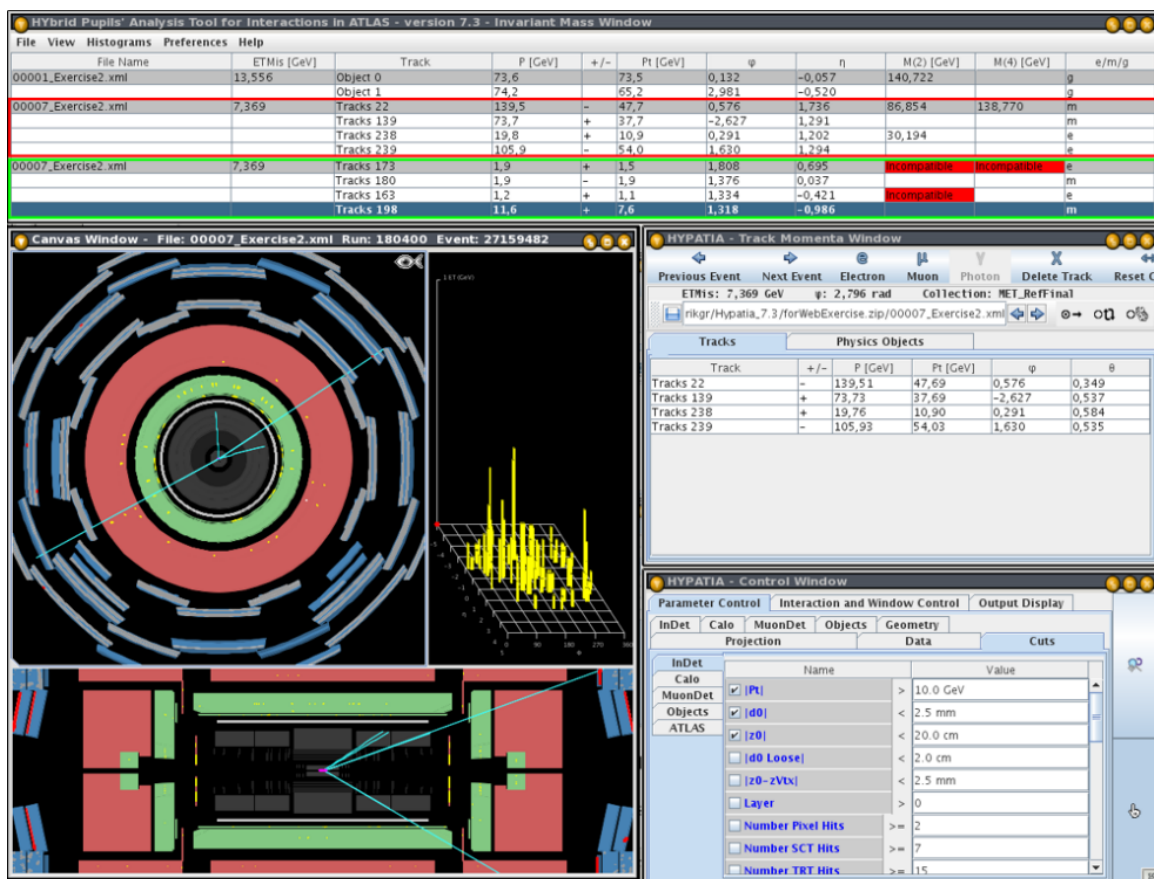
Obr. 47: Physics Objects - Fyzikální objekty. [7]

Volbou možnosti Physics Objects (v červeném rámečku) se objeví tabulka sestavených objektů v aktuální události. Objekty jsou zobrazeny žlutými grafickými prvky v náhledu události (v zelených elipsách). [2]



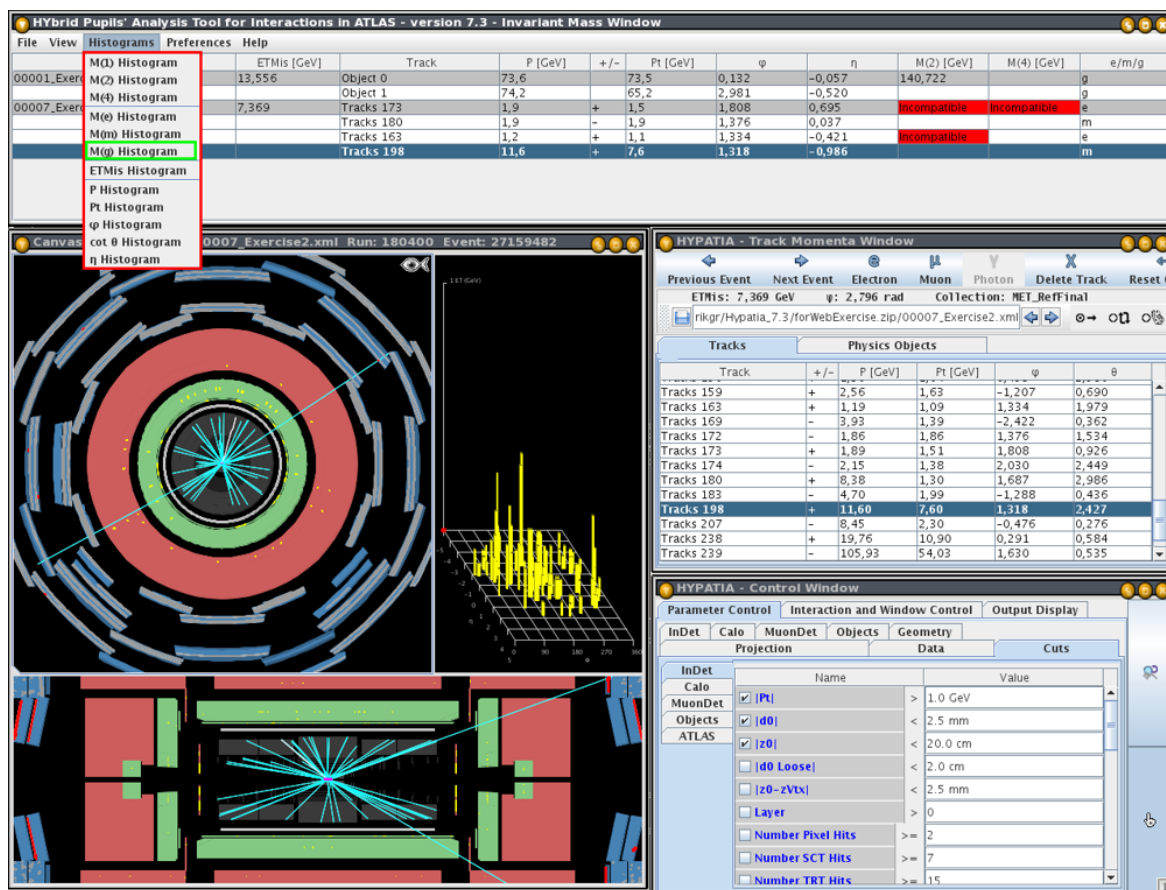
Obr. 48: Photon - Fotony. [7]

Pro snadnější rozlišení mezi elektrony a fotony, lze zvolit omezení příčné hybnosti částic Pt (v zeleném rámečku). Na události výše můžeme vidět, že téměř všechny trajektorie zmizely a půjde tedy nejspíše o dvoufotonovou událost. Dále je potřeba zvolit žluté značky v zobrazené události (ve žluté elipse) nebo jim odpovídající objekty v tabulce Track Momenta Window a zvolit, že se jedná o fotony (volba Photon v červeném rámečku). Tímto se objeví v okně Invariant Mass Window (v červeném rámečku). [2]



Obr. 49: Čtyři leptony. [7]

Program HYPATIA umožňuje také výběr 4 leptonů, přesněji dvojice mionů a dvojice elektronů nebo čtyři miony nebo čtyři elektrony (v červeném rámečku). V programu je vypočítána klidová hmotnost všech 4 leptonů a také samotných párů. Je třeba dávat pozor na správné pořadí, ve kterém se vkládají elektrony a miony (v opačném případě dojde k zobrazení hlášení incompatible – lze vidět v zeleném rámečku). [2]



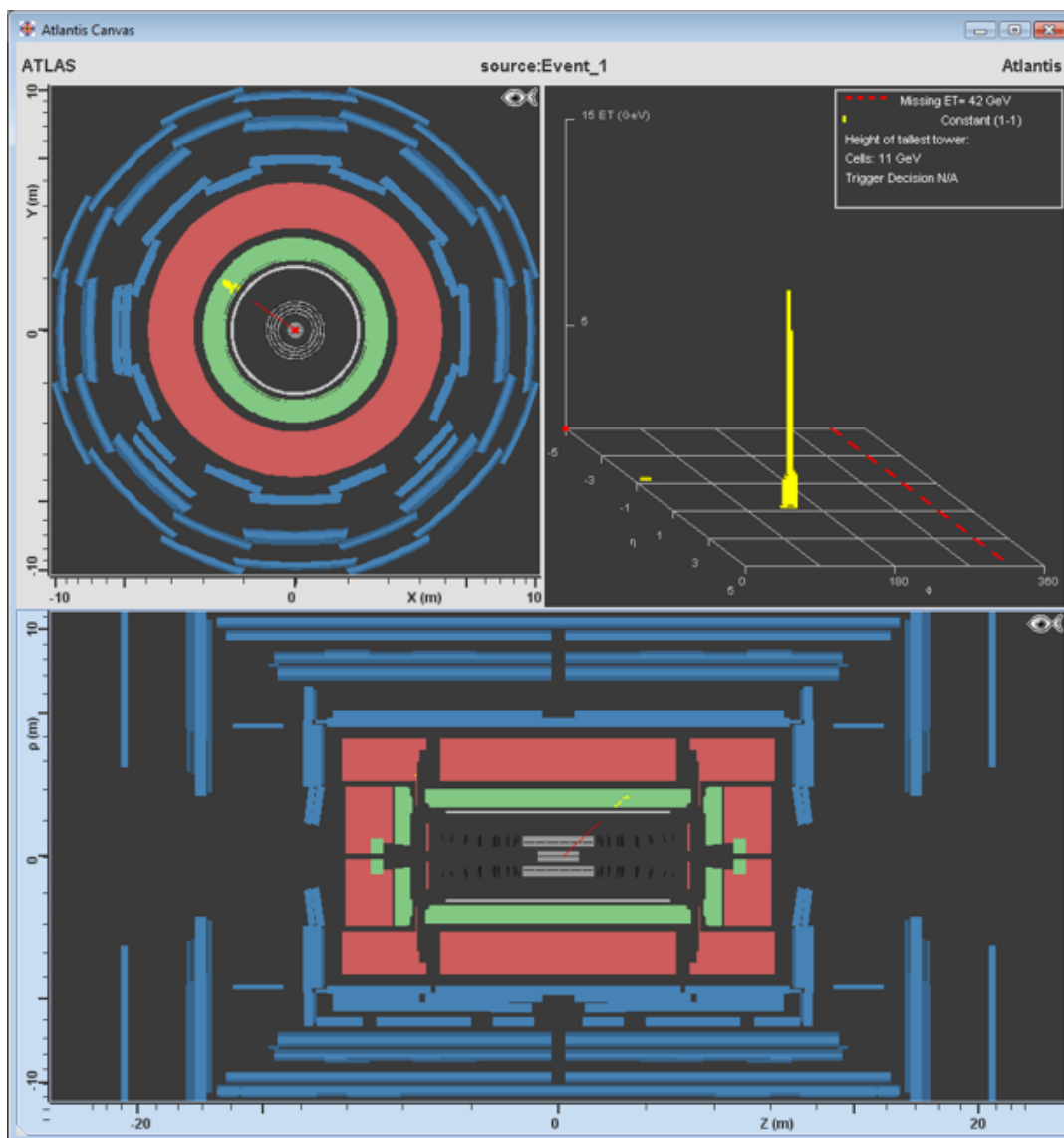
Obr. 50: Fotonové histogramy. [7]

Volba Histograms v novější verzi programu zobrazí nabídku histogramů kde kromě již dříve zmíněných, je možné vybrat také klidovou hmotnost dvojic fotonů – výběrem $M(g)$ (v zeleném rámečku). [2]

2.5 Zobrazování stop částic

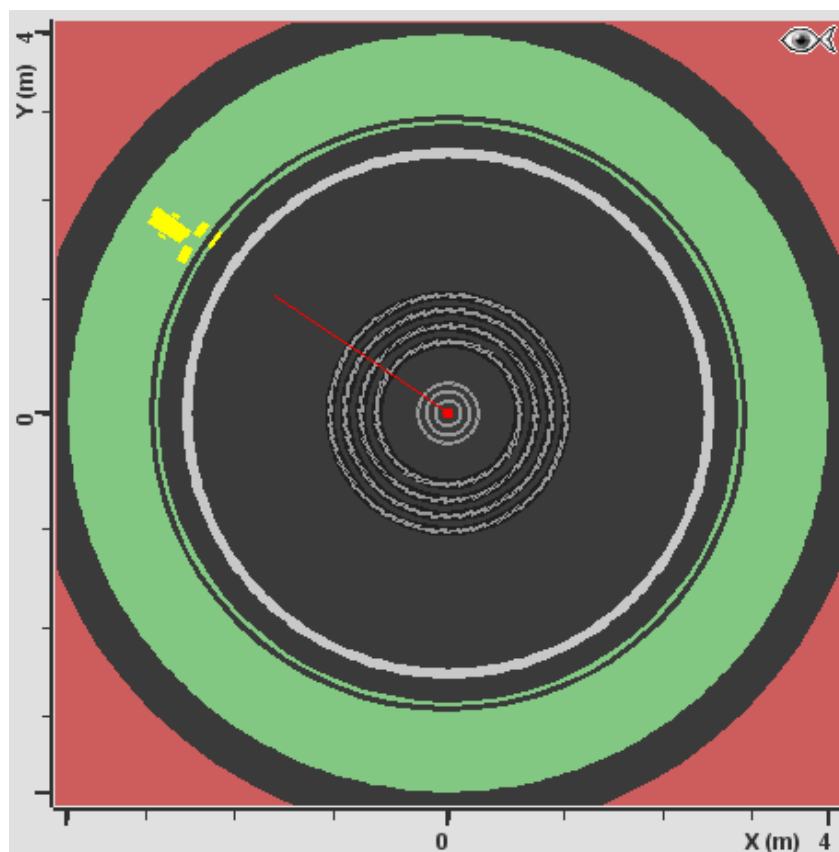
Aby byla možná analýza srážek protonu s protonem, zobrazována programem HYPATIA, je potřeba umět rozpoznávat mezi sebou částice na základě stop v detektoru. Nyní se naučíme rozpoznat elektrony a pozitrony, miony a antimiony, fotony, neutrina a také složitější hadrony (např. protony), vytvářené skupinami částic zvanými „jety“, či výtrysky. [2]

2.5.1 Elektron a pozitron



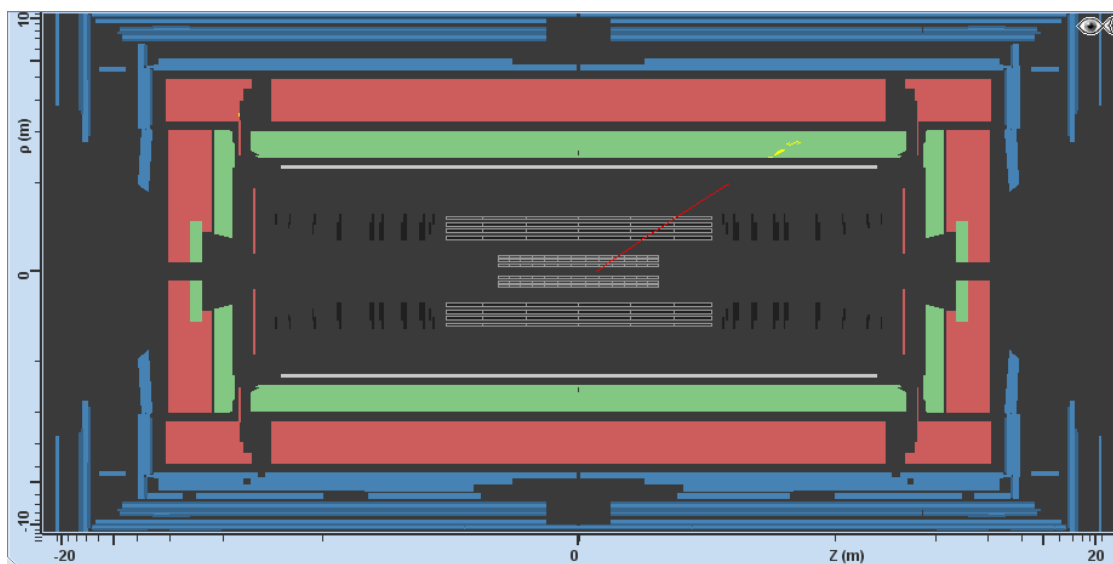
Obr. 51: Elektrony a pozitrony. [8]

Záznam na obrázku 51 ukazuje detekci elektronu nebo pozitronu. Jak lze vidět, částice nechala červenou stopu ve vnitřním detektoru a v elektromagnetickém kalorimetru odevzdala veškerou energii. V zelené části, která zobrazuje elektromagnetický kalorimetr, lze vidět pouze žluté obdélníky zobrazující odevdanou energii. Žádné další stopy jak v hadronovém kalorimetru, tak v mionových komorách nejsou a tedy se musí jednat o elektron nebo pozitron. [2]



Obr. 52: Koncový/průřezový pohled – elektrony a pozitrony. [8]

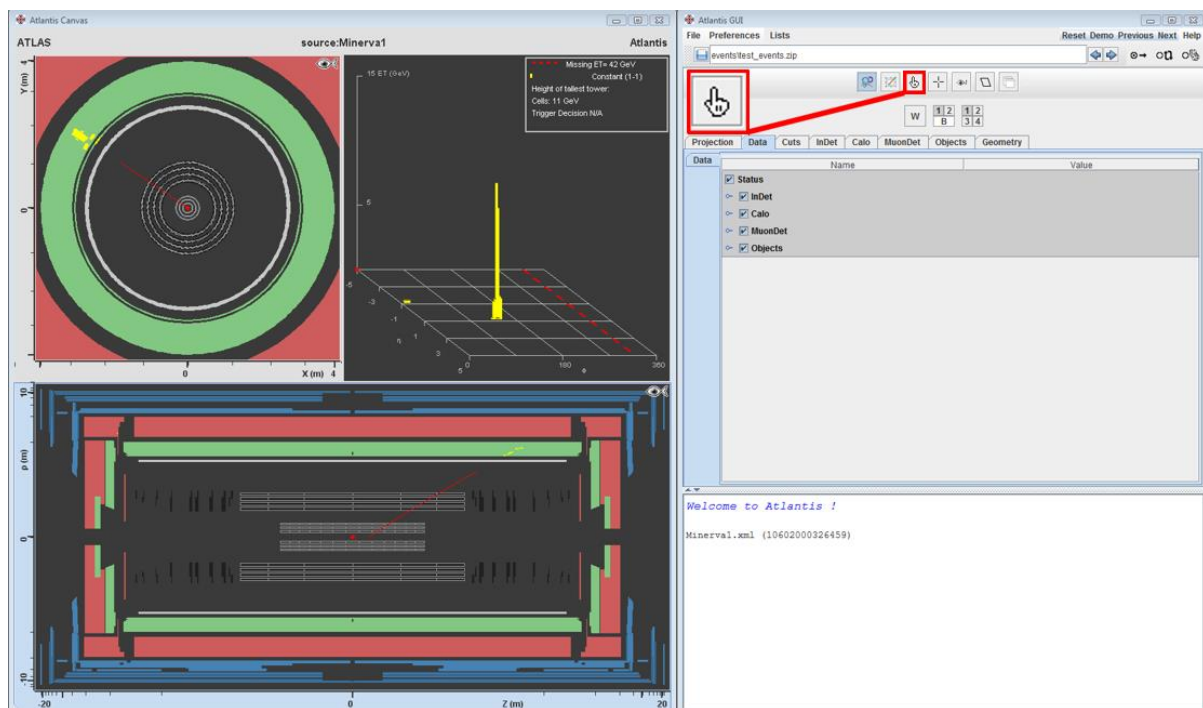
Ukázka předchozí události v průřezovém pohledu. Červená stopa, která prochází všemi třemi částmi vnitřního detektoru a žluté obdélníky označující místa, kde byla odevzdána energie jsou snadno rozpoznatelná. [2]



Obr. 53: Boční pohled – elektrony a pozitrony. [8]

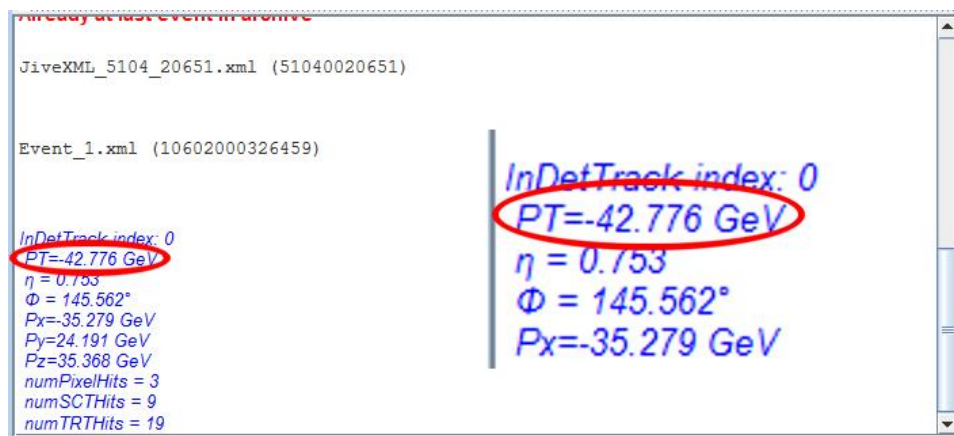
Stejná událost v bočním pohledu.

Zkuste si v mysli spojit boční s koncovým pohledem a představit si jak by událost vypadala v trojrozměrném prostoru. [2]



Obr. 54: Elektron nebo pozitron? [8]

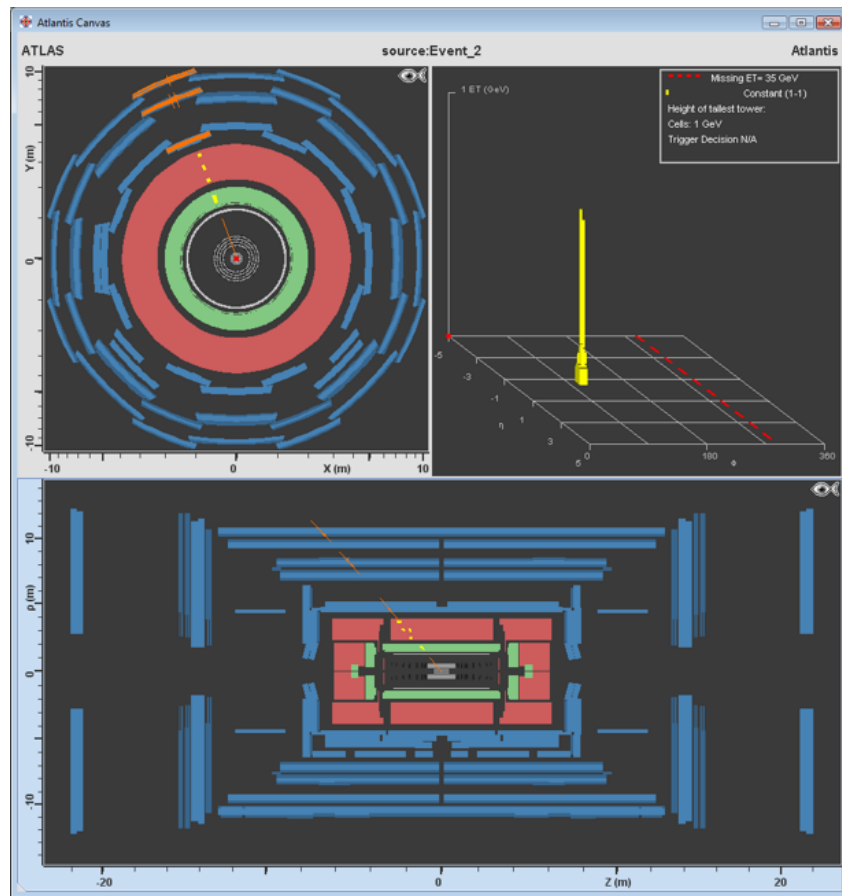
Nyní se ještě podíváme, jak rozlišit, jestli jde o elektron nebo pozitron. Nástrojová lišta v HYPATIA obsahuje tlačítko ukazující ruky. Pokud vybereme zmíněnou možnost a klikneme na stopu částice, zobrazí se informace o dané částici v okně vpravo dole. Mezi údaji jsou např. hybnosti, prostorové složky (P_x , P_y a P_z) a příčná hybnost (P_t) jak lze vidět na obrázku 55. [2]



Obr. 55: Údaje o částici – elektron a pozitron. [8]

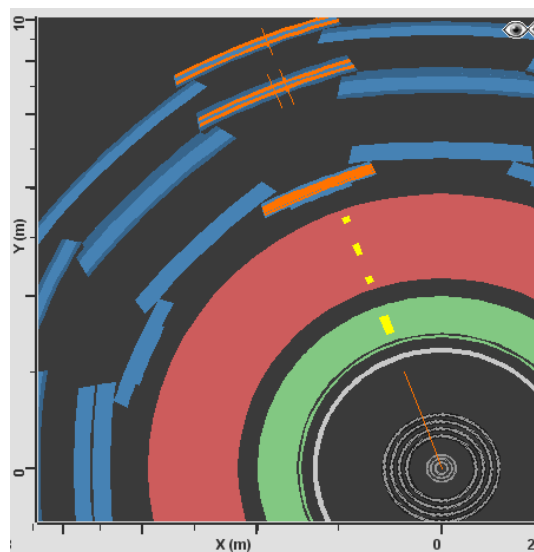
Znaménko u hodnoty P_t informuje, jaký je elektrický náboj příslušné částice (v ukázce výše je to mínus). Záporná hodnota znamená záporný náboj částice a kladná hodnota (bez znaménka) značí kladný náboj částice. V případě výše se tedy jedná o elektron. [2]

2.5.2 Mion a antimion



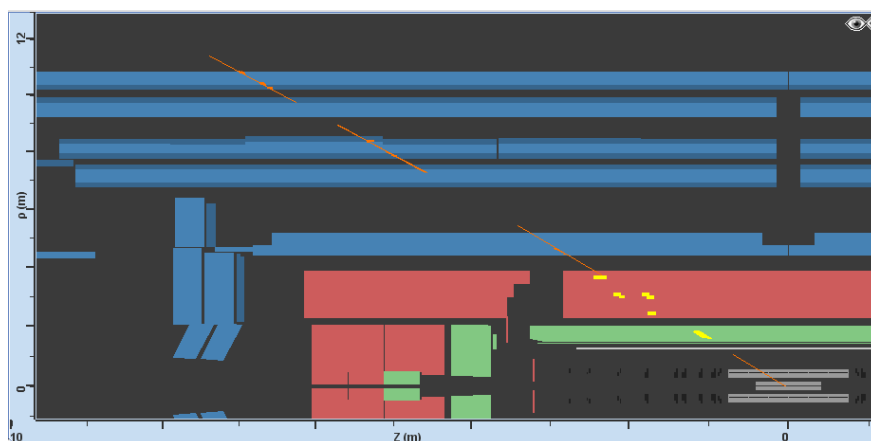
Obr. 56: Miony a antimiony. [8]

Na výše zobrazené události lze vidět oranžovou stopu přes vnitřní detektor, odevzdání malého množství energie v elektromagnetických a hadronových kalorimetrech, které je znázorněno žlutými obdélníčky v zelené a červené oblasti a také oranžovou stopu v mionových komorách. Jedná se tedy o mion nebo antimion, které jsou jediným typem částice procházející přes celý detektor a zanechávající signály ve všech oblastech. [2]



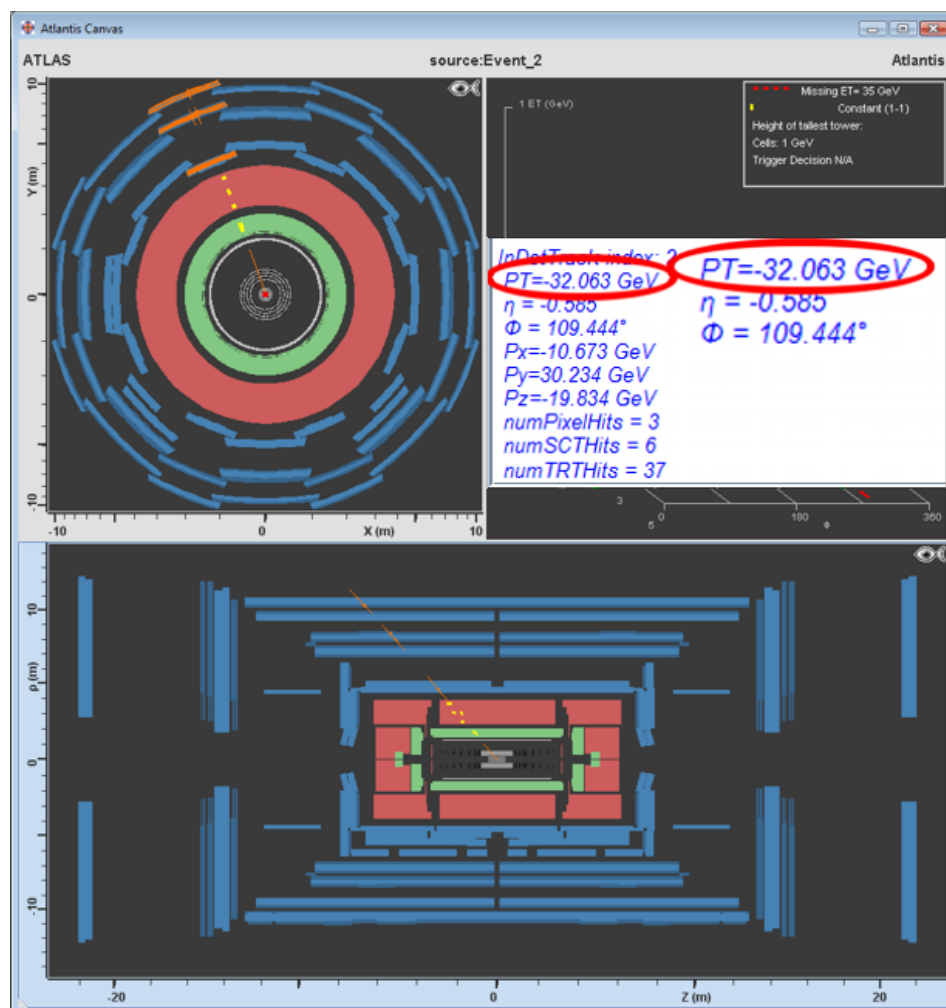
Obr. 57: Záznam z mionových komor. [8]

Na obrázku 57 jsou dobře vidět oranžové záchyty v mionových komorách. [2]



Obr. 58: Boční pohled na mionové komory. [8]

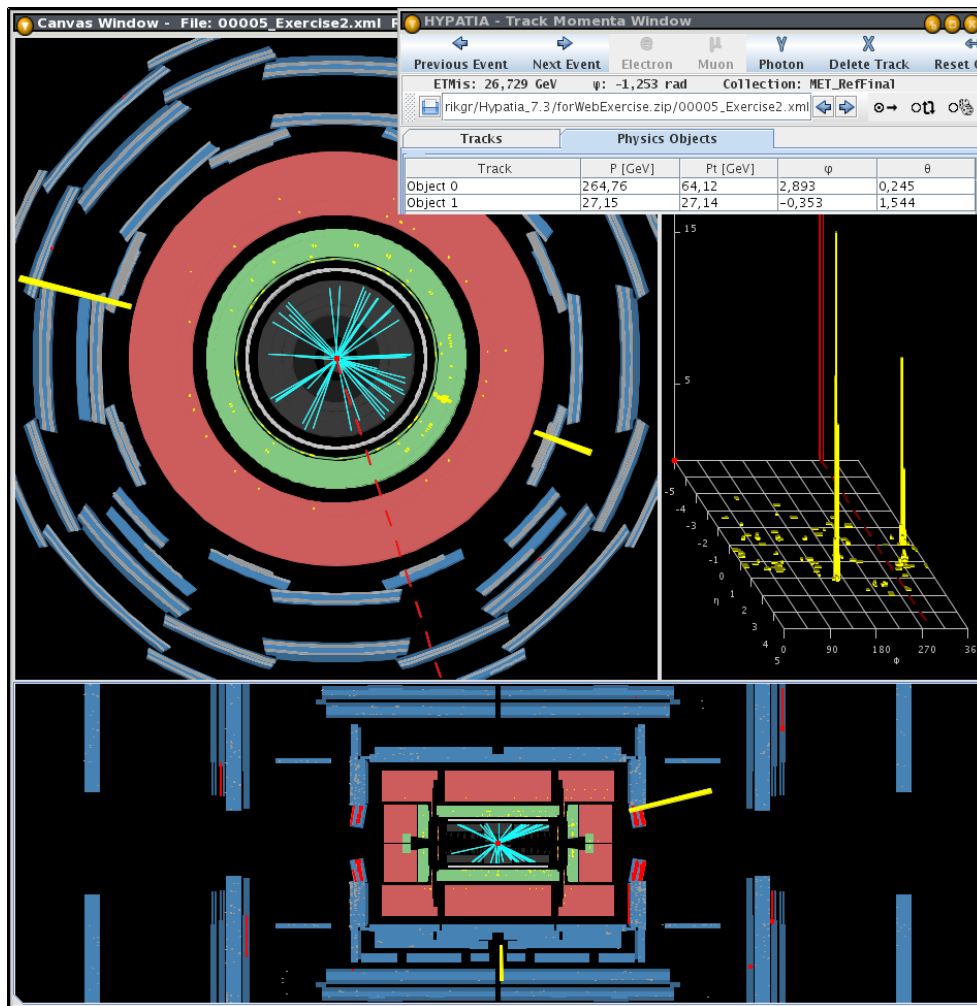
Při bočním pohledu na mionové komory se jednotlivé záznamy zobrazují oranžově jako křížky. Křížky jsou propojeny oranžovou tečkovanou čarou, jež znázorňuje trajektorii částice. [2]



Obr. 59: Mion nebo antimion? [8]

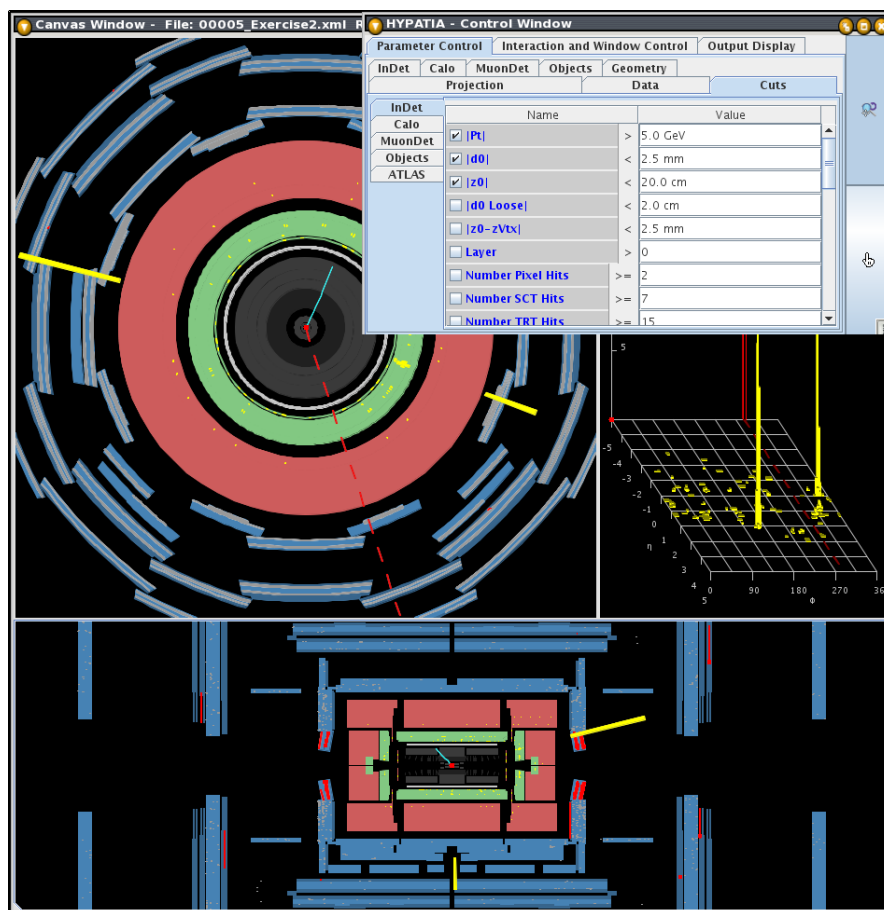
Abychom rozlišili, zda se jedná o mion nebo antimion, využijeme totožný postup jako v případě elektronu a pozitronu. Na záznamu výše vidíme u Pt záporné znaménko, proto je to mion. [2]

2.5.3 Foton



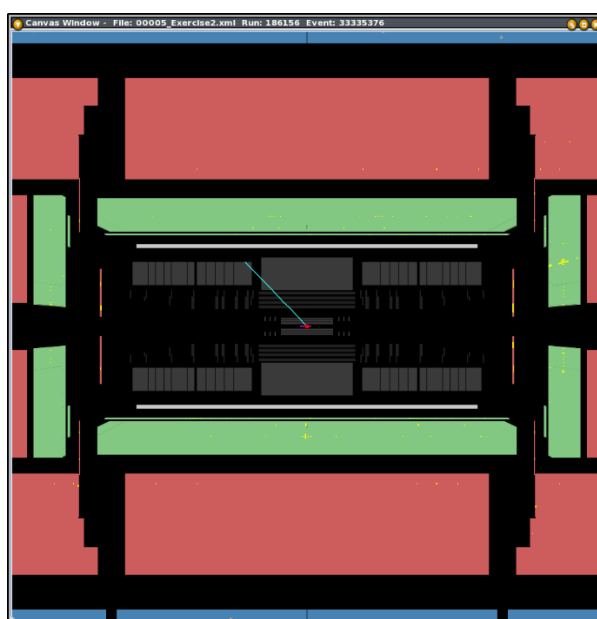
Obr. 60: Záznam fotonů. [8]

Na výše zobrazené události můžeme vidět velké množství modrých stop ve vnitřním detektoru. Světle zelená oblast, představující elektromagnetický kalorimetr, obsahuje spoustu žlutých stop, což značí, že zde byla odevzdána část energie. Jestliže zvolíte volbu „Physics Objects“, zobrazí se 2 žluté „věže“, které představují dva rekonstruované objekty. Je potřeba ještě dalšího zkoumání, aby bylo možné rozhodnout, zda se jedná o událost o 2 elektronech nebo 2 fotonech. [2]



Obr. 61: Záznam v kalorimetru. [8]

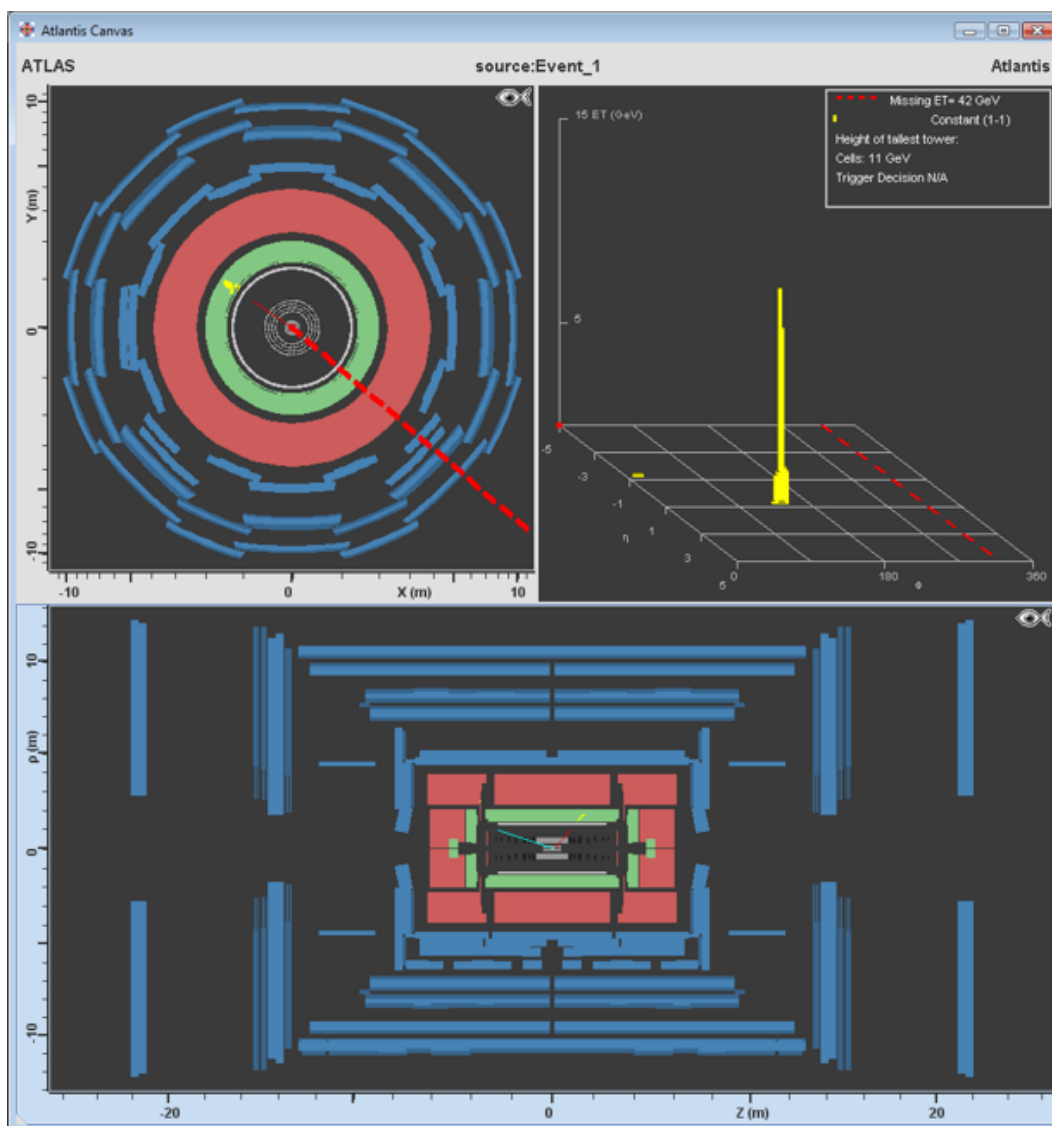
Pokud nastavíme ohraničení příčné hybnosti větší než 5 GeV ($P_t > 5 \text{ GeV}$) převážná část trajektorií z obrázku zmizí. Poslední trajektorie, která zbývá, nemíří ani k jedné ze dvou žlutých věží. Jelikož k věžím nemíří stopy s vyšší příčnou hybností (P_t), nejedná se nejspíše o událost elektronu nebo pozitronu. Protože elektromagnetický kalorimetr ukazuje odevzdání velké části energie, tak půjde patrně o dva fotony. [2]



Obr. 62: Zvětšený boční pohled. [8]

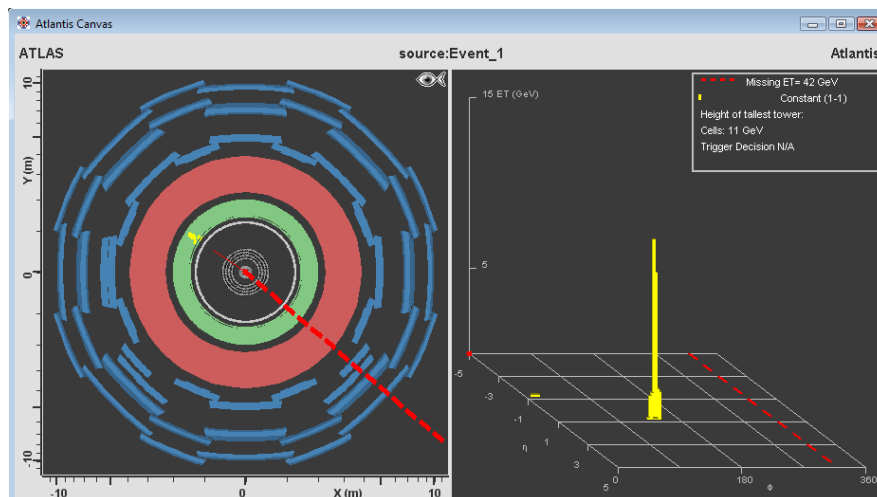
Zvětšený boční pohled ukazuje velké shluky žlutých polí, které se nacházejí uprostřed dolní části a nahoře v pravé části elektromagnetického kalorimetru. Opět lze vidět, že k nim nevedou žádné stopy. Tabulka „Physics Objects“ zobrazuje 2 rekonstruované objekty. Jak již víme z předchozího vyhodnocení, nejde o elektrony nebo pozitrony, půjde tedy nejspíše o fotony. Klikem je lze vybrat a zvolit volbu fotony. [2]

2.5.4 Neutrino



Obr. 63: Neutrino: chybí příčná energie (Pt). [8]

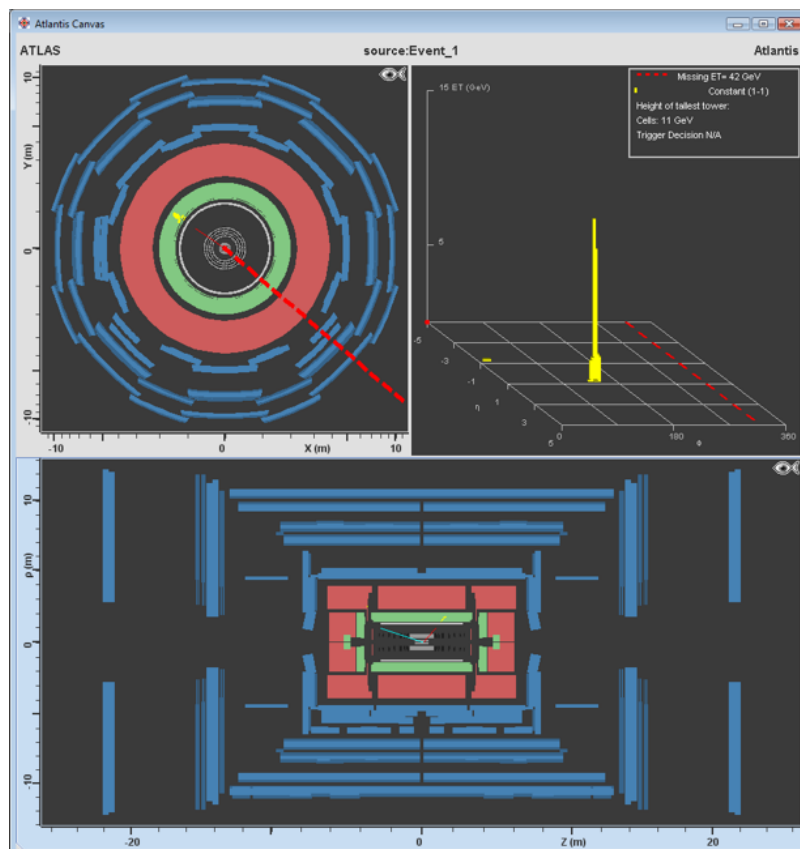
Detektor ATLAS nezachytí neutrino ani v jedné ze svých částí. Neinteragují a nenechají po sobě stopu v dráhovém detektoru, kalorimetru ani v mionové komoře. Jak je lze tedy detekovat, když nejsou vidět? Kvarky i gluony se před srážkou pohybují vždy rovnoběžně s osou svazku a jejich rychlost tedy nemá řádnou složku, která by byla kolmá na osu svazku (jejich příčná hybnost je tedy nulová). V důsledku zákona zachování hybnosti musí být celková příčná hybnost zachována a tedy nulová i po srážce. Jestliže naměřené hodnoty ukazují jiné hodnoty, mohly být výsledkem srážky částice, které detektor ze svého principu nevidí, nebo jednoduše detektor nezachytil některé z „obyčejných“ částic, jelikož měření není dokonalé. [2]



Obr. 64: Neutrino: červená stopa. [8]

Příčná hybnost, která chybí se v detektoru ATLAS určí z energie, která byla odevzdána v kalorimetrech. Jestliže se ukáže nerovnováha v energetické bilanci označující se jako „Missing ET“ (chybějící příčná energie), mohlo se stát, že výsledkem srážky bylo neutrino a část energie (hybnosti) ním byla odnesena. Program HYPATIA umožňuje dva způsoby, jak to zjistit:

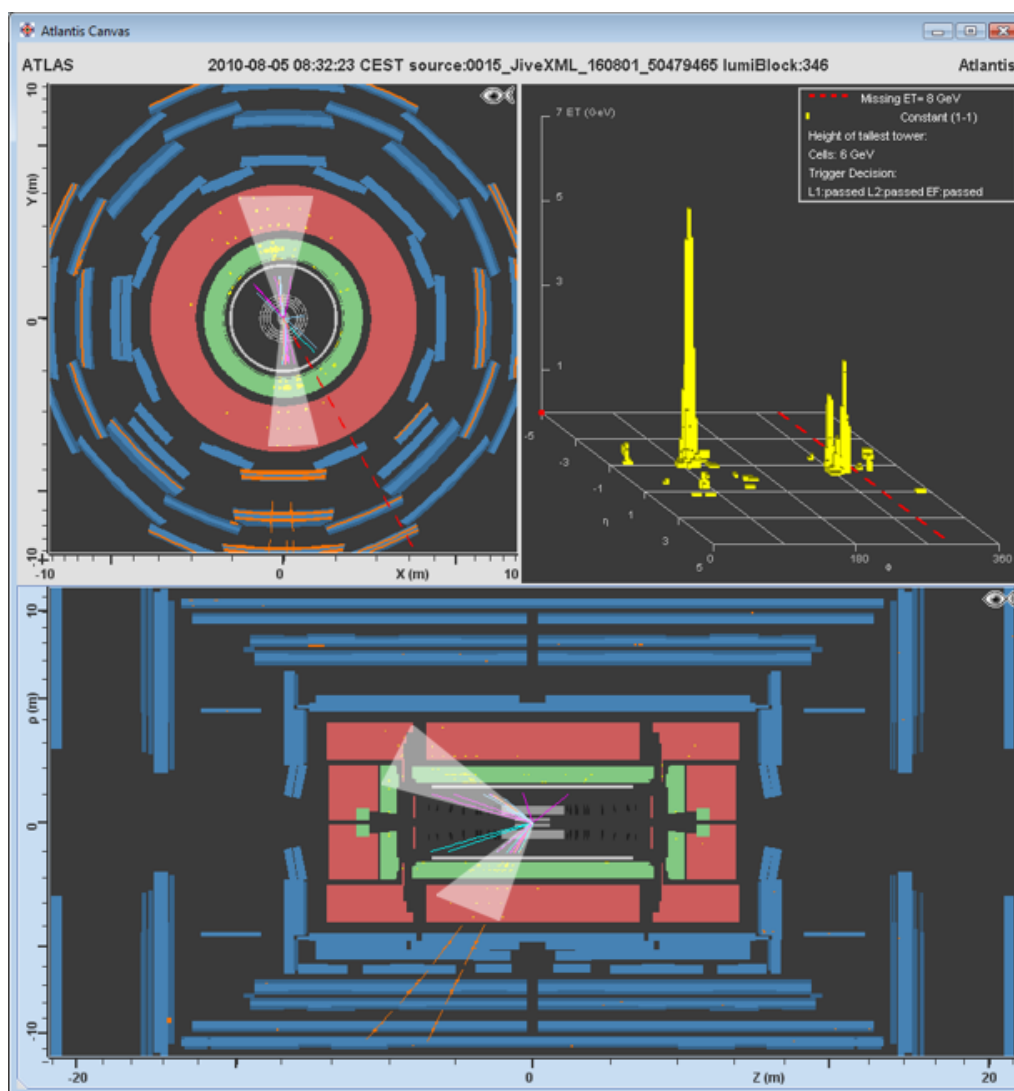
1. Podle hodnoty chybějící příčné energie – Missing ET, nacházející se v okně „Track Momenta Window“ (horní část okna).
2. Pomocí červené přerušované stopy v příčném náhledu události. Tato stopa vytyčuje směr kolmý na osu svazku, v němž energie „chybí“. Podle tloušťky čáry se dá usuzovat o tom, jak velká je část chybějící příčné energie (hybnosti). [2]



Obr. 65: Neutrino. [8]

Na záznamu srážky výše je v podstatě pouze elektron a neutrino. Není tu téměř žádná jiná částice, a tak je v důsledku zákona zachování hybnosti, rozdělení celkové příčné hybnosti distribuováno mezi těmito dvěma částicemi. Každá si odnese svou část hybnosti v téměř opačném směru než ta druhá. Program určí jaká část energie chybí a vykreslí ji právě ve směru, kde příčná hybnost chybí. Tlustou červenou přerušovanou stopou tedy program ukazuje skutečnost, že v dané události byla přítomna jedna nebo více nedetekovatelných částic. Při menších hodnotách chybějící hybnosti, např. 10 – 20 GeV, je červená přerušovaná stopa tenká a to může být způsobeno i nepřesností nebo chybami ve fungování detektoru. [2]

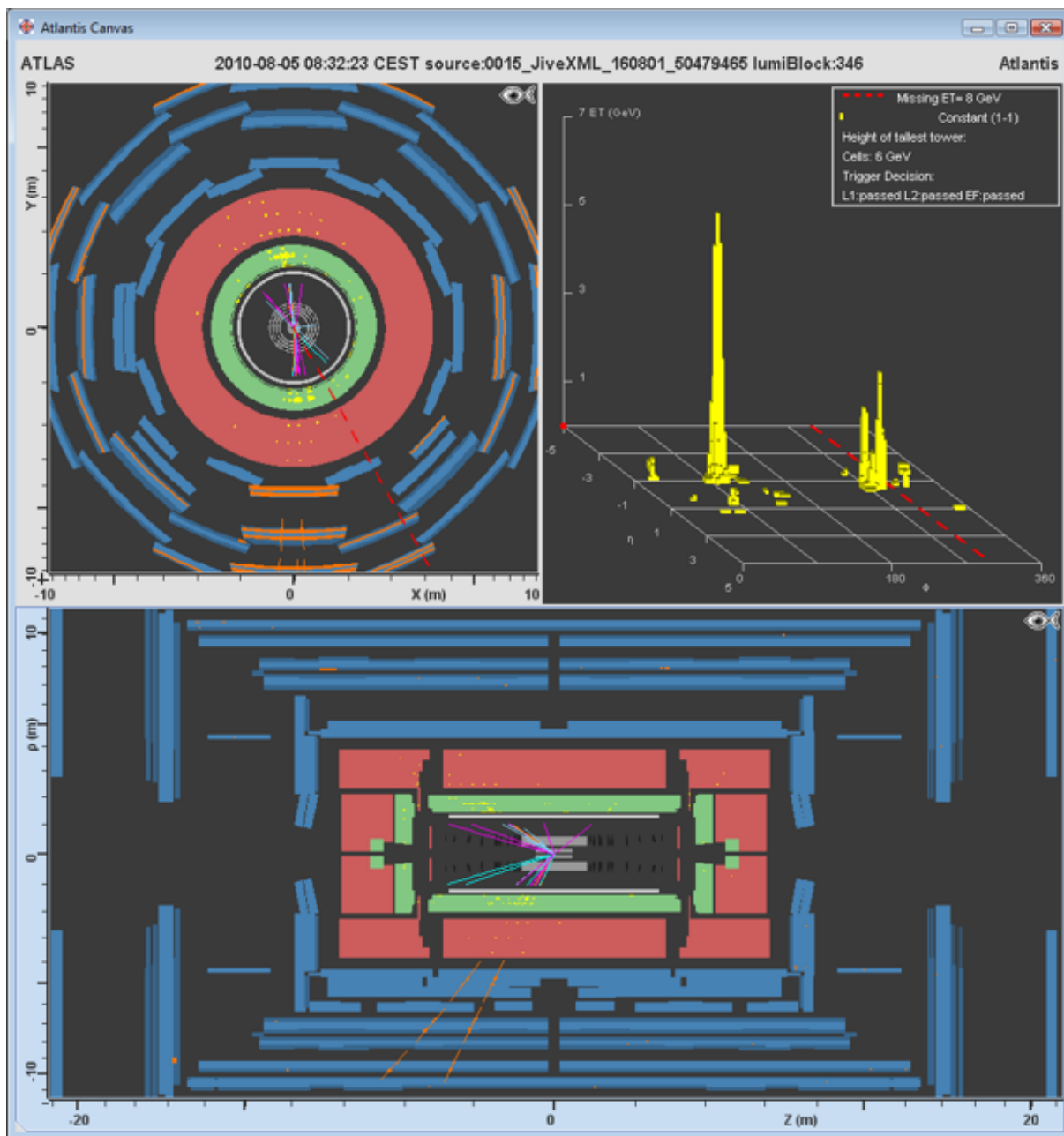
2.5.5 Jety



Obr. 66: Jety - výtrysky částic. [8]

Událost na obrázku 64 zobrazuje tzv. jety, též také „výtrysky“ částic. Všechny jety představují balík nebo svazek více částic, které interagují především silně (hadrony). Ve vnitřním detektoru zanechají stopu pouze částice, které jsou elektricky nabitě. Když budeme pokračovat dále ve směru stop, můžeme vidět významný záchyt v kalorimetrech. Vidíme také značky, neodpovídající žádné ze stop a které značí, že zde energii odevzdaly elektricky nenabitě částice. [2]

Velké množství záchytů máme hlavně v hadronovém kalorimetru. Je to z důvodu, že všechny jety vznikají z kvarků, antikvarků nebo gluonů, které se uvolnily při srážce. Aby byla překonána síla držící je uvnitř protonu, je potřeba velké množství energie. Určité množství způsobí přeměnu na další páry kvarků a antikvarků pohybující se téměř totožně s původním směrem. Dále se spojují do vázaného stavu, čímž vzniknou nové částice – hadrony. Právě hadrony vytváří jety, o které se teď zajímáme (na záznamu doplněné o šedé pozadí). [2]



Obr. 67: Jety a jejich zobrazení. [8]

Pokud se tedy částice pohybují ve skupině, zanechají stopu ve vnitřním detektoru a záznamy v elektromagnetickém a hadronovém kalorimetru, souvisí s „původními“ kvarky, antikvarky a gluony, které vylétly ze srážky a nazýváme je jety. [2]

Zde je odkaz na kterém si můžete výše naučené znalosti ověřit:

https://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath_exercise1.htm

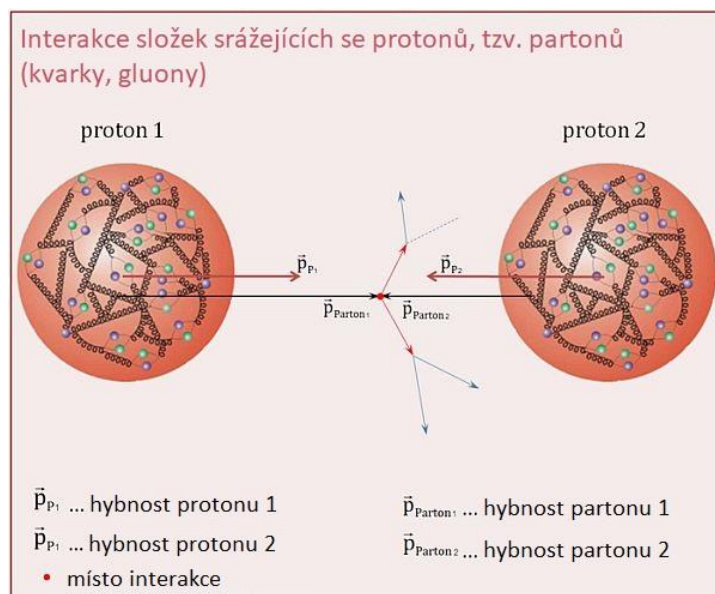
2.6 Rozpoznávání událostí

V následujících řádcích si řekneme, jakým způsobem lze rozpoznávat jednotlivé události při srážkách protonů a přiřadíme jim odpovídající fyzikální jevy. Rozebereme si boson Z, jak vzniká během srážek na LHC a jakým způsobem ho najít v událostech zobrazených programem HYPATIA. [2]

2.6.1 Srážka protonů

Na urychlovači LHC jsou urychlovány a následně přiváděny ke srážkám miliardy protonů. Ty jsou složeny z kvarků, které spojují gluony. Při srážce protonů se tedy sráží jednotlivé konstituenty (kvarky a gluony). [2]

Obrázek 68 ukazuje dvojici protonů okamžik předtím, než se srazí. Všechny protony obsahují velké množství kvarků a gluonů. Víme, že proton je tvořen třemi „valenčními“ kvarky ale to není vše, je v něm ještě celá řada „mořských“ nebo také „virtuálních“ kvarků a antikvarků, jež se opakovaně vytváří z gluonů a mění se zpět na ně. [2]



Obr. 68: Protony před srážkou. [9]

Pokud dojde ke srážce protonů s tak velkou energií, jaké dosahují v LHC, vzniknou všechny možné druhy částic – nejen těch ze kterých je tvořena „běžná“ hmota, ale také těch co existovaly pouze pár okamžiků po Velkém třesku. [2]

Hmotnost nově vzniklých částic je většinou, v porovnání s původními, mnohem vyšší, což je umožněno vztahem $E = m \cdot c^2$. To tedy znamená, že energie vstupující do srážky z ní může vyjít v podobě hmotnosti. [2]

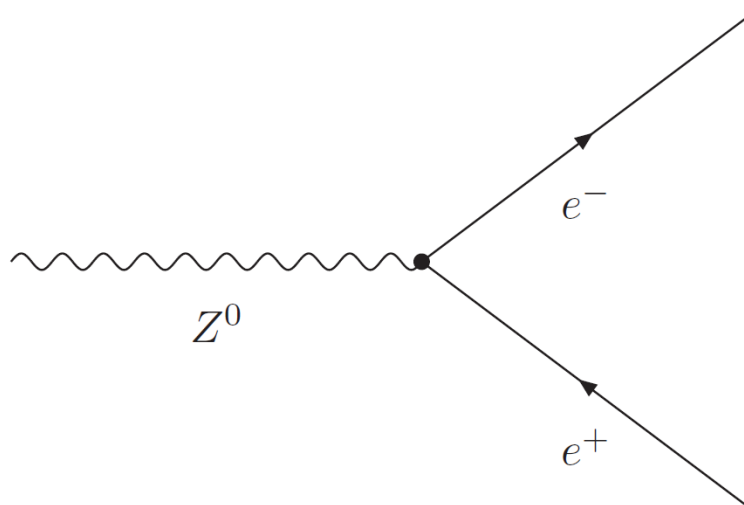
2.6.2 Boson Z v událostech

Nyní bude důležité umět vybrat srážky, při kterých došlo ke vzniku bosonu Z. Problémem by mohlo být, že boson Z je těžkou částicí s dobou života pouze $3 \cdot 10^{-25}$ s. Z tohoto důvodu se zaměříme na jeho produkty, jelikož víme, jakým způsobem se boson Z rozpadá. Způsobů rozpadu bosonu Z je více. [2]

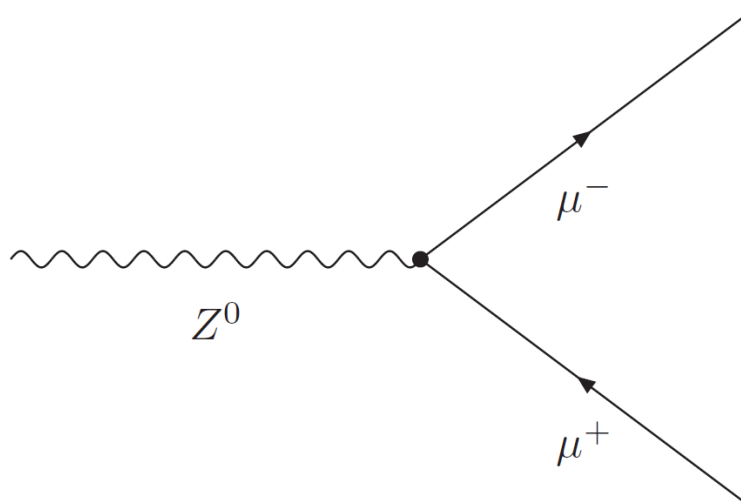
Rozpad bosonu Z musí také dodržovat přírodní zákony. To, mimo jiné, znamená, že celkový náboj všech výsledných částic je nulový a jestliže se boson Z rozpadne na dvě částice, musí to být dvojice částice a antičástice. [2]

Existuje celkem 24 možných kombinací kvarků a leptonů, my se ale budeme soustředit pouze na 2 rozpadové produkty, které se „nejlépe“ detekují. Jedná se o páry elektronu a pozitronu nebo mionu a antimionu. [2]

Následující obrázky znázorňují přeměnu těžkého bosonu Z na pár leptonů.



Obr. 69: Rozpad bosonu Z na elektron a pozitron. [10]



Obr. 70: Rozpad bosonu Z na mion a antimion. [10]

Elektrony, miony a jejich antičástice jsou tak stabilní a mají dostatečnou životnost na to, aby byly detektorem zachyceny. Tato skutečnost je pro nás velmi významná a dovoluje nám to detekovat částice s krátkou životností, jakou je boson Z . [2]

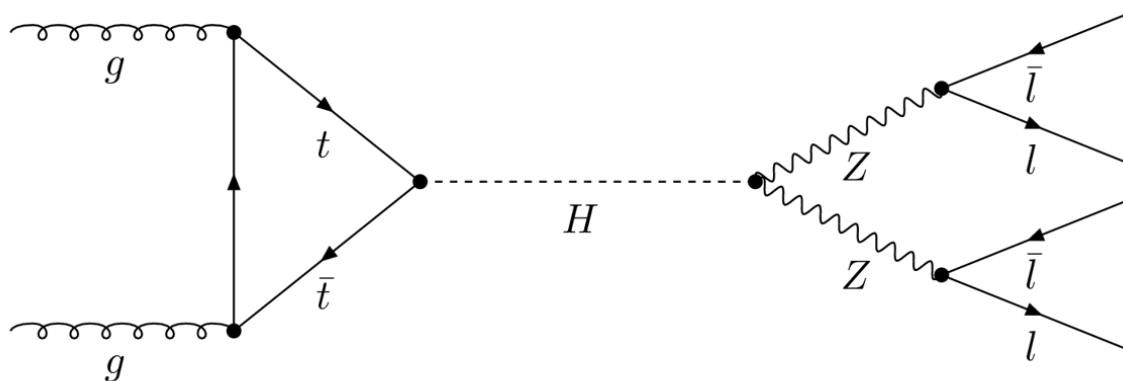
2.6.3 Higgsův boson v událostech

Další na řadě jsou srážky, během kterých může vznikat Higgsův boson. Hmotnost Higgsova bosonu je přibližně 125 GeV, má tedy ještě větší hmotnost než boson Z a kratší dobu života. Z tohoto důvodu se opět zaměříme na rozpadové produkty, jelikož víme, jakým způsobem se Higgsův boson rozpadá. Způsobů rozpadu Higgsova bosonu je více. [2]

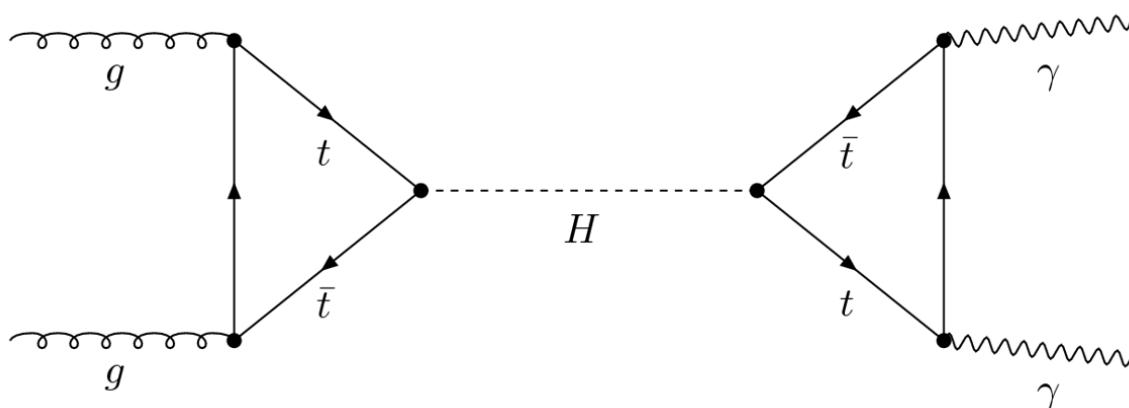
Higgsův boson a jeho vlastnosti jsou specifické jeho úlohou v mechanismu částic, kde zajišťuje jejich nenulovou hmotnost a proto je jeho interakce silnější s těžkými částicemi. [2]

Naše hledání se soustředí na 2 rozpadové produkty, které se „nejlépe“ detekují. Jedná se o pár bosonu ZZ nebo dvojici fotonů $\gamma\gamma$. [2]

Obrázky níže znázorňují rozpad Higgsova bosonu.



Obr. 71: Rozpad Higgsova bosonu na pár ZZ. [11]



Obr. 72: Rozpad Higgsova bosonu na dvojici fotonů. [11]

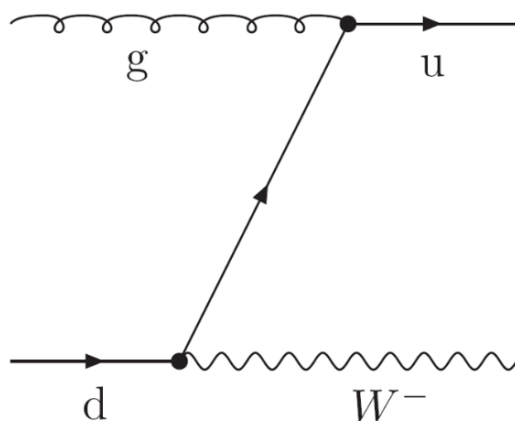
Leptony a fotony jsou tak stabilní a mají dostatečnou životnost na to, aby byly detektorem zachyceny. To je pro nás velmi významné a dovoluje nám to detekovat částice s krátkou životností jakou je Higgsův boson. [2]

2.6.4 Události jako pozadí

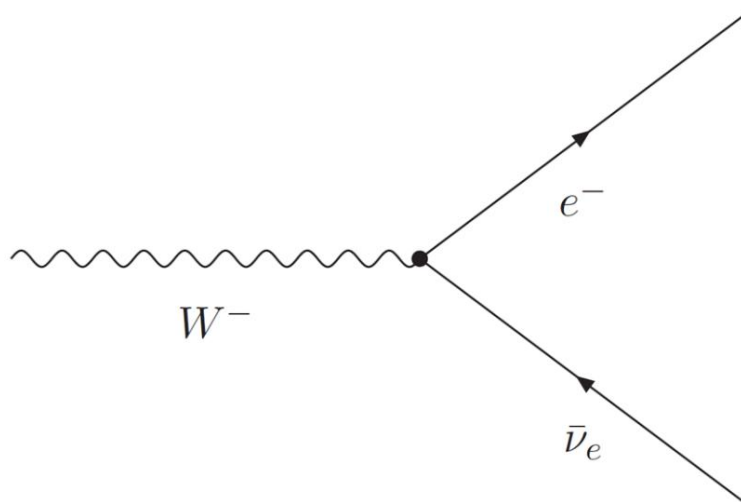
Během srážek protonů se objevují kromě bosonu Z a Higgsova bosonu také další částice. Může zde vzniknout například boson W a t-kvark. Jde o částice s vysokou hmotností a rozpadnou se okamžitě po vzniku, podobně jako Higgsova boson nebo boson Z. [2]

Během srážek se často objeví také „výtrysky“ částic známé jako jety, při kterých nevzniká boson Z, W ani t-kvark. Tyto události, při kterých vzniká boson W, t-kvark nebo jety a občas vypadají jako takzvaný „signál“ (událost, při níž vzniká částice, kterou hledáme), nazýváme pozadí. [2]

Obrázky 73 a 74 znázorňují vznik a rozpad bosonu W^- .



Obr. 73: Vznik bosonu W^- . [12]



Obr. 74: Rozpad bosonu W^- . [12]

Vidíme, že boson W^- vznikne, když se srazí gluon s d -kvarkem a následně se rozpadne na elektron a elektronové antineutrino. Způsobů vzniku a rozpadu bosonu W^- je ovšem více. Pokud bychom srovnali produkty rozpadu s bosonem Z, který je neutrální a rozpadové produkty, jenž musí mít nulový součet nábojů, vidíme, že boson W s nábojem ± 1 se nemůže rozpadat na pár částice a její antičástice. [2]

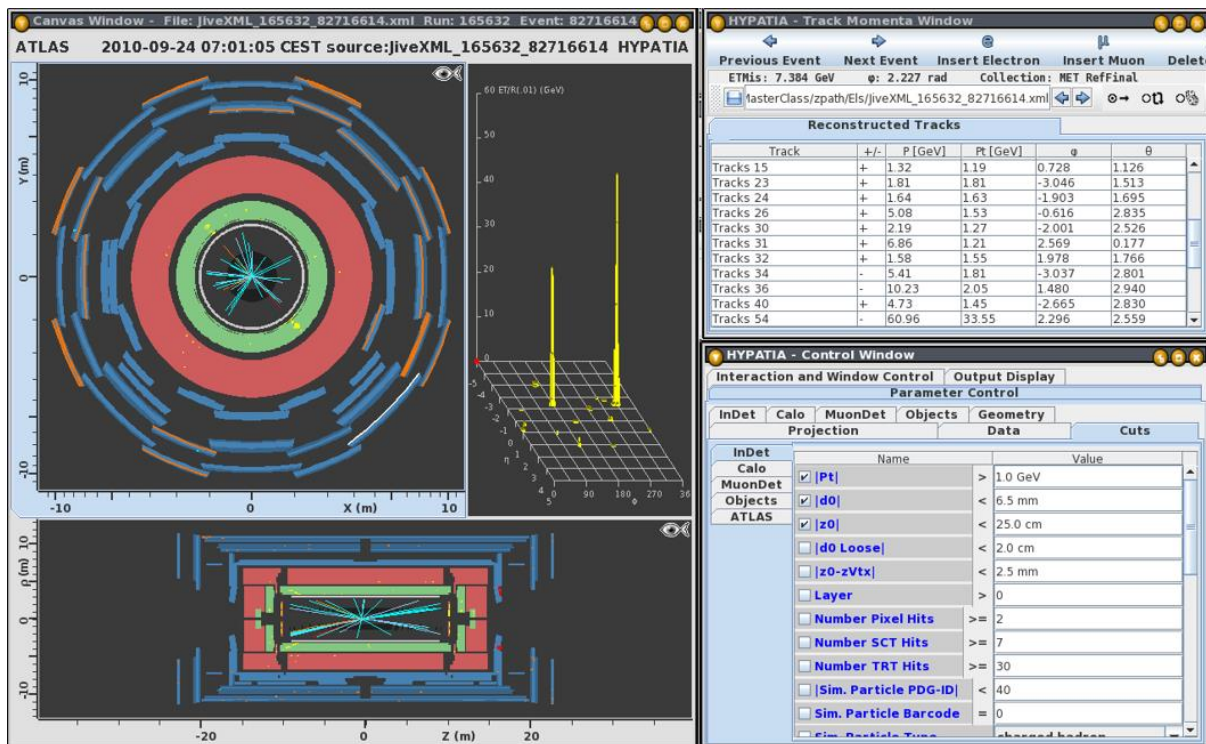
2.7 Zobrazování událostí

Ted' se podíváme, jak program HYPATIA zobrazuje události, o kterých jsme se zmiňovali výše. Nyní se nám hodí vše, co jsme se o rozpoznávání jednotlivých událostí a elementárních částic dozvěděli. Zjistíme jak rozlišit událost, která představuje signál od té, která tvoří pozadí. [2]

Snadno rozpoznatelné jsou leptony – antileptony a událost se čtyřmi leptony (elektrony a miony). Těžší to může být při událostech s dvěma fotony, jestliže k „energetickému klastru zaznamenanému v elektromagnetickém kalorimetru (ECAL) směřují i trajektorie nabitých částic“. [8]

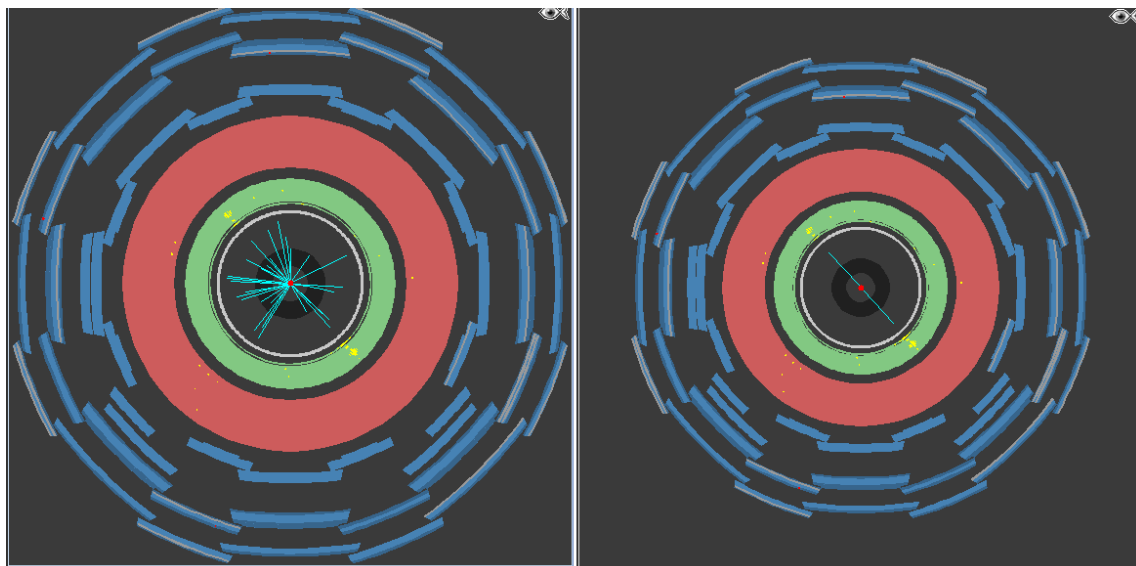
2.7.1 Procesy, které jsou signálem

Rozpad bosonu Z na pár elektron-pozitron: $Z \rightarrow e^- + e^+$



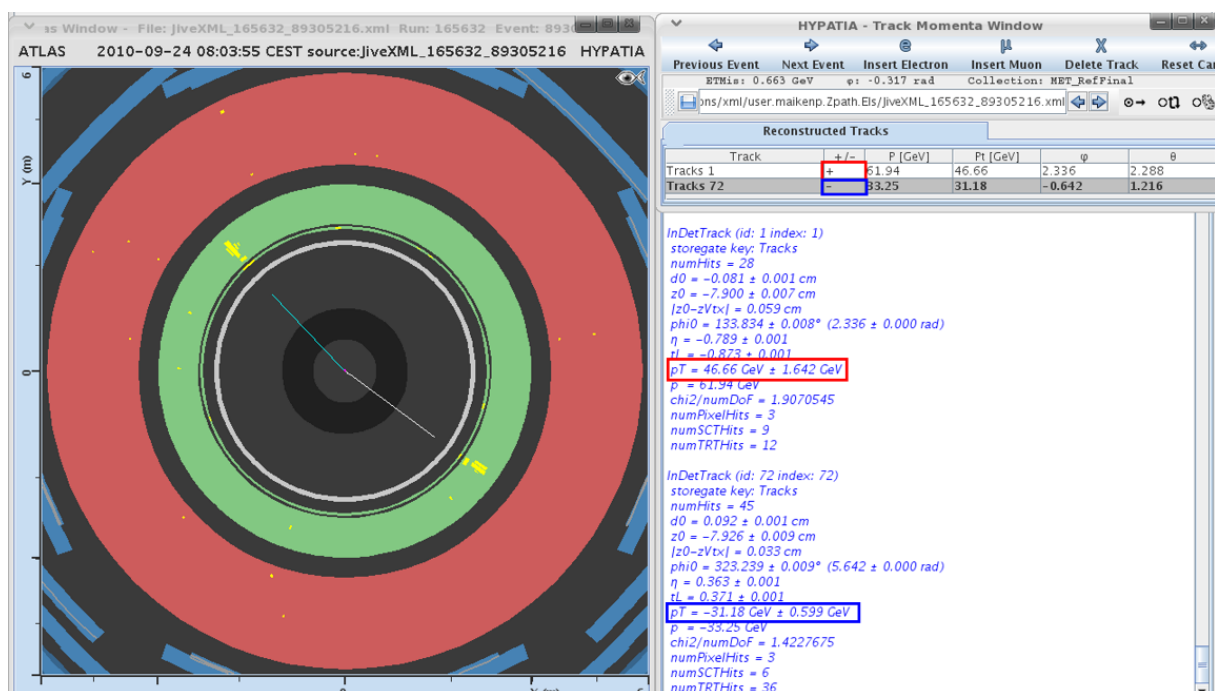
Obr. 75: Boson Z na scéně. [13]

Oba pohledy ukazují stopy v dráhovém detektoru (značeno žlutými obdélníčky) a určitou činnost v elektromagnetickém kalorimetru (zelené části) a je tedy zřejmé, že to budou elektrony. [2]



Obr. 76: Událost s bosonem Z: nastavení minimální hodnoty příčné hybnosti. [13]

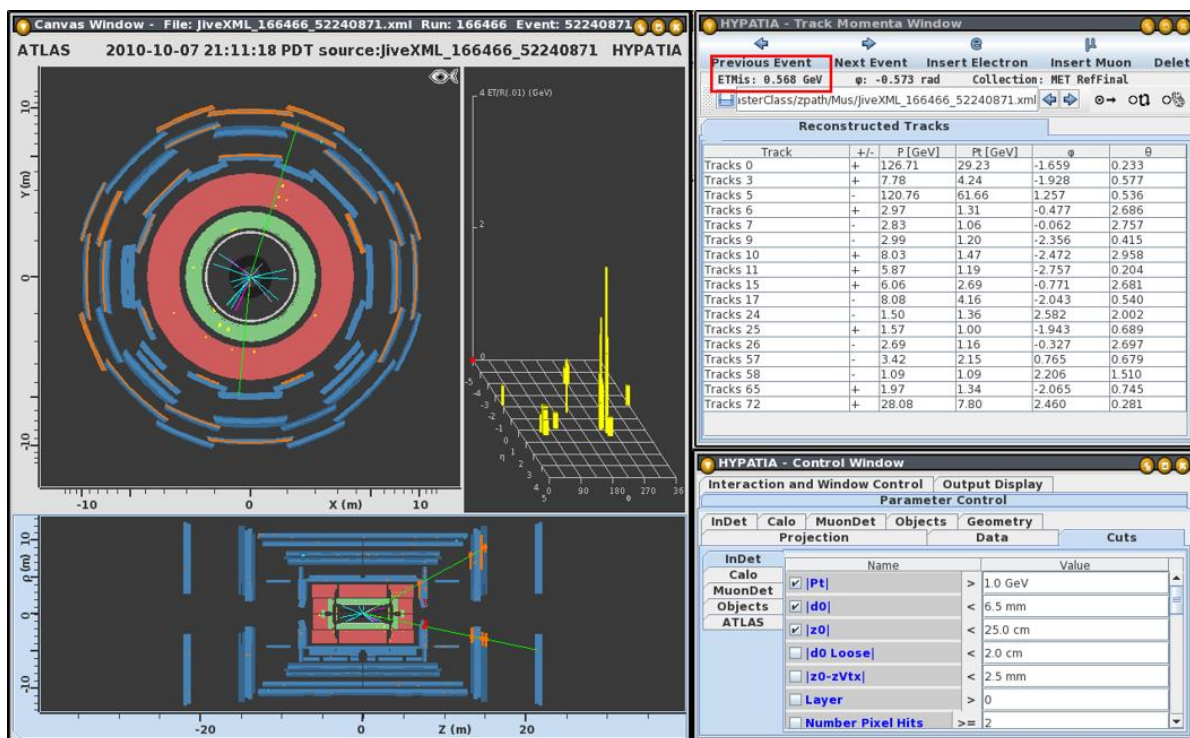
První obrázek s bočním pohledem ukazuje velké množství stop částic. Pokud chceme vidět jen ty částice, které mají větší příčnou hybnost, lze nastavit cut, tedy „řez“, dané veličiny. Poté se zobrazí jen ty částice, které mají větší příčnou hybnost než definovaná minimální hodnota (konkrétní hodnota musí být zvolena). Na výše zobrazené události byla vhodná hodnota 25 GeV. Toto nastavení zobrazí jen ty částice, které mají příčnou hybnost větší než 25 GeV. [2]



Obr. 77: Událost s bosonem Z: zvětšení koncového pohledu. [13]

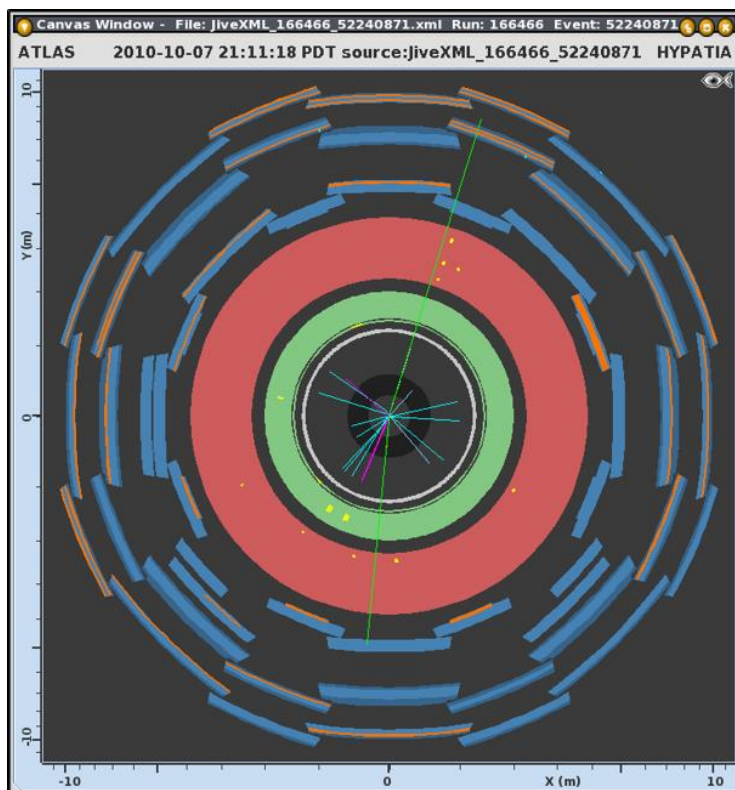
Při zvětšení koncového pohledu, vše svědčí o tom, že jde o pár elektron-positron, částice mají rozdílný náboj a opačný směr. Nejsou zde známky žádného neutrína, protože je zde nulová chybějící příčná hybnost a to je typické pro události $Z \rightarrow e^- + e^+$. [2]

Rozpad bosonu Z na pár mion-antimion: $Z \rightarrow \mu^- + \mu^+$



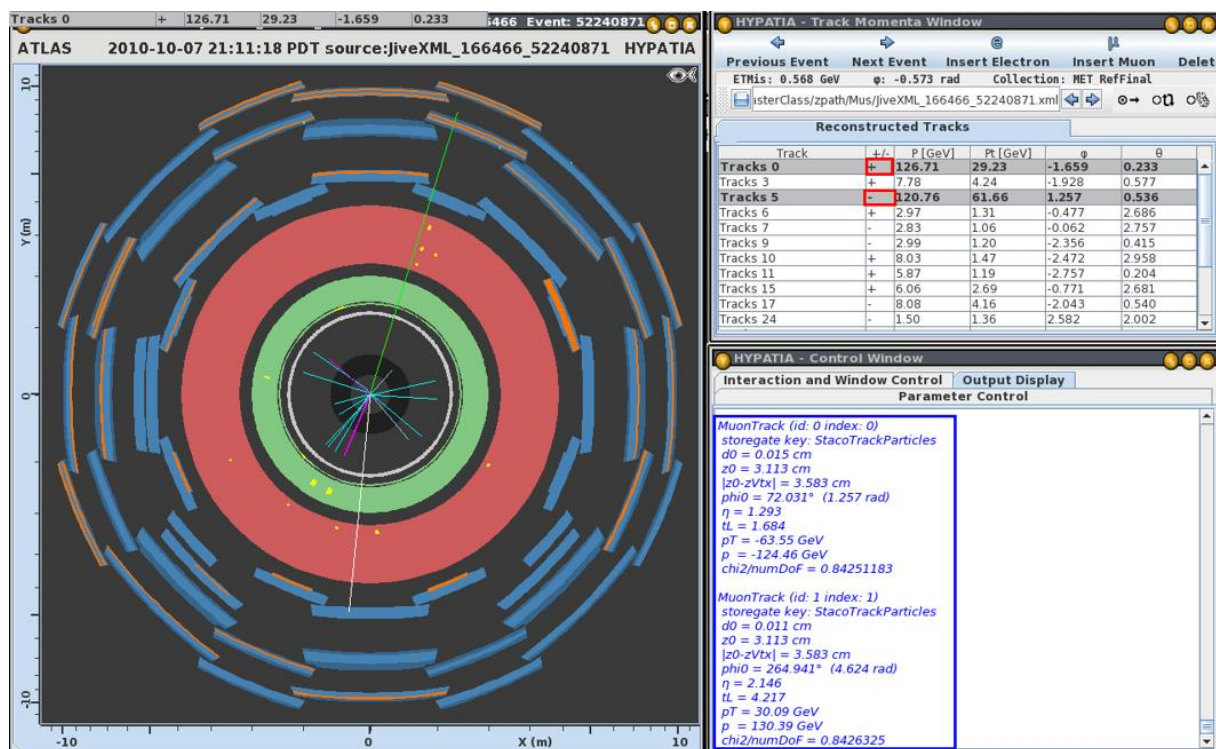
Obr. 78: Boson Z znova na scéně. [13]

Oba pohledy ukazují stopy po různých částicích, což je typickým úkazem pro události, které jsou zaznamenány na detektoru ATLAS. Protože je zde nulová chybějící příčná hybnost je jasné, že nevzniklo žádné neutrino. Dále lze vidět dvojici mionů vylétající v opačném směru. [2]



Obr. 79: Událost s bosonem Z: zvětšení koncového pohledu. [13]

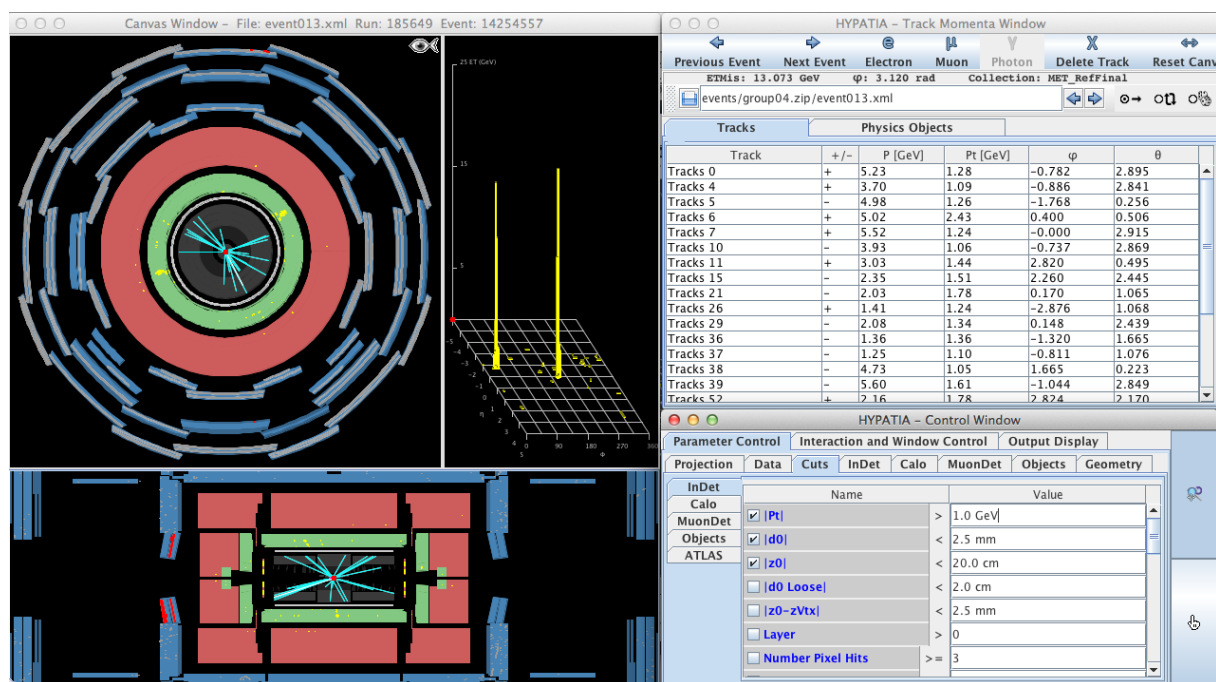
Na zvětšeném koncovém pohledu lze vidět, že dvojice mionů má opačný směr pohybu. To svědčí o možnosti, že vznikly z jedné částice, u které došlo po jejím vzniku k rozpadu. [2]



Obr. 80: Událost s bosonem Z. [13]

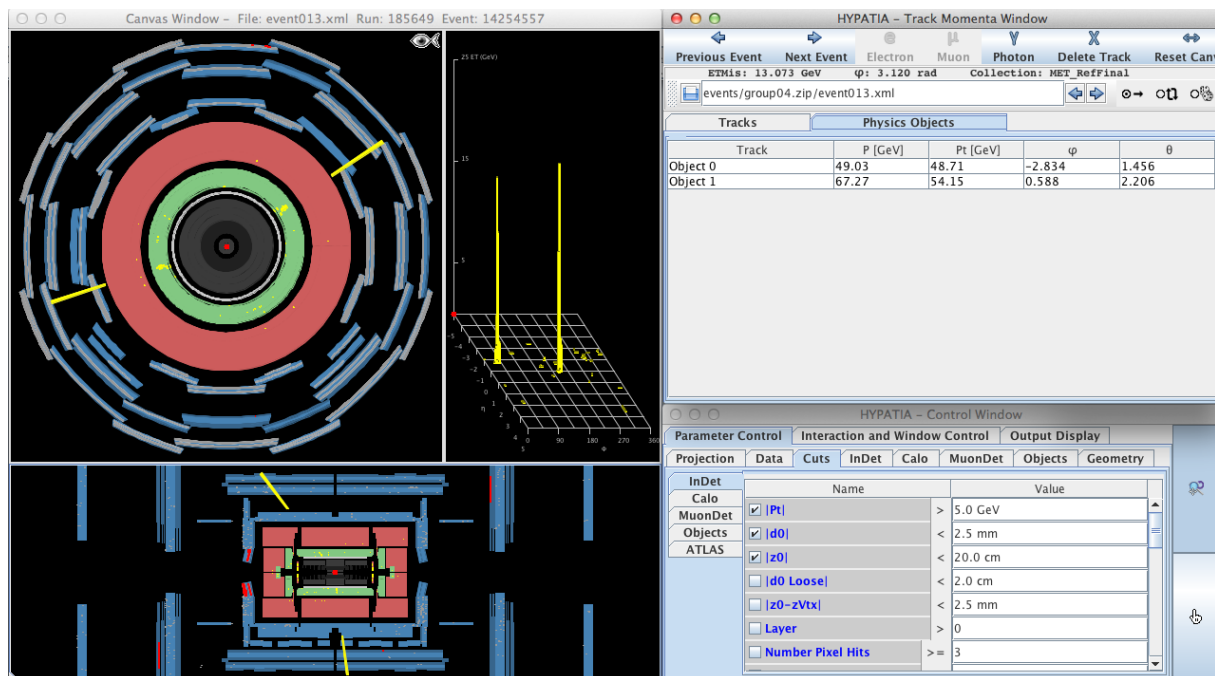
Nyní vidíme, že dvojice mionů jdoucí proti sobě má rozdílný náboj. To svědčí o tom, že zde vidíme pár mion-antimion a jde o událost s bosonem Z. [2]

Událost s dvojicí fotonů: $\gamma\gamma$ – událost 1.



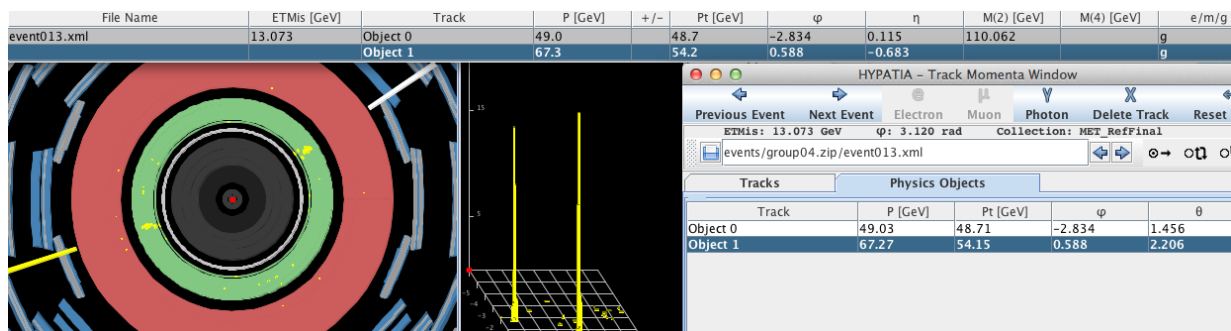
Obr. 81: Dvojice klastrů. [13]

Na výše zobrazených pohledech lze vidět více stop z dráhového detektoru a záznam (žluté klastry) z elektromagnetického kalorimetru (zelená část). Na digramu v pravé části vidíme tzv. lego plot (dvojice žlutých „věží“), které odpovídají důležitým klastrům v kalorimetru. Nejspíše to nejsou elektrony ale fotony, protože ke klastrům nevedou žádné stopy částic s nábojem. [2]



Obr. 82: Událost s dvojicí fotonů - nastavení minimální hodnoty příčné hybnosti. [13]

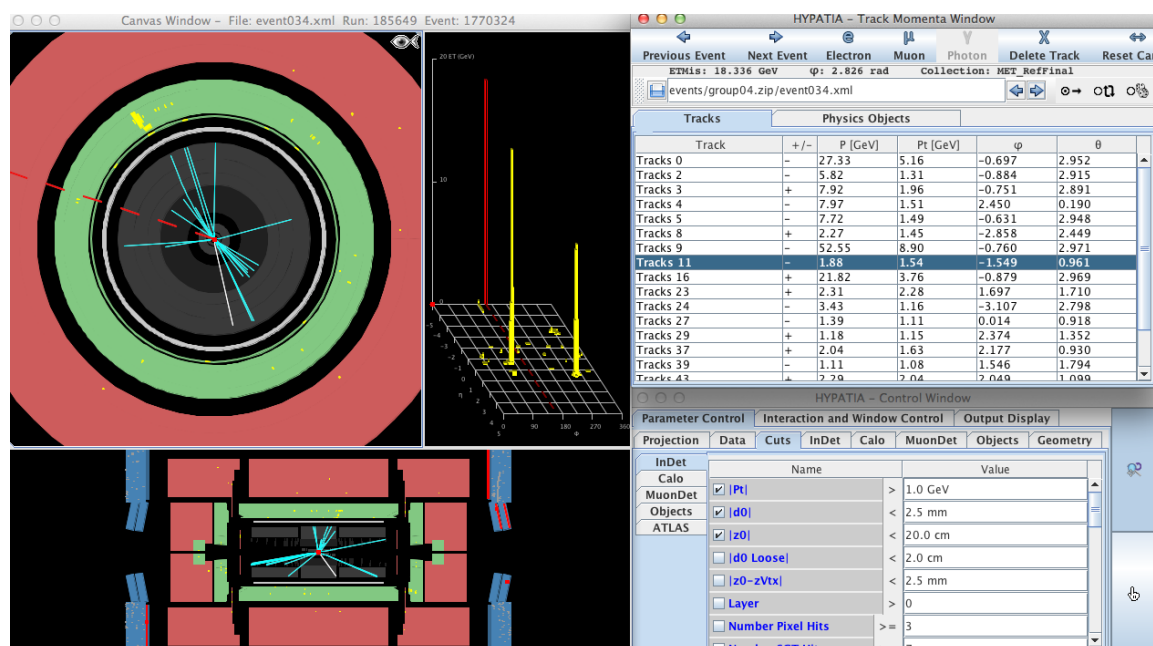
Pokud změníme minimální hodnotu pro příčnou hybnost z 1 na 5 GeV nezůstane ve vnitřním detektoru žádná stopa. Panel Track Momenta Windows umožňuje přepnout z „Tracks“ (stopy) na „Physics Objects“ (fyzikální objekty). Fyzikální objekty v naší události jsou fotony, jelikož žádné stopy částic s nábojem se nepohybují jejich směrem. Když zvolíme fyzikální objekty zobrazí se další stopy, které směřují na klastry. Z výsledku je jasné, že šlo o dvou fotonovou událost. [2]



Obr. 83: Událost s dvojicí fotonů - invariantní hmotnost. [13]

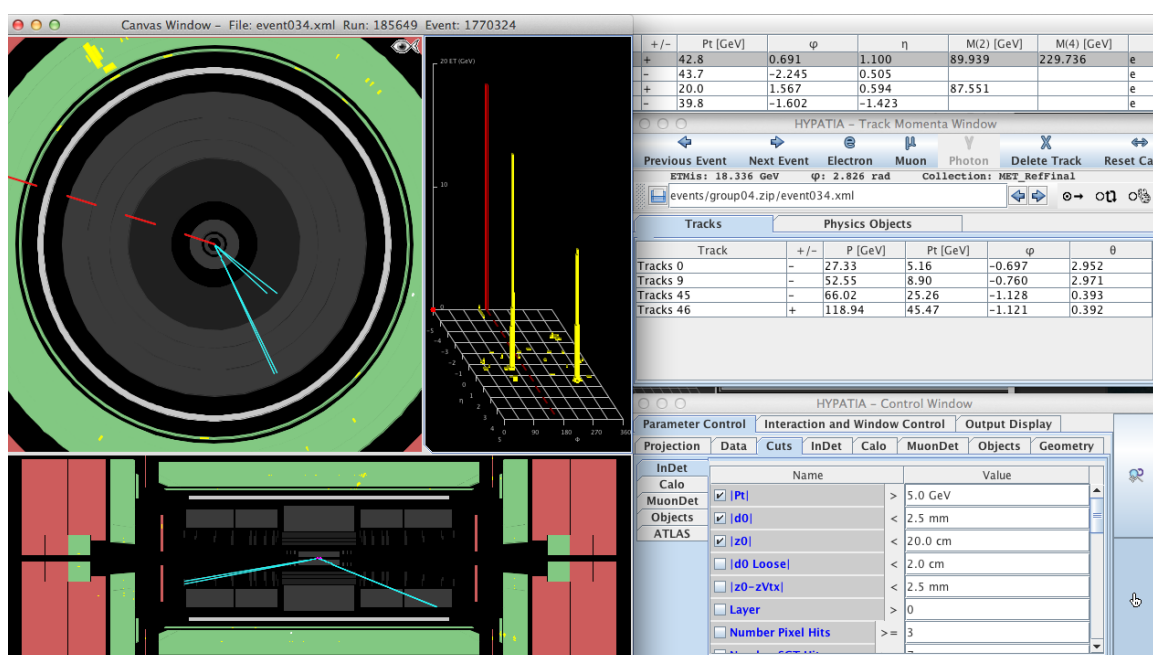
Dvojici fotonů je možné umístit do okna klidových hmotností volbou „Photon“. Tato dvojice fotonů má klidovou hmotnost 110,1 GeV. [2]

Událost s dvojicí fotonů: $\gamma\gamma$ – událost 2.



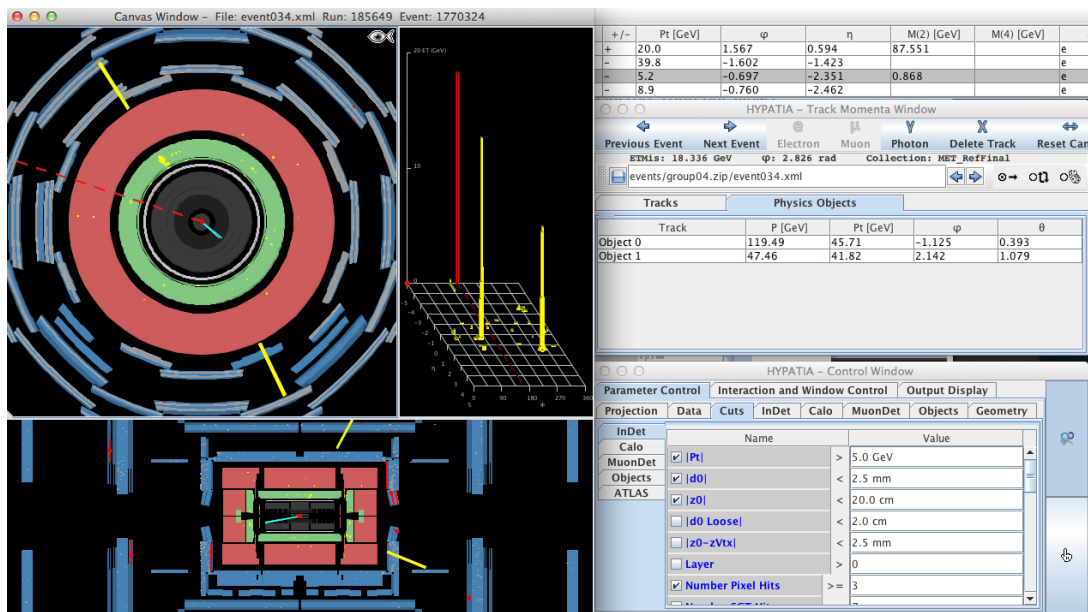
Obr. 84: Událost s fotony – dvojice věží v grafu energie. [13]

Událost na obrázku 84 zobrazuje dvojici klastrů v elektromagnetickém kalorimetru (žlutá barva), kterým náleží dvojice věží v grafu. [2]



Obr. 85: Událost s fotony – stopy ke klastrům. [13]

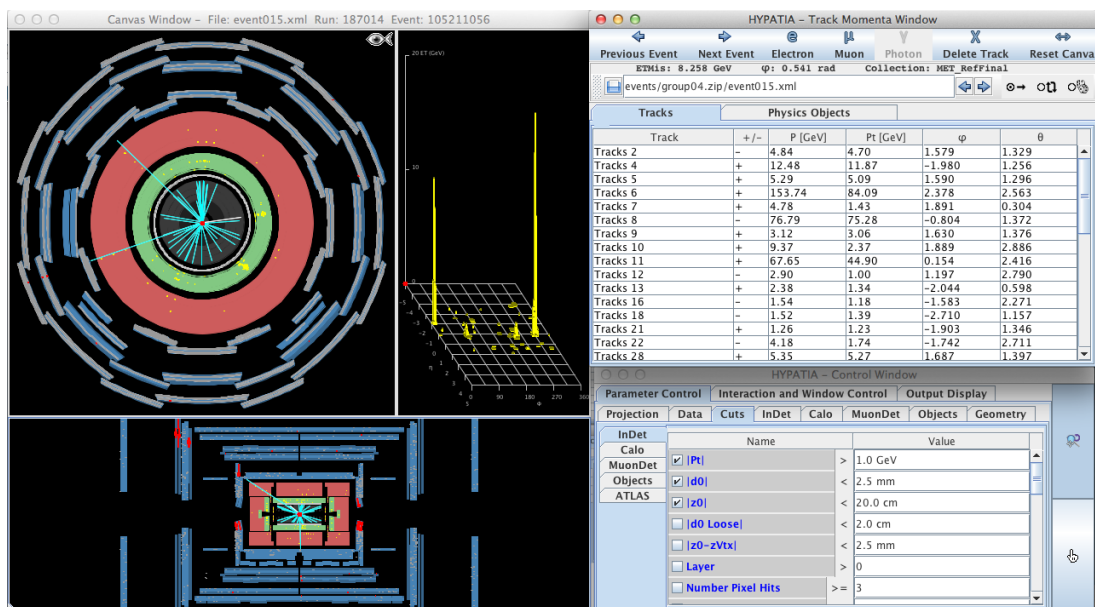
Jestliže nastavíme hranici příčné hybnosti na 5 GeV, pořád uvidíme dvojici klastrů. K jednomu z nich nemíří žádná stopa a k druhému dvě stopy vedle sebe. Dvojice stop, která směřuje k jednomu z klastrů (odpovídají číslům 45, 46 v tabulce Physics Objects v horní části), má klidovou hmotnost $M(e^+e^-) = 0,2$ GeV odpovídající fotonu, který konvertoval. Tato dvojice stop z náhledu zmizí, jestliže změníme požadavek „Number Pixel Hits“ (počet zásahů pixelů) alespoň na hodnotu 3 (záložka Cuts v okně Control Windows). [2]



Obr. 86: Událost s fotony - klidová hmotnost. [13]

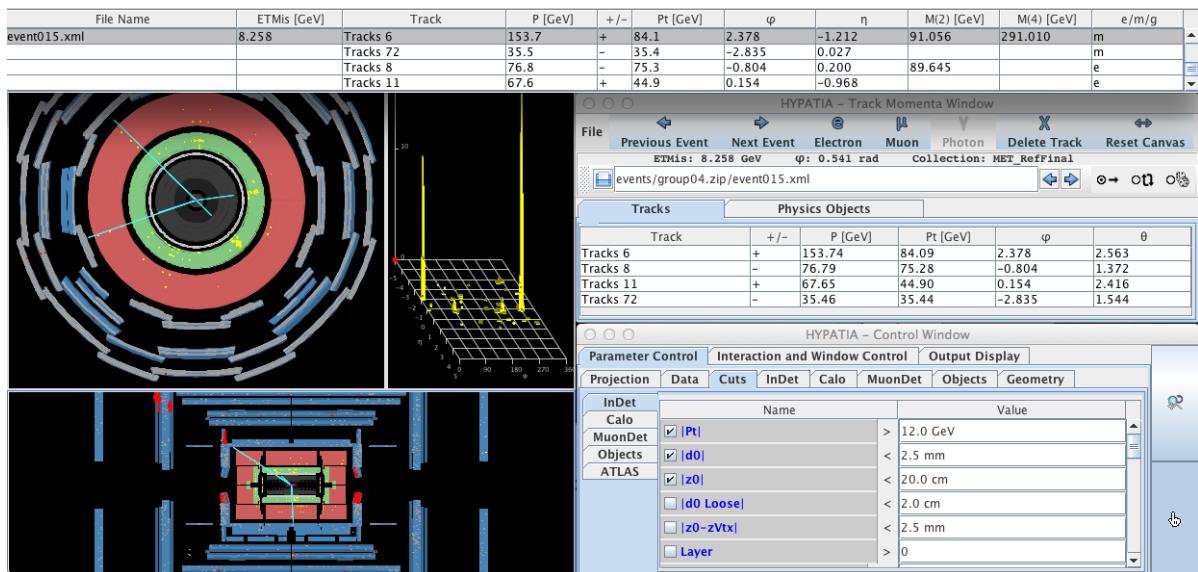
Po nastavení požadavku na zásahy alespoň 3 pixelů zmizela dvojice e^+e^- . Druhé dvojici elektronů neodpovídá žádná energie, která byla v kalorimetru odevzdána a jejich stopy mají stejný náboj. Pravděpodobně tak půjde o náhodnou konstelaci a není potřeba vzít ji v potaz. Pokud navýšíme spodní hranici příčné hybnosti na 10 GeV, zmizí také tyto stopy. Objekty, které zaznamenal kalorimetr, mají klidovou hmotnost $M(\gamma\gamma) = 100,1$ GeV. [2]

Rozpad dvojice bosonů Z na pár elektron-pozitron a mion-antimion: $ZZ \rightarrow e^- + e^+ + \mu^- + \mu^+$



Obr. 87: Událost s bosony Z - čtveřice leptonů. [13]

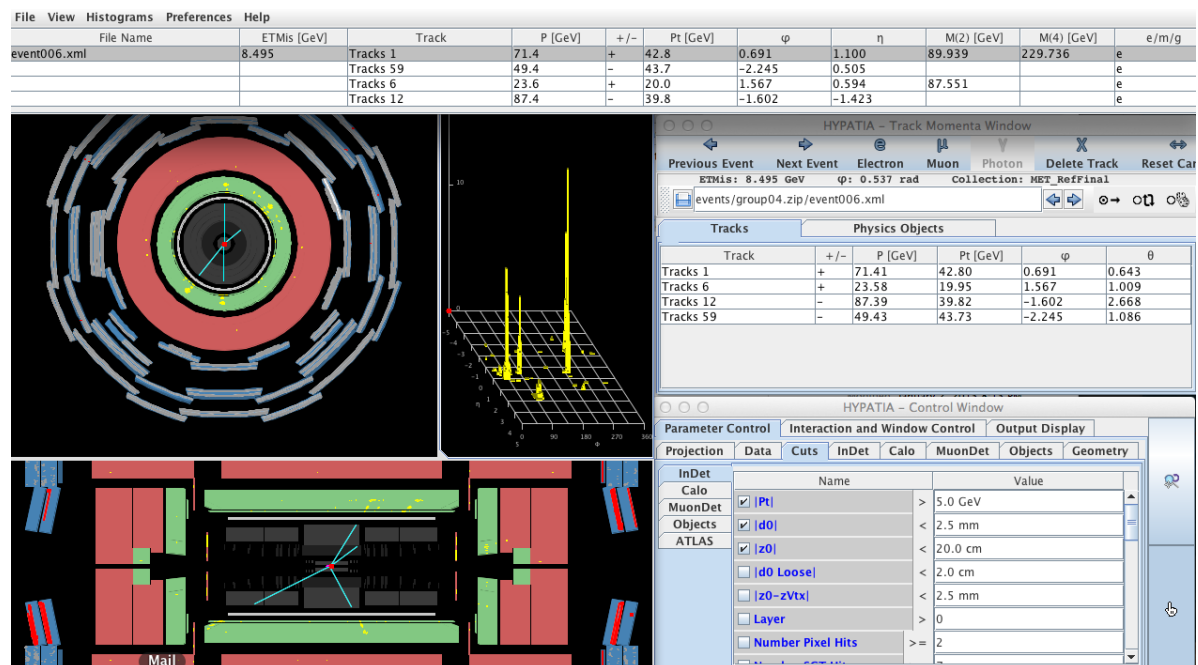
Událost výše zobrazuje mnoho stop. V mionových komorách lze vidět dva zásahy, přesně odpovídající mionům. Dále lze vidět 2 energetické klastry uvnitř elektromagnetického kalorimetru, ke kterým zřejmě míří stopy. Nyní je ale ještě potřeba provést důkladnější rozbor. [2]



Obr. 88: Událost s bosony Z - čtveřice leptonů po nastavení příčné hybnosti. [13]

Jestliže zvýšíme dolní hranici příčné hybnosti na 12 GeV, zůstanou v náhledu pouze 4 trajektorie. Jde o dvojici mionů a elektronů s opačnými náboji. Oba páry vznikly z rozpadu Z – $M(ee) = 89,6$ GeV a $M(\mu\mu) = 91,1$ GeV. Výše je tedy zobrazená událost s bosony Z, které se rozpadají na čtveřici leptonů, jejichž klidová hmotnost je $M(4l) = 291$ GeV. [2]

Rozpad dvojice bosonů Z na pár elektron-pozitron a mion-antimion: $ZZ \rightarrow e^- + e^+ + e^- + e^+$

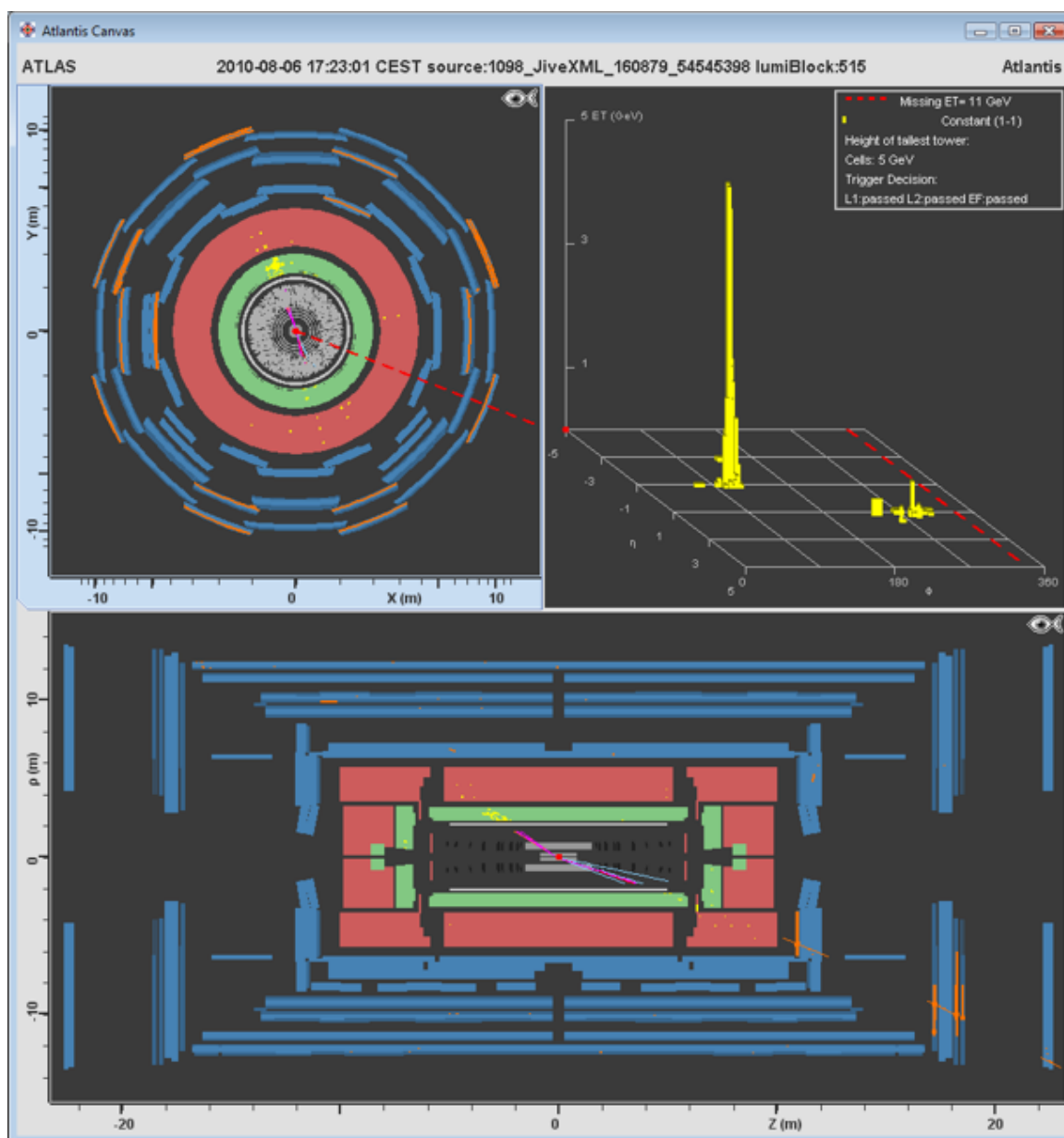


Obr. 89: Událost s bosony Z - čtveřice elektronů. [13]

Jestliže zvýšíme dolní hranici příčné hybnosti na hodnotu 5 GeV, zůstanou zde pouze 4 trajektorie, které směřují ke klastrům v kalorimetru. Oba páry vznikly z rozpadu Z – $M(ee) = 89,9$ GeV a $M(\mu\mu) = 87,6$ GeV. Výše je tedy zobrazená událost s bosony Z, které se rozpadají na čtveřici elektronů, jejichž klidová hmotnost je $M(4e) = 229,7$ GeV. [2]

2.7.2 Procesy, které jsou pozadím

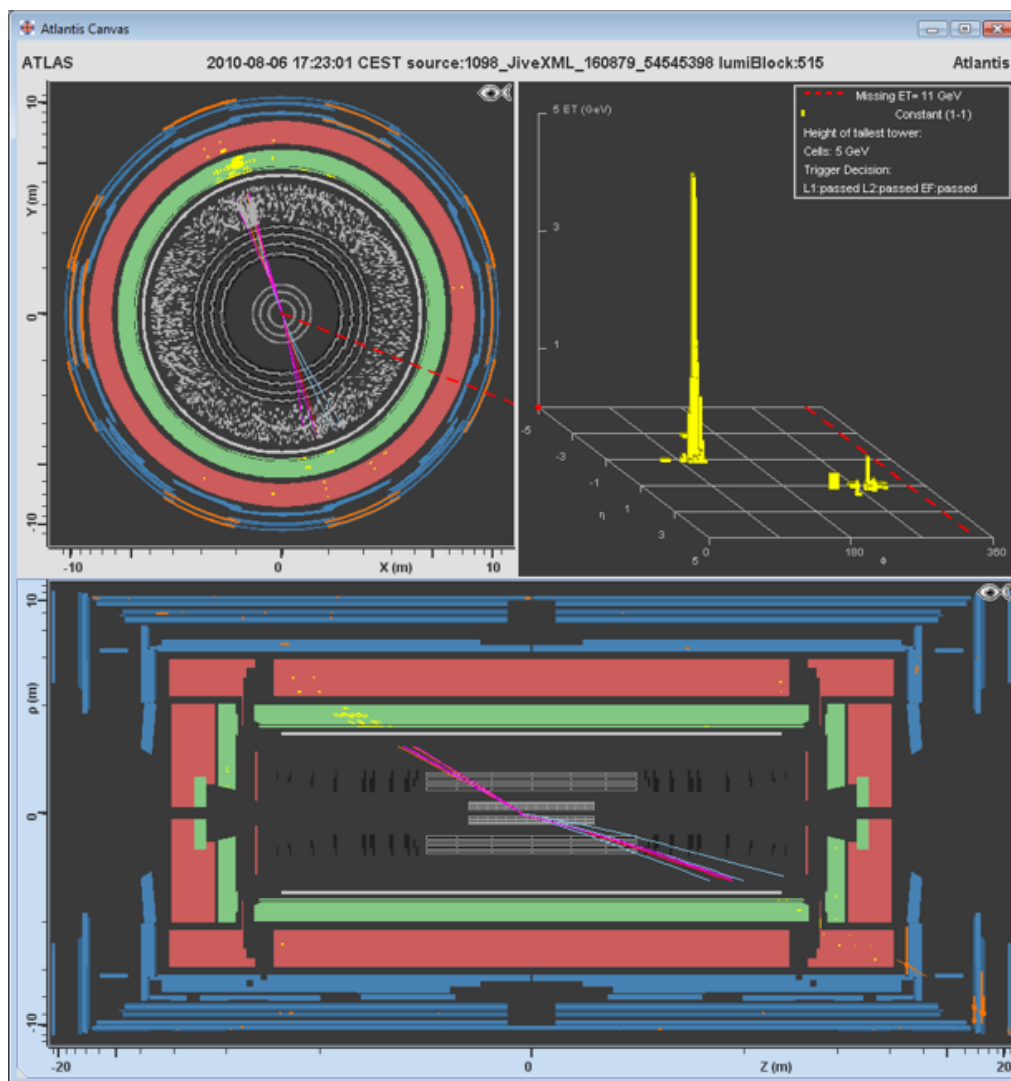
Událost s jety



Obr. 90: Událost s jety. [13]

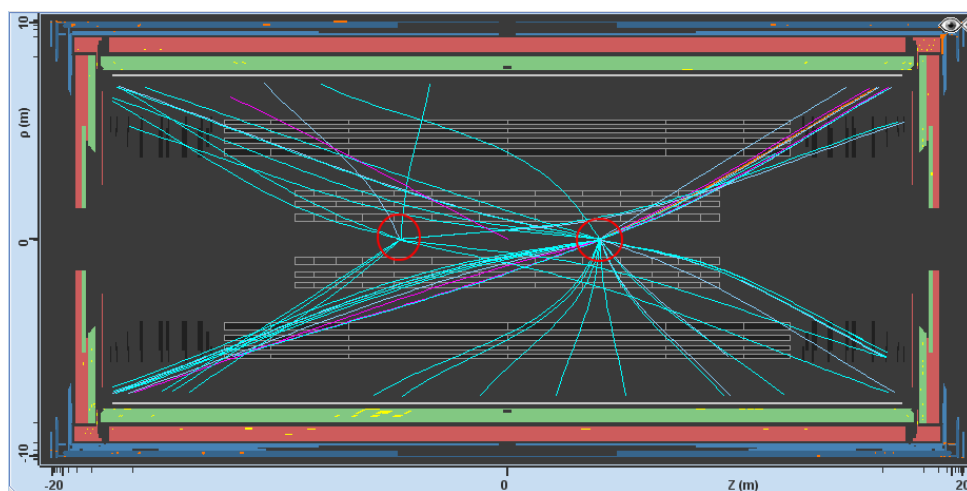
Výše zobrazená událost se od hledaných signálů liší ve dvou ohledech:

1. nachází se zde celé balíky částic
2. chybějící příčná hybnost je příliš nízká na výskyt jednoho nebo více neutrin. [2]



Obr. 91: Událost s jety. [13]

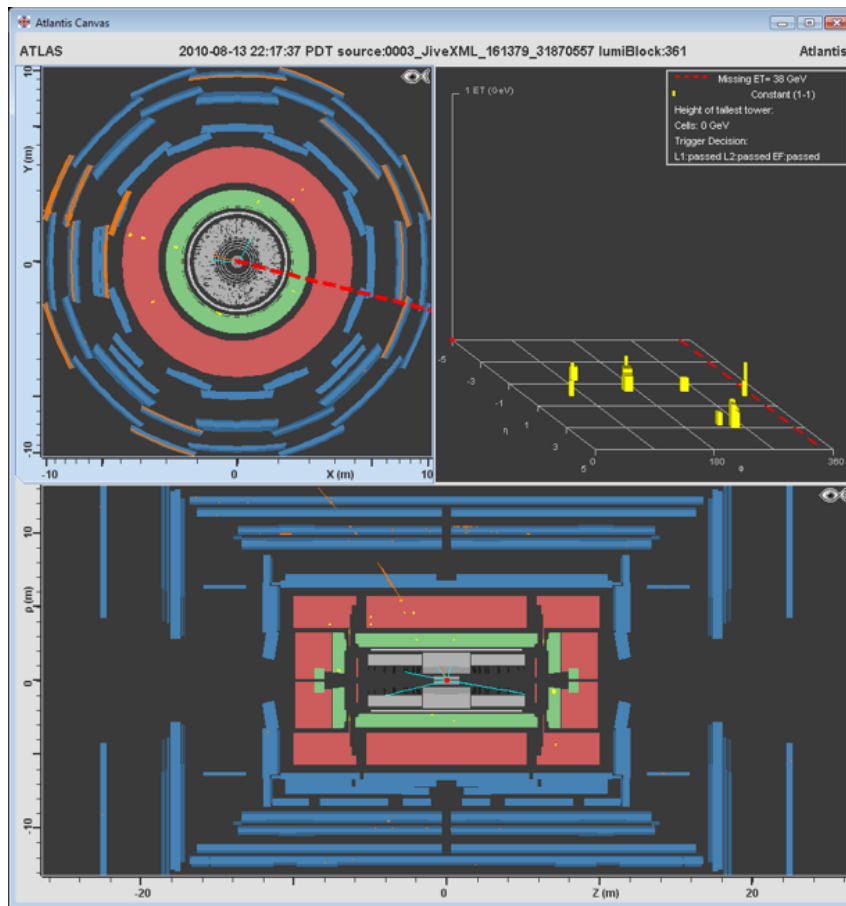
U obou pohledů je po zvětšení a volbě režimu rybího oka balík částic dobře viditelný. [2]



Obr. 92: Událost s jety 2. [13]

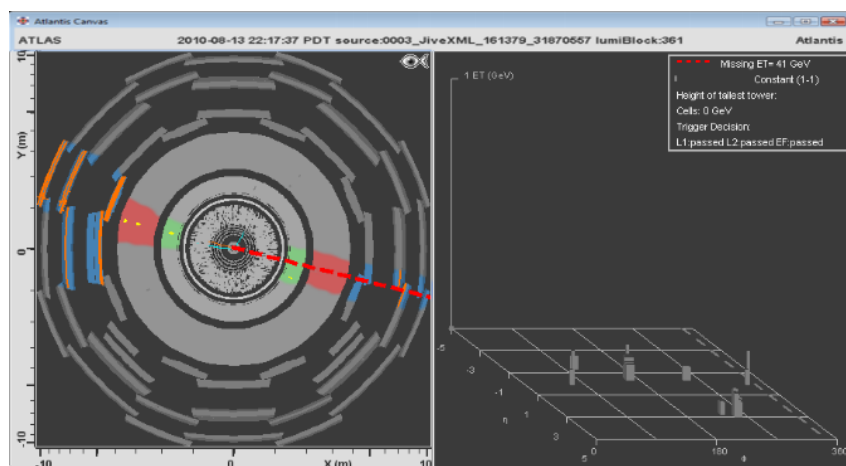
Tento náhled zvětšuje boční pohled jiné události, kde vidíme přibližně 60 cm vzdálená místa srážek (v červeném kroužku). Zde lze vidět, jak náročné může být událost identifikovat. [2]

Rozpad bosonu W na mion a neutrino: $W \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$



Obr. 93: Událost s bosonem W - zobrazení pomocí HYPATIA. [13]

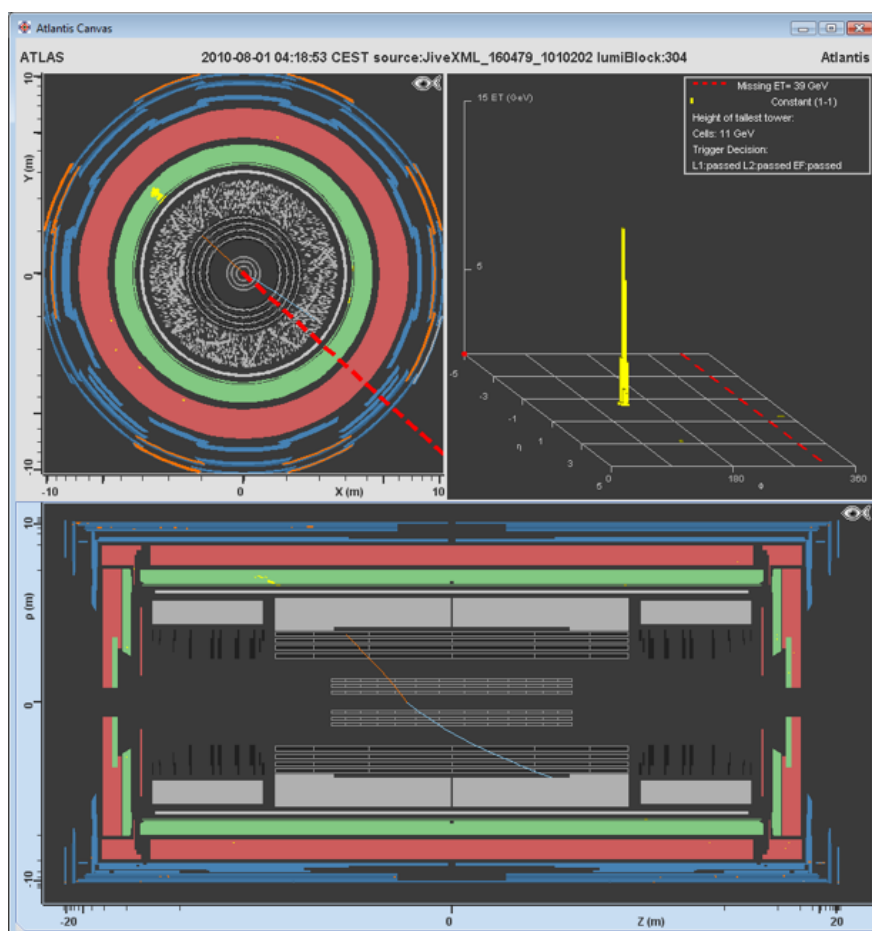
Chybějící příčná hybnost ve výše zobrazené události je 38 GeV a je tedy dostatečná na to, aby zde vzniklo neutrino. V obou pohledech lze také vidět stopu částice. [2]



Obr. 94: Událost s bosonem W - koncoví pohled. [13]

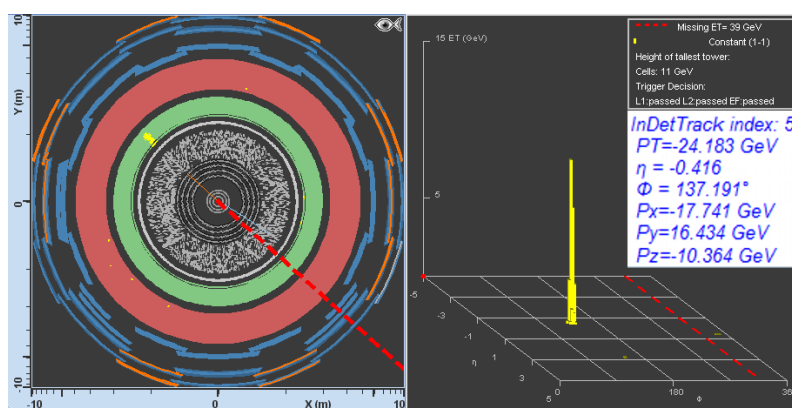
Z koncového pohledu na danou událost je jasné, že jde o mion nebo antimion. Trajektorie této částice míří v opačném směru než červená přerušovaná stopa, jež zobrazuje chybějící příčnou hybnost. Víme tedy, že zde nejspíše došlo k rozpadu bosonu W na mion (v náhledu události letí nalevo) a neutrino (letící vpravo). [2]

Rozpad bosonu W^- na mion a neutrino: $W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$



Obr. 95: Událost s bosonem W - režim pohledu rybího oka. [13]

Z koncového pohledu vidíme elektron, který má značnou příčnou hybnost a neutrino pohybující se v opačném směru. Samotný elektron je vidět i v pohledu z boku. [2]



Obr. 96: Událost s bosonem W – elektron. [13]

Když klikneme na trajektorii leptonu, získané údaje o znaménku dokazují, že jde právě o elektron. [2]

Zde je odkaz na kterém si můžete výše naučené znalosti ověřit:

https://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath_exercise2.htm

2.8 Hledání a objevování s využitím hmotnosti

Nyní si ukážeme poslední nástroje k tomu, abychom mohli začít skutečně objevovat. Princip další z metod určování částic využívá hmotnost částice. Nebudeme tedy identifikovat pouze produkty rozpadu částice, ale také zpětně určovat hmotnost částice, která se rozpadla. [2]

Jelikož má každá částice svou „vlastní“ hmotnost, je možné ji podle ní jednoznačně určit. [2]

Abychom rekonstrukci hmotnosti správně chápali, je třeba si ujasnit pojmy elektronvolt (eV), hybnost a vektor. Jednotlivé pojmy si lze nastudovat na odkazech níže:

Jednotky energie: https://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath_help1.htm

Hybnost: https://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath_help2.htm

Vektory: https://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath_help3.htm

Dále budeme používat trochu obecnější podobu Einsteinovy rovnice vyjadřující vztah mezi hmotností a energií, a kterou budeme měnit s přihlédnutím k základním přírodním zákonům – Zákon zachování energie a hybnosti (celková velikost po srážce musí zůstat stejná). [2]

Následně si musíme vysvětlit užitečný vztah, který umožňuje výpočet hmotnosti „původní“ částice, která se rozpadla pomocí rozpadových produktů. [2]

Například když se rozpadne boson Z na dvojici elektronů e^+e^- bude vztah vypadat takto:

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

Kde m_0 značí hmotnost, E energii, p hybnost a c rychlost světla. Indexem e a Z značíme, že jde o veličiny patřící k elektronu nebo bosonu Z . [2]

Při hledání Higgsova bosonu využijeme místo elektronového nebo mionového páru, na které se rozpadá s velmi malou pravděpodobností, fotonový pár nebo čtveřici leptonů. Pro rozpad na mionový pár pak lze tedy využít výše uvedený vztah, kde stačí zaměnit Z s H a e s γ . Pro rozpad na čtveřici leptonů opět stačí místo dvojice částic sečíst energii a hybnost čtveřice leptonů a zaměnit Z s H . [2]

2.8.1 Identifikování částic s využitím hmotnosti

Zde je úplná podoba Einsteinovy rovnice pro energii:

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

Kde E značí energii částice, p její hybnost a m_0 klidovou hmotnost. Hmotnost částice v klidu je vlastnost částice, která je v přírodě zachována, a proto se nemění. Nazýváme ji též jako „invariantní“ hmotnost. Pokud úplnou podobu vztahu upravíme, získáme:

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

Jelikož se veličina nemění, lze ji využít pro získání vztahu pro „původní“ částici, která se rozpadla. Je potřeba změřit energii a hybnost produktů po jejím rozpadu a v součtu budou stejně velké jako energie a hybnost částice před rozpadem. Pokud tedy známe energii a hybnost bosonu Z, můžeme určit jeho klidovou hmotnost. [2]

Jestliže se boson Z rozpadne na elektron-pozitronový pár, můžeme určit jeho hmotnost tím, že sečteme energie a hybnosti elektronu a pozitronu takto:

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

Energie a hybnost bosonu Z ($E_Z = E_{e^-} + E_{e^+}$ a $p_Z = p_{e^-} + p_{e^+}$) je nám známa, jelikož detektor umožňuje měřit energie a hybnosti rozpadových produktů. Máme tedy vše, co potřebujeme, abychom stanovili hmotnost bosonu Z a také jiných částic např. J/ ψ nebo Υ . [2]

Tato tzv. metoda klidové „invariantní“ hmotnosti se používá pro různé varianty produktů rozpadu např. $\gamma\gamma$, l^+l^- ($l = e, \mu$), $l^+l^-l^+l^-$ a další. [2]

2.9 Analýza reálných dat

V tuto chvíli se můžeme pustit do práce a splnit nejdůležitější zadání. Pomocí naměřených dat z detektoru ATLAS lze opětovně nalézt boson Z a také jiné částice a navíc pátrat po Higgsově bosonu. [2]

K tomu můžeme využít získané vědomosti o rozpoznávání částic a některé základní fyzikální principy.

2.9.1 Datové soubory a potřebné nástroje

Co budeme potřebovat:

1. Výše zmiňovaný program HYPATIA, který můžeme stáhnout zde:

http://hypatia.phys.uoa.gr/Downloads/HYPATIA/Hypatia_7.4_Masterclass.zip

2. Datové soubory obsahující několik tisíc událostí, které jsou rozdělené na menší balíčky po 50 událostech. Tyto soubory jsou ke stažení zde:

<http://cernmasterclass.uio.no/datasets/>

3. Webová stránka sloužící k uložení grafů. Odkaz zde:

<http://cernmasterclass.uio.no/OPloT/index.php>

4. Protokol o měření, který využijeme jako pomůcku k zaznamenání již prohlédnutých a roztřízených událostí. Můžeme stáhnout zde:

<http://cernmasterclass.uio.no/2014/material/tallysheet/>

2.9.2 Průběh cvičení

Teď již nastal čas na samotné měření hmotnosti bosonu Z a jiných částic, a také hledání Higgsova bosonu. Dále z daných měření vytvoříme histogramy a při práci ve skupinách následně zkombinujeme histogramy s ostatními skupinami (více o histogramu zde: https://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath_help4.htm). Využívat budeme kalkulátor klidových hmotností, který již obsahuje program HYPATIA (jak s ním zacházet se dozvíte zde: <http://hypatia.phys.uoa.gr/UseASEC/InvariantMassWindow.php>). Kromě tohoto nástroje budeme využívat i další údaje z programu HYPATIA, které slouží k rozpoznávání částic. [2]

Mezi zobrazenými srážkami, jsou události jako:

- boson Z (a jiné částice), které se rozpadají na elektron-pozitronový nebo mionový-antimionový pár
- uchazeči na události s rozpady Higgsova bosonu na dvojici fotonů
- uchazeči na události s rozpady Higgsova bosonu na čtveřici leptonů

Kromě hledaných událostí jsou zde také události ty, které jsou pozadím např. jety vznikající z kvarků, gluonů nebo bosony W. [2]

Postup cvičení

1. Na každé zobrazené události, kterou v programu HYPATIA prohlížíte, hledejte stopy rozpadu částic jako:
 - a. boson Z: hledejte elektron-pozitronový nebo mion-antimionový pár
 - b. Higgsův boson: hledejte fotonový pár ($\gamma\gamma$) nebo čtveřici leptonů ($e^+e^-e^+e^-$, $e^+e^-\mu^+\mu^-$, $\mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$)

Když se tyto páry nedaří najít, je možné, že jde o události pozadí. Pro správnou identifikaci můžete používat nástroje, které program HYPATIA obsahuje – označení drah a zobrazení údajů o daných částicích. Již roztržené události si důkladně zaznamenejte v protokolu o měření.
2. Jestliže jste došli k závěru, že pozorované rozpady jsou výsledkem některých výše zmíněných částic, označte příslušné trajektorie částic nebo další objekty a umístěte je do tabulky klidových hmotností:
 - a. Objevili jste stopy elektronového nebo mionového páru – mohlo by se jednat o boson Z nebo jiné ještě lehčí částice J/ψ nebo Υ .
 - b. Objevili jste čtveřici leptonů – měli jste štěstí a mohlo by se případně jednat o Higgsův boson.
 - c. Objevili jste fotonový pár – mohlo by se jednat o rozpad Higgsova bosonu na dva fotony.
3. Jestliže dojdete k závěru, že pozorované události jsou pozadím (neobjevili jste leptonový pár, který by měl opačný elektrický náboj nebo fotonový pár), neumísťujte do tabulky žádné klidové hmotnosti a jděte dále.
4. Jakmile roztržíte všechny události vyexportujte tabulku klidových hmotností následujícím způsobem:

File -> Export Invariant Masses

Jméno souboru bude Invariant_Masses.txt, to nechte jak je a soubor umístěte tak, ať jej jednoduše naleznete.

Jděte na odkaz sloužící k vytváření histogramů (grafů) a vložte váš vytvořený soubor.

2.9.3 Rozbor výsledků

Měříme páry leptonů

1. Udělejte srovnání histogramů, které odpovídají páru elektron-pozitron nebo mion-antimion.
 - a. Hledejte rozdíly a podobnosti.
 - b. Srovnejte četnost rozpadů bosonu Z na elektron-pozitronový a mion-antimionový pár.
 - c. Jaká byla očekávání a proč?
 - d. Lze pozorovat také jiné částice? Jaké jsou invariantní hmotnosti?
2. Která hmotnost bosonu Z je nejvíce pravděpodobná?
 - a. Jak lze vysvětlit, že není jediná konkrétní hmotnost bosonu Z?
 - b. Proč je rozdíl ve hmotnostech tak veliký?
3. Podařilo se vám objevit boson Z' ?
 - a. Jaká je má boson Z' hmotnost?
 - b. Jaká je výhoda kombinování vašich výsledků s ostatními skupinami?

Měříme páry fotonů

1. Podařilo se pozorovat nějaké známky po rozpadu Higgsova bosonu na dvojici fotonů?
 - a. Jestliže ne, jak to lze vysvětlit?
 - b. V datovém souboru je opravdu obsaženo několik uchazečů na rozpad Higgsova bosonu.
2. Podařilo se pozorovat nějaké známky po rozpadu Higgsova bosonu na čtveřici leptonů?
 - a. Jestliže ne, jak to lze vysvětlit?
 - b. V datovém souboru je opravdu obsažen jeden uchazeč na rozpad Higgsova bosonu. Při které hmotnosti?

3 Semináře částicové fyziky

Kromě toho, že si každý zájemce o částicovou fyziku může stáhnout zobrazovací program HYPATIA a podívat se na záznam srážek z detektoru ATLAS, existují také další možnosti, jak se s částicovou fyzikou hlouběji seznámit. Jednou z možností jsou semináře, kde se především studenti mohou setkat s odborníky spolupracujícími s CERN.

Na těchto seminářích, které se pořádají např. ve spolupráci s International Masterclasses, všude po světě, a kde se studenti dozví něco o částicové fyzice, je také možnost získat praktické zkušenosti z analýzy reálných dat z experimentů probíhajících na LHC.

Jeden z těchto seminářů s názvem Masterclass: Hands on particle physics, který je již několik let pravidelně pořádán na půdě Přírodovědecké fakultě Univerzity Palackého v Olomouci, jsem navštívil a odnesl jsem si cenné zkušenosti.

Většina zde zúčastněných studentů, především ze středních škol, se o semináři dozvěděla od svých vyučujících fyziky, ale byli mezi nimi i studenti, kteří si podobné akce sami vyhledávají. První část semináře byla věnována přednášce z částicové fyziky. Touto formou byli studenti seznámeni se základními pojmy, aktuálními poznatky a se směrem, kterým se částicová fyzika ubírá.

Další část patřila analýze reálných dat z experimentu ATLAS. Nejprve proběhla základní instruktáž a příprava na analýzu dat. Studenti se seznámili s programem HYPATIA, vyzkoušeli si, jak zobrazuje srážky a co je důležité pro rozpoznávání jednotlivých částic. Poté byly studentům přiřazeny sady naměřených dat, aby v nich hledali stopy po významných srážkách a označovali důležité částice. Nakonec byla všechna analyzovaná data nahrána do společné databáze a proběhla diskuse výsledků.

V poslední části se studenti zúčastnili společně s dalšími skupinami z partnerských institucí videokonference s CERN, při které porovnali své výsledky a měli možnost vzájemné diskuse.

Všechny akce pořádané International Masterclasses lze najít zde:

<https://physicsmasterclasses.org/>

Závěr

Úkolem mé práce byla příprava materiálu k výuce částicové fyziky na SŠ a následné vypracování cvičení, sloužícího k praktickému ověření získaných znalostí.

Předtím, než jsme se dostali k praktické části, bylo potřeba vytvořit teoretické zázemí týkající se částicové fyziky a její problematiky. Snažil jsem se popsat ty oblasti fyziky, které by žákům pomohly pochopit základní myšlenky částicové fyziky a principy na kterých staví jejich ověření.

V úvodu mé práce je popsána historie a princip rozptylových experimentů. Dále je vysvětleno, jakým způsobem bylo využito rozptylových experimentů k ověření teoretických základů částicové fyziky a také jsou popsány jednotlivé části detektoru ATLAS a jejich úloha v těchto experimentech.

V následující podkapitole byli popsány jednotlivé kvarky a leptony jako základní stavební částice hmoty, jejich místo ve vnitřní struktuře atomů, co vzniká jejich kombinací a jak vytváří hmotu a také bosony jako částice interakcí.

Následně byl představen Standardní model, jako současný obecně přijímaný model částic a jejich interakcí. To vše nás přivedlo k Higgsovu bosonu, jeho historii a úloze ve Standardním modelu částic.

V závěru části jsou žáci seznámeni s dalšími teoriemi, které přesahují rámec Standardního modelu a snaží se doplnit některé jeho nedostatky.

V další kapitole jsem se věnoval praktické části, ve které si žáci ověří získané znalosti o částicové fyzice. Cvičení vychází z Masterclasses a jejich Varianty Z, která žákům umožňuje prozkoumat naměřená data přímo z detektoru ATLAS. Nejprve si žáci zopakují a trochu rozšíří základní znalosti potřebné k provedení tohoto cvičení. V opakování se zaměřuji především na boson Z a Higgsův boson, po kterých žáci v získaných datech pátrají. Potom následuje kapitola, kde jsou žáci seznámeni s programem HYPATIA, který slouží k zobrazování událostí zachycených detektorem ATLAS. Následně je podrobně vysvětleno, jak program HYPATIA zobrazuje stopy jednotlivých částic nebo celých jetů. Dále je popsáno, jak rozpoznávat jednotlivé události zachycené detektorem a jak je program HYPATIA zobrazuje. Poslední vlastností, která byla využita k určování částic je hmotnost. S využitím hmotnosti lze v události identifikovat rozpadové produkty. Na konci kapitoly jsou uvedeny odkazy kde lze stáhnout vše potřebné k provedení cvičení, postup samotného cvičení a rozbor výsledků.

Na závěr práce se věnuji další možnosti jak se v oboru částicové fyziky vzdělávat a to prostřednictvím seminářů částicové fyziky. Tato část slouží jako motivace pro další vzdělávání v tomto oboru a shrnuji zde vlastní zkušenosti ze semináře, kterého jsem se zúčastnil.

Seznam použitých pramenů

Seznam literatury

- [1] *Fokus Physik Sekundarstufe II*. Berlín: Cornelsen Schulverlage GmbH, 2014, 528 s. ISBN 978-3-06-015555-2.
- [2] International Masterclasses: *Varianta Z*. [online]. [citace 24. 11. 2021]. Dostupné z URL: <https://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath.htm>
- [3] Encyklopedie fyziky: *Detektory v urychlovačích*. [online]. [15. 10. 2021]. Dostupné z URL: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/870-detektory-v-urychlovacich>
- [4] Jaderná fyzika: *Současný systém základních částic a základních fyzikálních interakcí*. [online]. [citace 19. 10. 2021]. Dostupné z URL: http://artemis.osu.cz/mm fyz/jm/jm_2_4_5.htm
- [5] Astrofyzika: *Sjednocení sil*. [online]. [citace 21. 10. 2021]. Dostupné z URL: <https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/interakce/toe.php>
- [6] International Masterclasses: *Varianta Z – Graviton*. [online]. [citace 24. 11. 2021]. Dostupné z URL: https://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath_graviton.htm
- [7] *Fokus Physik Sekundarstufe II: Lösungen*. Berlín: Cornelsen Verlag GmbH, 2017, 176s. ISBN 978-3-06-015736-5.
- [8] International Masterclasses: *Varianta Z – Zobrazování událostí*. [online]. [citace 18. 2. 2022]. Dostupné z URL: https://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath_lhcphysics3.htm

Seznam obrázků

- [1] *Fokus Physik Sekundarstufe II*. Berlín: Cornelsen Schulverlage GmbH, 2014, 528 s. ISBN 978-3-06-015555-2.
- [2] *Fokus Physik Sekundarstufe II*. Berlín: Cornelsen Schulverlage GmbH, 2014, 528 s. ISBN 978-3-06-015555-2. [obrázek byl dodatečně pozměněn]
- [3] International Masterclasses: *Varianta Z – Uspořádání a funkce detektoru ATLAS*. [online]. [citace 8. 3. 2022]. [obrázek byl dodatečně pozměněn]. Dostupné z URL: https://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath_atlas.htm
- [4] *Fokus Physik Sekundarstufe II: Lösungen*. Berlín: Cornelsen Verlag GmbH, 2017, 176s. ISBN 978-3-06-015736-5.
- [5] International Masterclasses: *Varianta Z – Higgsův boson*. [online]. [citace 8. 3. 2022]. [obrázek byl dodatečně pozměněn]. Dostupné z URL: https://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath_hboson.htm
- [6] International Masterclasses: *Varianta Z – Boson Z'*. [online]. [citace 8. 3. 2022]. Dostupné z URL: https://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath_zprime.htm
- [7] International Masterclasses: *Varianta Z – Zobrazovací program HYPATIA*. [online]. [citace 8. 3. 2022]. Dostupné z URL: https://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath_teilchenid2.htm

- [8] International Masterclasses: *Varianta Z – Rozpoznávání částic*. [online]. [citace 8. 3. 2022]. Dostupné z URL: https://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath_teilchenid3.htm
- [9] International Masterclasses: *Varianta Z – Když se protony srazí*. [online]. [citace 8. 3. 2022]. [obrázek byl dodatečně pozměněn]. Dostupné z URL: https://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath_protoncollisions.htm
- [10] International Masterclasses: *Varianta Z – Události s bosonem Z*. [online]. [citace 8. 3. 2022]. Dostupné z URL: https://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath_zevents.htm
- [11] International Masterclasses: *Varianta Z – Události s Higgsovým bosonem*. [online]. [citace 8. 3. 2022]. Dostupné z URL: https://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath_hevents.htm
- [12] International Masterclasses: *Varianta Z – Události tvořící pozadí*. [online]. [citace 8. 3. 2022]. Dostupné z URL: https://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath_bkgevents.htm
- [13] International Masterclasses: *Varianta Z – Jak HYPATIA zobrazuje události*. [online]. [citace 8. 3. 2022]. Dostupné z URL: https://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath_lhcphysics3.htm