

**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ  
FAKULTA**  
Univerzita Karlova

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Vojtěch Zívř

**Ilustrace fyziky mikrosvěta s pomocí  
programu Pythia**

Ústav částicové a jaderné fyziky

Vedoucí diplomové práce: doc. Mgr. Martin Spousta, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Učitelství fyziky - Učitelství  
matematiky

Praha 2023

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů. Tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V ..... dne .....

Podpis autora

Velmi rád bych zde poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Mgr. Martinu Spoustovi, Ph.D. za jeho cenné rady, vstřícnost, ochotu a trpělivost při vedení mé diplomové práce.

Název práce: Ilustrace fyziky mikrosvěta s pomocí programu Pythia

Autor: Vojtěch Zívr

Ústav: Ústav částicové a jaderné fyziky

Vedoucí diplomové práce: doc. Mgr. Martin Spousta, Ph.D., Ústav částicové a jaderné fyziky

Abstrakt: Diplomová práce je koncipována tak, aby čtenáře uvedla do základů částicové fyziky. Nejprve z hlediska historického vývoje poznání elementárních částic a interakcí mezi nimi působících. Následuje náhled do současného poznání reprezentovaného Standardním modelem. Dále pak je ukázáno, jakým způsobem se částice hledají a ověřují jejich vlastnosti. Konkrétně se jedná o LHC a ATLAS. Důraz je kladen na základy používání simulačního programu PYTHIA, kde jsou vysvětleny základní příkazy ovládající program. Dále je ukázáno několik jednoduchých příkladů událostí, se kterými se může čtenář setkat v experimentech na LHC. Na události je vždy ukázána nějaká vlastnost nebo jev. Konkrétně se jedná o využití částicové fyziky, ukázkou zákona zachování čtyř-hybnosti, rozlišení mezi signálem a pozadím, rozptyl světla na světlo a jety a jejich potlačení.

Klíčová slova: LHC Standardní model Pythia

Title: Illustrating the physics of the microworld using Pythia

Author: Vojtěch Zívr

Institute: Institute of Particle and Nuclear Physics

Supervisor: doc. Mgr. Martin Spousta, Ph.D., Institute of Particle and Nuclear Physics

Abstract: The thesis is designed to introduce the reader to the basics of particle physics. Firstly, in terms of the historical development of the knowledge of elementary particles and the interactions between them. This is followed by an introduction into the current knowledge represented by the Standard Model. Then is shown how particles are searched for and their properties verified. In particular, it is the LHC and ATLAS. Emphasis is given on the basics of using the simulation program PYTHIA and the basic commands controlling the program are explained. In addition, several simple examples of events that the reader may encounter in experiment at the LHC are shown. An event is always shown to exhibit some property or phenomenon. Specifically, these include the use of particle physics, demonstration of the four-momentum conservation law, the distinction between signal and background, light-by-light scattering, and jets and their suppression.

Keywords: LHC Standard model Pythia



# Obsah

Úvod	3
<b>1 Historický úvod</b>	<b>5</b>
1.1 Atomy . . . . .	5
1.2 Model atomu . . . . .	6
1.3 Objev antičástic . . . . .	8
1.4 Gravitace . . . . .	8
1.5 Elektromagnetismus . . . . .	9
1.6 Stav na začátku 20. století . . . . .	11
1.7 Slabá jaderná síla . . . . .	11
1.8 Kvarky . . . . .	13
<b>2 Současný stav fyzikálního poznání</b>	<b>15</b>
2.1 Standardní model . . . . .	15
2.2 Nutnost interakcí . . . . .	18
2.3 Jety . . . . .	19
2.4 Kvark-gluonové plasma . . . . .	20
2.5 Složené částice . . . . .	21
<b>3 Large Hadron Collider a detektor ATLAS</b>	<b>23</b>
3.1 Urychlování částic . . . . .	23
3.2 Large Hadron Collider . . . . .	23
3.3 Detektory částic . . . . .	24
3.4 ATLAS . . . . .	24
3.4.1 Vnitřní detektor . . . . .	25
3.4.2 Kalorimetr . . . . .	26
3.4.3 Mionový spektrometr . . . . .	26
3.4.4 Systém magnetů . . . . .	28
3.4.5 Znázornění na detektoru . . . . .	28
<b>4 Důležité veličiny a znázorňování srážek</b>	<b>30</b>
4.1 Nový souřadnicový systém . . . . .	30
4.2 Nové jednotky veličin . . . . .	32
4.3 Feynmanovy diagramy . . . . .	33
<b>5 PYTHIA</b>	<b>36</b>
5.1 Simulace . . . . .	36
5.2 Pythia . . . . .	37
5.3 Monte Carlo generátor . . . . .	37
5.4 Pseudonáhodná čísla . . . . .	38
<b>6 Jak ovládat program PYTHIA</b>	<b>40</b>
6.1 Nastavení parametrů srážky . . . . .	41
6.2 Nastavení tvrdého procesu . . . . .	42
6.2.1 Procesy silné jaderné interakce . . . . .	42
6.2.2 Procesy elektroslabé interakce . . . . .	45

6.2.3	Procesy s Higgsovým bosonem . . . . .	45
6.2.4	Další možnosti za hranicí standardního modelu . . . . .	45
6.3	Nastavení dalších vlastností srážek . . . . .	46
6.4	Práce s daty . . . . .	47
<b>7</b>	<b>Ukázky jednotlivých procesů</b>	<b>50</b>
7.1	$\beta$ rozpad . . . . .	50
7.1.1	Využití . . . . .	51
7.2	Ukázka . . . . .	52
7.3	Rozpad pionu na dva fotony . . . . .	55
7.3.1	Ukázka . . . . .	55
7.3.2	Zákon zachování čtyř-hybnosti . . . . .	56
7.4	Objev Higgsova bosonu . . . . .	58
7.4.1	Signál a pozadí . . . . .	58
7.5	Rozptyl světla na světle . . . . .	60
7.6	Jety . . . . .	62
7.6.1	Jety jako sonda . . . . .	63
	<b>Závěr</b>	<b>64</b>
	<b>Seznam použité literatury</b>	<b>65</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>68</b>

# Úvod

V této diplomové práci se pokusím o představení mikrosvěta. Podíváme se na částicovou fyziku, standardní model, LHC a detektor ATLAS a na to, jak jsou události pozorované například detektorem ATLAS a s čím se můžeme setkat.

Nejprve se v první kapitole podíváme na historický vývoj standardního modelu, kdy začneme od dávných Řeků a jejich snění o poznání nejzákladnějších zákonů a částecek světa, budeme pokračovat přes slavné osobnosti z doby osvícenství a skončíme u ohromných týmů vědců, které posunuli lidské poznání až za dříve nemyslitelné hranice k současnosti.

V druhé kapitole se podíváme, jak ono současné poznání vypadá a jak tento standardní model, který to vše popisuje, funguje. Zaměřím se na částice v standardním modelu a na to, jaké mezi nimi působí interakce. Povíme si o složených částicích, které je možné z těchto základních částic poskládat. Ať již to jsou méně známé částice mezony jako jsou kaony nebo piony, tak i všeobecně známé baryony jako jsou neutrony a protony. Dále se podíváme na to, jak se tyto částice produkují při hadronizaci v jetech. Nakonec se zmíním i o skupenství hmoty, se kterým je možné se při srážkách setkat, o kvark-gluonovém plazmatu.

Ve třetí kapitole se zaměřím na to, jak dnes měření částic probíhají. Vysvětlíme si, jak funguje urychlování částic a proč se musí částice urychlovat. Popíšeme si nejznámější a největší z urychlovačů - Velký hadronový urychlovač LHC v CERNu. Podíváme se, jaké částice se v něm mohou srážet a jakými všemi předurychlovači musí srážené částice projít, než se srazí. Dále se podíváme na jakých principech funguje jeden z detektorů na LHC - ATLAS. Z jakých vrstev a částí se skládá. Proč takové vrstvy má a jakým způsobem rozpoznáme, které částice změřil a jak z těchto dat zjistíme jaké vlastnosti dané částice mají.

V následující čtvrté kapitole si představíme veličiny a fyzikální jednotky, které se v částicové fyzice používají. Zmíním se i o Feynmanových diagramech, u kterých se naučíme je interpretovat a ukázat, co alespoň v základním přiblížení zobrazují.

V páté kapitole se podíváme na simulaci srážek. Povíme si, proč se nejprve srážky simulují a jakým způsobem simulace probíhají. Ukážeme si jeden z nejpoužívanějších simulátorů současnosti nazývajících se PYTHIA a nastíníme, jak tento program pracuje.

V předposlední šesté kapitole si ukážeme základy ovládání a nastavování v PYTHIA, respektive si ukážeme, jak napsat program, který nám pak PYTHIA vyhodnotí. Podíváme se na to, jak nastavit co se bude srážet a za jakých podmínek. Ukážeme si jak zapínat a vypínat jednotlivé procesy, aby se nemohlo dít úplně všechno, ale jen to, co potřebujeme. Nakonec si ještě ukážeme jak vytáhnout ze simulace potřebná data a jak s nimi pracovat.

V poslední kapitole si ukážeme pět událostí z nasimulovaných srážek a ke každé si něco málo povíme tak, aby nešlo jen o prostou ukázkou, ale bylo na události ukázáno něco praktičtějšího. První událostí, která je zmíněna je  $\beta$  rozpad. Ten byl vybrán, protože je to proces ukazující nejméně známou interakci, kterou je slabá jaderná síla. Druhým důvodem je i praktické využití  $\beta$  rozpadu v lékařství tak, aby bylo vidět, že pokrok ve výzkumu fundamentální fyziky může vést i k záchraně životů. Druhým jevem je rozpad nejjednoduššího mezonu - pionu,

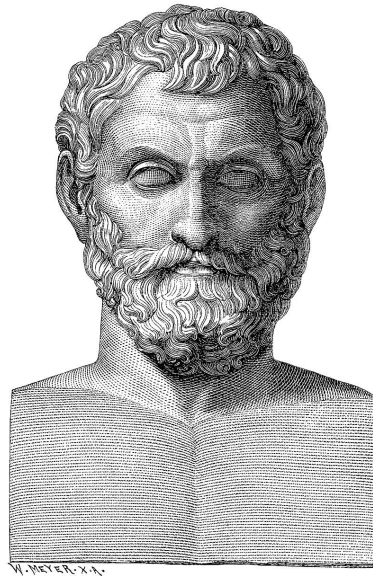
který se rozpadá na dva fotony. Na tomto procesu si ukážeme zákon zachování čtyř-hybnosti. Třetí událostí je rozpad Higgsova bosonu také na dva fotony, což je jedna z událostí, při které byl Higgsov boson, jakožto poslední částice standardního modelu, objeven. Zde si ukážeme, jak byl tento jev pozorován a jak odlišit signál od pozadí. Čtvrtou událostí je rozptyl světla na světlo. V poslední události se podíváme na jety, spršky částic, které se často při srážkách vyskytují.

Nakonec v příloze jsou jednotlivé programy a jejich výstupy, které může čtenář použít a vyzkoušet si s nimi pracovat. Programy je možné si upravit pro vlastní zkoumání a generování srážek.

# 1. Historický úvod

## 1.1 Atomy

Lidé se již od dávných časů nebo alespoň od úsvitu filosofie snaží přijít na to, jaký svět opravdu je a co jsou jeho nejzákladnější elementy. Už Tháles z Milétu, známý jako zakladatel filosofie, přednesl představu, že vše je tvořeno jen z vody [12]. Později zase Aristoteles tvrdil, že vše je složeno ze základních elementů oheň, vzduch, voda, země [1]. Platón k těmto čtyřem dodal ještě pátý a to živel ducha, který vlastnily jen živé bytosti [7]. Na první pohled se tyto myšlenky zdají směšné a v dnešní době víme, že jsou úplně mimo realitu. Vžijeme-li se do tehdejších myslitelů, tak gravitaci by bylo možné pomocí těchto sil krásně vysvětlit. Elementy, tak jak jsou seřazeny oheň, vzduch, voda a země, jsou seřazeny od nejlehčího po nejtěžší. Pokud by každý element zabíral své právoplatné místo ve vesmíru, čím lehčí, tím je výše, tak vysvětlíme, proč oheň ve vzduchu stoupá vzhůru. Vzduch ve vodě taktéž, ale země padá ve vodě směrem dolů. A dokonce i pátý element duch, který je nejlehčí musí mířit nejvýše, kde pak mají přebývat bytosti čistě duchovní. Ano, směšné, ale my dnes děláme něco velmi podobného, jen se nám elementy trochu změnily. Hlavní myšlenka, najít ty nejzákladnější částičky - elementy, které existují, nás neopustila, jen jsme se vydali mnohem sofistikovanější cestou. Tato myšlenka se nazývá atomismus, od řeckého nedělitelný, protože to jsou částičky, které už nelze dále dělit.



Obrázek 1.1: Vyobrazení Tháleta z Milétu, který je považován za zakladatele filosofie a položil tak základy zkoumání světa, kam fyzika patří. Žil na přelomu 7. a 6. století před naším letopočtem, což dokládá velké stáří myšlenky, která chce rozluštit, co jsou nejzákladnější částičky vesmíru [12].

Tato myšlenka lidi neopustila a když se dívali na svět, zjistili, že mnoho látek lze jistými procesy rozložit na jiné, ale existují i takové, které už dále rozložit nelze. Tyto látky se nazývají prvky, oproti sloučeninám, jako je voda, které rozložit lze. My dnes tyto prvky známe, je mezi nimi například vodík, kyslík, železo nebo zlato.

Lidé se tyto prvky snažili uspořádat a dát jejich vlastnostem řád. Nejznámější uspořádání známe všichni z hodin chemie, říkáme mu Mendělejeva periodická tabulka prvků. S touto periodickou tabulkou přišel Dmitrij Ivanovič Mendělejev roku 1869. Tehdy tato tabulka měla 63 prvků a dokonce později pomocí této tabulky i deset nových prvků předpověděl a všechny předpovědi vyšly.

**ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.**

**ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.**

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180.
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182.
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186.
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4
			Fe = 56	Rn = 104,4	Ir = 198.
			Ni = 59	Pi = 106,8	O = 199.
			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.
H = 1					
	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112	
	B = 11	Al = 27,4	? = 68	Ur = 116	Lu = 197?
	C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118	
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
	O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?	
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	I = 127	
Li = 7	Na = 23		K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133
			Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137
			? = 45	Ce = 92	
			?Er = 56	La = 94	
			?Yt = 60	Di = 95	
			?In = 75,6	Th = 118?	

Д. Менделѣевъ

Obrázek 1.2: Mendělejeva tabulka prvků rok 1869. S otazníky můžeme vidět i předpovězené prvky [11].

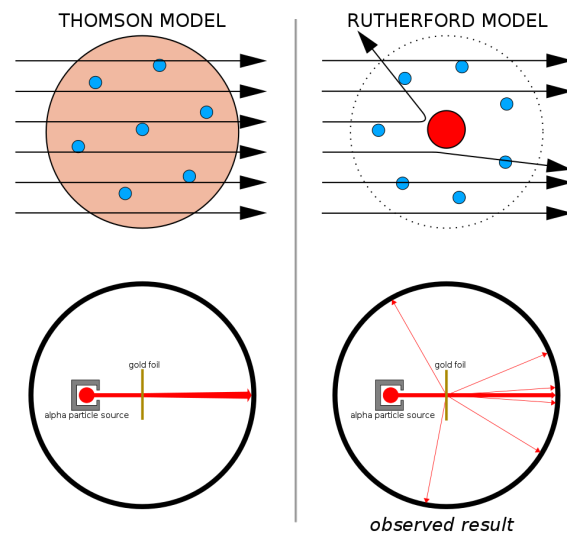
Dnes má tato tabulka 118 prvků, i když poslední předpovězené nevydrží existovat příliš dlouho. Poslední 118, Oganesson, má poločas rozpadu 1,8 ms.

Na chvíli se tak vše zdálo vyřešené. Místo čtyř elementů, co měli Řekové, my jich měli několik desítek, zato ale s velmi dobře fungujícími zákony. A protože tyto elementy - prvky nebyly nijak v tehdejší době dělitelné, tak byli nazvány atomy. Dnes opět víme, že dělitelné jsou a že název atomy - nedělitelné není úplně na místě. Lepší tvrzení je, že nejsou dělitelné chemickými procesy. Chemickými procesy máme na mysli zahřívání, ochlazování, míchání látek s jinými a nebo i proces elektrolýzy, při kterém prochází látkou elektrický proud. Takovýmito procesy se zabývá vědní obor chemie.

## 1.2 Model atomu

Chemikům to možná přišlo uspokojivé, ale fyziky to neuspokojilo vůbec a vrhli se hledat ještě elementárnější částice. První opravdu elementární částicí, která byla objevena byl elektron. Ten byl objeven na konci 19. století a to v roce 1897 anglickým fyzikem Josephem Johnem Thomsonem [3]. Tím, že tuto částici nazýváme opravdu elementární, máme na mysli to, že je elementární z našeho současného pohledu a to podle Standardního modelu částicové fyziky. To, jestli

se v budoucnosti náš pohled změní, zůstává stále otázkou. Po následném objevu atomového jádra Ernestem Rutherfordem v roce 1911 [9], tedy částic uvnitř atomu, se pohled na atomy změnil. Jádra jednotlivých atomů se liší v množství protonů, částic, které jádro tvoří. Například atom vodíku má jeden proton, atom helia má dva protony a podobně. Ani proton ale z dnešního pohledu nepovažujeme za elementární. Tato doba musela být hodně uspokojivá, několik desítek druhů atomů se smršlo na dvě, tehdy elementární částice. Proton a elektron, tedy kladně nabitá a záporně elektricky nabitá částice. V této době vznikají i první modely atomu. V jádru atomu jsou protony a v obalu, tedy okolo jádra, obíhají elektrony.



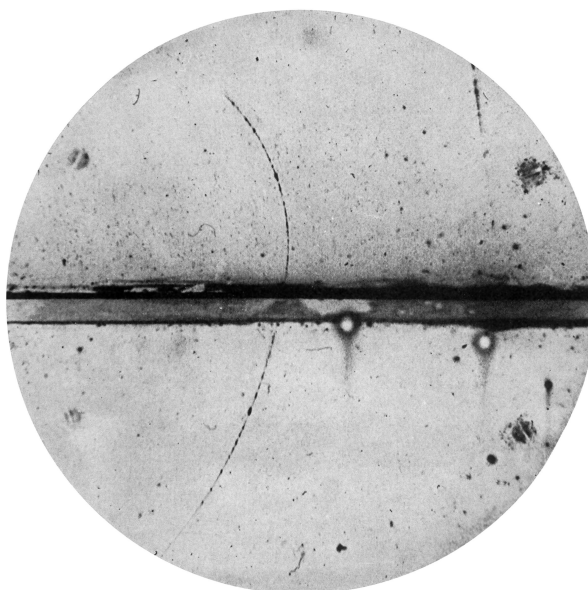
Obrázek 1.3: Rutherfordův experiment, kterým dokázal existenci jádra pomocí ostřelování zlaté fólie zářením alfa. Z průběhu odrazů částic do různých směrů je vidět, že uvnitř atomu musí být malé jádro [33].

Sám Rutherford si tuto představu trochu zkomplikoval nebo spíše vylepšil, když do ní přidal ještě elektricky neutrální částice neutrony. Tyto částice nebyly přidány pro nic za nic. Už tehdy lidé věděli, že existují různé izotopy atomů. Vezměme si například vodík. Vodík je nejlehčí prvek a je tvořen jedním protonem v jádru a jedním elektronem v obalu. Jádro takového prvku má atomovou hmotnost jedna, protože obsahuje jen jednu částici. Jenomže existují i jiná jádra vodíku, například u vodíku, který nazýváme deuterium. Jádro tohoto vodíku má atomovou hmotnost dvě, ale elektrický náboj jádra je jen jedna. Tuto nesrovnalost bylo potřeba nějak vyřešit. Možné řešení bez přidání další částice vypadalo následovně, ale neuspělo. Pokud budeme mít jádro se dvěma protony, tak už nebude vodíkem, ale heliem, protože jádro bude mít elektrický náboj dva. To ale nesouhlasí s experimentem, protože takovému jádru budeme muset dodat dva elektrony, aby byl atom elektricky neutrální a nebude se chovat jako vodík, ale jako helium. Například se nebude vázat s kyslíkem a nevytvoří tak vodu. Tuto myšlenku šlo trochu pozměnit a to tak, že se ke dvěma protonům v jádře přidá ještě jeden elektron, který tak sníží celkový náboj jádra na jedna. Pokud je hmotnost elektronu oproti protonu zanedbatelná, což je, pak je tento model na první pohled funkční. Tento model měl ale jednu nevýhodu. Už tehdy věděli, že elektron kvůli principu neurčitosti uvnitř jádra být nemůže. Nakonec model

s přidáním neutronu, místo páru protonu a elektronu, do jádra uspěl. Existence neutronu předpovězeného 1920 Rutherfordem byla potvrzena jeho kolegou Jamesem Chadwickem roku 1932. A tak vznikl známý model atomu, který známe dodnes. V obalu atomu jsou elektrony a v jádru atomu jsou protony, které určují druh prvku, a neutrony, které určují izotop daného prvku.

### 1.3 Objev antičástic

V tomtéž roce 1932 byla ještě objevena další částice zvaná pozitron [29]. Je to antičástice elektronu. Tedy chová se úplně stejně jako elektron jen má opačný náboj. Tuto částici předpověděl Paul Dirac, když se snažil skloubit speciální teorii relativity a kvantovou mechaniku. Při řešení rovnice, které se dnes říká Diracova rovnice, si všiml, že rovnice, která má popisovat chování elektronu, respektive částic s poločíselným spinem (co je spin si povíme dále v textu), má i jiné řešení, které je na chlup stejné, jen se liší ve znaménku. Znaménku, které jenom obrací elektrický náboj. Tato předpověď a její potvrzení sice vzbudilo velký ohlas, ale pro model atomu to příliš velikou roli nehrálo. Nezměnilo se nic, až na fakt, že existuje i atom, respektive antiatom, který může být sestaven z antičástic, tedy z antiprotonu, antineutronu a pozitronu. Dnes se předpokládá, že každá z částic má i svoji antičástici, lišící se znaménkem u náboje.



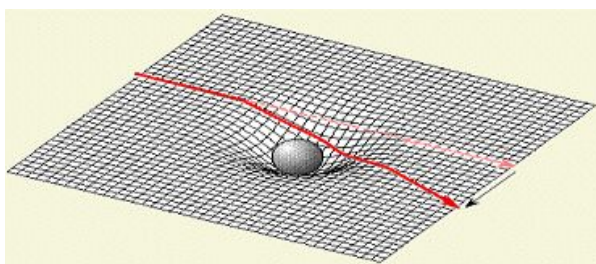
Obrázek 1.4: První stopa pozitronu v mlžné komoře. Čára značící částici odpovídá dle tloušťky elektronu. Protože je ale stočena na druhou stranu než elektron, tak musí mít opačný náboj. Není to elektron, ale pozitron.[8].

### 1.4 Gravitace

Než se podíváme, co se dělo v historickém vývoji zkoumání mikrosvěta dál, je dobré se podívat na druhou stránku věci. Doteď jsme jen popisovali, jaké částice ve světě existují, ale to není z ontologického hlediska vše. Ještě se musíme podívat



na to, jak mezi sebou dané existující objekty - částice, interagují, neboli jak na sebe působí. Tyto procesy se nazývají interakce nebo prostě jen síly. Slyšíme-li tedy o tom, že byla objevena pátá síla, je tím nejspíše myšlen další způsob vzájemného působení mezi částicemi neboli interakce. V období antického Řecka a vlastně až do doby Newtona se působení nijak zvláště neřešilo. Základní elementy oheň, vzduch, voda a země se mohly přemísťovat na své pozice, popřípadě do sebe mohly narážet a tím na sebe působit. Až Isaac Newton popsal prvně zákony mechaniky, dnes známé jako Newtonovy zákony - zákon setrvačnosti, zákon síly a zákon akce a reakce. Není úplně od věci zmínit, že nebyl jediný, kdo se o to snažil. Jeho věčným konkurentem byl Gottfried Wilhelm Leibniz. Oba, respektive jejich stoupenci, se dodnes přou o prvenství v objevu diferenciální počtu. To proč tu je zmiňován Newton, je ale pro jeho gravitační zákon. Zákon, který objevil podle legendy, když mu na hlavu spadlo jablko. To se sice nejspíše nestalo, ale v sadu se asi nacházel, protože jeho univerzita byla uzavřena kvůli moru v letech 1665-1667 a on se vydal na venkov, aby se moru vyhnul. Jablko nejspíše viděl padat při svých toulkách po sadu. To v čem byl tento zákon převratný je to, že se mu podařilo spojit zákony, které působí na zemi i na nebi v jedno. Dokázal tak v jednom zákonu popsat, proč padá jablko ze stromu a zároveň dokázal popsat nebeskou mechaniku a vysvětlit platnost Keplerových zákonů. Newton tak dokázal popsat první interakci, která souvisí s hmotností. Každá dvě tělesa se přitahují pomocí gravitační síly. Vzhledem k tomu, že hmotnost je vždy kladná a neexistuje záporná hmotnost, je gravitační síla vždy přitažlivá. Gravitační zákon, kterým popsal chování hmotných těles byl tak dobrý, že vydržel až do začátku 20. století. To jsou téměř tři století. Newtonovu mechaniku a gravitační zákon překonal až Albert Einstein speciální a později obecnou teorií relativity. Gravitační sílu Einstein popsal jako zakřivení prostoročasu, kdy se částice, jenž mají výslednici působících sil nulovou, pohybují rovnoměrně přímočaře, tedy podle prvního Newtonova zákona. Prostoročas je ale zakřivený, takže se nám zdá, že se rychlost mění a dráhy zakřivují. Protože neznáme elementární částice, která by ji definovali. Stojí tak trochu stranou. Existují snahy spojit ji se standardním modelem pomocí hypotetické částice graviton, ale to není zatím úspěšné.



Obrázek 1.5: Znázornění zakřivení pohybu v zakřiveném časoprostoru[26].

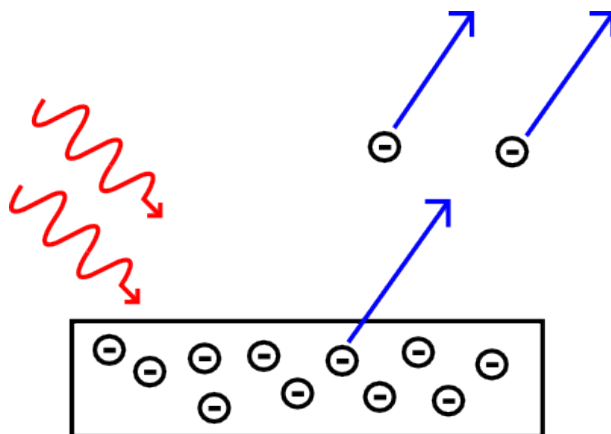
## 1.5 Elektromagnetismus

Další známou interakcí je interakce elektrická. Přestože tato síla vedla k rozmachu až v druhé polovině minulého století, lidé ji znají poměrně dlouho. Znali ji minimálně už od starověkého Řecka, i když ji úplně nedokázali vysvětlit. Již

tenkrát věděli, budou-li třít kožešinou o jantar, budou se pak chloupky kožešiny přitahovat k jantaru stejně jako se dnes přitahují vlasy k hřebenu, když se češeme. Odtud dokonce pochází i pojmenování síly, jantar má v řečtině stejný základ jako elektron. První hlubší teorii o elektrické síle přináší až Charles-Augustine de Coulomb [2], který přináší Coulombův zákon. Zákon je velmi podobný Newtonovu gravitačnímu zákonu, jen hlavní roli hraje elektrický náboj, nikoliv hmotnost. Elektrický náboj, na rozdíl od hmotnosti, může nabývat obou hodnot, jak hodnot kladných, tak hodnot záporných. Důsledkem je, že elektrická síla je síla přitažlivá i odpuzivá. Platí velmi známé pravidlo, že protiklady se přitahují. Kladný a záporný náboj se přitahují a dva kladné nebo dva záporné náboje se navzájem odpuzují. Nezávisle na elektrické síle byla objevena i síla magnetická a to opět v Řecku, tentokrát šlo o zmagnetizovanou rudu, která se nachází v oblasti Magnésia. Odtud také název magnetismus. Samotný magnet původně příliš využití neměl, stejně jako zpočátku elektrická síla. První využití přinesl kompas, který sestrojili Číňané nejpozději v devátém století.

Až v devatenáctém století se podařilo objevit mimo jiné Faradayův zákon, který ukázal jistou spojitost mezi elektrickou a magnetickou silou. Toto propojení bylo později dokončeno skotským fyzikem Jamesem Clerkem Maxwellem v Maxwellových rovnicích [24]. V rovnicích, které spojují elektřinu a magnetismus v jedno, elektromagnetismus. Až poté, s objevem speciální teorie relativity, se podařilo vysvětlit v čem tkví spojení elektřiny a magnetismu. Elektrický náboj, který se nepohybuje vytváří okolo sebe elektrické pole a elektrický náboj, který se pohybuje je hledaným zdrojem magnetismu. V Maxwellových rovnicích se nachází ještě jedna zajímavost. Kromě spojení elektřiny a magnetismu se zde totiž nachází i spojení s optikou, s vědou zabývající se světlem. S jednoduchou manipulací s Maxwellovými rovnicemi lze dojít k tomu, že existuje něco jako elektromagnetické vlnění. Toto vlnění má rychlost, která je definována pomocí dvou konstant. Permittivity, konstanty, která souvisí s tím, jak moc vede prostředí elektrické pole a permeabilitou, konstantou, která podává stejnou informaci o prostředí jen z hlediska magnetismu. Co je ale překvapující je, že tato rychlost je shodná s rychlostí světla. Ukázalo se, že světlo je vlastně elektromagnetické vlnění. Začátkem dvacátého století s příchodem kvantové mechaniky se elektromagnetismus změnil v kvantovou elektrodynamiku (QED). K tomuto přechodu pomohlo vysvětlení dvou problémů klasické fyziky, které do té doby neměly řešení. Prvním problémem je záření černého tělesa. Každé těleso vyzařuje jisté spektrum světla v závislosti na své teplotě. Absolutně černé těleso je takové těleso, které všechno dopadající světlo pohlcuje, tedy žádné neodráží nebo nepropouští. Pro takové těleso existuje vyzařovací zákon, který přesně určuje jaké spektrum světla bude vyzařovat. Typickým černým tělesem je naše Slunce, i když není vizuálně černé, nebo kupříkladu žárovka. Odvození tohoto zákona se dlouho nedařilo, až do té doby, kdy Max Planck použil matematický trik, který spočívá v tom, že neuvažuje elektromagnetické vlnění, světlo, jako nekonečně dělitelnou substanci, ale uvažoval, že existují jakési balíčky, kvanta, která se už nedají dělit, něco jako atomy světla. Odtud pochází pojmenování kvantová fyzika a také Planckova konstanta, která toto nejmenší kvantum energie popisuje. Nejprve se toto kvantování světla používalo jen jako matematický trik. Tento trik ale pomohl vysvětlit i druhý problém a to vnější fotoelektrický jev. Vnější fotoelektrický jev, kdy pokud se na atomy posvítí světlem, tak se elektrony z obalu uvolní. Tento jev měl ale jeden malinkatý

háček. Lidé netušili, proč funguje až od určité frekvence světla (rozdílné frekvence světla vnímá lidské oko jako barvu). Tento problém se podařilo vyřešit Albertu Einsteinovi v jeho zázračném roce 1905 a byl za něj odměněn Nobelovou cenou 1921. Einstein totiž dostal Nobelovu cenu za vysvětlení vnějšího fotoelektrického jevu (a obecný přínos fyzice), nikoliv za teorii relativity. Jak se mu to podařilo vysvětlit? Znal Planckův trik s kvantováním světla a využil ho také. Dopadající světlo neproudí plynule, ale dopadá v kvantech. Velikost energie, které toto kvantum má je závislé na frekvenci světla. Protože k uvolnění elektronu z obalu atomu je potřeba určitá minimální energie, tak se fotoelektrický efekt spustí pouze při určité frekvenci světla.



Obrázek 1.6: Znázornění vnějšího fotoelektrického jevu [16].

## 1.6 Stav na začátku 20. století

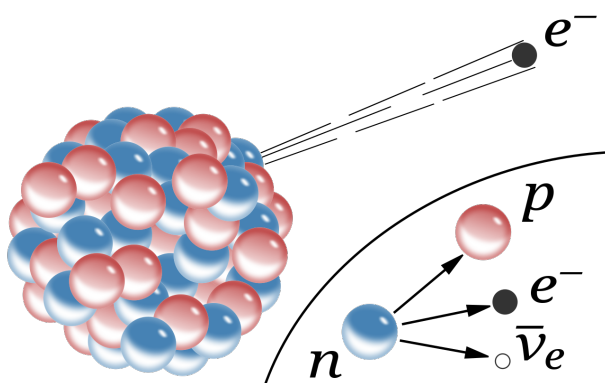
Na začátku dvacátého století jsme znali atomy složené z protonů, neutronů a elektronů. Měli dvě základní síly gravitační a elektromagnetickou. Gravitační síla byla zakřivením prostoročasu a elektromagnetická síla se dala vysvětlit předáváním kvant elektromagnetické vlny - tzv. fotony. Mějme na paměti, že tento model je dostačující naprosto pro všechny jevy, které z běžného života známe. Všechna tělesa, která známe se skládají z atomů, ať je to voda, vzduch, lidé, nebeská tělesa nebo mezihvězdný prach. A všechny interakce se dají vysvětlit pomocí gravitace nebo elektromagnetismu. Ať již je to padání věcí k zemi nebo obíhání planet okolo Slunce v případě síly gravitační a nebo přitahování vlasů k hřebenu při česání, fungování kompasu v případě elektromagnetismu. Připomeňme, že i chování světla je v elektromagnetismu obsaženo a dokonce i to že teď nepropadnu židli je také vysvětleno pomocí elektromagnetismu. Já i židle jsme z atomů, které mají v obalu elektrony. Tyto elektrony se tak při přiblížení odpuzují. Nebo to, že se tělesa nerozpadnou a atomy drží poblíž sebe lze zase vysvětlit pomocí vytváření elektronových vazeb.

## 1.7 Slabá jaderná síla

Později se na scéně objevují ještě další dvě interakce. A to silná a slabá jaderná síla. Jak jsme si již uvedli, tak v jádru atomu se nachází množství protonů a

neutronů. Nějaká síla ale tyto částice musí držet pohromadě a síla musí být silnější než elektromagnetická, protože protony v jádru se odpuzují elektromagneticky, kvůli stejnému náboji. Způsob, jakým tato síla, nazvaná jednoduše silná jaderná síla, je realizována ještě známý nebyl a museli jsme si tak na něj počkat. Poslední síla, která se ještě objevila na scéně souvisí s radioaktivním rozpadem  $\beta$ . V tomto případě jde o to, že se v jádrech některých atomů neutron změní na proton a vyzáří se záření  $\beta$  - elektron. Tento proces potřeboval vysvětlení a protože se děje v jádru a je to síla slabá, tak se nazývá slabá jaderná síla.

Když se Enrico Fermi snažil popsat  $\beta$  rozpad, zjistil že je potřeba přidat novou částici - (anti)neutrino [4]. Tato částice byla potřeba, protože se předpokládalo, že jisté vlastnosti se při tomto procesu zachovávají - zejména je to energie a nebo tzv. spin. Název spin lehce souvisí s otáčením. V klasické fyzice existuje veličina s názvem moment hybnosti, která vyjadřuje jak moc je těžké těleso roztočit, popřípadě kolik je v otáčení uloženo energie. Spin je velmi podobná veličina, protože má podobné vlastnosti i jednotku. Je to tedy jakýsi vnitřní moment hybnosti, kolik energie je uloženo uvnitř, přestože se částice ve skutečnosti neotáčí. Neotáčí se už jen proto, že se předpokládá, že je to částice bodová a že částice nejsou ani tak malé kuličky, ale spíše pole. Podíváme-li se na rozpad  $\beta$ . Máme neutron, který má elektrický náboj 0 a spin  $+1/2$ . Ten se přemění na proton o elektrickém náboji  $+1$  a spinu  $+1/2$ , dále elektron o elektrickém náboji  $-1$  a spinu  $+1/2$ . Pokud si to rychle sečteme, vidíme, že elektrický náboj nám sedí, ale původní částice má spin  $+1/2$  a výsledné dohromady  $+1$ . Pokud se taková vlastnost zachovává, tak je potřeba k výsledným částicím přidat ještě jednu částici, která je elektricky neutrální a má spin  $-1/2$ . Takovou částici nazýváme antineutrino. Tato částice navíc musí mít velmi malou hmotnost, protože hmotnost neutronu je téměř stejná jako proton plus vyzářený elektron. Původně se myslelo, že má neutrino hmotnost nulovou, ale nyní je experimentálně ověřeno, že neutrina obecně nenulovou hmotnost mají. Tuto hmotnost se ale dodnes nepodařilo změřit. Protože je hmotnost velmi malá a částice není nabitá, tak bylo její detekování velmi obtížné. Její předpovězení se odehrálo v roce 1933, ale potvrzení přišlo až v roce 1956. Enrico Fermi se potvrzení své částice nedožil, protože zemřel v roce 1954. Beta rozpad můžeme vidět na obrázku 1.7.



Obrázek 1.7: Znázornění  $\beta$  rozpadu [14].

Pro slabou sílu se ukázalo, že ji lze popsat velmi podobně jako sílu elektromagnetickou. K popisu se používal takzvaný intermediální vektorový boson W.

Intermediální znamená, že něco zprostředkovává, v našem případě slabou interakci. Boson znamená, že má spin celočíselnou hodnotu oproti částicím s poločíselnou hodnotou, které nazýváme fermiony, ale o tom více v následující kapitole. Vektorový znamená, že je popsán vektorovým polem. Vektorové pole je takové pole, které každému bodu v prostoru přiřadí nějaký vektor, šipku s velikostí a směrem, na rozdíl od skalárního pole, které každému bodu v prostoru připisuje číslo. Na první pohled to může znít komplikovaně, ale podíváme-li se například na předpověď počasí, tak mapa, která ukazuje teplotu je skalární pole, protože každé místo na mapě má určitou teplotu, jedno číslo. Vektorové pole je větrná mapa, která v každém místě ukazuje, jak moc a kterým směrem vítr fouká a většinou je znázorněno malými šipkami. Důvod, proč toto zmiňuji je ten, že slabá interakce je velmi podobná elektromagnetické, obě jsou popsány vektorovým polem. Pro elektromagnetickou sílu stačí k popsání jediný parametr, proto existuje jediná částice foton. Pro slabou jadernou sílu jich je třeba více. Jedna už byla zmíněna, je to boson  $W$ , ten ale musí být elektricky nabitý, protože při přeměně neutronu na proton se mění náboj a právě tato částice ho má odnést. Boson  $W$  tak bude existovat ve dvou variantách, a to kladně nebo záporně nabitý, takže existují bosony  $W^+$  a  $W^-$ . Při pokusu o sjednocení elektromagnetické a slabé síly v elektroslabou sílu bylo potřeba přidat ještě elektricky neutrální boson  $Z$ . Bosony  $W$  a  $Z$  se od fotonu ještě liší v tom, že foton nemá klidovou hmotnost, ale bosony  $W$  a  $Z$  klidovou hmotnost mají. Tento rozdíl v hmotnosti, ale zůstával záhadou. Na řešení přišli Robert Brout a Francois Englert a nezávisle na nich Peter Higgs v roce 1964. Toto zhmotnění probíhá tak, že vektorové pole slabé interakce získá svoji hmotnost v interakci s dalším polem, tentokrát skalárním, nazývajícím se Higgsovo pole. Higgsovu poli odpovídá další částice, takzvaný Higgsův boson, na jejíž potvrzení jsme čekali až do roku 2012. Je to tak prozatím poslední elementární částice, která byla objevena. Protože bosony elektromagnetické interakce jsou popsány vektorovým polem mají spin 1 a protože Higgsův boson je popsán polem skalárním, tak má spin 0. Je to jediná elementární částice se spinem nula. Za zmínku stojí, že Higgsův boson velmi dlouho populární nebyl, protože teorie nedávala přesnou předpověď jeho hmotnosti. Zatímco předpověď bosonů  $W$  a  $Z$  tyto hmotnosti poskytovala. Bosony  $W$  a  $Z$  byly potvrzeny v roce 1983 v CERNu. Na Higgsovu částici jsme si, jak už bylo zmíněno, museli dlouho počkat.

## 1.8 Kvarky

Od poloviny třicátých let 20. století se množství částic, které se tehdy považovaly za elementární, značně rozrůstalo. Byl například objeven mion, což je částice velmi podobná elektronu, jen je výrazně těžší a velké množství částic, které interagují silnou interakcí. K protonu a neutronu tak přibyli piony, kaony a další hadrony. Těchto částic začínalo být veliké množství, a tak se sen o jednoduchých fundamentálních zákonech začal rozplývat. Vědci tak tyto částice začali rovnat a seskupovat do tabulek, podobně jako se prvně řadily prvky v periodické soustavě prvků. Těmto tabulkám se říká multiplety. Každý multiplet je různě veliký a má různé vlastnosti, které odpovídají matematickým uskupením, zvaným grupy. V roce 1964 se nezávisle na sobě podařilo vědcům se jmény Murray Gell-Mann a George Zweig vytvořit model tří kvarků, které celou tehdy známou plejádu částic dokázala popsat jen pomocí tří kvarků, pro které se ustálily názvy  $u$  (up -

nahoru), d (down - dolu) a s (strange - podivný). Například proton již nebyl elementární částicí, ale složeninou dvou kvarků u a jednoho kvarku d. Při propojení se slabou interakcí, ale došlo k rozporu s měřenými daty. Podle teorie by mělo docházet k velmi časté interakci bosonu Z s kvarky d a s, což se ale nepozorovalo, nebo alespoň ne v takové míře jak ukazovala teorie. Tento problém se podařilo šarmantně vysvětlit přidáním čtvrtého kvarku c (charm - šarm). S touto myšlenkou přišli Sheldon Glashow, Jean Iliopoulos a Luciano Maiani v roce 1970. V roce 1974 byl c kvark experimentálně potvrzen a brzy poté se pro teorii, která popisovala sjednocenou elektroslabou interakci a silnou interakci, začal vžívat název Standardní model.

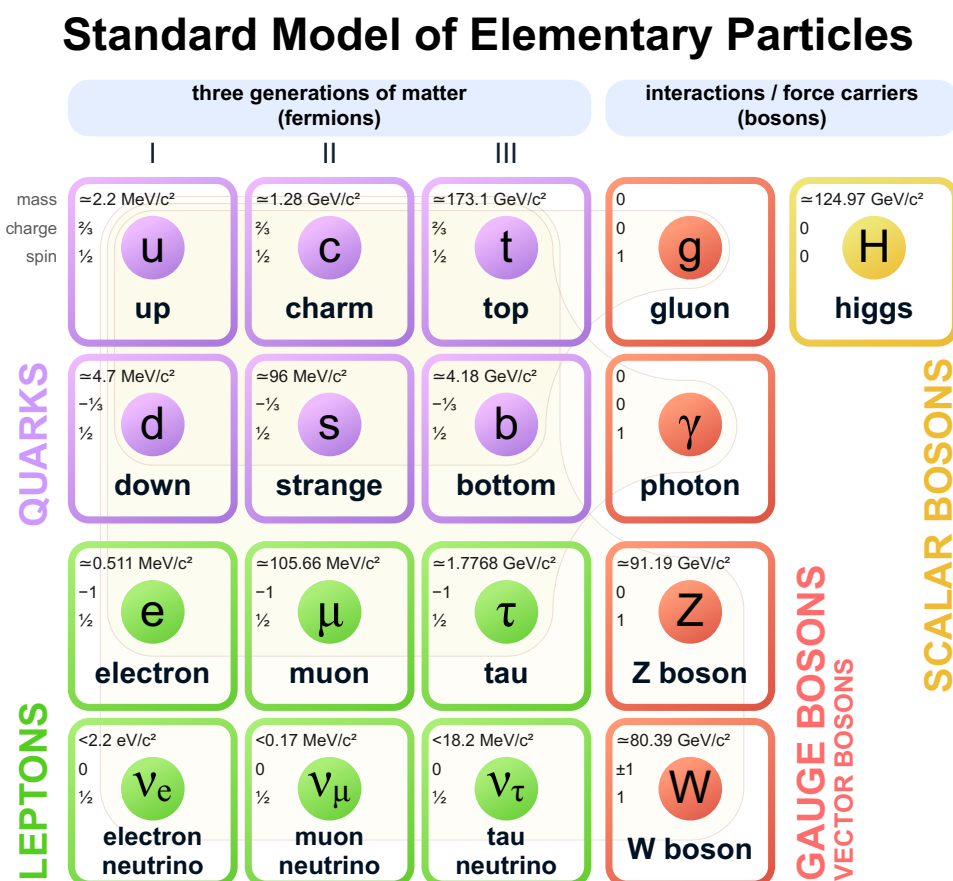
Ve fyzice existuje něco, čemu říkáme symetrie. Symetrií existuje několik, ale pro nás budou podstatné následující tři symetrie. První symetrie je symetrie C, je to takzvaná nábojově konjugáčnická symetrie. Jde o to, že pokud v rovnici nebo v experimentu obrátím znaménka nábojů, tak teorie nebo experiment budou fungovat nebo probíhat stejně. Například máme-li dva elektrony, tak se budou odpuzovat. Prohodím-li oba elektrony za pozitrony tj. otočím náboje, tak se budou opět odpuzovat. Elektrony a pozitrony tak C symetrií zachovávají. C symetrií dokonce zachovává elektromagnetismus, gravitace i silná interakce. Slabá interakce tuto symetrii narušuje a to dokonce maximálním možným způsobem. Druhou symetrií je symetrie P. V této symetrii jde o zachování parity, tedy o prohození prostorových souřadnic. Jde o to, co se stane, pokud prohodím levou stranu za pravou, hořejšek za dolejšek a předeek za zadek. Matematicky jde o zobrazení podle středové souměrnosti. Symetrie P v kombinaci se symetrií C dávají dohromady CP symetrii. Ukázalo se, že i tuto symetrii slabá síla narušuje, což přináší problémy. A právě toto narušení CP symetrie vedlo k tomu, že v roce 1972 Makoto Kobayashi a Toshihide Maskawa předpověděli ještě další dva kvarky b a t. Z počátku jejich práce nebyla příliš známá ani přijímaná, protože v roce 1972, nebyl znám ještě ani čtvrtý kvark. Nakonec ale v roce 1977 byl objeven půvabný pátý kvark b z anglického beauty - půvabný nebo dnes používanější bottom (dolní). Na potvrzení posledního kvarku jsme si ale museli počkat až do roku 1995. Oba vědci nakonec za svoji pravdivou předpověď obdrželi Nobelovu cenu v roce 2008. Kvark tak nesl jméno t od slova true - pravdivý, dnes se setkáme spíše s označením top kvark neboli horní. Poslední symetrií je symetrie T. Zde jde o prohození časových souřadnic tj. pustíme proces pozpátku. Obecně se přijímá, že CPT symetrii, kombinaci všech tří symetrií, splňují všechny interakce.

K šesti kvarkům, které se drží pohromadě a interagují společně pomocí gluonů, se podařilo objevit i šest leptonů. Tři leptony už známe, jsou jimi elektron a jeho hmotnější sourozenec mion. A k elektronu patří i neutrino, správně elektronové neutrino, protože se později objevila další dvě. V roce 1975 se objevil ještě hmotnější sourozenec elektronu a mionu, nazvaný tauon. V té době se ještě objevilo mionové neutrino (1962). Poslední neutrino tauonové bylo objeveno až roku 2000. V novém miléniu jsme se tak dostali do stavu, že máme šest kvarků a šest leptonů, které tvoří hmotu. Z teoretických důvodů je podstatné, aby bylo kvarků stejně jako leptonů.

# 2. Současný stav fyzikálního poznání

## 2.1 Standardní model

Všechny dnes známé přírodní jevy se vysvětlují a popisují pomocí čtyř základních interakcí - elektromagnetická síla, slabá jaderná síla, silná jaderná síla, gravitační síla. Gravitační interakce je popisována pomocí obecné teorie relativity, která vnímá gravitační sílu jako zakřivení prostoročasu. Nejedná se tak o interakci v pravém slova smyslu. Částice se pohybují podle prvního Newtonova zákona - Těleso setrvává v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu, dokud není nuceno vnějšími silami svůj stav změnit. Zdánlivá změna pohybu je způsobena tím, že je prostor zakřiven. Pokusy popsat gravitaci pomocí interakcí částic jsou zatím neúspěšné. Zbylé tři interakce jsou popisovány tzv. standardním modelem částic. Grafické znázornění modelu je na obrázku 2.1. Tento model předpokládá existenci několika elementárních částic, které si v této kapitole popíšeme.



Obrázek 2.1: Standardní model elementárních částic [10]

První rozdělení je na částice a antičástice. Ke každé částici existuje její anti-

částice, částice mající opačný náboj, a to jak elektrický, tak i barevný (je definován dále v textu). Částice se od sebe jinak neliší, mají stejnou hmotnost i na ně působí stejné interakce. Páry částice a antičástice se mohou vzájemně anihilovat a vyprodukovat částice zvané bosony, z nichž nejnámější jsou fotony. Ukázkovým příkladem takové srážky je anihilace elektron-pozitronového páru, při které vznikají dva opačnými směry pohybující se fotony. Tohoto jevu se využívá v pozitronové emisní tomografii (PET), která nám dovoluje nahlédnout např. do mozku člověka, aniž bychom museli narušit lebku.

Částice i antičástice dělíme na dvě základní skupiny podle velikosti spinu na fermiony a bosony. Jak již bylo v předchozí kapitole zmíněno, spin je moment hybnosti, který částice má, přestože nevykonává žádný prostorový pohyb, tedy jakýsi vnitřní moment hybnosti. Tato veličina může nabývat buď poločíselného, nebo celočíselného násobku redukované Planckovy konstanty (konstanty pojmenované po jednom ze zakladatelů kvantové fyziky Maxovi Planckovi). Mají-li částice spin poločíselný, nazýváme je fermiony a pokud celočíselný, pak jsou nazývány bosony. Můžeme říci, že elementární fermiony tvoří hmotu a elementární bosony zajišťují interakce.

Fermiony byly pojmenované Paulem Diracem (fyzikovi známém pro svou rovnici spojující kvantovou mechaniku se speciální relativitou) po italském fyzikovi jménem Enrico Fermi. Fermiony se řídí Fermiho-Diracovým rozdělením a platí pro ně Pauliho vylučovací princip (dva identické fermiony nesmí být ve stejném kvantovém stavu). Tento vylučovací princip například vysvětluje, proč se elektrony v obalu atomu poskládají do různých vrstev a nepadnou všechny do té nejbližší jádru. Poskládají se do vrstev, protože vrstva je právě jedna z informací, které určují zmiňovaný kvantový stav. Elementární fermiony se vyskytují ve třech generacích, které se liší hmotností. První generace má nejmenší hmotnost, druhá generace je o něco těžší a poslední je nejtěžší. Elementární fermiony se dále dělí na kvarky a leptony.

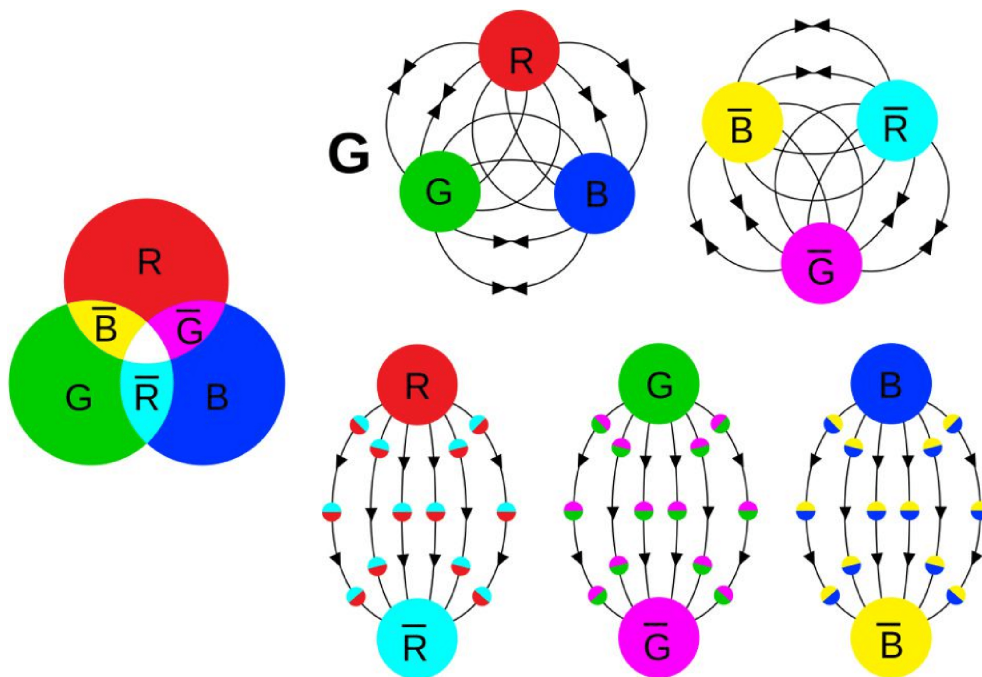
Leptony, jejichž název pochází z řečtiny a znamená lehká částice, nepodléhají silné jaderné síle a mají, na rozdíl od kvarků, celočíselný elektrický náboj. Mezi leptony patří nabitá částice elektron (1. generace), mion (2. generace) a tauon (3. generace). Mion je tak ve své podstatě jen těžší elektron a tauon je ještě mnohem těžší. Dále mezi leptony patří elektricky neutrální částice - elektronové, mionové a tauonové neutrino. Protože nejsou neutrino elektricky nabitá a jsou leptony, jediná síla ze standardního modelu, která na ně působí je slabá jaderná síla, proto je bylo tak těžké dlouho detekovat.

Druhou skupinou jsou kvarky. Kvarky jsou elementární částice, které interagují všemi čtyřmi známými interakcemi a mající následující základní charakteristiky: elektrický náboj, hmotnost, spin, vůni (flavor), barvu (color). Vůně (flavor) odkazuje na druh elementární částice. Například u kvarků rozeznáváme šest druhů, neboli vůní. Pro první generaci to jsou kvarky up a down. Pro druhou generaci charm a strange. Pro třetí generaci top a bottom (zde je možné se setkat i s označením true a beauty).

Hlavní interakcí probíhající mezi kvarky je silná jaderná síla, která je zprostředkovávána pomocí gluonů (definice níže) a popisována pomocí kvantové chromodynamiky (QCD). Kvarky existují ve třech barvách, odtud chromodynamika, protože chróma je z řečtiny barva. Tyto barvy jsou pro kvarky červená, zelená a modrá a pro antikvarky mají k nim tři příslušné antibarvy (antičervená, anti-



zelená a antimodrá). Pozor ale, že s barvami z naší každodenní zkušenosti však nemá tato barva žádnou spojitost. Označení barva, popřípadě barevný náboj, se používá jen jako vhodná analogie. Grafické znázornění této analogie je možné vidět na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Grafické znázornění barevného náboje. Vlevo barvy označené R - červená, G - zelená, B - modrá, pruhem je označena antibarva. Nahoře baryon (vlevo částice, vpravo antičástice). Dole tři možnosti jak barevně poskládat mezony. [6]

První zajímavou vlastností QCD je tzv. barevné uvěznění (color confinement), které diktuje fakt, že částice nemůže existovat volně, má-li některou z barev. Proto se kvarky seskupují dohromady a tvoří složené částice, protože složením všech tří barev (popřípadě antibarev) nebo složením barvy a antibarvy je dosaženo bezbarvosti (při analogickém skládání barev je to barva bílá). Jsou-li částice tvořeny kvarkem a antikvarkem s příslušnou barvou a antibarvou, říkáme takovým částicím mezony (např. piony, kaony). Jsou-li tvořeny ze tří kvarků různých barev, nazýváme je baryony (např. protony, neutrony). Další vlastností QCD je asymptotická volnost (asymptotic freedom), která říká, že síla interakce asymptoticky slábne s klesající vzdáleností a rostoucí energií. To jde proti naší běžné zkušenosti. Například magnetická síla s rostoucí vzdáleností klesá, tj. čím dále jsou od sebe magnety, tím méně se přitahují. Zde je to naopak. Můžeme si to představit tak, že je mezi částicemi pomyslná pružinka. Když se chtějí částice od sebe oddělit, pružinka se napíná a snaží se částice přitáhnout zpět k sobě.

Další skupinou jsou bosony. Jak již bylo uvedeno, jsou to elementární částice mající celočíselný spin a jsou to částice zajišťující interakce. Nejznámějším bosonem je foton, zajišťující elektromagnetickou interakci. Foton má nulovou klidovou hmotnost, proto se elektromagnetická interakce šíří maximální možnou rychlostí a to rychlostí světla a na neomezenou vzdálenost.

Dalšími bosony jsou W a Z bosony, částice zprostředkující slabou interakci.

Na rozdíl od fotonů nemají nulovou klidovou hmotnost a mají tak velmi krátký poločas života. Protože je poločas života kratší než  $10^{-24}$  s a šíření nemůže být přirozeně nekonečně rychlé, je její typický dosah  $10^{-18}$  m, což je asi tisícinu atomového jádra.

Silná jaderná interakce je pak zprostředkovávána pomocí již zmíněných gluonů. Pojmenování gluon pochází z anglického glue, neboli lepidlo, protože drží kvarky pohromadě a ty pak tvoří složené částice, hadrony. Gluony se vyskytují v osmi barvách. Jelikož i samy nesou barevný náboj, mohou samy mezi sebou interagovat. Přestože má gluon nulovou klidovou hmotnost a šíří se tak rychlostí světla, ale kvůli jeho opačnému působení (čím dál, tím silnější) a samointerakcím, je její účinnost omezena na  $10^{-15}$  m, což je velikost atomové jádra. Je tedy dobře vidět, proč se oběma jaderným silám říká jaderné - působí jen na vzdálenost jádra. Také je patrné, proč se s nimi v běžném životě nesetkáváme.

Poslední částicí standardního modelu je Higgsův boson, který pomohl sjednotit elektromagnetickou a slabou jadernou sílu a dát částicím hmotnost.

## 2.2 Nutnost interakcí

Na první pohled se může zdát, že máme vlastně dvě oddělené věci, kterými se částicová fyzika zabývá. Na jedné straně máme částice, které si zjednodušeně představujeme jako malé kuličky, a interakce, představující síly, které mezi částicemi působí. Ve skutečnosti ale tato dualita úplně neplatí. Je totiž možné vytvořit model, který by obsahoval jen částice. Jenže takovýto model by měl veliké potíže. Při počítání s částicemi by se ve výpočtech objevovali nekonečna a nedefinované výrazy. Pokud se ale k částicím přidají i interakce, tak se tyto problémy vyřeší.

Máme-li v modelu nějaké částice, chceme po nich, aby splňovali nějaké základní požadavky. Jednou z těchto vlastností může být invariance vůči posunu souřadnicového systému a to jak posunutí v prostoru, tak posunutí v čase. Tento požadavek je v celku logický. Nepředpokládáme, že pokud provedeme pokus na jednom místě a poté ten samý pokus uděláme o dvě minuty později a nezměníme počáteční podmínky, tak že by dopadl jinak. Stejně pokud pokus posuneme o kousek vedle. Právě takovéto podmínky vedou v konečném důsledku k přidání interakcí.

My tento příklad známe i ze středoškolské fyziky. U některých veličin nás nezajímá jejich hodnota, ale jaký je rozdíl těchto veličin ve dvou bodech. Příkladem může být potenciální gravitační energie. Vždy nás zajímá, jaký je rozdíl potenciální gravitační energie mezi dvěma body, protože z té můžeme například spočítat, jak moc polohové energie se přemění na kinetickou energii. Dalším příkladem může být elektrický potenciál, který nás také příliš nezajímá, ale podstatnější je elektrické napětí, což je rozdíl těchto potenciálů. Stejně to platí i pro výpočet polohy nebo času, pro výpočet rychlosti. Není podstatné, jak vzdáleny jsou od počátku, ale jak jsou vzdáleny od sebe. Proto se rychlost počítá jako změna polohy vydělená změnou času. Z těchto vlastností lze odvodit jisté zákony. Tuto skutečnost objevila Emma Noetherová, po které je pojmenován Teorém Noetherové. Ten říká, že invariance jistých veličin vede k zákonům zachování veličiny jiné. Pro středoškolskou fyziku se nejčastěji udává invariance vůči posunutí v čase, která vede k zákonu zachování energie a posunutí v prostoru vedoucí k zákonu zachování hybnosti. Ještě je možné dodat například invarianci k rotaci souřadnicového

systému, která vede k zákonu zachování momentu hybnosti. Matematicky se dá tato vlastnost vyjádřit nějakou matematickou operací. V našich příkladech o posunutí je to přičítání konstanty, v případě rotace je to násobení pomocí rotační matice.

Protože je ale částicová fyzika popsána kvantovou teorií, tak se zde jako hlavní veličina používá takzvaná vlnová funkce (pozor nemá nic společného s vlněním, jen první vlnové funkce, popisují jednoduché systémy obsahovaly sinus a cosinus, popřípadě komplexní exponenciálu a ty vyjadřují vlnění. Odtud tedy název vlnová funkce.) Tato vlnová funkce označovaná písmenem  $\psi$ , nemá úplně reálnou fyzikální interpretaci. Co ale interpretaci má je její druhá mocnina. Ta vyjadřuje pravděpodobnost. Pokud vynásobíme vlnovou funkci komplexní exponenciálou o velikosti jedna, tak se vlnová funkce změní, ale druhá mocnina nikoliv. Platí proto následující vztah.

$$\begin{aligned}\psi_2 &= \psi_1 \cdot e^{ix} \\ |\psi_2|^2 &= |\psi_1 \cdot e^{ix}|^2 \\ |\psi_2|^2 &= |\psi_1|^2\end{aligned}$$

Protože tato transformace nezmění pravděpodobnost, kterou druhá mocnina vlnové funkce reprezentuje, tak je vůči této transformaci vlnová funkce invariantní. To je pak možné, stejně jako v klasických případech, interpretovat tak, že platí nějaký nový zákon. V tomto případě to přidává k částicím interakce. Protože v argumentu komplexní exponenciály může být věcí více, tak se nám objeví více interakcí. Možnosti, které mohou být v argumentu se dají poskládat do skupinek, které se nazývají grupy. Každá grupa následně popisuje jednu z interakcí.

Nejjednodušší grupa, která se zde nachází, je taková, která obsahuje jednotkovou matici. Je to grupa  $U(1)$ . Tato grupa popisuje interakci, která má jen jednu proměnnou, tedy jeden boson. V našem světě ji říkáme elektromagnetická interakce a tou částicí je foton.

Druhá nejjednodušší grupa je grupa  $SU(2)$ , která obsahuje všechny matice  $2 \times 2$ , které mají determinant 1 a jejich transponovaná matice a komplexně sdružená je zároveň inverzní. (Ty to poslední dvě podmínky příliš neřešme.) Takováto grupa lze popsat pomocí 3 proměnných, takže musí obsahovat i tři bosony. Tuto interakci nazýváme slabá jaderná síla interagující částice jsou bosony  $W^\pm$  a boson  $Z$ .

Pokud tyto dvě skupiny sloučíme do jedné, tak dostaneme grupu  $U(1) \times SU(2)$ , která popisuje elektroslabou interakci.

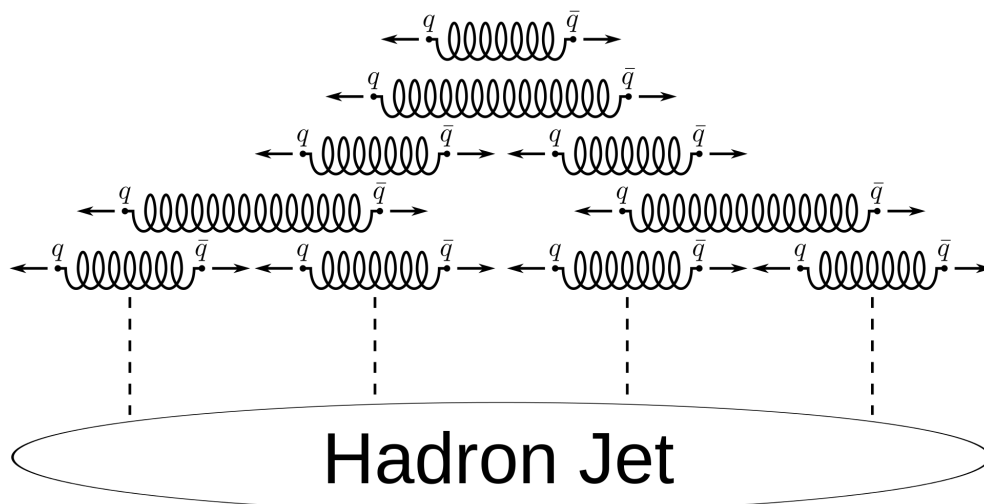
Poslední skupinou je grupa  $SU(3)$ , což je podobné, jako  $SU(2)$ , akorát s maticemi  $3 \times 3$ . Tato grupa je udána 8 proměnnými, takže má osm bosonů. Ty reprezentují silnou jadernou interakci a jejich osm gluonů.

Propojit všechny interakce do jedné a jednotného matematického popisu se ale ještě nepodařilo.

## 2.3 Jety

Jak již bylo zmíněno, silnou interakci si lze velmi zjednodušeně představit jako pružinku mezi dvěma kvarky. Máme-li pár kvark-antikvark, které jsou k sobě přitahovány silnou jadernou silou, a budeme-li se je snažit oddálit od sebe, tak nastane jedna zajímavá událost. Pokud dodáme tomuto páru dostatečné množství

energie a budou se od sebe oddalovat, tak bude pro pár energeticky výhodnější, když se vazba přetrhne. Protože však nemohou kvarky existovat samy, tak si oba k sobě vytvoří další částici, se kterou budou svázány. V naší analogii s pružinkou se pružinka přetrhne a na nových dvou koncích vzniknou nové částice. Tato částice je vytvořena z potenciální energie původní vazby. Pokud se při srážce stane, že takovýto pár vznikne a má dostatečné množství energie, což není při vysoce energetických srážkách nic neobvyklého, tak takovýto proces nastane hned několikrát. Původní pár se od sebe oddaluje a vzniká tak dvojice párů. Ty se opět oddalují a vznikne čtveřice párů a tak dále. Vznikne jakási sprška částic, které se říká jet, který se pohybuje ve směru původní částice.



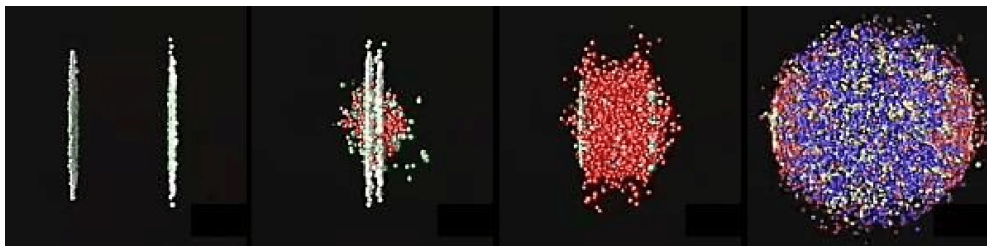
Obrázek 2.3: Grafické znázornění vzniku jetu pomocí oddalování páru kvark antikvark [19].

Sprška kvarků pak takzvaně hadronizuje, to znamená, že se kvarky pospojují do hadronů. Pospojují se, protože nemohou kvůli barevnému uvěznění zůstat samy. Není tak nic neobvyklého, že ze srážky dvou protonů (typický příklad srážení na urychlovači) vzniknou desítky protonů. Nevznikají z ničeho, vznikají z energie, kterou jsme sráženým částicím dodali. To je důvod, proč je potřebné při srážení částic, aby se pohybovaly velmi rychle. Čím rychleji se částice pohybují, tím větší mají kinetickou energii a tím více a těžších částic můžeme pozorovat.

## 2.4 Kvark-gluonové plasma

Ve fyzice na základní škole se učí, že existují tři skupenství hmoty. Pevná látka, kapalná látka a plynná. Pevná látka je taková látka, ve které drží atomy pohromadě, jsou mezi nimi vazby. Pokud pevné látce dodáme energii, zahřejeme ji, přetrhnou se vazby mezi atomy a vznikne kapalina. V kapalině se sice atomy již nedrží, ale pořád se drží poměrně blízko sebe. Když kapalině dodám další energii, začnou se částice od sebe vzdalovat a vznikne tak plyn. Zde většinou fyzika ve škole končí, ale co se bude dít, pokud budeme dodávat ještě více energie? Pokud to uděláme, odtrhnou se z atomů elektrony a vznikne něco čemu říkáme plasma. Takové plasma se vyskytuje například v ionosféře nebo na Slunci. Pro pořádek je dobré poznamenat, že tento proces nemusí nastávat jen u plynných látek, mo-

hou ionizovat (tak se přechodu do tohoto skupenství říká) i ostatní skupenství. Pokud bychom v tomto přidávání energie pokračovali, tak může nastat to, že se rozpadnou i jádra atomů a dokonce i samy nukleony, souhrnný název pro protony a neutrony. Tyto nukleony se tak rozpadnou na kvarky a gluony a vzniká kvark-gluonové plasma. Kvark-gluonové plasma (QGP) je skupenství hmoty, ve kterém existují volné kvarky a gluony. Vzniká při velmi vysokých teplotách a hustotě. Těchto podmínek dosahoval vesmír krátce po svém vzniku a uměle lze takových podmínek dosáhnout na velmi krátkou dobu při srážkách v urychlovačích. Ukázka vzniku QGP při srážce těžkých iontů (jader atomů, na LHC se používají jádra olova) je na obrázku 2.4. V těchto podmínkách již není proton schopen udržet se pohromadě a rozpadne se na elementární kvarky a gluony. Toto je další úkaz, se kterým se na urychlovačích můžeme setkat.



Obrázek 2.4: Vznik kvark gluonového plasmatu při srážkách těžkých iontů. [34]

## 2.5 Složené částice

U silné jaderné interakce bylo řečeno, že částice, které mají barevný náboj nemohou existovat samy o sobě, musí se dohromady vázat do složených částic. Jednou z možností jsou částice mezony, které jsou tvořeny dvojicí kvark-antikvark. Není nutné, aby to byl například kvark  $u$  a k němu příslušný anti  $u$ , v takové případě by se dokonce anihilovali. Mezony nejsou obecně příliš stabilní a mají tak velmi krátkou střední dobu života. Nejdéle vydrží neutrální kaon, který má střední dobu života přibližně 50 nanosekund. Je to z našeho pohledu velmi krátká doba, ale částicím to bohatě stačí na to, aby je detektor zaregistroval. Některé kombinace kvark antikvark nevydrží prakticky vůbec, méně než  $10^{-22}$  sekundy, takové útvary nestihnou s ničím reagovat a proto je nenazýváme částice, ale rezonance. Nejpočetnějšími mezony jsou piony a kaony. Piony obsahují jen kvarky první generace. Nabitý pion je spojením kvarku  $u$  a kvarku  $d$ , respektive kladný pion je  $u$  a anti  $d$  a záporně nabitý pion  $d$  a anti  $u$ . Neutrální pion je v superpozici  $u$  a anti  $u$  a zároveň  $d$  a anti  $d$ . Další částicí je kaon, který je charakteristický tím, že obsahuje s kvark. Elektricky kladně nabitý kaon je spojením  $u$  kvarku a anti- $s$  kvarku. Elektricky záporně nabitý kaon je dán opačným spojením, tj. s kvark a anti- $u$  kvark. Neutrální kaon má dvě možnosti, buď  $d$  kvark s anti  $s$  kvarkem nebo opačně (anti  $d$  a  $s$ ).

Druhou z možností jsou baryony - trojice kvarků, popřípadě trojice antikvarků. Nejznámější baryony jsou proton a neutron. Oba tyto baryony jsou opět tvořeny pouze kvarky první generace. Proton musí mít elektrický náboj jedna, takže jediná možnost jak ho sestavit z těchto kvarků je prostá, dva kvarky  $u$  a jeden  $d$ . Neutron má elektrický náboj nula, tak jediná možnost jak jej sestavit je jeden kvark  $u$

a dva kvarky d. Všimněme si, že proton a neutron se liší jen v jediném kvarku, takže vzpomeneme-li si na  $\beta$  rozpad, kdy se nám mění neutron na proton, tak to co se vlastně děje je, že jeden d kvark se změní na kvark u.

Je potřeba si uvědomit, že na detektoru, který si popíšeme v následující kapitole, se nám kvarky jako takové změřit přímo nepodaří. To, co vždy budeme místo toho pozorovat, jsou právě složené částice. Takže kvarky, a nejen je, ale i třeba elementární bosony slabé interakce, je nutné zpětně dopočítávat. Jedna možnost je, že víme, kdy a kde tyto složené částice byly a víme kam směřovaly, takže jsme schopni říci, kde byly předtím a takto si můžeme vlastně přehrát srážku pozpátku. Nebo se můžeme dívat na koncové složení částic, které je pro každou srážku nějak charakteristické a ze statistiky se dozvědět, jestli v několika z mnoha srážek nedošlo k události se zajímavou částicí.

# 3. Large Hadron Collider a detektor ATLAS

## 3.1 Urychlování částic

Ke zkoumání částic je potřeba použít urychlovač částic. Částicový urychlovač je zařízení, které využívá elektromagnetické pole, aby nabitě částice urychlilo na velmi vysoké rychlosti, blízké rychlosti světla. Takto urychlené částice se pak nechají narazit buď do terčiku, popřípadě do jiných částic obíhajících urychlovač v opačném směru. Platí, že elektrické pole částice urychluje. Toto pole je buď statické nebo proměnlivé. Proto v urychlovačích částic jsou urychlovány jen nabitě částice - ionty. Například protony, elektrony nebo jádra některých prvků. Magnetické pole se používá k zakřivení dráhy pohybujícího se iontu. Pokud je urychlovač lineární tj. bez zatáček, není třeba magnetického pole. Pokud ale chceme, aby částice využila urychlovač vícekrát než jednou, je potřeba urychlovač zatočit do kružnice. K tomu je potřeba magnetické pole. Pohybuje-li se nabitá částice kolmo (pravý úhel není třeba, ale lépe se to ukazuje) na směr magnetického pole, vznikne síla, která bude působit na částici a začne ji zatáčet. Směr této síly lze určit pro kladné náboje pomocí pravidla levé ruky, pro záporně nabitě síla směřuje na druhou stranu.

## 3.2 Large Hadron Collider

Největším, nejvýkonnějším a nejspíše i nejznámějším je dnes LHC (Large hadron collider) [22] ve švýcarsko-francouzském CERNu (Evropská organizace pro jaderný výzkum). Prvně byl spuštěn 10. září 2008 a zůstává zatím posledním přírůstkem do komplexu urychlovačů v CERN. LHC není prvním urychlovačem v CERNu a využívá svých předchůdců jako předurychlovačů. Cesta protonu, který se srazí v LHC na jednom z detektorů, začíná v láhvi se stlačeným vodíkem, odkud je vodík napumpována do zdrojové komory lineárního urychlovače Linac 2 (Linear accelerator 2), zprovozněného v roce 1978, kdy nahradil Linac 1. Ve zdrojové komoře je zbaven elektronového obalu, tak aby zůstalo jen vodíkové jádro (proton), mající elektrický náboj, který dovoluje proton urychlit pomocí elektrického pole. Po dosažení konce tohoto lineárního urychlovače má proton rychlost asi třetiny rychlosti světla a kinetickou energii 50 MeV. Odtud vstoupí do Proton Synchrotron Booster, který se skládá ze čtyř synchrotronových prstenců, ve kterých je proton urychlen na 96 % rychlosti světla a kinetickou energii 1,4 GeV. Druhým účelem boosteru je, že dovoluje udělat svazek s více protony, což zvyšuje využití svazku pro experimenty. Z boosteru putuje do Proton Synchrotronu (PS), kde se nejen urychlují protony, ale je zde možné i urychlovat těžké ionty, pokud je komplex přepnut na srážky těžkých iontů. Ty se sem případně dostávají z Low Energy Ion Ring (LEIR), který je plněn lineárním urychlovačem Linec 3. PS začal urychlovat 24. listopadu 1959 a je částicovým urychlovačem s energií 25 GeV, které je docíleno na kruhové dráze o obvodu 628 metrů. Při této energii se urychlované částice pohybují téměř rychlostí světla, a proto další urychlování,

ať již na tomto urychlovači nebo na dalších urychlovačích, vede k nárůstu energie, nikoliv už však k výraznému nárůstu rychlosti. Po dobu šedesátých let byl PS chloubou CERNu a dodával urychlené částice rovnou do experimentů, až v 70tých letech se stal "plničem" mnohem silnějšího urychlovače a to Super Proton Synchrotron (SPS). SPS byl zapnut v roce 1976. Se svým obvodem téměř 7 kilometrů operuje na 450 GeV. Tento urychlovač slouží opět jako předurychlovač pro LHC a nebo zásobuje další experimenty operující na nižších energiích než LHC, jako je například experiment COMPASS. Do popředí se dostal, když byl nastaven jako proton-antiproton collider (srážec) a byly zde objeveny intermediální bosony slabé interakce W a Z. Posledním a největším, nejvýkonnějším urychlovačem je pak již zmíněný LHC. Obsahuje dvě trubice, ve kterých se pohybuje svazek částic. V jedné trubici se svazek pohybuje po směru hodinových ručiček a v druhé naopak. Trubice se kříží na čtyřech místech, kde se nacházejí částicové detektory. Aby v trubicích nedocházelo ke srážkám s plynem, musí být v trubicích vakuum. Vzhledem k tomu, že obvod LHC je 27 kilometrů, řadí to tento vakuový systém k největším na světě. K zakřívování dráhy svazku se používají velmi silné magnety. Aby došlo ke zvýšení efektivity a snížení energetické náročnosti, používají se supravodivé magnety. Díky těmto a mnoha dalším zařízením je možné, aby každý proton měl před srážkou energii 7 TeV. Při proton-protonové srážce je tak dosaženo 13 TeV. Na místě, kde se dnes nachází LHC, běžel od roku 1989 Large Electron-Positron Collider (Velký elektron-pozitronový urychlovač). Ten však byl spolu s experimenty roku 2000 rozebrán, aby uvolnil místo již zmíněnému LHC. Za svého provozu detailně studoval například elektroslabou interakci nebo data z něj získaná pomohla dokázat, že jsou zde právě tři generace částic. Na LHC se nesráží pouze protony, jsou zde například sráženy jádra olova, při kterých může vznikat již zmíněné kvark-gluonové plasma. Schématické znázornění LHC a jeho předurychlovačů je zobrazeno na obrázku 3.1.

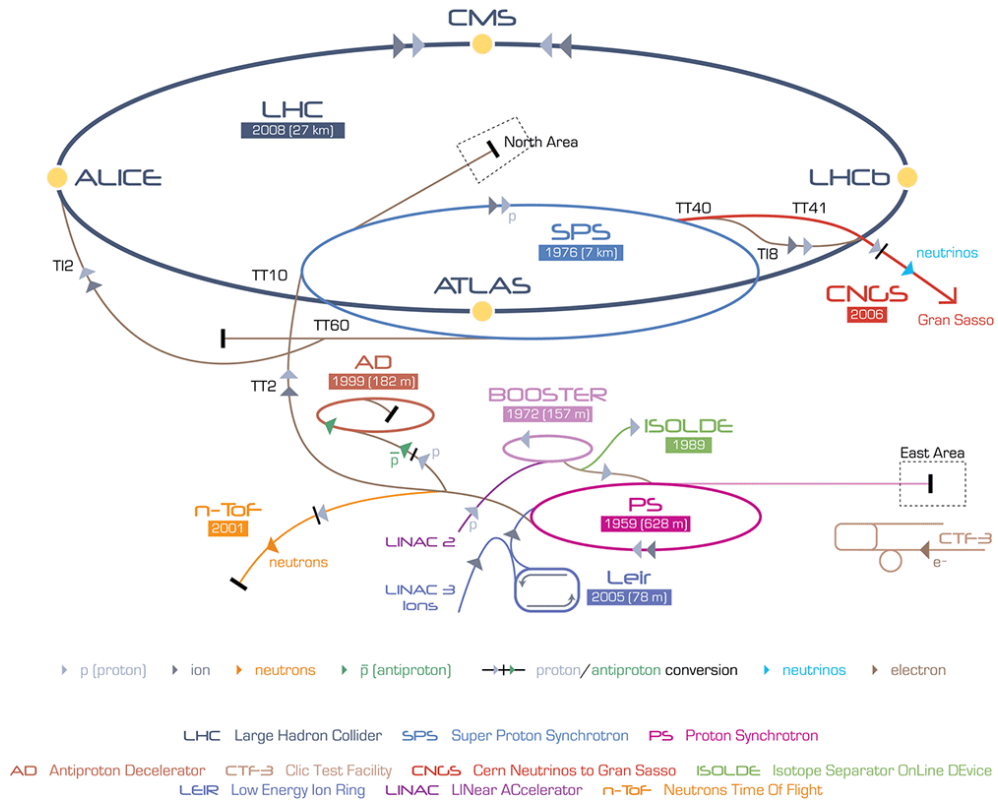
### 3.3 Detektory částic

Na LHC se na čtyřech místech nacházejí detektory částic [23]. Hlavními a největšími detektory snažícími se zabývat co největším rozsahem fyziky jsou ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) a CMS (Compact Muon Solenoid). Pracují nezávisle na sobě proto, aby mohlo dojít k porovnávání výsledků případných objevů. Dále se zde nachází i dva menší specializované detektory. ALICE (A Large Ion Collider Experiment) navržen ke studiu silně interagující hmoty při extrémních hustotách, kvark-gluonového plazmatu. LHCb (Large Hadron Collider beauty) detektor, jak již název napovídá, specializující se na beauty kvark, nebo jen b kvark, studující tak jemné odchylky mezi hmotou a antihmotou. Dále se zde nacházejí ještě další tři menší specializované detektory TOTEM, LHCf a MoEDAL.

### 3.4 ATLAS

ATLAS [18], znázorněný na obrázku 3.2, se skládá z několika soustředných válcově symetrických vrstev, kde v jejich středu se nachází místo srážek protonových nebo Pb svazků. Lze jej rozdělit do čtyř hlavních částí. Vnitřní detektor, kalorimetr, mionový spektrometr a magnetový systém. Každý z detektorů měří



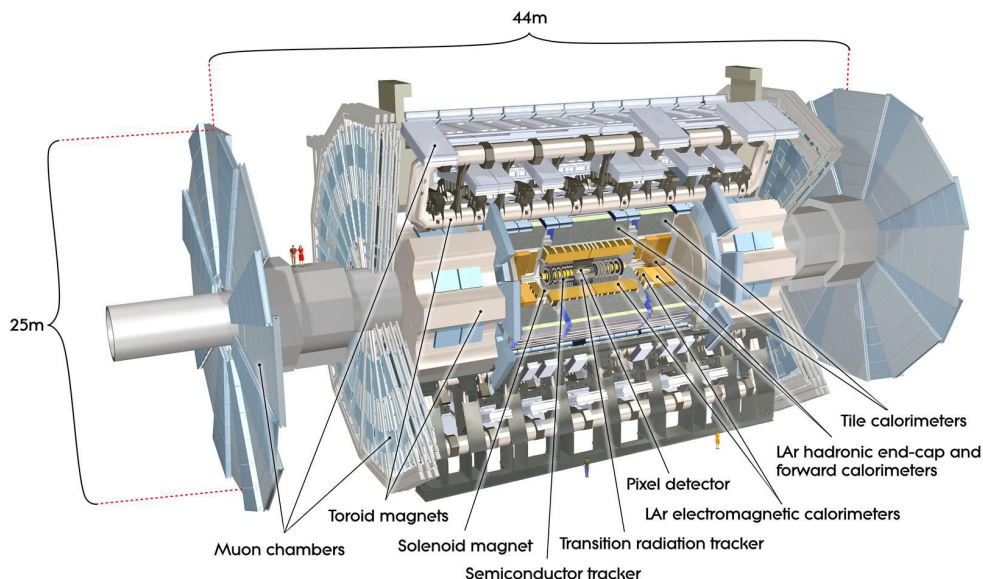


Obrázek 3.1: Schématická ukázka urychlovačů v CERNu [6].

nějakou vlastnost a jsou tak schopny zjistit vlastnosti všech stabilních částic až na neutrina, která jsou dopočítávána z hybnostní nerovnováhy mezi detekovanými částmi. K tomu, aby toto fungovalo, je potřeba, aby detektor byl hermetický a detekoval co největší množství ostatních částic, mimo neutrin.

### 3.4.1 Vnitřní detektor

Vnitřní detektor [37], znázorněný na obrázku 3.3, začíná několik centimetrů od osy srážky svazků a sahá až do poloměru 1,2 metru. V délce podél trubice urychlovače dosahuje 6,2 metru. Jeho hlavní funkcí je sledovat nabitě částic detekováním jejich interakcí s materiálem. Vzhledem k tomu, že vnitřní detektor je obklopen velmi silnými magnety, je tak možné měřit náboj částice, podle toho jakým směrem se zakřivuje a jejich hybnost tím, jak moc se zakřivuje. Pokud je zjištěno, že stopa některé částice nevychází z místa srážky, je pravděpodobné, že pochází z rozpadu jiných částic. Vnitřní detektor je pak možné rozdělit na tři části. Nejvnitřnější částí je Pixel Detector, který je rozdělen do tří vrstev v poloměrech okolo osy svazku 50,5 mm, 88,5 mm a 122,5 mm. Celkově se skládají z přibližně 1700 identických modulů odpovídajícím  $8 \times 10^7$  pixelů. Moduly, které jsou veliké 2 na 6 cm, jsou složeny ze senzorů a čtecích čipů, na kterých je nanesena křemíková vrstvička. V roce 2014 byla přidána ještě jedna vrstva, která je mnohem blíže ose svazku. Nese název IBL -Insertable B-Layer. Další částí vnitřního detektoru je Semi-Conductor Tracker, který je velmi podobný předchozímu detektoru s rozdílem, že místo malých pixelů je využito proužků o rozměrech 80  $\mu$ m na 12 cm, se kterými se lépe pracuje. Vnější část vnitřního detektoru je



Obrázek 3.2: Detektor Atlas [13]

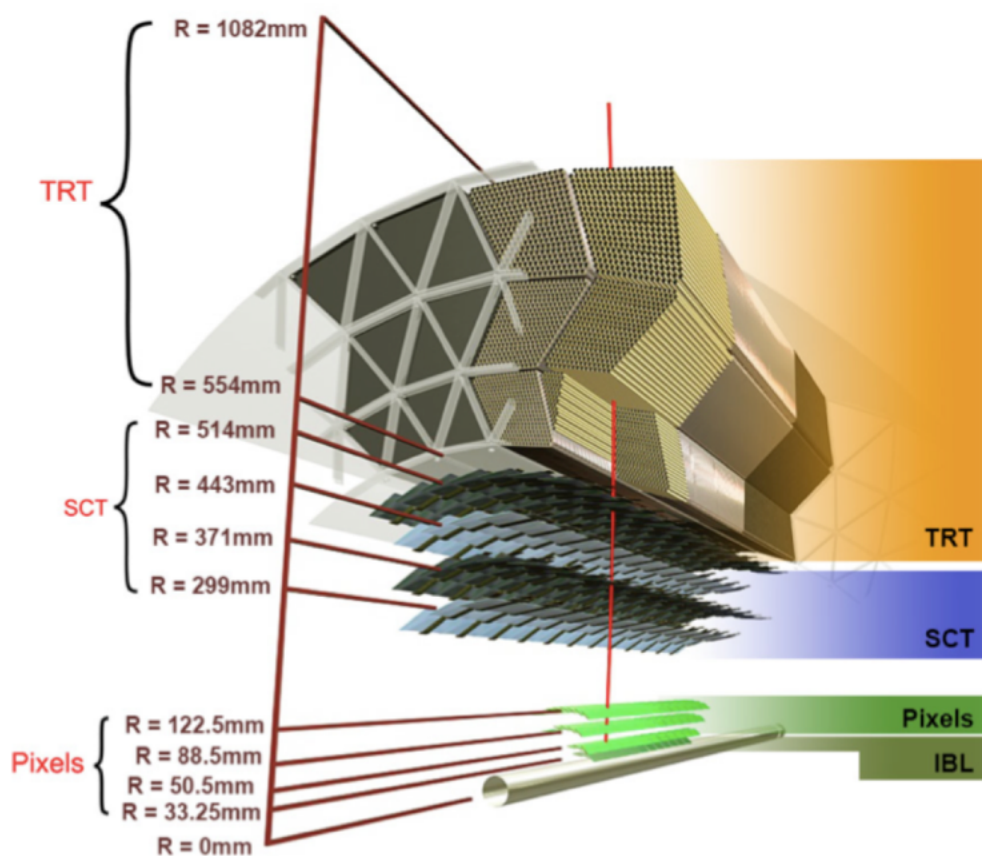
pak Transition Radiation Tracker. Za vnitřním detektorem se nachází magnet (solenoid), který slouží k zakřivování drah nabitých částic.

### 3.4.2 Kalorimetr

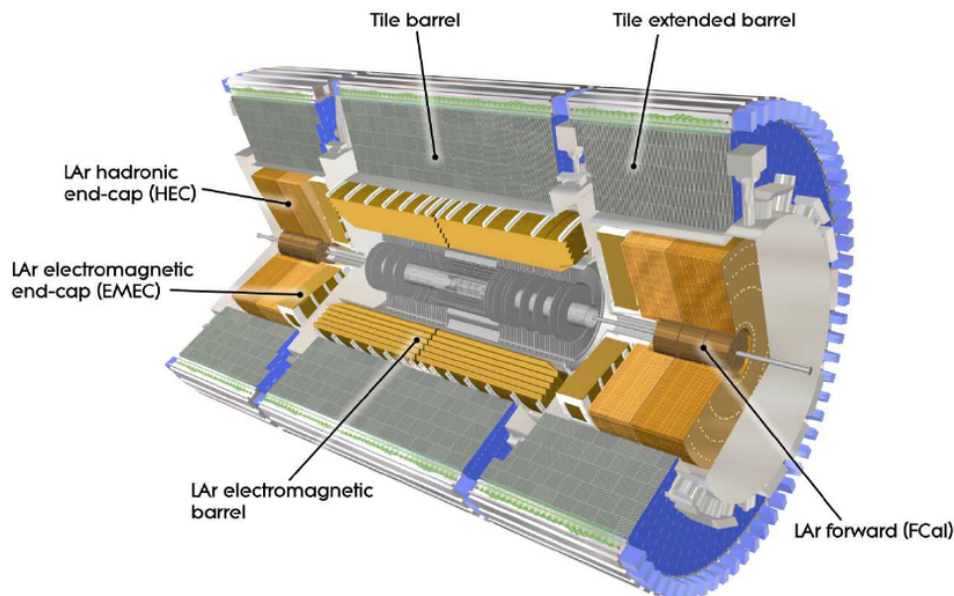
Kalorimetr je složen z hustého kovu (železa) nebo tekutého argonu a jak částice prochází kalorimetrem, ztrácí energii. Základním mechanismem měření energie v kalorimetrech je měření energie částic, která je deponovaná v elektromagnetické či hadronové spršce vznikající v materiálu kalorimetru. Kalorimetr je vzorkovací, to znamená, že periodicky testuje tvar výsledné spršky. Kalorimetr je navíc rozdělen na dva. Vnitřní elektromagnetický absorbuje energii od částic interagujících elektromagneticky (nabité částice a fotony). Tento je velmi přesný jak v množství naměřené energie, tak i v místě kde byla daná energie naměřena. Měří s rozlišením v longitudinálním směru až 0.0031 radiánů. Naopak vnější hadronový kalorimetr je méně přesný (typicky 0,1 radiánů) a detekuje zejména hadronovou komponentu spršky.

### 3.4.3 Mionový spektrometr

Mionový spektrometr je velký sledovací systém skládající se z 1200 měřících komor a několika tzv. triggerových komor s přesným časovým rozlišením. Triggerové komory jsou součástí komplexního triggerového (neboli spouštěcího) systému, který je speciálně určen pro rychlé zaznamenání události v případě výskytu požadované vlastnosti události, tedy např. výskytu vysoko-energetických mionů. Tento detektor se nachází od poloměru 4,25 m až do 11 m. Je to tedy největší část detektoru. Přesnost měření hybnosti částic je od 3 procent pro částice s nulovou hybností (100 GeV/c) až po 10 procent pro částice s velkou hybností (1 TeV/c).



Obrázek 3.3: Grafické znázornění vnitřního detektoru. IBL - Insertable B-Layer, Pixels - The Pixel Detector, SCT - Semi-Conductor Tracker, TRT - Transition Radiation Tracker [5]



Obrázek 3.4: Grafické znázornění kalorimetru. [20]

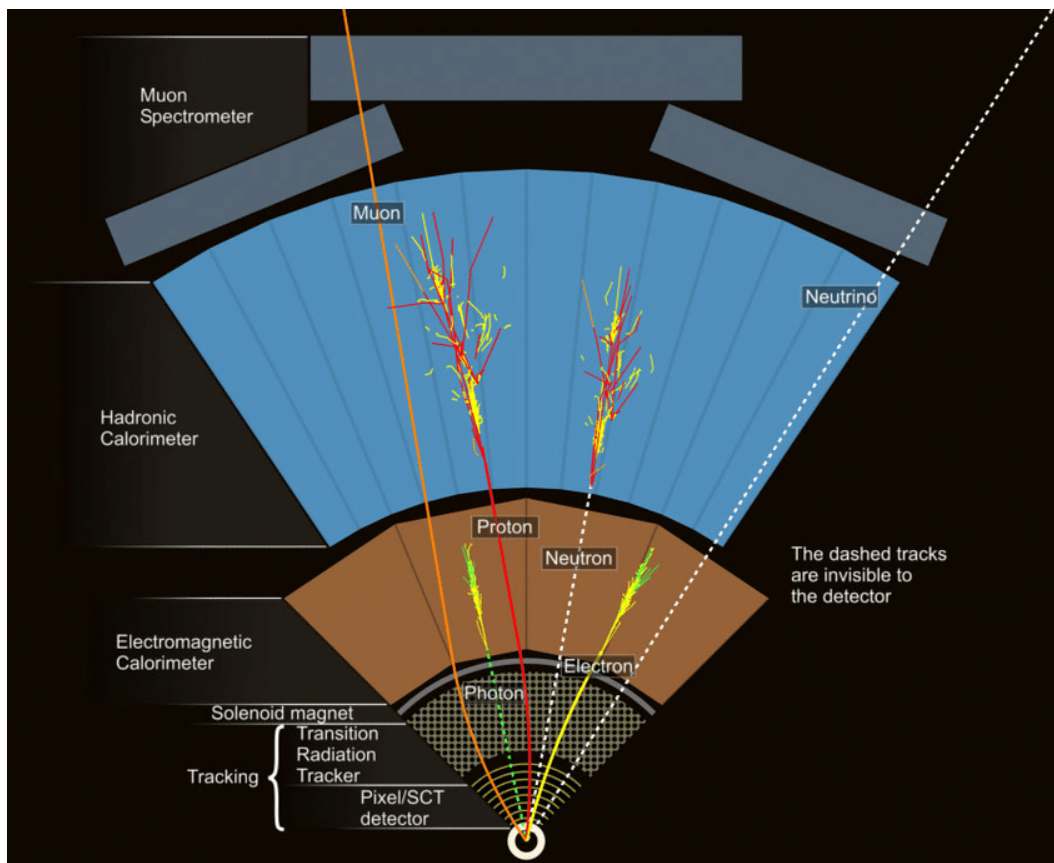
### 3.4.4 Systém magnetů

V detektoru se nachází dva systémy supravodivých magnetů k ohýbání drah nabitých částic. Síla (Lorentzova) působící na částice je závislá na rychlosti a pro poloměr takové dráhy platí  $r = \frac{pT}{q|B}$ . Vnitřní solenoid obklopující vnitřní detektor produkuje homogenní magnetické pole o indukci 2 tesla. Takto silné pole je potřeba, protože pro určení hmotnosti velmi rychlé nabité částice je důležité, aby se dráha dostatečně zakřivila a mohla tak být hmotnost dopočítána. Znamená to však, že dráha částic s malou hybností bude zakřivena tak moc, že začne rotovat v poli a pravděpodobně nebude změřena. Druhý, vnější, systém je složen z osmi velmi velikých supravodivých toroidálních magnetů, nacházejících se v oblasti mionového spektrometru, a dvou toroidálních magnetů tvořící vnější část magnetického systému. Magnetické pole není homogenní a pohybuje se mezi 2 a 8 tesla. Magnetické pole válcovitého tvaru je 26 metrů dlouhé a má poloměr 20 metrů.

### 3.4.5 Znázornění na detektoru

Na následujícím obrázku 3.5 můžeme vidět, jak se jednotlivé částice budou na detektoru jevit. Pokud se podíváme na částici úplně vlevo, tedy mion, tak vzhledem k tomu, že je elektricky nabitý, tak je pozorovatelný již od samého začátku. Můžeme i vidět, jak je jeho trajektorie mírně zakřivená z čehož je možné vypočítat hybnost. Jako jediná ze zobrazených částic projde celá i oběma kalorimetry a dostane se do mionového detektoru, který je vytvořen pro detekci této částice. Hned vedle se nachází foton. Ten, protože není nabitý, tak projde vnitřním detektorem bez povšimnutí. Elektromagnetický kalorimetr jej ale zcela pohltí a my tak víme, kudy se pohyboval a jakou měl energii. Následně tu máme dva hadrony. Proton a neutron. U protonu, protože je nabitý, opět vidíme jeho zakřivenou trajektorii už od začátku. Naopak neutron magnet nijak neovlivní a my jej nemůžeme spatřit

dokonce ani až do vstupu do hadronového kalorimetru. V hadronovém kalorimetru můžeme vidět, že tam oba postupně energii ztrácí. Tím můžeme dopočítat všechny potřebné informace o protonu a neutronu. Předposlední částicí je elektron, který je opět ovlivňován magnetem již úplně od začátku. Jeho cesta skončí už v elektromagnetickém kalorimetru. Nakonec je tu neutrino, které prochází celým detektorem bez povšimnutí. Musí se tak dopočítat pomocí jiného způsobu. Tímto způsobem je zákon zachování energie.



Obrázek 3.5: Znázornění jednotlivých částic procházejících detektorem ATLAS. Přerušovaná čára znázorňuje nezaznamenanou trajektorii detektorem. [38]

# 4. Důležité veličiny a znázorňování srážek

Než se do prezentace jednotlivých událostí v urychlovači pustíme, je potřebné si dovysvětlit některé veličiny, které se v částicové fyzice používají, také jejich jednotky a jak fungují. Nakonec co jsou to tzv. Feynmanovy diagramy, kterými budeme srážku znázorňovat.

## 4.1 Nový souřadnicový systém

Pro popis částic by se nabízel způsob, který známe z mechaniky ze střední školy. Mohli bychom použít skalární veličinu energii a vektorovou veličinu hybnost, celkově nazývané čtyř-hybnost. Takovýto popis má ale své nevýhody. Není totiž invariantní vůči Lorentzově transformaci, což znamená, že výsledky se budou lišit v závislosti na tom, v jaké souřadnicové soustavě se na událost díváme. Zachovat Lorentzovu invarianci je důležité, protože na LHC srážíme kvarky uvnitř protonů, a tyto kvarky nesou neznámou část hybnosti protonu. Při každé srážce je naše referenční souřadná soustava tedy jiná. Pro popis události bude tak vhodnější použití jiných veličin. Na první pohled se to může zdát nové, ale tuto změnu souřadnic používáme poměrně často. Kupříkladu pro pohyb po naší planetě Zemi nepoužíváme klasické eukleidovské souřadnice s počátkem ve středu Země, ale používáme souřadnice zeměpisné, tedy zeměpisnou šířku a délku. Třetí souřadnicí je pak například výška nad hladinou moře. Je podstatné, aby souřadnic pro oba popisy bylo stejně, to znamená pro popis souřadnice v trojrozměrném prostoru budou vždy potřeba tři. V eukleidovských souřadnicích jsou to tři osy  $x, y, z$  v zeměpisném pak tři výše jmenované. Určitě bychom našli i další příklady, ale pojďme se podívat na nové souřadnice, které budeme využívat v detektoru. Vzhledem k tomu, že jsou původní informace čtyři, energie a tři složky hybnosti, budeme muset najít čtyři souřadnice nové.

První novou souřadnicí bude příčná hybnost  $p_T$ . Paprsky v urychlovači jsou nasměrovány tak, aby byly v detektoru namířeny přímo proti sobě. V původních souřadnicích je to osa  $z$ . Příčná hybnost je velikost hybnosti, která je kolmá na tuto osu. Pro příčnou hybnost tak platí vztah

$$p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}.$$

Protože se paprsky v detektoru sráží v ose  $z$ , tak to znamená, že jejich příčná hybnost je nulová. Pokud je nulová příčná hybnost srážejících se částic, tak musí ze zákona zachování hybnosti být nulová i celková příčná hybnost po srážce.

Druhou novou veličinou je úhel  $\phi$ . To je úhel, který nám vyjadřuje, kterým směrem se částice pohybuje. Je to úhel kolmý na osu srážky (osu  $z$ ) a je nulový ve směru původní souřadnice  $x$ . Úhel opisuje kružnici okolo osy  $z$ . Pro příčnou hybnost a úhel  $\phi$  platí následující vztah,

$$\begin{aligned} p_x &= p_T \cos \phi \\ p_y &= p_T \sin \phi. \end{aligned}$$



Třetí novou veličinou je klidová hmotnost  $m$ . Jak možná víme ze speciální teorie relativity, tak energie částice závisí na souřadnicovém systému, ze kterého danou částici pozorujeme. Energie není invariantní. Ale víme, že klidová hmotnost invariantní je, tu totiž vždy naměříme stejnou. Zde nám pomůže slavný vzorec,

$$E = mc^2.$$

Nebo lépe plné znění této rovnice, na které se často zapomíná,

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2.$$

A ještě si zvolíme takové jednotky, které nás zbaví konstant. O těch se zmíním o něco níže,

$$E^2 = m^2 + p^2.$$

Klidovou hmotnost tak lze vyjádřit jako

$$m = \sqrt{E^2 - p^2}.$$

Což lze ještě poupravit na výsledný tvar

$$m = \sqrt{E^2 - (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)}.$$

Klidová hmotnost je charakteristická konstanta jednotlivých částic.

Poslední novou veličinou je rapidita značená  $y$ , popřípadě velmi podobná veličina pseudorapidita  $\eta$ . Rapidita vyjadřuje něco velmi podobného rychlosti, jen s tím rozdílem, že se s ní lépe pracuje při vyšších rychlostech, zvláště těch blízkých rychlostem světla. Zatímco pro skládání rychlostí platí komplikovaný vzoreček, rapiditu stačí pouze sečíst. Rapidita je definována následujícím vztahem

$$y = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{E+p_z}{E-p_z} \right).$$

Pseudorapidita je pak definována jako limita, speciální případ, rapidity kdy je klidová hmotnost zanedbatelná oproti hybnosti,

$$\eta = \lim_{\frac{m}{p} \rightarrow 0} y.$$

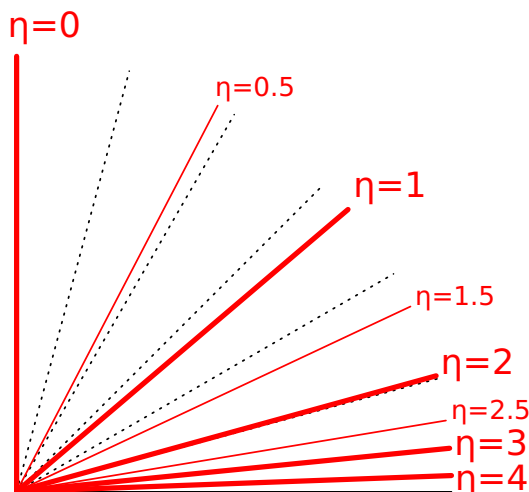
Nebo lze vyjádřit pseudorapiditu vztahem

$$\eta = -\ln \tan \frac{\theta}{2},$$

kde  $\theta$  je úhel, který svírá směr pohybu částice s osou srážky. Můžeme tento úhel nazvat úhel odchýlení se od osy  $z$ . Pseudorapiditu lze zobrazit jako jiné vyjádření úhlu, jak je možné dopočítat z definičního vzorce, případně je to vidět z grafického vyjádření (obr 4.1). Částice má nulovou pseudorapiditu letí-li směrem kolmo na osu srážejícího se svazku, kolmo na osu  $z$ . Nekonečnou pro částici letící ve směru svazku, podél osy  $z$ . Platí tedy, že částice s vysokou pseudorapiditou mohou uniknout z detektoru po ose srážejícího se svazku aniž by byly detekovány. Zde jsou totiž díry, kterými do detektoru svazky přicházejí. Nás většinou zajímá jen pseudorapidita do  $\eta = 5$ , která koresponduje s akceptancí (pokrytím) detektorem ATLAS.

Celá transformace (změna veličin) čtyř-hybnosti lze pak zapsat následujícím způsobem.

$$\begin{aligned} p_x &= p_T \cos \phi \\ p_y &= p_T \sin \phi \\ p_z &= (m^2 + p_T^2) \sinh y \\ E &= (m^2 + p_T^2) \cosh y \end{aligned}$$



Obrázek 4.1: Grafické znázornění pseudorapidity [31]

## 4.2 Nové jednotky veličin

V částicové fyzice se navíc používají odlišné jednotky, než na které jsme zvyklí. V první řadě nepoužíváme pro hmotnost kilogram nebo gram a pro energii nepoužíváme Jouly. Prvním důvodem je, že tyto jednotky jsou příliš velké na to, aby mohli vyjadřovat vlastnosti mikroskopických částic, se kterými se částicová fyzika zabývá. Samozřejmě možné by to bylo, ale bylo by to nepraktické. Zvolila se proto jednotka elektronvolt. Je to kinetická energie, kterou získá elektron ve vakuu, pokud je urychlený napětím jeden volt. Výpočet provedeme ze vzorce známého ze středoškolské fyziky.

$$E_K = qU$$

Nyní je dosadíme za  $q$  náboj elektronu a za  $U$  jeden volt.

$$E_K = e$$

$$E_K = 1,1,602176634 \cdot 10^{-19} \text{J}$$

$$1\text{eV} = 1,1,602176634 \cdot 10^{-19} \text{J}$$

Druhou zvláštností, které si můžeme všimnout je, že v jednotkách elektronvolt udáváme nejen velikost energie, ale udáváme v ní i hmotnost a hybnost. To je zapříčiněno tím, že mezi všemi těmito třemi veličinami existují vztahy, ve kterých se veličiny liší pouze konstantou. Tyto vztahy vypadají následovně,

$$E = mc^2,$$

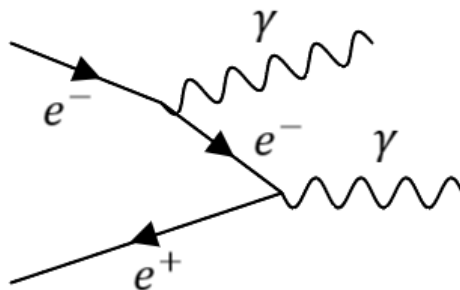
$$E = pc.$$

Jsou to vlastně členy výše uvedené Einsteinovy rovnice. Pokud například tvrdíme, že klidová hmotnost elektronu je 511 keV, tak tím máme na mysli, že hmotnost vynásobená čtvercem rychlosti světla je 511 keV. Obdobně to funguje i s hybností.



## 4.3 Feynmanovy diagramy

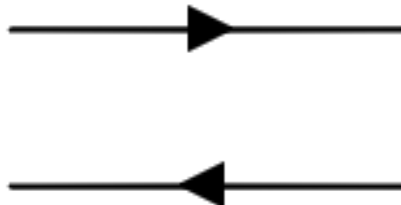
Pro lepší znázornění toho, co v procesu probíhá využijeme Feynmanových diagramů. Jeden Feynmanův diagram je na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2: Feynmanův diagram zobrazující anihilaci pozitronu a elektronu [17]

Hned zprvu je potřeba dodat, že tyto diagramy tu nejsou jen pro prosté znázornění srážky. Ve skutečnosti každý úsek a uzel odpovídá členu ve velmi komplikované rovnici, pomocí které lze vypočítat například pravděpodobnost, s jakou taková srážka nastane. Navíc nikdy nemůžeme přesně vědět, co se ve srážce děje. Může nastat i komplikovanější proces, který má stejné vstupní i výstupní částice jako náš znázorňovaný. Platí ale, že čím komplikovanější proces, tím mnohem méně pravděpodobný je. Pro nás ale bude dostačující, že budeme znázorňovat ten nejjednodušší proces, co může nastat. Pro konstrukci těchto diagramů existují pravidla, která zakazují nebo povolují jednotlivé uzly. Tato pravidla ale nebudeme uvádět a podíváme se spíše na to, jak takové diagramy číst. Na vodorovné ose budeme uvažovat čas a na svislé ose prostor. Budeme tak diagram číst zleva doprava. Není to jediný možný způsob, jak tyto diagramy psát, ale ulehčí nám to práci.

Pomocí rovných plných čar se šipkou znázorňujeme fermiony (kvarky a leptony). Pokud je šipka ve směru plynutí času, pak se jedná o částici, pokud je to naopak, pak se jedná o antičástici. Ukázka na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: Znázornění fermionu. Nahoře částice, dole antičástice. V tomto případě spolu nijak neinteragují [17].

Pokud je spojnicí vlnka, pak se jedná o boson elektroslabé interakce (foton, W a Z). Vyobrazeno na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4: Znázornění fotonu [17].

Pokud se vlnky překrývají, jedná se o gluon. Obrázek 4.5.



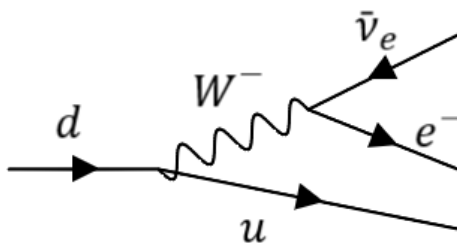
Obrázek 4.5: Znázornění gluonu [17].

V posledním případě, jedná-li se o přerušovanou přímou čáru, tak se jedná o Higgsov boson, tak jako je ukázáno na obrázku 4.6.



Obrázek 4.6: Znázornění Higgsova bosonu [17].

O jakou přesně částici se jedná se dozvíme vždy z popisku. Pokusíme-li se přečíst následující diagram 4.7 pro  $\beta$  rozpad, tak zleva máme jen jeden kvark  $d$ . Tento kvark se následně přechází na kvark  $u$  a vyzáří přitom boson  $W^-$ . Nakonec se boson  $W^-$  rozpadne na elektron a elektronové antineutrino.



Obrázek 4.7: Feynmanův diagram pro  $\beta^-$  rozpad [17].

# 5. PYTHIA

## 5.1 Simulace

Abychom pokročili v našem poznání okolního světa, je nutné dělat velké množství experimentů. Pro předměty každodenní velikosti to většinou není problém, ale jakmile se dostáváme k velikostem větším a nebo v našem případě velikostem menším, stávají se pomůcky pro experimentování větší, sofistikovanější a hlavně mnohem nákladnější. Pro zkoumání subatomárních částic jsou zapotřebí ohromné přístroje. Příkladem může být LHC a detektor ATLAS popsané v předchozích kapitolách. Navíc platí, čím více věcí se nám podařilo prozkoumat, tím se jevy, které jsme ještě nepoznali, stávají vzácnějšími a vzácnějšími. Samotné srážení jednotlivých částic je nutné nejprve natrénovat. Je potřeba naučit se rozlišit signál od pozadí. Pochopit, jak bude vypadat odezva detektoru a ověřit předpovědi Standardního modelu. Proto je potřeba se uchýlit k simulacím. K simulacím srážek budeme používat program PYTHIA v současné verzi 8.308 [32].



Obrázek 5.1: Logo programu PYTHIA s vyobrazením mýtické Pýthie [32]

Tento program využívá přesných parametrů Standardního modelu, které se fyzikům podařilo naměřit. Pythia je jeden z nejpoužívanějších generátorů srážek současnosti, jež je vyvíjen a aktualizován po dobu 30 let. V tomto programu je možné nasimulovat srážky při vysokých energiích a to jak elektronů, tak protonů. Slouží k simulaci tvrdých procesů, partonových spršek, hadronizace a mnoho dalšího. My se zaměříme na srážení protonů. Oproti reálnému měření má simulace velkou výhodu. Pythia, náš simulační program, nám umožňuje vypínat a zapínat určité procesy, což nám dovoluje zkoumat a zobrazovat procesy, které se dějí jen velmi zřídka. Nemusíme tak čekat na detektoru, až nastane událost, která má šanci na vznik například jedna ku několika bilionům, ale můžeme si zapnout jen patřičnou srážku a ta nastane kolikrát chceme. Dále nemusíme čekat, než se všechno v rámci rekonstrukce události vyhodnotí, ale máme výsledek téměř hned

po ruce. V neposlední řadě máme všechny informace o všech částicích, což se o skutečném experimentu říci nedá. Některé částice je těžké změřit, například neutrina, nebo některé částice mohou uniknout místem, kde zrovna není detektor, například podél svazku. Vidíme tak celý proces krok po kroku, vidíme vše co se stalo. Naopak v reálných datech vidíme většinou jen koncové produkty, nikoliv celý proces. Navíc zde jsou namíchány všechny procesy dohromady. To, že si můžeme nastavit jen jednotlivé procesy, nám dovolí podívat se na jednotlivé procesy zvlášť a určit jaký mají efekt na koncové produkty. Pokud naše nasimulovaná data souhlasí s reálnými daty, můžeme si být vcelku jisti, že jsme poměrně blízko skutečnosti. Je podstatné dodat, že v částicové fyzice je spousta jevů náhodných. Netušíme například, co se při srážce dvou protonů doopravdy stane. Která částice v jednom protonu se doopravdy srazí s kterou částicí druhého protonu. Výsledkem tak bude nějaké statistické rozdělení, jehož analýzy vyžaduje velké množství dat. Je tedy téměř vždy nutné si nejprve vše vyzkoušet na simulovaných datech, než se pustíme na data reálná.

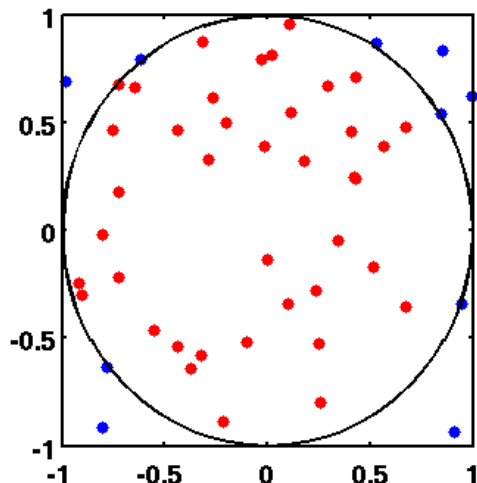
## 5.2 Pythia

Proč se program nazývá Pythia? Může nám napovědět už samotné logo (obr. 5.1). Je na něm totiž samotná Pythia vyobrazena. Na logu můžeme vidět krále Aegea, kterého můžete znát jako otce Thésea, řeckého hrdiny, který se v labyrintu postavil Mínotaurovi. Král na tomto obraze žádá o radu právě Pýthii, která byla věštkyně v Delfách. Pythia seděla na místě, kde ze země unikali plyny, které Pýthii omámily a ta mluvila víceméně náhodná slova, které pak kněžky transformovaly na proroctví. Stejně jako tehdy se z náhodných slov dělala proroctví, program Pythia funguje na podobném principu a vytváří předpovědi jednotlivých událostí při srážce. Roli náhodných slov zde převzala náhodná, respektive pseudonáhodná čísla, což má za následek, že Pythii řadíme k tak zvaným Monte Carlo generátorům.

## 5.3 Monte Carlo generátor

Co je to Monte Carlo generátor a k čemu se využívá? Monte Carlo je jedna z částí Monaka. Tato čtvrť je velmi známá pro mnohá kasína, která se zde vyskytují. Tak jako každé kasino pracuje s náhodou, tak i tento generátor to dělá také. Ukažme si jeden příklad, kdy si můžeme něco spočítat pomocí náhodných jevů, tedy Monte Carlo metody.

Představme si, že máme papír o velikosti 2x2 metry. Samotná rozloha není podstatná, jen se s tímto údajem bude v našem příkladu lépe zacházet. Na tento obrázek nakreslíme libovolnou plochu/útvár. Na obrázku 5.2 je znázorněn kruh se středem ve středu čtverce a poloměru jeden meter. Nyní máme za úkol zjistit obsah této plochy. Pokud je to jednoduchý útvár, můžeme se znalostí matematiky jeho obsah spočítat nebo pokud jsme fyzikálně nebo technicky zaměřeni, můžete zjistit, kolik váží jeden metr čtverečný papíru, potom útvár vystříhnou a zvážit. Pomocí jednoduché rovnice nebo trojčlenky se dopracujeme k přibližnému výsledku. Ale co, když ani jedna z možností nejde realizovat? Je tu jedna, která nám může pomoci, Monte Carlo metoda. Na papír náhodně umístíme libovolné



Obrázek 5.2: Obrázek pro výpočet obsahu kruhu pomocí Monte Carlo metody [25].

množství bodů. Pro každý bod určíme, jestli je v ploše, či nikoliv. Na obrázku jsou znázorněny červeně ty, co jsou uvnitř a modře ty, co jsou mimo. Následně jen vypočteme, jaká část bodů v ploše je a jaká není. Pokud na zobrazeném útvaru je 39 ze 49, znamená to, že útvar zabírá přibližně  $\frac{39}{49}$  původního obrazce, který má rozlohu  $4 m^2$ . Rozloha podle Monte Carlo metody je

$$S_{MonteCarlo} = \frac{39}{49} \cdot 4m^2 \doteq 3,18m^2.$$

Pokud provedeme opravdový výpočet pro obsah kruhu, tak je řešení

$$S_{Opravdové} = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 1^2m^2 \doteq 3,14m^2.$$

Vidíme, že opravdové řešení se příliš neliší od námi vypočteného. Samozřejmě platí, že body musíme umisťovat náhodně a čím více jich budeme mít, tím více se bude námi naměřená hodnota přibližovat té skutečné. A na podobném principu funguje i tento generátor. Místo náhodného bodu zvolí (pseudo)náhodná čísla, která pomocí rovnic Standardního modelu a dalšího pomocného popisu umožňuje vytvořit konkrétní fyzikální událost.

## 5.4 Pseudonáhodná čísla

Protože těchto událostí je velmi velké množství a každá událost se skládá z mnoha částic a mnoha proměnných, tak pro simulaci srážek je potřeba mít ohromné množství náhodných čísel. Pro náš jednoduchý případ, který byl počítán v předchozí sekci bychom pro každý bod potřebovali dvě náhodná čísla. Jedno pro souřadnici x a druhé pro souřadnici y. Celkem to je 98 náhodných čísel a to byl náš příklad extrémně jednoduchý.

Vzhledem k tomu, že počítač je čistě logický stroj, neumí si tato čísla sám od sebe vymýšlet, používá tak čísla, která jsou tzv. pseudonáhodná. Jde o čísla, která vychází z jednoho číselného řetězce, který nazýváme seed. Ten může být

vybrán i námi, popřípadě je nějaký v základním nastavení. Pseudonáhodná čísla jsou z tohoto původního seedu vytvářena deterministicky, tedy předurčeným způsobem, ale tento deterministický způsob zaručuje, že jsou čísla v nějaké rozmezí vybírána víceméně rovnoměrně. Čísla sice náhodná nejsou, protože jsou určena jednoznačně, ale mají podobné vlastnosti jako náhodná čísla, proto se jim říká pseudonáhodná.

Nyní, když už tušíme, jaký program budeme používat a jak program, alespoň v základech funguje a k čemu slouží, podíváme se v následující části, jak Pythii říci, co má dělat.

## 6. Jak ovládat program PYTHIA

Nyní se podíváme, jak si nastavit v Pythii, to co chceme, aby dělala. Pythia naneštěstí nemá hezké grafické rozhraní, ve kterém by se vše snadno nastavovalo. Navíc není úplně uživatelsky přívětivá pro lidi, kteří jsou seznámeni jen s operačním systémem Windows. Pythia běží na operačním systému Linux, popřípadě na Macu. Pokud přeci jen není k dispozici nic jiného než Windows, je možné si pomocí, například VirtualBoxu, nainstalovat Linux do virtuálního počítače. Jak se toto dělá nebudu v této práci popisovat. To stejné platí pro instalaci samotné Pythie. Návod k instalaci je opět na internetových stránkách Pythie [32]. My se podíváme jen na jednotlivá nastavení v rámci programu. Při instalaci Pythie se uloží ukázky jednotlivých programů, které můžeme také využívat. Pro prvotní používání je doporučeno využívat takovéto soubory a poupravit si je k vlastnímu účelu, než psát úplně nový od základu. Pro replikaci nebo pro jednoduché modifikace můžete využívat programy, které se nacházejí v příloze této práce.

Program má formu textového souboru psaném v jazyce C++, který můžete libovolně upravovat. Samotný textový soubor se skládá z mnoha řádků kódu. Vzorovou ukázkou můžeme vidět v ukázce kódu 6.1. Řádky můžeme rozdělit do několika částí. První skupina jsou řádky, kterými se zabývat nebudeme. Jsou to řádky, které definují knihovny. Provedou několik kontrol, jestli je vše v pořádku a napojí náš program na Pythii. V této části je možné si definovat nějaké proměnné, které budeme následně využívat pokud budeme chtít udělat nějakou komplikovanější operaci s výsledkem.

Listing 6.1: vzor.cc

```
1 //knihovny
2 #include <iostream>
3 #include <fstream>
4 #include <cmath>
5 #include "Pythia8/Pythia.h"
6
7 //spusteni programu
8 using namespace Pythia8;
9 int main()
10 {
11     Pythia pythia;
12
13 //deklarace promnenych
14
15 //seed
16     pythia.readString("Random:setSeed = on");
17
18 //nastaveni parametru srazky
19     pythia.readString("Beams:frameType = 1");
20     pythia.readString("Beams:eCM = 14000.");
21     pythia.readString("Beams:idA = 2212");
22     pythia.readString("Beams:idB = 2212");
23
```



```

24 //mechanismy
25   pythia.readString (" WeakSingleBoson:ffbar2W= on ");
26   pythia.readString (" PartonLevel:ISR = off ");
27   pythia.readString (" PartonLevel:FSR = off ");
28   pythia.readString (" HadronLevel:all = off ");
29
30 // Zacatek generovani udalosti
31
32   pythia.init ();
33   while (podminka == 0)
34     {
35       if (!pythia.next ()) continue;
36       for (int i = 0; i < pythia.event.size (); ++i) {
37
38 //zde je kod pro praci s casticemi
39
40         }
41     }
42   return 0;
43 }

```

Druhá část je o nastavení samotné srážky a tady už si to trochu rozebereme, protože zde už dojde k prvním místům, kde budeme mezi jednotlivými procesy přepínat. Ukázky, které tu jsou vyobrazeny, nejsou rozhodně všechny možnosti, které lze v této části použít. Ukazují jen ty nejzákladnější. Pro mnohem více možných nastavení je možné se podívat do manuálu Pythie [32]. Pokud nebude některý z těchto parametrů nastaven, tak bude uveden do základního nastavení. Které to je, je možné opět najít v manuálu.

## 6.1 Nastavení parametrů srážky

Listing 6.2: Nastavení parametrů srážky

```

1   pythia.readString (" Beams:frameType = 1 ");
2   pythia.readString (" Beams:eCM = 13600. ");
3
4   pythia.readString (" Beams:frameType = 2 ");
5   pythia.readString (" Beams:eA = 6800. ");
6   pythia.readString (" Beams:eB = 6800. ");
7
8   pythia.readString (" Beams:idA = 2212 ");
9   pythia.readString (" Beams:idB = 2212 ");

```

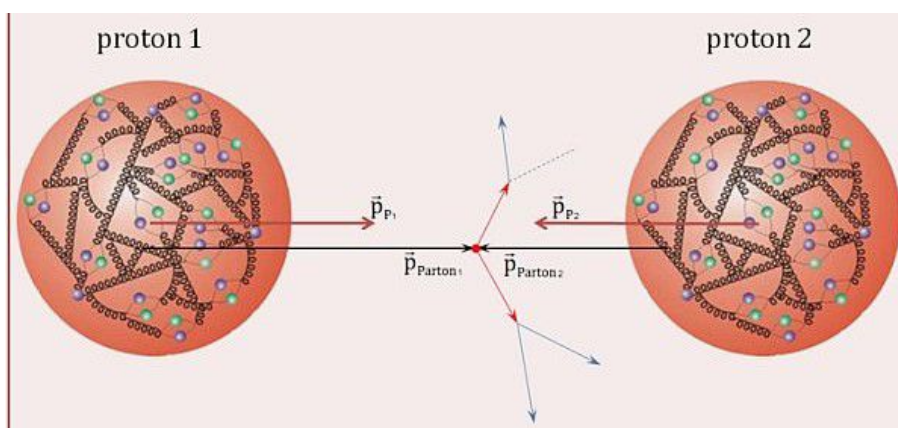
Další ukázka kódu 6.2 pojednává o vlastnostech srážených částic. Zde máme dvě možnosti. První je, že zvolíme `frameType 1`, což znamená, že celá srážka bude počítána v souřadnicích spjatými s těžištěm srážejících se částic. Na druhém řádku pak stačí uvést jen energii srážky. Ta se udává v GeV. V našem případě je to 13 600 GeV, což je současná skutečná hodnota pro srážení na LHC. Druhou možností je `frameType 2`, který nám umožní udat energii jednotlivých srážených

částic. Ty jsou na řádcích 5 a 6 nastaveny jako 6 800 GeV. Poslední dva řádky určují, co za částice se bude srážet. Obě částice mají označení 2212, což je kód pro proton. Pokud bychom chtěli srážet něco jiného, tak je možné tento kód změnit a napsat tam kód částice, kterou chceme srážet. Kódy jsou zapsány v poslední tabulce na konci této kapitoly.

## 6.2 Nastavení tvrdého procesu

### 6.2.1 Procesy silné jaderné interakce

Nyní můžeme určit, co se stane v části, která se nazývá tvrdý proces. Tvrdý proces je ten proces, kdy dojde k výměně velké hybnosti, a který je doprovázen vznikem nových částic s velkou příčnou hybností. Zde je nutné podotknout, že i když máme nastaveno, že se sráží dva protony, tak ve skutečnosti se srazí částice, ze kterých se proton skládá. Nazývají se partony. Konkrétně jsou to kvarky a gluony. Nepředstavujme si srážku dvou protonů jako srážku dvou kuliček, ale jako srážku chuchvalců menších částic. Navíc nemusí protony do sebe narazit přímo, ale mohou o sebe jen mírně zavadit a to postačí k tomu, aby se mohly srazit například kvarky, ze kterých se proton skládá. Lepší znázornění protonu a tvrdého procesu můžeme vidět na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1: Srážka dvou protonů [30].

Můžeme tak nastavit, které z partonů se při úvodní srážce srazí a co z této srážky vznikne. V této fázi jsou všechna základní nastavení ve stavu off, neboli vypnuto. Pokud chceme, aby se něco stalo, musíme některý z následujících procesů zapnout.

Listing 6.3: Nastavení tvrdých procesů

```

1  pythia.readString("HardQCD:all = on");
2
3  pythia.readString("HardQCD:gg2gg = on");
4  pythia.readString("HardQCD:gg2qqbar = on");
5  pythia.readString("HardQCD:qg2qg = on");
6  pythia.readString("HardQCD:qq2qq = on");
7  pythia.readString("HardQCD:qqbar2gg = on");
8  pythia.readString("HardQCD:qqbar2qqbarNew = on");

```

Nejjednodušším příkazem je první řádek v kódu 6.3, protože zapíná všechny tvrdé procesy, ve kterých jsou dvě vstupní a dvě výstupní částice, jejichž interakce je popsána kvantovou chromodynamikou, proto také název QCD (quantum chromodynamics). Jedná se o část standardního modelu, která se zabývá silnou jadernou silou. Pracuje tak hlavně s kvarky a gluony. Další příkazy umožňují zapínat jednotlivé typy procesů. Je možné tak v řádku 3 zapnout proces srážky dvou gluonů, kdy výsledkem jsou opět dva gluony. Písmena před číslicí 2 označují vstupující částice a písmena za ní ty vystupující. Písmenem g jsou pak označeny gluony a písmeny q kvarky. V těchto případech jsou to často jen lehké kvarky, tedy kvarky u, d a s. Slovem „bar“ se označují antičástice. Označení qbar je označením antikvarku. Gluon je sám sobě antičásticí, takže se u něj bar neobjevuje. Pokud bychom chtěli zapnout konkrétní situace, kdy chceme pozorovat některý z těžších kvarků, je možné zapnout situace speciálně pro ně.

Listing 6.4: Nastavení tvrdých procesů QCD s těžšími kvarky

```

1  pythia.readString ("HardQCD:gg2ccbar = on ");
2  pythia.readString ("HardQCD:qqbar2ccbar = on ");
3  pythia.readString ("HardQCD:gg2bbbar = on ");
4  pythia.readString ("HardQCD:qqbar2bbbar = on ");

```

V tabulce 6.4 je vidět, jak je možné zapnout jednotlivé procesy pro b kvarky a c kvarky. Tyto procesy se sice vyskytují i v těch předchozích nastaveních 6.3, ale takto je možné je zapnout samostatně. Platí totiž, že čím lehčí kvarky to jsou, tím vyšší pravděpodobnost vzniku této částice při srážce je. Nejnižší pravděpodobnost vzniku má top kvark, který má dokonce vlastní spínací možnosti.

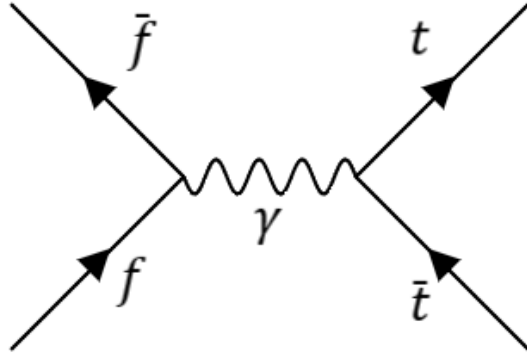
Listing 6.5: Nastavení produkce top kvarku

```

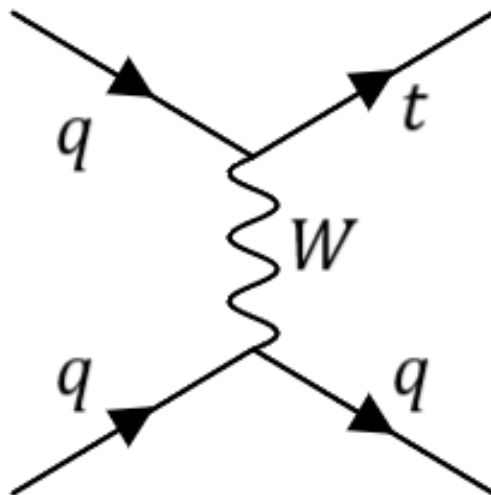
1  pythia.readString ("Top: all = on ");
2
3  pythia.readString ("Top:gg2ttbar = on ");
4  pythia.readString ("Top:qqbar2ttbar = on ");
5  pythia.readString ("Top:qq2tq (t:W) = on ");
6  pythia.readString ("Top:ffbar2ttbar (s:gmZ) = on ");
7  pythia.readString ("Top:ffbar2tqbar (s:W) = on ");
8  pythia.readString ("Top:gmgm2ttbar = on ");
9  pythia.readString ("Top:gmgm2ttbar = on ");

```

V kódu 6.5 se můžeme podívat na nastavení produkce top kvarku. První možnost zapíná všechny procesy, které top kvark produkuje. Zde se už objevují i jiné vstupní částice. Označení f je pro libovolný fermion a fbar pro libovolný anti-fermion. Označení gm je zkrácené označení gamma, neboli foton. V řádcích 5 až 7 je v závorce ještě ukázáno, skrze který boson tato srážka proběhne. W označuje bosony W. Označení gmZ je pro foton a zároveň i Z boson. Ve srážce se tyto dvě částice chovají stejně. Nakonec písmena t a s označují dva druhy výměny bosonu. S je označení pro srážku, která je znázorněna na diagramu 6.2. Jde o to, že se dvě částice srazí a spojí se do bosonu, který se následně rozpadne. Ve srážce s označením t jde pouze o výměnu částice a k samotnému sloučení částic nedojde. To je znázorněno na obrázku 6.3. Pro nás tato věc nemá velikého významu, ale jak již bylo zmíněno dříve, tak Feynmanovy diagramy znázorňují velmi komplikované rovnice a tam tento rozdíl hraje roli.



Obrázek 6.2: Srážka typu s. Konkrétně je znázorněno  $f\bar{f} \rightarrow t\bar{t}$  (s:  $\gamma$ ). [17].



Obrázek 6.3: Srážka typu t. Konkrétně je znázorněno  $qq \rightarrow tq$  (t:  $W$ ). [17].

## 6.2.2 Procesy elektroslabé interakce

Elektroslabé procesy jsou takové, kde se vyskytuje foton, jakožto částice elektromagnetické interakce, nebo bosony Z a W, které jsou částicemi slabé interakce.

Listing 6.6: Nastavení elektroslabé interakce

```
1
2 pythia.readString("PromptPhoton:all = on");
3 pythia.readString("WeakSingleBoson:all = on");
4 pythia.readString("WeakDoubleBoson:all = on");
5 pythia.readString("WeakBosonAndParton:all = on");
6 pythia.readString("PhotonCollision:all = on");
7 pythia.readString("PhotonParton:all = on");
```

## 6.2.3 Procesy s Higgsovým bosonem

Poslední skupinou procesů, které si ukážeme, budou procesy s Higgsovým bosonem. Jedná se o boson ze Standardního modelu, který byl potvrzen v roce 2012. Existují i další hypotetické Higgsovy bosony, ale ty zde diskutovat nebudeme.

Listing 6.7: Nastavení pro události s Higgsovým bosonem

```
1
2 pythia.readString("HiggsSM:all = on");
3
4 pythia.readString("HiggsSM:ffbar2H = on");
5 pythia.readString("HiggsSM:gg2H = on");
6 pythia.readString("HiggsSM:gmgm2H = on");
7 pythia.readString("HiggsSM:ffbar2HZ = on");
8 pythia.readString("HiggsSM:ffbar2HW = on");
9 pythia.readString("HiggsSM:ff2Hff(t:ZZ) = on");
10 pythia.readString("HiggsSM:ff2Hff(t:WW) = on");
11 pythia.readString("HiggsSM:gg2Httbar = on");
12 pythia.readString("HiggsSM:qqbar2Httbar = on");
```

Jako i v předchozích případech je možné použít spínač, který zapne všechny procesy dohromady. Tento spínač se nachází na prvním řádku. Další tři řádky zobrazují všechny možné fúze částic, které vedou ke vzniku pouze jednoho Higgsova bosonu. V dalších případech vzniká částic více. Jaké částice to jsou víme už z dříve zmíněných zkratk. Jediný nový symbol, který se zde vyskytuje je písmeno H pro Higgsův boson. V závorce v řádcích 8 a 9 je ještě zvýrazněn mezikrok, kterým proces probíhá. V případě ZZ se jedná o fúzi dvou Z bosonů v případě WW to je fúze  $W^+$  a  $W^-$ .

## 6.2.4 Další možnosti za hranicí standardního modelu

Zde byli znázorněny některé možné srážky objevených a potvrzených částic. Je možné ale i zapnout částice, které jsou čistě hypotetické. Ať již se jedná o leptokvarky, supersymetrické částice, temnou hmotu nebo mnoho dalšího. To už ale nechám na čtenáři, aby si prostudoval sám v manuálu [32].

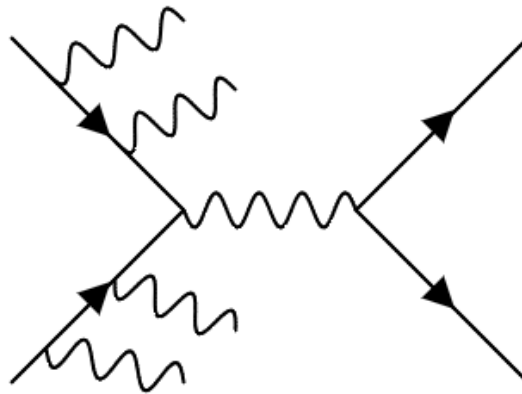
## 6.3 Nastavení dalších vlastností srážek

Existuje spousta dalších nastavení, které ovládají vlastnosti srážky. V následující tabulce jsou opět uvedeny některé z nich.

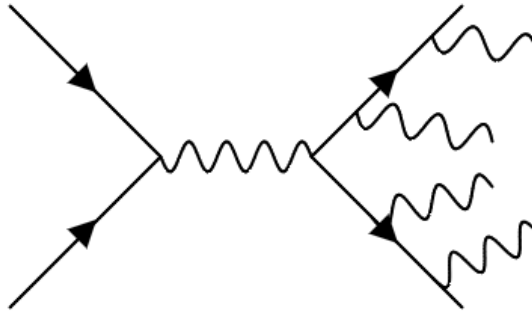
Listing 6.8: Další nastavení

```
1 pythia.readString("Random:setSeed = on");
2
3 pythia.readString("23:m0 = 91.1876");
4 pythia.readString("23:mWidth = 2.4952");
5
6
7 pythia.readString("PartonLevel:ISR = off");
8 pythia.readString("PartonLevel:FSR = off");
9 pythia.readString("HadronLevel:all = off");
10
11 pythia.readString("Print:quiet = on");
```

Na prvním řádku se zapíná náhodný seed. To dovoluje generovat vždy originální srážku. V následující dvojici řádků se nachází možnost nastavování určitých parametrů jednotlivých částic. Zde se konkrétně jedná o hmotnost a chybu hmotnosti bosonu Z. Pokud je to známá částice, tak je možné tuto část vynechat. Pokud bychom ale chtěli zkoumat částice hypotetické, tak se může hodit nastavení jejich hmotnosti. V prvním z další trojice řádků nastavujeme, respektive zakazujeme úplně původním částicím vyzařovat částice. To je znázorněno na diagramu 6.4. ISR je zkratka pro initial state radiation. V druhém to naopak zakazujeme produktům jejich interakce. Toto FSR neboli final state radiation je znázorněno na diagramu 6.5. To se může hodit ke snížení množství částic ve srážce. Poslední z této trojice zakazuje následnou hadronizaci, což událost významně zkrátí. Poslední řádek zakáže vypsání určitých informací, které se generují automaticky. Při zkoumání velkého množství dat program ukáže prvních několik srážek, takže víme jestli program funguje správně. Pokud nám ale bude stačit jen jedna událost, tak je zbytečné, aby se něco vypisovalo.



Obrázek 6.4: Znázornění ISR. [17].



Obrázek 6.5: Znázornění FSR. [17].

## 6.4 Práce s daty

Velmi podstatnou částí je následná práce s daty. Nejjednodušší příkaz je takový, který nám vypíše celou srážku do tabulky. Pro práci s velkým množstvím dat je to sice příkaz zbytečný, ale pro naše zkoumání, kdy bude stačit vypsát jen jednu srážku, je to vhodné. Těmito příkazy jsou následující dva řádky.

Listing 6.9: Vypsání informací

```
1 pythia.info.list();
2 pythia.event.list();
```

Do následující části, která prochází jednotlivé události, které generuje lze vkládat kód, který bude procházet jednotlivé částice a vybírat potřebné informace, které nás zajímají. Počet událostí, které projde je v této ukázce 10. Toto číslo je možné libovolně měnit. Popřípadě je možné přidat jinou podmínku, která zastaví generování částic. Následně program proběhne všechny částice, podle jejich pořadového čísla. V tomto případě je použita proměnná  $i$ .

Listing 6.10: Kód generující události

```
1
2 for (int iEvent = 0; iEvent < 10; ++iEvent)
3 {
4     if (!pythia.next()) continue;
5     for (int i = 0; i < pythia.event.size(); ++i) {
6 //zde se bude nachazet kod
7     }
8 }
```

Pro každou částici můžeme zjistit libovolnou informaci, kterou potřebujeme. S tou potom můžeme pracovat. Jen si nechat vypsat, co za srážku se stalo nebo si z informací udělat histogram námi určené veličiny. V ukázce kódu můžeme vidět seznam nejčastějších veličin a charakteristik, které můžeme zkoumat.

Listing 6.11: Volací znaky pro informace o částicích

```

1 pythia.event[i].id()      – kod castice
2 pythia.event[i].charge() – naboj castice
3 pythia.event[i].px()     – hybnost castice ve smeru x
4 pythia.event[i].py()     – hybnost castice ve smeru y
5 pythia.event[i].pz()     – hybnost castice ve smeru z
6 pythia.event[i].e()      – energie castice
7 pythia.event[i].m()      – hmotnost castice
8 pythia.event[i].pT()     – pricna hybnost castice
9 pythia.event[i].y()      – rapidita
10 pythia.event[i].phi()   – uhel fi
11 pythia.event[i].eta()   – pseudorapidita
12
13 pythia.event[i].mother1()
14 – cislo (i) prvni castice , ze ktere vznikla
15 pythia.event[i].mother2()
16 – poradove cislo (i) druhe castice , ze ktere vznikla
17 pythia.event[i].daughter1()
18 – poradove cislo (i) prvni castice , ktera z ni vznikla
19 pythia.event[i].daughter2()
20 – cislo (i) druhe castice , ktera z ni vznikla

```

Výstup posledních čtyř příkazů je pořadové číslo, což znamená, že celý tento segment může být vložen místo pořadového čísla  $i$ . Pokud bychom hledali kód částice, ze které vzešla, tak to uděláme následovně.

Listing 6.12: Kód mateřské částice

```

1 pythia.event[pythia.event[i].mother1()].id()

```



Nakonec pro interpretaci o jakou částici se jedná je nutné používat kód částice. Částic a rezonancí existuje nezměrné množství, takže nemá smysl vypisovat všechny. V následující tabulce jsou vypsány všechny elementární částice a několik těch nejčastěji se objevujících složených částic. Pro antičástici platí stejný kód, jen je číslo záporné. Úplný seznam je možné najít například zde [21].

Název částice	Zkratka	Kódové označení
down kvark	d	1
up kvark	u	2
strange kvark	s	3
charm kvark	c	4
bottom kvark	b	5
top kvark	t	6
elektron	e	11
elektronové neutrino	$\nu_e$	12
mion	$\mu$	13
mionové neutrino	$\nu_\tau$	14
tauon	$\tau$	15
tauonové neutrino	$\nu_\tau$	16
gluon	g	21
foton	$\gamma$	22
Z boson	$Z^0$	23
W boson	$W^+$	24
Higgsův boson	$H^0$	25
neutrální pion	$\pi^0$	111
nabitý pion	$\pi^+$	211
neutrální kaon	$K^0$	311
nabitý kaon	$K^+$	321
proton	p	2212
neutron	n	2112

# 7. Ukázky jednotlivých procesů

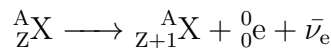
V této kapitole si ukážeme jednotlivé příklady událostí ve kterých se vyskytují částice standardního modelu. S těmito procesy se můžeme setkat na detektoru ATLAS a nebo s některými i například v lékařství.

## 7.1 $\beta$ rozpad

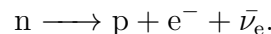
Jako první událost si ukážeme  $\beta$  rozpad, je to totiž událost na které lze ukázat nejméně známou interakci a to slabou jadernou sílu. Při této interakci můžeme pozorovat bosony  $W^+$  a  $W^-$ , které jsou zprostředkovateli této síly.

S  $\beta$  rozpadem se setkáme již na střední škole, a to buď v hodinách fyziky, ale spíše v hodinách chemie. Zjistíme totiž, že izotopy některých prvků jsou nestabilní a rádi se mění na jiné. A to je možné buď přeměnou  $\alpha$ , kdy dojde k vyzáření  $\alpha$  částice atomem.  $\alpha$  částice je jádro helia, které obsahuje dva protony a dva neutrony. Pouze se část atomu odlomí a odletí pryč. Druhým způsobem přeměny izotopu je přeměna  $\beta$ . Přeměnu  $\beta$  rozdělujeme na tři druhy a to rozpad  $\beta^-$  a  $\beta^+$  a elektronový záchyt. Na tyto přeměny se nyní právě podíváme.

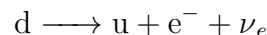
Podíváme-li se na rozpad  $\beta^-$ , tak jen na střední škole se dovíme, že jde o rozpad nebo přeměnu neutronu na proton, při které je vyzářeno záření  $\beta^-$ , známé spíše jako elektron. V atomu, ve kterém takováto změna probíhá, se zachovává nukleonové číslo, protože se žádný nukleon neztratí, ale zvýší se protonové číslo, protože tam přibude jeden proton. Jenže skutečnost je ale trochu komplikovanější. V první řadě ještě při této přeměně musí vzniknout elektronové antineutrino, aby byl zachován spin. Celá přeměna tak vypadá následovně.



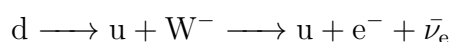
V této rovnici je označen libovolný izotop atomu X s jeho protonovým číslem  $Z$  a nukleonovým číslem  $A$ . Tedy na úrovni hadronů,



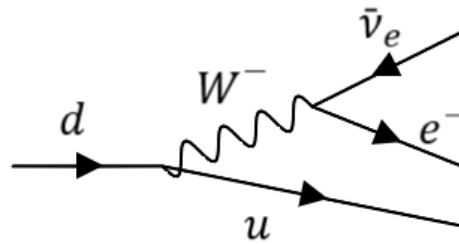
Pokud si vzpomeneme na kvarkové složení neutronu a protonu zjistíme, že neutron a proton se od sebe liší pouze v jednom kvarku. Neutron je složen ze dvou kvarků  $d$  a jednoho kvarku  $u$ . Proton se skládá z jednoho kvarku  $d$  a dvou kvarků  $u$ . To znamená, že při  $\beta^-$  přeměně dochází ke změně kvarku  $d$  na kvark  $u$ . Tuto rovnici pak lze zapsat takto:



Ale ani toto není konec současného poznání. Aby se jedna částice rozpadla okamžitě na tři další není možné. Je potřebné dodat mezikrok. Tento mezikrok obsahuje právě zmiňovaný boson  $W^-$ . Kvark  $d$  nejprve pouze vyzáří zmiňovaný boson  $W^-$ , čímž se změní na kvark  $u$ . Boson  $W^-$  ale není stabilní a tak se téměř okamžitě rozpadne na elektron a vyzáří při tom elektronové antineutrino. Celý výraz tak po výsledné úpravě vypadá takto:

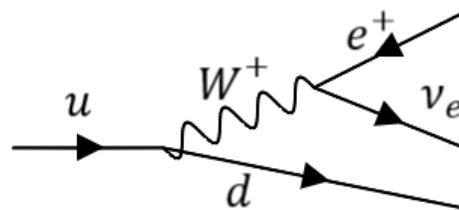


Tento proces lze následně znázornit pomocí Feynmanova diagramu 7.1.



Obrázek 7.1: Feynmanův diagram pro  $\beta^-$  rozpad [17].

Stejným způsobem vypadá i  $\beta^+$  rozpad. Liší se jen v tom, že tentokrát se mění u kvark na d kvark a je přitom vyzářen boson  $W^+$ . Boson  $W^+$  se následně rozpadne na neutrino a pozitron. Feynmanův diagram můžeme vidět na obrázku 7.2.

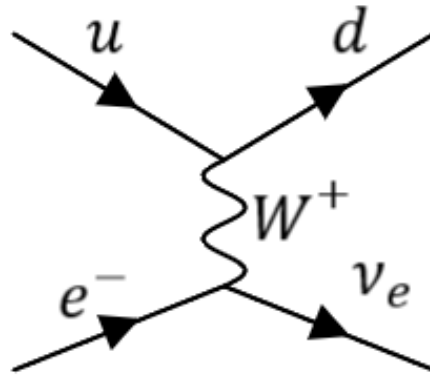


Obrázek 7.2: Feynmanův diagram pro  $\beta^+$  rozpad [17].

Poslední možností  $\beta$  rozpadu je elektronový záchyt. V tomto případě dochází k pohlcení elektronu v nejnižší vrstvě protonem, který se tak změnil na neutron. Při tomto procesu je ještě vyzářeno záření  $\gamma$ , neboli foton, protože do uvolněného místa v nejnižší vrstvě elektronového obalu sestoupí elektron z vyšší vrstvy. Aby mohl elektron takto sestoupit, je potřeba, aby se zbavil energie a to provede právě vyzářením  $\gamma$ . Feynmanův diagram lze znázornit tak jako na obrázku 7.3.

### 7.1.1 Využití

Laického pozorovatele by mohla napadnout otázka: „K čemu to využijeme?“. Když si v minulém století fyzikové hráli s urychlovači a objevovali nové částice a zkoumali jejich vlastnosti, dělali to nejspíše ze zvědavosti, protože chtěli vědět, jak náš okolní svět vypadá. Netušili, že to, co tehdy tvořili, bude jednoho dne zachraňovat životy. Krásným případem, kde můžeme využít  $\beta$  rozpad, je medicína. Jedním z konkrétních využití je pozitronová emisní tomografie (PET). Ta využívá rozpadu  $\beta^+$ . Myšlenka je velmi jednoduchá, i když provedení je složitější. Najde se izotop prvku, který má velmi krátkou dobu poločasu rozpadu, v řádech jednotek nebo desítek minut. Je podstatné, aby to byl rozpad  $\beta^+$ , jinak by to nefungovalo. Pokud najdeme takovýto izotop prvku, pak z něj jen stačí vyrobit látku, která je pro lidské tělo přirozená. Většinou se jedná o nějaké cukry, glukózu, kterou po vložení do lidského těla, začne tělo samo distribuovat kam



Obrázek 7.3: Feynmanův diagram pro elektronový záchyt rozpad [17].

potřebuje. Vyšetřovanému se následně takto upravená látka podá a počká se, než se dostatečně rozšíří po těle, zvláště do míst, která potřebujeme prozkoumat. Radioaktivní izotop, který tvoří jeden z atomů cukru se rozpadne a vyzáří se, mimo jiné, pozitron. Neutrino, které je také vyzářeno, projde tělem bez povšimnutí, takže jej můžeme zanedbat. Pozitron, který je antičásticí k elektronu, s elektronem anihiluje, pokud se setkají. Vzhledem k tomu, že elektronů je v okolí velké množství, jsou v obalu každého jiného atomu, který je v okolí, tak k anihilaci dojde téměř okamžitě. Při této anihilaci vzniknou dva fotony o energii 511 keV. To je klidová hmotnost elektronu a pozitronu, protože ta se nemůže nikam ztratit, bude odnesena vzniknuvšími fotony. Fotony, které vzniknou, se musí ze zákona zachování hybnosti pohybovat přesně opačnými směry. Tyto fotony jsou schopny se dostat z lidského těla ven. Pokud nainstalujeme okolo pacienta detektor, který tyto fotony zachytí, tak je možné zpětně dopočítat, odkud tato dvojice fotonů vyrazila. Dostaneme 3D obrázek, který bude zobrazovat, kam se dostal námi vložený lék nebo kde se nahromadila námi vyslaná glukóza. Výsledek vypadá jako na obrázku 7.4, kde jsou zobrazeny místa, kde je metabolizována glukóza rychleji a kde pomaleji. Tuto informaci už mohou lékaři využít při stanovování diagnózy.

## 7.2 Ukázka

$\beta$  rozpad je možné najít pokud zapneme procesy, které obsahují produkci bosonu  $W$ . Musí jít o produkci  $W$  bosonu z jednoho kvarku, kterému může pomoci gluon nebo foton. Navíc nesmí být výsledkem samotný boson, ale i další kvark, jinak by se nejednalo o námi hledaný proces. Konkrétně jsou to mechanismy, které se vyskytují v následující ukázce kódu.

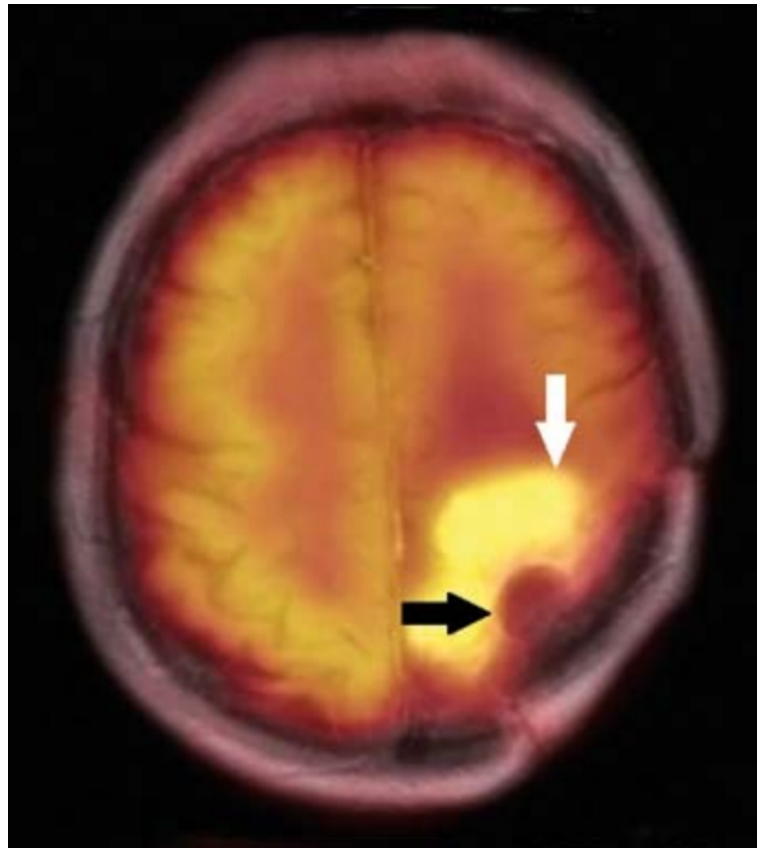
Listing 7.1: Mechanismy pro  $\beta$  rozpad

```

1
2 pythia.readString("WeakBosonAndParton:qg2Wq= on");
3 pythia.readString("WeakBosonAndParton:fgm2Wf= on");

```

Abychom našli  $\beta$  rozpad, tak musíme napsat příslušný kód. Jeden z možných kódů je na následující ukázce. Není to jediná možnost.



Obrázek 7.4: Zobrazení mozku pomocí PET. Bílá šipka ukazuje na místo, kde je zvýšený metabolismus a černá šipka ukazuje na místo, kde je snížený [27]

Listing 7.2: Vyhledávání pro  $\beta$  rozpad

```

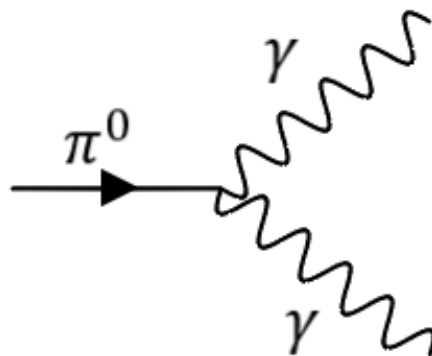
1
2 if (pythia.event[i].id() == 1 &&
3 pythia.event[pythia.event[i].daughter1()].id() == -24 &&
4 pythia.event[pythia.event[i].daughter2()].id() == 2) {
5 k = i;
6 while (pythia.event[pythia.event[k].daughter1()].id() == -24)
7 {k = pythia.event[k].daughter1();};
8 if (pythia.event[k].id() == -24 &&
9 pythia.event[pythia.event[k].daughter1()].id() == 11 &&
10 pythia.event[pythia.event[k].daughter2()].id() == -12)
11 {podminka = 1;
12 cout << "d kvark je " << i << endl;
13 cout << "u kvark je " << pythia.event[i].daughter2() << endl;
14 cout << "W- je " << k << endl;
15 cout << "elektron je " << pythia.event[k].daughter1() << endl;
16 cout << "elektronove antineutrino je " <<
17 pythia.event[k].daughter2() << endl << endl;
18 pythia.event.list();
19 }
20 }

```

To co program udělá je, že najde  $d$  kvark, který se rozpadá na  $u$  a  $W^-$ , poté počká dokud se  $W^-$  opravdu nerozpadne na elektron a elektronové antineutrino. Trik s čekáním je nutné udělat proto, že  $W^-$  při události mění svou hmotnost a podobně, protože na něj působí okolí. Aby se to dalo nějak vyjádřit, tak každá změna je udělána, tak, že  $W^-$  má dceřinou částici opět  $W^-$ , ale se změněnými vlastnostmi. Nakonec jen program vypíše celou událost a napíše, kde je která námi hledaná částice. Výsledkem je soubor logbeta.txt nacházející se v příloze. Nám ale postačí jen řádky týkající se  $\beta$  rozpadu. Vidíme, že se o  $\beta$  rozpad opravdu jedná.

## 7.3 Rozpad pionu na dva fotony

V následujícím procesu se podíváme na rozpad  $\pi^0$  na dva fotony. Ukážeme si na něm, jak se hmotná částice může rozpadnout na dvě částice nehmotné a ilustrováme si na tomto procesu zákony zachování energie a hybnosti. Feynmanův diagram procesu 7.5 je taktéž jednodušší než pro  $\beta$  rozpad.



Obrázek 7.5: Feynmanův diagram pro rozpad  $\pi^0$  na dva fotony [17].

### 7.3.1 Ukázka

Protože pion je nejjednodušší mezon, vzniká velmi často při hadronizaci. Většinou pionů vznikne několik, proto není potřeba hledat speciální proces, který by je generoval, ale postačí nám zapnout například všechny procesy silné interakce a dostat jeden náhodný.

Listing 7.3: Mechanismy pro rozpad pionu

```
1 pythia.readString("HardQCD:all = on");
```

Protože je to mnohem jednodušší proces než předchozí  $\beta$  rozpad, tak je i vyhledávání jednodušší.

Listing 7.4: Vyhledávání pro rozpad pionu

```
1
2 if ( pythia.event[i].id() == 111 &&
3 pythia.event[pythia.event[i].daughter1()].id() == 22 &&
4 pythia.event[pythia.event[i].daughter2()].id() == 22){
5     podminka = 1;
6     cout << "pi0 je " << i << endl;
7     cout << "foton je " <<
8     pythia.event[i].daughter1() << endl;
9     cout << "foton je " << pythia.event[i].daughter2() <<
10    endl << endl;
11 }
```

Celý program je v příloze pod názvem pi02gmgm.cc a jeho výstup pak v logpi0.txt. Na výstupu si ukážeme zákony zachování, které v částicové fyzice platí.

### 7.3.2 Zákon zachování čtyř-hybnosti

Pojďme se nyní podívat na hybnost, hmotnost a energii před a po rozpadu. Z výstupu nám postačí jen řádky, které se zabývají jedním konkrétním rozpadem vyobrazené na 7.6.

no	id	name	status	mothers	daughters	colours	p_x	p_y	p_z	e	m
18	111	(pi0)	-83	15 17	98 99	0 0	0.060	0.242	5.305	5.313	0.135
98	22	gamma	91	18 0	0 0	0 0	0.102	0.175	4.057	4.062	0.000
99	22	gamma	91	18 0	0 0	0 0	-0.042	0.067	1.248	1.251	0.000

Obrázek 7.6: Vybrané informace pro rozpad pionu

Nejprve se podívejme na první řádek, ve kterém se píše, co který sloupek znázorňuje. A ověřme, že se jedná o námi hledaný rozpad. Na druhém řádku s pořadovým číslem 18 vidíme, že  $\pi^0$  má dvě dceřiné částice, které mají pořadová čísla 98 a 99. Podíváme-li se na tyto řádky, řádky 3 a 4, tak vidíme, že se jedná o částice gamma, neboli fotony. Pojďme nyní ověřit všechny zákony zachování, které musí platit.

Nejjednoduššími zákony jsou zákony zachování hybnosti v jednotlivých osách. Pro hybnost ve směru x musí platit vztah

$$p_x(\text{pionu}) = p_x(1.\text{fotonu}) + p_x(2.\text{fotonu})$$

A opravdu platí, že

$$0,060\text{GeV} = 0,102\text{GeV} + (-0,042\text{GeV})$$

Totéž platí pro obě zbývající osy.

$$p_y(\text{pionu}) = p_y(1.\text{fotonu}) + p_y(2.\text{fotonu})$$

$$0,242\text{GeV} = 0,175\text{GeV} + 0,067\text{GeV}$$

$$p_z(\text{pionu}) = p_z(1.\text{fotonu}) + p_z(2.\text{fotonu})$$

$$5,305\text{GeV} = 4,057\text{GeV} + 1,248\text{GeV}$$

Platnost zákona zachování hybnosti všech třech směrech není nic překvapivého, je to učivo prvního ročníku střední školy. Co je ale podstatnější je, že platí i Einsteinův vzorec

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2.$$

Vzhledem k tomu, že používáme všude stejných jednotek, tak nám konstanta rychlosti světla zmizí,

$$E^2 = m^2 + p^2.$$

Zvláště pak musí platit zákon zachování energie. Ten můžeme ověřit jednodušším příkladem, kdy nám už energii program spočetl.

$$E(\text{pionu}) = E(1.\text{fotonu}) + E(2.\text{fotonu})$$

$$5,313\text{GeV} = 4,062\text{GeV} + 1,251\text{GeV}$$



My si to spočteme z Einsteinova vzorce.

$$E(\text{pionu}) = E(1.\text{fotonu}) + E(2.\text{fotonu})$$

$$\begin{aligned} \sqrt{m_{\text{pionu}}^2 + p_{\text{pionu}}^2} &= \sqrt{m_{1.\text{fotonu}}^2 + p_{1.\text{fotonu}}^2} + \sqrt{m_{2.\text{fotonu}}^2 + p_{2.\text{fotonu}}^2} \\ &= \sqrt{0,135^2 + 0,060^2} + \sqrt{0,242^2 + 5,305^2} = \\ &= \sqrt{0^2 + 0,105^2 + 0,175^2 + 4,057^2} + \sqrt{0^2 + (-0,042)^2 + 0,067^2 + 1,248^2} \end{aligned}$$

Pokud tento dlouhý výraz vypočítáme, tak dostaneme stejné hodnoty, jako nám vypočetl program.

Mělo by být patrné, že neplatí zákon zachování hmotnosti, který z běžné fyziky platí, protože se hmotná částice rozpadne na dvě nehmotné. Nemůže se ale rozpadnout ledajakým způsobem, vzniklé částice si musí odnést energii, která je ukrytá v klidové hmotnosti v hybnosti. Čtyřhybnost je v rámci speciální teorie relativity definována jako

$$P = (E, p_x, p_y, p_z)$$

Zachovává se pak kvadrát celkové čtyřhybnosti, tedy

$$P^2(\text{pionu}) = [P(1.\text{fotonu}) + P(2.\text{fotonu})]^2,$$

kvadrát čtyřhybnosti je definován jako

$$P^2 = E^2 - (p_x \times p_x + p_y \times p_y + p_z \times p_z),$$

což není nic jiného než hmotnost. Pro náš případ tedy

$$P^2(\text{pion}) = m^2(\text{pion}) = [E(1.\text{foton}) + E(2.\text{foton})]^2 - [\vec{p}(1.\text{foton}) + \vec{p}(2.\text{foton})]^2,$$

A vidíme, že z kinematiky vylétajících fotonů můžeme určit hmotnost mateřské částice.

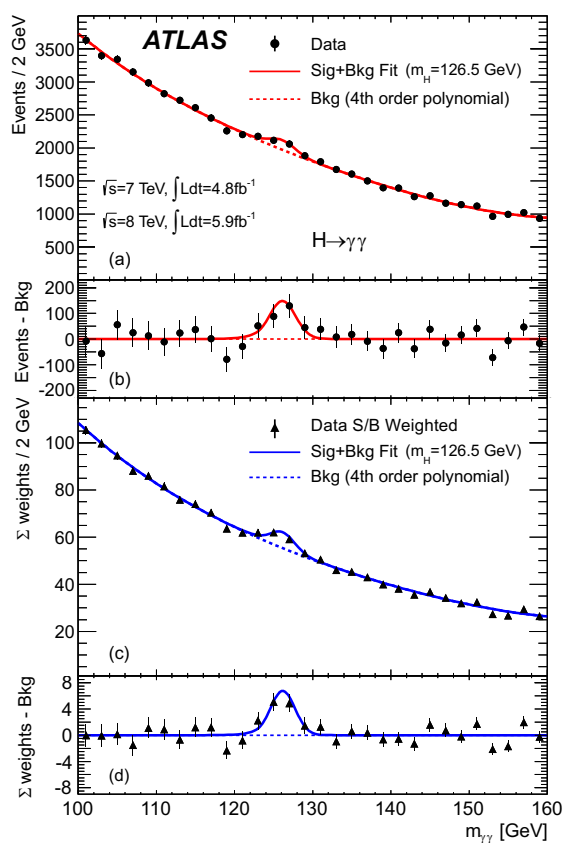
Jak již bylo zmíněno v kapitole 4, tak se těmito čtyřem veličinám, energii a třem hybnostem, říká čtyř-hybnost. Můžeme tak tvrdit, že platí zákon zachování čtyř-hybnosti.

## 7.4 Objev Higgsova bosonu

Poslední elementární částicí, která byla objevena je Higgsův boson. Je to poslední částice, která chyběla, aby byl standardní model experimentálně ověřen. Tato částice byla objevena, respektive potvrzena, až v roce 2012. V představách spousty lidí přebývá koncepce, že zkrátka v CERNu sráželi částice dostatečně dlouho a jednoho dne detektorem prolétl Higgsův boson, a tak byl objeven. Tato představa ale nemůže být dále od pravdy. V samotném detektoru totiž Higgsův boson není nikdy vidět, nevidíme totiž nikdy tu část procesu, která se děje velmi rychle a téměř ihned po srážce. Vždy vidíme jen výsledné produkty srážky. První práce, která potvrdila existenci Higgsova bosonu [36], tak zkoumala následující proces, kdy se typicky srážely dva gluony, jejichž produktem byl právě Higgsův boson. Ten se téměř okamžitě rozpadl typicky na dva fotony. Protože Higgsův boson je hmotný a fotony nehmotné, tak proběhne velmi podobná událost jako při rozpadu pionu. Vzniknou dva fotony, pro které platí zákon zachování čtyřhybnosti, což nám umožňuje určit například hmotnost Higgsova bosonu. Naneštěstí ale toto není jediný proces, který takto vypadá. Spousta procesů vypadá totiž velmi podobně. Nikdy se tak nedovíme, jestli jsme v konkrétní dané události viděli rozpad Higgsova bosonu, nebo jen jiný proces s podobným výstupem. Můžeme to ale vidět ze statistiky.

### 7.4.1 Signál a pozadí

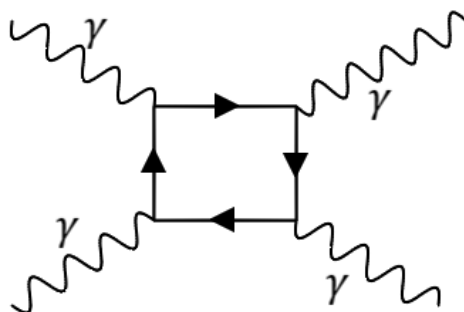
K tomu nám pomůže simulace. Nejprve určíme co hledáme, to bude signál. V tomto konkrétním případě je to výše popsany proces rozpadu Higgsova bosonu na dva fotony. Dále ještě najdeme všechny možné události, které mají podobný výsledek. Tyto události tvoří pozadí, je to takový šum, který je potřeba nějak odlišit. V tomto konkrétním případě jsou to procesy, ve kterých se sráží dva fermiony, respektive fermion a antifermion a výsledkem je jejich anihilace za vzniku dvou fotonů. Nyní můžeme nechat tyto procesy simulovat Pythií. Podíváme se, jak vypadá samostatné pozadí. Na obrázku 7.7 to můžeme vidět jako přerušovanou čáru. Na vodorovné ose se nachází hmotnost původní částice získaná ze zákona zachování čtyřhybnosti a na svislé ose se nachází četnost daného jevu. Modrá a červená data jsou jen jinak normovaná. Tečky a trojúhelníčky znázorňují opravdová data naměřená na ATLASu. Všimněme si, že v okolí hmotnosti 126,5 GeV se nachází mírný hrbolek. Tento hrbolek lze vysvětlit, pokud k pozadí přidáme i signál od Higgsova bosonu a to konkrétně takový, že Higgsův boson má hmotnost 126,5 GeV. Signál s pozadím je znázorněn plnou čarou. Pro lepší znázornění je možné se podívat na menší grafy s označením b a d. Na těch je možné vidět odchýlení od samostatného pozadí.



Obrázek 7.7: Graf znázorňující objev Higgsova bosonu o hmotnosti 126,5 GeV [36].

## 7.5 Rozptyl světla na světle

Další událostí je rozptyl světla na světle. Většina lidí by očekávala, že světlo na jiné světlo nijak nepůsobí. Pokud na sebe v noci posvítí dva lidé baterkami, tak také neuvidíme, že by se od sebe světelné kužely odráželi nebo se jinak zlomily. Ale ve skutečnosti k jevu interakce světla se světlem docházet může. Muže k tomu dojít například ve velmi periferních srážkách jader olova. Obě jádra okolo sebe prakticky jen proletí a jediné, co se sráží jsou dva fotony, která jsou přítomna jako elektromagnetické pole nabitých protonů. Feynmanův diagram znázorňující srážku vypadá následovně (obr.7.8).

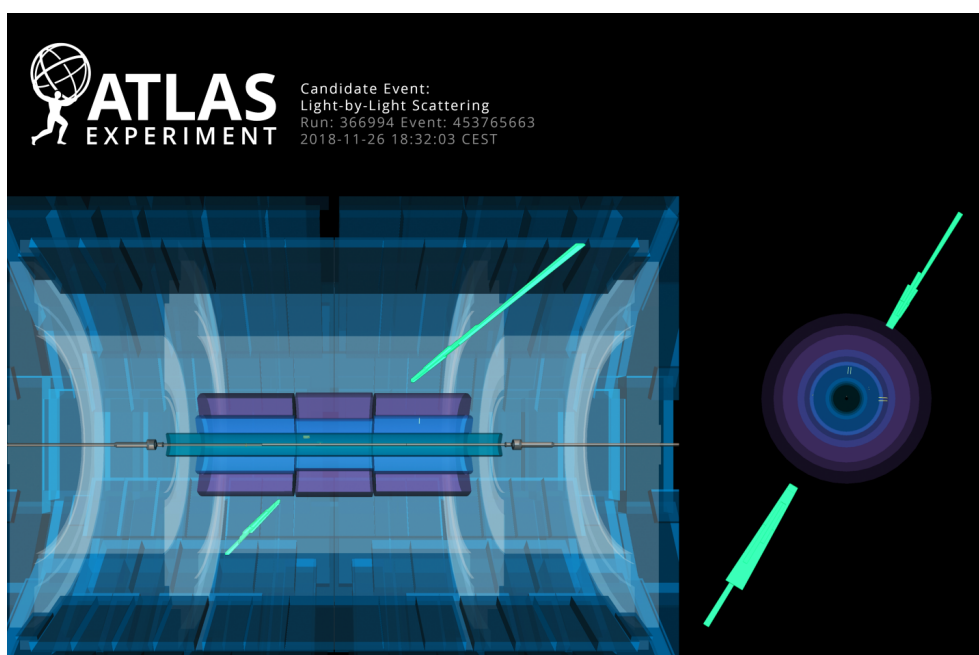


Obrázek 7.8: Feynmanův diagram pro rozptyl světla na světle. [17].

Důvod, proč vypadá možná trochu komplikovaněji je, že se jedná o proces tzv. vyššího řádu, který je složitější a tudíž i méně častý. Jedná se o čistě kvantový jev, nelinearitu, která není přítomna v klasické teorii elektromagnetismu. Pro nás je podstatné, že vstupní částice jsou dva fotony a výstupní částicí zase dva fotony. V detektoru tak uvidíme jen dvojici fotonů, která prochází skrze detektor v opačných směrech. Ukázku, co přesně bude pozorováno můžeme vidět na obrázku 7.9.

Z ukázky můžeme poznat, že se jedná opravdu o fotony, protože je vidíme až v elektromagnetickém kalorimetru, kde jsou zcela pohlceny.

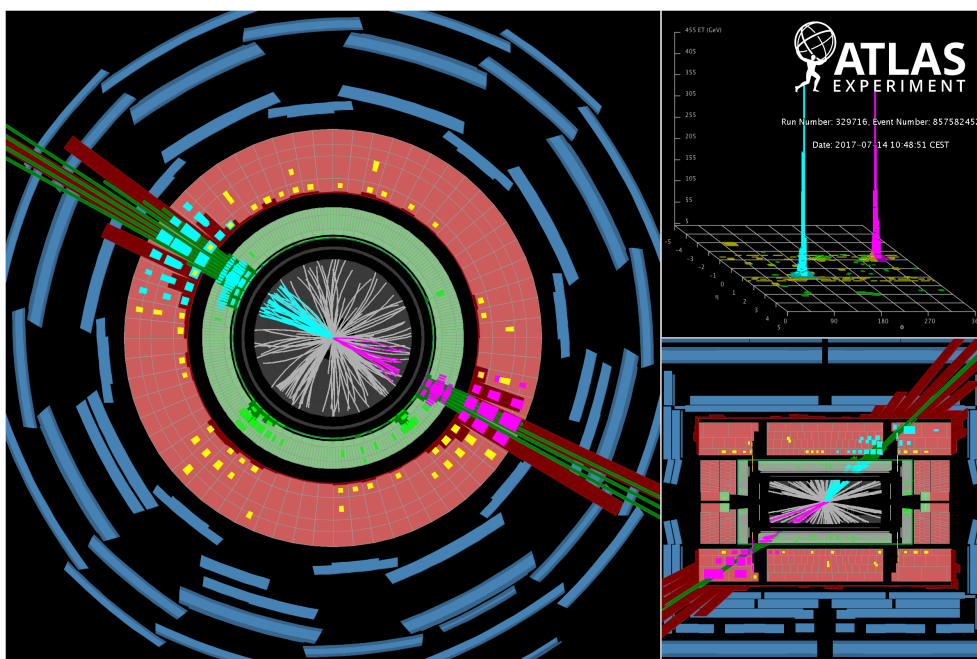
Pro simulaci v Pythii zde není přímo spouštěč, který by byl `gmgm2gmgm`, proto se Pythia pro tuto simulaci těchto konkrétních procesů nepoužívá. Místo Pythie se používá program STARLIGHT.



Obrázek 7.9: Zobrazení události, při které došlo k velmi periferní srážce dvou jader olova. V kalorimetru je možné vidět dva fotony (zeleně), což jasně naznačuje rozptyl světla na světlo. Mimo tyto fotony není v detektoru žádný jiný signál. [35]

## 7.6 Jety

Poslední ukázkou nebude konkrétní proces, ale jev, který se nachází v mnoha událostech a tím je jet. V češtině lze používat i výraz výtrysk, či sprška částic. Jet vzniká tak, že při úvodní srážce vznikne nejčastěji dvojice energetických částic letící opačnými směry. To, že letí opačnými směry víme ze zákonů zachování. Takto letící částice, může to být dvojice gluonů nebo kvarků, má dostatek energie na to, aby se dostaly daleko od sebe. Pro částice je tak energeticky výhodnější, když se vazba mezi nimi přetrhne a vzniknou další částice. Podrobnější popis vzniku jetu je možné najít v kapitole 2. Tyto částice se pak pohybují ve směru původních částic. Tyto částice se dále mohou rozpadat, jako to dělají piony. Nebo jsou-li to volné kvarky, tak hadronizují. To znamená, že se sloučí do hadronů. Nejčastěji jsou to mezony piony (pokud obsahují jen kvarky první generace, kvarky  $u$  a  $d$ ) a kaony (pokud obsahují  $s$  kvark). Méně často jsou to baryony, tedy protony a neutrony. Může se stát, že z původních srážených dvou protonů, vznikne mnohem více protonů. Znázornění vzniku dvou jetů můžeme vidět na obrázku 7.10. Na obrázku si povšimněme, že se zde vyskytuje mnoho dalších částic i mimo jety, ale většina energie je odnášena jety. Na obrázku jsou jety zvýrazněny fialovou a tyrkysovou barvou. To je vidět zvláště v pravé horní části, kde je ukázán histogram. Jet jako takový nemá úplně konkrétně určenou hranici, její volba je daná definicí jetu, kterou používáme.

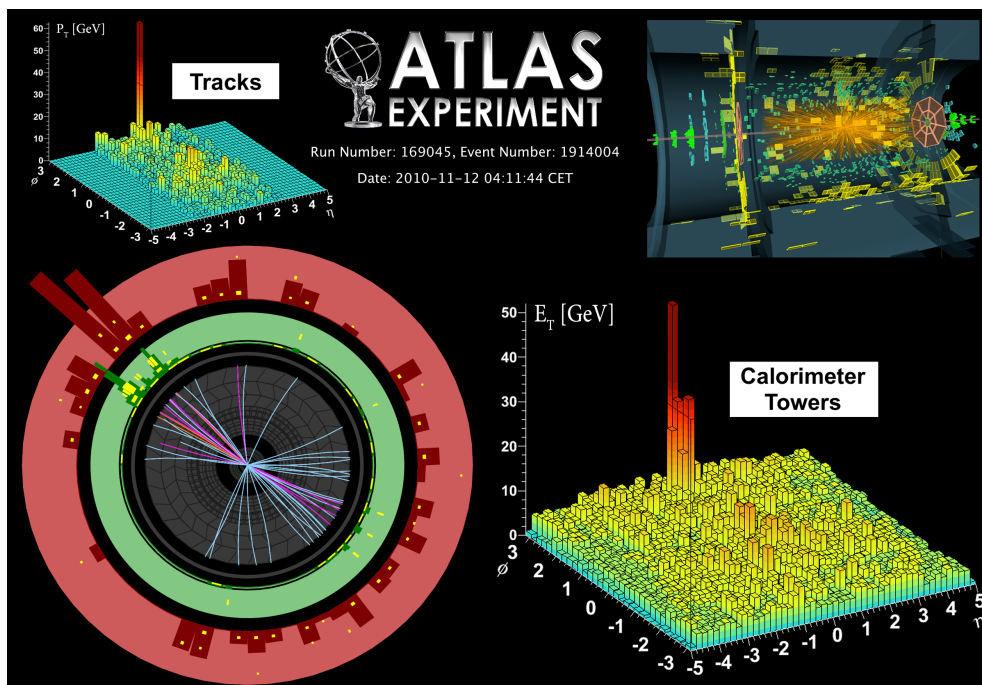


Obrázek 7.10: Zobrazení události na detektoru, při které došlo ke vzniku dvou jetů. V pravé horní části vidíme množství energie v závislosti na směru šíření. [15]

Jety nemusí v události vznikat jen dva. Produkce většího počtu jetů letících různými směry je ovšem méně častá.

### 7.6.1 Jety jako sonda

Jety lze pozorovat nejen v proton-protonových srážkách, ale i ve srážkách jader olova. Protože se v jádrech olova vyskytuje velké množství částic, stane se, že v takovémto případě vznikne kvark-gluonové plasma. Což si můžeme představit jako chuchvalec kvarků a gluonů. Pokud by při této srážce ještě vznikla dvojice jetů, tak se může stát, že jeden s jetů tímto kvark-gluonovým plasmatem projde. Protože je kvark-gluonové plasma složením částic, na které působí silná interakce a jet také, bude při průchodu plasmatem jet ovlivňován, podobně jako když elektricky nabitá částice prochází elektromagnetickým polem. To co budeme pozorovat se nazývá shášení jetů. Jet, který prochází plasmatem, bude zmenšovat svoji hybnost a lze říci, že uhasne. Sám o sobě by to byl jen další jev, který je sice zajímavý, ale k ničemu nám moc není. Jenže pokud máme o jetech dobré znalosti, víme, jak se chovají, jaké mají vlastnosti a složení, tak je můžeme použít jako sondu pro zkoumání kvark-gluonového plasmatu. Na podobném principu funguje spektroskopie. Pokud chceme zjistit složení nějakého plynu, tak na něj stačí posvítit světlem a z vlastností světla, které plynem prošlo jsme schopni zjistit složení plynu. Zde to funguje velmi podobně. Jenom místo světelného paprsku máme jet, místo plynu kvark-gluonové plasma. Zkoumání kvark-gluonového plasmatu nám pomůže zjistit více o počátečních dobách vesmíru, protože se předpokládá, že celý vesmír byl v jisté fázi svého vývoje kvark-gluonovým plasmatem. Na posledním obrázku 7.11 můžeme vidět jednu ukázkou srážky jader olova s přítomností jetů. Můžeme vidět, že se zde již nevyskytují dva výrazné jety, ale nachází se zde jen jeden. Druhý je poměrně výrazně oslaben. Navíc je vidět, že srážka již není tak čistá jako předtím, ale je zde mnohem větší množství signálu.



Obrázek 7.11: Zobrazení události v detektoru, při které došlo ke vzniku dvou jetů. Jeden jet je výrazně oslaben, protože prošel kvark-gluonovým plasmatem [28].

# Závěr

Po přečtení této diplomové práce by měl čtenář znát stručnou historii vývoje fyzikálního poznání, zvláště základních stavebních kamenů vesmíru a sil mezi nimi působících. A to od prvních poznatků a myšlenek z antického Řecka až po současný Standardní model částicové fyziky. Dále by měl být schopen Standardní model popsat. A to jak jednotlivé částice, které se zde vyskytují, tak by měl být schopen určit jaké interakce působí mezi kterými částicemi. Dále by měl mít představu, jakým způsobem se v této oblasti zkoumá a vědět, k čemu je LHC a jak, alespoň základně, funguje. Dále také jak funguje detektor ATLAS. Měl by se rovněž seznámit s používáním základních veličin a jednotek souvisejících s částicovou fyzikou. Dále by měl umět přečíst jednoduché Feynmanovy diagramy. Nakonec by měl mít představu, jak funguje program Pythia a umět, něco málo v něm napsat, nebo spíše poupravit pro vlastní potřebu.

V diplomové práci bylo představeno několik základních procesů, které se v částicové fyzice objevují. Každý z procesů byl představen i s nějakou ukázkou, která by měla čtenáře ponořit více do tajů částicové fyziky. Prvním z nich je  $\beta$  rozpad, který ukazuje příklad slabé jaderné interakce. Dále je na něm prezentován i příklad lékařského využití v podobě pozitronové emisní tomografie, aby bylo ukázáno, že i takto vzdálená část zkoumání od běžného života může mít praktický dopad na náš život. Dále je prezentován rozpad nejčastějšího mezonu, pionu. Na něm jsou ukázány zákony zachování energie a hybnosti. Také je to ukázka využití Einsteinova vzorce pro ekvivalenci mezi hmotou a energií, protože jde o rozpad hmotné částice na dva nehmotné fotony. Třetí ukázkou je objev Higgsova bosonu a vysvětlení, jak byla částice objevena, v rámci něhož byl například představen rozdíl mezi signálem a pozadím. Předposlední ukázkou byl rozptyl světla na světlo, který je poměrně neintuitivní ukázkou chování světla, protože ji v našem životě běžně nepozorujeme. Poslední ukázkou jsou spršky částic, zvaných jety, na kterých je prezentován způsob jak je možné je využít ke zkoumání raného vesmíru.



# Seznam použité literatury

- [1] Aristotelés. URL <https://cs.wikipedia.org/wiki/Aristotel%C3%AAs>. Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [2] Charles-augustin de coulomb. URL [https://cs.wikipedia.org/wiki/Charles-Augustin\\_de\\_Coulomb](https://cs.wikipedia.org/wiki/Charles-Augustin_de_Coulomb). Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [3] Elektron. URL <https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektron>. Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [4] Standardní model částicové fyziky: stručná historie a současný stav. URL [https://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/~horejsi/popular/Olomouc\\_2014\\_SM.pdf](https://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/~horejsi/popular/Olomouc_2014_SM.pdf). Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [5] Vnitřní detektor. URL <https://www.semanticscholar.org/paper/Alignment-of-the-ATLAS-Inner-Detector-Upgraded-for-Pena/644545987a31bad4ee6544f7374a8435c29bc48c>. Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [6] Schématická ukázka urychlovačů. URL <http://jakub.serych.cz/book/export/html/40>. Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [7] Platón. URL <https://cs.wikipedia.org/wiki/Plat%C3%BAn>. Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [8] Objev pozitronu. URL <https://cs.wikipedia.org/wiki/Pozitron#/media/Soubor:PositronDiscovery.jpg>. Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [9] Rutherfordův experiment. URL [https://cs.wikipedia.org/wiki/Rutherford%C3%BDv\\_experiment](https://cs.wikipedia.org/wiki/Rutherford%C3%BDv_experiment). Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [10] Standardní model částic. URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Standard\\_Model#/media/File:Standard\\_Model\\_of\\_Elementary\\_Particles.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model#/media/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg). Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [11] Mendělejevova tabulka prvků. URL [https://cs.wikipedia.org/wiki/Dmitrij\\_Ivanovi%C4%8D\\_Mendělejev#/media/Soubor:Mendeleev's\\_1869\\_periodic\\_table.png](https://cs.wikipedia.org/wiki/Dmitrij_Ivanovi%C4%8D_Mendělejev#/media/Soubor:Mendeleev's_1869_periodic_table.png). Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [12] Tháles z milétu. URL [https://cs.wikipedia.org/wiki/Thal%C3%AAs\\_z\\_Mil%C3%AAtu](https://cs.wikipedia.org/wiki/Thal%C3%AAs_z_Mil%C3%AAtu). Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [13] Atlas. URL <https://atlas.cern/discover/detector>. Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [14] Znázornění beta rozpadu. URL [https://www.wikiskripta.eu/w/Rozpad\\_beta#/media/Soubor:Beta-minus\\_Decay.svg](https://www.wikiskripta.eu/w/Rozpad_beta#/media/Soubor:Beta-minus_Decay.svg). Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [15] Detektor atlas ukazující dva jety. URL [https://twiki.cern.ch/twiki/pub/AtlasPublic/EventDisplayRun2Physics/JiveXML\\_display\\_329716\\_857582452.png](https://twiki.cern.ch/twiki/pub/AtlasPublic/EventDisplayRun2Physics/JiveXML_display_329716_857582452.png). Zobrazeno: 1. 1. 2023.

- [16] Vnější fotoelektrický jev. URL [https://mamut.spseol.cz/nozka/psk/052-opticke\\_zdroje\\_detektory/tisk.html](https://mamut.spseol.cz/nozka/psk/052-opticke_zdroje_detektory/tisk.html). Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [17] Generátor Feynmanových diagramů. URL <https://www.aidansean.com/feynman/>. Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [18] Atlas. URL <https://home.cern/science/experiments/atlas>. Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [19] Vznik jetu a jeho hadronizace. URL [https://cs.wikipedia.org/wiki/Barevn%C3%BDzn%C3%A1n#/media/Soubor:Quark\\_confinement.svg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Barevn%C3%BDzn%C3%A1n#/media/Soubor:Quark_confinement.svg). Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [20] Řez kalorimetrem. URL [https://www.researchgate.net/figure/Cut-away-view-of-the-ATLAS-calorimeters-The-LAr-calorimeters-are-seen-inside-fig1\\_230918118](https://www.researchgate.net/figure/Cut-away-view-of-the-ATLAS-calorimeters-The-LAr-calorimeters-are-seen-inside-fig1_230918118). Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [21] Kódy pro jednotlivé částice standardního modelu. URL <https://pdg.lbl.gov/2007/reviews/montecarlopp.pdf>. Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [22] Accelerators. URL <https://home.cern/science/accelerators>. Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [23] Experiments. URL <https://home.cern/science/experiments>. Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [24] Maxwellovy rovnice. URL [https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/elmag/5\\_1](https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/elmag/5_1). Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [25] Monte carlo simulace pro obsah kruhu. URL <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b0/MonteCarloIntegrationCircle.png>. Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [26] Ohyb pohybu v zakřiveném prostoročasu. URL <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/einstein/f2.htm>. Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [27] Využití pozitronové emisní tomografie (PET) v neurologii. URL <https://www.neurologiepropraxi.cz/pdfs/neu/2014/01/04.pdf>. Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [28] Detektor atlas ukazující potlacený jet. URL [https://twiki.cern.ch/twiki/pub/AtlasPublic/EventDisplayHeavyIonCollisions/run169045\\_evt1914004\\_v5.png](https://twiki.cern.ch/twiki/pub/AtlasPublic/EventDisplayHeavyIonCollisions/run169045_evt1914004_v5.png). Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [29] Pozitron. URL <https://cs.wikipedia.org/wiki/Pozitron>. Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [30] Srážka protonů jako chuchvalec partonů. URL [https://atlas.physicsmasterclasses.org/en/zpath\\_protoncollisions.htm](https://atlas.physicsmasterclasses.org/en/zpath_protoncollisions.htm). Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [31] Grafické znázornění pseudorapidity. URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Pseudorapidity#/media/File:Pseudorapidity\\_plot.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Pseudorapidity#/media/File:Pseudorapidity_plot.svg). Zobrazeno: 1. 1. 2023.

- [32] Pythia home page. URL <http://home.thep.lu.se/~torbjorn/Pythia.html>. Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [33] Rutherfordův experiment. URL [https://cs.wikipedia.org/wiki/Rutherfordův\\_experiment#/media/Soubor:Geiger-Marsden\\_experiment\\_expectation\\_and\\_result.svg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Rutherfordův_experiment#/media/Soubor:Geiger-Marsden_experiment_expectation_and_result.svg). Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [34] Vznik qgp při srážkách těžkých iontů. URL [https://ojs.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/lhc/vytrysky\\_LHC.htm](https://ojs.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/lhc/vytrysky_LHC.htm). Zobrazeno: 1. 1. 2023.
- [35] COLLABORATION, A. (2019). ATLAS Event Display: Light Scattering Off Light. General Photo. URL <https://cds.cern.ch/record/2667216>.
- [36] ET AL., G. A. (2012). Observation of a new particle in the search for the standard model higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Physics Letters B*, **716**(1), 11. doi: 10.1016/j.physletb.2012.08.020. URL <https://doi.org/10.1016%2Fj.physletb.2012.08.020>.
- [37] GRANT GORFINE (2009). Alignment of the ATLAS Inner Detector Tracking System. *eConf C090726*.
- [38] MORISBAK, V. a OULD-SAADA, F. (2023). Search for new physics with atlas at lhc -  $z'$  dilepton resonance at high mass.

# Seznam obrázků

1.1	Vyobrazení Tháleta z Milétu, který je považován za zakladatele filosofie a položil tak základy zkoumání světa, kam fyzika patří. Žil na přelomu 7. a 6. století před naším letopočtem, což dokládá velké stáří myšlenky, která chce rozluštit, co jsou nejzákladnější částičky vesmíru [12]. . . . .	5
1.2	Mendělejevova tabulka prvků rok 1869. S otazníky můžeme vidět i předpovězené prvky [11]. . . . .	6
1.3	Rutherfordův experiment, kterým dokázal existenci jádra pomocí ostřelování zlaté fólie zářením alfa. Z průběhu odrazů $\alpha$ částice do různých směrů je vidět, že uvnitř atomu musí být malé jádro [33].	7
1.4	První stopa pozitronu v mlžné komoře. Čára značící částici odpovídá dle tloušťky elektronu. Protože je ale stočena na druhou stranu než elektron, tak musí mít opačný náboj. Není to elektron, ale pozitron.[8]. . . . .	8
1.5	Znázornění zakřivení pohybu v zakřiveném časoprostoru[26]. . . . .	9
1.6	Znázornění vnějšího fotoelektrického jevu [16]. . . . .	11
1.7	Znázornění $\beta$ rozpadu [14]. . . . .	12
2.1	Standardní model elementárních částic . . . . .	15
2.2	Grafické znázornění barevného náboje. Vlevo barvy označené R - červená, G - zelená, B - modrá, pruhem je označena antibarva. Nahoře baryon (vlevo částice, vpravo antičástice). Dole tři možnosti jak barevně poskládat mezony. [6] . . . . .	17
2.3	Grafické znázornění vzniku jetu pomocí oddalování páru kvark antikvark [19]. . . . .	20
2.4	Vznik kvark gluonového plasmatu při srážkách těžkých iontů. [34]	21
3.1	Schématická ukázka urychlovačů v CERNu [6]. . . . .	25
3.2	Detektor Atlas [13] . . . . .	26
3.3	Grafické znázornění vnitřního detektoru. IBL - Insertable B-Layer, Pixels - The Pixel Detector, SCT - Semi-Conductor Tracker, TRT - Transition Radiation Tracker [5] . . . . .	27
3.4	Grafické znázornění kalorimetru. [20] . . . . .	28
3.5	Znázornění jednotlivých částic procházejících detektorem ATLAS. Přerušovaná čára znázorňuje nezaznamenanou trajektorii detektorem. [38] . . . . .	29
4.1	Grafické znázornění pseudorapidity [31] . . . . .	32
4.2	Feynmanův diagram zobrazující anihilaci pozitronu a elektronu [17]	33
4.3	Znázornění fermionu. Nahoře částice, dole antičástice. V tomto případě spolu nijak neinteragují [17]. . . . .	34
4.4	Znázornění fotonu [17]. . . . .	34
4.5	Znázornění gluonu [17]. . . . .	34
4.6	Znázornění Higgsova bosonu [17]. . . . .	35
4.7	Feynmanův diagram pro $\beta^-$ rozpad [17]. . . . .	35

5.1	Logo programu PYTHIA s vyobrazením mýtické Pýthie [32] . . . .	36
5.2	Obrázek pro výpočet obsahu kruhu pomocí Monte Carlo metody [25]. . . . .	38
6.1	Srážka dvou protonů [30]. . . . .	42
6.2	Srážka typu s. Konkrétně je znázorněno $\text{ffbar}2\text{ttbar}(s:\text{gmZ})$ . [17]. .	44
6.3	Srážka typu t. Konkrétně je znázorněno $\text{qq}2\text{tq}(t:\text{W})$ . [17]. . . . .	44
6.4	Znázornění ISR. [17]. . . . .	46
6.5	Znázornění FSR. [17]. . . . .	47
7.1	Feynmanův diagram pro $\beta^-$ rozpad [17]. . . . .	51
7.2	Feynmanův diagram pro $\beta^+$ rozpad [17]. . . . .	51
7.3	Feynmanův diagram pro elektronový záchyt rozpad [17]. . . . .	52
7.4	Zobrazení mozku pomocí PET. Bílá šipka ukazuje na místo, kde je zvýšený metabolismus a černá šipka ukazují na místo, kde je snížený [27] . . . . .	53
7.5	Feynmanův diagram pro rozpad $\pi^0$ na dva fotony [17]. . . . .	55
7.6	Vybrané informace pro rozpad pionu . . . . .	56
7.7	Graf znázorňující objev Higgsova bosonu o hmotnosti 126,5 GeV [36]. . . . .	59
7.8	Feynmanův diagram pro rozptyl světla na světlo. [17]. . . . .	60
7.9	Zobrazení události, při které došlo k velmi periferní srážce dvou jader olova. V kalorimetru je možné vidět dva fotony (zeleně), což jasně naznačuje rozptyl světla na světlo. Mimo tyto fotony není v detektoru žádný jiný signál. [35] . . . . .	61
7.10	Zobrazení události na detektoru, při které došlo ke vzniku dvou jetů. V pravé horní části vidíme množství energie v závislosti na směru šíření. [15] . . . . .	62
7.11	Zobrazení události v detektoru, při které došlo ke vzniku dvou jetů. Jeden jet je výrazně oslaben, protože prošel kvark-gluonovým plasmatem [28]. . . . .	63