

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

KOSMICKÉ DETEKTORY ČÁSTIC

Bakalářská práce



Vedoucí bakalářské práce: **Mgr. Jiří Kvita Ph.D.**

Vypracoval(a): **Kristýna Vitulová**

Studijní program: Optika a optoelektronika

Studijní obor Fyzika

Forma studia: Prezenční

Rok odevzdání: 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením Mgr. Jiřího Kvity Ph.D, za použití literatury uvedené v závěru práce.

V Olomouci dne

.....
podpis

Poděkování

Na tomto místě bych ráda vyjádřila upřímné díky vedoucímu mé bakalářské práce, Mgr. Jirímu Kvitovi PhD., nejen za odborné vedení a cenné rady, které mi poskytl, ale také za jeho nadšení a trpělivost, které sehrály klíčovou roli ve formování mého profesního růstu. Dále bych chtěla vyjádřit svůj vděk svým rodičům a rodině za jejich nekonečnou podporu a lásku, kterou mi poskytovali během mého bakalářského studia.

BIBLIOGRAFICKÁ IDENTIFIKACE

Autor: Kristýna Vitulová

Název práce: Kosmické detektory částic

Typ práce: Kosmické detektory částic

Vedoucí práce: Mgr. Jiří Kvita Ph.D.

Rok obhajoby práce: 2023

Abstrakt: Bakalářská práce hovoří o kosmických detektorech částic, jejich konstrukci a funkci. Popisuje jednotlivé technologie detektorů umístěných ve vesmíru, stejně jako dvou hlavních detektorů na urychlovači částic v laboratoři CERN v Ženevě a jejich strukturu. V praktické části se věnuje vykreslení některých publikovaných dat kolaborací AMS-02 a jejich možných vysvětlení.

Klíčová slova: Detektor, kosmické záření, AMS

Počet stran: 37

Počet příloh: 0

Jazyk: český

BIBLIOGRAPHICAL IDENTIFICATION

Author: Kristýna Vitulová

Title: Cosmic particle detectors

Type of thesis: Bachelor's

Supervisor: Mgr. Jiří Křivá Ph.D.

The year of presentation: 2023

Abstract: The bachelor's thesis discusses cosmic particle detectors, their construction, and functionality. It describes various detector technologies situated in space, as well as the two main detectors at the particle accelerator in CERN in Geneva, along with their structure. The practical section focuses on illustrating some of the published data from the AMS-02 collaborations and their potential explanations.

Key words: Detector, cosmic rays, AMS

Number of pages: 37

Number of appendices: 0

Language: Czech

Obsah

1	Úvod	8
1.1	Kosmické záření	8
2	Kosmické detektory částic	10
2.1	Detektor AMS-02	10
2.1.1	Konstrukce AMS-2	10
2.2	CALET	14
2.2.1	Konstrukce CALET	14
2.3	Fermi-LAT	14
2.3.1	Konstrukce Fermi-LAT	15
3	Detektory na urychlovači	16
3.1	Experiment ATLAS	16
3.2	Experiment CMS	21
3.3	Porovnání obou detektorů	22
4	Průchod částic látkou	23
4.1	Brzdné záření	25
4.2	Scintilace	27
4.3	Čerenkovovo záření	27
5	Úvod do antihmoty	29
5.1	Asymetrie hmoty a antihmoty ve vesmíru	29
6	Vykreslení publikovaných dat z AMS-02	31
6.1	Antiprotony	32
6.2	Pozitrony	34

1 Úvod

1.1 Kosmické záření

Tisíce metrů nad Zemským povrchem je naše atmosféra nepřetržitě vystavena dopadajícímu kosmickému záření. To dopadá na její vnější vrstvu ve dvou základních formách, v podobě fotonů a jiných subatomických částic. Dopadající fotony mají vlnové délky od rádiových vln přes viditelné světlo až po gamma záření. Zbývající částice jsou atomová jádra zbavena všech svých elektronů, elektrony, pozitrony, antiprotony a lehká antijádra. Vysokoenergetická sprška částic je známa jako kosmické záření, ačkoliv dosahuje o mnoho vyšších energií než alfa či beta radiace, a to až 10^{18} eV [15].

Jakmile primární kosmické záření zasáhne molekuly vnější vrstvy atmosféry, vznikne sekundární sprška subatomických částic. Tato sekundární sprška je před dopadem na Zemský povrch většinou pohlcena atmosférou, zanechávající po sobě sekundární dopadající záření, ve kterém jsou zastoupeny převážně miony a neutrinny [15].

Po roce 1912, kdy bylo kosmické záření objeveno Victorem Hessem při experimentu s létajícím balónem, se mnoho vědců zaměřilo na jeho výzkum. Na pozemní detekci vysokoenergetického záření pocházejícího z kosmických zdrojů se nyní soustředí hned několik observatoří, mezi které patří například Cherenkov Telescope Array (CTA), Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov (MAGIC) a High Energy Stereoscopic System (HESS). Tyto observatoře využívají techniku pozorování atmosferického Čerenkovova záření k detekci gamma fotonů. Na studium kosmického záření jako celku, tedy nejen gamma záření, jsou zaměřena výzkumná centra Pierre Auger Observatory (PAO) a Telescope Array (TA). Detektory těchto observatoří jsou rozloženy na velkých plochách, což zvyšuje jejich citlivost na vzácné a vysokoenergetické události [15].

Vedle pozemních detektorů kosmického záření existují také kosmické detek-

tory částic, které měří vlastnosti těchto částic mimo vliv Zemské atmosféry.

Pro měření některých charakteristických vlastností těchto částic, jako náboje a hybnosti, bylo třeba umístit magnetický spektrometr do vesmíru. Kosmické záření lze charakterizovat skupinou vlastností jako jsou energie, hybnost, náboj a rigidita. Rigiditou rozumíme schopnost částice odolávat zakřivení její dráhy při průchodu magnetickým polem. Je vyjadřována jako poměr hybnosti částice ku jejímu náboji.

Cílem této bakalářské práce je v teoretické části popsat několik základních druhů kosmických detektorů částic, stejně jako funkci nejznámějších a největších detektorů na velkém hadronovém urychlovači v laboratoři CERN. V praktické části se zaměříme na vykreslení a analýzu dat z kosmického detektoru částic AMS-02.

2 Kosmické detektory částic

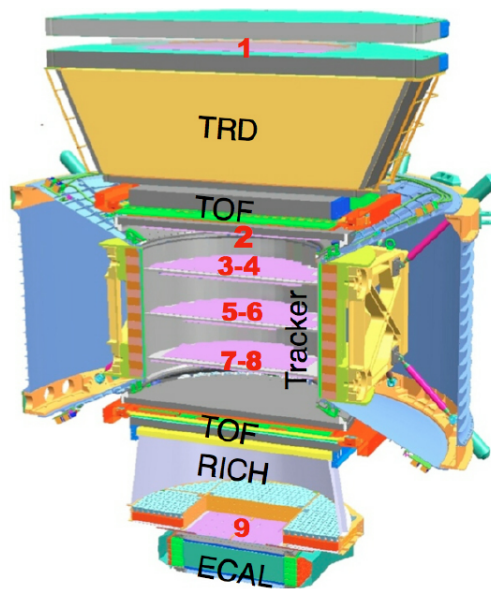
2.1 Detektor AMS-02

V květnu roku 2011 byl na mezinárodní stanici ISS umístěn detektor AMS-02, soustava detektorů částic obklopená permanentním magnetem pro měření hybnosti a náboje procházejících částic a jader z kosmického záření. Stal se tak prvním detektorem přesné částicové fyziky ve vesmíru a bude fungovat po celou dobu existence ISS. Jeho cílem je hledání antihmoty, zkoumání jejího původu, studium kosmického záření, zjištění směru, odkud kosmické záření přichází, hledání chybějící hmoty ve vesmíru, zejména částic chladné temné hmoty, supersymetrických částic a zkoumání nových jevů ve vesmíru. Částice zaznamenané detektorem AMS-02 mají energetické rozpětí mezi 1 GeV až po stovky GeV, což se odvíjí od druhu částice. Nejprímější interpretace těchto dat odkazuje na sekundární produkci částic z jaderných kolizí primárního záření a mezihvězdných objektů, stejně jako na galaktické astrofyzikální zdroje injektující pozitrony do mezihvězdného prostoru [19].

2.1.1 Konstrukce AMS-2

Celé zařízení, jehož schéma je vyobrazeno na obrázku 1, má hmotnost 6700 kilogramů a skládá se z několika subdetektorů. Dvacetivrstvý detektor přechodového záření, neboli Transition Radiation Detector - TRD, rozliší protony spolu s anti-protony od pozitronů a elektronů v rozsahu energií mezi 1,5 a 300 GeV. Pod TRD je umístěna horní část Time of Flight detektoru, ta spolu se svojí druhou částí umístěnou níže v detektoru určuje čas letu s přesností 140 pikosekund a změny energie částic. Současně slouží celému detektoru jako trigger, je tedy bazálním článkem zařízení sloužící k odlišení podstatných událostí od pozadí [19].

Ohyb dráhy magnetických částic je zajištěn permanentním magnetem. K tomuto ohybu dochází v takzvané ohybové rovině, jíž prochází magnetický indukční tok 0,8 tesla na metr čtvereční. Samostatný elektromagnetický kalorimetr umístěný v konečné části detektoru je doplňujícím prvkem měření energie. Tento kalorimetr složený z olověných a plastových vláken odlišuje leptony od hadronů a umožňuje také měření energie částic v rozsahu energií 1,5 GeV až 1 TeV, tedy elektronů, pozitronů a záření gama. Obklopen permanentním magnetem je v samém centru tohoto detektoru umístěn osmi-vrstvý křemíkový detektor drah - Tracker o celkové ploše 6,45 metrů čtverečních. Zaručuje měření polohy dráhy s přesností 10 μm v ohybové rovině a 30 μm mimo ni. Svou velikostí se řadí mezi největší křemíkové detektory na světě. Posledním nezmíněným poddetektorem je čítač Čerenkovova záření RICH - Ring Imaging Cerenkov Counter, měřící rychlost částic nebo jader s relativní přesností 0,1 procenta, stejně jako jejich náboj. Informace poskytnuté tímto subdetektorem spolu s měřením ohybu dráhy poskytují přesnou hodnotu hmotnosti částic a jader. Výpočetní sílu zabezpečuje PowerPC, operačním systémem je Linux [19].



Obrázek 1: Schéma detektoru AMS [2].

Data nasbíraná detektorem jsou přenesena na mezinárodní kosmickou stanici a následně do řídicí místnosti v CERN v Ženevě, zachycené na obrázku 2.

Pro tento účel se využívá systém rádiové komunikace mezi ISS a pozemními stanicemi. Signály s daty jsou vysílány z ISS pomocí vysokorychlostního spojení, které může být buď prostřednictvím geostacionárních satelitů, nebo přes základnové stanice na Zemi, které jsou schopny sledovat pohyb ISS na oběžné dráze. Po přijetí dat na Zemi se signály předávají do řídicí místnosti v CERNu, kde jsou dekodovány a zpracovány.



Obrázek 2: Řídicí místnost detektoru AMS-02 v laboratoři CERN.

Řídící místnost detektoru monitoruje mnoho důležitých aspektů detektoru, jako výkon jednotlivých detekčních prvků, nebo jejich teplotu. Dále je neustále sledován tok dat z detektoru a do řídicí místnosti je přenášén obraz i zvuk z mezinárodní kosmické stanice. Spojení s ní je udržováno nepřetržitě.

2.2 CALET

Detektor CALET, jehož název je složeným tvarem Calorimetric electron telescope, je vesmírný experiment instalovaný rovněž na vesmírné stanici ISS v srpnu roku 2015. Navržen a provozován Japonskem, ve spolupráci s Itálií a USA. Poskytuje nejvyšší energetické měření elektronového spektra kosmického záření v rozsahu 1 GeV až 20 TeV a k jeho možnostem patří například hledání možných blízkých zdrojů vysokoenergetických elektronů, detailů akcelerace a šíření částic kosmickým prostorem a také možných projevů existence temné hmoty [17].

2.2.1 Konstrukce CALET

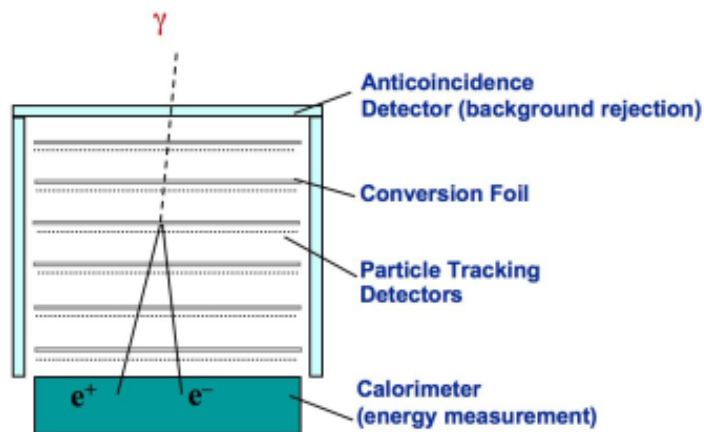
Bazálním článkem CALET je velmi tenký kalorimetr, obsahující Charge detektor (CHD), který identifikuje náboj částic ze zobrazovacího kalorimetru (IMC), jenž rekonstruuje dráhu částice a zaznamenává vývoj prvotní spršky ve vysokém rozlišení. Dalším prvkem je kalorimetr totální absorpce (TASC) jenž absorbuje veškerou energii dopadajících částic a identifikuje druh částice pomocí hodoskopického krystalového pole tvořeného slitinou olova a wolframu [17].

2.3 Fermi-LAT

Teleskop LAT je zkráceně Large Area Telescope, tedy detektor s velkou detekční plochou. Jedná se o detektor vysokoenergetických zdrojů gama záření, pokrývající energie od 20 MeV do více než 300 GeV se zorným polem asi 20 procent oblohy. Je umístěn na palubě observatoře Fermi spolu s monitorem záblesků gama GMB. Vzhledem k tomu, že observatoř Fermi byla navrhnutá a zkonstruována tak, aby detekovala neutrální částice gama, nemá na své palubě magnet, který by jí umožnil rozeznat elektrony od pozitronů. Proto ve snaze ověřit pozorování družice PAMELA bylo využito zemského magnetického pole pro odlišení pozitronů [16].

2.3.1 Konstrukce Fermi-LAT

Na obrázku 2 vidíme, že LAT je sestaven modulárně a to z 4 x 4 identických věží, jež jsou obklopeny antikoincidenčním štítem. Ten využívá segmentované dlaždice scintilátoru k potlačení falešných signálů a redukci pozadí. Tím napomáhá ke správné identifikaci a měření gamma záření. Každá věž o rozměrech 40x40 centimetrů je složena z trackeru, kalorimetru a modulu sběru dat. Tracker složen z 18 silikonových stripových detektorů detekuje částice s účinností vyšší než 99 procent a polohu určuje na méně než 60 mikrometrů [4].



Obrázek 3: Schéma LAT [3].

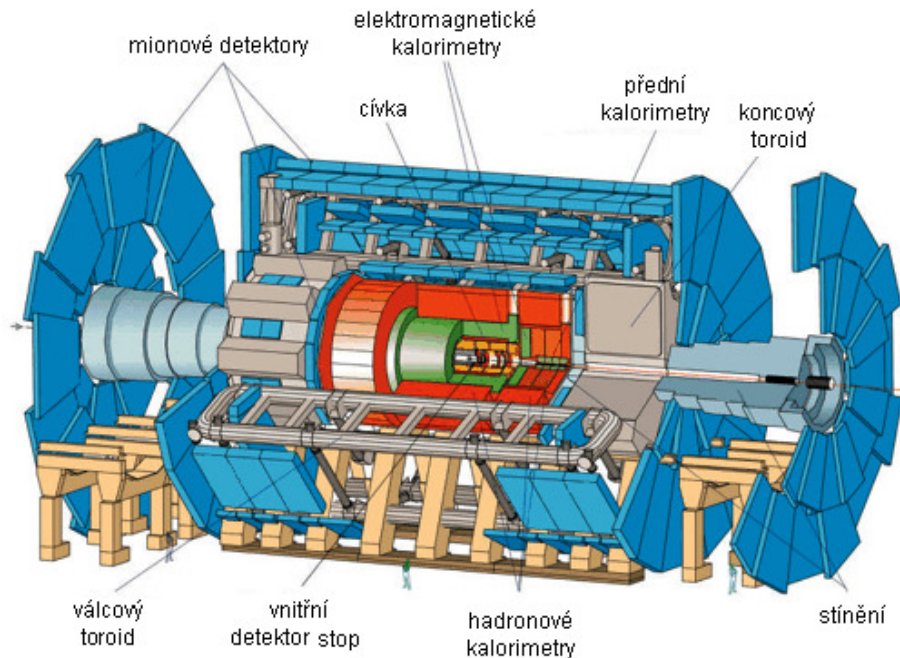
Hodoskopicky uspořádaný kalorimetr se skládá z 8 vrstev o 12 CsI sloupcích. Tato konfigurace zajišťuje měření trojrozměrných profilů elektronových a pozitronových spršek, což zvyšuje schopnost diskriminovat hadrony v kosmickém záření [4].

3 Detektory na urychlovači

Detektory na velkém hadronovém urychlovači (LHC) v laboratoři CERN se dělí na několik druhů. Víceúčelové detektory ATLAS a CMS jsou první kategorií, která je primárně určena k analýze množství částic, které vznikají při srážkách v urychlovači. Jsou to dva velké detektory, které jsou navrženy tak, aby byly schopné zachycovat velkou škálu částic a nezávisle na sobě potvrzovat své objevy. Do další kategorie, tedy kategorie středních detektorů, spadají ALICE a LHCb, jež jsou specializované na analýzu specifických srážek (například těžké ionty). Do poslední kategorie detektorů spadají nejmenší detektory - TOTEM a LHCf, ty jsou zaměřeny na takzvanou dopřednou fyziku.

3.1 Experiment ATLAS

ATLAS, známý také jako A toroidal LHC Apparatus, je výzkumným projektem prováděným na velkém hadronovém urychlovači (LHC) - největším urychlovači částic. S hmotností 7000 tun, délkou 46 metrů, a výškou a šířkou 25 metrů je momentálně největším částicovým detektorem na světě. Tento detektor je umístěn do podzemní kaverny, která se nachází v hloubce 100 metrů. Samotná kaverna je dlouhá 53 metrů, vysoká 35 metrů a široká 30 metrů. Po dokončení výkopu kaverny v roce 2003 byla zahájena instalace detektoru ATLAS. Pro jeho správnou funkci je zapotřebí 3000 kilometrů elektrických kabelů a více než 100 milionů elektronických kanálů. ATLAS sbírá data ze srážek protonů při nejvyšší dosažitelné energii 13,6 TeV v těžišťovém systému [18]. Detektor má složitou skořepinovou strukturu a skládá se ze subdetektorů, jejichž činnost bude popsána níže.



Obrázek 4: Schéma experimentu ATLAS [14].

Na obrázku číslo 3 vidíme, že nejbližší zóně, kde dochází ke srážkám protonů, se nachází Inner Tracker, neboli vnitřní dráhový detektor. Funkcí tohoto detektoru je velmi precizní určování dráhy jednotlivých nabitých částic. Magnetické pole, v němž je Inner tracker umístěn, je vyvoláno supravodivou cívkou o indukci 2T, chlazení této cívky je zajišťováno kryogenní tekutinou - tekutým heliem pod teplotu 4.5 Kelvinů. Částice produkované ve srážkách jsou tímto polem vychýleny ze směru pohybu primárních protonů tak, aby prošly detektory a mohly být zaznamenány jejich vlastnosti jako je třeba hybnost procházejících částic. Tento subdetektor je tvořen čtyřmi vrstvami. Vnitřní vrstva je pixelový křemíkový detektor o celkem 46080 pixelech, obsahuje přes 80 milionů kanálů. Je tvořen plochou 1,7 metrů čtverečních. Díky tomu je schopen určit polohu měřených částic s přesností 14 x 115 mikrometrů čtverečních [14,18].

Silicon Tracker (SCT) představuje další vrstvu detektoru, a jedná se o mikropásový křemíkový detektor, který sestává z 4088 dvoustranných modulů a

celkem 6 milionů kanálů. Tyto křemíkové detektory jsou schopny s přesností 17 mikrometrů na jednu vrstvu určit polohu částic. Tato vysoká přesnost umožňuje rozlišit i rozpadové produkty částic s velmi krátkým životem [18].

Posledním prvkem je vnější vrstva označená jako Transition Radiation Tracker (TRT). Jeho účelem je určovat a měřit polohu a hybnost částic s delší dobou života a identifikovat elektrony. Tento tracker je sestaven z dvanácti metrů krychlových modulů a zhruba půl milionu trubiček naplněných plynem, konkrétně xenonem, tetrafluormethanem a oxidem uhličitým. Dráty uvnitř těchto trubiček jsou udržovány pod napětím 1,78 kV [18].

Xenon obsažený v detekčních trubicích plní dvojí funkci. Zaprvé, pomáhá identifikovat částice, které procházejí touto látkou, a zadruhé, umožňuje detekci fotonů s rentgenovou vlnovou délkou. Tím, že se využije fotonová kaskáda, lze dosáhnout rozlišení mezi různými druhy částic, jako jsou například elektrony a piony. To je způsobeno tím, že elektrony emitují přechodové záření při nižších energiích než piony, a tato rozdílná energetická úroveň může být rozpoznána až ve více rádech. Poslední vrstva IBL (Insertable B-layer) byla dodána do detektoru v roce 2014 a slouží k zlepšení přesnosti a rozlišovacích schopností detekce nabitých částic [14].

Dalším subsystémem detektoru ATLAS je elektromagnetický kalorimetr, který slouží k detekci a měření energie a prostorové polohy určitých elementárních částic s charakterem interakce elektromagnetického pole. Tento kalorimetr je zejména zaměřen na detekci a měření fotonů a elektronů. Jeho struktura zahrnuje olověný materiál, který vytváří kaskádu elektronů a fotonů z těchto částic. Pro zajištění přesného prostorového pokrytí a měření se využívá tekutého argonu udržovaného při teplotě -183 stupňů Celsia. Tento argonový materiál disponuje harmonickou prostorovou strukturou, což přispívá k efektivní detekci a měření [14,18].

Dle posledních informací kalorimetr obsahuje zhruba 216 000 kanálů, tato informace se však může díky postupným úpravám detektoru měnit. Jednotlivé vrstvy kalorimetru mají různý počet radiačních délek pro elektrony.

V těchto vrstvách pak dochází k absorpci fotonů a zastavení elektronů. První vrstva slouží pro odlišení fotonů a neutrálních pionů. Druhá vrstva s tloušťkou 14 až 16 radiálních délek absorbuje většinu energie z elektron-fotonové složky. V poslední vrstvě se pak absorbují elektrony, kterým se podařilo proniknout druhou vrstvou. Dále k hadronovému kalorimetru prochází pouze hadrony. Kromě toho jsou na obou koncích kalorimetru umístěny oblasti zvané END-CAPS, které rozšiřují pokrytí kalorimetru a jsou schopny detekovat částice, které po srážce odchýlí od osy svazku protonů pod malým úhlem. Další význačnou vlastností tohoto kalorimetru je jeho vysoké časové rozlišení. Z každého kanálu kalorimetru je možné rozlišit události v čase kratším než 200 pikosekund [14,18].

Hadrony, či rychlé protony, které v elektromagnetickém kalorimetru ztratily pouze zlomek své energie a tudíž se jim podařilo opustit vnitřní detektor drah a elektromagnetický kalorimetr, jsou detekovány pomocí hadronového kalorimetru, tvořeného 64 moduly o zhruba 10 tisících kanálech. Hadronový kalorimetr slouží k měření energie. Kolizní zóna je obklopena hlavní oblastí kalorimetru válcovitého tvaru, kde je využito několika vrstev železa proložených scintilačními detektory. Průlet těžce nabitě částice vyvolá vznik sekundárních částic, které při průletu scintilačním detektorem vyvolají krátký záblesk, jenž je způsoben inoizací scintilačního detektoru sekundárními částicemi. Tento krátký záblesk je odváděn světlovodným vláknem a následně snímán fotonásobičem, jež jej převede na elektrický signál. Ten je pak dále zpracován [14,18].

Miony, které jen velmi málo interagují s okolní hmotou a nejsou tedy detekovány v kalorimetrech jako pozitrony a hadrony, jsou zachycovány v zařízeních nazývaných mionové komory. Na detektoru ATLAS jich nalezneme zhruba 4000. Mionové komory jsou umístěny co nejdále od oblasti srážek z důvodu velmi slabé interakce mionů s hmotou. V těchto komorách probíhá měření hybnosti a polarizace náboje mionů, což vyžaduje vytvoření velmi silného magnetického pole. K dosažení ohybu trajektorie mionů slouží cívky, kterými protéká proud o velikosti 20 000 A. Magnetická indukce dosahuje hodnoty 4 Tm a energie toroidního

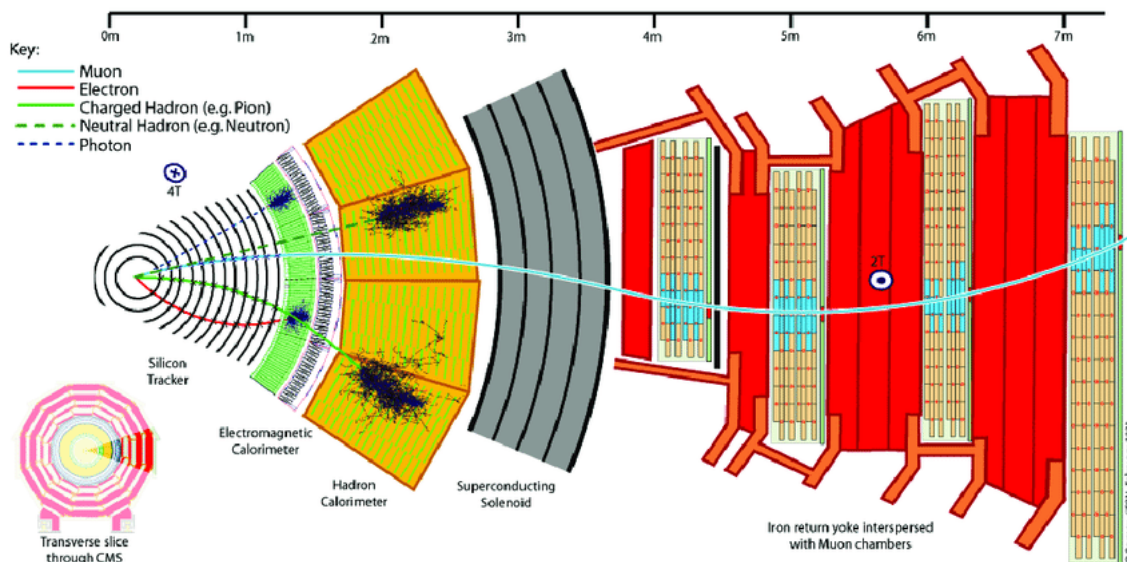
magnetického pole přesahuje 1,2 GJ [14,18].

V mionových komorách se nacházejí trubičky o průměru 3 cm, naplněné argonem a oxidem uhličitým, a uprostřed trubičky je tenký drát udržovaný na vysokém napětí. Při průchodu mionu trubičkou dochází k ionizaci plynu, a vysoké napětí zrychlí volné elektrony a ionty. Tím získáme elektrický impuls, který je dále zpracováván a analyzován. Tato technika umožňuje přesné měření trajektorie a hybnosti mionů a má významný vliv na studium jejich chování a vlastností v detektoru. Využití mionových komor a jejich detekčního mechanismu je klíčové pro experimentální fyziku a pro lepší porozumění subatomárním částicím a jejich interakcím [14,18].

3.2 Experiment CMS

CMS, neboli Compact Muon Solenoid je detektor umístěný na jednom ze čtyř kolizních bodů, jeho grafické znázornění je vyobrazeno na obrázku 4 níže. Je univerzálním detektorem určeným k pozorování nových fyzikálních jevů, které bychom pomocí velkého hadronového urychlovače mohli odhalit.

Detektor se chová jako velká, vysokorychlostní kamera zachycující 3D obrazy srážek částic ze všech směrů až 40 milionkrát za sekundu. Ačkoliv je většina částic vznikajících při srážkách nestabilních, mění se rychle na stabilní částice, které CMS, stejně jako jiné detektory, detekuje. Identifikací částic, měřením jejich hybnosti, energie a skládáním informací o všech těchto částicích dokáže detektor vytvořit obraz o srážce pro pozdější analýzu. CMS je navrhnut tak, aby detekoval částice a má nejsilnější solenoidní magnet, který byl kdy vyroben. Je válcovitého tvaru cibulovité struktury s několika soustřednými vrstvami komponent, které částice ohýbají, trasují, měří jejich energii a detekují například miony [13].



Obrázek 5: Radiální výseč detektoru CMS [13].

Silný magnet ohýbá částice při jejich výletu z kolizního bodu. Ohyb trajektorie částic slouží k identifikaci náboje dané částice, kdy se pozitivně a negativně nabitě částice ohýbají v opačných směrech podle magnetického pole. Zároveň ohyb trajektorie umožňuje měřit hybnost částic, kdy částice s vysokou hybností méně podléhají ohybu, než částice s hybností nižší. Solenoidní magnet je tvořen válcovou cívkou supravodivých vláken. Když díky supravodivosti nečelí procházejících 18 a půl tisíce ampérů odporu, generují magnetické pole okolo 4 tesla. Většinu hmotnosti detektoru tvoří ocelová kotva a to 12500 tun. Detektor CMS byl zkonstruován na povrchu, rozdělen na 15 dílů a spuštěn do kaverny, kde byl znovu sestaven [13].

3.3 Porovnání obou detektorů

Ačkoliv byly oba detektory navrženy k potvrzování některých svých objevů, nejsou totožné. K hlavním rozdílů patří například odlišný magnetický systém, určený k ohýbání trajektorií částic. Zatímco ATLAS využívá k ohybu solenoidální a toroidální magnety, umístěné kolem systému kalorimetrů, CMS využívá magnet solenoidní, vytvářející silné magnetické pole okolo osy svazku částic. Co se týče velikosti a hmotnosti obou detektorů, je detektor ATLAS větší, než CMS, ale lehčí a to zhruba o 5500 tun. Oba detektory mají odlišný systém kalorimetrů a to jak technologicky, tak v samotném návrhu. Elektromagnetický kalorimetr experimentu ATLAS je tvořen olovem a kapalným argonem, kde je olovo využito jako absorpční materiál a tekutý argon jako aktivní médium. Elektromagnetický kalorimetr CMS je tvořen krystalickým materiálem wolframem olovnatým. Dalším zmíněným rozdílem z mnoha je odlišnost hadronového kalorimetru. Hadronové kalorimetry v detektorech ATLAS a CMS se liší v použitých materiálech a technologiích, přičemž ATLAS využívá ocelový/scintilační systém a CMS používá vzorkovací kalorimetr s mosazí a plastovými scintilátory.

4 Průchod částic látkou

Pro správné pochopení funkce detektorů je důležité alespoň základní porozumění průchodu částice látkou a její interakce s okolím. Proto si tyto základní poznatky shrneme. "Při kolizi rychlých nabitých částic o rychlosti $v = \beta c$ dochází k energetickým ztrátám W , což vede k ionizaci, atomové, nebo kolektivní excitaci. U většiny kolizí, tedy až 90 procent, jsou energetické ztráty malé, nižší než 100 eV. Pro takzvané těžké částice s nábojem ze je rozptyl volných elektronů adekvátně popsán diferenciálním účinným průřezem Rutherfordova rozptylu [20].

$$\frac{d\sigma_R(W; \beta)}{dW} = \frac{2\pi r_e^2 m_e c^2 z^2 (1 - \beta^2 W/W_{max})}{\beta^2 W^2}, \quad (1)$$

kde W_{max} je maximální možný přenos energie při jediné kolizi. Ve hmotě však elektrony nejsou volné. W tak musí být konečné a je závislé na atomové a objemové struktuře. Pro elektrony vázané v atomech bylo Bethem využito Bornovy teorie pro získání diferenciálního průřezu" [20].

$$\frac{d\sigma_B(W; \beta)}{dW} = \frac{d\sigma_R(W, \beta)}{dW} B(W), \quad (2)$$

kde $B(W)$ je korekční faktor.

Betheovu teorii lze aplikovat pouze na energii, nad kterou již zanedbáváme atomové efekty.

Průměrný počet kolizí se ztrátou energie mezi W a $W+dW$ ve vzdálenosti d je $N_e dx (d\sigma/dW) dW$, kde $(W; \beta)/dW$ zahrnuje všechny příspěvky. Jako například ionizační energie, či elektronické vázání.

Počet kolizí je Poissonovsky distribuován se střední hodnotou M_0 . N_e je měřeno v elektronech na gram ($N_e = N_A Z/A$) nebo v elektronech na centimetr krychlový. ($N_e = N_A \sigma Z/A$).

Maximální přenos energie při jediné kolizi pro částici s hmotností M je

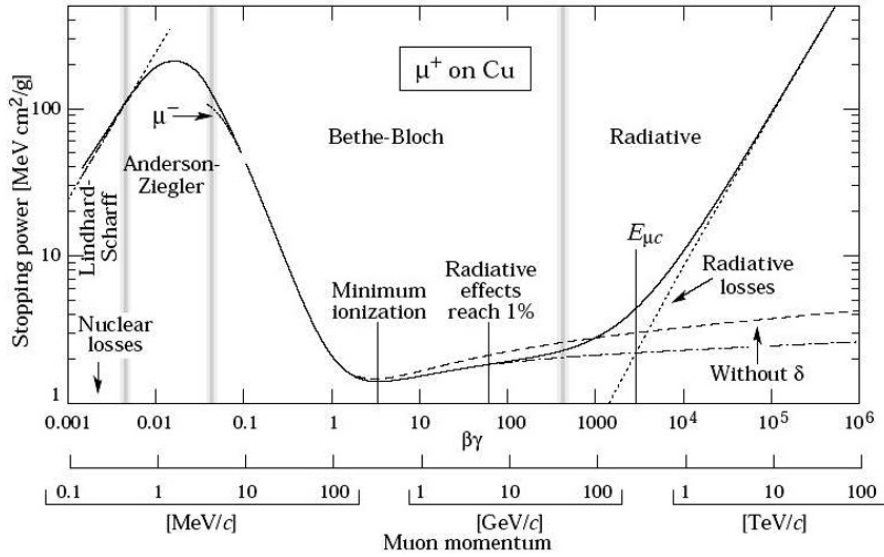
$$W_{(max)} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma m_e/M + (m_e/M)^2} \quad (3)$$

Lze použít aproximaci $W_{(max)} = 2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2$ pro $2\gamma m_e$.

Průměrná míra energetických ztrát v rozsahu $0.1 < \beta\gamma < 1000$ u přechodových Z-materiálů s přesností několika jednotek procent pro relativisticky nabitě těžké částice je dobře popsána takzvanou Betheho rovnicí [20].

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\sigma(\beta\gamma)}{2} \right] \quad (4)$$

V této rovnici je K konstantou s hodnotou zhruba $0,307 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$ a m_e je hmota elektronu. Částice, jež látkou prochází, je popsána svým nábojem z , rychlostí β a relativistickým faktorem γ . Střední hmotnostní číslo A , střední nábojové číslo Z a takzvaný střední ionizační potenciál I jsou veličinami popisující prostředí, jímž částice prochází. V této rovnici $\sigma(\beta\gamma)$ značí korekci efektu hustoty [20].



Obrázek 6: Ionizační ztráty kladně nabitého mionu v mědi [1].

Energetické ztráty kladně nabitého mionu procházející mědí jsou uvedeny na obrázku (6). Bethe-Blochova rovnice popisuje úsek (na obrázku v levé části), kde dochází k nejvyšší ionizaci pomalé částice, tedy dochází k nejvyšším ionizačním ztrátám, ty klesají až do bodu, jež je nazýván minimem ionizace. Fermiho plato, které následuje, je pomalým logaritmickým růstem, poté celkové energetické ztráty začnou rychle narůstat [1].

Elektrony a pozitrony, na rozdíl od těžkých nabitých částic, mohou předat veškerou svoji energii během jedné kolize. V tomto případě je pak maximální přenos energie roven energii celkové. Jedná-li se o elektrony, je nutno uvést v potaz interakci identických částic a to elektronů primárních a z atomů vyskytujících se v prostředí. Některé detektory, ku příkladu scintilační, využívají závislosti ionizačních ztrát na rychlosti a hmotnosti částice k její identifikaci [1].

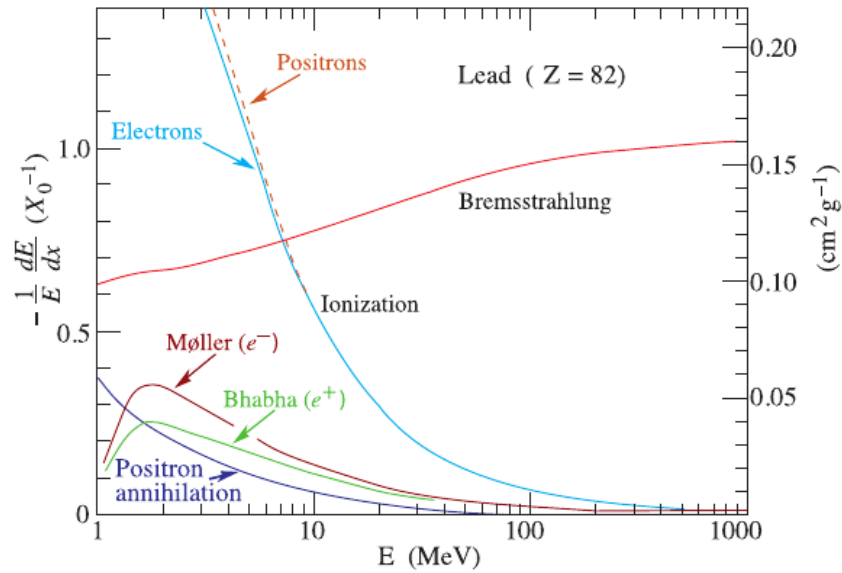
4.1 Brzdné záření

Fenomén nazývaný brzdné záření se projevuje převážně u elektronů, pozitronů a ve vyšších energiích také u mionů. Je způsoben vyzařováním brzdných fotonů nebo vytvářením elektron-pozitronových párů, když se hmotná nabitá částice, především jádra, pohybuje v elektromagnetickém poli. Tento proces vede ke ztrátě energie původní částice prostřednictvím emise záření.

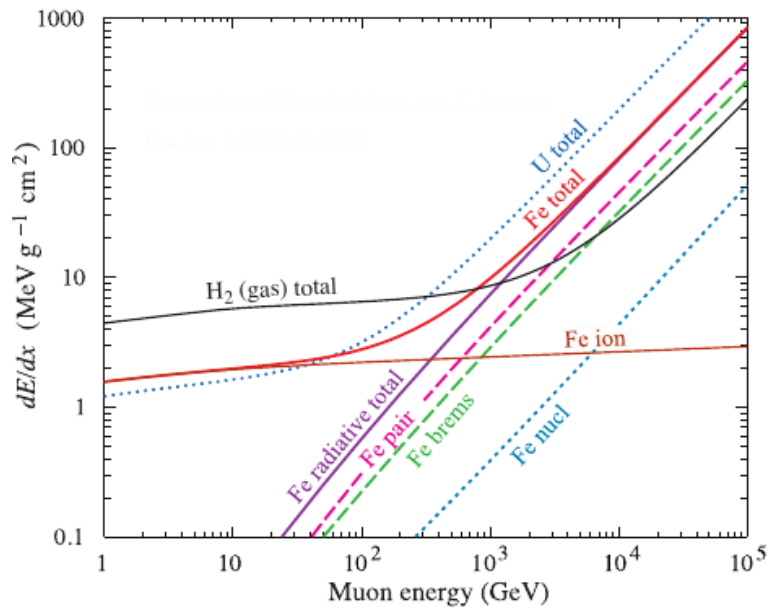
Střední vzdálenost, během které dojde k poklesu energie elektronu na $1/e$ původní hodnoty nazýváme radiační délku X_0 . Pokles energie je důsledkem brzdného záření. Je přímá úměra mezi počáteční energií a energetickými ztrátami v důsledku brzdného záření. Aproximací lze získat vztah

$$E(x) = E(0)e^{-\frac{x}{X_0}}. \quad (5)$$

Radiační délka je charakteristickou vlastností daného prostředí.



Obrázek 7: Energetické ztráty elektronů [1].



Obrázek 8: Energetické ztráty mionů [1].

Na obrázcích (7) a (8) pozorujeme různé typy energetických ztrát a to jak pro elektrony, tak miony v závislosti na druhu materiálu. Brzdné záření je značné především při vyšších energiích a to pro oba druhy částic. Kritická energie, při

které začíná toto záření převládat se pro obě částice liší z důvodu jejich rozdílných hmot.

4.2 Scintilace

Scintilace je proces, při němž po průchodu nabitě částice hmotným prostředím přejdou okolní molekuly do excitovaného stavu a při jejich přeměně zpět, do stavu základního, tyto molekuly uvolní část své energie.

Ionizující záření je tak za pomoci scintilátoru převedeno na viditelné záření a následně fotonásobičem registrováno a převedeno na elektronický signál. Toto detekční zařízení se nazývá scintilačním detektorem a je hojně využíváno například k měření rychlosti částic metodou doby letu [1].

4.3 Čerenkovovo záření

Prochází-li prostředím nabitá částice o rychlosti vyšší, než je v daném prostředí rychlost světla, jsou pod úhlem θ_c ke směru letu částice vyzařovány takzvané Čerenkovské fotony. Pro tento úhel platí vztah

$$\cos \theta_c = \frac{1}{\beta n}, \quad (6)$$

kde n je indexem lomu světla v tomto materiálu. Z této rovnice pak plyne existenční podmínka Čerenkovova záření, jež zní $\beta > \frac{1}{n}$.

Čerenkovovo záření je v detektorech nabitých částic hojně využíváno. Jsou neodmyslitelnou součástí detektorů částic, a využívány i při měření mimo naši atmosféru. U pozemních detektorů se jako médium využívá zpravidla voda, plyn, či krystaly, v detektorech kosmických pak gel, či aerogel. Ze směru vytvořeného kužele lze odvodit směr prolétající částice a jeho vrcholového úhlu lze dopočítat i její rychlost a energii. Jednou ze zajímavých vlastností tohoto druhu detektorů je jejich užití k zaznamenávání neutrin, která při kontaktu s vodou emitují rychlý

elektron, či mion produkující při průchodu médiem charakteristický kužel tohoto záření [1].

5 Úvod do antihmoty

Ke každé známé fundamentální částici existuje její ekvivalent s opačným nábojem, ale jinak souhlasnými vlastnostmi (v případě leptonů a kvarků i opačným leptonovým a baryonovým číslem a barvou). Antičástice, jak říkáme například antiprotonům, pozitronům, či antineutronům odpovídají protonům, elektronům a neutronům. Běžná hmota s antihmotou nemohou koexistovat v těsné blízkosti, neboť tato blízkost vede k jejich vzájemné anihilaci, při níž je uvolňována energie v podobě gamma záření, či elementárních částic. Antičástice však mohou vznikat současně s částicemi, například foton se může stát elektronem a pozitronem, nebo gluon kvarkem a antikvarkem [8,12].

5.1 Asymetrie hmoty a antihmoty ve vesmíru

Asymetrie mezi hmotou a antihmotou je záhadným fenoménem v současném poznání fyziky částic a kosmologie. Hlavním rysem asymetrie hmoty a antihmoty je skutečnost, že se ve vesmíru vyskytuje velké množství hmoty, zatímco antihmoty je jen velmi málo.

Hmota a antihmota jsou dvě základní formy hmoty v našem vesmíru. Hmota je složena z atomů, které obsahují protony (pozitivně nabitá částice), neutrony (neutrální částice) a elektrony (negativně nabitá částice). Antihmota je tvořena antiprotony (negativně nabitá antičástice protonů), antineutrony (antičástice neutronu) a pozitrony (pozitivně nabitá antičástice elektronu).

Při srážkách částic při velmi vysokých energiích, jako jsou ty, které se vyskytují v urychlovačích částic, nebo při raných stádiích vesmíru, mohou vznikat částice a antičástice. V těchto srážkách bychom očekávali, že se vytvoří stejné množství hmoty a antihmoty. Avšak na základě pozorování ve vesmíru víme, že hmoty je mnohem více než antihmoty.

Asymetrie hmoty a antihmoty je spojena s pojmem "baryonová asymetrie".

V současné době není zcela jasné, co způsobuje tuto asymetrii. Existuje několik hypotéz a teorií, které se snaží vysvětlit tuto nerovnováhu, ale žádná z nich zatím nebyla potvrzena experimentálně.

Jedním z klíčových otázek moderní fyziky je vysvětlit původ baryonové asymetrie a proč vesmír obsahuje více hmoty než antihmoty. Tato záhada zůstává jedním z nejdůležitějších a nejzajímavějších problémů, které jsou stále zkoumány v současné fyzice.

6 Vykreslení publikovaných dat z AMS-02

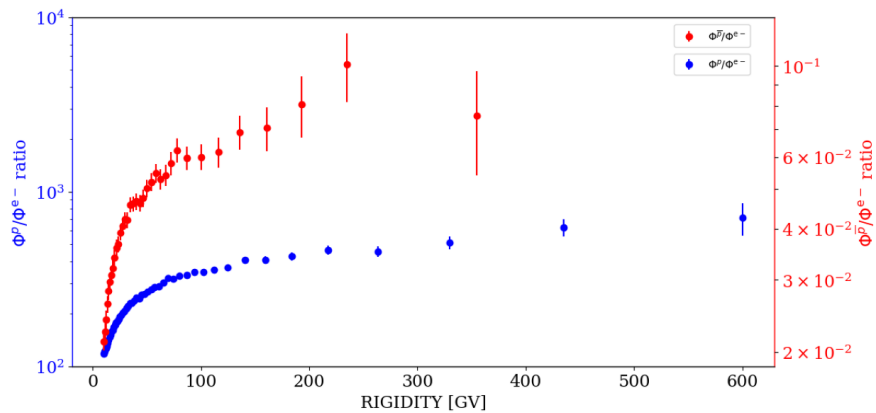
Od počátku svého působení do listopadu roku 2017 nasbíral experiment AMS-02 1.9 milionů pozitronů. Jediným současným primárním zdrojem antihmoty je kosmické záření, jež můžeme tímto detektorem pozorovat a měřit ve formě pozitronů a antiprotonů.

Zajímavým zjištěním z poslední publikace dat AMS-02 je například, že antiprotony a pozitrony mají takřka totožnou závislost na rigiditě, a protože pulsary nemohou produkovat pozitrony, což je způsobeno jejich velkým magnetickým polem, je velmi pravděpodobné, že ani tyto antiprotony z pulsarů nepocházejí.

V této práci se zaměřuji na data pozitronů, elektronů, protonů a antiprotonů nasbíraných detektorem, speciálně pak chování některých antičástic, jež vede na nové teorie a jevy. Praktickou část této práce tvoří vykreslení dat publikovaných AMS-02 [11], pomocí programovacího jazyku Python. K vykreslení těchto dat jsem použila knihovnu pandas, pro práci s daty a jejich analýzu, konkrétně k načtení dat z csv souborů a manipulaci s nimi pomocí DataFrame. Dále pak knihovnu numpy, která se užívá pro numerické výpočty v Pythonu. Mnou byla využita k vytvoření x-ových hodnot na osách a ke kombinaci hodnot z různých datových sad. K vykreslení grafů jsem použila knihovnu matplotlib.pyplot a ke konfiguraci vizuální stránky jsem použila třídu v knihovně matplotlib, konkrétně matplotlib.rcParams, s jejíž pomocí jsem upravila velikost, barvu a font písma pro lepší přehlednost.

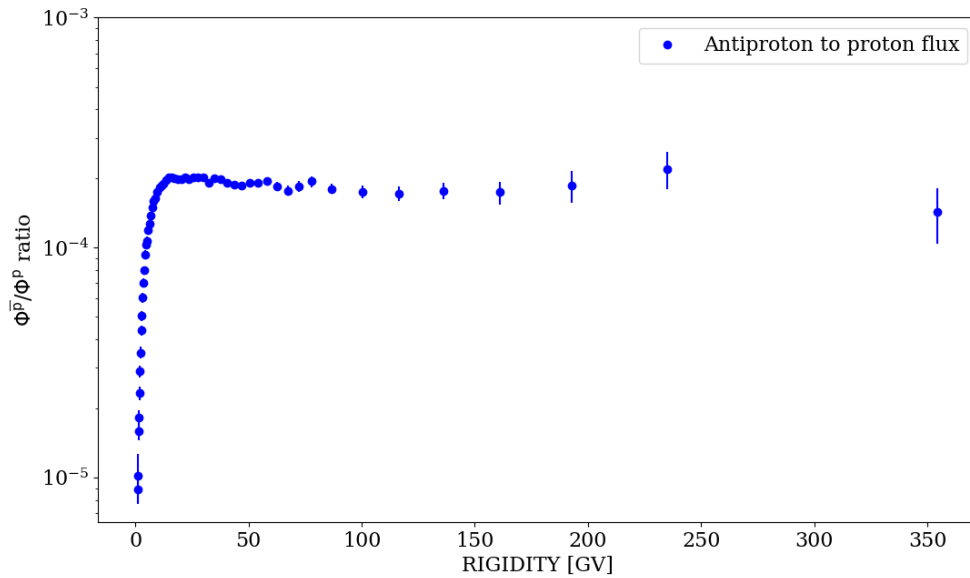
6.1 Antiprotony

Na obrázku č. 9, jenž jsem vykreslila pomocí programovacího jazyku Python a dat, poskytnutých kolaborací AMS-02 v tabulce 2 a 3 článku [11], na kterých je ukázán poměr toků antiprotonů a protonů vůči elektronům. Je z něj zřejmé, že protony, znázorněny modrou barvou, dosahují znatelně vyšších energií. Zatímco energie doposud nasbíraných dat antiprotonů nepřesáhne 400 GV, protony jsou měřeny až s energiemi okolo 600 GV. Zároveň pozorujeme, že odchylka antiprotonů je několika násobně vyšší. Ta je na vykresleném grafu vyjádřena jako kvadratická suma statistické a systematické chyby.



Obrázek 9: Poměr toků antiprotonů a protonů vůči elektronům dle dat z experimentu AMS-02 z roku 2016 [11].

Další zajímavou vlastností kosmických antiprotonů je chování toku poměru mezi antiprotony a protony, kdy nad 60 GV se tento flux stává nezávislým na energii, jak je vykresleno na obrázku 10.

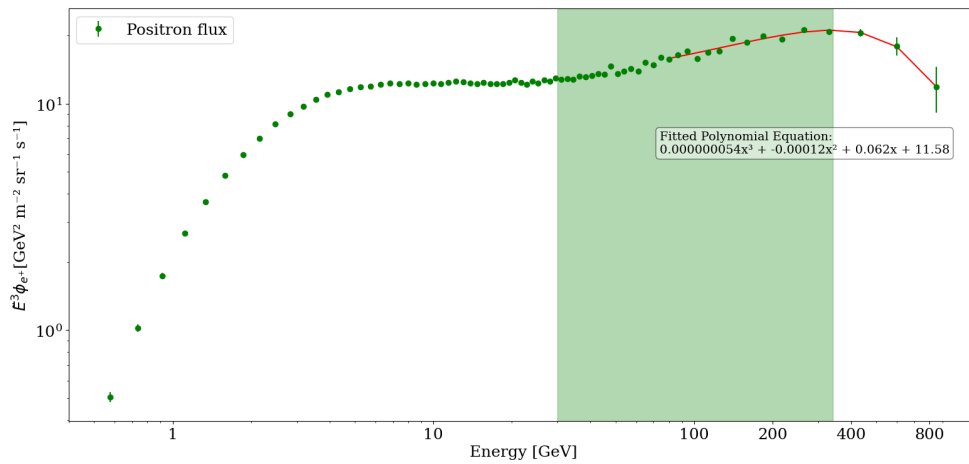


Obrázek 10: Poměr antiprotonů a protonů.

Tato konstantní závislost neodpovídá produkci antiprotonů při srážkách kosmického záření s mezihvězdnou látkou. Pokud by tyto antiprotony z daných srážek pocházely, musel by tento flux nad hranicí 60 GV pokračovat klesajícím trendem. Vykreslená data tomuto neodpovídají a tyto antiprotony tak musí pocházet z jiných, dosud neupřesněných zdrojů. Tímto zdrojem může být například anihilace temné hmoty.

6.2 Pozitrony

Pokud se zaměříme na chování pozitronů, pozorujeme trend vykazující opětovný vzrůst pozitronového fluxu mezi 30 a 341 GV. Získání horní hranice této energetické oblasti si ukážeme níže. Na obrázku (11) je tato energetická oblast vyznačena zelenou barvou.



Obrázek 11: Flux pozitronů.

Předpis definované křivky $f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$, kde $a = 0.000000054$, $b = -0.00012$, $c = 0.062$, $d = 11.58$.

První derivace této křivky je:

$$\frac{df}{dx} = 3ax^2 + 2bx + c.$$

Druhá derivace je:

$$\frac{d^2f}{dx^2} = 6ax + 2b.$$

Pro nalezení kritických bodů nastavím první derivaci rovnu nule a řeším rovnici pro x :

$$3ax^2 + 2bx + c = 0.$$

Vyřešením tohoto kvadratického výrazu získám hodnoty x pro kritické body a dále určím hodnotu x pro maximum křivky. Takto získaná hodnota $x = 341.23$ reprezentuje bod opětovného klesání. Tuto hodnotu jsem využila pro stanovení hranice zeleně vyznačené oblasti.

Podle reference [9] byl tento zlom detektorem AMS-02 naměřen s energií 284_{-64}^{+91} . Tato mnou vypočtená hodnota tedy spadá do rozmezí chyby měření detektoru.

Pakliže by tyto pozitrony pocházely výhradně z kolizních srážek kosmických paprsků, pozorovali bychom klesající trend pozitronového fluxu již od zhruba 7GV. Nadbytek pozitronů při vyšších energiích je produkován buďto anihilací temné hmoty, či novým, doposud neupřesněným astrofyzikálním zdrojem.

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo popsání kosmických detektorů částic, dvou hlavních detektorů umístěných na velkém hadronovém urychlovači, a vykreslení některých zajímavých dat z detektoru AMS-02. Bakalářská práce je rozdělena do šesti kapitol a dalších podkapitol. První kapitolou je úvod do kosmického záření a jeho základní popis. Druhá kapitola se věnuje podrobnému popisu kosmických detektorů částic, konkrétně AMS-02, Calet a Fermi-LAT, a jejich konstrukci. V následující kapitole jsou pak podrobně popsány dva hlavní detektory na velkém hadronovém urychlovači, ATLAS a CMS, a je provedeno jejich srovnání. V kapitole čtvrté jsem popsala chování částic procházejících látkou, které má čtenáři poskytnout lepší porozumění v oblasti měření částic a jejich vlastností, jenž se v detektorech odehrává.

Vzhledem k charakteristice vykreslených dat se kapitola pátá věnuje úvodu do antihmoty pro lepší pochopení kapitoly šesté. Tou je praktická část bakalářské práce, v níž vykresluji data publikovaná kolaborací detektoru AMS-02. V první podkapitole této závěrečné části jsem vykreslila a popsala chování antiprotonů a to jak závislost toku antiprotonů a protonů vůči elektronům, tak poměr antiprotonů vůči protonům.

V prvním případě jsme si ukázali, že protony dosahují vůči antiprotonům značně vyšších energií a jejich statistická neurčitost je několikanásobně menší. V druhém případě pak konstantní závislost poměru antiprotonů a protonů, která ukazuje na nové, doposud neupřesněné astrofyzikální zdroje antiprotonů. V druhé podkapitole praktické části bakalářské práce jsem se zaměřila na chování pozitronů. Vykreslený tok pozitronů na obrázku 11 ukázal jejich nadbytek při energiích nad 30GV, pomocí programu Python a výpočtů jsem zjistila, že růst dosahuje hodnot až 341,23 GeV. Mnou vypočtená hodnota zlomu spadá do asymetrické chyby naměřené hodnoty detektorem AMS-02, jenž je 284_{-64}^{+91} . Tento nadbytek poukazuje na možnou produkci pozitronů anihilací temné hmoty, či původ z jiných

astrofyzikálních zdrojů.

Do budoucna je plánovaná nová generace detektoru AMS-100, která má zvýšit citlivost měření antičástic a tím přispět k výzkumu asymetrie mezi hmotou a anti-hmotou ve vesmíru. Zároveň by tato nová generace měla zvýšit dosah měřených energií částic včetně protonů, jader a gamma záření až do energií řádově v desítkách TeV a PeV.

Reference

- [1] P. A. Zyla et al. (Particle Data Group), *The Review of Particle Physics*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020) Dostupné z: doi: 10.1093/ptep/ptaa104
- [2] F. Spada (2014). AMS-02 on the International Space Station. EPJ Web of Conferences. Dostupné z: doi: 10.1051/epjconf/20147000026.
- [3] The Fermi LAT instrument. Dostupné z: <https://www-glast.stanford.edu/instrument.html> [online 8.10.2022]
- [4] NASA *Fermi: Gamma-Ray Space Telescope*. Dostupné z: <https://fermi.gsfc.nasa.gov> [online 15.5.2023]
- [5] M. Havranek *ATLAS experiment - výzva pro nové technologie*. (2006). Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/bulletin/2006-25-atl.php> [online 8.1.2023]
- [6] I. Úlehla, M. Suk, Z. Trnka *Atomy, jádra, částice: celostátní vysokoškolská učebnice pro stud. matematicko-fyzikálních a přírodověd. fakult.*, (1990) ISBN 80-200-0135-2.
- [7] W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments. A How-to Approach*, (1994) ISBN 0387572805.
- [8] S. Sutton *Antimatter. Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/antimatter> [online 11.12.2022] Dostupné z: doi: 10.1088/1367-2630/14/9/095012
- [9] M. Aguilar *Towards Understanding the Origin of Cosmic-Ray Positrons*, (2019) Dostupné z: doi: 10.1103/PhysRevLett.122.041102
- [10] L. Canneti *Matter and Antimatter in the Universe*, (2012) Dostupné z: doi: 10.1088/1367-2630/14/9/095012,

- [11] AMS Collaboration *Antiproton flux, antiproton-to-proton flux ratio, and properties of elementary particle fluxes in primary cosmic rays measured with the Alpha Magnetic Spectrometer on the international space station*, (2016) Dostupné z: doi: 10.1103/PhysRevLett.117.091103
- [12] L. S. Kisslinger *Astrophysics And The Evolution of The Universe*, (2014) ISBN 981452090X.
- [13] G. L. Bayatian *CMS Physics Technical Design Report: Addendum on High Density QCD with Heavy Ions*, (2007) Dostupné z: doi: 10.1088/0954-3899/34/11/008
- [14] J. Reichl, M. Všetická *ATLAS*. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/882-atlas> [online 6.3.2023]
- [15] F. E. Close, M. Marten, C. Sutton a F. E. Close *The Particle Odyssey - A Journey to the Heart of Matter* (2002) ISBN 0198504861.
- [16] Y. Asaoka *Energy calibration of CALET onboard the International Space Station* (2017) Dostupné z: doi: 10.1016/j.astropartphys.2017.03.002
- [17] O. Adriani, Y. Akaike *Extended Measurement of the Cosmic-Ray Electron and Positron Spectrum from 11 GeV to 4.8 TeV with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station* (2018) Dostupné z: doi: 10.1103/physrevlett.120.261102
- [18] The ATLAS coloboration *The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider* (2008) Dostupné z: doi: 10.1088/1748-0221/3/08/S08003
- [19] J. Casaus *The AMS RICH detector* (2002) Dostupné z: doi: 10.1142/9789812819093-0151
- [20] R. L. Workman et al. (Particle Data Group) *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2022, 083C01 (2022) Dostupné z: doi: 10.1093/ptep/ptac097