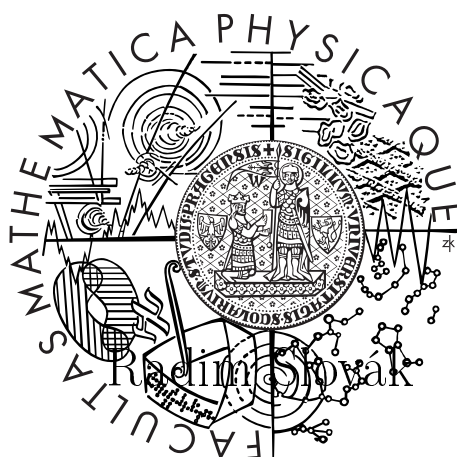


Univerzita Karlova v Praze  
Matematicko-fyzikální fakulta

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



### Zkoumání mionů z kosmického záření v kalorimetru Tilecal

Ústav částicové a jaderné fyziky

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Tomáš Davídek, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2011

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu RNDr. Tomáši Davidkovi, Ph.D. za vedení bakalářské práce a za jeho připomínky a rady.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

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 v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne

Podpis autora

Název práce: Zkoumání mionů z kosmického záření v kalorimetru Tilecal

Autor: Radim Slovák

Katedra: Ústav částicové a jaderné fyziky

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Tomáš Davídek, Ph.D., Ústav částicové a jaderné fyziky

Abstrakt: Cílem práce bylo seznámit se s detektorem ATLAS, potažmo s jeho hadronovým kalorimetrem Tile Calorimeterem, dále seznámit se se zpracováním dat pomocí programu ROOT. Před spuštěním detektoru je třeba ho testovat a monitorovat například pomocí mionů z kosmického záření. V práci jsme analyzovali experimentální data z jednoho modulu Tile Calorimeteru. Zjistili jsme úroveň šumu v každé cela, pak jsem oddělili signál od šumu a našli cely, kterými miony proletěly.

Klíčová slova: ATLAS, Tile Calorimeter, poměr signálu k šumu, ROOT

Title: Study of cosmic muons in Tile calorimeter

Author: Radim Slovák

Department: Institute of particle and nuclear physics

Supervisor: RNDr. Tomáš Davídek, Ph.D., Institute of particle and nuclear physics

Abstract: Main goal of this thesis is to learn about detector ATLAS, mainly about his hadron calorimeter Tile Calorimeter. Next step is get knowledge about processing data with program ROOT. It is necessary to test and monitor detector for example by muons from cosmic rays before his initiation. We analysed real experimental data from single module of Tile Calorimeter here. We found out signal-to-noise ratio. Then we separated out signal and noise and we found cells which muons flew through.

Keywords: ATLAS, Tile Calorimeter, signal-to-noise ratio, ROOT

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>2</b>
<b>1 Laboratoř CERN</b>	<b>3</b>
1.1 Large Hadron Collider . . . . .	3
1.2 Detektor ATLAS . . . . .	4
1.2.1 Vnitřní detektor . . . . .	4
1.2.2 Kalorimetry . . . . .	6
1.2.3 Mionový spektrometr . . . . .	8
1.2.4 Trigger . . . . .	9
<b>2 Analýza dat</b>	<b>10</b>
2.1 Popis experimentu . . . . .	10
2.2 Program . . . . .	14
<b>Závěr</b>	<b>17</b>
<b>Seznam použité literatury</b>	<b>18</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>19</b>
<b>Seznam použitých zkratk</b>	<b>20</b>

# Úvod

V mnoha komplexních detekčních systémech ve fyzice vysokých energií jsou jako jedny z nejdůležitějších detektorů použity kalorimetry. Jejich úkolem je měřit energii částic. Takový kalorimetr je umístěn i v experimentu ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) na urychlovači LHC (Large Hadron Collider) v laboratoři CERN (the European Organization for Nuclear Research). Je označen názvem Tile Calorimeter podle tvaru částí, ze kterých je složen. Skládá se z vrstvy absorbátoru - železa a aktivního materiálu - scintilačních desek.

Samotný detektor je nutné před spuštěním testovat a monitorovat. K tomuto účelu se používají hlavně svazkové testy a také miony z kosmického záření vzniklé převážně z reakcí protonů s kyslíkem nebo dusíkem a z následných rozpadů nabitých pionů. Testování a sběr dat probíhal na jednom modulu TileCalorimetru umístěném na zemském povrchu, které jsme pak analyzovali. Naším úkolem je zjistit úroveň šumu z každé cely kalorimetru. Naměřená hodnota souvisí s danou pravděpodobností, se kterou ji chceme získat. Po oddělení šumu od signálu vyhodnotíme cely, jenž jsou zasaženy miony. Tyto cely musí sousedit, abychom mohli prohlásit, že kalorimetrem skutečně proletěl mion.

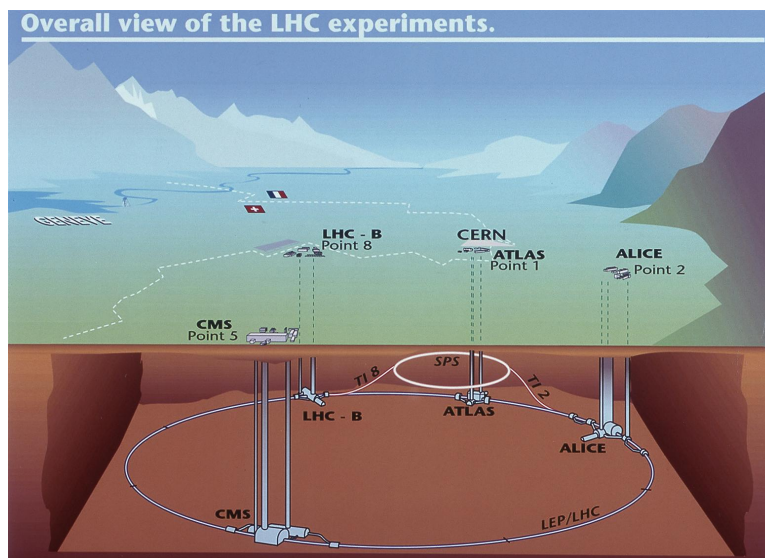
Celá práce je rozdělena do dvou kapitol. V první kapitole popisujeme urychlovač LHC a detektor ATLAS. Jsou zde uvedeny jejich části a základní principy, na kterých fungují. Druhá kapitola obsahuje seznámení se samotným algoritmem, tj. popsání experimentu a analýza naměřených dat. V příloze je uveden samotný zdrojový kód použitý pro analýzu dat.

# 1. Laboratoř CERN

Laboratoř CERN, která byla založena v roce 1954 na severozápadě od Ženevy na francouzsko-švýcarském pomezí, je největším výzkumným centrem fyziky elementárních částic na světě. Sdružuje přes 20 členských států, pracuje zde přes 9 500 vědců z 500 univerzit z celého světa. V roce 1993 se do projektu zapojila i Česká republika.

## 1.1 Large Hadron Collider

Large Hadron Collider, který je součástí CERNu, je zatím největším urychlovačem částic na světě. Byl umístěn do tunelu, kde se do roku 2000 nacházel velký urychlovač elektronů a pozitronů (LEP - Large Elektron-Positron Collider). Délka tunelu dosahuje 27 km a je vyhlouben v rozmezí 50-150 m pod zemí. LHC je supravodivý urychlovač srážející protony s celkovou energií 10 TeV. V zařízení dochází každých 25 ns k 25 inelastickým srážkám [1] při luminositě svazku  $10^{34} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  (luminosita je fyzikální veličina, která udává počet částic proletí za jednotku času jednotkovou plochou v místě srážky) a účinném průřezu inelastických proton-protonových srážek 70 mb. Akcelerace nabitých částic k velkým energiím je velmi technicky náročná a vyžaduje systém předurychlovačů a například nemalé množství supravodivých magnetů, chlazených tekutým héliem na teplotu 1,9 K, při nichž je možno dosáhnout velikosti magnetického pole 8,4 T.



Obrázek 1.1: Urychlovač LHC a jeho experimenty [2]

Pro experiment LHC je připraveno několik detektorů. Jedná se o soustavy detektorů a dalších přístrojů. Největší jsou experimenty ATLAS a CMS.

ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) a CMS (The Compact Mion Solenoid) zkoumají větší oblast fyziky, zejména proton-protonovou interakci, v jejím rámci pak nalezení Higgsova bosonu a částic, které tvoří temnou hmotu. Rozdíl mezi

těmito dvěma detektory, ač zkoumají fyzikálně přibližný problém, je v tom, že mají jiné technické řešení.

ALICE (A Large Ion Collider Experiment) zkoumá srážky iontů olova, dále kvark-gluonovou plasmu, která s velkou pravděpodobností existovala v době Velkého třesku.

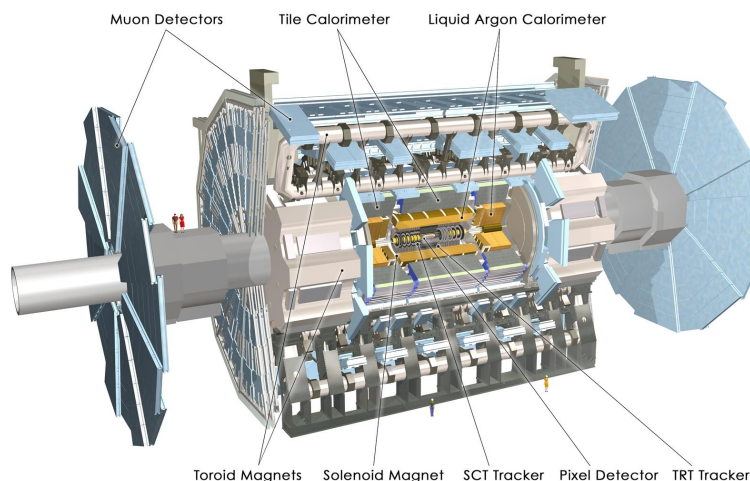
LHCb (Large Hadron Collider beauty) se zaměřuje na porušení CP symetrie v interakci kvarku  $b$ . Prozkoumává rozdíly mezi hmotou a antihmotou. Také by měl odpovědět na otázku, proč se vesmír zdá být složen jen z hmoty a ne z antihmoty.

TOTEM (TOTal Elastic and diffractive cross section Measurement) bude mít za úkol měřit hybnost částic a monitorovat luminositu LHC.

LHCf (Large Hadron Collider forward) použije protony nebo těžké ionty vytvořené LHC jako zdroj pro simulaci kosmického záření v laboratorních podmínkách.

## 1.2 Detektor ATLAS

Samotný detektor, viz obrázek 1.2, jenž má tvar válce o hmotnosti bezmála 7 000 tun, je dlouhý 44 m a vysoký 22 m. ATLAS je sestaven z různých typů detektorů. Od středu směrem k povrchu jsou postupně umístěny ve tvaru válce tyto vrstvy: vnitřní detektor, pak následuje elektromagnetický kalorimetr, hadronový kalorimetr a posledním je mionový spektrometr. V každé z těchto vrstev různé částice interagují jinak, podle toho můžeme například poznat, jaké vznikly při srážce částice.

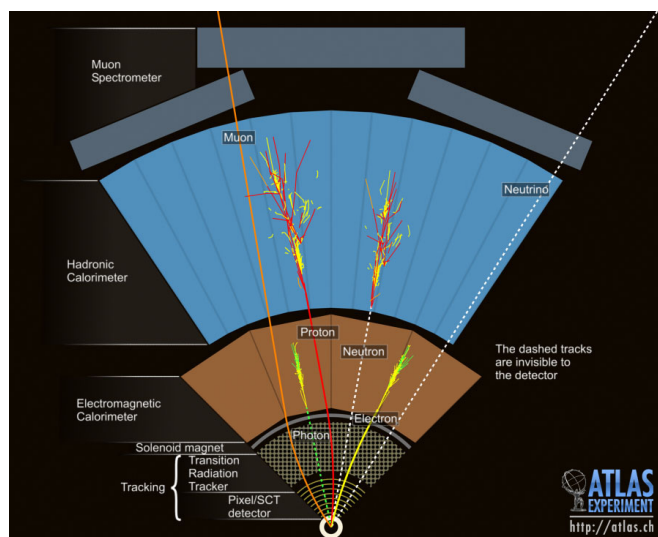


Obrázek 1.2: Detektor ATLAS [3]

### 1.2.1 Vnitřní detektor

Vnitřní detektor je schopen detekovat pouze nabitě částice, proto jsou pro něj fotony neviditelné. Naopak elektrony a pozitrony zanechají ve vnitřním detek-





Obrázek 1.3: Průchod částice ATLASem

toru stopu. Neutrina mají velmi malý účinný průřez a interagují pouze slabou interakcí, a tudíž nemohou být detektory na ATLASu zachycena.

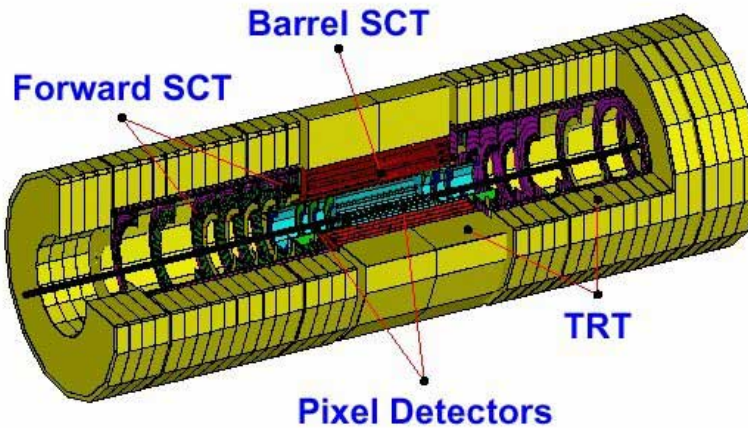
Pseudorapidity  $\eta$  je fyzikální veličina definovaná vztahem

$$\eta = -\ln\left(\tan\frac{\theta}{2}\right) \quad (1.1)$$

kde  $\theta$  je úhel od osy svazku a popisuje kinematicky částici vylétávající z místa interakce

Vnitřní detektor (Inner Detector) je umístěn nejbliž k trubici se svazkem, protože zde vzniká velký počet částic. Úkolem tohoto zařízení bude zaznamenat souřadnice a dráhy nabitých částic pod pseudorapiditou  $|\eta| < 2,5$  [4]. Vyplňuje válcovou dutinu o poloměru 115 cm a délce 690 cm. Celý systém bude chlazen na teplotu  $-7^\circ\text{C}$ . Nad dutinou se nachází solenoid s homogenním polem o velikosti 2 T.

Vnitřní detektor, viz obrázek 1.4, se dále skládá ze tří částí, a to postupně z křemíkových pixelových detektorů (Pixel Detector), křemíkových stripových detektorů (SCT - Semiconductor Tracker) a z detektorů přechodového záření (TRT - Transition Radiation Tracker). Uspořádání jednotlivých částí je přibližně stejné i pro ostatní části ATLASu. Každá jednotlivá část se skládá z několika sousedních válců, tzv. barrelů, uzavřených na koncích disky (forward nebo end-cap). Pixelové detektory jsou tvořeny z malých obdélníků, jejichž rozměry jsou v řádu mikrometrů. Tyto obdélníky určují prostorové rozlišení, jelikož částice, která projde pixelovým detektorem, v něm vytvoří elektrický signál a podle toho jsme schopni určit, kudy částice letěla. Stripové detektory jsou tvořeny z proužků (tzv. stripů) dlouhé přibližně deset centimetrů. Detektory přechodového záření jsou tvořeny stovkami tisíc plynem naplněných tenkých brček. Průchodem částic se vytváří přechodové záření vznikající průletem nabitě částice prostředím s periodickými změnami indexu lomu. Když částice prochází trubičkou, plyn se uvnitř ionizuje a vytváří elektrické pulsy na elektrodách. Z rekonstrukce doby vytvoření pulsu pak můžeme velmi přesně určit polohu částice.



Obrázek 1.4: Vnitřní detektor [4]

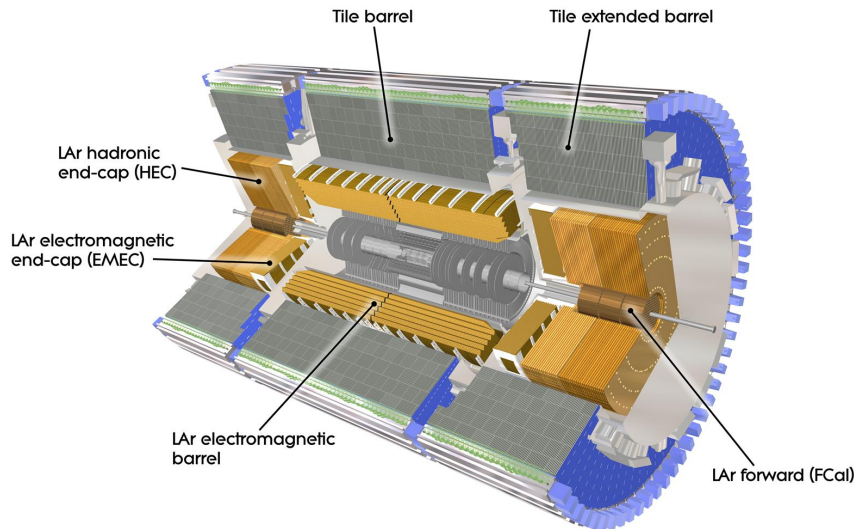
### 1.2.2 Kalorimetry

Kalorimetry jsou detektory, které mohou měřit energii prolétávajících nabitých nebo neutrálních částic. Jejich rozlišení se se zvětšující energií částic zlepšuje, takže jsou velmi vhodné pro měření vysokoenergetických částic. Jedná se o tzv. vzorkovací kalorimetry (sampling calorimeter). Kalorimetr je složen ze dvou střídajících se částí. První částí je absorbátor, kde vzniká sprška tvořená z méně energetických částic (protonů, elektronů a fotonů) a druhou částí je aktivní materiál, pomocí kterého se dál měří příslušná energie částic.

V ATLASu se nachází několik kalorimetrů. Dělíme je do dvou skupin, a to sice na elektromagnetické kalorimetry, jenž jsou blíže středu detektoru a hadronové kalorimetry, viz obrázek 1.5.

V elektromagnetickém kalorimetru se pohltí fotony a elektrony. Absorbátorem je zde olovo a aktivním materiálem je tekutý argon (LAr), který je také použit v některých částech hadronového kalorimetru. Tyto dvě vrstvy se v detektoru střídají, přičemž tekutý argon je rozdělen napůl čtecími elektrodami. Částice, procházející tímto prostředím, tvoří v tekutém argonu ionty. Ty pak dají vzniknout elektrickým signálům na elektrodách. Je složen ze tří částí [6], a to ze dvou koncových, které jsou stejně veliké a zaznamenávají částice pod pseudorapiditou  $1,4 < |\eta| < 3,2$ , a z prostřední části zaznamenávající částice pod pseudorapiditou  $|\eta| < 1,46$ . Všechny jsou umístěny v kryostatech. V koncových částech je použit za absorbátor měď. Signál je sbírán pomocí elektrod a navíc je zde použit centrální předzesilovač poskytující výhodný poměr signálu a šumu.

Hadronový kalorimetr (tzv. Tile Calorimeter, z angl. tile = dlaždice) bude hlavně identifikovat jety a rekonstruovat jejich energii. Absorbátorem je zde železo a jako aktivní materiál jsou použity plastické scintilační destičky. Je rozdělen na tři válcové části podobně jak ostatní detektory, tedy na hlavní část dlouhou 5,8 m, která pokryje oblast s pseudorapiditou  $|\eta| < 1,0$ , a dvě koncové části dlouhé každá 2,6 m pokrývající oblast s pseudorapiditou  $0,8 < |\eta| < 1,7$ . Vnitřní

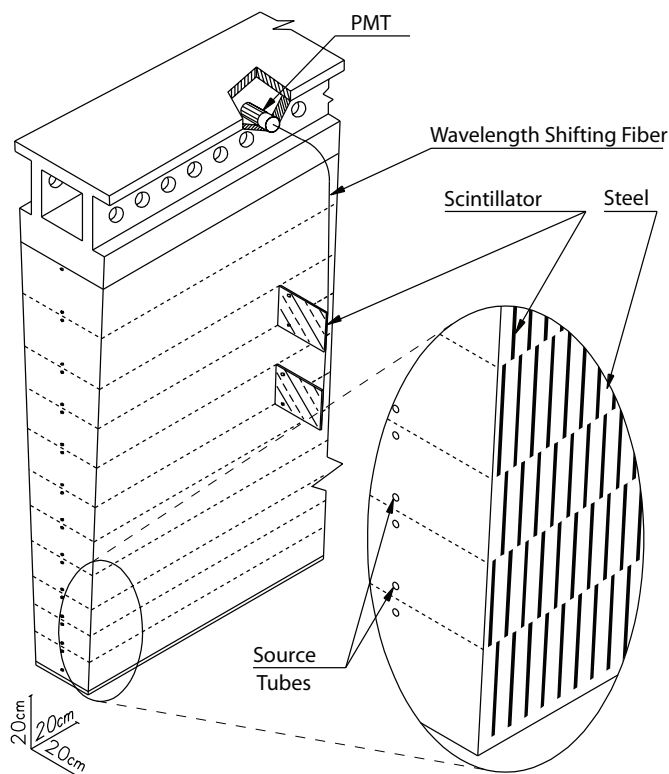


Obrázek 1.5: Uspořádání kalorimetrů v ALTASu [5]

poloměr všech tří částí je 2,28 m a vnější poloměr je 4,25 m. Mezi hlavním a oběma koncovými válci je malá mezera kvůli kabeláži ze spodních detektorů. Každá část kalorimetru se skládá z 64 modulů složených do válce.

Charakteristikou Tile Calorimeteru je rozložení scintilačních desek. Ty jsou umístěny kolmo na směr letu částic a střídají se s absorbátory. Rozměr scintilačních desek se pohybuje od 200 do 400 mm na délku a od 100 do 200 mm na výšku, viz obrázek 1.6. Všechny jsou 3 mm široké a celkem je jich v Tile Calorimeteru použito přes 460 000. Objemový poměr absorbátoru a aktivního materiálu je 4,67 : 1.

Když ionizující částice projde scintilátorem, 3% její energie se vyzáří ve formě světla, jehož vlnová délka odpovídá modré barvě. WLS (wavelength shifting) fibers posbírají toto světlo z každé strany scintilátoru vedoucí ke dvěma samostatným fotonásobičům, jenž jsou umístěny na vnějším konci kalorimetru. V těchto vláknech se modré světlo pohltí a převyzáří se v zelené oblasti světla. K posunutí vlnové délky dochází absorpcí a následnou emisí světla ve vybraném barvivo, které je přidáno do vláken. Materiál, z něhož jsou vyrobena vlákna, by měl mít co největší index lomu, aby vlákno zachytilo co nejvíce světla. Ve fotonásobičích je pak světelný signál, jehož doba náběhu je přibližně 5,5 ns s šířkou 17 ns, převeden na elektrický signál. Ten se pak dále elektronicky zpracovává. Fotonásobiče jsou spolu se směšovači světla, děliči vysokého napětí a s 3-in-1 card skládány do tzv. PMT (PhotoMultiplier) bloků, které jsou instalovány uvnitř šuplíku (drawer). Z tohoto bloku získáme tvarovaný elektrický signál digitalizován každých 25 ns 10-ti bitovým ADC převodníkem. Nasbíraná data jsou dočasně uložena v krátkodobé paměti (pipeline memory), dokud trigger 1. úrovně (LVL1, viz dál) nevydá signál. Digitalizovaná data jsou transformována přes optické vlákno a nahrána.



Obrázek 1.6: Rozložení scintilační desky v Tile Calorimeteru [6]

### 1.2.3 Mionový spektrometr

Miony jsou nabitě částice, zanechají tedy stopu ve vnitřním detektoru a jsou schopny projít oběma kalorimetry. Jelikož jsou přibližně 200-krát těžší než elektrony, nerozptylují se na atomových jádrech materiálu, kterým procházejí, a nevytváří tak velké spršky v elektromagnetickém kalorimetru.

Mionový spektrometr měří primárně hybnost mionů. Sekundárně slouží k určení znaménka náboje a také k měření drah, které jsou zakřiveny systémem velkých supravodivých toroidů se vzduchovým jádrem (air-core). Jelikož mion dokáže projít oběma kalorimetry, je spektrometr umístěn nejdál od trubice se svazkem.

Jsou zde umístěny MDT komory [7] (Monitored Drift Tubes). Samotné komory se skládají z vícenásobných vrstev trubic. Základním prvkem jsou hliníkové trubice naplněny plynem. Středem každé z nich prochází vysokonapěťový drát. Když mion proletí skrz trubici, způsobuje ionizaci a ionty driftují směrem k drátu a zde vytvoří elektrický puls. Pokud budeme měřit časové okamžiky pulsů, budeme schopni určit polohu mionu. Naměřené hodnoty polohy mionu jsou přesnější než 0,1 mm.

V end-capu jsou nainstalovány velmi přesné mnohohrátové proporcionální komory se segmentovanými proužky katody (CSC - Cathode Strip Chambers), protože pro malé úhly výletu částic se díky radiačnímu pozadí nedají použít MDT komory. Jemnost určení segmentace katody na proužky a určení těžiště indukovaného náboje na jednotlivých proužcích dává přesnost měření příčné souřadnice.

## 1.2.4 Trigger

Triggerovací zařízení slouží k filtrování velkého množství dat tak, abychom zaznamenali jenom pro nás důležité události, které jsou velmi řídké. Filtrování se využívá i u ATLASu, jelikož není reálné zaznamenávat všechny informace pocházející ze srážek částic.

Trigger na ATLASu je třístupňový, kde každá část vybírá jen události, které prošly předcházejícím stupněm.

Trigger první úrovně (LVL1) vybírá události podle jednoduchých kritérií, např. přítomnost mionu s vysokou příčnou hybností, přítomnost jetu, chybějící příčnou energií atd., a propouští je s frekvencí 75-100 kHz (průměrně každých 10 ms). Rozhodování se děje pomocí jednoúčelových procesorů. K tomu má k dispozici zhruba 2  $\mu$ s. Během rozhodování LVL1 jsou data ze všech částí detektoru držena v krátkodobé paměti (pipeline), . Informace z LVL1 systému je použita k rozpoznání oblasti detektoru, která obsahuje zajímavé vlastnosti jako např. velké elektromagnetické shluky (elektrony a fotony), jety a miony.

Nachází se zde méně přesné, ale zato rychlé detektory, jenž nám dávají informace o dráze mionů. Za prvé se jedná o tzv. komory s odporovými deskami (RPC - Resistive Plate Chambers) umístěny ve válcové části a za druhé o tzv. komory s úzkou šterbinou (TGC - Thin Gap Chambers), které se nacházejí v předních oblastech.

RCP je plynový detektor naplněný směsí argonu a butanu. Je tvořen rovnoběžnými bakelitovými deskami připojenými ke zdroji vysokého napětí. Tyto desky jsou pokryty vrstvou grafitu, kde je přilepen izolační film a jsou na něm umístěny snímací proužkové elektrody, na nichž vzniká signál se zpětnou vazbou. Dvě vrstvy na sebe kolmých proužků nám poskytnou dvoudimenzionální informaci o průletu částice s přesností měření řádově několika nanosekund.

Podobně TGC [8] vytvářejí pole mezi tenkými (50 mm) dráty a dvěma grafitovými katodami na obou stranách od anodových drátů. Šířka celé mezery mezi katodami je 3,2 mm. Pro výstup jsou pod rovinami grafitových katod vloženy vyčítací elektrody v podobě proužků nebo terčků.

Trigger druhé úrovně (LVL2) tedy musí zpracovat mnohem méně informací a snižuje frekvenci toku dat až na 1 kHz. Trigger třetí úrovně (LVL3), nazývaný též "Event Filter", má dost času na detailnější kritéria a zapisuje data na záznamové zařízení rychlostí až 100 MB/s.

## 2. Analýza dat

### 2.1 Popis experimentu

Naším cílem bylo zjistit, zda modulem kalorimetru proletěly miony z kosmického záření, které se dají například využít k monitorování a testování detektorů. Bude me chtít zkonstruovat tzv. šumový histogram z každé cely, abychom zjistili úroveň šumu v jednotlivé cele. Dalším úkolem je oddělit signál od šumu, protože na základě znalosti šumu pak můžeme zjistit, zda mion celu zasáhl nebo ne, resp. určíme, ve kterých celách je signál od mionu. Abychom mohli prohlásit, že kalorimetrem proletěl mion, musí zasažené cely sousedit. Pokud mion kalorimetrem proletěl, vytvoříme histogram součtu energie ze všech cel, kterými mion proletěl. Z jeho výsledku pak budeme schopni rychle zkontrolovat, zda mion kalorimetrem opravdu proletěl či nikoliv. Nakonec zjistíme účinnost detekce kosmických mionů.

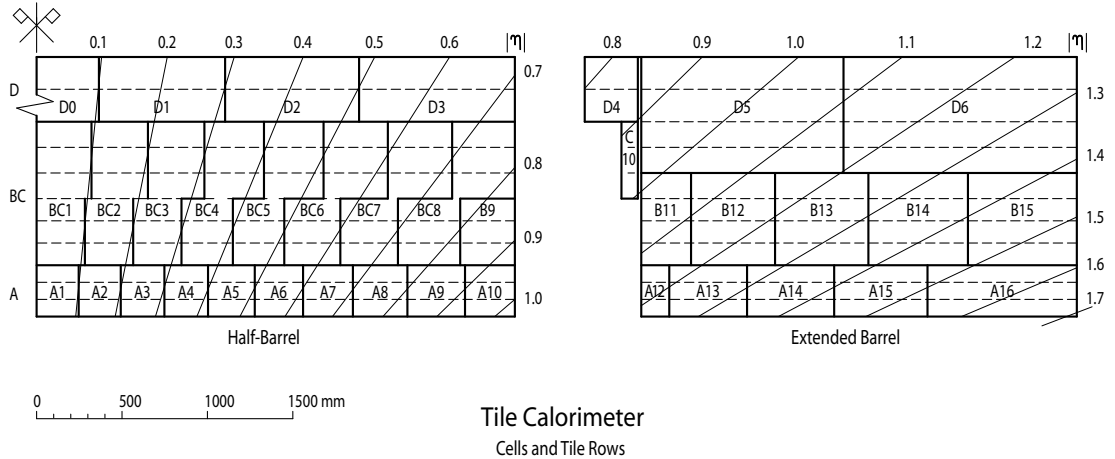
Poskytnutá experimentální data naměřená na jednom modulu z hadronového kalorimetru Tile Calorimeteru jsme dále zpracovávali. Experiment byl proveden v následujícím uspořádání. Jeden modul (tzv. barrel) z kalorimetru byl umístěný na povrchu Země. Cely D jsou umístěny nejbližší k povrchu a cely A míří směrem do nebe. Triggerování je zde odlišné a velmi zjednodušené než u samotného ATLASu. Nad celami A přesně ve středu se nachází první část triggerovacího zařízení. Jedná se o 2 scintilační detektory umístěny nad sebou, jejichž délka je 40 cm. Kdyby byl zde použit jenom jeden detektor, dostali bychom velkou úroveň šumu. Ale tím, že jsou zapojené v koincidenci, jsme schopni část šumu odfiltrovat. Druhá část se nachází pod celami D, kde jsou umístěny taktéž 2 detektory, avšak jsou umístěny vedle sebe. Jeden se nachází v levé polovině a druhý v pravé. Oba mají délku 1,5 m. Takže abychom mohli zaznamenat, že mion proletěl kalorimetrem, musí proletět částí triggeru nahore a pak i částí triggeru dole. Kdyby proletěl jen jednou částí, nic bychom nezaznamenali. To je také důvod, proč by v krajních celách neměl být detekován průlet mionu. V případě mionové spršky by jeden nebo více mionů proletěl jak horní, tak dolní částí triggeru a navíc by jiné miony proletěly krajními celami.

Necháme probíhat experiment, během něhož by kosmické miony měly proletět naším modulem. Procesem popsáním v předešlém odstavci dostaneme soubory dat s naměřenými údaji. Soubor označený jako *Data1.root* můžeme považovat za strom, který má dvě větve, a to větev *CollectionTree* a větev *h1000*. Tyto větve se dále dělí na další podčásti, ve kterých jsou mimo jiné zapsány hodnoty z fotonásobičů z každé cely. Tyto údaje jsou uloženy ve větvi *h1000/EfitA48* pro levou polovinu modulu kalorimetru a ve větvi *h1000/EfitC48* pro pravou polovinu. Dále se ve větvi *CollectionTree/TileMuId\_NMuons* nachází údaje o počtu mionů v daném eventu.

Hlavní program byl napsán pro program ROOT [9], což je moderně objektově-orientovaný mocný nástroj na analýzu dat. Je důsledně založen na programovacím jazyku C++. Verze programu, se kterou jsme pracovali byla 5.18/00b. Ke zpětné analýze bylo napsáno makro *Bakalarka.c*.

Nejprve budeme chtít naplnit histogramy údaji z fotonásobičů z každé cely zvlášť. Víme, že každá cela má své dva vlastní fotonásobiče [5]. Cely ležící v levé

části modulu hodnoty z fotonásobičů získávají z *Data.root/h1000/EfitA48* zatímco pro celý ležící v pravé části modulu z *Data.root/h1000/EfitC48*. Všimněme si, že celá D0 má fotonásobiče označené čísly 1 a 1. Data z celý D0 jsou uložena ve fotonásobičích označených 0 z *EfitA48* a 0 z *EfitC48*. Díky tomuto faktu musíme čísla všech fotonásobičů z ostatních cel snížit o jedničku. Histogramy mají rozsah od  $-200$  do  $1400$  a jsou vyplněny 200 biny na ose x. Očekáváme, že šum z celý vytvoří okolo nuly gaussovské rozložení a napravo pak bude samotný signál, který bude zasahovat do šumu, a proto jej pak budeme chtít od šumu oddělit. Tedy hodnota parametru  $\mu$  v Gaussově funkci bude rovna nule, viz dále. Přejdeme k naplnění samotných histogramů daty z fotonásobičů. To provedeme tak, že se omezíme jen na jeden mion v eventu a vybereme jen tzv. projektivní miony, což jsou miony, které vletí do modulu téměř pod kolmým úhlem. Vytvořili jsme šumové histogramy a uložíme je do souboru *histogramy.root*. Data jsou zkalibrována na elektromagnetické škále, tedy energie z jednotlivých kanálů jsou již v MeV. Kalibrace na elektromagnetickou škálu se provádí tak, že necháme kalorimetrem projít například elektron o energii  $E = 1$  GeV a budeme chtít celý zkalibrovat takovým způsobem, aby celkový součet ze všech cel byl roven původní energii elektronu  $E$ .



Obrázek 2.1: Pravá část modulu Tile Calorimeteru [6]

Šum z histogramů budeme chtít nafitovat Gaussovou funkcí v rozsahu od  $-200$  do  $200$ . ROOT používá Gaussovou funkci ve tvaru:

$$f(x) = ce^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.1)$$

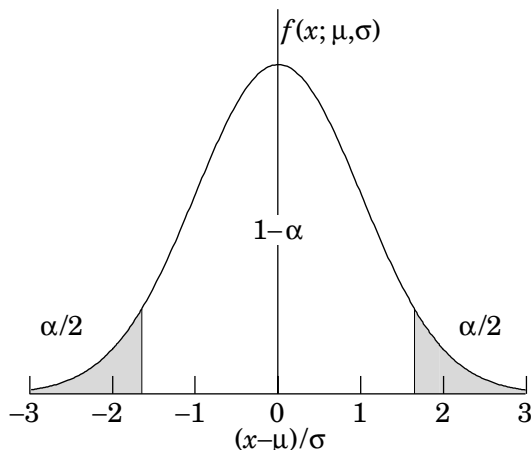
kde  $c$  je konstanta,  $\mu$  a  $\sigma^2$  jsou parametry. Platí, že v bodě  $x = \mu$  má funkce výšku  $c$ . V našem případě je parametr  $\mu$  roven nule, protože maximum šumu je umístěno právě v tomto bodě.

Po provedení fitu vidíme, že odpovídá údajům jen pro úsek v okolí nuly, což je způsobeno vlastností šumu. Proto zvolíme fitování součtem dvou gaussovských funkcí [10], která je v programu označena jako *fun2g*:

$$fun2g(x) = c_1 e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} + c_2 e^{-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} \quad (2.2)$$

Druhý člen funkce bude mít širší peak, ale menší hodnotou konstanty než první člen. Víme, že hodnoty  $\mu_i$ , pro  $i = 1, 2$ , jsou nulové, proto se ve funkci  $fun2g$  budou vyskytovat jen čtyři parametry místo šesti. Tyto parametry chceme určit. Využijeme toho, že jsme histogramy už jednou fitovali obyčejnou Gaussovou funkcí. Odtud získáme hodnoty konstant  $c_i$  a parametrů  $\sigma_i$ , pro  $i = 1, 2$ , které použijeme jako výchozí pro určení parametrů funkce  $fun2g$ . S takto zvolenými parametry vidíme, že fit funkcí  $fun2g$  popisuje data na celém svém rozsahu. Srovnání obou dvou fitů je graficky znázorněno na obrázku 2.3. Červeně je znázorněn fit jednoduchou Gaussovou funkcí a modrou barvou pak fit funkcí  $fun2g$ .

Na obrázku č. 2.1 je Gaussovo rozdělení. Označeno je jako  $f(x, \mu, \sigma)$  a někdy se označuje jako normálové rozdělení. Plocha pod celou křivkou je rovna jedné. Pravděpodobnost  $P(X)$ , že náhodná veličina  $X$  nabude hodnot z určitého intervalu, je rovna ploše pod hustotou nad tímto intervalem.



Obrázek 2.2: Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti [11]

Pro interval s hranicí  $\mu + \delta$  má tato plocha velikost  $1 - \frac{\alpha}{2}$ , protože chceme jenom jednostranný cut. Parametry  $\delta$  a  $\alpha$  navzájem souvisí podle tabulky 2.1.

Například pro interval s hranicí  $\mu + 3\sigma$  má tato plocha velikost 0,99865. Náhodná veličina  $X$  nabývá tedy hodnot z tohoto intervalu s 99,865% pravděpodobností.

Vytvoříme funkci  $F(x)$ :

$$F(x) = \frac{\int_{-\infty}^x fun2g \, dx}{\sqrt{2\pi} (c_1\sigma_1 + c_2\sigma_2)} \quad (2.3)$$

Tato funkce je normovaná, tj. je podělena integrálem přes celou reálnou osu z funkce  $fun2g$ . Tím dostaneme hodnotu funkce v bodě  $x$ . Hledáme například takový bod  $x$ , aby platilo, že  $F(x) = 0,99865$ . Pomocí metody půlení intervalů hledáme takové  $x$ , že

$$|F(x) - F(x_0)| < \epsilon \quad (2.4)$$



$\alpha$	$\delta$	$\alpha$	$\delta$
0,3173	$1\sigma$	0,2	$1,28\sigma$
$4,55 \times 10^{-2}$	$2\sigma$	0,1	$1,64\sigma$
$2,7 \times 10^{-3}$	$3\sigma$	0,05	$1,96\sigma$
$6,3 \times 10^{-5}$	$4\sigma$	0,01	$2,58\sigma$
$5,7 \times 10^{-7}$	$5\sigma$	0,001	$3,29\sigma$
$2,0 \times 10^{-9}$	$6\sigma$	$10^{-4}$	$3,89\sigma$

Tabulka 2.1: Rozdělení pravděpodobností Gaussova rozdělení [11]

kde  $\epsilon > 0$  je dostatečně malé. Tedy bod  $x$  je naše hledaná hodnota určená s 99,865% přesností oddělující šum od signálu. Tyto hodnoty určíme pro všechny cely, které nám udávají hranici pro oddělení šumu od signálu.

Ze znalosti šumu můžeme prohlásit, zda mion celu zasáhl nebo ne. To uděláme tak, že sečteme hodnotu parametru  $\mu$ , který je ale roven nule, s  $\delta$  násobkem hodnoty hranice pro oddělení šumu od signálu z dané cely, kde  $\delta$  je parametr související s volenou hranicí pravděpodobnosti. Tuto hodnotu porovnáme s celkovým signálem z obou fotonásobičů z cely a pokud je menší, můžeme prohlásit, že celu zasáhl mion.

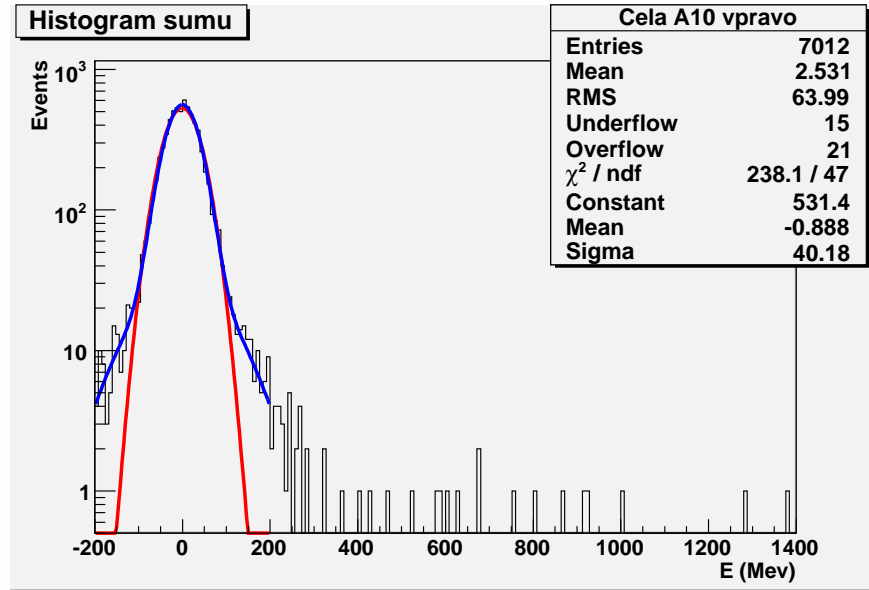
Abychom mohli prohlásit, že mion proletěl celým modulem, musí cely vertikálně sousedit. Například když mion zasáhne jako první celou A3, v další vrstvě musí projít celou BC2 a D1 nebo BC3 a D1. Z geometrie kalorimetru vyplývá, že by mohl proletět celami A3, BC2 i BC3 a pak celou D1. Tímto postupem dostaneme postupně všechny sousedící cely, kde by mohl mion proletět. Pro tyto cely založíme nový histogram, do kterého budeme ukládat hodnoty energií z fotonásobičů z těchto zasažených cel. Dále vytvoříme další histogram, do něhož budeme ukládat navíc i energie z fotonásobičů okolních cel. Rychlou kontrolou nám bude sloužit histogram převzatý z [6], který je na obrázku 2.7. Můžeme si všimnout, že má tvar Landauova rozdělení. Bude-li tedy tvar našeho energetického histogramu podobný tvaru referenčního, můžeme prohlásit, že se jedná o signál mionu, který proletěl modulem kalorimetru, viz obrázek 2.6.

Na obrázcích 2.4 až 2.6 jsou histogramy signálu z cel A1, A2, BC1, BC2 vlevo, A1, BC1 vpravo a D0 pro  $\delta = i\sigma$ , kde  $i = 1; 1,5; 2$ . Pro vyšší hodnoty  $\delta$  máme nedostatečný počet eventů pro analýzu. Histogramy jsou nafitovány fitem z konvoluce Gauss-Landauovy křivky [12]. Výsledky fitů pro dané  $\delta$  jsou znázorněny v tabulce 2.2. Je zde uvedena poloha peaku  $PP$ , její odchylka  $\sigma_{PP}$ , šířka peaku v polovině výšky  $FWHM$  a její odchylka  $\sigma_{FWHM}$ . Můžeme si všimnout, že šířka peaku se s vzrůstající hodnotou  $\delta$  zmenšuje, zatímco poloha peaku zůstává přibližně stejná. Ze srovnání uvedených obrázků s obrázkem 2.7 vyplývá stejný tvar peaku, ale hlavně velmi dobře odpovídá hodnota LandauMOP.

$\delta$	$PP$	$\sigma_{PP}$	$FWHM$	$\sigma_{FWHM}$
$1,0\sigma$	2726,2	17,6	1720,9	50,5
$1,5\sigma$	2658,4	23,9	1532,6	47,5
$2,0\sigma$	2644,4	27,1	1285,8	39,8

Tabulka 2.2: Výsledky fitu Gauss-Landau konvoluční funkcí pro různé hodnoty  $\delta$

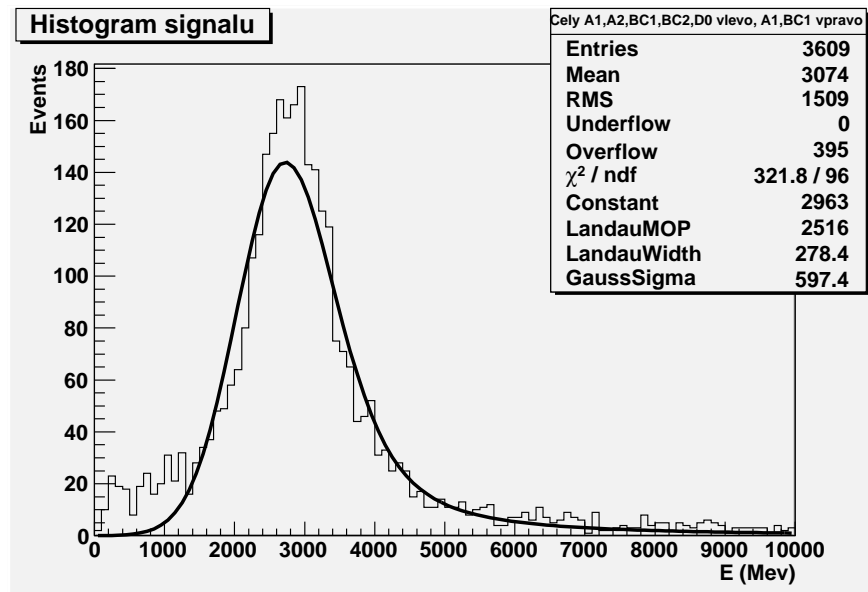
Z energetických histogramů je patrné, že nejvíce mionů proletělo středem modulu. Avšak počet eventů pro případ, kdy je  $\delta = 2\sigma$ , je na levé straně modulu o třetinu větší než na straně pravé. Z geometrie experimentu bychom očekávali, aby jejich počet byl přibližně stejný. Tento fakt může být dán různou účinností triggeru, tedy různou účinností spodních scintilátorů. Další průlety byly zaznamenány na obou koncích modulu, což ale není možné, protože aby mohl být mion detekován, musí projít triggerem. Jedná se tedy o miony, které letěly současně s miony zadetekovanými ve středu modulu.



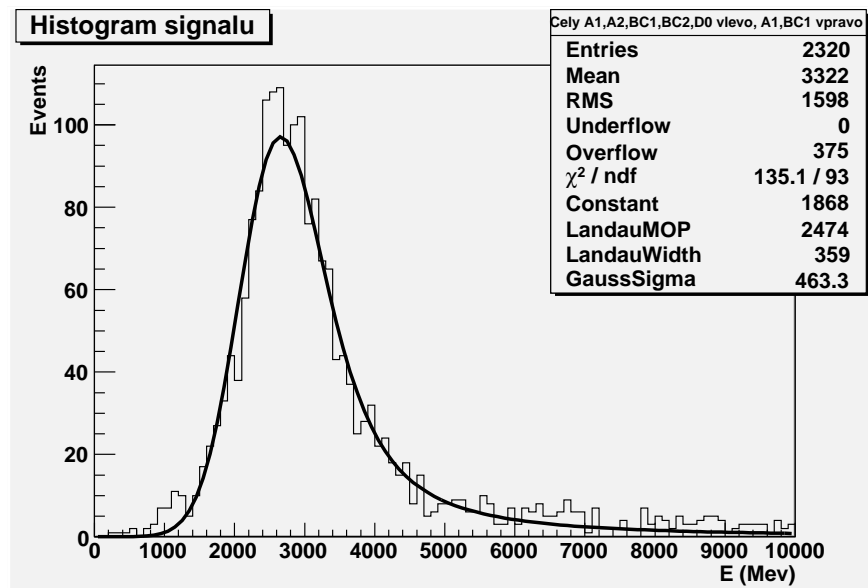
Obrázek 2.3: Srovnání fitů histogramů obyčejnou Gaussovou funkcí (červená čára) a funkcí *fun2g* (modrá čára) z cely A10 v pravé části modulu

## 2.2 Program

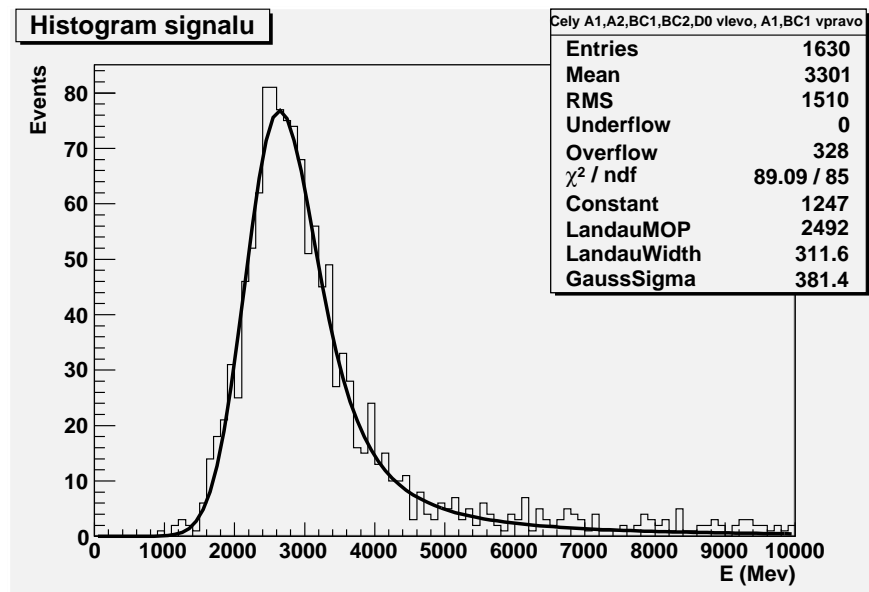
Zdrojový kód programu *Program.c* je umístěn na kompaktním nosiči přiloženém k práci. Jsou zde umístěny zdrojová data *Data.root*, avšak ve zdrojovém kódu se musí nastavit správná přístupová cesta ke zdrojovým datům. Dále jsou zde výstupy programu. A to sice šumové histogramy uložené v souboru *histogramy.root*, energetické histogramy průletu mionu *signal1.root* pro  $\delta = 1\sigma$ , *signal15.root* pro  $\delta = 1,5\sigma$  a *signal2.root* pro  $\delta = 2\sigma$ . Jsou zde také přiloženy energetické histogramy signálu s Gauss-Landau konvolučním fitem pro cely A1, A2, BC1, BC2 vlevo, A1, BC1 vpravo a celu D0 *FitSigma1.root*, *FitSigma15.root*, *FitSigma2.root* pro stejné hodnoty  $\delta$  jako výše.



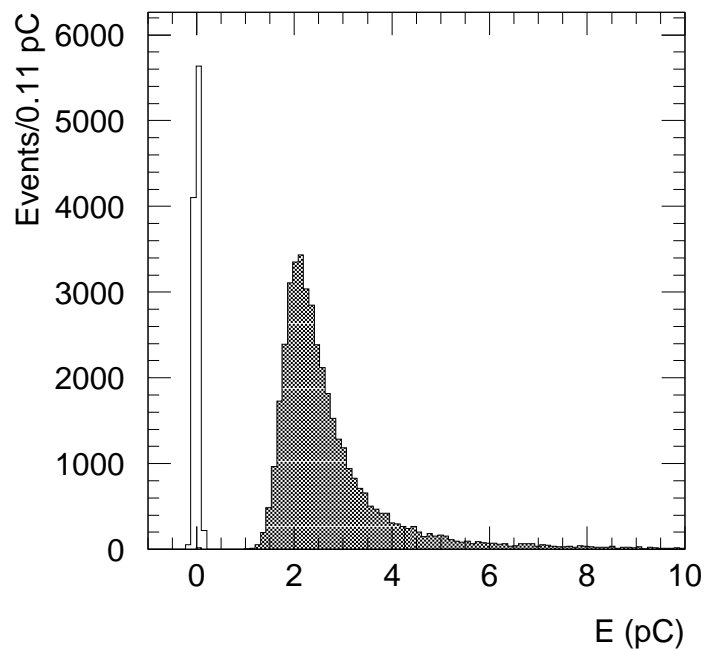
Obrázek 2.4: Energetický histogram pro cely A1, A2, BC1, BC2 vlevo, A1, BC1 vpravo a celu D0 pro  $\delta = 1\sigma$



Obrázek 2.5: Energetický histogram pro cely A1, A2, BC1, BC2 vlevo, A1, BC1 vpravo a celu D0 pro  $\delta = 1,5\sigma$



Obrázek 2.6: Energetický histogram pro cely A1, A2, BC1, BC2 vlevo, A1, BC1 vpravo a celu D0 pro  $\delta = 2\sigma$



Obrázek 2.7: Příklad signálu od izolovaného mionu měřeného v  $\eta = 0,35$  v celé věži. Úzký peak reprezentuje odpovídající šum, viz [6]

# Závěr

Seznámili jsme se s fungováním detektoru ATLAS, včetně jeho subdetektorů, speciálně pak s hadronovým kalorimetrem. Dále jsme se seznámili s programem ROOT, pomocí něhož jsme napsali program pro analýzu dat získaných pomocí kosmických mionů, které proletěly jedním modulem Tile Calorimeteru. Zjistili jsme úroveň šumu z každé cely a nafitovali jsme ji Gaussovou křivkou. Bylo patrné, že fit příliš neodpovídá u koncových hranic intervalu. Proto jsme histogramy nafitovali funkcí *fun2g*, viz rovnice 2.2. Z parametrů fitu a pomocí metody půlení intervalů jsme pak zjistili hranici, oddělující šum od signálu s danou hodnotou pravděpodobnosti pro každou celu. Za základě této informace jsme pak našli cely dávající zásah od mionu. Měli by však horizontálně sousedit. Vybrali jsme tedy vhodné sousední cely a prohlásili, že těmito celami proletěl mion.

# Seznam použité literatury

- [1] LHC <http://lhc.web.cern.ch/lhc>
- [2] CERN [www.cern.ch](http://www.cern.ch)
- [3] ATLAS <http://atlas.ch>
- [4] Vnitřní detektor [http://atlas.ch/inner\\_detector.html](http://atlas.ch/inner_detector.html)
- [5] Tile Calorimeter [atlas.web.cern.ch/Atlas/SUB\\_DETECTORS/TILE/index.php](http://atlas.web.cern.ch/Atlas/SUB_DETECTORS/TILE/index.php)
- [6] P. Adragna et al, Testbeam studies of production modules of the ATLAS Tile Calorimeter, NIM A 606 (2009) 362-394
- [7] MDT <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/project/MDT/www/mdt.html>
- [8] TGC <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/project/TGC/www/tgc.html>
- [9] ROOT <http://root.cern.ch>
- [10] Readiness of the ATLAS Tile Calorimeter for LHC collisions, EPJC 70 (2010) 1193 <http://www.springerlink.com/content/l355548m7h9x6gh3>
- [11] Particle Data Group: *Particle Physics Booklet*
- [12] Gauss-Landau konvoluční fitovací funkce <http://root.cern.ch/root/html/tutorials/fit/langa>

# Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Rozdělení pravděpodobností Gaussova rozdělení

Tabulka 2.2: Výsledky fitu Gauss-Landau konvoluční funkcí pro různé hodnoty  $\delta$

# Seznam použitých zkratek

CERN	-	the European Organization for Nuclear Research
LHC	-	Large Hadron Collider
LEP	-	Large Elektron-positron Collider
ATLAS	-	A Toroidal LHC Apparatus
CMS	-	The Compact Muon Solenoid
ALICE	-	A Large Ion Collider Experiment
LHCb	-	Large Hadron Collider beauty
TOTEM	-	TOTAL Elastic and diffractive Cross section Measurement
LHCf	-	Large Hadron Collider forward
SCT	-	Semiconductor Tracker
TRT	-	Transition Radiation Tracker
LAr	-	Liquid Argon
WLS	-	Wavelength shifting
PMT	-	PhotoMultiplier
LVL1	-	Level 1 - nejnižší stupeň triggeru
MDT	-	Monitored Drift Tubes
CSC	-	Cathode Strip Chambers
RPC	-	Resistive Plate Chambers
TGC	-	Thin Gap Chambers