



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Anežka Nováčková

Energetická kalibrace pionových spršek pro Future Circular Collider (FCC)

Ústav částicové a jaderné fyziky

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Jana Faltová, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2019

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) 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 má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V dne

Podpis autora

Ráda bych tímto poděkovala Mgr. Janě Faltové, Ph.D. za skvělé vedení, trpělivost a ochotnou pomoc při vypracovávání této bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat své rodině za obrovskou podporu během celých mých studií.

Název práce: Energetická kalibrace pionových spršek pro Future Circular Collider (FCC)

Autor: Anežka Nováčková

Ústav: Ústav částicové a jaderné fyziky

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Jana Faltová, Ph.D., Ústav částicové a jaderné fyziky

Abstrakt: Future Circular Collider (FCC) je plánovaný urychlovač částic Evropské organizace pro jaderný výzkum CERN. Tento urychlovač s obvodem téměř 100 km má dosahovat těžištové energie v řádu 100 TeV. Tato práce se zabývá systémem kalorimetrů pro experiment FCC-hh (čelní srážka dvou protonů). Aby bylo možné změřit skutečnou energii, kterou částice zanechají v kalorimetrech, je nutné systém kalibrovat. K tomu je použita simulace průchodu pionových spršek kalorimetru a její analýza.

Klíčová slova: FCC, kalibrace, kalorimetr

Title: Energy calibration of pions for the Future Circular Collider (FCC)

Author: Anežka Nováčková

Institute: Institute of Particle and Nuclear Physics

Supervisor: Mgr. Jana Faltová, Ph.D., Institute of Particle and Nuclear Physics

Abstract: Future Circular Collider (FCC) is a planned collider of the European Organization for Nuclear Research CERN. This collider with a circumference of almost 100 km will reach centre-of-mass energies of the order of 100 TeV. This thesis examines the system of calorimeters for the experiment FCC-hh (proton-proton collision). In order to be able to measure the true energy that particles leave in calorimeters, it is necessary to calibrate the system. For that reason is used a simulation of passage of pion showers through calorimeters and its analysis.

Keywords: FCC, calibration, calorimeter

Obsah

Úvod	2
1 Urychlovač FCC	3
1.1 CERN	3
1.1.1 Urychlovače v CERNu	3
1.2 FCC	4
1.2.1 Technické specifikace FCC-hh	4
2 Kalorimetrie	7
2.1 Elektromagnetický a hadronový kalorimetr	7
2.2 ECAL a HCAL na FCC-hh	8
3 Kalibrace kalorimetru	11
3.1 Energetické rozlišení	11
3.1.1 Monte Carlo simulace pionových spršek	11
3.1.2 Rozlišení kalorimetru v elektromagnetické škále	12
3.2 Benchmark metoda	12
3.2.1 Minimalizace	14
Závěr	19
Seznam použité literatury	20
Seznam obrázků	21

Úvod

Large Hadron Collider (LHC) je doposud největší kruhový urychlovač částic na světě. Pracovat začal 10. září 2008 a od té doby zaznamenal řadu úspěchů, z nichž nejvýznamnější je nejspíše objev Higgsova bosonu.

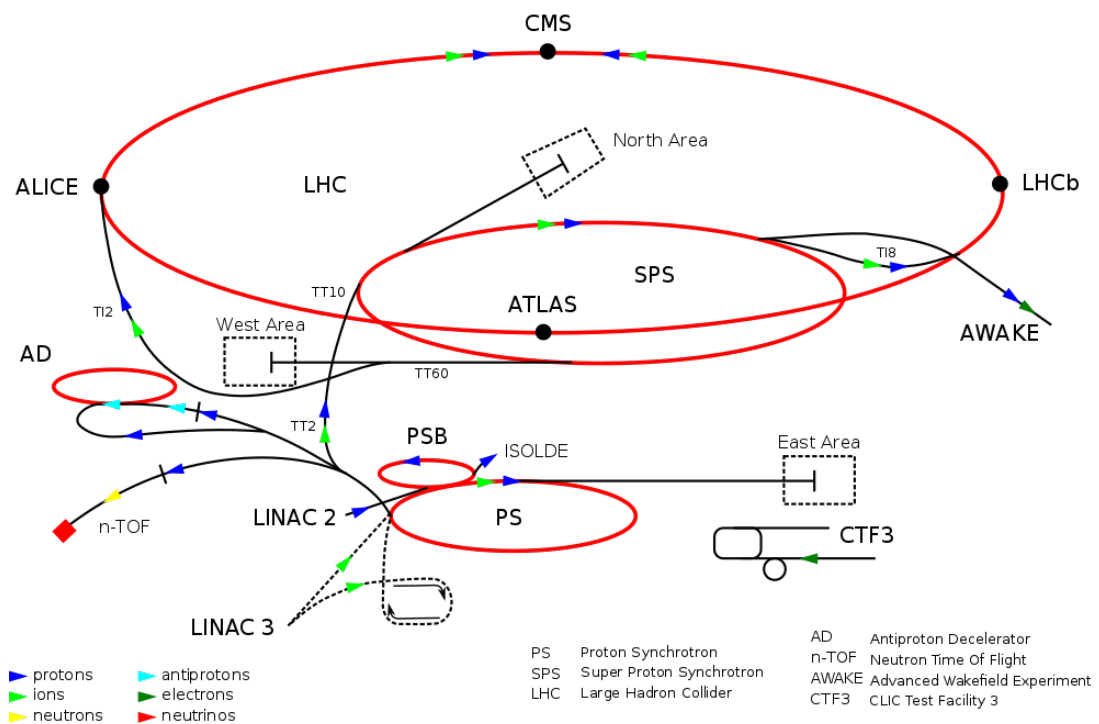
Jeden z možných projektů, který bude navazovat na upgrade LHC-HL je Future Circular Collider (FCC), který by měl částice urychlovat na energii $7\times$ vyšší. Může tedy umožnit pozorování nových částic a posunout tak hranice fyziky dále.

Tato práce se zabývá systémem kalorimetrů pro experiment FCC-hh, kde se podobně jako na LHC čelně sráží hadrony. Elektromagnetický a hadronový kalorimetr měří energii procházejících částic a je nutné je kalibrovat. Cílem této práce je kalibrace energie pionových svazků o pěti zadaných energiích na základě Monte Carlo simulací.

1. Urychlovač FCC

1.1 CERN

CERN je mezinárodní organizace založena roku 1954, jejímž cílem je od začátku umožnit prohloubení znalosti lidstva, provádět výzkum fyziky na světové úrovni, a spojit lidi z celého světa za cílem posouvání hranice vědy a technologie. Organizace má 23 členských států a laboratoř v současné době zaměstnává okolo 2500 lidí na vědeckých, technických a administrativních pozicích.



Obrázek 1.1: Schéma současné sítě urychlovačů v CERNu [1].

1.1.1 Urychlovače v CERNu

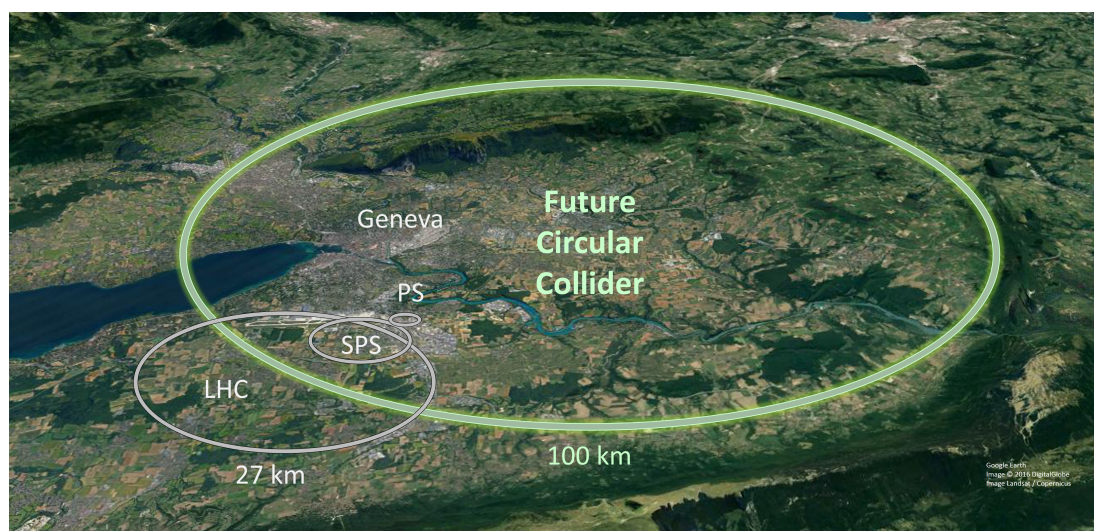
V laboratoři v Ženevě je v současné době v provozu síť osmi urychlovačů a dvou zpomalovačů (decelerators), viz obrázek 1.1. Na některých urychlovačích probíhají experimenty, některé slouží jako předurychlovače pro větší. Dosud největší urychlovač je Large Hadron Collider, který se nachází v 27 km dlouhém tunelu 100 m pod zemí. Dokáže urychlit částice na energii 6,5 TeV, dochází pak ke srážkám o těžištové energii až 13 TeV. LHC má předurychlovače čtyři. První v sérii je Linac 2, dále pak Proton Synchrotron Booster následovaný Proton Synchrotronem, odkud svazek míří do Super Proton Synchrotronu a pak je konečně odveden do LHC [2].

Na LHC nyní probíhá sedm experimentů, jsou to ALICE (A Large Ion Collider Experiment), ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS), CMS (Compact Muon Solenoid), LHCb (LHC beauty experiment), LHCf (LHC forward experiment), TOTEM (TOTAl Elastic and diffractive cross section Measurement) a MoEDAL

(Monopole and Exotics Detector at the LHC). Čtyři největší detektory – ALICE, ATLAS, CMS a LHCb – jsou rozmístěny po obvodu v místech, ve kterých se srážejí paprsky částic [3].

1.2 FCC

Projekt High Luminosity upgrade of LHC (LHC-HL) skončí po roce 2035. Jednou z možností, kterou lze navázat na proběhlé experimenty, je Future Circular Collider – vysokoenergetický urychlovač částic. Cílem tohoto experimentu bude posunout technické limity současných urychlovačů a díky možnosti dosáhnout vyšší energie a intenzity hledat novou fyziku. Výsledkem mezinárodní spolupráce více než 150 institucí po celém světě je studie FCC, jež zkoumá tři typy možných srážek, které by mohly na urychlovači probíhat: hadron-hadronové (protonové a ionové, koncept se nazývá FCC-hh), elektron-pozitronové (FCC-ee) a hadron-elektronové (FCC-he) [5].



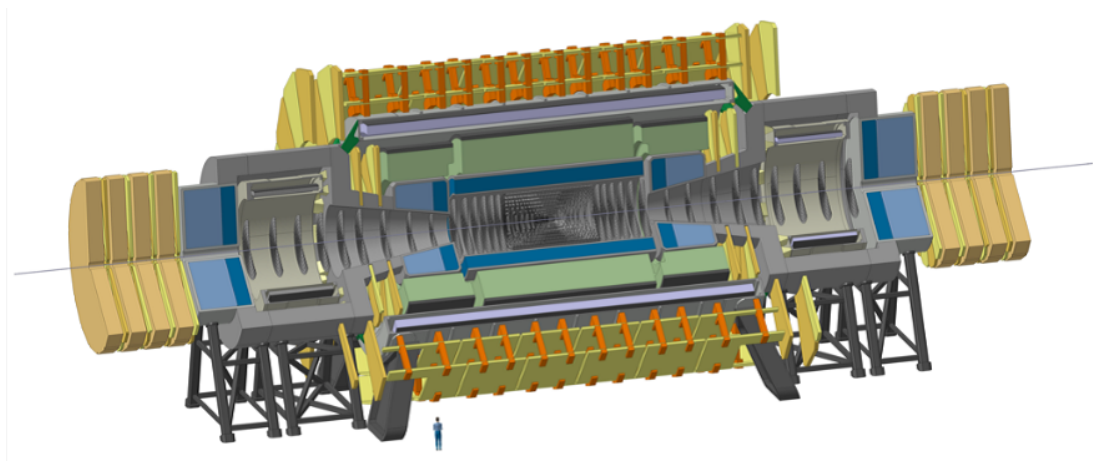
Obrázek 1.2: Letecký pohled zobrazující Ženevský komplex urychlovačů a možné umístění FCC [4].

1.2.1 Technické specifikace FCC-hh

Obvod urychlovače bude 97,75 km, do něj vložené části jako experimenty, vstupy paprsků částic z předurychlovačů a kolimátory mají všechny délku 1,4 km (kromě dvou o délce 2,8 km). Na obrázku 1.2 je možné vidět srovnání s LHC. Urychlovač FCC-hh by měl dosahovat srážek o energii v těžišti 100 TeV (což je sedmkrát větší energie, než jaké je v současné době dosaženo) a integrované luminosity v hlavních experimentech asi 20 ab^{-1} . K udržení paprsků v kruhovém orbitu bude nezbytné magnetické pole o velikosti téměř 16 T [5].

Rozložení urychlovače FCC-hh má mít podobně jako LHC čtyři interakční místa. Dvě budou interakční místa s vysokou luminositou, kde se budou nacházet univerzální detektory, a dvě budou interakční místa s nižší luminositou. Opět podobně jako na LHC, oba univerzální detektory se nejspíše budou lišit svým

uspořádáním, viz ATLAS a CMS. Postup vývoje detektoru je takový, že se nejprve diskutují obecné specifikace zařízení a až po té je studován tzv. referenční detektor. Ten pak umožňuje podrobnější zkoumání fyziky jednotlivých částí zařízení a jejich design.



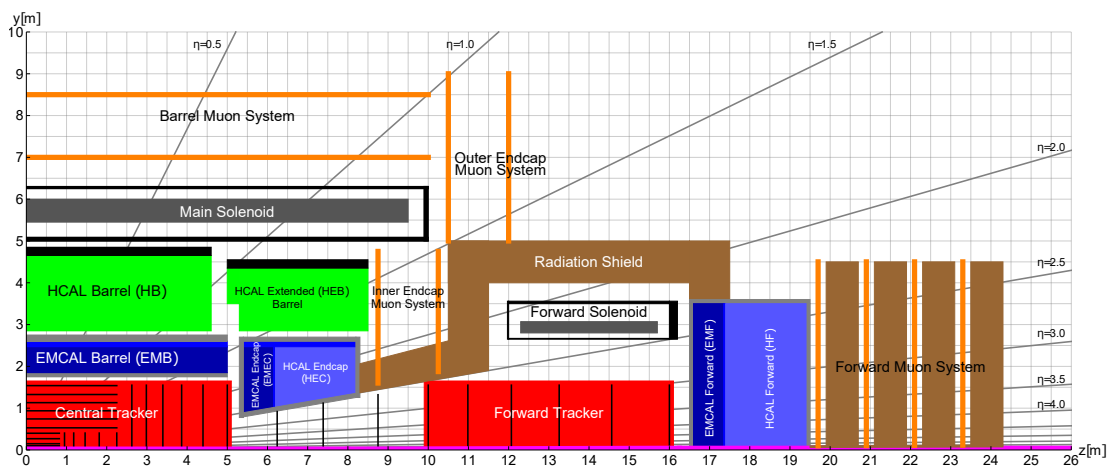
Obrázek 1.3: Referenční detektor FCC-hh. Uprostřed je šedě znázorněn dráhový detektor, tmavě modře je znázorněn elektromagnetický kalorimetr, světle modře a zeleně hadronový kalorimetr. Fialově je znázorněn centrální solenoid, žlutě pak systém mionových komor. Šedě je znázorněno i radiální stínění okolo dopředných a zpětných částí detektoru [5].

Na obrázku 1.3 je vyobrazen podélný průřez možné podoby detektoru FCC-hh. Detektor má délku 50 m a průměr 20 m, což jsou rozměry srovnatelné s detektorem ATLAS na LHC. Centrální detektor pokrývá $|\eta| < 2,5$ a zahrnuje dráhový detektor, elektromagnetický a hadronový kalorimetr uvnitř solenoidu, který má vnitřní průměr 10 m a vytváří pole o 4 T. Podél osy paprsku jsou umístěné dopředné části detektoru, potřebnou sílu na ohnutí paprsku poskytují dvě cívky o vnitřním průměru 5 m a se stejnou silou pole. Velmi přesné informace je tak možné získat o hybnosti až po rapiditu $|\eta| \approx 4$, o dráze částic až po $|\eta| \approx 6$.

Dráhový detektor má poloměr 1,6 m a poskytuje pokrytí až po $|\eta| = 3$. Elektromagnetický kalorimetr (ECAL) je tlustý zhruba 30 radičních délek a hadronový kalorimetr (HCAL) v kombinaci s ním má tloušťku více než 10,5 interakčních délek. Je tak zajištěno, že 98 % spršek s vysokou energií neprojde do systému mionových komor. Barelová část tohoto systému se bude nacházet vně hlavního solenoidu, tzv. endcap mionového systému částečně i uvnitř.

Na obrázku 1.4 je vyobrazeno podrobné schéma rozmístění částí detektoru FCC-hh spolu s rozměrovou škálou. Aby bylo možno detektor naistalovat a zprovoznit bude zapotřebí vyhloubit ve skále dutinu o délce 66 m.

Detektor je navržen tak, aby vydržel v provozu 25 let. Přípravná část projektu má trvat 8 let a předpokládá se, že samotná stavba by trvala 15 let. Celkem by tak tento projekt mohl trvat až 50 let, a pokud by se předtím uskutečnil i FCC-ee pak by dohromady projekty působily celkem 70 let [5].



Obrázek 1.4: Schéma referenčního detektoru FCC-hh s podrobným popisem jeho částí – podélný řez [5].

2. Kalorimetrie

Kalorimetr je detektor, který měří energii částic. Částice interaguje s materiálem detektoru, předává mu svou energii a nakonec zaniká – kalorimetr je destruktivní typ detektoru.

Primární částice vlétající do kalorimetru interaguje s prostředím a vytváří sekundární částice, mezi něž se energie původní částice rozdělí. Celý proces se opakuje a vznikají další částice do té doby, než se díky ztrátám energie v detektoru zastaví [6].

Kalorimetrie je možné podle stavby dělit na homogenní a nehomogenní nebo-li sampling kalorimetrie. Homogenní jsou tvořeny jedním materiálem, který plní dvě úlohy najednou – tvoří prostředí, ve kterém částice ztrácí energii a zároveň generuje měřitelný signál. Sampling kalorimetrie tyto úlohy rozdělují, skládají se z alternujících vrstev absorbátoru – materiálu s vysokou hustotou terčů (jader), se kterými procházející částice může interagovat – a aktivního média, vytváří měřitelný signál.

Výhodou kalorimetrů je, že jsou citlivé na jak nabitě, tak neutrální částice. Kromě energie lze zjistit i směr pohybu původní částice (díky segmentaci detektoru) a lze také rozlišit, jaké částice kalorimetrem prochází a kde se nacházejí. Kalorimetrie se hodí na vysokoenergetické experimenty, neboť rozlišení energie je úměrné $\frac{1}{\sqrt{E}}$, kde E je energie původní částice – rozlišení se tedy zlepšuje s vyšší počáteční energií. Kalorimetrie se podle toho, které částice měří, dělí na elektromagnetické a hadronové [7, 8].

2.1 Elektromagnetický a hadronový kalorimetr

Elektromagnetická sprška

Interakce částic s materiálem kalorimetru: pro energie v řádech MeV jsou dominantní fotoelektrický a Comptonův jev pro fotony, ionizace a excitace pro nabitě částice. Pro energie v řádu 100 MeV a vyšší pak začíná pro fotony převládat tvorba elektron-pozitronových párů, elektrony a pozitrony pak ztrácejí energii brzděním. Energie původní částice se tak rozděluje mezi sekundární částice, čímž vzniká kaskáda (sprška) částic, jejichž energie se při každé interakci zmenšuje. Vývoj elektromagnetické spršky končí ve chvíli, kdy energie elektronů klesne pod kritickou energii E_C , kdy jsou hlavní ztráty způsobené ionizací a excitací a ne tvorbou dalších částic [7].

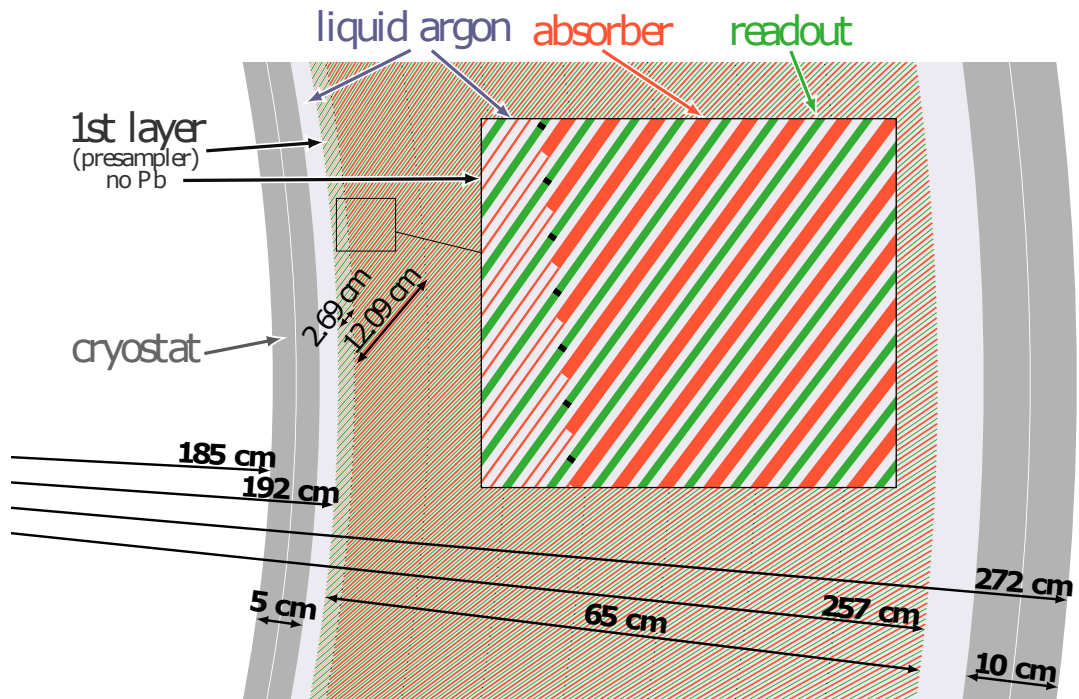
Charakteristickým rozměrem, kterým jsou spršky popisovány, je radiační délka X_0 – střední délka x , na které se původní energie elektronu zredukuje na svůj $\frac{1}{e}$ násobek, viz vzorec 2.1. X_0 tedy určuje, jak rychle elektrony ztrácejí energii brzděním a závisí na materiálu, kterým částice prochází: $X_0 \propto \frac{1}{Z^2}$ [9].

$$\langle E(x) \rangle = E_0 e^{-\frac{x}{X_0}} \quad (2.1)$$

Hadronová sprška

Podobně jako v elektromagnetické spršce, hadron postupně ztrácí energii, v tomto případě však díky převážně silným interakcím s materiálem detektoru. Vytváří sekundární částice – hadrony, které opět interagují s jádry. Vzniká hadronová kaskáda, částice se násobí do té doby, než dosáhnou prahu tvorby pionů $E \approx 2m_\pi$. V průměru třetina vyprodukovaných pionů bude π^0 , které se téměř okamžitě rozpadají na dva fotony, vzniká tak doprovodná elektromagnetická sprška. Část energie kalorimetr nemůže zaznamenat, je to z velké části energie spotřebovaná na rozbití jader či energie odnesená neinteragujícími částicemi z rozpadu hadronů (neutrína).

Vhodným parametrem pro popis hadronových spršek je interakční délka λ_I tj. střední dráha, kterou ujde hadron předtím, než neelasticky zainteraguje. Ve většině materiálů je interakční délka o hodně větší, než radiační délka, proto musí být hadronové kalorimetry větší než elektromagnetické [7, 8].



Obrázek 2.1: Geometrie barelového LAr elektromagnetického kalorimetru [5].

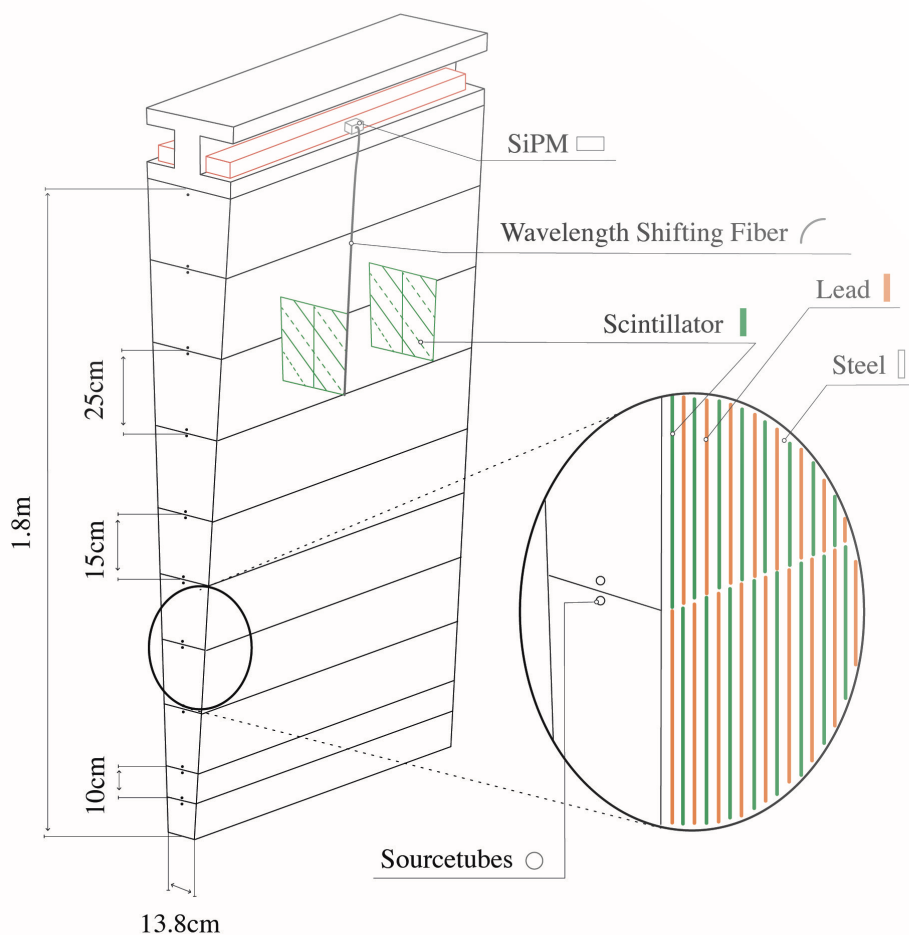
2.2 ECAL a HCAL na FCC-hh

Díky úspěšné aplikaci na experimentu ATLAS se předpokládá, že ECAL bude založen na LAr (Liquid Argon – tekutý argon) technologii. Kvůli požadavku vysoké granularity (velkému počtu buněk detektoru) a podélné segmentaci je zapotřebí jiné geometrie kalorimetru než akordeonové, kterou využívá barelový ECAL na ATLASu. Na obrázku 2.1 je zobrazena geometrie nakloněných ploch. Tekutý argon tvoří aktivní složku prostředí, absorbatorem jsou olovené pláty pokryté vrstvou oceli 2 mm tlusté. Pláty jsou nakloněny o 50° , vrstvy tekutého argonu mezi nimi jsou u středu detektoru široké 1,15 mm, na kraji se tloušťka LAr vrstvy zvětšuje na 3,09 mm. Kalorimetr je rozdělen na osm longitudinálních

vrstev, z nichž v té první olověný absorbátor chybí. Barelový ECAL má pokrytí $|\eta| < 1,5$ [5].

ECAL a HCAL jsou odděleny kryostatem, jež kalorimetr ochlazuje na pracovní teplotu, za normálních podmínek by argon byl plynný [5].

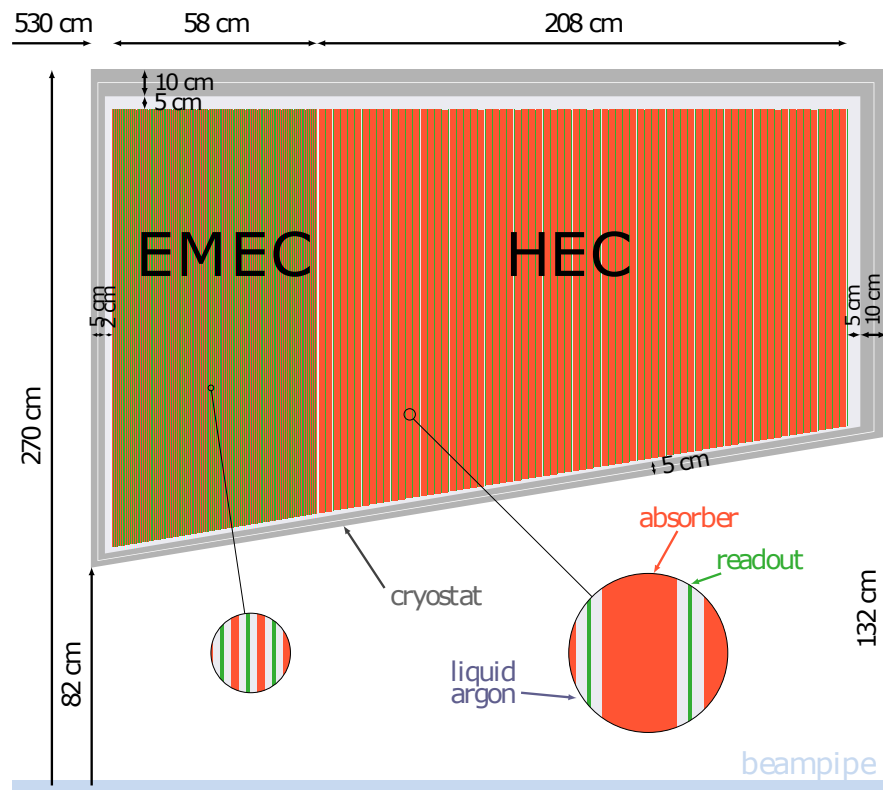
Stavba HCALu je z části založená na kalorimetru TileCal použitým v experimentu ATLAS. Barelový hadronový kalorimetr je rozdělen do tří částí: centrální barel s $|\eta| < 1,26$ a dvě prodloužené části s $|\eta| < 1,81$. Kalorimetr se bude skládat z deskových scintilátorů orientovaných kolmo k ose paprsku, na obrázku 2.2 je vidět jeden modul takového uspořádání. Skládá se z deseti longitudinálních ocelových vrstev, do kterých jsou vloženy střídavě destičky scintilátoru a olova. Výstup ze scintilátorů je čten WLS vlákny (WaveLength Shifting) a následně pak křemíkovými fotonásobiči. HCAL tak má oproti TileCalu velkou segmentaci [5].



Obrázek 2.2: Modul barelového hadronového kalorimetru [5].

Předpokládá se, že tzv. ECAL endcap bude tvořen ocelí obklopenými olověnými pláty tlustými 1,5 mm, mezi nimi LAr vrstva o tloušťce 0,5 mm, jak je vidět na obrázku 2.3. Dopředný ECAL používá stejné rozložení, pouze s měděnými 1 cm pláty a LAr vrstvami 0,1 mm tlustými. Navrhovaná geometrie HCAL endcapu (obrázek 2.3) a dopředného kalorimetru je taktéž založena na LAr tech-

nologii, s ECALem bude sdílet kryostaty. LAr se zde využívá převážně díky své odolnosti vůči radiaci a stabilitě. ECAL endcap stejně jako HCAL endcap dosahuje až $|\eta| = 2,5$, dopředné ECAL a HCAL až $|\eta| = 6$ [5].



Obrázek 2.3: Geometrie endcapu LAr kalorimetru [5].

3. Kalibrace kalorimetru

3.1 Energetické rozlišení

Energetické rozlišení $\frac{\sigma(E)}{E}$ detektoru popisuje, jak přesně je schopen určit energii vstupující částice. Měření v kalorimetru je založeno na tom, že energie zanechaná v detektoru částicemi ze spršky je úměrná energii původní částice: celková délka drah všech nabitých částic spršky T_0 je úměrná energii počáteční částice E_0 , a energie zanechaná v kalorimetru je úměrná celkové délce drah. Počet vzniklých částic v maximu spršky N je též úměrný původní energii částice.

Vývoj spršky je stochastický proces, rozlišení počtu částic se chová podle Poissonova rozdělení $\sigma(N) \approx \sqrt{N}$ a ideální rozlišení kalorimetru pak musí být

$$\frac{\sigma(E)}{E} \approx \frac{\sigma(N)}{N} \approx \frac{1}{\sqrt{N}} \approx \frac{1}{\sqrt{E_0}}.$$

Skutečné energetické rozlišení reálného kalorimetru je však ovlivněno i dalšími faktory, a proto je používán vzorec

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c, \quad (3.1)$$

kde \oplus představuje kvadratický součet. První člen rovnice a se nazývá sampling term a je výsledkem fyzikálních procesů při vývoji spršky. Ve vzorkovacích kalorimetrech jako je LAr představuje nejvýraznější problém pro energetické rozlišení.

Dalším členem je b , který popisuje elektronický šum. Silně závisí na technických součástkách použitých detektorem – pokud využívá scintilátory, je šum zpravidla menší, než pokud je signál sbírán pomocí náboje, kde jsou použity předzesilovače signálu.

Poslední člen c se nazývá konstantní. Tento člen jako jediný nezávisí na energii původní částice, jeho zdrojem může být geometrie samotného detektoru, nedokonalost v nějaké technické komponentě, poškození detektoru v důsledku stárnutí apod. [7]

3.1.1 Monte Carlo simulace pionových spršek

Pracovala jsem se sadou pěti datových souborů ve formátu ROOT [10]. ROOT je objektově orientovaný framework pro analýzu velkého objemu dat vyvíjený v CERNu. Je primárně určený pro analýzu dat v částicové fyzice, ale využívá se i v jiných oblastech. Jeho základem je C++.

Každý datový balíček obsahoval téměř 10 000 vygenerovaných událostí pomocí Monte Carlo simulací, které byly provedeny v Geant4. Negerovaly se celé srážky, ale pouze jednotlivé piony o daných energiích. Jedna událost v datovém balíčku odpovídá průchodu jednoho pionu detektorem, tím je elektromagnetický a hadronový kalorimetr v uspořádání, jaké bylo popsáno v sekci 2.2. Původní částice má předem známou hodnotu energie, která je stejná pro všechny události v souboru. Konkrétní původní energie pionů byly 20, 50, 100, 500 a 1 000 GeV.

3.1.2 Rozlišení kalorimetru v elektromagnetické škále

Pro každý event jsem sečetla celkovou energii zanechanou v kalorimetru. ECAL je již předem kalibrován na elektromagnetickou škálu – pomocí elektromagnetické škály (EM škály) se převádí naměřený signál v kalorimetru na energii elektronu, který by daný signál v detektoru zanechal. HCAL na EM škálu předem kalibrován nebyl. Proto bylo zapotřebí přenásobit energii zanechanou v každé buňce HCALu faktorem 0,94, aby byl hadronový kalorimetr kalibrován na správnou hodnotu EM škály. Pro každou energii jsem vytvořila histogram naměřených energií.

Energie rekonstruovaná v každé události je nezávislá náhodná hodnota, a proto se řídí podle Poissonova rozdělení. Vzhledem k vysokému počtu eventů přechází v limitě mnoha událostí na Gaussovo normální rozdělení. Histogramy jsem proto fitovala Gaussovým rozdělením v oblasti střední hodnota $\pm 2\sigma$. Výsledné grafy jsou na obrázku 3.1 a získané hodnoty střední hodnoty rekonstruované energie a její odchylky jsou v tabulce 3.1.

E_{true} [GeV]	E_{rec} [GeV]	$\sigma_{E_{\text{rec}}}$ [GeV]
20	$17,21 \pm 0,02$	$2,01 \pm 0,02$
50	$44,33 \pm 0,05$	$3,94 \pm 0,04$
100	$90,02 \pm 0,07$	$6,26 \pm 0,07$
500	$459,1 \pm 0,2$	$20,7 \pm 0,2$
1000	$926,0 \pm 0,4$	$36,7 \pm 0,4$

Tabulka 3.1: Původní energie E_{true} , střední hodnota rekonstruované energie E_{rec} a směrodatná odchylka $\sigma_{E_{\text{rec}}}$.

Je vidět, že rekonstruovaná energie E_{rec} je vždy o něco menší (zhruba o 10 %), než původní skutečná energie částic E_{true} . Abych zjistila rozlišení kalorimetru, fituji závislost $\frac{\sigma_{E_{\text{rec}}}}{E_{\text{rec}}}$ na E_{true} vzorcem 3.2, který je zjednodušením vzorce 3.1:

$$\frac{\sigma_{E_{\text{rec}}}}{E_{\text{rec}}} = \frac{a}{\sqrt{E_{\text{true}}}} \oplus b. \quad (3.2)$$

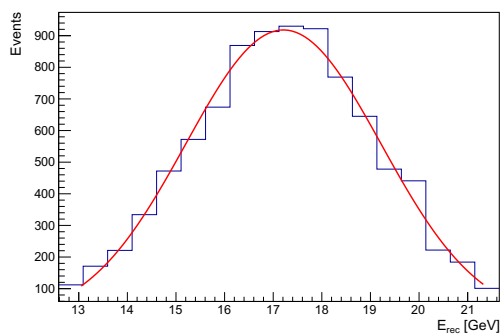
a je sampling člen a b představuje konstantní člen. Simulovaná data se kterými jsem pracovala neobsahovala šum, proto tento člen z původní rovnice 3.1 vypouštím. Výsledná závislost je vidět na obrázku 3.2 a výsledné hodnoty členů a a b jsou

$$a = (52 \pm 2)\%$$

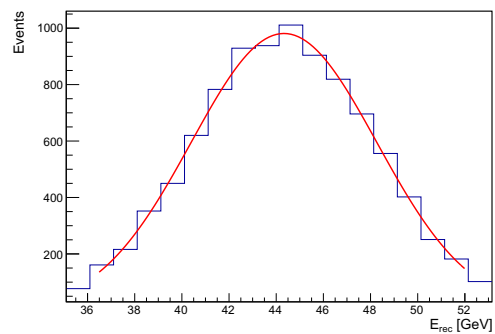
$$b = (4,0 \pm 0,4)\%.$$

3.2 Benchmark metoda

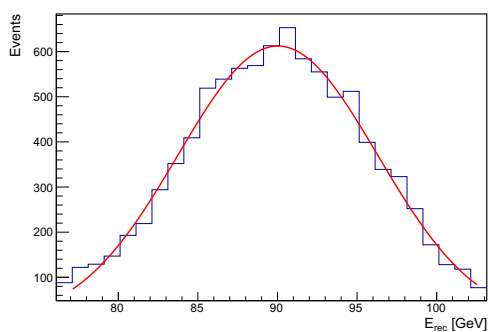
Tzv. benchmark metoda je metoda rekonstrukce energie, která byla vyvinuta pro ATLAS. Využívá se pro kalibraci hadronových spršek. Zahrnuje korekci ztráty energie v kryostatu, který se nachází mezi ECAL a HCAL. Celková energie (tzv. benchmark energie) se zapíše jako součet čtyř členů.



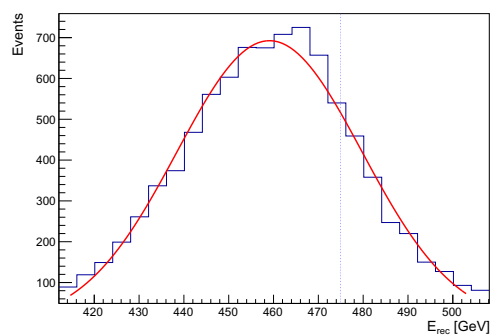
(a) Energie 20 GeV



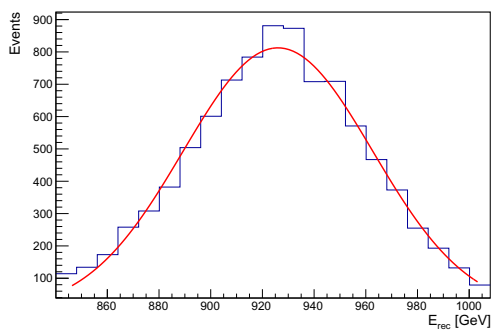
(b) Energie 50 GeV



(c) Energie 100 GeV

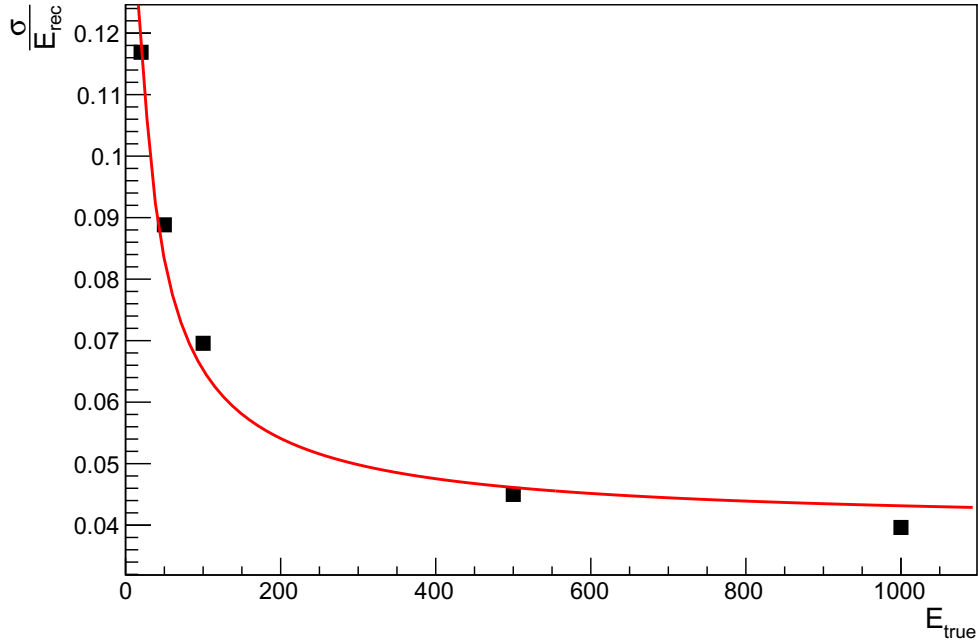


(d) Energie 500 GeV



(e) Energie 1000 GeV

Obrázek 3.1: Histogramy rekonstruovaných energií pro pět původních energií pionových spršek v EM škále.



Obrázek 3.2: Závislost energetického rozlišení kalorimetru $\frac{\sigma_{E_{\text{rec}}}}{E_{\text{rec}}}$ na energii původní částice E_{true} v elektromagnetické škále.

Prvním členem je součet energie, kterou částice zanechala v elektromagnetickém kalorimetru (součet je nutno opravit pro hadrony parametrem a), dále je přičten člen úměrný energii zanechané v HCalu, který je kalibrován na hadronickou škálu (úměrnost je popsána členem b).

Třetí člen součtu odpovídá ztrátám energie v kryostatu, které jsou závislé na energii uložené v poslední vrstvě ECALu a první vrstvě HCalu. Ztráty jsou popsány pomocí funkce $\sqrt{|(a \cdot E_{\text{last-ECAL}}) \cdot (b \cdot E_{\text{first-HCAL}})|}$. Poslední člen je úměrný E_{ECAL}^2 a odpovídá korekci non-kompence ECALu [11]. Tento člen při kalibraci zanedbávám, oproti ostatním členům se jedná pouze o malou korekci. Dále tedy používám vzorec 3.3:

$$E_{\text{bench}} = a \cdot E_{\text{ECAL}} + b \cdot E_{\text{HCAL}} + c \cdot \sqrt{|(a \cdot E_{\text{last-ECAL}}) \cdot (b \cdot E_{\text{first-HCAL}})|}. \quad (3.3)$$

3.2.1 Minimalizace

Abych zjistila hodnoty konstant a , b a c , využila jsem metody minimalizace χ^2 . Dosadila jsem do obecného vzorce pro χ^2 za očekávanou hodnotu E_{bench} , za skutečnou hodnotu E_{true} , viz vzorec 3.4. Následně jsem provedla minimalizaci této sumy pomocí ROOT balíčku Minuit2. Tento balíček automaticky najde minimum funkce pomocí změny jejích zadaných parametrů.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(E_{\text{bench}}^i - E_{\text{true}}^i)^2}{E_{\text{true}}^i} \quad (3.4)$$

Mnou použitá suma probíhá přes všechny eventy ze všech souborů, parametry minimalizace byly konstanty a , b a c . Minimum bylo nalezeno pro hodnoty:

$$\begin{aligned} a &= 1,0076 \pm 0,0008, \\ b &= 1,0678 \pm 0,0005, \\ c &= 0,648 \pm 0,005. \end{aligned}$$

Po dosazení těchto získaných konstant do 3.3 ještě stále byla zřetelná závislost rekonstruované energie na původní energii E_{true} obzvláště pro malé počáteční energie (to se dá pozorovat v grafu 3.5). Proto je nutné ještě fitovat E_{bench} mocninnou funkcí, abych se zbavila její závislosti na E_{true} . Konečnou energii E_{final} částic pak získám podle závislosti 3.5:

$$E_{\text{final}} = \left(\frac{E_{\text{bench}} - d}{e} \right)^{\frac{1}{f}}. \quad (3.5)$$

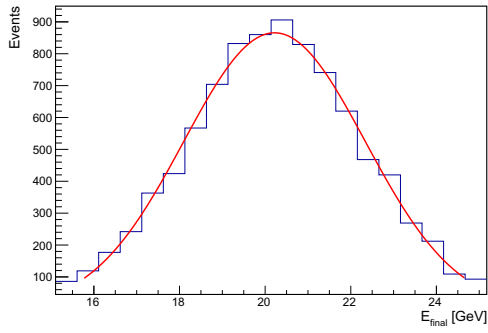
K zjištění hodnot konstant d , e a f jsem opět použila metody minimalizace χ^2 . Za očekávanou hodnotu jsem dosadila E_{final} a minimalizace probíhala pomocí Minuit2 s parametry d , e a f . Minimum nastalo pro hodnoty

$$\begin{aligned} d &= -1,10 \pm 0,07 \text{ GeV}, \\ e &= 0,949 \pm 0,004, \\ f &= 1,0086 \pm 0,0006. \end{aligned}$$

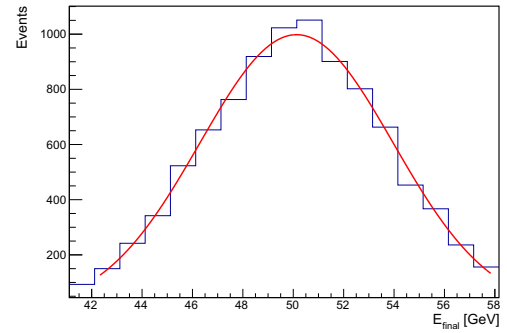
Dosadila jsem výsledné hodnoty d , e , f do vzorce 3.5 a použila jsem jej na energie jednotlivých eventů. Pro každou původní energii takto kalibrovaných pionových spršek jsem vytvořila histogram, viz obrázek 3.3. Do tabulky 3.2 jsem zapsala výsledné hodnoty střední energie a příslušné odchylky:

E_{true} [GeV]	E_{final} [GeV]	$\sigma_{E_{\text{final}}}$ [GeV]
20	$20,22 \pm 0,02$	$2,12 \pm 0,02$
50	$50,13 \pm 0,04$	$3,84 \pm 0,04$
100	$100,15 \pm 0,07$	$5,83 \pm 0,06$
500	$500,0 \pm 0,2$	$17,1 \pm 0,2$
1000	$1000,0 \pm 0,3$	$27,9 \pm 0,3$

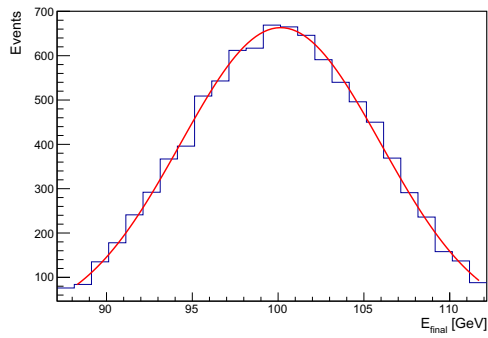
Tabulka 3.2: Původní energie E_{true} , střední hodnota finální rekonstruované energie E_{final} a její směrodatná odchylka $\sigma_{E_{\text{final}}}$.



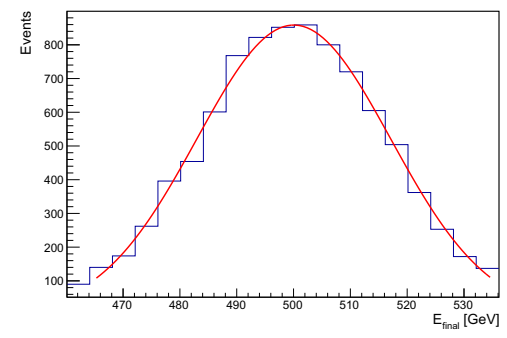
(a) Energie 20 GeV



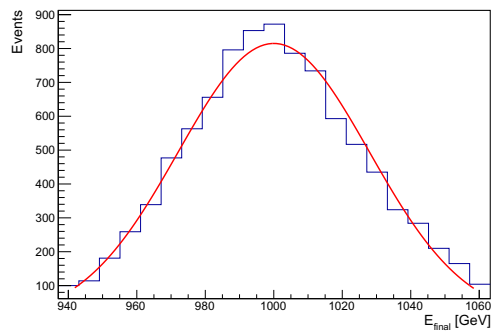
(b) Energie 50 GeV



(c) Energie 100 GeV

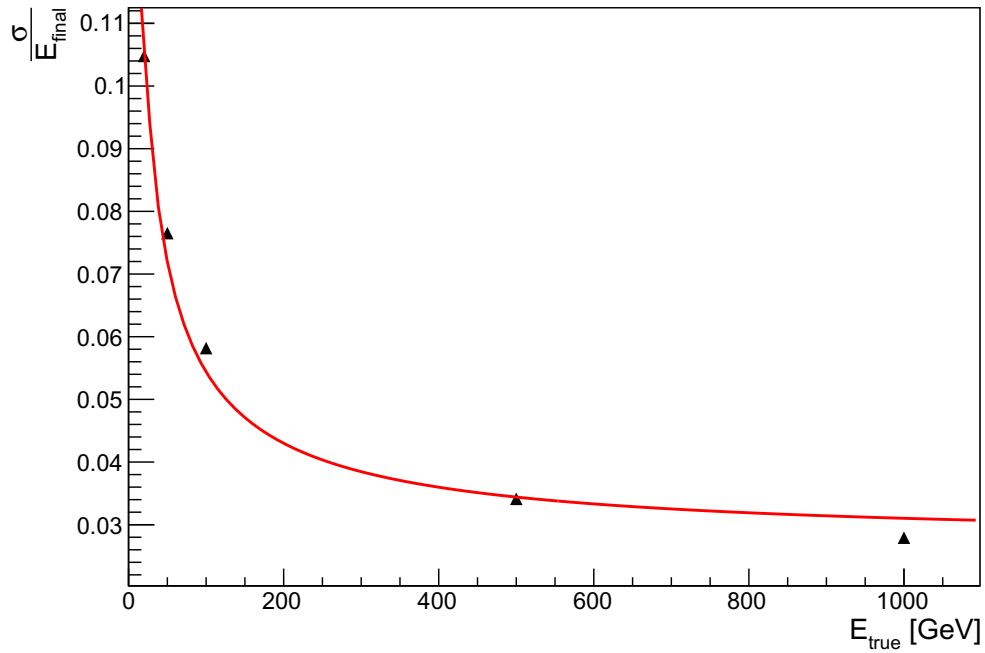


(d) Energie 500 GeV



(e) Energie 1000 GeV

Obrázek 3.3: Histogramy finálních rekonstruovaných energií pro pět původních energií pionových spršek.



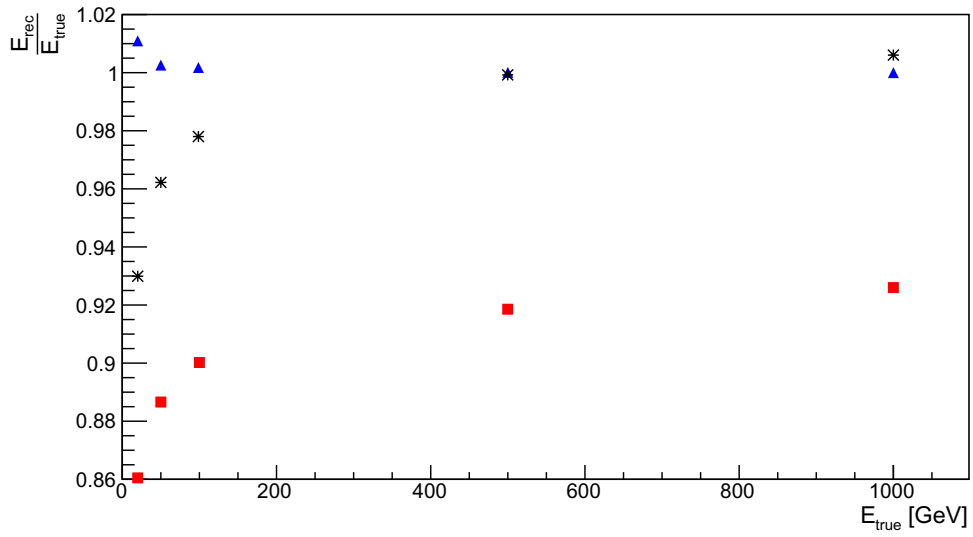
Obrázek 3.4: Závislost energetického rozlišení kalorimetru $\frac{\sigma_{E_{\text{final}}}}{E_{\text{final}}}$ na energii původní částice E_{true} po korekci mocninnou funkcí.

Jak je z tabulky 3.2 vidět, střední hodnoty konečné rekonstruované energie se v rámci odchylky shodují s původními energiemi částic, narozdíl od středních hodnot E_{rec} v EM škále. Závislost rozlišení kalorimetru na skutečné energii při použití této kalibrace je na obrázku 3.4. Sampling člen a a konstantní člen b získané fitem této závislosti mají hodnoty

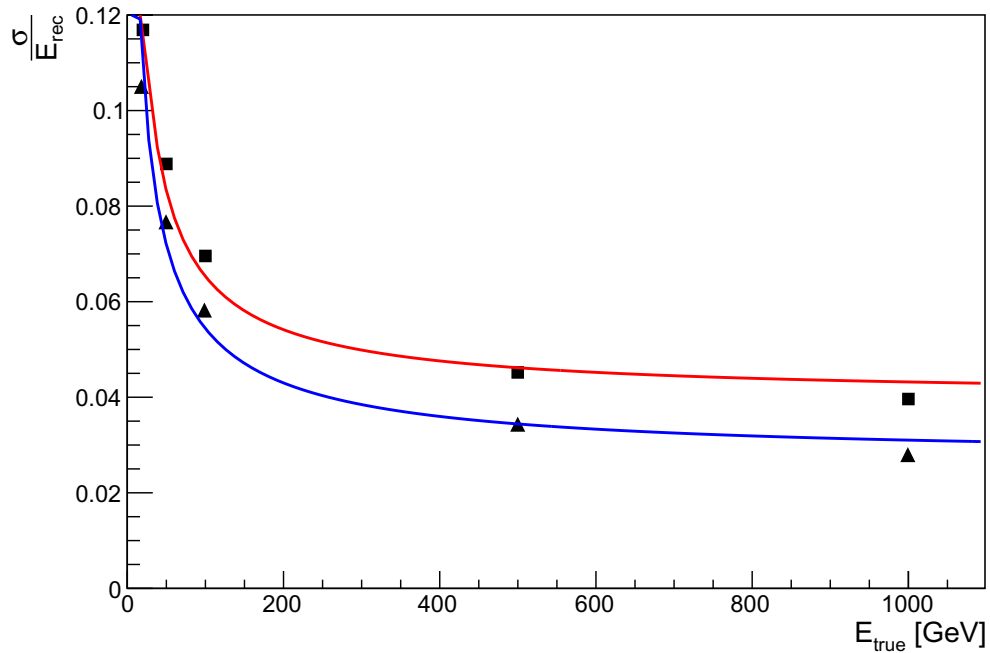
$$a = (47 \pm 2)\%$$

$$b = (2,7 \pm 0,3)\%.$$

V porovnání s hodnotami rozlišení v elektromagnetické škále jsou oba členy menší, a o 10 %, b o téměř třetinu. Porovnání závislosti je vidět na obrázku 3.6. Jakým způsobem závisí rekonstruovaná energie na původní energii lze zjistit z obrázku 3.5. Oproti poměru energie pionových spršek v EM škále je poměr konečné energie $\frac{E_{\text{final}}}{E_{\text{true}}}$ téměř konstantní.



Obrázek 3.5: Závislost poměru střední hodnoty rekonstruované energie $\frac{E_{\text{rec}}}{E_{\text{true}}}$ na skutečné energii. Červeně je energie v EM škále, černě E_{bench} před korekcí mocninnou funkcí a modře je E_{final} po korekci.



Obrázek 3.6: Porovnání závislosti energetického rozlišení kalorimetru. Červeně je závislost v EM škále, modře je závislost po kalibraci.

Závěr

Tato práce se nejprve zaměřila na urychlovač částic Future Circular Collider. Byly zde popsány plány na možnou podobu detektoru pro FCC-hh, jeho stavbu a součásti.

Poté byla rozebrána kalorimetrie a fyzikální procesy, které probíhají v detektorech – elektromagnetické a hadronové spršky. Byla podrobně popsána soustava kalorimetrů pro FCC-hh: složení soustavy, jak můžou vypadat jednotlivé části, jejich vlastnosti a jaké technologie budou využívat.

Dále byla za použití frameworku ROOT analyzována Monte Carlo simulace pionů o pěti zadaných energiích a jejich průchod soustavou kalorimetrů. Zkoumala jsem energetické rozlišení soustavy v elektromagnetické škále a v této škále jsem i provedla první rekonstrukci energie pionů.

Provedla jsem kalibraci soustavy kalorimetrů podle benchmark metody. Minimalizací χ^2 pomocí knihovny Minuit2 jsem získala hodnoty tří konstant, kterými jsem upravila energii zanechanou v kalorimetru. Závislosti této energie na původní zadané hodnotě jsem se zbavila pomocí fitu mocninnou funkcí. Získala jsem tedy dvě trojice kalibračních konstant. Pomocí těchto konstant dosazených do vzorce jsem opět rekonstruovala energii pionů a zjistila energetické rozlišení soustavy.

Podle očekávání se rozlišení ve srovnání s EM škálou vylepšilo. Bylo dosaženo rozlišení bez elektronického šumu se sampling členem $a = 47\%$ a konstantním členem $b = 2,7\%$. Toto rozlišení splňuje požadavky na kalorimetr – sampling člen $\approx 50\%$ a konstantní člen menší než 3% .

Seznam použité literatury

- [1] The accelerator complex. <https://public-archive.web.cern.ch/en/research/AccelComplex-en.html>. [Online]. [2019-07-12].
- [2] L. Evans *et al.* *LHC Machine*. JINST 3, S08001, 2008.
- [3] *LHC, The Guide*. Education, Communications and Outreach Group, Únor, 2017.
- [4] Future circular collider - image selection. <https://cds.cern.ch/record/2653532>. [Online]. [2019-07-12].
- [5] Future circular collider study. Volume 3: The Hadron Collider (FCC-hh) Conceptual Design Report, preprint edition edited by Michael Benedikt, Johannes Gutleber and Frank Zimmermann. CERN accelerator reports, CERN-ACC-2018-0058, Geneva, 2018. Submitted to Eur. Phys. J. ST.
- [6] I. Úlehla, M. Suk, and Z. Trka. *Atomy, jádra, částice*. První vydání. Academia, Praha, 1990.
- [7] Ch. Fabjan and F. Gianotti. *Calorimetry for Particle Physics*. CERN-EP/2003-075. Říjen, 2003.
- [8] C. Grupen and B. A. Shwartz. *Particle Detectors*. Second edition. Cambridge University Press, Cambridge, 2008.
- [9] M. Tanabashi *et al.* (Particle Data Group). *Review of particle physics*. Phys. Rev. D **98**, 030001, 2018.
- [10] <https://root.cern.ch/>.
- [11] Results from a combined test of an electromagnetic liquid argon calorimeter with a hadronic scintillating-tile calorimeter. ATLAS Collaboration. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 387 (1997) 333-351. PII: S0168-9002(97)00075-2.

Seznam obrázků

1.1	Schéma současné sítě urychlovačů v CERNu [1].	3
1.2	Letecký pohled zobrazující Ženevský komplex urychlovačů a možné umístění FCC [4].	4
1.3	Referenční detektor FCC-hh. Uprostřed je šedě znázorněn dráhový detektor, tmavě modře je znázorněn elektromagnetický kalorimetr, světle modře a zeleně hadronový kalorimetr. Fialově je znázorněn centrální solenoid, žlutě pak systém mionových komor. Šedě je znázorněno i radiační stínění okolo dopředných a zpětných částí detektoru [5].	5
1.4	Schéma referenčního detektoru FCC-hh s podrobným popisem jeho částí – podélný řez [5].	6
2.1	Geometrie barelového LAr elektromagnetického kalorimetru [5].	8
2.2	Modul barelového hadronového kalorimetru [5].	9
2.3	Geometrie endcapu LAr kalorimetru [5].	10
3.1	Histogramy rekonstruovaných energií pro pět původních energií pionových spršek v EM škále.	13
3.2	Závislost energetického rozlišení kalorimetru $\frac{\sigma_{E_{rec}}}{E_{rec}}$ na energii původní částice E_{true} v elektromagnetické škále.	14
3.3	Histogramy finálních rekonstruovaných energií pro pět původních energií pionových spršek.	16
3.4	Závislost energetického rozlišení kalorimetru $\frac{\sigma_{E_{final}}}{E_{final}}$ na energii původní částice E_{true} po korekci mocninnou funkcí.	17
3.5	Závislost poměru střední hodnoty rekonstruované energie $\frac{E_{rec}}{E_{true}}$ na skutečné energii. Červeně je energie v EM škále, černě E_{bench} před korekcí mocninnou funkcí a modře je E_{final} po korekci.	18
3.6	Porovnání závislosti energetického rozlišení kalorimetru. Červeně je závislost v EM škále, modře je závislost po kalibraci.	18