

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN
PRAGUE

Faculty of Nuclear Sciences and Physical
Engineering

Department of Physics



Bachelor thesis

**Simulation and design of sampling
electromagnetic calorimeter FOCAL**

Michal Kocan

Supervisor: RNDr. Petr Chaloupka, Ph.D.

Prague, 2015

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE
Fakulta Jaderná a Fyzikálně Inženýrská
Katedra Fyziky



Bakalářská práce

Simulace a návrh vzorkovacího
elektromagnetického kalorimetru
FOCAL
Michal Kocan

Vedoucí práce: RNDr. Petr Chaloupka, Ph.D.

Praha, 2015

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, software, atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 19.7.2015

.....

Michal Kocan

Title:

Simulation and design of sampling electromagnetic calorimeter FOCAL

Author: Michal Kocan

Specialization: Experimental nuclear physics

Sort of project: Bachelor thesis

Supervisor: RNDr. Petr Chaloupka, Ph.D.

Abstract: This thesis deals with principles of calorimetry and its application on a construction of forward electromagnetic calorimeter FoCal for the ALICE experiment on the LHC. In the first part is a description of properties of an electromagnetic cascade and an energy resolution of calorimeters. Next part deals with division of calorimeters by its construction and materials used for this construction. There is also a description of planned forward electromagnetic calorimeter FoCal and its comparison with forward electromagnetic calorimeter ECAL which is used in the LHCb experiment. The last part shows results from simulations with Geant4 of sampling electromagnetic calorimeters.

Key words: electromagnetic calorimetry, scintillator, FoCal, Geant4, simulations

Název práce:

Simulace a návrh vzorkovacího elektromagnetického kalorimetru FO-CAL

Autor: Michal Kocan

Zaměření: Experimentální jaderná a čisticová fyzika

Typ práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. Petr Chaloupka, Ph.D.

Abstrakt: Tato práce se zabývá principy kalorimetrie a jejich aplikace na konstrukci elektromagnetického kalorimetru FoCal pro experiment ALICE na LHC. Začátek práce pojednává o elektromagnetické kaskádě a o energetickém rozlišení kalorimetrů. V práci je také popsáno rozdělení kalorimetrů jak podle konstrukce, tak i podle použitých materiálů. Popsán je plánovaný návrh dopředného elektromagnetického kalorimetru FoCal pomocí křemíkových detektorů a jeho porovnání s dopředným kalorimetrem ECAL na LHCb. Poslední část práce je věnována simulacím různých řešení vzorkovacích kalorimetrů provedených programem Geant4.

Klíčová slova: elektromagnetická kalorimetrie, scintilátor, FoCal, Geant4, simulace

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat RNDr. Petru Chaloupkovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce.

Obsah

1 Kalorimetrie	13
1.1 Elektromagnetická kalorimetrie	13
1.1.1 Elektromagnetická kaskáda	14
1.1.2 Energetické rozlišení	16
1.2 Hadronová kalorimetrie	16
1.2.1 Hadronová kaskáda	16
1.2.2 Energetické rozlišení	17
2 Kalorimetry	18
2.1 Vzorkovací kalorimetry	18
2.1.1 Scintilační vzorkovací kalorimetry	19
2.1.2 Polovodičové vzorkovací kalorimetry	21
2.1.3 Kapalné vzorkovací kalorimetry	21
2.1.4 Plynné vzorkovací kalorimetry	21
2.2 Homogenní kalorimetry	21
2.2.1 Cherenkovy kalorimetry	22
2.2.2 Scintilační homogenní kalorimetry	22
2.2.3 Polovodičové homogenní kalorimetry	22
2.2.4 Vzácné plyny jako homogenní kalorimetru	22
3 Dopředný kalorimetru FoCal	24
3.1 Fyzikální motivace	24
3.2 Konstrukce FoCalu podle The FoCal Collaboration	25
3.3 FoCal a návrh podle FJFI	26
3.4 Elektromagnetický kalorimetru na LHCb	27
3.4.1 Detektor LHCb	27
3.4.2 Design ECALu na LHCb	28
4 Simulace elektromagnetického kalorimetru	31
4.1 Geant4	31
4.2 Má úprava zdrojového kódu	31
4.3 Simulace	33
4.4 FoCal podle FJFI	36

<i>OBSAH</i>	10
4.5 Simulace křemíkového detektoru	45
4.6 Výsledky ze simulací	47
5 Závěr	48

Seznam obrázků

1.1	a) Ztráta energie v olovu pro elektron a pozitron jako funkce energie. b) Fotonová interakce s olovem jako funkce energie. [11]	13
1.2	Schéma vývoje elektromagnetické kaskády. [12]	14
2.1	Zobrazení principu detekce různých druhů částic. [4]	19
2.2	Vytváření scintilace v organických scintilátorech. [14]	20
2.3	Vytváření scintilace v anorganických scintilátorech. [14]	20
3.1	Vznik partonů v urychlovaném jádře. Převzato z [19].	24
3.2	Detektor experimentu ALICE. Dopředný kalorimetrum má nahradit stávající PMD detektor(16.). Převzato z [5].	25
3.3	Plánovaná konstrukce FoCalu pomocí křemíkových detektorů. V detek- toru budou umístěny 2 křemíkové detektory s vysokým rozlišením. Zbylé křemíkové vrstvy budou s nízkým rozlišením. Převzato z [8].	26
3.4	Návrh optického vyčítání elektromagnetického kalorimetru FoCal. Převzato z [13].	27
3.5	Detektor LHCb, který zkoumá narušení CP symetrie a rozpad b kvarku. Převzato z [6].	28
3.6	a) Rozdelení ECALu na vnější, střední a vnitřní část. b) Detailní kon- strukce vnitřní části kalorimetru ECAL. Převzato z [15].	29
3.7	Nahoře vlevo vidíme sestavený vnitřní, střední a vnější modul. Na ve- dlejší fotografii jsou zobrazeny jednotlivé vrstvy kalorimetru: TYVEC, scintilátor a olovo. Na dolních obrazcích jsou připravené scintilační vrstvy a posunovače vlnové délky zahnuté do U. Převzato z [7].	30
4.1	Rozdelení kalorimetru na 4 části v programu Geant4. Do kalorimetru byl na ukázku puštěn 1GeV elektron. Výsledek je zobrazený programem Qt visualization.	32
4.2	Výsledný 2D histogram aktivní vrstvy pro 100 GeV foton v simulovaném kalorimetru z 20 vrstev. Aktivní vrstva je 4 mm tlustý scintilátor a ab- sorbér je olovo o jedné radiační délce. Uložená energie v jednotlivých pixelech je v jednotkách MeV. Pixel má rozměry 0,125 x 0,125 mm ² .	33
4.3	Graf k určení Moliérova poloměru z dat získaných simulací v programu Geant4. Moliérův poloměr je zde 11 mm.	34

4.4	Simulace kalorimetru ECAL na experimentu LHCb.	35
4.5	Simulované energetické rozlišení kalorimetru ECAL na experimentu LHCb. .	36
4.6	Simulace FoCalu navrženého v předchozích pracích. Simulováno bylo 40 vrstev, kde jako absorbér byl použit 1,5 mm silný wolfram a jako aktivní vrstva 0,5 mm silný scintilátor. Nalétávající částice byl foton o energii 100 GeV.	37
4.7	Závislost uložené energie na tloušťce scintilátoru d pro foton o energii $E_0=100$ GeV. Jako absorbér bylo použito olovo a wolfram o jedné radiační délce.	40
4.8	Závislost Moliérova poloměru na tloušťce scintilátoru d pro foton o energii $E_0=100$ GeV. Jako absorbér bylo použito olovo a wolfram o jedné radiační délce. Výpočet Moliérova poloměru byl prováděn až po skončení simulace z důvodu pomalosti jeho výpočtu. Uvedený poloměr je tak pouze průměrná hodnota po tisíci pokusech.	41
4.9	Energetické rozlišení pro různé absorbéry a velikost scintilační vrstvy. .	42
4.10	Fitování deponované energie pro určení energetického rozlišení. Ukázka zpracovávání dat pro konfiguraci wolframu a 4 mm scintilátoru.	44
4.11	Zobrazení simulovaného křemíkového detektoru a 100 GeV fotonu. Velikost křemíkových padů je $10 \times 10 \times 0,5$ mm ³ . Křemíkové pady jsou vyčítány 1,5 mm silným kaptonem. Jako absorbér je použit wolfram o jedné radiační délce a celkově 20 vrstev. Zelená barva znázorňuje fotony, červená elektrony a modrá pozitrony.	45
4.12	Energetické rozlišení pro křemíkový detektor, jedna vrstva křemíku na jednu radiační délku wolframu, před a po vyčtení.	46
4.13	Energetické rozlišení pro křemíkový detektor, jedna vrstva křemíku na půl radiační délky wolframu, před a po vyčtení.	47

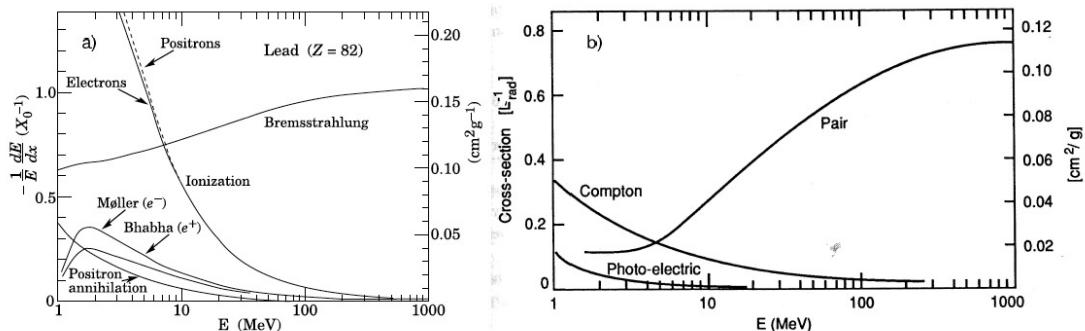
Kapitola 1

Kalorimetrie

Kalorimetrii dělíme obecně na elektromagnetickou a hadronovou. Elektromagnetická měří částice interagující pouze elektromagnetickou silou. Hadronová pak měří částice interagující silnou a elektromagnetickou silou. K změření energie nalétávající částice využívá kalorimetrie přeměnu kinetické energie původní částice na měřitelnou veličinu. Částice pomocí elektromagnetické nebo silné interakce vytvoří spršku částic s nižší energií, které je možné změřit ve formě světla nebo elektrického náboje.

1.1 Elektromagnetická kalorimetrie

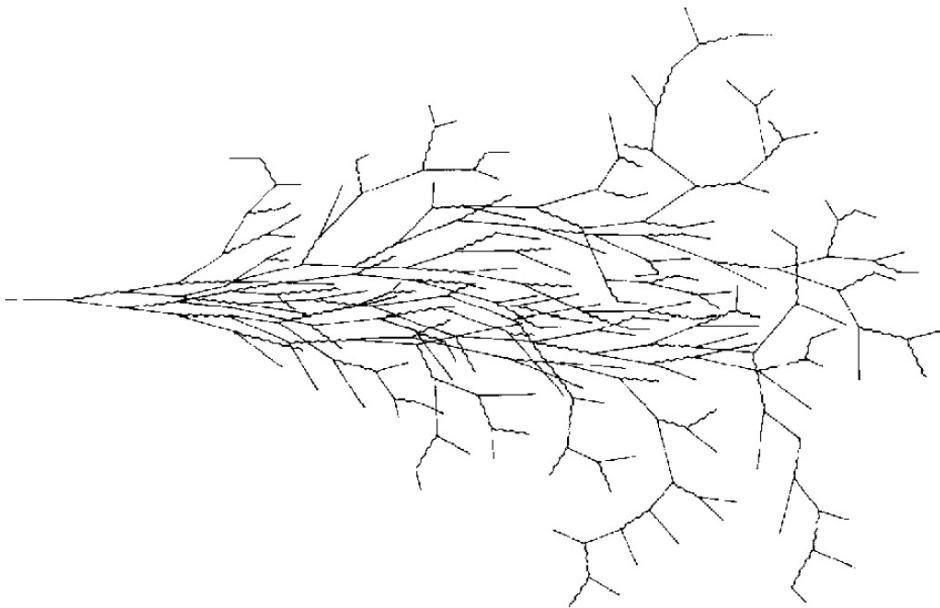
Elektron a pozitron při průchodu kalorimetrem ztrácí energii dvěma způsoby. První způsob je brzdné záření (Bremsstrahlung), které je dominantní při vyšších energiích. Při nižších energiích ztrácí elektron nebo pozitron energiích především excitací a ionizací. Foton při dostatečné energii vytváří elektron-pozitronový pár. Při nízkých energiích dochází k fotoelektrickému jevu a Comptonovu efektu. Ztráty energie jednotlivých částic jsou zobrazeny na obrázku 1.1.



Obrázek 1.1: a) Ztráta energie v olovu pro elektron a pozitron jako funkce energie. b) Fotonová interakce s olovem jako funkce energie. [11]

1.1.1 Elektromagnetická kaskáda

K znázornění vývoje elektromagnetické kaskády použijeme jako nalétávající částici elektron o dostatečné energii. Při průletu elektronu Coulombickým polem jádra se zakřivuje dráha letu a dochází tak ke ztrátě energie. Ztracená energie je vyzářena ve formě fotonu. Má-li tento foton dostatečnou energii, minimálně dvojnásobek kladové hmotnosti elektronu, dochází k rozpadu fotonu za tvorby elektronu a pozitronu o stejných energiích. Mají-li tyto částice opět dostatečnou energii, emitují fotony. Tento vývoj probíhá tak dlouho, dokud neklesne energie částic pod tzv. kritickou energii ϵ . Vývoj elektromagnetické kaskády vzniklé těmito jevy je zobrazen na obrázku 1.2.



Obrázek 1.2: Schéma vývoje elektromagnetické kaskády. [12]

K popisu vlastností elektromagnetické kaskády se používá radiační délka X_0 . Radiační délka závisí na volbě materiálu a definujeme ji jako průměrnou vzdálenost x , kterou elektron musí urazit, aby jeho původní energie E_0 klesla o $1/e$.

$$\langle E(x) \rangle = E_0 e^{-\frac{x}{X_0}} \quad (1.1)$$

V tomto vztahu $\frac{x}{X_0}$ označujeme písmenem t a nazýváme hloubkou materiálu k radiační délce. Radiační délku lze odhadnout vztahem (1.2). [11]

$$X_0(\text{gcm}^{-2}) \simeq \frac{716 \text{gcm}^{-2} A}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})} \quad (1.2)$$

Z je atomové číslo a A je atomová hmotnost daného materiálu.

Pro foton obdobně definujeme radiační délku X_{gamma} jako pokles intenzity svazku fotonů o $1/e$.

$$\langle I(x) \rangle = I_0 e^{-\frac{x}{X_\gamma}} \quad (1.3)$$

Radiační délka fotonu je větší než radiační délka elektronu nebo pozitronu, $X_{gamma} = \frac{9}{7} X_0$.

Klesne-li energie částice z elektromagnetické kaskády na takovou úroveň, při které se ztráta z ionizace a brzdného záření rovnají, nazýváme tuto energii kritickou energií. Například pro olovo je kritická energie $\epsilon_{Pb} \doteq 7,5 \text{ MeV}$, viz obrázek 1.1. Pro pevné látky lze kritickou energii approximovat vztahem (1.4). [11]

$$\epsilon = \frac{610 \text{ MeV}}{Z + 1,24} \quad (1.4)$$

Maximum elektromagnetické kaskády, nebo-li hloubku ve které se nachází největší počet druhotných častic, vypočteme vztahem (1.5).

$$t_{max} \simeq \ln \frac{E_0}{\epsilon} + t_0 \quad [X_0] \quad (1.5)$$

Pro elektrony a pozitrony $t_0 = -0,5$ a pro fotony $t_0 = 0,5$, t_{max} udáváme v radiační délce. K změření 95% energie měřené částice je potřeba přibližně

$$t_{95\%} \simeq t_{max} + 0,08Z + 9,6 \quad (1.6)$$

radiačních délek dlouhý kalorimetru. [11]

Při vytváření kaskády dochází k rozletu častic. Úhel rozletu častic se zvětšuje s počtem častic v kaskádě. Tento úhel můžeme popsat vztahem (1.7).

$$\langle \Theta \rangle \simeq \frac{m_e}{E(t)} \quad (1.7)$$

$E(t)$ je energie dané částice. Ze vzorce je patrné, že k největšímu rozptylu bude docházet právě při kritické energii.

Důležitým parametrem elektromagnetické kaskády je také Moliérův poloměr, který udává vzdálenost od středu kaskády, kde je uloženo 90% energie nalétávající částice. Moliérův poloměr lze approximovat pomocí vztahu (1.8). [11]

$$R_M(\text{g/cm}^2) \simeq 21 \text{ MeV} \frac{X_0}{\epsilon(\text{MeV})} \quad (1.8)$$

Z tohoto vztahu je patrné, že Moliérův poloměr nezávisí na energii nalétávající částice, ale na volbě materiálu kalorimetru.

1.1.2 Energetické rozlišení

Kalorimetry měří energii zanechanou v detektoru nabitými částicemi ionizací a excitací. Tato naměřená energie je úměrná původní energii částice. Celková délka kaskády T_0 , která je definovaná jako celková délka ionizačních drah všech nabitých částic z kaskády, je úměrná radiační délce násobené počtem všech částic elektromagnetické kaskády N .

$$T_0(g/cm^2) \sim X_0 N \quad (1.9)$$

Celkový počet částic v elektromagnetické kaskádě spočteme vztahem (1.10).

$$N = \frac{E_0}{\epsilon} \quad (1.10)$$

Celkovou energii částice tedy můžeme určit naměřením ionizační energie převedené aktivní vrstvou na náboj nebo světlo. Při měření dochází k fluktuaci celkové délky spršky T_0 . Jelikož je vývoj elektromagnetické kaskády náhodný proces, můžeme určit, že energetické rozlišení dané fluktuací v závislosti na energii je

$$\frac{\sigma(E)}{E} \sim \frac{1}{\sqrt{T_0}} \sim \frac{1}{\sqrt{E_0}}. \quad (1.11)$$

Ke zhoršení energetického rozlišení také přispívají úniky energií nebo interakce s konstrukcí experimentu. K únikům energie dochází podélne nebo bočně. Při podélném úniku délka kalorimetru nepohltí celou energii částice. Při bočním úniku se elektromagnetická sprška vyvíjí vně kalorimetru a není tak možná kompletní rekonstrukce původní energie. Ve skutečných kalorimetrech je celkové energetické rozlišení často parametrickováno vztahem (1.12).

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c \quad (1.12)$$

Parametr a je stochastický člen a je závislý na fluktuaci vývoje kaskády. Parametr b je tzv. šumový člen, který odpovídá šumu elektroniky. Parametr c je konstantní člen, který odpovídá nehomogenitě, nelineárnosti a špatné kalibraci kalorimetru.

1.2 Hadronová kalorimetrie

Hadronové kalorimetry měří energii častic, které interagují převážně silně a vytvářejí hadronovou spršku. Mezi měřené částice patří protony, piony a kaony. Hadronové kalorimetry se dříve používaly ke studiu kosmického záření.

1.2.1 Hadronová kaskáda

Obdobně jako u elektromagnetické kaskády, dochází i zde při interakci s materiélem kalorimetru k tvorbě sekundárních častic s nižšími energiami, a to především silnou interakcí. K popisu hadronové kaskády se používá délka jaderné interakce λ_l . Délka

jaderné interakce je definována jako střední vzdálenost, na které se počet částic ve svazku sníží o $\frac{1}{e}$. Jaderná délka je oproti radiační délce mnohonásobně delší, a proto je nutná větší velikost hadronových kalorimetru oproti kalorimetru elektromagnetickým. Například pro olovo je radiační délka $X_0 = 6,37 \text{ g cm}^{-2}$ a jaderná délka $\lambda_l = 199,6 \text{ g cm}^{-2}$. [1] Převodem na centimetry dostaneme rozdíl 17 cm. Délku jaderné interakce můžeme přibližně určit vztahem (1.13). [12]

$$\lambda_l \approx 35 \text{ g cm}^{-2} A^{\frac{1}{3}} \quad (1.13)$$

Při vývoji hadronové kaskády vznikají především piony. Piony jsou π^+ , π^- a π^0 . Každý z pionů vzniká přibližně se stejnou pravděpodobností. Neutrální pion se okamžitě rozpadá na dva fotony, které vytvářejí elektromagnetickou subkaskádu. Jelikož π^{+-} pouze ionizují své okolí, je původní energie převedena na π^0 a následně na elektromagnetickou kaskádu. Na rozdíl od elektromagnetické kaskády, kde je většina energie uložena v aktivním médiu, dochází u hadronové kaskády ke ztrátě energie, protože část hadronové energie je spotřebována k překonání vazebné energie jádra. Při překonávání vazebné energie jádra dochází k produkci pomalých částic, které jsou u vzorkovacích kalorimetru pohlceny absorbérem, a tak není možné změřit jejich energii.

1.2.2 Energetické rozlišení

Energetické rozlišení hadronových kalorimetru je oproti elektromagnetickým, z důvodu velkých fluktuací ve vývoji hadronové kaskády, horší. Dobré hadronové vzorkovací kalorimetry dosahují energetického rozlišení (1.14). [12]

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{35\%}{\sqrt{E[\text{GeV}]}} \quad (1.14)$$

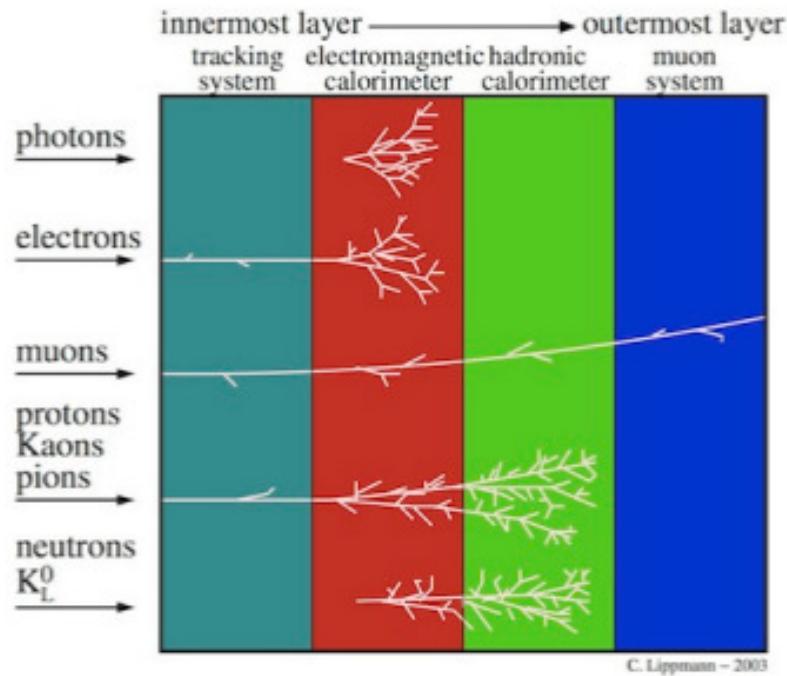
Kapitola 2

Kalorimetry

Kalorimetry rozdělujeme na homogenní nebo vzorkovací. U homogenních kalorimetru dochází k tvorbě kaskády a měření energie ve stejném materiálu. Vzorkovací kalorimetru je tvořen absorbérem a aktivní vrstvou. V absorbéru dochází k tvorbě sekundárních částic, které jsou měřeny aktivní vrstvou. Hlavní výhodou kalorimetru je možnost měření energie neutrálních částic např. fotonů nebo neutronů. Princip detekce jednotlivých částic je zobrazen na obrázku 2.1. Kalorimetry jsou dále vhodné u vysokoenergetických experimentů, protože energetické rozlišení se společně se zvyšující se energií zlepšuje. Výhodou je i prostorová úspornost, protože délka spršky se zvětšuje pouze logaritmicky v závislosti na energii. Nevýhodou kalorimetru je zničení původní částice, a tím nemožnost dalšího měření.

2.1 Vzorkovací kalorimetry

Vzorkovací kalorimetry mají obvykle horší energetické rozlišení než homogenní kalorimetry. Toto energetické rozlišení se pohybuje v rozmezí $5\% - 20\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$. [11] Oproti homogenním kalorimetru pak nabízejí lepší prostorové umístnění a identifikaci částic. V závislosti na druhu aktivního média rozdělujeme kalorimetry na scintilační, plynné, polovodičové a kapalné. Jako absorbér se nejčastěji používá olovo, železo, měď nebo wolfram.



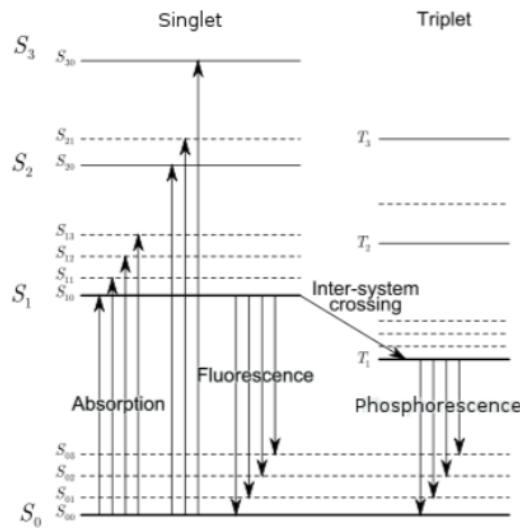
Obrázek 2.1: Zobrazení principu detekce různých druhů částic. [4]

2.1.1 Scintilační vzorkovací kalorimetry

Aktivní vrstva u scintilačních vzorkovacích kalorimetrů je tvořena scintilátorem, který při deexcitaci produkuje světlo. Scintilátory jsou organické nebo anorganické. Organické scintilátory mají rychlou odezvu, ale produkují slabý světelný výtěžek. Anorganické scintilátory produkují silný světelný výtěžek a lineární signál, ale mají pomalou odezvu.

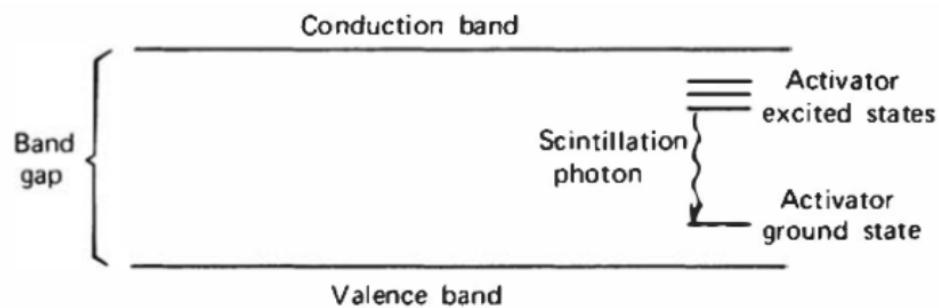
Organické scintilátory se obvykle skládají ze dvou nebo tří složek, rozpouštědla a rozpouštěné scintilační látky. Jako rozpouštědla se například používají minerální oleje, ve kterých je rozpouštěno velmi malé množství scintilační látky, tzv. fluory. Při interakci částice s kalorimetrem tak dochází k excitaci molekul rozpouštědla, které následně excitují scintilační příměs a dochází tak k produkcii signálu. Jako třetí látka se do kalorimetru může přidat posunovač vlnové délky. Odezva scintilátoru sice dosahuje pár nanosekund, ale nevýhodou je, že produkce světla vzhledem k malému množství scintilační příměsi dosahuje nízkých hodnot. Organické scintilátory mají velkou radiační délku, a tak se hodí především pro vzorkovací kalorimetry. Vytváření scintilace organických scintilátorů je zobrazené na obrázku 2.2

U **anorganických scintilátorů** závisí produkce světla na krystalické struktuře



Obrázek 2.2: Vytváření scintilace v organických scintilátorech. [14]

daného materiálu. Interagující částice vytváří pár elektron-díra ve valenčním a vodivostním pásu materiálu. Foton je následně emitován vracejícím se elektronem do valenčního pásu. Rychlosť odezvy a frekvence vyzařování fotona závisí na velikosti mezery mezi valenčním a vodivostním pásem, a také na pohybu elektronu na mřížce materiálu. K zvýšení produkce světla a k zrychlení odezvy se na krystaly přidávají příměsi. Nejpoužívanější je thallium, které vytvoří další aktivní prostor v mezeře mezi valenčním a vodivostním pásem. Tento prostor může být následně zaplněn elektrony z vodivostního pásu. Tím se zvýší pravděpodobnost emise fotona a zrychlí se i odezva. Vytváření scintilace anorganických scintilátorů je zobrazeno na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Vytváření scintilace v anorganických scintilátorech. [14]

2.1.2 Polovodičové vzorkovací kalorimetry

Mezi nejčastěji používané polovodiče patří křemík a germanium. Mezi jejich výhody patří vyšší hustota, než je hustota plynných kalorimetru, a tím pádem jejich kompaktnější rozměry. Mezi nevýhody patří vysoká cena a slabá radiační odolnost. Křemíkové detektory se nejčastěji používají spolu s wolframem jako absorbérem. Energie je v těchto kalorimetech deponována tvorbou páru elektron-díra ve valenčním a vodivostním pásu materiálu, které způsobí zvýšení elektrického signálu. Energie W , která je potřebná k vytvoření páru elektron-díra při teplotě 77 K, je 3,6 eV pro křemík a 2,9 eV pro germanium. Počet vytvořených párů elektron-díra při stejné energii E_0 je pokaždé téměř stejný a počet N_{ed} je dán vztahem (2.1).

$$N_{ed} \simeq \frac{E_0}{W} \quad (2.1)$$

Energetické rozlišení polovodičového kalorimetru je dán vztahem (2.2).

$$\frac{\sigma}{E} \approx \frac{\sqrt{F}}{\sqrt{N_{ed}}} \quad (2.2)$$

F označuje Fano faktor, který je například pro germanium přibližně 0,13. [11]

2.1.3 Kapalné vzorkovací kalorimetry

Kapalné vzorkovací kalorimetry rozdělujeme podle provozní teploty na teplé, pracující o pokojové teplotě a kryogenní. Teplé kalorimetry se vyznačují špatnou radiační odolností. Kryogenní kalorimetry se využívají ve vysokoenergetických experimentech a nejčastěji používaný materiál na aktivní vrstvu je argon. Jejich nevýhodou je nutnost chlazení, které zabírá prostor experimentu.

2.1.4 Plynné vzorkovací kalorimetry

Plynné kalorimetry byly hojně využívány v dřívějších dobách. Umožňují dobrou segmentaci a vyznačují se nízkou cenou. Správné fungování ale závisí na mnoha detailech: na správném průměru, na umístnění kabelů, tlaku plynu, teplotě atd. Z těchto důvodů byly později nahrazeny jinými typy kalorimetru.

2.2 Homogenní kalorimetry

Homogenní kalorimetry se vyznačují výborným energetickým rozlišením, jelikož veškerá energie částice je uložena v aktivním médiu. Mezi nevýhody patří velká interakční délka materiálu, a tím velké rozměry detektoru. Homogenní kalorimetry rozdělujeme na 4 typy: polovodičové, Cherenkovy, scintilační a ty ze vzácných plynů.

2.2.1 Cherenkovy kalorimetry

Cherenkovy kalorimetry jsou tvořeny průhledným materiálem, ve kterém nabité částice vytvářejí Cherenkovo záření. Nejčastěji používaným materiálem je olovnaté sklo. Cherenkovo záření vzniká při průchodu částice materiálem rychlostí vyšší, než je rychlosť světla v daném materiálu. Používají se především k rozpoznaní dané částice, protože emise Cherenkova záření závisí nejen na rychlosti, ale také na hybnosti částice. V kalorimetrii se používá k měření relativistických elektronů a pozitronů. Mezi výhody olovnatého skla patří nízká cena a možnost snadné manipulace, proto byl dříve využíván při vysokoenergetických experimentech. K nevýhodám patří jeho špatná odolnost vůči radiaci, a proto se dnes využívá fluorid olovnatý, který je vůči radiaci odolnější. K dalším výhodám patří menší radiační délka a vyšší účinnost. Energetické rozlišení Cherenkových kalorimetrů je v porovnání s ostatními homogenními kalorimetry horší, což je způsobeno malým světelným výtěžkem, který je v porovnání se scintilátorem 10^4 krát menší.

2.2.2 Scintilační homogenní kalorimetry

Z důvodu nižší potřebné energie k vytvoření páru elektron-díra, než-li k vytvoření Cherenkova záření, produkují homogenní scintilační kalorimetry mnohonásobně větší výtěžek světla. Díky čemuž mají lepší energetické rozlišení. Ke zhoršení energetického rozlišení přispívá fakt, že krystaly materiálu nejsou stejně. Proto se musí provádět kalibrace, bez které by docházelo k velkému zhoršení energetického rozlišení. V minulosti patřil mezi nejčastěji používaný materiál jodid sodný s příměsí thallia, který je levný a poskytuje velký světelný výtěžek. Mezi nevýhody patří hydroskopičnost a velká radiační délka. Na velkých experimentech tak byly upřednostňovány jiné látky, jako jsou BGO a PbWO_4 . Používaný je i jodid cesný, který má krátkou radiační délku a po přidání thallia poskytuje druhý největší světelný výtěžek. Pro urychlovač LHC se však zvolilo PbWO_4 , které má velmi krátkou radiační délku, je rychlé a odolává dobře radiaci.

2.2.3 Polovodičové homogenní kalorimetry

Nejčastěji používané polovodiče jsou křemík a germanium. Polovodičové homogenní kalorimetry jsou málo používané ve vysokoenergetických experimentech z důvodu vysoké ceny. Naopak se hodí pro nízkoenergetické experimenty vzhledem k výbornému energetickému rozlišení. Často jsou používány ve fotonové spektroskopii.

2.2.4 Vzácné plyny jako homogenní kalorimetr

Interagující částice při průletu plynem ztrácí energii ionizací i scintilací. Na každý jev je uvolněno přibližně stejné množství energie. Nejlepšího energetického rozlišení by se dosáhlo měřením náboje i světla, ale z důvodu technické a geometrické obtížnosti nebyl dosud tento postup u velkoformátových kalorimetrů použit. Pro homogenní kalorimetry

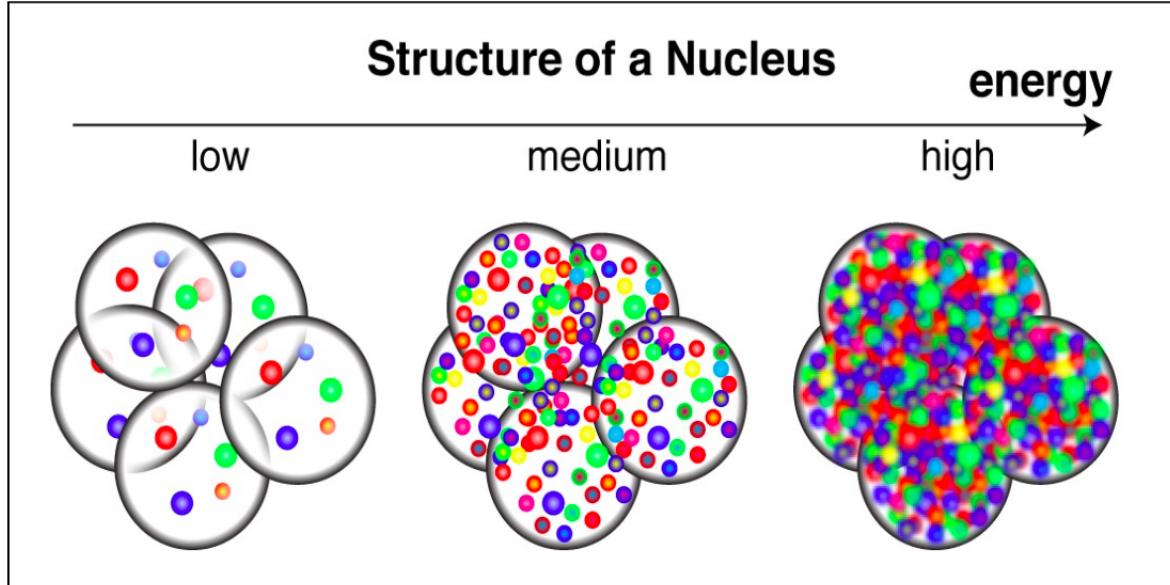
se nejčastěji používá, vzhledem k jeho krátké radiační délce, krypton. Lepší volbou by byl xenon, který je ale v přírodě málo zastoupený, a tak velmi drahý. Vzácné plyny mají dobrou odolnost vůči radiaci a rychlou odezvu. Nevýhodou je nutnost kryogeneze a čištění.

Kapitola 3

Dopředný kalorimetr FoCal

3.1 Fyzikální motivace

K pochopení vysokoenergetického rozptylu $p+p$ nebo $p+A$ potřebujeme znát hustotu partonů, kvarků a gluonů v protonu. Partonová distribuční funkce (PDF), která popisuje rozložení partonů, je dobře známá pro méně energetické protony, než jsou v $p + p$ nebo $p + A$ srážkách na LHC. S vyšší energií urychlovače LHC máme možnost zkoumat distribuční funkci pro velmi malé frakce hybnosti jádra x a velké přenesené hybnosti Q^2 . Díky tomu budeme lépe rozumět tvorbě částic ve vysokoenergetické fyzice. Nárůst partonů v nukleonech s nárůstem energie je znázorněn na Obr. 3.1.

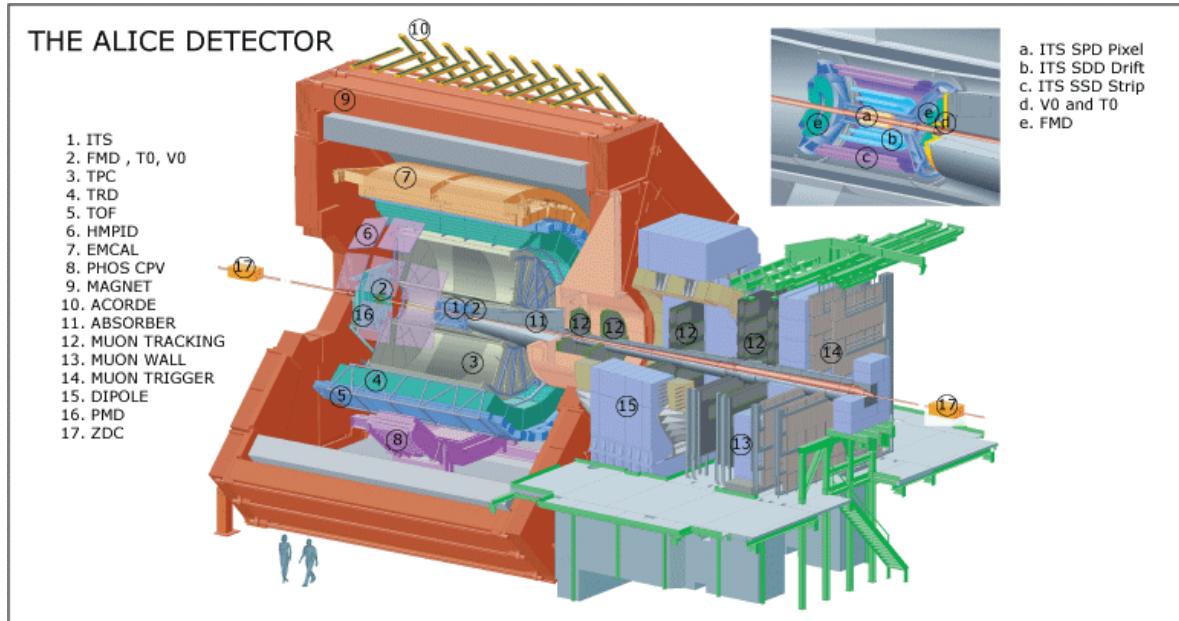


Obrázek 3.1: Vznik partonů v urychlovaném jádře. Převzato z [19].

Kalorimetru FoCal by měl

- měřit fotony v pseudorapiditě $2,5 < \eta < 4,5$ pro energie až 500 GeV,
- rozeznat přímé fotony od neutrálních pionů ($\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$) pro různé hybnosti,
- použítí pro srážky $p + p$, $p + A$ a $A + A$,
- nahradit stávající PMD (Photon Multiplicity Detector) ve vzdálenosti 3,5 m od interakčního bodu. [9]

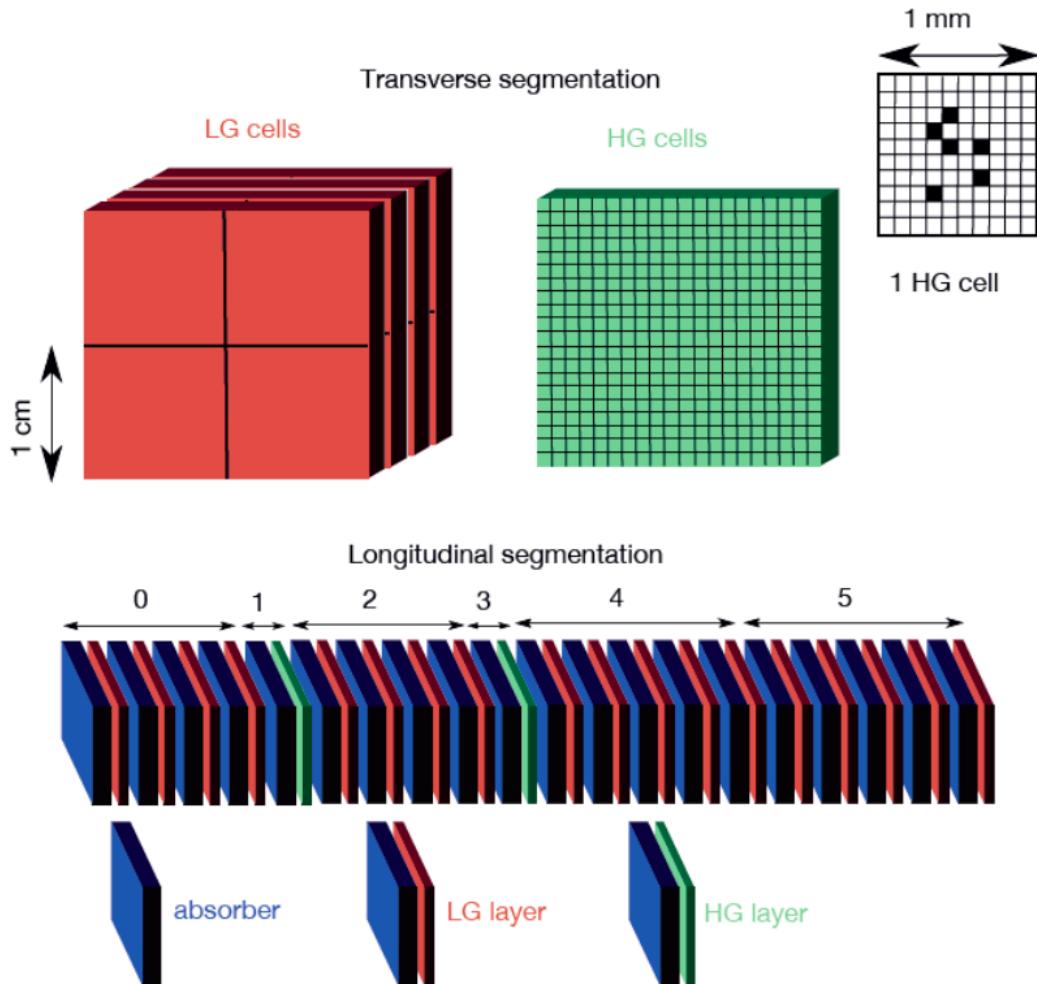
Umístnění v celém experimentu ALICE je zobrazeno na Obr. 3.2.



Obrázek 3.2: Detektor experimentu ALICE. Dopředný kalorimetru má nahradit stávající PMD detektor(16.). Převzato z [5].

3.2 Konstrukce FoCalu podle The FoCal Collaboration

FoCal by měl být postaven z wolframu a křemíku. Absorbér bude tvořen 3 mm silnými pláty wolframu a aktivní vrstva bude z 0,3 mm silných křemíkových detektorů. [9] Celkový počet vrstev bude 25, což odpovídá 22 radiačním délkám. Kalorimetru bude rozdělen na 177 částí, tzv. věží, které budou poskládány do disku kolem přívodní trubice. Každá věž bude o rozměrech $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ a bude nezávislá na ostatních. Jednotlivé vrstvy wolframu a křemíku budou zajištěny pomocí lepidla. Návrh můžeme vidět na Obr. 3.3.



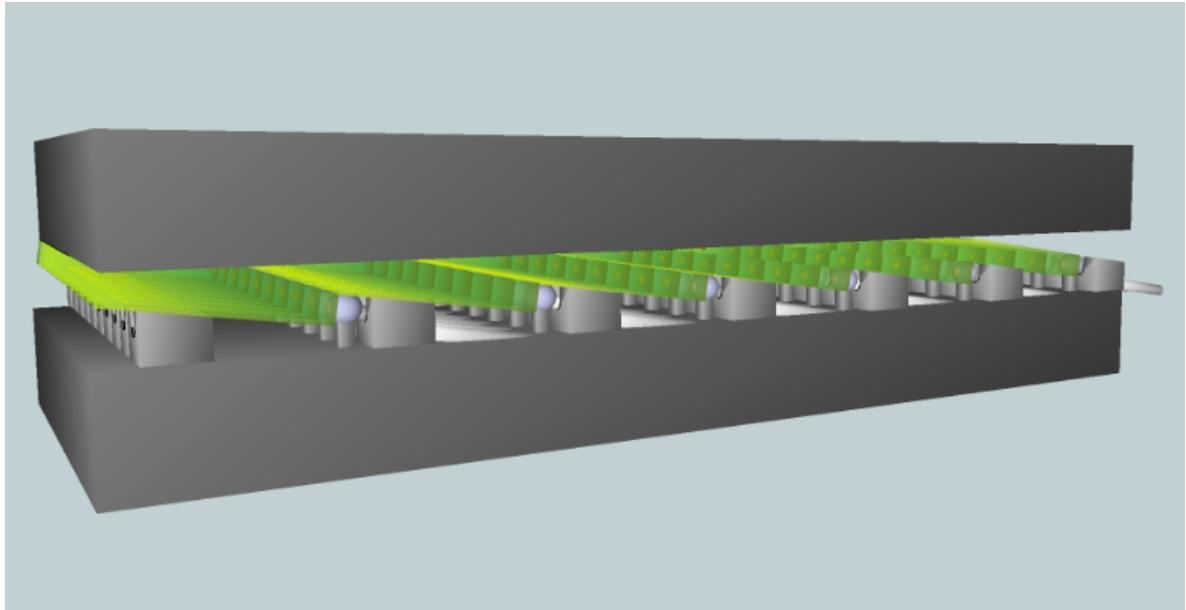
Obrázek 3.3: Plánovaná konstrukce FoCalu pomocí křemíkových detektorů. V detektoru budou umístěny 2 křemíkové detektory s vysokým rozlišením. Zbylé křemíkové vrstvy budou s nízkým rozlišením. Převzato z [8].

Křemíkové detektory budou ve dvou verzích: jemně segmentované a málo segmentované. Jemně segmentovaný detektor bude umístěn v 5. a 10. aktivní vrstvě. Nebude sloužit k měření deponované energie, ale bude sloužit k identifikaci jednotlivých kaskád. V méně segmentovaných vrstvách bude měřena deponovaná energie.

3.3 FoCal a návrh podle FJFI

Návrh podle FJFI uvažuje o nahrazení křemíkových detektorů scintilátory. Nahrazení křemíkových detektorů scintilátorem má hned několik výhod. Mezi ně patří nepotřebnost přídavného chlazení a stálého elektrického napětí. Scintilátor má také lepší radiační odolnost, a proto je pro dopřednou fyziku vhodnější. Kalorimetru je vyčítán

pomocí optických vláken, které jsou přivedeny k jednotlivým segmentům scintilační vrstvy. K lepšímu optickému vyčítání se na konec optického vlákna připevní kulička, či jiné zařízení. Optická vlákna budou přivedena k vysokorychlostní kameře, která z intenzity světla určí množství deponované energie. Jeden z návrhů vyčítacího systému je zobrazen na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Návrh optického vyčítání elektromagnetického kalorimetru FoCal. Převzato z [13].

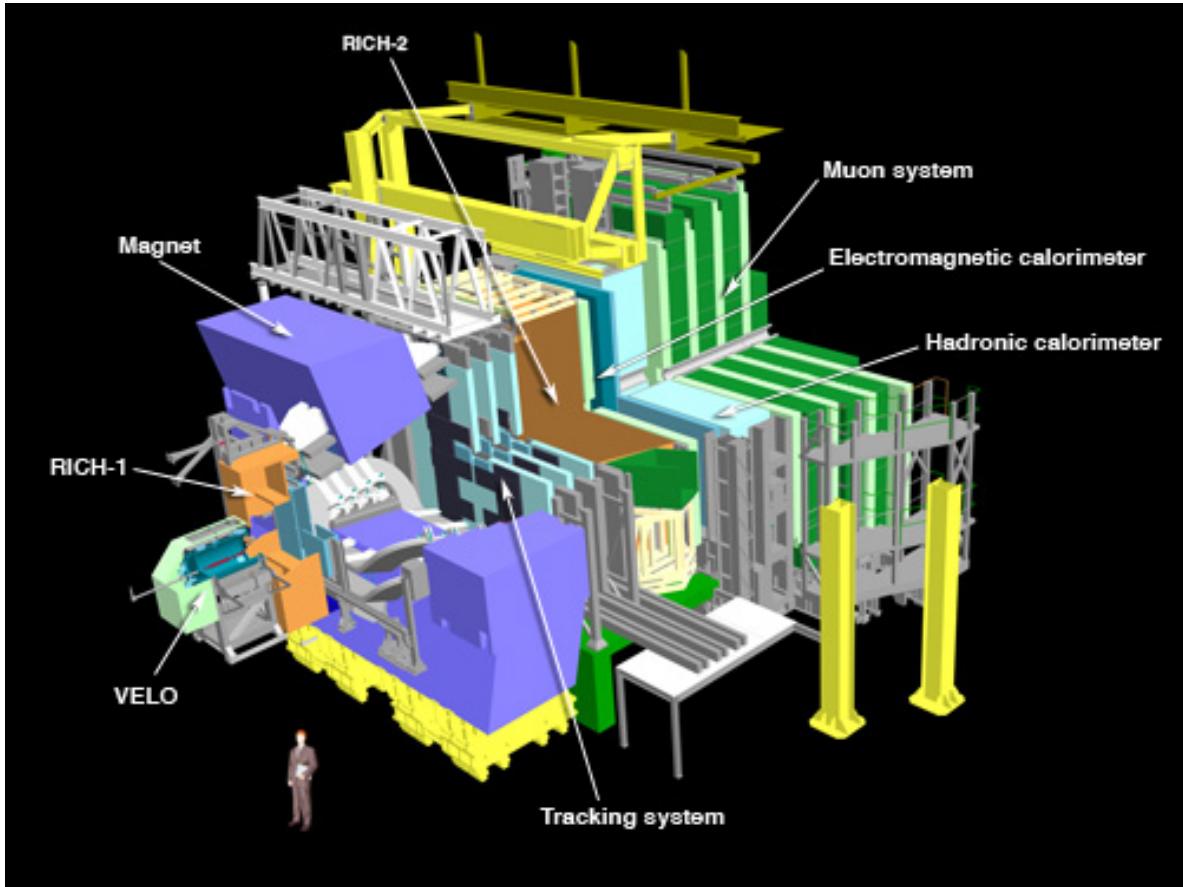
3.4 Elektromagnetický kalorimetr na LHCb

3.4.1 Detektor LHCb

Detektor LHCb je dopředný spektometr, který studuje narušení CP-symetrie a rozpad b kvarku. K tomuto účelu je zapotřebí elektromagnetický kalorimetr ECAL. Na ECAL byly podobné požadavky jako nyní na FoCal:

- rozpoznat vysokoenergetické fotony od neutrálních pionů,
- dobré energetické rozlišení $\sigma_E/E(\text{GeV}) = 10\%\sqrt{E}$,
- a rychlá odezva.

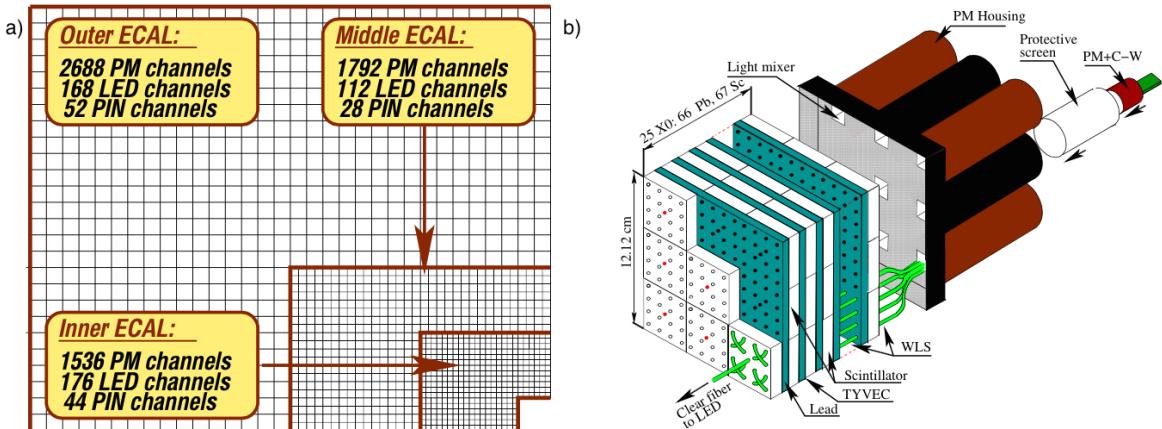
Detektor LHCb je zobrazen na obrázku 3.5.



Obrázek 3.5: Detektor LHCb, který zkoumá narušení CP symetrie a rozpad b kvarku. Převzato z [6].

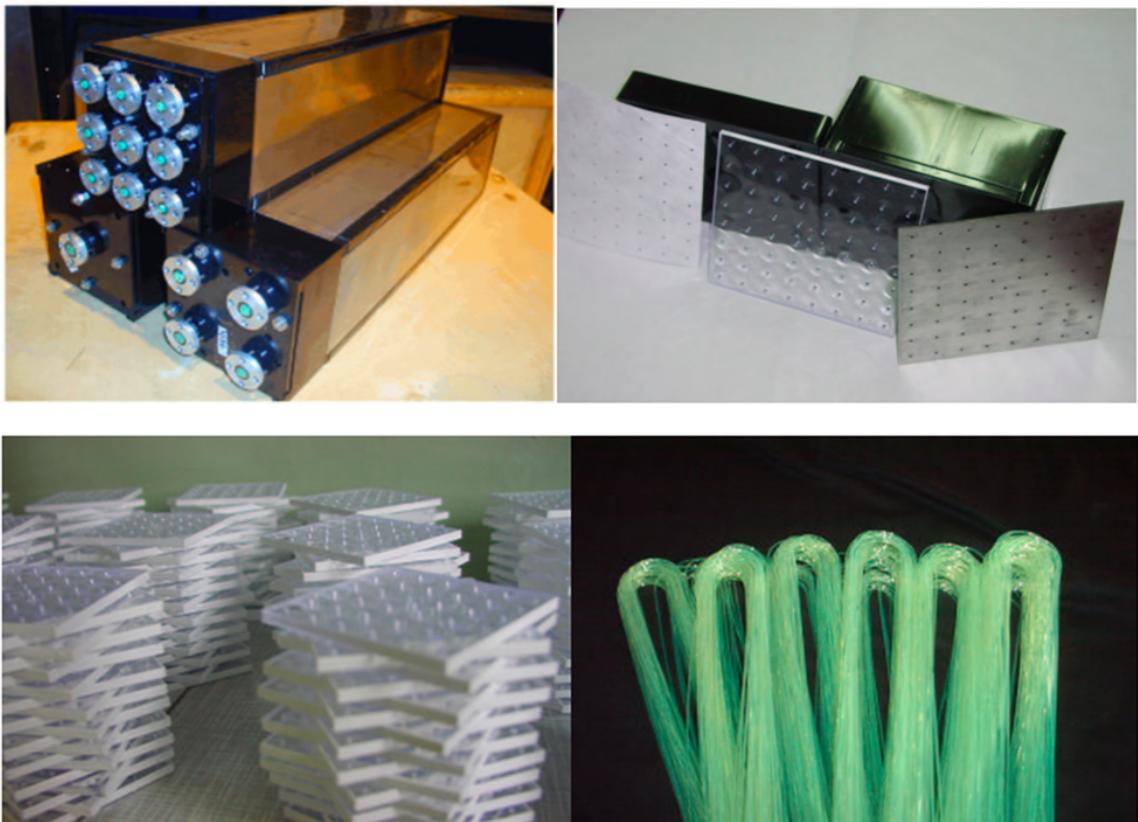
3.4.2 Design ECALu na LHCb

ECAL je, podobně jako náš návrh, scintilační vzorkovací kalorimetru. Kalorimetr je umístěn ve vzdálenosti 12,5 m od bodu interakce a jeho rozměry jsou $7,8 \times 6,3 \text{ m}^2$. Kalorimetr je rozdělen na vnitřní, střední a vnější část. Jednotlivé části se skládají ze stejně velkých modulů, $12,12 \times 12,12 \text{ cm}^2$, které se liší různým segmentováním, jak je patrné z obrázku 3.6-a). Vnitřní modul se dělí na 9 samostatných vyčítacích částí, střední modul na 4 a vnější modul je jedna samostatná vyčítací část. Každý modul je tvořen 66 olověnými vrstvami a 67 scintilačními vrstvami. Tloušťka olova je 2 mm a scintilátoru 4 mm. Celková tloušťka je 42 cm, což odpovídá 25 radiačním délкам. Moliérův poloměr je 3,5 cm. Energetické rozlišení vnitřní části je $\sigma_E/E(\text{GeV}) = (8,2 \pm 0,4) \%/\sqrt{E} + (0,87 \pm 0,07) \%$ a vnější části $\sigma_E/E(\text{GeV}) = (9,4 \pm 0,2) \%/\sqrt{E} + (0,83 \pm 0,02)\%$. ECAL vytvoří přibližně 3000 elektronových fotonů na 1 GeV. [15]



Obrázek 3.6: a) Rozdělení ECALu na vnější, střední a vnitřní část. b) Detailní konstrukce vnitřní části kalorimetru ECAL. Převzato z [15].

Konstrukce vnitřního modulu je zobrazena na obrázku 3.6-b). Modul je rozdělen na 9 jednotlivých vyčítacích částí. K tomu jsou scintilační vrstvy rozděleny na dlaždice, které jsou chemicky zmatněny. Chemické zmatnění slouží k lepší efektivitě, a také aby nedocházelo k průniku světla mezi jednotlivými dlaždicemi. Mezi vrstvy olova a scintilátoru je také přidáván tenký papír TYVEC, který má reflexivní vlastnosti. Vyčítání probíhá pomocí posunovačů vlnových délek, které prochází skrz jednotlivé vrstvy olova a scintilátoru. Tato konstrukce se nazývá shashlik. [7] Jednotlivé posunovače jsou ke zlepšení efektivity zahnuty do tvaru U, takže každý posunovač prochází detektorem dvakrát. Vlákna posunovače jsou na konci kalorimetru spojeny a přivedeny na fototonásobič. Skrz konstrukci také procházejí vlákna, která jsou přivedena k LED světlu, které slouží jako kontrola správné funkčnosti. Celý modul drží u sebe pomocí $100\mu m$ nerezové oceli. Jednotlivé komponenty a výsledné moduly jsou zobrazeny na Obr. 3.7.



Obrázek 3.7: Nahoře vlevo vidíme sestavený vnitřní, střední a vnější modul. Na vedlejší fotografii jsou zobrazeny jednotlivé vrstvy kalorimetru: TYVEC, scintilátor a olovo. Na dolních obrazcích jsou připravené scintilační vrstvy a posunovače vlnové délky zahnuté do U. Převzato z [7].

Kapitola 4

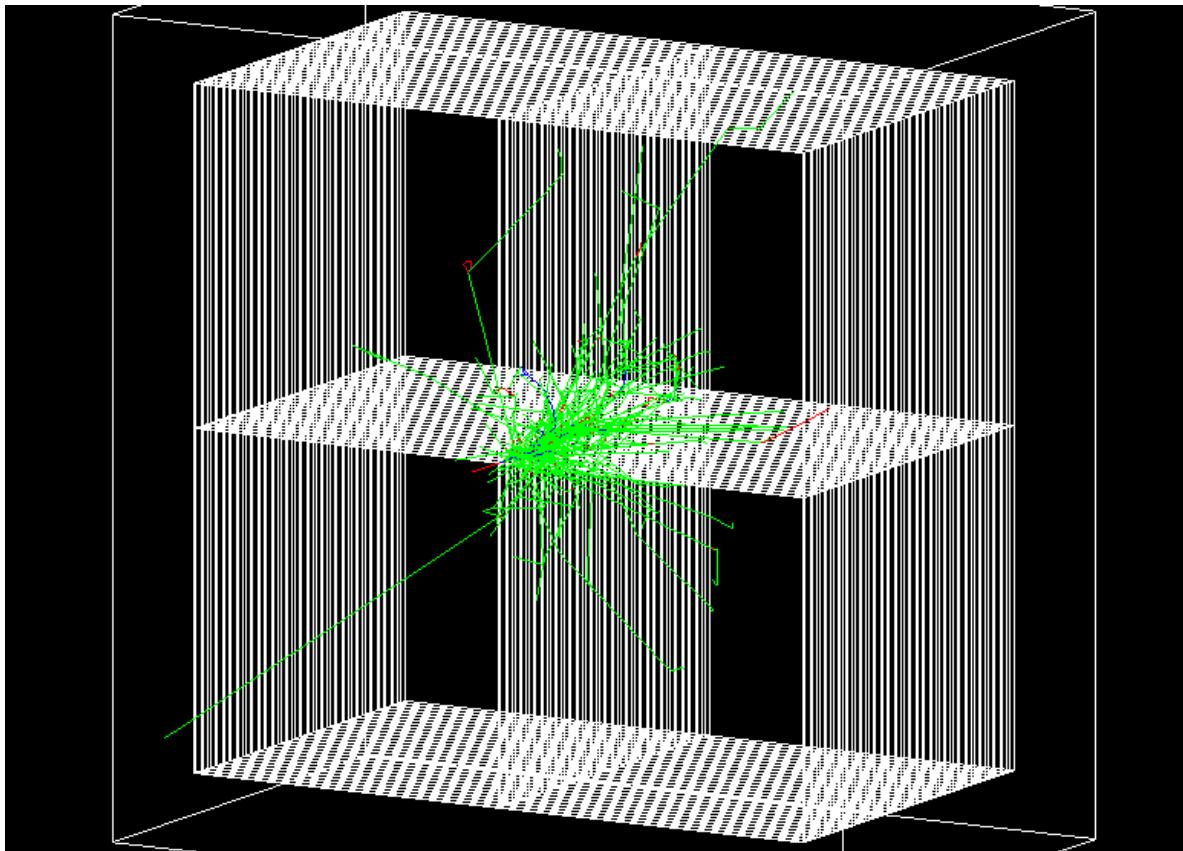
Simulace elektromagnetického kalorimetru

4.1 Geant4

Geant4 je objektově orientovaný Monte Carlo simulátor, který se používá k simulacím průchodu částic materiálem. [3] Je vyvíjen skupinou Geant4 Collaboration v CERNu. Má využití nejen v čisticové fyzice, ale také v lékařství a vesmírné fyzice. V čisticové fyzice je využíván na velkých experimentech jako je ATLAS, CMS nebo LHCb.

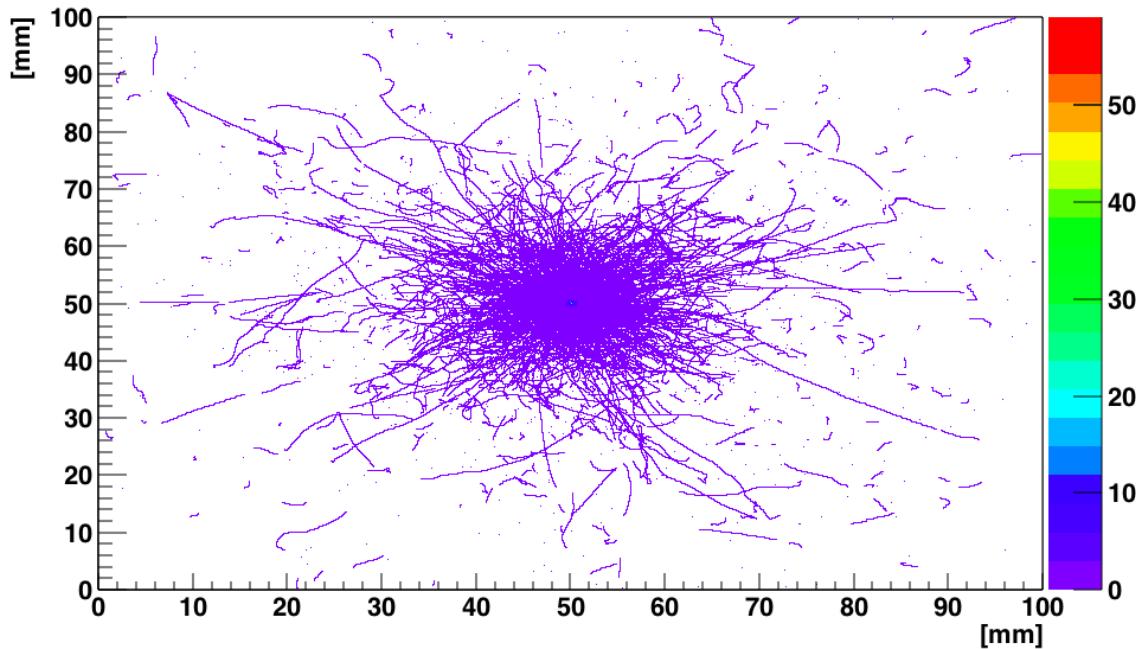
4.2 Má úprava zdrojového kódu

Jako základ jsem použil zdrojový kód, který byl určen k simulacím vzorkovacích kalorimetrů. Výsledek simulace ukládal do souboru .root celkovou uloženou energii v jednotlivých materiálech a uloženou energii v jednotlivých vrstvách. Zdrojový kód tak bylo nutné upravit, aby bylo možné sledovat vývoj kaskády v celém kalorimetru. K tomu bylo nutné zjistit, jak se určuje uložená energie v materiálu a jak se určuje ve kterém materiálu se energie ukládá. K určení materiálu byl využíván identifikátor, který byl zadán jako jeden z parametrů funkce, která se používala při samotné konstrukci kalorimetru. Tento parametr byl zjišťován při každém kroku s jednotlivou čisticí kaskády společně s deponovanou energií. Proto bylo nutné vymyslet, jak po rozdělení aktivní vrstvy stále mít možnost určit, že se jedná o aktivní vrstvu a kde se daný díl aktivní vrstvy nachází. Aby toto fungovalo, bylo zapotřebí zajistit správné rozdělení aktivní vrstvy a správné umístnění v simulovaném kalorimetru. Po vyřešení všech problémů, které v průběhu psaní a úpravě kódu vznikly, se mi podařilo vytvořit kalorimetr čtvercového průřezu o rozměrech $20 \times 20 \text{ cm}^2$, který jsem rozdělil 4 části. Výsledek zobrazený pomocí programu Qt visualization je zobrazen na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Rozdělení kalorimetru na 4 části v programu Geant4. Do kalorimetru byl na ukázkou puštěn 1GeV elektron. Výsledek je zobrazený programem Qt visualization.

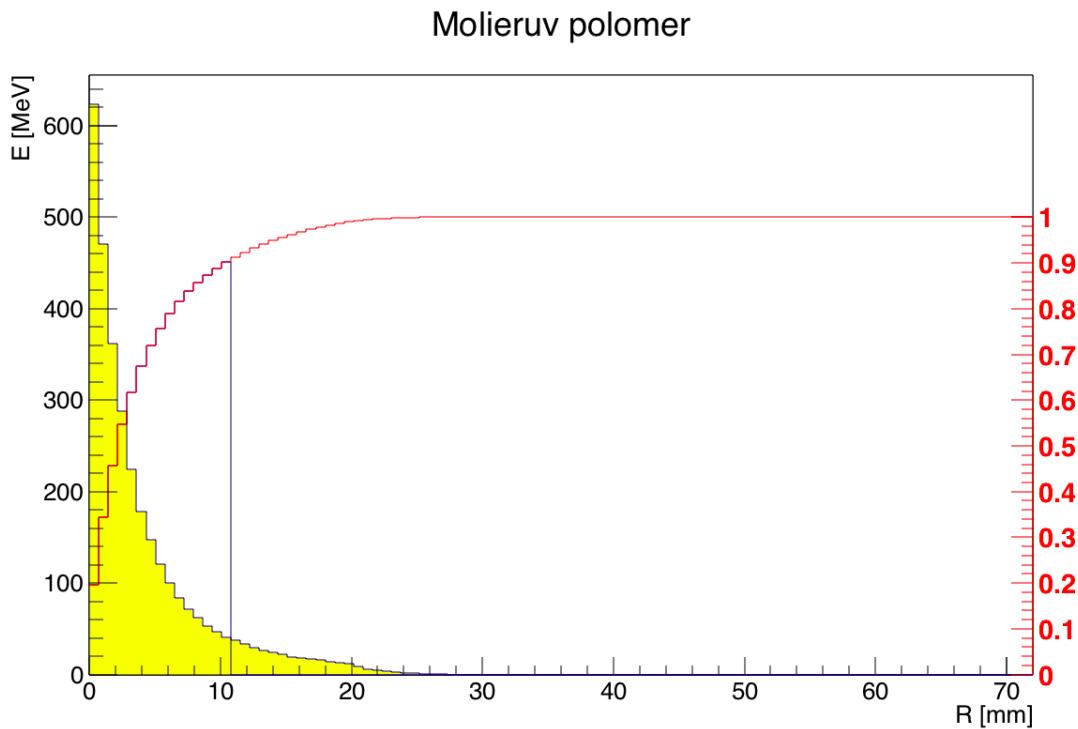
Po rozdělení kalorimetru jsem napsal kód k vytvoření 2D a 3D histogramů, aby bylo možné sledovat vývoj kaskády. Histogramy byly plněny vypočtenými souřadnicemi z identifikátoru a uložená energie byla ukládána jako váha. Výsledný 2D histogram je zobrazen na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2: Výsledný 2D histogram aktivní vrstvy pro 100 GeV foton v simulovaném kalorimetru z 20 vrstev. Aktivní vrstva je 4 mm tlustý scintilátor a absorbér je olovo o jedné radiační délce. Uložená energie v jednotlivých pixelech je v jednotkách MeV. Pixel má rozměry $0,125 \times 0,125 \text{ mm}^2$.

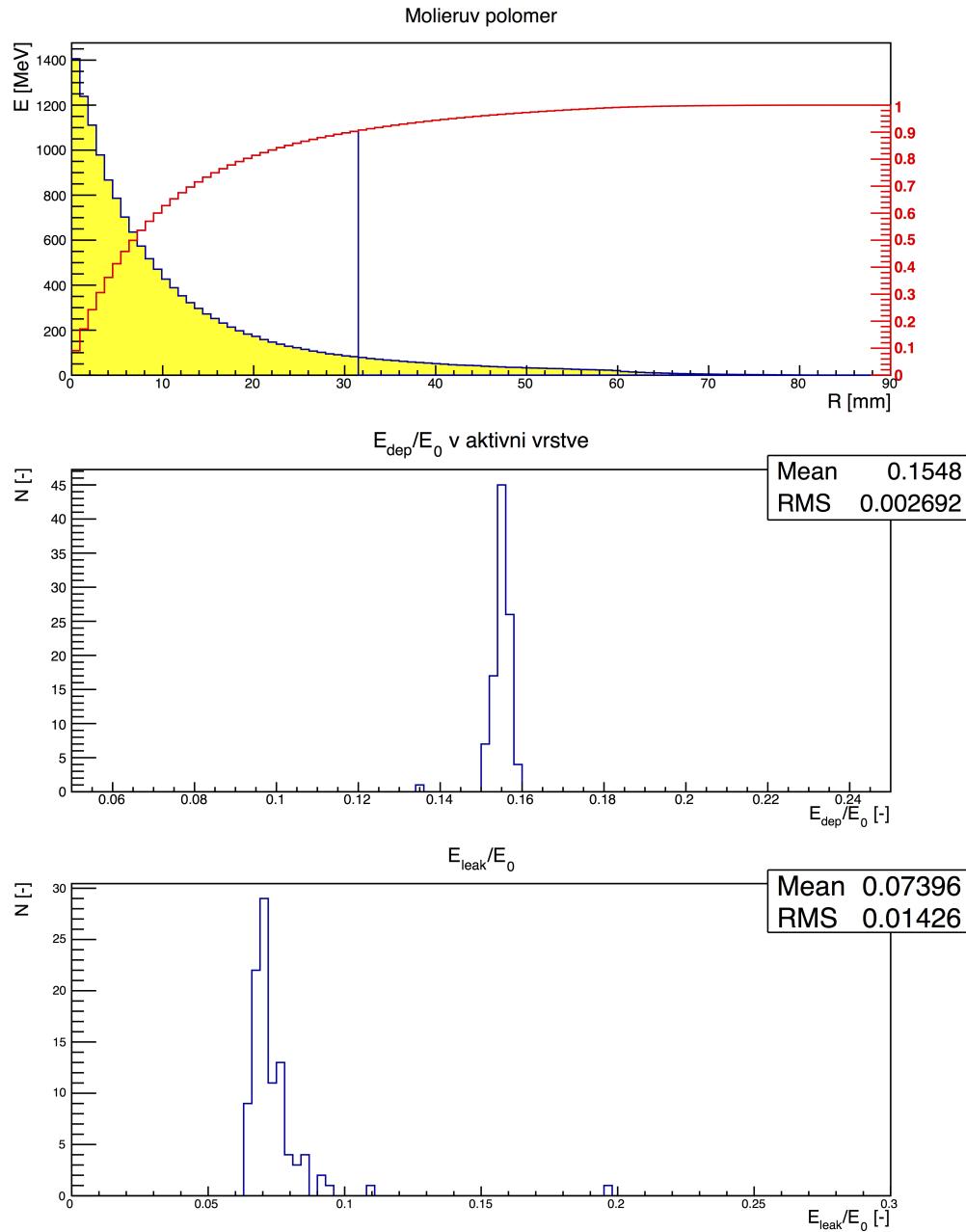
4.3 Simulace

K ověření správného fungování zdrojového kódu jsem se rozhodl zreprodukrovat výsledky, které byly publikovány v Prototype studies for a forward EM calorimeter in ALICE, kde testovali prototyp FoCalu pomocí křemíkových detektorů a wolframu. [20] Prototyp měl 20 vrstev a byl čtvercového průřezu o velikosti $4 \times 4 \text{ cm}^2$. Wolframová vrstva byla 3,5 mm silná, což odpovídá přibližně 1 radiační délce. Křemíková vrstva společně s vyčítací elektronikou měla přibližně 1 mm. Při této konfiguraci byl Moliérův poloměr pro elektron o energii 200 GeV 11 mm. K zreprodukrování výsledků jsem rozdělil aktivní vrstvu na části o velikosti $0,125 \times 0,125 \text{ mm}^2$. Z dat jsem určil Moliérův poloměr jako 11 mm. Graf k určení Moliérova poloměru je zobrazen na obrázku 4.3. Moliérův poloměr zde určuji jako vzdálenost od středu kaskády, ve které je uloženo 90% deponované energie v aktivní vrstvě.



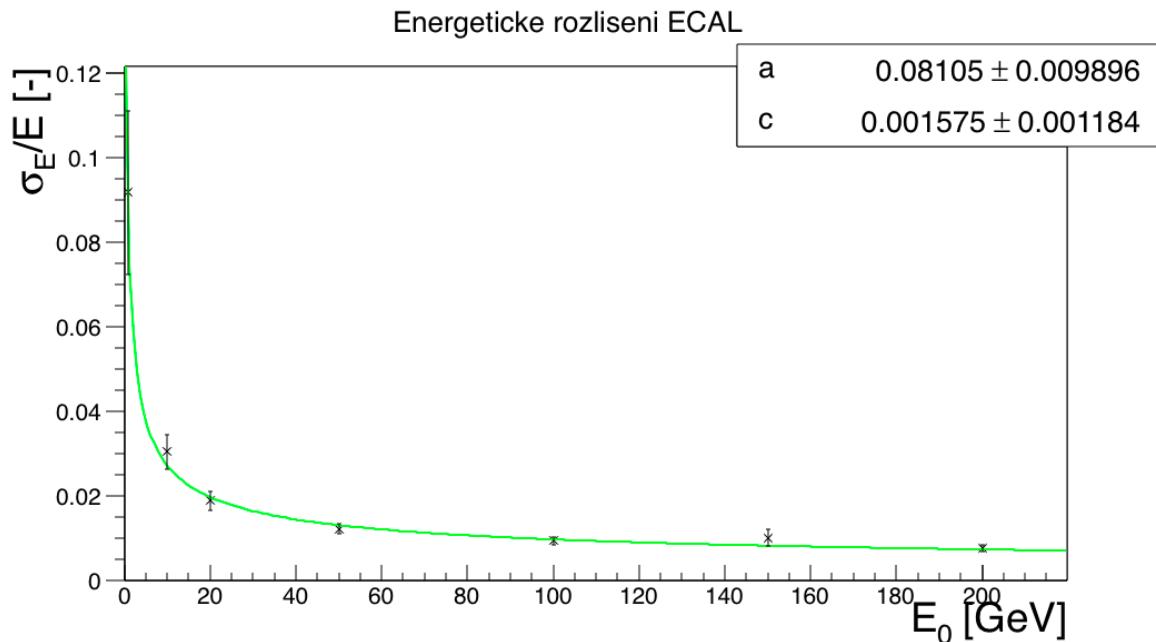
Obrázek 4.3: Graf k určení Moliérova poloměru z dat získaných simulací v programu Geant4. Moliérův poloměr je zde 11 mm.

Jelikož hlavní úkol této práce je simulace vzorkovacího kalorimetru pomocí scintilátorů, rozhodl jsem se provést simulace elektromagnetického kalorimetru použitého na LHCb, který byl popsán v předchozí kapitole. Program jsem proto upravil na velikost jedné části ECALu, která je přibližně $12 \times 12 \text{ cm}^2$. Pro ECAL je uváděn Moliérův poloměr 3,5 cm. [15] Zde se už udávané a mnou získané hodnoty liší. Mnou získaný Moliérův poloměr je 32 mm, viz. obrázek 4.4. Drobný rozdíl lze vysvětlit tím, že v simulacích jsem neuvažoval spojovací papír TYVEC mezi jednotlivými vrstvami, který má přibližně 0,1 mm. Dalším důležitým parametrem může být čistota olova použitá v ECALu. Při simulacích pracuji s čistým olovem a mezi jednotlivými vrstvami není žádná mezera.



Obrázek 4.4: Simulace kalorimetru ECAL na experimentu LHCb.

K určení energetického rozlišení jsem provedl simulace pro 7 hodnot energií v rozmezí 1 až 200 GeV. Konkrétně pro hodnoty: 1, 10, 20, 50, 100, 150 a 200 GeV. Pro každou hodnotu jsem spočetl σ_E/E a vynesl do grafu. Tyto hodnoty jsem proložil funkcí $f = \frac{a}{\sqrt{E_0}} + c$, kde parametr a odpovídá stochastickému členu a parametr c je konstantní člen



Obrázek 4.5: Simulované energetické rozlišení kalorimetru ECAL na experimentu LHCb.

energetického rozlišení. Výsledný graf je zobrazen na obrázku 4.5. Určené rozlišení je

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{(8 \pm 1) \%}{\sqrt{E_0}} + (0, 2 \pm 0, 1) \%.$$

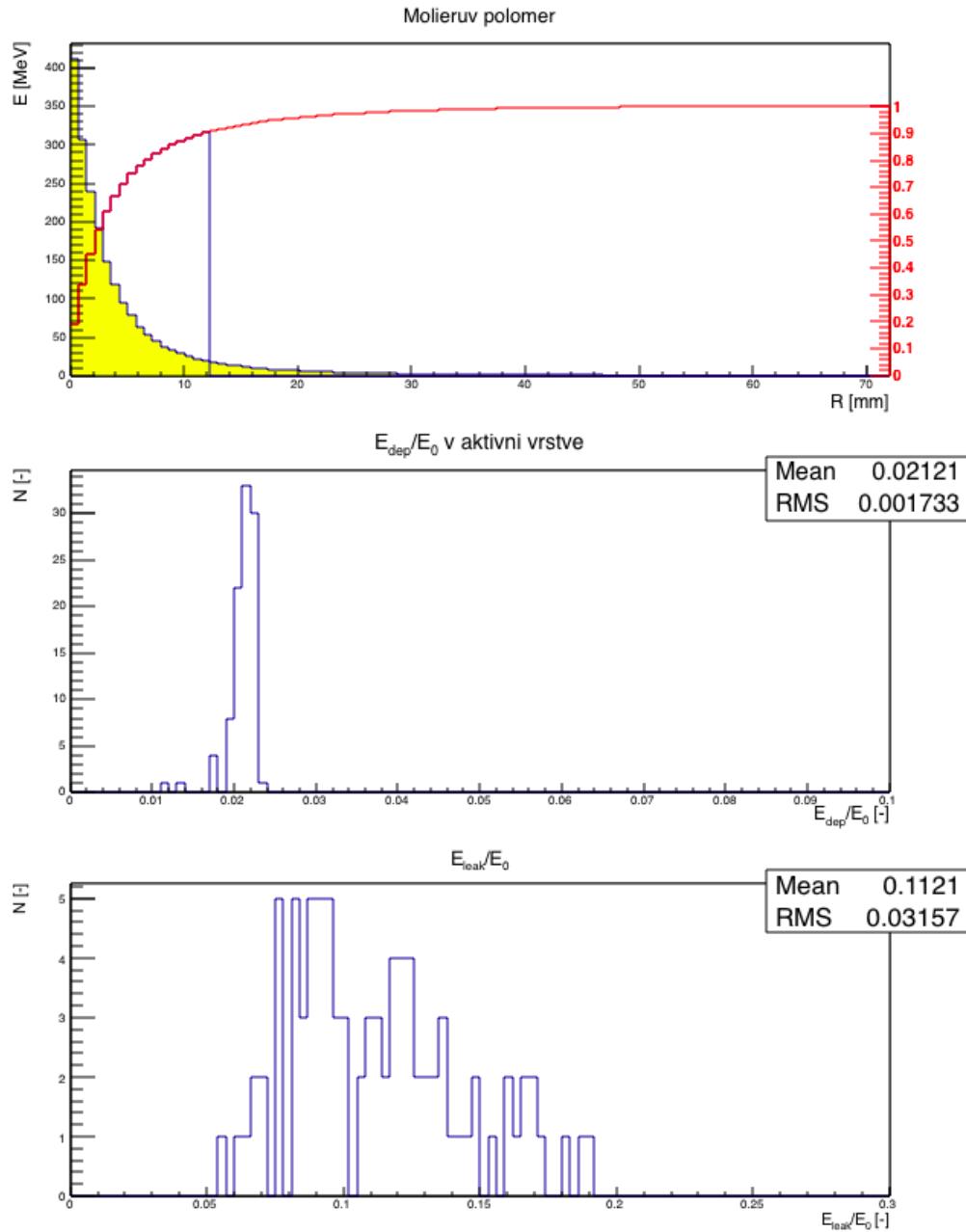
Nejlepší udávané rozlišení kalorimetru ECAL, které je pro vnitřní část kalorimetru, je

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{(8, 2 \pm 0, 4) \%}{\sqrt{E_0}} + (0, 87 \pm 0, 07) \%.$$

Je nutné si uvědomit, že uvedené rozlišení je určené z energie změřené vycítací aparaturou, která vykazuje šum, a tím zhoršuje energetické rozlišení.

4.4 FoCal podle FJFI

Po ověření funkčnosti simulace i v oblasti scintilátorů jsem mohl začít se simulacemi pro FoCal. První simulace jsem provedl pro uspořádání, které bylo navrhnuto v předchozích bakalářských pracích. [13, 21] Jako absorbér jsem tedy použil wolfram silný 1,5 mm a aktivní vrstvu ze scintilátoru silnou 0,5 mm. Celkový počet vrstev je 40. Čelní průřez jsem nastavil na 10 x 10 cm². Tento průřez bude použit i u všech dalších simulací. Jako testovací částici jsem použil foton o energii 100 GeV. Výsledky simulace jsou zobrazeny na obrázku 4.6.



Obrázek 4.6: Simulace FoCalu navrženého v předchozích pracích. Simulováno bylo 40 vrstev, kde jako absorbér byl použit 1,5 mm silný wolfram a jako aktivní vrstva 0,5 mm silný scintilátor. Nalétávající částice byl foton o energii 100 GeV.

Ze simulací jsem určil Molierův poloměr jako 12 mm a v aktivní vrstvě se deponovalo pouze 2 % energie původní částice. V simulovaném kalorimetru ECAL se naproti tomu uložilo 15,5 % energie původní částice. K zvýšení deponované energie bylo v předchozích pracích uvažováno detektor natočit, aby se prodloužila dráha v aktivních

vrstvách. Domnívám se však, že vzhledem k tomu, že by natočení mohlo být jenom malé, došlo by tak pouze k nepatrnému navýšení deponované energie v aktivní vrstvě, a tím malému zlepšení energetického rozlišení.

Abych věděl o jakých rozměrech aktivní vrstvy při budoucím návrhu uvažovat, rozhodl jsem se simulovat různé šířky aktivní vrstvy při stejné šířce absorbéru. Počet vrstev zůstal vždy 20 a absorbér měl vždy velikost jedné radiační délky. Jako absorbér jsem použil wolfram a olovo. Jejich základní vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 4.1.

	R_M [mm]	X_0 [mm]
ollovo	16,02	5,612
wolfram	9,33	3,504

Tab. 4.1: Přehled základních vlastností olova a wolframu. Hodnoty jsou převzaty z [1,2]

Simulace jsem prováděl vždy pro dvě energie fotonu, 10 GeV a 100 GeV. Výsledky jsou uvedeny v tabulkách 4.2, 4.3, 4.4 a 4.5.

d [mm]	R_M [mm]	$E_{dep}/E_0[-]$	$E_{leak}/E_0[-]$
0	17,0	$0,9673 \pm 0,0093$	$0,0327 \pm 0,0094$
1	18,5	$0,0195 \pm 0,0013$	$0,0441 \pm 0,0172$
2	21,0	$0,0353 \pm 0,0021$	$0,0480 \pm 0,0169$
3	23,0	$0,0492 \pm 0,0028$	$0,0533 \pm 0,0167$
4	24,5	$0,0619 \pm 0,0031$	$0,0592 \pm 0,0160$

Tab. 4.2: Hodnoty Moliérova poloměru, deponované a uniklé energie určené ze simulací pro 10 GeV foton a různé konfigurace kalorimetru. Jako absorbér bylo použito olovo a d je tloušťka použitého scintilátoru.

$d[\text{mm}]$	$R_M[\text{mm}]$	$E_{\text{dep}}/E_0[-]$	$E_{\text{leak}}/E_0[-]$
0	17,0	$0,9298 \pm 0,0284$	$0,0702 \pm 0,0284$
1	18,0	$0,0189 \pm 0,0009$	$0,0745 \pm 0,0292$
2	21,5	$0,0343 \pm 0,0014$	$0,0755 \pm 0,0246$
3	23,0	$0,0479 \pm 0,0024$	$0,0803 \pm 0,0262$
4	25,0	$0,0604 \pm 0,0024$	$0,0879 \pm 0,0336$

Tab. 4.3: Hodnoty Moliérova poloměru, deponované a uniklé energie určené ze simulací pro 100 GeV foton a různé konfigurace kalorimetru. Jako absorbér bylo použito olovo a d je tloušťka použitého scintilátoru.

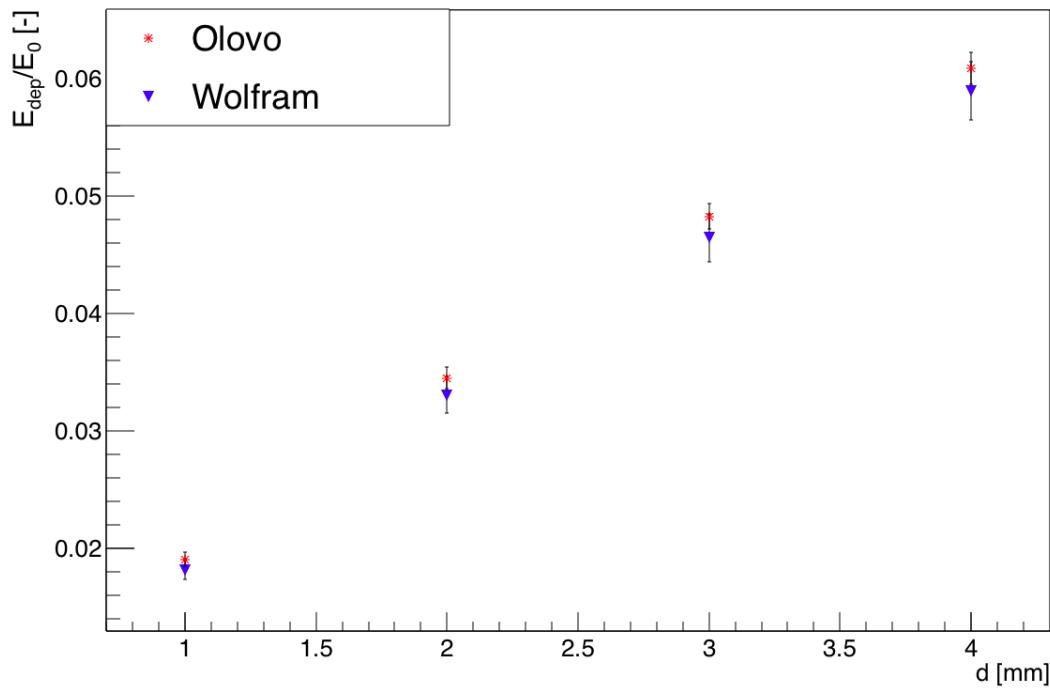
$d[\text{mm}]$	$R_M[\text{mm}]$	$E_{\text{dep}}/E_0[-]$	$E_{\text{leak}}/E_0[-]$
0	11,0	$0,9754 \pm 0,0110$	$0,0246 \pm 0,0109$
1	14,0	$0,0187 \pm 0,0013$	$0,0328 \pm 0,0189$
2	17,5	$0,0341 \pm 0,0021$	$0,0359 \pm 0,0189$
3	20,0	$0,0478 \pm 0,0027$	$0,0390 \pm 0,0177$
4	22,0	$0,0606 \pm 0,0032$	$0,0440 \pm 0,0184$

Tab. 4.4: Hodnoty Moliérova poloměru, deponované a uniklé energie určené ze simulací pro 10 GeV foton a různé konfigurace kalorimetru. Jako absorbér byl použit wolfram a d je tloušťka použitého scintilátoru.

$d[\text{mm}]$	$R_M[\text{mm}]$	$E_{\text{dep}}/E_0[-]$	$E_{\text{leak}}/E_0[-]$
0	11,0	$0,9356 \pm 0,2978$	$0,0669 \pm 0,0363$
1	14,0	$0,0182 \pm 0,0008$	$0,0650 \pm 0,0338$
2	17,5	$0,0330 \pm 0,0016$	$0,0685 \pm 0,0354$
3	20,0	$0,0465 \pm 0,0020$	$0,0704 \pm 0,0337$
4	22,0	$0,0590 \pm 0,0025$	$0,0729 \pm 0,0329$

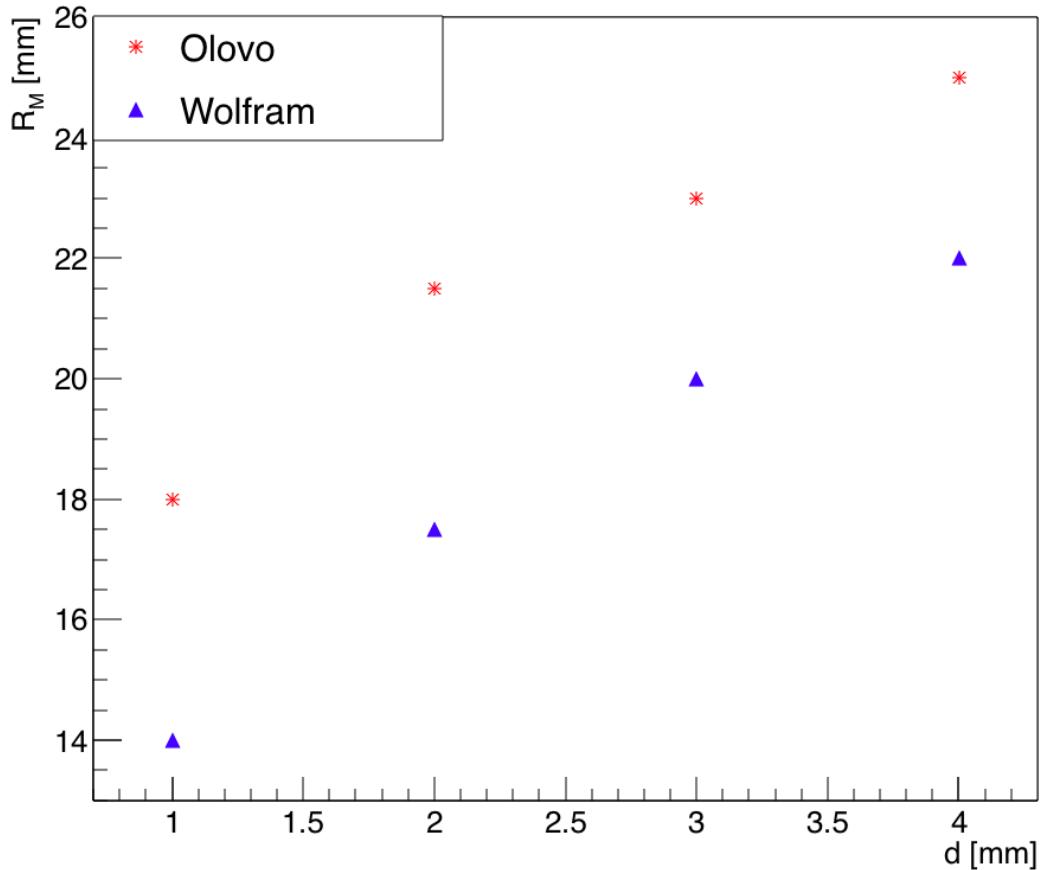
Tab. 4.5: Hodnoty Moliérova poloměru, deponované a uniklé energie určené ze simulací pro 100 GeV foton a různé konfigurace kalorimetru. Jako absorbér byl použit wolfram a d je tloušťka použitého scintilátoru

V uvedených tabulkách je vidět jak s zvětšující se vrstvou scintilátoru roste množství deponované energie, což vede k lepšímu energetickému rozlišení. Vývoj uložené energie v závislosti na tloušťce scintilátoru je pro foton o energii 100 GeV zobrazen na obrázku 4.7.



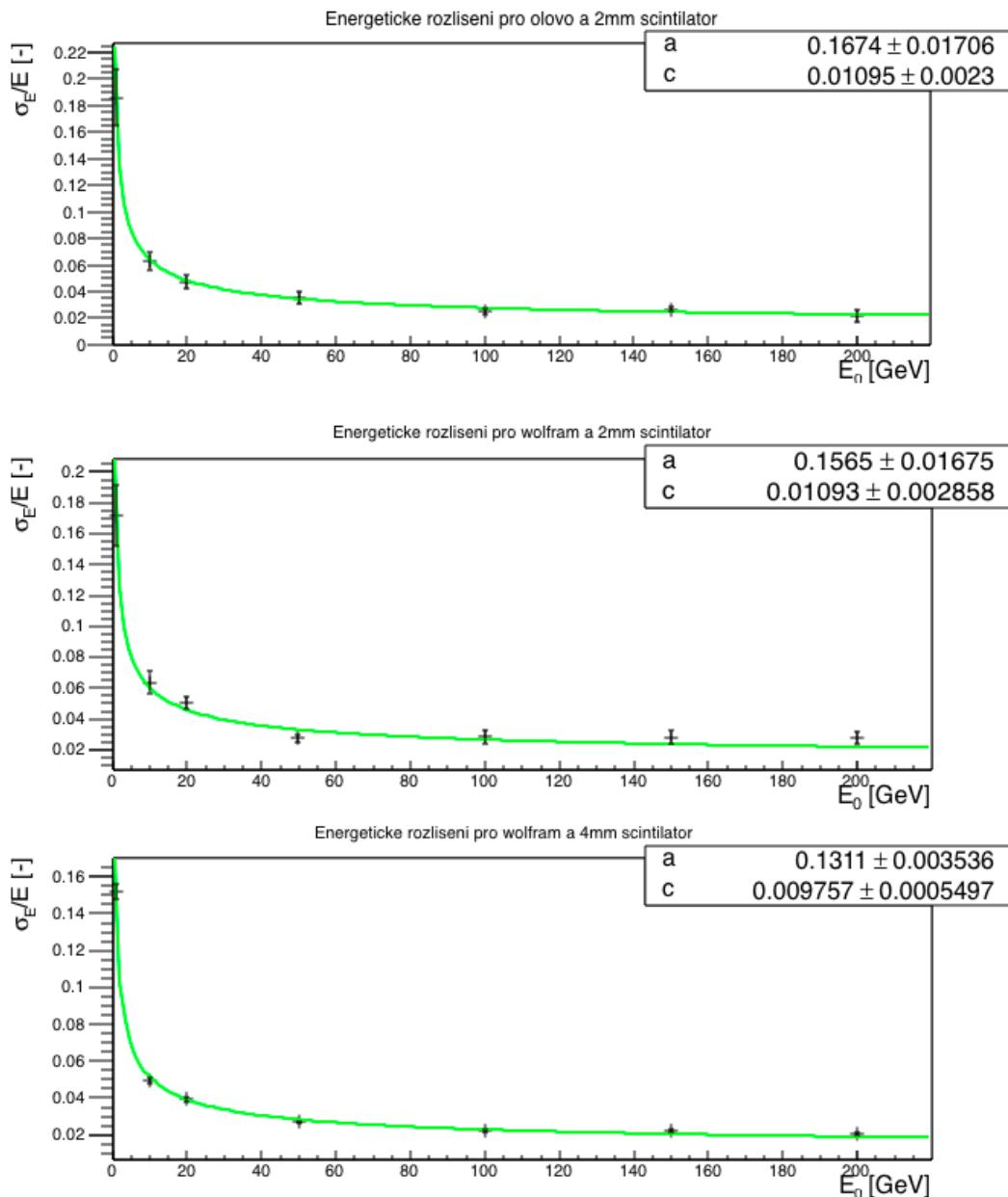
Obrázek 4.7: Závislost uložené energie na tloušťce scintilátoru d pro foton o energii $E_0=100$ GeV. Jako absorbér bylo použito olovo a wolfram o jedné radiační délce.

Se zvětšující se aktivní vrstvou roste ale také Moliérův poloměr. Vývoj Moliérova poloměru v závislosti na velikosti scintilační vrstvy je pro foton o energii 100 GeV zobrazeno na obrázku 4.8.



Obrázek 4.8: Závislost Moliérova poloměru na tloušťce scintilátoru d pro foton o energii $E_0=100$ GeV. Jako absorbér bylo použito olovo a wolfram o jedné radiační délce. Výpočet Moliérova poloměru byl prováděn až po skončení simulace z důvodu pomalosti jeho výpočtu. Uvedený poloměr je tak pouze průměrná hodnota po tisíci pokusech.

Správná šířka scintilátoru se tak bude muset dobře vybrat, aby bylo možné rozpoznat 2 fotony z rozpadu π^0 od přímých fotonů. Dále vidíme, že při stejné tloušťce scintilátoru je deponovaná energie větší, když bylo jako absorbér použito olovo. Rozdíl je však pouze v řádu pár desetin procenta deponované energie ku energii původní částice. Rozdíl Moliérova poloměru je však kolem 3 až 4 milimetrů. Proto je vhodnější materiál absorbéru wolfram. Další výhodou wolframu je, že chceme-li dosáhnout Moliérova poloměru například 21 mm, použijeme 4 mm silný scintilátor. V případě olova bychom však museli použít pouze 2 mm silný scintilátor. Při použití 4 mm scintilátoru je dosaženo lepšího energetického rozlišení při stejném rozměru kalorimetru, protože rozdíl mezi radiační délkou olova a wolframu je 2,108 mm. Energetické rozlišení pro tyto parametry je uvedeno na obrázku 4.9.

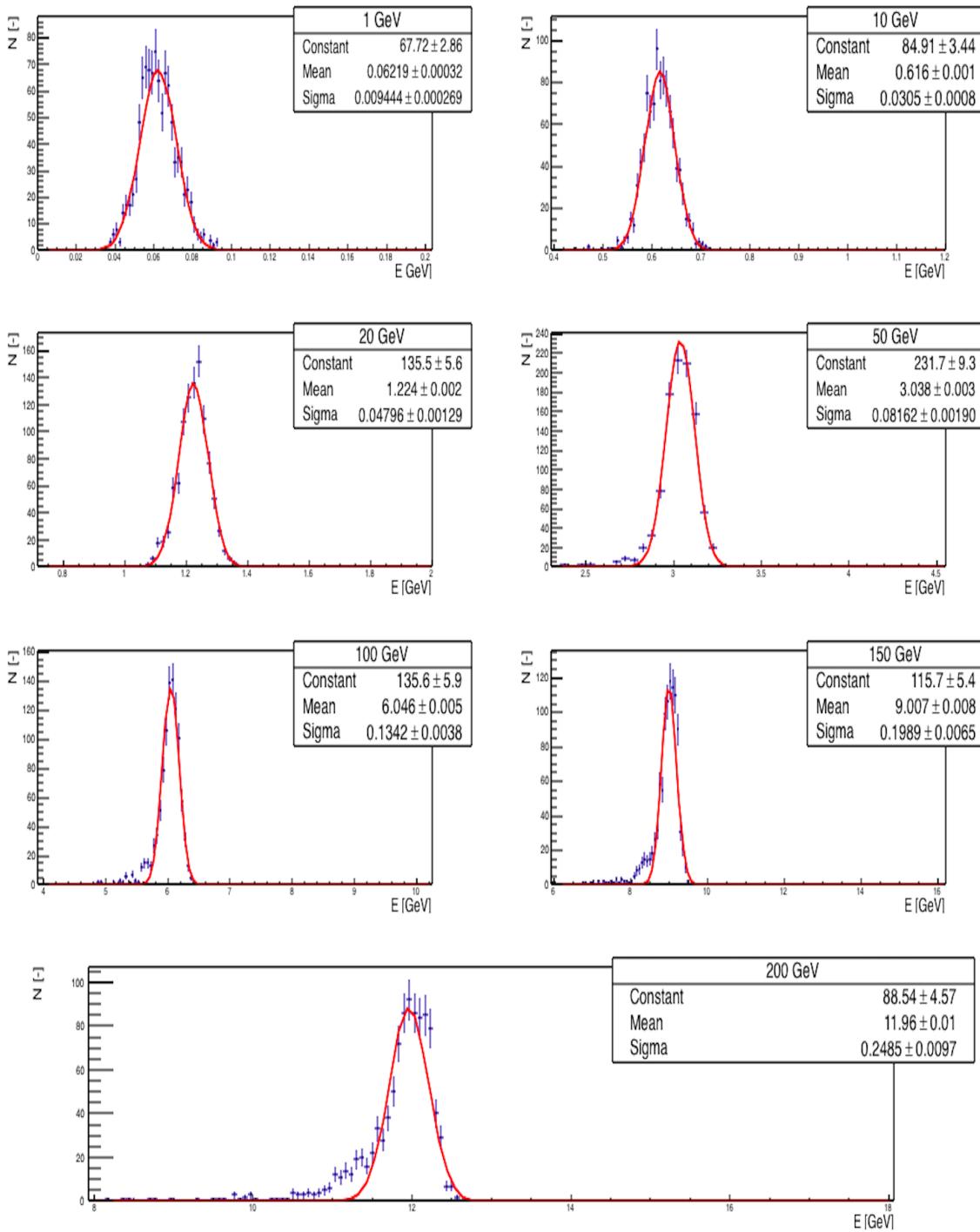


Obrázek 4.9: Energetické rozlišení pro různé absorbéry a velikost scintilační vrstvy.

Nejlepší ze simulovaných energetických rozlišení, které je pro wolfram a 4 mm scintilátor, je

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{(13,1 \pm 0,4)\%}{\sqrt{E_0}} + (0,98 \pm 0,05)\%.$$

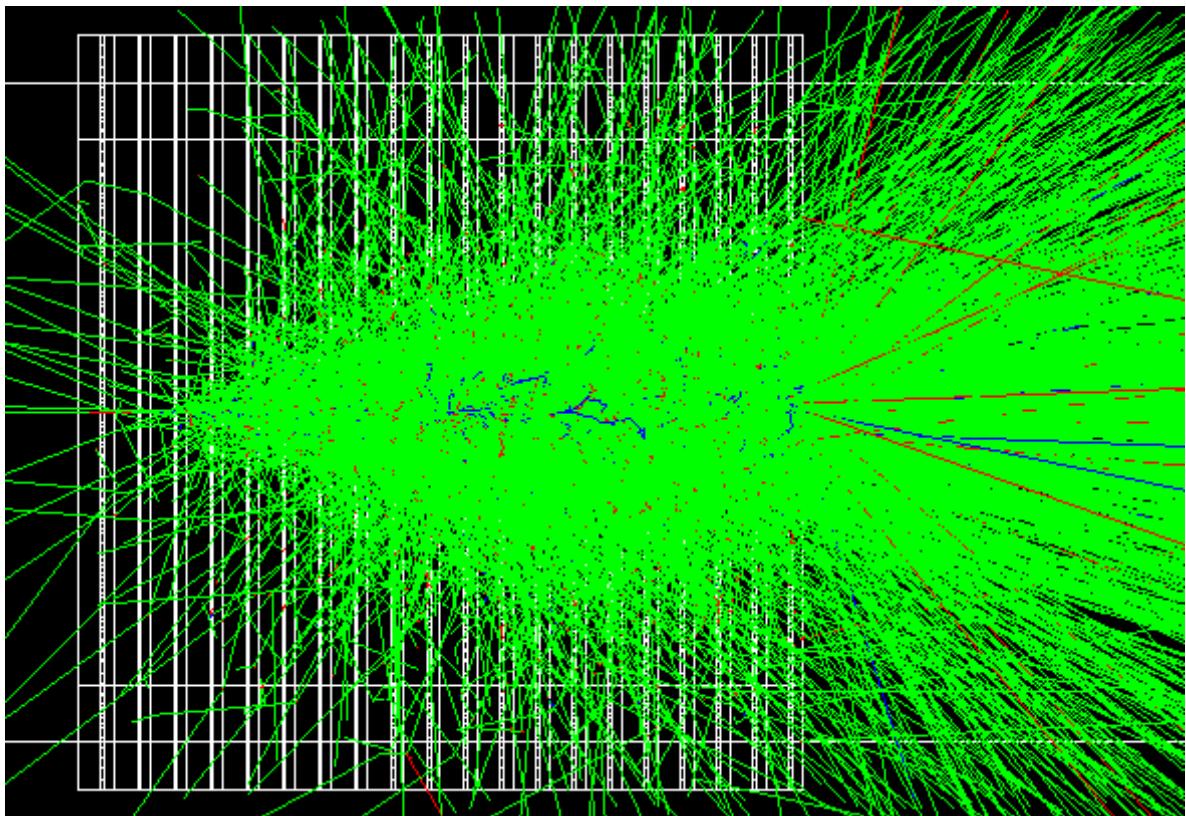
Určování hodnot pro energetické rozlišení je zobrazeno na obrázku 4.10. Při zpracovávání dat pro fotony o energiích 100 GeV, 150 GeV a 200 GeV deponovaná energie v scintilátoru fluktuovala více než pro nižší energie. To přisuzuji krátké radiační délce kalorimetru, která byla přibližně 20 radiačních délek. Při simulacích kalorimetru ECAL, který má 25 radiačních délek, k tomuto jevu nedocházelo.



Obrázek 4.10: Fitování deponované energie pro určení energetického rozlišení. Ukázka zpracovávání dat pro konfiguraci wolframu a 4 mm scintilátoru.

4.5 Simulace křemíkového detektoru

U předchozích simulací jsem narážel na problém, že není ještě určeno jakou bude mít vyčítací aparatura účinnost a jaké budou její rozměry. Od toho bude odvozena velikost padů a úroveň šumu. Toto ale neplatí pro křemíkové detektory. K simulacím jsem použil vlastnosti křemíkového detektoru, který byl použit v kalorimetru CALICE ECal. [17] Velikost křemíkového padu je $10 \times 10 \times 0,5\text{mm}^3$, který je vyčítán pomocí 1,5 mm silného kaptonu. Simulovaný kalorimetr je opět čtvercového průřezu $10 \times 10 \text{ cm}^2$ s 20 vrstvami absorbéra o jedné radiační délce. Simulovaný kalorimetr je zobrazen na obrázku 4.11.



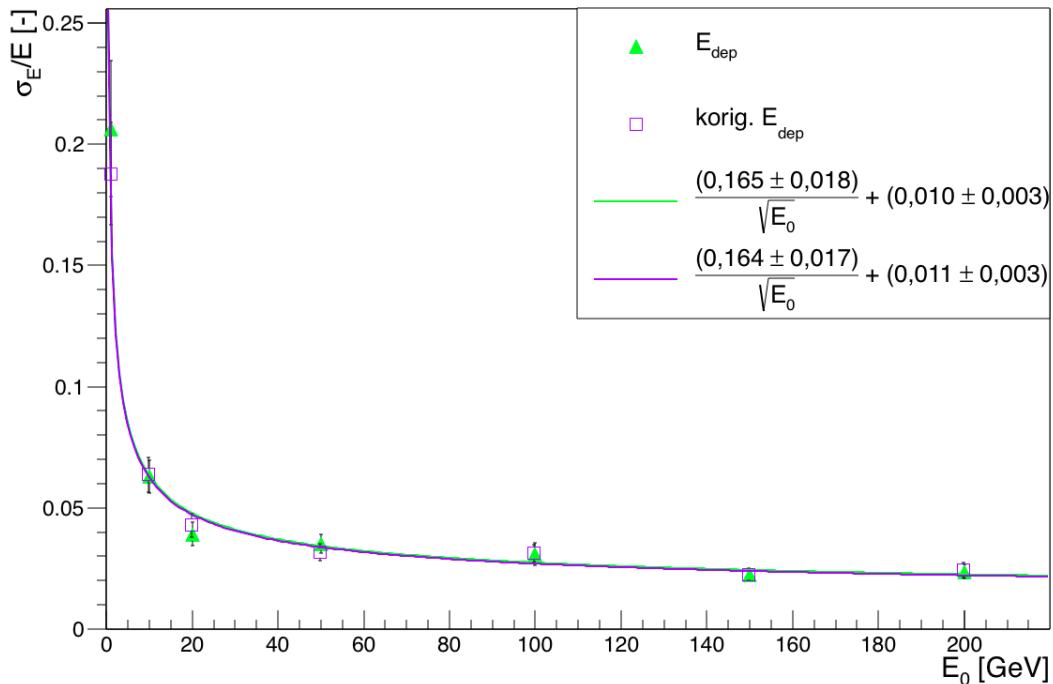
Obrázek 4.11: Zobrazení simulovaného křemíkového detektoru a 100 GeV fotonu. Velikost křemíkových padů je $10 \times 10 \times 0,5 \text{ mm}^3$. Křemíkové pady jsou vycítány 1,5 mm silným kaptonem. Jako absorbér je použit wolfram o jedné radiační délce a celkově 20 vrstev. Zelená barva znázorňuje fotony, červená elektrony a modrá pozitrony.

Energie uložená v padu je převáděna na tzv. MIPy. MIP je částice, která má nejmenší možnou energii k vytvoření ionizace. Pro křemík je tato energie 3,6 eV. Šum při tomto vyčítání dosahuje 1500 MIPů a jeden pad v reálném použití dosahoval až 40 000 MIPů. K simulacím jsem opět použil nastavení jako v předchozích případech. Moliérův poloměr v aktivní vrstvě jsem ze simulací určil jako 14 mm a deponovaná energie v křemíkové vrstvě se pohybuje kolem 1,5% E_0 . Energetické rozlišení pro toto nastavení je zobrazeno

na obrázku 4.12. Z obrázku je patrné, že vyčítací aparatura nijak výrazně neovlivňuje energetické rozlišení. Vyčítací aparatura nedokáže vyčíst veškerou energii uloženou v křemíku, ale zúží se tak energetický rozptyl. Energetické rozlišení po vyčtení tak je

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{(16 \pm 2)\%}{\sqrt{E_0}} + (1,1 \pm 0,3)\%.$$

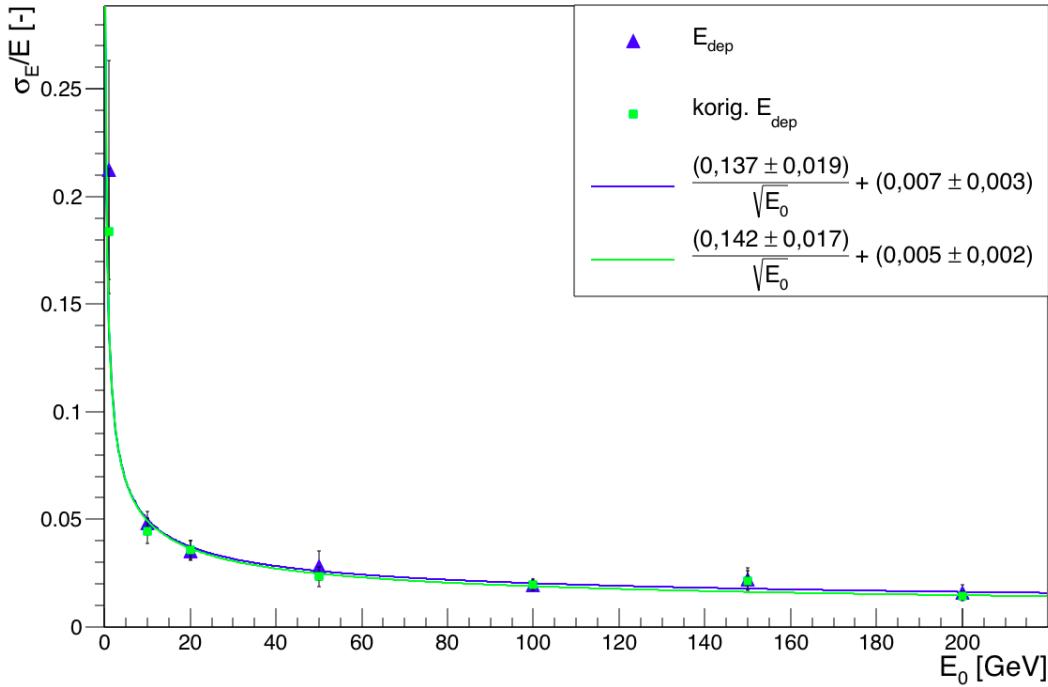
Energetické rozlišení pro kremik



Obrázek 4.12: Energetické rozlišení pro křemíkový detektor, jedna vrstva křemíku na jednu radiační délku wolframu, před a po vyčtení.

Toto energetické rozlišení odpovídá použití 2 mm scintilátoru, u kterého však chybí korekce vyčítání. Křemíkové řešení ale dosahuje lepšího Moliérova poloměru. K porovnání energetického rozlišení při stejném Moliérově poloměru musíme zvýšit tloušťku křemíkové vrstvy na jednu radiační délku absorbéra. To však v případě křemíkových detektorů nemůžeme udělat zvýšením tloušťky křemíkové vrstvy, ale pouze zvýšením křemíkových vrstev. Proto jsem křemíkovou vrstvu dal po každé půl radiační délce wolframu. Celkový počet vrstev se tak zvýšil na 40. Moliérův poloměr se zvýšil na 18 mm, což odpovídá Moliérovu poloměru při použití wolframu a 2 mm scintilátoru po jedné radiační délce absorbéra. Energetické rozlišení pro tento křemíkový detektor je zobrazeno na obrázku 4.13.

Energetické rozlišení pro kremík



Obrázek 4.13: Energetické rozlišení pro křemíkový detektor, jedna vrstva křemíku na půl radiační délky wolframu, před a po vyčtení.

Zde už je patrné zhoršení energetického rozlišení po vyčtení. Zhoršení je však pouze minimální. Výsledné energetické rozlišení je

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{(14 \pm 2)\%}{\sqrt{E_0}} + (0,5 \pm 0,2)\%.$$

Toto energetické rozlišení je podobné jako při použití wolframu a 4 mm scintilátoru. Použití scintilátoru má však o 4 mm větší Moliérův poloměr bez započítání vycítací aparatury. Konečný způsob vycítání bude mít velký vliv nejen na energetické rozlišení, ale také Moliérův poloměr.

4.6 Výsledky ze simulací

Jako vhodným absorbérem se ukázal být wolfram, který při stejné tloušťce scintilátoru má lepší energetické rozlišení, menší Moliérův poloměr a umožňuje lepší kompaktnost kalorimetru. Výsledné energetické rozlišení scintilačního kalorimetru bude také záležet na novém způsobu vycítaní. Pokud by se dokázalo zkonstruovat tenké a efektivní vycítací zařízení, může scintilační kalorimetr konkurovat křemíkovému kalorimetru při stejné velikosti kalorimetru. Ze simulací je také patrné, že 20 radiačních délek absorpéru je při takto vysokoenergetických částicích málo.

Kapitola 5

Závěr

Kalorimetrie je důležitou součástí experimentů v jaderné a čisticové fyzice. Jedná se o destruktivní metodu měření. Primární částice interakcí s kalorimetrem vytváří elektromagnetickou nebo hadronovou kaskádu sekundárních častic. Vývoj kaskády pokračuje, dokud nové částice mají dostatečnou energii k vytvoření dalších častic. Částice, které již nemají dostatečnou energii, jsou pohlceny materiélem kalorimetru.

Kalorimetry lze obecně rozdělit na homogenní a vzorkovací. V homogenních dochází jak k tvorbě nových častic, tak také k produkci signálu, který je následně vyčítán ve formě světla nebo náboje. Vzorkovací kalorimetry jsou tvořeny absorbérem a aktivní vrstvou. V absorbéru dochází k tvorbě sekundárních častic, které jsou měřeny aktivní vrstvou. Mezi výhody vzorkovacích kalorimetrů oproti homogenním jsou kompaktnější rozměry, a tím vhodnější umístění v experimentech. Oproti homogenním mají však horší energetické rozlišení. Jako aktivní vrstva se často používá scintilátor nebo křemíkové detektory. Scintilátory jsou dvojího typu: organické a anorganické. V kalorimetech se používají častěji organické, které mají dobrou radiační odolnost, snadno se vyrábí a jsou levné. Výhodou použití scintilátoru oproti křemíkovému detektoru je lepší radiační odolnost, nepotřebnost chlazení a kalorimetru nemusí být pod stálým elektrickým napětím.

Vysokoenergetické srážky na LHC dávají možnost zkoumat partonovou distribuční funkci i pro velmi malé frakce hybnosti x . K tomuto účelu je navrhován dopředný elektromagnetický vzorkovací kalorimetr FoCal, který by měl nahradit stávající detektor PMD.

Kalorimetr FoCal je plánován s aktivní vrstvou z křemíkových detektorů a wolframem jako absorbérem, avšak na FJFI je vyvíjen kalorimetr FoCal pomocí scintilátorů namísto křemíkových vrstev. Vyvíjen je také nový způsob optického vyčítaní. Signál je veden optickými kably do vysokorychlostní kamery, kde je signál zpracován. K lepšímu optickému vyčítaní je na konec optického vlákna u scintilátoru připevněna skleněná kulička.

Můj příspěvek ve vývoji kalorimetru bylo provedení několika simulací pro různé tloušťky aktivní vrstvy i různých energií primárního fotonu. Pro jednotlivé uspořádání jsem určil Moliérův poloměr, množství deponované energie v aktivní vrstvě a energetické rozlišení kalorimetru. Provedl jsem i porovnávací simulace pro křemíkový detektor.

V budoucnu bych rád pracoval na vylepšení mé simulace a pokračoval tak ve vývoji kalorimetru. Rád bych se také podílel na konstrukci prototypu detektoru FoCal.

Literatura

- [1] Atomic and nuclear properties of materials: Lead. http://pdg.lbl.gov/2011/AtomicNuclearProperties/HTML_PAGES/082.html. [Online; cit. 5-Duben-2015].
- [2] Atomic and nuclear properties of materials: Tungsten. http://pdg.lbl.gov/2011/AtomicNuclearProperties/HTML_PAGES/074.html. [Online; cit. 5-Duben-2015].
- [3] Geant4. <http://geant4.cern.ch/index.shtml>. [Online; cit. 5-Duben-2015].
- [4] Particle identification in ALICE: an extra boost in QGP studies - Part A. http://alicematters.web.cern.ch/?q=Lip_PID. [Online; cit. 5-Duben-2015].
- [5] The ALICE Experiment. <http://aliceinfo.cern.ch/Public/en/Chapter2/Chap2Experiment-en.html>, 2008. [Online; cit. 5-Duben-2015].
- [6] The LHCb Detector. <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/en/Detector/Detector-en.html>, 2008. [Online; cit. 5-Duben-2015].
- [7] Sergey Barsuk. Electromagnetic Calorimeter for the LHCb experiment. (LHCb-TALK-2004-005), Mar 2004.
- [8] Tatsuya Chujo. Calorimetry in ALICE at LHC. <http://indico.cern.ch/event/192695/session/4/contribution/362/material/slides/0.pdf>, 2014. [Online; cit. 5-Duben-2015].
- [9] The FoCal Collaboration. A Forward Electromagnetic Calorimeter (FoCal) in the ALICE experiment. *Letter of Intent*, July 2010.
- [10] A. Martens F. Machefert. Overview of the LHCb calorimeter electronics, journal=CALORIMETRY IN PARTICLE PHYSICS, Proceedings of the Eleventh International Conference. page 151, 2005.
- [11] C. W. Fabjan and F. Gianotti. Calorimetry for particle physics. *Rev. Mod. Phys.*, 75:1243–1286, 2003.
- [12] Claus Grupen and Boris Schwartz. *Particle detectors*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Pr. (2008) 651 p, 2008.

- [13] Jan Sasínek. Dopředny elektromagnetický kalorimetru pro experiment ALICE. Bachelor's thesis, ČVUT, Praha, 2013.
- [14] Glenn F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*, 3rd ed. John Wiley and Sons, New York, 2000.
- [15] Irina Machikhiliyan. The LHCb electromagnetic calorimeter. *J. Phys. Conf. Ser.*, 160:012047, 2009.
- [16] Marek Matas. Study of saturation effects in hadrons using balitsky-kovchegov evolution equation. Research thesis, ČVUT, 2015.
- [17] Michal Marčišovský. Monte Carlo simulation of Calorimeters for Future Particle Physics Experiments. Master's thesis, ČVUT, 2007.
- [18] Miroslav Šimko. Design and optimization of the optical readout system for electromagnetic calorimeter FOCAL. Master's thesis, ČVUT, 2013.
- [19] Gert-Jan Nooren. FoCal in ALICE physics motivation, 2011.
- [20] T. Peitzmann. Prototype studies for a forward EM calorimeter in ALICE. pages 341–347, 2013.
- [21] Roman Lavička. Studie dopředného elektromagnetického kalorimetru pro experiment ALICE. Bachelor's thesis, ČVUT, Praha, 2013.