

## Pracovní úkoly

1. Provést interaktivní simulace základních typů částic a zobrazit jednotlivé interakce
2. Porovnat energetické ztráty v kalorimetru pro různé druhy částic (elektron, mion, pion)
3. Prostudovat odezvu modelu kalorimetru a jeho energetické rozlišení

## Teoretická část

Vletí-li do kalorimetru vysokoenergetická částice, interaguje s materiálem kalorimetru, ztrácí svou energii a vytváří sekundární částice. Mají-li sekundární částice dostatek energie, produkují v následných interakcích další částice, přičemž energie takto vytvářených sekundárních částic postupně klesá. Tento proces se nazývá sprška [1].

V kalorimetru částice reagují různým způsobem. Čistě elektromagnetickou spršku vytvářejí  $e^-$ ,  $e^+$ ,  $\gamma$  a  $\pi^0$ . Elektrony a pozitrony vyzařují tzv. brzdné záření. Gama kvantum vytváří elektron pozitronový pár a neutrální pion se za velmi krátkou dobu rozpadne na dva fotony.

Miony nevyzařují tolik brzdného záření jako elektrony, protože mají mnohem vyšší hmotnost. Miony ztrácejí energii v kalorimetru převážně ionizací, proto zanechávají v kalorimetru velmi málo energie.

Všechny hadrony (s výjimkou  $\pi^0$ ) vytvářejí hadronovou spršku, jež se sestává z elektromagnetické spršky a čistě hadronové spršky. Čistě hadronová sprška obsahuje sekundární hadrony produkované v interakcích s jádry a tzv. neviditelnou energii, kterou kalorimetr nemůže detekovat.

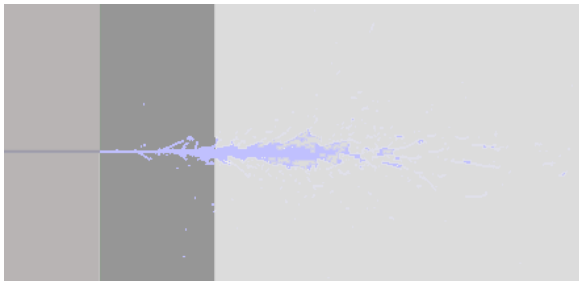
Viditelná energie ze spršek je úměrná původní energii nalétávajících částic. Energetické rozlišení kalorimetru je dáno, podle [1]:

$$\frac{\sigma(E_{dep})}{E_{dep}} = \frac{a}{\sqrt{E_0}} + b \quad (1)$$

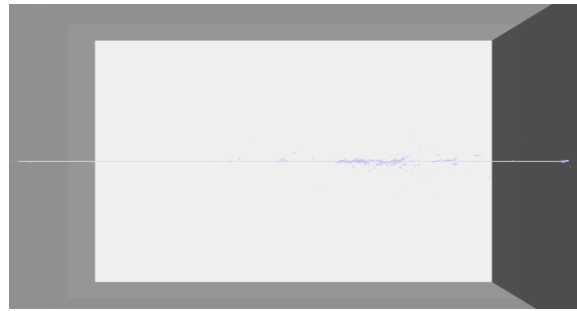
Kde  $E_{dep}$  je energie změřená kalorimetrem,  $E_0$  je energie původní částice,  $a$  a  $b$  jsou obecné konstanty, které můžeme zjistit fitováním.

## Výsledky měření

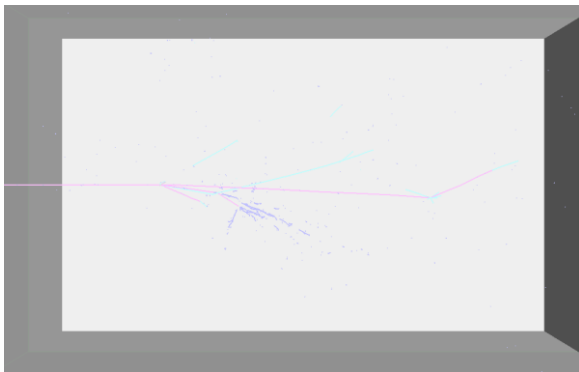
Na obrázcích 1-4 jsou zobrazeny výsledky interaktivní simulace průchodu částic kalorimetrem. Modrá barva značí elektromagnetickou spršku (fotony a elektrony/pozitrony), šedá barva značí miony, tyrkysová protony a růžová označuje piony. Na obrázku 1 je elektron procházející kalorimetrem, situace by vypadala podobně pro pozitron, foton nebo neutrální pion. Na obrázku 2 je vidět, že mion s kalorimetrem takřka neinteraguje. Průchod  $\pi^-$  je zobrazen na obrázku 3, kde lze pozorovat různé druhy částic, vznikající při hadronové spršce. Na obrázku 4 je zachycen průchod protonu s podobným výsledkem jako v případě pionu.



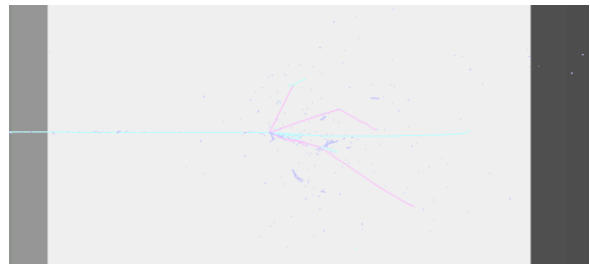
Obr. 1: Průchod elektronu s energií 10 GeV.



Obr. 2: Průchod mionu s energií 1 TeV.

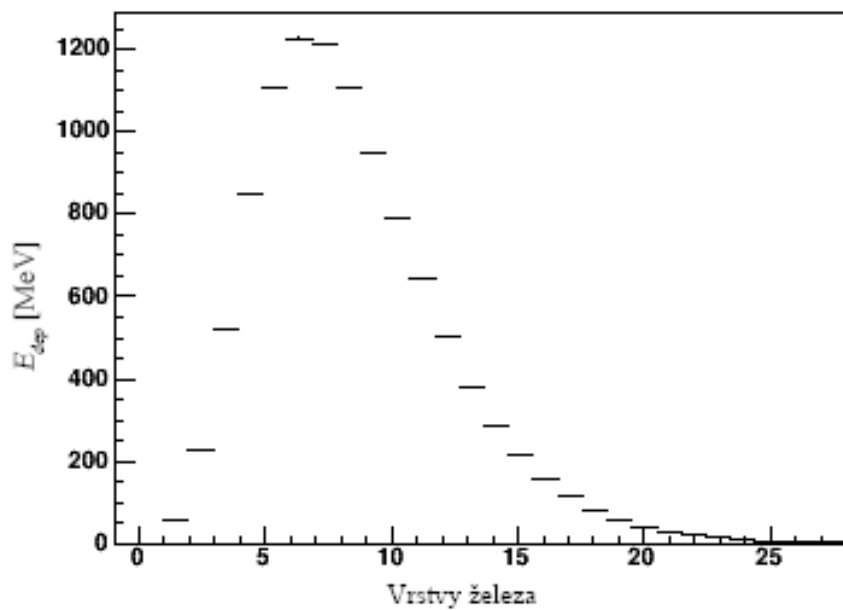


Obr. 3: Průchod  $\pi^-$  s energií 10 GeV.

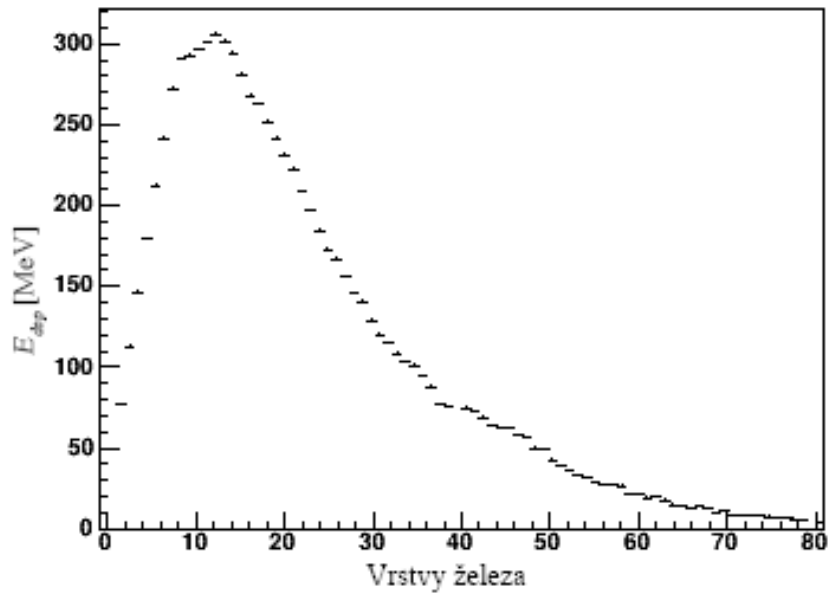


Obr. 4: Průchod protonu s energií 10 GeV.

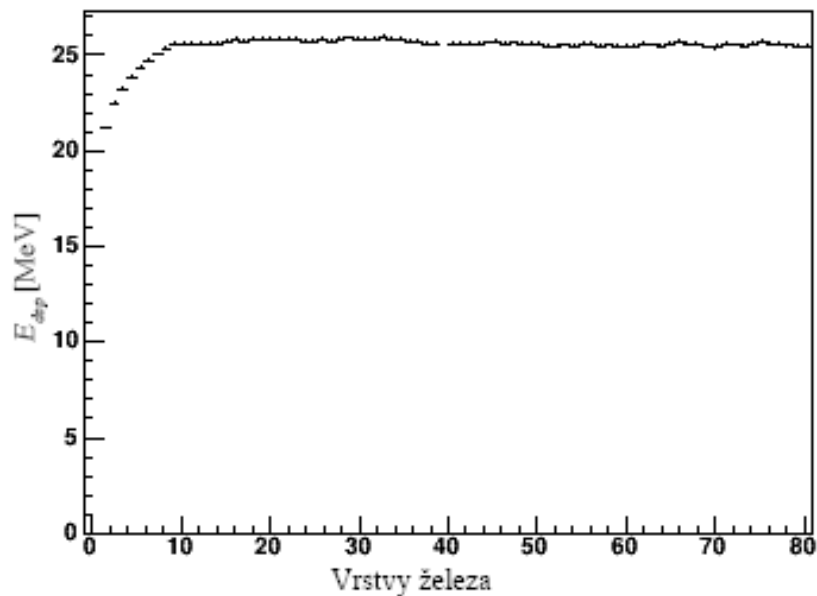
Grafy 1-3 zobrazují energii, kterou částice ztrácí v jednotlivých železných vrstvách kalorimetru. Jedná se o střední hodnotu energie, kterou jsme získali opakovaným měřením. Je vidět, že nejvíce energie ztrácí elektron a jeho střední dráha je nejkratší, což odpovídá obrázku 1. Pion ztrácí v jednotlivých vrstvách méně energie a jeho střední dráha je proto delší, to opět odpovídá výsledkům z interaktivní simulace. Naopak mion ztrácí v porovnání s elektronem velmi málo energie, interaguje pouze ionizačně a prochází celým kalorimetrem. To je opět v souladu s obrázkem 2.



Graf 1: Energie, kterou jeden elektron ztratí ve vrstvě železa kalorimetru.



Graf 2: Energie, kterou jeden pion ztratí ve vrstvě železa kalorimetru.



Graf 3: Energie, kterou jeden mion ztratí ve vrstvě železa kalorimetru.

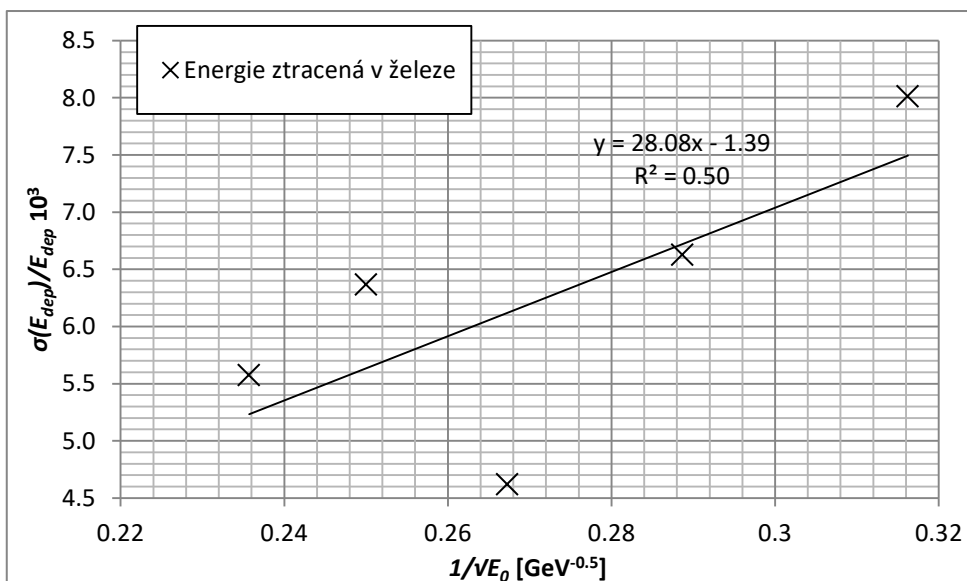
Graf 4 ukazuje naměřenou závislost (1) pro energii ztracenou v železe. Hodnoty konstant  $a$  a  $b$  jsme získali za pomoci lineární regrese. Jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1. Chybu měření jsme určili jako chybu lineární regrese. Graf 5 ukazuje naměřenou závislost pro scintilátor. Konstanty  $a$  a  $b$  jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 1: Konstanty  $a$  a  $b$  pro energetické rozlišení železné části kalorimetru

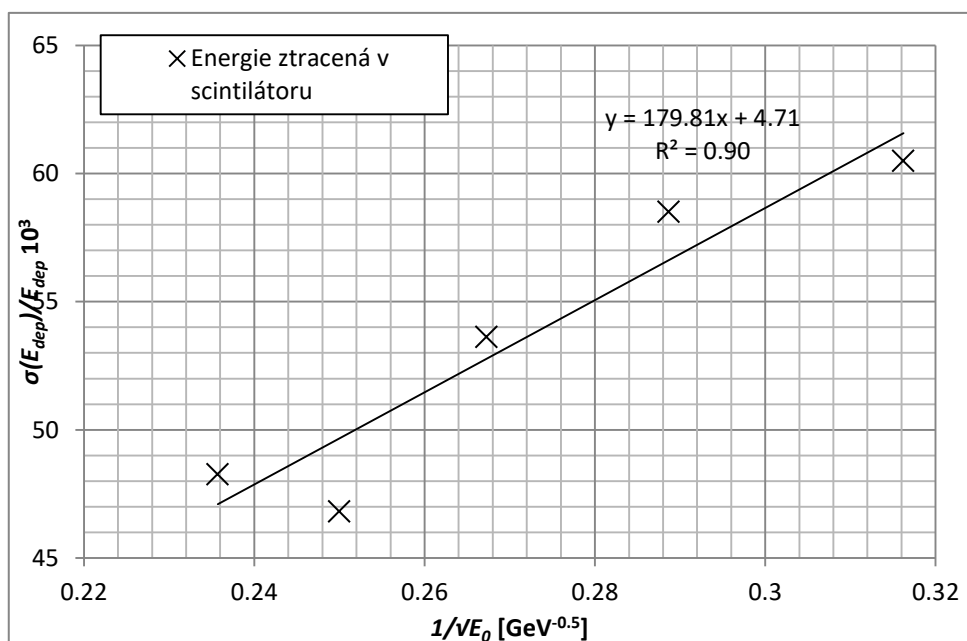
$a$ [ $\text{GeV}^{0.5}$ ]	$b$
$(0.03 \pm 0.02)$	$(-0.001 \pm 0.004)$

Tabulka 2: Konstanty  $a$  a  $b$  pro energetické rozlišení scintilátorové části kalorimetru

$a$ [ $\text{GeV}^{0.5}$ ]	$b$
$(0.18 \pm 0.04)$	$(0.00 \pm 0.01)$



Graf 4: Závislost energetického rozlišení kalorimetru na převrácené hodnotě odmocniny původní energie v železe.



Graf 4: Závislost energetického rozlišení kalorimetru na převrácené hodnotě odmocniny původní energie v scintilátoru.

## Diskuse

Interaktivní simulace ukázala, jak částice reagují v kalorimetru a také, jak je možné je od sebe odlišit. V interaktivní simulaci nebylo možné rozeznat elektron a pozitron. V praxi lze takovou situaci vyřešit např. zjištěním náboje dané částice. Miony v kalorimetru reagují poměrně málo, nicméně pokud bychom do kalorimetru vstřelili mion s dostatečně malou energií (3 GeV) ztratil by ionizací tolik energie, že by se v kalorimetru zastavil. Naopak při energii vyšší než 500 GeV můžeme pozorovat zřetelnou elektromagnetickou spršku.

Energie, kterou částice ztrácí v železné části kalorimetru je úměrná energii, kterou ztrácí v scintilátoru. Závislost vypadá stejně jako na grafech 1-3. Z grafu 3 je opět vidět, že energie,

kterou ztrácí mion, je v celé délce kalorimetru přibližně konstantní, což je dáno tím, že mion interaguje převážně ionizačně, přestože je nabitý.

V případě určování konstant ve vztahu (1) jsme zjistili, že konstanta  $b$  je přibližně rovna 0. Závislost energetického rozlišení na výchozí energii částice byla lineární, nicméně hodnoty velmi oscilovali okolo této lineární závislosti.

## Závěr

Energetické rozlišení kalorimetru je pro železnou část:

$$\frac{\sigma(E_{dep})}{E_{dep}} = \frac{(0.03 \pm 0.02) \sqrt{\text{GeV}}}{\sqrt{E_0}} + (-0.001 \pm 0.004)$$

A pro scintilátor:

$$\frac{\sigma(E_{dep})}{E_{dep}} = \frac{(0.18 \pm 0.04) \sqrt{\text{GeV}}}{\sqrt{E_0}} + (0.00 \pm 0.01)$$

## Literatura

- [1] Simulace průchodu vysokoenergetických částic kalorimetrem. *Fyzikální praktikum* [online]. [cit. 3. 11. 2017]. Dostupné z: [http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/\\_media/zadani/texty/txt\\_406.pdf](http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_406.pdf)