

Úkol

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

Teorie

V tomto praktiku se zabýváme počítačovou simulací průchodu vysokoenergetických částic kalorimetrem. Model kalorimetru je implementován po vzoru experimentu ATLAS v CERNu. Modelovaný kalorimetr má délku 150 cm, příčné rozměry 80×80 cm a obsahuje 75 střídavých vrstev železa a scintilátoru.

Jedná se o simulaci destruktivního měření. Částice kalorimetru předá veškerou svoji energii, většinu ve vrstvách železa a část ve scintilátoru, kde je transformována ve světelné záblesky, které je možné sledovat a vyhodnocovat. Při průchodu kalorimetrem se částice rozpadají a vytvářejí tzv. spršku.

Částice lze dle způsobu interakce s látkou rozdělit do skupin:

1. částice vytvářející čistě elektromagnetickou spršku (e^-, e^+, γ, π^0)
2. částice produkující hadronovou spršku (vysokoenergetické hadrony kromě π^0)
3. ionizující částice (μ)
4. neinteragující částice (ν)

V zájmu stručnosti byl popis jednotlivých způsobů interakce přenechán do sekce výsledků. Energetické rozlišení kalorimetru lze vyjádřit jako

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

kde E_0 je původní energie částice a a tzv. *sampling term*.

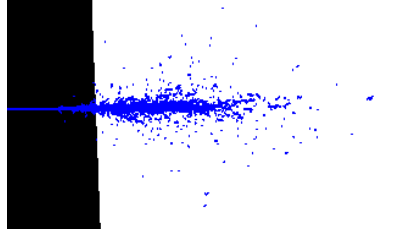
Výsledky

Úkol 1

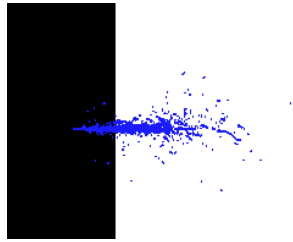
Obrázky 1 - 10 ukazují průlety částic kalorimetrem. Kvůli nesprávnému nastavení zobrazení interaktivní simulace byly výsledné snímky obrazovky barevně velice nevýrazné a nekонтastní. V mnoha případech také sprška zabírala jen malou část kalorimetru, při zobrazení celého snímku by zanikly detaily. Proto byly tyto snímky oříznuty a barevně vylepšeny softwarem pro digitální úpravu obrázků.

Jako první jsou zobrazeny elektromagnetické spršky elektronu (obr. 1), částice γ (obr. 2) a π^0 (obr. 3). Elektromagnetické spršky vznikají opakovanou konverzí částice γ na elektron-pozitronový pár, který následně brzdí na zář. Částice π^0 se s vysokou pravděpodobností (99 %) rozpadají na dva fotony.

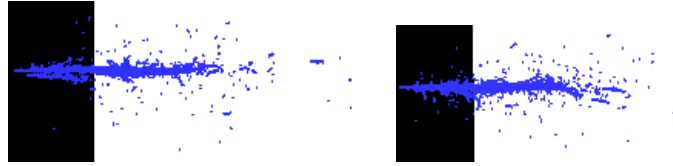
rychle rozbíjí na 2γ a ve zbytku případů na elektron pozitronový pár a γ . Na obrázku 3 vlevo vstupují do kalorimetru dvě z těchto částic. Elektron je zobrazen modře, nenabitě částice se nezobrazují.



Obrázek 1: Průlet elektronu s energií 20 GeV kalorimetrem

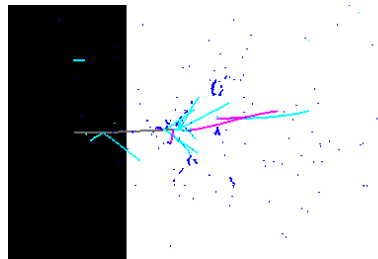


Obrázek 2: Průlet částice γ s energií 10 GeV kalorimetrem

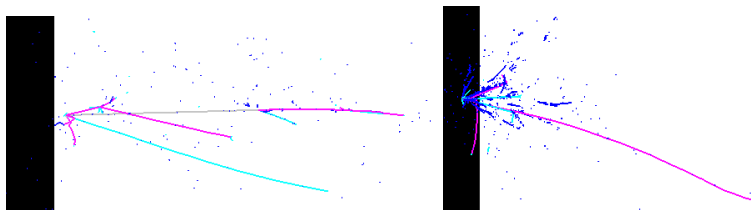
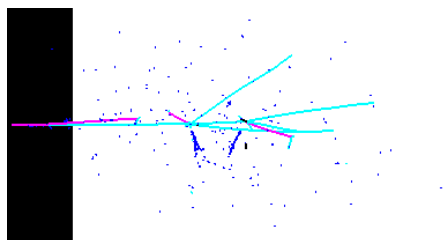
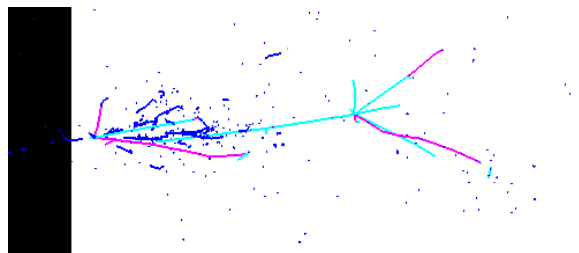


Obrázek 3: Průlet dvou částic π^0 s energií 10 GeV kalorimetrem

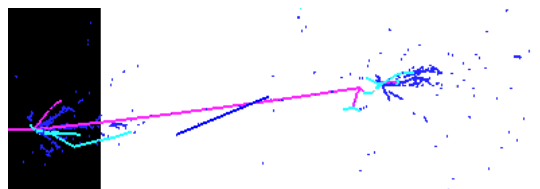
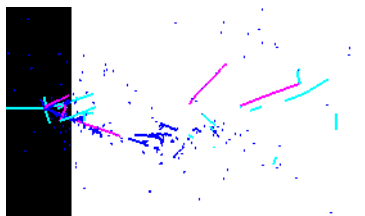
Obrázky 4 až 9 zachycují průlet částic produkujících hadronovou spršku. Ve všech případech jsou produktem další hadrony, především protony (světle modře) a částice π (fialově). Interakce se liší převážně dobou života původní částice, viz obr. 5, kde se částice K_L^0 (vlevo) šíří až za polovinu délky kalorimetru, kdežto K_S^0 se hned po dopadu na kalorimetr rozbíjí. Všechny tyto interakce jsou dále doprovázeny sprškami elektromagnetickými. Kromě hadronů a elektronů nám zde také část energie unášejí neutrino, která jsou však vysoce nereaktivní a nezobrazují se.



Obrázek 4: Průlet částice K^+ s energií 10 GeV kalorimetrem

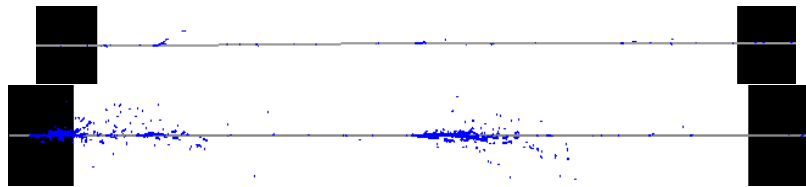
Obrázek 5: Průlet částic K_L^0 a K_S^0 s energií 10 GeV kalorimetremObrázek 6: Průlet částice Λ s energií 10 GeV kalorimetrem

Obrázek 7: Průlet neutronu s energií 10 GeV kalorimetrem

Obrázek 8: Průlet částice π^- s energií 10 TeV kalorimetrem

Obrázek 9: Průlet protonu s energií 10 GeV kalorimetrem

Na obrázku 10 vidíme dva průlety částice μ^- . Tato částice ztrácí jen minimum energie a kalorimetr vzápětí opouští. Tyto ztráty energie jsou způsobeny ionizací, z obrázku je patrné, že při vyšší energii je efekt ionizace větší.

Obrázek 10: Průlet částice μ^- s energií 10 GeV a 2 TeV kalorimetrem

Úkol 2

V zadní části protokolu jsou přiloženy výstupy programu root z měření průchodu elektronu a částice μ a π kalorimetrem. Všechny částice měly počáteční energii 17 GeV.

Z výsledků měření elektronu je zřejmé, že celá energie elektronu byla předána kalorimetru v jeho přední části, součet energie předané železu a scintilátoru se téměř rovná energii počáteční, úniky po stranách kalorimetru jsou zanedbatelné.

Výsledky měření částice μ ukazují (společně s obrázkem 10), že jen malá část energie (12 %) částice byla předána kalorimetru, a to rovnoměrně po celou dobu průletu. Většinu energie si částice odnesla s sebou po odchodu z kalorimetru. Úniky energie po stranách kalorimetru jsou opět zanedbatelné.

Předávání energie částice π probíhalo pozvolněji než v případě elektronu. Ze součtu energie předané železu a scintilátoru a z grafu ve spodní části přílohy je zřejmé, že nezanedbatelné množství energie uniklo po stranách kalorimetru.

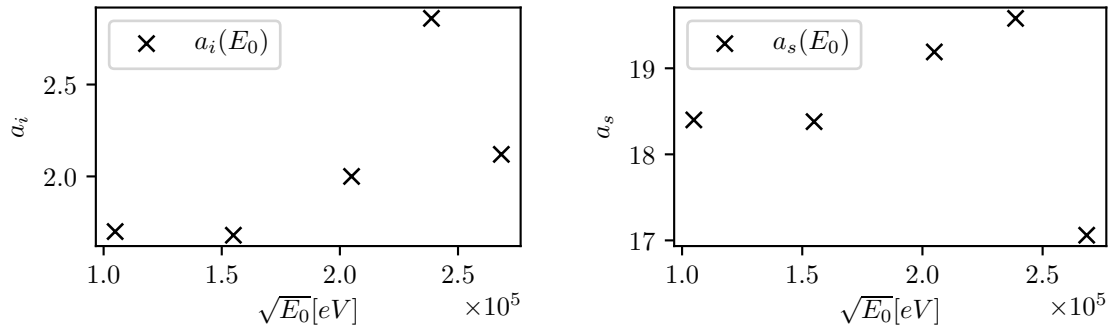
Úkol 3

Bylo provedeno 5 simulací průchodu elektronu s různou energií kalorimetrem. Byly zaznamenány hodnoty *sampling term* a_i pro ztráty energie v železe a a_s pro ztráty energie v scintilátoru. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce.

E_0 [eV]	a_i □	a_s □
$1,1 \times 10^{10}$	1,70	18,40
$2,4 \times 10^{10}$	1,68	18,38
$4,2 \times 10^{10}$	2,00	19,19
$5,7 \times 10^{10}$	2,86	19,58
$7,2 \times 10^{10}$	2,12	17,06

Tabulka 1: Tabulka hodnot pro úkol 3

Jak lze vidět z grafů na obrázku 11, není závislost a na $\sqrt{E_0}$ ani přibližně lineární, bylo proto od určení energetického rozlišení kalorimetru upuštěno.



Obrázek 11: Závislost a_i a a_s na odmocnině počáteční energie E_0

Diskuse

Jelikož toto praktikum bylo teoretičtějšího rázu a neproběhlo žádné skutečné měření, proběhla diskuse již v rámci shrnutí výsledků výše.

Závěr

Byly provedeny a popsány interaktivní simulace průchodu částic kalorimetrem.

Byly popsány průběhy energetických ztrát v kalorimetru pro elektron a částice μ a π .

Z důvodu nelinearity závislosti $a(\sqrt{E_0})$ nebylo možné určit energetické rozlišení kalorimetru.

Reference

- [1] Pokyny k měření “Simulace průchodu vysokoenergetických částic kalorimetrem”, dostupné z https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_406.pdf, 10.10.2018