

Pracovní 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

Teoretický úvod

Hadron je složená silně interagující subatomární částice. Mohou obsahovat kvarky, antikvarky, případně také gluony nebo být složeny pouze z gluonů. Proton, neutron, kaon a nabitý pion patří k hadronům.

Lepton částice, na kterou nepůsobí silná jaderná síla (silná interakce). K leptonům patří elektron, pozitron, mion.

Energetické ztráty jsou hlavně způsobeny brzdícím zářením nebo ionizací. Mají-li sekundární částice dostatek energie, produkuje v následných interakcích další částice, přičemž energie takto vytvářených sekundárních částic postupně klesá. Tento proces se nazývá sprška. Klesne-li energie pod určitou mez, proces tvorby dalších částic se zastaví a částice dále ztrácejí energii (např. ionizací) až se úplně zastaví.

Elektromagnetická sprška

Vysokoenergetický foton kosmického gama-záření se při průchodu kolem atomového jádra mění v relativistický elektron a pozitron (tzv. materializace). Vzniklý elektron (nebo pozitron) při průletu kolem jádra vyzáří energetický gama-foton, a tento proces se mnohokrát opakuje (viz obr 1).

Kritická energie

Kritická energie je taková, že pro energii menší než E_{krit} převládají energetické ztráty ionizací, pro vyšší - brzdícím zářením. Kritická energie je úměrná kvadrátu hmotnosti částice. Odtud vidíme, že pro mion je tento práh 200x a pro proton až 2000x větší než pro elektron.

Energetické rozlišení

Z úvah, uvedených ve studijním textu k úloze [1, kap. 1.3] plyne, že energetické rozlišení $\sigma(E_d)$ reálného kalorimetru je nepřímo úměrné odmocnině z počáteční energie svazku a je dáno vztahem

$$\sqrt{E_0}\sigma(E_d) = E_d(a + b\sqrt{E_0}) \quad (1)$$

kde E_d je měřitelná energie v kalorimetru, a a b jsou konstanty.

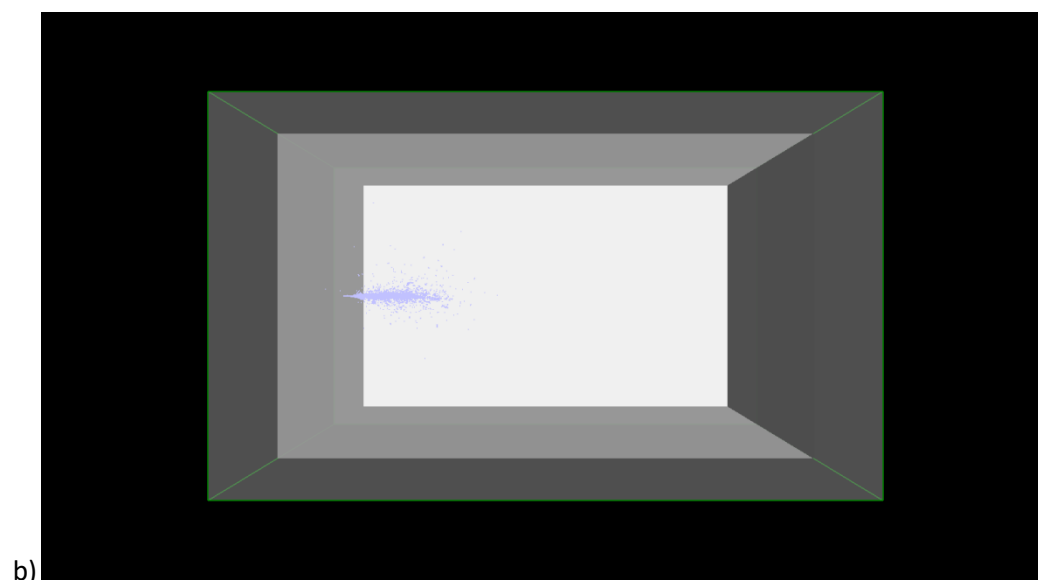
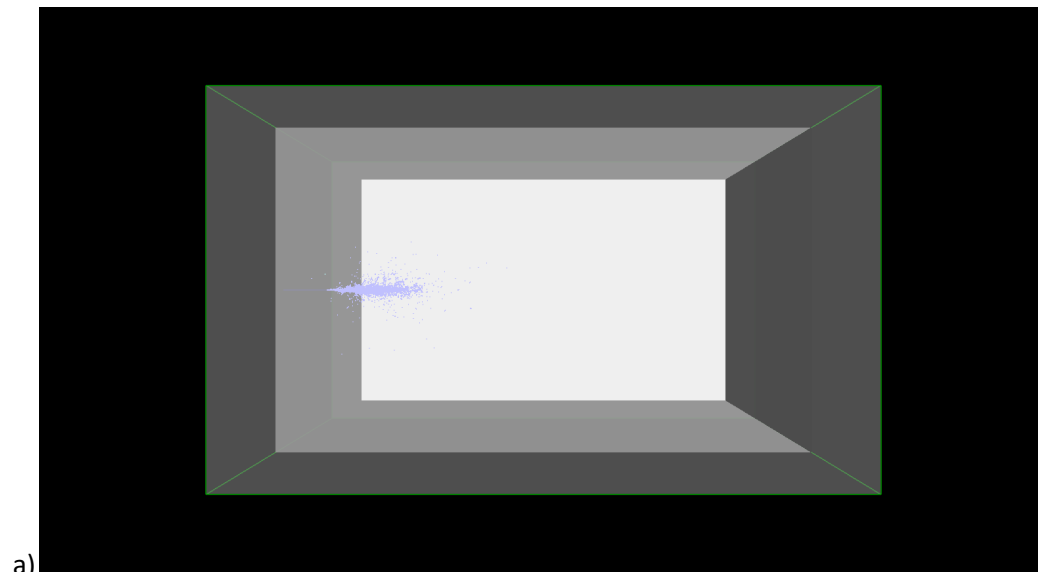
Výsledky měření

Interaktivní simulace

Pozorovali jsme interakce v kalorimetru pro různé částice a měnili jsme jejich energii. Obrázky znázorňují dráhy nabitých částic barevnými čarami. Neutrální částice se nezobrazovaly.

Elektromagnetická sprška

Obrázek 1: Elektromagnetické spršky generované (a) elektronem (b) gama zářením o energii 40 GeV

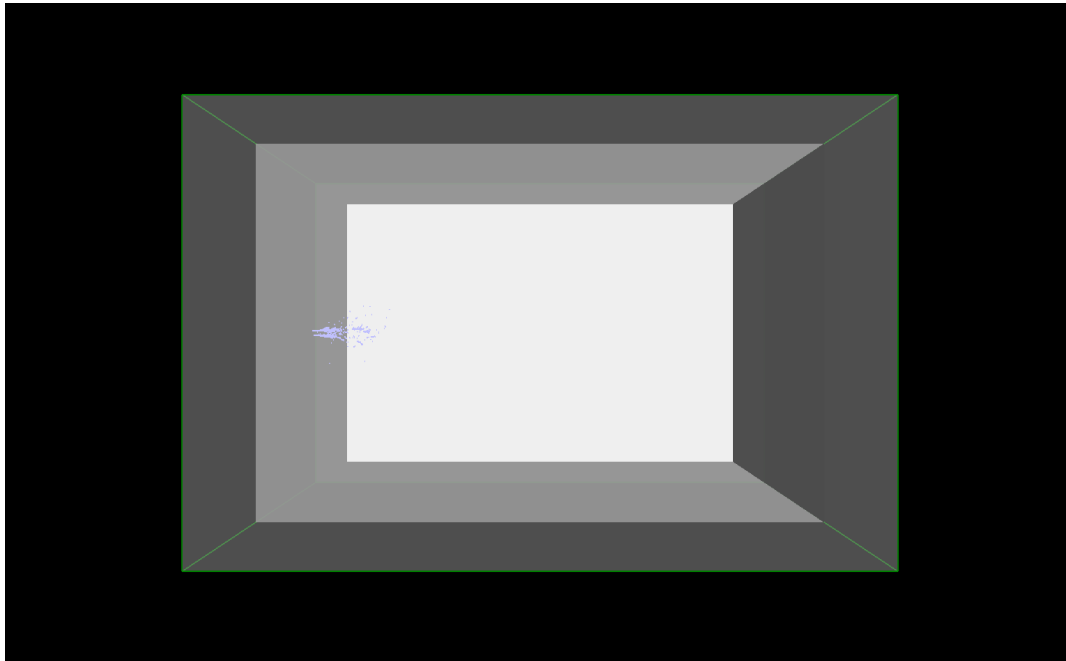


V obou případech dochází k vytváření EM kaskády, popsané v teoretickém úvodu.

Neutrální pi mezon

Dle známého předpisu rozpadu $\pi_0 \rightarrow 2\gamma$ jsme pozorovali 2 EM spršky vedle sebe.

Obrázek 2: rozpad π_0



Mion

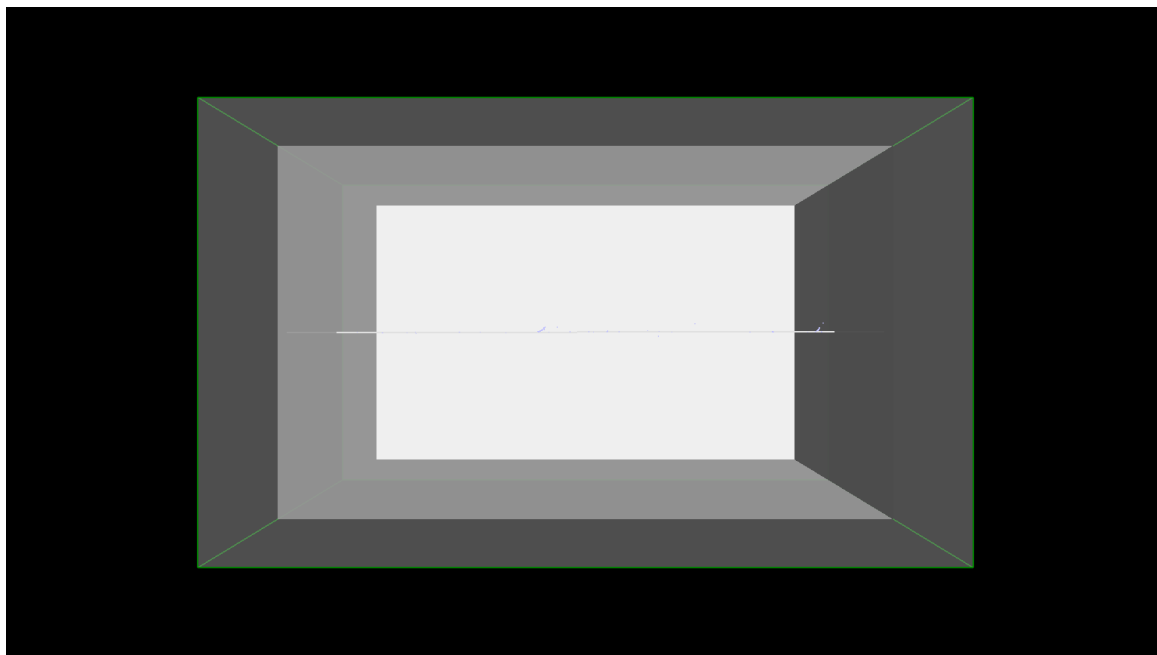
Mion patří k těžším částicím, a proto má vysokou kritickou energii (viz teoretický úvod) a proto skoro nevyzařuje brzdné záření na energiích nižších řádu TeVů. Takže pro nízké energie mion proletí skoro bez interakcí (na rozdíl od protonů, který patří k hadronům a tím pádem má schopnost interagovat s jádru silnou interakcí a srážkou rozdrtit jádro na jiné částice).

Energetické ztráty se skládají jenom z ionizace, která však není energeticky náročná. Pak mion relativně dlouho má dost vysokou energii na to, aby se v kalorimetru nezastavil.

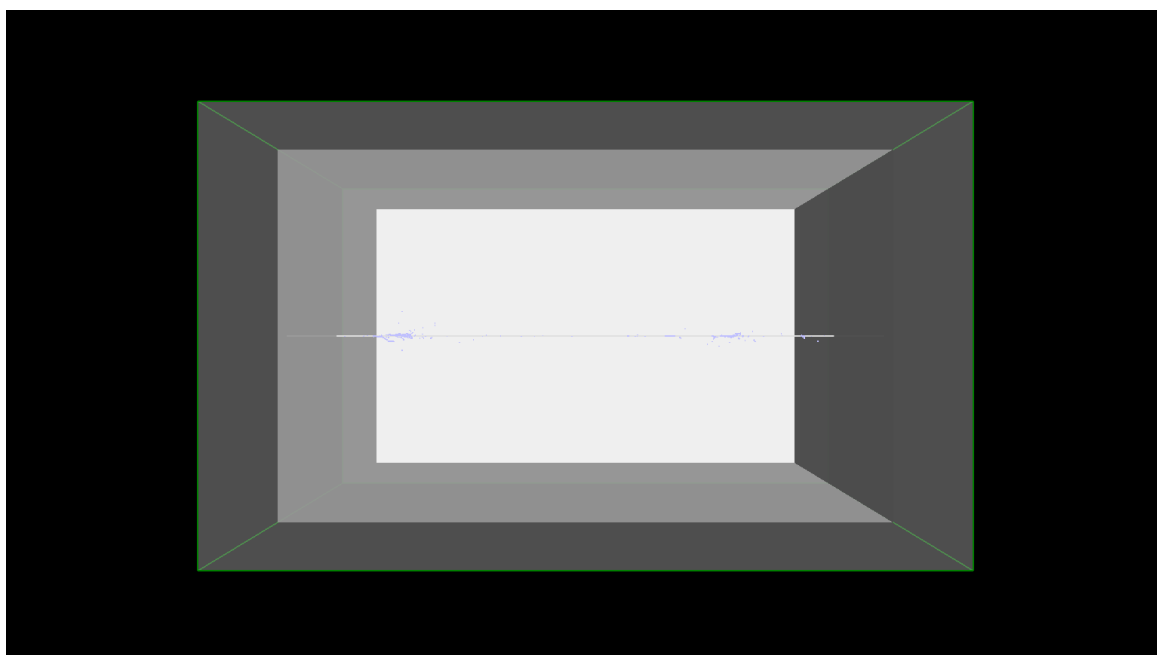
Na obrázku 3(c) vidíme EM spršku, vyvolanou emisí brzdného záření.

Obrázek 3: Průchod záporného mionu kalorimetrem s energiemi (a) 40 GeV, (b) 105 GeV, (c) 10 TeV

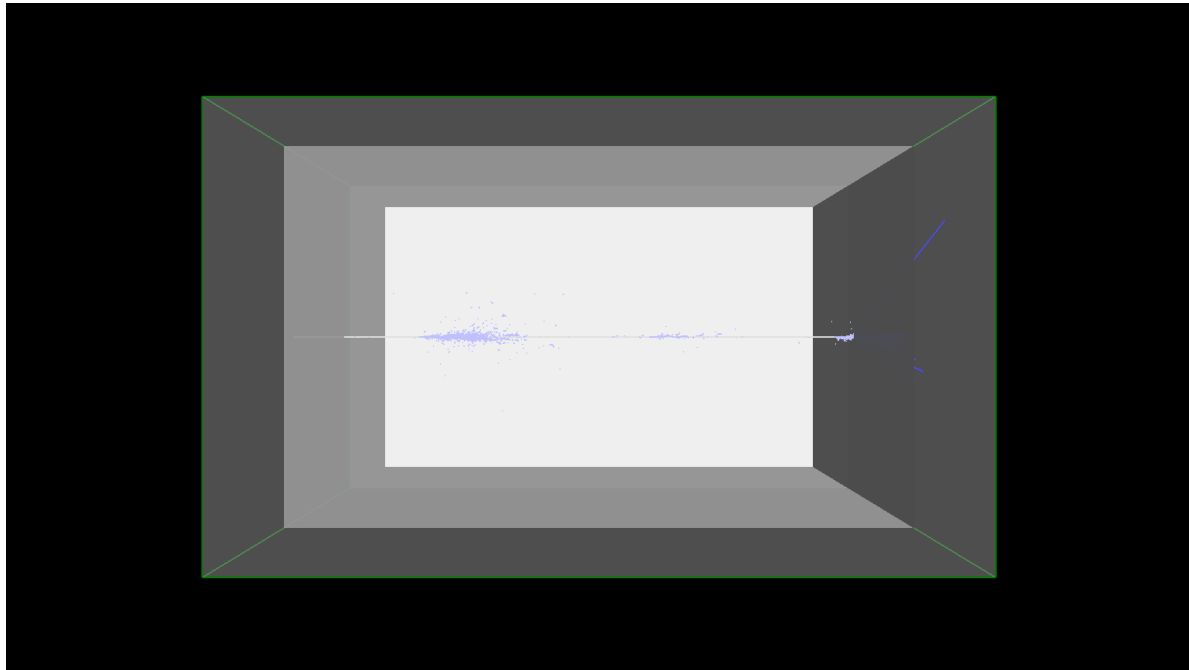
a)



b)



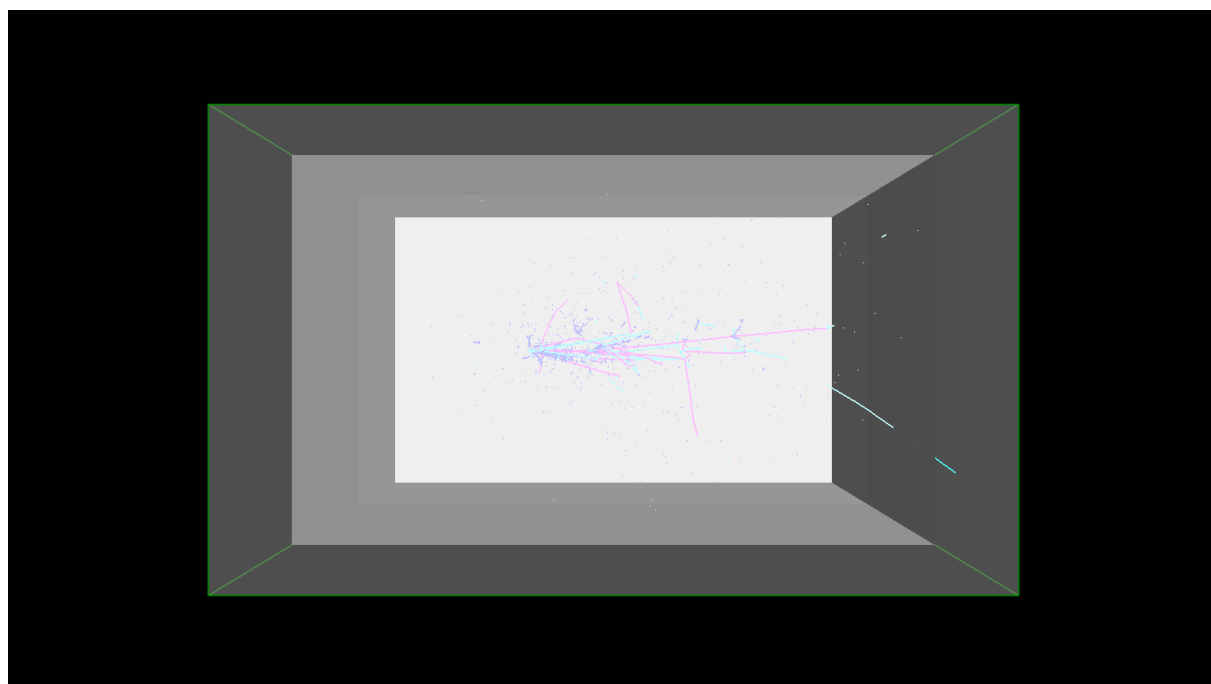
c)



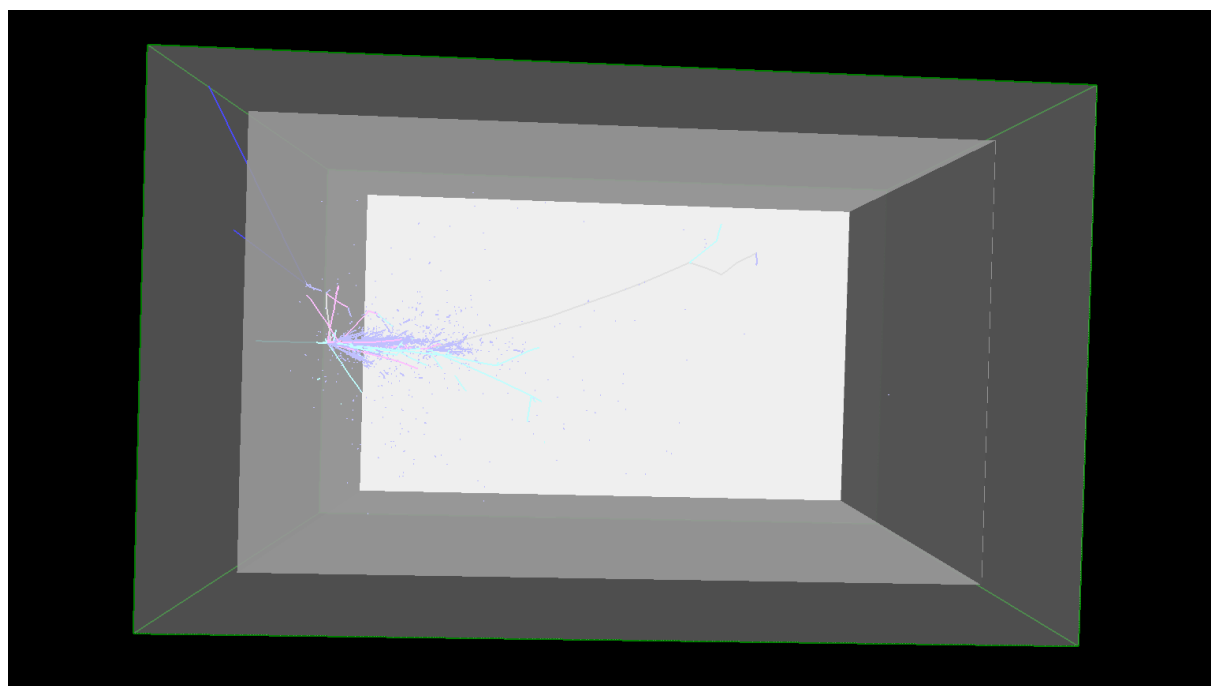
Hadronová sprška

Hadronové spršky jsou nejčastěji vyvolány nárazem hadronu do jádra média. Kvarky v hadronu interagují s kvarky jádra silnou interakcí a jsou schopni nárazem rozdělit jádro na komponenty, stopy kterých vidíme na obrázcích 4-7. Vysvozené hadrony a elektrony mají dost energie na to, aby dalšími nárazy zvětšovali intenzitu spršky do té doby, než ztratí většinu své kinetické energie. Jelikož se v důsledku interakce uvolňují i elektrony a pozitrony, můžeme pozorovat i menší EM spršky.

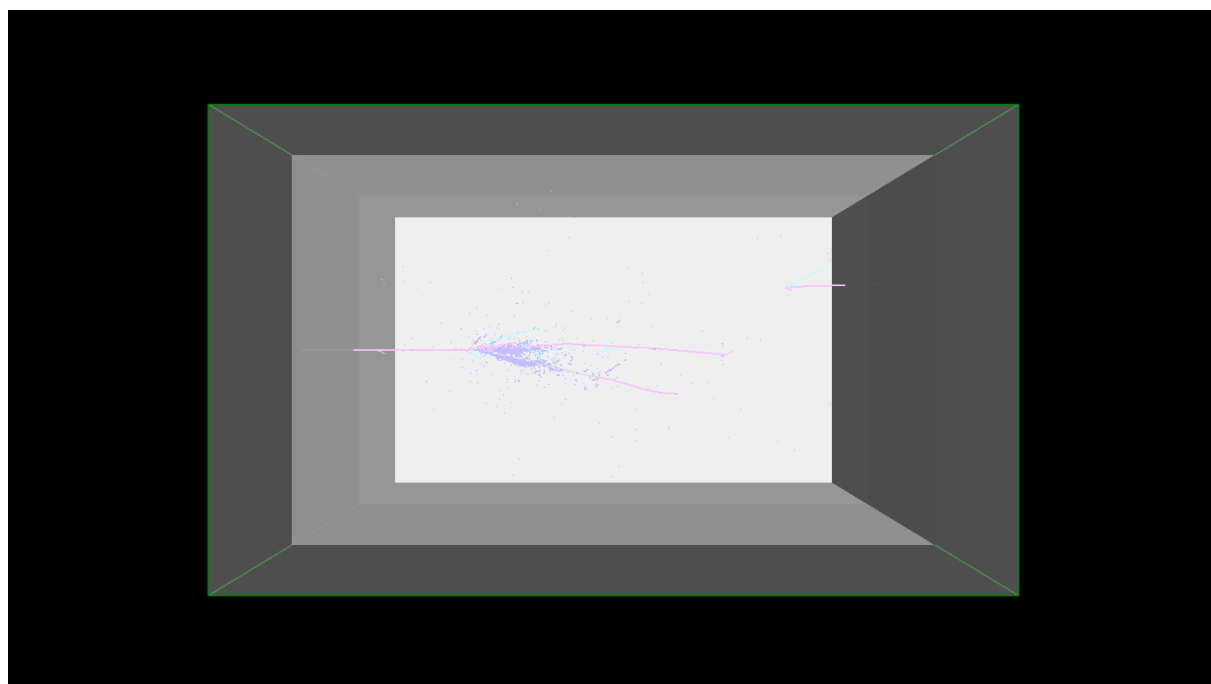
Obrázek 4: Hadronová sprška vyvolaná neutronem s energií 40 GeV



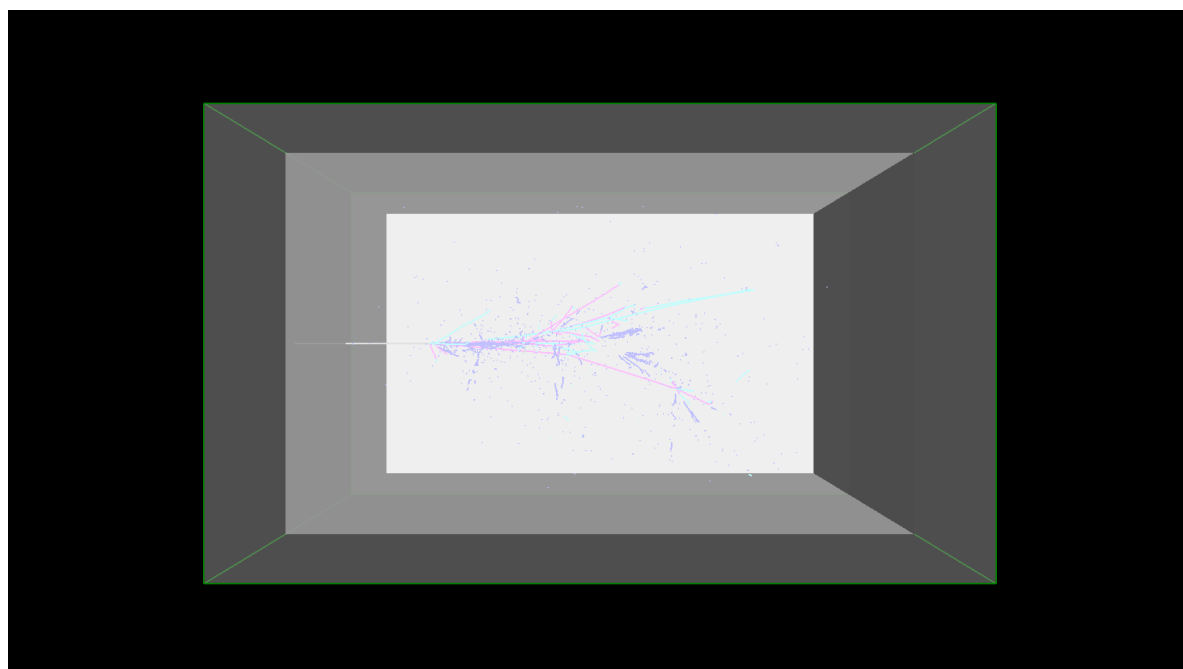
Obrázek 5: Hadronová sprška vyvolaná protonem s energií 40 GeV



Obrázek 6: Hadronová sprška vyvolaná kladným pi mezonem s energií 30 GeV

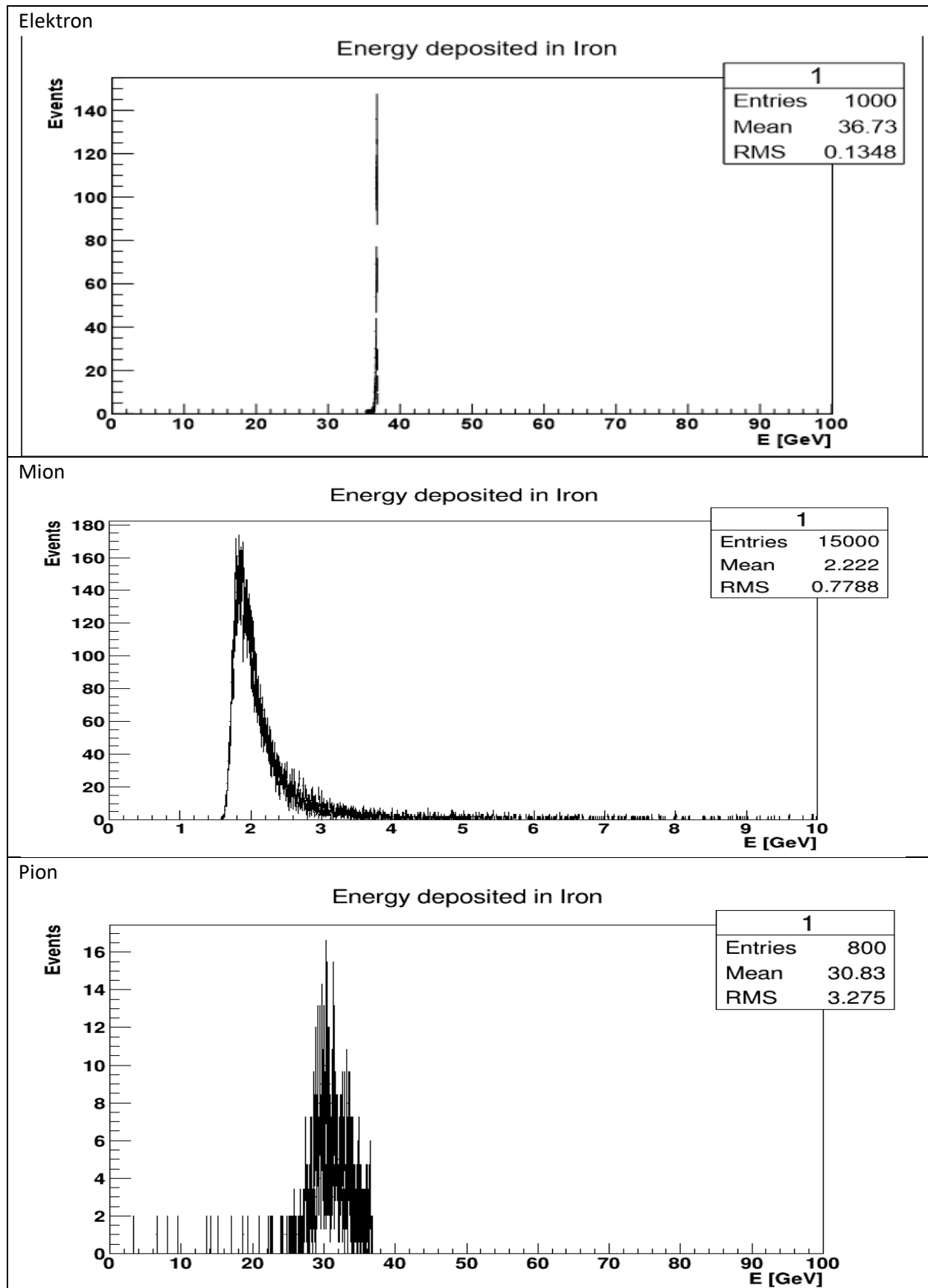


Obrázek 7: Hadronová sprška vyvolaná kaonem s energií 40 GeV

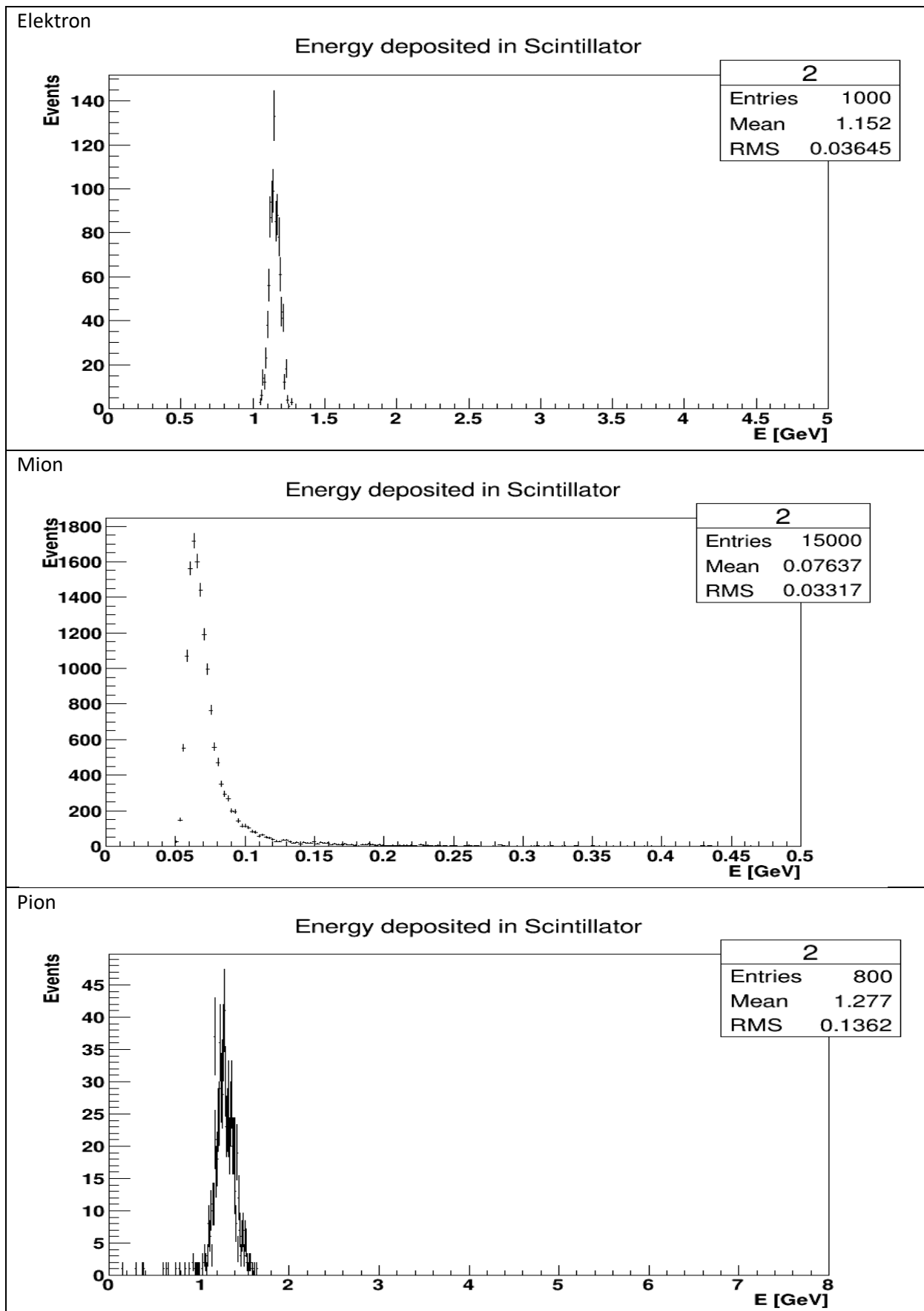


Kvantitativné porovnaní pro různé částice v kalorimetru

Obrázek 8: Energie, uvolněná (a) elektronem, (b) mionem, (c) pionem v železe s $E_0 = 38 \text{ GeV}$



Obrázek 9: Energie, uvolněná (a) elektronem, (b) mionem, (c) pionem v scintilátoru s $E_0 = 38$ GeV



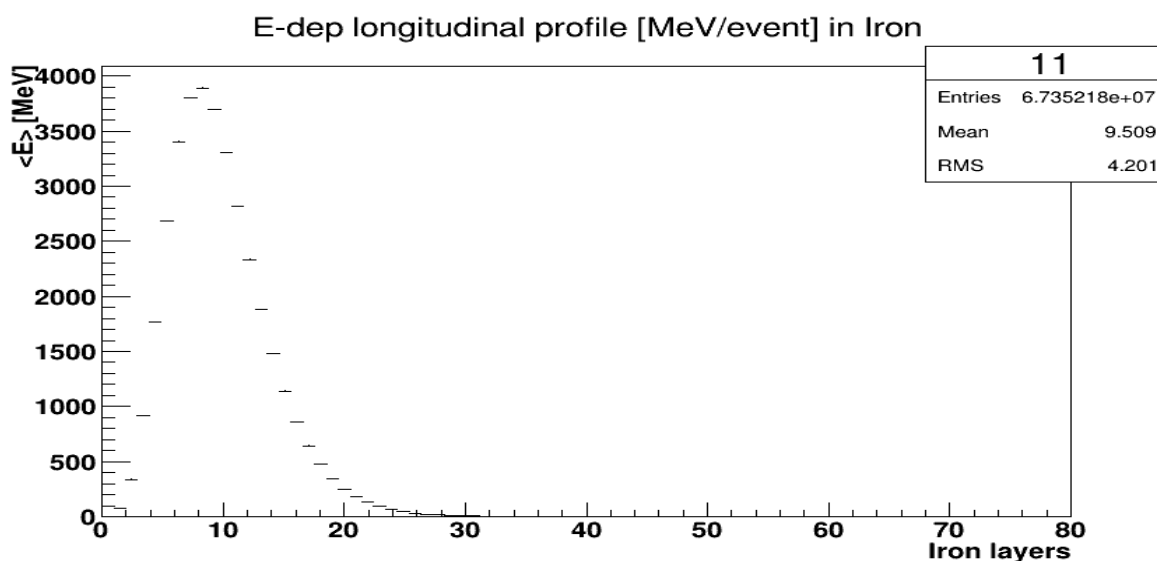
Elektron v kalorimetru vždy vyvolává EM spršku. Jelikož měřená veličina je proud a profil EM spršky nemá stupně volnosti pro vývoj spršky (vždy se vytváří EM kaskáda), uvolněná energie je lokalizovaná v malém okolí střední hodnoty. Z grafů 8,9 vidíme, že téměř veškerá energie elektronu byla uvolněná v kalorimetru.

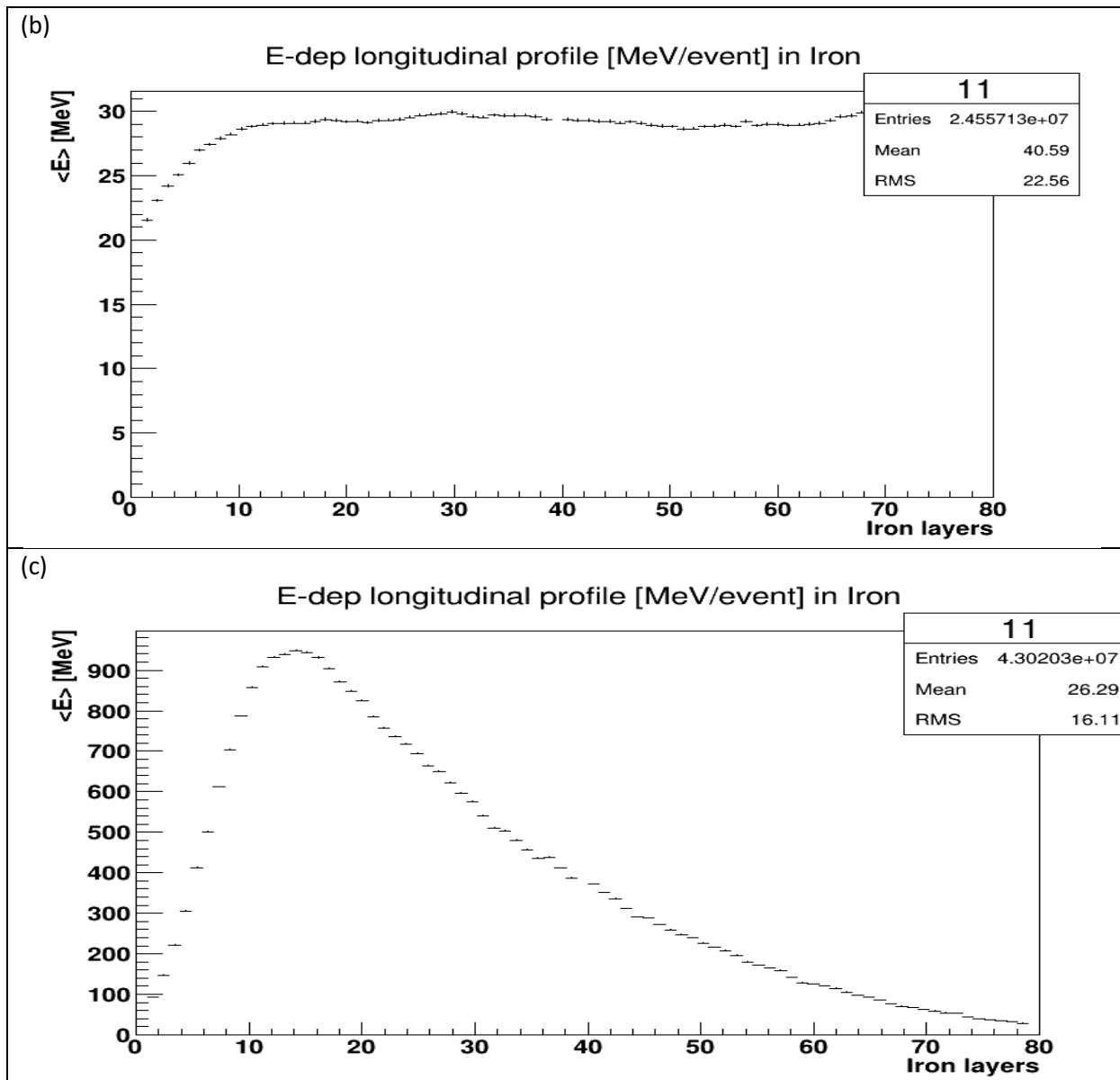
Mion je malointeragující částice. Z obr. 8 vidíme, že ztratil v kalorimetru jenom 2,2 GeV z původních 38 GeV, jelikož nevyzařuje a ionizační ztráty jsou malé a mion má dost energie, aby se v kalorimetru nezastavil. Ztráty však nejsou ideálně konstantní. Kvůli Dlouhé době života je nenulová pravděpodobnost ztrát po celé délce kalorimetru, takže nepatrná část mionů uvolňuje až několikrát větší energii než průměrná hodnota.

Nabitý **pion** vyvolává hadronovou spršku, neboť patří k hadronům a nelze předpovědět, jaké částice se vytvoří ve výsledku nárazu do jádra. Časová evoluce uvolnění energie závisí na konkrétním vývoji spršky a jelikož jde o stochastický proces nemáme úzký pík (jako elektron) kolem jedné hodnoty, ale distribuce energie je rozsáhlejší.

Obrázek 10: Profil spršky pro průchod (a) elektronu,(b) mionu,(c) pionu v scintilátoru s energií 38 GeV

(a)





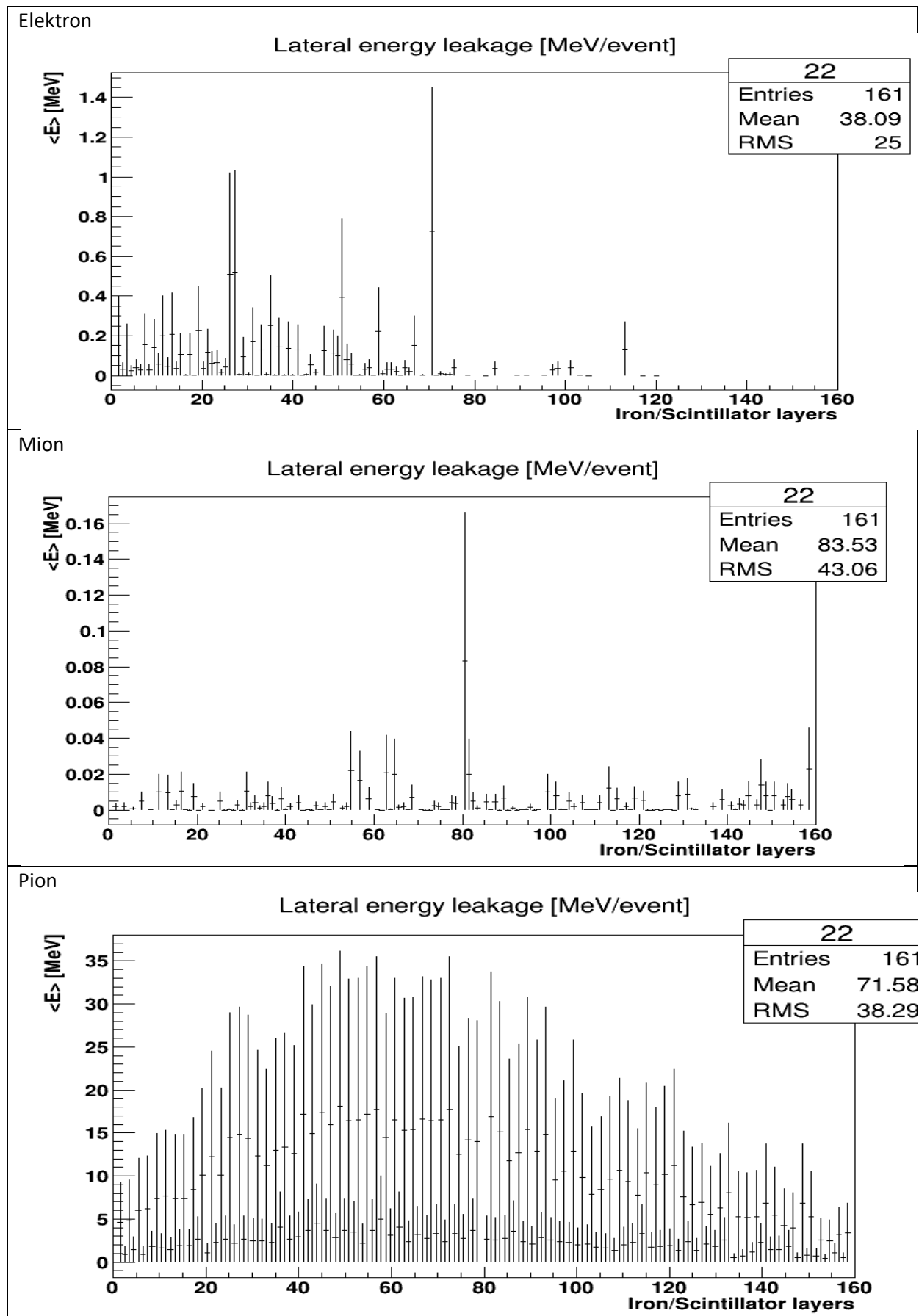
Na uvedených výše obrázcích vodíme tzv. profil spršky, který znázorňuje závislost uvolněné energie na poloze svazku částic v kalorimetru s původní energií 38 GeV.

Jak již bylo zmíněno výše **elektrony** se stejnou energií vyvolávají dost podobnou EM spršku. Pak na obr. 10 vidíme rychlý nárůst uvolněné energie s vysokou amplitudou již kolem desáté vrstvy kalorimetru a následující strmý pokles. Vidíme, že hloubka průniku elektronů nepřesahuje 30 vrstev.

Mion o dané počáteční energii ztrácí energii prostřednictvím ionizace, která je konstantní (v rámci stochastického procesu). Na začátku dráhy však vidíme nárůst energie. Důvodem je to, že ionizované atomy za určitou dobu deexcitují a vyzařují fotony, což přispívá k celkové hladině uvolněné energie. Na začátku dráhy mionu v médiu ještě nejsou ionizované atomy.

Pion díky širokému spektru částic, vytvořených ve spršce nemá typický tvar křivky pro průchod jedné částice. Uvedená výše křivka se skládá z velkého množství křivek. Lze nahlédnout, že nejvíce energie se nejpravděpodobněji uvolní mezi 10. a 20. vrstvou kalorimetru.

Obrázek 11: Energie „ztracená“ v kalorimetru pro částice s energií 38 GeV



Hlavní energetické ztráty **elektronu** připadají na spršku. V hlubších vrstvách zanedbatelně malá část přispívá ionizací.

Energetické ztráty pro **mion** jsou konstantní a zanedbatelně malé. Důvodem je to, že ionizace produkuje gama kvanty přímo měřené kalorimetrem.

Při průchodu kalorimetrem **piony** produkují další částice. Některé unikají z kalorimetru a odnášejí tak část energie vstupujícího pionu. Na ztrátách energie se podílí rozbití jader a část energie odnášejí neinteragující neutrino. Střední hodnota energie, kterou pion se vstupní energií 38GeV předal kalorimetru, byla kolem 33 GeV.

Energetické rozlišení

V programu ROOT jsme pětkrát simulovali průchod svazku záporných pi mezonů s energiemi 8, 16, 27, 34 a 46 GeV. Počet pionů ve svazku byl 600.

Výsledky simulace jsme zpracovali metodou lineární regrese v souladu se vzorcem 1. Ztráty v železe a scintilátoru jsme zpracovali zvlášť.

$$a_{Fe} = 0,33 \pm 0,05$$

$$b_{Fe} = 8 \pm 2$$

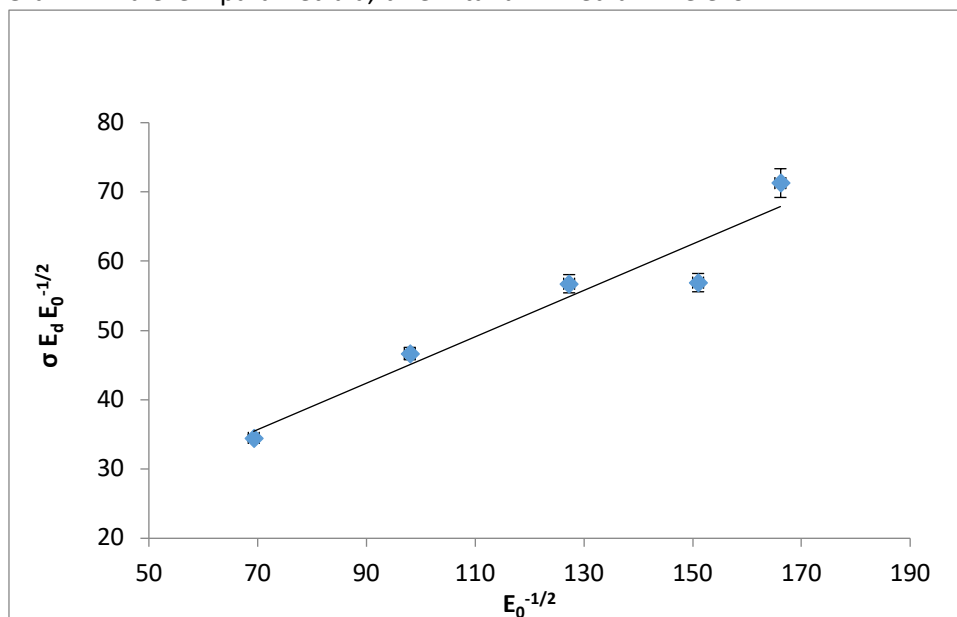
$$a_{Sc} = 0,14 \pm 0,05$$

$$b_{Sc} = 41 \pm 3$$

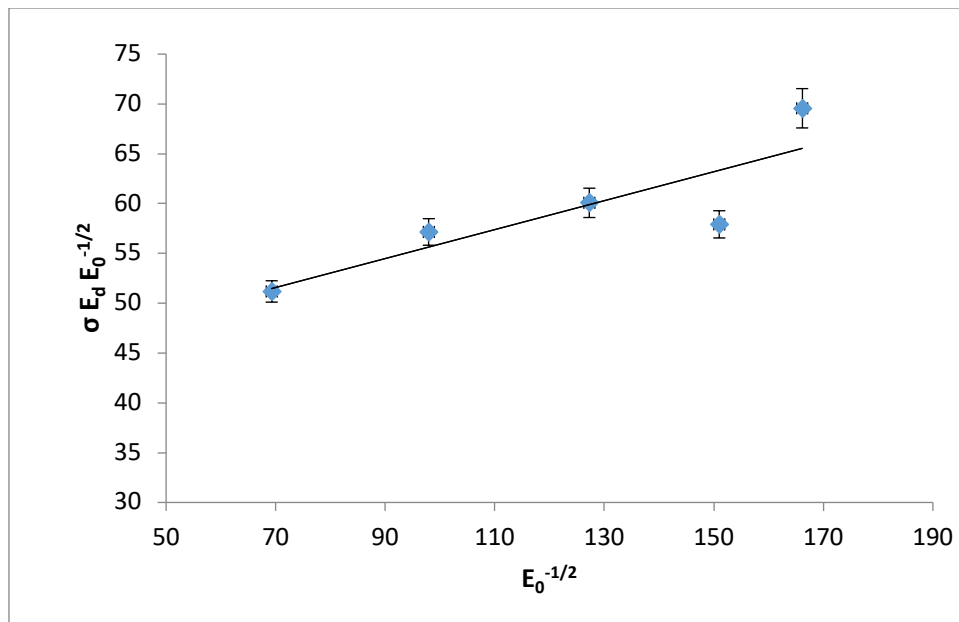
Tabulka 1: Závislost energetického rozlišení na počáteční energii pro železo a scintilátor

| E_0 [GeV] | $\sigma_{Fe} E^{-1}_d$ | $\sigma_{Sc} E^{-1}_d$ |
|-------------|------------------------|------------------------|
| 8 | 8,306 | 41,105 |
| 16 | 8,305 | 41,104 |
| 27 | 8,304 | 41,104 |
| 46 | 8,303 | 41,103 |

Graf 1: K nalezení parametru a, b ve vztahu 1. Médium: Železo



Graf 2: K nalezení parametru a, b ve vztahu 1. Médium: Scintilátor



Diskuze

Všechny provedené interakce probíhaly dle teoretických předpokladů a naměřené energetické ztráty s nimi dobře korespondovaly.

Z grafů 1,2 vidíme, že hodnoty odpovídající energii 38 GeV hrubě porušují linearitu zkoumané závislosti. Proto pro regresi jsme používali sadu měření bez dané hodnoty (rozlišení pro železo se změnilo přibližně z hodnoty 12 na 8).

Podrobnější komentáře k výsledkům viz Výsledky měření.

Závěr

Seznámili jsme se s interaktivní verzí simulace modulu hadronového kalorimetru Tilecal. Vyzkoušeli jsme se simulovat různé částice, s rozdílnou energií. Model nabízel různé úhly pohledu.

Prostudovali jsme charakter interakcí různých částic s různými vstupními energiemi a také statistiku průchodu kalorimetrem pro 1000 pionů.

Závislost energetického rozlišení na počáteční energii je v souladu s teoretickou předpovědí klesající.

Literatura

[1] Studijní text k úloze 16. [10.3.2017] Dostupné z http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_406.pdf