

Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

Fyzikální praktikum



Úloha č. A6

Název úlohy: Simulace průchodu částic hadronovým kalorimetrem

Jméno: Michal Grňo

Obor: FOF

Datum měření: 11. 11. 2020

Datum odevzdání: 25. 11. 2020

Připomínky opravujícího:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Práce při měření	0-3	
Teoretická část	0-2	
Výsledky a zpracování měření	0-9	
Diskuse výsledků	0-4	
Závěr	0-1	
Použitá literatura	0-1	
Celkem	max. 20	

Posuzoval:

dne:

1 Pracovní úkoly

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
4. ~~Vypracovat protokol včas, a ne v průběhu noci před odevzdáním~~

2 Teoretická část

Podstatou úlohy je zpracování a interpretace dat ze simulace kalorimetru pro detekci vysokoenergetických částic. V kalorimetru je možné pozorovat interakce elementárních a složených částic.

Jednou z nejčastěji pozorovaných interakcí je brzdné záření elektronů a pozitronů:

$$e^{\pm} \rightarrow \gamma + e^{\pm} \quad (1)$$

Vysokoenergetické fotony navíc mohou dát vzniknout páru elektron-pozitron:

$$\gamma \rightarrow e^{-} + e^{+} \quad (2)$$

Interakce (1) a (2) často probíhají dohromady a tak dávají vzniknout tzv. *elektromagnetické spršce*. Největší roli při absorbování elektromagnetické spršky hraje fotoefekt a Comptonův jev.

Všechny nabitě částice navíc mohou ionizovat atomy v kalorimetru:

$$(\text{částice})^{\pm} + (\text{atom})^0 \rightarrow (\text{částice})^{\pm} + (\text{atom})^{+} + e^{-} \quad (3)$$

Uvolněné elektrony mají typicky poměrně malou energii a jsou rychle reabsorbovány.

Interakce mionů μ^{\pm} se od elektronů liší tím, že vyzařují mnohem méně brzdného záření a jejich nejčastější interakcí je ionizace atomů (3). Dostatečně nízkoenergetické miony jsou typicky zastaveny, načež se rozpadnou na elektron a neutrino a jsou absorbovány:

$$\begin{aligned} \mu^{-} &\rightarrow e^{-} + \bar{\nu}_e + \nu_{\mu} \\ \mu^{+} &\rightarrow e^{+} + \nu_e + \bar{\nu}_{\mu} \end{aligned} \quad (4)$$

Takové interakce ovšem nepozorujeme, protože neutrino neinteragují a výsledné elektrony už jsou typicky nízkoenergetické a rychle rekombinují. Na to, abychom interakci pozorovali v okamžiku, kdy má ještě mion vysokou energii, je příliš málo častá.

Dále budeme pozorovat piony π^0, π^{+}, π^{-} . Ty se velmi rychle rozpadají:

$$\begin{aligned} \pi^0 &\rightarrow \gamma + \gamma \\ \pi^0 &\rightarrow e^{-} + e^{+} + \gamma \\ \pi^{+} &\rightarrow e^{+} + \nu_e \\ \pi^{-} &\rightarrow e^{-} + \bar{\nu}_e \end{aligned} \quad (5)$$

Výsledkem všech rozpadů jsou elektromagnetické spršky – v případě π^0 je možné za dobrých podmínek rozlišit dvě nebo tři oddělené spršky.

Interakce hadronů jsou výrazně „nepořádnější“ a méně konzistentní. Pro naše účely stačí shrnout jejich interakce nekonkrétním vztahem:

$$p^{\pm}, e^{\pm}, n^0 \rightarrow p^{\pm}, e^{\pm}, n^0, \pi^{\pm}, \pi^0, \gamma \quad (6)$$

Produkty (6) se souhrnně označují jako *hadronová sprška*.

Nakonec budeme pozorovat krátkověké neutrální kaony K_S^0 a neutrální Λ -baryony Λ^0 . Obě tyto částice se mohou rozpadnout na pár neutrálních částic, nebo na kladně a záporně nabitou částici:

$$\begin{aligned} K_S^0 &\rightarrow \pi^{+} + \pi^{-} & K_S^0 &\rightarrow \pi^0 + \pi^0 \\ \Lambda^0 &\rightarrow p^{+} + \pi^{-} & \Lambda^0 &\rightarrow n^0 + \pi^0 \end{aligned} \quad (7)$$

V případě kaonu budeme typicky pozorovat dvě nebo čtyři elektromagnetické spršky, u Λ -baryonu jednu hadronovou a jednu až dvě elektromagnetické spršky.

V detektoru nebudeme schopni detekovat veškerou energii vstupující částice – část energie budou odnášet například neutrino. Pro pevně určenou vstupní částici o proměnné energii E_0 , platí, že energie E_d detekovaná ve scintilátoru kalorimetru je přímo úměrná energii částice: $E_0 \propto E_d$.

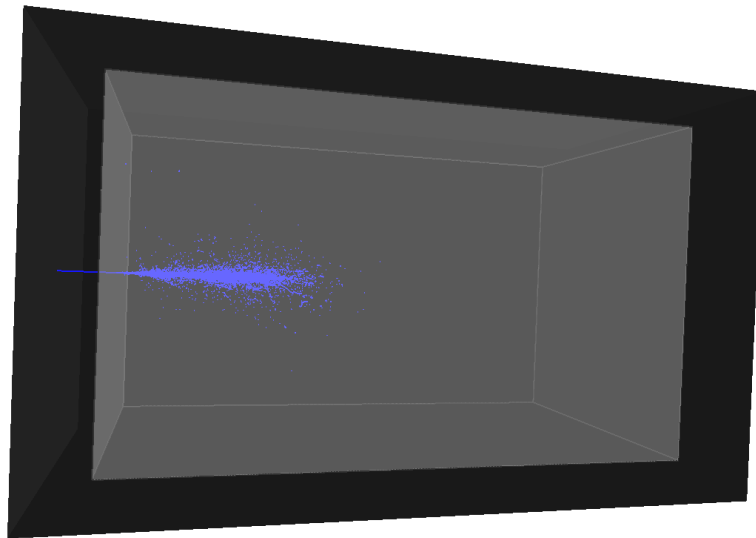
Pro rozlišení σ_E reálného detektoru platí vztah [1]:

$$\underbrace{\sqrt{E_0} \frac{\sigma_E}{E_d}}_r = a + b \sqrt{E_0}, \quad (8)$$

kde konstanta a se nazývá „*sampling term*“.

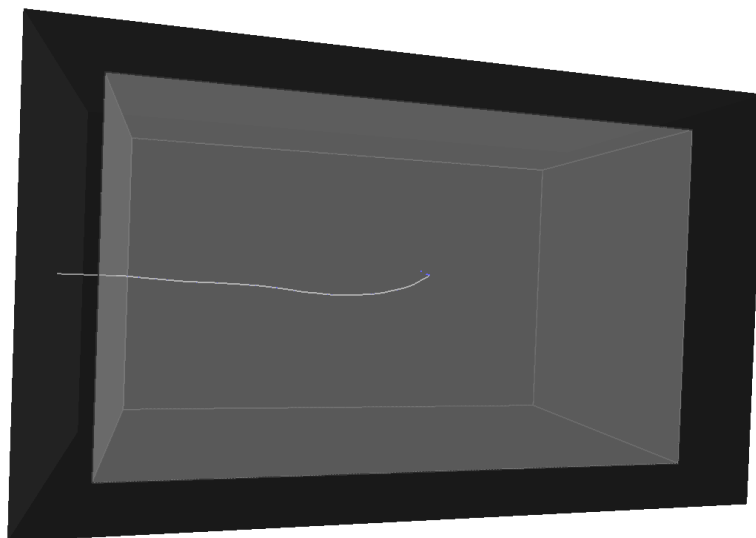
3 Výsledky měření

Nejprve jsme měřili e^- , e^+ , γ . Nezávisle na částici a energii jsme vždy pozorovali typickou elektromagnetickou spršku, viz obr. 1. Se zvyšující se energií se sprška pouze zvětšovala, ale nepozorovali jsme žádnou kvalitativní změnu.

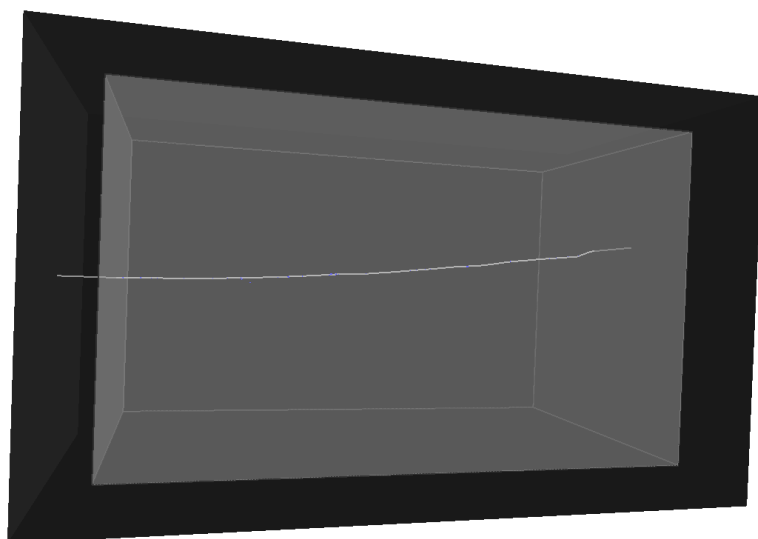


Obrázek 1: Elektromagnetická sprška e^- při 100 GeV.

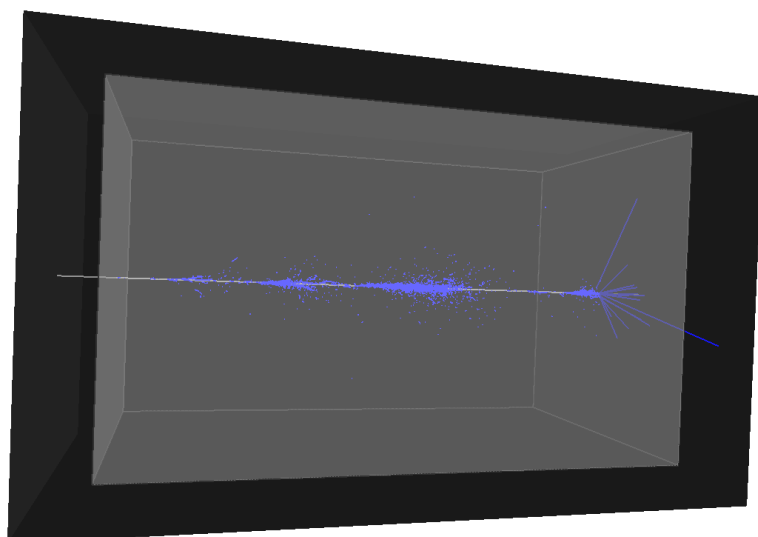
Dále jsme měřili μ^\pm . Pro nízké energie byl mion pouze zpomalen a absorbován (obr. 2), při vyšších energiích už proletěl celým kalorimetrem (obr. 3). Při ještě vyšších energiích bylo možné pozorovat ionizaci atomů a při energiích vyšších než 50 GeV začalo být pozorovatelné i brzdné záření (obr. 4). Kladný i záporný mion produkovaly kvalitativně stejné výsledky.



Obrázek 2: Absorbce μ^+ při 1 GeV.

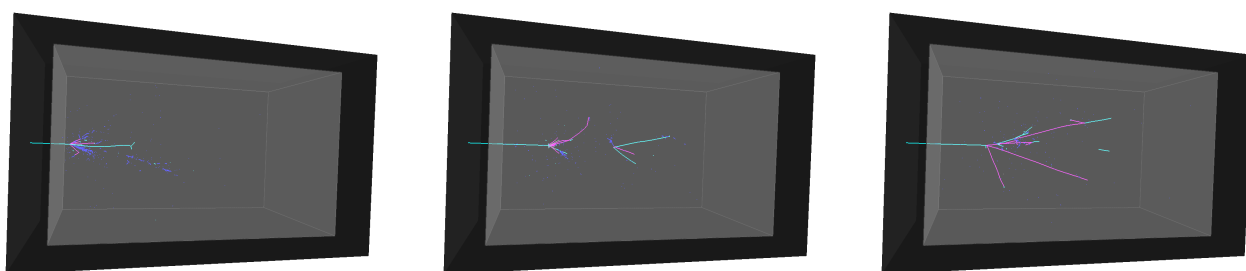


Obrázek 3: Průlet μ^- při 1.7 GeV.

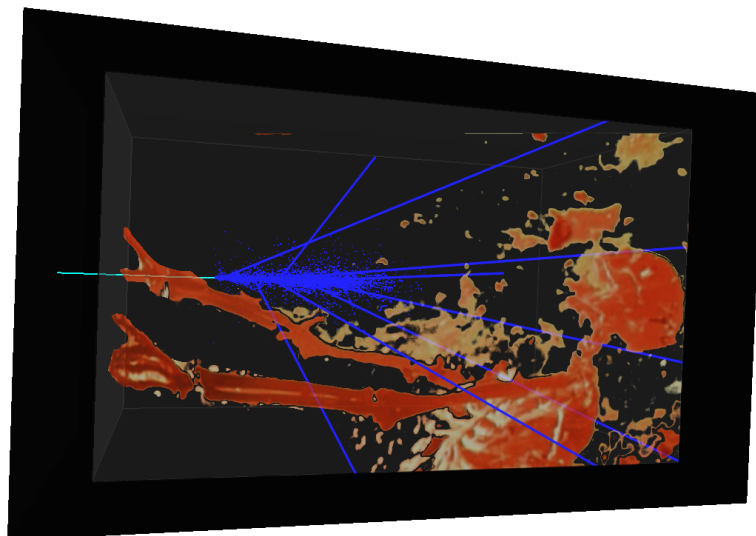


Obrázek 4: V levé části ionizace, dále vpravo brzdné záření μ^- při 10 TeV.

Následně jsme pozorovali interakce hadronů. O tom, že byly spršky méně konzistentní se můžete přesvědčit z obr. 5.

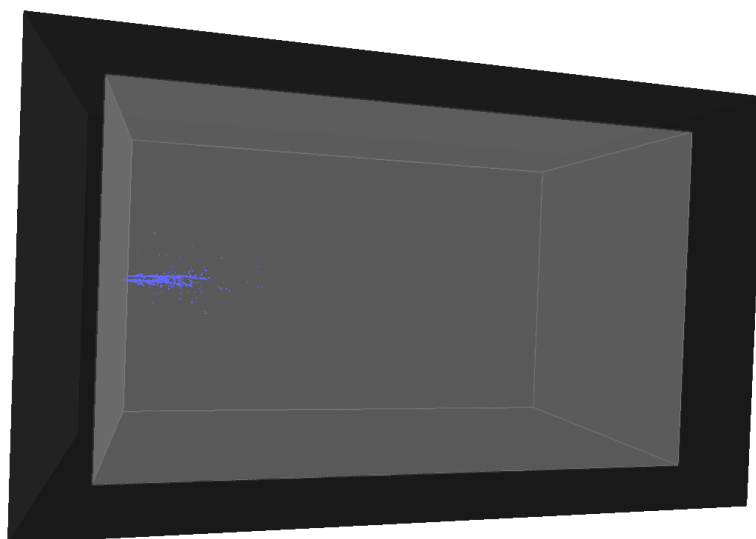


Obrázek 5: Tři různé interakce p^+ při 10 GeV.



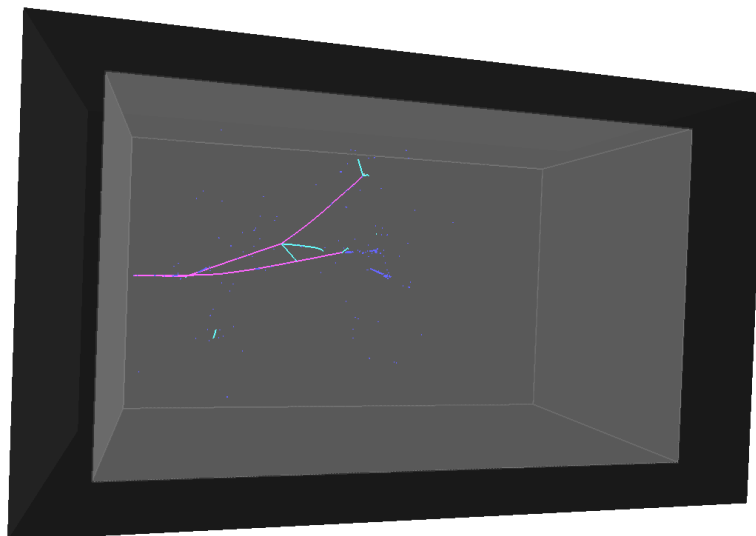
Obrázek 6: Umělecké ztvárnění rozpadu protonu $p^+ \rightarrow \pi^0 + e^+$. Nebylo pozorováno.

Poté jsme měřili π^0 . Jednotlivé elmag. spršky byly rozlišitelné do energií cca 10 GeV, poté začaly splývat dohromady a byly těžko rozlišitelné. Případ, kdy by se pion rozpadl na tři částice podle (5) se nepodařilo identifikovat.

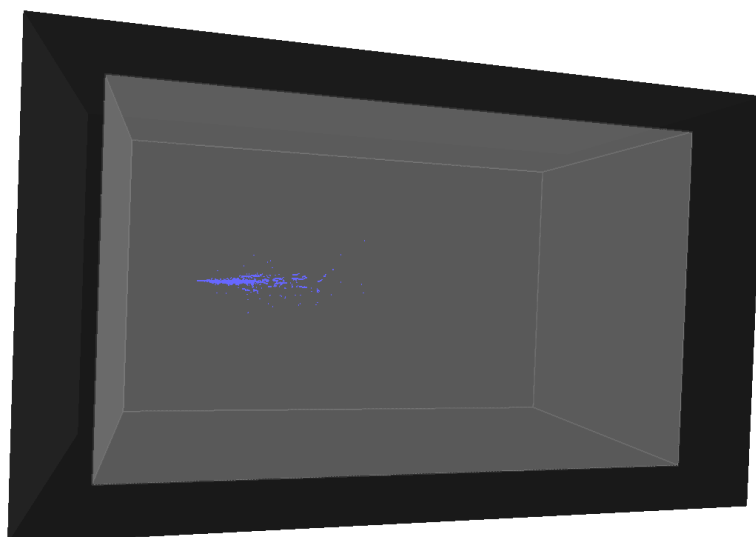


Obrázek 7: Rozpad π^0 na dva fotony při 4 GeV.

Nakonec jsme měřili K_S^0 , který podle (7) může mít hadronovou i elektromagnetickou spršku. Obě byly pozorovány (obrázky 8 a 9).



Obrázek 8: Rozpad K_S^0 na $\pi^+ + \pi^-$ při 5 GeV.



Obrázek 9: Rozpad K_S^0 na $2\pi^0$ při 5 GeV.

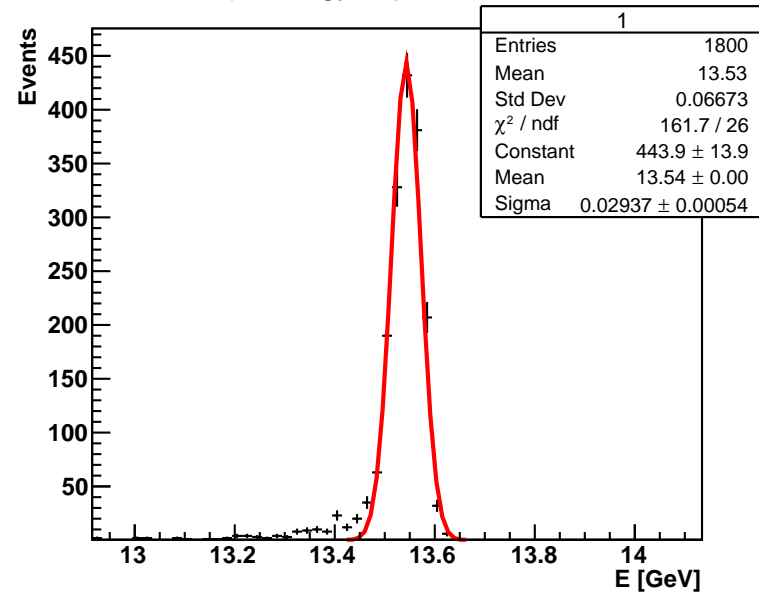
Na následujících třech stránkách jsou grafy energetických ztrát částic e^- , μ^- , π^+ (v tomto pořadí) při energii $E_0 = 14$ GeV.

První ze stránek ukazuje kvantitativní data pro elektron. Součet energií předaných v železné části a ve scintilátoru je $13.54 + 0.42 = 13.99$ (v GeV), drtivá většina produktů interakcí tedy byla absorbována v kalorimetru. Energie předaná ve scintilátoru odpovídá normální distribuci, její rozptyl je cca. 5 % střední hodnoty. Bokem kalorimetru unikalo méně než 0.1 % celkové energie.

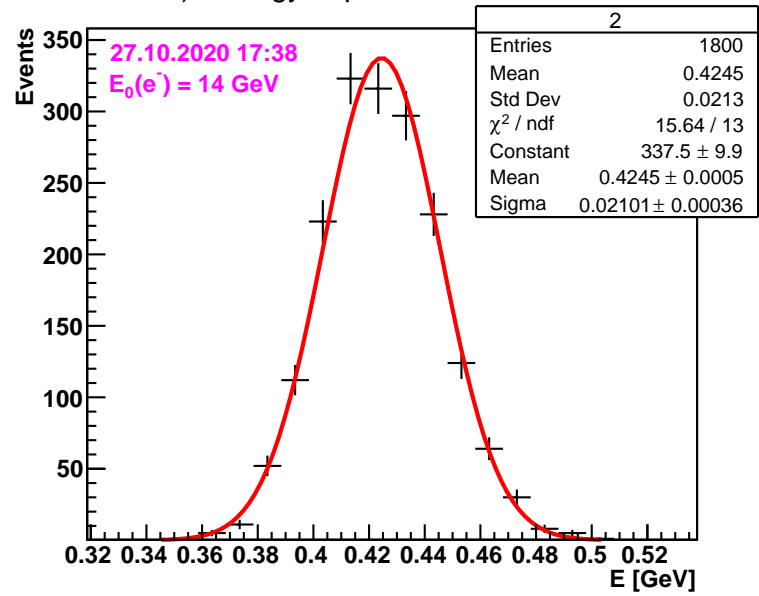
Druhá ze stránek s grafy obsahuje data pro mion. Součet energií předaných v železné části a ve scintilátoru je $11.24 + 0.48 = 11.72$ (v GeV), tedy pouhých 84 % vstupní energie. Z grafů energie v závislosti na vzdálenosti vidíme, že skutečně nějaká část mionů unikla. Jedná se ovšem o relativně malý počet mionů, než aby to stačilo k vysvětlení, proč nedetekujeme 16 % energie – ve skutečnosti totiž většina nedetekované odchází ve formě mionových a elektronových (anti)neutrin. Energie předaná ve scintilátoru odpovídá normální distribuci, její rozptyl je cca. 10 % střední hodnoty. Bokem kalorimetru unikalo cca. 0.13 % celkové energie.

Třetí a poslední stránka obsahuje grafy kladného pionu. Tentokrát statistické rozložení předané energie není normální, ale Landauovo. Ze středních hodnot předané energie vidíme, že částice vzniklé interakcemi pionu v kalorimetru typicky zanechají pouze 2.1 GeV, tj. 15 % vstupní energie. Z grafu energie v závislosti na vzdálenosti je zřejmé, že drtivá většina interagujících částic není v kalorimetru zachycena. Bokem kalorimetru unikalo zanedbatelné množství celkové energie.

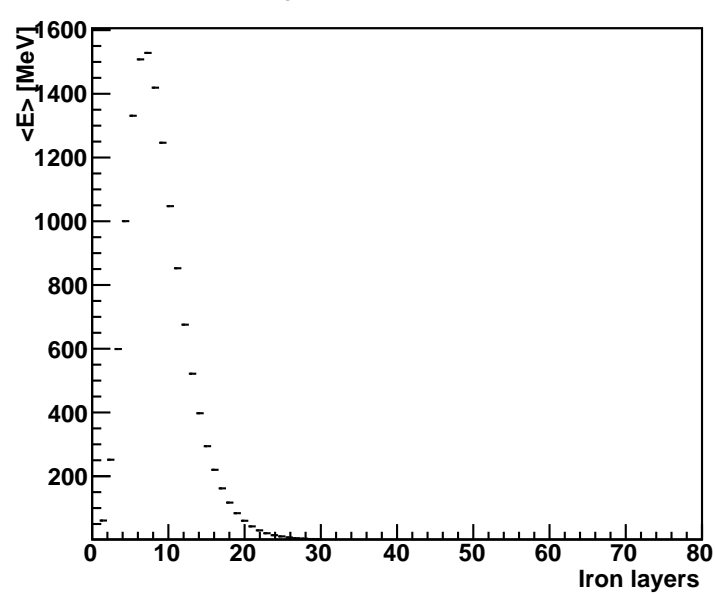
a) Energy deposited in Iron



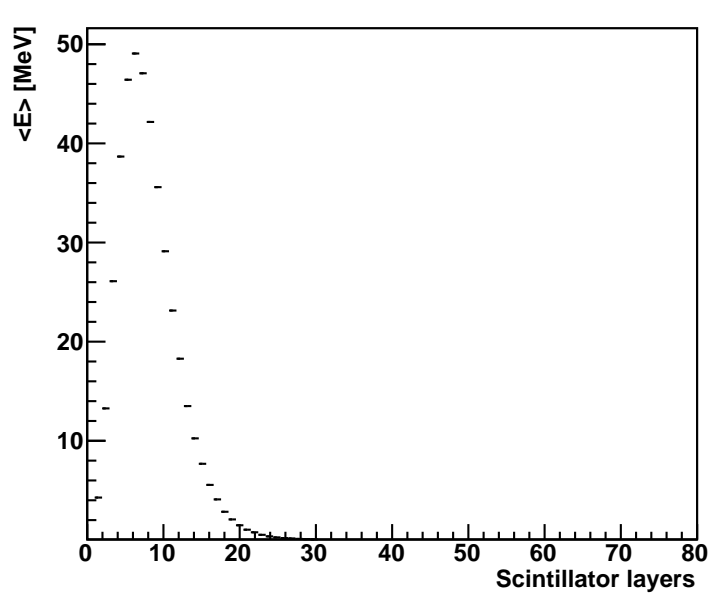
b) Energy deposited in Scintillator



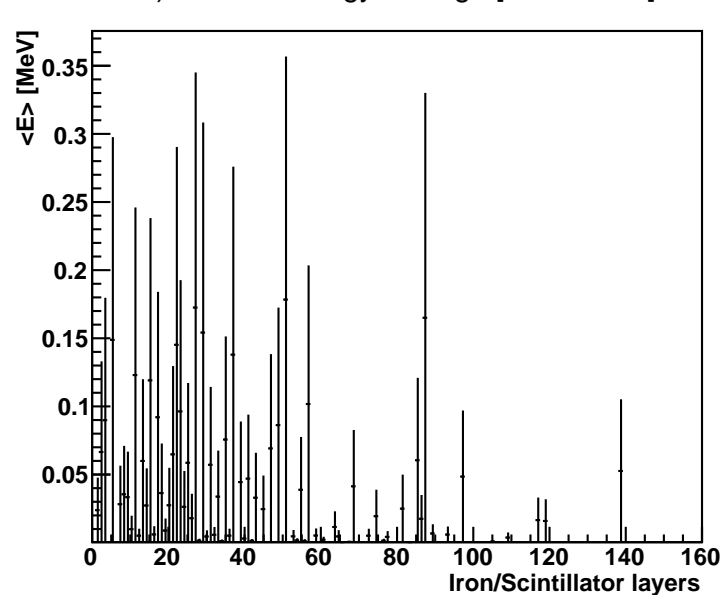
c) E-dep longitudinal profile [MeV/event] in Iron



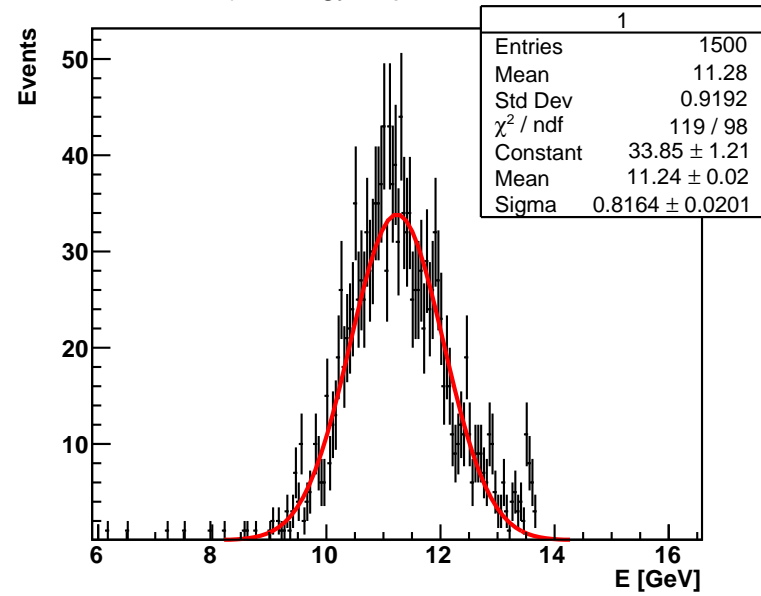
d) E-dep longitudinal profile [MeV/event] in Scintillator



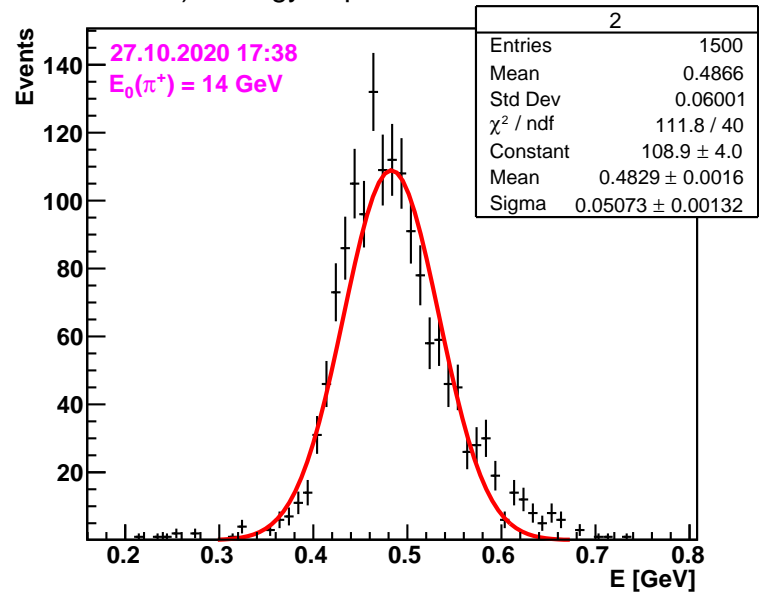
e) Lateral energy leakage [MeV/event]



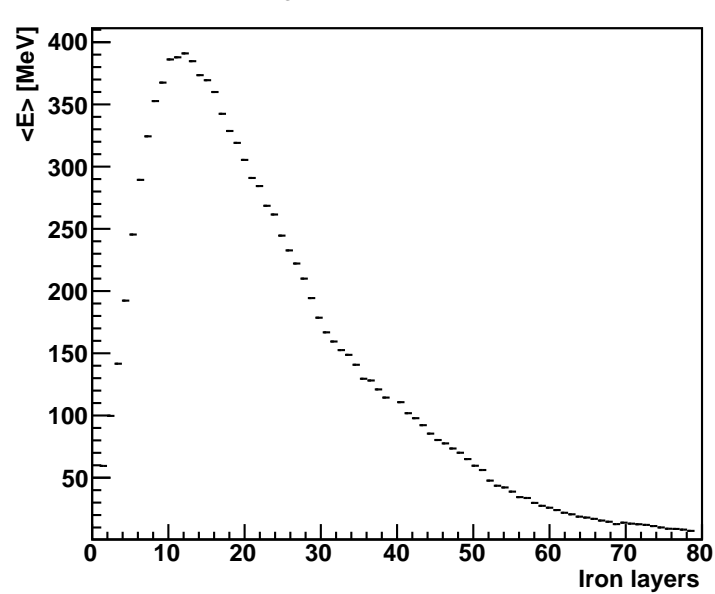
a) Energy deposited in Iron



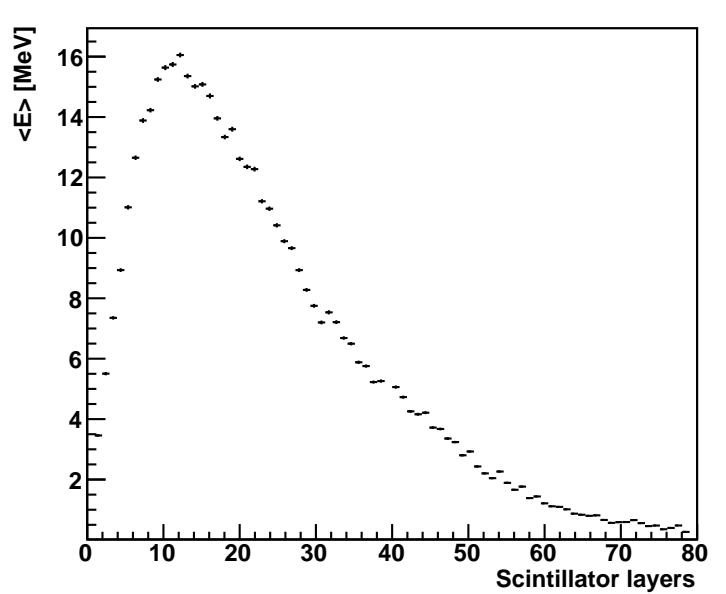
b) Energy deposited in Scintillator



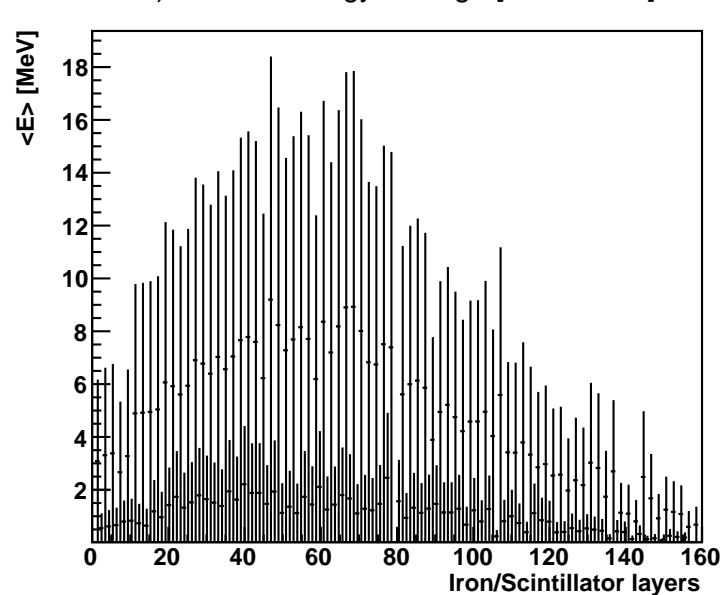
c) E-dep longitudinal profile [MeV/event] in Iron



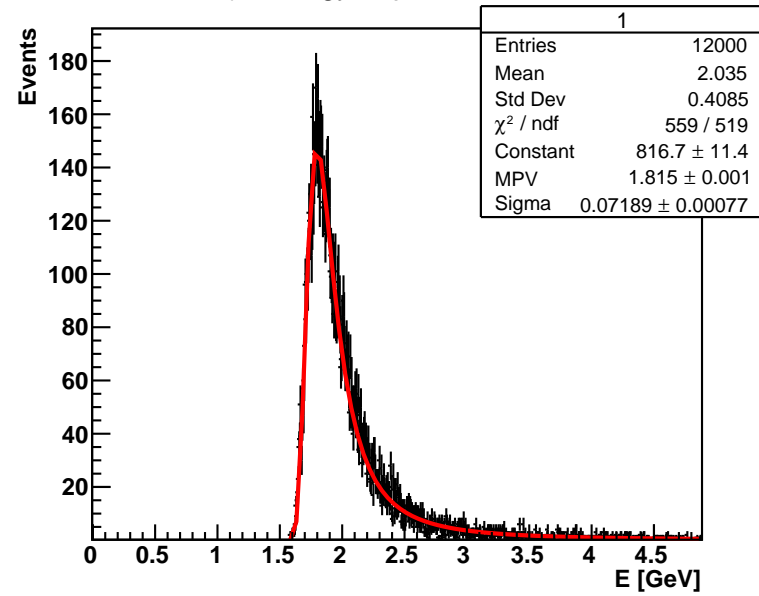
d) E-dep longitudinal profile [MeV/event] in Scintillator



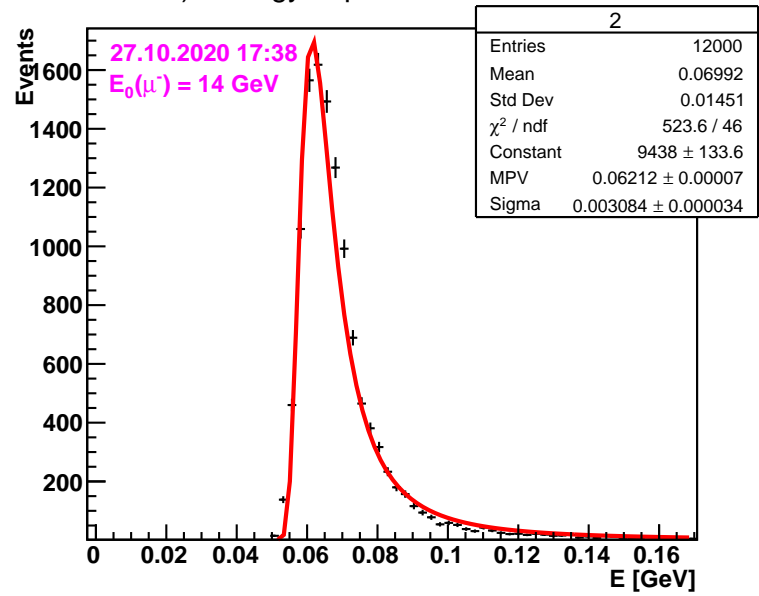
e) Lateral energy leakage [MeV/event]



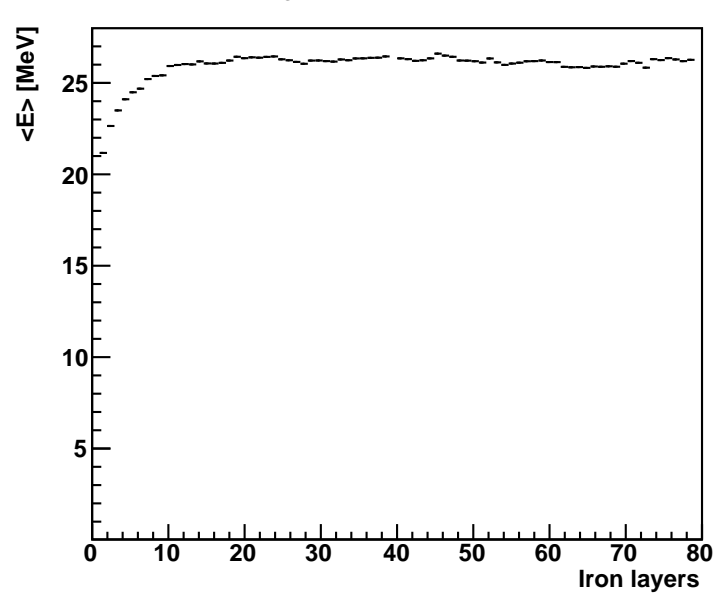
a) Energy deposited in Iron



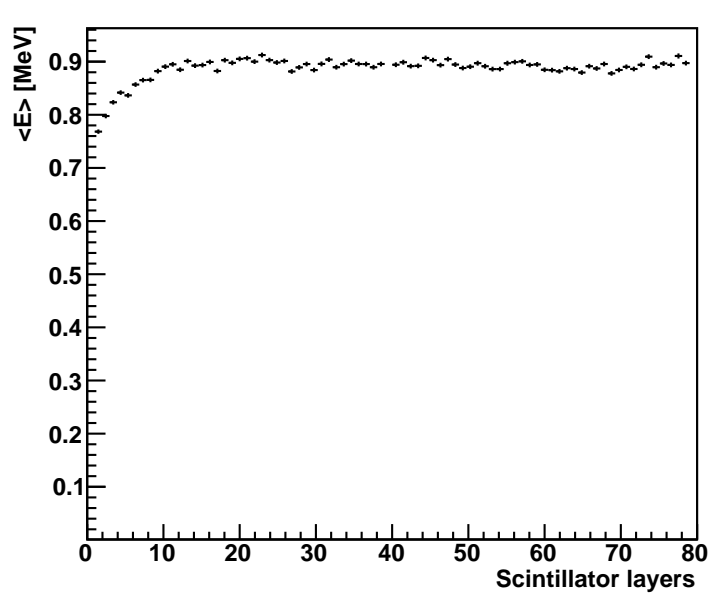
b) Energy deposited in Scintillator



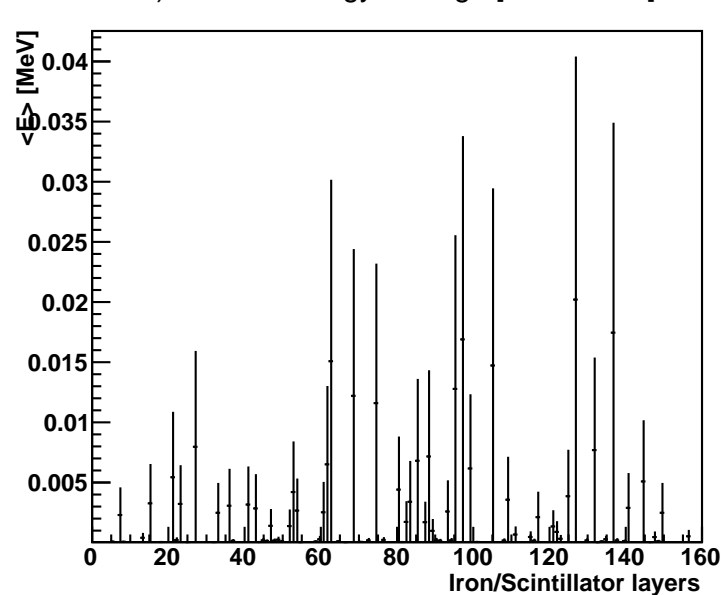
c) E-dep longitudinal profile [MeV/event] in Iron



d) E-dep longitudinal profile [MeV/event] in Scintillator



e) Lateral energy leakage [MeV/event]



Nakonec jsme detailně zkoumali závislost vstupní energie E_0 (v rozpětí 15 až 55 GeV) a energie E_d předané ve scintilátoru, konkrétně pro vstupní částici π^- . Chtěli jsme jednak ověřit platnost lineárního vztahu $E_0 \propto E_d$, ale také určit *samplovací člen* detektoru podle (8). Získaná data byla:

E_0 [Gev]	E_d [Mev]	r [GeV $^{\frac{1}{2}}$]
15.00	0.52 \pm 0.06	45.76 \pm 1.47
25.00	0.86 \pm 0.11	62.93 \pm 2.02
35.00	1.18 \pm 0.14	69.52 \pm 2.23
45.00	1.52 \pm 0.14	60.45 \pm 1.93
55.00	1.86 \pm 0.16	65.13 \pm 2.08

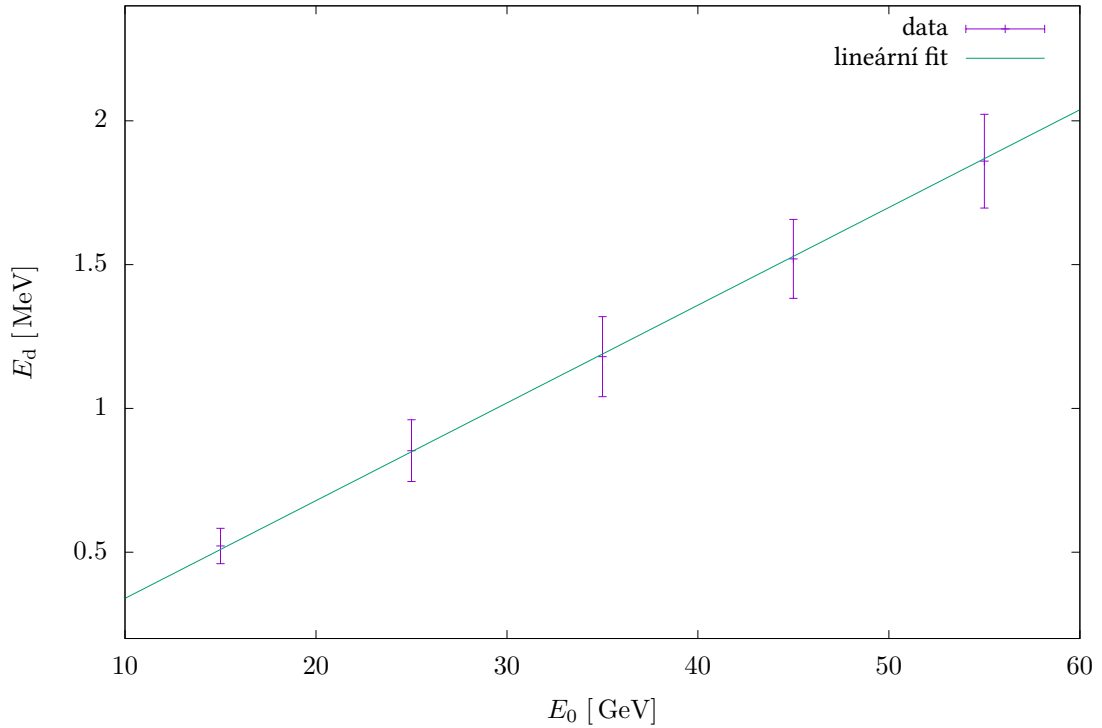
Tabulka 1: Závislost celkové a předané energie pro π^- . Každý řádek je statistickým souborem 500ti událostí.

Nejprve jsme sestavili graf $E_d(E_0)$, viz obr. 10. Tím jsme ověřili lineární závislost:

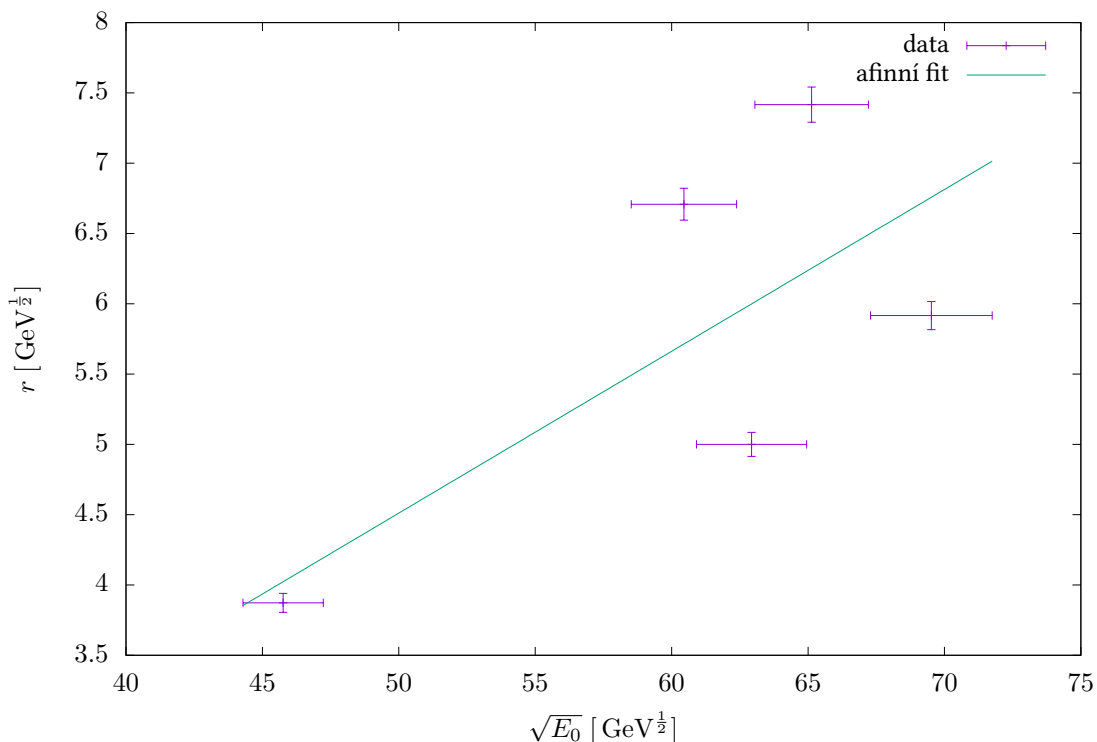
$$E_d = (3.40 \pm 0.02) \cdot 10^{-5} E_0$$

Následně jsme provedli afinní fit závislosti $r(\sqrt{E_0})$, viz obr. 11, tím jsme získali hodnotu samplovacího členu:

$$a = (0.115 \pm 0.052) \text{ GeV}^{\frac{1}{2}}$$



Obrázek 10: Závislost mezi skutečnou vstupní energií a energií detekovanou ve scintilátoru, proložená přímkou procházející počátkem.



Obrázek 11: Afinní fit podle vztahu (8).

4 Diskuse

Protože byla data vygenerována simulací, nebyl příliš velký prostor pro nepříjemná překvapení. Přesto by autor chtěl vyjádřit svou rozmrzelost nad faktem, že se nepodařilo naměřit rozpad protonu $p^0 \rightarrow \pi^0 + e^+$, což by dle jeho mínění byla vzrušující událost pro budoucí fyziku a příjemné zpestření středečního dopoledne.

Výsledný *sampling term* je zatížený velkou chybou (asi 50 %). Pro lepší kvalitativní posouzení platnosti vztahu (8) by tedy bylo vhodné porovnat výsledky i s jinými vstupními částicemi než jen π^- .

5 Závěr

Podařilo se kvalitativně popsat interakce částic γ , e^\pm , μ^\pm , p^+ , π^0 a K_S^0 a Kvantitativně prozkoumat předání energie u částic e^- , μ^- , π^+ při 14 GeV.

Podařilo se ověřit lineární závislost $E_d \propto E_0$ a určit *sampling term*, který vyšel:

$$a = (0.115 \pm 0.052) \text{ GeV}^{\frac{1}{2}}$$

6 Literatura

[1] Praktikum částicové a jaderné fyziky. Simulace průchodu vysokoenergetických částic kalorimetrem. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_406.pdf. 30. září 2014

10 stránek?!