

Pracovní úkol:

1. Seznámit se s interaktivní verzí simulace
2. Prostudovat charakter interakcí různých částic v hadronovém kalorimetru
3. Kvantitativně srovnat energetické ztráty v kalorimetru pro různé druhy částic

Teorie:

Hadronový kalorimetr slouží k měření energie a směru nabitých i neutrálních částic. Skládá se z několika vrstev tzv. absorbátoru, ve kterém dochází k tvorbě sekundárních částic, a aktivního média, ve kterém částice ztrácejí část své energie a ze kterého je čten signál.

Vlétne-li vysokoenergetická částice do kalorimetru, ztrácí svou energii produkcí sekundárních částic. Ty, pokud mají stále dostatečnou energii, mohou produkovat další částice. Tento děj se nazývá sprška. Pokud je energie částice příliš malá k produkci sekundárních částic, ztrácí energii pomocí ionizace až se úplně zastaví. Monitorováním celého tohoto procesu je možné určit energii nalétávající částice.

Směr nalétávající částice se udává dvojicí souřadnic (η, ϕ) , kde ϕ je azimutální úhel a η představuje pseudorapiditu [1]: $(\eta = -\ln(\tan(\theta/2)))$, kde úhel θ se měří od osy svazku.

Podle způsobu, jakým částice interagují s materiálem v kalorimetru je lze rozdělit do několika skupin:

1. Částice jako například elektron e^- , pozitron e^+ , foton γ a pion π^0 (který se během velice krátké doby rozpadá, $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$) vytvářejí čistě elektromagnetickou spršku.
2. Protony p , neutrony n a piony π^\pm vytváří hadronovou spršku.
3. Ionizující částice, což jsou všechny nabitě částice, jejichž energie je příliš malá k produkci dalších sekundárních částic. Patří sem také miony μ .
4. Neinteragující částice, jejichž zástupcem jsou neutrina ν , interagující s okolím slabou interakcí. Jejich střední volná dráha je tak velká, že pravděpodobnost interakce v kalorimetru je naprosto zanedbatelná.

Více k dané problematice viz [1].

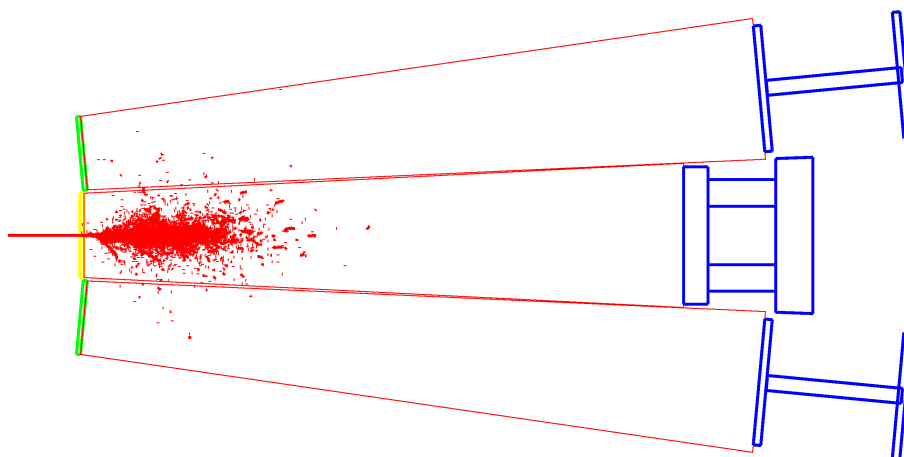
Měření:

Simulaci jsem prováděl na počítačovém modelu hadronového kalorimetru v experimentu ATLAS.

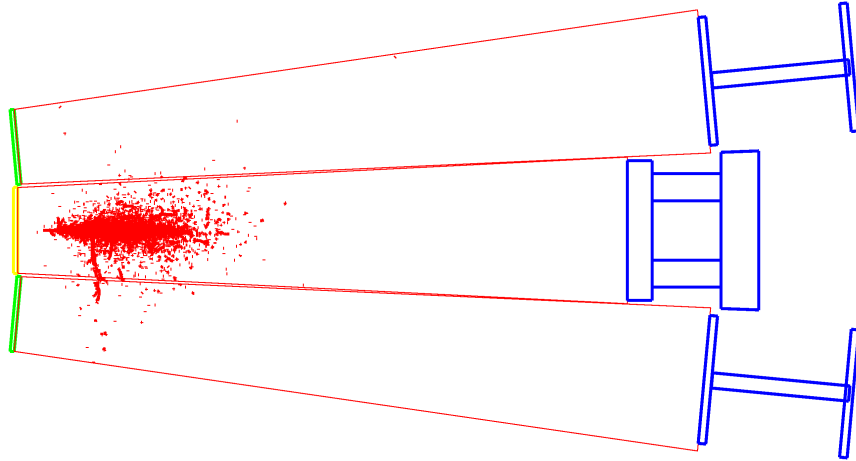
Nejdříve jsem simuloval průchod částic e^- , e^+ , ν_e , μ^- , μ^+ , ν_μ , γ , π^0 , π^- a π^+ s energiemi 100GeV.

Nejjednodušší průběh interakce byl u neutrin ν_e a ν_μ . Neutrina s látkou interagují pouze a jenom slabou interakcí, proto je u nich účinný průřez velice malý a interakce s látkou velice řídká. Vzhledem k nulovému náboji kalorimetr nezaznamenal ani jejich trajektorii a obrázek tedy zůstal bez poskvrny.

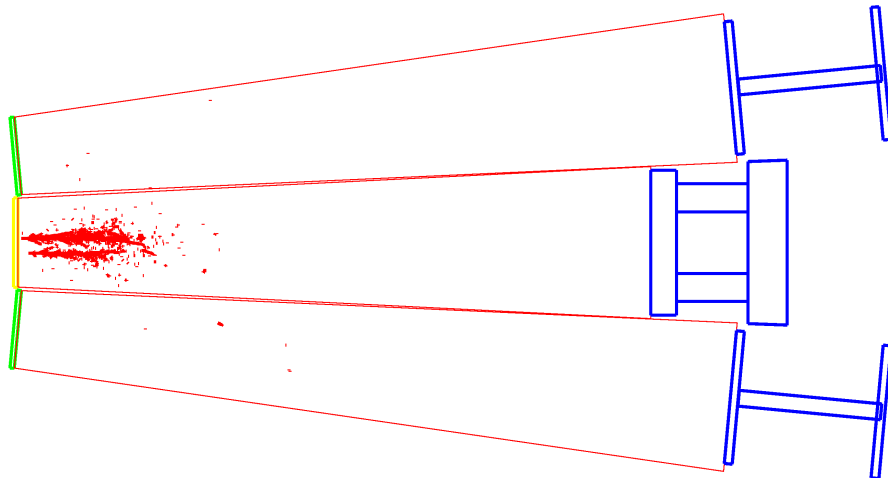
Interakce elektronu e^- , pozitronu e^+ (Obr. 1), fotonu γ (Obr. 2) a pionu π^0 (Obr. 3) vypadaly skoro identicky až na to, že při simulaci s fotonem γ nelze vidět stopa přilétávající částice, jelikož foton je částice bez náboje. Bylo to díky tomu, že elektrony a pozitrony vyzařují brzdné fotony γ , které dále tvoří elektron-pozitronové páry, popřípadě ztrácejí energii Comptonovým rozptylem či fotoefektem. Pion π^0 tvoří také elektromagnetickou spršku a to díky tomu, že se během velice krátké doby ($\approx 10^{-16}$ s) rozpadá na dva fotony γ . Při energii 100GeV mají tyto fotony téměř shodný směr a proto vypadá simulace skoro identicky jako při γ fotonu. Když mu ovšem přidělíme energii menší (10GeV), γ fotony mají už dostatečně odlišné dráhy aby je šlo rozlišit.



Obr. 1: Elektromagnetická sprška vytvořená elektronem e^- s energií 100GeV. Obdobný průběh interakce dostaneme i pro pozitron e^+ .

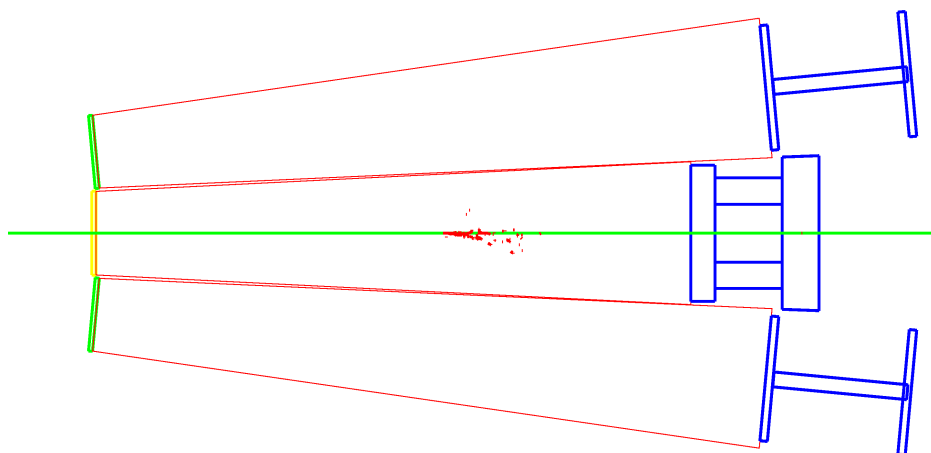


Obr. 2: Elektromagnetická sprška vytvořená fotonem γ o energii 100GeV. Jelikož se jedná o nenabitou částici, nelze vidět stopa přilétávající částice.

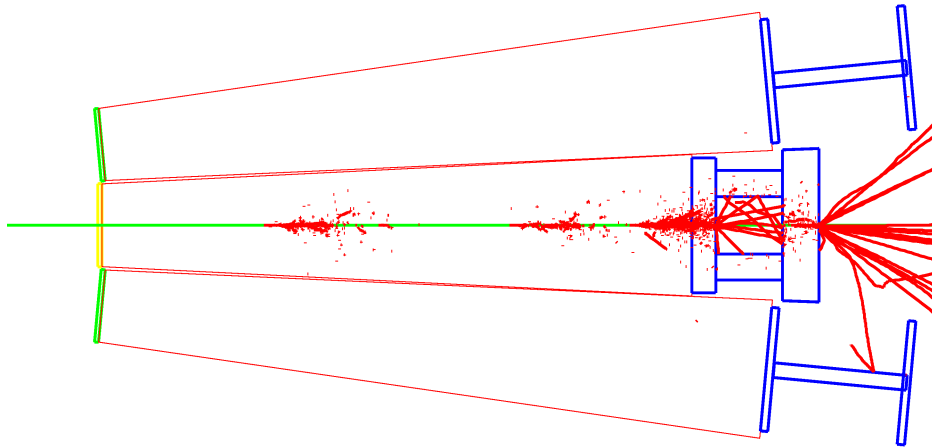


Obr. 3: Zde byla původní částice pion π^0 o energii 10GeV, která se však velice rychle rozpadla na dva fotony γ , které vytvořili elektromagnetickou spršku.

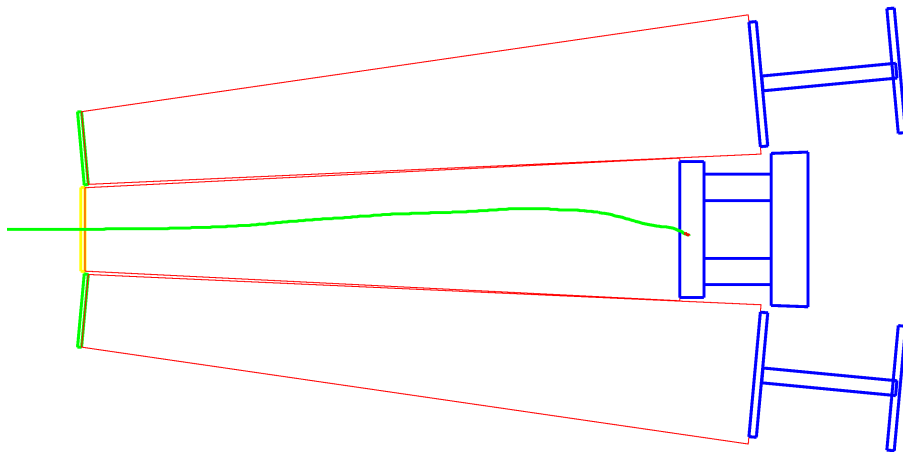
Velice podobně interagovaly miony μ^- a μ^+ , které jsou však oproti elektronům mnohonásobně těžší a netvořily proto tolik brzděho záření, energii ztrácely ionizací (Obr. 4). V případě, že jsem ovšem mionům přidal energii (2000GeV), začaly tvořit mnohem více fotonů γ (Obr. 5). V opačném případě, když jsem jim energii ubral (2GeV), ztrácely energii opět jenom ionizací a zastavily se ještě v kalorimetru (Obr. 6).



Obr. 4: Průběh interakce, kterou způsobil mion μ^- s energií 100GeV. Zelená čára určuje ionizaci. Dále jde vidět, že zhruba v polovině průchodu vyzářil foton γ a vytvořila se elektromagnetická sprška. Většinu energie si však mion odnesl s sebou když vyletěl z detektoru. Pro mion μ^+ byla interakce analogická.

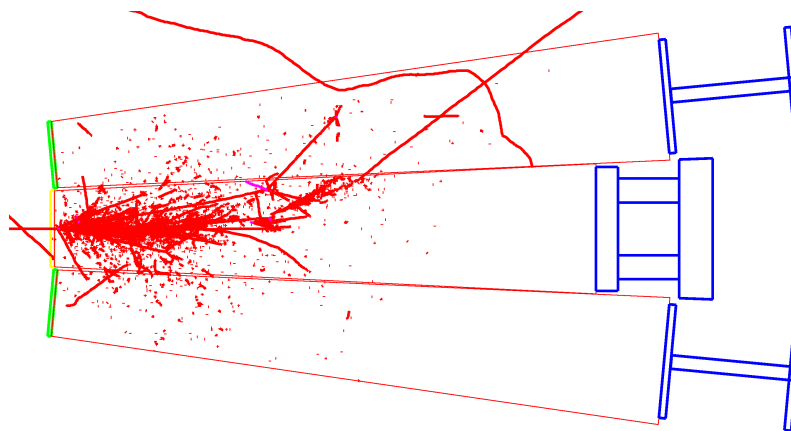


Obr. 5: Zde je interakce mionu μ^- s energií 2000GeV. Interakcí bylo více, přičemž při výletu z detektoru pravděpodobně interagoval s nějakým atomem železa tvořícího konstrukci.

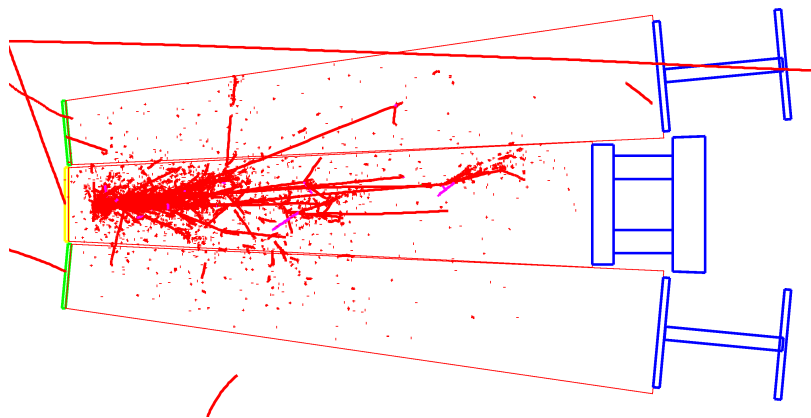


Obr. 6: Mion μ^- o energii 2GeV ztratil ionizací tolik energie, že se v detektoru zastavil. Tato energie tedy zhruba odpovídá energetickým ztrátám mionu v kalorimetru.

Zajímavější byla simulace s částicemi tvořícími hadronovou spršku. Tedy s protony p , neutrony n a piony π^+ a π^- . Tyto částice interagují především s jádrem železa, ze kterého je absorbátor, přičemž právě při rozbití jádra vnikají největší energetické ztráty, které bohužel nejsou detekovány. Kromě hadronové spršky, se v interakci objeví i elektromagnetická sprška a to z důvodu tvorby pionu π^0 , který se velice rychle rozpadne na dva fotony γ . Všechny výsledné obrázky byly hodně podobné, kromě toho, že u neutronu nebyla z důvodu nulového náboje vidět trajektorie přilétávající částice. Obr. 7 a 8.



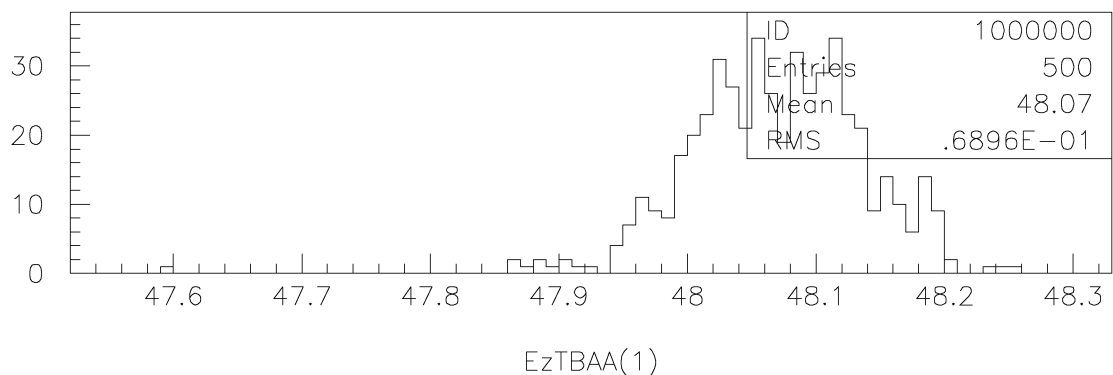
Obr. 7: Při náletu protonu p o energii 100GeV vznikla hadronová a elektromagnetická sprška, která se ani nevešla do detektoru. Pro piony π^- a π^+ byla situace zcela analogická.



Obr. 8: Neutron n o stejné energii 100GeV vytvořil obdobnou spršku, avšak není zde detekována jeho trajektorie.

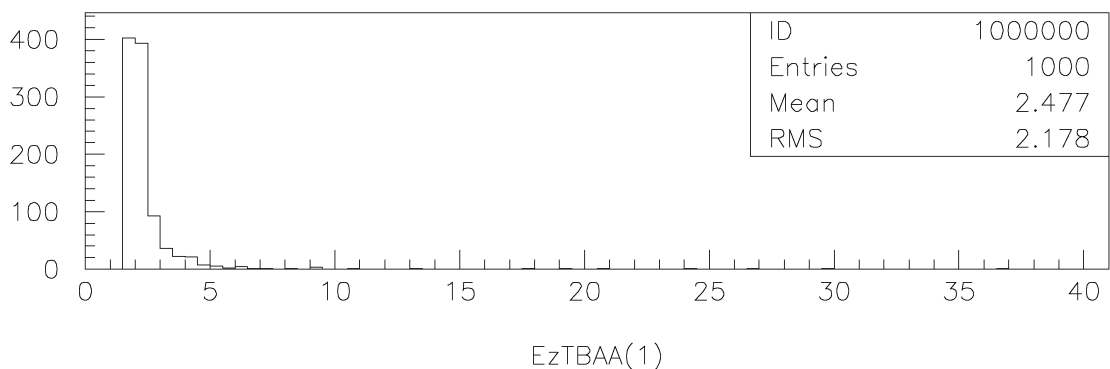
V další části měření jsem zjišťoval energetické ztráty v kalorimetru pro elektrony e^- , miony μ^- a piony π^+ . Směr nalétávajících částic byl zadán jako $\eta = 0,35$ a $\phi = 0^\circ$.

Nejprve jsem provedl simulaci s 500 elektrony o energiích 50GeV. Histogram energetických ztrát je na Obr. 9. Průměrná zachycená energie byla 48,07GeV, což koresponduje s Obr. 1, ze kterého jde vidět, že skoro všechny srážky se udály v hlavním detektoru.



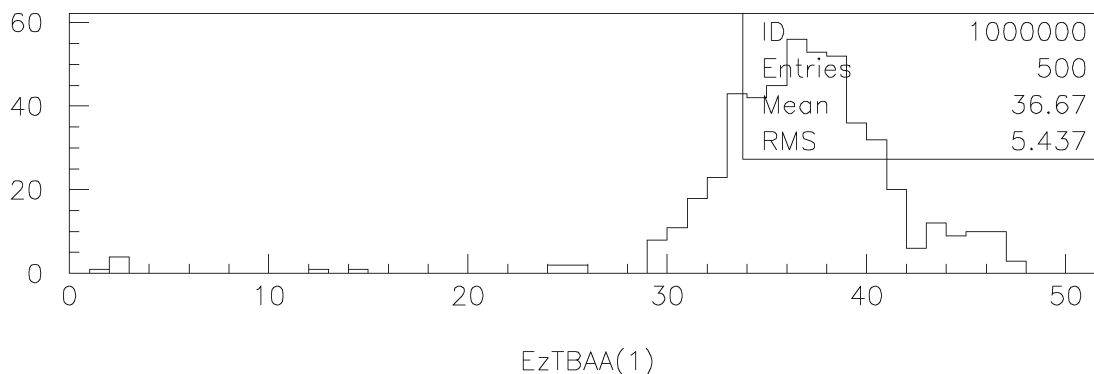
Obr. 9: Energetické ztráty elektronů e^- o energiích 50GeV - celkem 500 měření.

Dále jsem provedl simulaci s miony μ^- , kterých bylo 1000, s energií opět 50GeV. Vezmeme-li v úvahu, že mion v kalorimetru skoro pouze ionizoval, a že tímto ztratil energii zhruba 2GeV (podle Obr. 6), očekáváme energetické ztráty kolem 2GeV. Tohoto výsledku také bylo dosaženo - 2,477GeV. Většinu energie si tedy miony odnesly s sebou pryč.



Obr. 10: Energetické ztráty mionů μ^- o energiích 50GeV - celkem 1000 měření.

Nakonec jsem provedl totéž s 500 piony π^+ , o energiích opět 50GeV. Zde byly energetické ztráty 36,67GeV. Ztráty jsou o dost menší, než původní energie pionů, což je způsobeno díky tomu, že se celá sprška nevešla do detektoru a některé částice z něj vylétly pryč, čímž odnesly část energie s sebou. Energetické ztráty vznikly také díky zmiňovanému rozbití jader železa, ze kterého byl absorbátor. Další energii si s sebou odnášela neutrina, která s kalorimetrem víceméně vůbec neinteragují. Díky těmto ztrátám je peak také tolik roztáhlý.



Obr. 11: Energetické ztráty pionů π^+ o energiích 50GeV - celkem 500 měření.

Diskuze:

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

Podrobnější rozebrání výsledků viz Měření.

Závěr:

Simuloval jsem interakce částic e^- , e^+ , ν_e , μ^- , μ^+ , ν_μ , γ , π^0 , π^- a π^+ v hadronovém kalorimetru (Obr. 1-8).

Naměřil jsem energetické ztráty pro částice e^- , μ^- a π^+ .

Literatura

[1] *Studijní texty k praktiku IV*: <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/>