

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra fyziky
Obor: Jaderné inženýrství
Zaměření: Experimentální jaderná fyzika



Modely atmosférických spršek kozmičských paprsků s velmi vysokou energií

Air Shower Models for Ultra High Energy Cosmic Rays

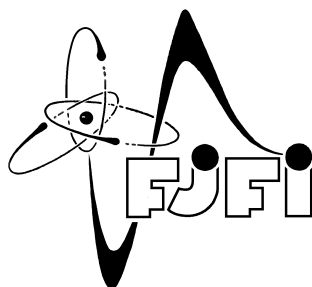
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracovala : Elena Rakovská
Vedoucí práce: RNDr. Jiří Chudoba , Ph.D.
Rok: 2011

Před svázáním místo téhle stránky

vložíte zadání práce

 s podpisem děkana (bude to jediný oboustranný list ve Vaší práci) !!!!

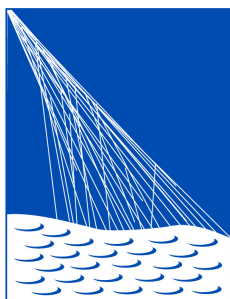


Prehlásenie

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu vypracovala samostatne a použila som iba podklady (literatúru, projekty, SW atd.) uvedené v priloženom zozname.

V Prahe dňa

.....
Elena Rakovská



PIERRE
AUGER
OBSERVATORY

Pod'akovanie

Ďakujem RNDr. Jiřimu Chudobovi, Ph.D. za vedenie tejto práce, pozitívny prístup a precízne korekcie. Veľká vďaka patrí Mgr. Petrovi Nečasalovi za pomoc pri odhaľovaní mnohých záhad, RNDr. Petrovi Trávníčkovi, Ph.D. za nenahraditeľné informácie, Mgr. Honzovi Ebrovi a Ing. Kubovi Víchovi za podnetné rozhovory. V neposlednom rade by som chcela poďakovať celej skupine Pierre Auger na FZU za možnosť účasti v nesmierne tvorivom prostredí, ktoré poskytuje.

Elena Rakovská

Název práce:

Modely atmosférických spršek kozmických paprsků s velmi vysokou energií

Autor: Elena Rakovská

Obor: Jaderné inženýrství

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. Jiří Chudoba , Ph.D.

Fyzikální ústav Akademie věd České republiky, v. v. i.

Konzultant: —

Abstrakt: Ultra vysokoenergetické kozmické žiarenie reprezentuje najenergetickejší zdroj elementárnych častíc prístupných vedcom. Dosahujú makroskopické energie okolo 10^{20} eV z doposiaľ neidentifikovaných zdrojov. Bohužiaľ, ich tok je veľmi nízky (jedna častica za storočie na kilometer štvorcový) a nie je možné detekovať ich priamo. Z toho dôvodu sú štúdie charakteru častíc kozmického žiarenia najvyšších energií založené na meraní rozsiahlych spršok častíc generovaných interakciou primárnej častice s atómom vzduchu v atmosfére. Väčšinu vlastností kozmického žiarenia je možné získať len z interpretácie dát atmosférickej spršky a sú teda závislé na predpovediach hadrónových interakčných modelov pri ultra vysokých energiách. Prvé dáta z Veľkého Hadrónového urychľovača (LHC) posunuli o viac ako tri stupne ťažiskovú energiu, v ktorej sa merajú protón-protón zrážky a sú k dispozícii na porovnanie s hadrónovými modelmi. Všetky tieto témy sú diskutované v práci.

Klíčová slova: observatórium Pierra Augera, modely atmosférických spršiek, kozmické žiarenie, UHECR, CORSIKA

Title:

Air Shower Models for Ultra High Energy Cosmic Rays

Author: Elena Rakovská

Abstract: Ultra High Energy Cosmic Rays (UHECR) represent the most energetic source of elementary particles available to scientists. They achieve macroscopic energies over 10^{20} eV from till now unidentified sources. Unfortunately, their flux is very low (one particle per century per square kilometer) and it is not possible to detect them directly. Therefore studies of the nature of cosmic ray particles at the highest energies are based on the measurement of extensive air showers generated from the interaction primary particle with air atom in the atmosphere. Most cosmic ray properties can only be obtained from the interpretation of air shower data and are thus depending on predictions of hadronic interaction models at ultra-high energies. The first Large Hadron Collider (LHC) data have extended by more than a factor of three the center of mass energies in which we have direct proton-proton measurements available to compare to hadronic models. All the topics are discussed in this work.

Key words: Pierre Auger Observatory, air shower models, cosmic rays, UHECR, CORSIKA

Obsah

Úvod	9
1 Kozmické žiarenie a Pierre Auger experiment	10
1.1 Primárne častice a rozvoj spŕšky	11
1.1.1 Sekundárne častice	11
1.2 Energetické spektrum	13
1.2.1 GZK hranica	14
1.2.2 Urýchľovanie a zdroje UHECR/EHECR	15
1.3 Detekcia kozmického žiarenia	16
1.3.1 Povrchové detektory	18
1.3.2 Fluorescenčné detektory	18
1.3.3 Experimenty	19
1.4 Observatórium Pierre Auger	22
1.4.1 Hybridný detektor	22
1.4.2 Energetické spektrum	25
1.4.3 Anizotropia	26
1.4.4 Zloženie UHECR	27
2 Modely atmosférických spŕšok	29
2.1 CORSIKA	29
2.2 Počet miónov	30
3 Diskusia vplyvu výsledkov z LHC	33
3.1 Účinný prierez	33
3.2 Multiplicita, elasticita a π nábojový pomer	36
3.3 Diskusia	36

Záver	41
Zoznam použitých zdrojov	42

Značenie

V tejto bakalárskej práci sú použité nasledujúce skratky a značenia:

<i>AGN</i>	aktívne galaktické jadro
<i>CMBR</i>	z ang. Cosmic Microwave Background Radiation
<i>EHECR</i>	z ang. Extra High Energy Cosmic Rays, $E \geq 10^{20}$ eV
<i>eV</i>	elektron-volt $1 \text{ eV} = 1.6022 \times 10^{-19}$ J
<i>GZK</i>	Greisen-Zatsepin-Kuzmin
<i>LHC</i>	z ang. Large Hadron Collider
<i>RHIC</i>	z ang. Relativistic Heavy Ion Collider
<i>UHECR</i>	z ang. Ultra High Energy Cosmic Rays, $E \sim 10^{19}$ eV

Úvod

Výskum kozmického žiarenia by sa dal označiť za príbeh vedeckého dobrodružstva. Už takmer sto rokov sa vedci snažia odhaliť záhady extrémne vysokoenergetických častíc priletavajúcich z vesmíru meraniami na štítoch hôr, v horkovzdušných balónoch a na ďalších rozmanitých odľahlých miestach Zeme. Spravidla so sebou rozlúštenie jednej záhady prinieslo množstvo nových otázok, ktoré zaujímajú ako astronómov, tak aj časticových fyzikov. Rýchlo sa rozvíjajúci obor astročasticovej fyziky nám môže objasniť rôzne charakteristiky vesmíru, keďže nám kozmické žiarenie prináša informácie o vysokoenergetických procesoch prebiehajúcich v ich zdrojoch, aj o galaktických a extragalaktických magnetických poliach.

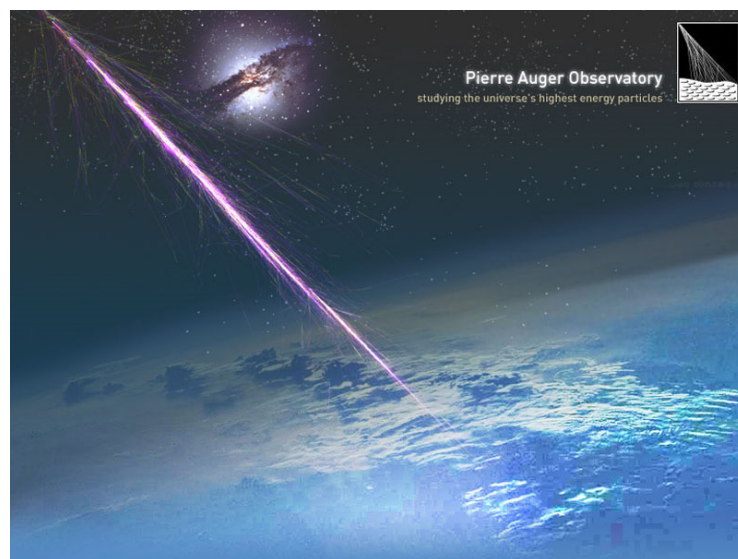
Cieľom tejto bakalárskej práce je preniknutie do oboru kozmického žiarenia, zoznámenie sa s projektom Pierre Auger Observatory a popísanie tohto experimentálneho zariadenia. V ďalšej časti je úlohou naštudovanie a opísanie používaných modelov pri rekonštrukcii atmosferických spršok. Dôležitý element práce tvorí diskusia vplyvu najnovších výsledkov z LHC na používané modely.

V súlade so stanovenými cieľmi je táto práca rozdelená do troch základných kapitol. V prvej časti sa nachádza zhrnutie doterajších poznatkov o kozmickom žiarení, ako aj hlavné otázky, ktorými sa táto oblasť zaoberá v súčasnosti. Obsahom je tiež opis experimentu Pierre Auger Observatory, ktorý v dnešnej dobe tvorí špičku tohto výskumu. Druhá kapitola je venovaná popisu simulačných modelov, ktoré sú pri rekoštrukcii atmosferických spršok kľúčovým faktorom pri stanovení výsledkov. Nastavenie správnych parametrov v týchto modeloch je veľmi dôležitá, avšak náročná úloha. Používajú sa k tomu dáta zo zrážkových experimentov, ktoré sa však pohybujú v rádovo nižších energiách. Posledná kapitola sa zaoberá najnovšími výsledkami z LHC, ktoré by mohli prispieť k spresneniu nastavenia parametrov v simulačných modeloch rekonštruujúcich atmosférické spršky, čím sa očakáva lepšie pochopenie tématiky a posunutie o krok bližšie k vysvetleniu záhad kozmického žiarenia.

Kapitola 1

Kozmické žiarenie a Pierre Auger experiment

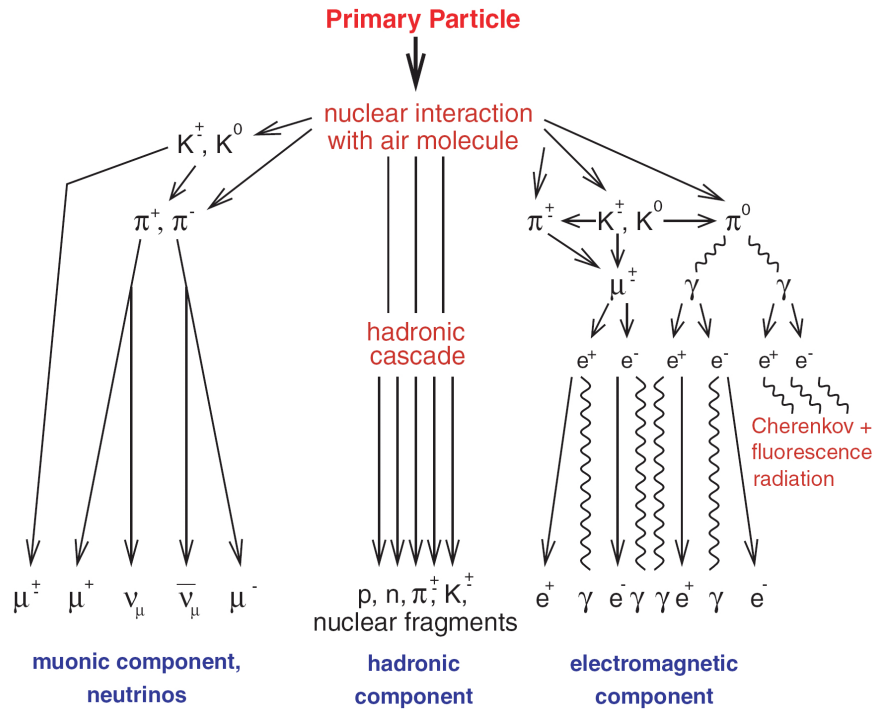
Kozmické žiarenie tvorí jednu z najzaujímavejších oblastí súčasnej fyziky. Za takmer storočie nám jeho pozorovanie pripravilo množstvo otázok, z ktorých väčšina zostáva dodnes stále nezodpovedaná. Prvýkrát sa časticami priletavajúcimi z kozmu významnejšie zaoberal rakúsky fyzik Hess v roku 1912. Autorom pojmu kozmické žiarenie sa stal americký fyzik Millikan až v 1925. Populárna interpretácia "veci, ktoré pršia z neba a nie sú mokré" je obľúbená, pretože korektná vedecká definícia kozmického žiarenia je sporná. Dnes pojmom kozmické žiarenie označujeme jednak primárnu časticu, ako aj kaskádovú spršku, ktorú v atmosfére spôsobuje, až po častice dosahujúce zemský povrch. Prvenstvo za objavenie spršky kozmického žiarenia a odvodenie energie primárnej častice až na 10^{15} eV nesie francúzsky fyzik Pierre Auger z roku 1938, jedna z najvýznamnejších osobností v celej histórii skúmania kozmického žiarenia. Na jeho počesť je aj pomenovaný zatiaľ najrozsiahlejší experiment v tomto obore.



Obrázok 1.1: Ilustračný obrázok kozmického žiarenia tímu Pierre Auger Observatory.

1.1 Primárne častice a rozvoj spršky

Primárne častice z celého energetického spektra tvoria z 90 % protóny, viac ako 7 % α častice, zvyšné percentá pripisujeme jadrom ľahkých prvkov končiac pri Fe , ale aj e^- , e^+ z malej časti aj γ . Zloženie pri energiách nad TeV je odlišné. Prilietavajúca častica z vesmíru prvýkrát interaguje s molekulami v zemskej atmosfére spravidla už niekoľko desiatok kilometrov nad povrchom (väčšinou medzi 10-40 km), v závislosti na energii a type častice. Výsledkom tejto interacie sú takzvané sekundárne častice, ktoré sa opäť zrážajú s molekulami vzduchu za vzniku ďalších elementárnych častíc. Týmto spôsobom sa rozvíja kaskádová sprška. Častice pri prechode atmosférou postupne strácajú svoju energiu. Spočiatku tvorbou častíc, kým majú ešte energiu väčšiu, než je prahová energia pre ich vznik, a v momente keď túto hranicu prekročia, zvyšok energie strácajú ionizačnými a radiačnými stratami. Pri uvažovanej energii 10^{20} eV primárnej častice detekujeme na zemskom povrchu až rádovo desiatky miliard častíc s energiami v jednotkách eV na ploche niekoľkých km^2 . Tento proces nazývame sprškou kozmického žiarenia, ktorá je schématicky znázornená na obrázku 1.2.



Obrázok 1.2: Rozvoj spršky kozmického žiarenia, prevzaté z [22].

1.1.1 Sekundárne častice

Sekundárne častice môžeme deliť podľa ich prenikavosti na tvrdú a mäkkú zložku. Mäkká časť sa prechodom látkou (absorbátorom) silne pohlcuje. Tvoria ju predovšetkým nízkoenergetické fotóny, pióny a elektrón-fotónový komponent. Tvrdá zložka sa naopak absorbuje slabo, jej obsahom sú častice interagujúce silno, mióny a neutrína.

Iné rozdelenie môže prebehnúť v súlade s časticovým zložením na jednotlivé komponenty spršky: elektromagnetickú, hadrónovú a miónovú. Ako tieto časti vznikajú, sa dá objasniť detailnejším rozborom interakcie primárneho vysokoenergetického protónu. Ten sa bude pri vstupe do atmosféry zrážať väčšinou s elektrónmi v obaloch atómov vzduchu (78 % N_2 , 21 % O_2 , 1 % $Ar + CO_2$) čím vyvolá ich ionizáciu, ale aj stretmi s jadrami, za vzniku hlavne π , K , η mezónov a neutrónov. Každá častica, v závislosti na jej energii, type a prostredí, v ktorom sa pohybuje, môže voľiť medzi interakciou a rozpadom¹. Voľné elektróny v poli jadier (jadro je označené Z) môžu vytvárať fotóny.

$$e^- + Z \longrightarrow e^- + Z + \gamma$$

Fotóny môžu mať za následok vznik elektrón-pozitrónových párov.

$$\gamma + Z \longrightarrow Z + e^- + e^+$$

Ďalšie fotóny vznikajú z rozpadu neutrálneho piónu.

$$\pi^0 \longrightarrow \gamma + \gamma$$

Týmto spôsobom sa zásobuje pomerná časť elektromagnetického komponentu.

Neutrálne K mezóny sa rozpadávajú s pravdepodobnosťou 69 % na nabité pióny a s 31 % na neutrálne pióny, K^\pm s pravdepodobnosťou 63 % na mióny a s 21 % na pióny.

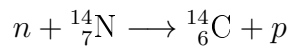
$$K^0 \longrightarrow \begin{cases} \pi^- + \pi^+ \\ \pi^0 + \pi^0 \end{cases}$$

$$K^\pm \longrightarrow \begin{cases} \mu^\pm + \nu_\mu \\ \mu^\mp + \bar{\nu}_\mu \\ \pi^\pm + \pi^0 \end{cases}$$

η mezóny sa premieňajú na fotóny s pravdepodobnosťou 39 %, alebo na neutrálne pióny (32 %), prípadne na kombináciu piónov (23 %).

$$\eta \longrightarrow \begin{cases} \gamma + \gamma \\ \pi^0 + \pi^0 + \pi^0 \\ \pi^+ + \pi^- + \pi^0 \end{cases}$$

Neutróny, ak sú už dostatočne spomalené, sa zachytávajú v jadrách dusíka, pričom vzniká opäť protón.



Miónový komponent, do ktorého zaraďujeme aj neutrína, sa rodí hlavne z rozpadu nabitých π mezónov.

$$\pi^\pm \longrightarrow \begin{cases} \mu^\pm + \nu_\mu \\ \mu^\mp + \bar{\nu}_\mu \end{cases}$$

Dominantným rozpadovým kanálom miónov je vznik elektrónov a neutrín.

$$\mu^\pm \longrightarrow \begin{cases} e^\pm + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \\ e^\mp + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \end{cases}$$

¹Viac detailnejších informácií o pravdepodobnostiach rozpadov je v [26].

Ďalej nerozpadnuté nukleóny a mezóny sú obsiahnuté v hadrónovom komponente, ktorý sa príliš neodchyľuje od osi spršky.

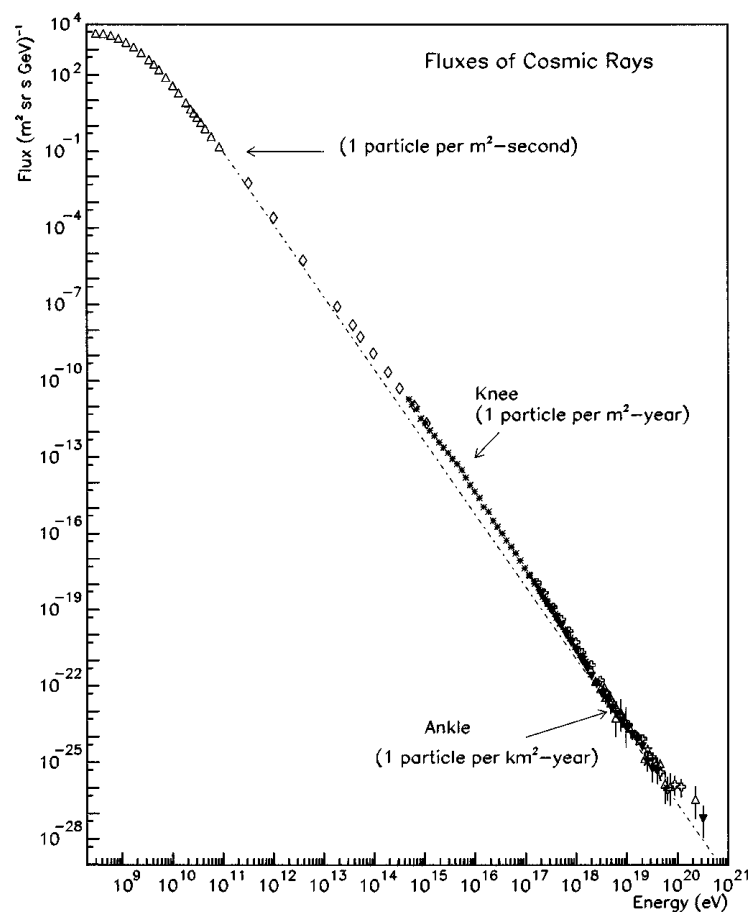
Po interakcii primárnej častice vznikne množstvo nových častíc, ktoré opäť interagujú, alebo sa rozpadávajú (v prípade nestabilných častíc) a sú zdrojom ďalšieho zástupu častíc. Týmto lavínovým princípom počet partikul rýchlo narastá. V dôsledku postupných strát energie prestane byť proces tvorby častíc dominantný a ich počet začne klesať. Atmosférickú hĺbku (funkcia nadmorskej výšky a hustoty atmosféry), v ktorej je počet sekundárnych častíc maximálny, označujeme ako X_{max} . Táto veličina je pre nás dôležitá, pretože nesie informáciu o type primárnej častice a jej energii.

1.2 Energetické spektrum

Energetické spektrum kozmického žiarenia je závislosť toku častíc na ich energii, riadi sa jednoduchým vzťahom

$$\Phi = dN/dE = cE^{-\alpha}$$

kde Φ je tok častíc, N a E ich počet a energia, c je normalizačná konštanta a α je index exponenciálneho klesania, ktorý nie je pre celé spektrum rovnaký.

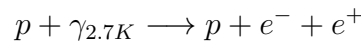


Obrázok 1.3: Energetické spektrum kozmického žiarenia, prevzaté z [12].

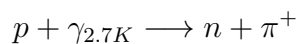
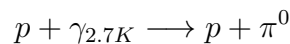
So zvyšujúcou sa energiou častíc prudko klesá ich počet, ako je patrné z obrázku 1.3. Pri energiách 100 GeV je to jedna častica na m^2 za sekundu, pri 10 PeV pozorujeme jednu časticu na m^2 za rok, o energii 10 EeV k nám priletí už iba jedna častica na km^2 za rok. Primárne častice s energiami menšími ako GeV sa do zemskej atmosféry nedostanú v dôsledku pôsobenia slnečného vetra. Exponenciálny index môžeme vo väčšine zobrazeného spektra položiť za $\alpha \simeq 2,7$. Oblasť energií $10^{15,5}$ eV, kde pozorujeme mierny nárast počtu priletávajúcich častíc, nazývame kolená. Spektrum v tomto mieste klesá menej strmo a koeficient môžeme aproximovať $\alpha \simeq 3$. V oblasti $10^{17,8}$ eV sa nachádza takzvané druhé kolená. V analógii s podobou nohy (ktorá má dve kolená) nazývame oblasť $10^{18,8}$ eV členkom, kde sa opäť vraciame k hodnote $\alpha \simeq 2,7$. Vznik týchto anomálií sa obyčajne vysvetľuje tým, že urýchľované protóny a ľahké jadrá dosiahnu prahovú energiu potrebnú k úniku z magnetického poľa (prvé kolená), pre ťažšie jadrá je nutná k prekročeniu hranice väčšia energia (druhé kolená), čím predpokladáme vyčerpanie galaktických zdrojov. Na vysvetlenie členka existuje viac teórií, jedna z nich predpokladá nárast extragalaktických prameňov.

1.2.1 GZK hranica

V 1965 bola objavená radiácia kozmického mikrovlnného pozadia (CMBR). Rok nato predpovedali Greisen [20] a nezávisle od neho Zatsepin s Kuzminom [39] teoretickú hranicu energie pre kozmické žiarenia. Táto GZK- hranica udáva limit energie $6 \cdot 10^{19}$ eV, ktorý by častice priletávajúce na Zem nemali presiahnuť. Hlavná myšlienka vychádza z predpokladu, že vysoko energetické protóny interagujú s fotónmi reliktného žiarenia². Prahová energia pre produkciu elektrón-pozitrónových párov je 10^{18} eV, ale energetické straty sú iba 0.1 %.

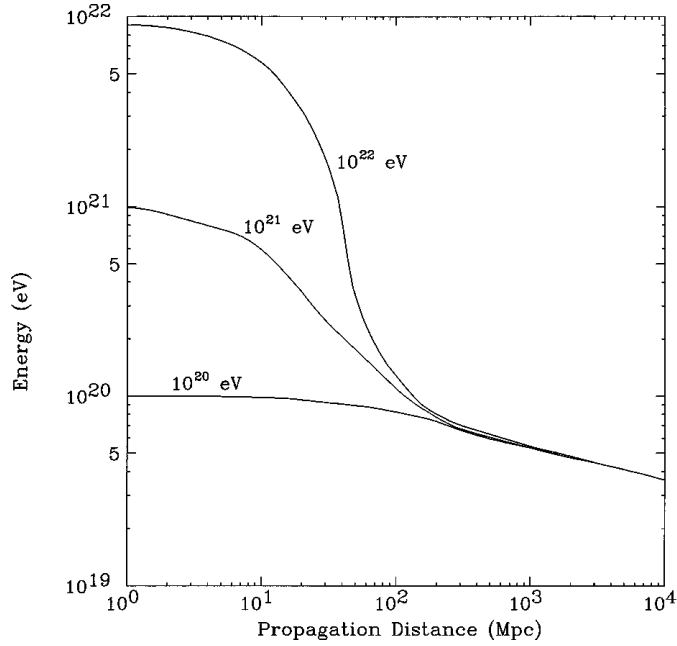


Dôležitá je interakcia za piónovej produkcie, kde je síce prahová energia procesu až $6 \cdot 10^{19}$ eV, ale dochádza k významným energetickým stratám 20 % a s rastúcou energiou sa zvyšuje účinný prierez tohto procesu.



Je zrejmé, že proces vzniku piónov je pre vysokoenergetické protóny limitujúci, pretože ich stredná voľná dráha je len $l = 6$ Mpc. Ako je viditeľné z obrázku 1.4, protóny letiace zo vzdialenosti 100 Mpc by nemali dosahovať energiu prekračujúcu 10^{20} eV. Koniec energetického spektra je preto ovplyvnený GZK-hranicou. V minulosti nastali rozpory v jej potvrdení na základe výsledkov z pozorovaní, o čom sa bude detailnejšie pojednávať pri popise jednotlivých experimentov.

²Tieto fotóny majú energiu $6 \cdot 10^{-4}$ eV, čo odpovedá teplote 2,7 Kelvina, a medzigalaktický priestor vyplňajú s hustotou $400/\text{cm}^3$.



Obrázok 1.4: Zo závislosti energie protónu na dráhe letu je jasne viditeľná GZK hranica. Obrázok bol prevzatý z [12].

1.2.2 Urýchľovanie a zdroje UHECR/EHECR

Výskum kozmického žiarenia so sebou prináša nemálo fascinujúcich otázok. Odkiaľ toto žiarenie pochádza? Sme schopní odhaliť jeho zdroje? Ako je možné, že nadobúda tak obrovské energie? Aké urýchľovacie procesy sú za to zodpovedné?

Základné princípy, o ktorých sa uvažuje, že by mohli spôsobiť urýchlenie častíc na energie $\sim 10^{20}$ eV, sú silné elektromagnetické polia, šokové vlny u rôznych astronomických objektov, rozpady superťažkých častíc, ktoré doteraz neboli pozorované a iné viac exotické scenáre. Jeden z uvažovaných spôsobov je založený na princípe tzv. Fermiho urýchľovania. Základnú myšlienku formuloval Enrico Fermi už v roku 1949 [18], kde popisuje, ako je nabitá častica zrkadlená opakovaným pohybom medzi hviezdneho magnetického poľa v plynoch mračnách, čo môže spôsobiť jej energetický zisk. Za predpokladu, že častica je relativistická ($E = pc$), magnetické pole v mračne sa nemení ani po zrážke s časticou, jej pohyb je v tomto poli náhodný a rozptyl je elastický, bol odvodený energetický zisk [29]

$$dE/dt = \eta Z e c^2 B$$

kde E je energia častice, Ze jej náboj, B intenzita magnetického poľa, a $\eta < 1$ je parameter akceleračného procesu.

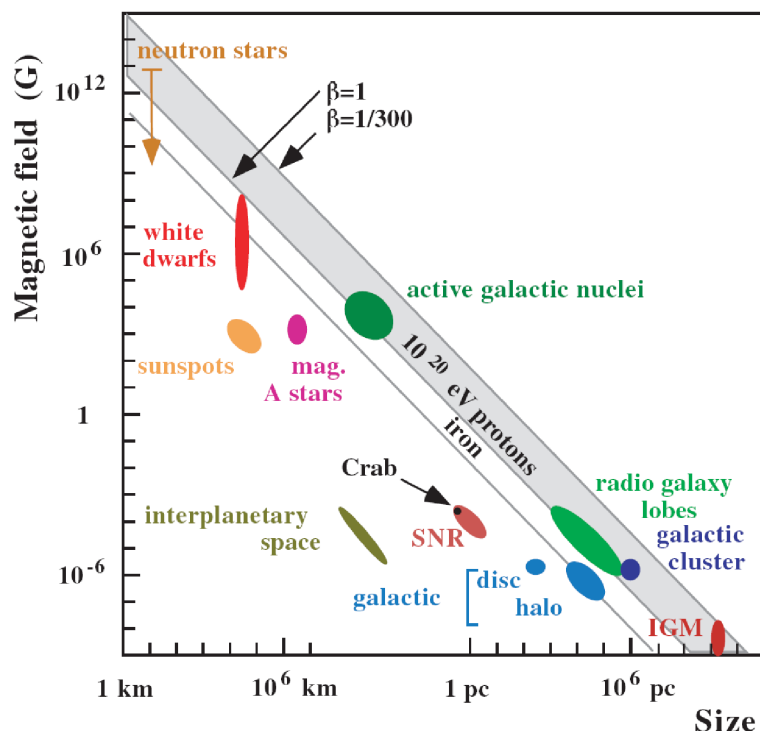
V roku 1994 L. Duray vysvetľoval vznik kozmického žiarenia o energiách $\sim 10^{15}$ eV difúznymi šokmi supernov. Energetický zisk pri tomto procese sa dá vypočítať pomocou vzťahu

$$E[EeV] = 0.9 Z B[\mu G] R[kpc]$$

kde za magnetickú indukciu šokovej oblasti dosadzujeme hodnoty v jednotkách μG^3

³1 Gauss = 10^{-4} T

a R je jej veľkosť v [kpc]. Podobným smerom sa uberal aj A. M. Hillas, ktorý na základe závislosti B na R uviedol možné galaktické objekty, ktoré by za urýchľovanie mohli byť zodpovedné, čo je znázornené na obrázku 1.5.

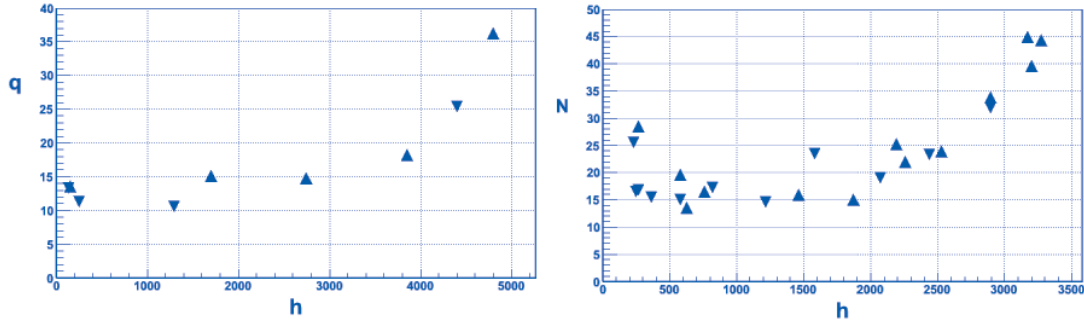


Obrázok 1.5: Modifikovaný Hillasov diagram zobrazuje silu magnetického poľa a veľkosť možných urýchľovacích zdrojov EHECR. Objekty, ktoré ležia pod diagonálou, nie sú schopné urýchliť protóny ani jadrá železa na 10^{20} eV a parameter $\beta = vc$ vyjadruje účinnosť procesu. Prebraté z [38], originál pochádza z [23].

1.3 Detekcia kozmického žiarenia

História detekcie kozmického žiarenia začala už pred sto rokmi. Spočiatku sa jednalo o snahu vysvetliť fakt, že aj silno tienené ionizačné komory zaznamenávali radiáciu. Pôvodne to bolo pripisované zbytkovému zemskému žiareniu, tzv. Erdstrahlung. Nakoniec sa opak ukázal pravdou, žiarenie nepochádza zo zeme, ale z kozmu. Nemecký fyzik a jezuitský kňaz Theodor Wulf dospel v roku 1909 k zaujímavému záveru na základe meraní radiácie na zemi, v podzemných jaskyniach a na Eiffelovej veži. K jeho prekvapeniu zistil pomocou svojho elektrometra, že so zvyšujúcou sa výškou vodivosť vzduchu vôbec neklesá, naopak skôr rastie. V roku 1912 uskutočnil rakúsky fyzik Victor Franz Hess prevratný let balónom. Počiatok letu bol v Ústí nad Lebem, trval šesť hodín a bolo dosiahnuté prevýšenie až 5 350 metrov. Meranie tromi elektrometrami potvrdilo Wulfovú domnienku, ionizácia s rastúcou výškou narastala, a v 4 500 metroch dosiahla dvojnásobok hodnoty na zemi. Z Hessovej interpretácie týchto výsledkov vyplynulo, že zdroj žiarenia musíme hľadať v kozme. Zo začiatku

tento záver nebol prijatý pozitívne medzi ostatnými fyzikmi, ako zadostučinenie bola Victorovi Hessovi za objav kozmickej radiácie udelená v 1936 Nobelová cena. O 70 rokov neskôr sa českému astrofyzikovi Jířimu Grygarovi podarilo zrekonštruovať let balónom, kde meraním na dvoch Geiger-Müllerových počítačoch potvrdil správnosť Hessovho merania. Výsledky z oboch letov sú znázornené na obrázku 1.6.



Obrázok 1.6: Na ľavej strane sú Hessove výsledky z roku 1912, na pravej strane namerané hodnoty Grygara z roku 2006. Veličina q v jednotkách [ion·cm⁻³·s⁻¹] je aritmetický priemer ionizácie vzduchu z dvoch zhodných elektrometrov vynesená v závislosti na nadmorskej výške h v [m]. Veličina N udáva priemerný počet zachytených častíc sekundárneho kozmického žiarenia za minútu dvomi Geiger-Müllerových počítačov, vynesená rovnako v závislosti na h v [m]. Smer trojuholníkov v oboch grafoch symbolizuje stúpanie, resp. klesanie balónu. Obrázok sa nachádza v [21].

So zaujímavou myšlienkou pôvodu kozmického žiarenia prišiel americký fyzik Robert Millikan, ktorý tvrdil, že ide o uvoľnenú väzbovú energiu (v podobe fotónov) pri tvorbe zložených atómov z protónov a elektrónov⁴. Túto predstavu vyvrátil Arthur Compton, ďalšia významná osobnosť vo svete fyziky. Postupom času sa pojem kozmickej radiácie⁵ ukázal byť nepresný, pretože pri použití hmlových komôr boli v magnetickom poli dráhy zakrivené, čo jasne ukazovalo, že sa jedná o elektricky nabitú častice. V 30. rokoch, keď ešte neexistovali urýchľovače, bolo kozmické žiarenie pre fyzikov jediným zdrojom vysokoenergetických častíc. Takto bol objavený pozitron aj mión.

Prevratný objav v obore kozmického žiarenia učinil francúzsky fyzik Pierre Auger. Pozoroval časovú synchronizáciu prilietavajúcich častíc v Geiger-Müllerových detektoroch rozmiestnených od seba vo vzdialenosti 20 m, čo ho priviedlo k myšlienke, že sa jedná o sekundárne častice, pochádzajúce zo zhodného zdroja. Týmto smerom sa uberal aj jeho ďalší výskum, pri experimentoch v Alpách sa koincidencia potvrdila aj pri rozstupoch 200 m, čím odvodil energiu primárnych častíc až na 10^{15} eV. V tej dobe to bol veľmi odvážny krok, ktorý so sebou priniesol množstvo otázok a otvoril dvere nasledujúcemu výskumu trvajúcemu dodnes. V Augerových stopách sa vydali nasledujúci bádatelia kozmického žiarenia, ktorí pokračovali v budovaní stále väčších a väčších sietí povrchových detektorov. Neskôr sa vyvinula aj iná metóda detekcie, založená na pozorovaní excitácie atómov dusíka.

⁴Neutrón bol objavený roku 1932, v tej dobe teda ešte nebol známy.

⁵Presnejšie bol pojem Cosmic radiation nahradený Cosmic rays, čo by v preklade mali byť Kozmické lúče, to ale nie je bežne používaný termín.

1.3.1 Povrchové detektory

S rastúcou energiou primárnej častice sa zväčšuje plocha dopadu sekundárnych častíc a výnamne klesá ich tok. Pre merania z oblastí najvyšších energií je preto dôležité mať plochu vytvorenú z pozemných detektorov čo najväčšiu. Merajú sa elektróny, pozitrony, mióny a fotóny pomocou vodných, alebo vzdušných Čerenkovových detektorov, scintilátorov, prípadne miónových detektorov. Ideálne je spŕšku detekovať v jej maxime, prípadne tesne za ním, čo kladie požiadavky na atmosférickú hĺbku umiestnenia experimentov. Pre čo najpresnejšiu rekonštrukciu je tiež dôležitý čo najrovnejší povrch, na ktorom sú detektory umiestnené do pravidelnej mriežky. Pre určenie osi spŕšky, teda aj smeru priletu primárnej častice, využívame relatívny čas zaznamenania signálu z minimálne troch navzájom nelineárne rozmiestnených detektorov. V prvom priblížení sa disk spŕšky považuje za rovinný, jeho hrúbka sa pohybuje od niekoľko nanosekúnd pri jadre spŕšky až po mikrosekundy vo vzdialenosti okolo kilometra od neho. Týmto spôsobom sa dá určiť smerovanie osi spŕšky s presnosťou od 1° do 5° . Dôležitou informáciou pre určenie polohy jadra spŕšky je okrem relatívnych časov priletu aj hustota detekovaných častíc. Pre daný typ detektoru je zostavená laterálna distribučná funkcia, ktorá udáva hustotu častíc v závislosti na vzdialenosti od jadra spŕšky. Pomocou štatistických metód, χ^2 alebo MLE (maximálne vierohodný odhad) sa na základe nameraných dát vypočíta umiestnenie jadra spŕšky. Z laterálnej funkcie v pevnom bode od jadra spŕšky je možné určiť energiu primárnej častice.

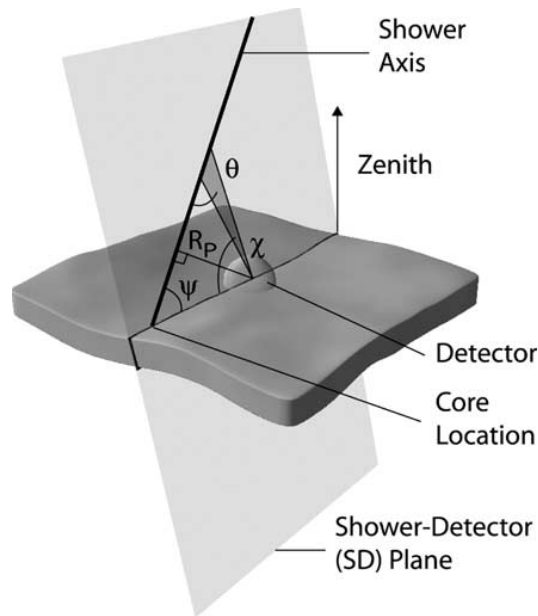
1.3.2 Fluorescenčné detektory

Sekundárne častice spŕšky pri prelete atmosférou ionizujú molekuly dusíka, ktoré pri deexcitácii emitujú UV žiarenie o vlnových dĺžkach 300 - 400 nm. Toto izotropne rozložené svetlo zaznamenávajú fluorescenčné detektory a sú schopné sledovať trajektóriu spŕšky pri jej rozvoji. Veľkou výhodou tejto metódy je možnosť pozorovania spŕšky až niekoľko kilometrov od jej osi. Detektor sa skladá zo sústavy zrkadlových ďalekohľadov a v ich ohniskovej rovine sa nachádzajú rovnomerne rozmiestnené fotonásobiče. Celá pozorovateľná obloha je rozdelená na malé časti, typicky má jeden segment veľkosť $1^\circ \times 1^\circ$ a je priradený jednému fotonásobiču. Intenzita fluorescenčného svetla je nízka, čo obmedzuje pozorovanie len na jasné a bezmesačné noci. Zber dát pomocou fluorescenčných detektorov prebieha z tohto dôvodu len $\sim 10\%$ z roka. Os spŕšky spoločne s umiestnením detektoru definujú detekčnú rovinu spŕšky, zobrazenú na obrázku 1.7, ktorá sa dá zrekonštruovať pomocou signálu zo zasiahnutých fotonásobičov.

Parameter dopadu R_p a úhol ψ , ktoré určujú os spŕšky, obdržíme fitom z nameraných veličín t_i a Θ_i pomocou funkcie [25]

$$t_i - t_0 = \frac{R_p}{c \cdot \sin \Theta_i} - \frac{R_p}{c \cdot \tan \Theta_i} = \frac{R_p}{c} \cdot \tan \left(\frac{\Theta_i}{2} \right)$$

kde t_i je čas zaznamenania svetla i -tým fotonásobičom a Θ_i uhol, pod ktorým priletelo. t_0 je čas preletu prednej roviny spŕšky cez stred detektoru a c je rýchlosť sveta.



Obrázok 1.7: Geometria trajektórie spršky pri meraní fluorescenčným detektorom. Obrázok je prevzatý z [5].

Ak spršku zachytávajú súčasne dva fluorescenčné detektory (stereo mód), je trajektória spršky určená priesečníkom detektčných rovín z oboch detektorov a nemusíme používať výhradne informácie z časového omeškania.

1.3.3 Experimenty

- **Volcano Range**

Prvý z novodobých experimentov bol zrealizovaný v oblasti Volcano Range v Novom Mexiku v rokoch 1959 - 1963. Na ploche $8,1 \text{ km}^2$ bolo rozmiestnených 19 scintilačných detektorov vzdialených od seba 442 m, neskôr bol pridaný jeden špeciálny miónový. Signál bol zobrazovaný na osciloskopoch, merala sa amplitúda pulzu a relatívne časy zaznamenania. Prvý krát boli detekované častice s energiou nad 10^{18} eV a ukázala sa existencia členka v energetickom spektre. Rekordný event nameraný na tomto experimente v roku 1962 mal energiu až $1,4 \cdot 10^{20} \text{ eV}$. Vedúci projektu Linsley ako prvý analyzoval smer priletu častíc.

- **Haverah Park**

Od roku 1967 trval 20 rokov výskum kozmického žiarenia v Haverah Parku vo Veľkej Británii. 12 km^2 bolo pokrytých vodnými Čerenkovovými detektormi. Nerovný povrch ich nedovoľoval umiestniť v pravidelnej sieti, preto boli rozmiestnené štyri hlavné detektory od seba vzdialené 500 m a okolo nich bolo vytvorených šesť podpolí, kde boli detektory vzdialené 50 až 100 m. Najväčší event mal energiu $\sim 10^{20} \text{ eV}$.

- **SUGAR**

Skratka SUGAR je odvodená z Sydney University Giant Air-Shower Recorder. Až do čias Pierre Auger Observatory to bolo jediné zariadenie merajúce kozmické žiarenie na južnej pologuli. V rokoch 1968 - 1979 na ploche 60 km² bolo rozmiestnených 54 staníc. Na každej z nich boli dva scintilačné detektory 1,7 m pod zemou, aby zaznamenávali hlavne mióny. Stanice boli od seba vzdialené jednu míľu, čo sa vo výsledku ukázalo príliš ďaleko aj pre najenergetickejšie eventy. Analýza dát z audiopások, kam boli merania zaznamenávané, bola preto málo presná. V dnešnej dobe sa výsledky z experimentu SUGAR nepoužívajú.

- **Jakutsk**

V roku 1970 bolo započaté meranie na ruskom Sibíri v blízkosti mesta Jakutsk, ktoré trvá dodnes. V priebehu štyroch rokov bolo pole rozšírené na 18 km², kde sa v trojuholníkových sieťach nachádzajú scintilačné detektory o rôznych veľkostiach zberných plôch. Pole bolo doplnené o miónové detektory a vzdušné Čerenkovove detektory, čo významne spresnilo určenie energie primárnej častice. Od roku 1995 bola plocha zmenšená na 10 km² a experiment Jakutsk sa zameriava na preskúmanie spektra v oblasti nižších energií.

- **Fly's Eye**

V americkom Utahu bola použitá prvý krát metóda fluorescenčnej detekcie. Fly's Eye 1 mal polomer 1,6 m a skladal sa z 67 zrkadiel. Celkom 880 fotonásobičov pokrývalo celú oblohu. Zber dát začal v roku 1981 a o päť rokov sa pridal Fly's Eye 2, ktorý pozostával z 36 zrkadiel a 464 fotonásobičov. Navzájom boli od seba vzdialené 3,4 km. V tomto stereo móde fungovali až do 1992. Experiment Fly's Eye stále drží rekord najenergetickejšieho eventu z roku 1991, kedy bola zaznamenaná častica s energiou $3 \cdot 10^{20}$ eV. Táto obrovská hodnota odpovedá 50 J, čo je energia štandardnej tehly padajúcej z jedného metra.

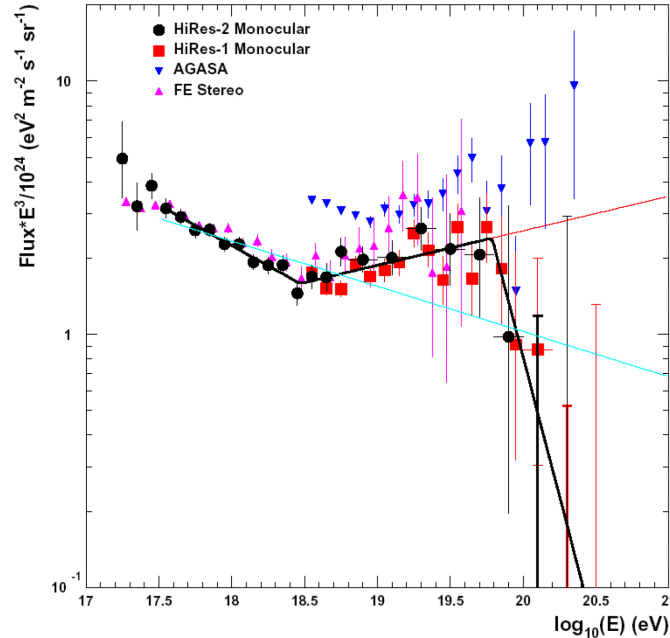
- **AGASA**

Japonský experiment AGASA, ktorého názov vznikol z Akeno Giant Air-Shower Array, pokrýva plochu až 100 km², na ktorej sa nachádza 111 scintilačných detektorov vzdialených od seba 1 km. Meranie tu v tomto rozmere prebiehalo od 1990, neskôr bolo doplnených 27 miónových detektorov. Bolo nameraných viac ako desať eventov s energiou nad 10^{20} eV a v spektre nie je pozorovaný pokles pri hranici GZK. Dnes sa už tieto výsledky zdajú nepravdepodobné.

- **HiRes**

High Resolution Fly's Eye (HiRes), ako je zrejmé z názvu, je pokračovateľom úspešného projektu Fly's Eye. Experiment bol spustený v 1997, o dva roky neskôr začal zbierať dáta v stereo móde. Dva fluorescenčné detektory sú od seba vzdialené 12,5 km. Hlavné vylepšenie spočívalo vo zväčšení polomeru zrkadiel z 1,6 m na 2 m a v zúžení zorného poľa jedného fotonásobiča z $5^\circ \times 5^\circ$ na $1^\circ \times 1^\circ$. Výsledky z experimentu HiRes na rozdiel od Agasy pokles spektra v oblasti GZK potvrdzovali, čo je znázornené na obrázku 1.8. Tento rozpor

v tom čase vyvolával nemalé rozpaky a stal sa jednou z fyzikálnych motivácií pre stavbu nového experimentu, ktorý by situáciu objasnil a stal sa ním Pierre Auger Observatory, ktorý bude podrobnejšie popísaný v časti 1.4. V roku 2006 bol projekt HiRes ukončený v súvislosti so započatím prác na novom americko-japonskom experiment Telescope Array.



Obrázok 1.8: Porovnanie výsledkov energetického spektra z experimentov Agasa, Hires a Fly's Eye. Obrázok je prebratý z [6].

- **KASCADE**

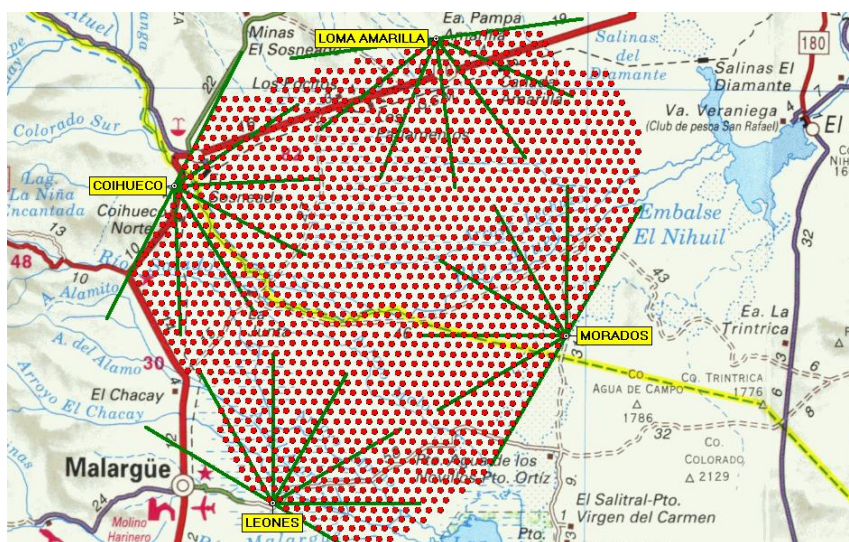
Od roku 1996 funguje pri výskumnom centre v Karlsruhe experiment KASCADE (KARlsruhe Shower Core and Array DETector). Pôvodne sa skladá z 252 scintilátorov v 13 metrových odstupoch na ploche 200 m^2 , spolu s miónovými detektormi a centrálnym detektorom, ktorého kľúčovú časť tvorí hadrónový kalorimeter. Týmto spôsobom je premeriavaná hlavne oblasť energií $\sim 10^{15}$ eV. Špeciálne pre rekonštrukciu atmosferických spršok kozmického žiarenia tu bol vyvinutý simulačný program CORSIKA. Postupom času bolo pole rozšírené o 500 m^2 (Kascade Grande) tvorených 37 stanicami, pričom každá z nich pozostáva zo scintilačného detektora a elektronických triggrovacích súčiastok. Hlavným cieľom bolo premeranie spektra okolo $E \sim 10^{17}$ eV, kde sa očakávalo tzv. železné koleno.

1.4 Observatórium Pierre Auger

Pierre Auger Observatory (PAO) je najväčší projekt skúmania kozmického žiarenia na svete. Jeho myšlienka vzišla v roku 1992 od profesora Jima Cronina a profesora Alana Watsona. V dnešnej dobe je do experimentu zapojených takmer 300 fyzikov z viac ako 70 inštitúcií v 17 krajinách. Nachádza sa na južnej pologuli, odkiaľ je pozorovateľný stred našej galaxie, pri juhoamerických Andách, v argentínskej oblasti Mendóza neďaleko mesta Malargüe. Motiváciou pre vznik tohto obrieho observatória bolo získať odpovede na otázky, ktoré si kládol už Pierre Auger: o aké častice sa jedná, odkiaľ prichádzajú a aké majú energie. V roku 2004 boli získané prvé dáta, od 2008 projekt funguje už v plnom plánovanom rozsahu. PAO je unikátne nielen svojou širokou medzinárodnou spoluprácou, ale aj rozlohou a revolučným spôsobom detekcie.

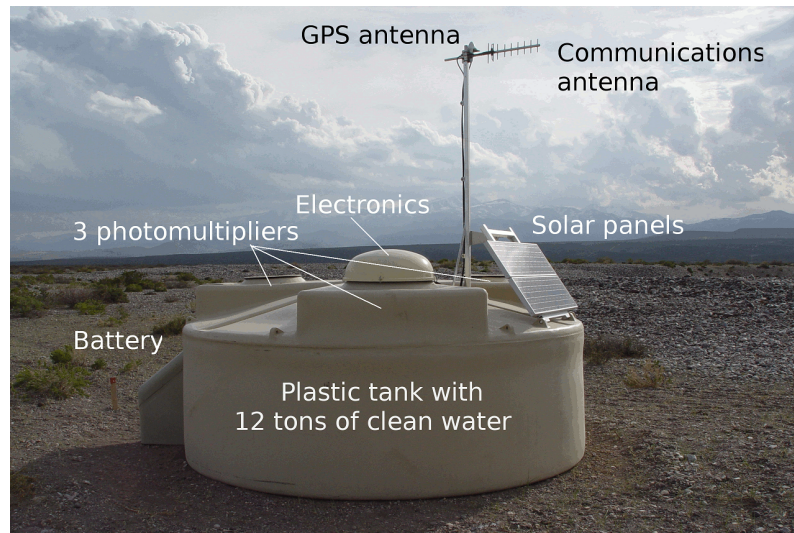
1.4.1 Hybridný detektor

Pre čo najpresnejšie výsledky sa na PAO používa hybridná metóda zberu dát. To znamená, že sprška je zaznamenávaná zároveň povrchovým, aj fluorescenčným detektorom. Na obrovskej ploche⁶ 3000 km² je v pravidelnej trojuholníkovej sieti rozmiestnených 1 600 vodných Čerenkovových detektorov navzájom od seba vzdialených 1,5 km. Za jasných bezmesačných nocí je ich meranie doplnené údajmi z 24 fluorescenčných detektorov, ktoré sú po šiestich rozmiestnené v štyroch staniách (Los Leones, Coihueco, Los Morados, Loma Amarilla) na okraji poľa. Schéma tohto experimentálneho usporiadania je graficky znázornená na obrázku 1.9.



Obrázok 1.9: Schématické usporiadanie hybridného detektora PAO. Červené krúžky znázorňujú povrchové detektory, žltým sú označené mená pahorkov, na ktorých sa nachádzajú fluorescenčné detektory a zelené čiary naznačujú zorné pole jednotlivých teleskopov. Obrázok je prebratý z [33], originál pochádza z [14].

⁶Táto plocha by pokryla až $\frac{1}{16}$ rozlohy Slovenskej republiky.



Obrázok 1.10: Povrchový detektor PAO. Obrázok je použitý v [32].

Jeden z 1 600 vodných Čerenkovových detektorov je odfotený na obrázku 1.10. Tvori ho plastová nádrž so špeciálnym vnútorným ochranným obalom (liner) obsahujúca 12 000 litrov čistej vody. Čerenkovove fotóny sú zaznamenávané tromi fotonásobičmi. Prívod energie zabezpečuje batéria napojená na solárny panel. Presnosť časových údajov garantuje GPS anténa, komunikácia medzi detektormi a centrálnymi počítačmi prebieha pomocou rádio systému. Uhlové rozlíšenie na PAO je menšie ako 1° pri zaznamenaní spŕšky aspoň 4 detektormi. Viac informácií sa dá nájsť v [4].

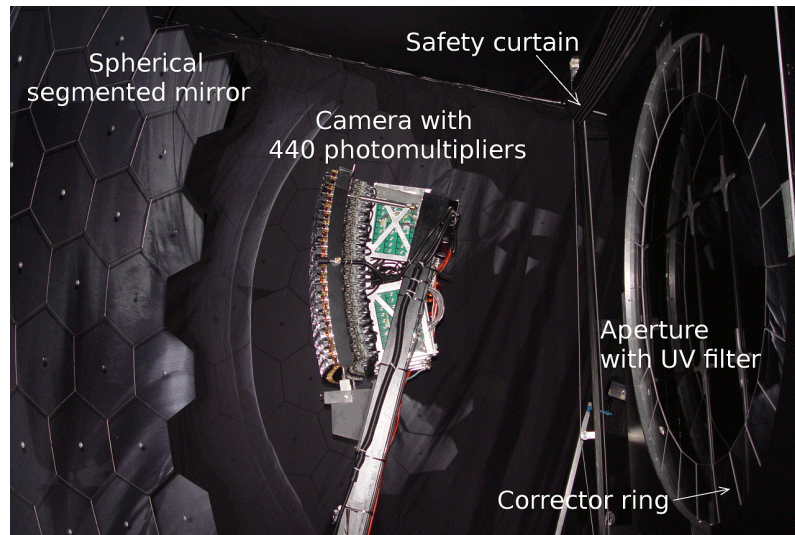
Každý zo štyroch fluorescenčných detektorov sa skladá zo šiestich teleskopov. Jeden teleskop je schopný pokryť zorné pole $30^\circ \times 30^\circ$ v azimutálnom a vertikálnom smere. Je umiestnený v budove, ktorá na základe klimatických podmienok otvára svoj shutter (uzávierka) a umožňuje meranie. Pohľad na teleskop je zachytený na obrázku 1.11. Fluorescenčné svetlo vniká oknom cez UV-prepúšťajúci filter a Schmidtov optický korekčný prstenec (odstraňuje aberáciu svetla). Svetlo sa fokusuje na $3,5 \times 3,5 \text{ m}^2$ segmentovaných zrkadlách⁷ do 440 pixelovej kamery s fotonásobičmi. Svetelné pulzy sa v pixeloch digitalizujú každých 100 nanosekúnd. Detailnejší popis sa nachádza v [9].

Povrchové detektory a fluorescenčné teleskopy umožňujú rekonštrukciu spŕšky dvomi nezávislými meraniami⁸. Kombinácia týchto dvoch metód sa nazýva hybridná detekcia, ktorou je možné dosiahnuť výrazne presnejších výsledkov. Pri určovaní smeru osi hybridný odhad nahradzuje štandardný postup fitovania⁹ pripojením informácie o čase priletu spŕšky jediným sudom. Týmto spôsobom môžeme doplniť časové údaje z pixelov v kamere teleskopu. Na obrázku 1.12 je znázornený bod dopadu spŕšky pri hybridnej a mono detekcii. V hybridnom móde dosahuje rozlíšenie smeru priletu a pozície jadra spŕšky presnosť lepšiu ako $0,6^\circ$ a 50 m. PAO premeriava energetické spektrum hybridnou detekciou až do 3 EeV, pri vyšších energiách sa používajú iba povrchové detektory.

⁷Na dvoch staniciach boli tieto zrkadlá vyrobené v Olomouci.

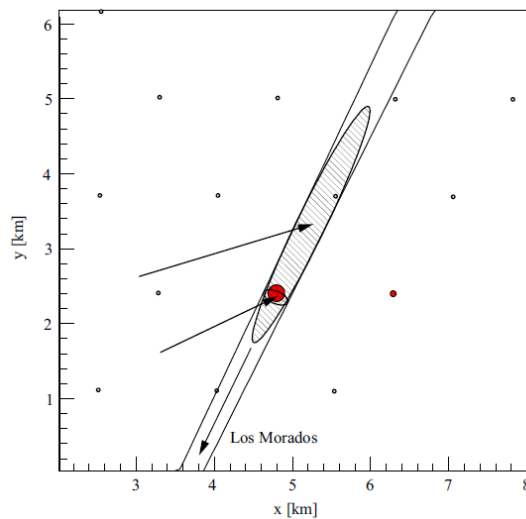
⁸Triggrovací systém povrchového detektoru [10], fluorescenčného detektoru [9].

⁹Bližšie bola táto téma rozobraná v časti o fluorescenčných detektoroch.



Obrázok 1.11: Pohľad do vnútra fluorescenčného detektora na stanici Coihueco. Obrázok je použitý v [32].

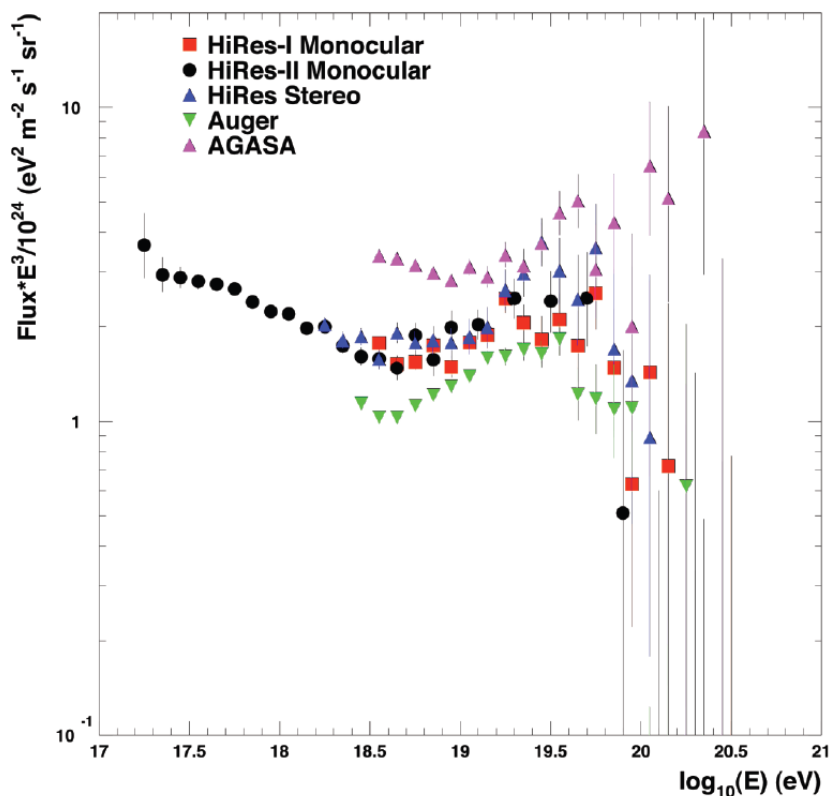
Po určení geometrie spŕšky sa rekonštruje jej pozorovateľná energia na základe znalostí interakcie svetla pri prechode atmosférou a vzniku Čerenkovovho svetla. Pre stanovenie celkovej energie spŕšky je potrebné určiť neviditeľnú energiu, ktorú odnášajú neutrína a vysokoenergetické mióny. Pre elimináciu systematických chýb je venovaná veľká pozornosť kalibrácii detektorov a meraniu atmosférických podmienok.



Obrázok 1.12: Porovnanie mono a hybridnej metódy. Dole smerujúca šípka ukazuje na stranu Los Morados, dve čiary znázorňujú nepresnosť detekčnej roviny spŕšky na povrchu. Väčšia elipsa ukazuje neurčitost pozície jadra spŕšky pri mono detekcii, menšia elipsa pri hybridnej detekcii. Natočenie šípok reprezentuje zrekonštruovaný smer osi a ich dĺžka je úmerná sínusu zenitového uhla spŕšky. Prázdne krúžky sú aktívne sudy, vyplnené sú triggrované, ich polomer je úmerný logaritmu signálu. Obrázok je prebratý z [8].

1.4.2 Energetické spektrum

Ako už bolo spomínané, jednou z hlavných motivácií pre stavbu PAO bolo rozhodnúť v rozpore medzi výsledkami z HiRes a AGASA. Na rekonštrukciu energetického spektra nad 10^{18} eV sú vyberané hybridné eventy (približne 10 % všetkých nameraných dát), ktoré musia spĺňať viaceré kritéria. Napríklad sprška musí mať zenitový uhol menší ako 60° a jej maximum X_{max} musí byť pozorovateľné teleskopom. Doterajšie výsledky na PAO pozorujú mierny pokles toku v oblasti 4 EeV a jeho potlačenie u častíc s energiami okolo 30 EeV, teda potvrdenie členka a GZK hranice. Na obrázku 1.13 sú zaznamenané pre porovnanie výsledky z experimentov HiRes, AGASA a PAO. Rozdielny trend dát z japonského experimentu sa pripisuje veľkej závislosti na použitých hadrónových modeloch, ktoré sa od seba môžu navzájom pri vysokých energiách výrazne líšiť. Odchýlka výsledkov medzi HiRes a PAO môže byť spôsobená rozdielnou atmosférickou konštantou. Systematické nepresnosti v energetickej mierke v dôsledku kalibrácie sú 7 % pri energiách 10^{19} eV a 15 % pri 10^{20} eV. Pričom systematická nepresnosť až 22 % v absolútnej energetickej škále pochádza z fluorescenčného merania [17]. Veľká pozornosť na PAO smeruje k významnému zníženiu týchto chýb.



Obrázok 1.13: Porovnanie výsledkov energetického spektra z experimentov AGASA, HiRes a PAO. Obrázok bol publikovaný v [7].

1.4.3 Anizotropia

Ďalšou zaujímavou otázkou, ktorú je dnes snaha objasniť, je možná anizotropia kozmického žiarenia. Až na oblasť $10^8 - 10^{11}$ eV, kde je za nárast počtu častíc z jedného smeru zodpovedné Slnko, nemá zmysel uvažovať o antizotropii priletu častíc až do energií 10^{18} eV. To je spôsobené galaktickým magnetickým poľom, ktoré častice pri lete zakrivuje, a kým sme schopní ich detekovať, stratia informáciu o svojom pôvodnom smere. Presná veľkosť zakrivenia sa dá vypočítať pomocou vzťahu vychádzajúceho z Lorentzovej sily

$$r_L[kpc] = \frac{E[EeV]}{ZeB[\mu G]}$$

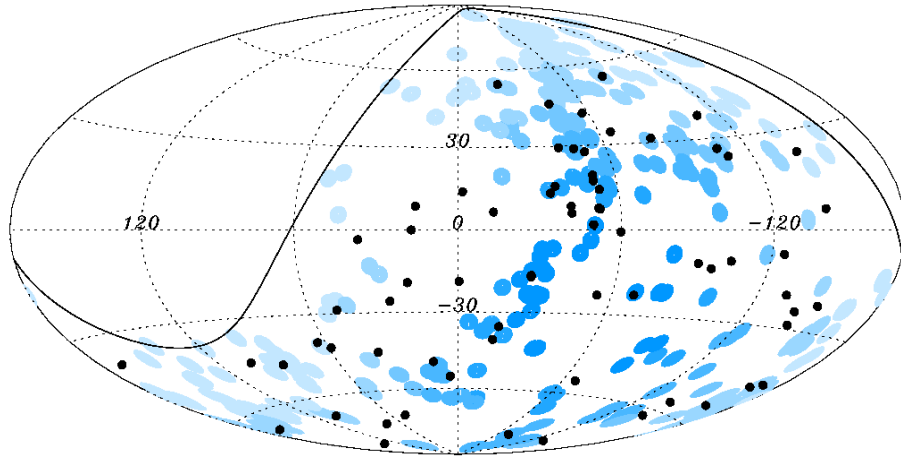
kde r_L je Larmorov polomer, E a Ze je energia a náboj častice, B je magnetická indukcia. Pre výpočet medznej energie dosadzujeme za $r_L = 300$ pc, čo odpovedá šírke nášho galaktického disku, a za $B = 4 \mu G$ [30]. Energia protónu tak vychádza $\sim EeV$. Z toho dôvodu sa o anizotropii kozmického žiarenia uvažuje len u častíc s energiou $E \geq 10^{19}$ eV. Presná hodnota B galaktického magnetického poľa však nie je známa, čo môže byť zdrojom nepresností.

Určenie anizotropie vychádza z výpočtu, kde zisťujeme pravdepodobnosť P , že k alebo viac z celkového počtu N izotropných eventov sa bude nachádzať v kruhovej oblasti o uhlovom polomere ψ okolo zvolených smerov, parameter p odpovedá výseku tejto kruhovej oblasti. P je daná vzťahom

$$P = \sum_{i=k}^N \binom{N}{i} p^i (1-p)^{N-i}$$

Z dát nazbieraných od januára 2004 do augusta 2007 sa hľadalo minimum funkcie P s parametrami ψ , maximálnou vzdialenosťou zdroja D_{max} a prahovou energiou častíc E_{min} s výslednými hodnotami $\psi = 3,1^\circ$, $D_{max} = 75$ Mpc a $E_{min} = 56$ EeV. Primárni kandidáti na zdroje sú aktívne galaktické jadrá (AGN)¹⁰. Tieto merania potvrdzujú anizotropné rozloženie častíc s energiami nad ~ 56 EeV, pričom chyba tejto hypotézy by mala byť menšia ako 1 % [3]. Keďže je štatistika zostavená len z 27 vhodných eventov, je namieste opatrná interpretácia týchto výsledkov. Po pridaní dát nameraných do konca roku 2009 sa pri výberových kritériách (zenitový uhol $\theta \leq 60^\circ$ a $E \geq 55$ EeV) na eventy ich počet sa zvýšil na 69, vykreslené sú na obrázku 1.14. Stupeň korelácie medzi smerom priletu UHECR a AGN však poklesla z pôvodných (69_{-13}^{+11}) % na (38_{-6}^{+7}) %. Pričom pri predpoklade izotropného rozloženia sa očakáva hodnota 21 %. V každom prípade pre vyvodenie významnejších záverov je potrebná väčšia štatistická vzorka. Súčasný výskum sa ale ubera aj cestou iných scenárov. Ako možné zdroje sa uvažujú rôzne extragalaktické objekty a používajú sa iné katalógy. Oblasť záujmu smeruje aj k regiónu v okolí rádiogalaxie Centarus A, kde sa koncentruje najväčšie množstvo pozorovaných priletov. Cen A je najbližšia AGN, vzdialená necelých 4 Mpc. Viac informácií [11].

¹⁰Ako zdroj informácií o AGN bol použitý Véron-Cetty a Véron (VCV) katalóg kvazarov a aktívnych galaktických jadier [37].

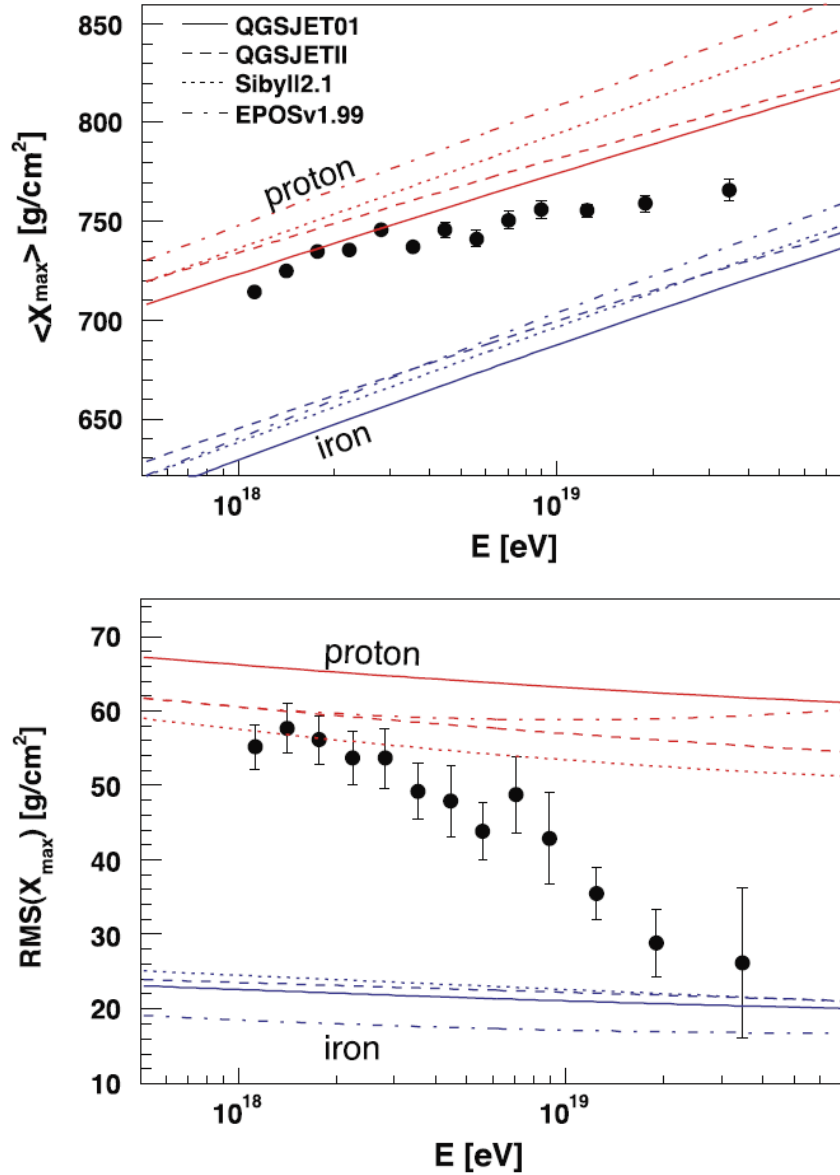


Obrázok 1.14: Projekcia hviezdnej oblohy v galaktických súradniciach. Čiernymi bodkami je zaznačených 69 vybraných eventov detekovaných na PAO do konca roka 2009. Plná čiara vymedzuje zorné pole spŕšok so zenitovým uhlom menším ako 60° . Modré krúžky majú polomer $3,1^\circ$ a reprezentujú 318 AGN, ktoré ležia do vzdialenosti 75 Mpc od Zeme. Tmavšia modrá znázorňuje väčšiu relatívnu expozíciu. Obrázok pochádza z [11].

1.4.4 Zloženie UHECR

Určiť zloženie primárnych častíc je obzvlášť náročná úloha. Typ primárnej častice sa musí odvodzovať zo vzniknutých desiatok miliárd sekundárnych častíc. Atmosférická hĺbka X_{max} je veličina veľmi významne korelovaná so zložením primárnych partikul. Fluorescenčný detektor je schopný ju merať s vysokým rozlíšením. Ďalšiu kompozičnú informáciu nesie fluktuácia X_{max} . Protónová spŕška preniká hlbšie do atmosféry, teda dosahuje väčšie hodnoty atmosférickej hĺbky a má širšie X_{max} rozdelenie¹¹, než jadrá ťažších prvkov. Na obrázku 1.15 sú namerané závislosti X_{max} a $RMS(X_{max})$ na energii primárnej častice. Pre porovnanie sú tam znázornené hodnoty pre krajné uvažované možnosti zloženia (protón a železo), ktoré sú vypočítané rôznymi simulačnými modelmi. Tejto problematike sa budú bližšie venovať nasledujúce kapitoly. Možná interpretácia týchto dát je, že s rastúcou energiou tvoria primárne častice stále ťažšie jadrá. Tento záver je však silne závislý na použitých hadrónových modeloch, ktorých správnosť je pri tak vysokých energiách otázná. Odhadovať zloženie je možné aj z pomeru miónového komponentu k elektromagnetickému. Napríklad pre protóny je tento pomer približne o 40 % menší, ako pri najťažších očakávaných jadrách v kozmickom žiarení [13]. Celková systematická nepresnosť odvodenej X_{max} je menšia ako 15 g/cm^2 pri nízkych energiách, nad 10^{18} eV je chyba $\leq 11 \text{ g/cm}^2$. Monitorovaním atmosféry je snaha eliminovať dominantný príspevok k týmto hodnotám. Horný limit pre obsah fotónov pri energiách nad 10 EeV bol určený na 2 % [17].

¹¹Smerodatnú odchylku X_{max} budeme označovať $RMS(X_{max})$, z ang. root mean square, ktorá sa počíta ako odmocnina z priemeru kvadrátov odchýliek jednotlivých meraní X_{max} od stredného X_{max} .



Obrázok 1.15: Na hornom grafe je závislosť strednej hodnoty X_{max} na energii primárnej častice, v dolnom obrázku sa nachádza závislosť $RMS(X_{max})$ na energii primárnej častice. Auger dáta sú porovnané s rôznymi modelovými (QGSJET, SIBYLL, EPOS) predpoveďami, ak by zloženie bolo čisto protónové, alebo čisto železné. Obrázok je prebratý z [40].

Kapitola 2

Modely atmosférických spršok

Bez správneho vyhodnotenia nameraných dát je aj vysoko kvalitné experimentálne zariadenie zbytočné. Analýza údajov o sprške si vyžaduje podrobný teoretický model jej rozvoja v atmosfére. To je možné dnes doceliť pomocou detailného Monte Carlo programu, do ktorého sú zahrnuté všetky doterajšie poznatky o silnej, slabej a elektromagnetickej interakcii. Táto úloha je však veľmi zložitá, pretože energie primárnych častíc kozmického žiarenia sú o niekoľko rádov väčšie než tie, s ktorými sa pracuje na zemi. Aby sa dali tieto energie priamo merať, musel by mať LHC priemer rovnaký ako má Merkúr pri svojom obehu okolo Slnka. Bolo vyvinutých viacerých simulačných programov, ktorých výsledky sa kvôli týmto problémom líšili. V dnešnej dobe je jedným z najpoužívanejších v oblasti rekonštrukcie atmosférických spršiek kozmického žiarenia program CORSIKA.

2.1 CORSIKA

COsmic Ray SIMulations for KAscade je plný názov Monte Carlo programu, pomocou ktorého študujeme vývoj spršky v atmosfére. Pôvodne bol vyvinutý na simuláciu spršok pre experiment Kascade. V priebehu rokov bol rôzne modifikovaný a dnes ho používa veľa vedeckých skupín po celom svete. Posledná verzia je CORSIKA 6.980 z 12. apríla roku 2011. Je použiteľný od primárnych energií $E \simeq 10^{12}$ eV, až po najvyššie energie $E \simeq 10^{20}$ eV. Na rekonštrukciu spršky sa používajú vždy dva modely, jeden pre vysoké energie a jeden pre nízke energie. Hranica prechodu sa môže líšiť v závislosti na použitom nízkoenergetickom modeli, rádovo sú to desiatky GeV. Základná myšlienka spočíva v tom, že častica sa pri vlete do atmosféry vždy rozhoduje medzi dvoma procesmi - rozpadom a inelastickou interakciou, ktoré si navzájom konkurujú. Vďaka ich štatistickej povahe sa práve náhodne generujú vzdialenosti, ktoré častica prejde do najbližšieho rozpadu, alebo interakcie, určené na základe hustoty atmosféry a inelastického účinného prierezu. Najpoužívanejšie vysokoenergetické modely sú založené na myšlienke Gribov-Reggeho teórie. Vo všetkých modeloch sa používa poruchová kvantová chromodynamika, rozdiely sú spôsobené odlišnou implementáciou a prístupom k vysokoenergetickému rozptylu.

- **QGSJET01**

Quark Gluon String model with JETs sa v praxi ukázal ako veľmi vhodný na popis dát kozmických spršok, no obsahuje viacero teoretických nedostatkov. Pre modelové predpovede je charakteristický veľmi dobrý popis distribúcie primárnej častice a veľkým počtom sekundárnych častíc pri vysokých energiách.

- **QGSJETII**

Je nástupcom QGSJET01 a obsahuje opravy nedostatkov a rôzne vylepšenia, ktoré sa rokmi ukázali nevyhnutnými. Sekundárna multiplicita je oproti predchodcovi nižšia, avšak predpovedá viac sekundárnych častíc ako ostatné modely. Posledná verzia QGSJET II-0.4 je z roku 2009 [27].

- **EPOS**

V EPOSe sú hypotetické pomeróny vymieňané medzi partónami a nie hadrónami, ako je tomu v ostatných modeloch. Jeho predpovede sú vo veľmi dobrej zhode s meraniami na urýchľovači RHIC, čo bolo docielené pridaním rôznych fenomenologických parametrov. EPOS je pokračovateľom zastaralého NEXUSu. Najnovšia verzia EPOS 2 je z roku 2010 [28].

- **SIBYLL**

Je minijetový model vyvinutý špeciálne pre potreby v oblasti astročasticovej fyziky. SIBYLL predpovedá najvyššie účinné prierezy pre protón-protón a protón-vzduch. Charakteristickou črtou je mierne narušenie v distribúcii primárnej častice. Z roku 2009 pochádza posledná verzia SIBYLL 2.1 [1].

- **GHEISHA**

Je obľúbený nízkoenergetický model, ktorý sa v CORSIKE začne používať pri prekročení prahu energie 80 GeV v laboratórnej sústave. Výhodou oproti ostatným modelom je, že GHEISHA pracuje s málo energetickými neutrónmi realistickejšie ako ostatné staršie modely.

Simulačné modely používané v CORSIKE, ale aj v iných Monte Carlo programoch, slúžiacich na rekonštrukciu atmosférických spršok majú výrazne menej parametrov ako modely, používané v časticovej fyzike na urýchľovačoch, napríklad PYTHIA alebo PHOJET. To je jedným z dôvodov, prečo sa predpovede vo vysokých energiách tak významne odlišujú.

2.2 Počet miónov

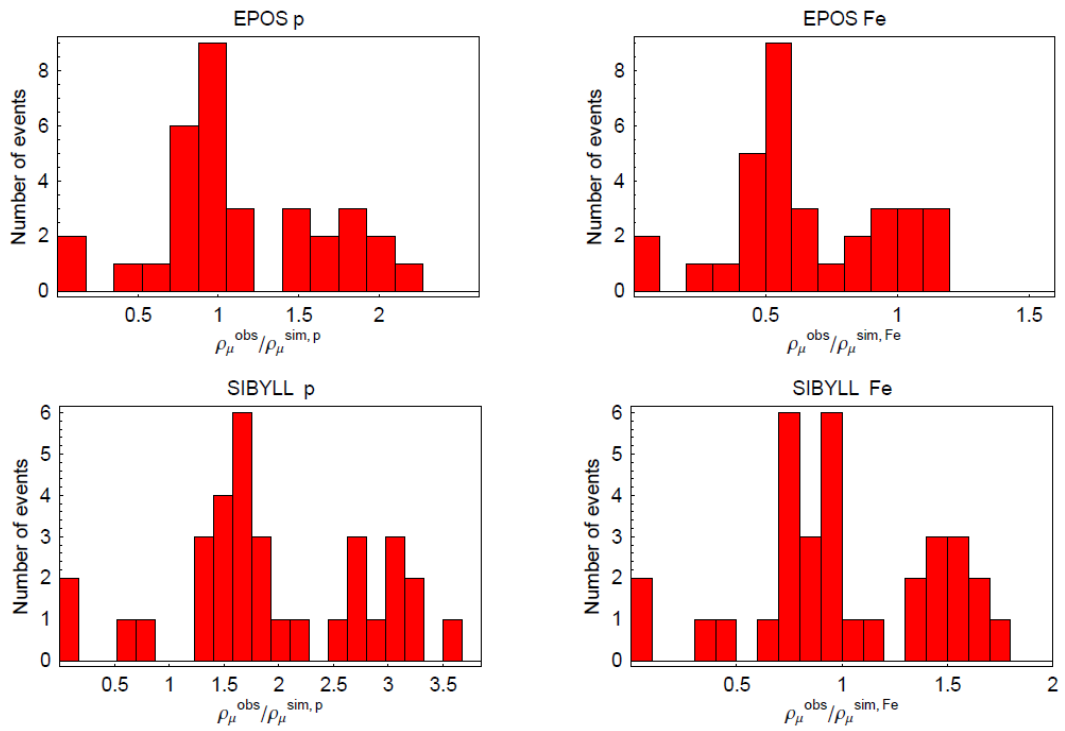
V posledných desaťročiach boli simulačné Monte Carlo modely postupne vylepšované a dnes dosahujú dobrú kvalitu a v celkovom merítku sú schopné popisovať namerané dáta. Najväčší zdroj neurčitostí pramení z nedostatočnej znalosti priebehu hadrónových interakcií pri veľmi vysokých energiách, ktoré sa nedajú priamo merať na pozemských experimentoch. S tým prirodzene súvisia aj nezrovnalosti v počte miónov medzi experimentom a modelovými predpoveďami, pretože práve mióny sú

citlivým ukazovateľom na primárne hadrónové interakcie. Už v 2004 pri meraniach na detektore DELPHI sa ukázal prebytok miónov s energiami $E_\mu > 50$ GeV [34]. Tento problém je dodnes nevyjasnený. EPOS 2 bol upravený už na základe nedávnych výsledkov z LHC. Oproti svojmu predchodcovi je produkovaných viac baryónov a antibaryónov v podpredných smeroch, čím sa zvyšuje aj počet miónov.

Hybridné eventy, ktoré poskytuje PAO, sú ideálne pre štúdium korelácie medzi X_{max} a hustotou miónov vo vzdialenosti 1 km od jadra spršky S(1000). V tomto mieste závisí signál len mierne na hmotnosti primárnej častice. Konkrétne medzi protónom a železom činí rozdiel len 13 %, závislosť na použítom interakčnom modeli je $\sim 5\%$. Pri použití QGSJET II spolu s nízkoenergetickým modelom FLUKA bol vo vybraných hybridných eventoch pozorovaný nárast v počte miónov približne 1,5 násobný v protónových sprškách. Predpovede modelu SIBYLL dávajú relatívny počet miónov 1,27 a QGSJET II 1,39 pre železné spršky. Ak by sme teda predpokladali, že naše simulačné modely sú bezchybné, museli by byť primárne častice tvorené aj jadrami, ktoré sú ťažšie od železa. Preto je zrejmé, že ak chceme Monte carlo modely používať na správnu interpretáciu dát, je nevyhnutné vyriešiť túto nezrovnalosť [16].

Zaujímavý príspevok k miónovej otázke priniesla analýza výsledkov z experimentu Jakutsk [19], kde disponujú miónovými detektormi a nemusia byť použité nepriame metódy pre určenie počtu miónov. Prísne vybraných 33 eventov s energiami nad $2 \cdot 10^{19}$ eV bolo jednotlivo porovnaných so simulčnými programami SIBYLL a EPOS pre protónové a železné primárne častice. Na obrázku 2.1 sú znázornené výsledky, kde sa objavuje výrazný peak pre ľahké jadrá, ďalší pre ťažšie jadrá a našli sa aj eventy takmer bez miónov. Interpretácia týchto dát hovorí, že UHECR sú trojakého typu: protóny, železá a fotóny. Ukázalo sa, že individuálny prístup k eventom môže veľa napovedať o zložení kozmického žiarenia. Hadrónový model EPOS sa vyprofiloval na vhodného kandidáta poskytujúceho zatiaľ najpresnejšie predpovede pre hustoty miónov pre protóny, naopak model SIBYLL sa javí použiteľný pri ťažkých jadrách.

Počet miónov dopadajúcich na zem je väčší v sprške indukovanej ťažkým jadrom, ako protónom. Z tohto pohľadu namerané dáta jasne ukazujú na trend zmeny zloženia primárnych častíc pri vysokých energiách na železá. Druhý prístup k vysvetleniu veľkého počtu miónov je v zmene priebehu prvých hadrónových interakcií. Oba smery majú svoje opodstatnenie. Na určenie zloženia kozmického žiarenia pri extrémne vysokých energiách je bežne používaná veličina X_{max} . Je však závislá na viacerých parametroch, ktoré môžu výsledky významne ovplyvniť (viac k tejto téme je v nasledujúcej kapitole). Preto ak by sa podarilo objasniť záhadu prebytočných miónov, získali by sme mocný nástroj na odlišenie spršok z ľahkých a ťažkých prvkov.



Obrázok 2.1: Pomery hustôt miónov nameraných na experimente Jakutsk ρ_μ^{obs} a nasimulovaných modelmi SIBYLL a EPOS pre protón $\rho_\mu^{sim,p}$ a železo $\rho_\mu^{sim,Fe}$. Obrázok je prevzatý z [19].

Kapitola 3

Diskusia vplyvu výsledkov z LHC

Nedá sa jednoznačne rozhodnúť, či rozdiely, ktoré medzi sebou vykazujú jednotlivé modely, môžu určovať teoretickú systematickú nepresnosť v simulovaní hadrónových interakcií. Je možné, že existujúce rozdiely medzi modelmi sú buď väčšie, alebo menšie ako terajšia systematická neistota. Vyjasniť túto situáciu by pomohli nové dáta z urýchľovačov, na základe ktorých by bolo možné upraviť modely tak, aby viac odpovedali realite. Nedá sa však vylúčiť, že naša úroveň predstavy o hadrónových modeloch je nedostatočná a nepopisujeme tak všetky možné scenáre, ktoré by boli schopné objasniť experimentálne hodnoty. V tejto časti budú popísané jednotlivé veličiny zahrnuté v modeloch, ktoré markantne ovplyvňujú interpretáciu experimentálnych hodnôt z rozvoja spršky kozmického žiarenia. Akú úlohu v tejto problematike zohráva LHC?

3.1 Účinný prierez

Hadrónový účinný prierez významne ovplyvňuje rozvoj kaskádovej spršky v atmosfére. Interpretácia nameraných dát je závislá na hadrónových modeloch, ktoré extrapolujú účinný prierez z hodnôt zmeraných na urýchľovačoch až do extrémne vysokých energií, ktoré dosahujú primárne častice kozmického žiarenia. Tým vnášajú do analýzy veľkú a ťažko odstrániteľnú systematickú neurčitost, ktorá sa prejavuje predovšetkým v stanovení maxima spršky a v určení počtu miónov. Pre potreby v oblasti kozmického žiarenia je dôležitý hlavne účinný prierez pre produkciu častíc medzi protónom a vzduchom σ_{prod}^{p-air} , pretože proces pri ktorom nevznikajú žiadne častice nemá na rozvoj kaskádovej spršky vplyv. Počíta sa na základe znalostí z jadro-jadro a mezón-jadro reakcií v nižších energiách, ktoré prebiehajú v pozemských experimentoch. Používa sa zjednodušenie, že nukleóny v jadre sú nekorelované

$$\psi^*(\vec{r}_1 \dots \vec{r}_A) \psi(\vec{r}_1 \dots \vec{r}_A) = \prod_{j=1}^A \rho_j(\vec{r}_j)$$

kde ψ je vlnová funkcia jadra s A nukleónmi a \vec{r}_j označuje polohu jeho jednotlivých nukleónov $j = 1 \dots A$. Hustoty nukleónov sú normalizované $\int \rho_j(\vec{r}_j) d^3r_j = 1$.

Zrážkové parametre¹ nukleónov sú značené \vec{b}_j a hadrónu kozmického žiarenia \vec{b} . Rozptyľová amplitúda v priestore zrážkového parametra $a(s, b)$ sa dá spočítať na základe analógie s difrakciou v optike a pri zanedbaní spätného odrazu v zrážkach medzi nukleónmi (recoil effect) môže byť vyjadrená pre násobný rozptyl. Totálny účinný prierez je daný vzťahom [35]

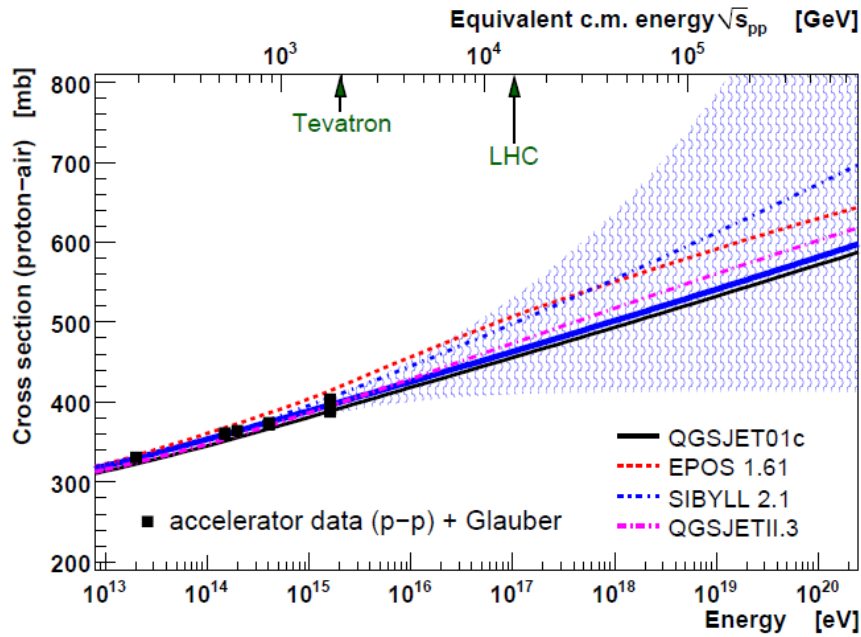
$$\sigma_{tot}^{hA} = 2\mathcal{R}e \int 1 - \prod_{j=1}^A \left[1 - \int a_j(\vec{b} - \vec{b}_j) \rho_j(\vec{r}_j) d^3 r_j \right] d^2 b$$

súčet účinných prierezov pre elastický a kvázi-elastický môžeme vypočítať zo vzťahu

$$\sigma_{ela}^{hA} + \sigma_{qel}^{hA} = \int d^2 b \left| 1 - \prod_{j=1}^A \left[1 - a_j(\vec{b} - \vec{s}_j) \right] \right|^2 \times \left(\prod_{j=1}^A \rho_j(\vec{r}_j) d^3 r_j \right)$$

a účinný prierez pre produkciu častíc je potom daný

$$\sigma_{prod} = \sigma_{tot} - \sigma_{ela} - \sigma_{qel}.$$



Obrázok 3.1: Neurčitosť extrapolácie produkčného účinného prierezu protón-vzduch (σ_{prod}^{p-air}) z hodnôt energií prístupných na urýchľovačoch (Tevatron, LHC) až do energií kozmického žiarenia. Obrázok je prebratý z [35].

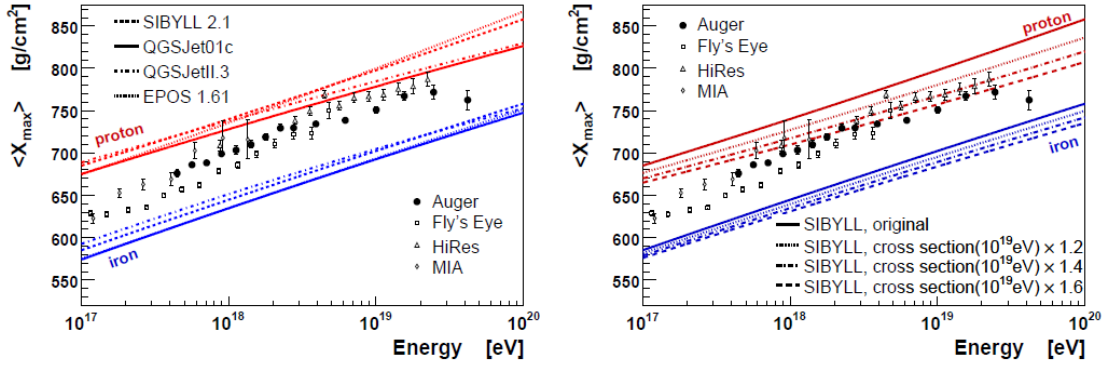
Na obrázku 3.1 sú znázornené extrapolácie σ_{prod}^{p-air} pomocou jednotlivých modelov, vykreslená plocha udáva neurčitosť týchto aproximácií. Pri energiách 10^{18} eV je jasne vidieť, že neistota je výrazne väčšia ako sú rozdiely medzi modelmi a pri 10^{19} eV

¹Zrážkový parameter (z ang. impact parameter) \vec{b} je definovaný ako kolmá vzdialenosť medzi smerom projektilu a stredom potenciálového poľa $U(r)$ tvoreného objektom, ku ktorému sa projektil približuje. Zrážkový parameter \vec{b} má priamu súvislosť s úhľom rozptylu Θ .

dosahuje relatívna neurčitost až 50 %. Účinný prierez pre produkciu častíc je veľmi dôležitá veličina, ktorá určuje interakčnú dĺžku, čo sa prejaví na X_{max} , ale má aj úzky súvis s rýchlosťou rozvoja spršky. Dopad pri zmene účinného prierezu je zrejmy z obrázku 3.2. Použitý faktor má tvar $f(E) = 1 + (f_{19} - 1)F(E)$ a

$$F(E) = \begin{cases} 0 & E \leq 1\text{PeV} \\ \frac{\ln(E/1\text{PeV})}{\ln(10\text{EeV}/1\text{PeV})} & E > \text{PeV} \end{cases}$$

kde E je energia projektilu. Použitý prevod má tvar $\sigma^{mod} = \sigma^{orig} f(E, f_{19})$.



Obrázok 3.2: Na ľavej strane sa nachádza porovnanie závislosti X_{max} na energiách z rôznych experimentov s modelovými predpoveďami pre protón a železo. Na ľavej strane sa nachádzajú rovnaké dáta v porovnaní s modelom SIBYLL pri rôznych modifikáciách účinného prierezu. Obrázok je prebratý z [35].

Inelasticitný účinný prierez pre protón-protón zrážky je v merítke veľkého záujmu v časticovej fyzike a venuje sa mu veľká pozornosť pri urýchľovačových experimentoch, ale aj pri meraní kozmického žiarenia. Určenie účinného prierezu je problematické, pretože v dnešnej dobe neexistuje konzistentná teória, z ktorej by sa dal vypočítať. Doteraz boli výsledky najenergetickejších meraní prístupné z Fermilabu pri² $\sqrt{s} = 1,8$ TeV. Situácia v určení účinného prierezu pri protón-antiprotónových zrážkach bola ale nepríjemná a jednotlivé hodnoty sa od seba líšili až o 10 %. Konkrétne [24] $\sigma_{p-\bar{p}}^{inela} = 71,71 \pm 2,02$ mb pri experimente E-811, $\sigma_{p-\bar{p}}^{inela} = 72,8 \pm 3,1$ mb pre E-710 a $\sigma_{p-\bar{p}}^{inela} = 80,03 \pm 2,24$ mb v meraniach experimentu CDF, z ktorého boli dáta prebrané do programu CORSIKA. Vyriešiť tieto nezrovnalosti má za úlohu práve LHC. Prvé merania inelasticitného účinného prierezu pri protón-protónových zrážkach s $\sqrt{s} = 7$ TeV prebehli na detektore ATLAS v CERNe [2]. Finálny výsledok, ktorý je možné porovnávať s predchádzajúcimi experimentami (teda po extrapolácii do plného kinematického rozsahu) bol stanovený na $\sigma_{p-p}^{inela} = 69,4 \pm 2,4(\text{exp.}) \pm 6,9(\text{extr.})$ mb. Tento účinný prierez je nižší, ako predpovedajú používané modely, ktoré zatiaľ stále počítajú s výsledkami z CDF³. Už v minulosti (keď boli dostupné len dáta z

²Center of mass energy-ťažisková energia je invariantná veličina. V prípade n častíc s hmotnosťami m_1, m_2, \dots, m_n a energiami E_1, E_2, \dots, E_n môže byť ťažisková energia vyjadrená v Lorentzovsky-invariantnom tvare $\sqrt{s} = \sqrt{(E_1 + E_2 + \dots + E_n)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n)^2}$.

³Predbežné výsledky z experimentu ALICA prezentované 17.6.2011 sú pre $\sqrt{s}=7$ TeV $\sigma_{p-p}^{inela} = 72,7 \pm 6,2$ mb.

Fermilabu) nastali pochybnosti o správnosti týchto údajov a tak vznikli simulácie, ktoré by účinný prierez znížili. Napríklad v [24] boli uskutočnené tri modifikácie pôvodného QGSJETu. Po znížení účinného prierezu, zvýšení multiplicity a znížení priemernej priecnej hybnosti $\langle p_{\perp} \rangle$ sa ukázala najlepšia zhoda s experimentálnymi dátami. Konkrétne bola pozorovaná najväčšia redukcia chyby medzi pozorovanou strednou logaritmickou hmotnosťou⁴ $\langle \ln A \rangle$ medzi experimentami, ktoré merajú distribúciu častíc na zemi a tými, ktoré pozorujú X_{max} .

3.2 Multiplicita, elasticita a π nábojový pomer

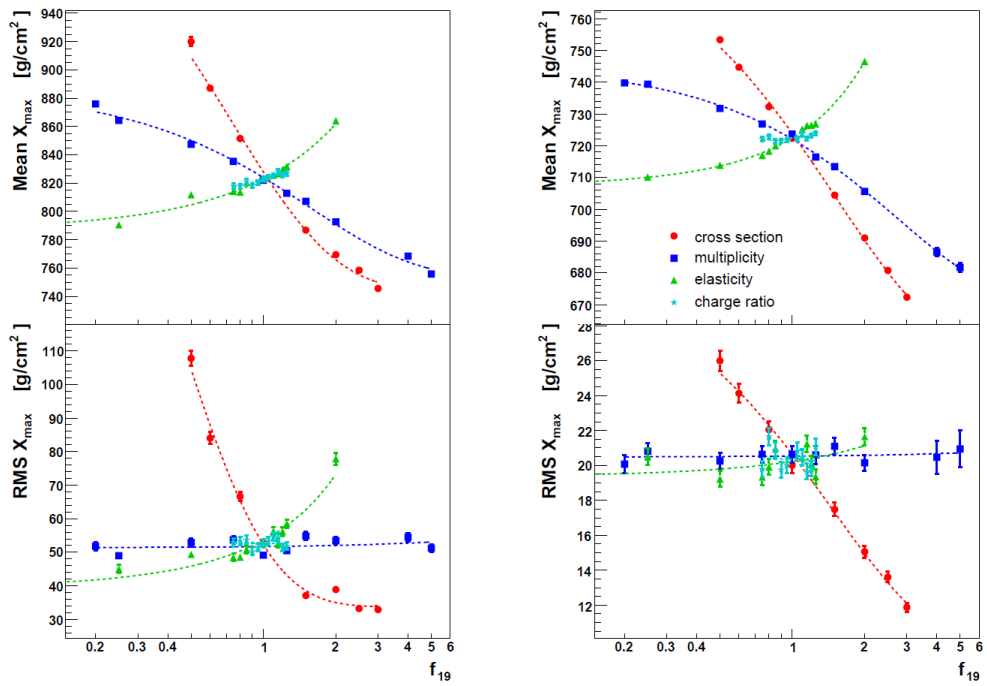
Sekundárna multiplicita n_{mult} je definovaná ako celkový počet sekundárnych častíc vyprodukovaných pri hadrónovej zrážke. Elasticita sa rovná podielu energií v laboratórnej sústave $k_{ela} = E_{leading}/E_{tot}$, kde $E_{leading}$ je energia počiatkovej častice po zrážke a E_{tot} je celková energia projektilu. Piónový nábojový pomer $c = n_{\pi^0}/(n_{\pi^0} + n_{\pi^+} + n_{\pi^-})$, kde n_{π^x} je počet piónov typu π^x , udáva zlomok častíc prechádzajúcich do elektromagnetickej komponenty po každej interakcii. Predpokladá sa, že π^0 sa rozpadáva výhradne na 2γ . Pre štúdium modifikácií týchto veličín bola ich pôvodná hodnota vynásobená faktorom $f(E, f_{19})$, rovnako ako pri účinnom priereze. Aký dopad majú všetky popisované parametre na hodnotu X_{max} a $RMS(X_{max})$ je viditeľné na obrázku 3.3, rozdiely pri počte miónov sú na obrázku 3.4. Konkrétne boli volené primárne častice protóny, alebo železá o energii $10^{19.5}$ eV a každý bod v grafoch 3.3 a 3.4 odpovedá priemeru z 1000 generovaných spŕšiek. Čiary spájajúce tieto body sú len ilustratívne a nemajú fyzikálny význam. Bol použitý model SIBYLL 2.1, ale pri porovnaní rovnakých simulácií s modelmi QGSJET II.3, EPOS 1.6 a QGSJET01c sa neprejavili žiadne významné odlišnosti v trende jednotlivých veličín. Pre jednoduchosť sa predpokladá, že až do 10^{15} eV je priebeh interakcií presne známy a chyby vznikajú až pri extrapolácií do vyšších energií.

3.3 Diskusia

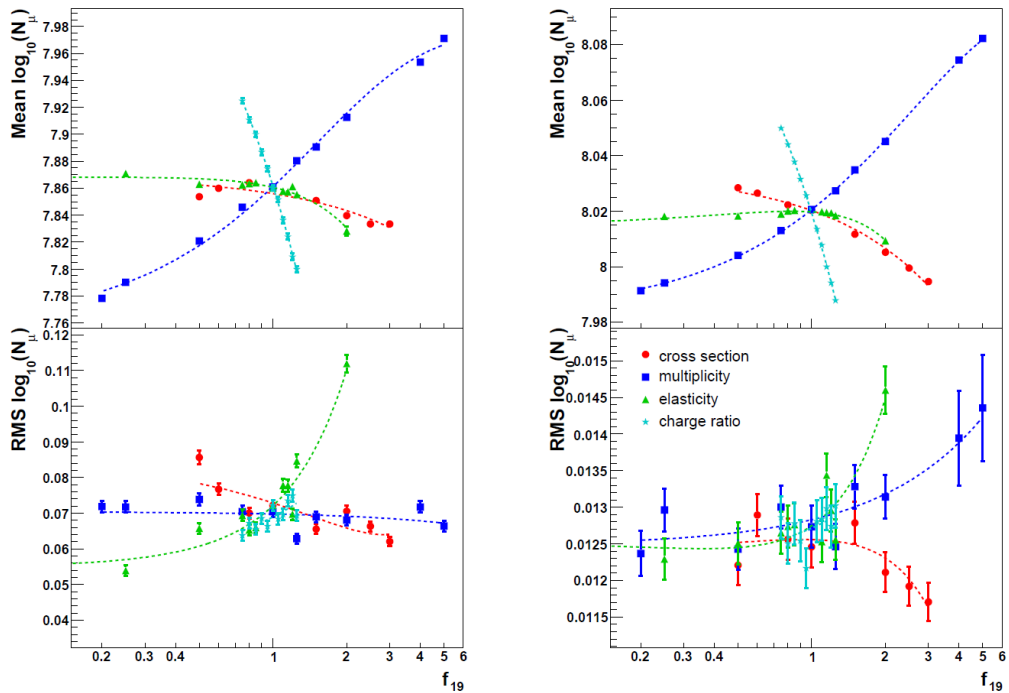
Najvýznamnejší vplyv na X_{max} a teda aj $RMS(X_{max})$ je jasne viditeľný u účinného prierezu, elasticita sa prejavuje ako menej rozhodujúca. To implikuje, že fluktuácia X_{max} je dobrý parameter pre štúdium hadrónových účinných prierezov pri veľmi vysokých energiách. Nárast počtu miónov sa dá doceliť vzrastom multiplicity, alebo poklesom piónového nábojového pomeru. Zvýšiť počet miónov o viac ako 30 % však pomocou modifikácie týchto parametrov nevyzerá reálne. Je zrejmé, že pre určenie chemického zloženia primárnych častíc sú potrebné ďalšie nezávislé informácie.

Nové svetlo do oblasti kozmického žiarenia by mohol vrhnúť experiment LHCf v CERNe. Detektory LHCf sú umiestnené 140 metrov po oboch stranách od stredu

⁴Chemické zloženie kozmického žiarenia sa dá charakterizovať pomocou strednej logaritmickej hmotnosti $\langle \ln A \rangle = \sum_i r_i \ln A_i$, kde r_i je relatívny pomer nukleónov A_i . Zo znalosti X_{max}^p a X_{max}^{Fe} zo simulácií a nameranej hodnoty X_{max}^{exp} , sa dá spočítať $\ln A = \frac{X_{max}^{exp} - X_{max}^p}{X_{max}^{Fe} - X_{max}^p} \ln A_{Fe}$.

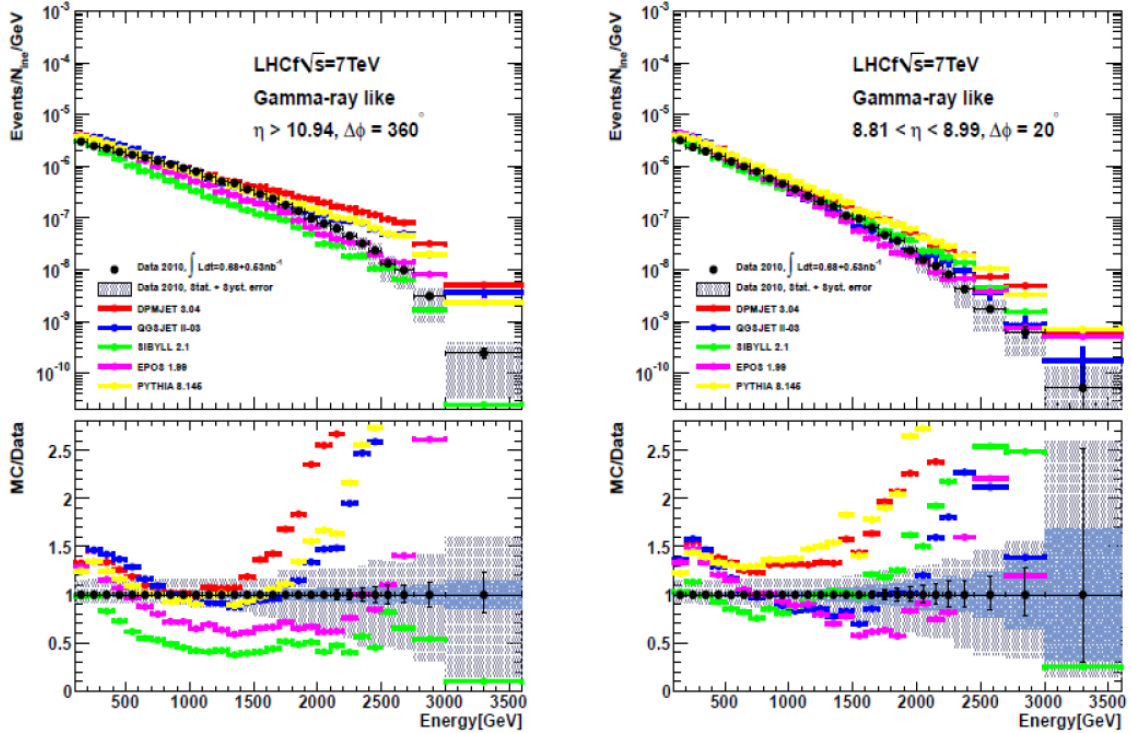


Obrázok 3.3: Vplyv zmeny účinného prierezu, multiplicity, elasticity a nábojového pomeru na X_{max} a $RMS(X_{max})$ pre protón (vľavo) a železo (vpravo). Obrázok je publikovaný v [36].



Obrázok 3.4: Vplyv zmeny účinného prierezu, multiplicity, elasticity a nábojového pomeru na počet miónov N_{μ} pre protón (vľavo) a železo (vpravo). Obrázok je publikovaný v [36].

interakčného bodu ATLASu. LHCf sa venuje štúdiu sekundárnych častíc emitovaných pri veľmi malých úhloch pri protón-protónových zrážkach. Situácia by mala byť podobná vstupu kozmickej častice do atmosféry s energiou $2,5 \cdot 10^{16}$ eV. Hlavný úmysel spočíva v presnení súčasných modelov používaných k rekonštrukciám spršok kozmického žiarenia. Podľa doterajších výsledkov je skutočne potrebné uskutočniť v modeloch zmeny, pretože ani jeden nie je schopný uspokojivo popísať namerané dáta. Na obrázku 3.5 sú nedávne výsledky skupiny LHCf. Do testov zahrnuli okrem



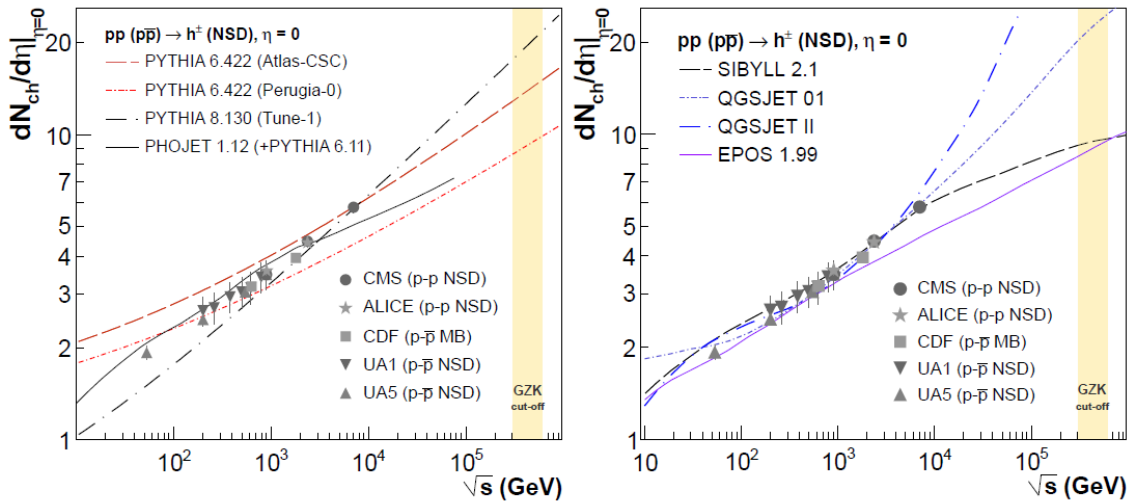
Obrázok 3.5: Porovnanie nameraného fotónového energetického spektra s rôznymi Monte Carlo modelmi. Obrázok je prebratý z prezentácie profesora Takashi Sako (Nagoya University) s názvom "Prvé LHCf merania fotónového spektra pri zrážkach $\sqrt{s} = 7$ TeV p-p a pseudorapidite > 8.8 v LHC" dňa 17.5.2011 na CERNskom seminári, prezentácia je prístupná na [31].

modelov z CORSIKY: DPMJET 3, QGSJET II, SiBYLL 2.1, EPOS 1.99 aj model PYTHIA 8, ktorý je rozšírený hlavne pri analýze výsledkov z urýchľovačov. Dáta boli nazbierané pri rovnakej hodnote energie $\sqrt{s} = 7$ TeV a dvoch rôznych hodnotách pseudorapidity⁵. Pre $\eta > 10,94$ je pozorovaná dobrá zhoda dát s modelmi DPMJET, QGSJET a PYTHIA v rozmedzí 0,5-1,5 TeV. Modely SYBILL a EPOS tak dobrú zhodu síce neukazujú, ale pri energiách nad 1,5 TeV nedosahujú tak výrazných rozdielov. Pre $8,81 < \eta < 8,99$ sú celkové odchylky dát od modelov menšie, no pri energiách nad 2 TeV už sú rozdiely veľmi výrazné. Z týchto výsledkov je zrejmé, že Monte Carlo modely by mali prejsť zmenami už v nižších energiách, teda predpoklad, že chyby vznikajú až pri extrapoláciach do vysokých energií nie je úplne presný.

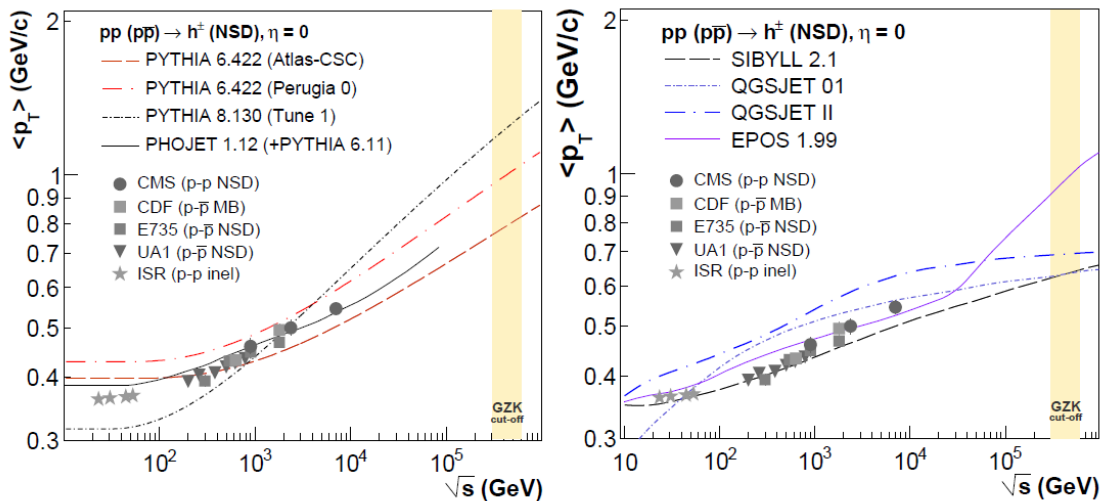
⁵Pseudorapidita je veličina používaná vo vysokoenergetickej časticovej fyzike, vyjadruje sa ako $\eta = -\ln(\tan \frac{\Theta}{2})$ kde $\cos(\Theta) = \frac{\vec{p}_z}{\vec{p}}$ a teda pri $\Theta = 90^\circ$ je $\eta = 0$ a pri $\Theta = 0$ platí $\eta \rightarrow \infty$.

Posledné merania v LHC s $\sqrt{s} = 7$ TeV po prvý krát umožnili premerať oblasť okolo kolena ($10^{15,5}$ eV) na urýchľovači. Doterajšie výsledky významne podporujú klasickú interpretáciu, že ide o prechod v zložení z ľahkých častíc na ťažšie. Teda sa jedná o charakteristickú črtu spektra kozmického žiarenia a nedochádza v oblasti $\sqrt{2}$ TeV k zásadnej zmene hadrónových interakcií. Doteraz boli síce oficiálne publikované dáta len z centrálnych LHC detektorov, ktoré pokrývajú len malú časť energie prispievajúcej ku koncovým stavom častíc. Je však rozumne ťažko predstaviť, že by k tak markantnej zmene správania interakcií dochádzalo len v okolí osi zväzku. Viac pravdepodobné je štandardné vysvetlenie, že do spektra započítame ťažšie jadrá, ktoré vedú k transformácii väčšej časti energie do nedetekovaných častíc v hadrónových interakciách. Pri testoch hadrónovej produkcie nabitých častíc [15] boli medzi skúmané modely vyvinuté špeciálne pre kozmické žiarenie zahrnuté opäť aj typické urýchľovačové modely PYTHIA a PHOJET. Pri porovnávaní centrálnej hustoty pseudorapidity $dN_{ch}/d\eta|_{\eta=0}$, pravdepodobnosti multiplicity $P(N_{ch})$ a strednej pričnej hybnosti $\langle p_{\perp} \rangle$ sa ukázalo, že žiadny z modelov nie je schopný konzistentne popísať namerané dáta. Prekvapivo výsledky porovnania udávajú lepšiu zhodu s modelmi kozmického žiarenia pri $dN_{ch}/d\eta|_{\eta=0}$ na obrázku 3.6 a pri nižších energiách $P(N_{ch})$ ako väčšina vylepšených verzií PYTHIA. Na obrázku 3.7 je znázornená závislosť strednej pričnej hybnosti nabitých hadrónov zmeraných na viacerých experimentoch spolu s predpoveďami simulačných modelov. Táto veličina je citlivým merítkom dynamiky interakcií, najväčšiu zhodu je možné pozorovať pri PHOJETe a EPOSe.

Testovanie modelov simulujúcich spršky kozmického žiarenia pri energiách LHC je veľmi dôležitý krok k ich presnejšiemu nastaveniu. Z doterajších výsledkov vyplýva, že jednotlivé modely musia prejsť zmenami, ale žiaden sa neprejavil natoľko neakceptovateľne, aby sa po vylepšení prestal uvažovať v ďalšej analýze. S veľkými očakávaniami sa bude sledovať vývoj situácie pri $\sqrt{s} = 14$ TeV, plánovanej v najbližších rokoch v LHC. Pri správnej interpretácii meraní na Pierre Auger by nastávala možnosť študovať účinné prierezy až pri energiách $\sqrt{s} \sim 450$ TeV!



Obrázok 3.6: Centrálna hustota pseudorapidit nabitých častíc $dN_{ch}/d\eta|_{\eta=0}$ v $p-p$ a $p-\bar{p}$ zrážkach pre NSD (z ang. non-single diffractive) v závislosti na ťažiskovej energii \sqrt{s} z rôznych experimentov v porovnaní s Monte Carlo simuláciami. Na ľavej strane sú vyobrazené najpoužívanéjšie modely v urýchľovačovej fyzike, na pravej strane sú typické modely kozmického žiarenia. Obrázok je prebratý z [15].



Obrázok 3.7: Stredná hodnota p_{\perp} nabitých častíc pri strednej hustote pseudorapidit v $p-p$ a $p-\bar{p}$ zrážkach pre NSD (z ang. non-single diffractive) a MB (minimum bias) v závislosti na ťažiskovej energii \sqrt{s} z rôznych experimentov v porovnaní s Monte Carlo simuláciami. Na ľavej strane sú vyobrazené najpoužívanéjšie modely v urýchľovačovej fyzike, na pravej strane sú typické modely kozmického žiarenia. Obrázok je prebratý z [15].

Záver

Táto práca poskytuje v základných rysoch ucelený pohľad na súčasnú situáciu v obore kozmického žiarenia. Špeciálna pozornosť je venovaná observatóriu Pierre Auger v Argentíne, jedinečnému experimentu čo do veľkosti, ako aj šírky medzinárodnej spolupráce. Prvý krát bola na skúmanie kozmických častíc použitá hybridná detekcia, teda kombinácia povrchových a fluorescenčných detektorov. Zhrnuté sú doterajšie namerané výsledky o kozmických časticiach najvyšších energií, ktoré nám observatórium Pierre Auger poskytlo. Stručne je popísaná história objavovania kozmického žiarenia a iné experimenty pôsobiace v tomto vednom odbore.

Pri štúdiu vlastností kozmických častíc vychádzame zo skúmania atmosferických spršiek, ktoré pri prilete iniciujú. Zrekonštruovať priebeh spršky z obrovského množstva sekundárnych častíc dopadajúcich na zem je neľahká úloha. S akými úskaliami sa pri tom vedci stretávajú, je v práci zjednodušene popísané. Hlavný záujem smeruje k simulačnému Monte Carlo programu CORSIKA. Ukazuje sa, že problém veľkého počtu pozorovaných miónov sa nedá jednoducho vysvetliť zmenou niekoľkých parametrov v hadrónových modeloch.

Spektrum kozmického žiarenia výrazne poklesne v oblasti energií 30 EeV, čo odpovedá GZK hranici. Anizotropné rozdelenie priletu častíc sa so zväčšujúcim počtom nameraných vysoko kvalitných eventov nezdá byť už tak jasná, ako tomu bolo v minulosti. Veľká pozornosť pri hľadaní zdrojov sa sústreďuje na blízku galaxiu Centaurus A. Kľúčovým momentom pre astročasticovú fyziku by bolo určenie chemického zloženia kozmických častíc. Je to základným predpokladom pre odhalenie zdrojov, mechanizmu akcelerácie, ako aj propagácie vo vesmíre.

Pri meraniach na LHC bolo po prvý krát možné premerať na urychľovači energie odpovedajúce kolenu. S veľkou pravdepodobnosťou je možné potvrdiť, že sa jedná o charakteristickú črtu spektra kozmického žiarenia. Rovnako sú výsledky z LHC zásadným testom vysokoenergetických hadrónových modelov. Účinný prierez sa z výsledkov experimentu ATLAS javí byť nižší, než sa očakávalo. To sa premietne do vyššieho X_{max} , s čím sa rúca predstava o čisto protónovom zložení najenergetickejších kozmických častíc. Pre vyvodenie definitívnych záverov je však potrebná korekcia hadrónových modelov, pretože ani jeden nie je schopný uspokojivo popísať namerané dáta. V LHC sa ukázalo, že nie za všetkými nezrovnalosťami sa dá hľadať chyba v extrapolácii do najvyšších energií, pretože nesúladi sa prejavil už skôr.

Zoznam použitých zdrojov

- [1] E.J. Ahn, R. Engel, T.K. Gaisser, P. Lipari, and T. Stanev. Cosmic ray event generator sibyll 2.1. *arXiv:0906.4113*, 2009.
- [2] ATLAS Collaboration. Measurement of the inelastic pp cross section at $\sqrt{s} = 7$ tev with the atlas detector. *CERN-PH-EP-2011-047*, 2011.
- [3] The Pierre Auger Collaboration. Correlation of the Highest-Energy Cosmic Rays with Nearby Extragalactic Objects. *Science*, 318:938.
- [4] The Pierre Auger Collaboration. Auger Collaboration. *Nucl. Instr. Meth. A*, 523:50–95, 2004.
- [5] The Pierre Auger Collaboration. Monocular measurement of the spectrum of UHE cosmic rays by the FADC detector of the HiRes experiment. *Astroparticle Physics*, 23(2):157–174, 2005.
- [6] The Pierre Auger Collaboration. First observation of the Greisen-Zatsepin-Kuzmin suppression. *Physical review letters*, 100(10):101101, 2008.
- [7] The Pierre Auger Collaboration. Measurement of the flux of ultra high energy cosmic rays by the stereo technique. *Astroparticle Physics*, 32(1):53–60, 2009.
- [8] The Pierre Auger Collaboration. The exposure of the hybrid detector of the Pierre Auger Observatory. *Astroparticle Physics*, 2010.
- [9] The Pierre Auger Collaboration. The fluorescence detector of the Pierre Auger Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 620(2-3):227–251, 2010.
- [10] The Pierre Auger Collaboration. Trigger and aperture of the surface detector array of the Pierre Auger Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 613(1):29–39, 2010.
- [11] The Pierre Auger Collaboration. Update on the correlation of the highest energy cosmic rays with nearby extragalactic matter. *Astroparticle Physics*, 2010.
- [12] J.W. Cronin. Cosmic rays: the most energetic particles in the universe. *Reviews of Modern Physics*, 71(2):165–172, 1999.

- [13] J.W. Cronin. The highest-energy cosmic rays. *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements*, 138:465–491, 2005.
- [14] J.W. Cronin et al. The Pierre Auger Project Design Report. *available at: Auger website www.auger.org*, 1995.
- [15] D. d’Enterria, R. Engel, T. Pierog, S. Ostapchenko, and K. Werner. Constraints from the first lhc data on hadronic event generators for ultra-high energy cosmic-ray physics. *arXiv:1101.5596*, 2011.
- [16] R. Engel. Test of hadronic interaction models with data from the pierre auger observatory. *arXiv:0706.1921*, 2007.
- [17] R. Engel et al. The Pierre Auger Observatory-Recent Results and Plans. *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements*, 196:57–66, 2009.
- [18] E. Fermi. On the origin of the cosmic radiation. *Physical Review*, 75(8):1169, 1949.
- [19] A.V. Glushkov, I.T. Makarov, M.I. Pravdin, I.E. Slepsov, D.S. Gorbunov, G.I. Rubtsov, and S.V. Troitsky. Muon content of ultrahigh-energy air showers: Yakutsk data versus simulations. *JETP Letters*, 87(4):190–194, 2008.
- [20] K. Greisen. End to the cosmic-ray spectrum? *Physical Review Letters*, 16(17):748–750, 1966.
- [21] J. Grygar and R. Šmída. Door meten tot weten. *Československý časopis pro fyziku*, 58(2):116, 2008.
- [22] A. Haungs, H. Rebel, and M. Roth. Energy spectrum and mass composition of high-energy cosmic rays. *Reports on Progress in Physics*, 66:1145, 2003.
- [23] A.M. Hillas. The origin of ultra-high-energy cosmic rays. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 22:425–444, 1984.
- [24] J.R. Hörandel. On total inelastic cross sections and the average depth of the maximum of extensive air showers. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 29:2439, 2003.
- [25] M. Nagano and A.A. Watson. Observations and implications of the ultrahigh-energy cosmic rays. *Reviews of Modern Physics*, 72(3):689, 2000.
- [26] K. Nakamura and others (Particle Data Group). Review of particle physics. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 37:075021, 2010.
- [27] S. Ostapchenko. Air shower calculations with qgsjet-ii: effects of pomeron loops. *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements*, 196:90–93, 2009.
- [28] T. Pierog, I. Karpenko, S. Porteboeuf, and K. Werner. New developments of epos 2. *arXiv:1011.3748*, 2010.
- [29] R.J. Protheroe. Acceleration and interaction of ultra high energy cosmic rays. *Arxiv preprint astro-ph/9812055*, 1998.

- [30] M. Prouza and R. Šmída. The galactic magnetic field and propagation of ultra-high energy cosmic rays. *Arxiv preprint astro-ph/0307165*, 2003.
- [31] T. Sako. First LHCf measurement of photon spectra at $|\eta| > 8.8$ in LHC at $\sqrt{s} = 7$ TeV collision. <https://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=137111>, 2011.
- [32] R. Šmída. Cosmic-ray physics with the pierre auger observatory. *Charles University, PhD. thesis, available at: http://www-hep2.fzu.cz/smida/www/dizertace-smida.pdf*, 2009.
- [33] R. Šmída and M. Prouza. Novinky ze světa nejvyšších energií. *Vesmír*, 87(8), 2008.
- [34] P. Trávníček and J. Řídký. Detection of high-energy muons in cosmic-ray showers. *Charles University, PhD. thesis, available at: www-hep2.fzu.cz/travnick/thesis.ps.gz*.
- [35] R. Ulrich, R. Engel, S. Müller, F. Schüssler, and M. Unger. Proton-air cross section and extensive air showers. *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements*, 196:335–340, 2009.
- [36] R. Ulrich, R. Engel, and M. Unger. Hadronic multiparticle production at ultrahigh energies and extensive air showers. *Physical Review D*, 83(5):054026, 2011.
- [37] M.P. Véron-Cetty and P. Véron. Quasars and Active Galactic Nuclei. *VizieR Online Data Catalog*, 7248:0–1, 2006.
- [38] J. Vícha. Aspects of energy calibration of cosmic ray showers detected by surface detector at the Pierre Auger Observatory. *Czech Technical University in Prague, FNSPE, Diploma thesis, available at: bazille.fjfi.cvut.cz/ejf/publications/DP_Jakub_Vicha.pdf*, 2008.
- [39] G.T. Zatsepin and V.A. Kuz’Min. Upper limit of the spectrum of cosmic rays. *JETP Lett.(USSR)(Engl. Transl.)*, 4, 1966.
- [40] D. Zavrtanik et al. Results from the Pierre Auger Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010.