

**MASARYKOVA UNIVERZITA**  
**PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA**  
ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY

# **Diplomová práce**

**BRNO 2015**

**BC. JAROSLAVA KOČKOVÁ**



**MASARYKOVA UNIVERZITA**  
**PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA**  
ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY

---



# **Atmosferické částicové spršky**

Diplomová práce

**Bc. Jaroslava Kocková**

**Vedoucí práce: Mgr. Filip Hroch, Ph.D. Brno 2015**

# Bibliografický záznam

**Autor:** Bc. Jaroslava Kocková  
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita  
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

**Název práce:** Atmosferické částicové spršky

**Studijní program:** Fyzika

**Studijní obor:** Teoretická fyzika a astrofyzika

**Vedoucí práce:** Mgr. Filip Hroch, Ph.D.

**Akademický rok:** 2014/2015

**Počet stran:** xi + 43

**Klíčová slova:** atmosferické částicové spršky; kosmické záření; fyzika vysokých energií;  
Pierre Auger; CZELTA

# Bibliografický záznam

<b>Autor:</b>	Bc. Jaroslava Kocková Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita Ústav teoretické fyziky a astrofyziky
<b>Názov práce:</b>	Atmosférické časticové spřšky
<b>Študijný program:</b>	Fyzika
<b>Študijný odbor:</b>	Teoretická fyzika a astrofyzika
<b>Vedúci práce:</b>	Mgr. Filip Hroch, Ph.D.
<b>Akademický rok:</b>	2014/2015
<b>Počet strán:</b>	xi + 43
<b>Kľúčové slová:</b>	atmosférické časticové spřšky; kozmické žiarenie; fyzika vysokých energií; Pierre Auger; CZELTA

# Bibliographic Entry

**Author:** Bc. Jaroslava Kocková  
Faculty of Science, Masaryk University  
Department of Theoretical Physics and Astrophysics

**Title of Thesis:** Atmospheric Particle Showers

**Degree Programme:** Physics

**Field of Study:** Theoretical Physics and Astrophysics

**Supervisor:** Mgr. Filip Hroch, Ph.D.

**Academic Year:** 2014/2015

**Number of Pages:** xi + 43

**Keywords:** extensive air showers; cosmic rays; high energy physics; Pierre Auger; CZELTA

# Abstrakt

V této diplomové práci se věnujeme kosmickému záření, popisu jeho vlastností a vysvětlení jeho možného vzniku. Dále se zabýváme atmosférickými částicovými sprškami, vznikajícími při interakci vysokoenergetických částic při průchodu zemskou atmosférou. Uvádíme stručný přehled projektů, které zaměřují svou pozornost právě na studium kosmického záření. Zvýšenou pozornost věnujeme projektu CZELTA, na kterém se podílí i Masarykova univerzita. Cílem této práce je proto zpracování údajů poskytnutých detektory umístěnými v areálu Přírodovědecké fakulty.

# Abstrakt

V tejto diplomovej práci sa venujeme kozmickému žiareniu, popisu jeho vlastností a vysvetleniu jeho možného vzniku. Ďalej sa zaoberáme atmosférickými časticovými sprškami, vznikajúcimi pri interakcii vysokoenergetických častíc pri prechode so zemskou atmosférou. Uvádzame stručný prehľad projektov, ktoré zameriavajú svoju pozornosť práve na štúdium kozmického žiarenia. Zvýšenú pozornosť venujeme projektu CZELTA, na ktorom sa podieľa i Masarykova univerzita. Cieľom tejto práce je preto spracovanie údajov poskytnutých detektormi umiestnenými v areáli Přírodovedeckej fakulty.

# Abstract

In this thesis we study cosmic rays, it's characteristics and possible explanation of it's origin. We concern with extensive air showers which are generated by interaction of high energy particles with the Earth's atmosphere. We present a short overview of projects which aim is to study cosmic rays. We pay special attention on project CZELTA involving Masaryk University. The goal of this work therefore is to process the data provided by the detectors located in the area of the Faculty of Science.



**Masarykova univerzita**  
**Přírodovědecká fakulta**



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

**Student** : **Bc. Jaroslava Kocková, učo 357513**  
**Studijní program** : **Fyzika**  
**Studijní obor** : **Teoretická fyzika a astrofyzika**

Ředitel Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky PŘF MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje diplomovou práci s tématem:

### Atmosferické částicové spršky

#### Atmospheric Particle Showers

**Zásady pro vypracování:** Vysokoenergetické částice pronikající z vesmíru do zemské atmosféry dávají vzniknout, po interakci s okolními částicemi, atmosferické částicové spršce. Produkty této spršky mohou být relativně snadno detekovány a vyhodnocovány s použitím moderních technologií. Jejich využití pro případné pozorování astronomických objektů ovšem vyžaduje hlubší fyzikální pochopení a interpretaci.

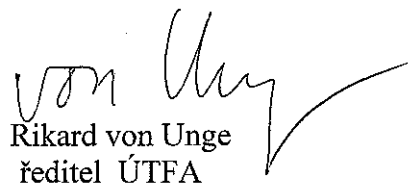
V průběhu roku 2012 byl na naší fakultě instalován detektor atmosferických spršek CZELTA. Je vybaven scintilačními detektory sekundárních částic a umožňuje detekovat částice o primárních energiích větších než stovky TeV.

Tato práce by měla být zaměřena na popis, zpracování dat či interpretaci výsledků z tohoto detektoru. Primárním cílem je odborná popularizace tohoto zařízení mezi širokou vědeckou obec.


Práce může být psána jazykem českým, slovenským nebo anglickým.

*Vedoucí diplomové práce* : Mgr. Filip Hroch, Ph.D.  
*Datum zadání diplomové práce* : leden 2013  
*Datum odevzdání diplomové práce* : dle harmonogramu ak. roku 2013/2014

V Brně leden 2013

  
Rikard von Unge  
ředitel ÚTFA

Zadání diplomové práce převzal dne: 14.11.2014

  
Podpis studenta



# Pod'akovanie

Moje veľké ďakujem patrí predovšetkým vedúcemu tejto práce Filipovi, za poskytnuté rady, ochotu, trpezlivosť a čas, ktorý mi venoval vždy, keď som to potrebovala. Jeho optimizmus mi zakaždým dodal nádej, že to dotiahnem do úspešného konca. Ďalej by som chcela poďakovať Adamovi za hektolitre čaju, pretože bez nich by sa mi naozaj ťažko písalo a všetkým blízkym, ktorí mi nikdy neprestali veriť a povzbudzovali ma do boja. Vymenovanie všetkých, ktorým som vďačná, by bolo dlhšie ako samotná práca, preto na záver spomeniem už iba mamku, ktorá vykonala korekciu gramatiky.

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracovala samostatně s využitím informačních zdrojů, které jsou v práci citovány.

Brno 8. decembra 2014

.....  
Bc. Jaroslava Kocková

# Obsah

Úvod .....	xi
<b>Kapitola 1. Základy kozmického žiarenia .....</b>	<b>1</b>
1.1 Pohľad do minulosti .....	1
1.1.1 Fermiho mechanizmus .....	2
1.1.2 GZK limit .....	3
1.2 Čo je to kozmické žiarenie? .....	4
1.3 Energie .....	4
1.4 Exotika a vysoké energie .....	6
1.5 Mechanizmy urýchľovania a Hillasov diagram .....	6
1.6 Chemické zloženie a anizotropia .....	6
1.7 Atmosférické spŕšky .....	9
1.7.1 Elektromagnetická spŕška .....	10
1.7.2 Hadrónová spŕška .....	11
<b>Kapitola 2. Experimenty a detektory .....</b>	<b>12</b>
2.1 Detekčné systémy .....	12
2.1.1 Čerenkovovo žiarenie .....	13
2.1.2 Fluorescencia .....	14
2.2 Prehľad observatórií zaoberajúcich sa výskumom kozmického žiarenia .....	15
2.2.1 Volcano Ranch .....	15
2.2.2 Haverah Park .....	15
2.2.3 Jakutsk .....	15
2.2.4 SUGAR .....	15
2.2.5 AGASA .....	15
2.2.6 Fly's Eye .....	16
2.2.7 HiRes .....	17
2.2.8 CASA-MIA .....	17
2.2.9 Pierre Auger Observatory .....	19
2.2.10 Telescope Array .....	20
<b>Kapitola 3. CZELTA .....</b>	<b>21</b>
3.1 Kompozícia stanice .....	21
3.1.1 Vybavenie na streche .....	21
3.1.2 Určovanie času .....	23
3.1.3 Elektronické vybavenie .....	23

3.2	Analýza údajov .....	23
3.2.1	Súradnicové systémy .....	24
3.2.2	Prevody jednotlivých súradníc .....	27
<b>Kapitola 4.</b>	<b>Príklad .....</b>	<b>32</b>
<b>Záver</b>	<b>.....</b>	<b>42</b>
<b>Zoznam použitých zdrojov</b>	<b>.....</b>	<b>43</b>

# Úvod

Pierre Auger Observatory (PAO) je najväčším detektorom, ktorý bol kedy postavený v snahe pátrať po tých najenergetickejších časticách vo vesmíre. S existenciou týchto častíc sa vynára množstvo otázok, na ktoré odpoveď zatiaľ nepoznáme. Odkiaľ pochádzajú? Čo ich urýchľuje na rýchlosti mimoriadne blízke svetlu?

Zdá sa, že kozmické lúče s nižšími energiami, v rádoch  $10^9 - 10^{15}$  eV, vznikajú pri výbuchoch supernov v našej Galaxii. Sú urýchľované magnetickým poľom, ktoré okrem supernov sa nachádza i na Slnku a slnečnom vetre. Žiarenie s energiou vyššou, povedzme  $10^{18}$  eV, sa však týmto procesom vysvetliť nedá. Pravdepodobne má pôvod mimo Galaxie, hlavným znakom, ktorý podporuje tento fakt je, že nie je preferovaný žiadny smer, z ktorého k nám prichádza. Dnes sa domnievame, že zdrojom kozmického žiarenia sú AGN (aktívne galaktické jadrá, Active Galactic Nuclei), jety a horúce škvvrny rádiových galaxií.

Čo však žiarenie s najvyššou detekovanou energiou vôbec? Jeho hodnota bola až  $10^{20}$  eV! Na dosiahnutie takejto ohromnej energie by bolo potrebných 10 miliónov Tevatronov (najväčší urýchľovač častíc)! Pri takýchto enormných hodnotách kozmológovia prichádzajú s hypotetickými objektmi, od kozmických strún až po monopóly. Častice s energiou  $10^{20}$  eV na Zem navyše dopadajú zriedka (respektíve takmer vôbec) – priemerne 1 častica za sto rokov, čo nám sťažuje podmienky pri hľadaní ich zdrojov a podstaty. U častíc s  $E = 10^{18}$  eV, je táto frekvencia o niečo vyššia, na povrch dopadá 1 častica za týždeň. Preto bolo nutné na detekciu vysoko energetického žiarenia skonštruovať naozaj, naozaj veľký detektor.

PAO je pomenovaná podľa Pierrea Victora Augera (1899 – 1993), objaviteľa atmosférických spŕšok. Zaoberal sa atómovou a nukleárnou fyzikou, či fyzikou kozmického žiarenia.

# Kapitola 1

## Základy kozmického žiarenia

### 1.1 Pohľad do minulosti

V roku 1900, francúzsky fyzik Henri Becquerel objavil nestálosť chemických prvkov. Niektoré prvky podliehali premenám na iné a pri tomto procese emitovali do priestoru častice. Dnes vieme, že išlo o jav rádioaktívneho rozpadu látok a vyžarovanie častíc sa nazýva radiáciou. Pozoruhodný bol ďalší efekt spojený s uvedeným úkazom. V prítomnosti rádioaktívnych látok sa elektroskop samovoľne vybíjal a bolo tak možné pomocou neho merať úroveň radiácie. Prekvapivo, elektroskop sa však mierne vybíjal, i keď naň žiadne rádioaktívne látky nepôsobili. Ako to bolo možné? Vysvetlenie prišlo o pár rokov neskôr. [13]

Stalo sa to pred storočím, presnejšie v roku 1912, keď Victor Hess vypustil do atmosféry Zeme balón s cieľom vysvetliť, prečo ionizačné komory na povrchu aj po úplnom zatemnení stále vykazovali radiáciu. Domnieval sa, že radiácia pochádza z povrchu a preto by balón vo veľkej nadmorskej výške mal zaznamenať jej úbytok. Opak bol pravdou. Hodnoty radiácie s výškou narastali a preto sa muselo jednať o radiáciu, ktorá k nám prichádza z vesmíru.

Prvým mužom, ktorému sa podarilo kozmické žiarenie „vidieť“, bol Dimitrij Skobelzyn. V hmlovej komore zachytil v roku 1927 stopy zanechané po jeho prechode komorou.

Keďže existencia kozmického žiarenia bola definitívne potvrdená, vedci si začali klásť otázku z čoho sa vlastne skladá. Robert Millikan sa nazdával, že by mohlo ísť o gama žiarenie prichádzajúce z vesmíru. Pri pokuse s hmlovou komorou v roku 1932 Carl Anderson objavil antielektrón (neskôr nazvaný pozitron) a zistil tak, že toto žiarenie pozostáva prevažne z nabitých častíc. Objav pozitronu a neskôr Sethom Neddermeyerom v roku 1937 i miónu dal vznik časticovej fyzike a podnietil tak ostatných fyzikov k hlbšiemu záujmu o kozmické žiarenie.

Experiment z roku 1938, v ktorom francúzsky fyzik Pierre Auger umiestnil dva časticové detektory v Alpách 200 metrov od seba, zaznamenal príchod častíc v rovnakom čase. Muselo ísť o sekundárne častice, ktoré pochádzali z rovnakého zdroja a pri prechode atmosférou vznikli interakciou molekúl vzduchu s primárnymi vysokoenergetickými časticami. Jednalo sa o tzv. atmosférické časticové spršky s energiami  $10^{15}$  eV. Prítom energie, ktoré dosahovala prirodzená rádioaktivita Zeme či vtedajšie urýchľovače častíc sa pohybovali v ráde MeV. Auger si lámal hlavu, aký mechanizmus mohol byť dostatočne účinný, aby primárne častice urýchlil na tak obrovské energie a usúdil, že by mohli byť výsledkom pôsobenia rozľahlých elektrických polí vo vesmíre. To však dodnes s istotou nevieme povedať.

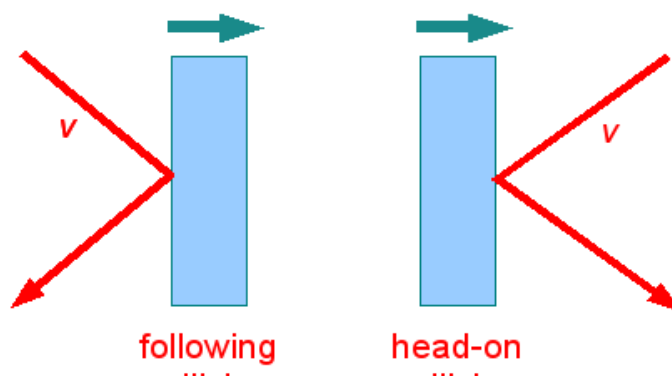
V snahe vysvetliť mnoho záhad, ktoré sa objavovali pri štúdiu kozmického žiarenia sa v roku 1946 rozbehla konštrukcia rozsiahlych polí detektorov na zachytávanie časticových spršok. Uskutočnili ich skupiny vedené v USA Brunom Rossim a Jurijom Zatsepinom v Rusku.

### 1.1.1 Fermiho mechanizmus

V teoretickej oblasti sa skúmaním kozmického žiarenia zaoberal Enrico Fermi. Jeho vysvetlenie urýchľovania častíc z roku 1949 hovorí, že častice, ktoré prekročia energiu  $10^{15}$  eV uniknú z pozostatku zo supernovy, s ktorým boli dovtedy spojené. Nabitá častica väznená v magnetickom poli pozostatku supernovy je urýchľovaná energiou jej rázovej vlny. Častica sa tak pohybuje v smere šírenia vlny. Pretože je však viazaná s okolitým magnetickým poľom, núti ju vrátiť sa späť. Tam je znovu urýchlená energiou z rázu a vytláčaná smerom von. Tento proces sa opakuje dovtedy, kým častica nenadobudne energiu dostatočnú na prekonanie magnetického poľa supernovy. Fermiho mechanizmus tak umožňuje časticiam dosahovať energie vyššie ako  $10^{15}$  eV.

Aké však bolo prekvapenie vedcov, keď v roku 1962 detekovali časticu, ktorej energia dosiahla hodnotu  $10^{20}$  eV! Stalo sa tak v Novom Mexiku vo Volcano Ranch Array Johnovi Linsleymu a jeho spolupracovníkom. Je možné aby Fermiho mechanizmus urýchlil častice na tak obrovské energie?

Pozrime sa na tento problém za pomoci matematiky. Predpokladajme, že častice sú urýchľované prostredníctvom medzihviezdneho mračna, ktorého pohyb je v priestore čisto náhodný. Chovanie mračien môžeme prirovnať k akémusi *magnetickému zrkadlu*, na ktorom sa častice odrážajú tak, ako je to znázornené na obrázku 1.1. [7]



Obr. 1.1: Fermiho urýchľovací proces druhého rádu

Pri každom odraze získa častica priemernú energiu

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle = \frac{8}{3} \left( \frac{v}{c} \right)^2, \quad (1.1)$$

pričom  $v$  a  $c$  sú rýchlosti mraku a častice. Všimnime si, že energia získaná pri procese závisí na rýchlostiach v druhej mocnine. Odtiaľ pochádza pomenovanie mechanizmu ako **Fermiho urýchľovací proces druhého rádu**. Je možné stanoviť i zmenu energie za čas medzi dvomi kolíziami, kde  $L$  označuje strednú voľnú dráhu medzi mračnami pozdĺž magnetických siločiar:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{4}{3} \left( \frac{v^2}{cL} \right) E = \alpha E. \quad (1.2)$$

Za predpokladu rovnovážneho stavu a zavedením veličiny  $\tau_{\text{esc}}$  ako charakteristického času častice nutného na jej zotrvanie v oblasti, kde dochádza k urýchleniu, môžeme pre spektrum energie písať:

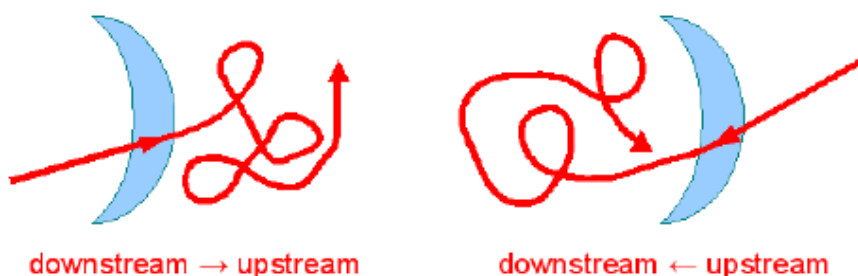
$$N(E)dE = \kappa \cdot E^{1+1/\alpha\tau_{\text{esc}}} dE, \quad (1.3)$$

$\kappa$  je konštanta. Fermiho urýchľovací proces druhého rádu dobre vysvetľuje spektrum v oblasti nižších energií, no smerom k vyšším hodnotám sa ukazuje ako nedostatočný.

Zapíšme priemernú energiu častice po jednom odraze vo forme  $E = \beta E_0$ , kde  $E_0$  je energia pred odrazom. Veličina  $P$  nech je pravdepodobnosť zotrvania častice po odraze v urýchľovanej oblasti, potom po  $n$  odrazoch vznikne  $N = N_0 P^n$  častíc. Ich energia je  $E = \beta^n E_0$ . V tomto prípade možno spektrum zapísať pomocou rovnice:

$$N(E)dE = \kappa \cdot E^{-1+\ln P/\ln \beta} dE = \kappa \cdot E^\xi dE. \quad (1.4)$$

V nasledujúcich krokoch sa budeme snažiť získať prírastok energie v lineárnej závislosti na pomere  $v/c$ , preto sa tomuto postupu hovorí **Fermiho urýchľovací princíp prvého rádu**. V takomto prípade sa ukazuje, že urýchľovací mechanizmus funguje s vyššou efektívnosťou najmä pre vysoké hodnoty rýchlosti  $v$ , ktoré nezriedka dosahujú tisícnásobok rýchlosti medzihviezdneho mračna. Produkujú sa pravdepodobne na šokových vlnách pri výbuchu supernov či v aktívnych jadrách galaxií. Budeme predpokladať, že rozdelenie rýchlostí častíc je izotropné na oboch stranách šokovej vlny. Preto je problém symetrický a nezáleží, či častica prechádza vlnou „zľava“ či „sprava“, vid' obrázok 1.2.



Obr. 1.2: Fermiho urýchľovací proces prvého rádu

V oboch prípadoch je priemerná energia získaná pri prechode vlnou

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle = \frac{4}{3} \left( \frac{v}{c} \right), \quad (1.5)$$

a pravdepodobnosť úniku častice zo šokovej vlny  $P_{\text{esc}} = 1 - P$ :

$$P_{\text{esc}} = \frac{4}{3} \left( \frac{v}{c} \right). \quad (1.6)$$

Dostávame tak žiadúce vyjadrenie, v ktorom energia i pravdepodobnosť závisia na pomere rýchlostí v prvej mocnine. Pre spektrum energie už potom možno jednoducho napísať:

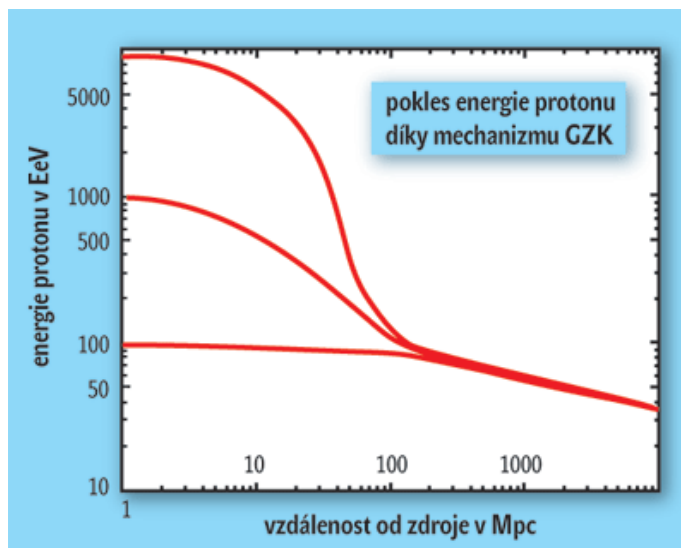
$$N(E)dE = \kappa \cdot E^{-2} dE. \quad (1.7)$$

Všimnime si, že spektrum nie je závislé na neistej hodnote súčinu  $\alpha \tau_{\text{esc}}$ , ako to bolo v prípade Fermiho urýchľovania prvého rádu. Preto sa tento mechanizmus generovania vysokoenergetických častíc javí ako veľmi sľubný.

### 1.1.2 GZK limit

Reliktné žiarenie – pozostatok éry rozpínania vesmíru po Veľkom Tresku, bolo objavené Američanmi Arnom Penziasom a Robertom Wilsonom v roku 1965. Keď vysokoenergetické častice

kozmickeho žiarenia interagujú s reliktným žiarením, zníži sa ich energia. Túto myšlienku rozpracovali nezávisle od seba Kenneth Greisen a Vadem Kuzmin s Georgijom Zatsepinom. Častice strácajú energiu preto nemôžu cestovať vesmírom k nám z príliš veľkých vzdialeností. Preto všetky častice s energiou vyššou ako  $5 \cdot 10^{19}$  eV musia pochádzať z okolia 100 Mpc od Zeme. Nachádzajú sa však v tejto oblasti zdroje, ktoré by mohli byť pôvodcami vysokoenergetických častíc?



Obr. 1.3: Pokles energie častice po interakcii s reliktným žiarením

V snahe zodpovedať túto otázku sa začali konštruovať obrovské detekčné polia, ktoré by zachycovali častice s energiami nad  $10^{20}$  eV. Prvým bol Haverah Park, pole 200 Čerenkovových detektorov. Pokrývalo plochu  $12 \text{ km}^2$  a zaznamenávalo dáta viac ako 20 rokov.

Existuje vôbec nejaký limit, do ktorého môžu energie častíc dosiahnuť? Rekord v najenergetickejšej detekovanej častici zatiaľ drží detektor The Fly's Eye z roku 1991. Hodnota jej energie bola neuveriteľných  $3 \cdot 10^{20}$  eV. Nebola však osamotená, o tri roky neskôr časticu s energiou  $2 \cdot 10^{20}$  eV zaznamenali skupiny vedcov v Japonsku (AGASA) a Rusku (Jakutsk).

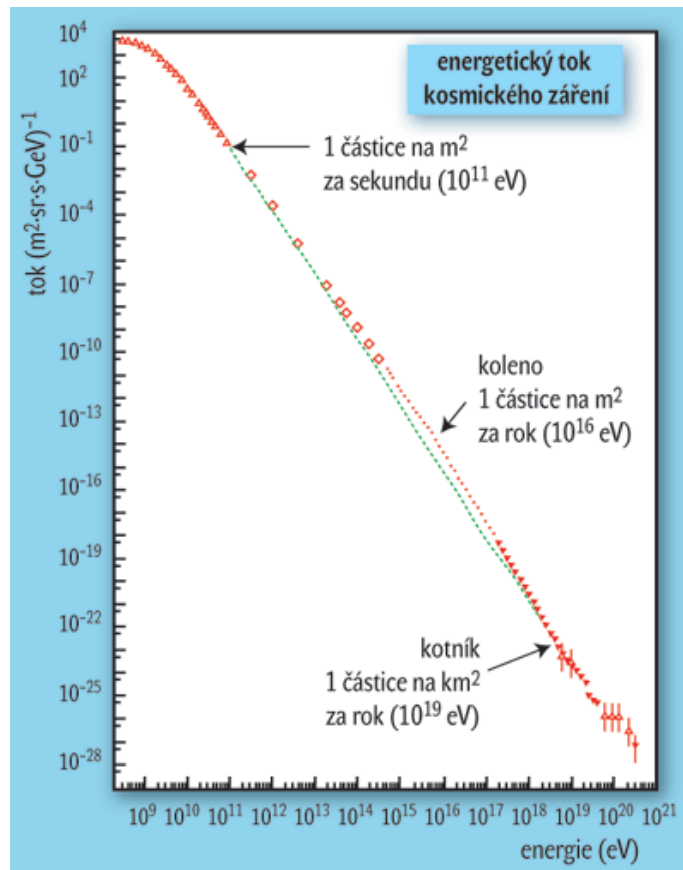
## 1.2 Čo je to kozmické žiarenie?

Kozmickým žiarením označujeme elementárne častice, ktoré k nám prenikajú z vesmíru. Okrem bežných častíc, ako sú protóny či elektróny, môže obsahovať aj exotické mióny,  $\pi$ -mezóny (pióny) či  $\lambda$ -baryóny. Podstatnú časť tvoria aj jadrá hélia, kyslíka, dusíka a uhlíka a fotóny  $\gamma$ -žiarenia.

## 1.3 Energie

Spektrum kozmického žiarenia pokrýva veľmi rozsiahlu oblasť. Zahrňame do neho častice s energiami od 1 GeV až po stovky EeV. Spektrum žiarenia rozumieme závislosť toku žiarenia na jeho energii. Charakteristický preň je graf, ktorý môžeme popísať klesajúcou funkciou, kde tok energie klesá o tri rády na každý rád energie. V praxi to znamená, že kým častice s energiami v ráde GeV dopadajú na Zem po desaťtisícoch na meter štvorcový za sekundu, tie vysokoenergetické s hodnotami energie  $10^{20}$  eV k nám prídu približne jedna za rok na plochu  $100 \text{ km}^2$ .





Obr. 1.4: Spektrum kozmického žiarenia.

Pozrime sa na graf spektra detailnejšie. Vieme, že kozmické žiarenie k nám prichádza z niekoľkých zdrojov. Predovšetkým zo slnka, no nás bude teraz zaujímať žiarenie galaktické. Je pravdepodobné, že častice do energií  $5 \cdot 10^{15}$  eV sú urýchlené magnetickým poľom vybuchujúcich supernov mechanizmom tak ako ho popísal Fermi. Spektrum v tejto oblasti vykazuje exponenciálnu závislosť, kde je sklon krivky daný faktorom  $\xi$ . Tento faktor zostáva konštantný v rozmedzí energií od  $10^{10}$  až  $10^{15}$  eV. Dosahuje tu hodnotu približne 2,7.

Avšak, spektrum sa smerom k vyšším energiám mení. Sklon krivky dosahuje do hodnôt  $10^{18}$  eV úroveň  $\xi = 3,1$ . Spektrum v tejto oblasti nazývame „kolenom“. Čo spôsobuje jeho zmenu nám zatiaľ nie je jasné a vedci doposiaľ tento problém nie sú schopní uspokojivo vysvetliť.

Podobne je to s výkladom spektra smerom k čoraz vyšším energiám. Za hranicou  $10^{18}$  eV sa sklon krivky znovu mierne mení a môžeme ho popísať hodnotou  $\xi = 2,3$ . Zmenu spektra na tomto mieste označujeme ako „členok“. Ako už bolo spomenuté, ani tu presne nevieme, čo stojí na pozadí pozorovaného javu.

Žiarenie za „členkom“ je pre nás takisto veľkou záhadou. Aký mechanizmus je schopný urýchliť častice na energie rádu stoviek EeV? Existuje vôbec nejaký limit týkajúci sa konca spektra? Isté je, že pri energiách presahujúcich  $4 \cdot 10^{19}$  eV klesá tok častíc. Môže byť spôsobený efektom GZK, ale takisto aj nemusí. Mohlo by sa jednať o to, že zdroj vyvolávajúci urýchľovanie častíc smerom k obrovským energiám stráca svoju efektívnosť. Navyše, podmienky na skúmanie nám sťažuje aj malá štatistika pozorovacích údajov.

## 1.4 Exotika a vysoké energie

Výsledky projektu AGASA, ktoré pozorovali nadbytok žiarenia s energiami nad  $4 \cdot 10^{19}$  eV, vyvolali špekulácie o ich pôvode. Musí existovať nejaký iný mechanizmus urýchľovania častíc, ako ten, ktorý navhol Fermi. Dodnes nám nie je jasné, či sú úvahy o rozpade superťažkých častíc správne. Hypotézy hovoria o tom, že sa jedná o topologické defekty v štruktúre časopriestoru či extrémne hmotné pozostatky Veľkého Tresku. Tieto hypotetické častice by mohli pochádzať z temnej hmoty, o ktorej stále mnoho nevieme.

## 1.5 Mechanizmy urýchľovania a Hillasov diagram

Vieme, že väčšina častíc kozmického žiarenia je elektricky nabitá. To znamená, že ich trajektória a rýchlosti sú ovplyvnené vlastnosťami magnetického poľa, ktorým prechádzajú. Aby bolo magnetické pole schopné urýchliť častice na extrémne energie, musí byť toto pole dostatočne silné alebo ohromne rozľahlé. Medzi týmito veličinami platí vzťah, že polomer trajektórie, po ktorej sa deje pohyb častice, musí byť menší ako polomer oblasti, na ktorej častica nadobudne svoju energiu. Tento polomer nazývame Larmorovým polomerom  $R_L$ . Preň platí vzťah:

$$R_L = \frac{E}{qB}. \quad (1.8)$$

Ak je však Larmorov polomer väčší, častica nadobudne dostatočnú energiu na to, aby unikla z magnetického poľa.

Akonáhle častica opúšťa oblasť, v ktorej dochádza k jej urýchleniu, dosiahne najväčšiu možnú hodnotu energie. Častica s nábojom  $q$ , urýchlená v magnetickom poli s indukciou  $B$  a zdrojom jej urýchlenia s veľkosťou  $R$  má maximálnu energiu  $E_{\max} = qBR$ .

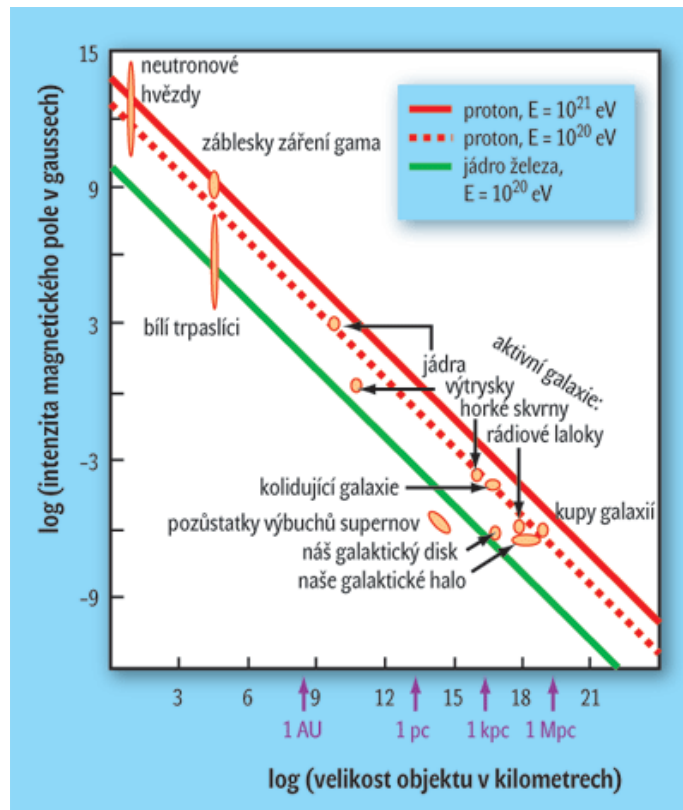
Vynesme si do grafu závislosť intenzity magnetického poľa na veľkosti objektov, o ktorých uvažujeme, že by mohli byť zdrojmi urýchľovacieho mechanizmu častíc kozmického žiarenia. Ostatne, tak to v roku 1984 urobil i britský fyzik Michael Hillas. Na graf vyniesol dané veličiny v logaritmickom merítku a taktiež diagonály pre rôzne hodnoty energie, ktoré maximálne mohla dosiahnuť častica v danom type zdroja. Objekty, ktoré ležia pod touto priamkou už častice na zvolenú energiu urýchliť nedokážu.

Uvažujme teda protón s energiou  $10^{20}$  eV. Z grafu vidíme, že jedinými možnými kandidátmi, ktorí by boli schopní protón urýchliť na tak vysoké energie sú neutrónové hviezdy, AGN a prípadne ešte rádiové laloky v aktívnych galaxiách. Ojedinelým javom, ktorý by stál za úvahu sú kolízie dvoch galaxií, pri ktorých by mohli vznikáť vysoké energie.

Čo sa týka objektov, ktoré by mohli udeliť časticiam energie v ráde  $10^{21}$  eV, tam môžeme o zdrojoch už iba špekulovať a na scénu prichádzajú len spomínané hypotetické superčastice. Navyše, predpokladáme, že mechanizmus urýchľovania v týchto objektoch prebieha so stopercentnou účinnosťou. Samozrejme, realisticky musíme zväziť, že v prírode to takto nefunguje a tak sa nám výpočet vhodných kandidátov drasticky znižuje. Okrem toho, Hillasov diagram je založený na princípe Fermiho mechanizmu a ako je už niekoľkokrát zdôraznené, stále si nie sme istí, či tento jav naozaj funguje. Je možné, že vo vesmíre existujú urýchľujúce mechanizmy, ktoré pracujú s vyššou účinnosťou.

## 1.6 Chemické zloženie a anizotropia

Aby sme vedeli čo – to povedať o chemickom zložení kozmického spektra, budeme ho musieť rozobrať po jednotlivých etapách. To jednoducho z toho dôvodu, že informáciu o ňom nám skresľuje



Obr. 1.5: Hillasov diagram

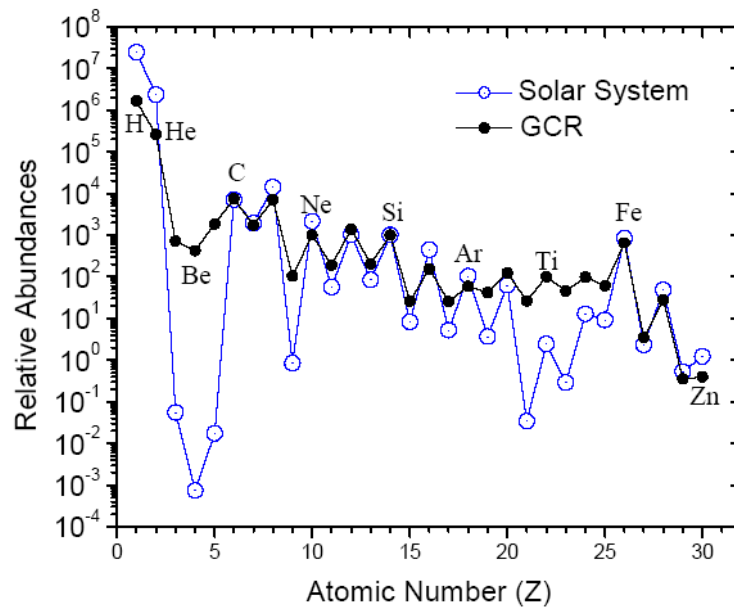
dominancia množstva častíc s nižšími energiami. Asi 90% žiarenia je tvorených jadrami vodíka a hélia, zhruba 9% tvoria ťažšie prvky a len ostatné 1% zahŕňajú pozitrony a elektróny.

Stanovíť z čoho sa skladá žiarenie s energiami pod  $10^{15}$  eV dnes nepredstavuje žiadny problém. Tok častíc je dostatočne silný na to aby sme toto žiarenie mohli merať priamo a nie len pomocou sekundárnych spršok. Primárne žiarenie pozostáva predovšetkým z jadier vodíka a hélia, odpovedá preto obsahu prvkov vo vesmíre s jedným nápadným rozdielom. Objavuje sa v ňom nadbytok prvkov Li, Be a B. Tento exces vysvetľujeme javom známym ako štiepenie (angl. *spallation*). Ide o proces, kedy jadro ťažšieho prvku interaguje s protónom žiarenia a dochádza tak z rozpadu jadra na ľahšie časti. Týmto spôsobom jednoducho môžeme vysvetliť aj prítomnosť iných prvkov v kozmickom žiarení ľahších ako železo.

So žiarením s energiami nad  $10^{15}$  eV to už také jednoduché nie je, pretože tok je príliš nízky na to, aby sme ho mohli merať priamo. Na detekciu nám preto slúžia atmosférické spršky častíc, ktoré meriame zo Zeme. Podstatu primárneho žiarenia tak môžeme len nepriamo odvodiť z vlastností sekundárnych častíc – z ich náboja a hmotnosti. To predstavuje problém, pretože v súčasnosti nie sme schopní na základe merania stanoviť náboj častice a určenie hmotnosti silne závisí na zvolenom modeli. Preto sa vo výklade musíme rozhodnúť, či pracujeme so sprškami, ktorých zdrojom boli ľahké primárne častice (protóny) alebo, naopak, ťažšie (železo a pod.), meraním to však zatiaľ nie sme schopní zistiť.

Smerom k vyšším energiám, mnohé experimenty (DICE, CASA-MIA, JACEE) poukazujú na fakt, že zloženie žiarenia sa mení. Ťažšie prvky postupne začínú zvyšovať svoje zastúpenie.

A čo energie týkajúce sa spektra nad „kolenom“? Projekty ako AGASA a HiRes ukazujú, že zloženie sa znova mierne mení. V spektre zase začínajú prevládať ľahšie prvky, no nakoľko sú



Obr. 1.6: Nadbytok prvkov Li, Be a B kozmického žiarenia v porovnaní s okolím Slnka

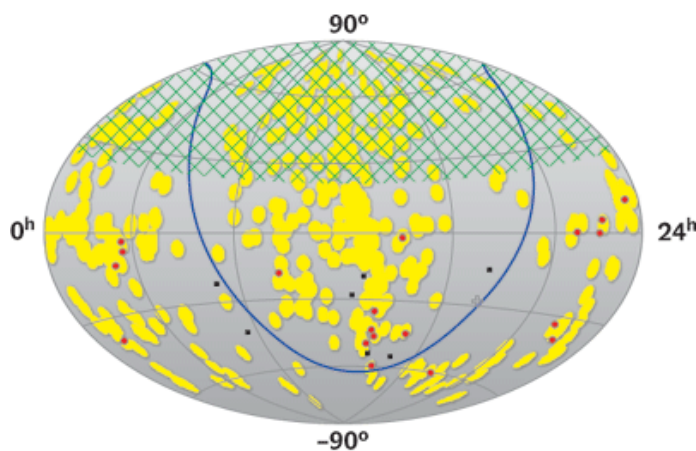
tieto výsledky spoľahlivé je stále otáznе, pretože tok žiarenia v tejto oblasti je veľmi nízky a modely, s ktorými experimenty pracujú sú len extrapoláciou pre modely náležiacie nižším energiám. Navyše, žiarenie za medzou GZK môže byť podľa AGASA a HiRes tvorené lúčmi gama a nie protónmi čo značne komplikuje situáciu. Ak by sa nám podarilo nejakým spôsobom zistiť, z čoho sa žiarenie nad touto medzou skladá, objasnilo by to mnohé záhady, ktoré sú dosiaľ spojené s kozmickým žiarením.

Jednou z veľkých neznámych je určenie zdrojov kozmického žiarenia. Ako už vieme, potenciálni kandidáti sú značne obmedzení intenzitou a veľkosťou produkovaného magnetického poľa i efektom GZK. Ak detekujeme žiarenie s energiou nad  $5 \cdot 10^{19}$  eV, znamená to, že sa od nás musí nachádzať vo vzdialenosti menšej ako 100 Mpc. V takejto vzdialenosti nie je príliš mnoho zdrojov, ktoré by spĺňali Hillasovo kritérium, navyše, vysokoenergetické častice sú len veľmi málo vychyľované magnetickým poľom od svojho pôvodného smeru. To nám umožňuje stanoviť smer k možnému zdroju.

Za zmienku určite stojí niekoľko udalostí, ktoré sa vedcom dosiaľ podarilo zaznamenať. Jedná sa o detekciu častíc s energiami  $2 \cdot 10^{20}$  eV z AGASA a  $3 \cdot 10^{20}$  eV z Fly's Eye. Keďže do vzdialenosti do 100 Mpc nie je látka vo vesmíre rozložená rovnomerne, spektrum žiarenia teda môže byť obecné v rôznych smeroch odlišné, preto je výhodné zobrazovať smer priletu častice v závislosti na galaktických súradniciach. Navyše, v roku 2007 sa podarilo zaznamenať anizotropiu v smere priletavajúceho žiarenia s energiou nad  $5 \cdot 10^{19}$  eV. Výsledky z PAO ukazujú, že vysokoenergetické častice vychádzajú primárne z miest v okolí aktívnych galaktických jadier (AGN).

Vynesme si do mapy oblohy v rovníkových súradniciach polohy 27 vysokoenergetických udalostí. Je prekvapivé, že až 20 z nich je vzdialených menej ako 3 stupne od polohy AGN. Ďalších 5 bodov zo zvyšných 7 leží v okolí galaktického rovníka. Ich smer mohol byť teda galaktickým magnetickým poľom zmenený o viac ako  $3^\circ$ . Ako tento fakt interpretovať? Mohlo by sa zdať, že je to dostatočný dôkaz tvrdenia, že AGN sú zdrojom vysokoenergetického kozmického žiarenia. Neuchýľme sa však k prenáhleným záverom. Svedčí to iba o tom, že potenciálne zdroje kozmického žiarenia môžu mať vo vesmíre rovnaké rozloženie ako tieto jadrá. Na utvorenie si presnejšieho

obrazu usporiadania objektov vo vesmíre tak budeme musieť počkať na ďalšie dáta z PAO a iných projektov venujúcich sa kozmickému žiareniu.



Obr. 1.7: Mapa oblohy v rovníkových súradniciach a v nej zakreslené polohy blízkych AGN. Majú žltú farbu a každá plocha polomer približne 3 stupne. Žlté políčky zaberajú zhruba 21 % viditeľnej časti oblohy, preto je pozoruhodné, že až 20 z celkovo 27 najenergetickejších udalostí spadá do tejto oblasti. Tie sú označené ako červené body. Ostatných 7 udalostí je znázornených čiernou. Modrá čiara označuje rovinu Galaxie, krížik určuje jej stred. Vyšrafovaná zelená časť z PAO nie je pozorovateľná.

## 1.7 Atmosférické spršky

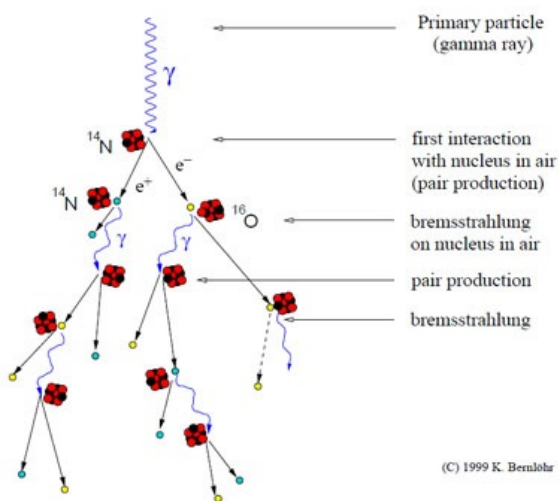
Na Zem dopadá každú sekundu asi 200 častíc kozmického žiarenia (protóny, ťažké jadrá..). Pri prechode atmosférou sa zrážajú s časticami vzduchu a spúšťajú tak kaskádovitý proces, ktorý nazývame spršky. Výsledkom zrážky je produkcia sekundárnych častíc, ktoré si energiu pôvodnej častice medzi sebou rozdeľujú. Môžu pozostávať až z niekoľko miliárd novo vzniknutých častíc a pri dopade na zem pokrývajú plochu desiatok štvorcových kilometrov.

Spršky, ktoré majú dostatočnú energiu na dosiahnutie povrchu zeme nazývame *extensive air showers* (EAS). Meraním vlastností spršok tak môžeme čo – to vypovedať aj o vlastnostiach primárnej energetickej častice. Prvá zrážka väčšinou vyprodukuje okolo 50 sekundárnych častíc. Najväčšie zastúpenie tu majú pióny, ktoré môžu byť elektricky neutrálne, nabité záporne i kladne. Pióny sú nestabilné, ale kladne nabité majú o niečo dlhšiu dobu rozpadu a stihnú sa tak zraziť s ďalšími časticami skôr, ako tomuto rozpadu podľahnú. Vytvorí tak ďalšiu zrážku podobnú tej primárnej a postupne dochádza ku kaskádovej sprške.

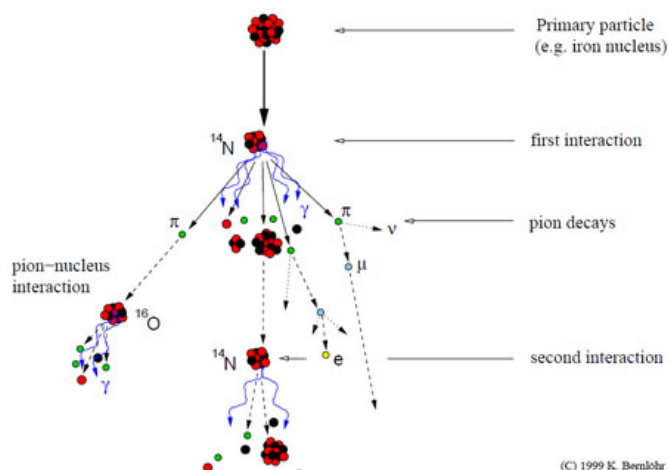
Neutrálne pióny sa okamžite rozpadajú na dva fotóny, ktoré vzápätí interagujú s jadrami rozptýlenými vo vzduchu a produkujú elektrón-pozitrónové páry. Tie tiež nemajú dlhú životnosť a znovu sa menia na fotóny za vzniku brzdného žiarenia (*bremsstrahlung*).

Takže podľa typu častice, ktorá spršku vyvolala rozdeľujeme EAS na dva typy: elektromagnetickú spršku (spôsobenú fotónmi ale i elektrónmi a neutrínami) a hadrónovú spršku (vytvorenú protónmi a jadrami ťažších prvkov).

Development of gamma-ray air showers

Obr. 1.8: Extensive air shower –  $\gamma$  žiarenie

Development of cosmic-ray air showers



Obr. 1.9: Extensive air shower – kozmické žiarenie

### 1.7.1 Elektromagnetická sprška

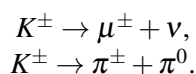
Neutrálne pióny s krátkou životnosťou sa rozpadnú na páry fotónov. Tieto fotóny sa za prítomnosti molekúl vzduchu okamžite premenia na elektrón-pozitrónový pár. Symbolicky môžeme reakciu zapísať v tvare:  $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$ . Novovzniknuté elektróny a pozitróny podliehajú brzdnému žiareniu, kde sa ich energia využije pri tvorbe fotónu na molekulách vzduchu. Zapísané pomocou reakcie:  $e^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma$ . Znovu dochádza k produkcii elektrónov a pozitrónov, k brzdnému žiareniu a celý kolobeh sa opakuje dovtedy, až kým častice nedosiahnu istú kritickú hodnotu energie. Časť kinetickej energie primárnej častice sa totiž spotrebuje pri produkcii častíc, jej zvyšok sa rozloží pozdĺž spršky. Ak priemerná energia častíc klesne natoľko, že už nie je dostatočná na vytváranie nových, sprška zaniká a dosahuje svoje maximum.

Vedľajšími produktami elektromagnetickej spršky sú mióny, ktoré vznikajú pri interakcii elektrón-pozitrónových párov. Pozitrón reaguje s elektrónom, ktorý do reakcie poskytuje jadrá vzduchových častíc:  $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ .

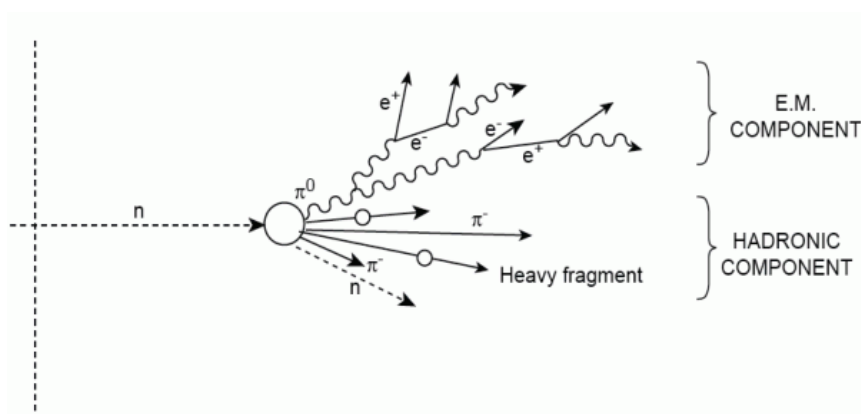
### 1.7.2 Hadrónová sprška

Keď vysokoenergetický hadrón (neutrón, protón, jadrá ťažších prvkov) narazí do jadra častice vzduchu, vytvorí spršku, ktorá oproti elektromagnetickej vyprodukuje omnoho bohatšie spektrum častíc. Pozostáva z protónov, neutrónov, piónov, kaónov a ťažších jadier. Nestabilné častice sa okamžite rozpadajú, stabilné vytvoria zrážkami s okolitými časticami ďalšie spršky.

Kaóny sú vysoko nestabilné a rozpadajú sa buď na pióny alebo mióny. Rozpady môžeme symbolicky zapísať:



Následne dochádza k rozpadu nabitých piónov na mióny a miónové neutrína:  $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$ . Pri rozpade neutrálnych piónov dochádza k produkcii páru fotónov:  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ .



Obr. 1.10: Hadrónová sprška s hadrónovým jadrom a elektromagnetickými vedľajšími sprškami po obvode.

Kaóny ani pióny však v sprške nemáme šancu pozorovať, pretože sa rozpadajú príliš rýchlo a okamžite po vzniku tvoria mióny. Tie v hojnom počte dopadajú až na povrch zeme a hladko prelietajú skrz neho, keďže mióny pomocou silných jadrových síl s hmotou neinteragujú. Hlavnou interakciou v tomto prípade sa stáva elektromagnetická, ktorú uplatňujú na elektróny vo vzduchu. Avšak elektróny sú neporovnatelne ľahšie, preto nemajú schopnosť zabrzdiť prelet miónov hmotou. Mióny sa napokon rozpadnú na elektróny alebo pozitróny a elektrónové a miónové neutrína:  $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e + \nu_\mu$ .

Súčasne s hadrónovou sprškou vzniká i elektromagnetická, pretože pri jednotlivých rozpadoch nestabilných častíc dochádza ku vzniku elektrónov a fotónov. Elektromagnetická sprška sa vytvorí na obvode okolo centrálnej hadrónovej, no kým sa kaskáda dostane k povrchu zeme, obvykle hadrónové jadro zaniká, pretože všetky častice v ňom sa premenili na mióny, elektróny a fotóny. Práve vysoký počet miónov nám umožňuje odlíšiť hadrónovú spršku od elektromagnetickej.

Informácie použité v tejto kapitole pochádzajú najmä z [1], [2], [3], [13].



## Kapitola 2

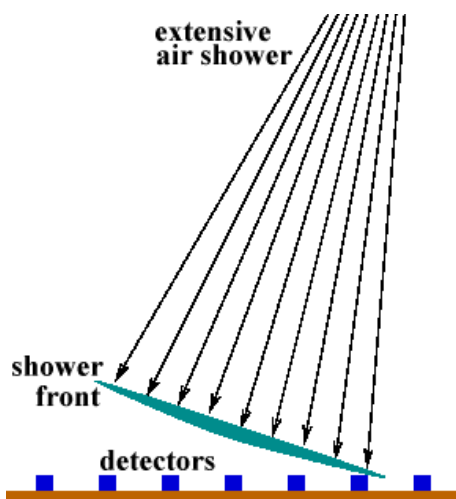
# Experimenty a detektory

### 2.1 Detekčné systémy

Zemský povrch je neustále bombardovaný časticami, ktoré k nám prichádzajú z útrob vesmíru. Ako už vieme, ich energie môžu byť naozaj rôzne, líšia sa aj o desať rádov. Keďže tie najenergetickejšie častice na Zem prilietavajú sporadicky, je nutné na ich detekciu budovať skutočne ohromne rozmerné detektory. Jedná sa vlastne o rozľahlé polia navzájom prepojených detektorov. Prvé observatórium, ktoré bolo postavené za účelom sledovania kozmického žiarenia bolo vybudované v Novom Mexiku. Pole *Volcano Ranch* malo rozlohu zhruba 8 km<sup>2</sup> a obsahovalo 19 scintilačných detektorov.

Na akom princípe vlastne tieto pozemné detektory pracujú? Zjednodušene predpokladajme, že častice spršky pohybujúce sa takmer rýchlosťou svetla dopadnú na pole detektorov tak, ako to vidíme na obrázku 2.1. Každá stanica potom zaznamená dopad spršky, tzv. udalosť (*event*) v určitom čase, ktorý síce bude pre jednotlivé stanice rôzny, ale vo vzájomnej koincidencii. Z týchto časových údajov je potom možné určiť smer primárneho kozmického žiarenia.

Pozemné detektory nám, nanešťasie, neumožňujú sledovať rozvoj spršky v atmosfére, vidíme už iba jej výsledok, teda dopad častíc na detektor. Preto pri konštrukcii trajektórie častice využívame dva fyzikálne javy sprevádzajúce EAS: Čerenkovovo žiarenie a fluorescenciu.



Obr. 2.1: Dopad EAS na pozemný detektor

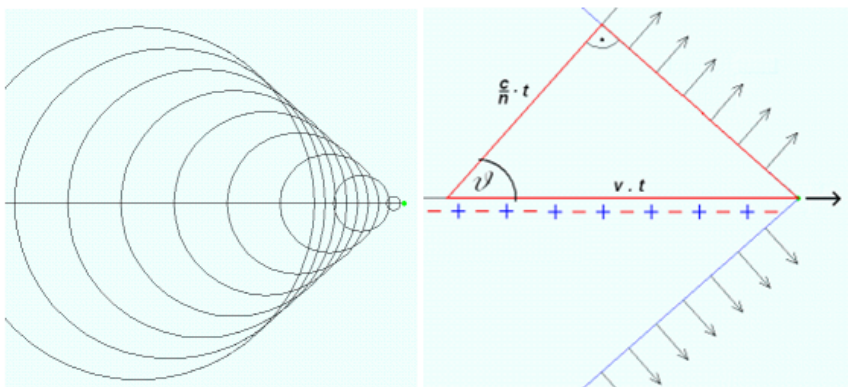


### 2.1.1 Čerenkovovo žiarenie

Čerenkovovo žiarenie vzniká pri prechode prostredím rýchlosťou vyššou ako je fázová rýchlosť svetla v tomto prostredí. Pomenovanie dostalo podľa ruského fyzika Pavla Alexejeviča Čerenkova, nositeľa Nobelovej ceny (1958) ktorý ho v roku 1934 ako prvý dôkladne popísal.

Existencia Čerenkovovho žiarenia bola teoreticky predpovedaná už v 1888 anglickým fyzikom Oliverom Heavisidom. Častica pohybujúca sa v hmotnom prostredí rýchlosťou väčšou ako je rýchlosť svetla mala podľa neho vyžarovať žiarenie presne definovaných vlastností. Manželia Curieovci sa snažili v rokoch 1900-1905 z rádioaktívnych roztokov izolovať rádium. Síce pozorovali modrasté žiarenie, odpovedajúce Čerenkovovmu, ale nevenovali mu žiadnu pozornosť. Francúzsky vedec M. L. Mallet ožaroval vodný roztok gama lúčmi a výsledné špecifické žiarenie chybné popisoval v práci z roku 1926 ako luminiscenčné žiarenie. S. I. Vavilov, odborník na luminiscenciu, spolu s Čerenkovom systematicky a dôkladne dané žiarenie študovali a analyzovali. Napokon dospeli k záveru, že s luminiscenciou nemá žiadny súvis, ale je vyvolané veľmi rýchlymi elektrónmi vznikajúcimi pri zrážkach gama žiarenia s atómami prostredia. Presnú teóriu vzniku žiarenia vypracovali až I. M. Frank a I. J. Tamm na základe klasickej elektrodynamiky v rokoch 1937 – 1946.

Hoci rýchlosť svetla vo vákuu je univerzálnou konštantou, svetlo sa v látkovom prostredí môže šíriť rýchlosťou podstatne menšou ako je  $c$ . Napríklad pre vodu je to iba  $0,75c$ . Ak však žiarenie nejakým spôsobom urýchlíme nad túto hodnotu (počas jadrových reakcií alebo v urýchľovači), vyprodukuje žiarenie odpovedajúce Čerenkovovmu. Je to vlastne analógia aerodynamického tresku pre elektromagnetickú vlnu. Objekt pohybujúci sa nadzvukovou rýchlosťou pred sebou akoby tlačí vznikajúce zvukové vlny, ktoré nemajú dostatočnú rýchlosť aby sa od objektu vzdialili a vytvoria tak rázovú vlnu. Rovnakým mechanizmom pred sebou svetelnú rázovú vlnu vyvolá nabitá častica.



Obr. 2.2: Geometria Čerenkovovho žiarenia [10]

Pre prostredie s indexom lomu  $n > 1$  sa môže častica pohybovať rýchlejšie ako je rýchlosť šírenia svetla v tomto prostredí. Jej rýchlosť je potom  $v_c = \beta c$ . Rýchlosť elektromagnetického signálu je  $v_{em} = c/n$ , kde  $c$  je rýchlosť svetla v danom prostredí. Ak  $v_{em} < \beta c$  – nabitá častica potom vysiela žiarenie v oblasti viditeľného spektra, Čerenkovovo žiarenie.

Z obrázka 2.2 možno potom vyvodit:

$$\cos \theta = \frac{x_{em}}{x_c} = \frac{v_{em}t}{v_c t} = \frac{\frac{c}{n}t}{\beta c t} = \frac{1}{\beta n}. \quad (2.1)$$

Rozoberme si dve špecifické situácie:

1. Pre každé prostredie možno nájsť minimálnu, tzv. prahovú rýchlosť, pri ktorej vzniká Čerenkovovo žiarenie.  $\cos \theta$  môže maximálne nadobudnúť hodnotu 1, pre ktorú je rýchlosť častice  $v_c$  najmenšia.

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n} = 1 \Rightarrow \frac{ct}{n} = \beta ct. \quad (2.2)$$

$$v_{em}t = v_{c,\min}t \Rightarrow v_{em} = v_{c,\min}, \quad (2.3)$$

teda sa rovná rýchlosti žiarenia v látkovom prostredí.  $\theta$  je tak  $0^\circ$  a vyžarovanie sa deje v smere pohybu častice. Pre vodu s  $n = 1,33$  platí:

$$v_{c,\min} = v_{em} = \frac{c}{n} = \frac{c}{1,33} = 0,752c. \quad (2.4)$$

2. Maximálna možná rýchlosť, ktorú častica môže dosiahnuť je tá, ktorou sa žiarenie pohybuje vo vákuu. Vieme, že k tejto hodnote nikdy presne nedospeje, ale predpokladajme, že sa jej takmer dokonale priblíži. Pre takúto ultrarelativistickú časticu platí  $\beta = 1$ , teda

$$v_c = \beta c \Rightarrow v_{c,\max} = c. \quad (2.5)$$

Potom:

$$\cos \theta_{\max} = 1/\beta n = 1/n. \quad (2.6)$$

Vo vákuu sa žiadne žiarenie či častica nemôže pohybovať rýchlejšie ako je rýchlosť svetla vo vákuu  $c$ , teda tu Čerenkovovo žiarenie vzniknúť nemôže.

Elektrón prelietavajúci vodou maximálnou rýchlosťou, bude maximálne vyžarovať na:

$$\cos \theta_{\max} = 1/n = 1/1,33 \Rightarrow \theta_{\max} = 41,25^\circ. \quad (2.7)$$

### 2.1.2 Fluorescencia

Počiatky štúdia fluorescencie sa uskutočnili v laboratóriách v Los Alamos v 60. rokoch minulého storočia pri testoch s jadrovými výbuchmi vo vzduchu. Pri explóziách vzniká veľký počet nabitých častíc, ktoré sú schopné vytvoriť pri interakcii s molekulami vzduchu svetelnú stopu. Podobný jav bol neskôr pozorovaný aj pri prechode častíc spŕšky atmosférou Zeme. Fluorescencia nám tak umožňuje použiť iný prístup pri štúdiu EAS.

K fluorescencii dochádza pri excitácii hladín  $^{2}\text{P}$  a  $^{1}\text{N}$  molekúl dusíka ionizovanými časticami prilietavajúcimi z kozmu. Pomocou merania fluorescencie, ktorá je vyžarovaná izotropne, sa nemusíme uchýľovať k uplatneniu modelov hadrónovej spŕšky, pretože ak vezmeme do úvahy, že atmosféra sa chová ako kalorimeter, je možné jednoducho stanoviť energiu kozmického žiarenia.

Fluorescencia je síce neviditeľná pre ľudské oko, ale fluorescenčný detektor hravo zaznamená svetelnú stopu dusíka. Vznikajúce UV žiarenie sa preň chová ako UV žiarovka preletujúca atmosférou rýchlosťou svetla. Niekedy sa stane, že spŕšku zachytia dva detektory, čo umožňuje veľmi presne stanoviť trajektóriu častíc. Z množstva fluorescenčného žiarenia meraného pozdĺž časticovej spŕšky možno určiť jej maximum a odtiaľ, ak vezmeme do úvahy, že hmotnejšie častice preniknú hlbšie do atmosféry, aj hmotnosť primárneho žiarenia.

## 2.2 Prehľad observatórií zaoberajúcich sa výskumom kozmického žiarenia

### 2.2.1 Volcano Ranch

Prvá detekcia kozmickej spršky s energiou vyššou ako  $10^{18}$  eV sa uskutočnila vďaka skupine vedcov z MIT vedenej fyzikom Johnom Linsleym. Údaje, ktoré poskytovalo toto pole v Novom Mexiku poukazovali na to, že smerom k vyšším energiám sa spektrum kozmického žiarenia mení – jeho pokles za „členkom“ je pozvoľnejší, ako sa očakávalo. Problémom poľa Volcano Ranch boli príliš veľké vzdialenosti medzi jednotlivými scintilátormi (884 m), nebolo tak možné presnejšie stanoviť počet časič v sprške. [4]

### 2.2.2 Haverah Park

V rokoch 1964 – 1987 bolo vo Veľkej Británii vybudované pole pozemných detektorov Haverah Park pod záštitou University of Leeds. Nachádzalo sa na ploche s rozlohou  $12 \text{ km}^2$ , kvôli terénu však nemohlo byť rozložené vo forme pravidelnej mriežky. Uplatnilo sa preto rozmiestnenie s centrálnym menším poľom štyroch Čerenkovových detektorov s rozlohou  $34 \text{ m}^2$ , ktoré boli od seba vzdialené 500 m. Okolo centra bolo vybudovaných 6 ďalších polí vo vzdialenosti okolo 2 km s plochou 50 alebo 150 m. Okrem toho bol Haverah Park vybavený aj scintilátorom s tekutinou zastrešenou olovom, ktorý slúžil na detekciu miónov a miónovým spektrometrom.

### 2.2.3 Jakutsk

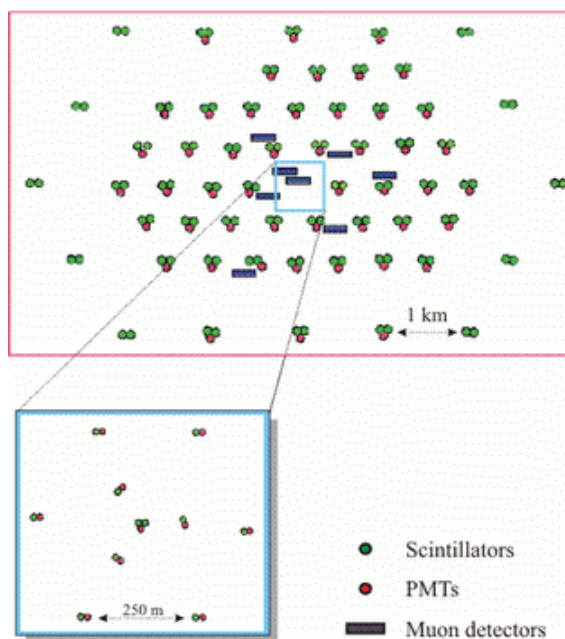
Pole detektorov situované na Sibíri bolo spustené v roku 1967 pod prevádzkou Inštitútu kozmofyzikálneho výskumu a aeronómie. Pôvodný návrh D. D. Krasilnikova s 13 stanicami z roku 1959 bol rozšírený na plochu  $18 \text{ km}^2$ . Cieľom experimentu Jakutsk bolo preskúmať kaskády častíc v atmosfére a pomocou nich určiť vlastnosti primárneho žiarenia, konkrétne intenzitu, spektrum energie, zloženie a jeho pôvod. Neskôr bolo pole doplnené na 43 scintilátorov, detektorom miónov a detektormi Čerenkovovho žiarenia. Vzdialenosti medzi detektormi sú v rozpätí 100 – 250 m a pomocou nich boli zaznamenané 3 udalosti s energiou nad  $100 \text{ EeV}$ . [15]

### 2.2.4 SUGAR

Pole SUGAR (skratka od *The Sydney University Giant Air Shower Recorder*) pozostávalo zo 47 staníc rozmiestnených na ploche  $70 \text{ km}^2$ . Táto plocha je príliš veľká na detekciu menších spršok, preto bolo hlavné pole detektorov vzdialených od seba asi 1,6 km umiestnených v mriežke doplnených ďalšími 9 detektormi, ktoré boli rozložené s menšou vzdialenosťou. Každý detektor zaznamenával udalosti nezávisle od ostatných na magnetické pásky. Údaje z experimentu sú cenné najmä pre vysokú presnosť v určovaní smeru príchodov kozmického žiarenia s energiami nad  $10^{18}$  eV. Stopy po anizotropii však objavené neboli. Neskôr, v roku 2000, skupina pracovníkov z Adelaide detekovala signál pochádzajúci z centra Galaxie.

### 2.2.5 AGASA

Projekt AGASA (*Akeno Giant Air Shower Array*) v Japonsku fungoval v rokoch 1994 – 2000 a pozostával zo 111 detektorov na ploche zhruba  $100 \text{ km}^2$ . Detektormi tu boli pozemné scintilátory alebo vodné Čerenkovské detektory. Scintilátory oddeľovala vzdialenosť asi 1 km a každý mal plochu  $2,2 \text{ m}^2$ . Na 27 z týchto scintilátorov bol nainštalovaný aj detektor miónov. Podstata detekcie



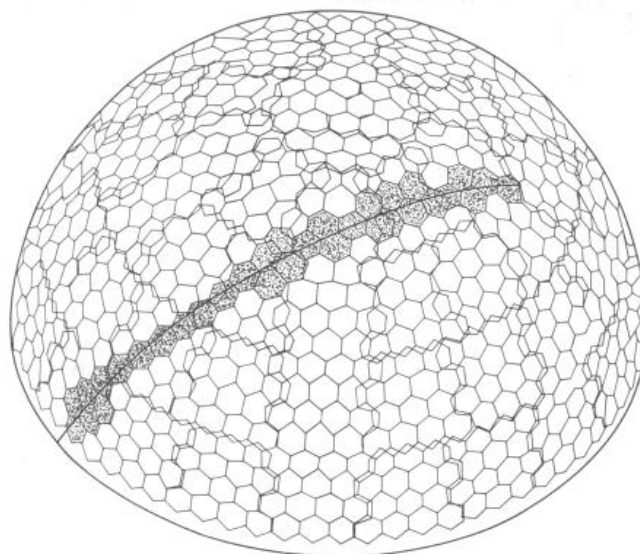
Obr. 2.3: Rozmiestnenie detektorov poľa Jakutsk

spočívala v tom, že prelietavajúce častice vytvorili v prostredí záblesk, ktorý sa sledoval fotonásobičmi a následne vyhodnocoval, takže sa získali informácie o smere príchodu spŕšky a energii primárnej častice. Zdalo sa, že experiment podáva rozporuplné výsledky, pretože nad hranicou GZK, kde by tok častíc mal klesať rýchlejšie než o tri rády na každý rád energie, sa tento pokles naopak spomalil.

### 2.2.6 Fly's Eye

Problém sa objavil, keď sa údaje z AGASA porovnali s výsledkami z projektu Fly's Eye. Detektor bol postavený v americkom Utahu a vedúcimi osobnosťami projektu sa stali Haven Bergeson, George Cassiday a Gene Loh. Nainštalovaných bolo 67 detekčných jednotiek, každá z nich bola veľkým sférickým zrkadlom s hliníkovým povrchom s priemerom 1,5 m. Projekt Fly's Eye I fungoval na základe merania fluorescencie pomocou Winstonových kolektorov a fotonásobičov. Tie boli zoskupené buď po 12 alebo 14 v ohniskovej rovine každého zrkadla. Zrkadlá boli chránené pred poveternostnými podmienkami v oceľových trubiciach s rozmermi 2,13 m v dĺžke a 2,44 m v priemere. V trubiciach sa dokopy nachádzalo až 880 fotonásobičov usporiadaných do šesťuholníkovej siete, odtiaľ teda pochádza názov *Fly's Eye*. Fotonásobiče rozdelia oblohu na 880 pixelov a pri prechode spŕšky atmosférou sa jej dráha zobrazí na príslušných pixeloch, tak ako to môžeme vidieť na obrázku.

Okrem tejto stopy fotonásobiče zaznamenajú i čas príchodu spŕšky a intenzitu fluorescenčného žiarenia. Z týchto údajov je možné zostrojiť trajektóriu spŕšky v dvoch krokoch. Po prvé, je nutné určiť rovinu, ktorá prechádza ako spŕškou, tak i detektorom. V tomto kroku považujeme dráhu spŕšky za priamku. Situáciu je možné zjednodušiť, pretože pri dostatočne veľkých vzdialenostiach možno zdroj fluorescenčného žiarenia považovať za priamkový a samotný detektor ako bod. Rovinu „detektor-spŕška“ bližšie určíme parametrami  $R_p$  – dopadovým parametrom a uhlom sklonu  $\chi_0$ . Z goniometrie možno potom vyvodíť závislosť času príchodu spŕšky na uhle jej sklonu (za predpokladu, že svetlo i častice spŕšky sa šíria rýchlosťou svetla vo vákuu), čo je druhý krok



Obr. 2.4: Stopa na fotonásobičoch po prelete spršky

procedúry.

Fly's Eye I bol doplnený menším počtom Fly's Eye II s 8 ďalšími detekčnými jednotkami (neskôr sa tento počet ešte zvýšil na 36) a celkovo tak toto zariadenie pokrývalo plochu  $1000 \text{ km}^2$ . Spomedzi všetkých údajov, ktoré „Mušie oko“ nameralo vyčnieva jeden, dodnes neprekonaný rekord z roku 1991, kedy bola zaznamenaná udalosť s energiou  $(3,2 \pm 0,9) \cdot 10^{20} \text{ eV}$ . Udalosť bola o to pozoruhodnejšia, že sa stala len asi 12 km od detektoru Fly's Eye I, preto bolo možné získať vskutku dobré údaje o jej spektre a energii. [13]

Nanešťastie, kvôli malej apertúre nebolo možné merať spektrá udalostí nad  $10^{20} \text{ eV}$  a overiť tak platnosť medze GZK. Preto bol v roku 1997 experiment doplnený o detektor High Resolution I (odtiaľ skratka HiRes) a v 1999 High Resolution II.

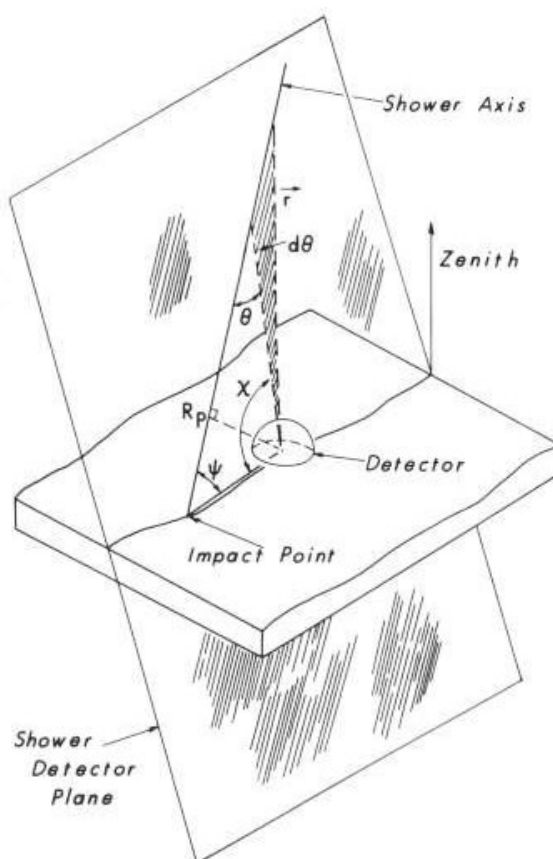
### 2.2.7 HiRes

HiRes fungoval na báze fluorescenčných detektorov, používajúcich zrkadlá a kamery zložené z mnohých fotonásobičov. Detektory I a II sú od seba vzdialené 12,6 km, taktiež umiestnené v Utahu. Merania z HiRes teóriu GZK limitu potvrdzovali – tok častíc so vzrastajúcou energiou klesá so štvrtou, respektíve piatou mocninou. Projekt bol kvôli sérii prevádzkových problémov v roku 2006 zrušený, no do tej doby nám stihol poskytnúť neoceniteľné údaje o zložení kozmického žiarenia, spektre v oblasti vysokých energií a jeho anizotropii. Problémom však stále boli rozpory s pozorovaniami z AGASA. Situáciu mal vyriešiť až ďalší, vôbec najambicióznejší projekt.

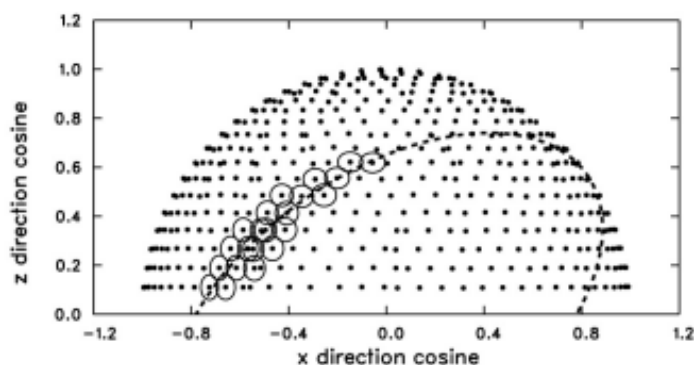
### 2.2.8 CASA-MIA

V roku 1998 bola dokončená výstavba projektu CASA-MIA (*The Chicago Air Shower Array*) za účelom stanoviť miesto a smer šírenia vysokoenergetického kozmického žiarenia a  $\gamma$ -žiarenia s energiami nad  $10^{14} \text{ eV}$ . Údaje z experimentu by nám tak mali poskytnúť odpoveď na základnú otázku a to odkiaľ k nám toto žiarenie prichádza. [14]

V roku 1983 totiž fyzici Samorski a Stamm identifikovali asi 11 kpc vzdialený systém röntgeno-



Obr. 2.5: Rekonštrukcia trajektórie EAS



Obr. 2.6: Záznam udalosti vysokoenergetickej častice z roku 1991

vých dvojhviezd Cygnus X-3 ako zdroj fotónov s energiami  $2 \cdot 10^{15}$  eV. Aby mohla byť ich hypotéza potvrdená, laureát Nobelovej ceny James Watson Cronin inicioval spustenie projektu CASA-MIA, na ktorom sa podieľali skupiny vedcov z Univerzity v Chicagu a Michiganu. Pole na ploche  $0,24 \text{ km}^2$  bolo vybudované špeciálne na sledovanie žiarenia pochádzajúceho zo systému Cygnus X-3. Pole bolo postavné vo forme pravouhlej siete s 1024 scintilátormi s obsahom  $1,5 \text{ m}^2$  vo vzdialenostiach



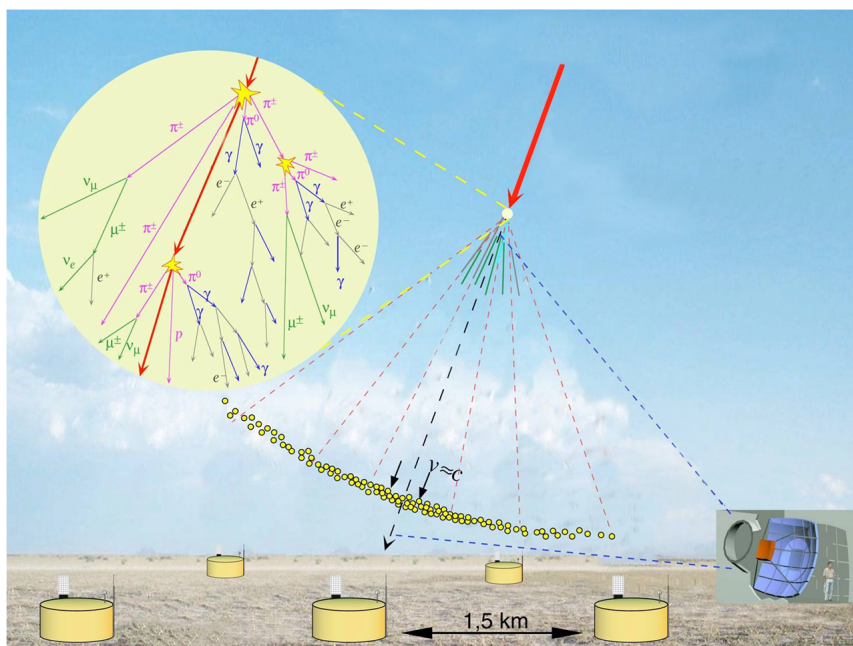
15 m od seba. Navyše pole bolo vybavené aj 16 detektormi miónov umiestnených 3 m pod zemou s plochou  $64 \text{ m}^2$ .

Prekvapivý bol výsledok pozorovania: zo systému Cygnus X-3 neboli zaznamenané žiadne signály  $\gamma$ -žiarenia, čo vyvolalo špekulácie, že výsledky Samorskeho a Stamma boli podvrhom. Napriek tomu, vybudovanie zariadenia CASA-MIA nebolo stratou času, pretože to podnietilo Cronina k plánu vytvoriť ešte väčšie detekčné pole, čo sa dovtedy pokladalo za neuskutočniteľné.

## 2.2.9 Pierre Auger Observatory

Jeho výstavba započala v roku 1995. Pierre Auger Observatory (PAO) je najväčším postaveným observatóriom, je to unikátne dielo kombinujúce dva typy detekčných zariadení v snahe pátrať po najenergetickejších časticiach, vysvetliť odkiaľ sa berú a objasniť pôvod a vývoj celého vesmíru. Umožňuje nám zachycovať omnoho viac vysoko energetických častíc a s oveľa väčšou presnosťou vyhodnocovať zaznamenané dáta.

Prvý systém detekcie je zložený z 1600 staníc, ktoré sú navzájom prepojené a zaberajú plochu asi  $3000 \text{ km}^2$ , čo je o niečo viac ako rozloha Luxemburska. Každý detektor je tvorený obrovskou nádržou vody (water tank) s objemom asi 11 tisíc litrov a sú od seba vzdialené 1,5 km. Vnútri panuje úplná tma, s výnimkou, kedy tankom vody preletí kozmické žiarenie spŕšky. Putujú rýchlejšie ako je pohyb svetla vo vode. Elektromagnetická tlaková vlna tak dáva vznik Čerenkovovmu žiareniu, ktoré sa meria fotonásobičovými trubicami.



Obr. 2.7: Schéma pozemných detektorov PAO

Častice zo spŕšky takto zasiahnu niekoľko detektorov naraz, ktoré vyhodnotia, či sa jedná o príslušníkov jednej udalosti (eventu) a ak áno, údaje sa pošlú do riadiaceho centra. Kombináciou údajov o počte dopadnutých častíc a času preletu vieme vypočítať smer a energiu pôvodného žiarenia, ktoré spŕšku vyvolalo.

Druhý detekčný systém je založený na meraní fluorescenčného žiarenia, ktoré vzniká pri zrážkach s časticami zemskej atmosféry, hlavne atmosférickým dusíkom. PAO používa 24 týchto FD. Celkové množstvo dopadnutého svetla závisí na počte častíc v spŕške a teda na ich energii. Smer a tvar

svetelnej stopy nám ukazuje, odkiaľ pôvodné kozmické žiarenie prišlo a čo za časticu to mohlo byť. Fluorescenčné detektory však vstupujú do hry len pri bezmesačnej jasnej noci. Pozemné detektory sú naproti tomu schopné merania neustále a tak zaznamenajú 10-krát viac eventov.

Southern AO neďaleko Malargüe, Argentína zbiera dáta už od roku 2004, no konštrukcia bola dokončená až v 2008. Do projektu je zapojených 19 krajín s viac ako 90 inštitúciami. Detektory sú situované na nasledujúcich miestach:

- Ground station array – 1600 SD (stred oblasti)
- Los Leones – 6 FD
- Morados – 6 FD
- Loma Amarilla – 6 FD
- Coihueco – 6 FD

V 2007 boli publikované prvé predbežné výsledky. PAO objavilo smery 27 pôvodcov vysoko energetického žiarenia, ktoré vykazovali silnú koreláciu s AGN objektmi. To súhlasí s teóriou, podľa ktorej sa v centre každého AGN nachádza supermasívna čierna diera produkujúca extrémne magnetické pole, dostatočné k urýchleniu kozmického žiarenia na energie  $10^{20}$  eV.

Do budúcnosti je plánovaná ešte výstavba severnej časti observatória v Colorade a tiež sa uvažuje o rozšírení fungujúcej južnej časti.

### 2.2.10 Telescope Array

Ďalším observatóriom kombinujúcim obe detekčné dechniky je Telescope Array vybudované inštitúciami z USA v spolupráci s Japonskom, Kóreou, Ruskom a Belgickom. Toto zariadenie situované v púšti v Utahu spustilo svoju činnosť v roku 2007. Až 500 scintilátorov umiestnených do štvorcovej siete je doplnených tromi stanicami s teleskopmi, ktoré sú od seba vzdialené 30 km. Každý scintilátor má plochu  $3 \text{ m}^2$  a delí ich vzdialenosť 1,2 km. V súčasnosti je experiment zameraný na skúmanie žiarenia s energiami nad  $10^{18}$  eV, no uvažuje sa o jeho rozšírení smerom k nižším energiám. [16]



## Kapitola 3

# CZELTA

V predchádzajúcej kapitole sme sa venovali vysokoenergetickému žiareniu a detekčným metódam, ako ho zaznamenávať a vyhodnocovať. Všetko to boli projekty veľkých rozmerov, rozľahlé polia staníc, ktoré vznikali vďaka spolupráci mnohých inštitúcií. Nie je to však jediný spôsob, ako možno skúmať kozmické žiarenie. Užitočné informácie o ňom môžeme získavať aj pri experimentoch realizovaných v oveľa menšom merítke. Husté polia detektorov možno nahradiť redšie rozmiestnenými stanicami, ktoré fungujú autonómne. Pomocou GPS systému a časových záznamov dopadu kaskády častíc na jednotlivé stanice možno určiť smer prichádzajúceho primárneho žiarenia. Na tomto princípe funguje projekt CZELTA, o ktorom si teraz povieme niečo viac.

Projekt CZELTA (**CZE**ch **L**arge-**a**rea **T**ime coincidence **A**rray) vznikol v spolupráci Ústavu technickej a experimentálnej fyziky ČVUT v Prahe a Filozoficko-prírodovedeckej fakulty Sliezskej univerzity v Opave. Scintilátory sa budujú na strechách vybraných škôl na území Českej republiky. Projekt je zameraný najmä na stredoškolských študentov, ktorí tak majú možnosť zoznámiť sa so serióznou vedeckou prácou, vyhodnocujú získané údaje a starajú sa o prevádzku detektorov. Okrem vedeckej hodnoty má tento experiment preto aj pedagogický význam.

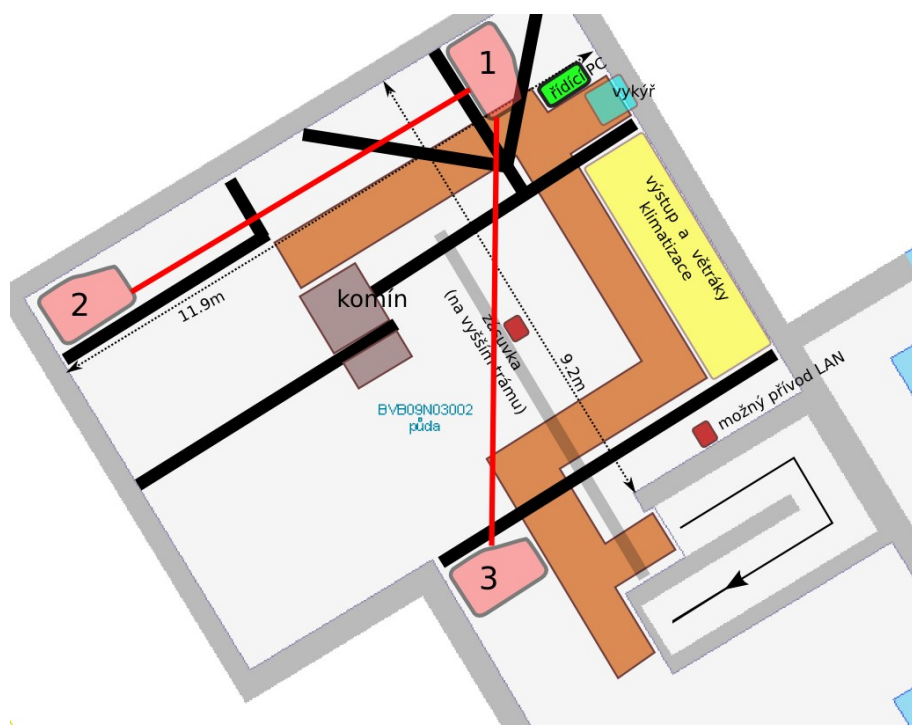
Scintilátory zaznamenávajú časticové spršky, ktorých zdrojom je primárne žiarenie s energiou vyššou ako  $10^{14}$  eV. Snahou je detekovať zdroje žiarenia, ktoré nemajú náhodnú povahu, preto sa experiment zaoberá štúdiom koincidií v čase registrovaných na jednotlivých stanicach.

### 3.1 Kompozícia stanice

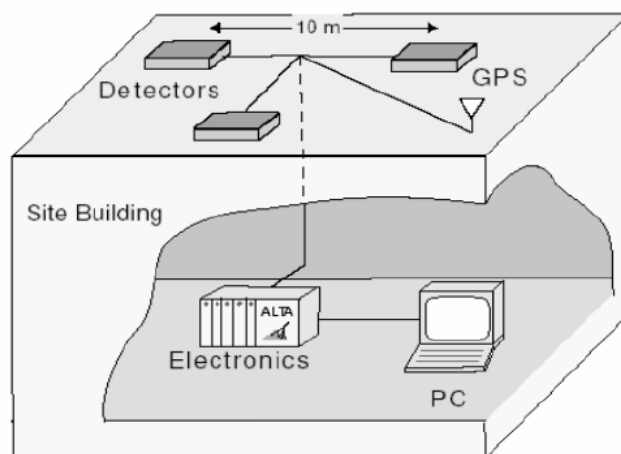
Pod strechou budovy Ústavu fyziky kondenzovaných látok sú postavené tri scintilátory v tvare rovnostranného trojuholníka. Scintilátor tvorí doska s rozmermi  $60\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ , pričom každá je vo vzdialenosti 10 m od druhej. Pri dopade kaskády častíc na dosku sa vyprodukujú fotóny, ktoré vzápätí zaznamená fotonásobič. Elektrický signál je uchovaný len v prípade, ak ho zaregistrujú všetky tri detektory. Zároveň však musí byť signál vzniknutý v intervale časov menších ako 100 ns. Vylúčia sa tak všetky udalosti, pri ktorých mala kaskáda priemer menší ako 10 m a teda energia primárnej častice bola menšia ako  $10^{14}$  eV. Súčasťou stanice je, samozrejme, okrem detektorov i GPS, elektronické príslušenstvo umiestnené vnútri budovy a počítač na spracovanie dát.

#### 3.1.1 Vybavenie na streche

Každý detektor je chránený krytom s tepelnou izoláciou. V podstate sa jedná o veľkú „škatuľu“, v ktorej je umiestnený scintilátor s ďalším dreveným krytom. Na ňom je pripevnený termostat, ktorý zabezpečuje stálu teplotu zariadenia. K prístroju vedú káble chránené kovovou trubicou: kábel



Obr. 3.1: Schéma usporiadania stanice pod strechou Ústavu fyziky kondenzovaných látok Přírodovědecké fakulty MU v Brně, čísla 1 – 3 označují jednotlivé detektory

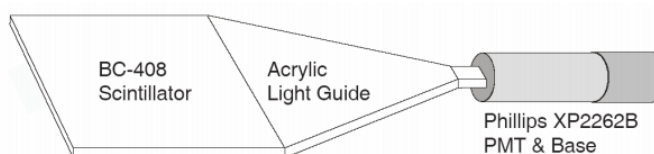


Obr. 3.2: Súčasti prístroja na detekciu EAS

vedúci k termostatu, LED dióde, vysoké napätie k fotonásobiču a signálový kábel fotonásobiča. Na streche je prítomná aj anténa GPS.

Montáž všetkých staníc bola vykonaná presne podľa predlohy jej kanadského partnera, projektu ALTA. Zariadenie je tvorené scintilátormi BC-408 a svetlovodmi vedúcimi k fotonásobiču typu Phillips XP2262B.

Keď plochou scintilátoru prejde ionizované žiarenie, dochádza k tvorbe fotónov s charaktre-



Obr. 3.3: Schéma detektoru

istickou vlnovou dĺžkou  $\lambda = 425 \text{ nm}$ . Takisto možno detekovať i  $\gamma$ -žiarenie, pretože v scintilátore dochádza ku Comptonovmu rozptylu. Množstvo vyprodukovaných fotónov, ktoré fotonásobič zaznamená takmer vôbec nezávisí na type častice, ktorá jav spustila, ani na jej energii.

plocha scintilátora	$\sim 0,5 \text{ m}^2$
elektrické napätie na fotonásobiči	1900 - 2100 V
citlivosť fotonásobiča	$10^7 \text{ e}/\gamma$
účinnosť detektora	$\sim 100 \%$

Tab. 3.1: Niektoré charakteristické parametre detekčného zariadenia

### 3.1.2 Určovanie času

Na zaznamenávanie časových údajov týkajúcich sa dopadu spŕšky na detektor slúži anténa GPS (Global Positioning System). Okrem času, samozrejme, pomocou GPS získame informácie aj o presnej polohe a nadmorskej výške zariadenia. Každú sekundu vyšle GPS signál zariadeniu, ktoré spracováva údaje o dopadoch častíc. Následne potrebujeme zistiť čas, ktorý uplynul medzi dvomi takýmito signálmi. Čas sa meria 100 MHz hodinami opravenými na teplotu. Pre stanice od seba vzdialné menej ako 100 km možno dobu medzi dvomi impulzmi merať s presnosťou 10 ns, pre vzdialenosti v stovkách kilometrov je táto presnosť rovná 16 ns.

### 3.1.3 Elektronické vybavenie

Najdôležitejšou časťou elektroniky je rám s elektronickými blokmi, ktorý pozostáva z niekoľkých častí: jednak *koincidenčného bloku*, ktorého cieľom je analyzovať kaskády častíc, tie však musia zasiahnuť všetky tri scintilátory a priemery kaskád musia byť väčšie ako 10 m. *Časový blok* stanoví rozdiel časov nameraných na jednotlivých scintilátoroch s presnosťou 25 ps a zároveň absolútny čas dopadu spŕšky (ten s presnosťou 10 – 20 ns). Na určenie energie, ktorá sa vytvorí v scintilátoroch pri dopade je určený *analogový blok*. V rámci sa nachádzajú i ďalšie bloky, napríklad *teplotný*, *kalibračný* a iné, no tým teraz nebudeme pripisovať väčší význam.

## 3.2 Analýza údajov

Získali sme údaje o kaskáde častíc: časy jej dopadu na scintilátory, rozdiely medzi nimi, nuž nasleduje samotné spracovanie dát. Údaje o udalosti sa každú sekundu zapíšu do tabuľky, ktorej štruktúra vypadá nasledovne: prvý riadok vždy začína údajom  $x$ , kvôli znalosti HW konfigurácie, v tvare ( $x$ -číslo hw konfigurácie ostatné stĺpce vyplnené nulami). V ďalších riadkoch nasledujú dáta týkajúce sa jednotlivých udalostí. V prvom stĺpci je vždy udané či sa jedná o skutočný event ( $a$ ),

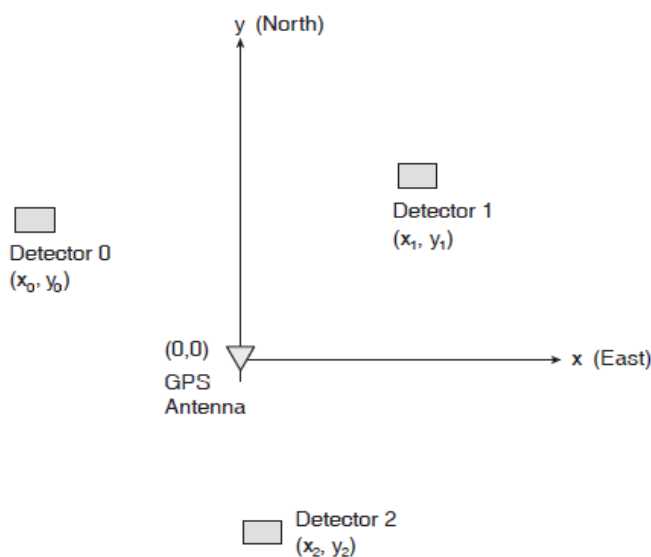
alebo kalibračný ( $c$ ), v druhom nasleduje čas z GPS vo formáte *rrrrmmddhhmmss*, čiže rok, mesiac, deň, hodina, minúta a sekunda.

Stĺpec za tým obsahuje desatinné číslo, ktoré určuje koľko nanosekúnd prebehlo od predchádzajúcej sekundy danej zo signálu GPS. Nasledujúcich 6 stĺpcov sa týka jednotlivých kanálov, konkrétne TDC0, TDC1, TDC2, ADC0, ADC1, ADC2. Každý TDC (time-to-digital converter) kanál odpovedá 25 ps; ADC (analog-to-digital converter) zase 0,4 pC.

Posledné štyri stĺpce udávajú teplotu v stupňoch Celzia v detektoroch 0, 1, 2 a „škatuľi“ s elektronikou.

### 3.2.1 Súradnicové systémy

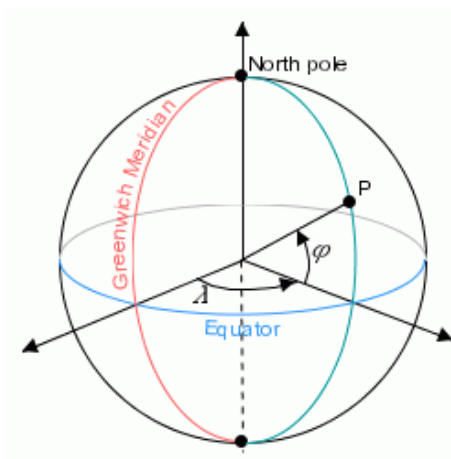
Pri ďalšej analýze údajov je nutné zaviesť presné súradnicové systémy, ktoré nám umožnia okrem iného i porovnávať výsledky s ostatnými stanicami rozmiestnenými po celom svete. V prvom rade sa zameriame na presný popis sústavy detektorov umiestnených na streche. Poloha detektora 0 až 2 je popísaná súradnicami  $x$  a  $y$  v sústave spojenjej s GPS v počiatku.  $x$ -ová os smeruje na východ,  $y$ -ová ku geografickému severu. Bohužiaľ, pri určovaní severu nemôžeme dosiahnuť presnosť väčšiu ako  $4^\circ - 5^\circ$ , pretože merania magnetickým kompasom závisia na lokálnom magnetickom poli a prevode hodnôt z magnetického severu do geografického. Lokálne magnetické pole sa môže v závislosti od polohy na streche meniť aj v desiatkach stupňov. Navyše, určovanie polohy pomocou GPS je tiež v ráde niekoľkých metrov, čo do meraní vnáša príliš veľké nepresnosti vzhľadom na malé rozmery vzdialenosti oddeľujúcej od seba jednotlivé detektory.



Obr. 3.4: Súradnicový systém spojený s detektormi na streche

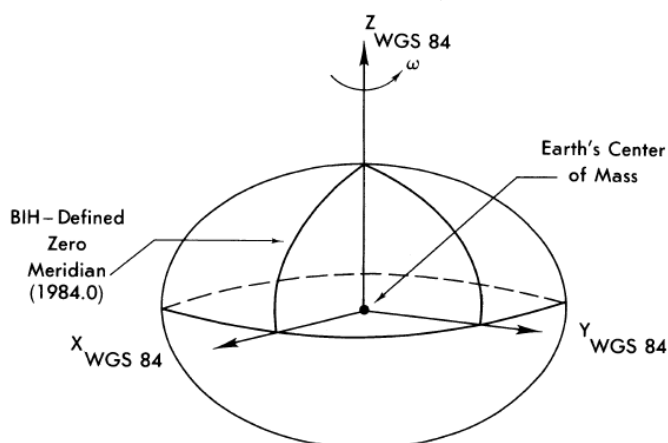
### Zemepisné súradnice

Zemepisné súradnice slúžia na presné určenie polohy nejakého miesta na Zemi. Súradnicový systém je sférický s počiatkom v strede Zeme. Zemepisná šírka  $\varphi$  určuje uhlovú vzdialenosť miesta od rovníka, zemepisná dĺžka  $\lambda$  určuje uhlovú vzdialenosť od nultého poludníka. Za nultý poludník je zvolený poludník prechádzajúci Greenwichom (Veľká Británia).

Obr. 3.5: Zemepisné súradnice: zemepisná šírka  $\varphi$ , zemepisná dĺžka  $\lambda$ 

Ďalšie parametre týkajúce sa tvaru zeme popisuje Svetový geodetický systém (WGS84) z roku 1984. Je to geodetický štandard definujúci súrdanicový systém a referenčný elipsoid parametrami:

- dĺžka hlavnej poloosi:  $a = 6378137$  m
- dĺžka vedľajšej poloosi:  $b = 6356752,3142$  m
- prevrátená hodnota sploštenia:  $f = 1 - \frac{b}{a}$ ;  $1/f = 298,257223563$
- uhlová rýchlosť Zeme:  $\omega = 7,292115 \cdot 10^{-5}$  rad/s
- gravitačný parameter:  $GM = (3986004,418 \pm 0,008) \cdot 10^8 \text{m}^3/\text{s}^2$
- excentricita:  $e = 8,1819190842622 \cdot 10^{-2}$



Obr. 3.6: Definícia parametrov v rámci sústavy WGS84

Navyše, je nutné rozlišovať medzi dvomi veličinami popisujúcimi zemepisnú dĺžku. Je rozdiel, ak uvažujeme o uhle, ktorý zvierá úsečka prechádzajúca daným bodom a stredom Zeme s rovinou

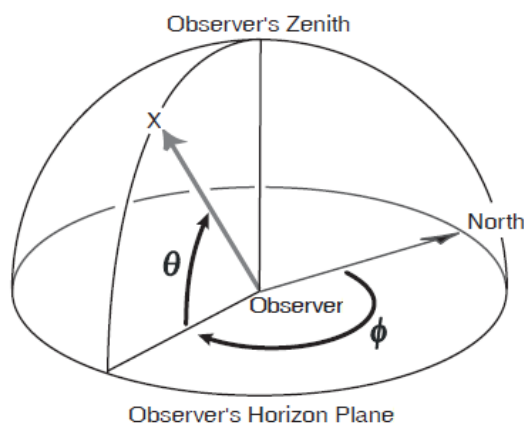
rovníka, vtedy hovoríme o *geocentrickej dĺžke*  $\lambda_c$ . Naproti tomu, *geografická dĺžka*  $\lambda_g$  je uhol, ktorý zvierá kolmica vedená na povrch Zeme z daného bodu s rovinou rovníka. Je to práve geografická dĺžka, ktorú sme schopní na povrchu Zeme odmerať, práve tak nám tento údaj poskytuje i GPS. Keďže nás zaujíma vzájomná vzdialenosť dvoch ľubovoľných staníc, musíme zaviesť prevod medzi obomi dĺžkami v tvare:

$$\tan \lambda_c = \frac{b^2}{a^2} \tan \lambda_g. \quad (3.1)$$

### Obzorníkové súradnice

V astronómii, samozrejme, nie je výhodné na určovanie polohy daného bodu použiť zemepisné súradnice. Je preto definovaných niekoľko astronomických súradnicových sústav, ktoré si ďalej priblížime. Každá sústava je presne popísaná základnou rovinou a základným smerom v nej. V prípade obzorníkovej súradnicovej sústavy je tou základnou rovinou horizontu a základným smerom smer k južnému bodu miestneho poludníka, nazývaného meridián. Rovina horizontu je daná rovinou prechádzajúcou miestom pozorovateľa a s nebeskou klenbou sa pretína v kružnici nazývanej miestny horizont.

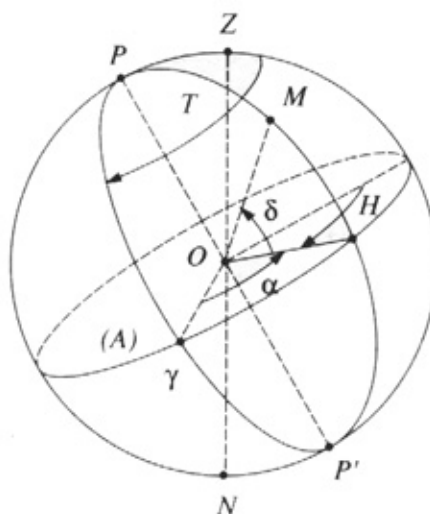
V obzorníkovej sústave meriame súradnice *azimut*  $\phi$  – uhol meraný v stupňoch od meridiánu na západ a *výšku nad obzorom*  $\theta$  – uhol medzi dotyčnicovou rovinou v mieste pozorovateľa s týmto miestom. Obvykle je však výhodné merať doplnkovú veličinu k výške nad obzorom, tzv. *zenitovú vzdialenosť*, ktorú určíme jednoducho ako  $90^\circ - \theta$ .



Obr. 3.7: Obzorníkový súradnicový systém

### Rovníkové (ekvatoreálne) súradnice I. druhu

Ďalšou užitočnou astronomickou súradnicovou sústavou je rovníková prvého druhu. V nej je základnou rovinou rovina zemského rovníka, ktorá je kolmá na zemskú os a prechádza miestom pozorovateľa. Základný smer je daný priesečnicou základnej roviny s meridiánom. V tejto sústave meriame dĺžku pomocou *hodinového uhla*  $H$  v hodinách smerom na západ a šírku pomocou *deklinácie*  $\delta$ . Meria sa v stupňoch a meriame ňou uhol medzi daným bodom na sfére a základnou rovinou.



Obr. 3.8: Rovníkový súradnicový systém I. a II. druhu

### Rovníkové (ekvatoreálne) súradnice II. druhu

Základnou rovinou zostáva rovina zemského rovníka, no rozdiel oproti súradniciam I. druhu je v základnom smere. Ten je určený priesečnicou základnej roviny s rovinou ekliptiky a smeruje k *jarnému bodu*. Táto sústava je pravotočivá a polohu na sfére meriame pomocou súradníc: dĺžkovej *rektascenzie*  $\alpha$  – od základného smeru na východ v hodinách, šírkovej *deklinácie*  $\delta$  – uhol určený daným bodom a základnou rovinou, meria sa v stupňoch.

### Galaktické súradnice

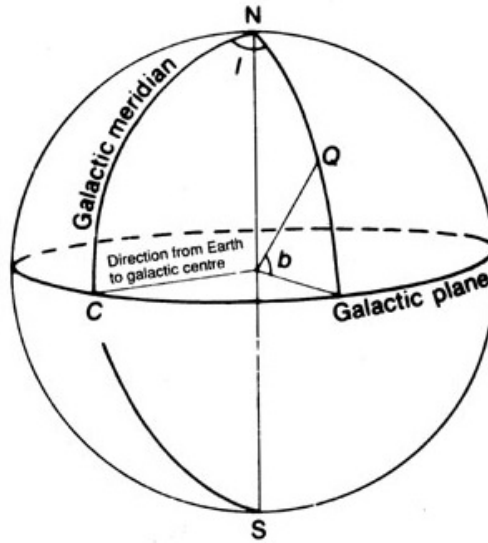
Keďže nás zaujímajú javy, ktoré sa nedejú priamo na oblohe, ale ich pôvod je niekde v galaxii, je výhodné použiť na meranie polohy galaktický súradnicový systém. Základnou rovinou sústavy je rovina Galaxie. S rovinou zemského rovníka zvierá uhol  $i = 62,6^\circ$ . Ľubovoľnú polohu v nej udávajú dva uhly: *galaktická dĺžka*  $l$  a *galaktická šírka*  $b$ . Základným smerom je smer ku galaktickému centru presne daný pre ekvinokcium 2000:  $\alpha = 17^h 45^m 37^s$ ,  $\delta = -28^\circ 56' 10''$ . Galaktickú dĺžku meriame od základného smeru na východ, galaktickú šírku určuje uhol medzi základnou rovinou a pozorovaným bodom.

### 3.2.2 Prevody jednotlivých súradníc

V nasledujúcom kroku nám zostáva už iba presne definovať prevody medzi jednotlivými súradnicovými systémami. V prvom rade musíme transformovať miestny čas príchodu kaskády častíc do obzorníkovej sústavy. Pri ďalších výpočtoch zároveň musíme stanoviť základné predpoklady, ako to, že spŕška sa k nám pohybuje rýchlosťou svetla vo vákuu, čelo kaskády je tvorené rovinou a je kolmá na os prechádzajúcu spŕškou.

Z geometrie vieme, že akúkoľvek rovinu možno popísať všeobecnou rovnicou roviny obsahujúcou ľubovoľný bod  $P_0(x_0, y_0, z_0)$ :

$$A(x - x_0) + B(y - y_0) + C(z - z_0) = 0. \quad (3.2)$$



Obr. 3.9: Galaktický súradnicový systém

Parametre  $A, B, C$  udávajú normálový vektor roviny  $\vec{n} = (A, B, C)$ . Označme  $d_i$  vzdialenosť bodu  $P_i$  od roviny, potom pre ňu platí:

$$d_i = \frac{A(x_i - x_0) + B(y_i - y_0) + C(z_i - z_0)}{|\vec{n}|}, \quad (3.3)$$

kde  $(x_i, y_i, z_i)$  sú súradnice bodu  $P_i$ ,  $|\vec{n}|$  je veľkosť normálového vektora. Súradnice každého detektora potom definujeme pomocou vektorov:

$$\begin{aligned} P_0 &= (x_0, y_0, 0), \\ P_1 &= (x_1, y_1, 0), \\ P_2 &= (x_2, y_2, 0). \end{aligned} \quad (3.4)$$

Definujme rovinu kaskády dopadajúcu k detektoru 0 ako:

$$A(x - x_0) + B(y - y_0) + C(z) = 0, \quad (3.5)$$

pričom ak vezmeme do úvahy, že žiarenie sa pohybuje rýchlosťou svetla vo vákuu, môžeme pre parametre  $A, B, C$  písať:  $\vec{c} = (A, B, C)$ . Pre vzdialenosť bodu  $[x_i, y_i, z_i]$  od tejto roviny potom platí vzťah:

$$d_i = \frac{A(x_i - x_0) + B(y_i - y_0) + C(z_i)}{c}. \quad (3.6)$$

Teraz môžeme jednoducho vypočítať vzdialenosť k jednotlivým detektorom. Je zřejmé, že:

$$\begin{aligned} d_0 &= 0, \\ d_1 &= \frac{A(x_1 - x_0) + B(y_1 - y_0)}{c}, \\ d_2 &= \frac{A(x_2 - x_0) + B(y_2 - y_0)}{c}. \end{aligned} \quad (3.7)$$



Pre parametre A a B s využitím predchádzajúcich vzťahov možno napísať vzťahy:

$$A = c \frac{d_2 - d_1 \frac{y_2 - y_0}{y_1 - y_0}}{(x_2 - x_0) - (x_1 - x_0) \frac{y_2 - y_0}{y_1 - y_0}},$$

$$B = c \frac{d_2 - d_1 \frac{x_2 - x_0}{x_1 - x_0}}{(y_2 - y_0) - (y_1 - y_0) \frac{x_2 - x_0}{x_1 - x_0}}. \quad (3.8)$$

Vzdialenosť roviny od jednotlivých detektorov s použitím časov dopadu spršky na ne  $t_0, t_1, t_2$  je:

$$d_i = c(t_i - t_0); i = 0, 1, 2. \quad (3.9)$$

Jednotlivé vzdialenosti môžeme dosadiť do vyššie uvedených rovníc a odtiaľ vypočítame hodnoty pre A a B v závislosti na polohe detektorov a čase dopadu kaskády na ne. Veličiny A a B však možno vyjadriť i pomocou obzorníkových súradníc a to v tvare:

$$A = c \cos \theta \sin \phi,$$

$$B = c \cos \theta \cos \phi. \quad (3.10)$$

Pre azimut  $\phi$  platí:

$$\tan \phi = \frac{A}{B}. \quad (3.11)$$

Takto po dosadení veličín A a B dostaneme azimut v závislosti na polohe detektora a čase. Problémom je určenie kvadrantu, z ktorého pochádzajú hodnoty azimutu. Aby pokryl celú oblohu, jeho hodnoty musia patriť do intervalu  $(0, 2\pi)$ . Vieme ale, že po výpočte funkcie  $\arctan \phi$  jeho hodnoty spadajú do intervalu  $(-\pi/2, \pi/2)$ . Tento fakt vyplýva z nejednoznačnosti určenia pomeru  $A/B$ , pretože:  $A/B = (-A)/(-B)$ . Riešenie je prosté: musíme vziať do úvahy len poradie, v ktorom sprška dopadla na jednotlivé detektory. Potom možno riešenia rovnice vziať z kvadrantu  $(0, 2\pi)$ .

Výšku nad obzorom  $\theta$  vypočítame ako:

$$\cos \theta = \sqrt{\frac{A^2 + B^2}{c^2}}. \quad (3.12)$$

Výška nad obzorom bude vždy pochádzať z intervalu  $(0, \pi/2)$ , pretože odmocnina je vždy kladné číslo. Fyzikálne z toho vyplýva, že nie sme schopní určiť, či kaskáda častíc dopadla na detektor zhora alebo zdola. Logicky je však zrejmé, že dopad častíc sa uskutočňuje vždy zvrchu.

Ďalší postup pri analýze údajov počíva v prevode obzorníkových súradníc na rovníkové. K tomu potrebujeme informáciu o zemepisnej geografickej dĺžke  $\lambda_g$  a šírke  $\phi$  miesta pozorovania. Navyše, musíme zistiť časové údaje: UTC (*Coordinated Universal Time*) a okamih dopadu spršky na detektor. Využijeme rovníkové súradnice II. druhu, kde pre deklináciu platí:

$$\sin \delta = \sin \theta \sin \lambda_g + \cos \theta \cos \lambda_g \cos \phi. \quad (3.13)$$

S rektascenziou to nebude také priamočiare, pretože k jej výpočtu potrebujeme ešte znalosť hodinového uhla  $H$  z rovníkových súradníc I. druhu. Pre hodinový uhol platí vzťah:

$$\cos H = \frac{\sin \theta - \sin \lambda_g \sin \delta}{\cos \lambda_g \cos \phi}. \quad (3.14)$$

Odtiaľ je už prepočet na rektascenziu jednoduchý:

$$\alpha = LST - H, \quad (3.15)$$

kde  $LST$  je miestny siderický (hviezdny) čas (*Local Siderial Time*). Podstatným rozdielom medzi obomi časmi je v tom, že UTC sa vzťahuje k Slnku a siderický čas ku hviezdám. Hviezdny čas vypočítame pomocou vzťahu:

$$LST = LST_0 + 1,0027379093(T_p - 1) + \lambda_g. \quad (3.16)$$

Venujme sa jednotlivým výrazom v tomto vzťahu.  $LST_0$  je hodinový uhol jarného bodu pre Greenwichský poludník. Jeho hodnota je tabelovaná v astronomickej ročenke pre polnoc v UTC. Číslo 1,0027379093 udáva o koľko hviezdny deň predbieha ten slnečný.  $T_p$  označuje pásmový čas a pre naše zemepisné pásmo platí časový posun +1 hodina (zimný čas; pre letný +2 hodiny). Posledný člen  $\lambda_g$  označuje geografickú dĺžku miesta pozorovania.

Konečne sa dostávame k tomu, čo nás primárne zaujíma, teda k určeniu miesta príchodu kozmického žiarenia v rámci Mliečnej cesty. Na to budeme potrebovať previesť rovníkové súradnice na galaktické. Transformácia súradníc je nasledovná:

$$\begin{aligned} b &= \sin^{-1}(\cos \delta \cos 27,4^\circ \cos(\alpha - 192,25^\circ) + \sin \delta \sin 27,4^\circ), \\ l &= \tan^{-1} \left( \frac{\sin \delta - \sin b \sin 27,4^\circ}{\cos \delta \sin(\alpha - 192,25^\circ) \cos 27,4^\circ} \right) + 33^\circ, \end{aligned} \quad (3.17)$$

pričom platí predchádzajúce označenie, kde  $b$  je galaktická šírka,  $l$  galaktická dĺžka.

x	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
a	2014	09	11	09	33	37	83	104	165.5	530	1574	3744	972	332	236	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
a	2014	09	11	09	34	01	69	792	4970.3	1084	2006	3749	1120	1841	2047	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
c	2014	09	11	09	34	08	970.0		4095	724	3745	1064	1245	417	350	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a	2014	09	11	09	34	33	25	2430	480.3	485	1253	3744	551	417	350	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
c	2014	09	11	09	35	08	895.0		4095	868	3725	1086	1223	1114	1114	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a	2014	09	11	09	35	14	58	696	8046.9	1202	1758	3753	504	736	712	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a	2014	09	11	09	35	22	89	147	036.7	1035	1607	3747	144	269	256	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a	2014	09	11	09	35	30	22	327	1798.7	462	1903	3744	663	216	153	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 3.2: Příklad udalostí z data 11. 9. 2014

## Kapitola 4

### Príklad

V predchádzajúcej kapitole sme si uviedli všetky potrebné definície nutné pri rekonštrukcii pozorovanej polohy zdroja kozmického žiarenia. Pozrime sa teraz na jednu konkrétnu udalosť a pokúsme sa vykresliť ju na mapu oblohy. K dispozícii máme údaje o dopade spŕšok na stránke <http://czelta.utef.cvut.cz/download.php?source=alta>, kde si môžeme vybrať dáta z rôznych detekčných staníc a zvoliť si ľubovoľný deň, či viac dní, ktoré nás zaujímajú. Získame tak textový súbor so štruktúrou popísanou v predchádzajúcej kapitole. Nás budú predovšetkým zaujímať stĺpce s údajmi z kanálov TDC0, TDC1 a TDC2. Upozorňujem, že je nutné vziať do úvahy korekciu na stredný čas každého detektoru. Jedná sa o to, že kým prebehne prenos a spracovanie signálov z detektorov, uplynie určitá doba. Preto musíme od každého TDC0 až 2 odčítať medián všetkých nameraných časov. Nové hodnoty TDC upravíme z násobkov 25 ps na sekundy a potom pristúpime k výpočtu vzdialeností detektorov podľa vzorca (3.9). Výsledky, samozrejme, budú v metroch. Na ilustráciu, vyberme si údaje z kanadskej stanice Laurent pre deň 29.9.2005. Niekoľko prvých udalostí je zaznamenaných v tabuľke 4.1.

rok	mesiac	deň	hodina	minúta	sekunda	nanosekundy	TDC0	TDC1	TDC2
2005	9	29	5	23	17	143299496	3211	3709	3770
2005	9	29	5	23	17	424144689.5	3804	3132	3462
2005	9	29	5	23	54	603294654.6	3497	3773	3408
2005	9	29	5	24	28	516058063	4095	3761	3472
2005	9	29	5	24	32	931693802.5	3543	3709	3771

Tab. 4.1: Dáta pre 5 udalostí na stanici Laurent z dňa 29.9.2005

Aby sme mohli postúpiť k ďalšiemu spracovaniu, je nutné získať informáciu o presnej pozícii detektorov na stanici v miestnom súradnicovom systéme. Trojuholník detektorov je orientovaný vždy nasledovne:  $x$ -ová os smeruje od západu na východ,  $y$ -ová os od juhu na sever. Súradnice  $(x, y, z)$  pre vybrané stanice sú v tabuľke 4.2. Zvýraznené hodnoty zodpovedajú súradniciam pre náš príklad.

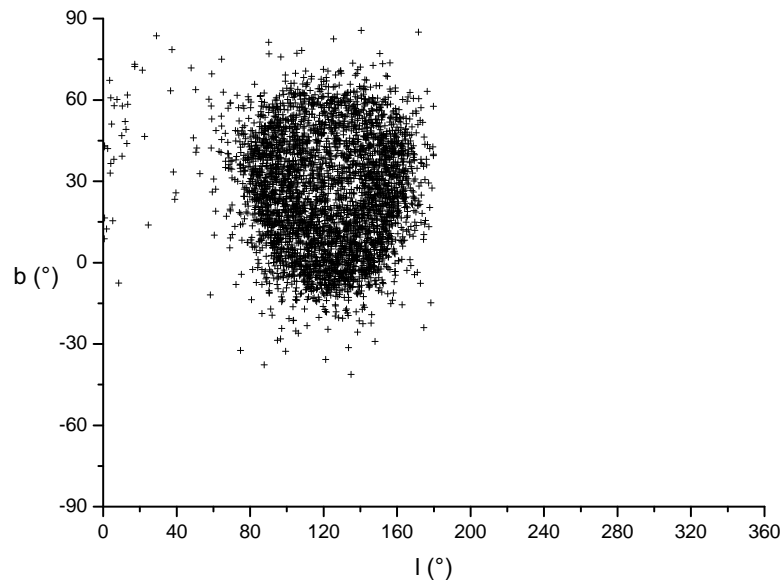
Zo znalosti súradníc detektorov a vzájomných vzdialeností medzi nimi môžeme vypočítať parametre A a B podľa vzťahov (3.8). Vypočítané parametre dosadíme do vzorcov pre azimut a výšku nad obzorom, čím dostaneme polohy vyjadrené v obzorníkovej sústave.

Aby sme boli schopní pokračovať v ďalších výpočtoch, je nutné získať informácie o GPS súradniciach miesta pozorovania. V tabuľke 4.3 sú zaznamenané polohy vybraných staníc. Následne GPS údaje využijeme pri výpočte rovníkových súradníc zo vzťahov (3.13) a (3.15).

Tabuľka 4.4 zobrazuje konkrétne hodnoty vypočítané pre náš príklad. Zdôrazňujem, že je nutné

všetky uhly dosadzovať v radiánoch a takisto treba vziať pri výpočte hviezdneho času do úvahy informáciu o letnom čase a dátumu nástupu jesennej rovníkovej rovníkovej, keďže  $LST_0$  je definovaný ako hodinový uhol jarného bodu. Okrem toho, musíme mať na pamäti, že v ročenkách je jeho hodnota daná pre poľnoc. V našom konkrétnom prípade jesenná rovníkovej nastala 23.9.2005 a pre deň 29.9.2005 k poľnoci bude  $LST_0 = 0,407869$  h .

Dostávame sa takmer na koniec, posledným krokom je už len previesť rovníkové súradnice na galaktické definované pomocou (3.17). Následne vybrané udalosti v týchto súradniciach zakreslíme na mapu oblohy, kde môžeme vidieť, odkiaľ k nám jednotlivé častice prišli.

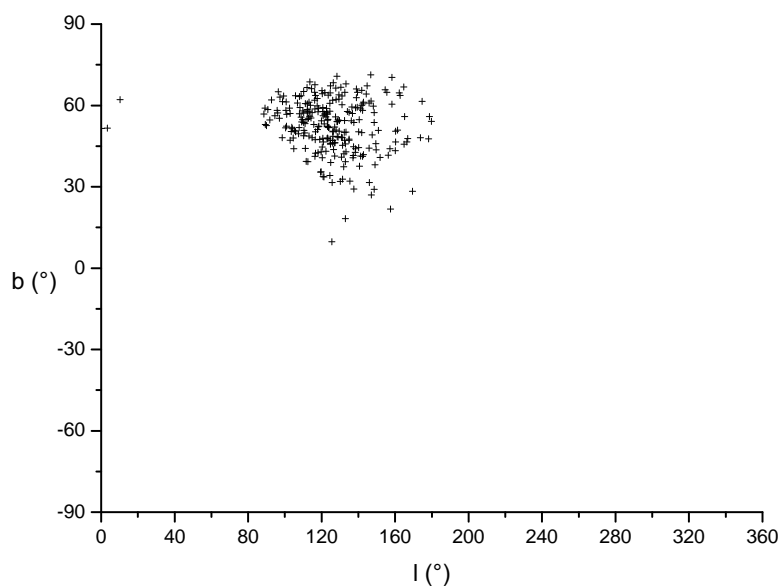


Obr. 4.1: Sprška častíc na stanici Laurent Kanada z dňa 29.9.2005 vynesená do grafu v závislosti na galaktických súradniciach

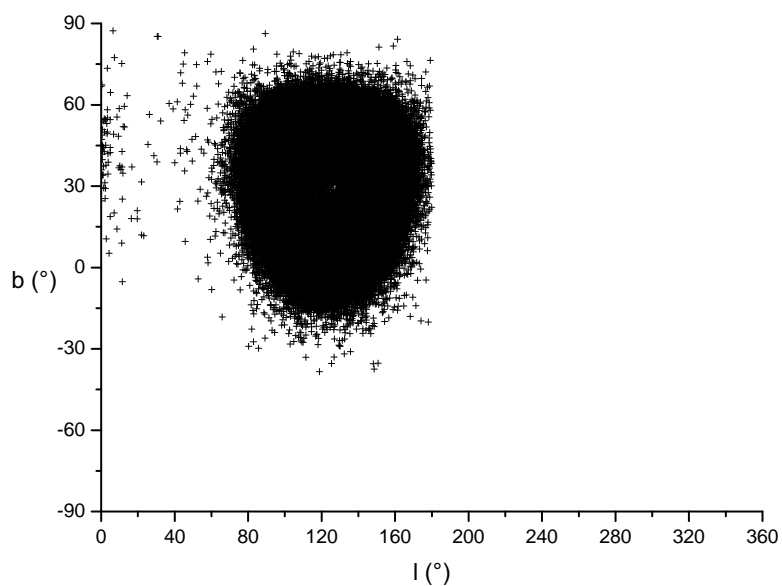
Považujem za vhodné uviesť si aj príklad týkajúci sa práve merania z Masarykovej univerzity. Na ilustráciu si zvolíme údaje z dňa 27.9.2013 v rozpätí šiestich hodín. Pri analýze postupujeme rovnakým spôsobom ako v prípade kanadskej stanice Laurent. Budeme potrebovať informácie o polohe detektorov v miestnom súradnicovom systéme a GPS súradnice. Nájdeme ich rovnako v tabuľkách 4.2 a 4.3. Vypočítame polohy spršok postupne v obzorníkových, rovníkových a galaktických súradniciach a posledné menované zaznamenáme do mapy oblohy.

V záujme štatistiky je rozumné spracovať pozorovania niekoľkých dní a nesústrediť sa na krátke časové obdobie. Z dostupných údajov vyberme najdlhší súvislý meraný časový úsek, konkrétne udalosti, ktoré nastali medzi 30.10.2013 a 6.12.2013, teda merania nadobudnuté za viac ako mesiac. Výsledky rovnako znázorníme do mapy oblohy v galaktických súradniciach.

Z uvedených príkladov je zrejmé, že meranie času pri výpočtoch zohráva významnú úlohu. Dovoľujem si znovu poznamenať, že časové údaje TDC0 až 2 z jednotlivých detektorov je nutné opraviť o korekciu na stredný čas, pretože zariadeniu trvá určitú dobu, pokiaľ sa zachytený signál spracuje. Ako tento fakt ovplyvňuje samotné výsledky? To zistíme, ak si pomocou histogramu znázorníme závislosť počtu udalostí na časovom oneskorení. Z histogramov pre jednotlivé detektory možno usúdiť, že najviac eventov bude patriť do intervalu, ktorý pripadá nulovej, respektíve

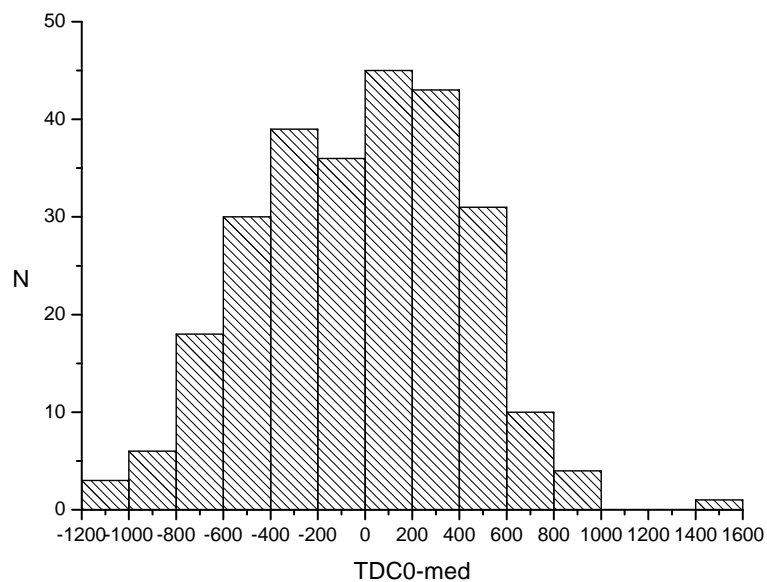


Obr. 4.2: Spřška částic na stanici MU Brno z dne 27.9.2013 vynesena do grafu v závislosti na galaktických súradniciach

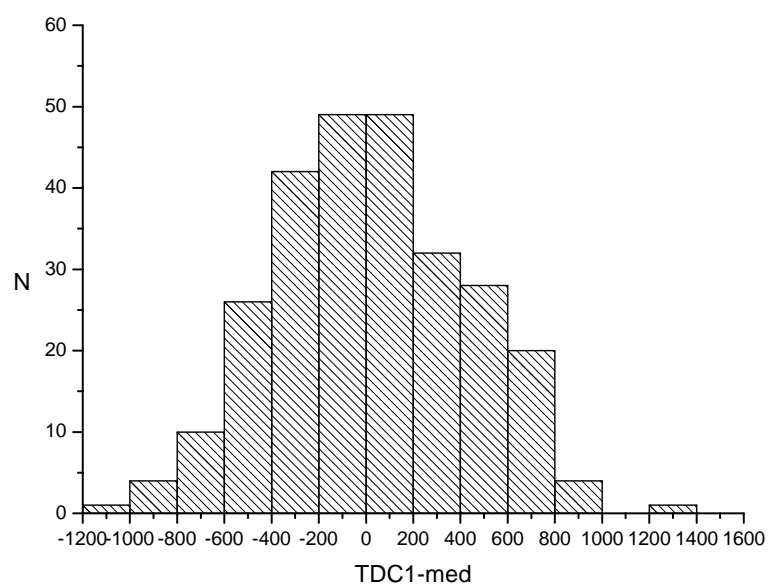


Obr. 4.3: Všetky zaznamenané udalosti za obdobie 30.10. – 6.12.2013 vynesené v galaktických súradniciach

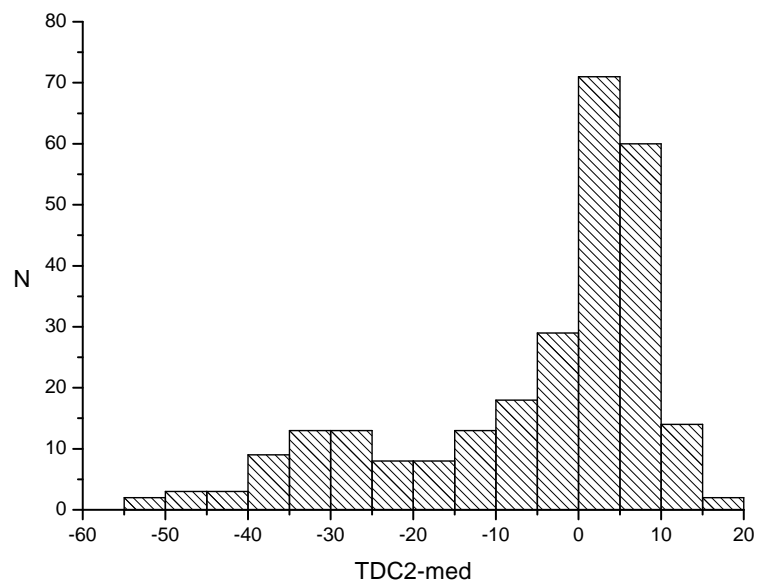
minimálnej odchýlke od stredného času. Smerom k väčším odchýlkam tieto počty klesajú. Na prvý pohľad možno pôsobí zvláštne graf pre tretí detektor, kde je oneskorenie veľmi malé. Tento jav pripisujeme spôsobu konštrukcie detektora (v porovnaní s ostatnými dvomi má kratšie vedenie, preto oneskorenie nie je také výrazné).



Obr. 4.4: Histogram pre detektor 0, udalosti z dňa 27.9.2013



Obr. 4.5: Histogram pre detektor 1



Obr. 4.6: Histogram pre detektor 2



Detekční stanice	$x_0$ [m]	$y_0$ [m]	$z_0$ [m]	$x_1$ [m]	$y_1$ [m]	$z_1$ [m]	$x_2$ [m]	$y_2$ [m]	$z_2$ [m]
<b>MU Brno</b>	<b>1.062</b>	<b>4.424</b>	<b>0</b>	<b>-7.096</b>	<b>-0.878</b>	<b>0</b>	<b>1.561</b>	<b>-5.864</b>	<b>0</b>
UTEF Praha	0	0	0	-6.403	-7.907	0	3.602	-9.286	0
SU Opava	0	0	0	3.84	9.23	0	-6.16	7.90	0
Gymnázium Pardubice	0	0	0	-1.811	9.869	0	7.672	5.636	0
Mendelovo gymnázium Opava	0	0	0	0.36	9.97	0	9.56	3.56	0
Kladno	0	0	0	-8.620	4.955	0	-0.139	10.017	0
SU2 Testovací stanice Opava	0	0	0	-7.79	6.17	0	-9.72	-3.56	0
Opava ZBSN	0.354	0.668	0	-0.989	-9.15	0	8.036	-5.671	0
<b>Kanadské stanice</b>									
O' Leary	-7.548	7.461	0	7.592	7.540	0	-0.047	1.636	0
O' Brien	-9.449	3.895	0	-0.682	-1.435	0	-9.82	-6.233	0
Trinity	-7.354	6.575	0	0.237	0.384	0	-9.588	-3.177	0
MacDonald	1.394	2.210	0	6.659	-8.585	0	-3.760	-9.058	0
Maddock	0.000	0.320	0	7.807	6.557	0	9.273	-3.370	0
Thorhild	10.567	0.557	0	5.357	-8.218	0	0.473	0.629	0
Gprairie	-8.666	-0.495	0	0.686	-0.581	0	-5.101	-8.694	0
Vegreville	-3.634	7.809	0	6.408	7.774	0	1.425	-0.856	0
Physroofe	3.867	0	0	3.8705	-9.98	0	3.0075	-5.038	0
<b>Laurent</b>	<b>11.549</b>	<b>0.341</b>	<b>0</b>	<b>1.499</b>	<b>0.253</b>	<b>0</b>	<b>6.566</b>	<b>8.971</b>	<b>0</b>
Page	8.439	6.728	0	-0.115	1.568	0	8.474	-3.372	0
McNally	0.008	1.58	0	-0.045	-8.455	0	-8.699	-3.286	0
Beaumont	-0.751	1.292	0	-4.717	10.543	0	-10.437	2.219	0

Tab. 4.2: Tabuľka súradníc detektorov vybraných staníc v ČR a Kanade

Detekční stanice	zemepisná šířka [°]	zemepisná délka [°]	nadmorská výška [m]
<b>MU Brno</b>	<b>49.204239</b>	<b>16.596859</b>	
UTEF Praha	50.0673815	14.4229437	258.83
SU Opava	49.9379083	17.8977584	326.60
Gymnázium Pardubice	50.0359507	15.7894172	284.18
Mendelovo gymnázium Opava	49.9384055	17.9073715	321.74
Kladno	50.1404958	14.1009331	446.18
SU2 Testovacia stanica Opava	49.9379083	17.8977584	326.60
Kanadské stanice			
O' Leary	53.59267	-113.475	689.26
O' Brien	53.53547	-113.427	670.35
Trinity	53.45751	-113.443	692.64
MacDonald	53.55284	-113.567	686.45
Maddock	53.21834	-114.964	870.01
Thorhild	54.15318	-113.112	655.85
Gprairie	55.18227	-118.810	668.30
Vegreville	53.49890	-112.074	642.11
Physroofe	53.52816	-113.526	702.72
<b>Laurent</b>	<b>53.47949</b>	<b>-113.523</b>	<b>690.59</b>
Page	53.45676	-113.446	694.37
McNally	53.54846	-113.459	668.69
Beaumont	53.34892	-113.423	725.12

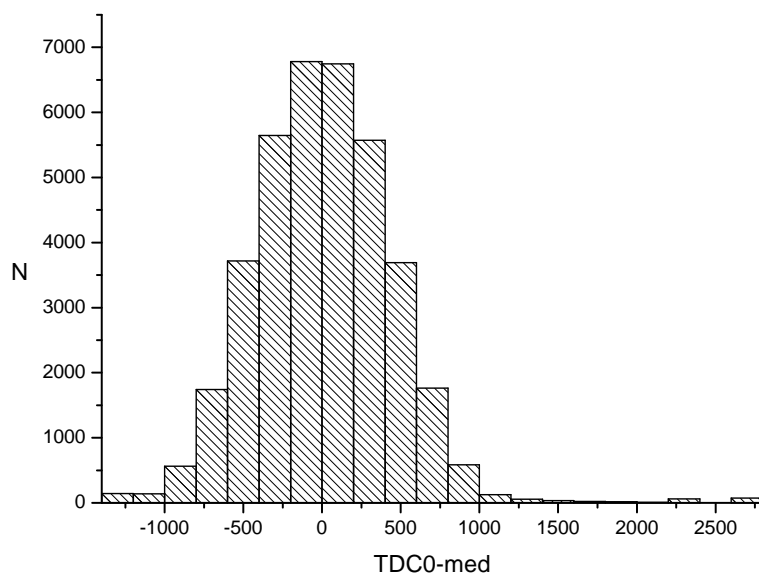
Tab. 4.3: Tabuľka GPS súradníc vybraných staníc v ČR a Kanade

$d_2$ [m]	$d_1$ [m]	$\theta$ [°]	$\phi$ [°]	LST [h]	$\alpha$ [h]	$\delta$ [°]
4.1895995	3.7324161	62.556388	-54.1886452	22.24247656	18.89599	60.889974
-2.5632255	-5.0365132	59.91593	-89.129994	22.24247656	19.271273	44.420198
-0.66703820	2.0685679	73.596599	46.286525	22.2527824803	20.503306	62.507382
-4.6692675	-2.5032670	62.028889	-32.57743	22.2622527828	18.893668	70.904068
1.7088170	1.24413870	79.785333	-44.772575	22.2633669360	21.299689	59.977193

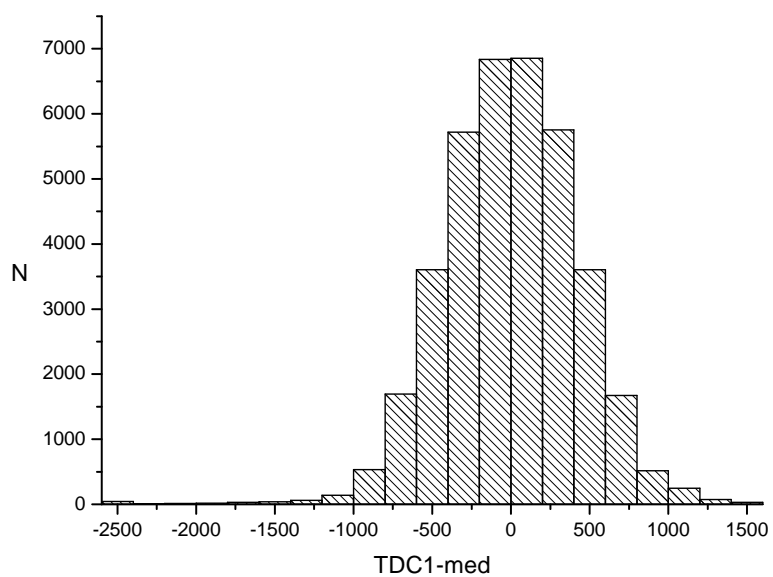
Tab. 4.4: Vzdialenosti detektorov, obzorníkové a rovníkové súradnice na stanici Laurent pre 5 udalostí

$b$ [°]	$l$ [°]
23.15	91.06
14.29	75.96
13.48	97.58
25.41	101.77
7.45	99.32

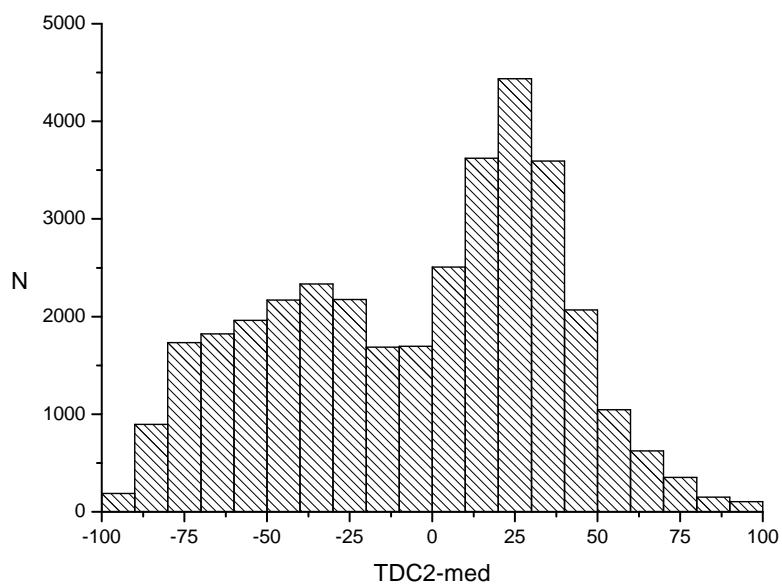
Tab. 4.5: Galaktické súradnice pre 5 udalostí na stanici Laurent



Obr. 4.7: Histogram pre detektor 0, udalosti za obdobie 30.10. – 6.12.2013



Obr. 4.8: Histogram pre detektor 1, udalosti za obdobie 30.10. – 6.12.2013



Obr. 4.9: Histogram pre detektor 2, udalosti za obdobie 30.10. – 6.12.2013

# Záver

Táto práca sa zaoberá štúdiom kozmického žiarenia, jeho popisu a javom, ktoré sú s ním spojené. Venuje sa predovšetkým atmosférickým časticovým sprškam a detekčným zariadeniam zachytávajúcim ich pohyb zemskou atmosférou. Dôraz kladie najmä na projekt CZELTA, ktorého súčasťou je Prírodovedecká fakulta Masarykovej univerzity od roku 2012. Jedným z cieľov bolo spracovanie údajov poskytnutých detektormi inštalovanými na streche budovy v areáli fakulty.

V prvom rade sme určili polohu dopadajúcich spršok v závislosti na galaktických súradniciach a zakreslili ich do hviezdnej mapy a to pre dve situácie. Najprv sme si náhodne vybrali údaje z jedného dňa po dobu 6 hodín a snažili sa stručne priblížiť postup pri ich spracovaní, ktorý by slúžil ako návod pre študentov.

V druhom prípade bolo zaujímavejšie sledovať, aké výsledky dostaneme zahrnutím väčšieho počtu pozorovacích dní. Z údajov dostupných online sme vybrali najdlhšie súvislé meranie, ktoré trvalo viac ako mesiac pozorovania. Výsledky sú rovnako zaznačené v galaktickej mape.

Analogicky, pre porovnanie výsledkov sa rovnako postupovalo pri analýze dát z vybranej stanice v kanadskom meste Laurent. Na oboch uvedených mapách je jasne zreteľná sférická oblasť, z ktorej časticové spršky pochádzajú. Navyše, možno na nej zhliaďnúť istú štruktúru bodov formujúcich sa do prstencu. Myslíme si, že vysvetlenie sa nachádza v spôsobe rozloženia detektorov, teda že plocha každého detektora je mierne inak naklonená voči dopadajúcemu žiareniu. Keďže sklon závisí na kosíne uhla dopadu, premietne sa tento fakt do prstencového tvaru.

Pri spracovávaní sme navyše zistili, že nemožno zanedbávať čas potrebný na prenos signálu z detektorov do centrálného počítača. Boli sme zvedaví, ako bude vypadáť závislosť počtu udalostí na veľkosti odchýlky od akéhosi stredného času. Najlepšie možno túto závislosť pozorovať v histograme vytvorenom pre väčšie množstvo dát, kde sa toto rozloženie veľmi blíži Gaussovmu rozdeleniu.

Možno sa na prvý pohľad môže zdať zbytočné skúmať kozmické žiarenie v takomto malom rozsahu, len pomocou pár detektorov. Najmä, keď sa zatiaľ ani po storočí výskumu vedcom nepodarilo uspokojivo vysvetliť mnoho otázok, ktoré sa pri štúdiu vynárajú. A to majú k dispozícii observatóriá priam obludných rozmerov! Veríme však, že krôčik po krôčku sa nám napokon podarí odhaliť dobre strážené tajomstvá vysokoenergetických častíc a to aj prispením jednotlivých študentov, ktorí sa do projektu prostredníctvom CZELTY môžu zapojiť. Ktovie, možno ten, kto vysvetlí napríklad pôvod kozmického žiarenia, či je jeho zdrojom mocná explózia, supermasívna čierna diera alebo i kolízie medzi dvomi galaxiami, pochádza práve z radov poslucháčov našej fakulty.

# Zoznam použitých zdrojov

- [1] A. Hamilton, *ALTA: Alberta Large Area Time Coincidence Array*, University of Alberta, Edmonton, Alberta, 2002.
- [2] M. Prouza, R. Šmída, *Svět nejvyšších energií*, *Vesmír* 87, 544, 2008.
- [3] J. W. Cronin, *Kosmické paprsky: nejenergetičtější částice ve vesmíru*, *Reviews of Modern Physics*, Vol. 71, No. 2., 1999 (preložila M. Boháčová).
- [4] K. H. Kampert, A. A. Watson, *Extensive Air Showers and Ultra High-Energy Cosmic Rays: A Historical Review*, *European Physical Journal*, 37 (3), 2012.
- [5] J. Janík, Z. Mikulášek, *Obecná astronomie*, str. 26–30, Masarykova univerzita, Brno, 2013.
- [6] M. Hák, *CZELTA: Od detekce kosmického záření k modelům superenergetických částic*, časopis *Zvěd*, elektronicky: <http://intranet.cvut.cz/zajemci-o-studium/jak-to-vidi-studenti/a-zved>.
- [7] M. Bustamante, G.D. Carrillo Montoya et al., *High-energy cosmic-ray acceleration*, 5th CERN - Latin-American School of High-Energy Physics, str.533-540, Recinto Quirama (Medellin), Antioquia, Colombia, 2009.
- [8] P. Beneš, K. Smolek, *CZELTA, základní přehled a popis technického vybavení*, příspěvek prednesený na pracovnej schôdzke projektu CZELTA, Pardubice, 2007.
- [9] J. Hrubý, *Čerenkovovo záření*, Jihočeská univerzita, České Budějovice, 2002.
- [10] Čerenkovovo žiarenie: [http://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cerenkovovo\\_z%C3%A1%C5%99en%C3%AD](http://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cerenkovovo_z%C3%A1%C5%99en%C3%AD).
- [11] Pierre Auger Observatory: <http://www.auger.org/>.
- [12] CZELTA: <http://www.utef.cvut.cz/czelta/czelta-en>.
- [13] HiRes: <http://www.cosmic-ray.org/about hires.html>.
- [14] CASA-MIA: <http://usparc.ihep.su/spires/find/experiments/www2?ee=CASA-MIA>.
- [15] Jakutsk: <http://eas.ysn.ru/index.php>
- [16] Telescope Array: <http://www.telescopearray.org/>.

Táto práca bola vysádzaná typografickým systémom L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.

