

Středoškolská odborná činnost 2007/2008

Obor 02 – fyzika

Vítězná práce celostátního kola ve Varnsdorfu

**Detekce vysokoenergetického
kosmického záření
CZELTA**

Autoři:

Jiří Slabý, Petr Šedivý, Petr Bouchner
Gymnázium Pardubice, Dašická 1083
530 03 Pardubice, 8. ročník

Konzultant:

RNDr. Vladimír Vícha
Gymnázium Pardubice

Upravená verze 13. 8. 2008

Pardubice, 2008
Pardubický kraj

Prohlašujeme tímto, že jsme soutěžní práci vypracovali samostatně pod vedením RNDr. Vladimíra Víchy a uvedli v seznamu literatury veškerou použitou literaturu a další zdroje včetně internetu.

V Pardubicích dne

podpisy autorů

Poděkování

Rádi bychom poděkovali všem, díky kterým projekt CZELTA existuje. Na jedné straně jsou to pracovníci Ústavu technické a experimentální fyziky ČVUT v Praze, kteří tento projekt vytvořili a nabídli naší škole spolupráci, poté nám poskytli svůj čas a byli našimi rádci a spolupracovníky. Za všechny jmenujme alespoň Ing. Stanislava Pospíšila, DrSc., Doc. Ing. Ivana Štekl, CSc., Ing. Karla Smolka, Ph.D., Ing. Petra Přidala. Na druhé straně poděkujeme vedení gymnázia zastoupeného paní ředitelkou Ing. Jitkou Svobodovou, které se zasadilo o realizaci projektu v Pardubicích.

Náš největší dík však patří panu RNDr. Vladimíru Víchovi, který je naším konzultantem a s nímž jsme měli tu možnost a čest spolupracovat na projektu, jenž nás všechny uchvátil a fascinoval.

Anotace

Předmětem naší práce byla detekce vysokoenergetického kosmického záření, které je díky mnoha nezodpovězeným otázkám v popředí zájmu fyziků na celém světě.

Nejdříve jsme se snažili pečlivě poznat aparaturu stanice projektu CZELTA. Změřili jsme podstatné údaje o poloze a orientaci, které jsme po náročné teoretické práci použili na vytvoření algoritmů pro výpočet souřadnic příchozích spršek sekundárního kosmického záření. Udělali jsme několik druhů zobrazení koule – oblohy – do roviny. Vytvořili jsme podklady, které by mohly pomoci efektivně nastavit prodlužovací kabely u dalších stanic CZELTA.

Vyvodili jsme obecné závěry ohledně příchodů spršek na povrch Země – údaje vztahující se k závislosti počtu spršek na meteorologických veličinách (zvláště tlaku), analyzovali jsme směry, odkud spršky přicházejí – jak v souřadnicích obzorníkových, tak i rovníkových.

Zaměřili jsme se i na detailnější analýzu dat a ukázali jsme, jakým způsobem lze v datech hledat a vyhodnocovat spršky, které by mohly být zajímavé z hlediska vyhledání potenciálního zdroje – gama výtrysky, spršky v krátkém časovém sledu z blízkých míst na obloze.

Na závěr jsme uvedli, jak by se mělo v projektu pokračovat.

Hodnocení práce studentů Jiřího Slabého, Petra Šedivého a Petra Bouchnera vypracované v rámci středoškolské odborné činnosti 2007/2008 s názvem:

Detekce vysokoenergetického kosmického záření CZELTA

Práce studentů Jiřího Slabého, Petra Šedivého a Petra Bouchnera se zabývá studiem kosmického záření pomocí detektorů na stanici Gymnázia Pardubice, která je součástí systému projektu CZELTA. Projekt je zaměřen na detekci spršek sekundárních částic, které vznikají interakcí částic s velmi vysokou energií s jádry v atmosféře. Je to velice aktuální téma, protože původ těchto částic je stále do značné míry záhadou. K detekci sekundárních částic se využívá trojice scintilačních detektorů, které jsou v daném případě umístěny na střeše Gymnázia Pardubice. Nedílnou součástí stanice je GPS systém pro určení přesného času spršky a hledání spršek, které zasáhnou i jiné stanice. Daly by se tak identifikovat spršky způsobené částicemi s velmi vysokou energií. Další důležitou částí je meteorologická stanice, která umožňuje určovat stav atmosféry, který je ovlivňuje rozvoj spršky sekundárních částic.

Studenti provedli zaměření pozic detektorů a celkové orientace aparatury, které je nezbytné pro určování směru příchodu kosmické spršky jak v obzorníkových tak v rovníkových souřadnicích. S využitím literatury připravili potřebné algoritmy, které následně i otestovali. Jsou první, kteří v rámci stanic CZELTA připravili potřebný aparát pro určování rovníkových souřadnic. To je velmi důležitý krok pro využívání těchto stanic a pomůže to jejich pokračovatelům

Studenti si poradili i s problémy, které vznikají, když přichází signály ve velmi blízkém čase. Díky pravděpodobně špatné funkci bloku, který zpracovává časové signály, docházelo v tomto případě ke špatnému určení časových intervalů. Tato situace byla řešena posunem jednotlivých časových signálů vůči sobě. Studenti srovnali výsledky pro rozložení směru příchodu spršek před úpravou a po úpravě a ukázali, že přijaté řešení problém odstranilo. Studenti pak provedli velmi pečlivou analýzu dat měřených upraveným systémem a získali rozložení přicházejících spršek v závislosti na azimutu a vzdálenosti nad obzorem. V souladu s předpoklady bylo azimutální rozložení izotropní a počet spršek prudce klesal se snižující se výškou nad obzorem. Plně se tak potvrdila správná funkce celé sestavy i použitých výpočetních algoritmů.

Studenti se snažili objevit vícenásobné spršky. Podařilo se jim najít podezřelou trojici, která přišla v rozmezí 15 s a úhlová vzdálenost příchodu spršek byla menší než 9° . Tato trojice je zajímavá, i když může být i náhodná. Je však velmi malá pravděpodobnost, že by zdrojem byl objekt v otevřené hvězdokupě M52, kam se směr jejich příchodu promítá. Takové hvězdokupy nejsou příliš nadějnými kandidáty jako zdroj vysokoenergetických částic. Také koincidence spršky ze stanice CZELTA a zábleskem gama GRB 070714A bude asi spíše náhodná. V každém případě studenti odladili metodiku, která by při dostatečně vysoké statistice měření mohla přinést velice zajímavé výsledky.

Velice důležité je dlouhodobé sledování časového vývoje počtu spršek a jeho závislost na různých veličinách, jako je vývoj počasí na Zemi, slunečního počasí v meziplanetárním prostoru a dalších parametrech. Měl bych jen poznámku, že zvláště v případech velmi detailních grafů by bylo dobré zobrazit i statistickou chybu jednotlivých bodů. Bylo by tak lépe vidět, které výkyvy jsou reálné a které čistě statistickou fluktuací. Velice ilustrativní jsou už zmíněné závislosti rozložení spršek v obzorníkových souřadnicích, ale také v rovníkových souřadnicích. Pěkně dokumentují z jakých oblastí vesmírného prostoru lze danou stanicí spršky pozorovat. I ono potvrzuje, že stanice i použité algoritmy jsou v pořádku.

Pro část věnovanou „energii“ je na závadu, že na začátku není detailněji popsán způsob detekce spršek, jaká okna jsou nastavena pro sběr celkové odezvy detektoru. Veličina

označovaná jako energie specifikuje počet částic, který detektorem prolétl. Mohlo by to přispět při interpretaci pozorovaných vlastností celkové odezvy detektoru. Ta je dána počtem částic, které detektorem proletěly nastaveným oknem (každá částice ztratí pro danou tloušťku scintilátoru zhruba 2 MeV). Mohlo by se tak určovat, které detektory byly na kraji a které ve středu spršky.

Důležitou částí je i studium závislosti počtu spršek na atmosférických vlivech. Ukazuje se, že je jasně patrná souvislost mezi počtem spršek a tlakem. Tato studie je velice důležitá pro korekce měření během budoucích dlouhodobých pozorování časového vývoje spršek. A je dobře, že se ji studenti intenzivně věnovali.

Vůbec je práce velmi pečlivě provedená. Našel jsem v ní jen pár a spíše jen drobnějších chyb a překlepů. Například Greisen-Zatsepin-Kuzin limita není maximální dolet, ale hraniční energie jádra kosmického záření nad kterou je energie dostatečná na to, aby tato jádra ve srážkách s fotony reliktního záření produkovala π mezony (energie musí stačit k přeměně nukleonu na delta rezonanci). Jádra s energií vyšší než je tato limita velmi intenzivně ztrácejí energii a brzy se dostanou pod tuto limitní energii. V rovnici definující čas t_2 na straně 20 úplně dole má být TDC2 místo TDC1 a v rovnici (2) na následující straně x_2 místo x_{21} . Tyto nedostatky však nemají na celkovou velmi vysokou kvalitu práce vliv.

Práce ukazuje, že se studenti velice dobře seznámili s problematikou sledování spršek sekundárního kosmického záření. Vyřešili i řadu praktických problémů, na které v průběhu své práce narazili. Jejich práce je popsána přehledně, srozumitelně a čtivě. To je velmi důležité i z toho hlediska, že jejich práce poslouží jako studijní materiál pro jejich následovníky. Je jasné, že práce je součástí dlouhodobého kolektivního úsilí a některých problémů se mohla jen dotknout. I tak studenti plně prokázali, že jsou schopni se rozebrat ve vědeckém problému, provést rešerši literatury v dané oblasti, provádět experimenty a analyzovat získaná data, vyvodit z nich závěry, srozumitelně je popsat a své interpretace doložit. Práci bych hodnotil velmi kladně.

V Řeži 6. 4. 2008


RNDr. Vladimír Wagner CSc.
ÚJF AV ČR Řež
250 68 Řež
E_mail: wagner@ujf.cas.cz

1. Obsah

1. Obsah.....	7
2. Úkoly a cíle	9
3. Kosmické záření.....	9
4. Projekt CZELTA	12
5. Detekční stanice CZELTA	13
5.1. Výhody i nevýhody technického zpracování projektu.....	16
5.2. Struktura dat	17
6. Teoretická rekonstrukce směru	18
6.1. Orientace aparatury na střeše gymnázia – předpoklady k určení směru	18
6.2. Určení x -ové, y -ové, z -ové složky rychlosti – normálový vektor čela spršky.....	21
6.3. Obzorníkové souřadnice.....	23
6.4. Praktické výpočty	24
6.5. Ekvatoreální (rovníkové) souřadnice druhého druhu – deklinace, rektascenze.....	25
7. Různé druhy zobrazení.....	27
7.1. Příklady jednotlivých druhů zobrazení	28
8. Testování algoritmů.....	31
9. Prodlužovací smyčky	33
10. Analýza dat – vyhledávání spršek	38
10.1. Hledání clusterů.....	38
10.2. Gama výtrysky	40
11. Počty spršek.....	43
12. Rozbor grafů výšky a azimutu přichozích spršek	47
13. Rozbor grafů deklinace a rektascenze spršek.....	50
14. Energie – neužitečná veličina?	55
15. CZELTA a její citlivost na meteorologickou situaci	62
16. Cíle a vize do budoucnosti	67
17. Diskuze.....	68
18. Závěr.....	69
19. Slovník pojmů a zkratk.....	71
20. Zdroje	71
20.1. Použitá literatura	71
20.2. Obrázky	73
21. Přílohy	74
21.1. Fotografie	74
21.2. Dokumenty	77

Elektroskop ve výšce 5 350 metrů nad Ústím nad Labem vykazoval podivné chování. Na palubě balonu naplněného hořlavým vodíkem se tři muži nevěřícně dívali na plíšky vybíjejícího se elektroskopu. Ani nevolnost z neuvěřitelné výšky nedokázala překonat vědecké vzrušení, jež právě zažívali. Experiment neprobíhal pomaleji, jak na zemi předpovídali, nýbrž opačně. A to dokonce devětkrát rychleji! Psal se sedmý srpen roku 1912 a jeden z nich, asistent vídeňské university Dr. Victor Franz Hess, ještě netušil, že za tento objev mu o čtyřicet let později bude udělena Nobelova cena.

2. Úkoly a cíle

Planeta Země je doslova bombardována kosmickým zářením. Například vámi teď prolétají částice kosmického záření, aniž byste o tom věděli. Zdaleka ještě nebyly objasněny všechny jevy související s kosmickým zářením. Pro obyčejného člověka by nebylo příjemné, pokud by jím teoreticky (u astronautů se to bohužel může stát i prakticky) prošla částice mikroskopických rozměrů s energií letícího tenisového míčku a zainteragovala by s jeho tělem a pokusila se mu vyrazit zuby.

Doslova královskou otázku „Odkud pocházejí ty nejenergičtější částice, které člověk dosud detekoval?“ bude těžké zodpovědět. Je téměř jisté, že vědci, kterému se podaří proces vysvětlit, bude udělena Nobelova cena. I přes to, že náš projekt by pomohl jen malou kapkou v moři poznání, můžeme se stanicí CZELTA provádět různé analýzy dat, pomocí nichž potvrdit, rozšířit, nebo i vyvrátit dosavadní výsledky. CZELTA je zkratka vzniklá ze slov CZEch Large-area Time coincidence Array, volný překlad zní „celorepubliková časově koordinovaná detekční síť“.

Vytyčili jsme si řadu úkolů:

- detailní poznatky o obsluze a měření stanic CZELTA
- určit směry příchozích spršek (souřadnice obzorníkové, rovníkové II. druhu tzv. ekvatoreální)
- pokusit se vyhledat spršky odpovídající význačným událostem ve vesmíru – např. gama výtryskům
- kvantitativní analýza dat – závislosti počtu spršek, souvislost s meteorologickými veličinami
- analýza energií pohlcených v detektorech

3. Kosmické záření

Počátek výzkumu kosmického záření spadá do počátku 20. století. Tehdy vědci nemohli objasnit, proč i ve velmi dobře stíněných ionizačních komorách dochází k samovolnému vybíjení. Tento jev vysvětlovali zemskou radiací. Viktor Hess (obr. 1) navrhl a provedl pokus, který měl vše objasnit. Vyletěl s balonem do výšky a podle předpokladů se měl elektroskop vybíjet pomaleji – byl by od zdroje radiace dále. Nastal však úplně opačný jev, vybití proběhlo devětkrát rychleji. Začala tak éra detailního výzkumu částic, které k nám přilétají z kosmu.

Nejdříve se částice považovaly za neutrální, ale roku 1933 zjistil Arthur Compton, že množství dopadajících částic se liší se zeměpisnou šířkou. Pokud je ovlivňuje magnetické pole Země, pak musí být kladně nebo záporně nabitě.



obr.1 – Viktor Hess (1912) [1]

V roce 1938 si všimli Pierre Auger a Ronald Maze, že částice přicházejí v časové a prostorové závislosti, a tak výsledkem byla teorie, že částice přicházejí v sekundárních sprškách. Velikost kužele spršky je závislá na energii primární částice.

Další výzkum se týkal mechanismu vzniku energetických částic, jejich rozpadu v atmosféře a chemického složení.

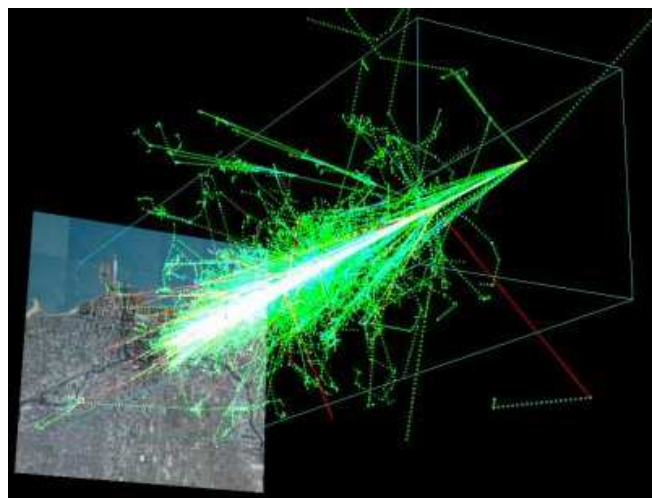
Pod primárním zářením uvažujeme částice vzniklé ve vesmíru, které nezinteragovaly s hmotou naší atmosféry (nejedná se tedy o záření, ale jednotlivé částice, z historických důvodů se ale budeme držet tradičního názvu). Každý zdroj takových částic má určité spektrum energie (tab. 1). V oblasti vysokých energií si však v současné době nejsme jisti ani zdrojem, ani mechanismem, jakým by měly částice vznikat. Je však jisté, že částice i ve volném vesmíru ztrácejí svoji energii interakcí s reliktními fotony, a tak lze pro každou částici určit „maximální dolet“, který vychází z tzv. Greisen-Zatsepin-Kuzmin limitu [1]. U některých vysokoenergetických částic nedokážeme najít uspokojivý zdroj, který by GZK limitu vyhovoval. Tok primárních částic je závislý na energii. Můžeme určit průměrný počet částic dopadlých za časovou jednotku na určitou plochu (obr. 2, tab. 2). Spektrum kosmického záření je zatím záhadou. Proč je v oblastech „koleno“ (angl. knee) snížený a „kotník“ (angl. ankle) zvýšený počet částic, je předmětem bádání. Obecně lze říci, že čím větší energie částice mají, tím méně se vyskytují.

Jev	Energie vzniklých částic
Sluneční vítr	$<10^{10}$ eV
Kvasary a aktivní galaktická jádra	$<10^{19}$ eV
GRB (výtrysky gama záření)	$<10^{19}$ eV
Topologické defekty vesmíru	$>10^{19}$ eV

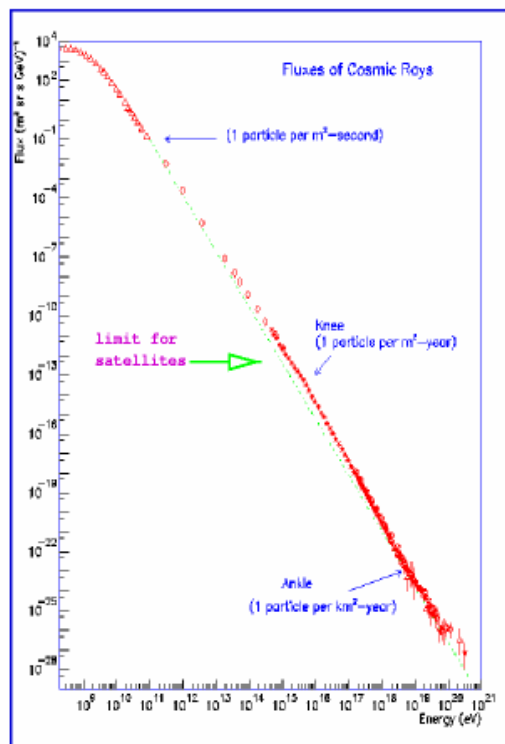
tab. 1 – Energetický charakter původců částic s vysokou energií [2]

Energie	Počet částic, plocha za čas
$<10^8$ eV	Odkloněny mag. polem Země, slunečním větrem
10^{12} eV	Několik na m^2 / s
10^{16} eV	Několik na m^2 / rok
10^{18} eV	Jedna na km^2 / rok
10^{20} eV	Jedna na km^2 / století

tab. 2 – Tok částic dle energie [2]



obr. 3 – Sprška sekundárního záření [3]

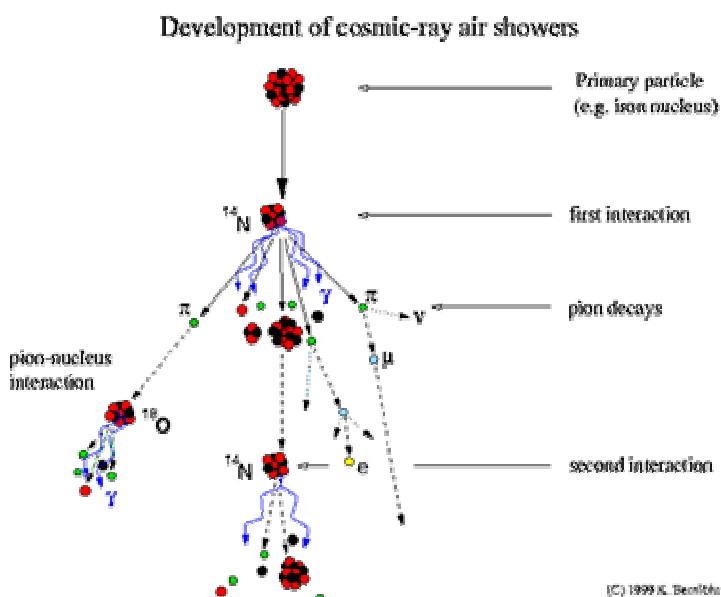


obr. 2 – Tok částic, jejich energie [2]

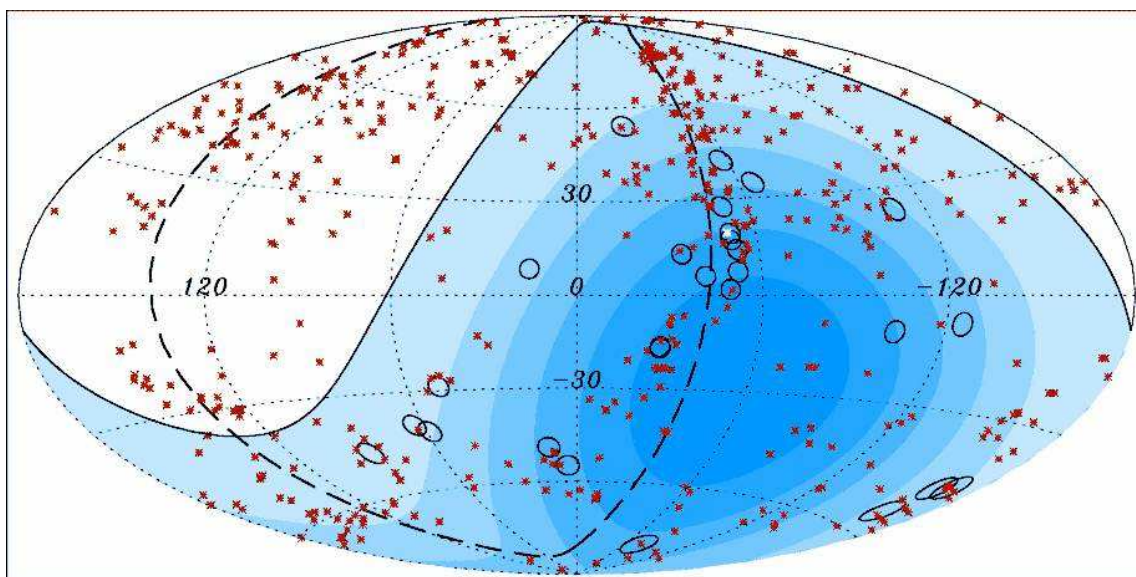
Složení primárního KZ je: 90% protony, 7% jádra helia, 1% těžší jádra, 1% elektrony a pozitrony, nepatrně fotonů.

Sekundární spršky vznikají interakcí příchozích částic s atmosférickými plyny, k níž dochází poprvé zhruba ve výšce 30 km. Sprškou míníme relativistické částice uspořádané v rovině (můžeme si je představit jako pomalu se rozšiřující lóvanec) pohybující se téměř rychlostí světla k zemskému povrchu (pokud vznikne foton, tak se samozřejmě pohybuje přímo rychlostí světla). Ze složení sekundárních spršek lze zjistit, jaká byla primární částice. Pokud byl primární částicí foton, tak bude sprška obsahovat elektrony, pozitrony a fotony γ záření. Pokud primární částicí bylo nějaké jádro, bude navíc obsahovat i miony, neutrina a hadrony (tj. protony, neutrony a piony). Jak taková sprška vypadá lze namodelovat (obr. 3). Příklad rozpadu jádra primární spršky Fe po interakci s dusíkovými atomy můžete vidět na obr. 4.

Ještě před tím, než dorazí do zemské atmosféry, prolétá částice vesmírem, a jelikož je většina těchto částic nabitá, působí na ně různá magnetická pole ve vesmíru, pole naší Galaxie i Země. Jak hodně částice zakřiví svou trajektorii, závisí na její energii. U těch s největší energií (řádově 10^{20} eV) téměř nedochází k odchýlení od původního směru. Na druhé straně energetického spektra jsou částice, které se nechají „strhnout“ magnetickým polem Země a končí v tzv. Van Allenových páslech nebo jsou jen odkloněny a dopadají na póly naší planety, ať již letěly kamkoliv, např. k nám do Pardubic [3].



obr. 4 – Počátek vývoje sekundární spršky Fe jádra



obr. 5 – Rozložení částic detekovaných Pierre Auger Observatory (galaktické souřadnice) [4]

V současné době se detekcí sekundárních spršek (nazývaných také EAS – extensive air shower) zabývají obrovské vědecké týmy mající k dispozici nákladná zařízení. Mezi nejznámější a největší patří evropský projekt Pierre Auger Observatory, který v Argentině na ploše 3 000 km² operuje s 1 600 detektory čerenkovského záření (v současnosti jich je v provozu 1 400). Na obr. 5 je 27 zaznamenaných částic o nejvyšší energii (tj. už spočítané primární částice o energii větší než $5,7 \cdot 10^{19}$ eV – znázorněné kroužky) spolu se znázorněnými aktivními galaktickými jádry (červené křížky), která jsou považována za jedny z pravděpodobných zdrojů vysokoenergetických částic. Projektu se účastní i Česká republika [4].



obr. 6. – H.E.S.S. detektory [5]

Dalšími projekty jsou AMANDA Antarctic Muon and Neutrino Detector Array (zabývá se vysokoenergetickými neutriny, detektory jsou umístěny v Antarktidě) a na něj navazující IceCube, jenž bude uveden do provozu v roce 2010.

Detektory budou umístěny v prostoru kubického kilometru ledu. Neutrina bude zaznamenávat také laboratoř Antares s detektory čerenkovského záření umístěnými pod hladinou Středozemního moře. Za zmínku jistě stojí i projekt H. E. S. S. (High Energy Stereoscopic System), který věnuje atmosférické detekci čerenkovského záření v Namibii [4].

V Severní Americe se rozšířil projekt NALTA (North American Large area Time coincidence Arrays), na jehož bázi byl ve spolupráci s University of Alberta založen projekt CZELTA.

4. Projekt CZELTA

Dosud jediný vědecký projekt zaměřený na detekci sekundárních spršek vysokoenergetického kosmického záření v České republice rozběhl v roce 2004 Ústav technické a experimentální fyziky ČVUT v Praze (ÚTEF) v úzkém svazku s kanadskou univerzitou v Albertě. Ta dodala stanici (detektory, elektroniku), jejíž prototyp poprvé zkušebně uvedla roku 1998 [5]. Stanice byla nainstalována na střechu pražského ústavu. Kromě vědeckých účelů mají projekty NALTA a CZELTA pedagogický význam. Studenti středních škol mají možnost zapojit se do výzkumu takřka na vrcholu lidského poznání částicové astrofyziky. Zároveň je možné dosažené výsledky prezentovat a srovnávat s dalšími zapojenými školami a to jak v České republice, tak i v zahraničí.

Poté, co Gymnázium Pardubice, Dašická ulice, projevilo zájem o umístění detekční stanice, navštívili jej v srpnu 2005 pracovníci ÚTEF a University of Alberta. Po prohlídce střechy a fyzikálních učeben byla spolupráce dojednána. Stanice samozřejmě není zadarmo, a tak bylo nutné napsat projekt do rozvojového programu SIPVZ pod Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy. Napoprvé však gymnázium neuspělo, a proto se muselo rok čekat na další příležitost. Tentokrát byl grant získán a mohlo se začít s praktickou přípravou instalace stanice v Pardubicích.

Říjen 2006 se nesl ve znamení instalace boxů na detektory. Musely se vyzdvihnout za pomoci jeřábnické techniky na plochou střechu pětipodlažní budovy. Samotný vstup na střechu je možný pouze po žebříku. V prosinci 2006 došlo ke konečné instalaci detektorů a elektroniky a stanice byla za zájmu pedagogů i studentů spuštěna.

5. Detekční stanice CZELTA

Stanice a její příslušenství jsou zajisté základním stavebním kamenem projektu. Pomocí ní získáváme data o počtech událostí, časech příchodu, energiích spršek a teplotě. Jedná se o poměrně rozsáhlou konstrukci, kterou bychom mohli rozdělit na tři části: detekční část na střeše gymnázia, vyhodnocovací a zaznamenávací aparatura v kabinetu chemie a poslední drobná jednotka pro zaznamenávání počasí je uložena v kabinetu fyziky.



obr. 7 – Tři schránky s detektory na střeše gymnázia

Samotná budova naší školy nabízí pro projekt CZELTA ideální podmínky. Především se jedná o poměrně vysokou budovu, která není zásadně stíněna ani z jedné strany. Podstatné je také to, že budova má velkou plochu střechu, takže detektory mají dostatek volného prostoru a manipulace s nimi je velmi usnadněna.

Na střeše gymnázia jsou tři detektory umístěné ve vrcholech obecného trojúhelníku o straně přibližně 10 m (obr. 7). Toto rozmístění

se podle zkušeností našich předchůdců ukázalo jako výhodné (z důvodu velikosti sekundární spršky a jejich toku – průměr 10 m $\approx$ primární částici o energii 10^{14} eV [6]), svými rozměry přijatelné a hlavně lze se třemi body pracovat jako s rovinou. Bedna detektoru je v našem případě načerno natřený dřevotřískový box. Jednotlivé schránky jsou mezi sebou spojeny uzemněnými kovovými trubkami, které fungují jako důkladné stínění pro přenos informací kabely. U boxu detektoru 0 se nachází anténa GPS přijímače (obr. 8) a měřicí přístroje meteorologické stanice: anemometr, teploměr, srážkoměr a barometr (důležitý pro zkoumání závislosti počtu událostí na atmosférickém tlaku). Uvnitř je box detektoru izolovaný pěnovým polystyrenem, nachází se zde scintilační deska (scintilátor), fotonásobič, kontrolní LED dioda, topení a zdroj vysokého napětí. Scintilátor je čtvercová deska o straně 60 cm, tloušťce 1 cm, vyrobená z organického plastu (dle informace výrobce polyvinyltoluen), typové označení zní Bicron BC-408, v níž vznikají fotony s vlnovou délkou $\lambda = 425$ nm [7]. Scintilátor, fotonásobič a LED dioda jsou uzavřeny ještě v jenom speciálním boxu, zcela nepropustném pro světlo (obr. 9, obr. 10). Jako ochrana proti mrazu je použito odporové topení. Zdroj vysokého napětí napájí fotonásobič, jenž zajišťuje přeměnu světelného signálu ze scintilátoru na elektrický signál přijatelný pro další zpracování. LED dioda je prvkem kontroly. Jasně určí, zdali elektronika pracuje správně. Na začátku každé minuty tato dioda krátce zasvítí v každém detektoru a vyvolá tak signál ve fotonásobičích. Elektronika zpracuje tento signál jako koincidenci, což potvrdí funkčnost celého systému a tato koincidence si při analýze dat jednoduše vyřadí, takže nezkrsluje data. Filtrace funguje tak, že se odstraní několik nanosekund, kdy byla dioda aktivní. Tento jev je zajímavý z toho důvodu, že takový maličký zdroj světla s nepatrnou svítivostí vyvolá přímo extrémní hodnoty energií – proto lze jednoznačně určit okamžik aktivity diody od spršky.

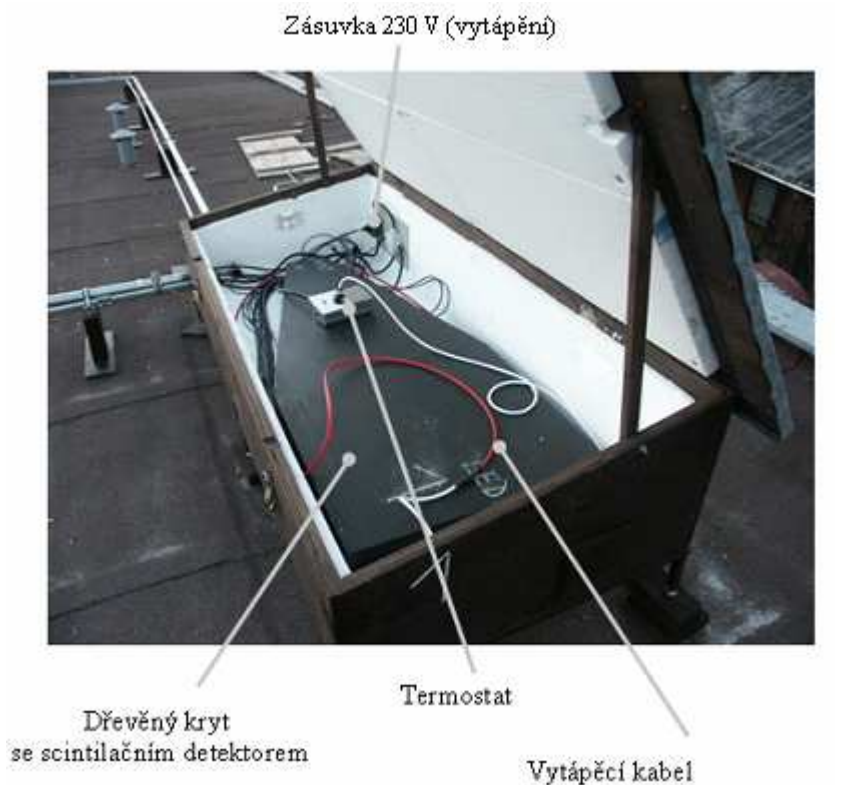


obr.8 – GPS anténa

Pokud událost vytvoří dostatečně silný signál, je potřeba ho rychle a přesně přenést k dalšímu zpracování do zařízení, které vyhodnotí příchod spršky. Byla použita koaxiální signální kabeláž. Ač je to běžně dostupný nejrychlejší způsob přenosu signálu, přesto mají tyto kabely zpoždění přibližně 5 ns/m (pro porovnání světelná informace má ve vakuu i vzduchu zpoždění přibližně 3,3 ns/m). Drobný problém by také mohl být v tom, že se pozvolna mění jejich elektrické vlastnosti, a tím pádem i zpoždění vlivem atmosférických podmínek, mechanickým namáháním apod., ale to je z hlediska týdnů, měsíců a několika málo roků zanedbatelné. Od každého detektoru vede kabel dlouhý přibližně 15 m.

Nyní je třeba vysvětlit, jak se měří koincidence událostí. Vlnoplocha spršky se šíří k zemi a postupně zasáhne všechny detektory. Zpoždění mezi zásahy detektorů je určeno sklonem vlnoplochy. Pokud zásahy detektorů nastanou v časovém okně přibližně 100 ns (záleží na konstrukci elektroniky), pak jsou vyhodnoceny jako současně a aparatura je zapíše jako jednu spršku. Z rozdílů časů zásahů jednotlivých detektorů můžeme zjistit směr příchodu spršky.

Vzhledem k tomu, že všechny kabely nejsou stejně dlouhé, může docházet k negativnímu jevu, tj. že některé reálně možné koincidence budou vlivem zpoždění na kabeláži vyřazeny. Proč nejsou všechny přesně stejně dlouhé? Zajímavý a dopředu nepředvídatelný je jev elektroniky, která má problémy přesně určit čas příchodu z oblastí



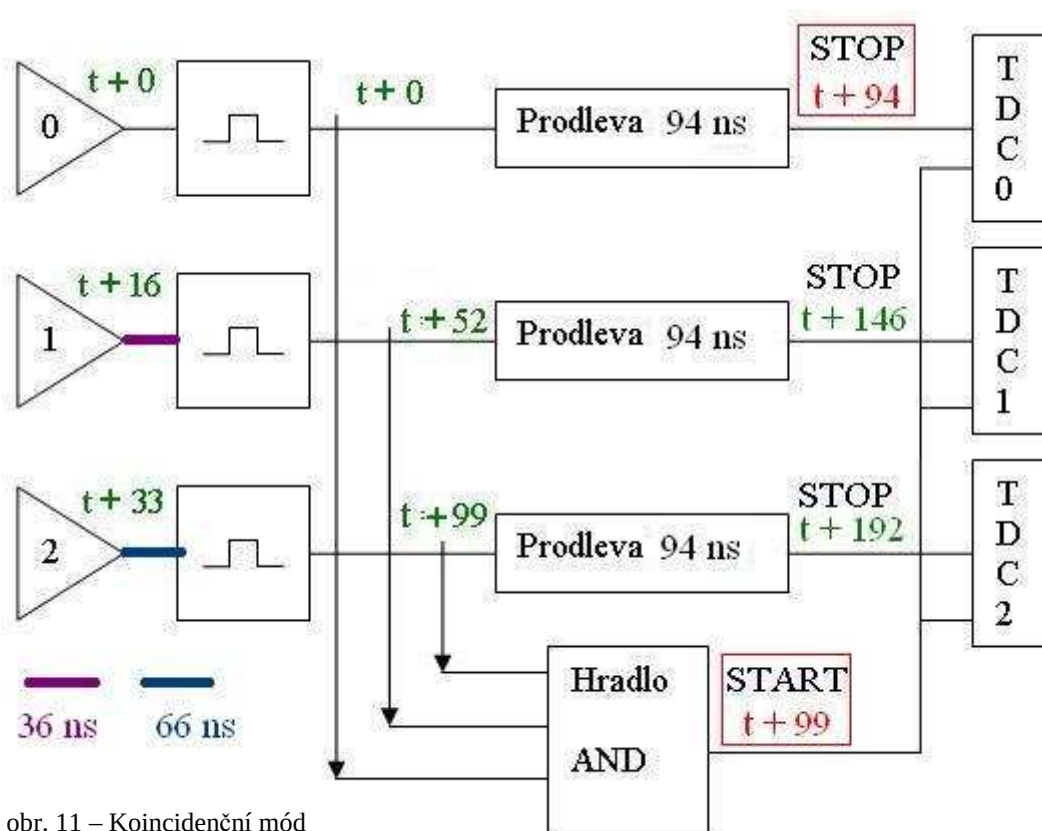
obr. 9 – Schránka s detektorem



obr. 10 – Otevřený detektor

odpovídající význačným směrům podle orientace trojúhelníku. Rozdíly časů jednotlivých událostí jsou tak malé, že se s tím elektronika nedokáže vypořádat. Problém je pravděpodobně v modulu, který dodává přesný relativní čas (krok je 25 ps) a je jen jeden společný pro všechny tři kanály. Toto hvězdicovité zkreslení se dá potlačit jediným možným způsobem, totiž vřadit mezi detektor a elektroniku nestejně dlouhé zpožďovací smyčky kabelu o jasně definovaném zpoždění; jediné tak se dá docílit toho, že se události časově blízké o několik ns vzdálí. Pochopitelně na to nesmíme zapomenout při dalším zpracování. Narážíme ovšem na problém, že se část dat na úkor správnosti ostatních ztratí.

Ze schématu koincidenčního modulu (obr. 11) můžeme jednoduše vypočítat, že pokud je sprška nízko nad obzorem a ze směru proti detektoru s nejdelším prodloužením, dostane TDC modul, který převádí analogový signál na číselnou hodnotu vyjadřující čas, dříve signál STOP než signál START (přirozené zpoždění světla na 10 m je ve vzduchu 33 ns, když k tomu připočteme prodloužení na kabeláži 66 ns, dostáváme se za hranici okna vytvořeného reálnou elektronikou 94 ns) [8] [9] .



obr. 11 – Koincidenční mód

Nyní se posuňme k části druhé, do kabinetu chemie, kde je umístěna elektronika a PC (obr. 12), nacházíme se v patře pod střechou, takže je zde nejvýhodnější umístění z hlediska kabeláže. Co se vlastně rozumí onou „elektronikou“? Jedná se o box zahrnující několik samostatných modulů. Obsahuje již zmíněný koincidenční modul, který mimo jiné měří zpoždění mezi detektory s krokem 25 ps. Měření probíhá nepřetržitě, takže jak tato elektronika, tak i PC musí být neustále zapnuty. PC je navíc chráněno zdrojem záložního napětí, ovšem pouze krátkodobě. Tento projekt má jednu nespornou výhodu: protože je použito standardní PC s běžným operačním systémem, je zajištěna jednoduchost obsluhy. Tím se otvírají možnosti každému studentovi školy, protože nemusí umět pracovat v nevizuálních prostředích, nemusí umět programovat, stačí jen, aby měl vštípené základy



obr.12 – PC, vpravo elektronika (např. koincidenční modul)

práce s počítačem a webovými stránkami. PC je připojeno k internetu, takže jej lze kdykoliv sledovat a stahovat data ze stanice. (Nyní již funguje centrální shromaždiště dat ze stanic projektu CZELTA, a tak tato možnost zůstává spíše pro ověřování neustálého měření a zapnutí počítače.). V tomto kabinetu je také umístěn vyhodnocovací modul stanice GPS, který slouží jako

přesný zdroj času UTC pro koincidence (nepřesnost může být 10 až 20 ns, což je v globálním hledisku zanedbatelné – slouží hlavně pro budoucí analýzu dat z více stanic najednou).

V poslední části se nacházíme v kabinetu fyziky, kde je umístěn panel meteorologické stanice. Jedná se o poměrně malý, ale důležitý přístroj. Pro nás je nejdůležitější údaj o tlaku vzduchu. Umí ale i zobrazit či vyexportovat do PC řadu dalších hodnot.

5.1. Výhody i nevýhody technického zpracování projektu

Výhody:

- Rozšíření znalostí z oblasti elektroniky, matematiky, fyziky, analytického myšlení, jazyků.
- Jednoduchá obslužnost, vše je soustředěno do standardního PC

Nevýhody:

- Těžko změřitelné, či dopředu určitelné celkové zpoždění elektroniky, jelikož v řádech nanosekund existuje kusová odlišnost elektronických součástek, které pak mají různá zpoždění (nejpřesnější je hledat ho zpětně z velkého množství dat pomocí směrodatné odchylky nebo podle Gaussova rozdělení pravděpodobností).
- Nelze určit, zda elektronika vyhodnocuje správně, problémy s „růžicí“ v grafu – špatné vyhodnocení událostí přicházejících z význačných směrů.
- Závislost na nepřetržitém zdroji síťového napětí (při výpadku musí nastavení provést odborník).

5.2. Struktura dat

Data stanice poskytuje v hexadecimálním tvaru. My se však budeme věnovat už tvaru převedenému do textového ASCII formátu .txt (lze snadno převést programem Jakuba Čermáka – AltaProcesor.exe, nebo si můžete stáhnout již převedená data z jeho serveru [10]), který používají ke zpracování programy ClusterSearcher i Counter, tento formát lze také využít pomocí funkce Text do sloupců v programu Microsoft Excel.

R	M	D	H	M	S	Ns	TDC0	TDC1	TDC2	E0	E1	E2	T0	T1	T2	T uvnitř
2007	10	01	01	19	09	263953275.0	973	3764	4095	432	597	0	16.0	16.5	16.5	27.0
2007	10	01	01	19	39	835470680.4	4095	3781	1612	198	186	155	16.0	16.5	16.5	27.0
2007	10	01	01	19	49	211618520.1	365	3766	2162	499	140	441	16.0	16.5	16.5	27.0

Prvních šest sloupců je naprosto zřejmých, pojednávají o roce, měsíci, dnu, hodině, minutě a sekundě spršky. Další sloupec je nanosekunda spršky, tento údaj je třeba brát s přesností na 10 až 20 ns. Čas je udáván v UTC. Časy TDC0, TDC1, TDC2 vyjadřují stav čítače, který počítá od 0 do 4095, jeden krok představuje 25 ps. Je potřeba si dát pozor na hodnoty 0 resp. 4095, obvykle představují špatné měření – pro znázornění jsou zde právě první dvě uvedené spršky špatně zapsané. Další tři sloupce se věnují energii zachycené v každém detektoru – jednotka není ovšem jasně určitelná. Měří se totiž náboj, který vznikl a zesílil se ve fotonásobičích. Můžeme tedy uvažovat pouze relativní hodnotu. Ovšem znovu je potřeba si dávat pozor na spršky s nulovou nebo maximální hodnotou energie. V posledních čtyřech sloupcích jsou k dispozici teploty ve stupních Celsia, v každém detektoru je jedna sonda a poslední hodnota odpovídá teplotě v místnosti s vyhodnocovací elektronikou.

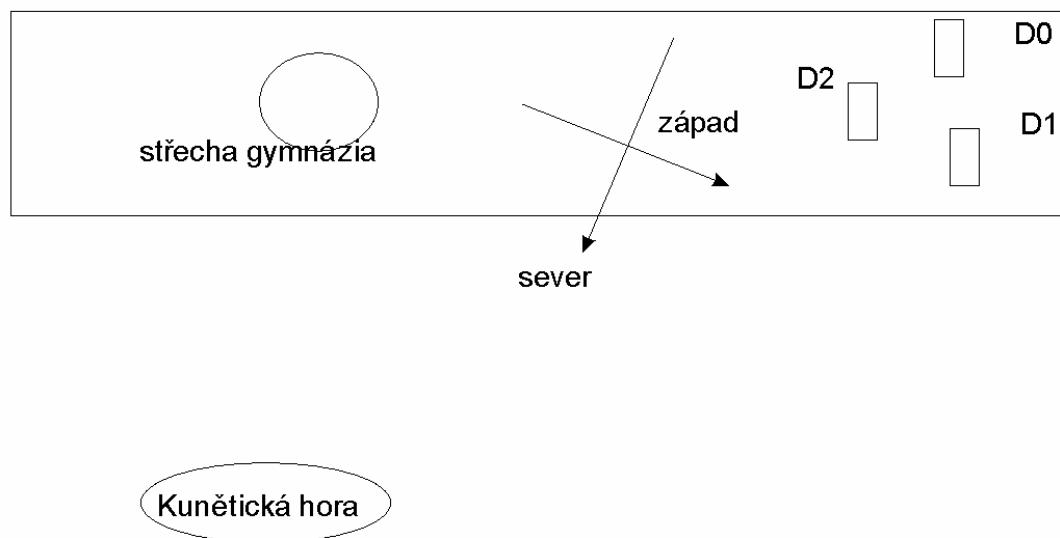
6. Teoretická rekonstrukce směru

Jedním ze základních úkolů aparatury je určení příchozích směrů spršky. Pro toto určení je nezbytné znát rozložení aparatury vůči světovým stranám. Možná, že se na první pohled jedná o snadný úkol, ale k vzhledem k rozměrům trojúhelníku a požadované přesnosti, to opravdu tak jednoduché není. Toto zjištění si vyžádalo nemalé množství času i usilovné práce.

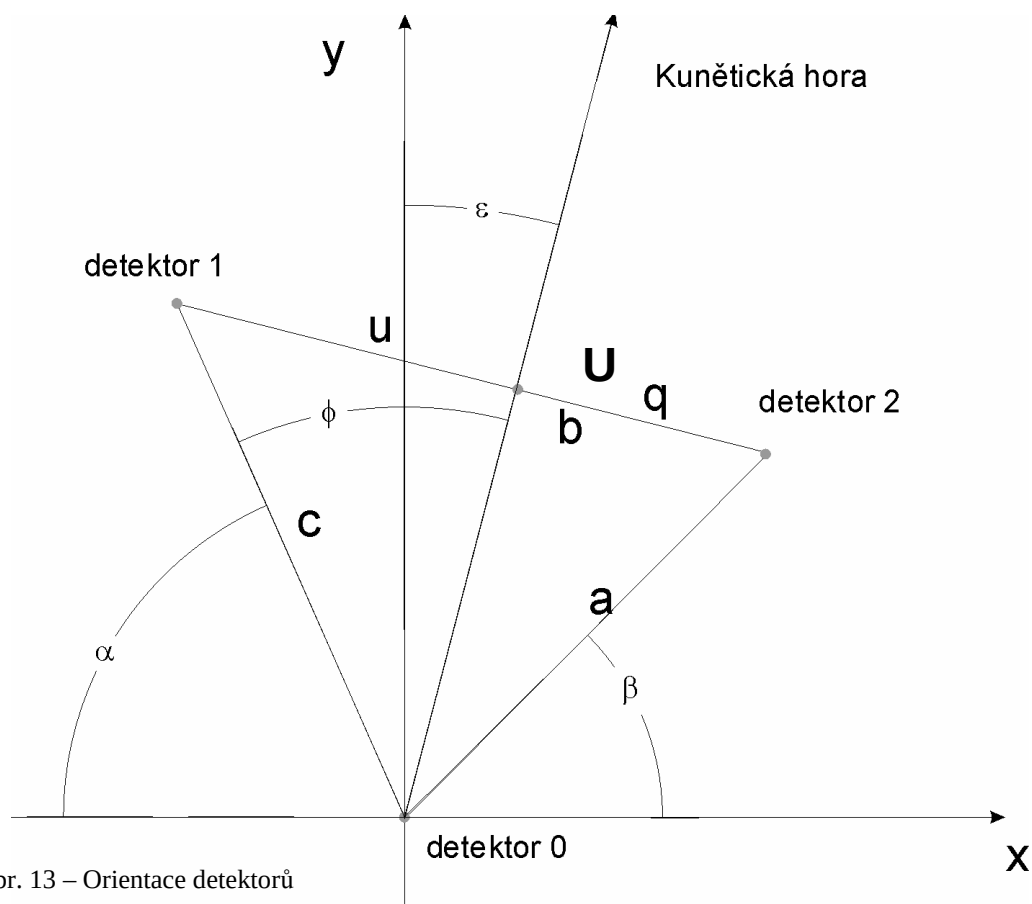
6.1. Orientace aparatury na střeše gymnázia – předpoklady k určení směru

Problém jsme se nejdříve snažili vyřešit pomocí běžně dostupné techniky. Pásmem jsme stanovili přesné rozměry trojúhelníku a při vlastním měření jsme se snažili co nejvíce minimalizovat zkreslení délky stran trojúhelníku průvěsem pásma. Zde jsme pochopili, že trojúhelník je opravdu jen orientačně rovnostranný, což ale není takový problém, protože pro určení směru spršky použijeme analytickou geometrii, kde budeme potřebovat souřadnice středů detektorů vůči zvolené soustavě. Poté jsme si vybrali detektor D0 jako počátek souřadnic x, y, z , kde osa x míří západovýchodním směrem, osa y severojižním směrem (kladné hodnoty x na východ, kladné hodnoty y na sever) a osa z do zenitu. U detektoru D0 jsme si kapesním GPS modulem změřili zeměpisné souřadnice. Dále bylo nutné si vybrat v krajině nějaký význačný bod. Každý, kdo navštívil Pardubicko, asi tuší, že jsme si nemohli vybrat nic jiného než Kunětickou horu. Na průnik myšlené spojnice Kunětické hory a detektoru D0 a strany trojúhelníku (mezi detektory D1, D2 viz obr. 12) jsme umístili bod, u kterého jsme naměřili vzdálenosti od detektorů D1 a D2. Zbývalo určit jen zeměpisné souřadnice Kunětické hory (přesněji místa na hradbách, které jsme si vybrali dalekohledem jako určující pro spojnici). Tento úkol jsme provedli tak, že jsme se vypravili na Kunětickou horu automobilem a určili zeměpisné souřadnice vybraného místa opět kapesním GPS (zeměpisné souřadnice v mapách na internetu nejsou tak přesné).

Situační schéma rozmístění detektorů na střeše je na následujícím obrázku 12.



obr. 12 – Orientace střechy vzhledem ke Kunětické hoře



obr. 13 – Orientace detektorů

Největší problém je zjistit úhel ϵ , který však můžeme určit pomocí myšleného pravoúhlého trojúhelníku (obr. 13). Jeho vrcholy jsou detektor D0, Kunětická hora a třetí vrchol je průsečík rovnoběžky procházející Kunětickou horou s poledníkem procházejícím detektorem D0. Jeho rozměry získáme z rozdílu zeměpisných souřadnic detektoru D0 a Kunětické hory a jejich přepočtu na vzdálenosti, tak nám vznikne onen pravoúhlý trojúhelník, u kterého známe složky vzdálenosti x a y od Kunětické hory (s určitou chybou), přičemž složka x odpovídá místní rovnoběžce D0 a y místnímu poledníku Kunětické hory, odtud přes funkci tangens už lehce vypočteme žádaný úhel. K tomu ale potřebujeme znát délku našeho poledníku a rovnoběžky. Vzhledem k tvaru Země (geoid) jsou všechny poledníky takřka stejné délky, takže délka nultého i našeho poledníku je 40 009 km. U rovnoběžek je situace opačná, jejich délka se mění. Většina dostupných údajů plyne z výpočtu přes poloměr Země a jejího kruhového průřezu, což se nám jeví jako možný zdroj chyb. Ze změřených stran trojúhelníku D0D1D2 si spočítáme pomocí kosinové věty úhel při vrcholu D1, poté podle známé vzdálenosti u určíme dle další kosinové věty velikost strany D0U, a pak stačí jen použít sinovou větu pro dopočítání velikosti úhlu ϕ . Odečtením ϵ od ϕ získáme orientaci vektoru D0D1 vůči severu. Orientaci D0D2 získáme tím, že od ϵ odečteme ϕ a ještě přičteme úhel δ , který získáme uplatněním kosinové věty na trojúhelník D0D1D2. Existuje samozřejmě ještě jednodušší způsob určení úhlů α, β pomocí buzoly, ale to je méně přesné.

Tento postup se může zdát dosti náročný, ale na počátku se nám jevil jako jediný rozumně možný. Později se nám však naskytla možnost využít zařízení jménem diferenciální GPS. Tento přístroj je velice přesná GPS stanice schopná několikaminutovým odečtem signálu z družic stanovit nejen zeměpisné souřadnice s přesností na několik desetinných míst, ale i zároveň spolupracovat s dalšími stanicemi, takže je pak schopná uvést přesné délky vektorů a jejich orientace vůči světovým stranám. Samotné měření je velice snadné, stačí

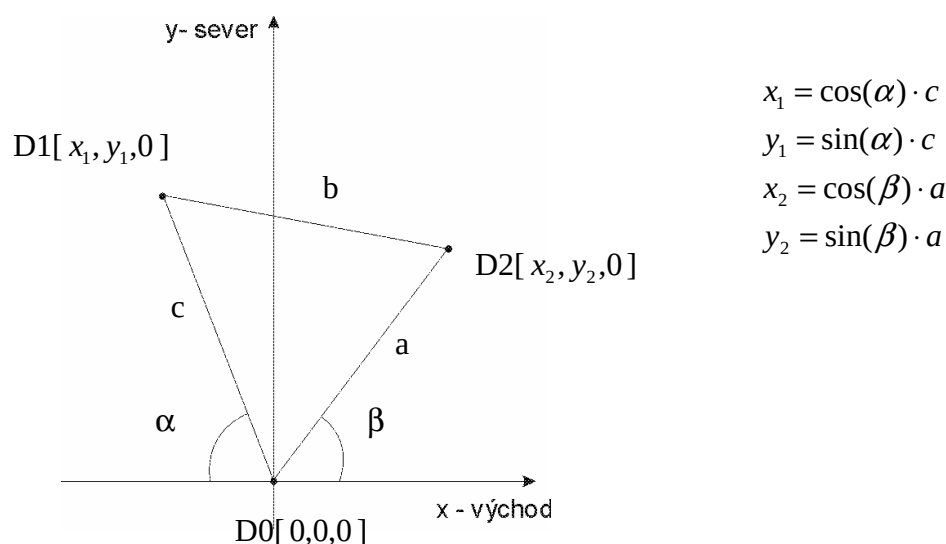
položit zařízení na středy detektorů a počkat potřebný čas (okolo 30 minut, záleží i na počasí) až se stanice zkalibruje. Samotné zpracování a vyhodnocení trvá déle. My jsme měli toto zařízení zapůjčené i s obsluhujícím pracovníkem, který se o všechno postaral a druhý den nám poslal celý protokol o měření (uveden v příloze). Děkujeme společnosti E.R.A. a.s., která nám tuto možnost poskytla.

Výsledky měření diferenciální GPS se dobře shodovaly s námi předem naměřenými a spočítanými údaji. Délky stran byly přesné s odchylkou na 1 cm vůči našemu měření pásmem (očekávali jsme mnohem větší už jen kvůli prohnutí měřidla a složitosti umístění diferenciální GPS na střed detektoru, protože ta na rozdíl od detektorů nemá přesně vyznačený střed), což znamená ověření platnosti přesnosti měření diferenciální GPS, a tudíž můžeme brát její data jako vyhovující a pravdivá.

Azimuty - měřené naší metodou	Úhel od severu
D0-D1	352,8°
D0-D2	57,9°
Azimuty - měřené pomocí diferenciální GPS	Úhel od severu
D0-D1	349,6°
D0-D2	53,7°

Tyto vektory nás utvrdily, že první metoda není až tak špatná, dala by se zopakovat, kdyby se bedny někdy v budoucnu posunuly (i když se to neplánuje, nesmíme však zapomínat, že boxy s detektory nejsou pevně přichyceny ke střeše, a tak může dojít k jejich posunutí vlivem větru, což se stalo při orkánu Kyrill).

Ze znalostí orientace a velikosti stran lze vypočítat souřadnice jednotlivých detektorů v soustavě souřadnic xy (x kladné hodnoty na východ, y kladné hodnoty na sever) viz obr. 14.

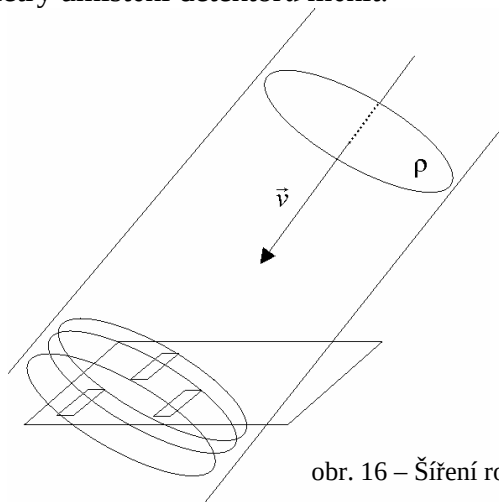
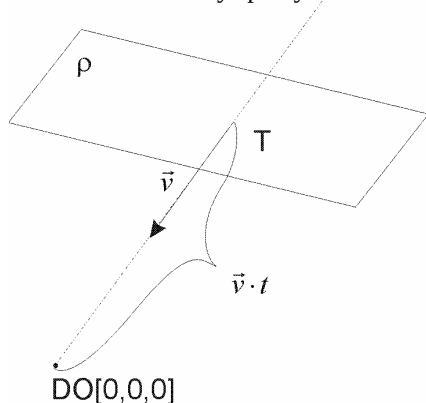


obr. 14 – Orientace detektorů

6.2. Určení x-ové, y-ové, z-ové složky rychlosti – normálový vektor čela spršky

Jak určíme směr spršky z rozdílu časů zásahů jednotlivých detektorů a souřadnic detektorů? Způsobů je určitě několik, ale pokaždé povedou ke stejným rovnicím. Velice rychlý způsob je určení přes analytickou geometrii a rovnici roviny čela spršky. Na střeše máme zavedenu soustavu souřadnic. Počátek bude v detektoru D0, osa y míří na sever a osa x míří na východ. V rovině xy leží 3 detektory, je to rovina horizontu. Osa z míří do zenitu (kladné hodnoty). Souřadnice detektorů x_1, y_1, x_2, y_2 byly již číselně určeny, ale je výhodné počítat obecně, kdyby se měly parametry umístění detektorů měnit.

obr. 15 – Šíření roviny spršky



obr. 16 – Šíření roviny spršky

Budeme uvažovat, že čelo spršky je rovinné (obr. 15, obr. 16) a postupuje rychlostí světla ve vakuu $c = 299\,792\,458$ m/s. Vektor rychlosti $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$ je pro rovinu normálový vektor.

Čelo spršky pokládáme za rovinu $\rho: v_x \cdot x + v_y \cdot y + v_z \cdot z + d = 0$. V rovnici roviny se pouze s časem mění parametr d . Vyjádříme parametr d v závislosti na čase. Čas bude mít nulovou hodnotu v okamžiku, kdy rovina ρ prochází detektorem D0 tedy počátkem soustavy souřadnic.

Pro bod T, který se pohybuje s rovinou ρ , platí:

$$D0-T = \vec{v} \cdot t$$

$$T = [0, 0, 0] - (v_x, v_y, v_z) \cdot t, \text{ a jeho souřadnice } T [-v_x \cdot t, -v_y \cdot t, -v_z \cdot t]$$

Dosazení souřadnic bodu T do rovnice roviny získáme parametr d :

$$T \in \rho: v_x \cdot (-v_x \cdot t) + v_y \cdot (-v_y \cdot t) + v_z \cdot (-v_z \cdot t) + d = 0$$

$$d = t \cdot (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)$$

$$d = t \cdot c^2$$

$$\rho: v_x \cdot x + v_y \cdot y + v_z \cdot z + c = 0$$

Zavedeme časy t_1, t_2 :

$$t_1 = (TDC1 - TDC0) \cdot 25 \text{ ps udává o kolik dříve (později) byl zasažen detektor D1 než D0.}$$

$$t_2 = (TDC2 - TDC0) \cdot 25 \text{ ps udává o kolik dříve (později) byl zasažen detektor D2 než D0.}$$

$$v_x \cdot x_1 + v_y \cdot y_1 + 0 = -c^2 \cdot t_1 \quad (1)$$

$$v_x \cdot x_2 + v_y \cdot y_2 + 0 = -c^2 \cdot t_2 \quad (2)$$

Vyřešením soustavy rovnic (1),(2) o dvou neznámých získáme složky vektoru rychlosti:

$$v_x = \frac{c^2(t_1 y_2 - t_2 y_1)}{x_1 y_2 - x_2 y_1}$$

$$v_y = \frac{c^2(t_1 x_2 - t_2 x_1)}{y_1 x_2 - y_2 x_1}$$

celková rychlost v má velikost c , proto poslední složka má velikost: $v_z = -\sqrt{c^2 - v_x^2 - v_y^2}$

Znaménko mínus znamená, že rychlost míří do záporných hodnot osy z .

Pro označení místa na obloze, odkud přišla sprška, bude vhodnější používat opačný vektor.

$$u_x = -\frac{c^2(t_1 y_2 - t_2 y_1)}{x_1 y_2 - x_2 y_1}$$

$$u_y = -\frac{c^2(t_1 x_2 - t_2 x_1)}{y_1 x_2 - y_2 x_1}$$

$$u_z = \sqrt{c^2 - u_x^2 - u_y^2}$$

Ze znalosti t_1, t_2 a x_1, y_1, x_2, y_2 tedy můžeme určit vektor $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)$.

6.3. Obzorníkové souřadnice

Pokud známe vektor $\vec{u}$, známe tedy i směr, odkud sprška přišla. Směr představuje určitý bod na obloze, odkud mohla přijít primární částice (Vzhledem k velikosti trojúhelníku chytáme spršky, jejichž primární částice mají velikou energii, ale pořád jsou ještě ovlivněny magnetickými poli ve vesmíru). Nyní je žádoucí dostat se k lepšímu vyjádření tohoto bodu na obloze. Nejvýhodnější soustavou souřadnic z hlediska pozorovatele jsou obzorníkové souřadnice (obr. 17). Charakterizuje je výška objektu nad horizontem a azimut.

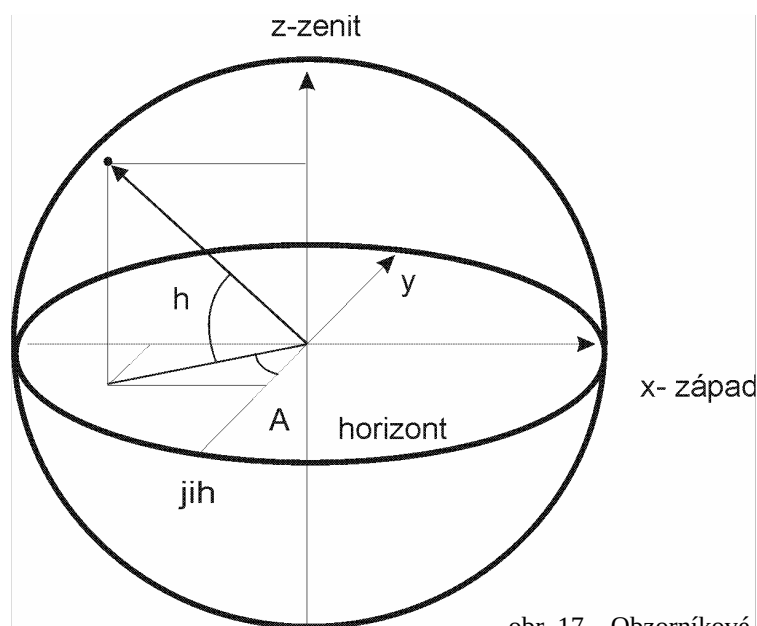
Azimut se počítá od severu, poté je nutno ho převést na azimut od jihu, protože ho tak používají astronomové. Pro azimut platí přepočít z vektoru rychlosti vztah

$$\sin(A) = \frac{u_x}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2}}, \text{ poté je nutné podmínkami ošetřit, do kterého kvadrantu spadá kolmý}$$

průmět vektoru $\vec{u}$ do roviny xy . Podmínka zněla: Když u_x je nezáporná, tak se jedná o první nebo druhý kvadrant, když ne, je to třetí nebo čtvrtý kvadrant. V praxi znamená připočítat 180° k původnímu azimutu.

Pro výšku nad horizontem existuje jednoznačný vztah: $\text{tg}(h) = \frac{u_z}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2}}$ nebo $\sin(h) = \frac{u_z}{c}$

Pro úplnost dodejme, že azimut nabývá hodnot od 0° do 360° a výška od 0° do 90° .



obr. 17 – Obzorníkové souřadnice

6.4. Praktické výpočty

D0: lat. 50° 02' 9,48846" N, lon. 15° 47' 22,04649" E

Dl: lat. 50° 02' 9,80786" N, lon. 15° 47' 21,95535" E

D2: lat. 50° 02' 9,67093" N, lon. 15° 47' 22,43190" E

$$a = 9,520 \text{ m}$$

$$b = 10,400 \text{ m}$$

$$c = 10,034 \text{ m}$$

$$\alpha = 36,3^\circ$$

$$\beta = 79,6^\circ$$

$$x_1 = -1,811 \text{ m}$$

$$y_1 = 9,869 \text{ m}$$

$$x_2 = 7,672 \text{ m}$$

$$y_2 = 5,636 \text{ m}$$

$$u_x = -\frac{299792458^2 (t_1 \cdot 5,636 - t_2 \cdot 9,869)}{-1,811 \cdot 5,636 - 7,672 \cdot 9,869} \text{ m/s}$$

$$u_y = -\frac{299792458^2 (t_1 \cdot 7,672 + t_2 \cdot 1,811)}{9,869 \cdot 7,672 + 5,636 \cdot 1,811} \text{ m/s}$$

$$u_z = \sqrt{299792458^2 - u_x^2 - u_y^2} \text{ m/s}$$

6.5. Ekvatoreální (rovníkové) souřadnice druhého druhu – deklinace, rektascenze

Znalost obzorníkových souřadnic spršek je dobrým východiskem k dalším propočtům. Sama nám udává, z jakých směrů k nám spršky přicházejí nejčastěji. Bohužel pro náš projekt (a naštěstí pro Zemi a lidstvo na ní) se Země otáčí kolem své osy, potažmo pro nás se obloha otáčí kolem Polárky. Výška nad horizontem vypovídá o počtu spršek příchozích z daného sklonu, což je následně důležité pro rozbor grafů rektascenze a deklinace.

Dále je třeba najít přepočet, který bude brát v úvahu otáčení oblohy. Nejlépe tomuto cíli vyhovuje systém rovníkových souřadnic druhého druhu, tj. souřadnice, které se nemění s časem. To už jsme museli vyhledat v astronomických knihách. Jak jsme později zjistili, je nutné pro tento přepočet znát místní hvězdný čas, mimo to je také nejprve nutné určit rovníkové souřadnice prvního druhu.

Nejdříve jsme se rozhodli, že se pokusíme sestavit funkční vzorec pro výpočet místního hvězdného času. Snažili jsme se vycházet z několika zdrojů a výsledný čas ověřit přes důvěryhodné astronomické stránky.

Výpočet místního hvězdného času θ (po výpočtu konkrétní hodnoty je potřeba převést do rozmezí 0 až 24 – tzn. zbytek po dělení 24) [11]:

$$\theta = 6,697374558 + 2400,051337 \cdot \frac{JD - 2\,451\,545}{36525} + 24 \cdot (JD + 0,5 - \text{celá část}(JD+0,5)) + \phi$$

celá část $(JD + 0,5)$ – znamená nejbližší menší celé číslo k číslu JD po přičtení 0,5

ϕ – zeměpisná délka pozorovacího místa v hodinách

JD – juliánské datum

$$JD = D + \left\{ \frac{153f - 457}{5} \right\} + 365g + \left[\frac{g}{4} \right] - \left[\frac{g}{100} \right] + \left[\frac{g}{400} \right] + 1721\,118,5$$

Pro $M < 3$: $f = M + 12$, $g = R - 1$.

Pro $M \geq 3$: $f = M$, $g = R$.

R – rok

M – měsíc

D – občanský den

JD – juliánské datum

$[a]$ značí celou část čísla a , tedy nejbližší menší celé číslo např. $[-6,5] = -7$

$\{a\}$ značí číslo a s useknutou desetinnou částí např. $\{-6,5\} = -6$

Výpočet deklinace δ [12] :

$$\sin(\delta) = \sin(h) \cdot \sin(\phi) - \cos(h) \cdot \cos(A) \cdot \cos(\phi),$$

kde h – výška nad horizontem

ϕ – zeměpisná šířka pozorovatele (tedy našeho zařízení)

A – azimut od jihu

Výpočet hodinového úhlu t [12]:

$$\cos(t) = \frac{\sin(h) \cdot \cos(\phi) + \cos(A) \cdot \cos(h) \cdot \sin(\phi)}{\cos(\delta)}$$

$$\sin(t) = \frac{\cos(h) \cdot \sin(A)}{\cos(\delta)}$$

Zde jsou nutné dva vzorce, aby bylo jednoznačné určení kvadrantu. Doporučujeme podmínku (vyzkoušena pro Microsoft Excel – funkce $\arccos(t)$ může v různých programech vracet hodnoty z rozdílných kvadrantů!):

$$\sin(t) < 0 \Rightarrow t = -\arccos(t)$$

$$\sin(t) > 0 \Rightarrow t = \arccos(t)$$

kde h – výška nad horizontem

ϕ – zeměpisná šířka pozorovatele (tedy našeho zařízení)

A – azimut od jihu

δ – deklinace

t – hodinový úhel

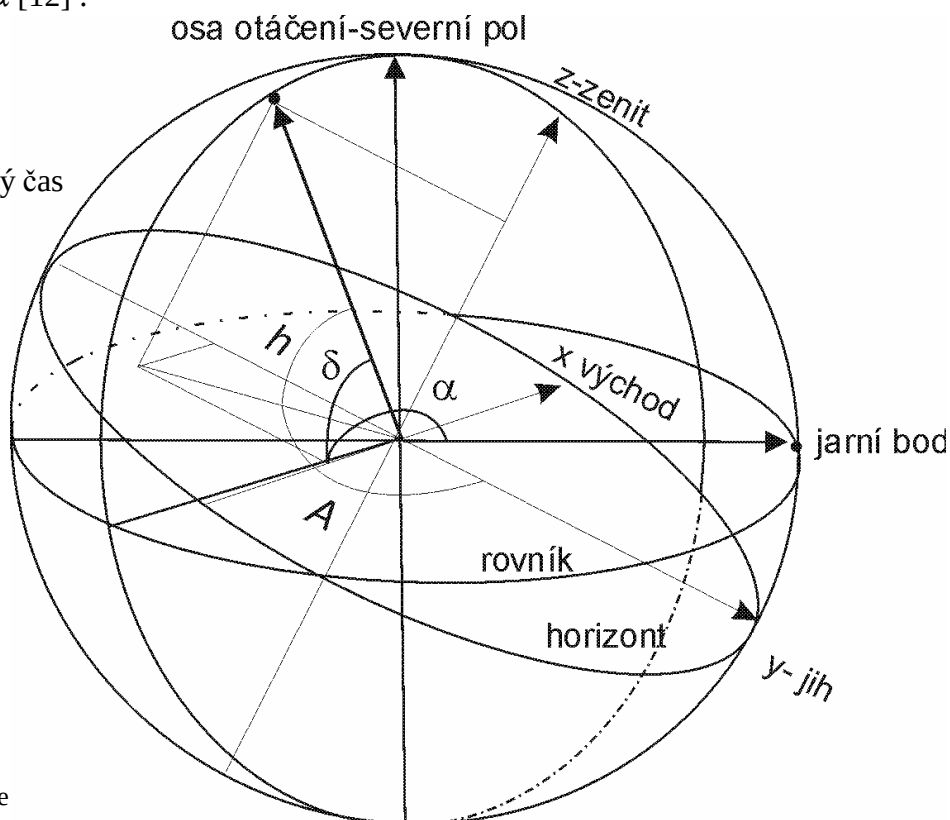
Ted' se jen musí přepočítat hodinový úhel na rektascenzi α pomocí znalosti místního hvězdného času.

Výpočet rektascenze α [12]:

$$\alpha = \theta - t$$

kde t – hodinový úhel

θ – místní hvězdný čas



obr. 18 – Rovníkové souřadnice

7. Různé druhy zobrazení

Když známe u každé spršky její deklinaci a rektascenzi, je možné ji zobrazit přesně do místa, odkud opravdu přišla nezávisle na pohybu Země. Jedním z našich cílů je ověřit, zda spršky přicházejí opravdu z celé oblohy. Existují místa, odkud by přicházely spršky častěji než odjinud? Naše idea byla, že bychom mohli dát do jednoho zobrazení spršky za celý rok. Tato myšlenka se ukázala jako neproveditelná, protože programy, které používáme (především Microsoft Excel), nejsou schopné taková množství dat zpracovat, ba co více je zobrazit (za rok máme kolem 800 000 spršek). Nejdelší časový úsek, který se nám daří zobrazit, je okolo jedenácti dnů, i přes to, že se to může zdát jako krátký časový úsek, bodů se nám vykreslí okolo 25 000.

Problémem je zobrazení spršek na kulové ploše. Trojdimensionální vizualizaci lze provést např. v programu Maple. My jsme nejprve provedli několik zobrazení koule do roviny v programu Microsoft Excel, u kterého jsme museli převést body do souřadnic xy . To lze provést mnoha způsoby.

1. typ: Body na povrchu koule promítneme do roviny horizontu (rovníku) ve směru přímky zenit – nadir (sever – jih). Azimut (rektascenze) je nezkreslený. Zkreslená je výška (deklinace) a dochází také k velkému zkreslení plochy blízko u horizontu (plocha se zde zmenšuje vůči kouli, takže spršky zde mají zdánlivě velkou hustotu).

2. typ: Povrch polokoule rozdělíme na stejně široké kulové pásy a ty převedeme na soustředná mezikruží. Tady je nezkreslený azimut (rektascenze) i výška nad obzorem (deklinace), avšak dochází opět ke zkreslení plochy (směrem k horizontu plocha roste více než na kouli).

3. typ: Zobrazení vyhovuje podmínkám rovnosti obsahu plochy na kouli a obsahu našeho kruhového zobrazení. Nezkreslený je azimut (rektascenze) a zkreslená je výška (deklinace).

Všechna zobrazení je vhodné dělat zvlášť, jak pro severní tak i pro jižní část oblohy. Možná se vám zdá divné, jak je možné, že máme zápornou deklinaci, ale je to způsobeno umístěním detektoru na 50. rovnoběžce severní šířky. Pouze kladnou deklinaci bychom měli, kdybychom naše zařízení umístili na severní pól. Naopak nejlepší místo pro umístění zařízení by byl rovník, protože pak bychom dostali obraz celé oblohy. Bohužel toto tvrzení je pouze teoretické, protože sprška procházející nízko nad obzorem vymírá díky delší dráze v atmosféře.

Během naší práce se ukázala potřeba vytvoření ještě 4. a 5. typu zobrazení. Čtvrté se pokouší nastínit, jak vypadá obloha, když se díváte na stojícího pozorovatele i oblohu „z boku“. Pátým zobrazení jsme se pokoušeli o vytvoření něčeho, co se podobá Grinteovu zobrazení, poněvadž záblesky GRB jsou zobrazovány právě v této soustavě. Naše zobrazení není ideální Grinteovo zobrazení, ale pro naše účely nám prozatím stačí. Y-ová stupnice vždy odpovídá deklinaci, x-ová odpovídá jen u hodnoty deklinace 0. Toto zobrazení je na představu dost náročné, protože okraje grafu tvoří spršky z druhé strany koule a na kouli se nedíváme shora, ale přímo z profilu.

Poslední 6. typ zobrazení, o který jsme se snažili, bylo vytvoření 3D polokoule – oblohy s obzorníkovými souřadnicemi – se zakreslenými směry spršek. Byl vytvořen v programu Maple.

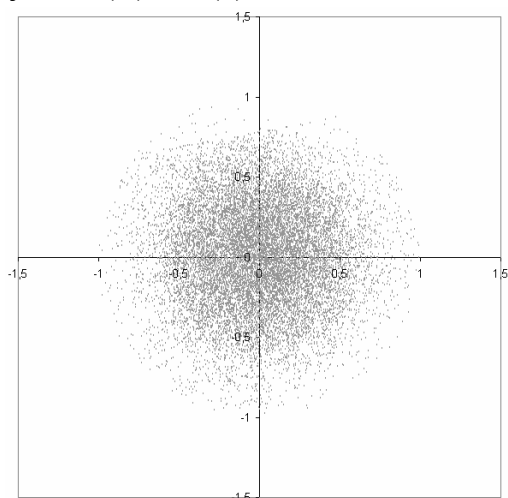
7.1. Příklady jednotlivých druhů zobrazení

Uvedené postupy můžeme použít jak u obzorníkových, tak u rovníkových souřadnic, samozřejmě je potřeba uvedené vzorce drobně upravit – výška nad obzorem nemůže být záporná, rektascenzi astronomové kvůli obrácenému obrazu z dalekohledů někdy počítají a znázorňují na mapách (po přepočtení na hodiny) od 12 hodin (vlevo) do -12 hodin (vpravo). Platí, že deklinace odpovídá výšce nad obzorem a rektascenze azimutu. Uvedené příklady odpovídají námi použitým grafům.

1. typ zobrazení – obloha do roviny horizontu

$$x = \cos(h) \cdot \sin(A)$$

$$y = \cos(A) \cdot \cos(h)$$

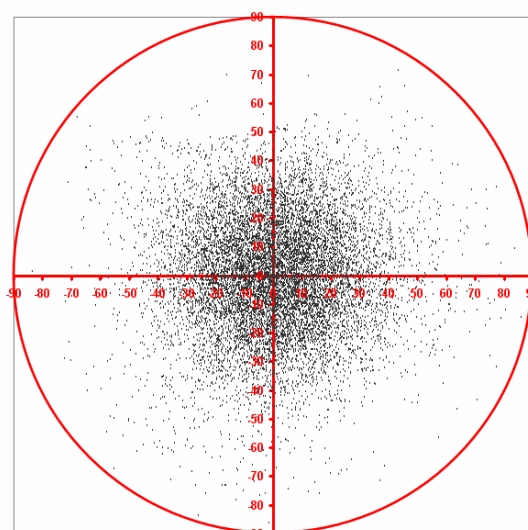


obr. 19 – 1. typ zobrazení

2. typ zobrazení – oblohy do roviny horizontu (na osách zenitová vzdálenost – ze vzorců je patrné, že vlevo a dolů je uvedena vzdálenost záporně – jedná se pouze o formální chybu)

$$x = \cos(A) \cdot (90 - h)$$

$$y = \sin(A) \cdot (90 - h)$$



obr. 20 – 2. typ zobrazení

3. typ zobrazení - obloha do roviny rovníku

Vycházíme z předpokladu

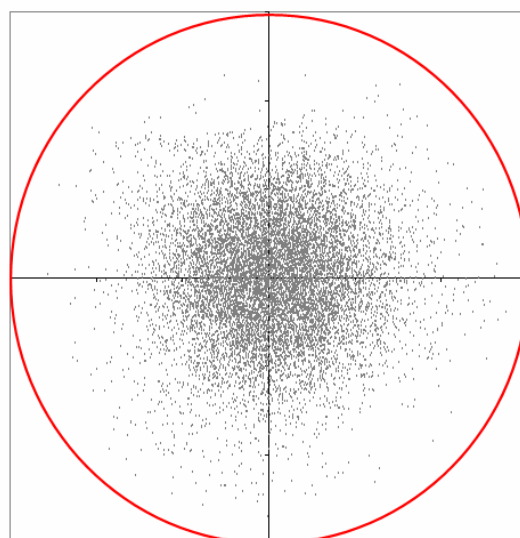
$$\pi * r_{kruhu}^2 = 2 * \pi * r_{koule} * v_{vrchlık-koule}$$

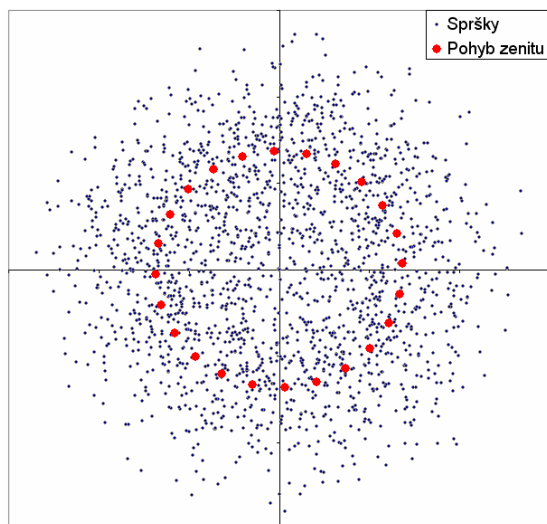
Dále platí z geometrie koule $v = r - r \cdot \sin(\delta)$, kde r je jednotkový poloměr koule.

$$x = \cos(\alpha) \cdot \sqrt{2 * (1 - \sin(\delta))}$$

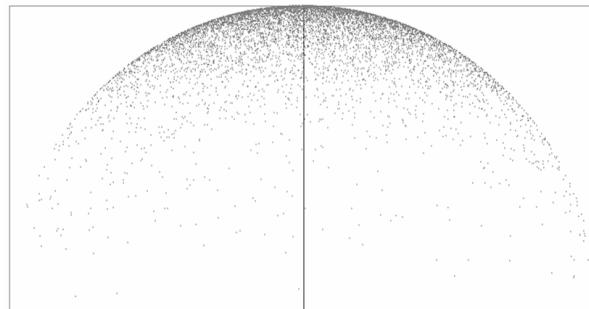
$$y = \sin(\alpha) \cdot \sqrt{2 * (1 - \sin(\delta))}$$

obr. 21a – 3. typ zobrazení





Ještě jednou 3. typ při použití deklinace a rektascenze. Červený bod vyjadřuje pohyb zenitu.



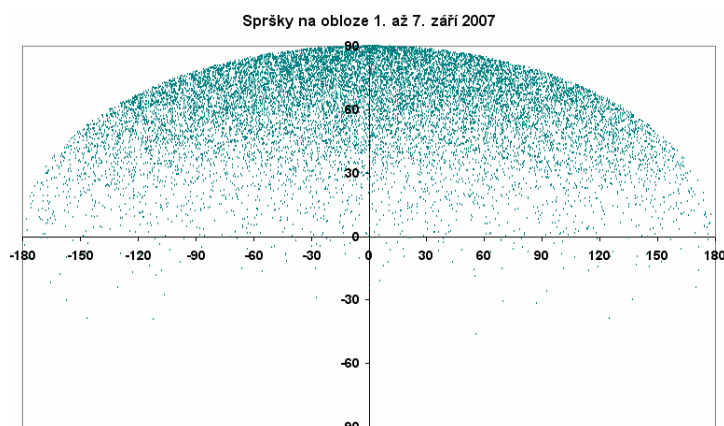
obr. 22 – 4. typ zobrazení

obr. 21b – 3. typ zobrazení 4. typ zobrazení – při pohledu na pozorovatele a jeho oblohu „z boku“

Toto zobrazení je vhodné především pro zobrazení obzorníkových výsledků.

$$x = \sin(A) \cdot \cos(h)$$

$$y = \sin(h)$$



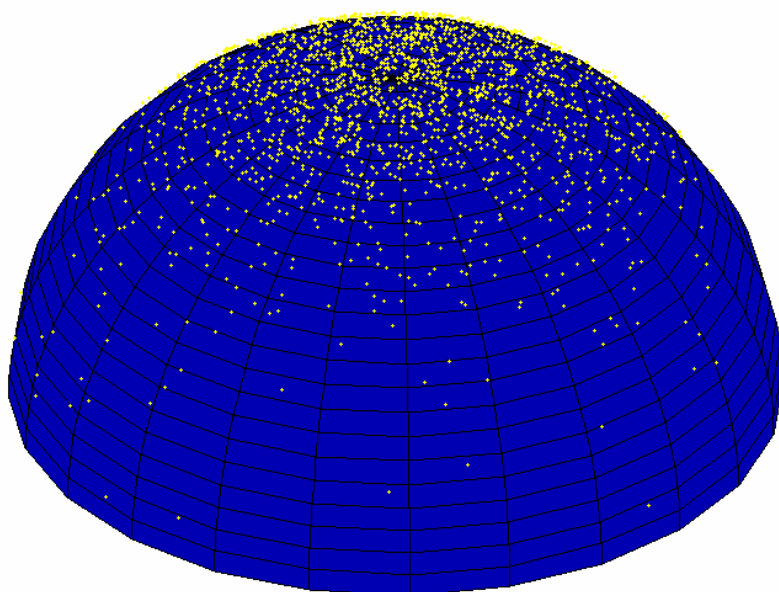
5. typ zobrazení – podobné Grinteovu zobrazení

V rovníkových souřadnicích, na začátek se musí vytvořit podmínka, která převede rektascenzi od 180° do 360° na -180° do 0° .

$$x = \cos(\delta) \cdot \alpha$$

$$y = \sin(\delta)$$

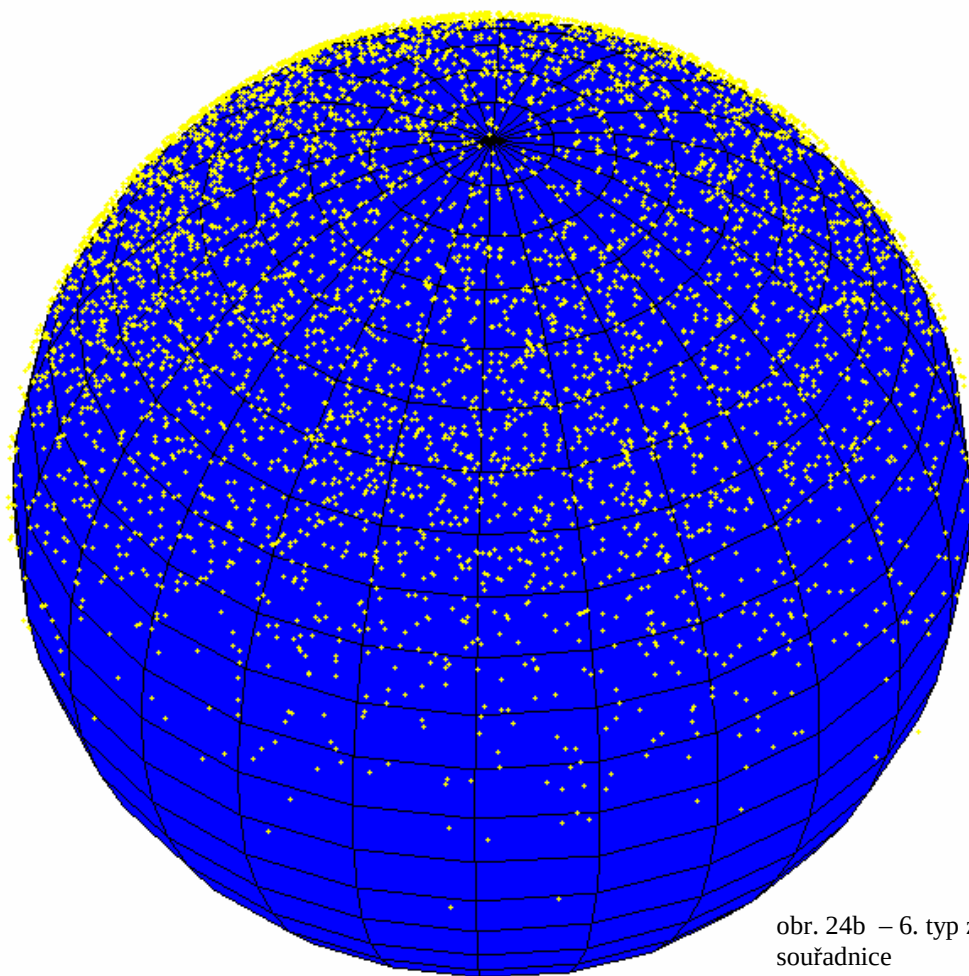
obr. 23 – 5. typ zobrazení



6. typ zobrazení – vytvořené v programu Maple

Použít můžeme jak obzorníkové tak rovníkové souřadnice. V případě obzorníkových obrázků názorně ukazuje, že aparatura zachytává nejvíce spršky v blízkosti zenitu.

obr. 24a – 6. typ zobrazení – obzorníkové souřadnice



obr. 24b – 6. typ zobrazení – rovníkové
souřadnice

8. Testování algoritmů

Při jakýchkoliv delších algoritmech je potřeba být si jist, že jsou jednotlivé kratší výpočty správně. Hlavním výstupem by měly být dvě souřadnice – výška nad obzorem a azimut (případně deklinace a rektascenze). Pro ověření jednotlivých fází výpočtu jsme použili především internetové zdroje.

Nejdříve ověříme náš algoritmus pro výpočet juliánského data. Mezi amatérskými astronomy je velmi známou a důvěryhodnou webovou stránkou Heavens-above.com [13]. Po vložení našich souřadnic můžeme nalézt širokou škálu informací. My však vybereme „What time is it?“ a stránka nám zobrazí aktuální místní čas, greenwichský čas, a pak právě současné juliánské datum. Zobrazení vypadá takto:

UTC:14:06:41 Friday, 15 February 2008, Julian day number: 2,454,512.08798 (server samozřejmě jinak pracuje s čárkami a tečkami!), neboli 14 hodin 6 minut 41 sekund světového času 15. února 2008 je JD=2454512,08798.

Podíváme-li se na výsledek zpracovaný námi

Rok	Měsíc	Den	Hodina	Minuta	Sekunda	Juliánské datum
2008	2	15	14	6	41	2454512,08797454

musíme uznat, že výpočet je s přesností na 11 platných cifer.

Další, co lze na internetu nalézt, je transformátor souřadnic na webových stránkách Astronomického ústavu Akademie věd České republiky [14]. Můžeme vložit první spršku dne 3. 10. 2007:

Rok	Měsíc	Den	Hodina	Minuta	Sekunda	výška h	A azimut od jihu	$\delta/^\circ$	$\alpha/^\circ$
2007	10	3	0	1	34	53,359842	188,697875	83,673121	82,483445

A jaký je výsledek?

$\delta (^\circ)$:	83.673121	$\alpha (^\circ)'''$:	82	29	4.941169
---------------------	-----------	------------------------	----	----	----------

Po přepočítání na stupně vychází rektascenze $\alpha = 82,484706^\circ$, což ve srovnání s naším výpočtem $\alpha = 82,483445^\circ$ při zanedbání drobných nepřesností potvrzuje platnost našeho algoritmu. Můžete si ještě všimnout, že deklinace vychází na dostupný počet desetinných míst úplně stejně.

Další možností je vyhledat v astronomických tabulkách nebo na internetu objekt, u kterého budeme mít uvedené jak obzorníkové, tak ekvatoreální souřadnice (druhého řádu). Na internetu jsme našli výborný applet, kde jsou údaje o hvězdách (obr. 25) [15]. Po vložení údajů o poloze pozorovatele a času můžete projíždět hvězdnou oblohou, a pokud na hvězdu ukážete kurzorem, zobrazí se vám všechny čtyři souřadnice, které potřebujete. Z internetových stránek jsme do našeho algoritmu přenesli azimut a výšku nad obzorem a očekávali jsme, jak bude vycházet deklinace a rektascenze.

	Rok	Měsíc	Den	Hodina	Minuta	výška h	A azimut od jihu	$\delta/^\circ$	$\alpha/^\circ$
Alpha Leonis	2008	1	29	22	55	47,311110	324,432220	12,071417	151,892979
Tau Persei	2008	1	29	22	55	40,136600	127,876600	52,707030	43,248643

Předpoklad	dekl.	rekt.
Alpha Leonis	11,928	152,019
Tau Persei	52,79527	43,7083

Výsledek, který jsme dostali naším algoritmem, se neliší od předpokladu o více než 1° , což můžeme považovat za fakt, který potvrzuje správnost našich výpočtů. Internetové stránky, které byly použity, samozřejmě mohou obsahovat neplatné klamavé údaje, avšak bylo by velkou náhodou, kdybychom pomocí jiných vzorců dostali stejně špatný výsledek.



The applet displays a star field on the left and a control panel on the right. The control panel includes sliders for Azimut (325°) and Výška (45°), a magnification slider (Zvětšení), and input fields for geographical coordinates (Zeměpis. délka: 15,8°, Zeměpis. šířka: 50,0°), date (Datum: 29. 1. 2008), and time (Čas: 23:55 hod (SČ)). A red button labeled 'Pohyb / Pauza' is at the bottom of the controls. Copyright information for W. Fendt 2001 and M. Panoš 2006 is at the bottom right.

Alpha Leonis (Regulus)
 Rektascenze: 10 h 8 min 48,5 s
 Deklinace: 11° 55' 40"
 Azimut: 324° 25' 56"
 Výška: 47° 18' 40"

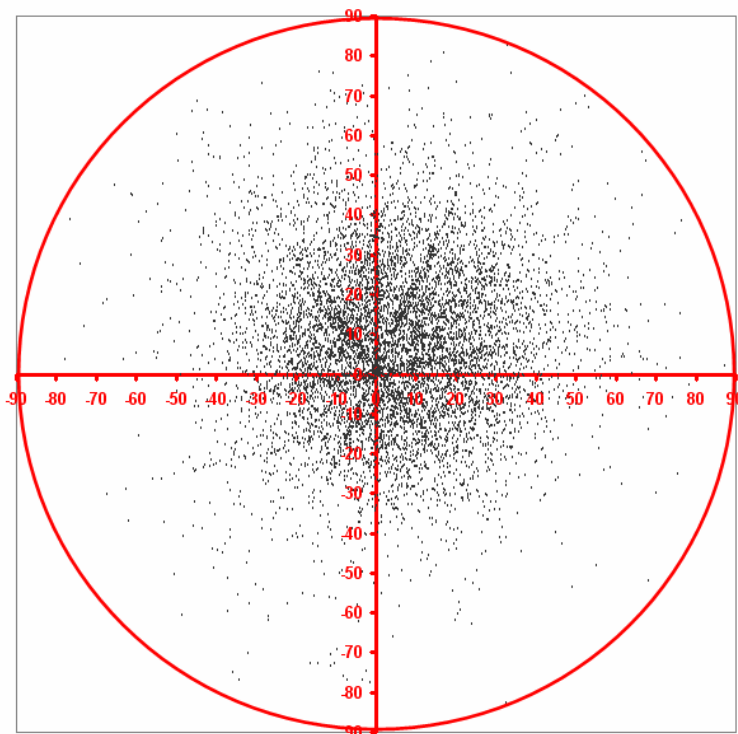
obr. 25 – Applet na interaktivní zobrazení hvězdné oblohy včetně možnosti animace, zobrazené azimutu, výšky nad obzorem, deklinace, rektascenze [6]

9. Prodlužovací smyčky

Jednou z nejdůležitějších nastavitelných vlastností aparatury je časové prodloužení na jednotlivých kanálech, které pak při analýze dat musíme zahrnout. Představíme-li si aparaturu, kde je na všech kanálech stejně dlouhý kabel (s konstantním zpožděním signálu na délkovou jednotku) vedoucí ke koincidenčnímu módu, kde všechny součástky mají stejnou časovou prodlevu (v řádu nanosekund hraje roli již kusová odlišnost jednotlivých součástek!), pak by celkové časové prodloužení vůči kanálu 0 bylo rovno nule.

$$\Delta TDC1 = TDC1 - TDC0 = 0$$

$$\Delta TDC2 = TDC2 - TDC0 = 0$$

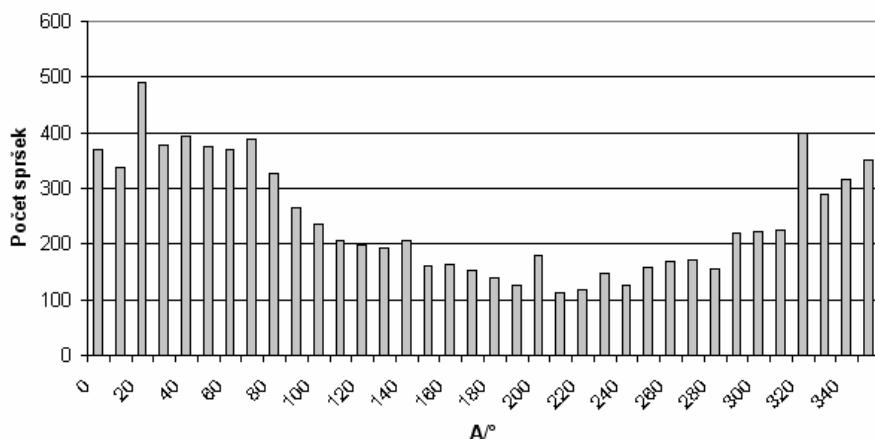


obr. 26 – Průmět do roviny horizontu při němž souhlasí zenitová vzdálenost 9. až 14.12.2006 (8 834 spršek)

Avšak v praxi dochází při tomto nastavení aparatury k selhání elektroniky. Pokud přijde sprška a vyvolá událost na dvou či třech detektorech téměř zároveň, řádově jednotky nanosekund, aparatura vykazuje chybné měření časových zpoždění. Na obr. 26 je zobrazení oblohy z období 9. až 14. prosince 2006 (2. typ), kdy byla stanice téměř v tomto režimu. Jsou zde patrné paprsky, které naznačují směry, ze kterých přicházejí chybně zaznamenané spršky. Je vidět, že nejvíce jsou ohroženy spršky přicházející ze zenitu a z význačných směrů, které souvisí s orientací trojúhelníku.

Podstatné také je, že počet spršek, které vykazovaly nesmyslná zpoždění, byl 6,5%. Zpravidla nelze spočítat složka vektoru $\vec{u}$. Podíváme-li

Počet spršek v závislosti na azimutu
9. až 14.12.2006



obr. 27 – Závislost počtu spršek na azimutu

se na rozložení jednotlivých směrů (azimutů od jihu) uvidíme, že jsou nerovnoměrně zastoupeny, což popírá izotropii příchodů spršek (obr. 27).

Jenomže to je pouze důsledek našeho předpokladu, že časové prodloužení $\Delta TDC1 = 0$, $\Delta TDC2 = 0$. Ze znalostí kosmického záření víme, že z dlouhodobého hlediska by všechny směry měly být

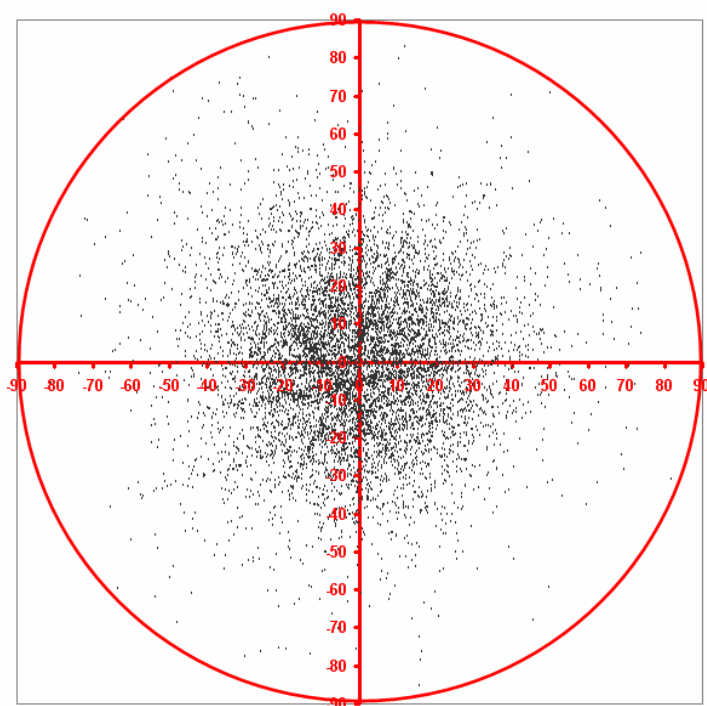
zastoupeny v podobném počtu. Z většího množství dat můžeme směrodatnou odchylkou vyfiltrout události, které podle pravděpodobnostního rozdělení neměly nastat. Dále také nepoužijeme události, ve kterých je v poli energie hodnota 4095. Tyto události zpravidla pak vykazují chybu v hodnotě složky vektoru u_z . Pak můžeme přes trojnásobek směrodatné odchylky

$$s_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}{N-1}}$$

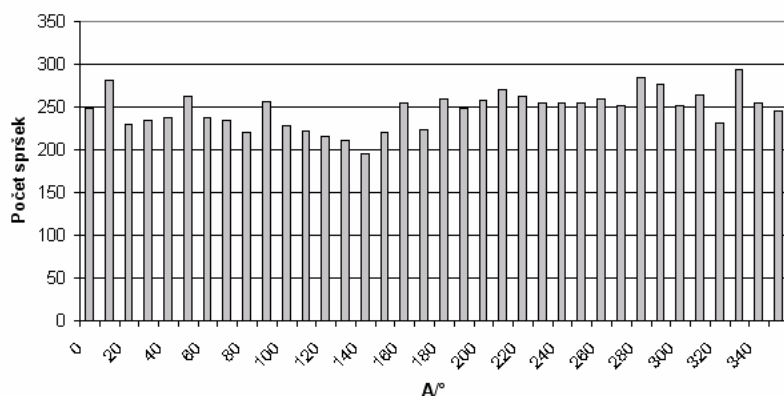
zjistit okolí průměrné hodnoty, kde se vyskytuje námi hledaný průměr s 99,97% pravděpodobností. Hodnoty vyskytující se mimo tento interval vyškrtáme a celou proceduru provedeme ještě několikrát, dokud už nevypadávají další hodnoty. Střední hodnoty těchto intervalů udávají hodnotu zpoždění při průchodu signálu celou elektronikou. Tím jsme zjistili, že hodnoty $\Delta TDC1$, $\Delta TDC2$ nejsou nulové.

$$\Delta TDC1 = 3,317 \text{ ns}$$

$$\Delta TDC2 = 4,645 \text{ ns}$$



Počet spršek v závislosti na azimutu
9 až 14.12.2006



Ted' můžeme znovu vykreslit předchozí dva grafy. Na obr. 28 se „hvězdice“ špatně zapsaných událostí posunula mimo počátek, avšak při pečlivém pozorování zjistíte, že kruhové zorné pole naopak posunulo svůj střed do počátku soustavy souřadné, což je určitě věrohodnější zobrazení. Při tomto nastavení stanice snímá všechny azimuty a výšky podle jednoznačných pravidel. To lze vyčíst i z grafu rozdělení počtu spršek podle azimutu (obr. 29), které se přiblížilo předpokládané izotropii. Když se podíváme na množství nevyhovujících dat, snížilo se ze 6,5% na 5,9%.

obr. 28 – Průmět do roviny horizontu při němž souhlasí zenitová vzdálenost 9. až 14. 12. 2006 (8 834 spršek) – bez prodlužovacích kabelů, se zpožděním elektroniky

obr. 29 – Závislost počtu spršek na azimutu, se zpožděním elektroniky

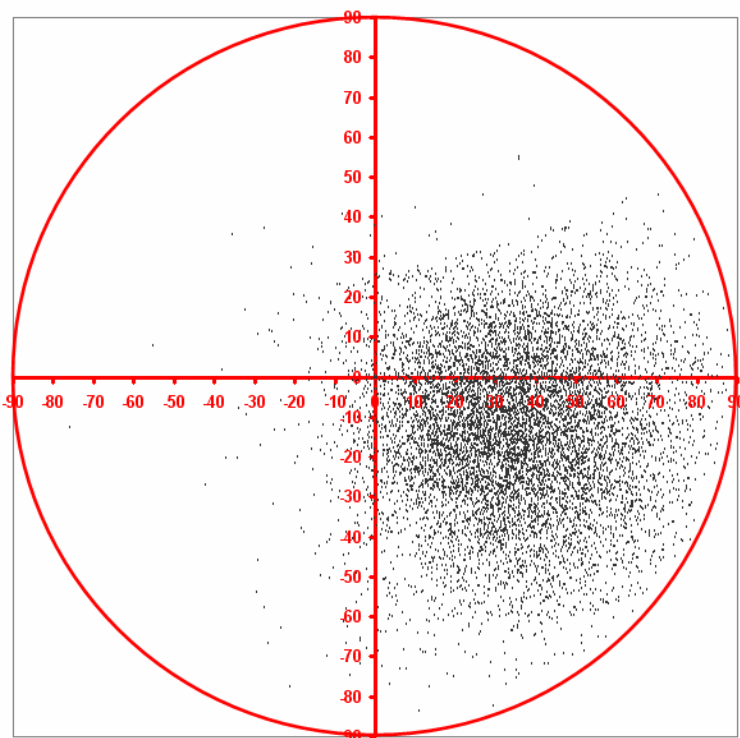
Pro podrobnější analýzu je nutné zkreslení dat hvězdíci předcházet. Nabízí se citlivé prodloužení kabelů na jednotlivých kanálech, tím by se události, které přišly brzo po sobě, jednotlivým zpožděním oddálily

a elektronika by nevykazovala zkreslení dat. Na naši stanici byly v souladu se zběžnou znalostí 100 ns mezery od příchodu na první do příchodu na poslední detektor umístěny prodlužovací kabely a to v takové délce, že se uvažovalo:

$$\Delta TDC1 = 78,015 \text{ ns}$$

$$\Delta TDC2 = 25,426 \text{ ns}$$

Kabely byly opatřeny nálepkou se zpožděním. Stanice v tomto stavu běžela 11 měsíců, během



obr. 30 – Průmět do roviny horizontu při němž souhlasí zenitová vzdálenost 3. až 8. 10. 2007

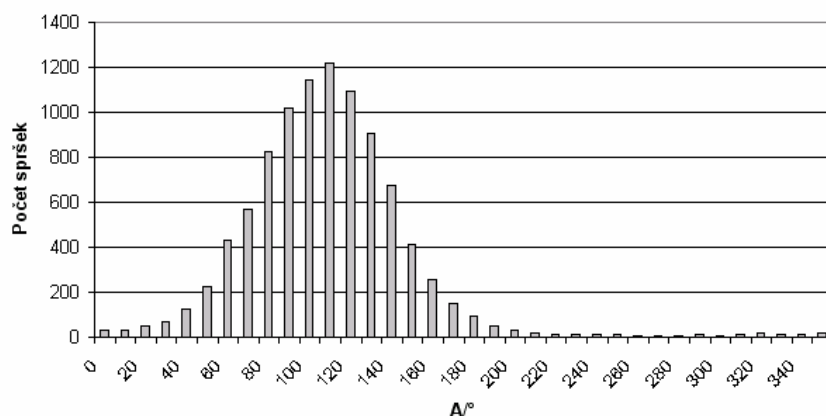
kterých jsme vypracovávali jednotlivé výpočty a zobrazení. Když jsme ovšem vytvořili algoritmy pro promítnutí oblohy, po vytvoření obrázků z tohoto časového období se zdálo, že data za celý rok jsou ztracena. Místo výsledku – celá obloha zobrazena ve středu soustavy – jsme dostali podivný výřez. Ilustrativně jsme vybrali 3. až 8. 10. 2007 (obr. 30), což je vzorek 6 dnů jako v prvním případě. Navíc i rozdělení v závislosti na azimutu bylo více než zvláštní. Proč by mělo najednou vypadat jako Gaussova křivka (obr. 31)? A proč je počet chybných dat plná čtvrtina, tedy 26%?

Uvažovali jsme nad možnými příčinami. Dosud jsme detailně neporozuměli koincidenčnímu

módu, takže jsme nevěděli, zda nemohlo prodloužení kabelů naprosto změnit zapsaná data, zasažený první detektor mohl být zapsán jako poslední a díky nám neznámým procesům v elektronice tyto události mohly být nerozeznatelné od správných dat. A byly vůbec nějaké spršky správně zapsány? Tyto otázky nám nedávaly spát. Desítky hodin strávených hledáním a testováním vzorců, hodiny seminářů s vědeckými pracovníky ÚTEF, práce školy při psaní projektu pro získání prostředků na nákladnou stanici – to vše teď mohlo přijít vniveč. Pak ovšem přišel další seminář a my jsme se dozvěděli, v čem byla chyba. Udané zpoždění

($\Delta TDC1 = 78,015 \text{ ns}$,
 $\Delta TDC2 = 25,426 \text{ ns}$) bylo pouze orientační a to před konečnou montáží a už vůbec v něm nebyla započítána další elektronika. Pak byly kabely ještě všemožně

Počet spršek v závislosti na azimutu
3. až 8. 10. 2007



obr. 31 – Závislost počtu spršek na azimutu, s prodlužovacími kabely

stříhány i nastavovány, avšak nikoho nenapadlo nálepky s původním zpožděním odstranit. Od pracovníků ÚTEF nám bylo sděleno, že dle Gaussova rozdělení pravděpodobnosti je skutečné zpoždění rovno:

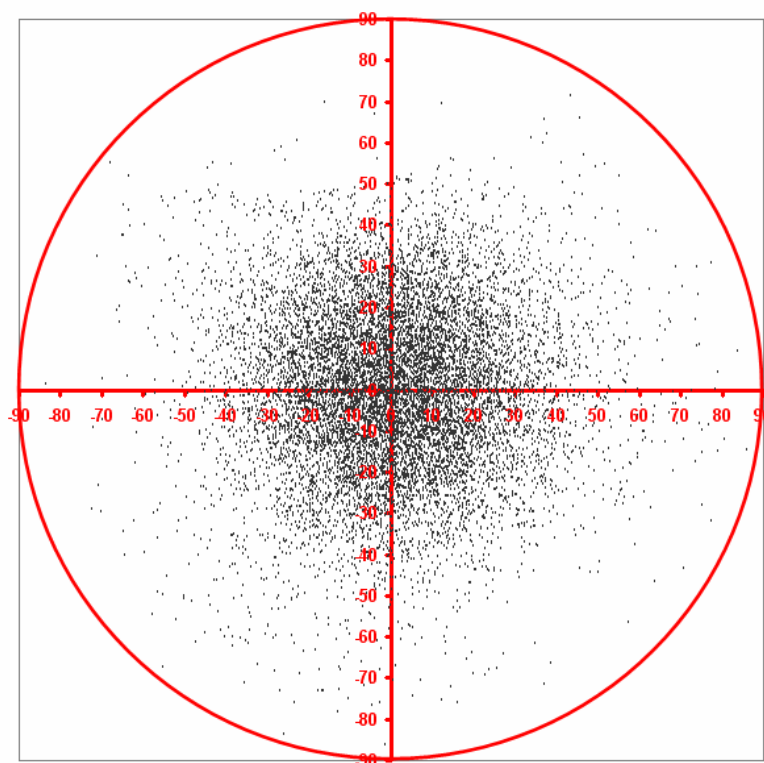
$$\Delta TDC1 = 66,375 \text{ ns}$$

$$\Delta TDC2 = 36,3 \text{ ns}$$

Pokud použijeme naši výše popsanou analýzu pravděpodobnostního rozdělení podle směrodatné odchylky a odfiltrujeme náhodné chyby, dostaneme se k hodnotám podobným:

$$\Delta TDC1 = 66,21 \text{ ns}$$

$$\Delta TDC2 = 36,76 \text{ ns}$$



obr. 32 – Průmět do roviny horizontu při němž souhlasí zenitová vzdálenost 3. až 8.10.2007

Odchylky v desetinách nanosekund jsou pro nás zanedbatelné. Jako správné budeme uvažovat hodnoty ÚTEF. Teď už můžeme znovu vykreslit oblohu, která se bude od předchozích podstatně lišit. Na obr. 32 už se nenachází „hvězdice“, takže události, které byly blízko u sebe, jsme úspěšně oddálili. Událostí, které jsme k sobě naopak přiblížili tak, že elektronika mohla chybovat, není mnoho, protože přicházejí ze směrů nízko nad obzorem, a tak chyby nejsou znatelné. Znatelný je ale úbytek událostí z jižního směru, které jsou nízko nad obzorem. To je způsobeno právě větší délkou prodlužovacího kabelu, než by měla být. Po detailním prozkoumání koincidenčního

módu jsme zjistili, že z nastavené 100 ns prodlevy si jednotlivé součástky odkrojí celkem 6 ns. Prostor pro spršku je tedy pouze 94 ns. Představme si situaci, že přijde sprška těsně nad obzorem přímo ze směru od kanálu D0 (tento detektor je namířen právě na jih). Projde detektorem D0 a ten spustí 94 ns prodlevu pro další dva signály z detektorů D1, D2. Protože do detektoru D1 se šíří nejdelší přímou spojnici, tzn. po straně trojúhelníku, je výsledný čas také nejdelší.

$$a \approx 10 \text{ m}, c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \Rightarrow \Delta t_1 = \frac{a}{c} = \frac{10}{3 \cdot 10^8} \text{ s} \approx 33 \text{ ns}$$

Pak signál projde kabelem a přibude další zpoždění.

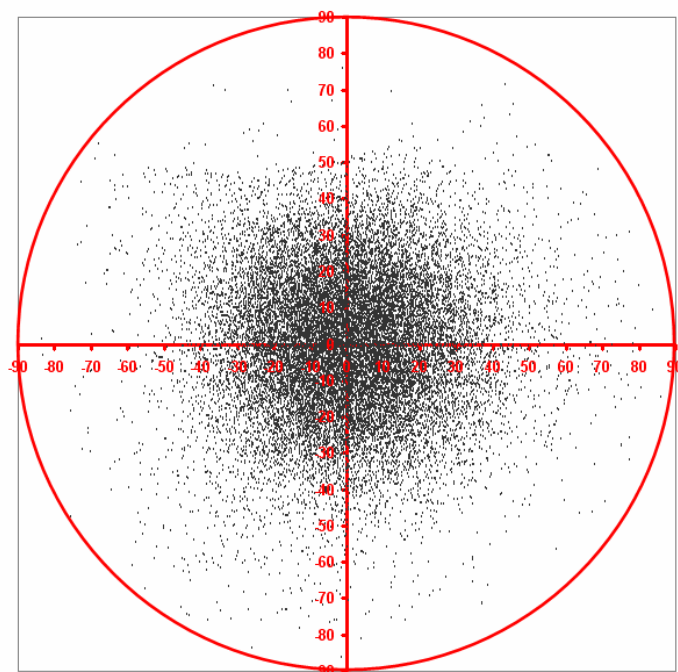
$$\Delta TDC1 = 66,21 \text{ ns}$$

Celkové zpoždění je pak

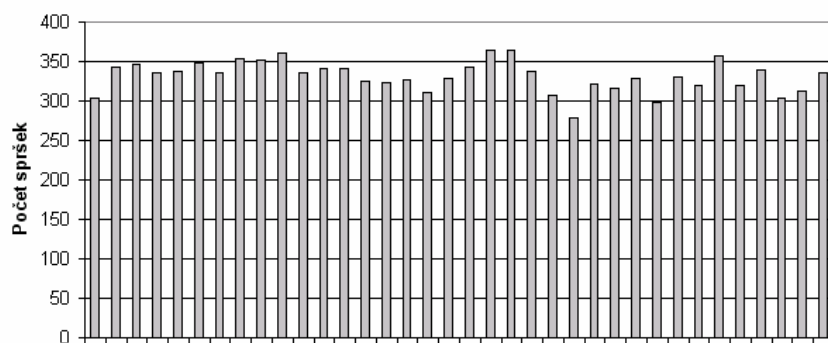
$$\Delta t \approx 99 \text{ ns}$$

což je více než 94 ns prostor, který poskytuje reálná elektronika. V širším množství dat je oříznutí daleko průkaznější a viditelnější. Na obr. 33 jsou zobrazena data za 11 dní. Daň v podobě drobného oříznutí pozorované oblohy, odkud k nám ale přilétá malé množství

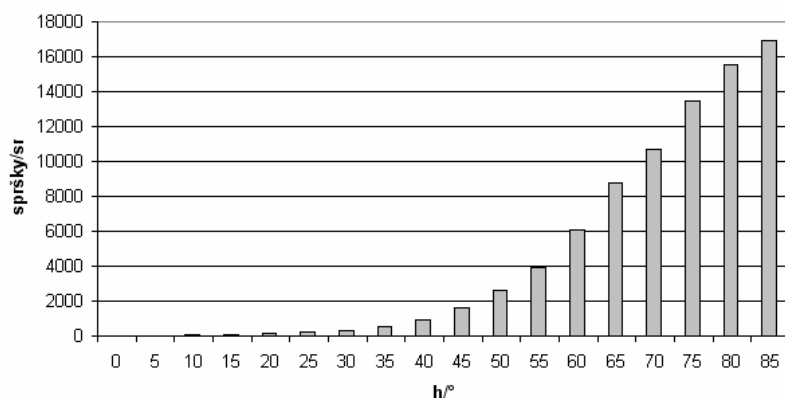
částic, vyvážila věrohodnost dat v důležité oblasti oblohy, kde data nejsou tolik zkreslena atmosférickou tloušťkou. Otázkou je, zda by případné těsné nastavení kabelu na celkové zpoždění 94 ns již ovlivnilo chování elektroniky při sprškách ze zenitových a růžicových oblastí či nikoliv.



**Počet spršek v závislosti na azimutu
3 až 8.10.2007**



**Počet spršek na steradián v závislosti na výšce nad obzorem
3. až 8.10.2007**



obr. 33 – Průmět do roviny horizontu při němž souhlasí zenitová vzdálenost 3. až 13. 10. 2007 (21 746 spršek)

Opět můžeme i vykreslit graf závislosti počtu spršek na azimutu (obr. 34), který se z tvaru Gaussovy křivky změnil do téměř rovnoměrného rozložení námi zaznamenaných událostí. Konečně bez rušící růžice můžeme zobrazit i graf závislosti počtu spršek na výšce nad obzorem (obr. 35). To je důležité především pro představu, jak tloušťka atmosféry pohlcuje jednotlivé spršky a kolik jich dorazí až na povrch planety. Z úhlů do 45° nad obzorem nepřichází téměř žádné sekundární záření, a tak i kabely způsobené oříznutí dat je v celkovém měřítku téměř zanedbatelné.

Naopak množství spršek zaznamenaných kolem zenitu je velmi velké a je podstatné udržet jejich správnost.

obr. 34 – Závislost počtu spršek na azimutu

obr. 35 – Počet spršek na steradián v závislosti na výšce nad obzorem

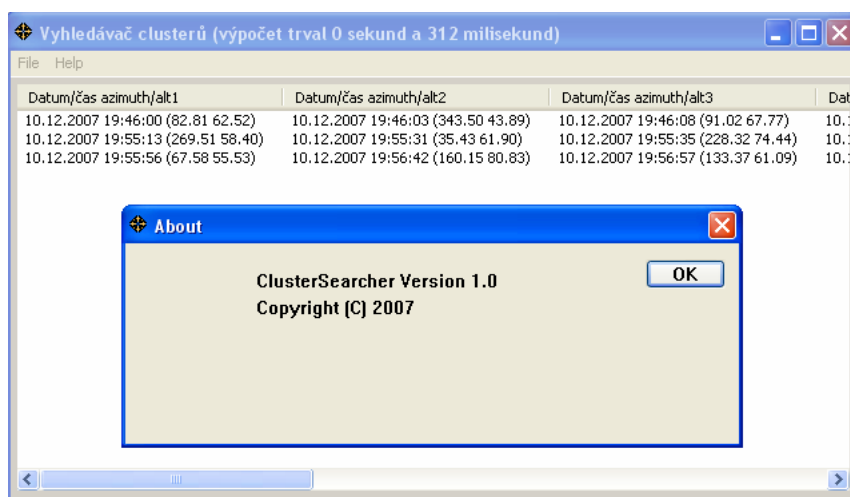
10. Analýza dat – vyhledávání spršek

Na následujících řádcích uvádíme dva způsoby a výsledky, jichž lze dosáhnout při detailní analýze dat. První z nich je hledání zajímavých událostí pouze v našich datech, druhým způsobem je vyhledání spršky, jež by mohla vzniknout zvláštní událostí ve vesmíru, která byla zaznamenána jinými detektory a informace o ní je dostupná např. na internetu.

10.1. Hledání clusterů

Jednou z možností, kudy se vydat při analýze dat, je vyhledávat clustery. Clusterem míníme skutečnost, kdy v neobvykle krátkém časovém sledu přijde větší množství spršek. Je na místě zkontrolovat, zda nepřicházejí z podobného směru. Pak by se mohlo uvažovat, že spršky mají stejný původ a podle astronomické mapy či zdrojů na internetu zjistit, jestli se v tomto směru nenachází nějaký význačný objekt, např. aktivní galaktické jádro, či supernova. Dále je potřeba určit přibližnou pravděpodobnost, že by taková posloupnost několika spršek z daného směru přišla náhodně.

Prvním krokem bylo využití programu ClusterSearcher – Vyhledávač clusterů (obr. 36), jenž napsal Jakub Čermák, bývalý student Gymnázia Pardubice, který podle zadaných podmínek – počet spršek, maximální časový odstup mezi nimi – najde odpovídající spršky.



obr. 36 – Cluster Searcher – Vyhledávač clusterů – program vyvinutý speciálně pro analýzy CZELTA

Nalezli jsme velmi zajímavou trojici spršek. V tabulce uvádíme postupně pořadí spršek, rok, měsíc, den, hodinu, minutu, sekundu, výšku nad obzorem, azimut od jihu, deklinaci a rektascenzi.

P	R	M	D	H	M	S	h/°	A/°	δ/°	α/°
1.	2007	12	10	19	46	0	63	135,5	63,0	346,4
2.	2007	12	10	19	46	8	68	144,1	65,0	359,6
3.	2007	12	10	19	46	15	68	121,6	56,8	355,0

Pokud spočítáme úhlovou vzdálenost objektů na obloze ze vzorce

$$\cos \Delta = \sin \delta_1 \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cos \delta_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)$$

zjistíme, že se spršky odchylují v průměru o 7,2°.

Spršky	$\Delta/^\circ$
1.,2.	6
2.,3.	8,2
3.,1.	7,5

Dalším krokem je výpočet pravděpodobnosti, že sprška je náhodná. Pro tento účel jsme použili Poissonovo rozdělení pravděpodobnosti.

Mějme děj, který nastává zcela náhodně v čase s četností f (příchod spršky kosmického záření). Počet událostí, které nastanou ve zvoleném časovém intervalu o délce T označíme k . Počet událostí k je náhodná veličina, která se řídí Poissonovým rozdělením. Pravděpodobnost, že v zadaném časovém intervalu budeme pozorovat k událostí, je rovna

$$P(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda},$$

kde $\lambda = fT$. Parametr λ představuje střední hodnotu veličiny k .

Tři spršky přišly 10. 12. 2007 během 15 s z pásu oblohy s výškou 60° až 70° nad obzorem. Z tohoto pásu v období 8. až 14. prosince 2007 přišlo v průměru 558 spršek za den. Vzhledem k tomu, že v azimutu se všechny vešly do 25° , vyřízneme z kulového pásu část s intervalem azimutu 25° . Z této plochy přiletlo denně $558 \cdot \frac{25}{360} = 38,75$ spršek

Relativní četnost je $f = \frac{38,75}{86400} \text{ s}^{-1} = 4,485 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

Vypočteme, jaká je pravděpodobnost, že ve zvolených 15 s přijdou z vybrané části oblohy nejméně tři náhodné spršky:

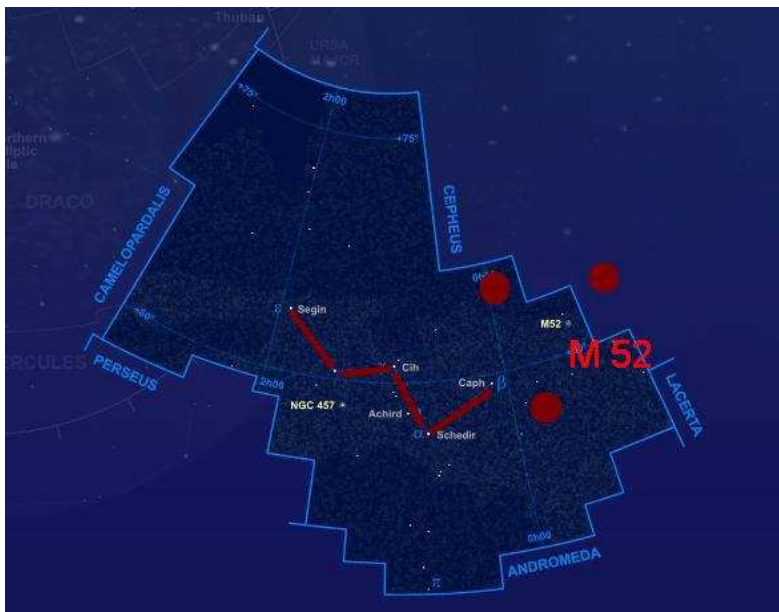
$$T = 15 \text{ s}$$

$$\lambda = f \cdot T = 4,485 \cdot 10^{-4} \cdot 15 = 6,7274 \cdot 10^{-3}$$

$$P(k \geq 3) = 1 - P(0) - P(1) - P(2) = 1 - \frac{\lambda^0}{1} \cdot e^{-\lambda} - \frac{\lambda^1}{1} \cdot e^{-\lambda} - \frac{\lambda^2}{2} \cdot e^{-\lambda} = 5 \cdot 10^{-8}$$

Pravděpodobnost, že z části oblohy vymezené výškou 60° až 70° a intervalem azimutu 25° přiletí během 15 s náhodně 3 spršky je $5 \cdot 10^{-8}$.

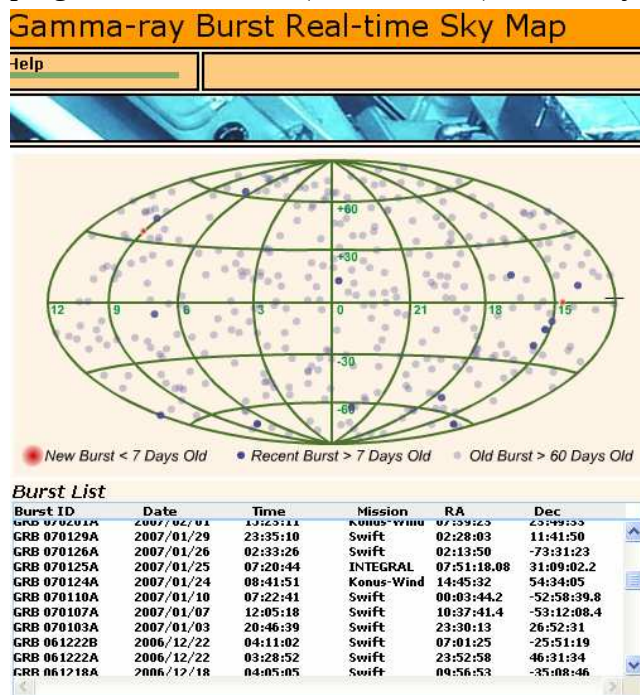
Pokud se podíváme do astronomické mapy (my jsme k tomuto účelu použili již zmíněný applet na zobrazování stálých hvězd[16]), zjistíme, že v okolí této trojice spršek se nachází otevřená hvězdokupa Messier 52 spadající pod souhvězdí Cassiopeia (česky Kasiopeja) [17]. Po vykreslení na mapu (obr. 37) vidíme, jak cluster objekt „obklíčil“. Jestli se může v objektu M-52 zdroj nacházet, je pro nás zatím nezodpověditelnou otázkou.



obr. 37 – Grafické znázornění námi nalezeného clusteru [7]

10.2. Gama výtrysky

Intenzivní výtrysky γ záření (v angličtině nazývány Gamma Ray Bursts – GRBs) jsou v současné době pro astrofyziku velkým oříškem a částečně záhadou. Byly objeveny v rámci programu družic Vela (od roku 1963) [18], který měl pomoci detekce γ záření v době Studené



obr. 38 – web GRB záblesků [8]

války zaznamenat jakékoliv jaderné testy Sovětského svazu odehrávající se na Zemi. Až v roce 1973 předala americká vláda podivná data astronomům a ti v dalších letech začali zjišťovat, že tyto paprsky přicházejí z kosmu, neboť výkon, který krátkodobý GRB vyžáří do okolního prostoru, je mnohanásobně vyšší než světelný výkon hvězd galaxie Mléčné dráhy [19].

Co je ovšem zahaleno tajemstvím, je vznik tohoto záření. Existují teoretické předpovědi, které je ale potřeba potvrdit experimentálně získanými daty, kterých je díky obtížné pozemské detekci a finančně nákladné detekci z oběžné dráhy velmi málo. Teorie mluví o supernovách, srážkách dvou neutronových hvězd nebo srážkách neutronových hvězd s černými děrami, přesný mechanismus však dosud potvrzen není.

Podle dosud zaznamenaných a přesně změřených výtrysků se vesmírem pohybují tyto vysokoenergetické γ fotony miliardy let než jsou pohlceny. Některé z nich mohou mít i energii větší než 10^{14} eV, tedy energii, která vyvolá spršku, již je schopna naše stanice zaznamenat.

Na internetu jsou volně dostupná základní data o záblescích zaznamenaných družicemi INTEGRAL a Swift (obr. 38) [20]. Gama záblesk na jedné straně přenáší spoustu energie, na druhé však putuje vesmírem ve velmi úzkém svazku – tzv. jetu, a proto má nálezy spršky vzniklé γ fotonem, který by byl zároveň detekován družicí, malou pravděpodobnost. I přes tyto nepříliš příznivé předpovědi jsme jednu po druhé prošli data z družic za období únor až prosinec 2007. Družice zaznamenaly za tuto dobu 85 výtrysků, většina z nich nebyla z naší středoevropské polohy ani na obzoru, a přesto se ten s označením GRB 070714A jeví z našeho hlediska jako nadějný.

Označení určuje datum – 14. července 2007, družicí zaznamenaná délka tohoto výtrysku je 2 s. V následující tabulce uvádíme srovnání dat získaných na internetu a samotný výpočet, ke kterému jsme dospěli použitím našeho algoritmu.

Zdroj dat	UTC/h:min:s	α /h:min	δ /° : ' "
Internetová databáze	4:59:29	2:51	30:14
Naše sprška	5:01:03	3:16	25:06

Pokud použijeme vzorec pro výpočet úhlové vzdálenosti

$$\cos \Delta = \sin \delta_1 \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cos \delta_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)$$

dojdeme k výsledku

$$\Delta = 6,2^\circ$$

Dále musíme zjistit pravděpodobnost, že z udaného místa mohla být náhodně zaznamenána sprška. Záblesk GRB 070714A zaznamenaný družicí i sprška zaznamenaná naší stanicí spadají do pásu oblohy s výškou 60° až 70° nad obzorem. Z tohoto pásu v období 8. až 14. července 2007 přišlo v průměru 421 spršek za den. Úhel na obloze mezi GRB a naší sprškou je $6,2^\circ$. Vyřízneme z kulového pásu část o úhlové šířce azimutu 10° a z této plochy přiletlo denně

$$421 \cdot \frac{10}{360} = 12 \text{ spršek}.$$

$$\text{Relativní četnost je } f = \frac{12}{86400} \text{ s}^{-1} = 1,3888 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}.$$

GRB byl zaznamenan v 4:59:29 UTC a naše sprška v 5:01:03 UTC. Rozdíl je 94 sekund. Vypočteme, jaká je pravděpodobnost, že ve zvolených 94 s přijde z vybrané části oblohy alespoň jedna náhodná sprška ($k > 0$):

$$T = 94 \text{ s}$$

$$\lambda = f \cdot T = 1,3888 \cdot 10^{-4} \cdot 94 = 1,3056 \cdot 10^{-2}$$

$$P(k \geq 1) = 1 - P(0) = 1 - e^{-\lambda} = 1 - e^{-1,3056 \cdot 10^{-2}} = 0,013$$

GRB podle družice Swift trval pouze 2 s a námi zaznamenaná sprška přišla 94 s po začátku záblesku. Pravděpodobnost, že z vybrané části oblohy v průběhu vybraných 94 s přišla sprška náhodně, je přibližně 1,3 %. Sprška i GRB se blíží k hvězdě 41 Arietis, tradičně nazývané Bharani, v souhvězdí Berana (obr. 39).



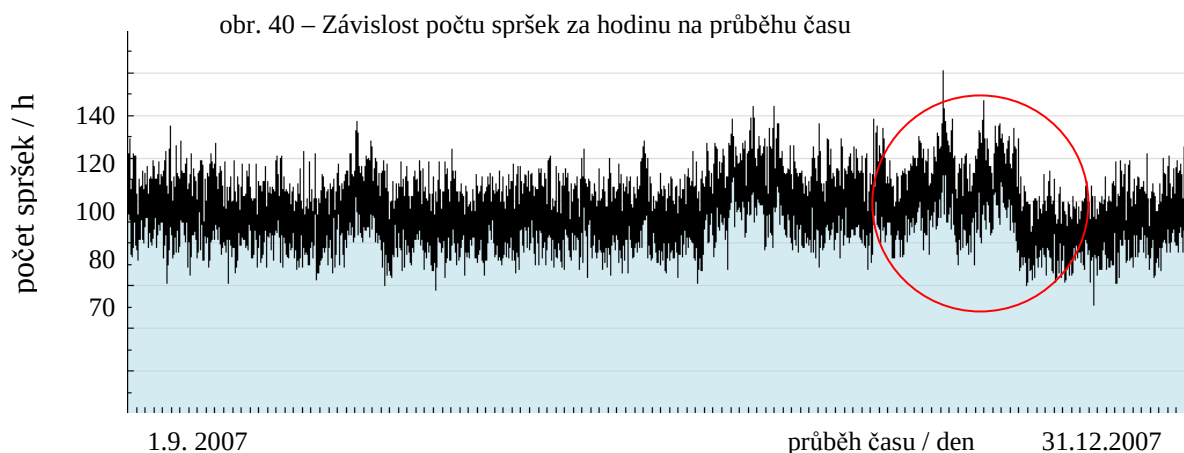
obr. 39 – Grafické znázornění naší spršky a GRB výtrysku [9]

11. Počty spršek

Základní charakteristikou, která nás zajímá u spršek sekundárního kosmického záření, je počet spršek, které dopadají na detektory, a tím pádem na cokoliv, co se vyskytuje na zemském povrchu.

Pokud by se naše detektory dostaly do zorného pole silného zdroje vysokoenergetického záření, první, na čem bychom to mohli zpozorovat, by byl zvýšený tok částic. Bohužel, díky proměnám počtu spršek v závislosti na meteorologických veličinách, to není tak jednoduché. Nejdříve by se musel vymyslet algoritmus, který by tuto závislost odstranil. Korekce toku na tlak je však záležitostí pro nás ještě velmi vzdálenou – nemáme dostatek meteorologických dat, navíc by se musel vzít v potaz nejenom tlak, ale i další veličiny jako jsou teplota vzduchu, možná i vlhkost vzduchu.

Můžeme se teď postupně podívat, jak se počty spršek v čase mění. Prvním grafem je klouzavý součet spršek po 1 hodině (obr. 40). Úsekem jsou čtyři měsíce – od 1. září 2007 do 31. prosince 2007. Je zde patrných několik minim a maxim. Hodnota hodinového součtu se pohybuje mezi 70 a 120 sprškami, ale jak se můžete přesvědčit, je poměrně variabilní, maxima dosahují i přes 150 spršek za hodinu.

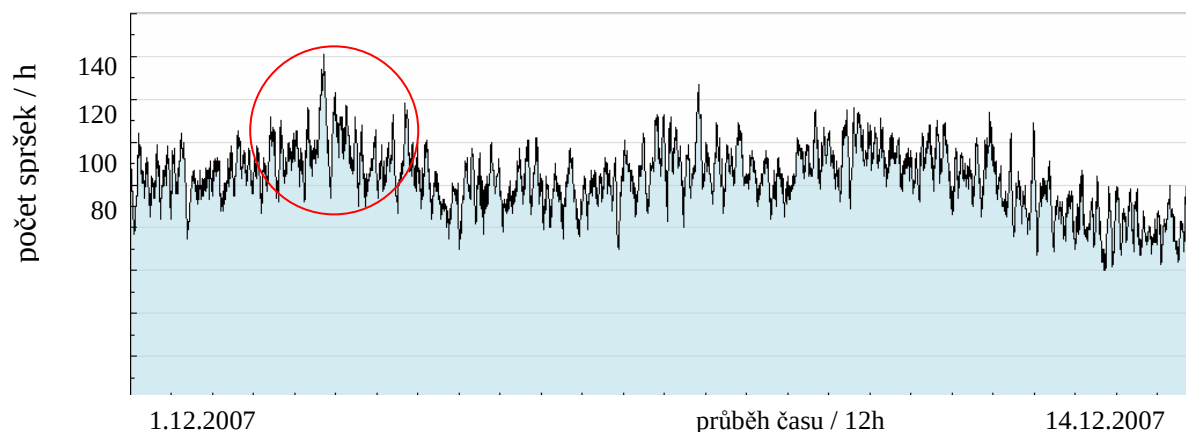


Můžeme se přiblížit na graf jednoho měsíce (obr. 41). Jednotlivé týdny v měsíci jsou velmi rozdílné. Některé se drží na konstantním toku 80 spršek za hodinu, některé mění ze dne na den počet spršek i o 20.



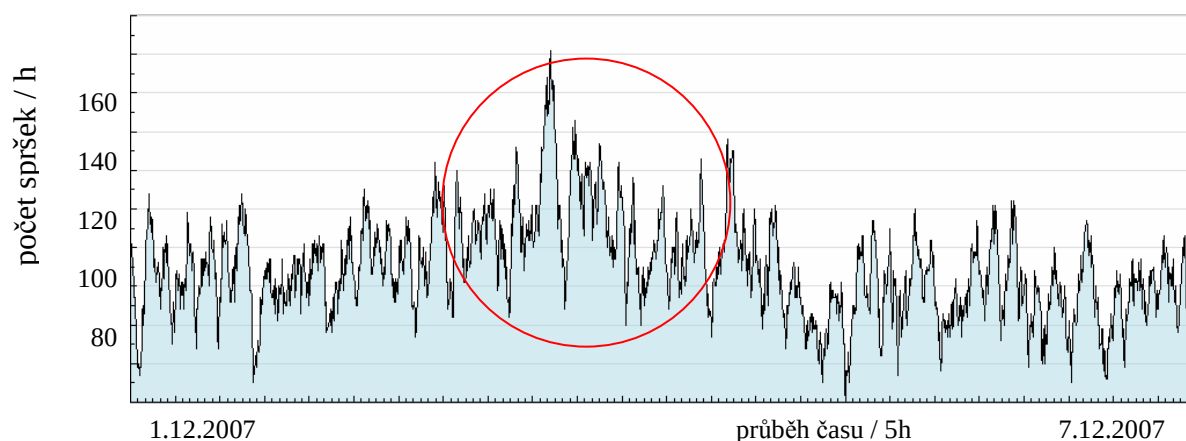
Na dalším grafu z prvních 14 dní v prosinci 2007 (obr. 42) už „písmeno M“ není téměř znatelné. Zakroužkovali jsme nejvyšší hodnotu – levý vrchol tohoto útvaru.

obr. 42 – Závislost počtu spršek za hodinu na průběhu času

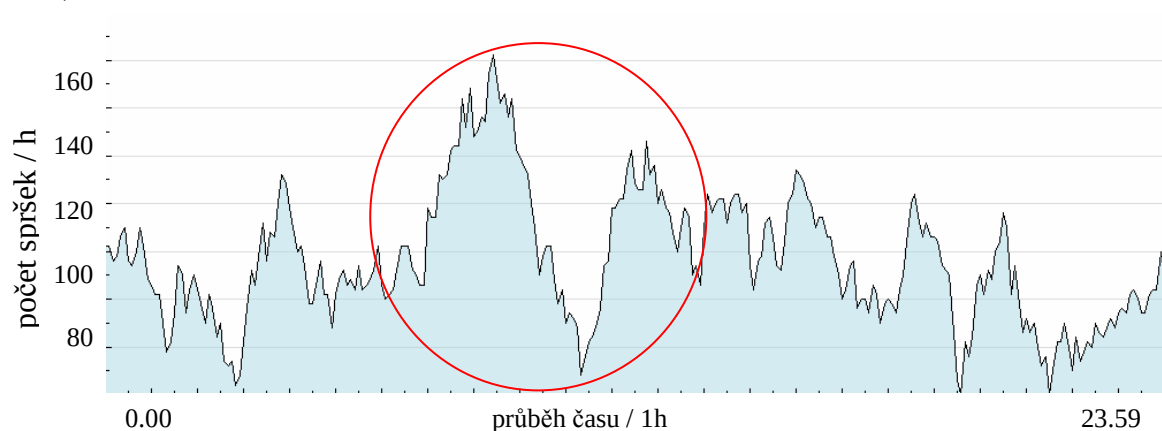


Na týdenním grafu (1. až 7. prosince 2007) už jsou znatelné jednotlivé posuny počtu událostí za hodinu (obr. 43). Maximální hodnota se blíží k 160 sprškám za hodinu, naopak u úpatí je to kolem 95.

obr. 43 – Závislost počtu spršek za hodinu na průběhu času

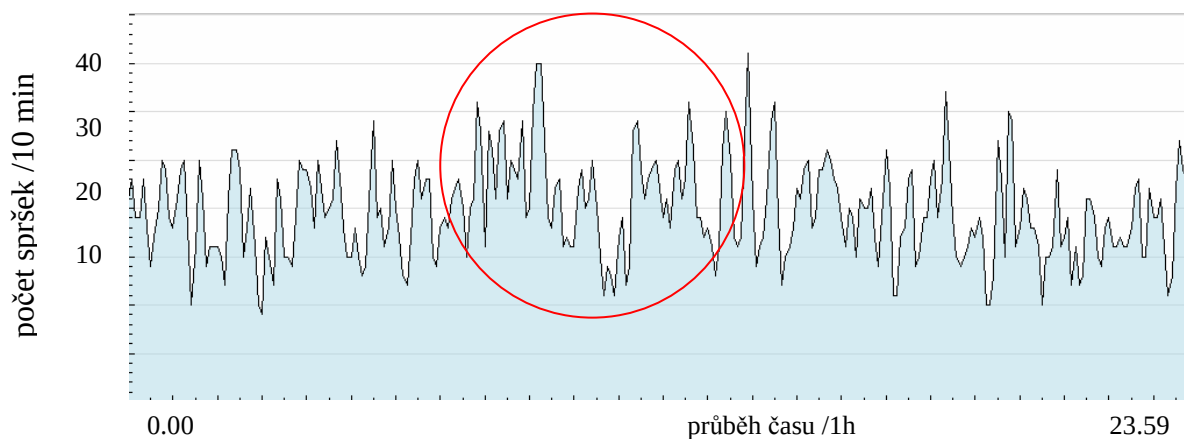


Denní graf (1. prosince 2007) už v hodinových součtech vypadá velmi málo podrobný. Vidíme, že v průběhu čtyř hodin klesl počet spršek z hodnoty 160 na hodnotu 95, tzn. o 41% (obr. 44).



obr. 44 – Závislost počtu spršek za hodinu na průběhu času

Když už přestaly být klouzavé hodinové součty dosti přesné, můžeme přistoupit ke kratšímu intervalu např. 10 minutám. Tím se nám ovšem mění měřítko na ose y. Průměrnou hodnotu hodinového toku bychom dostali vynásobením šesti. Vrchol je 35 spršek za 10 minut, což odpovídá 210 sprškám za hodinu (obr. 45).



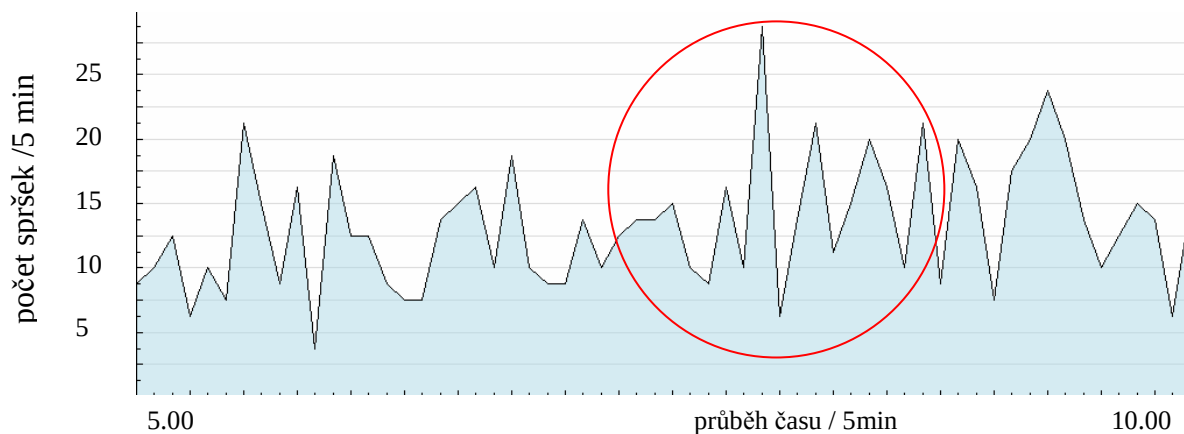
obr. 45 – Závislost počtu spršek za 10 minut na průběhu času

Předposledním grafem (obr. 46) je počet spršek za 10 minut, celková doba je 12 hodin v rozmezí 4. až 16. hodiny 3. prosince 2007.



obr. 46 – Závislost počtu spršek za 10 minut na průběhu času

Na posledních pěti grafech se upřesňovaly jednotlivé hodnoty a zvláště křivka těsně za vrcholem nabyla reálnější podoby. Pokud se budeme dále snažit zpřesnit, dostaneme se na hranici rozumného zobrazení. Z posledního grafu (obr. 47), kde jsou součty po 5 minutách a data za 5 hodin – od 5 do 10 hodiny 3. prosince 2007.



obr. 47 – Závislost počtu spršek za 5 minut na průběhu času

Součtové grafy jsou jistě impozantní. Pro další analýzu by byla potřeba především korelace s tlakem. Na zpracování však bude muset být použita softwarová technika odpovídající množství nasbíraných dat – jednoduchým výpočtem zjistíme, že při průměrných 100 sprškách za hodinu množství nasbíraných dat překročí za rok 800 000 spršek.

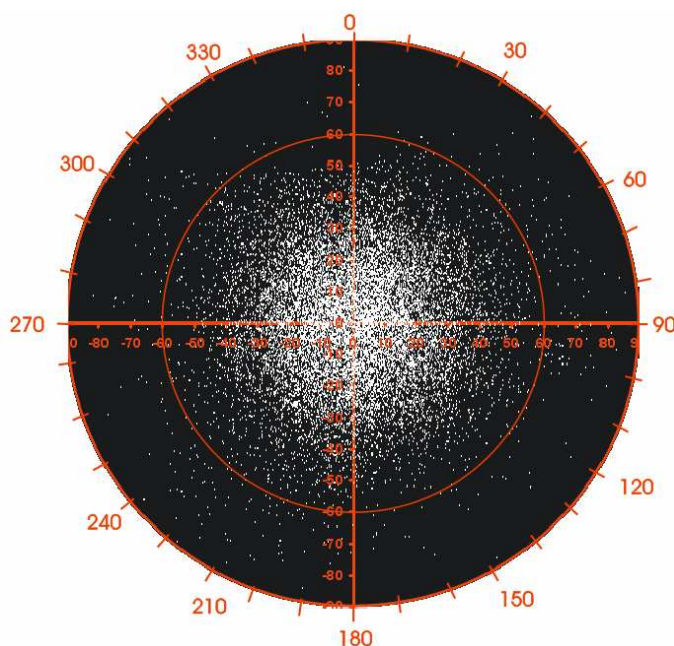
Byly použity grafy ze systému Jakuba Čermáka [21].

12. Rozbor grafů výšky a azimutu příchozích spršek

U každé spršky, kterou zachytíme, můžeme určit směr, z jakého místa oblohy k nám přilétla, tuto polohu přepočítáváme do obzorníkových souřadnic. Tato soustava je reprezentována výškou nad horizontem a azimutem od jihu. Nejprve vysvětlím, co tyto souřadnice znamenají ve spojitosti k našemu zařízení. Azimut a výška vyjadřují, z jakých míst oblohy dopadají spršky na detektor, tak jako bychom to vnímali my, kdybychom se postavili na jeho místo. Pro tento přepočet nepotřebujeme znát ani čas, ani zeměpisnou polohu naší stanice, je nutno pouze znát velikost a orientaci trojúhelníku, který tvoří naše detektory.

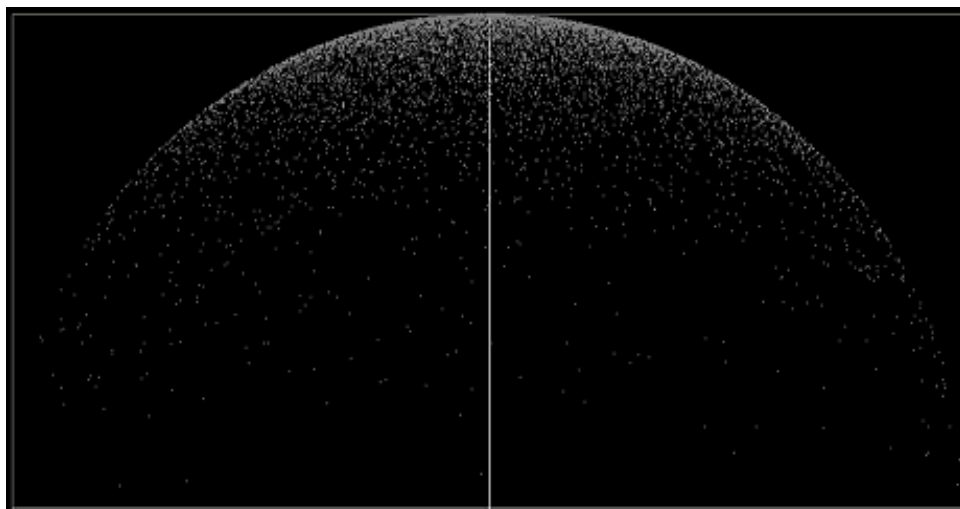
Tyto souřadnice nám neřeknou, z jakého místa ve vesmíru k nám sprška skutečně přišla, ale grafy azimutu a výšky nám pomohou implementovat grafy deklinace a rektascenze spršek. Ve významu nám graf azimutu a výšky udá zorné pole, ze kterého spršky zachytáváme.

Obloha 1. až 7. září 2007 se
zobrazenými sprškami
2. typ (obr. 48)



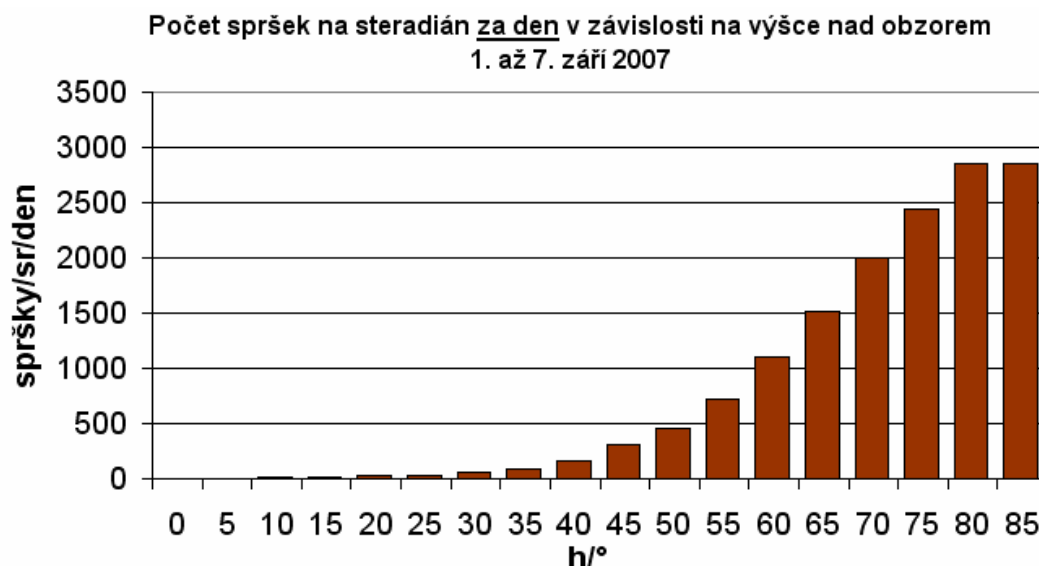
obr. 48 – Průmět oblohy 1. až 7. září 2007

Zobrazení oblohy, které výborně
dokumentuje, odkud pochází nejvíce
spršek dopadajících na povrch Země.
4. typ (obr. 49)



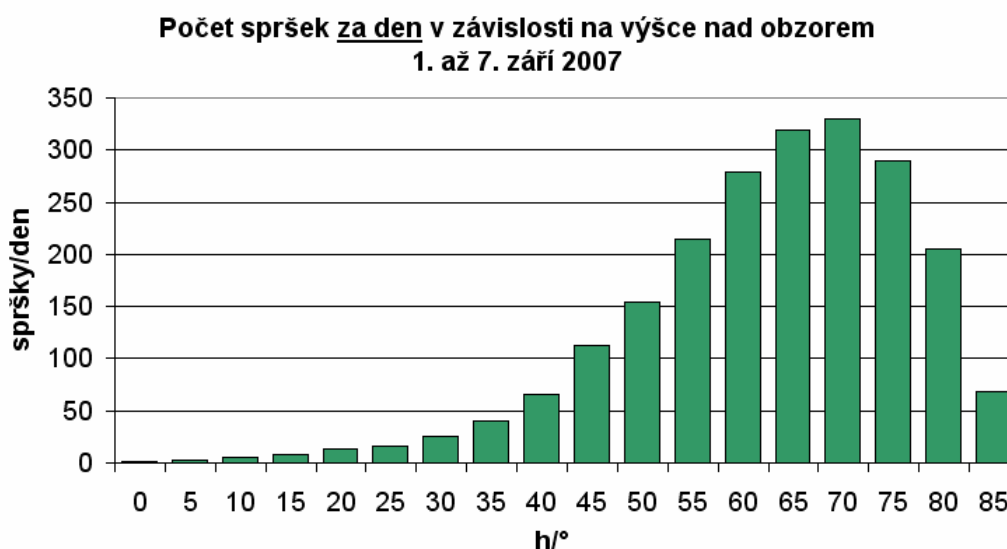
obr. 49 – Průmět oblohy 1. až 7. září 2007

Z grafů a z graficky zpracovaného makra (programovací nástroj v Microsoft Excel, založený na jazyku Visual Basic, který nám pomohl sečíst spršky zadaných parametrů) je patrné, že největší hustota přichozích spršek je přímo v zenitu (obr. 50) (makro je přepočtené na jeden den – může se zdát matoucí, že součet spršek několikrát převyšuje tok spršek za den, to je však způsobeno tím, že 1 steradián je poměrně velký úhel a my máme velkou hustotu toku částic pouze v malém úhlu, při jednom pólu oblohy).



obr. 50 – Počet spršek / sr za den v závislosti na h

To si můžeme odvodit tím, že sprška sestupující kolmo k povrchu Země urazí v atmosféře nejmenší dráhu, a tím ztratí nejméně energie. Tento poznatek je vidět i z analýzy energií, kde s klesající výškou, klesá i energie. Graf makra, které sčítá spršky v jednotlivých pásích, dokumentuje, že i když je největší hustota částic při výškách kolem 90°, tak do našich detektorů dopadá nejvíce částic z pásu mezi 65° a 75° výšky (obr. 51), což je způsobeno nejlepším poměrem mezi hustotou dopadu částic a prostorovým úhlem.



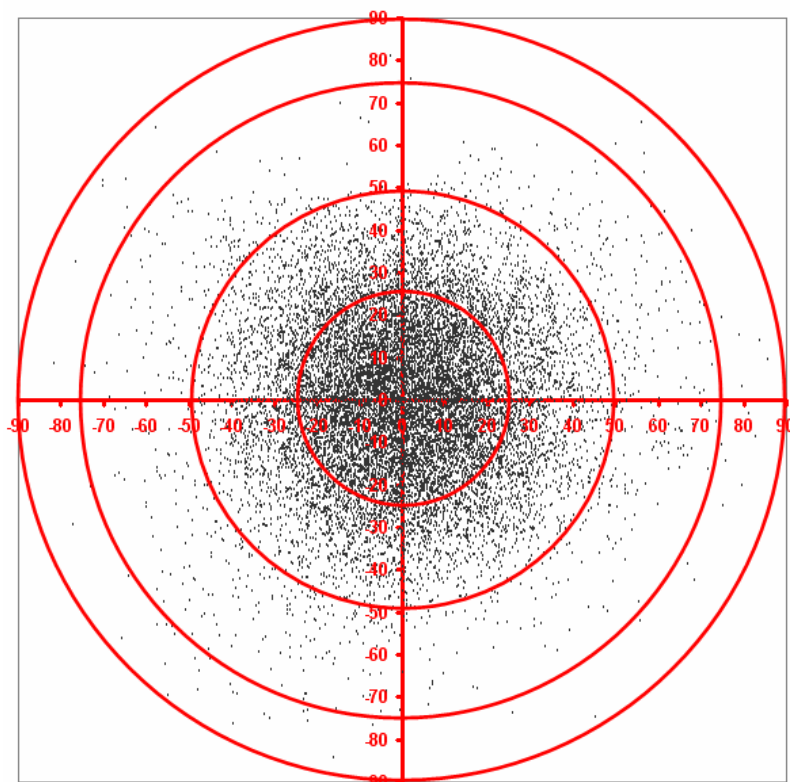
obr. 51 – Počet spršek za den v závislosti na h

Když se podíváme na celkový počet spršek a rozdělíme je podle výšky nad obzorem, můžeme vytvořit předpoklad ohledně prodlužovacích kabelů, což odpovídá otázce „Jak dlouhé můžeme připojit prodlužovací kabely a neztratit významnější množství dat?“

Zenitová vzdálenost	Množství ze všech spršek
25°	56%
50°	95%
75°	99,5%

Na oblohu jsme spršky zakreslili do kruhů – nejmenší odpovídá 25° od zenitu, největší je celá obloha – 90° (obr. 52).

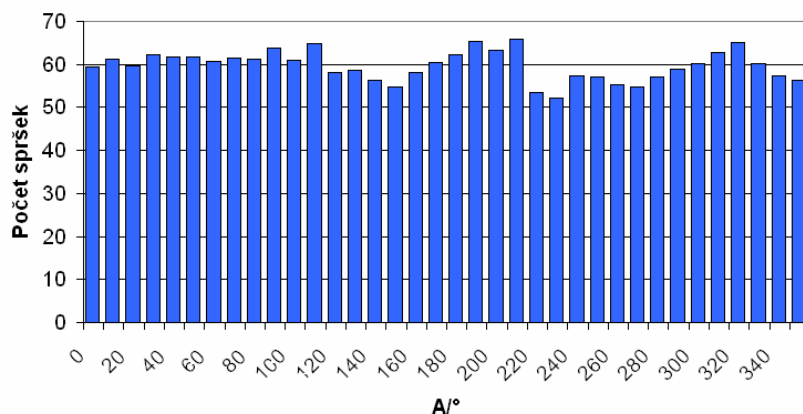
**Průmět do roviny horizontu při němž
souhlasí zenitová vzdálenost 1. až 7. září 2007**



obr. 52 – Průmět do roviny horizontu

Ve výše uvedeném zobrazení oblohy, ani v grafu počtu spršek v závislosti na azimutu (obr. 53) nepozorujeme nějaké výrazné zvýhodnění určitých směrů. Tento závěr znamená ověření námi vytvořených algoritmů, protože by bylo velice zvláštní, kdyby se nám jeden nebo více směrů projevoval vyšším počtem spršek než jiný. Opět se zde musím zmínit o tom, že to, co by způsobilo zvýhodnění, by muselo rotovat spolu se Zemí, což znamená, že problém by byl patrně v atmosféře nebo v magnetickém poli Země.

**Počet spršek za den v závislosti na azimutu
1. až 7. září 2007**

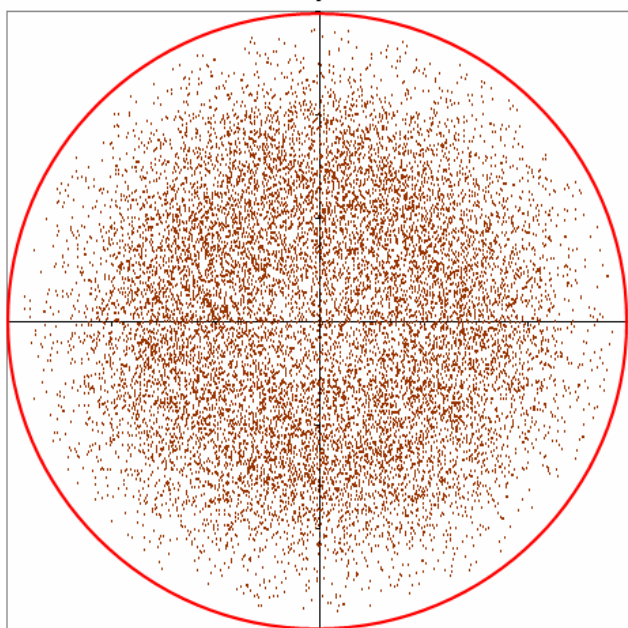


obr. 53 – Počet spršek za den
v závislosti na azimutu

13. Rozbor grafů deklinace a rektascenze spršek

Nyní se dostáváme k hlavním pilířům naší práce. Jedním z cílů, které jsme si vymezili na začátku našeho projektu, bylo pokusit se o vytvoření funkčního algoritmu pro výpočet deklinace a rektascenze spršky a její následné zakreslení do grafu dle příslušných souřadnic. Když jsme poprvé kopírovali data rektascenze a deklinace do algoritmu pro příslušné zobrazení, tajil se nám dech, čekali jsme něco ohromného, přáli jsme si, aby nám body, které reprezentují spršky, shlukly do třech, čtyřech míst na obloze. Výsledek nebyl ohromující, ale nebyl ani špatný, body se nám vykreslily tak, že kosmické záření oblohy je izotropní.

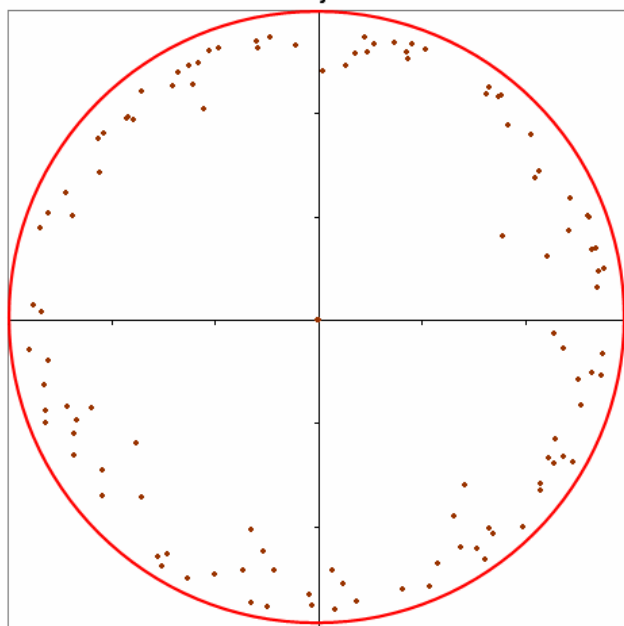
Zobrazení deklinace a rektascenze - severní obloha
1. až 7. října 2007



Díky středoevropské poloze většina námi detekovaných spršek pochází ze severní polokoule rovníkového systému – 3. typ.

obr. 54 – Zobrazení severní oblohy
v rovníkovém formátu

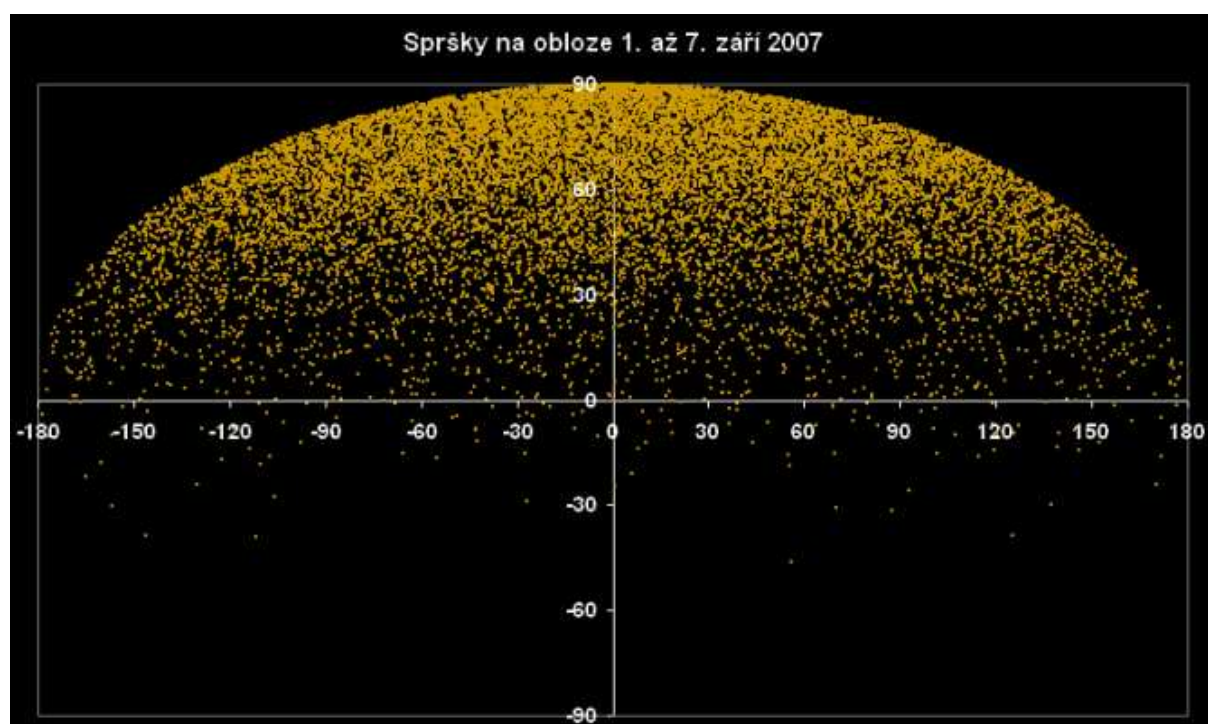
Zobrazení deklinace a rektascenze - jižní obloha
1. až 7. října 2007



Z jižní oblohy k nám přichází spršek jen velmi málo – 3. typ.

obr. 55 – Zobrazení severní oblohy
v rovníkovém formátu

Můžeme je i zakreslit do 4. typu zobrazení (obr.56)..



obr. 56 – Zobrazení oblohy v rovníkovém formátu

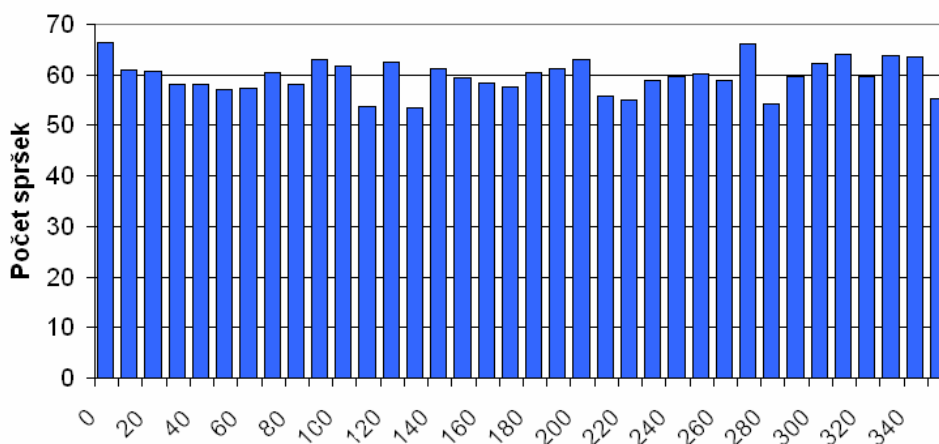
Náš projekt je sice ojedinělý v České republice, ale ve vesmíru obíhají družice, které monitorují kosmické záření, a z jejich měření vyplývá, že kosmické záření přichází izotropně alespoň v zorných polích těchto družic (I když tato zorná pole nejsou příliš velká.).

Dovolím si obrátit pořadí, ve kterém budu implementovat deklinaci a rektascenzi. Jak už jsem zmínil, body v grafu měly v kružnicích stejnou hustotu, to je způsobeno tím, jak kužel spršek opisuje během dne kružnici na obloze (v podstatě zenit vykoná více než 360° , ale 1 stupeň, který je navíc, není ani v grafu vidět.). Výklad toho, kde by měla být hustota spršek nejvyšší, je problematický. Hustota spršek po přepočtení na deklinaci by měla mít maximum kolem 50° , to však platí pro statickou úvahu, kdybychom spršky vykreslili z jednoho okamžiku. Země se ale otáčí a spršky mají v grafu deklinace a rektascenze skoro stejnou hustotu přibližně od 50° až 90° deklinace (mírně se do středu zmenšuje), zatímco od 50° níže se zmenšuje výrazně. Příčinu tohoto jevu můžeme hledat v tom, že plocha, kterou kužel spršek opíše za den, je mnohem menší pod zenitovou kružnicí než nad ní (nejedná se jen o problém zobrazení, navíc u zobrazení 3. typu není zkreslení ploch). Navíc spršky přesahují přes severní pól, a tak doplňují hustotu bodů spršek, které mají největší nahuštění na druhé straně (toto vlastně souvisí s onou zmenšenou plochou – jedná se spíš o vysvětlení, kam se ztrácí plocha).

Samozřejmě my se tak snadno nevzdáváme, a proto jsme zkoušeli zobrazit si v grafu deklinace a rektascenze spršek více dní v naději, že se nám budou přeci jen některá místa zdát více nahuštěná sprškami. K našemu zklamání se grafy staly tak nepřehlednými, že jako metoda hledání není tento postup ideální. Navracíme se tedy používání maker. Ty nám umožňují přesněji popsat již výše zmíněná fakta.

Graf počtu spršek na rektascenzi (obr. 57) potvrzuje homogenitu.

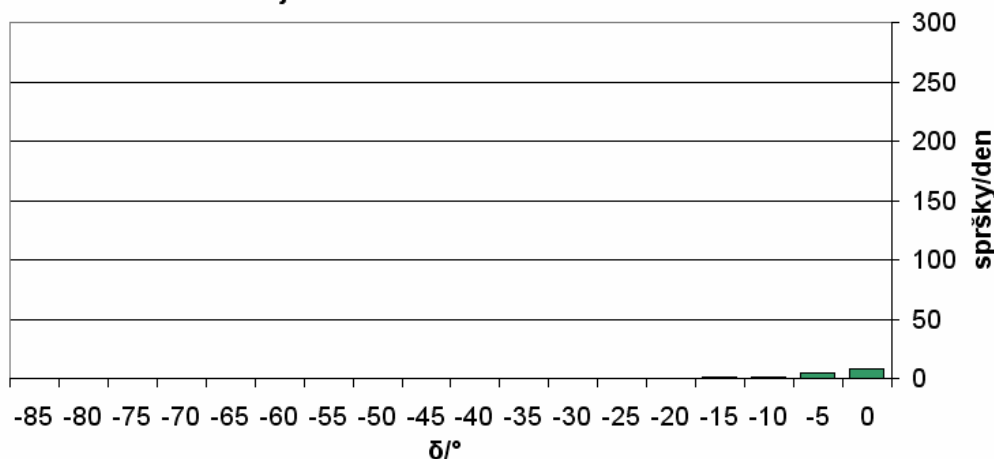
**Počet spršek za den v závislosti na rektascenzi
1. až 7. září 2007**



obr. 57 – Počet spršek v závislosti na rektascenzi α/°

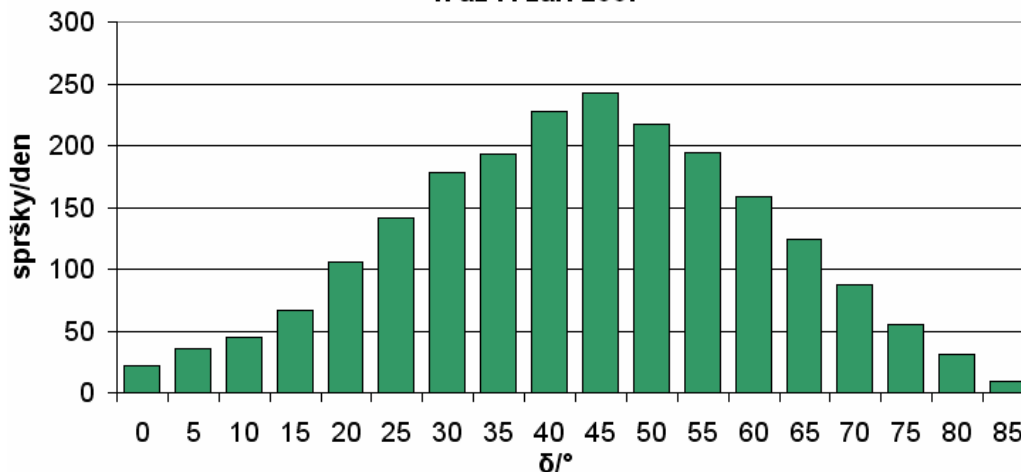
Počty spršek za den v závislosti na deklinaci (obr. 58 a obr. 59) – jasně popisují maximum spršek kolem 50° deklinace a naopak je vidět, jak z jižní oblohy přichází malý počet spršek.

**Počet spršek za den v závislosti na deklinaci
jižní obloha 1. až 7. září 2007**



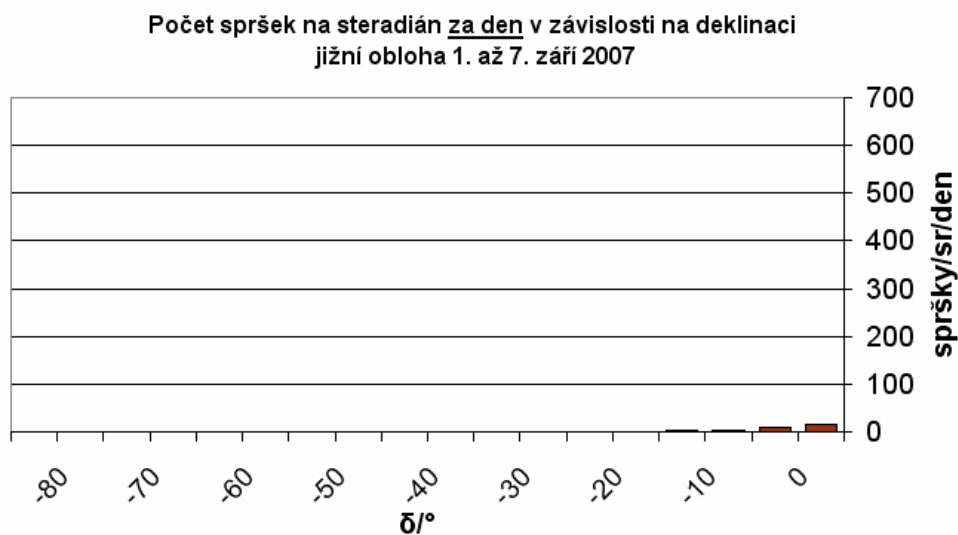
obr. 58 – Počet spršek v závislosti na deklinaci – jižní část

**Počet spršek za den v závislosti na deklinaci - severní obloha
1. až 7. září 2007**

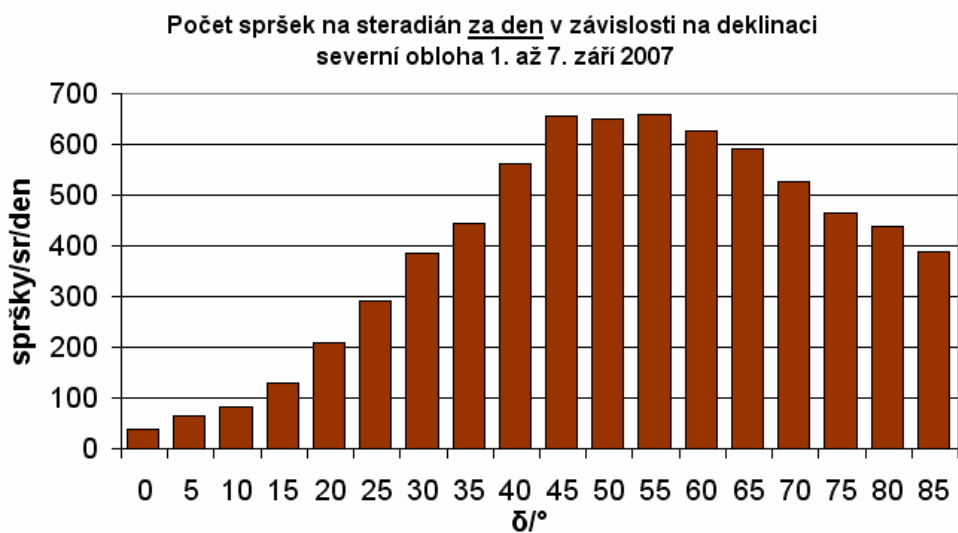


obr. 59 – Počet spršek v závislosti na deklinaci – severní část

V počtu spršek na steradián můžeme vidět nepoměr mezi klesáním na jedné a druhé straně maxima, které je dané souřadnicovým systémem (obr. 60 a obr. 61).



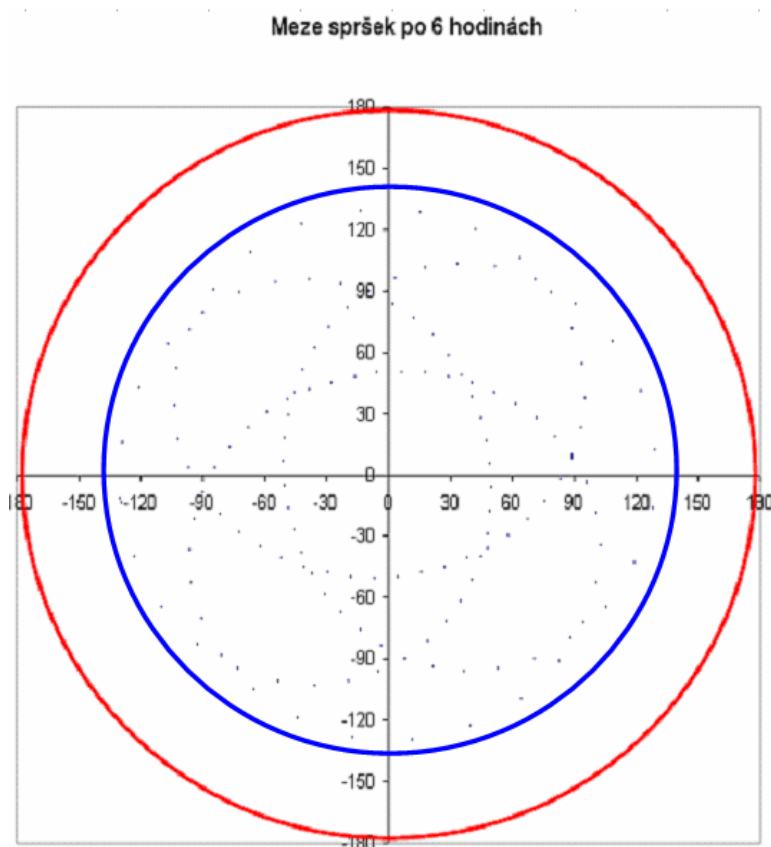
obr. 60 – Počet spršek /sr v závislosti na deklinaci – jižní část



obr. 61 – Počet spršek /sr v závislosti na deklinaci – severní část

Poslední z rozboru deklinace a rektascenze uvedu, jaké jsou meze směrů, odkud můžeme teoreticky přijímat spršky. Na následujícím grafu (obr. 62) jsou vytečkované části oblohy, které odpovídají $h = 0^\circ$ a azimutu, která měníme po desítkách od 0° do 350° , to vše celkem čtyřikrát vždy po šesti hodinách. Tak můžeme vytvořit teoretické zorné pole, které jsme schopni v našich zeměpisných podmínkách detekovat, na grafu je znázorněné modře. Celkové pole je znázorněné červeným kruhem. Nejnižší sprška, která může přijít na náš detektor, opisuje za den kružnici o deklinaci -40° . To nám poskytuje možnost prohlížet až 82% z celé oblohy.

obr. 62 – Meze spršek po 6 hodinách



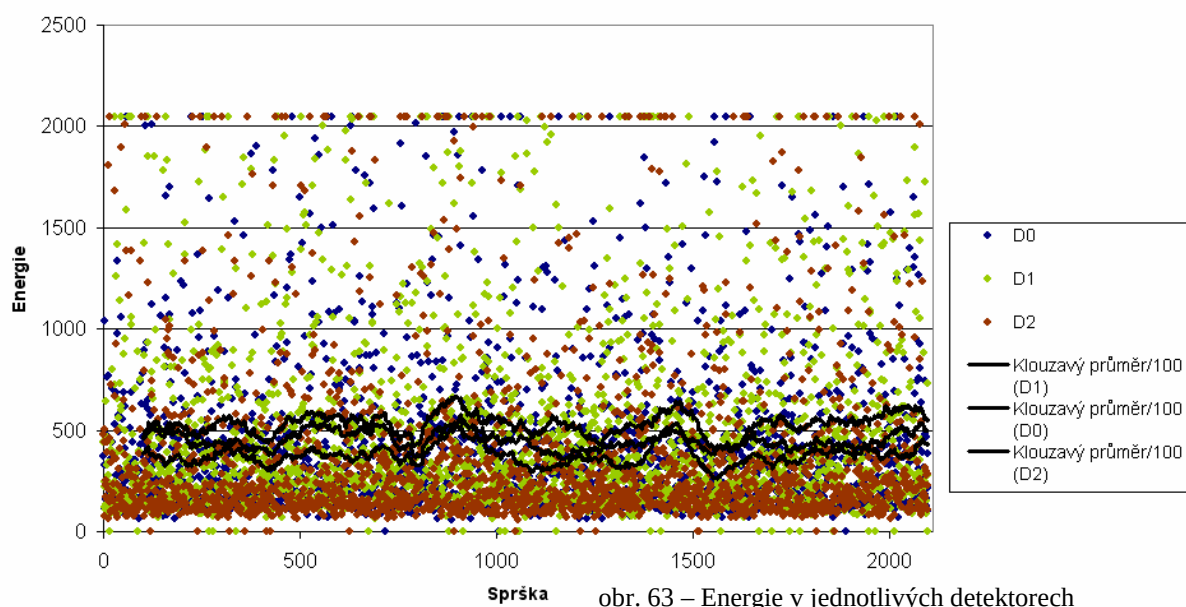
14. Energie – neužitečná veličina?

V datech, která získáváme z detektorů je obsažen i zajímavý údaj o energii deponované ve scintilátoru. U každého detektoru je s časem zásahu sprškou uvedena i její energie. Její přesná interpretace je složitější. Víme, že odpovídá náboji, který vznikne ze scintilačních fotonů ve fotonásobiči, ale nelze jednoznačně určit její absolutní velikost, jelikož závisí na nastavení napětí na jednotlivých fotonásobičích.

Energie nám spíše může sloužit jako srovnání mezi několika sprškami. Je to údaj, který je u každé spršky a lze s ním pracovat. Určili jsme průměrnou energii deponovanou v jednotlivých detektorech, která se poměrně liší v závislosti na napětí na fotonásobiči (obr. 63)

Detektor	Průměrná energie
D0	451
D1	530
D2	378

Energie v jednotlivých detektorech



obr. 63 – Energie v jednotlivých detektorech

Bylo by bláhové se domnívat, že energie se vztahuje jen k jedné konkrétní částici, která detektorem prolétá. Detektorem prolétá na stovky částic každou vteřinu a při spršce se tento počet ještě zvýší, proto je na detektoru nastavena určitá minimální energie (okolo 70), při které se má vyhodnotit, že se jedná už o spršku kosmického záření (Jinak by detektory mohly spouštět částice, které mají původ v pozemské přírodě.).

Hodnota energie má i svoje maximum – 2047 (2^{11}), z tohoto čísla je patrné, že nebude problém v tom, že částice, které dopadají do detektoru, mají určitou energetickou mez, ale že elektronika má své omezení v bitových čítačích.

První problém, který jsme čekali, že energie vyřeší, je problém s velkým množstvím špatných spršek (6 až 7 %), u kterých je rozdíl času jednotlivých detektorů větší než 33 ns,

což není možné vzhledem k rozměrům trojúhelníku. Pravděpodobně se jedná o více menších spršek, které zasáhly detektory ve stejný čas, nebo jde o chyby vzniklé funkcí elektroniky.

Velkým problémem není ani tak, že spousta spršek je špatná, ale že by spršky, které pokládáme za dobré, nebyly jednou sprškou, ale několika menšími. Naše idea byla taková, že menší spršky mají výrazně menší energii a vzájemně se jimi liší a že by se tudíž dalo pomocí rozdílu energií odfiltrovat spršky, které nevznikly z jedné částice.

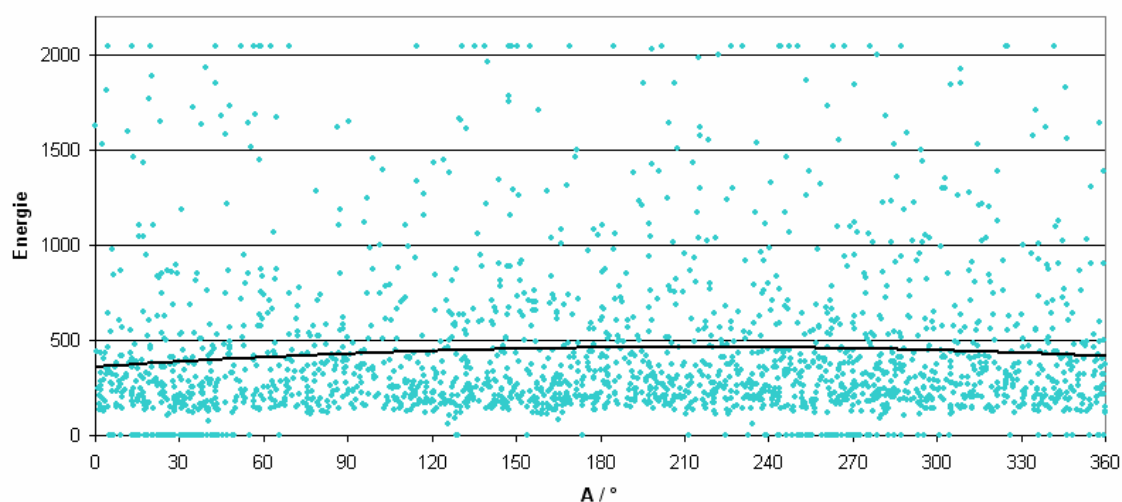
Dobré spršky	Energie
Průměrné energie	469
Odchyly	234
Špatné spršky	Energie
Průměrné energie	164
Odchyly	115 (poměrně lze převést na 328)

Z tabulky vidíme, že špatné spršky mají menší energii a větší relativní odchyly než dobré spršky, ale rozdíl není tak velký, aby se daly dobré spršky třídít od špatných. Nehledě na to, že energie spršky závisí na dalších faktorech (viz níže) a podle velikosti 94 ns okna a počtu špatných spršek lze odhadnout, že špatných spršek v dobrých je jen okolo 1 %.

Jaké další analýzy jsme s energiemi tedy schopni provádět? Můžeme zkoumat závislosti průměrné energie a její rozptyl na azimutu, výšce, deklinaci, rektascenzi.

Začneme od nejjednodušších analýz: Závislost průměrné energie na azimutu (obr. 64). Z tohoto grafu je vidět, že průměrné energie nezávisí na azimutu. To je dobře, protože není důvod, proč by měl být zvýhodněn nějaký směr před jiným, zvláště když se Země otáčí, to by pak musela být nějaká díra v atmosféře (pozn. závislost množství spršek na ozónu jsme nezkoumali).

Závislost energie na azimutu

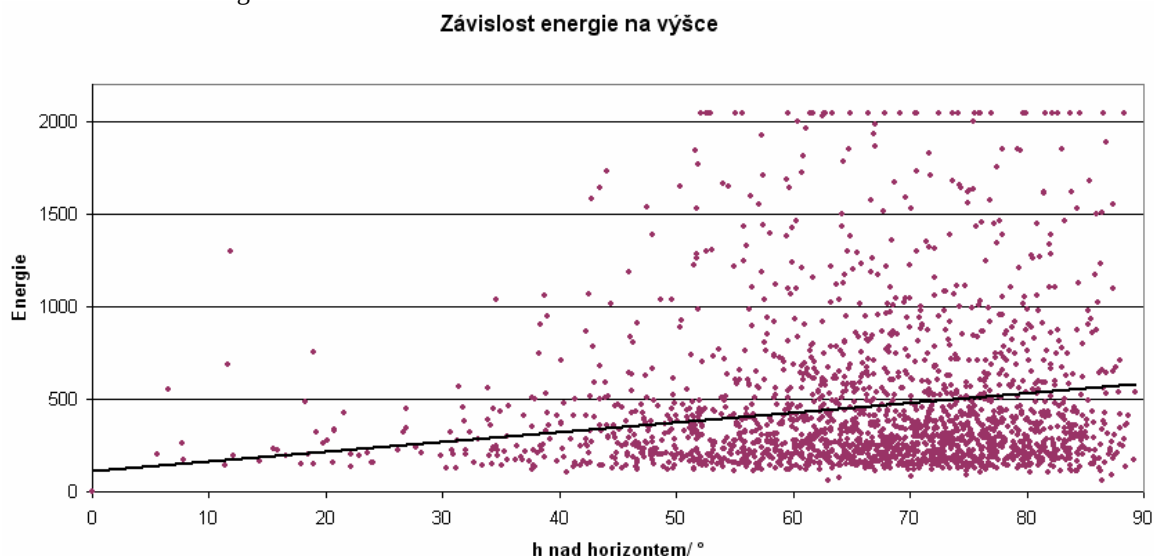


obr. 64 – Závislost energie na A

I když by se někomu mohlo zdát, že regresní křivka je přeci jenom dost prohnutá (zde je zvolen polynom druhého stupně, protože data na začátku a na konci jsou ze stejného místa oblohy), což je doufám způsobeno pravděpodobnostními fluktuacemi rozložení. Pro závislosti odchyly na azimutu platí podobný graf.

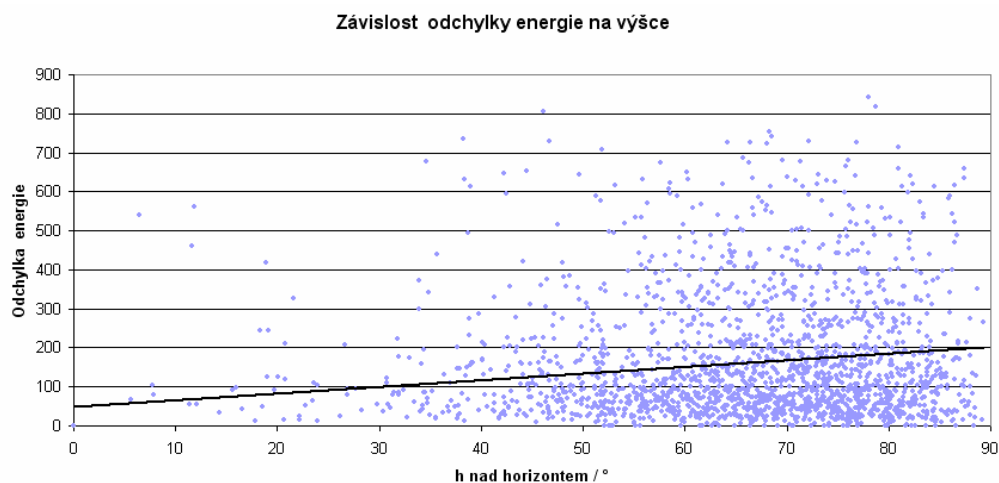
Zajímavější graf je závislosti průměrné energie na výšce nad horizontem (obr. 65). Zde už z rovnice regrese jasně vidíte, že čím více jde sprška kolměji na detektory, tím nese více energie a tím více ji v detektoru zanechá. Měření opět odpovídá teorii. Čím sprška jde blíž k horizontu, tím má delší dráhu a tím více ztrácí energii. To je také důvod, proč nejvíce spršek přichází z kolmých směrů. Microsoft Excel nám poskytuje i možnost vygenerování rovnice regrese pro přímku (otázkou je také, zdali je použití přímky to pravé, protože spršek neubývá rovnoměrně od kolmého směru a sprška určitě neztrácí rovnoměrně svoji energii na dráze a koneckonců i dráha spršky taky neroste rovnoměrně na úhlu (dráha roste přibližně podle vzorce: $\text{výška atmosféry}/\sin(h)$): $E \approx 5,2751 \cdot \text{azimut} + 113,79$, to nám pomůže pro případ, kdybychom chtěli srovnat všechny energie spršek na stejnou úroveň výšky nad horizontem (Pro případ odfiltrování špatných spršek). Tuto možnost jsme nakonec také využili. Průměrná energie po přepočtu činí dokonce 597.

obr. 65 – Závislost energie na h



Spršky	Energie
Dobré spršky	597
Špatné spršky	164

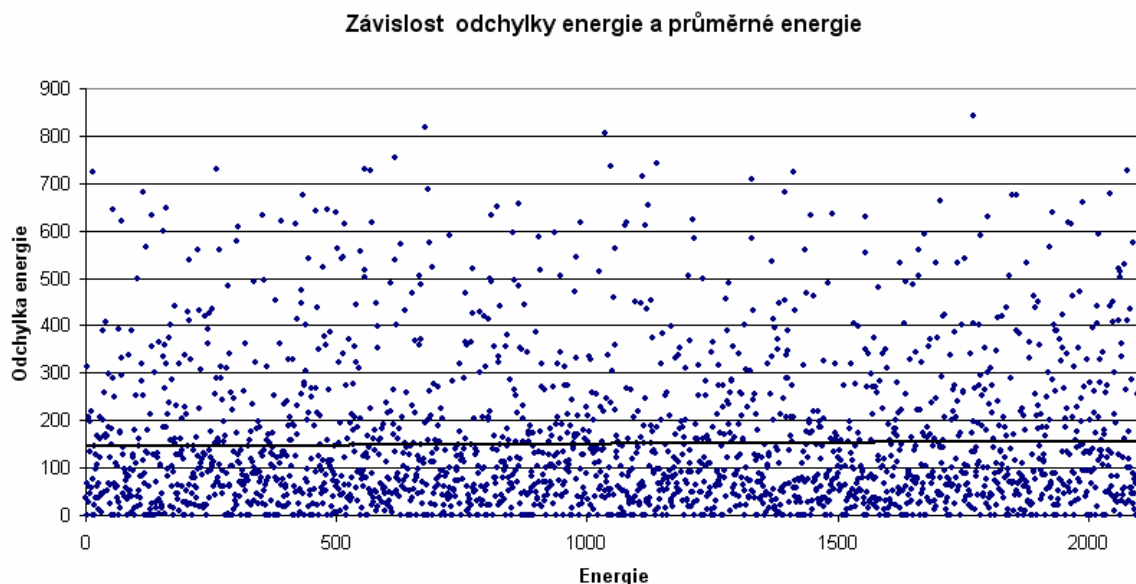
Odchyly energií také rostou s výškou nad horizontem (obr. 66). To se dalo očekávat, s výškou roste energie a čím větší je energie, tím by měl být i větší její rozptyl.



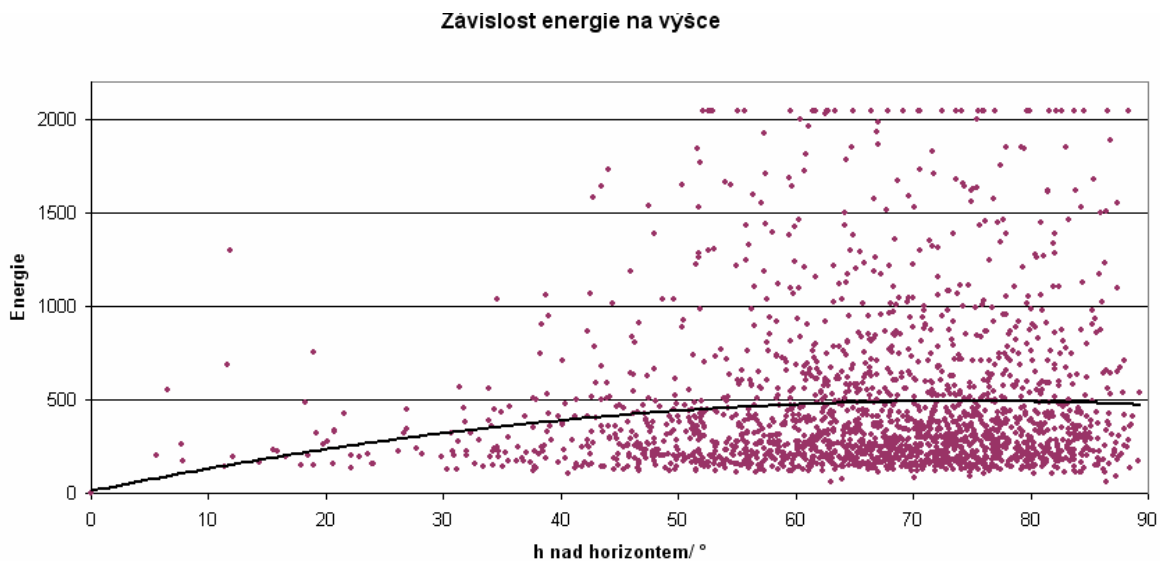
obr. 66 – Závislost odchyly energie na h

Pro jistotu jsme udělali i graf závislosti odchylky energie na energii (obr. 67). Chyba, regresní přímka je úplně rovná. Odchytky tedy s energiemi nerostou. Toto tvrzení je paradoxní vůči grafu závislosti odchylky energie na výšce. Tento rozpor jsme fyzikálně neuměli vysvětlit. Proto jsme změnili typ křivky regrese (jak bylo už nastíněno).

obr. 67 – Závislost odchylky energie a průměrné energie

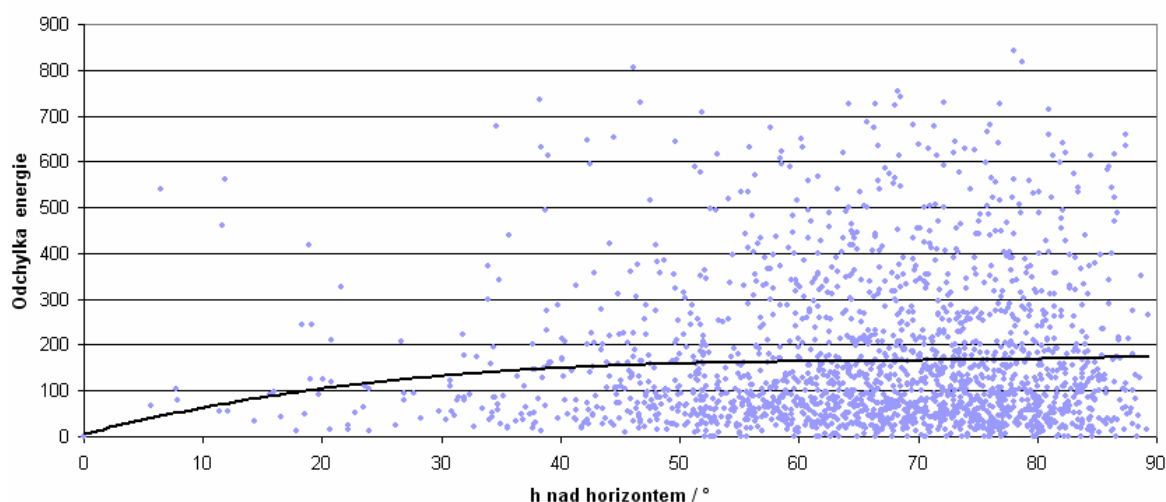


Dále jsou uvedeny nové grafy závislosti energie a rozptylu energie na výšce nad horizontem (obr. 68 a obr. 69), které jsou proloženy regresními křivkami, jejíž základ je v polynomu vyššího stupně. Možná že v něm je řešení zmíněného problému. Spršek, které mají průměrnou energii menší (začátek grafu), je strašně málo, a proto nedokážou ovlivnit křivku regrese závislosti odchylek energie na energii. To je příklad práce, se kterou se musíme každý den potýkat.



obr. 68 – Závislost energie na h

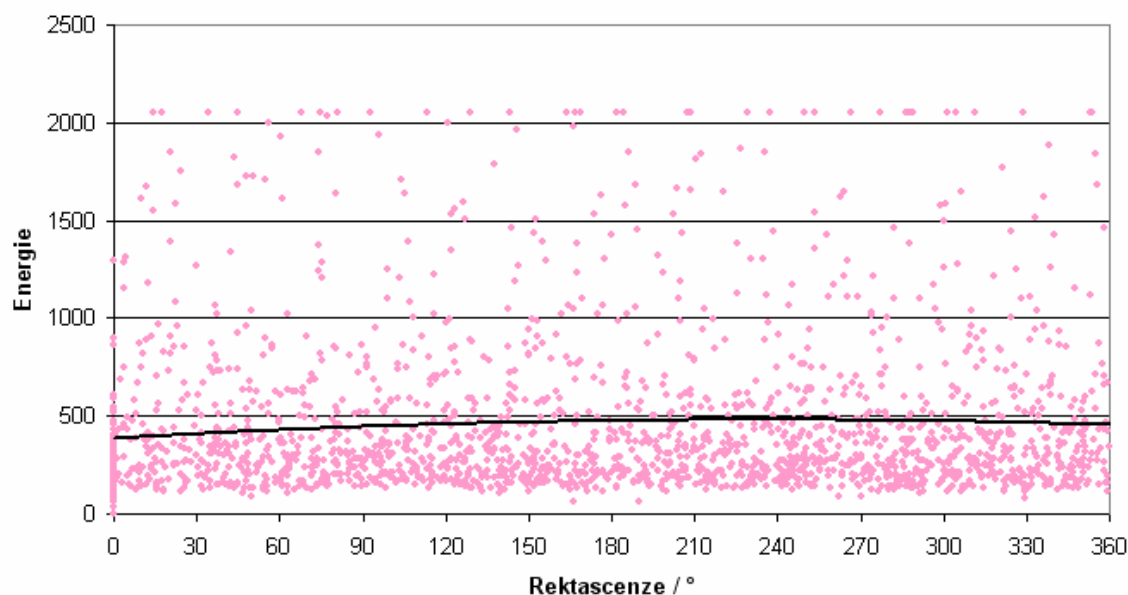
Závislost odchylky energie na výšce



obr. 69 – Závislost odchylky energie na h

Nyní už se zase dostáváme do klidnějších vod. Jasná závislost energie na rektascenzi (obr. 70) z regresní přímky není vidět, což svědčí o tom, že i energetické rozložení spršek je homogenní i vůči samotnému vesmíru, který se neotáčí. Bohužel, tedy neexistuje žádný tak silný zdroj, který by rovnováhu vychýlil. Pro závislosti odchylky energie na rektascenzi platí podobný graf.

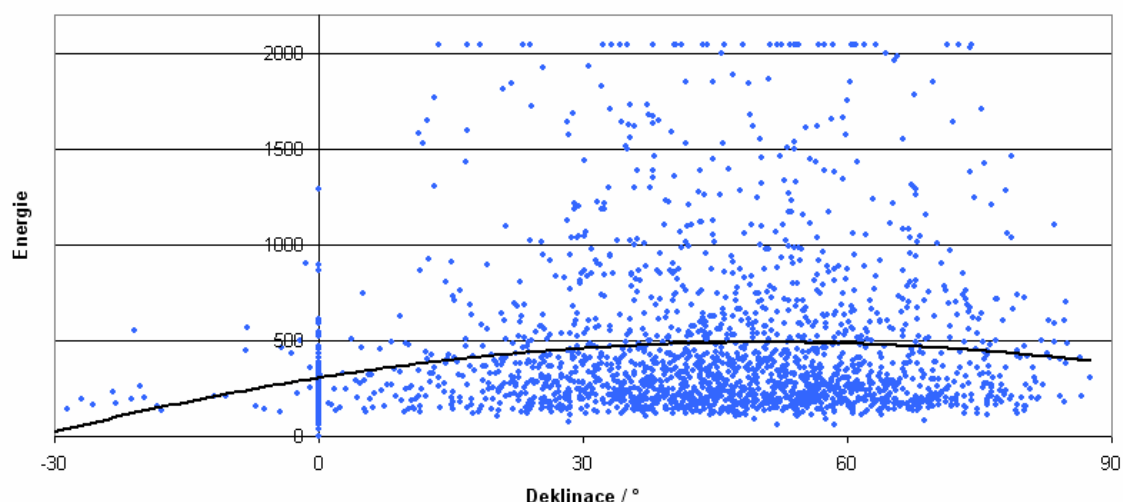
Závislost energie na rektascenzi



obr. 70 – Závislost energie na rektascenzi

Výklad grafu závislosti energie na deklinaci (obr. 71) je obtížnější, protože ten už ovlivněn tím, že nejvíce energie dopadá ve sprškách, které mají výšku nad horizontem 90° , což odpovídá 40° deklinace. Křivka regrese má u deklinace naštěstí své maximum právě v hodnotách kolem 40° , takže se nám teorie shoduje s praxí. Pro závislosti odchylky na deklinaci platí obdobný graf. Jen křivka regrese je ještě více prohnutá.

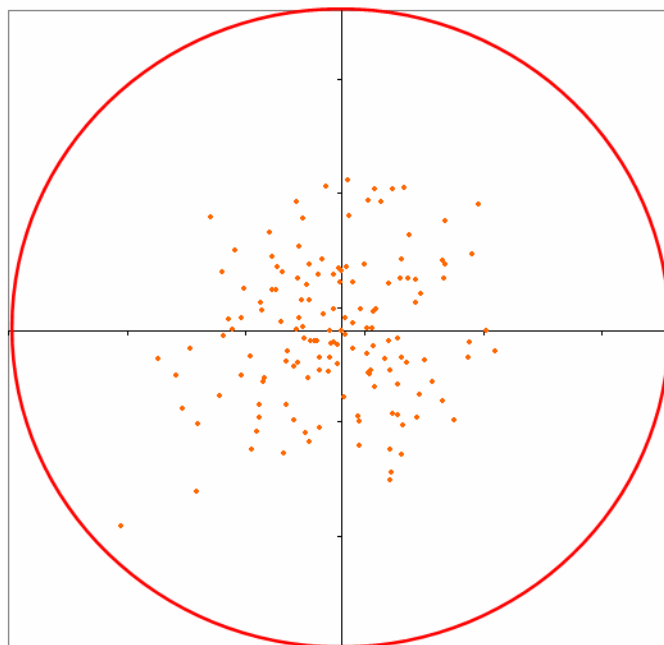
Závislost energie na deklinaci



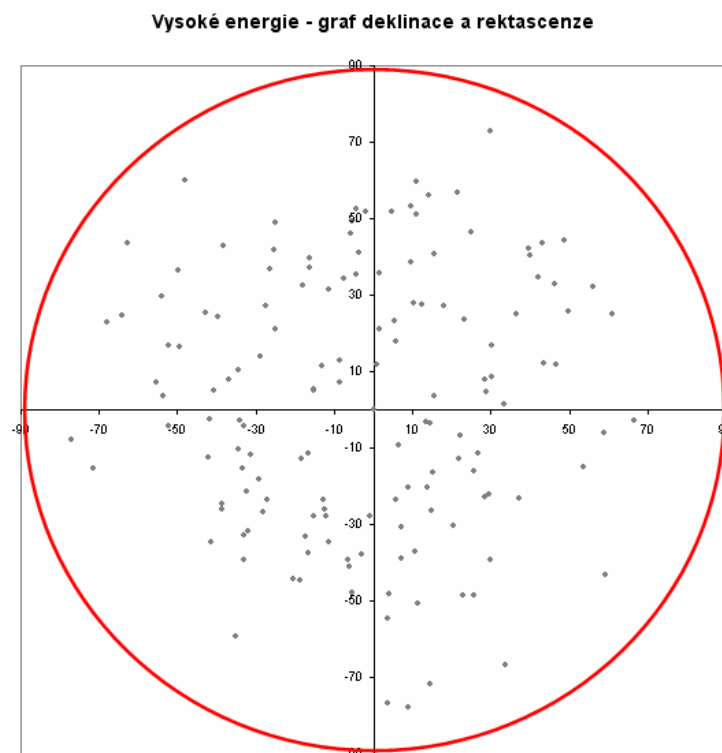
obr. 71 – Závislost energie na deklinaci

Poslední, co nás napadlo, že bychom mohli udělat u energií, je graf deklinace a rektascenze u spršek s vysokou energií. To znamená u spršek, u kterých je energie alespoň v jednom binu 2047. Tato myšlenka vznikla z toho, že většina částic je vychýlena magnetickým polem Země a Galaxie a jen ty nejneenergetičtější částice (řádově 10^{19}) nejsou vychýleny a nesou v sobě informaci o místě, odkud pocházejí. Bohužel, těchto částic dopadá jen pár za rok na km^2 a my oproti tomu máme poměrně hodně částic za den, které mají alespoň v jednom binu číslo 2047. Překvapení se nekonalo, body se nám v grafu neshlukly do dvou nebo tří bodů. V podstatě není rozdíl mezi náhodností bodů v grafu výšky a azimutu (obr. 72) a grafem deklinace a rektascenze (obr. 73), samozřejmě body jsou ještě víc rozházené, ale to je způsobeno tím, jak zenit opisuje kružnici na obloze. I vy můžete zkontrolovat tyto grafy, ale sami vidíte, že nic rozumného z nich získat nelze, možná že by se muselo zpracovávat hodně dlouhé období, ale na to už je potřeba naprogramovat speciální programy.

Vysoké energie - azimut a výška



obr. 72 – Vynesení spršek s vysokou energií – obzorníkový systém



obr. 73 – Vynesení spršek s vysokou energií – rovníkový systém

Kdybych měl napsat résumé k energiím, tak bych v první řadě změnil nadpis na „zajímavá veličina“. I když na první pohled její rozbor nepřinesl nic zásadního, přinesl nám alespoň základní povědomí, jak ji stanice zpracovává. Do dalších let bych doporučil udělat program, který by počítal průměrné energie v jednotlivých směrech rektascenze (nejvíce po 1°), protože takový program by mohl doplnit makra počtu spršek z jednotlivých hodnot rektascenze. Pokud by se objevil silný zdroj kosmického záření, mohlo by se stát, že by jeho spršky sekundárních částic měly větší energii než ostatní.

Všechny grafy jsou ze dne 3. 10. 2007, ale pro jiné dny vycházejí takřka stejně.

15. CZELTA a její citlivost na meteorologickou situaci

Může se zdát neuvěřitelné, snad i nesmyslné, že na dopad sekundárního kosmického záření na zemský povrch má vliv počasí. Vzdálenost, kterou záření urazilo na cestě k Zemi, je vůči atmosféře tak nepoměrná, že si nedovedeme představit, jak by tenká slupka atmosféry mohla jeho putování ovlivnit. Je zde však velký rozdíl mezi kosmickým prostorem a atmosférou.

Ve vesmíru panuje takřka dokonalé vakuum, jen pár částic na metru krychlovém (přesto i ve vesmíru dochází také k útlumu srážkou s jinou částicí či celým tělesem, viz např. srážky s fotony reliktního záření). Na Zemi je situace opačná. Už ve vrchních vrstvách atmosféry, ve výškách 20 až 30 km, je hustota molekul plynu tak vysoká, že dojde ke srážce a vzniku sekundárních částic, které se opět srážejí s dalšími částicemi vzduchu, až vznikne typický trychtýř spršky. Z tohoto výkladu už asi plyne, co nejvíce bude ovlivňovat spršky. Je to hustota částic, která souvisí velmi úzce s tlakem, což už je běžně měřitelná meteorologická veličina.

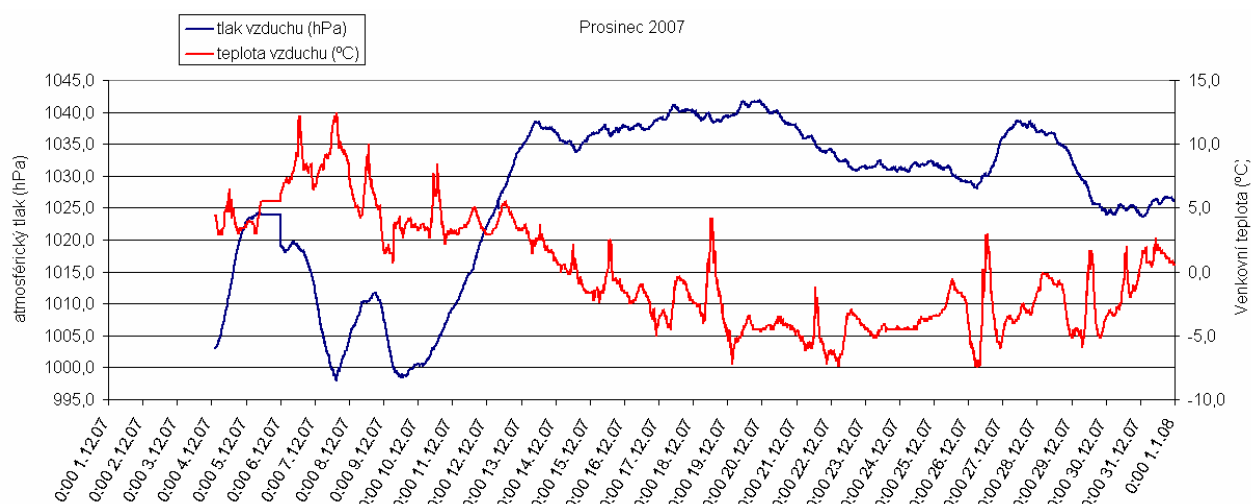
Než jsme se vůbec začali zabývat závislostmi mezi počasím a sprškami, vyhodnotili jsme, zda má vliv na spršky den a noc. Základním ukazatelem u našeho projektu je průměrný počet spršek za určitý časový úsek. Průměrný počet spršek je dle našeho měření přibližně stejný jak za noc, tak za den, a to i v různých obdobích roku (měsíce v létě nám poskytují obdobné výsledky jako měsíce v zimě). Toto zjištění nám už poskytuje několik dílčích závěrů.

V první řadě je pravděpodobné, že naše vysokoenergetické kosmické záření nemá nic společného se slunečním větrem, který by zvyšoval počet spršek přes den.

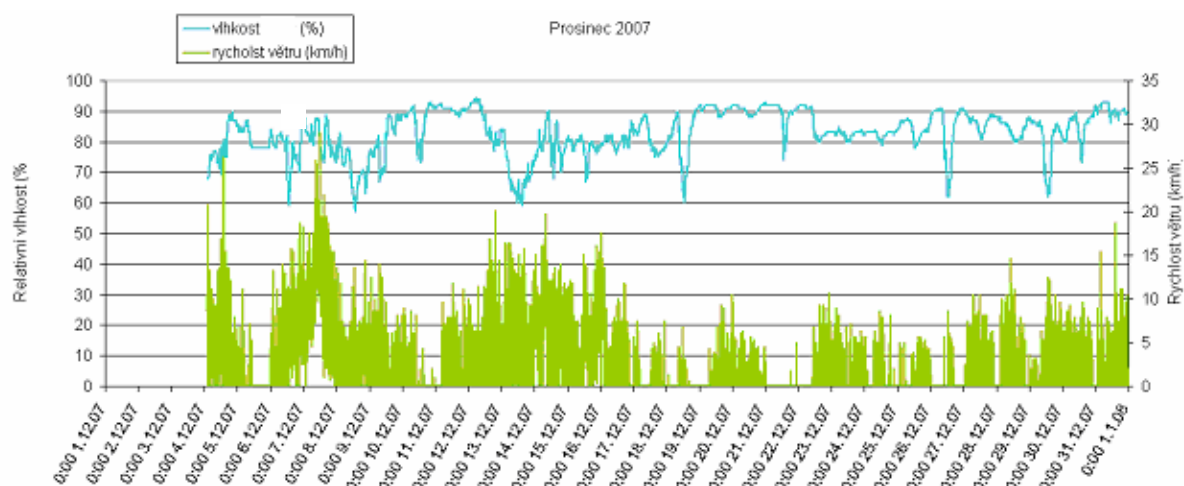
Druhé zjištění, které je také podstatné, je, že počet spršek nebude asi záviset tolik na teplotě (i když teplota a tlak spolu souvisí), protože přes noc a den dochází ke značným teplotním rozdílům. Ve svých závěrech musíme být opatrní, protože by se mohlo stát, že tyto dva jevy by mohly jít proti sobě a ve výsledku se anulovat. Z tohoto důvodu bylo zapotřebí instalovat měřicí meteorologickou stanici na našem gymnáziu i pro přesnější analýzy.

Již používaná meteorologická stanice nebude sloužit jen pro naše účely, její data budou v blízké době dostupná pro všechny zájemce na internetových stránkách našeho gymnázia a získané údaje budou používány pro výuku v hodinách fyziky a zeměpisu. Není přece krásné, když víte, jaké nad vaší školou právě počasí?

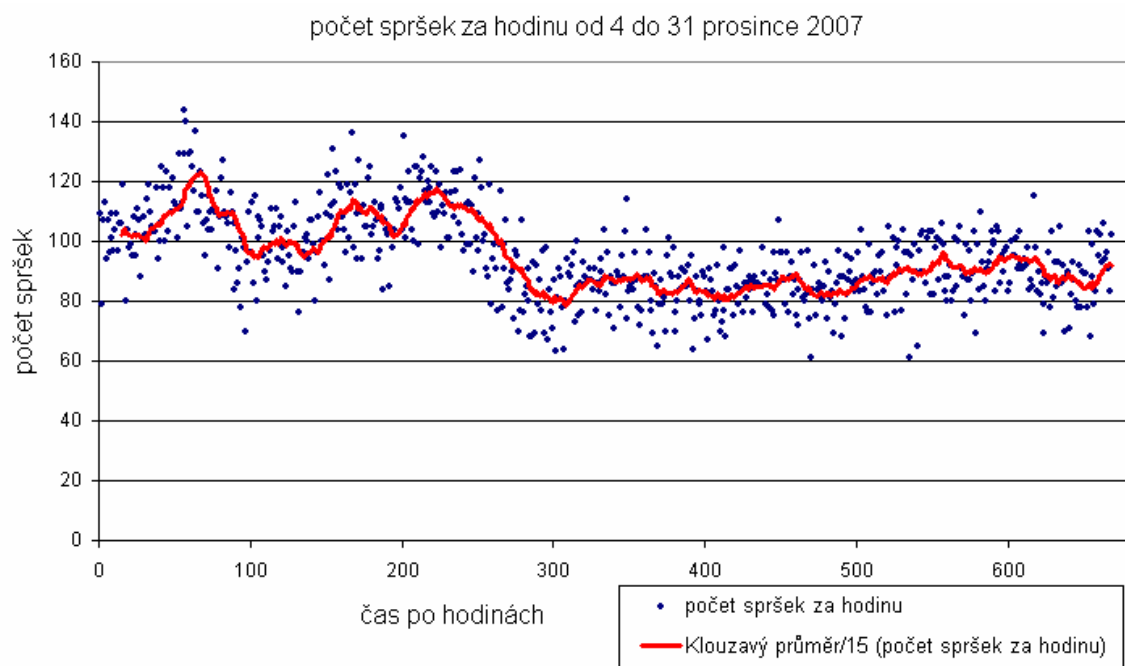
Meteorologická stanice se skládá z modulu na měření tlaku (barometr) a teploty vzduchu, rychlosti a směru větru (anemometr), vlhkoměru (hygrometr) a srážkoměru (ombrometr). Vše je napojeno na počítačový výstup. Bohužel jsou se stanicí neustále problémy, musela se již několikrát reklamovat, takže důvěryhodných dat, která by byla z většího časového období, je velice málo, v podstatě máme jen jeden měsíc a to prosinec. Grafy jednotlivých veličin jsou uvedeny níže.



obr. 74 – Časový průběh atmosférického tlaku a teploty

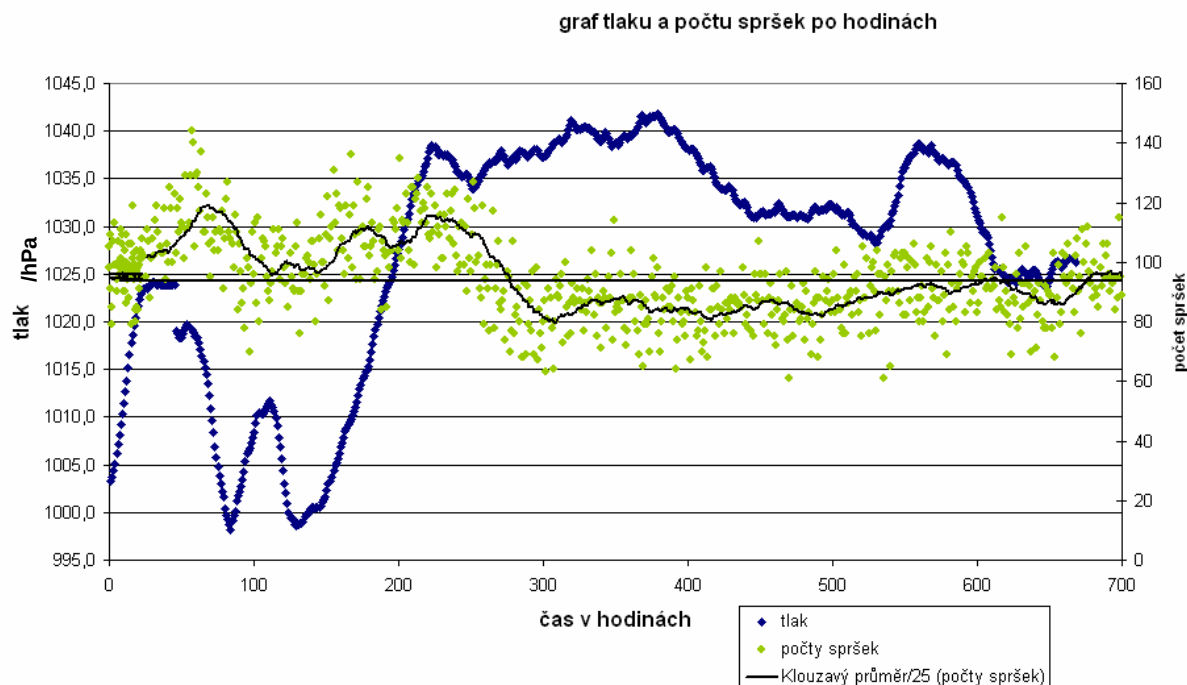


obr. 75 – Časový průběh vlhkosti a rychlosti větru



obr. 76 – Časový průběh počtu srážek za hodinu

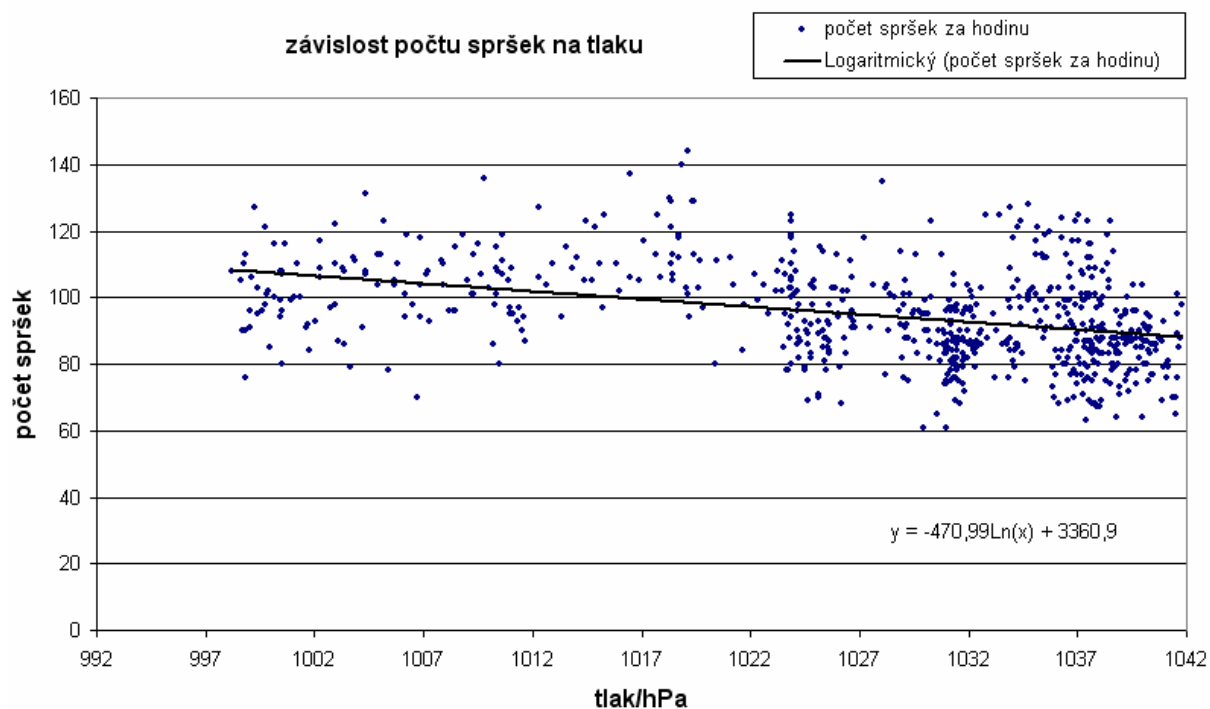
Při srovnání těchto tří grafů (obr. 74, 75 a 76) námi měřených veličin vidíte už běžným pohledem, že nejvýrazněji počet srážek ovlivňuje tlak. Není možné si nevšimnout, že v první polovině následujícího grafu tvoří tlak pomyslné písmeno W a počet srážek písmeno M, což jsou písmena k sobě převrácená.



obr. 77 – Časový průběh atmosférického tlaku a počtu srážek za hodinu

Z grafu (obr. 77) vyplývá, že čím je vyšší tlak, tím je menší počet srážek. Nemůžeme s jistotou prohlásit, že počet srážek závisí jen na tlaku, v grafech vidíme možnou závislost počtu srážek na teplotě a vzdušné hustotě, konec konců všechny meteorologické veličiny jsou určitým způsobem spojeny, ale u tlaku dochází k největší poměrné změně vůči počtu srážek. Tlak se mění jen do 5% vůči své průměrné hodnotě, ale srážky svůj počet mohou klidně zdvojnásobit.

Dále jsme se pokusili vytvořit graf, kde byla vynesena závislost počtu srážek přímo na tlaku. Nejsme si jisti, jakou křivkou máme proložit data, abychom získali tu pravou závislost počtu srážek na tlaku, poměrná změna tlaku a počtu srážek dává nám tušit, že se nebude jednat lineární ale spíše o logaritmickou závislost, ale k ní vycházíme z malého období a její přesnost nebude velká (jak napovídá i její hodnota spolehlivosti). Kdyby se nám podařilo určit závislost počtu srážek na tlaku, podařilo by se nám v podstatě určit zkreslení počtu srážek tlakem, které bychom pak eliminovali, a tudíž by se údaj počet srážek za určité období stal velice dobrým ukazatelem, zdali se něco ve vesmíru neděje.



obr. 78 – Závislost počtu srážek na atmosférickém tlaku

Rovnice, které zde uvedeme, tedy berte spíše jako orientační, závislost se bude muset ještě zkoumat. Rovnice pro lineární závislost:

$$\text{počet srážek} = -0,462 \cdot \text{atmosférický tlak (v hPa)} + 569,38$$

a rovnice pro logaritmickou závislost:

$$\text{počet srážek} = -470,99 \ln(\text{atmosférický tlak (v hPa)}) + 360,9.$$

Nyní se vraťme o pár řádků výše, z grafů teploty a počtu srážek by se možná mohlo usuzovat, že čím je vyšší teplota, tím je počet srážek vyšší (možná je to způsobeno jen tlakem), tudíž by to znamenalo, že v noci (je chladněji) bude na naše detektory dopadat méně srážek. Pokud by částice přicházely ze Slunce a zvýšení teploty podporovalo jejich průchod atmosférou, pak bychom měli naměřit rozdíly v toku ve dne a v noci. To se nám potvrdit nepodařilo. Pravděpodobně tedy vysokoenergetické (!) záření nemá původ ve Slunci, a pokud ano, tak se jedná o zanedbatelnou část.

Možná ještě zajímavější závislost by nám mohl přinést graf, kde bychom vynesli přímo závislost počtu srážek na hustotě vzduchu. Pokud známe tlak i teplotu, nebude to problém. Ze stavové rovnice ideálního plynu odvodíme vztah

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}$$

kde ρ – hustota v kg/m^3

p – tlak v Pa

M – molární hmotnost vzduchu (dle tabulek)

R – plynová konstanta – $8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

T – termodynamická teplota v K.

Z grafu (obr. 79) je jasně patrné, že čím je vzduch hustší, tím méně spršek registrujeme. Otázka je, zda bude hustota vzduchu tou správnou vypovídající veličinou, protože se velice mění s nadmořskou výškou a naše hustota platí jen pro naši úzkou vrstvu atmosféry (samozřejmě tlak také přímo nevypovídá o tlacích ve vyšších vrstvách atmosféry). Uvádíme i rovnici proložené křivky (opět se zde uvažuje o logaritmické závislosti).

$$\text{počet spršek} = -312,24 \cdot \ln(\text{hustota vzduchu } (\text{kg/m}^3)) + 179,69$$



obr. 79 – Závislost počtu spršek za hodinu na hustotě vzduchu

16. Cíle a vize do budoucnosti

Tato kapitola, ač se to nezdá, je velice důležitá, protože poskytuje návod, jak pokračovat dále. Skýtá nabyté znalosti a zkušenosti nás, kteří jsme strávili nemalou část svého volného času prací na analýze dat stanice, a tak známe většinu jejich, jestli to tak můžeme napsat, libůstek a neřestí.

Práce na projektu bychom mohli rozdělit na několik kategorií. První kategorie práce, která bude nutná, aby se prováděla vždy, je neustále monitorování funkčnosti zařízení, kontrola počtu spršek a jejich směru, ověřování námi dosažených výsledků a dat. S touto prací souvisí činnost, která by se dala zařadit do kategorie číslo dvě. Bude nutné námi vymyšlené algoritmy uvést v život v nějakém programovacím jazyku jako je například jazyk C⁺⁺. Je časově neúnosné každý den přepokopírovávat do programu Microsoft Excel ručně. Ve vytvořeném programu se bude moci vytvořit přesně nadefinovaný typ grafu. Z tohoto důvodu by bylo žádoucí, aby mezi studenty pokračujícími v naší práci byl dobrý programátor.

Třetí velice důležitý úkol, který naše následovníky čeká, je hledání spršek, které byly vyvolány gama záblesky a jsou zaznamenány družicemi. S touto otázkou souvisí i základní cíl, ke kterému směřuje celosvětový výzkum – identifikace zdrojů. První cesta vede přes GRB, druhá je hledání clusterů. Dnes už máme k dispozici vytvořené algoritmy pro jejich přepočtení na deklinaci a rektascenzi. Ty nejnadějnější jsme zkoumali, ale je pořád více těch, které jsme neprozkoumali. Bylo by nádherné, kdyby někdo vytvořil program, který by dokázal zobrazit clustery za velké období do jednoho grafu.

Čtvrtá kategorie prací zahrnuje zpřesnění našich výsledků, tvorbu úplně nových programů, zlepšení algoritmů, ale i vymyšlení nových fyzikálních teorií plynoucích z těchto výsledků. Velice dobrým přínosem by byl program, který by umožnil zachytit zvýšení počtu spršek (či velikosti energií) z určitého směru, ba co více, kdyby tento program uměl vytvořit graf deklinace a rektascenze spršek za velké časové období, přičemž u bodů by počítal relativní hustotu a tuto hustotu by převedl na barevnou škálu. Je také zapotřebí vylepšit čtvrtý typ zobrazení a normalizovat ho, aby odpovídal klasickému Grintevu zobrazení.

U závislosti spršek na počasí, by se nemusela zkoumat jen závislost tlaku na počtu spršek, ale i závislost tlaku na průměrném azimutu, průměrné energii nebo by se mohla hledat závislosti i jiných veličin (teplota a vlhkost vzduchu, stav ozonu, sluneční svit, rychlost větru). U energií by se měl zkoumat větší časový úsek než je délka jednoho dne.

Předposlední kategorie zahrnuje spolupráci s institucemi a vědeckými ústavy a školami, které se zabývají výzkumem kosmického záření. Nesmíme zapomenout, že detektory nejsou jen u nás, ale i na dalších školách v České republice i v zahraničí. Je naší povinností se zajímat o tato zařízení, jejich data porovnávat s našimi, případně pomáhat při vyhodnocování. My s nimi nesoutěžíme, všichni se snažíme společně dosáhnout pokroku ve vědě. V důsledku toho píšeme tuto práci, uvádíme v ní kompletní vzorce, aby z ní měli užitek i ostatní.

Poslední kategorie souvisí s možnými technickými zlepšeními. Pořád tu existuje značný problém s ideální délkou kabelů a určením skutečného zpoždění elektroniky. Co by nám však udělalo největší radost, je instalace detektorů na střeše Střední školy elektrotechnické Pardubice. S tímto zlepšením by se nám otevřely neskutečné možnosti. Porovnáním zásahu jednotlivých detektorů bychom mohli najít opravdu vysokoenergetické spršky, které nejsou zkresleny magnetickými poli galaxií. A pak můžeme najít pravý, nefalšovaný zdroj.

17. Diskuze

Jedním z největších problémů celé naší práce, i když o něm téměř nebyla řeč, je magnetismus galaxií. Pokud bychom měli nějakým způsobem charakterizovat, jak se vypadá trajektorie nabitě částice o energii 10^{14} eV v magnetickém poli galaxie, lze určitě použít příměr zamotaného neforemného klubka provázku. U těchto částic se opravdu nedá zpětně určit směr, a tudíž i zdroj odkud k nám přilétají. Přesto má naše práce význam.

Existují totiž dvě možnosti, jak se problému s magnetickými poli vyhnout. První způsob je předpokládat příchod částice bez náboje – vysokoenergetického γ fotonu. Pro nás se nejdůležitějším (a také jsme se o to pokusili) jeví zkoumat, jestli se v datech nevyskytují spršky, které by mohly odpovídat gama výtryskům.

Druhou možností je detekce sekundární spršky vzniklé z primární částice o energii řádově vyšší než 10^{14} eV, např. až 10^{20} eV. Taková částice už téměř není magnetickým polem odchylována a polohu jejího pravděpodobného zdroje lze určit velmi přesně, jak dokazuje projekt Pierre Auger Observatory. Pokud bychom chtěli použít naší aparaturu, jedna z možností, jak odfiltrovat tyto částice s nezakřivenou trajektorií, by byla používat data z více stanic. Ty by byly blízko u sebe, a tudíž by se mohla při nález spršky ze stejného směru ve stejný čas (GPS) odhadovat energie primární částice. Závisela by na velikosti spršky (tzn. vzdálenosti detekčních stanic).

S čím jsme se ve studované literatuře nesetkali a poté nás to překvapilo, je fakt, jak hodně ovlivňuje tloušťka atmosféry, kterou sprška prochází (úměrná s výškou nad obzorem), počet spršek, které dopadnou až na zemský povrch.

Naopak předpoklad, že tlak a tedy hustota vzduchu ovlivňuje počet detekovaných spršek, se potvrdil. Vyšší hustota vede ke snížení počtu spršek.

Zabýváme se také otázkou, jak přesné je vyhodnocení směrů. Určení směrů závisí na hodnotách $TDC0$, $TDC1$, $TDC2$. Chyba v určení časů se projeví jako chyba v určení polohy na obloze. Na chybu času má vliv nárůst signálu v detektoru a následné zpracování elektronikou. Testovali jsme, jak se změní azimut a výška nad obzorem v případě změny vstupního času o 1 ns, kterou odhadujeme jako reálnou maximální chybu. Konkrétní výsledek bude záviset na relativní orientaci spršky vůči detektorům. Maximální chyba v azimutu by neměla překročit 10° a ve výšce nad horizontem 5° .

18. Závěr

Kosmické záření je jeden z abstraktních pojmů, ke kterému běžný člověk přistupuje s vědomím, že „snad prý“ existuje, ale naprosto si nedokáže představit, čemu by jeho zkoumání mělo být prospěšné. Pomineme-li primární, avšak neurčitou formuli, že člověk se snaží svůj svět prozkoumat co nejpečlivěji a nejpodrobněji – tzv. věda pro vědu, nacházíme otázky, na něž nemáme odpovědi, a to především v oblastech kosmologie, radiační ochrany, používání medicínské techniky, částicové fyziky i budoucího přežití lidstva.

Když Albert Einstein uveřejnil články Speciální teorii relativity, těžko mohl předpokládat, že o několik desítek let později budou díky němu družice GPS poskytovat čas s neobvyklou přesností do zařízení kdekoli na světě. Je velmi těžké předpovídat, komu a kde se bude informace, kterou jste vyzkoumali, hodit, kde ji použije nebo jestli na vašich základech nepostaví slavnou teorii. Jak napsal Isaac Newton v dopise z 5. února 1676 Robertu Hookovi: „Stál jsem na ramenou obrů.“ A nemyslel tím nikoho menšího než Galilea Galileiho a Johanna Keplera [22].

Naši práci jsme se svým skromným dílem snažili přispět k rozvoji projektu CZELTA.

Jako první jsme si vytkli úkol určit směry přicházejících spršek. K tomu bylo nejprve nutné změřit polohy a orientace detektorů na střeše školy.

V průběhu další práce jsme museli detailně porozumět funkci stanice.

V teoretické oblasti jsme vytvořili algoritmy, které ke každé spršce v datech stanice přiřadí souřadnice obzorníkové – výšku nad obzorem a azimut. Následně jsme vytvořili přepočty i na souřadnice ekvatoreální – deklinace a rektascenze – jako první v projektu CZELTA.

Věnovali jsme se také vytvoření vhodných zobrazení, která dokážou názorně prezentovat výsledky obdržené v souřadnicových systémech.

Zjistili jsme, že vlivem chybně udaného zpoždění na kabelech dochází ke zkreslení obrazu oblohy. Dokázali jsme provést korekci v našich algoritmech.

Z hlediska dlouhodobého zpracování dat jsme se zabývali analýzou počtů spršek a jejich vztahů s aktuálními meteorologickými veličinami zvláště tlakem. Zkoumali jsme směry, ze kterých přicházejí a dopadají na zemský povrch i jejich lokalizaci v rovníkových souřadnicích.

Vyhledávali jsme informace o gama výtryscích a hledali jejich vliv na námi měřená data. V jednom případě se nám podařilo nalézt spršku, která se časově i umístěním v souřadnicovém systému blížila gama výtrysku GRB 070714A (úhlová vzdálenost 6°) zaznamenaného družicí Swift. Pravděpodobnost, že by sprška přišla náhodně, je 0,013. S velkou pravděpodobností se ve výtrysku vyskytoval alespoň jeden foton s energií větší než 10^{14} eV.

Druhou možností, jak detailněji zkoumat data, bylo vyhledávat clustery. Našli jsme cluster o třech sprškách v patnácti vteřinách a úhlové vzdálenosti maximálně 8° mezi dvěma, které obepínají hvězdokupu M-52. Pravděpodobnost náhodného příchodu tohoto clusteru je $5 \cdot 10^{-8}$.

Při rozboru spršek s maximální deponovanou energií jsme nezjistili žádnou výraznou nehomogenitu oblohy.

Zamysleli jsme se i nad tím, jak v tomto projektu dále pokračovat a navrhli další možnosti v bádání.

Posledním v našem výčtu výsledků je přímo napsání těchto řádků. Věříme, že první souhrnná práce o projektu CZELTA naplní i pedagogický význam a najde si čtenáře z řad studentů, kteří se budou chtít a nakonec se i zapojí do tohoto projektu. Naše publikace pro ně může být návodem „jak začít“.

19. Slovník pojmů a zkratek

Cluster [klastr] – několik spršek přicházejících v krátkém časovém intervalu z blízkých směrů

Detektor – jeden ze tří černých boxů, který je umístěn na střeše. Jde o souhrnné označení všech jeho částí, jako je scintilátor, fotonásobič, zdroj vysokého napětí a kontrolní LED diody

Časové okno – jedná se o časový interval po příchodu prvního zásahu do detektoru, elektronika čeká, zdali nepřijde další zásah, resp. další dva zásahy

Koincidence – jev, kdy tři události z tří detektorů nastanou po sobě tak, že se vejdou do určeného časového okna

Primární kosmické záření – volná částice nebo foton letící vesmírem

Scintilátor – deska z organického plastu, když ji prolétne částice, excitují se atomy, které při přechodu na nižší energetickou hladinu emitují záření – vznik signálu

Sekundární kosmické záření – částice vzniklé v důsledku srážky primární částice s atomy atmosféry

Událost – jev, kdy částice sekundární spršky vstoupí do jakéhokoliv z detektorů a vyvolají vznik signálu

EAS – extensive air shower – sekundární sprška KZ

eV – elektronvolt, jednotka energie – odpovídá práci vykonané elektrickým polem při urychlení elektronu napětím 1 V; $1 \text{ eV} \approx 1,602\,176 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

GPS – Global Positioning System, systém umožňující přesnou lokalizaci a přesný čas, založený na družicích na oběžné dráze Země

GRB – Gamma Ray Burst, vysokoenergetický výtrysk gama záření, neznáme zdroje

KZ – kosmické záření

TDC – stav čítače u každého detektoru – 1 krok odpovídá 25 ps

UTC – koordinovaný světový čas podle atomových hodin, bývá zaměňován s GMT (Greenwich Mean Time), ale ten se dopočítává podle rotace Země

20. Zdroje

20.1. Použitá literatura

Prolog

[0] *Knihovna Akademie věd* [online]. 2004 [cit. 2008-03-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.linca.cas.cz/index.php?page=032>>

Kosmické záření

[1] NYKLÍČEK, Michal. *Detekční techniky používané při studiu vysokoenergetického kosmického záření*. [s.l.], 2006. 36 s. ČVUT. Rešeršní.

[2] *UTEF* [online]. 2007 [cit. 2008-03-01]. Dostupný z WWW: <www.utef.cvut.cz>.

[3] *Okna vesmíru* [online]. 2005 [cit. 2008-03-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.oknavesmíru.cz/mikrosvet/cihana-na-exoticke-castice.html>>.

[4] *OSEL* [online]. 2007 [cit. 2008-03-01]. Dostupný z WWW: <www.osel.cz>.

Projekt Czelta

[5] *NALTA, ALTA* [online]. 2007 [cit. 2008-03-03]. Dostupný z WWW: <<http://csr.phys.ualberta.ca/nalta/>>.

Detekční stanice CZELTA

[6] *UTEF* [online]. 2007 [cit. 2008-03-03]. Dostupný z WWW: <www.utef.cvut.cz>.

[7] *Detectors Saint Gobain* [online]. 2008 [cit. 2008-03-03]. Dostupný z WWW: <http://www.detectors.saint-gobain.com/Data/Element/Node/Category/Category_edit.asp?ele_ch_id=C0000000000000001855&Lang=US>.

[8] HAMILTON, Andrew. *Alta: Alberta Large Area Time Coincidity Array*. [s.l.], 2006. 109 s. Diplomová práce.

[9] HAMILTON, Andrew. *The Alta Cosmic Ray Experimental System*. [s.l.] : [s.n.], 2004. s. 595-604.

Struktura dat

[10] ALTA, CZELTA [online]. 2008 [cit. 2008-03-05]. Dostupný z WWW: <<http://regulus.utef.cvut.cz/~jcermak>>.

Teoretická rekonstrukce směru

[11] *Nebeská mechanika* [online]. 2008 [cit. 2008-02-05]. Dostupný z WWW: nebmech.astronomy.cz/VYPOCTY/vypocty.htm%23ObcJul.

[12] ŠIROKÝ, Jaromír, ŠIROKÁ, Miroslava. *Základy astronomie v příkladech*. Praha : SPN, 1966. 158 s.

Testování algoritmů

[13] *Heavens above* [online]. 2008 [cit. 2008-02-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.heavens-above.com>>.

[14] *Transformace souřadnic* [online]. 2007 [cit. 2008-02-15]. Dostupný z WWW: <http://www.asu.cas.cz/~bezdek/fyzika/trf_astro_souradnic.html>.

[15] *Hvězdná obloha* [online]. 2006 [cit. 2008-03-01]. Dostupný z WWW: <http://kabinet.fyzika.net/aplety/a14cz/fixedstars_cz.htm>

Hledání clusterů

[16] *Hvězdná obloha* [online]. 2006 [cit. 2008-03-06]. Dostupný z WWW: <http://kabinet.fyzika.net/aplety/a14cz/fixedstars_cz.htm>.

[17] *Kasiopeja(souhvězdí)* [online]. 2007 [cit. 2008-03-06]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kasiopeja_%28souhv%C4%9Bzd%C3%AD%29>.

Gama výtrysky

[18] *Astronomický deník*[online]. 2005 [cit. 2008-03-04]. Dostupný z WWW: <http://denik.hvezdarna.cz/2005_04_01_archiv.html>

[19] *Gama záblesk*[online]. 2007 [cit. 2008-03-04]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Gama_z%C3%A1blesk>

[20] *GRB Real Time Sky Map*[online]. 2008 [cit. 2008-03-04]. Dostępny z WWW: <<http://grb.sonoma.edu>>

Počty událostí

[21] *ALTA, CZELTA* [online]. 2008 [cit. 2008-03-16]. Dostupný z WWW: <<http://regulus.utef.cvut.cz/~jcermak>>.

Závěr

[22] ŠTOLL, Ivan. *Svět očima fyziky*. 1. vyd. Praha : Prometheus, 1996. 252 s. Pomocné knihy pro žáky. ISBN 80-85849-89-5.

Zdroje

[23] FARKAŠOVÁ, Blanka, KRČÁL, Martin. *CITACE : projekt Bibliografické citace* [online]. verze 1.1. Brno : BB Group, c2004-2008 [cit. 2008-03-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.citace.com/apl-www.php>>

20.2. Obrázky

Kosmické záření

- [1] Aldebaran[online]. 2008 [cit. 2008-03-01]. Dostupný z WWW: <http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_16/victor_hess.jpg>
- [2] Pierre Auger[online]. 2008 [cit. 2008-03-01]. Dostupný z WWW: <<http://www-hep2.fzu.cz/Auger/cz/obr1.gif>>
- [3] UTEF[online]. 2008 [cit. 2008-03-01]. Dostupný z WWW: <http://www.utef.cvut.cz/document/utef_projects/1000006_protonshower.jpg>
- [4] OSEL[online]. 2008 [cit. 2008-03-01]. Dostupný z WWW: <http://www.osel.cz/_popisky/1194855474.jpg>
- [5] HESS[online]. 2008 [cit. 2008-03-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/HESS.html>>

Testování algoritmů

- [6] *Hvězdná obloha* [online]. 2006 [cit. 2008-02-26]. Dostupný z WWW: <http://kabinet.fyzika.net/aplety/a14cz/fixedstars_cz.htm>.

Hledání clusterů

- [7] *eSky: the electronic sky* [online]. 2007 [cit. 2008-03-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.glyphweb.com/esky/clusters/m52.html>>.

Gama výtrysky

- [8] GRB Real Time Sky Map[online]. 2008 [cit. 2008-03-09]. Dostupný z WWW: <<http://grb.sonoma.edu>>
- [9] *Beran (souhvězdí)*[online]. 2008 [cit. 2008-03-09]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Beran_%28souhv%C4%9Bzd%C3%AD%29>

21. Přílohy

21.1. Fotografie



foto 1 – Na střeše gymnázia – zleva Jiří Slabý, obslužný pracovník diferenciální GPS, Petr Bouchner

foto 2 - Petr Šedivý, Jiří Slabý, srší úl v detektoru, máme je vyšťourat?





foto 3 - Při semináři s pracovníky UTEF – vpředu Jiří Slabý a Karel Smolek, v pozadí Petr Šedivý a Petr Bouchner

foto 4 - Psaní poznámky, Petr Šedivý





foto 5 – Diferenciální GPS stanice

foto 6 – Diferenciální GPS stanice a její obslužný pracovník



21.2. Dokumenty

Data z diferenciální GPS

Site Positions gymnazium

Horizontal Coordinate System: World Geodetic Sys. 1984
11/14/07

Date:

Height System: Ellips. Ht.
gymnazium.spr

Project file:

Desired Horizontal Accuracy: 0.020m + 1ppm

Desired Vertical Accuracy: 0.040m + 2ppm

Confidence Level: 95% Err.

Linear Units of Measure: Meters

Fix	Site Position ID	Site Descriptor	Position	95% Error
Status	Status			
1	GYM0	STRECHA GYM	Lat. 50° 02' 09.48846" N	0.000
Fixed	Processed		Lon. 15° 47' 22.04649" E	0.000
Fixed			Elv.	0.000
Fixed				
2	GYM1	STRECHA GYMNASIA1	Lat. 50° 02' 09.80786" N	0.002
Processed			Lon. 15° 47' 21.95535" E	0.000
			Elv.	0.004
3	GYM2	STRECHA GYMNASIA2	Lat. 50° 02' 09.67093" N	0.002
Processed			Lon. 15° 47' 22.43190" E	0.002
			Elv.	0.004

	Site ID	Site Descriptor	Elevation Factor
1	GYM0	STRECHA GYM	0.99995366
2	GYM1	STRECHA GYMNASIA1	0.99995366
3	GYM2	STRECHA GYMNASIA2	0.99995366

Data z diferenciální GPS

Processed Vectors gymnazium

Vector Stage: 11/14/07	Processed	Date:
Horizontal Coordinate System: file: gymnazium.spr	World Geodetic Sys. 1984	Project
Height System:	Ellips. Ht.	
Desired Horizontal Accuracy:	0.020m + 1ppm	
Desired Vertical Accuracy:	0.040m + 2ppm	
Confidence Level:	95% Err.	
Linear Units of Measure:	Meters	

<u>PDOP</u>	<u>Vector Identifier</u> <u>Meas. Type</u>	<u>Vector</u> <u>Length</u>	<u>95%</u> <u>Error</u>		<u>Vector</u> <u>Components</u>	<u>95%</u> <u>Error</u>	<u>Process</u> <u>QA</u>	<u>SVs</u>
1 2.0	GYM0-GYM1 11/13 14:15 L1 GPS	10.034	0.004	X	-6.768	0.002		7
				Y	-3.799	0.001		
				Z	6.360	0.002		
2 1.5	GYM0-GYM2 11/13 14:47 L1 GPS	9.520	0.004	X	-6.233	0.002		9
				Y	6.209	0.001		
				Z	3.637	0.003		