

Je to hodnota většinou již těžko dosažitelná v běžných obytných místnostech. Navíc by Jana viděla svůj obraz ve vzdálenosti 11,8 m, což by jí znesnadnilo pozorování detailů.

Zpětně můžeme pro $a = 540$ cm vyčíslit c užitím rovností (6). Vyjde $c = 89,7$ cm, což se od původně zadané hodnoty liší jen o 3 mm.

Závěr

Zobrazování zrcadlem je zajímavé a didakticky dobře zpracované téma, viz například [1] a [2]. Proto nebylo cílem článku učivo rozšiřovat nebo jeho metodiku měnit. Spíše šlo o to poskytnout čtenáři několik námětů k zamyšlení nebo příležitostnému využití při výuce.

Literatura

- [1] Němec, P.: Zobrazení rovinným zrcadlem Fyzika 7 ZŠ, video, dostupné na <https://www.bing.com/videos/riverview/relatedvideo?q=rovinn%C3%A9+zrcadlo+youtube&mid=4D4E2CEF6A66A6A9606C4D4E2CEF6A66A6A9606C&FORM=VIRE>.
- [2] Lepil, O.: Fyzika pro gymnázia. Optika. 7. vydání, Prometheus, Praha, 2023.

Studium mionů pomocí mionového teleskopu

SAMUEL SOJKA – MIROSLAV MAŠLÁN

Přírodovědecká fakulta UP, Olomouc

Kosmické záření je nedílnou součástí našich životů, jelikož každý okamžik skrze nás s největší pravděpodobností zrovna prochází některá z částic, která má prvopočátek hluboko ve vesmíru. Ačkoliv to naše životy nijak neovlivní, je možné vsudypřítomnost těchto částic využít k řadě vědeckých účelů. Přestože od prvního objevení těchto částic uplynulo již přes 100 let, stále objevujeme nové vlastnosti a způsoby využití těchto částic. Ať už se jedná o studium vesmíru, rozmanité aplikace v astrofyzice, či pro různé metody tomografie, kosmické záření je nedílnou součástí rozvoje fyziky v posledním století.

Bakalářská práce [1] nesoucí stejný název jako tento článek se zabývá konstrukcí zařízení, které je schopné kosmické záření detekovat. Přesněji je sestrojeno a optimalizováno tak, že detekuje primárně miony, což jsou částice vznikající při rozpadu vesmírných pionů. Miony nás zajímají z toho důvodu, že díky jejich vlastnostem dokáží dobře pronikat skrze olověnou vrstvu, kterou odstíníme ostatní kosmické záření a veškeré šumy. V druhé části práce jsou získaná data zpracována a vyhodnocena, čímž je mimo jiné potvrzen barometrický jev, který v první polovině 20. století objevili fyzikové L. V. Mysovskij a L. Tuwim.

Práce byla původně zamýšlena především jako experimentální, nicméně po celou dobu se nabízela také myšlenka využít teleskop jako didaktickou pomůcku, která by mohla studentům středních škol přiblížit nejen astrofyziku a astronomii, ale i přístrojovou a experimentální fyziku. Zároveň by mohl sloužit jako prostředek pro rozvoj dovedností v oblasti zpracování dat. Podobnou problematikou se zabývá například projekt CZELTA [2], avšak na rozdíl od něj umožňuje námi navržený teleskop realizovat detekci i samostatně, přímo v podmínkách školní laboratoře.

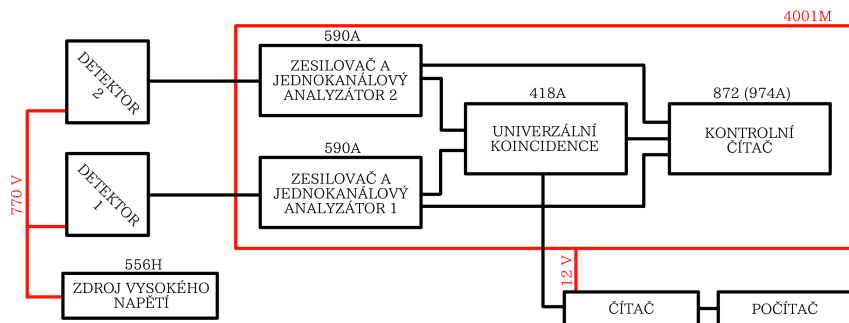
Konstrukce teleskopu

Mionový teleskop – ač nejde o teleskop v pravém slova smyslu – byl zkonstruován ze dvou scintilačních detektorů, mezi něž byla vložena olověná vrstva. Jeho princip je poměrně jednoduchý. Sekundární kosmické částice, vznikající při srážkách primárních kosmických paprsků s atomy v zemské atmosféře, se obvykle rozdělují na měkkou a tvrdou složku. Měkkou složku tvoří částice, které lze snadno odstínit vhodným materiálem, například olovem. Tvrdá složka naopak většinou takovou vrstvou projde. Miony patří právě do této tvrdé složky a v našich nadmořských výškách jsou zároveň nejčastější. Díky tomu je lze odlišit od ostatních sekundárních částic s vysokou úspěšností právě tímto způsobem.

Teleskop tedy detekuje částice schopné proniknout olověným stíněním. Klíčová je také volba dvou detektorů. Pokud bychom použili pouze jeden detektor, nad nímž by se nacházela olověná vrstva, podařilo by se sice odstínit nechtěné částice přicházející shora, ale měření by výrazně rušily šumy a částice přicházející z jiných směrů. Nejjednodušší a zároveň účinné řešení spočívá v použití dvou detektorů, mezi nimiž je umístěna olověná deska tak, aby zakrývala všechny možné dráhy mezi libovolnými body obou detektorů. Díky tomu nemůže žádná částice projít oběma detektory, aniž by zároveň nepronikla olověným stíněním. Použití dvou detektorů navíc omezuje prostorový úhel, z něhož mohou detekované částice přicházet, což

snižuje jejich celkový počet. Jelikož porovnáváme relativní rozdíly v určitých situacích a za různých podmínek, snížení absolutní četnosti nám nevadí.

Abychom mohli s takovouto sestavou pracovat, musíme najít způsob, kterým ověříme, že částice skutečně prošla oběma detektory, a nejednalo se o dvě různé částice. Ačkoliv tuto skutečnost nemůžeme nikdy úplně vyloučit, nejlepším řešením je využití koincidenční jednotky, která zaregistruje signál pouze v případě, kdy přijme signál od obou detektorů v rámci definovaného časového okna. Jako ochranný prvek před zaregistrováním dvou různých částic jsou mezi detektory a koincidenční jednotkou umístěny zesilovače s jednobokými analyzátory. Slouží k odfiltrování slabých signálů ze scintilačních detektorů, které typicky odpovídají částicím s nízkou energií – a právě těch je v šumu pozadí nejvíce. Výskyt dvou takových částic ve stejném okamžiku není nepravděpodobný, což by mohlo vést k falešné detekci. Výhodou je, že detekované miony mají vysokou energii, a tudíž bez problémů projdou tímto filtrem. Zesilovačem je signál poté zesílen pro jeho lepší zpracování koincidenční jednotkou. Pro lepší pochopení konstrukce přikládáme na obr. 1 schéma základních funkčních bloků teleskopu.

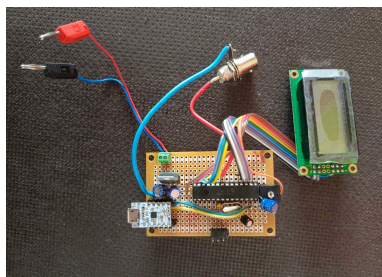


Obr. 1 Blokové schéma mionového detektoru

Jak můžeme vidět, signál z koincidenční jednotky je poté vyslán do čítače – speciálně navrženého zařízení schopného tyto signály zpracovávat a zaznamenávat do počítače. Čítač zde funguje jako výstupní periferie celého teleskopu. Je tvořen mimo jiné mikropočítačem AVR32DB28, což nám umožňuje funkci čítače dle potřeby přizpůsobovat a upravovat. V našem experimentálním režimu byl čítač nastaven tak, aby každou hodinu zaznamenal do počítače počet detekovaných signálů za danou hodinu spolu s číslem odpovídajícím počtu hodin uplynulých od spuštění měření. Veli-

kou výhodou zařízení je i možnost online komunikace s teleskopem – za předpokladu vhodného softwarového vybavení připojeného počítače – což výrazně usnadňuje obsluhu a dohled nad měřením. Fotografie čítače můžeme vidět na obr. 2, jeho schéma a podrobnější popis je dostupný z [1].

Kromě námi navrženého čítače byl použit také kontrolní čítač, jehož hlavním úkolem byla kontrola správné funkce jak samotného teleskopu, tak našeho čítače. Jeho výhodou byla možnost čítat impulzy z více kanálů. Díky tomu bylo možné sledovat nejen počet částic, které prošly koincidenční jednotkou, ale také počet částic, které prošly jednotlivými detektory, což nám dalo jistý vhled do efektivity našeho filtrování.



Obr. 2 Čítač s převodníkem

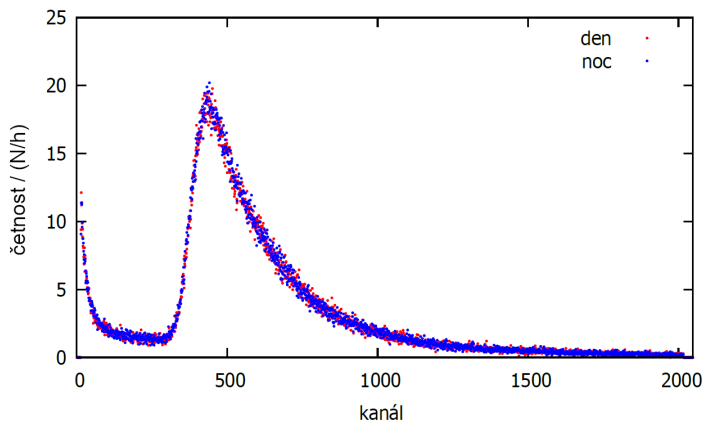
Po dokončení konstrukce byl celý teleskop umístěn na zátěžový trojpatrový průmyslový vozík, který umožňuje teleskop přemísťovat. Díky tomu jsme byli schopni provést měření v různých patrech Přírodovědecké fakulty UP a ověřit, zda je železobetonová konstrukce budovy schopna odstínit část toku mionů. Finální verzi sestrojeného teleskopu můžeme vidět na obr. 3.



Obr. 3 Mionový teleskop

Vyhodnocení získaných dat

Po zhotovení a optimalizaci teleskopu bylo započato první dlouhodobé měření. Z dat získaných během testování teleskopu vyvstala otázka, zda je četnost detekovaných mionů závislá na denní době – přesněji řečeno, jestli se jejich tok liší přes den a během noci. První dlouhodobé měření trvalo asi týden a bylo zaměřeno právě na zodpovězení této otázky. Výsledkem měření je graf, který můžeme vidět na obr. 4, jenž zobrazuje průměrnou četnost detekovaných mionů v závislosti na intenzitě příchozího signálu.



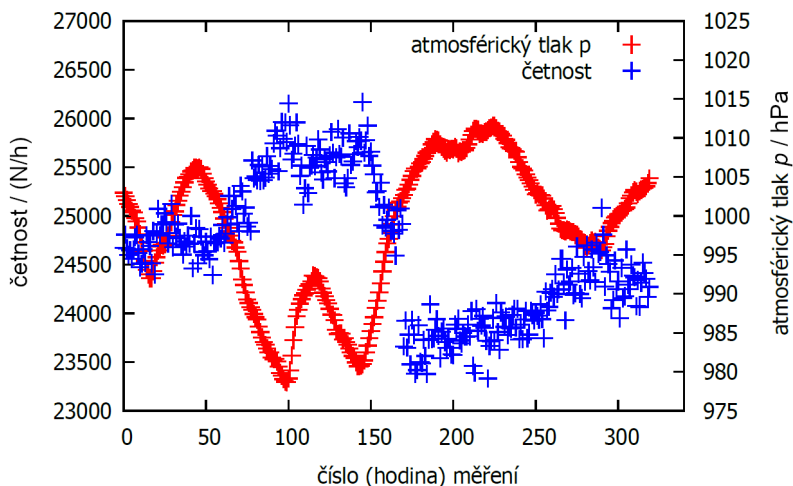
Obr. 4 Energetické spektrum registrovaných mionů – porovnání den/noc

Jak můžeme vidět, už toto měření nám ukazuje, že závislost na části dne nelze pozorovat. Celkový počet detekovaných mionů se lišil o pouhých 0,8 %, a při opakovaném měření se tento relativní rozdíl snížil na 0,3 %.

Za zmínku stojí také využití energetického spektra pro zobrazení získaných dat. Ačkoliv toto zobrazení poskytuje určitý vhled do chování detekovaných mionů, ukázalo se – jak bylo podrobněji diskutováno v práci [1] – že na základě odezvy použitých scintilačních detektorů nelze zpětně spolehlivě určit energii jednotlivých mionů, z hlediska jejich energie je tak můžeme porovnávat jen omezeně, relativně k jinému měření.

Druhé dlouhodobé měření mělo za cíl jednak ověřit předchozí závěry týkající se závislosti četnosti detekovaných mionů na denní době, jednak porovnat získaná data s meteorologickými údaji z oblasti měření. Výsledky ukázaly výraznou nepřímou závislost mezi četností mionů a atmosférickým tlakem, což odpovídá známému barometrickému jevu. Zaznamenali jsme však i určitou závislost na teplotě.

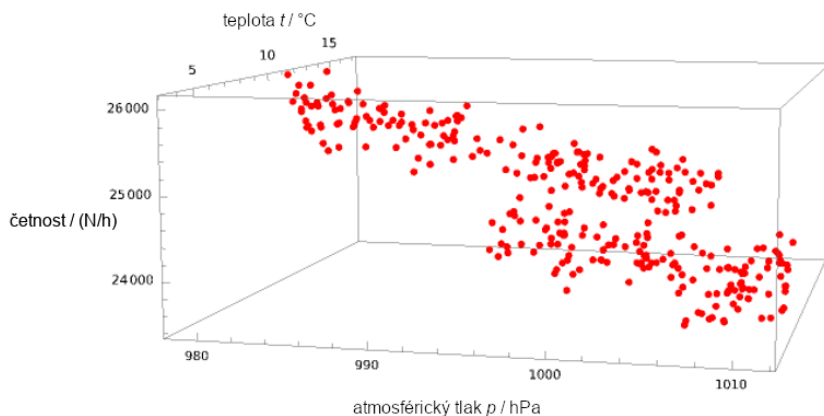
Po tomto zjištění proběhla řada měření, ve kterých jsme porovnávali získanou četnost právě s těmito dvěma meteorologickými údaji. Zároveň jsme celý teleskop přemísťovali mezi patry budovy Přírodovědecké fakulty, abychom mohli ověřit i stínící efekt železobetonové konstrukce. Výsledkem tohoto snažení je série grafů, které ukazují časový průběh četnosti detekovaných mionů a tlaku či teploty, což nám umožňuje vizualizovat očekávanou závislost. Jeden z těchto grafů můžeme vidět na obr. 5.



Obr. 5 Graf časového průběhu četnosti detekovaných mionů na tlaku – sklepy

Vzhledem k tomu, že teplota a tlak jsou vzájemně provázány stavovou rovnicí ideálního plynu, bylo nutné ověřit, že pozorovaná závislost četnosti mionů na teplotě není pouze zprostředkovaným důsledkem její korelace s tlakem. Za tímto účelem byly vytvořeny trojrozměrné grafy, které umožňují současné zobrazení četnosti mionů, teploty a atmosférického tlaku. Příklady takto převedeného grafu z dat na obr. 5 můžeme vidět na obr. 6.

Za celkový výsledek všech měření by se daly považovat hodnoty, získané pomocí lineární regrese, tzn. proložení trojrozměrných grafů rovinou a poté odečtením parametrů její obecné rovnice. Výsledné hodnoty pro měření na jednotlivých patrech můžeme vidět v tab. 1. Parametr a pro nás není tolik důležitý, jelikož pouze ukazuje absolutní polohu roviny. Parametr β nám vyjadřuje závislost četnosti na atmosférickém tlaku a parametr γ nám vyjadřuje závislost četnosti na teplotě.



Obr. 6 Graf závislosti četnosti detekovaných mionů na teplotě a tlaku – sklep

Pozorní čtenáři si mohou všimnout, že na obr. 6 jsou data „rozdělena“ do dvou rovin. Tento jev se nám nepodařilo jednoznačně vysvětlit, avšak všimli jsme si, že se vyskytuje v místech, kde nastává prudká změna atmosférického tlaku. Máme podezření, že se tak děje v důsledku změny funkce scintilačních detektorů při změně jejich teplot, avšak na toto chování jsme narazili až při konci našich měření, tudíž nebyl čas tuto hypotézu ověřit. Jak je ale vidět, toto rozdělení zachovává stejný sklon roviny a mění jen její absolutní pozici, tudíž parametr a , který pro nás není zásadní.

Tabulka 1: Porovnání získaných parametrů pro všechna hlavní měření

Parametry fitu	Sklep	4. podlaží	Dlouhodobé měření	6. podlaží
$a/(N \cdot h^{-1})$	93 300(2 000)	65 200(2 700)	57 400(2 300)	72 000(13 000)
$\beta/(N \cdot hPa^{-1} \cdot h^{-1})$	-68,9(2,0)	-31,7(2,7)	-23,2(2,3)	-29(12)
$\gamma/(N \cdot ^\circ C^{-1} \cdot h^{-1})$	10(6)	16(5)	73(8)	0(23)

Jak můžeme z tab. 1 vyčíst, podařilo se nám ověřit existenci barometrického jevu. Závislost na teplotě je ve většině měření také zaznamenatelná, ale při měření v 6. podlaží se nám potvrdit nepodařila, tudíž nelze vyslovit jednoznačný závěr. Je avšak možné, že teplotní závislost odráží spíše změnu funkce scintilačních detektorů při rozdílné teplotě. Stínící schopnost železobetonové konstrukce byla v práci [1] taktéž potvrzena.

Využití ve výuce fyziky

Fyzika mikrosvěta pro mnoho žáků základních a středních škol často nepatří mezi nejoblíbenější části fyziky. Důvodů může být více, ale jedním z hlavních je nepochybně nedostatek dostupných školních pokusů, které by tuto oblast přiblížily prostřednictvím přímé zkušenosti. Většina školních experimentů má spíše modelový a demonstrační charakter, ale často postrádají motivační potenciál vycházející z práce s reálnými daty nebo jevy. Mnoha žákům se proto může fyzika mikrosvěta může jevit jako vzdálená, abstraktní nebo příliš obtížná. Využívání reálných, byť zjednodušených experimentů ve výuce se proto jeví jako velmi vhodné.

Přesná kopie našeho mionového detektoru rozhodně není něco, o co by se nutně měli středoškolské učitelé běžně pokoušet. Scintilační detektory spolu s použitou elektronikou a zátěžovým vozíkem nejsou běžnou součástí vybavení školních fyzikálních kabinetů a pořizovací náklady celého zařízení jsou z pohledu výuky zbytečně vysoké. Při úvodní rešerši této problematiky jsme však narazili na projekt Cosmic Watch [3], který nabízí detailní návody na sestavení obdobného mionového detektoru, ovšem za cenu v řádu „pouhých“ tisíců korun. Na webových stránkách projektu je volně dostupný ke stažení veškerý potřebný software a seznam součástí nutných k sestavení vlastního mionového teleskopu. Ačkoliv konstrukce není úplně triviální, podrobný popis jednotlivých kroků ji činí zvládnutelnou i pro motivované zájemce. Takový projekt by mohl být zajímavou výzvou pro zapálené učitele fyziky, kteří chtějí přiblížit moderní částicovou fyziku svým studentům prostřednictvím reálného experimentu.

Otázkou zůstává, jak efektivně zapojit žáky do experimentální činnosti. Prvním krokem by mělo být jasné vymezení cílů experimentu. Pro mladší žáky může být vhodné zaměřit se na ověření stínícího účinku školní budovy, čímž se přirozeně upevňuje jeden z principů radiační ochrany. U starších žáků lze uvažovat i o experimentálním ověření barometrického jevu, což by však vzhledem k náročnosti interpretace mohlo být vhodné spíše pro odborné semináře nebo volitelné předměty. V obou případech je však zásadní práce se získanými daty. A právě to představuje jednu z klíčových výhod tohoto typu experimentu – na rozdíl od většiny běžných školních pokusů, kde žáci měří přímo výsledek, zde musí zpracovávat rozsáhlejší množství dat. To přirozeně vede k využití počítačů a propojení fyziky s informatikou, plně v souladu s požadavky nových RVP i současným pojetím fyziky jako školního předmětu. Na druhé straně je třeba přiznat, že právě tato výhoda je zároveň i nevýhodou – experiment je časově náročný

a vyžaduje více vyučovacích hodin, které by se mu musely obětovat. Klíčové proto je najít vhodnou organizační formu, jak jej do výuky zařadit – například jako dlouhodobý projekt, mezioborovou aktivitu nebo součást badatelských seminářů. Přes tyto praktické obtíže je zjevné, že ve výuce chybí větší množství experimentů zaměřených na fyziku mikrosvěta a zde prezentovaný princip může představovat jeden z možných způsobů, jak tuto mezeru alespoň částečně zaplnit.

Literatura

- [1] *Sojka, S.*: Studium mionů pomocí mionového teleskopu. Bakalářská práce, PřF UP, Olomouc, 2024. Online. Dostupné z: <https://theses.cz/id/tt8wz4/>
- [2] *ČVUT. CZELTA*. 2014. Online. [cit. 2024-07-19]. Dostupné z: <http://czelta.utef.cvut.cz/publicweb/>
- [3] *Przewłocki, P., Frankiewicz, K.*: CosmicWatch [online]. 2017 [cit. 2024-04-04]. Dostupné z: <http://cosmicwatch.lns.mit.edu/about>



V pondělí 23. 6. 2025 proběhla na PřF UP v Olomouci tradiční Celostátní přehlídka studentských prací z didaktiky fyziky, které se zúčastnilo celkem 11 studentů VŠ. Více informací na stránce https://exfyz.upol.cz/didaktika/soutez_2025/.