



## **Středoškolská technika 2022**

**Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT**

### **Kosmické záření**

**Klára Matějková**

Gymnázium Botičská

Botičská 1, Praha 2, 12801

# Poděkování

Chtěla bych poděkovat RNDr. Petru Chaloupkovi, Ph. D. za ochotu, trpělivost, cenné rady a za poskytnutí potřebných materiálů a zařízení. Rovněž bych chtěla poděkovat Ing. Jakubu Šafaříkovi za rady a připomínky k mé práci.



# Anotace

Cílem mé práce bylo změření úhlové závislosti příchodu kosmického záření na Zemi a zjistit, jak se jeho intenzita mění s úhlem. Práci jsem si rozdělila na dvě části. Tou první bylo sestavení držáku na scintilační detektory a tou druhou samotné měření. V teoretické části jsem se zaměřila na kosmické záření, na jeho původ a složení a také na princip fungování scintilátorů. Měření hodnot jsem prováděla dvěma scintilačními detektory, mezi kterými jsem nastavila koincidence. Z mých výsledků vyplývá, že nejvíce částic přichází pod úhlem zenitu a se zvětšujícím úhlem se počet částic snižuje.

# Abstract

The goal of my thesis was to measure the angle dependence of cosmic rays and to examine how the intensity of cosmic rays varies with different angles. This thesis consist of two parts. In the first part I focus on the assembly of the holder for scintillator detectors and in the second part on the data measurement. The measurement was done with two scintillator detectors set on coincidence. The results demonstrate that most particles come at an angle of zenith and the amount decreases with increasing angle.

# Obsah

Úvod.....	8
Přehled literatury.....	9
Primární kosmické záření.....	9
Původ.....	9
Složení.....	9
Sekundární kosmické záření.....	10
Vznik.....	10
Složení.....	10
Spršky sekundárního kosmického záření.....	10
Elementární částice.....	12
Scintilátory.....	13
Anorganické a organické scintilátory.....	13
Fotonásobič.....	14
Metodika.....	15
Pomůcky.....	15
Postup.....	15
Příprava scintilátorů.....	15
Sestavení držáku.....	15
Měření.....	18
Zpracování naměřených údajů.....	18
Výsledky a diskuse.....	19
Závěr.....	25
Seznam literatury.....	26

# Úvod

Ve své práci bych se chtěla zaměřit na kosmické záření. Kosmické záření, nejen že tvoří nemalou součást přírodního pozadí, ale také může objasnit mnoho o vzniku částic a fungování vesmíru. Poznatky, které máme, jsou často nejisté. Mnoho našich otázek o částicích s nejvyšší energií čeká na odpovědi, jelikož o nich zatím mnoho nevíme. Pro toto téma jsem se rozhodla na základě mého dlouholetého zájmu o jadernou a částicovou fyziku. Mým cílem bude změřit úhlovou závislost příchodu kosmického záření a vytvořit graf této závislosti. Bude to důkaz toho, že záření přichází nejen z prostředí kolem nás, ale také z vesmíru.

# Přehled literatury

Kosmickým zářením nazýváme částice, které na Zemi přichází z vesmíru. Za jeho objevitele je považován Viktor Franz Hess, který roku 1911 provedl experiment s hermetickou ionizační komorou. Balón s touto komorou vypustil a pozoroval zprvu pokles ionizace a poté zhruba od výšky 1,5 km její prudký nárůst. Na základě toho vyvodil, že ionizující záření pochází mimo jiné i z mimozemských zdrojů. Toto záření dále dělíme na primární, což je to, které k nám přichází, a sekundární, které vzniká interakcí primárního záření s atmosférou. (1)

## Primární kosmické záření

### Původ

O původu primárního záření existuje několik teorií, ale ty se dají rozdělit na dva pohledy. Tím prvním je galaktický model, podle kterého záření vzniká v naší Galaxii, a druhý je extragalaktický, podle kterého pochází z místa za jejími hranicemi. (1) Galaktický model uvažuje jako nejpravděpodobnější zdroj kosmického záření supernovy, pulsary a magnetary. Některé částice však nabývají energií až  $10^{20}$  eV a žádný z těchto zdrojů není schopen tyto energie vysvětlit. Proto se předpokládá, že částice o největší energii vznikají a jsou urychlovány mimo naši Galaxii. Za extragalaktické zdroje považujeme srážky galaxií a aktivní galaktická jádra. (2) Po svém vzniku jsou částice urychlovány několika mechanismy. Jedny z nejdůležitějších jsou Fermiho mechanismus, který popisuje urychlení částic při srážkách s pohybujícími se magnetickými oblaky, a urychlení částic po interakci s rázovými vlnami po výbuchu supernov a únik částic při pohlcování hmoty z černé díry. (3)

### Složení

Jak už bylo zmíněno, primární kosmické záření je to, co na Zemi přichází z vesmíru. V případě primárního kosmického záření se z většiny jedná o nabitě částice. Hlavní složkou jsou protony (86 %),  $\alpha$ -částice (11 %), jádra dalších prvků (1 %) a elektrony a neutrina (2 %). Někdy se sem řadí i fotony o vysoké energii. K poznatku, že se jedná o nabitě částice, došel roku 1927 Jacob Clay na základě šířkového efektu. Prokázal, že největší intenzita záření je na pólech a nejnižší na rovníku. Toto dokazuje, že záření je ovlivněno magnetickým polem Země. Charakter nabitých částic potvrzuje i východozápadní asymetrie. Ze západu dopadá více částic než z východu, a to z důvodu převahy kladně nabitých částic. (2) (4)

Náboj těchto částic způsobuje, že částice se během své cesty k Zemi vychylují působením nehomogenních magnetických polí, tudíž nejsme schopni s přesností určit, kde na obloze se nachází její zdroj. U částic s energií do  $10^{14}$  eV se počítá s úplnou izotropií a anizotropií můžeme pozorovat u částic s energií nad  $10^{19}$  eV. (2)

# Sekundární kosmické záření

## Vznik

Sekundární kosmické záření vzniká interakcí primárního kosmického záření s atmosférou. Primární kosmické záření přichází s velkou energií a zhruba ve výšce 25–30 km, kde je dostatečná hustota molekul, interaguje s molekulami atmosféry a započne se kaskáda, která pokračuje, dokud energie vznikajících částic neklesne pod hranici, která je nutná pro tvorbu nových částic. Tyto kaskády nazýváme také spršky. Počet vzniklých částic závisí na energii částice primárního záření. (2)

## Složení

U sekundárního záření rozlišujeme měkkou a tvrdou složku a dále 4 komponenty: hadronovou, neutrinovou, elektromagnetickou a mionovou. Tímto jsme schopni vznikající částice zařadit. Nejčastěji primární interakcí vznikají piony ( $\pi^-$ ,  $\pi^+$ ,  $\pi^0$ ), dále nukleony a méně často kaony ( $K^-$ ,  $K^+$ ), které jsou hadronovou komponentou. Dalšími interakcemi se spouští kaskády a vznikají fotony, elektrony a pozitrony, které jsou elektromagnetickou komponentou, miony tvořící mionovou a neutrina tvořící neutrinovou komponentu. Na měkkou a tvrdou složku se dělí podle toho, jak moc jsou částice pohlcovány. Měkká složka je pohlcována velmi dobře a řadí se sem fotony, elektrony a pozitrony. Tvrdá složka je velmi pronikavá a řadí se sem miony a neutrina. (2) (4)

## Spršky sekundárního kosmického záření

Po interakci částice s molekulami atmosféry se spustí tzv. spršky. Nejčastěji dochází ke vzniku pionů, jejichž vznik můžeme vyjádřit pomocí fotoprodukce hadronů,

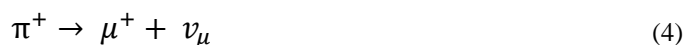


kde p je proton a N je proton či neutron. Pion vzniká buďto nabitý nebo neutrální. Neutrální pion se velmi rychle rozpadá na dva fotony. Fotony následně spustí elektromagnetickou kaskádu.



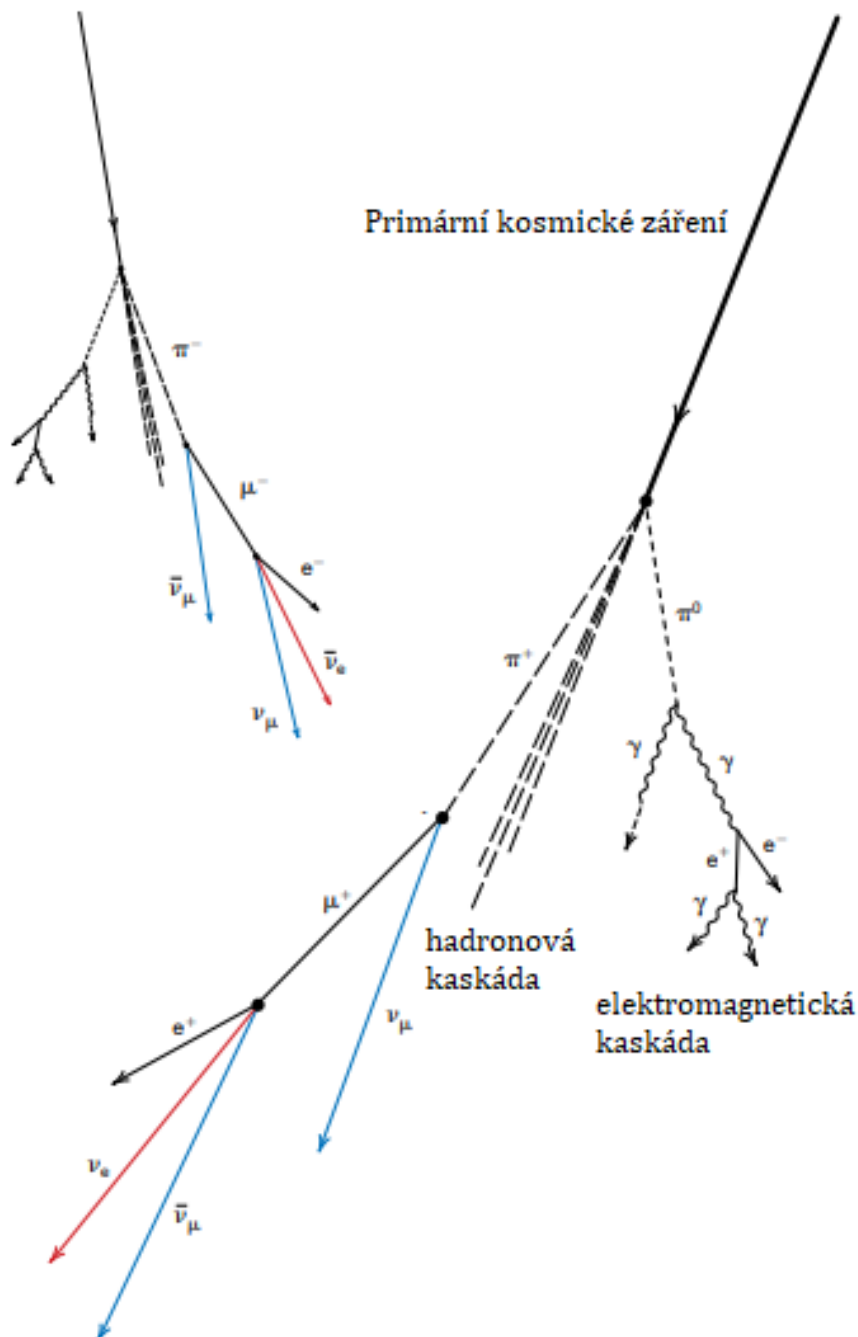
Vzniká elektron-pozitronový pár, který další interakcí s atomy atmosféry vyzařuje fotony brzdného záření. Tyto fotony opět interagují za vzniku elektron-pozitronového páru.

Hadronová kaskáda je tvořena nukleony, a hlavně nabitými piony.





Nabitý pion se rozpadá na mion a mionové neutrino. Miony se také rozpadají a vznikají mionové antineutrino, elektronové neutrino a pozitron. Pokud vzniklý neutron neinteraguje s dalšími částicemi, projde rozpadem  $\beta$ . (5) V případě, že částice mají opačný náboj, i produkt bude mít náboj opačný, nebo u neutrina vznikne antičástice. (2)



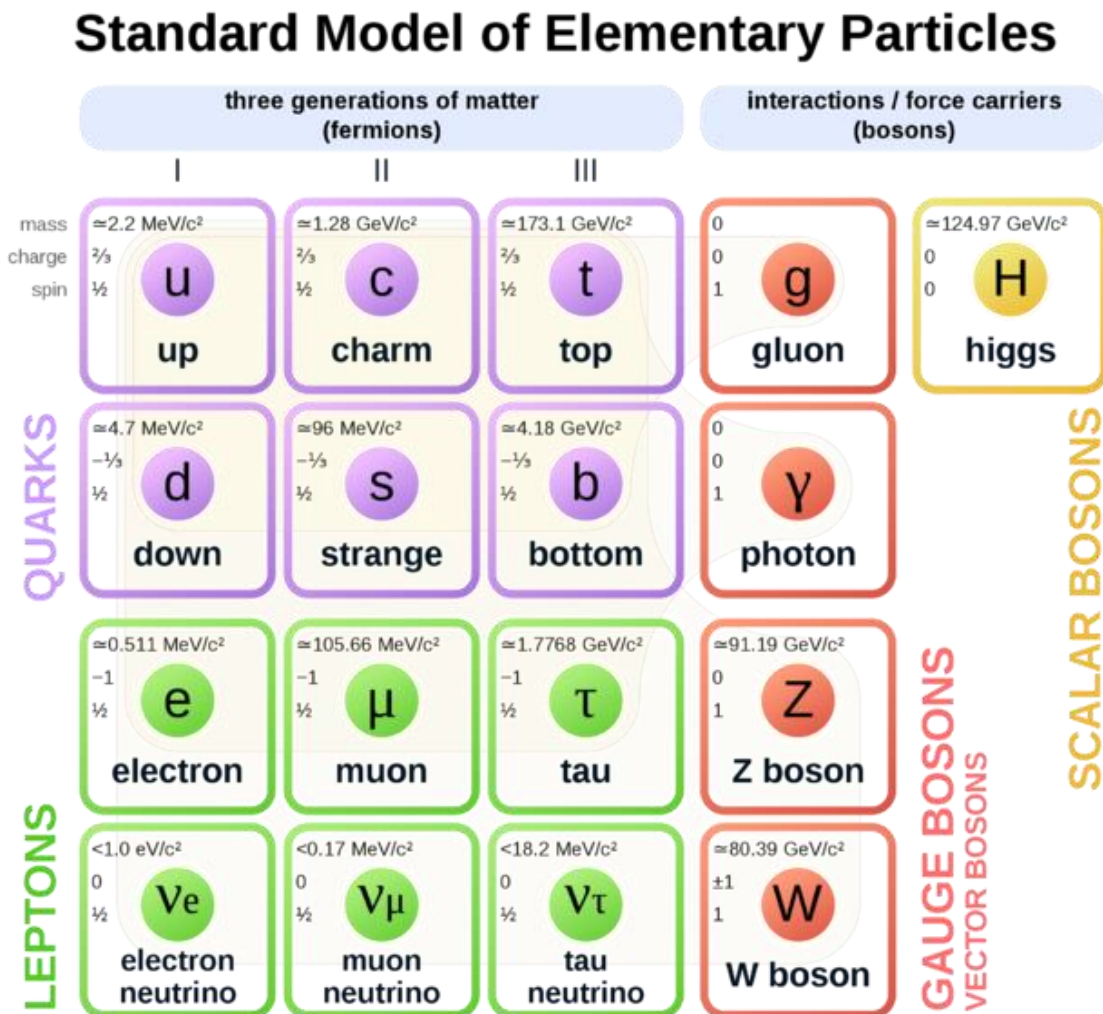
Obr. 1: Vývoj spršky kosmického záření, upraveno podle (6)

Rozvoj spršky je ovlivněn typem částic a jejich energií. Při průchodu atmosférou ztrácí částice svou energii. Ionizační ztráty jsou způsobeny interakcí částice a elektronového obalu atomu. U vývoje elektromagnetických kaskád dochází při průchodu elektronu o vysoké energii k vyzáření fotonu, který se také nazývá brzdným zářením. V prostředí, kde se

částice pohybuje rychleji, než je rychlost světla v daném prostředí, vzniká Čerenkovo záření. Částice kolem sebe začne vyzařovat elektromagnetické vlny, které tvarem připomínají rázovou vlnu aerodynamického třesku. (7)

## Elementární částice

Elementární částice jsou takové, které považujeme za základ hmoty a nemají již další strukturu. Tyto částice jsou uspořádány to tzv. Standartního modelu.



Obr. 2: Standartní model (8)

Tento model rozlišuje fermiony a bozony. Fermiony jsou částice, které tvoří dané látky. Odlišnost jednotlivých prvků a látek zajišťuje tzv. Pauliho vylučovací princip, díky kterému dva fermiony nemohou obsadit stejný kvantový stav. Příkladem může být atomový obal, kde jsou elektrony v různých energetických stavech. Aby mohly existovat baryony, kvarky a gluony mají tzv. barevný náboj. Toto však neplatí pro bozony, které stejný kvantový stav obsazovat mohou. Z tohoto důvodu se bozony považují za zprostředkovatele silových interakcí mezi částicemi. Dalším rozdílem mezi nimi je jejich spin. Zatímco fermiony mají spin pouze  $\frac{1}{2}$  a  $-\frac{1}{2}$ , bozony nabývají spinu 0 a 1.

Fermiony dělíme na leptony a kvarky. Kvarky tvoří baryony, což jsou sady 3 kvarků a jejichž příkladem je proton a neutron. Silovým působením mezi kvarky je silná jaderná síla, jejímž nosičem je bozon gluon. Mezi leptony patří elektricky nabitě částice elektron, mion, tauon a k nim 3 odpovídající elektricky neutrální neutrína. Interakce mezi nabitými částicemi zajišťují fotony. Bozony  $W^+$ ,  $W^-$  a  $Z^0$  jsou nosiči slabé jaderné síly, která se uplatňuje například u rozpadu  $\beta$ . (9) Standardním modelem byla také předpovězena poslední částice Higgsov bozon. Ten byl objeven roku 2012 v hadronovém urychlovači LHC v CERN. Ostatní částice, jako bozony  $W^\pm$  a  $Z^0$ , interakcí s přidruženým Higgsovým polem získávají svoji hmotnost. (10)

Velkou část sekundárního záření utváří mezony. Mezony jsou spojení kvarku a antikvarku, což je antičástice kvarku. Antičástice mají stejnou hmotnost i spin, ale mají opačné náboje. Nejlehčím mezonem je pion, který je tvořen up a down kvarky a antikvarky. U kaonů se jedná o up, down a strange kvarky. Tyto částice mají celočíselný spin. (9)

## Scintilátory

Scintilátory jsou materiály sloužící k detekci ionizujícího záření. Fungují na principu fosforescence. Procházející částice interaguje s elektrony atomu látky a dojde k jejich excitaci. Při následné deexcitaci dojde k vyzáření fotonů viditelného světla, které jsou poté zachyceny fotonásobičem.

Neexistuje žádný scintilátor, který by se dal využít univerzálně. Při výběru sledujeme několik parametrů. Jedním z nich je hustota, která se svým vzrůstem zvyšuje pravděpodobnost excitace v dané látce. Počet fotonů, který v scintilátoru vyprodukuje částice o energii 1 MeV se nazývá světelný výtěžek. Předpokládá se, že s rostoucí energií částice úměrně poroste i počet vyzářených fotonů, ale není tomu tak. Tato proporcionalita, respektive neproporcionalita, je způsobena dalšími vlastnostmi scintilátoru a dalšími procesy, které v něm probíhají. U scintilátorů se rozlišuje, jak velký rozdíl energií je mezi dvěma částicemi, který je ještě schopen rozlišit, tzv. energetické rozlišení. Rozlišujeme je i časově, kdy nás zajímá doba, která je nezbytná k rozlišení dvou přicházejících částic. (11)

## Anorganické a organické scintilátory

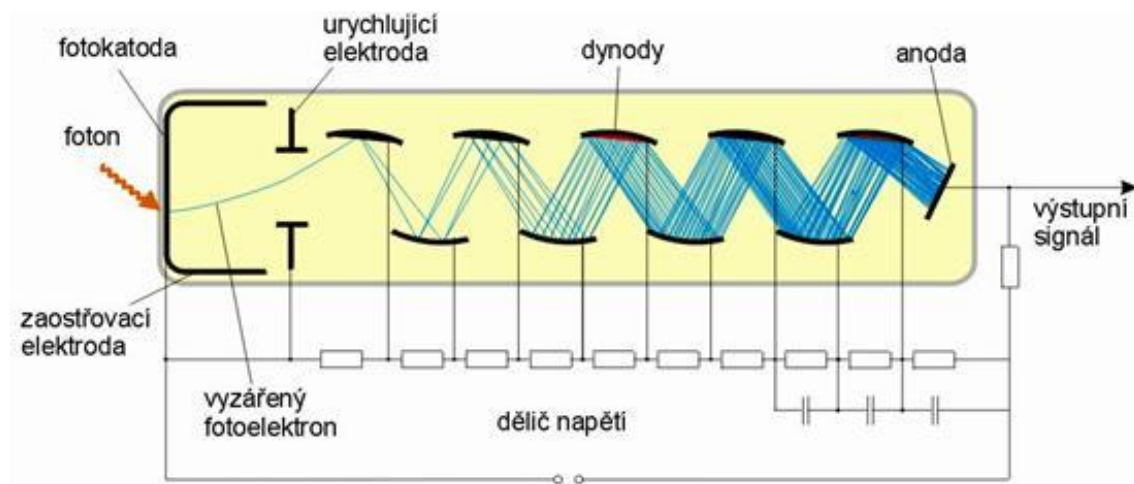
Anorganické scintilátory jsou závislé na krystalové mřížce a příměsi další látky, tzv. aktivátoru. Aktivátor umožní, aby při excitaci mezi základním a excitovaným stavem nebyl takový rozdíl energie, aby došlo k vyzáření fotonu o vlnové délce mimo viditelné spektrum. Příkladem anorganického scintilátoru může být jodid sodný aktivovaný thaliem NaI(Tl), který je hojně používán, nebo jodid cesný aktivovaný thaliem CsI(Tl), kterého se využívá při detekci hlavně záření  $\gamma$ .

Organické scintilátory oproti nim nejsou závislé na skupenství. Jeho molekuly si mohou energii předávat, čehož se využívá přidáním příměsí. Tyto molekuly mohou například vyzářit foton o výhodnější vlnové délce nebo jich může uvolnit více. Z důvodu nízkého

protonového čísla atomů organického scintilátoru, nejsou vhodné pro detekci  $\gamma$  záření. Příkladem organického scintilátoru je 3-hydroxyflavon. (12)

## Fotonásobič

Fotonásobiče fungují na principu přeměny slabých fotonů viditelného světla vyzářených ze scintilátoru na měřitelný elektrický proud. Na fotokatodě je absorbován foton ze scintilátoru a dojde k vyzáření elektronu. Tento vyzářený elektron je veden na systém dynod, kde se sekundární emisí vyzářují další elektrony, které dopadají na anodu, ze které je poté odváděn zesílený signál. (4)



Obr. 3: Fotonásobič (13)

# Metodika

Cílem mé práce BOČ bylo sestavit vhodný držák na scintilační detektor a následně změřit úhlovou závislost dopadu kosmického záření.

## Pomůcky

K sestavení držáku jsem použila překližku, konkrétně 3 desky o rozměrech 800×500 mm, ze které jsem vyřezala jednotlivé části, které popíšu později v postupu, dřevěný trám a závitové tyče na propojení jednotlivých částí.

K přípravě samotných scintilátorů jsem použila černou lepící pásku a lesklou hliníkovou folii. Scintilátory jsem použila dva, jeden o rozměrech 30×210×60 mm a druhý o rozměrech 25×215×100 mm. Scintilátory od firmy NUVIATech Instruments byly vyrobeny z polystyrenu. K nim jsem připevnila fotonásobiče od firmy Hamamatsu, model H6153-70MOD. Scintilátory s fotonásobičem jsem následně připojila k osciloskopu, konkrétně jsem využila digitální osciloskop firmy Tektronix, model DPO4054. Fotonásobič musel být také připojen ke zdroji vysokého napětí, využila jsem zdroj firmy Bertan High voltage power supply series 225.

Pro zjištění počtu přicházejících částic jsem využila Counter firmy MASTECH, model MS6100.

Ke zpracování naměřených údajů jsem využila Microsoft Excel a aplikaci Gnuplot k vytvoření grafu úhlové závislosti.

## Postup

### Příprava scintilátorů

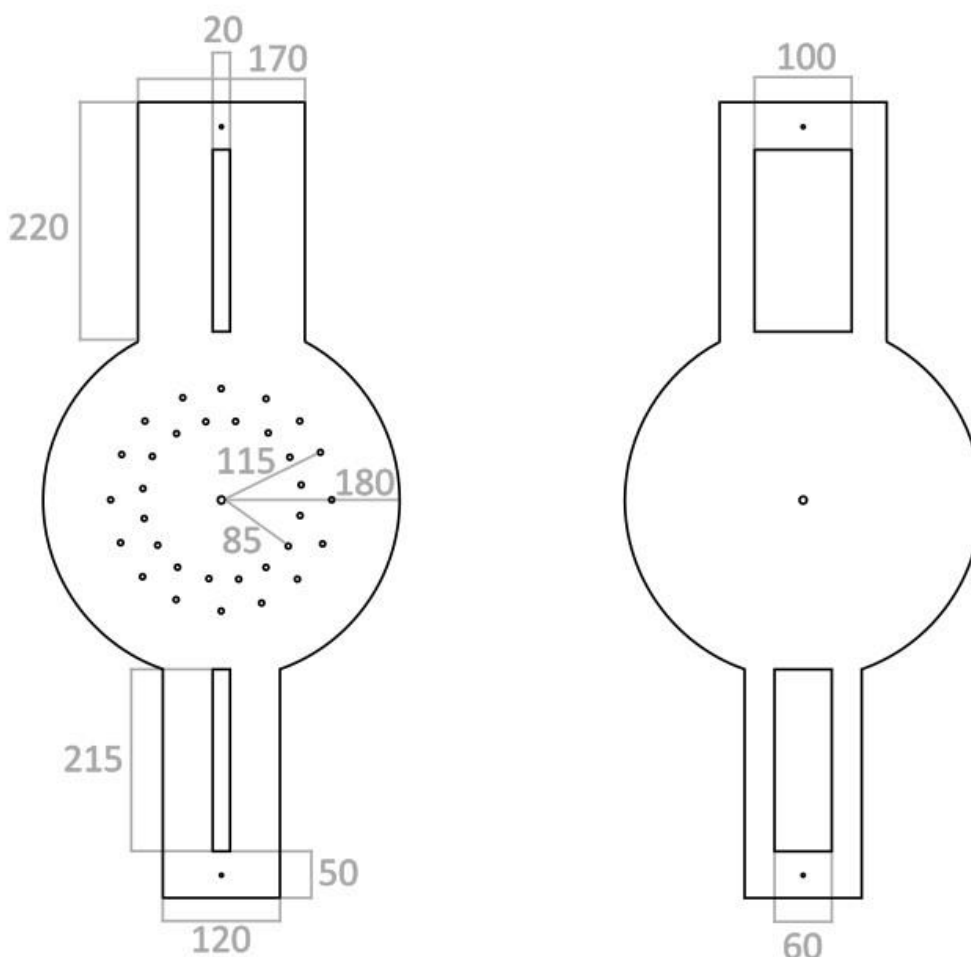
Hliníkovou folií jsem pokryla celý povrch scintilátorů až na jednu stranu, ke které jsem později připevnila fotonásobič. Poté jsem černou lepící páskou připevnila fotonásobič k nezakryté straně scintilátoru a celý i s fotonásobičem jsem ho oblepila černou lepící páskou. Bylo podstatné oblepit scintilátor a fotonásobič tak, aby byl scintilátor úplně zakrytý, abych zachytila pouze viditelné světlo vyzářené scintilátorem po průchodu částice, a ne to z prostředí.

### Sestavení držáku

Držák se skládal z tří částí: otáčivých ramen, podpurné části (dále stojan) a malých držáků, které sloužily k připevnění scintilátoru k ramenu.

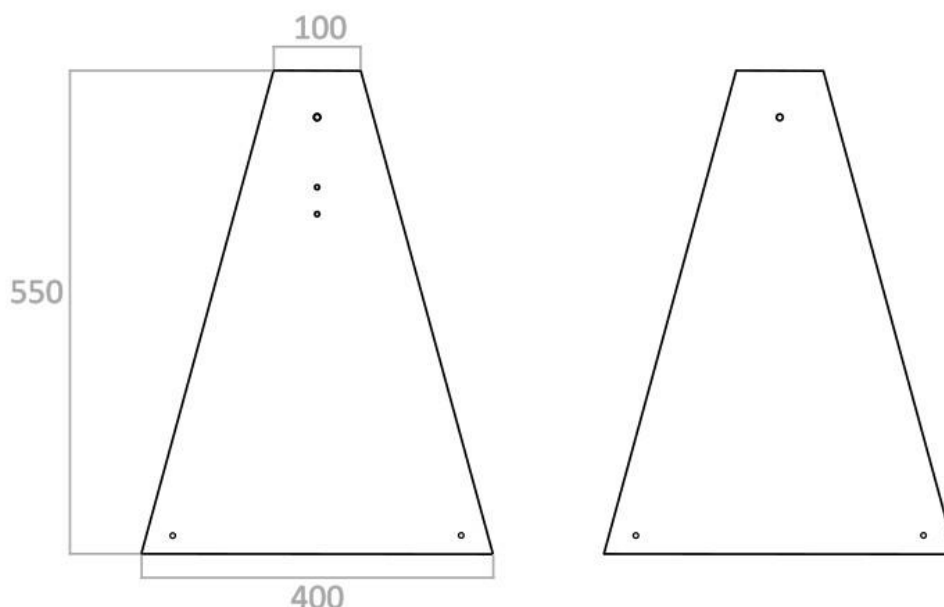
Prvním krokem bylo vyřezání otáčivých ramen. Jedno z ramen mělo vyvrtné otvory v kruhové části, pomocí kterých jsem později byla schopná upevnit ramena v požadovaném úhlu. Na vystouplých částech jsem vyřezala obdélníky, které sloužily nejen k upevnění

scintilátorů, ale také jsem díky nim mohla měnit vzdálenost mezi scintilátory. Otvor uprostřed sloužil ke složení ramen a stojanu. Otvory na koncích ramen sloužily k pevnému spojení obou ramen, aby se otáčela stejně a zůstala vzájemně rovnoběžná. Obě ramena se lišila velikostí otvorů v obdélníkových částech. Otvory byly u jednoho ramene větší, aby jimi bylo možné prostrčit scintilátor. Toto bylo nezbytné z toho důvodu, že na této straně vystupovaly fotonásobiče. V tomto ramenu již nebylo nutné vyvrtat otvory pro upevnění při otočení ramen, protože ramena byla pevně spojená.



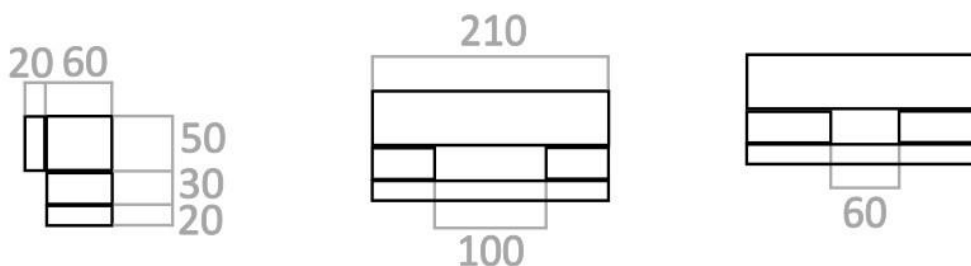
Obr. 4: Ramena držáku

Pro stojany jsem zvolila tvar lichoběžníku. U této části bylo podstatné, aby tyto lichoběžníky udržely veškeré části. Každý stojan měl v sobě tři otvory. Jeden v horní části, který sloužil ke spojení s rameny a dva po stranách v dolní části, které sloužily ke spojení a zpevnění těchto dvou lichoběžníků. V jednom z lichoběžníků jsem vyvrtala dva otvory tak, aby jimi bylo možné prostrčit šroub a tím upevnit ramena v požadované poloze.



Obr. 5: Stojan držáku

Poslední částí byly malé držáky. Ty se skládaly ze tří částí. Základem byl kvádr, ke kterému jsem přivrtala z jedné strany malý kus překližky, který sloužil k upevnění k ramenu držáku. Na vedlejší straně k tomuto kusu překližky jsem připevnila kus, který se skládal z kusu překližky a dvou menších kvádrů, mezi které jsem upevnila scintilátor. Všechny tyto části se daly volně rozložit, abych mohla měnit vzdálenost mezi scintilátory. Části, mezi kterými byl scintilátor upevněn, jsem vystlala filcovými podložkami, aby se případně scintilátor nepoškodil.



Obr. 6: Malé držáky na scintilátory, pohled ze strany (vlevo) a pohled zepředu pro dvě šířky scintilátorů (uprostřed a vpravo)

Ramena a stojany jsem spojila celkem pěti závitovými tyčemi. Jedna, která procházela středem ramen a horním otvorem stojanů, měla za úkol držet obě ramena a zároveň umožnit jejich volné otáčení. Další dvě byly na spodních rozích stojanů a sloužily k upevnění vzdálenosti mezi rameny, zlepšovaly stabilitu a pomáhaly zabránit vzájemnému vychýlení ramen i stojanů. Pro stejný účel jsem dala ještě jednu tyč na konce ramen. Stojan a rameno s otvory na změnu úhlu, pod kterým jsem měřila, byly hned u sebe, zatímco na druhé straně byl stojan od ramene dál, a to z důvodu vystupujících fotonásobičů.

## Měření

Měření proběhlo tak, že jsem scintilátory upevnila do držáku, zvolila jsem úhel, pod kterým jsem chtěla měřit, a vzájemnou vzdálenost scintilátorů. Po upevnění do držáku, jsem je připojila k osciloskopu, kde jsem nastavila koincidence, což znamená, že průchod částice se zaznamená pouze tehdy, projde-li oběma scintilátory. Následně jsem zvolila trigger a přivedla vysoké napětí. Koincidence bylo možné určit, že částice přišla pod určitým úhlem.

## Zpracování naměřených údajů

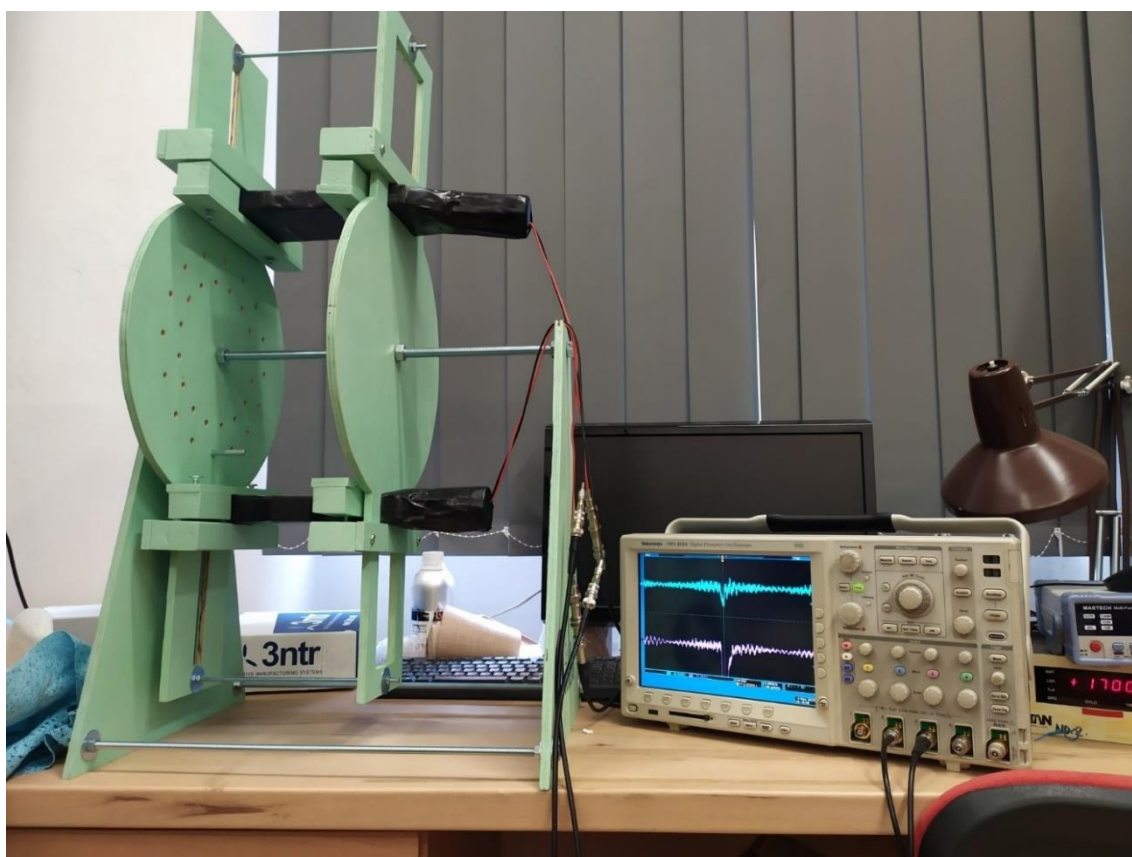
Naměřené hodnoty jsem zaznamenala do tabulky a vytvořila jsem graf úhlové závislosti přicházejících částic. Předpokládala jsem, že výsledný graf bude mít tvar kosinusoidy. K vytvoření grafu jsem použila Gnuplot, protože po zadání naměřených hodnot s jejich odchylkami nebylo možné v aplikaci Excel graf proložit kosinusoidou.



# Výsledky a diskuse

Na základě měření jsem mohla svůj předpoklad potvrdit a úhlová závislost příchodu kosmického záření má tvar kosinusoidy. Největší počet částic přichází pod úhlem zenitu a se zvětšujícím se úhlem počet přicházejících částic klesá. Díky tomuto poznatku lze konstatovat, že detekované částice byly z většiny kosmického původu. Detekované částice však mohou být i původu jiného.

První část mé práce, a to sestavení držáku, se mi vydařila. S rameny jsem mohla volně otáčet a mohla jsem měnit vzdálenost scintilátorů od sebe. Během sestavování byl právě s touto částí největší problém, protože překližka v čase, kdy jsem ji nechala mezi sestavením a vyřezáním na místě s vlhkým vzduchem, natáhla vodu. Jelikož zvětšila svůj objem, musela jsem se k těmto částem vrátit a opět je zapilovat, protože jsem potřebovala, aby tyto části přesně seděly.



Obr. 7: Sestavený držák

Do obou fotonásobičů jsem přiváděla napětí 1700 V. Osciloskop jsem nastavila tak, aby měřil v čase 40 ns. Každý fotonásobič je na osciloskop přiváděn na jiný kanál. Aby byla započítána pouze částice, která projde oběma scintilátory, nastavila jsem osciloskop na koincenci. Na obou kanálech jsem nastavila stejný trigger, který určuje minimální napětí, které musí přijít z fotonásobičů, aby se částice započítala, a tuto hodnotu jsem nastavila na -50 mV.

Vzhledem k tomu, že jsem měřila po dlouhou dobu, nebyla jsem schopná měření zapnout a zastavit pokaždé ve stejný čas, proto jsem hodnoty přepočítala na počet částic za minutu, a s těmi jsem dále pracovala.

Tabulka č. 1: 1. měření na vzdálenost 330 mm

Čas (min)	Úhel (rad)	Počet částic	Počet částic za čas ( $\cdot \text{min}^{-1}$ )	Odchylka	Procentuální přesnost
514	0.000	2143	4.169	0.090	2.160
374	0.196	1583	4.233	0.106	2.513
1111	0.393	4889	4.401	0.063	1.430
448	0.589	1296	2.893	0.080	2.778
1342	0.785	4352	3.243	0.049	1.516
1814	0.981	2641	1.456	0.028	1.946
911	1.178	1104	1.212	0.036	3.010
1362	1.374	821	0.603	0.021	3.490

Tabulka č. 2: 2. měření na vzdálenost 460 mm

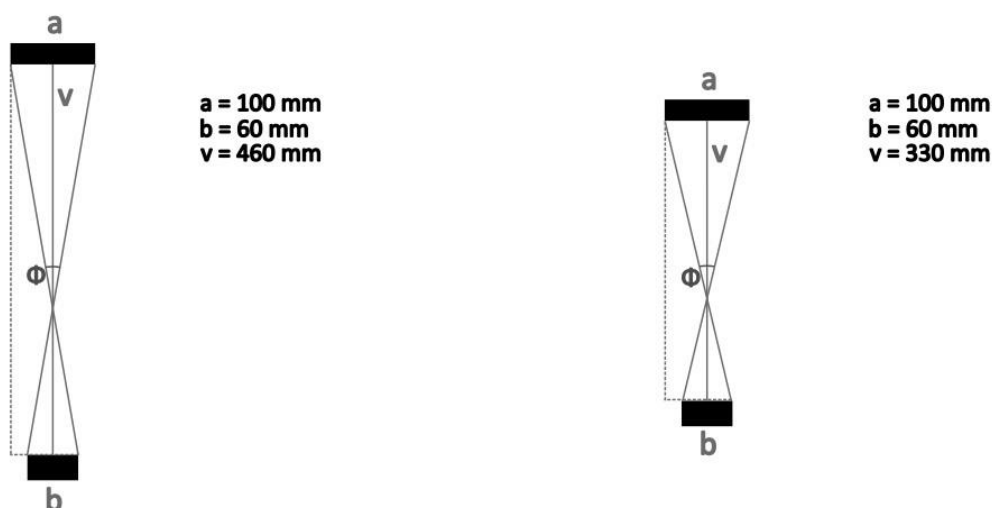
Čas (min)	Úhel (rad)	Počet částic	Počet částic za čas ( $\cdot \text{min}^{-1}$ )	Odchylka	Procentuální přesnost
432	0.000	1223	2.831	0.081	2.859
1462	0.196	3630	2.483	0.041	1.660
1399	0.393	3330	2.380	0.041	1.733
1678	0.589	3458	2.061	0.035	1.701
1450	0.785	2268	1.564	0.033	2.100
1212	0.981	1219	1.006	0.029	2.864
4320	1.178	3694	0.855	0.014	1.645
2952	1.374	1475	0.500	0.013	2.604

Tabulka č. 3: 3. měření na vzdálenost 460 mm

Čas (min)	Úhel (rad)	počet částic	Počet částic za čas ( $\cdot \text{min}^{-1}$ )	odchylka	procentuální přesnost
1479	0.000	3834	2.592	0.042	1.615
1402	0.196	3525	2.514	0.042	1.684
4134	0.393	9212	2.228	0.023	1.042
1445	0.589	2989	2.069	0.038	1.829
1495	0.785	2498	1.671	0.033	2.001
4332	0.981	4890	1.129	0.016	1.430
1371	1.178	1095	0.799	0.024	3.022
1470	1.374	738	0.502	0.018	3.681

Jelikož scintilátory nejsou pouze určitý bod v prostoru, není pracovat rovnou s těmito naměřenými daty, protože čistě tato data ukazují pouze střední hodnotu, a ne celý úhel výseče, kterou koincidence pokrývá.

Úhel, který mé měření pokrývá jsem spočítala takto:



Obr. 8: Náčrtek k výpočtům

$$\theta = 180 - 2 \left( \tan^{-1} \left( \frac{v}{b + \frac{a-b}{2}} \right) \right) \quad (6)$$

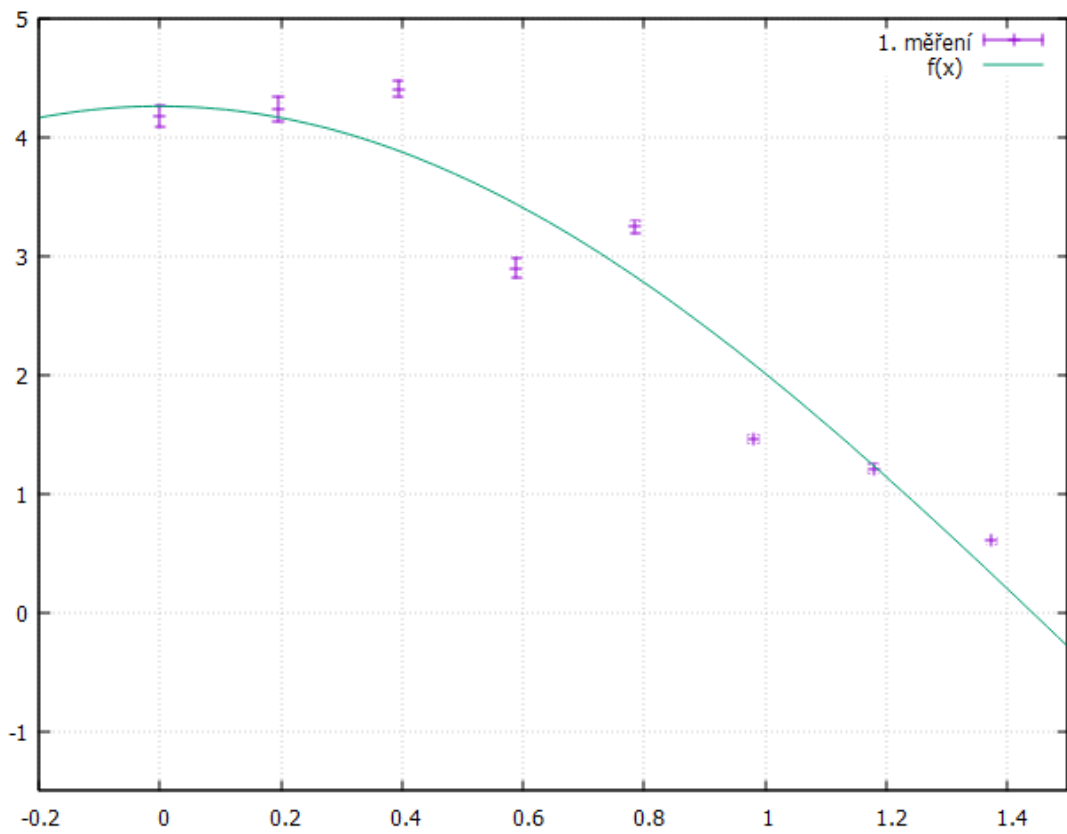
Po dosazení do této rovnice jsem zjistila, že když jsou scintilátory od sebe 460 mm, zabírají úhel  $19,73^\circ$  a při vzdálenosti 330 mm úhel  $27,25^\circ$ .

Jak už jsem zmínila, hodnoty jsem proložila funkcí. Vzhledem k tomu, že v tuto chvíli ještě nemám hotová všechna měření, grafy jsem proložila funkcí kosinus, ale po ukončení měření musím tuto funkci upravit. Upravená rovnice funkce již zahrnuje fakt, že měříme úhel větší, a ne pouze jeho střední hodnotu.

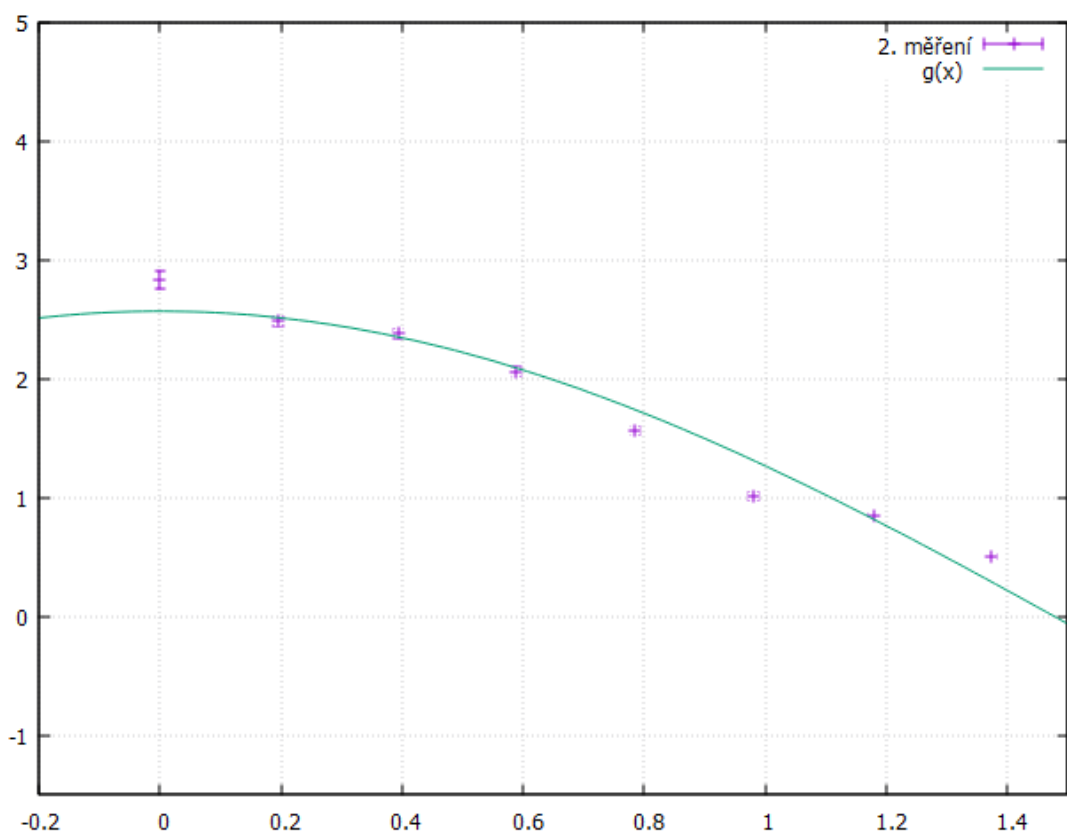
$$N(\theta) = 2a * \cos(\theta) \sin(\Delta) + b\Delta \quad (7)$$

První měření jsem provedla na vzdálenosti 330 mm. Tato vzdálenost byla nejmenší možná vzdálenost dána konstrukcí držáku. Scintilátory byly v této pozici nejbližší u sebe, zabíraly největší výseč, a tudíž jsem naměřila i nejvíce částic. Tuto skutečnost zobrazuje Graf 1 Graf z 1. měřen. Z něj lze také vyčíst, že první měření nebylo příliš přesné, protože hodnoty neodpovídají křivce. V určitých bodech jsou několikanásobně vychýlenější, než je odchylka. Toto měření probíhalo z velké části přes den, kdy se v místnosti pohybovali lidé a byla spuštěna další zařízení. Jednou z možných příčin mohly být například zářivky.

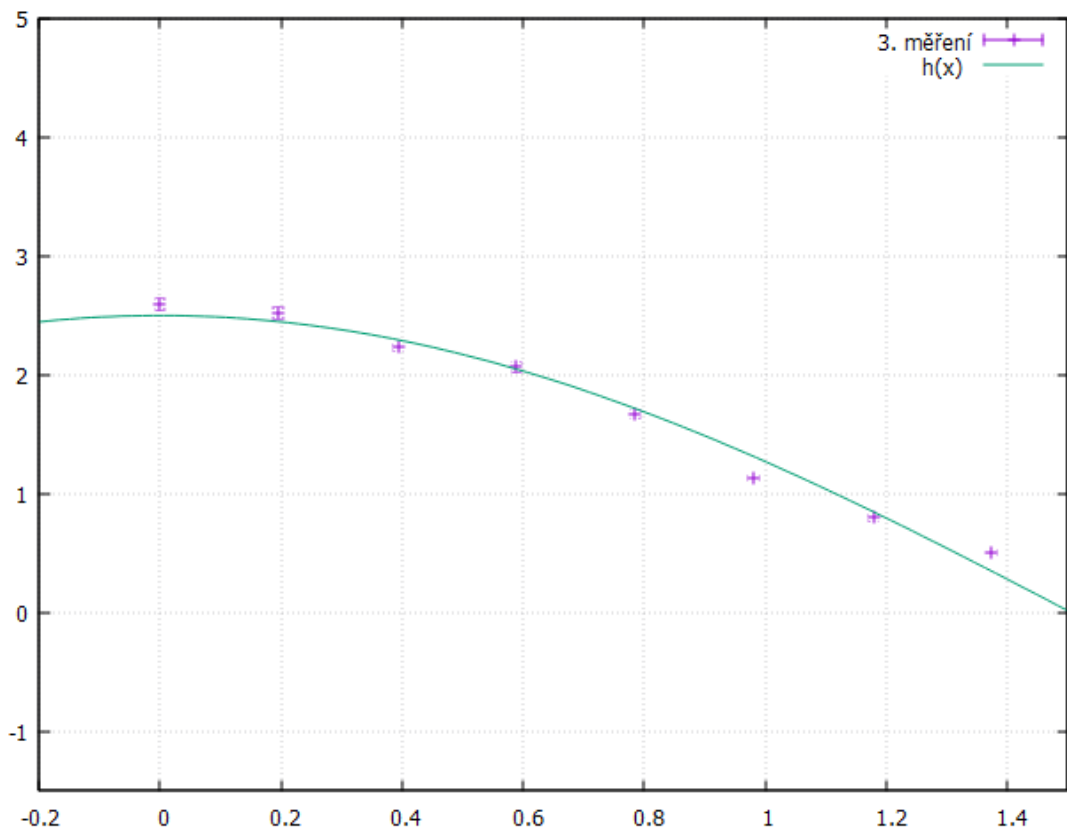
Měření č. 2 a 3 jsem provedla obě na vzdálenosti 460 mm. Už na první pohled lze vidět, že tato dvě měření byla přesnější než to první. Odůvodňuji si to tím, že tato měření probíhala převážně přes noc a přes víkend. Počet detekovaných částic byl naopak nižší, protože zabíraný úhel byl menší než při 1. měření.



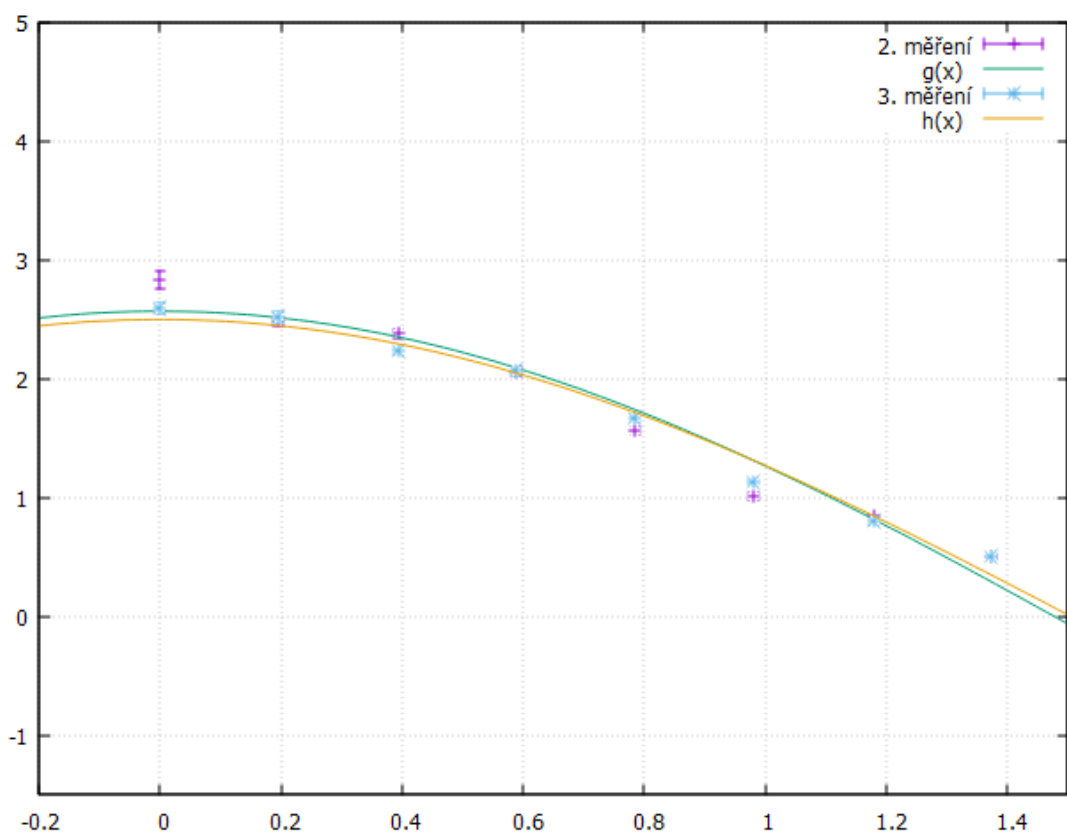
Graf 1 Graf z 1. měření



Graf 2 Graf z 2. měření



Graf 3 Graf z 3. měření



Graf 4 Graf 2. a 3. měření

Sloučením obou grafů dohromady se mohu přesvědčit, že naměřená data byla poměrně přesná, protože křivky obou grafů jsou téměř identické.

# Závěr

Cílem mé maturitní práce bylo změřit úhlovou závislost dopadu kosmického záření a sestavení držáku na scintilační detektory. Během měření jsem detekovala převážně miony, což jsou sekundární částice kosmického záření.

Držák jsem sestavila tak, aby mi umožnil měření koincidence pod různými úhly, ale také v různých vzdálenostech od sebe. V případech, kdy k sobě byly scintilátory nejbližší, jsem detekovala nejvíce částic a naopak.

Během měření jsem se mohla přesvědčit, že mé výsledky ovlivňují i částice jiného než kosmického původu, hlavně ty vznikající například v zářivkách nebo činností dalších zařízení. Z toho důvodu je mé 1. měření nepřesné. Měření s číslem 2 a 3 jsem provedla v době, kdy šumu bylo méně. V grafech se můžeme přesvědčit, že hodnoty se již tolik nevychylují. Předpokládám, že tato dvě měření byla velmi přesná, protože křivky i hodnoty obou grafů jsou téměř totožné. Na základě svého předpokladu jsem grafy proložila kosinusoidou, která však s hodnotami pracuje jako se středními, a nezahrnuje celý úhel, který měření pokrývá.

# Seznam literatury

1. DUBINSKÝ, Juraj a Karel KUDELA. *Kozmické žiarenie*. Bratislava: Veda, 1984.
2. NOVÁK, Šimon. *Vlastnosti spršek kosmického záření s ohledem na typ primární částice* [online]. Praha, 2016 [cit. 2022-12-29]. Dostupné z: [https://physics.fjfi.cvut.cz/publications/ejcf/BP\\_Simon\\_Novak.pdf](https://physics.fjfi.cvut.cz/publications/ejcf/BP_Simon_Novak.pdf). Bakalářská práce. České vysoké učení technické, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. Vedoucí práce RNDr. Petr Trávníček, Ph.D.
3. RICHTROVÁ, Michaela. *Urychlovače elementárních částic* [online]. Brno, 2008 [cit. 2022-12-29]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/cbysw/bc.pdf>. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Pedagogická fakulta. Vedoucí práce Prof. RNDr. Vladislav Navrátil, CSc.
4. ÚLEHLA, Ivan, Zbyšek TRKA a Michal SUK. *Atomy, jádra, částice*. Praha: Academia, 1990. ISBN 80-200-0135-2.
5. DERMER, C D a A ATOYAN. Ultra-high energy cosmic rays, cascade gamma rays, and high-energy neutrinos from gamma-ray bursts. *New Journal of Physics* [online]. United Kingdom: IOP Publishing, 2006, **8**(7), 122-122 [cit. 2022-12-30]. ISSN 1367-2630. Dostupné z: doi:10.1088/1367-2630/8/7/122
6. LOUIS, Bill, Vern SANDBERG, Gerry GARVEY, Hywel WHITE, Geoffrey MILLS a Rex TAYLOE. Celebrating the neutrino: The Evidence for Oscillations. *Los Alamos Science* [online]. USA: Los Alamos National Security, 1997, **25**, 120 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://lascience.lanl.gov/lascience25.shtml>
7. BAKALOVÁ, Alena. *Vlastnosti spršek kosmického záření ultra-vysokých energií*. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. Vedoucí práce Ing. Jakub Vícha, Ph.D.
8. Standard Model of Elementary Particles. In: *Multimediaexpo.cz: Otevřená encyklopedie* [online]. Praha: Multimediaexpo.cz, 2020 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: [http://www.multimediaexpo.cz/mmezc/index.php/Soubor:Standard\\_Model\\_of\\_Elementary\\_Particles.png](http://www.multimediaexpo.cz/mmezc/index.php/Soubor:Standard_Model_of_Elementary_Particles.png)
9. CLOSE Frank. *Particle Physics: A Very Short Introduction*. New York: Oxford University Press, 2004. ISBN 978-0-19-280434-0.
10. The Higgs boson, ten years after its discovery. In: *CERN* [online]. Ženeva: CERN, 4 July 2022 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://home.cern/news/press-release/physics/higgs-boson-ten-years-after-its-discovery>
11. JARÝ, Vítězslav a Jan PEJCHAL. Scintilátory kolem nás. *Věda kolem nás: Výzvy a otázky* [online]. Praha: Academia, 2017, (62) [cit. 2022-12-29]. ISSN 2464-6245. Dostupné z: [http://www.vedakolemnas.cz/miranda2/m2/sys/galerie-download/VKN\\_62WEB.pdf](http://www.vedakolemnas.cz/miranda2/m2/sys/galerie-download/VKN_62WEB.pdf)
12. LAVIČKA, Roman. *Studie dopředného elektromagnetického kalorimetru pro experiment ALICE*. Praha, 2013. Bakalářská práce. České vysoké učení technické, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. Vedoucí práce Doc. RNDr. Vojtěch Petráček, CSc.
13. Fotonásobič. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. Praha: Reichl, Všeticka, c2006-2022 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/747-fotonasobic>