

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA JADERNÁ A FYZIKÁLNĚ INŽENÝRSKÁ

KATEDRA DOZIMETRIE A APLIKACE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ



## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

### Detekce temné hmoty na neutrinových experimentech

Autor: Vít Jirutka

Vedoucí práce: Ing. Filip Jediný, Ph.D.

Praha, 2021



*Katedra:* KDAIZ

*Akademický rok:* 2019/2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

*Student:* Vít Jirutka

*Studijní program:* Aplikace přírodních věd

*Obor:* Dozimetrie a aplikace ionizujícího záření

*Název práce:* Detekce temné hmoty na neutrinových experimentech  
(česky)

*Název práce:* Detecting Dark Matter in neutrino experiments  
(anglicky)

*Pokyny pro vypracování:*

1. Popište historii hledání temné hmoty.
2. Popište jednotlivé modely předpovídající temnou hmotu.
3. Popište detektory a experimenty hledající interakce temné hmoty.
4. Popište možné interakce temné hmoty v blízkých detektorech NOvA/DUNE.
5. Vytvořte simulaci vzniku temné hmoty nebo její detekce dle vybraného modelu.

*Doporučená literatura:*

- [1] BERTONE, Gianfranco a Dan HOOPER. History of dark matter. *Reviews of Modern Physics*. 2018, **90**(4). DOI: 10.1103/RevModPhys.90.045002. ISSN 0034-6861.
- [2] SJÖSTRAND, Torbjörn, Stephen MRENNNA a Peter SKANDS. A brief introduction to PYTHIA 8.1. *Computer Physics Communications*. 2008, **178**(11), 852-867. DOI: 10.1016/j.cpc.2008.01.036. ISSN 00104655.
- [3] MURTHY, M. V. N. a G. RAJASEKARAN. Anomalous Kolar events revisited: Dark matter?. *Pramana*. 2014, **82**(3), 609-615. DOI: 10.1007/s12043-014-0718-5. ISSN 0304-4289.
- [4] ALEXANDER, J. aj. Dark Sectors 2016 Workshop: Community Report. 2016, arXiv:1608.08632.
- [5] AYRES, D.S. aj (NOvA collaboration). The NOvA technical design report, 2007, FERMILAB-DESIGN-2007-01.

*Jméno a pracoviště vedoucího bakalářské práce:*

Ing. Filip Jediný  
České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská  
Katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření  
Břehová 7  
115 19 Praha 1

*Jméno a pracoviště konzultanta bakalářské práce:*

---

*Datum zadání bakalářské práce:* 14. 10. 2019

*Termín odevzdání bakalářské práce:* 7. 7. 2020

*Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.*

  
.....  
garant oboru

  
.....  
vedoucí katedry

  
.....  
děkan

*V Praze dne 14.10.2019*



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....

.....

Vít Jirutka

## **Poděkování**

Děkuji panu doktorovi Filipu Jedinému za vedení, neocenitelné rady a připomínky, které formovaly tuto bakalářskou práci. Dále bych rád poděkoval svým nejbližším, kteří pro mě vytvořili ideální prostředí pro práci.

*Název práce:* **Detekce temné hmoty na neutrinových experimentech**

*Autor:* Vít Jirutka

*Obor:* Dozimetrie a aplikace ionizujícího záření

*Druh práce:* Bakalářská práce

*Vedoucí práce:* Ing. Filip Jediný, Ph.D.

Katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, České vysoké učení technické v Praze

*Abstrakt:*

V předložené bakalářské práci je popsána stručná historie objevů, které vedly ke zformování hypotézy o temné hmotě. Snaha popsat ji vedla fyziky k vytvoření tzv. částicových modelů temné hmoty. Částice, které jsou jednotlivými modely předpovídány, se snaží detekovat experimenty po celém světě. Při těchto měřeních jsou uplatňovány různé přístupy a technologie. Jedním z přístupů je i pátrání v rámci neutrinových experimentů, které se k tomu dobře hodí. Experimentem, kde například probíhají tato měření, je NOvA (NuMI Off-axis  $\nu_e$  Appearance). Tento experiment je také popsán v jedné z kapitol této práce. S detekcí temné hmoty na neutrinových experimentech se v budoucnu stále počítá. Jedním z těchto projektů bude i experiment DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment), jemuž je zde také věnována jedna z kapitol. V poslední části této práce je demonstrována simulace interakcí částic temné hmoty s Blízkým detektorem experimentu NOvA a rozebrán rozdíl mezi interakcí těžkých neutrálních leptonů a lehké temné hmoty.

*Klíčová slova:* částicová fyzika, temná hmota, modely temné hmoty, detekce temné hmoty, neutrinové experimenty, lehká temná hmota, těžké neutrální leptony, PYTHIA

*Title:* **Detecting Dark Matter in neutrino experiments**

*Author:* Vít Jirutka

*Abstract:*

This submitted bachelor thesis describes a brief history of discoveries which lead to the formation of the dark matter hypothesis. The attempt to explain it led to the creation of so-called particle models of dark matter. Experiments around the world try to detect particles which are predicted by those models. Various approaches and technologies are applied in these measurements. One of the approaches is the search at neutrino experiments, which are well suited for this purpose. One of the experiments where these measurements take place is the NOvA experiment (NuMI Off-axis  $\nu_e$  Appearance). The detection of dark matter is still expected to be attempted at future neutrino experiments. One of these projects will be the DUNE experiment (Deep Underground Neutrino Experiment), also briefly described here. In the last chapter of the thesis, the simulation of the interactions of light dark matter particles in the NOvA Near Detector is demonstrated and also the difference between the interactions of heavy neutral leptons and lightweight dark matter is discussed.

*Key words:* particle physics, dark matter, dark matter models, neutrinos, neutrino experiments, LDM, HNL, PYTHIA

## Obsah

Úvod.....	10
<b>1 Historie temné hmoty .....</b>	<b>12</b>
1.1 Cesta k temné hmotě .....	12
1.2 Zrod temné hmoty .....	14
<b>2 Modely temné hmoty .....</b>	<b>18</b>
2.1 Neutrino.....	18
2.2 Těžké neutrální leptony .....	19
2.2.1 Experimenty hledající těžké neutrální leptony .....	20
2.2.2 Produkce HNL .....	21
2.2.3 Rozpad HNL v detektoru .....	22
2.3 Axiony.....	23
2.4 Teorie supersymetrie.....	23
2.5 Slabě interagující hmotné částice (WIMPs).....	24
<b>3 Experimenty pátrající po temné hmotě .....</b>	<b>26</b>
3.1 Experiment XENON1T.....	26
3.1.1 Technické řešení.....	26
3.1.2 Mechanismus detekce .....	27
3.1.3 Výsledky měření .....	27
3.2 Experiment LUX-ZEPLIN.....	27
3.2.1 Technické řešení.....	27
3.2.2 Výsledky měření .....	28
3.3 Experiment CRESST-III .....	28
3.3.1 Technické řešení.....	28
3.3.2 Výsledky měření .....	29
3.4 Experiment SuperCDMS SNOLAB .....	29
3.4.1 Technické řešení.....	29
3.4.2 Výsledky měření .....	30



3.5 Experiment MADMAX .....	30
3.5.1 Technické řešení.....	30
3.5.2 Výsledky měření .....	31
3.6 Experimenty IceCube a ANTARES.....	31
3.6.1 Technické řešení.....	31
3.6.2 Výsledky měření .....	32
3.7 Další experimenty zkoumající temnou hmotu .....	32
3.7.1 Experimenty s ostřelováním terčíku.....	32
3.7.2 Experimenty se srážkami elektronů a pozitronů.....	33
3.7.3 Experimenty na Velkém hadronovém urychlovači .....	33
3.7.4 Experimenty pátrající po WIMPs scintilačními detektory .....	34
3.8 Měření v dole Kolar .....	34
3.8.1 Technické řešení.....	35
3.8.2 Výsledky měření .....	35
<b>4 Neutrinové experimenty .....</b>	<b>36</b>
4.1 Experiment NOvA.....	36
4.1.1 Příprava neutrinového svazku (NuMI).....	36
4.1.2 Detektory experimentu NOvA .....	37
4.1.3 Cíle experimentu NOvA.....	39
4.1.4 Hledání temné hmoty .....	40
4.1.5 Pozadí interakcí exotických částic .....	41
4.2 Experiment DUNE.....	42
4.2.1 Urychlovací soustava a příprava svazku .....	42
4.2.2 Detektory experimentu DUNE.....	44
4.2.3 Cíle experimentu DUNE .....	46
4.2.4 Pátrání po temné hmotě.....	48
4.3 Experiment T2K.....	49
4.3.1 Technické řešení experimentu T2K .....	49
4.3.2 Cíle experimentu T2K a hledání temné hmoty.....	50

<b>5</b>	<b>Detekce exotických částic v Blízkém detektoru experimentu NOvA .....</b>	<b>52</b>
5.1	Simulační řetězec .....	52
5.2	Energetická spektra částic pokračujících ve směru primárního svazku .....	52
5.3	Energetická spektra částic pokračujících ve směru do Blízkého detektoru .....	54
5.4	Úhlové rozložení částic vznikajících při ostřelování terčíku .....	56
5.5	Simulace podoby výstupu z detektoru při detekci exotických částic .....	57
	Závěr .....	61
<b>6</b>	<b>Bibliografie .....</b>	<b>62</b>

## Úvod

Co stojí za neobvyklou podobou rotačních křivek galaxií? Je to tajemná substance, kterou nazýváme temná hmota. Je o ní zatím známé pouze málo, a tak je před vědci spousta otázek, na které je nutné odpovědět. Touha věnovat se něčemu neprobádanému a také to, že mě celý život fascinuje vesmír, mě vedlo k výběru tématu, které se temné hmoty více než dotýká.

Nejzákladnější informací, kterou je nutné o temné hmotě zjistit, je, jaké částice ji tvoří (za předpokladu platnosti částicové hypotézy jejího původu). Roky měření a teoretických úvah postupně vedly k zformování tzv. částicových modelů temné hmoty. To jsou hypotézy o tom, jak si vědci temnou hmotu vysvětlují a představují. Existuje jich několik a zatím není známo, která je ta správná. A právě z tohoto důvodu je detekce částic temné hmoty tak důležitá a věnují se jí vědci na experimentech po celém světě. Fyzikové se snaží temnou hmotu detekovat různými detektory přímo specializovanými na částice, které modely předpovídají. Jsou to experimenty pátrající po axionech, slabě interagujících hmotných částicích nebo sterilních neutrinech. Zajímavou alternativou ke specializovaným experimentům pátrajícím po temné hmotě, jako jsou například XENON1T nebo LUX-ZEPLIN, jsou neutrinové experimenty.

Experiment NOvA je jedním z míst, kde vědci využívají vhodné podmínky neutrinových experimentů pro zkoumání temné hmoty. Ač primárně slouží k jiným měřením, ukázalo se, že je hlavně díky vysokému počtu interakcí v terčíku vhodný pro tento účel. Navíc díky citlivým detektorům vědci mohou provádět i měření toku ze zdrojů v blízkém vesmíru. Pátrání po částicích temné hmoty bude navíc probíhat i na připravovaném experimentu DUNE, který doufejme přinese další nové poznatky. Vyhlídky má víc než dobré. Experiment bude po svém úplném dokončení disponovat největší kryogenní soustavou detektorů, která byla kdy zkonstruována. Jeho tři detektory různých typů ve stanici Blízkého detektoru, z nichž se dokonce dva mohou pohybovat podle potřeby měření, vědcům poskytnou možnost provádět měření, která zatím nikdo nemohl provést.

Jedním z nejdůležitějších pomocných nástrojů, který pomáhá částicovým fyzikům na experimentu NOvA i na ostatních experimentech, je simulace. Význam simulací je hlavně v možnosti sledovat, jak bude vypadat nějaká interakce uvnitř detektoru. Podle výsledků simulací potom vědci mohou upravovat konfiguraci detektoru, upravit dle nich identifikační algoritmy částic a tím zvýšit pravděpodobnost úspěšné detekce i zpracování proběhnuvších interakcí.

Částice, které interagují s okolním prostředím jenom velmi vzácně, je nutné podrobit velmi precizním simulacím. Důvod je nasnadě. Je nutné, aby detektor i všechny identifikační algoritmy byly co nejlépe připraveny na případnou interakci exotických částic. Těmi mohou být například těžké neutrální leptony nebo částice lehké temné hmoty. Tyto hypotetické částice, které nejsou součástí Standardního modelu částic a mohly by být částicemi, které tvoří temnou hmotu, zatím nebyly v rámci žádného experimentu detekovány.

Cíl této práce je v seznámení s problematikou temné hmoty a pochopení základních pojmů a modelů temné hmoty. Důležitou součástí je také porovnání technologií a výsledků experimentů pátrajících po temné hmotě. Dalším cílem je získat znalosti ohledně probíhajícího neutrinového experimentu NOvA a budoucího experimentu DUNE.

Cílem praktické části je vytvoření simulace detekce částic lehké temné hmoty v Blízkém detektoru experimentu NOvA pomocí náležitého softwaru a srovnání jejího grafického výstupu s detekcí rozpadu těžkých neutrálních leptonů.

# 1 Historie temné hmoty

Už od pradávných dob byli lidé fascinováni pohledem na noční oblohu plnou zářivých bodů dnes známých jako hvězdy. Tisíce let trvalo, než se lidé začali na hvězdy dívat s touhou po poznání a pochopení obrazu, jenž se jim noc co noc objevoval nad hlavami.

## 1.1 Cesta k temné hmotě

První dochované hlubší zamyšlení nad nebeskou klenbou najdeme ve starověkém Řecku. Zde skupina filozofů, kteří si říkali atomisté, vytvořila první model hvězdné klenby, který byl založený na dlouhodobém pozorování pohybu hvězd po obloze. Na atomisty navázal i Aristoteles, který na základě pozorování vyslovil myšlenku, že Země je nehybným středobodem a ostatní tělesa kolem ní obíhají v několika různých slupkách. Tak se zrodila teorie geocentrismu, která byla uznávána až do 17. století.

Během středověku v Evropě kvůli katolické církvi nebylo pro astronomii, potažmo vědu, místo, a tak další zásadní myšlenky musíme hledat v arabském světě. Perský astronom a matematik al-Birúní na základě svých výpočtů a pozorování již v 11. století vyslovil domněnku, že Země rotuje kolem své vlastní osy a zároveň obíhá kolem Slunce (1). Tímto tvrzením al-Birúní předběhl M. Koperníka a G. Galilea o více než 500 let. Galilei astronomii obohatil i jiným způsobem. Díky svému vylepšenému dalekohledu byl s to pozorovat vesmírná tělesa, která nikdo předtím neviděl. Při pozorování Jupitera přišel na to, že kolem něho obíhají čtyři satelity. Byly to největší a nejjasnější přírodní družice Io, Europa, Ganymedes a Callisto. Tímto objevem ostatním ukázal, že nad jejich hlavami existují tělesa, která nejsou vidět pouhým okem.

Nové přelomové poznatky v chápání fyziky ve vesmíru se objevily v 17. století a zasloužili se o ně hlavně J. Kepler a I. Newton. Kepler fyzikálně popsal podobu drah planet obíhajících kolem Slunce, změny rychlosti během oběhu i časové trvání oběhů planet v závislosti na jejich středních vzdálenostech od Slunce. Newtonova kniha *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, ve které zformuloval pohybové zákony a zákon gravitace, pomohla pochopit vzájemné ovlivňování a chování dvou těles nejen ve vesmíru. Na základě těchto poznatků a díky stále lepším dalekohledům mohl významný matematik F. Bessel roku 1844 formulovat jednu z nejzásadnějších vět pro studium temné hmoty:

*„But light is no real property of mass. The existence of numberless visible stars can prove nothing against the evidence of numberless invisible ones.“* (2)

K této zásadní myšlence ho přivedlo pozorování Prokyonu a Siria, protože obě hvězdy vykazovaly zvláštní hodnoty vlastního pohybu. Bessel také v témž článku konstatoval, že podivný pohyb obou hvězd by se dal vysvětlit tím, že se jedná o dvojhvězdy, jejichž druhé složky nevidíme. Dnes již víme, že měl pravdu.

V roce 1846 došlo k velkému astronomickému objevu, tentokrát dokonce v naší Sluneční soustavě. Francouzský astronom a matematik U. Le Verrier ve snaze vysvětlit již dlouho známé anomálie v poloze Uranu předpověděl existenci nové velké planety. Díky svým matematickým schopnostem dokázal vypočítat její polohu tak přesně, že německý astronom J. Galle dokázal planetu Neptun najít ještě ten den, kdy mu přišel dopis s přibližnými souřadnicemi (3).

Na konci 19. století astronomové začali přemýšlet, proč nejsou hvězdy na obloze rozloženy rovnoměrně. Postupem času se zrodila dvě možná vysvětlení. Některé části noční oblohy obsahují opravdu méně hvězd, nebo je zde stejné množství hvězd, avšak mezi hvězdami a Zemí se vyskytuje určitá látka, která znemožňuje jejich pozorování. K vysvětlení této otázky vědci přistupovali různě. Obzvláště inovativní byl sekretář Královské astronomické společnosti W. H. Wesley. Ten trval na tom, že tato otázka se dá vyřešit pouze provedením experimentu. Namáčel si štětec do inkoustu a cákal ho na papír. Mezi jednotlivými cákanci otáčel papír, aby bylo možné zanedbat směrovou preferenci (4).

Další krok k pochopení rozložení hvězd v naší galaxii a množství „neviditelné“ hmoty udělal sám lord Kelvin, který vyslovil tezi, že hvězdy v naší galaxii můžeme chápat jako částice v plynu. Podle Kelvina potom až devět desetin hvězd nemůžeme vidět například kvůli jejich velké vzdálenosti nebo malé zdánlivé jasnosti (5). Kelvinův novátorský přístup upoutal pozornost známého matematika H. Poincarého, který jako první použil spojení „temná hmota“ ve smyslu vesmírné hmoty, kterou nejsme schopni pozorovat (6). Na Kelvina navázal svou prací nizozemský astronom J. Oort. Při studiu Mléčné dráhy dokázal, že celá galaxie rotuje, a dokonce vypočetl její přibližnou hmotnost. Z analýzy průměrné vesmírné hustoty a chování hvězd odhadl, že chybějící hmotnost může dosahovat hmotnosti „viditelných“ objektů (7).

Na počátku 20. století se mezi astronomy rozpoutala velká debata o slabých, nejasných objektech, kterým se v té době říkalo mlhoviny. Část věřila, že mlhoviny jsou tvořeny shlukem hvězd v naší galaxii. Druhá část ovšem zastávala názor, že jsou to velmi vzdálená gigantická seskupení hvězd nacházející se vně naší galaxie. Tuto debatu ukončil až v roce 1924 Američan E. Hubble, který změřil vzdálenost objektu, kterému se říkalo mlhovina

Andromeda. Změřil, že leží přes dva milióny světelných let od Země. Tím potvrdil domněnky, že ona mlhovina není shlukem několika hvězd v Mléčné dráze, ale že se jedná o úplně jinou galaxii. Galaxie v Andromedě byla zevrubně zkoumána astronomy již roky před tímto objevem. Už v roce 1914 M. Wolf publikoval naměřená data, která dokazovala, že hvězdy obíhají kolem středu systému (8). Právě rozložení rychlostí obíhání hvězd kolem středu galaxií se stalo hlavním objektem zájmu dalších astronomů. Při detailním měření provedeném K. Lundmarkem se zjistilo, že rychlosti oběhů hvězd se od určitého poloměru téměř nemění. Tento jev byl později pozorován a změřen i u dalších galaxií bez ohledu na jejich předpokládané hmotnosti, které byly vypočítány na základě jejich svítivosti. To vedlo K. Lundmarka v roce 1930 k napsání článku (9), kde připouští možnost, že v hvězdných systémech se může vyskytovat velké množství temných objektů ve formě „studených hvězd, komet, temných mračen a tak dále,“ které svou gravitační silou zapříčiňují vysokou rychlost oběhů pozorovatelných objektů na periferii galaxie.

## 1.2 Zrod temné hmoty

Pokud předchozí objevy a pozorování bereme jako malé krůčky k poznání, co znamená pojem temná hmota, následující odstavce budou popisovat obrovský skok ve zkoumání tohoto fenoménu.

V roce 1933 švýcarský astrofyzik F. Zwicky podroboval analýze pozorování kupy galaxií v souhvězdí Vlasů Bereniky, které provedl E. Hubble. Pro analýzu inovativně použil viriálového teorému, který byl známý z užívání v termodynamice, a odhalil velké rozdíly mezi odhadovaným a výpočty předpokládaným chováním galaxií. Galaxie na okraji kupy obíhaly až čtyřístakrát rychleji, než by vzhledem k vypočítané hmotnosti kupy měly. Zwicky správně usoudil, že ony anomálie způsobuje chybný výpočet hmotnosti galaxií. Předpokládal, že pohyb každé galaxie více či méně ovlivňuje i nějaká další zatím neviditelná hmota, která drží kupu galaxií při sobě a dovoluje vysoké rychlosti rotací galaxií, které leží dále od středu systému (10). Vzhledem k velkým rozdílům mezi pozorováním a teoretickými výpočty Zwicky vyslovil větu:

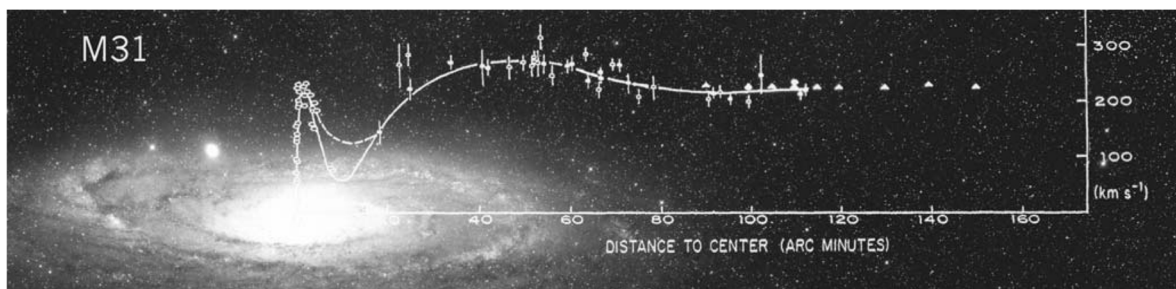
*„If this would be confirmed, we would get the surprising result that dark matter is present in much greater amount than luminous matter.“* (10)

Zwicky poprvé tedy použil pojem „temná hmota“ k pojmenování oné Oortovy chybějící hmoty nebo oněch temných objektů, o kterých psal K. Lundmark.

O jak přelomovou myšlenku šlo, svědčí i velké množství odmítavých reakcí světových vědců, jako byl například E. Holmberg, který měl rychle obíhající galaxie pouze za gravitačním potenciálem přechodně zachycená tělesa (11). Sám švýcarský astrofyzik přemýšlel o struktuře temné hmoty a v roce 1937 ve svém článku (12) nabídl svůj pohled. Domníval se, že ji tvoří studené hvězdy, fragmenty kosmických těles, makroskopické i mikroskopické pevné částice a plyny. Dnes již víme, že skutečnost je mnohem složitější. To však Zwickyho přínos nijak nesnižuje, jelikož otázku, z čeho se skládá temná hmota, si kladou vědci i téměř o sto let později.

Vzhledem k Druhé světové válce a následujícímu závodu v dobývání vesmíru mezi Sovětským svazem a Spojenými státy americkými byla pozornost vědecké společnosti i finanční podpora směřována jinam než na zkoumání vzdáleného vesmíru. Nicméně stále probíhala měření a pozorování galaxií okolo nás. Předmětem zájmu se staly hlavně takzvané rotační křivky. Tyto křivky popisují rychlost obíhání těles kolem center galaxií v závislosti na jejich vzdálenosti od středu. Nejvhodnější ke studiu dynamiky galaxií, a tedy i objektem zájmu se stala Galaxie v Andromedě, která díky své relativní blízkosti poskytovala nejlepší příležitost k měření a pozorování.

Průlom přineslo až pozorování V. Rubinové a K. Forda, kteří pomocí v té době nejcitlivějšího spektrometru zkoumali Galaxii v Andromedě. Kvalita naměřených dat byla velkým skokem kupředu. Naměřené spektrum ukázalo nečekané výsledky. Ukázalo se, že Galaxie nerotuje stejným způsobem jako Sluneční soustava, jak bylo očekáváno, ale že od určité vzdálenosti od centra rychlost obíhání téměř neklesá (13). Byly to stejné výsledky, jakých se dobral Zwicky u kupy galaxií ve Vlasech Bereniky o téměř čtyřicet let dříve. Data naměřená Rubinovou byla o dva roky později potvrzena M. Robertsem a R. Whitehurstem, kteří rotační křivky měřili pomocí radiových vln (14). Naměřená data jsou prezentována na Obrázek 1.



Obrázek 1: Data naměřená Rubinovou spektrometrem (kolečka) a radioteleskopem Robertsem a Whitehurstem (trojúhelníčky), v pozadí snímek Galaxie v Andromedě pořízen observatoří Palomar (15).



Interpretace výsledků měření Rubinové i Robertse vyžadovala vysvětlení oněch vysokých rychlostí obíhání okrajových částí. Již v roce 1974 se o to postaraly dva nezávislé týmy vědců. Týmy okolo J. Ostriker (16) i okolo J. Einasta (17) došly ke stejnému závěru. Z důvodu stability galaxií musí každá galaxie obsahovat velké množství temné hmoty. Výskyt této skryté hmoty lineárně roste s rostoucím poloměrem, a tedy její výskyt se v mnohém liší od výskytu pozorovatelných těles.

Vzhledem ke stále pádnějším argumentům pro existenci temné hmoty si astrofyzikové více a více uvědomovali nutnost nalezení druhu částic, které tvoří onu temnou hmotu. Jelikož podmínka stability galaxií byla již pevně zakořeněná v astrofyzice, bylo objevení hmoty, jež drží galaxie při sobě, velmi důležitým cílem. Tento fakt konstatovali S. Faber a J. Gallagher ve svém článku *Masses and mass-to-light ratios of galaxies* publikovaném v roce 1979 (18).

Od osmdesátých let se fyzikové hlavně zabývali hledáním různých možných částic, které mohou temnou hmotu tvořit. Vědecké týmy napříč světem zveřejňovaly a zveřejňují další a další modely temné hmoty. Ty nejpravděpodobnější jsou popsány v následující kapitole.

V roce 1998 se v astronomických dalekohledech poprvé objevila kupa galaxií, která poskytuje asi nejsilnější fyzikální důkaz pro přesvědčení, že teorie o temné hmotě se ubírá správným směrem. Alternativní teorie k teorii temné hmoty, teorie modifikované newtonovské dynamiky, MOND, totiž říká, že rychlejší rotace vnějších částí galaxií se dá vysvětlit nepřesnou formulací gravitačního zákona. *Bullet cluster*, česky kupa galaxií Střela, je kupou skládající se ze dvou srážejících se kup galaxií. Při srážce spolu obě kupy interagují nejen gravitačně, ale jejich plynná oblaka i elektromagneticky a to upoutalo pozornost i částicových fyziků.

Jak je známo, každá kupa galaxií se skládá ze samotných galaxií, oblaku plynu a podle všeho i temné hmoty. Mračno plynu jedné kupy, které samo má větší hmotnost než všechny galaxie v ní, je vychýleno nábojem druhého mračna. Toto bylo pozorováno prostřednictvím rentgenové observatoře Chandra. Tým vědců okolo D. Clowe se zaměřil na změření gradientu intenzity gravitačního pole v kupě a jeho porovnání s pozorovanou pozicí mračen a galaktické hmoty (19). V případě existence pouze gravitace mračna a galaxií, tedy v případě, že temná hmota neexistuje a správná je teorie MOND, by nejvyšší hodnota byla v blízkosti nebo přímo v plynném mračně. To ovšem pozorováno nebylo. Nejvyšší hodnota byla v oblasti, kde jsou galaxie, jejichž pozorovatelná hmota je mnohonásobně lehčí než hmotnost mračna. V této oblasti se ovšem vyskytuje i temná hmota, která je ještě těžší než plyn. V článku (19) tedy autoři konstatují, že bez existence temné hmoty by toto pozorování

nebylo možné vysvětlit. Tyto závěry potvrdily i další týmy vědců, které se opíraly o zpřesněná měření kupy galaxií Střela (20).

V současné době se nadále vědci zabývají hledáním druhu částic temné hmoty, ale také důsledky existence temné hmoty. Objevila se například teorie o tom, že velmi masivní černé díry mohly vzniknout právě z temné hmoty v oblastech extrémního nakupení (21). Částicoví fyzikové také pracují na zvýšení pravděpodobnosti detekce temné hmoty. Tím je myšleno zdokonalování detektorů a dále také návrh experimentů vedoucích k detekci temné hmoty (22).

## 2 Modely temné hmoty

Jak je naznačeno v předchozí kapitole, představy o temné hmotě se v průběhu let mnohokrát měnily. V současné době sice stále nevíme, jaké částice temnou hmotu přesně představují, ale na základě pozorování a naměřených dat se postupem času objevilo několik možných teorií, které jsou v současnosti podrobovány zevrubnému zkoumání. Je zde uvedeno několik hlavních modelů, které udávají směr hledání temné hmoty.

### 2.1 Neutrína

Při předpokladu, že částice temné hmoty jsou již zahrnuty ve Standardním modelu částic, se neutrína stala jedním z nejžhavějších kandidátů. Neutrína splňují dostatek požadavků získaných různými měřeními temné hmoty. Všechny tři druhy i jejich antičástice jsou stabilní, neinteragují elektromagneticky ani silnou interakcí. Díky těmto vlastnostem se neutrinům velmi brzy dostalo pozornosti.

Již v roce 1966 J. B. Zeldovič a S. S. Gerštejn při studiu role neutrin ve vesmíru dokázali vypočítat odhadovanou klidovou hmotnost mionového neutrina (23). Jejich odhad zpřesnil tehdejší předpoklady o tři řády. V témže článku navíc stanovili, kolik elektronových a mionových neutrin se vyskytovalo v počátečních horkých fázích vesmíru a kolik tzv. reliktních neutrin mohlo přežít do současné doby jako tepelný pozůstatek. O pár let později, roku 1976, uveřejnili A. Szalay a G. Marx článek, ve kterém nejenže snížili horní hranici předpokládané hmotnosti neutrina, ale také se zamysleli nad tím, že neutrína o hmotnosti asi 10 eV mohou být onou chybějící hmotou ve vesmíru (24). Teorie, že neutrína mohou tvořit temnou hmotu, ovšem otevřeně zazněla až v roce 1980. V tom roce tým okolo J. B. Zeldoviče a A. G. Doroškeviče publikoval článek, ve kterém připouští možnost, že oblaka vysokoenergetických neutrin a antineutrin s klidovou hmotností asi 30 eV by mohla tvořit galaktická hala (25).

V této době už vědci věřili, že temná hmota skutečně existuje, ale objevila se nová otázka. Existuje temná hmota ve formě horké, nebo studené temné hmoty? Horká temná hmota se vyznačuje ultrarelativistickými rychlostmi částic a vede k formování struktur postupným rozpadem velkých galaktických nadkup na jednotlivé shluky galaxií, popřípadě galaxie. Studená temná hmota, predikovaná P. J. Peeblesem roku 1982 (26), naopak tvoří struktury postupně z malých objektů galaktických velikostí až po galaktické nadkupy. Studenou temnou hmotu tvoří částice, které se pohybují nerelativistickými rychlostmi. I z těchto stručných

charakteristik vyplývá obrovský rozdíl mezi těmito formami. Tuto debatu ukončil až nový nástroj v rukou astrofyziků, numerické simulace. Ty ukázaly, že model temné hmoty může existovat pouze ve formě studené temné hmoty (27).

Z tohoto článku ovšem také vyplývá, že neutrina, elektronová a mionová, jsou příliš lehká a rychlá na to, aby mohla tvořit temnou hmotu. To ovšem znamená, že musí existovat nějaká nová, do standardního modelu nezanesená částice.

Tento zlom ovšem definitivně teorii o neutrinech jako o částicích temné hmoty nevyvrátil. V roce 1994 S. Dodelson a L. Widrow přišli s teorií o dalším typu těžkých neutrin, který byl vytvořen během raných fází vesmíru a na ostatní neutrina přechází jenom velmi omezeně (28). Tato sterilní neutrina mohla být produkována s různou klidovou hmotností sahající od jednotek keV výše a pak by je, při těchto hmotnostech, jejich kinetická energie řadila do modelu studené temné hmoty. Teorii o sterilních neutrinech v dalších letech rozvíjel například A. Kusenko. Tento fyzik v roce 2009 publikoval článek, v němž se zabývá možným přesahem sterilních neutrin do moderní astrofyziky. Existence sterilních neutrin by podle něho mohla vysvětlit původ rychlosti rotace pulsarů, tedy rychle rotujících neutronových hvězd (29). Dále v článku konstatuje, že tato neutrina by mělo být možné detekovat pomocí rentgenových teleskopů skrze fotony, které vznikají jejich rozpadem.

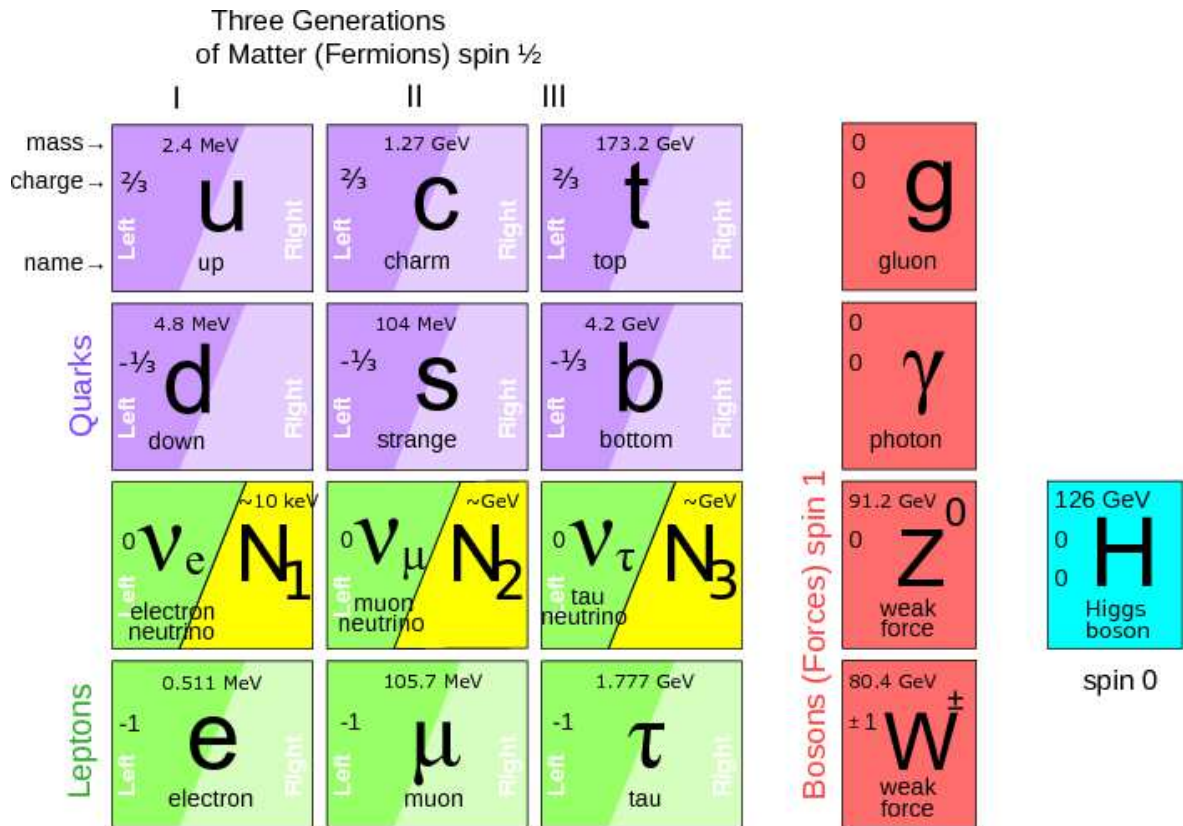
## 2.2 Těžké neutrální leptony

Mezi kandidáty na částice temné hmoty patří také těžké neutrální leptony, zkráceně HNL (z anglického Heavy Neutral Leptons). Tyto částice, které jsou podobné známým druhům neutrin a měly by mít dlouhou dobu života, která je jednou z předpokládaných vlastností částic temné hmoty, jsou navíc pro vědce atraktivní i z důvodu snadného zasazení do Standardního modelu částic (30), (31).

Motivací, proč hledat tyto exotické částice, může být i to, že v případě jejich nalezení budou mít fyzici důkazy o pravdivosti některých, dnes pouze teoretických modelů, jako je například Seesaw mechanismus, který se snaží vysvětlit rozdělení hmotností neutrin (32), (31).

HNL nejsou součástí Standardního modelu částic. Mělo by se jednat o velmi hmotné, elektricky neutrální částice, které by měly být chirálními protějšky neutrin ze Standardního modelu, což znamená, že by měly být pravotočivé – měly by mít záporné spinové kvantové číslo. Pokud by toto platilo, dalo by se říct, že rozdělení neutrálních leptonů má stejnou

podobu jako rozdělení leptonů nabitých (30). Obrázek 2 ukazuje hypotetickou podobu Standardního modelu částic, pokud by do něj byly zahrnuty i těžké neutrální leptony.



Obrázek 2: Standardní model částic po rozšíření o těžké neutrální leptony  $N_i$  (33).

Důležitým parametrem každé částice je její hmotnost. Je tomu tak i u HNL. Fyzici ovšem zatím odhadli pouze rozpětí, v němž by se jejich hmotnost mohla pohybovat. Z tohoto důvodu existuje několik hypotetických modelů vzniku těchto částic. HNL mohou vznikat například při rozpadu pionu, kaonu (34), mezonu W (32), nebo dokonce při rozpadu Higgsova bosonu (31).

### 2.2.1 Experimenty hledající těžké neutrální leptony

Z důvodu, že fyzikové neznají hmotnost HNL, je velmi obtížné přesně určit procesy, kterými by tyto částice mohly vznikat a prostřednictvím kterých by bylo možné je detekovat, proto musí být prováděny experimenty, které pracují s různými energiemi částic. Protože HNL jsou elektricky neutrální a předpokládá se malý účinný průřez detekce, je navíc hledání těchto částic velmi obtížné.

Hypotézu, která počítá s HNL o velmi vysokých hmotnostech v řádech přes 100 GeV, prověřovali a prověřují na Velkém hadronovém urychlovači v CERN. Na experimentu CMS

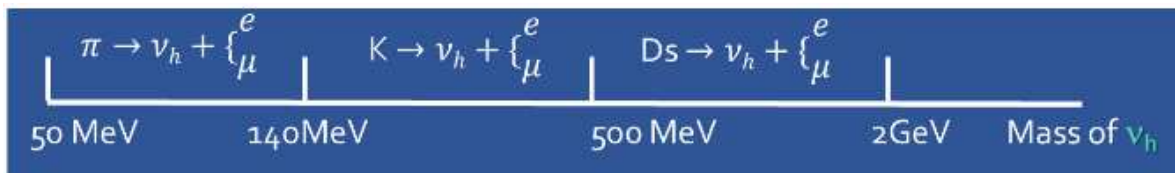
pátrají po leptonech, které by mohly vznikat při srážkách extrémně urychlených protonů. Toto hledání je zaměřeno na částice dokonce o hmotnosti až 1,2 TeV (35). V oblasti nižších energií pátrají po HNL i na experimentech LHCb (36) a ATLAS (37). Ve všech případech by se částice měly tvořit při rozpadu bosonu W spolu s ostatními neutriny.

Pro menší hmotnosti těžkých neutrálních leptonů, asi do 2 GeV, se uvažuje možnost, že by mohly vznikat rozpadem mezonů. Po těchto částicích pátrají na experimentu MicroBooNE, kde sledují zejména rozpad kaonu (38), nebo Super-Kamiokande, kde prověřují rozpad jak kaonu, tak i pionu (39). V oblasti těchto hmotností HNL se počítá s výzkumem i v rámci budoucího experimentu DUNE, kde se pro tento účel perfektně hodí detektor MPD s plynným argonem (40).

### 2.2.2 Produkce HNL

Jak již bylo popsáno výše, existuje více hypotéz o tom, při jakých interakcích má k produkci těžkých neutrálních leptonů docházet. V rámci této kapitoly budou více přiblíženy pouze ty možnosti produkce, které jsou důležité pro neutrinové experimenty s ostřelováním terčíku svazkem urychlených částic, jako jsou NOvA a DUNE (detailněji popsány v Kapitole 4).

Oba neutrinové experimenty mohou prověřovat hypotézy, které předpovídají vznik částic HNL při tvorbě neutrinového svazku. Při ostřelování terčíku urychlenými protony vzniká množství pionů, kaonů a těžších mezonů, které míří do rozpadové komory. Většina z nich se krátce poté rozpadá slabou interakcí a vytváří tak neutrinový svazek. Právě mezi těmito rozpady však existují takové, o kterých se fyzici domnívají, že mohou produkovat i HNL. Nejvíce zkoumané rozpady částic jsou ty, při kterých je velký rozdíl mezi energií mateřského mezonu a dceřiným nabitým leptonem, což bývá zpravidla elektron a méně pravděpodobněji i mion. Na Obrázek 3 jsou ukázány příklady rozpadů, které mohou hypoteticky stát za produkcí těžkých neutrálních leptonů (34).



Obrázek 3: Nejzkoumanější rozpady pionu, kaonu a Ds mezonu při pátrání po HNL (značka  $\nu_h$ ) na neutrinových experimentech NOvA a DUNE. Poslední člen v rovnicích představuje přítomnost elektronu nebo mionu (40).

Zmíněné rozpady nejsou jediným možným mechanismem vzniku těchto částic. Z dalších rozpadů přichází v úvahu například rozpad tauonu nebo složitější tříčásticové rozpady (30), (34).

### 2.2.3 Rozpad HNL v detektoru

I přes uvažování, že při ostřelování terčíku v rámci experimentů NOvA a DUNE nevzniká žádná částice s energií vyšší, než má Ds mezon, zůstává nadále velké množství kanálů, kterými se částice HNL může rozpadnout. A právě na dceřiné produkty těchto rozpadů jsou fyzici odkázáni, pokud chtějí odhalit přítomnost těžkých neutrálních leptonů v detektoru.

Samotný fakt, že by se HNL rozpadl v detektoru, však ještě neznamená, že to je detektor s to zaregistrovat. Jedním z kanálů rozpadu těžkých neutrálních leptonů může například být rozpad na tři neutrina, která téměř jistě všechna v detektoru neinteragují, a tak vědcům zůstane informace o rozpadu HNL utajena.

Channel	Threshold	Channel	Threshold	Channel	Threshold
$\nu\nu\nu$	$10^{-9}$ MeV	$e^\mp K^\pm$	494 MeV	$\nu\eta'$	958 MeV
$\nu e^+ e^-$	1.02 MeV	$\nu\eta$	548 MeV	$\mu^\mp K^{*\pm}$	997 MeV
$\nu e^\pm \mu^\mp$	105 MeV	$\mu^\mp K^\pm$	559 MeV	$\nu\phi$	1019 MeV
$\nu\pi^0$	135 MeV	$\nu\rho^0$	776 MeV	$\nu e^\pm \tau^\mp$	1776 MeV
$e^\mp \pi^\pm$	140 MeV	$e^\mp \rho^\pm$	776 MeV	$e^\mp D^\pm$	1870 MeV
$\nu\mu^+ \mu^-$	210 MeV	$\nu\omega$	783 MeV	$\nu\mu^\pm \tau^\mp$	1880 MeV
$\mu^\mp \pi^\pm$	245 MeV	$\mu^\mp \rho^\pm$	882 MeV	$\tau^\mp \pi^\pm$	1870 MeV
		$e^\mp K^{*\pm}$	892 MeV		

Tabulka 1: Tabulka možných kanálů rozpadu HNL. Levý sloupec vždy obsahuje dceřiné produkty rozpadu a pravý sloupec prahovou energii, kterou musí částice mít, aby rozpad mohl proběhnout (36).

Dceřiné produkty rozpadu těchto leptonů, které dokáže detektor zachytit, jsou opět již zmíněné nabitě leptony (elektrony, miony atd.) a mezony (piony, kaony atd.). Možné kanály rozpadu HNL jsou obsahem Tabulka 1. Případnou identifikaci těchto kanálů rozpadu HNL navíc ještě ztěžuje fakt, že dceřiné produkty rozpadu mohou být identické jako dceřiné produkty interakcí, které v detektoru probíhají standardně při interakcích neutrin (34), (30).

## 2.3 Axiony

V roce 1977 při zavádění nového mechanismu pro popis silné interakce v kvantové chromodynamice vědci R. Peccei a H. Quinnová postulovali existenci nové lehké částice (43). Touto částicí je axion. Zatímco o jeho nulovém spinu a náboji nebyly žádné pochybnosti, na jeho hmotnosti vědci dlouhou dobu nemohli najít shodu. Část fyziků existenci axionu úplně zamítla, protože z rovnic kvantové chromodynamiky usuzovala, že axion musí mít energii v řádech keV nebo dokonce MeV. M. Šifman ovšem ukázal, že hmotnost axionu může dosahovat i daleko menších hodnot. Odhad hmotnosti těchto částic se postupem času stále více zpřesňoval, například i díky pozorování supernovy SN 1987A. V současnosti již víme, že hmotnost axionu by se měla pohybovat v rozmezí mezi jednotkami meV a  $\mu\text{eV}$  (44).

Axion by byl zástupce Nambuových-Goldstoneových bosonů patřících k Pecceiho-Quinnové symetrii (PQ symetrie), která řeší v rámci kvantové chromodynamiky narušení symetrie mezi nábojem a paritou (CP problém) silné interakce (45). Tento boson by díky dostatečnému zastoupení ve vesmíru a interagování na delší vzdálenost pouze přes gravitační sílu splňoval podmínky pro částici temné hmoty. Přestože axiony by měly být velmi lehké částice, produkovány by byly jako nerelativistické. Produkce těchto částic by byla možná skrze rozpad strun, oscilace axionálního pole (vacuum realignment) a rozpad doménových stěn (46).

V současné době je detekci axionů věnováno velké úsilí. V nedávné minulosti bylo prezentováno několik domnělých pozorování existence axionů, ale prozatím všechny byly vyvráceny (47), (48). Sledovat axiony, které by měly vyletovat ze Slunce, se snaží detektor CAST v CERN. Vědci se mimo prostou detekci axionů přicházejících z kosmu snaží připravit experimenty, které by měly vést k produkci a následné detekci axionů. Mezi ně patří například experiment týmu K. Beyera, kde za pomoci dvou vysokoenergetických laserových paprsků zkoušeli srážet dva fotony s očekávaným vznikem axionů. Závěr experimentu zní, že za současných podmínek prozatím nelze dosáhnout energií paprsků, při kterých by se axiony měly tvořit (49).

## 2.4 Teorie supersymetrie

Na začátku sedmdesátých let se na vědecké scéně začala objevovat nová teorie o částicích ve vesmíru. Tato teorie hovoří o tom, že každý fermion, hmotná částice, má svého symetrického partnera mezi bosony, interakčními částicemi. To tedy v důsledku znamená existenci



velkého množství nových bosonů i fermionů. Názvy supersymetrických bosonů se skládají z jména svého partnera ze Standardního modelu částic a předpony s-. Jsou to skvarky, sneutrina, smiony apod. Názvy předpovídaných fermionů se tvoří spojením jména jejich partnera ze Standardního modelu a přípony -ino. Je tedy předpovězena existence gluina, gravitina apod (50).

Předpokládá se, že tyto částice vznikly během raných fází vesmíru a měly by se rozpadat postupem času na částice se stále menší klidovou hmotností. Nejlehčí ze supersymetrických částic by se měly s malou pravděpodobností rozpadat na částice ze Standardního modelu. To by ovšem znamenalo, že se někde ve vesmíru vyskytují v nezanedbatelném množství (51). Problémem ovšem je, že zatím se nepodařilo zjistit, která z předpovídaných částic je ta úplně nejlehčí. Kvůli této nejistotě byl zaveden pojem neutralino, který tuto částici označuje bez ohledu na to, jestli se ve skutečnosti jedná o bino, wino nebo higgsino (52). Neutralino by díky svému hojnému výskytu ve vesmíru mohlo být dalším kandidátem na částici temné hmoty za předpokladu, že interaguje pouze skrze gravitační sílu. Neutralina ovšem nejsou jediným kandidátem vzešlým z teorie supersymetrie. Roku 1982 H. Pagels a J. Primack přišli ve svém článku (53) s tvrzením, že gravitino, superpartner hypotetické částice gravitonu, by mohlo být tou částicí, která stojí za chybějící hmotou ve vesmíru. Gravitino podle předpovědi interaguje pouze gravitačně a je stabilní. Existence gravitina by ovšem podle dalších fyziků měla dalekosáhlé následky pro existenci a zastoupení ostatních lehkých částic ze Standardního modelu. V roce 1984 se objevil článek, který prezentoval závěry týmu J. Ellise (54). Ellis a jeho kolegové zahrnuli existenci gravitina do výpočtu rychlosti expanze vesmíru a zjistili, že v takovém případě by měl vesmír expandovat rychleji. To by ovšem zapříčinilo menší zastoupení  ${}^4_2\text{He}$  ve vesmíru, než je ve skutečnosti pozorováno. Po několika dalších desítkách let probíhal napříč vědeckou komunitou spor o existenci nejen gravitina, ale celkově o platnost teorie supersymetrie. Při detailní analýze modelů vesmíru, nabírání dat a následném revidování výpočtů tým W. Büchmüllera dospěl k závěru, že za určitých podmínek a příhodné volbě parametrů je existence gravitina možná (55).

## 2.5 Slabě interagující hmotné částice (WIMPs)

Po zformulování hlavních modelů temné hmoty, které jsou popsány v předchozích odstavcích, se skupina vědců začala ptát po tom, zda skutečně existuje přesvědčivý důkaz o tom, že hmotnost částice temné hmoty se jednoznačně musí pohybovat v řádech menších než desítky GeV. Tento dotaz vyplynul z teoretického předpokladu existence slabě interagují-

cích hmotných částic, anglicky WIMPs, které postulovali G. Steigman a M. S. Turner ve svém článku (56). WIMPs by měly dosahovat hmotností v rozmezí od 10 GeV až po 100 TeV. Původ těchto částic by měl vycházet z tepelné produkce během raných fází vesmíru, ovšem dosud nebyla zaznamenána žádná takováto částice, a tak je těžké cokoli říci o jejich produkci (57).

Slabě interagující hmotné částice nejsou přesně definovány. Jejich společným znakem je, že s ostatní hmotou interagují pouze skrze gravitační a slabou sílu nebo možná prostřednictvím gravitace a síly, která má ještě menší intenzitu než slabá interakce (58). Za předpokladu existence WIMPs lze z teoretických výpočtů odvodit, že každým centimetrem čtverečným Země proletí až  $10^5$  takových částic každou sekundu, což nám poskytuje možnost snažit se WIMPs detekovat v laboratořích po celém světě. Kvůli nízkému účinnému průřezu interakce s hmotou v detektoru je detekce obtížná (59). V posledních letech se mnoho týmů vědců po celém světě pokouší detekovat slabě interagující hmotné částice, a to dvěma způsoby.

První ze způsobů detekce WIMPs je pátrání po částicích, které by měly přicházet z okolního vesmíru. Týmy se zaměřují například na trpasličí galaxie okolo Mléčné dráhy (60) nebo na samotný střed naší galaxie (61), kde by se WIMPs měly akumulovat. Druhým způsobem je detekce částic vzniklých při srážkách vysokoenergetických částic. Touto cestou se slabě interagující hmotné částice snaží nalézt například v CERN na urychlovači LHC (62) nebo v Gran Sasso při experimentu XENON10 (63). Navzdory všem snahám mnoha týmů na mnoha experimentech se zatím WIMPs nepodařilo detekovat, a tak část komunity částicových fyziků už teorii o slabě interagujících hmotných částic opouští jako neperspektivní (64).

### 3 Experimenty pátrající po temné hmotě

Jak už bylo nastíněno v předchozí kapitole, v současné době probíhá na Zemi i ve vesmíru několik experimentů, které mají za cíl zachytit částice temné hmoty, zaznamenat je a odhalit jejich vlastnosti. K tomuto účelu slouží dva odlišné principy. Prvním přístupem je detekce částic přicházejících z okolního vesmíru, ke které jsou potřeba zpravidla detektory daleko větších rozměrů. Druhým způsobem je produkce vlastních částic v nějakém vysokoenergetickém zdroji zde na Zemi, který výzkumníkům umožňuje zaměřit na určitý relativně malý rozměr s předem definovanými a známými podmínkami. Oba přístupy jsou různě vhodné pro různé modely temné hmoty, tudíž se v praxi můžeme setkat s oběma z nich.

#### 3.1 Experiment XENON1T

Experiment XENON1T je založen na detekci částic dopadajících na Zemi z okolního vesmíru. Jde o experiment pátrající po existenci WIMPs prostřednictvím jejich předpokládané interakce s jádry atomů citlivého objemu detektoru. Detektor je umístěn v Národních laboratořích Gran Sasso v Itálii. XENON1T je větším pokračováním menších experimentů XENON10 a XENON100, které se lišily menším objemem a tím i menším citlivým objemem. Nástupcem tohoto projektu je experiment XENONnT, který má k dispozici větší detektor a je možné s ním měřit i s vyšší přesností. Ač tento experiment je již v provozu a nabírá data, nebyly zatím uveřejněny žádné výsledky (65). Z tohoto důvodu zde bude popsán experiment XENON1T, jehož technologie je téměř totožná, a navíc výsledky z jeho měření byly již publikovány.

##### 3.1.1 Technické řešení

Detektor je naplněn 3,2 t tekutého xenonu, který by měl sloužit jako terčový objem pro WIMPs. O samotnou detekci interakcí v citlivém objemu se stará dvoufázová válcová xenonem plněná časová projekční komora. Stěny komory jsou pokryty speciálně upravenými vysoce odrazivými teflonovými panely, které slouží k případnému odražení ultrafialových záblesků, které by měly vznikat v komoře. Celá komora musí být kvůli zachování vlastností xenonu v kryostatu, který zařízení ochlazuje na pracovní teplotu  $-96\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Chlazená nádoba je celá ponořena do deionizované vody. Ta slouží jako médium pro vnější Čerenkovův detektor registrující průchod mionů detektorem a zároveň jako stínění před neutrony a fotonovým zářením pocházejícím z přírodního pozadí (66).

### 3.1.2 Mechanismus detekce

Jak je již naznačeno v názvu, dvoufázová projekční komora obsahuje xenon ve dvou skupenstvích. Zastoupení kapalné i plynné fáze se velmi hodí pro přesnější detekci WIMPs. Částice interagující v detektoru mají možnost interagovat s různými částicemi. Pokud jde o WIMPs nebo neutrony, ty se rozptylují na jádrech xenonu, fotony a elektrony interagují pouze s elektrony v obalu. Na základě energie vzniklých scintilačních fotonů, které jsou zachyceny fotonásobiči umístěnými na podstavách komory, lze rozlišit, jaká částice interagovala. Pokud tedy částice interaguje v kapalném xenonu, vyvolá excitaci a ionizaci. Deexcitací vzniknou scintilační fotony, které jsou v ultrafialové oblasti a jsou sebrány na fotonásobičích. Celá komora je obklopena elektrickým polem, které vede elektrony z ionizace vzhůru a urychluje je. Urychlené elektrony mají v plynné fázi takovou energii, aby vyvolaly další scintilační záblesk, jehož síla je závislá na počtu elektronů. Oba záblesky vědcům poskytnou dostatek informací k zjištění pozice prvotní interakce (67), (66).

### 3.1.3 Výsledky měření

I přes to, že experiment XENON1T byl v době měření největším a nejcitlivějším detektorem WIMPs, nepodařilo se mu tyto částice detekovat. Výsledkem experimentu bylo pouze snížení předpokládaného účinného průřezu spinově nezávislých WIMPs s hmotností větší než 10 GeV na hodnotu menší než  $4,1 \cdot 10^{-51} \text{ m}^2$  (68).

## 3.2 Experiment LUX-ZEPLIN

Dalším xenonovým experimentem, který se snaží detekovat WIMPs, je americký projekt LUX-ZEPLIN. Je umístěn v Sanfordském podzemním výzkumném zařízení, kde v budoucnu bude stát Vzdálený detektor experimentu DUNE.

### 3.2.1 Technické řešení

Experiment využívá podobnou detekční technologii jako experiment XENON1T. To umožňuje ověřování výsledků měření díky spolupráci mezi týmy odborníků. Detektorem je časová projekční komora plněná plynným a kapalným xenonem. Komora obsahuje přes 7 t tohoto vzácného plynu, což je asi o 1 t méně než u XENONnT. Menší množství citlivého objemu je kompenzováno větší citlivostí detektoru. Pro vyhodnocení signálu je třeba registrovat v koincidenci tři scintilační fotony, které by měly vzniknout interakcí WIMPs v detektoru. Ten je potom schopen zachytit WIMPs s hmotností větší než 5 GeV a například po

navrhované úpravě přechodu na koincidenci dvou fotonů až 2,5 GeV. Podle článku (69) navíc tato úprava bude mít za následek pouze malé zvýšení pozadí v důsledku existence temných pulzů.

Ve středu detektoru se nachází xenonem plněná časová projekční komora fungující stejně jako ta, která byla popsána v kapitole o experimentu XENON1T. Jediný větší rozdíl v konstrukci detektoru oproti experimentu XENON1T je ten, že okolo časové projekční komory se nenachází Čerenkovův detektor, ale gadoliniem dopovaný tekutý scintilátor detekující přicházející neutrony a paprsky gamma. Scintilační fotony ze scintilátoru mají za úkol detekovat fotonásobiče upevněné na stěnách nádoby, která odděluje detektor od vodní lázně, jež ho obklopuje (70).

### 3.2.2 Výsledky měření

Projekt zatím nedosáhl svého hlavního cíle detekovat WIMPs a ani zvýšená citlivost na WIMPs malých hmotností zatím nepřinesla úspěch. Detektor zatím posloužil jako důležitý testovací subjekt v oblasti zvyšování citlivosti detektorů s kapalným xenonem a poznatky získané v rámci tohoto projektu poslouží při konstrukci dalších detektorů (69).

## 3.3 Experiment CRESST-III

V Národní laboratoři Gran Sasso se ovšem nachází další experiment zaměřený na přímou detekci částic, jež by mohly tvořit temnou hmotu. Tímto experimentem je CRESST-III, což je zkratka anglického názvu Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers. Tento projekt se soustředí na detekci WIMPs s hmotností přibližně 10 GeV a menší s pomocí kryogenního scintilačního kalorimetru. CRESST-III svou činností navazuje na měření předešlých dvou projektů stejného jména, kterým se nepodařilo zachytit žádnou částici temné hmoty (71).

### 3.3.1 Technické řešení

K detekci využívá deset malých, asi 24 g vážících scintilačních krystalů  $\text{CaWO}_4$ , které působí jako terčový objem možných interakcí (72). Kvůli snížení kosmického pozadí, které tvoří zejména miony, je detektor umístěn v podzemní laboratoři a je obklopen masivním stíněním, které se skládá z polyethylenu, olova a mědi. Záblesky v krystalu má za úkol registrovat polovodičový detektor, který je chlazen na teplotu asi 5 mK a tvoří ho vrstvička křemíku napařená na safírové podložce. Krystal a detektor jsou obklopeny vysoce odrazivou

fólií, která zvyšuje šanci pro detekci vzniklého záblesku a zamezuje znehodnocování měření částicemi  $\alpha$  vzniklými při aktivaci olova (73).

### 3.3.2 Výsledky měření

Vylepšení detektorů oproti předchozím generacím experimentu přinesly zvýšení citlivosti detektoru k hypotetickým lehkým částicím temné hmoty. Oproti původním předpokladům se ovšem zvýšil podíl interakcí částic z pozadí v detektoru, což výzkumníky vedlo k nutnosti více se soustředit na zkoumání původu těchto interakcí. Zvýšení podílu pozadí na výstupních datech snížilo citlivost detektoru k interakcím zkoumaných částic temné hmoty (72).

## 3.4 Experiment SuperCDMS SNOLAB

Díky pokroku, který byl dosažen v uplynulé dekádě v oblasti kryogenních detektorů, je v současné době možné již detekovat částice s hmotností menší než 1 GeV. Experiment, jehož detektory budou částice s touto hmotností detekovat, začne nabírat data již v roce 2021. Jméno experimentu zní SuperCDMS SNOLAB, což je zkratka anglického názvu Super Cryogenic Dark Matter Search at Sudbury Neutrino Observatory Laboratory. Podle názvu je zřejmé, že experiment probíhá v Sudbury v Kanadě. Detektor se nachází v šachtě niklového dolu, asi 2000 m pod povrchem (74).

### 3.4.1 Technické řešení

O samotnou detekci se budou starat křemíkové a germaniové detektory. V rámci experimentu fungují dva typy detektorů. Jde o High voltage (HV) detektory, které jsou vynikající pro detekci částic s hmotností menší než 5 GeV, a interleaved Z-sensitive Ionization and Phonon (iZIP) detektory, které jsou určeny k detekci částic s hmotností blízkou 5 GeV (75). Oba typy detektorů jsou kvůli krystalům germania nebo křemíku provozovány při teplotách několika desítek mK. Jsou vyrobeny s důrazem na používání stejných konstrukčních materiálů, postupů a oba mají stejný rozměr, aby se navzájem lišily pouze v nutném minimu částí. Tento přístup zaručuje vzájemnou minimalizaci pravděpodobnosti vzniku chyb při vyhodnocení (76).

HV detektory snímají s vysokou přesností energii fononů vzniklých v detektoru a dokážou zachytit i nízké energie zanechané v detektoru. Oproti nim iZIP detektory snímají nejen fonony, ale i ionizaci. Tento typ detektoru navíc dokáže rozeznat, jestli se u interakce jedná

o rozptyl na elektronu nebo na jádře. Tyto typy detektorů se navzájem doplňují a je díky nim možné detekovat interagující částice s větším rozsahem hmotností (75).

### 3.4.2 Výsledky měření

Jak již bylo naznačeno výše, experiment se rozběhne až v tomto roce, a tak ještě nebyla zveřejněna žádná naměřená data. Nicméně vzhledem k použitým detekčním technologiím a schopnosti registrovat i výrazně lehčí částice, než tomu bylo doposud, má experiment veliký potenciál pro detekci částic temné hmoty. Krom tohoto cíle si vědci stanovili další a neméně obtížný úkol. Postupným vyladěním detektorů, stínění i metod vyhodnocení a technologickými vylepšeními by v budoucnu chtěli dosáhnout hranice citlivosti známé jako Solar neutrino floor. To znamená, že chtějí dosáhnout takové citlivosti, aby o WIMPs s jistotou mohli říci, že buď tyto hypotetické částice neexistují, nebo je alespoň nelze odlišit od neutrin v pozadí (77), (75).

## 3.5 Experiment MADMAX

Všechny dosud představené experimenty cílily svoji pozornost na částice s hmotností přes stovky MeV. MADMAX, což je akronym anglického názvu MAgnetized Disk and Mirror Axion eXperiment, je plánovaný experiment, který se bude snažit detekovat axiony v rozsahu od 40 do 400  $\mu\text{eV}$  (78). Tento rozsah hmotností je pro vědce v současnosti téměř nedetekovatelný, a tak tento experiment bude významným krokem vpřed i z pohledu nových technologií.

### 3.5.1 Technické řešení

Celý experiment vychází z hypotézy, že na rozhraních silných magnetických polí se axiony mohou přeměňovat na fotony. Zařízení, které se využívá k navození ideálních podmínek, se jmenuje dielektrický haloskop, anglicky dielectric haloscope. Je tvořen 80 dielektrickými disky vyrobenými z  $\text{LaAlO}_3$  umístěnými ve vnějším magnetickém poli o indukci 10 T, které vede paralelně s disky. Dielektrické disky narušují magnetické pole, a tak v dielektrickém haloskopu vznikají místa s velkým gradientem magnetické indukce. Detekce částic o různých hmotnostech je umožněna nastavitelnou vzdáleností, kterou mezi sebou mohou dielektrické disky mít. Rozměry haloskopu se tedy dle potřeby budou měnit z 20 cm až na 200 cm (78). Měnicí se rozměry ovšem kladou zvýšené nároky i na rozměry vnějšího magnetického

pole, respektive na rozměry magnetických cívek a jejich chlazení. Cívky budou kryostaticky chlazeny na teplotu 1,8 K, což bude docíleno pomocí supratekutého helia (79).

Pokud se na rozhraní magnetického pole bude emitovat foton, vyletí z haloskopu, odrazí se od parabolického fokusačního zrcadla směrem na detekční anténu, která je schopná zachytit elektromagnetické záření v mikrovlnné oblasti (80).

### 3.5.2 Výsledky měření

Experiment MADMAX je sice ještě ve stádiu projektování, ale už teď běží testování technologií k jeho konstrukci na zmenšeném prototypu. Ten vědcům pomůže nalézt odpovědi na otázky kolem konstrukce detektorů i použití nových technologií. Asi nejdůležitějším aspektem, který se v současné době na prototypu testuje, je správné fungování všech komponentů v silném magnetickém poli a při teplotách blízkých absolutní nule. Dalšími předměty zkoumání jsou reálné parametry dielektrických disků, jako jsou šířka, dokonalá plochost, jejich přesné rozmístění. V neposlední řadě je třeba také navrhnout optimální detekční systém antény, který bude s co nejvyšší pravděpodobností schopný zachytit signál (81).

Hlavním úkolem experimentu bude detekovat axiony s hmotností okolo 100  $\mu\text{eV}$ . Klíčový pro tento projekt je pokrok v technologii supravodivých cívek, které budou v experimentu vytvářet silné magnetické pole. Očekává se, že magnet splňující potřebné specifikace bude moci být zkonstruován v roce 2025 (79).

## 3.6 Experimenty IceCube a ANTARES

Experimenty IceCube a ANTARES (z anglického Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental Research project) se od předešlých velmi výrazně liší. To, čím se odlišují, je nejen jejich obrovský detekční objem, ale i způsob, kterým se snaží nelézt temnou hmotu. Oba experimenty staví na ideji, že při anihilaci temné hmoty ve vesmíru vznikají neutrina s vysokou energií. K této přeměně má nejvíce docházet uprostřed velkých objektů, jako jsou hvězdy a galaxie (82).

### 3.6.1 Technické řešení

Oba detektory jsou vystavěny tak, aby zachytily fotony Čerenkovova záření, které vzniká při letu nabitých částic pocházejících z neutrinových interakcí. Zajímavé ovšem na obou detektorech je to, kde po fotonech pátrají.



Detektor IceCube se nachází v ledu na Jižním pólu. Využívá zde mocnou ledovou pokrývku, která slouží jako prostředí, kde dochází k uvolňování Čerenkovova záření, jenž je posléze zachyceno sítí fotonásobičů. Fotonásobiče jsou zavěšeny na vláknech, která byla spuštěna do vyhloubených vrtů a ty opět zality vodou. Měření probíhá v hloubce od 1450 m až do hloubky 2450 m pod povrchem. Celkový objem detektoru tak je  $1 \text{ km}^3$  (83).

Detektor ANTARES je umístěn asi 40 km od Toulonu na dně Středomořského moře v hloubce 2475 m. Celý detektor je tvořen 885 fotonásobiči, které jsou také zavěšeny na vláknech tak, jako je tomu v případě IceCube. ANTARES je menší detektor o asi třetinovém objemu v porovnání s druhým experimentem (84).

### **3.6.2 Výsledky měření**

Porovnáním naměřených dat z několika let měření obou detektorů s pravděpodobností současné detekce, vědci nezachytili žádná neutrino, která by do detektoru vstoupila ve směru od středu Mléčné dráhy a která by zároveň splňovala energetická kritéria neutrin vytvořených anihilací temné hmoty. Porovnáním dvou knihoven dat navíc bylo docíleno lepší citlivosti, než kterou mají detektory při samostatné práci (82).

## **3.7 Další experimenty zkoumající temnou hmotu**

Při pátrání po částicích tvořící temnou hmotu se využívá mnoho různých přístupů a technologií. Výše podrobněji popsané projekty jsou pouze malou částí všech experimentů, které hledají temnou hmotu. V této kapitole budou alespoň stručně zmíněny další důležité experimenty patřící do tohoto oboru.

### **3.7.1 Experimenty s ostřelováním terčíku**

Experimenty s ostřelováním terčíku, z angličtiny beam-dump experimenty, se zabývají hledáním nových částic, které vznikají při ostřelování terčíku svazkem částic. Při srážce mohou být produkovány nové kvazistabilní lehké částice (22). Shrnutí významných experimentů a základní informace o nich jsou obsaženy v Tabulka 2.

Název experimentu	Umístění	Oblast zkoumání	Výsledky
CHARM	CERN (Švýc./Fr.)	Elektronová neutrína, slabá interakce	Objevy bosonů W a Z
PANDA (antiProton Annihilation at Darmstadt)	Laboratoře GSI (Něm.)	Hadronová spektroskopie, struktura v jádrech atomů	Ve výstavbě

Tabulka 2: Základní informace o experimentech, které zkoumají částice, které vznikají ostřelováním terčů (85), (86).

### 3.7.2 Experimenty se srážkami elektronů a pozitronů

Následující experimenty využívají srážky urychlených elektronů a pozitronů, jejichž energie se rovnají energetickým hladinám různých hadronových resonancí. Vysoká luminosita svazků a velké objemy získaných dat poskytují těmto experimentům možnost pátrat po lehkých částicích z temného sektoru s vysokou citlivostí (22). Základní informace o těchto projektech jsou shrnuty v následující Tabulka 3.

Název experimentu	Umístění	Oblasti zkoumání	Výsledky
BaBar (B and B-Bar Experiment)	SLAC National Accelerator Laboratory (US)	Higgsovo záření Temný skalární boson S	Nalezení důkazu o mí- sení $D^0$ mezonů a jejich antičástic
KLOE ( $K_L^0$ -Long Experiment)	Národní labora- toře ve Frascati (It.)	Rozpad temného Higgsova bosonu	Bez úspěšné detekce temného fotonu U

Tabulka 3: Základní informace o experimentech využívající srážek elektronů a pozitronů (22), (87), (88), (89).

### 3.7.3 Experimenty na Velkém hadronovém urychlovači

Experimenty na Velkém hadronovém urychlovači v laboratořích CERN jsou jedinečné díky energiím částic, se kterými se zde pracuje. Díky možnosti vytvářet exotické částice, jako je například Higgsov boson, jsou tyto experimenty nedocenitelné. Předpokládá se, že právě rozpad Higgsova bosonu by mohl vést k produkci částic temného sektoru (22). Přehled experimentů je zanesen v Tabulka 4.

Název experimentu	Oblast zkoumání	Výsledky
CMS (Compact Muon Solenoid)	Higgsův boson, vlastnosti jeho rozpadu a vzniknuvší částice včetně temné hmoty	Objev Higgsova bosonu
ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus)	Rozpad Higgsova bosonu, vzniknuvší částice a leptonové jety	Objev Higgsova bosonu
LHCb (Large Hadron Collider beauty)	Nové kvazistabilní částice, leptonová rezonance a sterilní neutrina	Objev pentakvarku

Tabulka 4: Základní informace o experimentech na Velkém hadronovém urychlovači (22), (90), (91), (92), (93).

### 3.7.4 Experimenty pátrající po WIMPs scintilačními detektory

Experimenty přiblížené v této kapitole se zabývají detekcí WIMPs pomocí scintilačního detektoru s krystaly jodidu sodného aktivovaného thalliem, zkráceně NaI:Tl. Experiment DAMA/LIBRA (z anglického Dark Matter/Large Sodium Iodide Bulk for Rare Processes) provozovaný v Národní laboratoři Gran Sasso byl jediným experimentem hledající WIMPs, který svými měřeními po desetiletí podporoval myšlenku o existenci těchto částic. Měření každý rok ukazovala kolísání počtu interakcí v detektoru. To by podporovalo hypotézu o tom, že Země při svém obíhání okolo Slunce prolétává mračny WIMPs (94), (95). Kvůli vysvětlení těchto měření, která byla v rozporu s výsledky měření detektorů WIMPs založených na jiných technologiích, byla nutná výstavba nového detektoru v rámci jiného experimentu.

Tímto experimentem je ANAIS (z anglického Annual modulation with NaI scintillators). Je provozován v Canfrancské podzemní laboratoři ve Španělsku. Jeho hlavním úkolem bylo potvrdit, nebo vyvrátit výsledky měření experimentu DAMA/LIBRA, a proto se k detekci využíval také krystal NaI:Tl. Měření mělo větší přesnost a probíhalo několik let. Naměřená data neukázala žádné kolísání signálu. Závěry experimentu DAMA/LIBRA byly tedy zamítnuty (96).

## 3.8 Měření v dole Kolar

V indickém zlatém dole Kolar probíhala mezi lety 1960 a 1992 hlubinná měření zabývající se energetickou distribucí a intenzitou toku atmosférických mionů a zkoumáním v té době

hypotetického bosonu  $W$ . Experiment, který probíhal pod vedením M. R. Krishnaswamyho, jehož výsledky byly publikovány v roce 1975 v článku (97), dospěl k zajímavým výsledkům.

### **3.8.1 Technické řešení**

Experiment byl založen na relativně jednoduchém principu. V důlní štolě asi 2,3 km pod povrchem byl umístěn detektor. Ten se skládal ze scintilátorových desek, mezi kterými se nacházel absorber. Miony, které měl detektor zachytit, měly pocházet ze dvou zdrojů. Část měla být tvořena miony, které vznikají v atmosféře a dopadají víceméně kolmo na povrch Země. Druhou částí měly být miony vznikající při interakcích mionových neutrin s okolní skálou. Ukázalo se však, že velkou část, asi 40 %, zachycených interakcí tvořily současné detekce procházejících mionů a hadronů. Tak velké množství současných detekcí ovšem vůbec neodpovídalo předpokládanému účinnému průřezu reakce buzené neutrinem. Odhadované místo interakce u několika zaznamenaných drah částic se navíc nacházelo ve vzduchu, kde neutrina téměř neinteragují (97).

### **3.8.2 Výsledky měření**

Výsledky měření vědce velmi zaujaly. Nedokázali si vysvětlit, co by mohlo způsobovat tolik současných detekcí. V článku (97), kde byly výsledky publikovány, zformulovali několik hypotéz, které mohly výsledky měření vysvětlit. Jednou z hypotéz byl i rozpad nové těžké částice, která navíc může mít leptonový náboj a rozpadá se prostřednictvím slabé interakce.

Data nasbíraná týmem vědců v dole Kolar v současnosti stále nemohou být vysvětlena žádnou známou interakcí mionů, neutrin ani žádných jiných částic ze Standardního modelu. Některé články v minulosti i současnosti diskutují možnost, že částicí, jejíž rozpad byl v Kolaru změřen, může být částice temné hmoty (98), (99).

## 4 Neutrinové experimenty

Jak již bylo zmíněno, jedním z přístupů k hledání částic temné hmoty je experimentování se svazkem o vysoké intenzitě částic. Tento přístup je výhodný pro zkoumání temné hmoty, jelikož velké množství generovaných částic může do jisté míry kompenzovat malý účinný průřez interakce částice temné hmoty s částicemi ze Standardního modelu.

### 4.1 Experiment NOvA

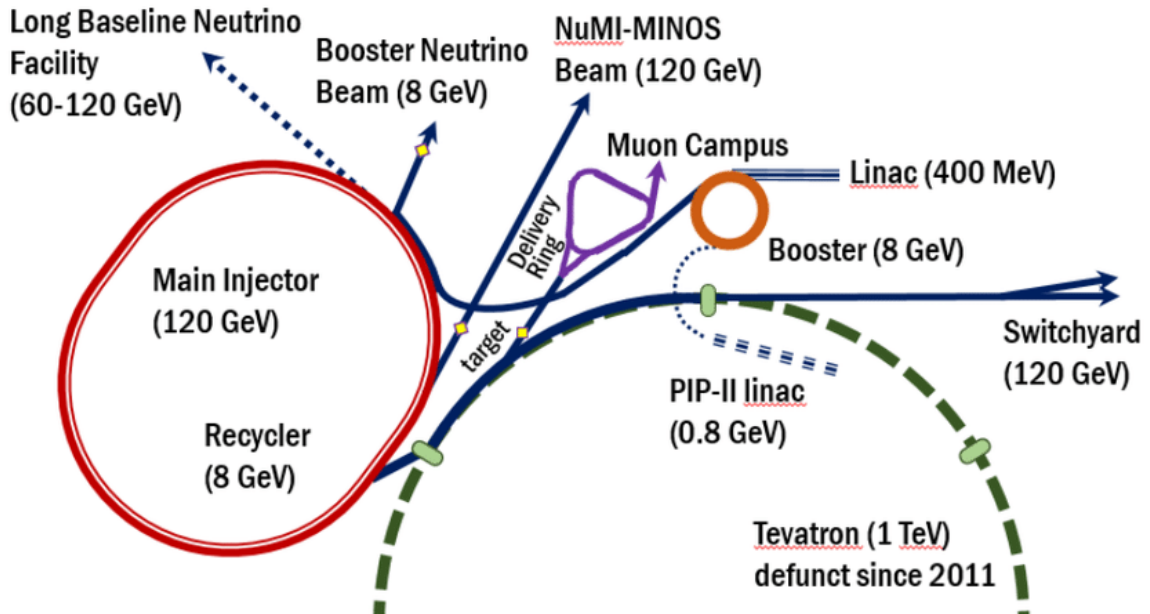
Experiment NOvA z anglického NuMI Off-axis electron-neutrino Appearance je experiment založený na detekci neutrin, které pochází ze srážky urychlených protonů s uhlíkovým terčem. Neutrina tvořící se během srážek jsou mionová a mohou podél dráhy oscilovat v jiné vůně. Experiment používá dva detektory, které by měly zachytit tyto oscilace (100).

#### 4.1.1 Příprava neutrinového svazku (NuMI)

Experiment využívá urychlovací soustavu ve Fermiho národní urychlovačové laboratoři (Fermilab, předměstí Chicaga). Proces urychlování částic začíná urychlením iontů H na lineárním urychlovači Linac na kinetickou energii 400 MeV. Po separaci obou elektronů z každého iontu vodíku putují protony do cyklotronu Booster, kde jsou urychleny až na energii 8 GeV. Pro větší intenzitu protonového svazku, tedy větší počet protonů, nejsou odtud protony vedeny přímo do cyklotronu Main Injector, ale do Recycleru, což je akumulární prsteneček, kde se protonový svazek zesiluje stálou injektáží nových protonů z Boosteru (101). Poté, co se svazek stane dostatečně vydatným, putuje do Main Injectoru, kde je urychlen na 120 GeV. Svazek je posléze vyveden do uhlíkového terče, který kvůli obrovské intenzitě srážek částic, která může dosahovat až 800 kW, musí být chlazený vodou (102). Schéma urychlovací kaskády je přiblíženo na Obrázek 4.

Srážení protonů a uhlíkového terče má za následek tvorbu mezonů, kterými jsou piony i kaony. Tyto mezony vylétnou z terčíku a prochází dvěma magnetickými poli, která je fokusují (103). Mezony jsou vedeny do 675m vakuové rozpadové komory, kde se rozpadají za vzniku neutrin, popřípadě antineutrin (102). Po průchodu částic rozpadovou komorou jsou částice vedeny skrze hadronový monitor a absorbátor, kde jsou odstíněny protony, jež dosud neinteragovaly, a mezony, které se nerozpadly. Po projití hadronovým absorbátorem, což je velmi masivní stínění zhotovené z hliníku, oceli a betonu, již pokračují pouze neutrina a miony. Miony je nutné kvůli přesnější detekci také odstínit, tudíž pod zemí částice prochází mocnými vrstvami dolomitu a jejich zeslabující se tok je sledován třemi monitory mionů,

kterými částice postupně prochází (101). Monitory zajišťují průběžné měření toku mionů, které vznikly rozpady hadronů. Informace o energetickém profilu svazku těchto částic navíc vědcům pomáhá i při studiu neutrin, protože zpřesňuje očekávaný tok neutrin (104).



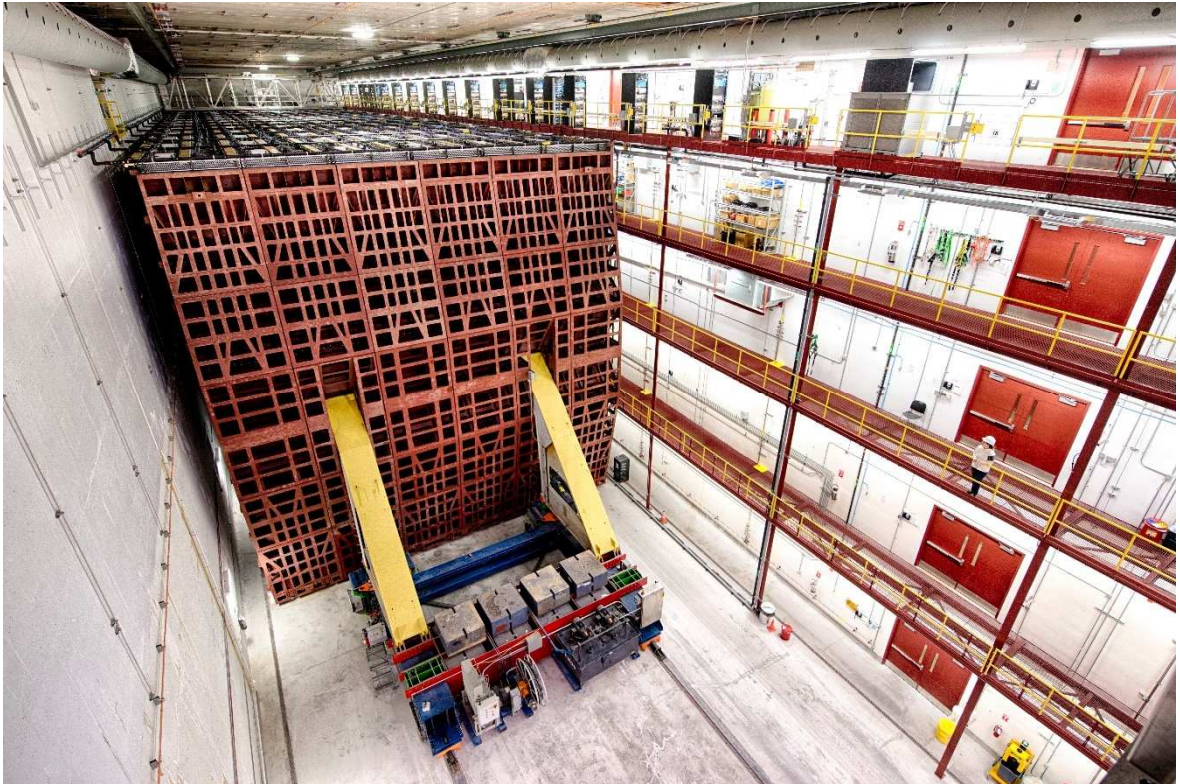
Obrázek 4: Urychlovací kaskáda Fermiho národní urychlovačové laboratoře. Plnou čarou jsou vykresleny stávající části kaskády a přerušovanou čarou části, které kaskádu tvořily v minulosti nebo je jejich výstavba plánována (105).

#### 4.1.2 Detektory experimentu NOvA

Experiment NOvA využívá dvojici detektorů umístěných lehce mimo osu letu emitovaných neutrin. Přesněji řečeno oba leží o 14 mrad nalevo od osy letu z pohledu dráhy částic. Toto umístění zajišťuje užší spektrum energií neutrin, což je z hlediska detekce výhodné. Blízký detektor, zkráceně ND z anglického Near Detector, je umístěn pouze asi kilometr od zdroje neutrin, zatímco Vzdálený detektor, zkráceně FD z Far Detector, který je ukázán na Obrázek 5, je vzdálen od zdroje 810 km (102). Různá vzdálenost detektorů od zdroje neutrin je také důvodem jejich různých rozměrů. Blízký detektor měří na výšku a šířku 3,8 m a je dlouhý 15,8 m. Vzdálený detektor je 15,8 m vysoký i široký a 59,6 m dlouhý. Oba detektory si jsou vnitřní strukturou kvůli minimalizování vlivu systematických chyb co nejpodobnější, avšak liší se hlavně svou velikostí (106).

Kostra obou detektorů je vystavěna z polyvinylchloridu (PVC) a to FD řadí mezi největší, ne-li úplně největší, plastové stavby na světě. Celkový objem detektorů je rozdělen do malých plastových buněk, které jsou naplněny scintilátorem. Jednotlivé buňky mají na Vzdále-

ném detektoru rozměry  $3,8 \times 5,9 \times 1550 \text{ cm}^3$  a každou z nich vede vlákno měniče vlnové délky, které mění signálové modré záblesky na záblesky zelené barvy, která je vhodnější pro zpracování navazující elektronikou. Celkový počet buněk je v Blízkém detektoru 20 192 a ve Vzdáleném je to 344 064 (107). Sběr signálových záblesků mají na starost křemíkové lavinové fotodiody, které záblesky přetvoří na elektrický signál, který již lze zpracovat tradičně za použití výpočetní techniky (102).



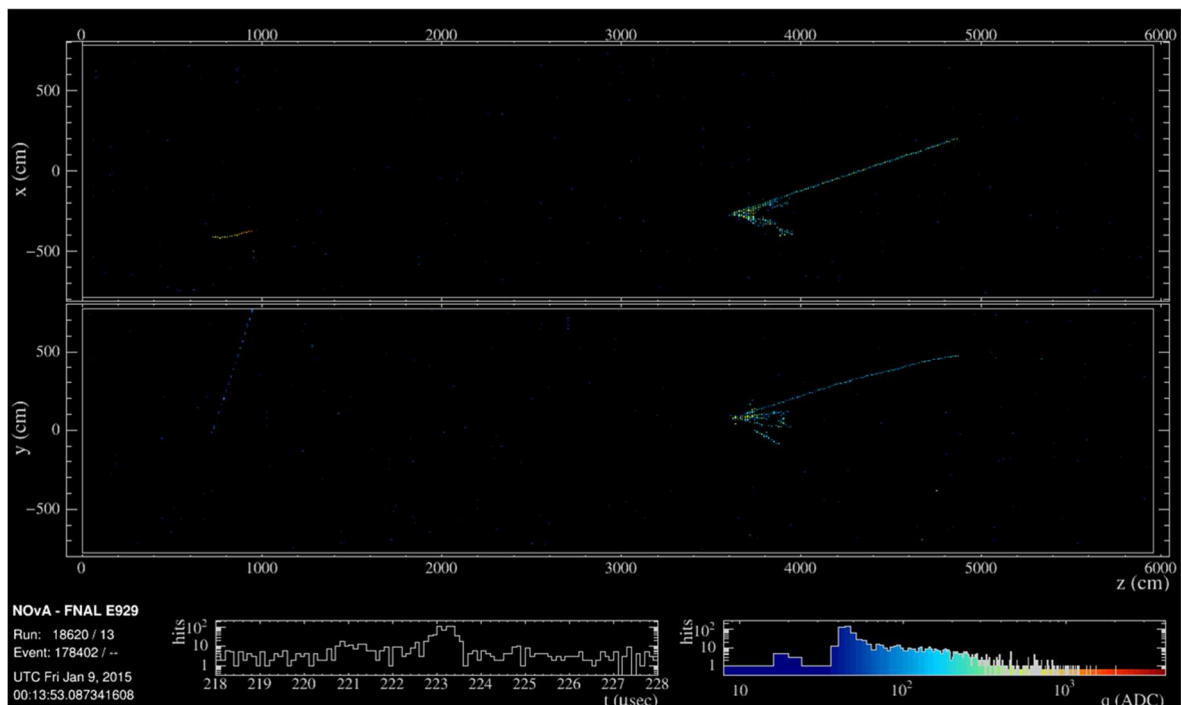
*Obrázek 5: Hala Vzdáleného detektoru experimentu NOvA a detektor samotný (108).*

Celý experiment je založen na principu scintilace, a tak velmi důležitou součástí detektoru je kapalný scintilátor. V obou detektorech dohromady je asi 8800 t scintilačního roztoku (102). Hlavní součástí tohoto roztoku je čirý minerální olej, který umožní šíření záblesků světla a také ochlazuje citlivý objem detektoru. Samotnou scintilující látkou je pak 1,2,4-trimethylbenzen neboli pseudokumen. Ten je zodpovědný za přenos energie, kterou zanechává neutrino, na záblesk UV záření. Tyto fotony jsou zachyceny dalšími složkami roztoku, kterými jsou 2,5-difenyloxazol a 1,4-di(methylstyryl)benzen a které postupně posunou vlnovou délku emitovaného záření až na úroveň, kdy ji mohou zachytit vlákna měniče vlnové délky (107).

### 4.1.3 Cíle experimentu NOvA

Neutrína jsou zatím méně prostudované částice, a tak se výzkumníci v rámci experimentu NOvA snaží zkoumat jejich základní vlastnosti a chování. Vědci již vědí, že neutrin jsou nejméně tři druhy, elektronové, mionové a tauonové, a také vědí, že tyto druhy mezi sebou oscilují.

Jedním z cílů je pozorovat oscilaci mionového neutrina na elektronové, která před stavbou detektorů této generace nebyla pozorována (109). Z tohoto důvodu je Vzdálený detektor umístěn 810 km od zdroje neutrin, v této vzdálenosti mají totiž neutrina první oscilační maximum (110), tedy největší pravděpodobnost změny z jednoho typu na druhý. Výstupní signál z detektoru je ukázán na Obrázek 6.



Obrázek 6: Výstup z FD experimentu NOvA očištěný od signálů z pozadí. Vrchní část obrázku zobrazuje pohled na detektor shora a centrální pohled z boku. Zde je zachycena detekce kosmického mionu vlevo a mionu, který vznikl interakcí mionového neutrina v detektoru, vpravo. V dolní části obrázku vlevo je vyznačen čas detekce v jednotlivých buňkách detektoru a vpravo intenzita odezvy v jednotlivých buňkách (111).

Záhadou také stále zůstává i hierarchie hmotností konkrétních stavů neutrin. Jsou změřeny kvadráty rozdílů hmotností, kterých jednotlivé stavy dosahují, ovšem kvůli onomu změření pouhého kvadrátu zatím není jasné, která hmotnost náleží ke kterému stavu (112).



Jednotlivé stavy jsou navíc superpozicí neutrinových vůní a navzájem se liší pouze v míře zastoupení jednotlivých vůní (113).

Relativně úzká specializace detektorů má za následek nízký počet možných fyzikálních měření neutrinových parametrů. Pro zvýšení závažnosti a výtěžnosti vědeckého potenciálu detektoru se proto klade stále větší důraz na měření mimo oscilační analýzu. Do těchto měření spadá detekce neutrin pocházejících ze supernov (114), snaha o detekci sterilních neutrin (115) nebo pátrání po temné hmotě (42).

#### 4.1.4 Hledání temné hmoty

Částice temné hmoty produkované buď ve vesmíru nebo během srážek částic z urychlovače se podle teoretických předpokladů mohou rozpadat či rozptylovat na atomech citlivého objemu obou detektorů a tím zde zanechávat energii, kterou se vědci snaží detekovat. Tuto energii lze detekovat pomocí monitorování produktů temné hmoty, například mionů ve Vzdáleném detektoru. Experimentátoři totiž zhruba vědí, kolik interakcí mionů v detektoru pochází z pozadí, jelikož tok mionů je stálý a závisí pouze na vzájemné konstelaci Země a Slunce. Při zvýšení detekce mionů proto lze usoudit, že existuje i jiný zdroj mionů, než jsou reakce kosmického záření v atmosféře, a tímto zdrojem by mohly být interakce temné hmoty (42).

Jak již bylo popsáno výše, jednou ze zkoumaných možností je, že částicemi temné hmoty může být sterilní neutrino (28). V experimentu NOvA se využívá předpokladu, že i sterilní neutrino velmi omezeně osciluje, tedy přechází na nám známé vůně. Měření na Vzdáleném detektoru ukázala, že počet detekcí tzv. neutral current interakcí v detektoru svědčí buď o tom, že sterilní neutrina neoscilují se známými druhy, nebo sterilní neutrina neexistují. Závěry jsou ovšem zatíženy poměrně velkou statistickou i systematickou chybou, tudíž hypotéza o sterilních neutrinech zatím nebyla vyvrácena a je třeba se jí po vylepšení detekční a vyhodnocovací aparatury dále věnovat (115).

Pátrání po temné hmotě ale probíhají i na Blízkém detektoru, tam se ovšem ubírají cestou přímé detekce. Vycházejí z teoretických modelů předpokládajících, že částice tzv. lehké temné hmoty  $\chi$  (LDM z anglického Lightweight Dark Matter) s hmotností menší než GeV mohou být prostřednictvím částicových zprostředkovatelů, portálových částic  $V_\chi$ , propojeny s částicemi ze Standardního modelu, které je možné detekovat. Podle modelu Neutrálního vektorového portálu (Neutral Vector Portal model) při interakci protonů s terčíkem může vzniknout portálová částice  $V_\chi$ , jež se později rozpadá na dvě částice temné hmoty. Tyto částice

by se pak mohly v Blízkém detektoru při reverzním procesu rozptýlit a skrze prostředníka předat energii elektronům nebo jádrům v citlivém objemu detektoru. Z hypotetického modelu vyplývá, že k vyhodnocování je rozptyl částic temné hmoty na elektronech vhodnější než rozptyl na jádrech. Na elektronech se totiž rozptylují neutrina s mnohem nižší pravděpodobností než na jádrech, a to znamená, že sledovaná reakce temné hmoty tam má mnohem menší pozadí. Elektromagnetické spršky vyvolané reakcí částic temné hmoty jsou v detektoru snadno rozeznatelné, neboť kopírují směr svazku, což je další výhoda tohoto přístupu oproti rozptylu na hadronech v jádře (42). Toto měření na Blízkém detektoru znamenalo krok kupředu oproti předešlým experimentům, současné výsledky jsou ovšem omezeny statistikou a rozměry detektoru, které neumožní zachytit vysokoenergetické spršky (116). Detailnější popis fyzikální podstaty modelu Neutrálního vektorového portálu vysoce převyšuje rámec této práce, a tak detailnější informace jsou k dispozici v článku (42).

#### 4.1.5 Pozadí interakcí exotických částic

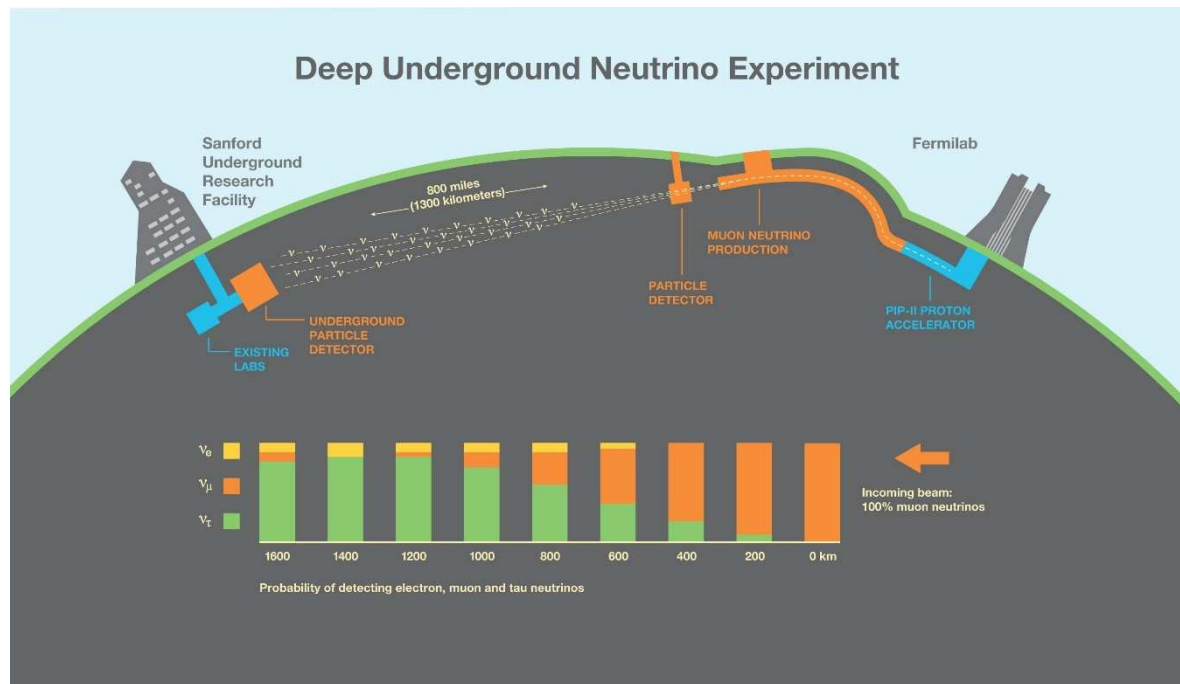
Když fyzici pátrají po interakcích exotických částic, hraje velkou roli odlišení detekčního signálu od pozadí. Při pátrání po těžkých neutrálních leptonech i částicích  $\chi$  na experimentu NOvA jsou největšími zdroji nežádoucího signálu neutrinové interakce a kosmické miony.

Vzhledem k rozpadovým kanálům HNL nelze předpokládat možnost odlišit produkty interakce neutrin a rozpadů těžkých neutrálních leptonů. Velký problém také představuje produkce pionů při neutrinových interakcích, jelikož dlouhé dráhy, které zanechávají v detektoru, mohou být mylně ztotožněny jako dráhy od mionů. (40). Jednou z možností, jak od sebe neutrina a HNL odlišit, je podle času jejich interakce v detektoru. Tento postup počítá s menší rychlostí částic HNL oproti neutrinům a může se využít na experimentech s přesným časovým měřením, kterým je například MicroBooNE (41). Vědci na experimentu NOvA však díky širokému časovému oknu svazku tuto možnost nemají.

V případě identifikace interakce částic temné hmoty  $\chi$  jsou největším zdrojem pozadí také neutrinové interakce, neboť jejich interakční kanály jsou stejné. To společně s produkcí kaonů v terčíku zcela znemožňuje jakoukoli identifikaci původce detekčního signálu. Z tohoto důvodu se přítomnost interakcí částic  $\chi$  zkoumá analýzou počtu všech zaznamenaných interakcí a porovnáním s předpokládaným počtem interakcí pocházejících pouze od neutrin. Pokud se počty interakcí od sebe výrazněji liší, lze předpokládat, že došlo k interakcím částic  $\chi$  (42).

## 4.2 Experiment DUNE

Deep Underground Neutrino Experiment zkráceně DUNE je budoucí experiment, který do jisté míry naváže na experiment NOvA probíhající v současné době. Cíle obou experimentů se značně překrývají, ovšem DUNE představuje významný krok kupředu v oblasti neutrinové fyziky, fyziky formování černých děr, zkoumání narušení symetrie mezi nábojem a paritou a v neposlední řadě v oblasti studia temné hmoty (117).



Obrázek 7: Schéma experimentu DUNE společně s pravděpodobností výskytu jednotlivých neutrinových vůní (118).

K těmto účelům bude využívat nejvýkonnější protonový svazek a největší argonové detektory na světě, které budou neutrina detekovat až ve vzdálenosti 1300 km od terče (119). Pro lepší představu je schéma experimentu ukázáno na Obrázek 7.

### 4.2.1 Urychlovací soustava a příprava svazku

Jak již bylo předestřeno, experiment DUNE má mnoho společného s experimentem NOvA a je tomu tak i v případě urychlovací soustavy experimentu. Toto zázemí bude poskytovat také Fermilab. Po ukončení poskytování neutrinového svazku současnému experimentu NOvA proběhnou v systému urychlovačů změny, které budou mít za následek zvýšení výkonu koncového protonového svazku z 800 kW na ohromujících 1,2 MW a zároveň také možnost nastavit energii protonového svazku v rozpětí 60 až 120 GeV. Okolo roku 2030 by dokonce mělo dojít k dalším vylepšením urychlovačů, aby bylo možné dosahovat výkonu svazku až 2,4 MW (120).

Nejvýznamnějším vylepšením je výměna lineárního urychlovače Linac. V současné době urychluje Linac ionty  $H^-$  s kinetickou energií 400 MeV. Pro projekt DUNE je ovšem plánováno nahrazení tohoto lineárního urychlovače urychlovačem splňujícím plán vylepšování PIP-II. Bude se jednat o supravodivý lineární urychlovač, který bude ionty  $H^-$  urychlovat až na energii 800 MeV. Toto vylepšení bude mít stěžejní vliv na zvýšení výkonu svazku, ale i na lepší využití energie vložené do urychlování díky lepší fokusaci (121). Než tedy bude získán výsledný protonový svazek, musí být ionty  $H^-$  urychleny novým supravodivým lineárním urychlovačem, odkud budou protony po oddělení elektronů urychleny synchrotronem Booster. Z důvodu zvýšení energie částic z lineárního urychlovače bude v rámci PIP-II nutné modifikovat i Booster. Přidáním a vyměněním magnetů, které upravují podobu svazku, a radiofrekvenčních dutin, které svazek urychlují, se zvýší maximální možná frekvence a celkový výkon protonového svazku (122). Protony z Boosteru budou vedeny do Main Injektoru, jak je tomu i v současnosti. Za účelem zvýšení počtu najednou urychlovaných protonů bude třeba zvýšit výkon všech zařízení pro udržení svazku a jeho urychlování, ať už půjde o výměnu radiofrekvenčních dutin nebo o instalaci pulzních kvadrupolových magnetů (123).

Protože svazek bude mít vyšší výkon a bude docházet k většímu množství interakcí s terčíkem, je nutné také upravit zařízení v terčové stanici. Kvůli lepšímu využití částic, zlepšení fokusace a snížení radiačního namáhání okolních materiálů se pro experiment DUNE počítá s instalací mohutnějšího terčíku a tří fokusačních magnetických polí. Magnetická pole budou i nadále moci být provozována tak, aby bylo možné sledovat jak neutrina, tak i antineutrina (124). Poté, co částice ze srážky projdou těmito poli, zamíří do 194 m dlouhé heliem plněné a dusíkem chlazené rozpadové komory. V této komoře, která bude muset být od okolí oddělena téměř šesti metry betonového stínění, se piony a kaony rozpadají na neutrina. Po projití rozpadovou komorou zamíří částice do mohutného hadronového absorbátoru. Absorbátor bude vyroben z hliníku, oceli a betonu a bude chlazen vodou. Přímo za absorbátorem bude umístěn monitor hadronů, který bude poskytovat důležité informace o intenzitě a rozložení toku hadronů, které by prošly absorbátorem (125). Po odstínění drtivé většiny hadronů částice proletí skrz ionizační komory a Čerenkovovy detektory, které mají za úkol měřit energetické spektrum mionů, a pokračují do čtyř ocelových mionových absorbátorů, mezi kterými bude vždy měřen tok a energie mionů za pomoci plynových Čerenkovových detektorů či diamantových detektorů (125), (126).

#### 4.2.2 Detektory experimentu DUNE

Experiment DUNE je dvoudetektorový neutrinový experiment. Blízký detektor, zkr. ND, je umístěn v areálu Fermiho národní urychlovačové laboratoře (Fermilab, předměstí Chicaga) asi 62 m pod povrchem a 574 m od terčíku (124). Vzdálený detektor, zkr. FD, je situován v areálu Sanfordského podzemního výzkumného zařízení (SURF, Lead) 1500 m pod povrchem a 1 300 km od terčové stanice a budou ho tvořit dva typy argonových detektorů. Prvním z nich bude jednofázový detektor, kde se bude argon nacházet pouze v kapalném skupenství (fázi), a druhým bude dvoufázový detektor, kde se bude argon vyskytovat jak v kapalném, tak i plynném skupenství (127).

Blízký detektor nelze chápat jako jeden detektor, ale jako zařízení skládající se ze tří různých za sebou situovaných detektorů. Těmito detektory budou ArgonCube, detektor na bázi časových projekčních komor s tekutým argonem, víceúčelový detektor MPD (z anglického Multi-Purpose Detector) a monitor neutrinového svazku SAND (z anglického System for on-Axis Neutrino Detector). Navíc bude možné s detektory ArgonCube a MPD pojíždět podle potřeby do osy svazku a z ní, což umožní uskutečnit ještě širší škálu měření (127).

Detektor ArgonCube se má skládat z 35 projekčních komor, které kvůli optimálním vlastnostem tekutého argonu musí být chlazeny kryostatem. Komory jsou navíc dále vnitřně členěny tak, aby bylo možné registrovat dráhu částic. Celkové rozměry detektoru jsou  $3 \times 7 \times 5 \text{ m}^3$ . ArgonCube bude kvůli minimalizaci systematických chyb postaven tak, aby byl co nejpodobnější velkému FD. Detektor se bude zabývat kontrolním měření pro FD. Díky své vysoké energetické rozlišovací schopnosti a možnosti sledovat dráhu částic umožní měřit tok částic různými technikami zahrnujícími i rozptyl mionových neutrin na elektronech (127), (128).

Zásadním parametrem, který bude třeba měřit, je i hybnost vysokoenergetických mionů. Zařízení k měření hybnosti těchto mionů se nazývá magnetický spektrometr a je součástí víceúčelového detektoru MPD. Vysokoenergetické miony budou prolétat magnetickým polem a podle zakřivení jejich dráhy se s vysokou přesností bude měřit velikost jejich hybnosti. Detektor má obsahovat časovou projekční komoru se stlačeným plynným argonem, kterou obklopuje elektromagnetický kalorimetr. MPD bude mít ještě jednu velmi důležitou roli a tou bude detekce částic vzniklých při interakcích neutrin s atomy argonu v ArgonCube (129), (127).

S oběma již představenými detektory bude navíc možné dle potřeby pojíždět ve směru kolmo vůči dráze přicházejících částic. Bude tedy možné pozorovat, jak se s pozicí detektorů

mění energetické spektrum přicházejících částic a účinný průřez jejich interakcí. Při různých vzdálenostech od osy bude možné změřit i závislost energetické odezvy detektoru na skutečně deponované energii (127).

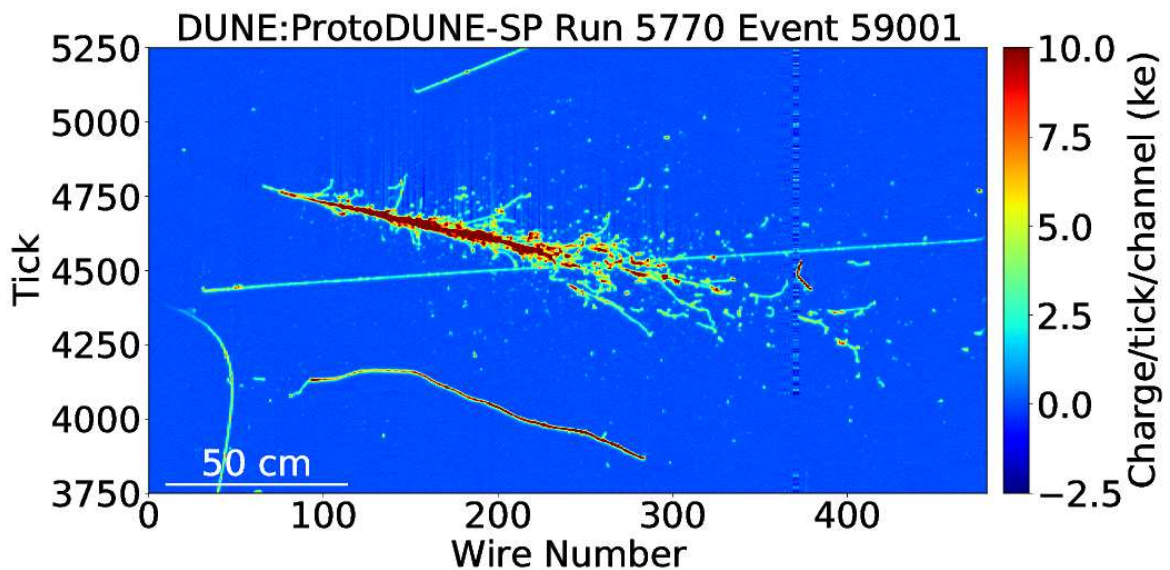
Posledním detektorem ND je monitor neutrinového svazku SAND. Od ostatních se na první pohled bude odlišovat, jelikož je permanentně umístěn v ose svazku částic. Detektor se skládá ze supravodivého solenoidálního magnetu, elektromagnetického kalorimetru a 3D scintilačního detektoru. Hlavním úkolem detektoru je trvalé měření neutrinového svazku, jeho změn v čase a jeho složení (130). K tomuto účelu je v centru detektoru 3D scintilační detektor, jenž se skládá z krychliček o hraně jeden centimetr. Díky segmentaci scintilátoru a vyhodnocení každé krychličky zvláště bude možné sledovat přímo let neutrin ve 3D objemu. SAND také bude s to rozeznat i malé energie deponované neutrony ve 3D, čímž umožní daleko přesnější výpočty týkající se rekonstrukce interakcí (131), (127).

Hala Vzdáleného detektoru bude umístěna 1300 km od terčové stanice asi 1500 m pod úrovní terénu u města Lead. Vzdálený detektor se bude skládat ze čtyř paralelních argonových detektorů. Každý detektor bude dosahovat rozměrů  $18 \times 19 \times 66 \text{ m}^3$ , což z něj bude činit největší detektor svého druhu na světě. Zajímavostí je, že se počítá s využitím detektorů, které budou obsahovat pouze kapalný argon, současně s těmi, co obsahují jak kapalný, tak i plynný argon (132). Jednotlivé detektory FD budou obsahovat 10 kt tekutého argonu udržovaného kryotechnikou na teplotě  $-184 \text{ }^\circ\text{C}$  (133).

Pro ověření koncepce a naměření dat potřebných pro vyvinutí softwarového vyhodnocovacího systému pro experiment DUNE se v současné době zmenšené prototypy obou detektorů testují v CERN v rámci projektu ProtoDUNE. Podle článků (132) a (134) testování a sběr dat probíhá úspěšně a experimentu DUNE potvrzují významný vědecký potenciál.

Mechanismus detekce neutrin na jádrech argonu v Blízkém i Vzdáleném detektoru využívá schopnost argonu skvěle vést elektrický náboj a dobré optické vlastnosti. Když neutrino interaguje s jádrem argonu, toto jádro emituje elektron. Elektron je elektrickým polem v detektoru vlečen k anodě. Ionizace i průchod elektronu detektorem vyvolá emitování scintilačních fotonů. Argon sice nemá ani zdaleka ideální vlnovou délku scintilačního maxima asi 127 nm, ale pomocí posunovačů vlnové délky je záření upraveno tak, aby bylo možné scintilační fotony efektivně zachytit v křemíkových fotonásobičích (127). Porovnáním času sebrání elektronů na anodě a času na fotonásobiči společně s určením směru pohybu lze získat přesné místo, kde došlo k interakci. Tato informace je velmi cenná a pomáhá v následné 3D rekonstrukci celé události (133). Na Obrázek 8 je ukázána interakce elektronu

v prototypu argonového detektoru ProtoDUNE, který bude součástí stanice Vzdáleného detektoru.



Obrázek 8: Interakce elektronu s vysokou energií v detektoru ProtoDUNE s tekutým argonem, na pozadí této interakce je zachycen průlet mionu (135).

Jak je nastíněno výše, FD bude využívat detektory jak s kapalným argonem, tak i s argonem v plynném i kapalném stavu. Výhodou dvoufázového detektoru je zvýšení efektivního objemu detektoru. Jednofázový detektor s kapalným argonem musí mít složitou vnitřní strukturu desek měnící vlnovou délku fotonového záření, katodových a anodových desek atd. (133). Zásadní myšlenkou dvoufázového konceptu detektoru je větší zesílení signálu. Elektrony vzniklé ionizací atomů argonu jsou elektrickým polem donuceny stoupat vzhůru detektorem (136). Na rozhraní kapaliny a plynu elektrony urychlí silné elektrické pole, které je vystřelí do plynného argonu. V plynném argonu elektrony procházejí Velkým elektronovým násobičem, zkr. LEM (z anglického Large Electron Multiplier), kde se díky jeho mikrostruktuře vytvoří Townsendova lavina elektronů, která je později sebrána na anodě (127).

#### 4.2.3 Cíle experimentu DUNE

Experiment DUNE má vytyčeny cíle hlavně na poli astrofyziky a částicové fyziky. Jde o projekt, který bude pracovat s nejpokročilejšími technologiemi, tudíž má ty nejlepší předpoklady pro popis fyzikálních dějů, které zatím byly za hranicemi technických možností.

Prvním cílem je více se dozvědět o neutrinech, jejichž podrobnější parametry stále zbývá naměřit a zpřesnit. Jak jsem již zmiňoval, vědci stále neznají hierarchii hmotností jednotli-

vých typů neutrin, takže stále nevědí, zda typ  $\nu_3$  je nejtěžším typem neutrin, nebo tím nejlehčím. Dále je nutné provést více měření ke zpřesnění neutrinového modelu. Fyzikové se budou snažit zachytit, jak mionová neutrina  $\nu_\mu$  oscilují na elektronová neutrina  $\nu_e$  během svého letu mezi Blízkým a Vzdáleným detektorem (127). Oscilace neutrin v hmotě navíc velmi úzce souvisí i s narušením CP symetrie, která je vyjádřena parametrem  $\delta_{CP}$ , který určuje rozdíl mezi chováním neutrin a antineutrin (124).

Dalším a neméně významným cílem je zkoumání Teorie velkého sjednocení. Tato teorie, která je mimo fyziku Standardního modelu, předpovídá, že baryony by se mohly měnit na leptony a naopak. V důsledku by to znamenalo, že protony by měly danou dobu života, po které by se rozpadaly na kaon a antineutrino, nebo že probíhá oscilace neutronů a antineutronů (137). Díky skvěle se hodícím vlastnostem časové projekční komory s tekutým argonem budou fyzikové mít dosud nevídané možnosti detekce a identifikace těchto procesů (127).

Mimo cíle na úrovni částicové fyziky se projekt DUNE bude zaměřovat i na astrofyzikální jevy. Jedním z hlavních výzkumů v projektu DUNE bude i detekce neutrin pocházejících z výbuchů supernov. Díky citlivým detektorům budou astrofyzici moci detekovat výbuchy supernov v jádru Mléčné dráhy a omezeně i supernov z Galaxie v Andromedě. Tato měření mohou vědcům, v případě dostatečného množství dat z detekcí, pomoci při rekonstrukci posledních chvil života hvězd (138). Možnost detekovat i neutrino s malou energií, která nepochází z Main Injectoru, jenom ukazuje, jak komplexním experimentem DUNE bude (124).

Díky velmi citlivým detektorům, které byly pro tento experiment navrženy, se mohou fyzikové věnovat i vysoce přesným měřením fyzikálních jevů, které jsou mimo Standardní model. Jde o měření hledající minimální odchylky mezi předpovězenými a experimentálně získanými daty, a tak velkou roli hrají nejen přesné detektory s vysokým účinným průřezem, ale také nízkošumová elektronika a stálé prostředí (127). Mezi hypotézami, které se v rámci DUNE budou prověřovat jsou existence těžkých neutrálních leptonů, rozpady neutrinových tridentů, narušení Lorentzovy symetrie a v neposlední řadě i možné narušení symetrie náboje, parity a času (CPT symmetry) (124).



#### 4.2.4 Pátrání po temné hmotě

Součástí měření, která budou vědci na experimentu DUNE provádět, je i pátrání po temné hmotě. Nezaměřují se přitom pouze na jednu teorii, ale prověří několik různých hypotéz. Pátrání bude probíhat na obou detektorech, a to jak současně, tak i na každém zvlášť (127).

Prostřednictvím těch měření, která budou probíhat na obou detektorech, se bude pátrat po sterilních neutrinech. Při pozorování oscilací vůní tzv. aktivních neutrin, což jsou prokázaná neutrina již zmíněných tří vůní, se vědci také zaměří na možnou, málo pravděpodobnou oscilaci na sterilní neutrino. Tento výzkum naváže na ten, jenž provádí v současné době tým vědců na experimentu NOvA. Experiment DUNE bude disponovat nejpokročilejšími detektory a detekční technologií, a tak může detailně prozkoumat parametry, při kterých by známé vůně přecházely na sterilní formu (139), (124).

Relativně nový model temné hmoty se nazývá urychlená temná hmoty (zkr. BDM z anglického Boosted dark matter). Tato hypotéza uvažuje existenci relativistických částic temné hmoty, které byly urychleny reakcí hmotnější částice temné hmoty s částicí ze Standardního modelu. K tomuto urychlení by podle teorie mělo docházet v jádru galaxií nebo hvězd. Relativistická částice přilétající ze Slunce by tedy přes rozptyl na elektronu nebo jádře argonu měla ve Vzdáleném detektoru odevzdat svoji energii, která by byla detekovatelná (140), (124).

Existence lehké temné hmoty je další možnou teorií, kterou budou vědci v rámci experimentu DUNE prověřovat. Vysoký tok částic, kterým vědci v rámci experimentu budou disponovat, je ideální k ověření portálových modelů temné hmoty. Stejně jako v případě NOvA model hovoří o částicích s hmotností menší nebo rovnou 1 GeV, které by zatím detekčním snahám na jiných experimentech mohly unikat. Částice lehké temné hmoty by podle předpokladů mohly vznikat v terčíku při reakcích protonů. Následně by v Blízkém detektoru mohly být detekovány přes pružný rozptyl svého prostředníka, tzv. temného fotonu  $V$ , na elektronech nebo jádrech. Velmi důležitou roli v těchto měřeních bude hrát i pohyb detektorů v kolmém směru k letu částic. Porovnáním dat získaných měření v ose svazku a mimo ni, budou moci vědci prozkoumat více faktorů ovlivňující interakci a zároveň snížit nejistotu měření (141). Základním předpokladem k úspěšné detekci jsou velmi přesná měření zahrnující přesné stanovení času detekce, energie rozptýlené částice či úhlu srážky (124).

## 4.3 Experiment T2K

Dalším neutrinovým experimentem je japonský T2K (zkratka Tokai-to-Kamioka), který má za úkol sledovat oscilaci mionových neutrin na elektronová. Na Vzdáleném detektoru Super-Kamiokande výše uvedeného experimentu v minulosti probíhalo měření oscilace kosmických neutrin. Za tento objev dostal T. Kajita v roce 2015 Nobelovu cenu za fyziku (142). Cíle experimentu T2K se z velké části kryjí s těmi, které si vytyčili vědci z experimentu NOvA. Projekt využívá podobný koncept sestávající z urychlovací soustavy a dvou detektorů, z nichž jeden se nachází v těsné blízkosti urychlovací laboratoře a druhý 295 km od terčíku (143).

### 4.3.1 Technické řešení experimentu T2K

Soustava urychlovačů pro tento experiment se nachází ve městě Tokai. Celá urychlovací kaskáda se skládá ze tří urychlovačů, na jejichž výstupu mají protony kinetickou energii 30 GeV. Těmito urychlovači je lineární urychlovač Linac a synchrotrony RCS (z anglického Rapid Cycling Synchrotron) a Main Ring. Protony jsou po urychlení navedeny do grafitového terčíku, se kterým interagují za produkce mimo jiné kaonů a pionů. Piony jsou fokusovány třemi magnetickými poli a směřují do rozpadové komory plněné heliem. V rozpadové komoře probíhá rozpad pionů na mionová neutrina  $\nu_\mu$ , která poté putují skrz monitor toku mionů do komplexu blízkého detektoru (144).

Stanice blízkého detektoru se nachází 280 m od terčíku a hlavním úkolem v ní umístěných detektorů je předpovídat neutrinové interakce ve vzdáleném detektoru, kterým je detektor Super-Kamiokande. Ve stanici blízkého detektoru je umístěn detekční systém skládající se z několika druhů detektorů. Ve středu soustavy detektorů, která se nachází mimo osu svazku, je detektor pionů  $\pi^0$ , tři časové projekční komory a dva scintilátorové detektory. Tyto detektory jsou obklopeny elektromagnetickým kalorimetrem a detektorem mionů. Přímo v ose svazku se nachází ještě jeden detektor, který měří směr a intenzitu neutrinového svazku (145).

Detektor  $\pi^0$  je tvořen scintilátorovými tyčemi uspořádanými do vrstev, mezi kterými je terčová měděná nebo olověná fólie. Tento detektor má za úkol měřit účinný průřez reakcí neutrálních pionů, ve kterých figuruje Z boson a které představují hlavní složku pozadí v oscilacích neutrin (146).

Za detektorem neutrálních pionů následují tři časové projekční komory a dva detektory s jemnou strukturou. Tyto části detektoru společně zajišťují trasování částic interagujících

v detektoru. Časové projekční komory jsou vynikající ve 3D rekonstrukci drah nabitých částic a v jejich rozpoznávání (143), zatímco detektory s jemnou strukturou, tvořené vrstvami scintilátorů, velmi úspěšně detekují částice s krátkou dráhou letu, které vznikají při interakcích v detektoru. Tato soustava detektorů má za úkol měřit fyzikální vlastnosti nejdůležitější reakce v rámci experimentu T2K, reakce neutrina s neutronem za vzniku protonu a leptonu (147).

Elektromagnetický kalorimetr, který obklopuje vnitřní detektory, má za úkol detekovat fotonové záření, které není zachyceno ve vnitřních detektorech. Kalorimetr také detekuje miony unikající z detektoru (143).

Detektorem umístěným přímo v ose svazku je INGRID (z anglického Interactive Neutrino GRID). Má sendvičovou strukturu a skládá se z ocelových desek, mezi kterými jsou umístěny scintilátory. Neutrina reagují s deskami a nabitě produkty těchto interakcí jsou zachyceny scintilátory (148).

Jako vzdálený detektor experimentu T2K slouží detektor Super-Kamiokande, což je největší Čerenkovův detektor na světě. Je umístěn v hoře Ikeno asi 295 km od terčíku v bývalém zinkovém dole v šachtě, kde se dříve nacházel detektor Kamiokande. Hlavním úkolem Super-Kamiokande je pátrat po přítomnosti elektronových neutrin ve svazku mionových neutrin letících z terčíku. Skládá se ze dvou do sebe vnořených válcovitých nádob, které jsou od sebe odděleny opticky nepropustnou stěnou. Vnitřní nádoba, která má průměr téměř 34 m a výšku více než 36 m, má na svých stěnách přes 11 000 fotonásobičů. Ty slouží k zesílení záblesků fotonů Čerenkovova záření, které vznikají v ultračisté vodě, kterou je detektor naplněn (149). Samotné vyhodnocení přítomnosti elektronových neutrin probíhá na základě tvaru odezvy jdoucí ze systému fotonásobičů. Vnější nádoba je v průměru o 2 m větší a také má na svých stěnách fotonásobiče. Systém dvou do sebe vnořených detektorů poskytuje vědcům nástroj pro vyloučení kosmických mionů a dalších zdrojů pozadí, což je pro experiment T2K důležité (143).

#### **4.3.2 Cíle experimentu T2K a hledání temné hmoty**

Experimentátoři v rámci tohoto experimentu zkoumají fyziku neutrin. Jejich hlavním cílem je měřit parametry přechodu mionového na elektronové neutrina a tím zdokonalovat a zpřesňovat popis neutrinových oscilací. K těmto parametrům patří jak rozdíl kvadrátů hmotností, tak i směšovací úhly  $\theta_{13}$  a  $\theta_{23}$  (143).

Dalším velkým úkolem, který si vědci stanovili, je pátrání po sterilních neutrinech. K prozkoumání možné existence této hypotetické částice vědce vedly nesrovnalosti při experimentech s krátkou dráhou letu částic a detailní analýza předchozích měření s antineutrinovými svazky. V rámci experimentu T2K experimentátoři sledují počet  $\nu_e$ , který interaguje v detektoru, a porovnávají ho s počtem částic nalétávajících na terčik. Tento poměr je důležitý, jelikož v případě existence sterilních neutrin by tento poměr měl být menší, než je vypočítáno pro model tří vůní. Pro toto měření fyzici využívají i detektor pionů  $\pi^0$ , protože reakce těchto pionů způsobují největší část reakcí na pozadí a pro přesná měření je nutné tyto reakce z měření vyloučit. Dosavadní měření vypovídají o tom, že pokud je oscilace známých neutrin ve sterilní možná, pohybuje se její pravděpodobnost v hodnotách, které jsou menší než současná nejistota měření (150).

## 5 Detekce exotických částic v Blízkém detektoru experimentu NOvA

Tato poslední kapitola, jež je i praktickou částí této práce, pomocí simulací demonstruje hlavní rozdíly v interakcích jak mezi rozdílnými druhy částic, tak i mezi jejich různými hmotnostmi. Exotickými částicemi, jejichž interakce v Blízkém detektoru experimentu NOvA jsou v této kapitole nasimulovány, jsou částice temné hmoty  $\chi$ , které byly popsány výše v Kapitole 4.1.4 a těžké neutrální leptony, které byly popsány v Kapitole 2.2. Pro simulaci vysokoenergetických srážek byl použit program PYTHIA (151) a pro analýzu dat byl použit program ROOT. Pro simulaci byly nastaveny parametry reálného protonového svazku, který je pro experiment NOvA připravován, a reálného Blízkého detektoru a byly k nim doplněny předpokládané parametry exotických částic.

### 5.1 Simulační řetězec

Pro simulaci LDM byl využit existující program „nova\_num\_chi“ (autoři Filip Jediný a Sergej Kotelnikov), který byl upraven na žádoucí hmotnosti temných částic.

Pro simulaci byly nastaveny parametry reálného protonového svazku, který je pro experiment NOvA urychlován na 120 GeV, geometrie reálného Blízkého detektoru a byly k nim doplněny předpokládané parametry exotických částic. V každé simulaci byla zadána srážka 100 000 protonů s terčíkem.

Program simuluje dopad protonů na terčík, interakci za vzniku sekundárních mezonů, vektorového mediátoru  $V_\chi$  a jeho rozpad na částice  $\chi$ . Tyto výsledné částice jsou pak propagovány do objemu Blízkého detektoru, kde je simulován jejich rozptyl na elektronech.

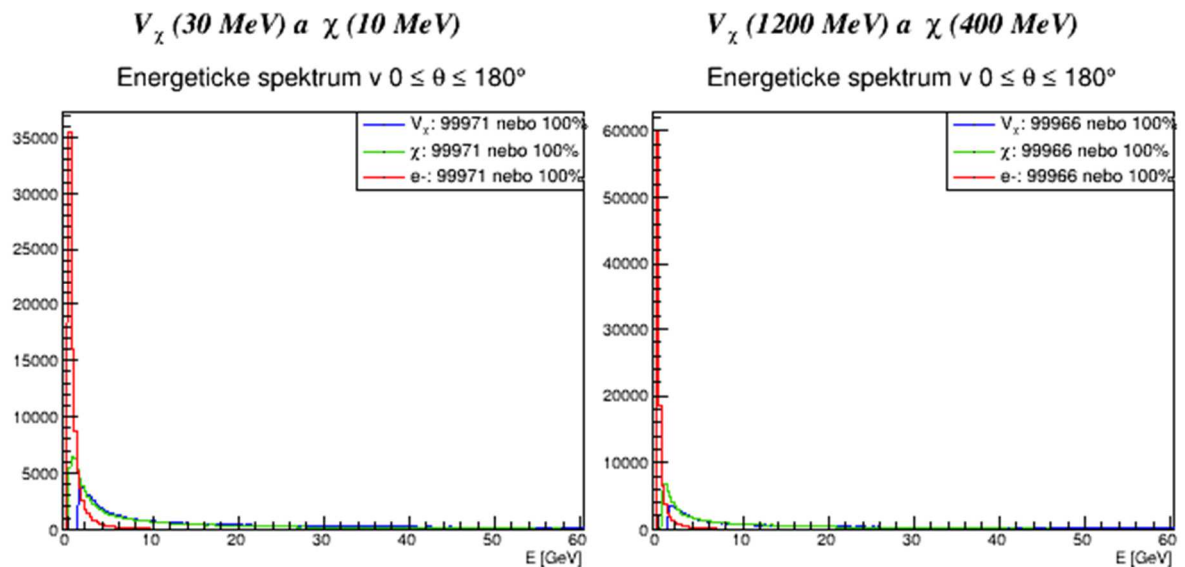
Výstupem z programu je parametrický popis výsledných elektronů v HEPEVT formátu. Soubor s tímto popisem je potom použit jako vstup do produkčního generátoru tzv. raw dat, která odpovídají reálnému výstupu z detekční a vyhodnocovací soustavy. Pro simulaci HNL rozpadů byly využity již existující HEPEVT zdrojové soubory.

### 5.2 Energetická spektra částic pokračujících ve směru primárního svazku

První provedené simulace, jejichž výsledky jsou zobrazeny na Obrázek 9 a Obrázek 10, ukazují energii, již by po vzniku mohly mít částice  $\chi$  a portálové částice  $V_\chi$ , které pokračují

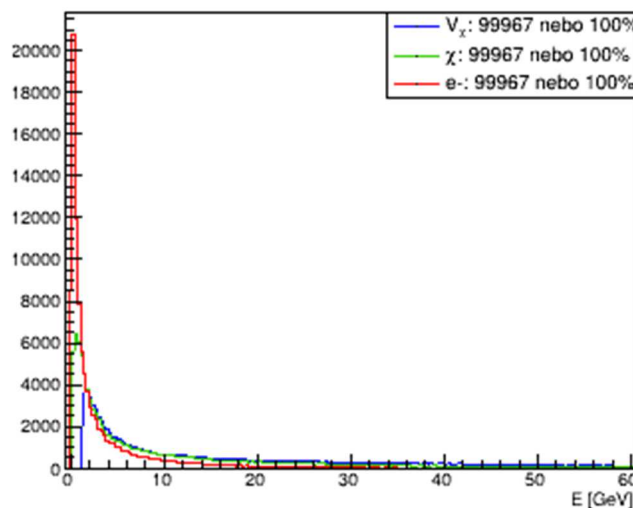
v dopředném směru vzhledem k primárnímu svazku, a rozptýlené elektrony. V grafech je energie částic na ose x a počet částic s danou energií na ose y.

Pro simulaci, jejíž výstup je na Obrázek 9, byly zvoleny hmotnosti částic  $V_\chi$  a  $\chi$  v poměru 3:1, což odpovídá nejčastěji používanému poměru hmot a naplňuje základní podmínku rozpadu (součet hmot produktů nepřevyšuje hmotnost mateřské částice). Zároveň také jejich hodnoty odpovídají současným vědeckým hypotézám (42). Z Obrázek 9 vyplývá, že drtivá většina všech druhů zkoumaných částic dosahuje energií pod hodnotou 5 GeV a že odražené elektrony mají ostré energetické spektrum. Při porovnání obou grafů je zřejmé, že při uvažované vyšší hmotnosti částic  $\chi$  a  $V_\chi$  jsou tyto částice produkovány s vyšší energií.



Obrázek 9: Energetické spektrum částic při zvolených hmotnostech částic  $\chi$  a  $V_\chi$ . Pravý graf odpovídá zvoleným hmotnostem 30 MeV pro  $V_\chi$  a 10 MeV pro  $\chi$  a levý pro hmotnosti 1200 MeV a 400 MeV.

**$V_\chi$  (500 MeV) a  $\chi$  (10 MeV)**  
Energetické spektrum v  $0 \leq \theta \leq 180^\circ$



Obrázek 10: Energetické spektrum částic při zvolených hmotnostech částic  $\chi$  a  $V_\chi$ . Graf odpovídá zvoleným hmotnostem 500 MeV pro  $V_\chi$  a 10 MeV pro  $\chi$ .

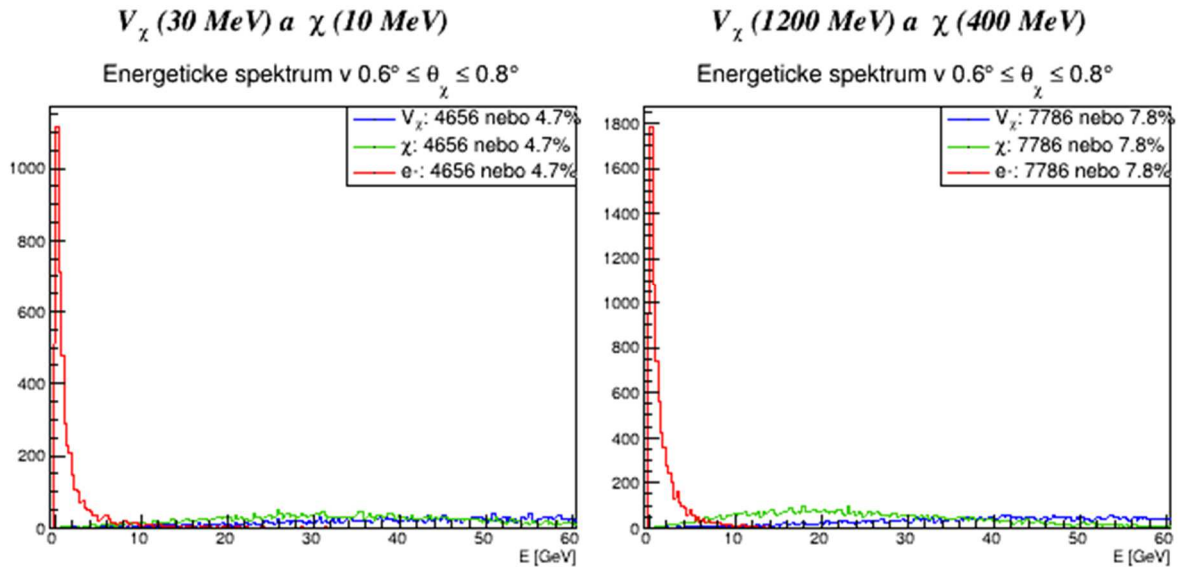
Výsledky další simulace jsou ukázány na Obrázek 10. Pro tuto simulaci byl zvolen podíl hmotností o dost větší než v předchozích případech. Na první pohled je vidět, že rozptýlené elektrony mají ostré energetické spektrum.

### 5.3 Energetická spektra částic pokračujících ve směru do Blízkeho detektoru

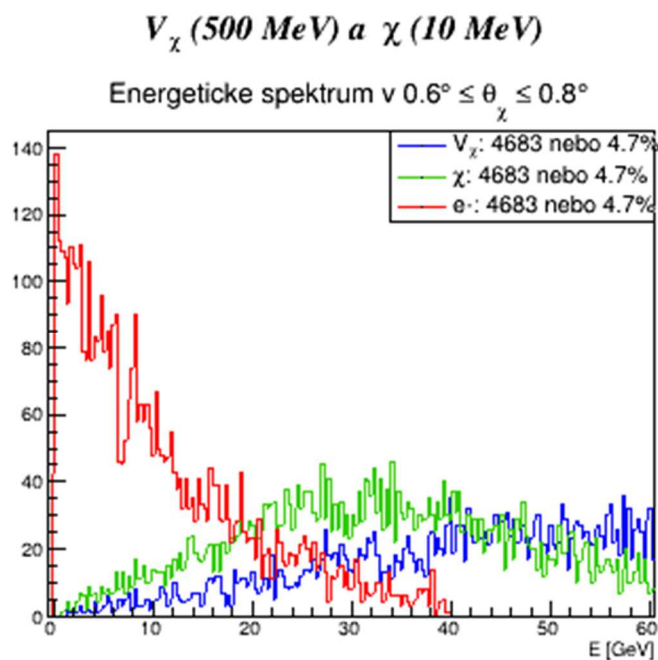
Výsledky simulací, které jsou zobrazeny na Obrázek 11 a Obrázek 12, ukazují energie, jež by po vzniku mohly mít částice  $\chi$  a portálové částice  $V_\chi$  pokračující ve směru, který je přivede do Blízkeho detektoru, a rozptýlené elektrony. V grafech je energie částic na ose x a počet částic s danou energií na ose y.

Z Obrázek 11 plyne, že elektrony, do kterých LDM v detektoru narazí, nemají až na výjimky energii větší než 10 GeV. To platí bez ohledu na zadané hmotnosti. Na grafu popisujícím vyšší zvolené hmotnosti je vidět užší a vyšší pík produkce elektronů než na druhém grafu. Také si lze všimnout, že při vyšších zadaných hmotnostech dolétne do detektoru více částic  $\chi$  a  $V_\chi$ . V grafu popisující větší hmotnosti je ukázáno, že zachycené částice  $\chi$  dosahují většinou energií v rozmezí 10 a 30 GeV.

Energetické spektrum zachycené na Obrázek 12 se od spekter na Obrázek 11 výrazně liší. Elektrony v tomto případě dosahují energií až 40 GeV a nevykazují tak vysoké maximum v oblastech nízkých energií. Lze si povšimnout, že energie, kterých dosahují částice  $\chi$  a  $V_\chi$ , jsou oproti oběma grafům na Obrázek 11 vyšší. Dále podle Obrázek 12 je patrné, že do detektoru letí zejména vysokoenergetické částice.



Obrázek 11: Energetické spektrum částic, které směřují do ND při zvolených hmotnostech částic  $\chi$  a  $V_\chi$ . Pravý graf odpovídá zvoleným hmotnostem 30 MeV pro  $V_\chi$  a 10 MeV pro  $\chi$  a levý pro hmotnosti 1200 MeV a 400 MeV.



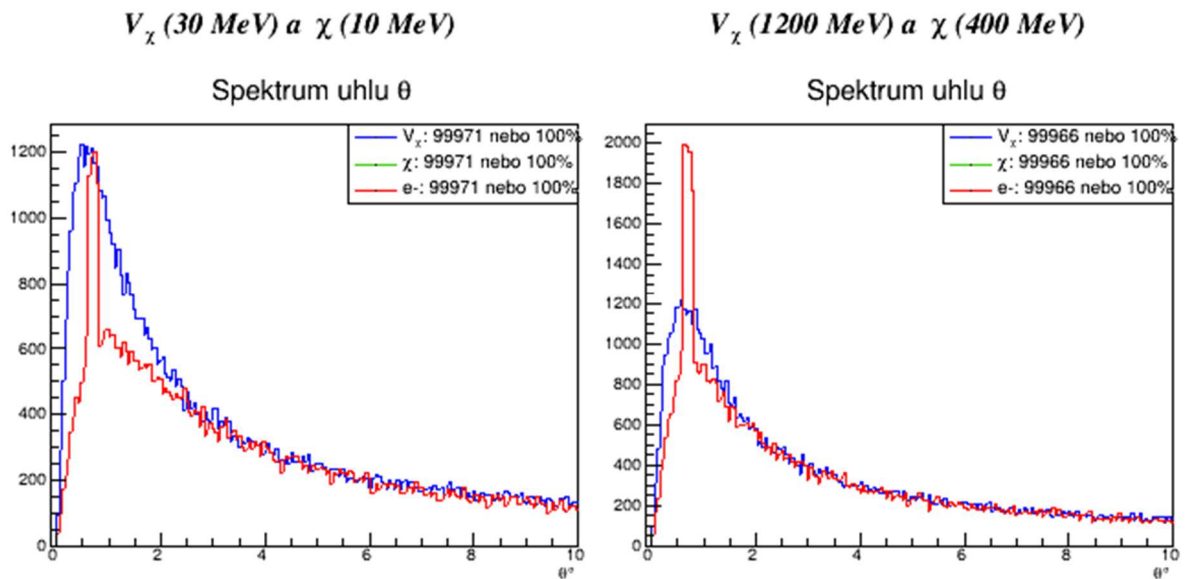
Obrázek 12: Energetické spektrum částic, které směřují do ND při zvolených hmotnostech částic  $\chi$  a  $V_\chi$ . Graf odpovídá zvoleným hmotnostem 500 MeV pro  $V_\chi$  a 10 MeV pro  $\chi$ .



## 5.4 Úhlové rozložení částic vznikajících při ostřelování terčíku

Provedené simulace, jejichž výsledky jsou zobrazeny na Obrázek 13 a Obrázek 14, ukazují úhlové rozdělení, jež by po vzniku mohly mít portálové částice  $V_\chi$ , které pokračují v dopředném směru vzhledem k primárnímu svazku, a rozptýlené elektrony. Nevyskytují se zde částice  $\chi$ , jelikož jejich produkce je navázána na rozpad mediátorových částic  $V_\chi$ . V grafech je odchylka úhlu od směru primárního svazku na ose x a počet částic s danou energií na ose y.

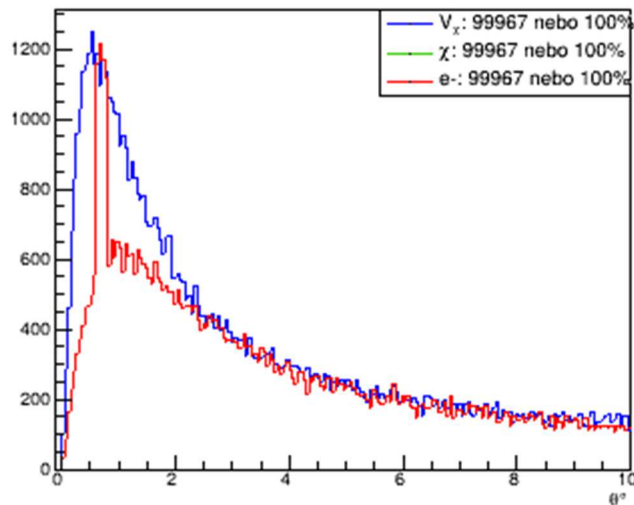
Na Obrázek 13 i Obrázek 14 vidíme, že rozdílná volba hmotnosti částic  $V_\chi$  a  $\chi$  neměla pozorovatelný vliv na úhel, pod kterým částice  $V_\chi$  vylétají z terčíku. Největší počet těchto částic vylétává v malých úhlech, tedy téměř souběžně se směrem původních protonů. Velmi úzké maximum úhlového rozdělení elektromagnetických spršek, které jsou buzeny vychýlenými elektrony, odpovídá směru do detektoru, což je způsobeno téměř ideálními podmínkami pro jejich vznik v detektoru.



Obrázek 13: Úhlové rozdělení částic při zvolených hmotnostech částic  $\chi$  a  $V_\chi$ . Pravý graf odpovídá zvoleným hmotnostem 30 MeV pro  $V_\chi$  a 10 MeV pro  $\chi$  a levý pro hmotnosti 1200 MeV a 400 MeV.

## $V_\chi$ (500 MeV) a $\chi$ (10 MeV)

### Spektrum uhlu $\theta$



Obrázek 14: Úhlové rozdělení částic při zvolených hmotnostech částic  $\chi$  a  $V_\chi$ .

## 5.5 Simulace podoby výstupu z detektoru při detekci exotických částic

V této části je předvedeno, jak by vypadal výstup z Blízkého detektoru při zachycení interakce lehké temné hmoty reprezentované částicí  $\chi$  a rozpadu těžkého neutrálního leptonu. K této simulaci byla využita získaná, výše prezentovaná data a nástroj EventDisplay (standardní součást SW NOvA), který nasimulovaná data zobrazil tak, jako by je naměřil sám detektor. Tato simulace byla vytvořena pro interakci částice temné hmoty  $\chi$  o hmotnosti 10 MeV a rozpad těžkého neutrálního leptonu o hmotnosti 600 MeV.

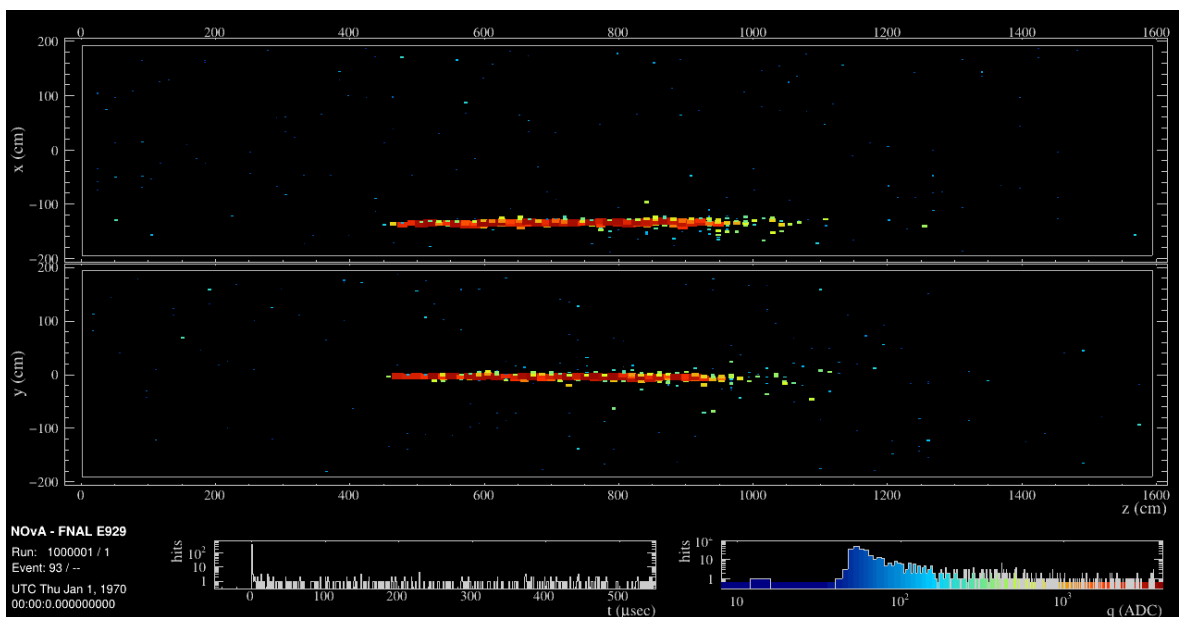
Všechny následující obrázky (Obrázek 15, Obrázek 16, Obrázek 17, Obrázek 18, Obrázek 19, Obrázek 20) mají stejnou strukturu – vrchní část obrázku zobrazuje pohled na detektor shora, centrální pohled z boku. V dolní části obrázku vlevo je vyznačen čas detekce v jednotlivých buňkách detektoru a vpravo intenzita odezvy v jednotlivých buňkách.

Na Obrázek 15, Obrázek 16 a Obrázek 17 vidíme interakci částic lehké temné hmoty, které v detektoru interagovaly prostřednictvím svých vektorových zprostředkovatelů za vzniku vždy jedné elektromagnetické spršky – jde tedy o interakci, kdy jedna částice předá energii druhé částici. Tyto částice deponovaly svou energii na dráhách dlouhých až 6 m.

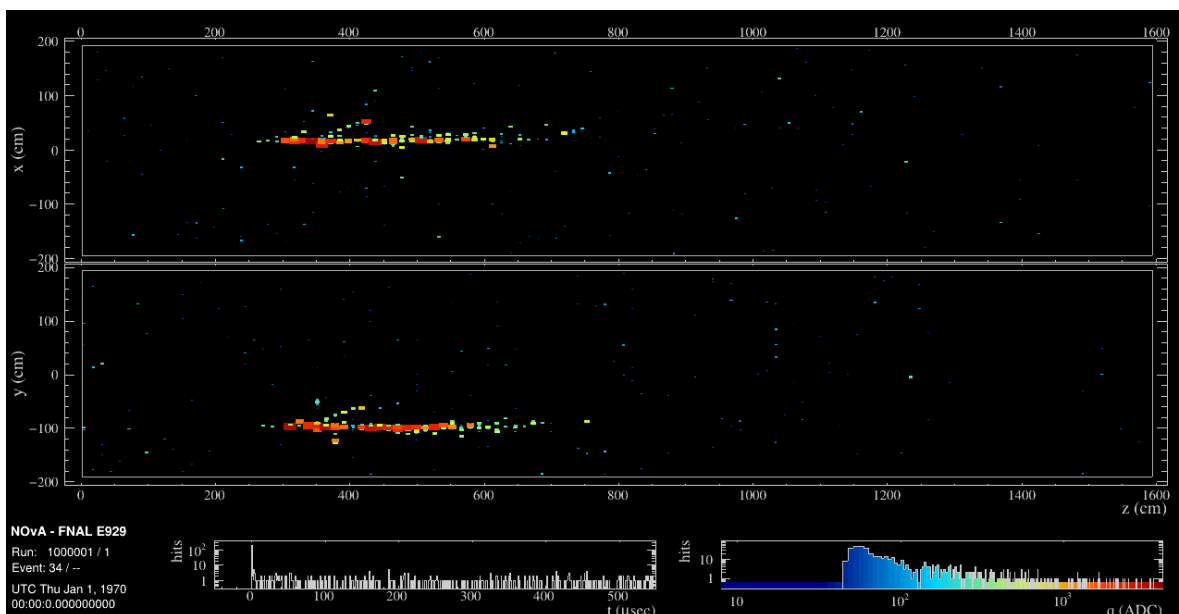
Na Obrázek 18, Obrázek 19 a Obrázek 20 vidíme rozpad těžkého neutrálního leptonu v detektoru. Oba HNL vytvořily při svém rozpadu několik částic, které deponovaly svou energii na dráhách dlouhých okolo 4 m. Na rozdíl od částic  $\chi$  se HNL rozpadají na 2 anebo

více částic. Na obou obrázcích jsou jasně vidět vyznačené dráhy, kde částice zanechávaly svou energii.

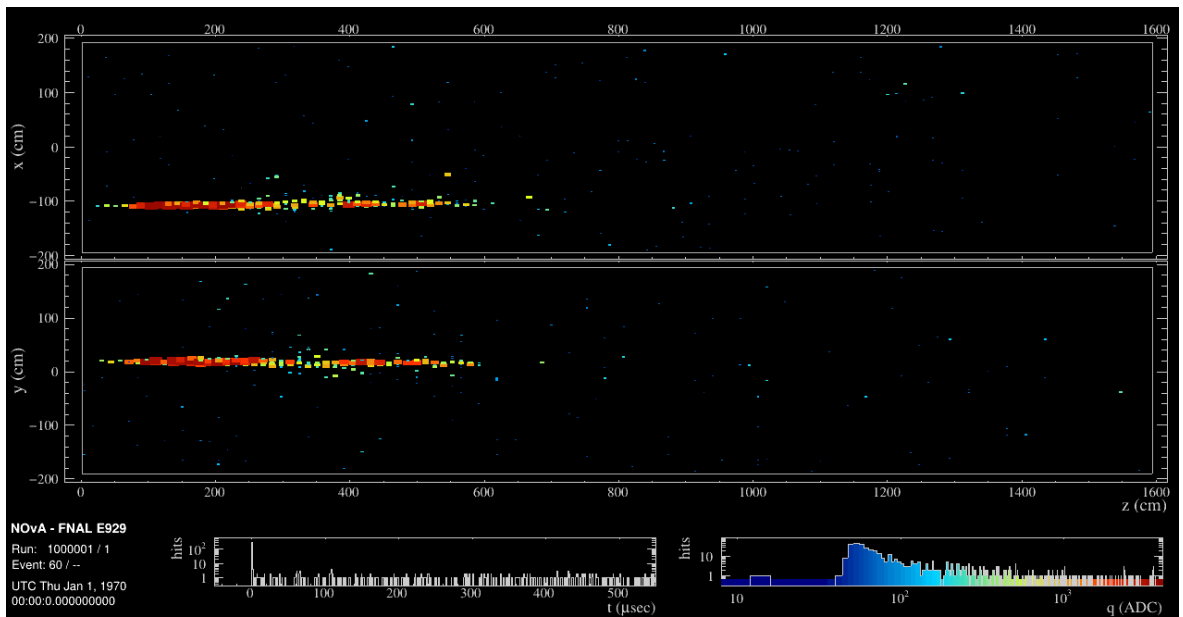
Při srovnání výstupů z detektoru na obrázcích pro interakci částice  $\chi$  a rozpad HNL je jasně vidět rozdíl mezi oběma vzniklými signály. Dráha, která vznikla po interakci částice lehké temné hmoty, vždy kopíruje původní směr této částice. Úhel, pod kterým se od sebe vzdalují částice vzniklé z rozpadu těžkého neutrálního leptonu, je dán kinetickou energií HNL. Při nižších hodnotách této veličiny jsou úhly větší, a tak i lépe patrné v detektoru. Tuto skutečnost lze využít pro efektivní oddělení signálu při identifikaci rozpadů HNL v detektoru.



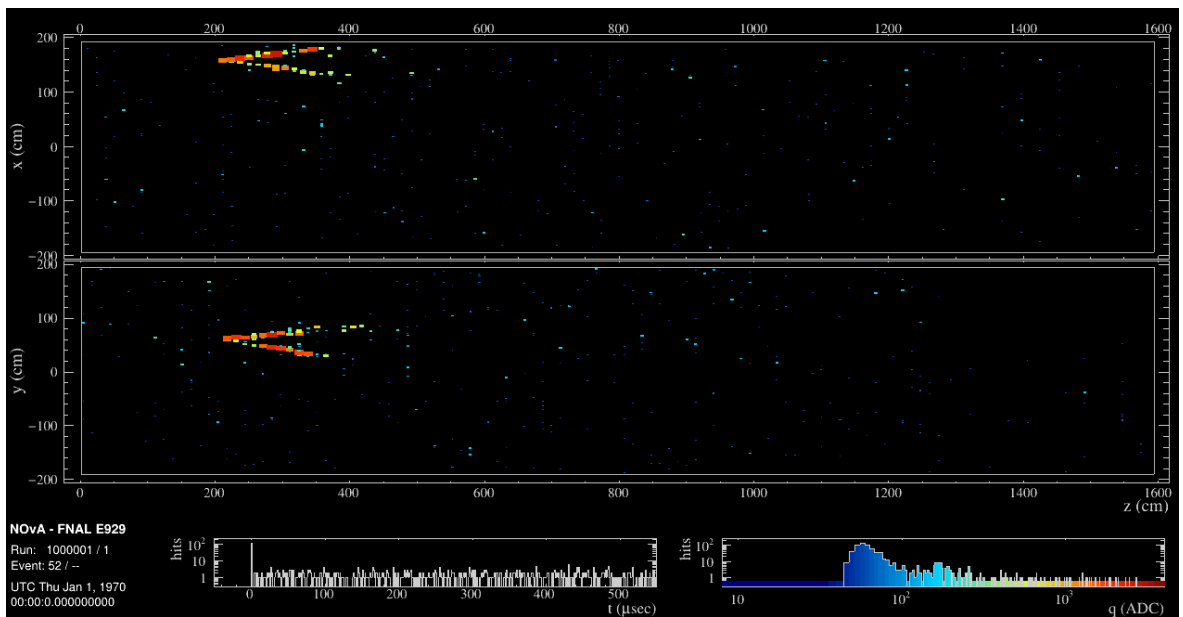
Obrázek 15: Simulace interakce hypotetické částice  $\chi$  v Blížkém detektoru.



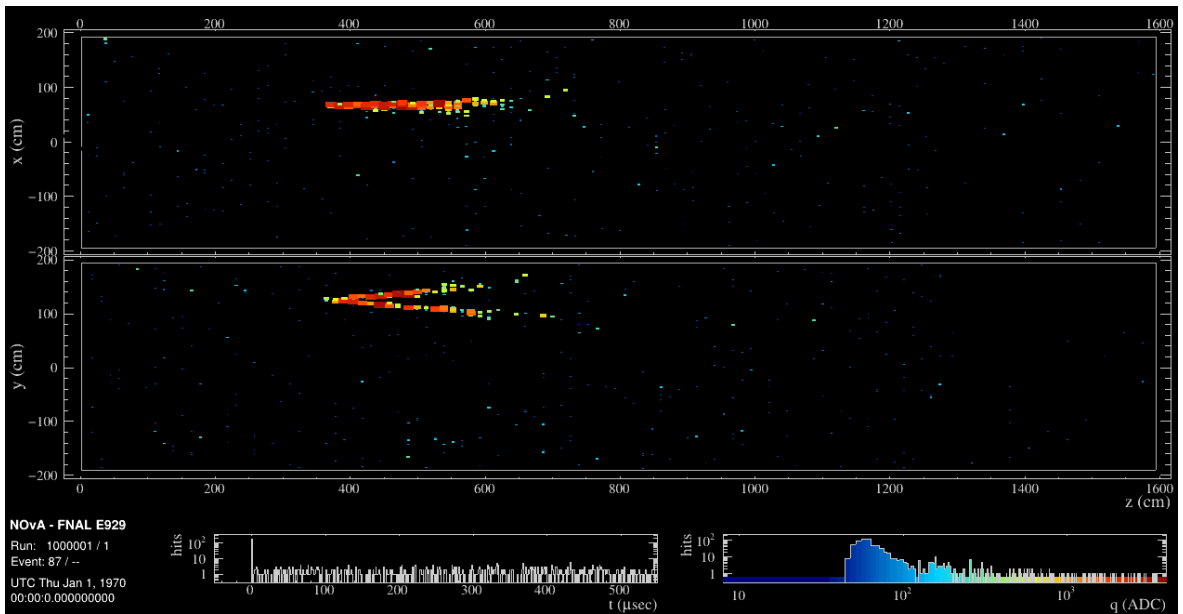
Obrázek 16: Simulace interakce hypotetické částice  $\chi$  v Blížkém detektoru.



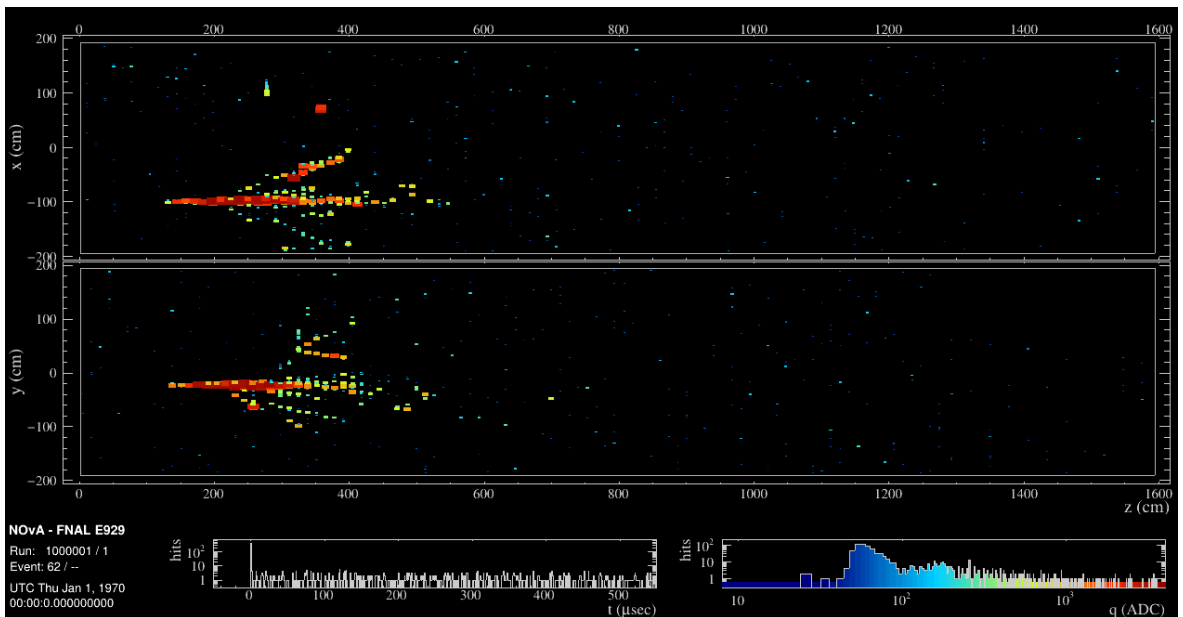
Obrázek 17: Simulace interakce hypotetické částice  $\chi$  v Blízkém detektoru.



Obrázek 18: Simulace rozpadu těžkého neutrálního leptonu v Blízkém detektoru.



Obrázek 19: Simulace rozpadu těžkého neutrálního leptonu v Blízkém detektoru.



Obrázek 20: Simulace rozpadu těžkého neutrálního leptonu v Blízkém detektoru.

## Závěr

Hlavním cílem této práce bylo seznámit se se základními pojmy v oblasti hledání částic temné hmoty. To zahrnovalo nastudování a pochopení základních myšlenek modelů temné hmoty, srovnání přístupů k pátrání na různorodých experimentech, které probíhají po celém světě, a zevrubné seznámení s neutrinovým experimentem NOvA, v rámci kterého vědci pátrají po temné hmotě. Potenciál neutrinových experimentů ve zkoumání temné hmoty se v budoucnu ještě zvýší experimentem DUNE, který díky svým technologicky pokročilým detektorům a výpočetní technice bude mít vynikající předpoklady pro velmi přesná měření, která jsou nutnou podmínkou při hledání částic temné hmoty.

Dalším cílem této práce bylo vytvoření simulace detekce temné hmoty v Blízkém detektoru experimentu NOvA. K tomuto účelu byl použit program PYTHIA, který metodou Monte Carlo generuje srážky a interakce částic. Tato náhodná data poté reprezentují nahodilost interakčních procesů ve fyzice vysokých energií. Data, která byla vytvořena programem PYTHIA, byla zpracována pomocí programu ROOT, který byl právě za tímto účelem vytvořen v CERN. Simulovaná data byla převedena do formátu, který odpovídá podobě dat, jež jsou produkována samotným detekčním systémem Blízkého detektoru experimentu NOvA. Tato data byla pomocí nástroje EventDisplay převedena na vizuální výstup, který by byl získán, pokud by zde skutečně byla částice temné hmoty detekována.

Výše popsaná simulace byla provedena pro částici temné hmoty  $\chi$ , která může v detektoru interagovat přes svého vektorového prostředníka  $V_\chi$ . Protože v současné době není známo mnoho o hmotnosti těchto částic, byly provedeny simulace s různě zvolenými hodnotami tohoto parametru. Cílem těchto simulací bylo zjistit případné rozdíly v úhlových a energetických spektrech, které by mohly být vyvolány značnými rozdíly v uvažovaných hmotnostech. Ukázalo se, že rozdíly v energiích částic, které by mohly být detekovány, nezávisí ani tak na hodnotách hmotností částic  $\chi$  a  $V_\chi$ , jako spíše na poměru mezi nimi. Výsledná vizualizovaná podoba interakce částice  $\chi$ , která se řadí mezi částice lehké temné hmoty, v detektoru, byla dále porovnána s podobou signálu, který vzniká v detektoru rozpadem těžkého neutrálního leptonu. Toto srovnání ukázalo, v čem se detekce těchto kandidátů na částici temné hmoty liší.

Z výsledků této práce tedy plyne, že na Blízkém detektoru experimentu NOvA lze účinně pátrat po částicích temné hmoty, ať už se jedná o částice lehké temné hmoty  $\chi$  s hmotností v rozsahu jednotek až stovek MeV, tak i o těžké neutrální leptony s hmotností činící i stovky MeV.

## 6 Bibliografie

1. *Book of Instructions in the Elements of the Art of Astrology*. **al-Biruni, Abu Rayhan**. Londýn : Luzac & co. ; Do angličtiny přeložil R. R. Wright a M. A. Edin, 1934.
2. **Bessel, Friederich**. On the variations of the proper motions of Procyon and Sirius. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1844, Sv. 6, 1844MNRAS...6R.136B.
3. **NASA**. Solar system exploration. *Web NASA*. [Online] 26. 6 2019. [Citace: 16. 11 2020.] [https://solarsystem.nasa.gov/planets/neptune/exploration/?page=0&per\\_page=10&order=launch\\_date+desc%2Ctitle+asc&search=&tags=Neptune&category=33](https://solarsystem.nasa.gov/planets/neptune/exploration/?page=0&per_page=10&order=launch_date+desc%2Ctitle+asc&search=&tags=Neptune&category=33).
4. **Bertone, Gianfranco a Hooper, Dan**. *Web Fermi National Accelerator Laboratory*. [Online] 26. 5 2016. [Citace: 16. 11 2020.] <https://lss.fnal.gov/archive/2016/pub/fermilab-pub-16-157-a.pdf>. FERMILAB-PUB-16-157-A.
5. *Baltimore lectures on molecular dynamics and the wave theory of light*. **Thomson, William, alias Lord Kelvin**. OL5962000W , London : C. J. Clay and sons, Publication agency of the Johns Hopkins university, 1904.
6. *The Milky Way and the Theory of Gases*. **Poincaré, Henri Jules**. 1906PA.....14..475P, 1906, Sv. 14.
7. *The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems*. **Oort, Jan Henrik**. 1932BAN.....6..249O, místo neznámé : North-Holland Publishing Company, 1932, Sv. 6.
8. **Wolf, Maximilian**. *Vierteljahres schr. Astron. Ges.* 49. 1914.
9. **Lundmark, Knut Emil**. Über die Bestimmung der Entfernungen, Dimensionen, Massen und Dichtigkeit für die nächstgelegenen anagalactischen Sternsysteme. *Meddelanden fran Lunds Astronomiska Observatorium*. 1, 1930, Sv. 125, 1930MeLuF.125....1L.
10. **Zwicky, Fritz**. Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln. *Helvetica Physica Acta*. 1933, 1937ApJ....86..217Z.
11. **Holmberg, Erik**. On the clustering tendencies among the nebulae. *Astrophysical journal*. 1940, 1940CMWCI.633....1H.
12. **Zwicky, Fritz**. On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae. *Astrophysical Journal*. 1937, 1937ApJ....86..217Z.

13. **Rubin, Vera a Ford, William Kent.** Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions. *Astrophysical Journal*. 159, 1970, 1970ApJ...159..379R.
14. **Roberts, Morton a Whitehurst, Robert Neal.** High-Velocity Neutral Hydrogen in the Central Region of the Andromeda Galaxy. *Astrophysical Journal*. 175, 1972, 1972ApJ...175..347W.
15. **Rubin, Vera a Dunlap, Janice.** M31. *Physics today*. [Online] 2016. [Citace: 13. 2 2021.] <https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/1.2435662>.
16. **Ostriker, Jeremiah, Peebles, Phillip James a Yahil, Amos.** The Size and Mass of Galaxies, and the Mass of the Universe. *Astrophysical Journal*. 193, 1974, 1974ApJ...193L...10.
17. **Einasto, Jaan, Kaasik, Ants a Saar, Enn.** Dynamic evidence on massive coronas of galaxies. *Nature*. 250, 1974, 1974Natur.250..309E.
18. **Faber, Sandra a Gallagher, John.** Masses and Mass-To-Light Ratios of Galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 17, 1979, 1979ARA&A..17..135F.
19. **Clowe, Douglas, Gonzalez, Anthony a Markevitch, Maxim.** Weak-Lensing Mass Reconstruction of the Interacting Cluster 1E 0657-558: Direct Evidence for the Existence of Dark Matter. *The Astrophysical Journal*. 604, 2004, arXiv:astro-ph/0312273.
20. **Parafitz, Danuta, Kneib, Jean-Paul a Morandi, Andrea.** The Bullet cluster at its best: weighing stars, gas and dark matter. *Astronomy & Astrophysics*. 594, 2016, arXiv:1209.0384.
21. **Argüelles, Carlos, Díaz, Manuel a Krut, Andreas.** On the formation and stability of fermionic dark matter haloes in a cosmological framework. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 502, 2020, 10.1093/mnras/staa3986.
22. *Dark Sectors 2016 Workshop: Community Report*. **Collective**. Menlo Park : autor neznámý, 2016. arXiv:1608.08632.
23. **Zeldovič, Jakov Borisovič a Gerštejn, Semjon Solomonovič.** Rest Mass of Muonic Neutrino and Cosmology. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*. 4, 1966, 1966JETPL...4..120G.
24. **Szalay, Alexander Sandor a Marx, György.** Neutrino rest mass from cosmology. *Astronomy and Astrophysics*. 49, 1976, 1976A&A....49..437S.



25. **Zeldovič, Jakov Borisovič, a další.** Astrophysical implications of the neutrino rest mass. II - The density-perturbation spectrum and small-scale fluctuations in the microwave background. III - Nonlinear growth of perturbations and the missing mass. *Pisma v Astronomicheskii Zhurnal*. 6, 1980, 1980PAZh....6..457D.
26. **Peebles, Phillip James.** Primeval adiabatic perturbations - Effect of massive neutrinos. *Astrophysical Journal*. 258, 1982, 1982ApJ...258..415P.
27. **White, Simon David, Frenk, Carlos Silvestre a Davis, Marc.** Clustering in a neutrino-dominated universe. *Astrophysical Journal*. 274, 1983, 1983ApJ...274L...1W.
28. **Dodelson, Scott a Widrow, Lawrence Marc.** Sterile Neutrinos as Dark Matter. *Physics review letters*. 72, 1994, arXiv:hep-ph/9303287.
29. **Kusenko, Alexander.** Sterile neutrinos: The dark side of the light fermions. *Physics Reports*. 481, 2009, 2009PhR...481....1K.
30. **Coloma, Pilar, a další.** GeV-scale neutrinos: interactions with mesons and DUNE sensitivity. *The European Physical Journal C*. 81, 2020, arXiv:2007.03701v3, FERMILAB-PUB-20-269-ND.
31. **Cottin, Giovanna, a další.** Heavy neutral leptons in effective field theory and the high-luminosity LHC. 2021, arXiv:2105.13851v1.
32. **Vit, Martina.** Search for heavy neutral lepton at CMS. *ICHEP2020: 40th International Conference on High Energy Physics*. 2020, [https://indico.cern.ch/event/868940/contributions/3815922/attachments/2082383/3497891/HNL\\_at\\_CMS\\_MVit.pdf](https://indico.cern.ch/event/868940/contributions/3815922/attachments/2082383/3497891/HNL_at_CMS_MVit.pdf).
33. **Bonivento, Walter, a další.** Proposal to Search for Heavy Neutral Leptons at the SPS. 2013, arXiv:1310.1762v1.
34. **Ballet, Peter, Boschi, Tommaso a Pascoli, Silvia.** Heavy Neutral Leptons from low-scale seesaws at the DUNE Near Detector. *Journal of High Energy Physics*. 2020, arXiv:1905.00284v2.
35. **CMS collaboration.** Search for heavy neutral leptons in events with three charged leptons in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV. *Physical Review Letters*. 120, 2018, arXiv:1802.02965v2.
36. **LHCb collaboration.** Search for heavy neutral leptons in  $W^+ \rightarrow \mu^+ \mu^+ \text{jet}$  decays. *European Physical Journal C*. 81, 2021, arXiv:2011.05263v2.

37. **ATLAS collaboration.** Search for heavy neutral leptons in decays of  $W$  bosons produced in 13 TeV  $p\bar{p}$  collisions using prompt and displaced signatures with the ATLAS detector. *Journal of High Energy Physics*. 265, 2020, arXiv:1905.09787v2.
38. **Kelly, Kevin J. a Machado, Pedro A. N.** The MicroBooNE Experiment, the NuMI Absorber, and Heavy Neutral Leptons. 2021, arXiv:2106.06548v1, FERMILAB-PUB-21-277-T.
39. **Coloma, Pilar, a další.** New constraints on Heavy Neutral Leptons from Super-Kamiokande data. *The European Physical Journal C*. 80, 2020, arXiv:1911.09129v2.
40. **Hatzikoutelis, Athans a De Roeck, Albert.** Heavy Neutral Leptons at Accelerator Neutrino Experiments. *Neutrino Frontier Beyond-Standard-Model (BSM)*. 2020, [https://indico.fnal.gov/event/44987/contributions/197046/attachments/134489/166477/Snmss\\_meeting\\_091720\\_v3.pdf](https://indico.fnal.gov/event/44987/contributions/197046/attachments/134489/166477/Snmss_meeting_091720_v3.pdf).
41. **MicroBooNE Collaboration.** Search for heavy neutral leptons decaying into muon-pion pairs in the MicroBooNE. *Physical Review D*. 101, 2020, arXiv:1911.10545v2 .
42. **Jediný, Filip, a další.** Searching for Lightweight Dark Matter in NOvA Near Detector. *The 15th International Conference on Flavor Physics & CP Violation*. 2017, 10.22323/1.304.0056.
43. **Peccei, Roberto Daniele a Quinová, Helen Rhoda Arnold.** CP conservation in the presence of pseudoparticles. *Physical Review Letters*. 38, 1977, 1977PhRvL..38.1440P.
44. **Sikivie, Pierre.** Dark matter axions. *Crossing the Boundaries: Gauge Dynamics at Strong Coupling*. 2019, arXiv:0909.0949.
45. **Tongyan, Lin.** TASI lectures on dark matter models and direct detection. *TASI*. 2019, arXiv:1904.07915.
46. **Duffy, Leanne Delma a van Bibber, Karl.** Axions as dark matter particles. *New Journal of Physics*. 11, 2019, arXiv:0904.3346.
47. **Zavattini, Emilio, Zavattini, Guido a Ruoso, Giovanni.** Experimental Observation of Optical Rotation Generated in Vacuum by a Magnetic Field. 96, 2006, arXiv:hep-ex/0507107.
48. **Zavattini, Emilio, a další.** New PVLAS results and limits on magnetically induced optical rotation and ellipticity in vacuum. *Physical Review D*. 77, 2008, arXiv:0706.3419.

49. **Beyer, Konstantin, a další.** Axion detection through resonant photon-photon collisions. *Physical Review D*. 101, 2020, arXiv:2001.03392.
50. **Martin, Stephen Patrick.** A Supersymmetry Primer. 2016, arXiv:hep-ph/9709356.
51. **Jungman, Gerard, Kamionkowski, Marc a Griest, Kim.** Supersymmetric Dark Matter. *Physics Reports*. 267, 1996, 1996PhR...267..195J.
52. **Bertone, Gianfranco, Hooper, Dan a Silk, Joseph.** Particle Dark Matter: Evidence, Candidates and Constraints. *Physics Reports*. 2004, arXiv:hep-ph/0404175.
53. **Pagels, Heinz a Prismač, Joel R.** Supersymmetry, cosmology, and new physics at teraelectronvolt energies . *Physical Review Letters*. 48, 1982, 1982PhRvL..48..223P.
54. **Ellis, Jonathan Richard, Kim, Jih E. a Nanopoulos, Dimitri.** Cosmological gravitino regeneration and decay. *Physics Letters B*. 145, 1984, 1984PhLB..145..181E.
55. **Buchmüller, Wilfried.** Gravitino Dark Matter. 2009, arXiv:0910.1870.
56. **Steigman, Gary a Turner, Michael S.** Cosmological constraints on the properties of weakly interacting massive particles. *Nuclear Physics B*. 253, 1984, FERMILAB-PUB-84-110-A.
57. **Gelmini, Graciela B.** Light weakly interacting massive particles. *Reports on Progress in Physics*. 80, 2016, arXiv:1612.09137.
58. **Roszkowski, Leszek, Sessolo, Enrico Maria a Trojanowski, Sebastian.** WIMP dark matter candidates and searches – current status and future prospects. *Reports on Progress in Physics*. 81, 2017, arXiv:1707.06277v2.
59. **Primack, Joel Robert, Seckel, David a Sadoulet, Bernard.** Detection of Cosmic Dark Matter. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*. 38, 1988, 1988ARNPS..38..751P.
60. **The Fermi-LAT.** Dark Matter Constraints from Observations of 25 Milky Way Satellite Galaxies with the Fermi Large Area Telescope. *Physical Review D*. 2014, arXiv:1310.0828.
61. *Dark matter searches with the IceCube Upgrade.* **Baur, Sebastian.** International Cosmic Ray Conference : Madison, 2019. arXiv:1908.08236.
62. **Buchmueller, Oliver, Doglioni, Caterina a Wang, Lian-Tao.** Search for dark matter at colliders. *Nature physics*. 2017, arXiv:1912.12739 .
63. *The XENON10 WIMP Search Experiment at the Gran Sasso Underground Laboratory.* **Baudis, Laura.** Paříž : autor neznámý, 2007. arXiv:astro-ph/0703183.

64. **Terning, John.** A new candidate for dark matter and a way to detect it. místo neznámé : <https://phys.org/news/2019-06-candidate-dark.html>, 2019.
65. **XENON collaboration.** Projected WIMP Sensitivity of the XENONnT Dark Matter Experiment. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics.* 11, 2020, arXiv:2007.08796v2.
66. **Xenon collaboration.** The XENON1T Dark Matter Experiment. *The European Physical Journal C.* 77, 2017, arXiv:1708.07051v1.
67. **XENON collaboration.** Excess Electronic Recoil Events in XENON1T. *Physical Review D.* 102, 2020, arXiv:2006.09721v3.
68. **Volta, Giovanni.** Results from the XENON1T experiment. *Swiss Physics Society Annual Meeting.* 2019, [https://indico.cern.ch/event/801048/contributions/3479560/attachments/1897783/3131532/Results\\_from\\_the\\_XENON1T\\_experiment.pdf](https://indico.cern.ch/event/801048/contributions/3479560/attachments/1897783/3131532/Results_from_the_XENON1T_experiment.pdf).
69. **LZ collaboration.** Enhancing the sensitivity of the LUX-ZEPLIN (LZ) dark matter experiment to low energy signals. 2021, arXiv:2101.08753v1.
70. —. The LUX-ZEPLIN (LZ) Experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* 953, 2019, arXiv:1910.09124v2.
71. **Strauss, Raimund, a další.** The CRESST-III low-mass WIMP detector. *Journal of Physics: Conference Series.* 718, 2016, DOI:10.1088/1742-6596/718/4/042048.
72. **Mancuso, Michele, a další.** Searches for Light Dark Matter with the CRESST-III Experiment. *Journal of Low Temperature Physics.* 199, 2020, 2020JLTP..199..547M.
73. **CRESST collaboration.** First results from the CRESST-III low-mass dark matter program. *Physical Review D.* 100, 2019, arXiv:1904.00498v1.
74. **SuperCDMS Collaboration.** SuperCDMS SNOLAB Low-Mass Detectors: Ultra-Sensitive Phonon Calorimeters for a Sub-GeV Dark Matter Search. *proceedings of the 38th International Conference on High Energy Physics (ICHEP).* 2016, arXiv:1611.04083v1.
75. **SuperCDMS collaboration.** Projected Sensitivity of the SuperCDMS SNOLAB experiment. *Physical Review D.* 95, 2017, arXiv:1610.00006v1.

76. **Neog, Himangshu , a další.** Phonon-mediated High-voltage Detector with Background Rejection for Low-mass Dark Matter and Reactor Coherent Neutrino Scattering Experiments. 2020, arXiv:2006.13139v1.
77. **SuperCDMS collaboration.** SuperCDMS SNOLAB - Status and Plans. *Journal of Physics: Conference Series*. 1342, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1342/1/012077.
78. **Majorovits, Bela.** MADMAX: A new road to axion dark matter detection. *Journal of Physics: Conference Series*. 1342, 2020, doi:10.1088/1742-6596/1342/1/012098.
79. **MADMAX collaboration.** MADMAX Status Report. 2020, arXiv:2003.10894v2.
80.  **Egge, Jacob, a další.** A First Proof Of Principle Booster Setup For The MADMAX Dielectric Haloscope. *The European Physical Journal C*. 80, 2020, arXiv:2001.04363v2.
81. **MADMAX collaboration.** A new experimental approach to probe QCD axion dark matter in the mass range above 40  $\mu\text{eV}$ . *The European Physical Journal C*. 79, 2019, arXiv:1901.07401v2.
82. **ANTARES collaboration a IceCube collaboration.** Combined search for neutrinos from dark matter self-annihilation in the Galactic Centre with ANTARES and IceCube. *Physical Review D*. 102, 2020, arXiv:2003.06614v2.
83. **IceCube collaboration.** The IceCube Neutrino Observatory: Instrumentation and Online Systems. *Journal of Instrumentation*. 12, 2017, arXiv:1612.05093v2.
84. **Zornoza, Juan de Dios a Zúñiga, Juan.** The ANTARES neutrino telescope. *Proceedings of the SEA conference*. Valencia, 2012, arXiv:1209.6480v2.
85. **CHARM II collaboration.** Precision measurement of electroweak parameters from the scattering of muon-neutrinos on electrons . *Physics Letters B*. 335, 1994, DOI: 10.1016/0370-2693(94)91421-4.
86. **Panda collaboration.** The PANDA Experiment. *Journal of Physics: Conference Series*. 599, 2015, doi:10.1088/1742-6596/599/1/012001.
87. **Seiden, Abraham.** D0–D'0 Mixing at BaBar. *Proceedings of the CHARM 2007 Workshop*. 2007, arXiv:0710.1211v1.
88. **Drásal, Zbyněk.** CP violation measurements in B mesons at Belle. *Journal of Physics Conference Series*. 556, 2014, doi:10.1088/1742-6596/556/1/012037.

89. **KLOE collaboration.** Recent KLOE Results on the Search for Dark Forces. *International Journal of Modern Physics: Conference Series.* 35, 2014, DOI: 10.1142/S2010194514603937.
90. **Daci, Nadir a CMS collaboration.** Dark matter searches in CMS. *Journal of Physics: Conference Series.* 623, 2015, doi: 10.1088/1742-6596/623/1/012029.
91. **ATLAS collaboration.** Searches for displaced hadronic and lepton jets at ATLAS. *Proceedings of 38th International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2016).* 165, 2016, DOI: 10.22323/1.282.0165.
92. **LHCb collaboration.** Searches for Majorana neutrinos in B decays. *Physical Review D.* 85, 2012, arXiv:1201.5600v3.
93. —. Observation of a narrow pentaquark state,  $P_c(4312)^+$ , and of two-peak structure of the  $P_c(4450)^+$ . *Physical Review Letters.* 122, 2019, arXiv:1904.03947.
94. **Barnabei, Rita, a další.** First results from DAMA/LIBRA and the combined results with DAMA/NaI. *The European Physical Journal C.* 56, 2008, arXiv:0804.2741.
95. **Barnabei, Rita, Belli, Pierluigi a Bussolotti, Andrea.** First model independent results from DAMA/LIBRA—phase2. *Nuclear Physics and Atomic Energy.* 19, 2019, arXiv:1805.10486v2.
96. **Amaré, Julio, Cebrián, Susana a Oliván, Miguel Ángel.** Annual modulation results from three-year exposure of ANAIS-112. *Physical Review D.* 103, 2021, arXiv:2103.01175v2.
97. **Krishnaswamy, Marthi Ramaswamy, Menon, Mambillikalathil Govind Kumar a Narasimham, Vemuri Syamala.** Evidence for the production of new particles in cosmic ray experiments deep underground. *Pramana.* 5, 1975, DOI: 10.1007/BF02846033.
98. **Senthil, Thiru a Rajasekaran, Guruswamy .** Anomalous Kolar Events and Dark Matter Decay in Dwarf Spheroidal Galaxies. 2019, arXiv:1906.08951v1.
99. **Murthy, M. V. N. a Rajasekaran, Guruswamy.** Anomalous Kolar events revisited: Dark Matter? *Pramana – Journal of Physics.* 82, 2013, arXiv:1305.2715.
100. **Bian, Jianming .** *The NOvA Experiment: Overview and Status.* Santa Cruz : Meeting of the American Physical Society Division of Particles and Fields, 2013. arXiv:1309.7898.

101. **Pershey, Daniel.** A Measurement of  $\nu_e$  Appearance and  $\nu_\mu$  Disappearance Neutrino Oscillations with the NOvA Experiment. *California Institute of Technology, Pasadena, California*. 2018, ORCID: 0000-0003-4298-0337.
102. *The NOvA Technical Design Report. NOvA Collaboration . FERMILAB-DESIGN-2007-01*, 2007. DOI: 10.2172/935497.
103. **Sijith, Edayath.** Long-baseline Sterile Neutrino Searches in the NOvA Experiment. 2020, doi:10.2172/1767034.
104. **Adamson, Phil, a další.** The NuMI Neutrino Beam. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A*. 806, 2015, arXiv:1507.06690.
105. **researchgate.net.** *Rapid-Cycling Synchrotron for Multi-Megawatt Proton Facility at Fermilab*. 25.6.2021. [https://www.researchgate.net/figure/The-Fermilab-Proton-Complex-with-past-current-and-planned-particle-accelerator-systems\\_fig2\\_332109975](https://www.researchgate.net/figure/The-Fermilab-Proton-Complex-with-past-current-and-planned-particle-accelerator-systems_fig2_332109975).
106. **Kafka, Gareth.** A Search for Sterile Neutrinos at the NOvA Far Detector. 2016, DOI: 10.2172/1336405.
107. **Mufson, Stuart Lee, a další.** Liquid scintillator production for the NOvA experiment. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*. 799, 2015, arXiv:1504.04035v2.
108. **Hahn, Reidar.** *NOvA Neutrino Experiment Far Detector at Ash River, MN*. Ash River : autor neznámý, 2015. 15-0164-06.
109. **NOvA collaboration.** NOvA experiment. *novaexperiment.fnal.gov*. [Online] [Citace: 1. 4 2021.] <https://novaexperiment.fnal.gov/research-goals/>.
110. **Messier, Mark D.** First neutrino oscillation measurements in NOvA. *Nuclear Physics B*. 2016, Sv. 908, DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2016.04.027.
111. **fnal.gov.** *500 millionths of a second of data*. 25.6.2021. <https://nusoft.fnal.gov/nova/public/neutrinos.html>.
112. **Formaggio, Joseph A., de Gouvêa, André Luiz a Robertson, Robert Graham Hamish.** Direct Measurements of Neutrino Mass. *Physics Reports*. 2021, arXiv:2102.00594.
113. **Aguilar, Alexis A., Auerbach, Leonard B., a další.** Evidence for Neutrino Oscillations from the Observation of Electron Anti-neutrinos in a Muon Anti-Neutrino Beam. *Physical Review D*. 64, 2001, arXiv:hep-ex/0104049.

114. **NOvA collaboration.** Supernova neutrino detection in NOvA. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. 10, 2020, FERMILAB-PUB-20-201-E, arXiv:2005.07155v3.
115. —. Search for active-sterile neutrino mixing using neutral-current interactions in NOvA. *Physical Review D*. 2017, arXiv:1706.04592v2.
116. **deNiverville, Patrick a Frugiuele, Claudia .** Hunting sub-GeV dark matter with theNOvAnear detector. *PHYSICAL REVIEW D*. 99, 2018, arXiv:1807.06501.
117. **Blucher, Edward.** *Neutrino Physics and the Deep Underground Neutrino Experiment*. Chicago : The University of Chicago, 2018. [https://indico.cern.ch/event/754050/contributions/3192840/attachments/1745766/2828311/Blucher\\_Student\\_lecture\\_India.pdf](https://indico.cern.ch/event/754050/contributions/3192840/attachments/1745766/2828311/Blucher_Student_lecture_India.pdf).
118. **Fyzikální ústav Akademie věd České republiky.** *Experiment DUNE*. 25.6.2020. <https://www.fzu.cz/vyzkum/vyzkumna-temata/neutrinovy-experiment-dune>.
119. **DUNE collaboration.** The DUNE Far Detector Interim Design Report Volume 1: Physics, Technology and Strategies. 2018, Sv. Fermilab-Design-2018-02, arXiv:1807.10334.
120. **Shiltsev, Vladimir D.** Fermilab Proton Accelerator Complex Status and Improvement Plans. *Modern Physics Letters A*. 32, 2017, arXiv:1705.03075.
121. **DUNE collaboration.** Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) Conceptual Design Report Volume 1: The LBNF and DUNE Projects. 2016, arXiv:1601.05471.
122. **Eldred, Jeffrey.** Novel Approaches to High-Power Proton Beams. *Proceedings of Science NuFact2019*. 2019, arXiv:2001.05576.
123. **Lebedev, Valeri a PIP-II collaboration.** The PIP-II Reference Design Report. 2015, FERMILAB-DESIGN-2015-01, DOI: 10.2172/1365571.
124. **DUNE collaboration.** Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), Far Detector Technical Design Report, Volume II: DUNE Physics. 2020, FERMILAB-PUB-20-025-ND, arXiv:2002.03005.
125. **Papadimitriou, Vaia, Ammigan, Kavin a et alii.** Design of the LBNF Beamline. *38th International Conference on High Energy Physics*. 2016, FERMILAB-CONF-17-022-AD.



126. **LBNE Collaboration.** The Long-Baseline Neutrino Experiment: Exploring Fundamental Symmetries of the Universe. 2014, arXiv:1307.7335v3, BNL-101354-2014-JA, FERMILAB-PUB-14-022, LA-UR-14-20881.
127. **DUNE collaboration.** Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), Far Detector Technical Design Report, Volume I: Introduction to DUNE. 2020, FERMILAB-PUB-20-024-ND, arXiv:2002.02967.
128. **Auger, Martin, a další.** A New Concept for Kilotonne Scale Liquid Argon TimeProjection Chambers. *Instruments 4 (2020) 1*. 2019, arXiv:1908.10956v3.
129. **Duffy, Kirsty.** High-Pressure Gaseous Argon TPC for the DUNE Near Detector. *Meeting of the Division of Particles and Fields of the American Physical Society*. 2019, arXiv:1910.06422v1.
130. **Stanco, Luka.** *ND-SAND (System for on-Axis Neutrino Detection)*. Padova : the SAND Collaboration, 2020. <https://indico.fnal.gov/event/21576/contributions/63527/attachments/39820/48172/SAND-Stanco-ND22jan2020.pdf>.
131. **Bertolucci, Sergio.** *System for on Axis Neutrino Detection (SAND) Status and Outlook*. Bologna : University of Bologna and INFN, 2019. [https://indico.cern.ch/event/857610/contributions/3654731/attachments/1957937/3252993/LBNC\\_Dec\\_6th\\_2019\\_SB.pdf](https://indico.cern.ch/event/857610/contributions/3654731/attachments/1957937/3252993/LBNC_Dec_6th_2019_SB.pdf).
132. *ProtoDUNE and a Dual-phase LArTPC.* **Scarpelli, Andrea.** Ostuni : Conference proceeding of Neutrino Oscillation Workshop, 2019. arXiv:1902.04780.
133. **DUNE collaboration.** Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), Far Detector Technical Design Report, Volume IV: Far Detector Single-phase Technology. *Journal of Instrumentation (JINST)*. 15, 2020, FERMILAB-PUB-20-027-ND, arXiv:2002.03010.
134. **Belver, Daniel, a další.** ProtoDUNE-DP Light Acquisition and Calibration Software. 2021, arXiv:2103.02415v3.
135. **cds.cern.ch.** *A  $6\sim GeV/c$  electron candidate.* 26.6.2021. [https://cds.cern.ch/record/2724554/files/R5770\\_E59001\\_T1T5T9\\_w0\\_480\\_t3750\\_5250\\_sc15.png](https://cds.cern.ch/record/2724554/files/R5770_E59001_T1T5T9_w0_480_t3750_5250_sc15.png).
136. *Liquid Argon Experiments.* **McConkey, Nicola.** Durham : YETI International Youth Conference On Electronics, Telecommun. and Information Tech., 2020.

[https://conference.ippp.dur.ac.uk/event/830/sessions/1087/attachments/3890/4432/YETI\\_LArDetectors.pdf](https://conference.ippp.dur.ac.uk/event/830/sessions/1087/attachments/3890/4432/YETI_LArDetectors.pdf).

137. **Brailsford, Dominic.** DUNE: Status and Perspectives. *NuPhys2017 Prospects in Neutrino Physics*. 2017, arXiv:1804.04979v1.

138. **DUNE collaboration.** Supernova Neutrino Burst Detection with the DeepUnderground Neutrino Experiment. 2020, FERMILAB-PUB-20-380-LBNF, arXiv:2008.06647v2.

139. **Krasnov, Igor.** On DUNE prospects in the search for sterile neutrinos. *Physical Review D*. 100, 2019, arXiv:1902.06099v3.

140. **Berger, Joshua, a další.** Prospects for Detecting Boosted Dark Matter in DUNE through Hadronic Interactions. 2020, PITT PACC 1910, SLAC-PUB-17486, arXiv:1912.05558v2.

141. **de Romeri, Valentina, Kelly, Kevin J. a Machado, Pedro A. N.** Hunting for light dark matter with DUNE PRISM. *Journal of Physics: Conference series*. 1468, 2020, FERMILAB-CONF-20-310-T, DOI: 10.1088/1742-6596/1468/1/012061.

142. **Kajita, Takaaki.** Nobel Lecture: Discovery of atmospheric neutrino oscillations. *Reviews of Modern Physics*. 88, 2016, DOI: 10.1103/RevModPhys.88.030501.

143. **T2K collaboration.** The T2K Experiment. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A*. 659, 2011, arXiv:1106.1238v2.

144. **Kuze, Masahiro.** Neutrino Experiments at J-PARC. *Proceedings of the 3rd J-PARC Symposium*. 2020, arXiv:2001.03417v2.

145. **T2K collaboration.** Search for heavy neutrinos with the T2K near detector ND280. *Physical Review D*. 100, 2019, arXiv:1902.07598v2.

146. **Assylbekov, Shamil, a další.** The T2K ND280 Off-Axis Pi-Zero Detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 686, 2018, arXiv:1111.5030v2.

147. **Amaudruz, Pierre-André, a další.** The T2K Fine-Grained Detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 696, 2012, arXiv:1204.3666v1.

148. **T2K collaboration.** Measurements of the T2K neutrino beam properties using the INGRID on-axis near detector. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A*. 694, 2012, arXiv:1111.3119v1.

149. *The Super-Kamiokande Experiment*. **Walter, Christopher W.** arXiv:0802.1041v1,,  
místo neznámé : World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2008. ISBN #9789812771971.
150. **Dewhurst, Debra.** Searches for sterile neutrinos using the T2K off-axis neardetector.  
*Prospects in Neutrino Physics Conference*. 2014, arXiv:1504.08237v1.
151. **Sjöstrand, Torbjörn, a další.** An Introduction to PYTHIA 8.2. 2014,  
arXiv:1410.3012.