

# Rozhledy matematicko-fyzikální

---

Natálie Faryadová

Modelování rozptylu světla v mlhovinách v rámci Talentové akademie ELI  
Beamlines a HiLASE

*Rozhledy matematicko-fyzikální*, Vol. 99 (2024), No. 3, 45–56

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/152609>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2024

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ*:  
*The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

# Modelování rozptylu světla v mlhovinách v rámci Talentové akademie ELI Beamlines a HiLASE

*Natálie Faryadová*

**Abstrakt.** Tento článek se zabývá modelováním rozptylu světla v reflexních mlhovinách. Cílem je popsat experiment provedený v laserových centrech ELI Beamlines a HiLASE v září 2023 během akce Talentová akademie. Účelem této akce bylo umožnit středoškolským studentům pracovat v profesionálním vědeckém prostředí a poskytnout jim nové dovednosti. Článek je rozdělen do dvou částí: v úvodní teoretické části jsou popsány jevy emise a rozptylu světla, princip laseru a objekt, jehož chování se snažíme modelovat – mlhovina. V druhé praktické části je popsán postup experimentu, který mlhovinu simuloval pomocí zlatých nanočástic a laseru.

## Úvod

Talentová akademie je soutěž určená talentovaným středoškolákům, kterou pořádají laserová centra ELI Beamlines (The Extreme Light Infrastructure ERIC) a HiLASE (Fyzikální ústav AV ČR). Finalisté Talentové akademie mají možnost vyzkoušet si skutečnou práci vědců v laserových centrech a získat tak reálné zkušenosti s prací v laboratořích i s odbornými počítačovými programy.

## 1. Teoretická východiska experimentu

### 1.1. Emise světla

Světlo lze definovat dvěma způsoby. Jednou z možností je popisovat světlo jako elektromagnetické vlnění o vlnové délce asi 390 až 750 nm. Druhou možností je považovat světlo za proud částic nazývaných fotony. V obou případech se jedná o přenos energie, a to buď ve formě vlny, nebo částice.

K emisi takové energie dochází například tehdy, když elektron v atomu přeskóčí na nižší energetickou hladinu. Tento jev popsal Niels Bohr, když se snažil vytvořit model vodíku, který vysvětloval jeho emisní spektrum. Bohrov model ukázal, že atom absorbuje nebo vyzařuje energii pouze tehdy, když se elektron přesouvá mezi energetickými hladinami, a že energie odevzdaná elektronem odpovídá energii vyzařovaného kvanta světla, tedy fotonu.

Tomuto druhu emise se říká spontánní. Spontánní emise je chaotický děj, protože každý elektron skáče sám a ne vždy ve stejnou chvíli. Když je potřeba, aby vyzářené světlo mělo konkrétní vlastnosti, například aby bylo koherentní (viz dále), používá se tzv. stimulovaná emise, která je základním principem fungování laseru.

## 1.2. Laser

Laser je přístroj, který funguje na principu stimulované emise. Stimulovaná emise nastává, když foton interaguje s excitovaným elektronem v atomu, který se nachází ve vyšší energetické hladině. Tento foton stimuluje elektron k tomu, aby přeskokem do nižší energetické hladiny uvolnil svou přebytečnou energii ve formě nového fotonu. Klíčové je, že nově uvolněný foton má zcela shodné vlastnosti jako foton, který elektron excitoval – má stejnou energii (vlnovou délku), fázi, polarizaci i směr šíření [1].

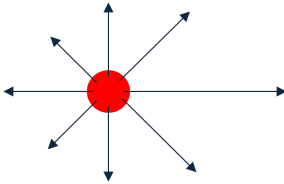
Tento proces umožňuje vytvořit souvislé světelné paprsky s vysokou intenzitou, což je základním principem fungování laseru. V praxi to znamená, že všechny fotony vzniklé stimulovanou emisí jsou identické. Tento jev se označuje jako koherence světla. Výstupním otvorem laseru pak proud koherentních fotonů vychází. Světlo vycházející z laseru může být uvolňováno s různou frekvencí, což je často využíváno zejména u velmi výkonných, tzv. pulsních laserů. Jeden z nejsilnějších laserů na světě, BIVOJ v HiLASE v České republice, je pulsní laser, který pracuje s frekvencí 1 až 10 Hz.

## 1.3. Rozptyl světla

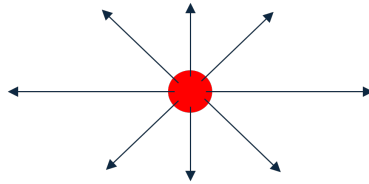
Rozptyl světla je jev, při kterém se světlo odchyluje od původního směru kvůli interakci s různými částicemi. Existují dvě základní varianty rozptylu: Rayleighův a Mieův.

*Rayleighův rozptyl* popisuje situaci, kdy se světlo rozptyluje na částicích, které jsou menší než desetina vlnové délky záření, což platí zejména pro krátké modré vlny. Tento jev vysvětluje například modrou barvu oblohy – světlo dopadající na malé částice ve vzduchu (jako jsou molekuly) se nejvíce rozptyluje v modré části spektra. Proto je obloha modrá a Slunce žluté. Kdyby Země neměla atmosféru, viděli bychom skutečnou, bílou barvu Slunce. Protože ale částice v atmosféře rozptylují zejména modré fotony, vidíme modrou barvu všude na obloze. Tato barva pak ve spektru Slunce není tak výrazná a složením zbylých barev bez modré vznikne žlutá barva Slunce.

*Mieův rozptyl* pozorujeme, když jsou částice větší než desetina vlnové délky světla. Tento rozptyl je obecnější, protože nezávisí na velikosti částice a funguje i pro částice, které světlo absorbují – na rozdíl od Rayleighova rozptylu. Výpočty podle Mieovy teorie jsou však složitější, a proto se, pokud to podmínky dovolují, při výpočtech intenzity rozptýleného světla často upřednostňuje jednodušší Rayleighova teorie [2].



Obr. 1: Mieův rozptyl



Obr. 2: Rayleighův rozptyl

Každá částice rozptyluje světlo s jinou intenzitou a v různých úhlech. U Rayleighova rozptylu dochází k symetrickému rozptylu směrem dopředu i dozadu. Naproti tomu Mieův rozptyl se vyznačuje silnějším rozptylem ve směru dopředu, přičemž dochází k tzv. *dopřednému rozptylu*. Tento efekt je výraznější u větších částic. Mieův rozptyl také zahrnuje rozptyl v mnoha směrech, včetně určitého množství zpětného rozptylu, ale většina energie je směřována dopředu [3].

#### 1.4. Mezihvězdná látka

Velká část vesmíru je zaplněna mezihvězdnou látkou, kterou tvoří plyn a částice prachu. Přestože zabírá obrovské oblasti prostoru v galaxii, mezihvězdná látka představuje jen malé procento z celkové hmotnosti – v případě naší Galaxie tvoří asi 5 % hmotnosti. Největší podíl v těchto pěti procentech má vodík v plynném stavu, průměrná hustota mezihvězdné látky je kolem milionu atomů na metr krychlový.

Mezihvězdný plyn absorbuje světlo vzdálenějších hvězd. Absorpce probíhá různými ionty, atomy či molekulami. Vodík v této oblasti však většinou zůstává nepozorovatelný, protože se ve vesmíru obvykle vyskytuje v neutrálním stavu a jeho absorpční čáry leží v ultrafialové části spektra [4, s. 108–109]. Světlo ještě více tlumí mezihvězdný prach, který se skládá z částic různého původu (např. kovy a minerály) o velikosti kolem jednoho mikrometru.

Tyto částice rozptylují světlo Rayleighovým rozptylem, takže ovlivňují převážně modré světlo. Proto prachovým oblakem proniká hlavně světlo s delšími vlnovými délkami, tedy červené světlo. V důsledku toho působí

mezihvězdné oblaky nebo hvězdy zahalené prachem červeněji, než jaké jsou ve skutečnosti [5].

### 1.5. Mlhoviny

Když je hustota mezihvězdného oblaku (prachu a plynu) v určité oblasti dostatečně vysoká, mohou zde vznikat hvězdy. Oblak se skládá převážně z vodíku, přičemž až deset procent jeho hmotnosti tvoří prach. Aby se oblak začal smršťovat pod vlivem gravitační síly, musí mít dostatečně velkou hmotnost. Částice z vnějších oblastí oblaku získávají vysokou rychlost a při průchodu hustšími vnitřními oblastmi tak dochází ke zvýšení teploty. Pokud teplota dosáhne úrovně potřebné k zažehnutí fúzních reakcí, zrodí se hvězda. Nejjednodušším způsobem, jak vyvolat smrštění oblaku mezihvězdné látky, je výbuch nedaleké supernovy. Ten vytváří rázovou vlnu, která zvyšuje hustotu prachu a plynu v oblaku [4, s. 116–118]

Těmto mezihvězdným oblakům se také říká *mlhoviny*. Nejsou důležité jen při vzniku hvězd, jsou přítomny i při jejich zániku. Zbytky po výbuchu supernovy (což je jedno z možných konečných stádií života hvězdy) jsou totiž také mlhoviny, konkrétně vrchní plynné vrstvy, které supernova při svém výbuchu odhodí do okolí [6].

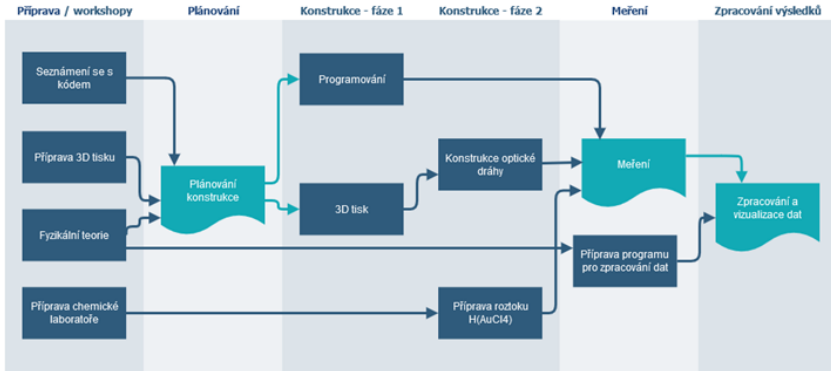
Existuje několik druhů mlhovin. V základu se dělí na tmavé a difúzní. Tmavé se na fotkách jeví jako tmavé fleky, jelikož nejsou osvětlené žádnou hvězdou [7]. Difúzní mlhoviny mají vlastní zdroj světla, který ozařuje látku zevnitř. Další kategorií jsou mlhoviny reflexní. Ty odrážejí světlo z nedaleké hvězdy. Plyn, který obsahují, je studený a neionizovaný, tudíž bez nedaleké hvězdy by patřily mezi tmavé mlhoviny. Absorpční spektrum mlhoviny má stejné absorpční linie jako hvězda, která ji osvětluje. Tyto mlhoviny odrážejí až 60 % světla, které na ně dopadá [8].

## 2. Praktická část

Praktická část této práce byla realizována během finále Talentové akademie 2023 ve výzkumných laserových centrech HiLASE a ELI Beamlines. Cílem bylo vytvořit laboratorní model reflexní mlhoviny pomocí zlatých nanočástic a měřit její rozptyl pomocí několika laserů s různými vlnovými délkami.

Pracovní skupinu tvořili čtyři členové, z nichž každý měl specifickou roli. *Chemik* připravoval zlaté nanočástice, které byly použity jako materiál rozptylující světlo. *Konstruktér* navrhl a sestavil zařízení pro měření. *Programátor* se staral o automatizaci měření a programování krokových

motorů a světelných senzorů měřicího zařízení. Nakonec *teoretik* analyzoval naměřená data a vytvářel jejich grafické znázornění.



Obr. 3: Diagram experimentu

Na obr. 3 je znázorněn postup práce našeho týmu. První odpoledne absolvoval každý člen workshop, kde se naučil základy potřebné k úspěšnému zvládnutí jeho části experimentu. Večer jsme si všichni sdělili získané zkušenosti a začali plánovat konstrukci měřicího přístroje.

Abychom mohli měřit rozptyl světla, rozhodli jsme se, že budeme měřit intenzitu světla v úhlu  $270^\circ$  kolem kyvety s roztokem zlatých nanočástic, který modeloval chování mlhoviny, tedy v úhlu  $\pm 135^\circ$  na každou stranu od osy kolem kyvety.

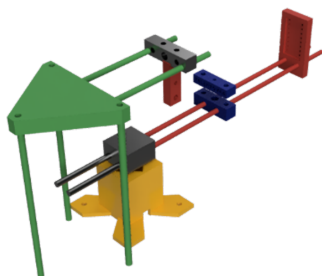
Jakmile jsme se dohodli na postupu, dva členové týmu začali pracovat na 3D modelování a tisku konstrukce držící kyvetu, zatímco zbývající dva členové se věnovali programování ovládacího software pro krokové motory a snímače světla. Následující den odešel jeden člen do chemické laboratoře připravovat roztoky s nanočásticemi, zatímco zbytek týmu připravoval optickou dráhu v laboratoři.

Jakmile byly nanočástice vloženy do kyvety, začalo samotné měření pomocí připravené konstrukce. Měření trvalo přibližně tři hodiny; během té doby jeden člen týmu připravoval grafy a chemik prováděl spektroskopii na připravených roztocích. Nakonec jsme se všichni zapojili do práce na grafech a připravili prezentaci výsledků měření.

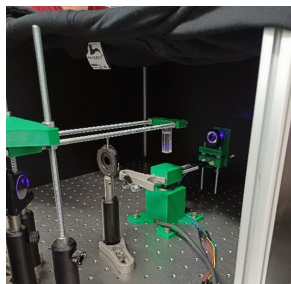
Celý experiment trval necelé tři dny. Na následujících stránkách bude podrobně vysvětleno, jaké úkoly jednotlivé specializace měly a jak jejich práce probíhala.

## 2.1. Konstrukce měřicího přístroje

Za tento aspekt práce zodpovídal *konstruktér*. Navrhl měřicí zařízení, které bylo sestaveno ze závitových tyčí a částí vytištěných pomocí 3D tiskárny, přičemž jednotlivé součásti nejprve vymodeloval v programu Autodesk Inventor. Model zařízení je zobrazen na obr. 4. Oranžově je znázorněn držák krokového motoru, který je přišroubován k optické desce (optický breadboard – deska s pravidelnou mřížkou otvorů se závitem, na kterou se upevňují různé optické prvky, viz obr. 5).



Obr. 4: Model měřicího přístroje vytvořený pomocí AutoDesk Inventor



Obr. 5: Finální vzhled konstrukce

Krokový motor otáčí ramenem, na němž jsou umístěny dva digitální snímače světla: TLS2591, který měří intenzitu v celém viditelném spektru společně s částí infračerveného, a AS7341, který umožňuje měřit intenzitu pro jednotlivé části spektra. Spektrum je rozděleno do intervalů o šířce 20 nm a výstupem senzoru je intenzita světla pro každý interval zvlášť.

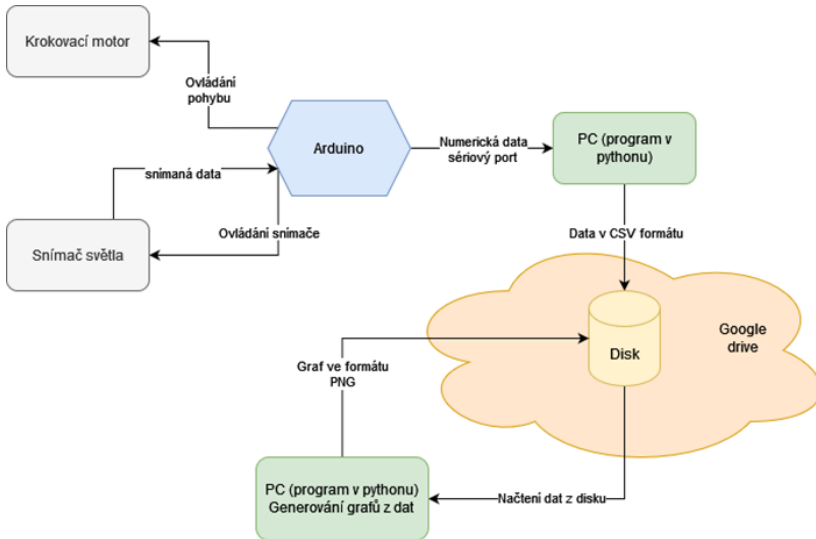
Rameno se pohybuje v zadaném intervalu a je tak možné měřit intenzitu světla, které prochází květou se vzorkem (držák květy je na obr. 4 vyznačen zelenou barvou). Vzorek v květetě je přes čočku osvětlován světlem laseru.

## 2.2. Program pro měření

Jako *programátor* jsem měla za úkol vytvořit program pro snímače světla a krokový motor v prostředí Arduino a zajistit uložení naměřených dat do tabulky. Arduino je jednoduchá programovatelná elektronická deska, která slouží k ovládní různých elektronických zařízení, sensorů a motorů. Je oblíbená pro svou snadnou použitelnost a široké možnosti využití v projektech pro začátečníky i pokročilé.

Organizátoři nám poskytli základní verze tří programů napsaných v jazyce pro Arduino – jeden pro motor a po jednom pro každý snímač.

Nejprve bylo nutné upravit tyto programy tak, aby vyhovovaly potřebám našeho týmu a zkombinovat je do jednoho. Arduino totiž neumožňuje současný běh dvou programů a vzájemná synchronizace (například krok, čekání 1 sekundy, měření atd.) by byla jinak nemožná. Schéma vytvořeného řešení je na obr. 6.



Obr. 6: Diagram toku dat

Deska Arduino jednak ovládala krokový motor, jednak zasílala digitální data ze snímačů přes virtuální sériový port do počítače, kde je přebíral skript vytvořený v jazyce Python, jenž získaná data ukládal ve formátu CSV. Po každém měření byly tyto soubory nahrány na Google drive, odkud si je stáhli členové týmu, kteří pracovali na grafech. Ti měli další pythonový skript, který z dat vytvářel grafy. Ty se potom také přidaly na Google drive, aby k nim měli přístup všichni členové týmu.

### 2.3. Příprava nanočástic

Člen týmu se specializací *chemik* měl za úkol připravit roztok s nanočásticemi zlata, které v našem experimentu představovaly prach v mlhovině. Také prováděl spektrofotometrii výsledného roztoku.

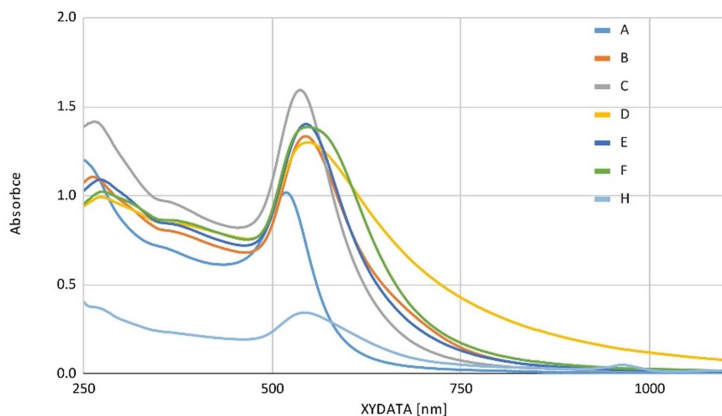
Zlaté nanočástice byly vytvořeny směsí tří roztoků: citrátu trisodného ( $\text{Na}_3\text{Cit}$ ), jodidu draselného ( $\text{KI}$ ) a kyseliny chlorzlatité  $\text{H}(\text{AuCl}_4)$ . Zlaté nanočástice musely být kulaté a musely mít správnou velikost, což byla



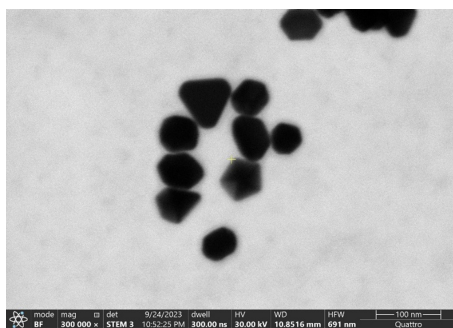
největší překážka, jelikož nanočástice tvořily všechny možné tvary, a pokud se nedodržel přesný poměr látek, neměly správnou velikost. Velikost částic byla měřena pomocí elektronového mikroskopu<sup>1)</sup>.

Podle velikosti se nanočástice rozdělily do kyvet s vodou tak, aby všechny nanočástice v jedné kyvetě měly stejnou hodnotu absorpce. Ta byla zjištěna pomocí spektrofotometrie<sup>2)</sup>, díky které se také dala dokázat jejich přítomnost v roztoku.

Spectrofotometer measurement



Obr. 7: Graf absorpce všech připravených roztoků podle vlnové délky světla zářícího na roztok



Obr. 8: Zlaté částice s různými tvary zkoumané elektronovým mikroskopem

<sup>1)</sup>Mikroskop, který používá proud elektronů jako zdroj světla.

<sup>2)</sup>Analytická metoda, která zjišťuje vlastnosti vzorku podle jeho absorpční hodnoty.

Tyto připravené roztoky sloužily jako model reflexní mlhoviny, kde zlaté nanočástice představovaly prach a částice ve vesmíru.

## 2.4. Teorie a zpracování dat

Osoba se specializací *teoretik* měla za úkol pochopit zkoumané fyzikální jevy, vysvětlit je svému týmu a nakonec vizualizovat získaná data ve formě grafů. Zatímco probíhala první měření, byl teoretikem vytvářen program v Pythonu, který analyzoval naměřené výsledky a vizualizoval je pomocí grafu.

## 2.5. Měření

V laboratoři bylo nejprve nutné sestavit celé zařízení na optické desce. Sestávalo ze dvou zrcadel, laseru, dvou irisových clon a zastiňovacích desek. Sestavení trvalo přibližně dvě hodiny kvůli řešení různých problémů, které se průběžně objevovaly. Proto se zařízení na obr. 5 mírně liší od původního návrhu na obr. 4.

Samotné měření trvalo asi tři hodiny. K dispozici byly lasery se čtyřmi vlnovými délkami: fialový (415 nm), zelený (530 nm), červený (630 nm) a infračervený (930 nm). Měření se zeleným laserem se však nestihlo dokončit a data z červeného laseru se vůbec nezačala sbírat. Grafy byly proto vytvořeny pouze z dat získaných s fialovým a infračerveným laserem.

## 2.6. Výsledky měření

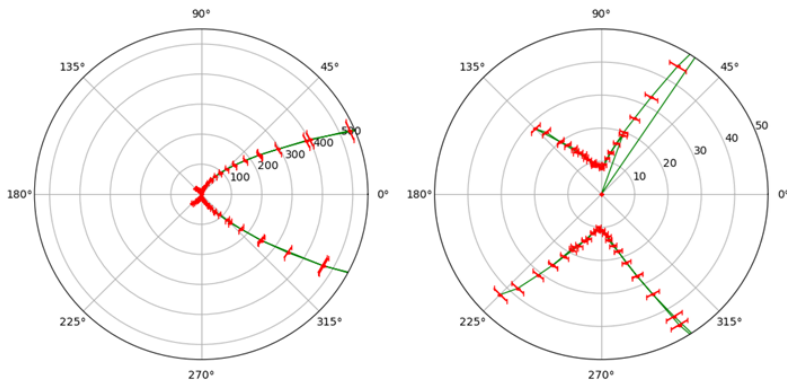
Naměřená data byla převedena do polárních grafů, kde je zaznamenána intenzita světla v daném úhlu. Polární graf nepoužívá kartézskou souřadnicovou soustavu, tedy osy  $x$  a  $y$ , ale zobrazuje data v kruhovém formátu pomocí úhlů a vzdáleností od středu. Každý bod na grafu je určen úhlem (ve stupních nebo radiánech) a vzdáleností od středu, což umožňuje znázornit hodnoty, které závisí na směru nebo úhlu.

Na našich grafech jsou vidět u křivky malá čísla. Ta indikují specifickou radiální hodnotu, tj. velikost radiusu (poloměru), když se používají polární souřadnice, na daném bodě. Také díky tomu, že měření bylo provedeno dvakrát na obě strany, je možné občas vidět dvě křivky vedle sebe. Pokud se na grafu objeví, znamená to, že nastal mezi měřeními rozdíl.

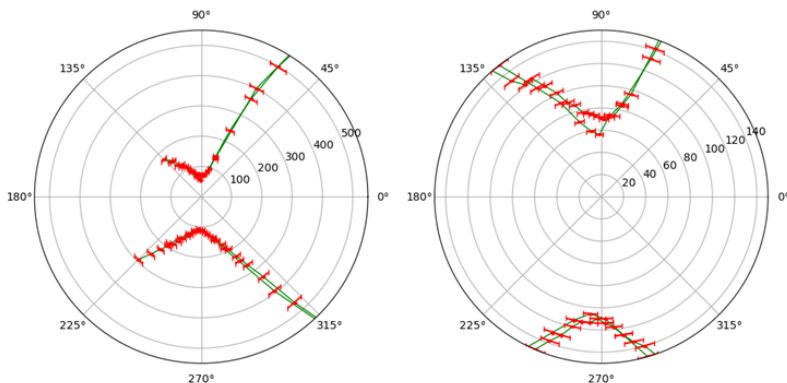
Grafů bylo celkem dohromady 32: pracovali jsme s osmi roztoky s různě velkými nanočásticemi a pro každé měření jsme vytvořili čtyři grafy – dva pro každý laser. Ukázka naměřených hodnot je na obr. 9 a 10.

V grafech je vynesena intenzita rozptýleného světla, která je tím větší, čím je datový bod dále od středu. Kruh je oceňován ve stupních – nula

stupňů odpovídá spojnicí kyvety s roztokem a laseru. Měření bylo prováděno v oblouku o velikosti  $270^\circ$ , což je na grafech zobrazeno v oblasti od  $0^\circ$  do  $135^\circ$  proti směru hodinových ručiček a  $0^\circ$  až  $135^\circ$  ve směru hodinových ručiček (na stupnici  $0^\circ$  až  $225^\circ$ ).



Obr. 9: Výsledné grafy série G (nanočástice o průměru 34 nm) s laserem 415 nm



Obr. 10: Výsledné grafy série G (nanočástice o průměru 34 nm) s laserem 930 nm

Na obr. 9 a 10 je patrné, že stejné roztoky rozptylují dvě různé vlnové délky odlišným způsobem. Nejenže je v některých místech větší intenzita světla, ale různé vlnové délky se rozptylují v různých směrech (na obr. 10 je například silnější Rayleighův rozptyl než na obr. 9).

Jak již bylo zmíněno, Mieův a Rayleighův rozptyl se liší také směrovým rozložením rozptýleného světla. Na grafech je zřetelnější Rayleighův

rozptyl, který je symetrický ve směru dopředu a dozadu. Tato symetrie se však častěji objevuje v přiblížených grafech vpravo. Rozptyl světla by byl méně patrný, pokud bychom graf nezvětšili, protože intenzita rozptýleného světla nebyla dostatečně silná.

Několik měření, a tím i grafů, bylo bohužel ovlivněno různými problémy. Často se v některých místech objevoval extrémní skok intenzity, zejména tam, kde se světlo přiblížilo ke konstrukci. Další nepřesnost může být způsobena tím, že od naměřené intenzity nebyla odečtena intenzita okolního světla v laboratoři.

## Závěr

Cílem experimentu bylo simulovat reflexní mlhovinu a ověřit, že v takovém prostředí dochází k Rayleighovu rozptylu světla. Tento cíl se podařilo splnit, jak je vidět z grafů naměřených dat. Experiment byl úspěšný nejen sám o sobě, ale také umožnil účastníkům pracovat na vědeckém problému, seznámit se s novými technologiemi, navrhnout řešení a analyzovat výsledky. Na konci akce byly výsledky prezentovány před zaměstnanci laserových center a zástupci Akademie věd.

Je však třeba podotknout, že dosažené výsledky nebyly vždy zcela přesné, protože experiment byl prováděn pod časovým tlakem. Cíle se podařilo dosáhnout díky spolupráci a nadšení všech členů týmu. Experiment by se navíc neuskutečnil bez podpory organizátorů Talentové akademie, kteří účastníkům tuto příležitost poskytli.

Na další ročníky Talentové akademie se lze přihlásit prostřednictvím jejich webových stránek <https://www.hilase.cz/o-nas/popularizace-vedy/talentova-akademie/>. Soutěž je určena pro středoškolské studenty, a to i bez předchozích vědeckých zkušeností. Nabízí možnost provést experiment v profesionálních podmínkách s pomocí vědců.

## Literatura

- [1] Hecht, J.: *Laser: Fundamental principles*. Encyclopædia Britannica, cit. 8/2/2024, Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/laser/Fundamental-principles>.
- [2] Hahn, D. W.: *Light Scattering Theory*. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Florida, 2009, Dostupné z: <http://plaza.ufl.edu/dwhahn/RayleighandMieLightScattering.pdf>.

- [3] Britannica, T. Editors of Encyclopaedia: *Rayleigh scattering*. Encyclopædia Britannica, cit. 8/2/2024, Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/Rayleigh-scattering>.
- [4] Šolc, M., Švestka, J., Vanýsek, V.: *Fyzika hvězd a vesmíru*. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 1983.
- [5] NSF: *All we are is dust in the interstellar wind*. U.S. National Science Foundation, Alexandria, cit. 10/2/2024, Dostupné z: <https://new.nsf.gov/news/all-we-are-dust-interstellar-wind>.
- [6] Hubblesite: *Stars and Nebulas*. Space Telescope Science Institute, Baltimore, Maryland, cit. 10/2/2024, Dostupné z: <https://hubblesite.org/science/stars-and-nebulas>.
- [7] Mathis, J. S.: *Nebula: Historical survey of the study of nebulae*. Encyclopædia Britannica, cit. 10/2/2024, Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/nebula/Historical-survey-of-the-study-of-nebulae>.
- [8] Mathis, J. S.: *Reflection nebula*. Encyclopædia Britannica, cit. 10/2/2024, Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/reflection-nebula>.



Reflexní mlhovina NGC 1999 v souhvězdí Orionu (zdroj: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Reflexn%C3%AD\\_mlhovina#](https://cs.wikipedia.org/wiki/Reflexn%C3%AD_mlhovina#))