



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

**ATMOSFÉRICKÁ OPTIKA,  
DUHA, JEVY HALO, BARVA OBLOHY**  
FYZIKÁLNÍ OPTIKA – SEMESTRÁLNÍ PROJEKT

**AUTOR PRÁCE**

**Bc. JOZEF BILKO, (xbilko03)**

**ZADAVATEL**

**doc. Ing. PETR SEDLÁK, Ph.D.**

**BRNO 2024**

## Abstrakt

Cielom tohto semestrálneho projektu je vytvoriť interaktívnu 3D vizualizáciu atmosférických optických javov, ako sú dúha, halo efekty a zmena farby oblohy počas dňa. Výstupný program umožňuje meniť počasie v simulácii – oblačnosť, vlhkosť vzduchu, intenzitu dažďa a čas – čím sa menia aj samotné vizuálne javy. Simulácia beží v reálnom čase s použitím knižnice Three.js a vlastných shaderov v jazyku GLSL. Umožňuje používateľovi voľný pohyb v scéne, pozorovanie efektov z rôznych uhlov a pochopenie ich vzniku v závislosti od polohy Slnka a aktuálneho stavu atmosféry.

## Kľúčové slová

Počítačová grafika, atmosférická optika, simulácia, vizualizácia, shader, dúha, halo, farba oblohy, Three.js, JavaScript

## Citácia

BILKO, Jozef. *Atmosférická optika, dúha, jevy halo, farva oblohy*. Brno, 2024. . Vysoké učení technické v Brně, . Zadavatel doc. Ing. Petr Sedlák, Ph.D.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Dúha</b>	<b>3</b>
2.1	Fyzikálny princíp . . . . .	3
2.2	Geometria a pozorovanie . . . . .	4
2.3	Uhol dúhy . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Halové javy</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Farba oblohy</b>	<b>9</b>
4.1	Rayleighov rozptyl . . . . .	9
4.2	Zmena farby počas dňa . . . . .	9
<b>5</b>	<b>Simulácia atmosférickej optiky</b>	<b>11</b>
5.1	Pozorovacie podmienky . . . . .	11
5.2	Optické javy v simulácii . . . . .	11
5.3	Záver . . . . .	12
	<b>Literatúra</b>	<b>13</b>

# Kapitola 1

## Úvod

Táto práca sa týka fyzikálnych javov, ktoré sú vlastne bežné v každodennom živote, avšak často si ich ani človek neuvedomí – ide o atmosférické optické javy. Tieto vizuály sú spôsobené interakciou svetla so zložkami v atmosfére, ako napr. vodné kvapky, ľadové kryštáliky alebo molekuly vzduchu. V rámci projektu sa rieši dúha, halové javy a farba oblohy. Tieto fenomény sú výsledkom princípov ako lom, odraz, rozptyl svetla, čo sú všetky podmienené geometrickými a atmosferickými podmienkami (uhol, dážď, oblačnosť, poloha zdroju svetla).

Pretože je možné tieto javy popísať geometricky, sú ideálne pre ich simulovanie v počítačovej grafike, práve preto nie je táto práca obmedzená iba na teoretické podklady a rovnice – výsledkom je i praktická vizualizácia týchto javov v podobe 3D prostredia vytvorenom pomocou knižnice Three.js. Cieľom toho je intuitívne priblížiť vznik týchto javov.

Užívateľ má samozrejme v simulácii možnosť meniť parametre ako uhol pohľadu, pozícia slnka, oblačnosť, vlhkosť v atmosfére, týmto ovplyvňuje podmienky, pri ktorých sa jednotlivé optické efekty objavujú. Simulácia tak nepredstavuje iba statické zobrazenie, ale je to dynamický model umožňujúci skúmať závislosť optiky v atmosfére a týchto podmienok.

Cieľom tejto práce je preto:

- Popísať a fyzikálne vysvetliť vznik troch vybraných atmosférických javov – dúha, halo a farba oblohy
- Vytvoriť zjednodušený, názorný 3D model týchto javov
- Umožniť užívateľovi meniť podmienky pozorovania a sledovať, ako tieto zmeny ovplyvňujú vizuálny výstup

V nasledujúcich kapitolách sa preto najprv pozrieme na fyzikálne zákony každého z javov. Kapitola o dúhe (2) sa zameria najmä na lom a odraz v kvapkách vody, kapitola halových javov (3) sa viaže na interakciu svetla s kryštálmi ľadu a kapitola o farbe oblohy (4) predstaví Rayleighov rozptyl a jeho závislosť od vlnovej dĺžky. Následne bude popísaný výsledný vizualizačný nástroj, vrátane spôsobu, akým sú javy modelované a ako môžu byť ovplyvňované interakciou zo strany používateľa.

Tému som si zvolil pretože spája dve oblasti, ktoré ma zaujali: simulácia 3D prostredia a farby. Navyše som presvedčený, že práve ľudské videnie zohráva kľúčovú úlohu pri pochopení zložitých javov – obzvlášť tých, ktoré sa skrývajú v každodenných veciach.

## Kapitola 2

# Dúha

Táto kapitola vychádza predovšetkým z poznatkov prezentovaných v publikácii *Introduction to Optics* [3], zaoberá sa optickým javom dúhy, čo vzniká pôsobením lomu, odrazu a disperzie svetla vo vodných kvapkách. Pri modelovaní dúhy sa využíva toho, že vlnová dĺžka svetla je považovaná za zanedbateľnú vzhľadom na rozmery interagujúcich elementov (dažďové kvapky). Základné optické zákony, ktoré popisujú správanie svetelných lúčov, sú zákon odrazu a lomu (Snellov zákon) – tieto princípy možno odvodiť aj pomocou Fermatovho princípu (Toto a viac v [3])

### 2.1 Fyzikálny princíp

Podľa geometrickej optiky svetelné lúče putujú priamo. Táto aproximácia je opravená, pretože typická vlnová dĺžka viditeľného svetla ( $\sim 500\text{nm}$ ) je extrémne malá v porovnaní s rozmermi kvapiek. Keď slnečné svetlo teda na kvapku dopadne, najprv sa láme na rozhraní vzduch-voda, potom dochádza k vnútornému odrazu a nakoniec opäť k lomu pri výstupe. Týmto procesom sa biele svetlo rozkladá na jednotlivé spektrálne zložky. Ako uviedol Pedrotti a kolegovia [3], tento model umožňuje aplikovať zákon odrazu, podľa ktorého:

$$u_i = u_r$$

a Snellov zákon, ktorý popisuje lom lúča pri prechode medzi prostrediami:

$$n_i \sin u_i = n_t \sin u_t.$$

Tieto zákony sú základom pre pochopenie spôsobu, akým sa tvorí dúha obdobne ako na fotografii (2.1).



Obr. 2.1: Typická fotografia dúhy – vizuálne ilustruje spektrálne rozloženie farieb, ktoré vzniká v dôsledku lomu a vnútorného odrazu vo vodných kvapkách (Zdroj: <https://www.3doptix.com/academy-post/rainbow/>).

## 2.2 Geometria a pozorovanie

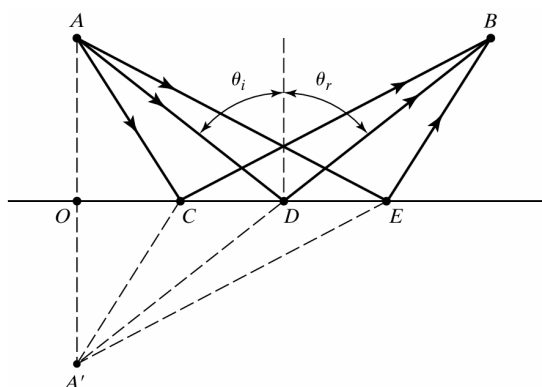
Ako už bolo spomenuté, pozorovanie dúhy závisí teda od geometrických podmienok – konkrétne od polohy slnka, vodných kvapiek a pozorovateľa. V rámci geometrickej optiky [3], sa dráha svetelného lúča rozkladá na segmenty a pri prechode cez kvapku vody sa uplatňujú tri hlavné procesy:

- Pri vstupe do kvapky sa lúč láme podľa Snellovho zákona
- Vo vnútri kvapky sa následne odráža, pričom uhol odrazu je rovný uhlu dopadu
- Pri výstupe opäť dochádza k lomu.

Táto geometria spôsobuje to, že rôzne vlnové dĺžky (farby) sú odchýlené pod rôznym uhlom, čo vedie k spektrálnemu rozloženiu farieb – tie pozorujeme ako dúhu. Pre lepšiu ilustráciu tejto geometrie je zobrazený diagram 2.2, ktorý ukazuje tri možné dráhy svetelného lúča medzi bodmi A a B skrz vodnú kvapku. Správna dráha, označená ako ADB je najkratšia a spĺňa podmienky pre zákon odrazu:

$$u_i = u_r$$

Pričom lúč zostáva v rovine dopadu a dáva za vznik primárnej dúhe.



Obr. 2.2: Schéma lúčovej geometrie vo vodnej kvapke. Diagram zobrazuje tri možné dráhy svetelného lúča z bodu A do bodu B cez kvapku, pričom správna dráha je označená ako ADB. Zobrazené sú aj zrkadlové dráhy A'CB a ACB. Tento diagram ilustruje, ako princíp najkratšej dráhy vedie k zákonu odrazu a ukazuje, že lúč zostáva v rovine dopadu (Podľa [3]).

## 2.3 Uhol dúhy

Odvodenie uhla, pod ktorým možno primárnu dúhu pozorovať, je možné vykonať analýzou optickej dráhy svetelných lúčov v kvapke. Tento proces zahŕňa použitie tzv. Fermatovho princípu, hovorí vlastne o tom, že svetlo putuje dráhou, ktorá minimalizuje celkový čas prechodu medzi dvoma bodmi. Pre optiku je tento princíp kľúčový pri odvodzovaní zákonov lomu a odrazu. Fermatov princíp v tomto prípade predpokladá, že svetelný lúč sa šíri po najkratšej možnej ceste, čím sa optimalizuje čas prechodu medzi médiami.

V tomto prípade ide o médiá vzduch-voda (kvapka), to sú dva lomy a vnútorný odraz – tieto dve lomové a jedna odrazová plocha vedú k určitej odchýlke  $\delta$ , ktorá je maximálna pri určitej hodnote uhla dopadu. Tento maximálny uhol je zároveň spojený s maximálnou intenzitou svetla, ktoré možno pozorovať v rámci primárnej dúhy. Výsledná intenzita svetla teda závisí od geometrických vlastností kvapky a vlnovej dĺžky svetla, to je dôvod, prečo sa rôzne farby vyskytujú pri rôznych uhloch.

Presné odvodenie uhla zahŕňa minimalizáciu celkového prechodového času, ktorý je vyjadrený rovnicou:

$$\frac{dt}{dx} = 0,$$

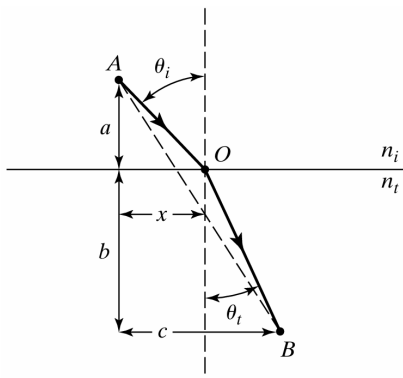
kde  $t$  je čas prechodu svetla medzi bodmi A a B. Tento postup vyžaduje aplikáciu trigonometrických a geometrických postupov, tie sú podrobne opísané v literatúre [3]. Na základe týchto úvah sa odvodí, že výsledná odchýlka závisí od indexov lomu oboch médií (voda a vzduch) a uhlov dopadu a lomu. Tento princíp je znázornený na obrázku (2.3).

Obrázok popisuje schému svetelného lúča, ktorý prechádza medzi prostrediami. Lúč sa šíri z bodu A v jednom prostredí s rýchlosťou  $y_i$  do bodu B v druhom prostredí s rýchlosťou  $y_t$ . V tomto prípade je bod O bod lomu medzi dvoma prostrediami. Rovnako ako Fermatov princíp – svetelný lúč minimalizuje celkový čas prechodu, táto minimálna doba vedie k

rovnakému vzťahu, ako je Snellov zákon, ktorý vyjadruje závislosť medzi uhlami dopadu a lomu:

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t.$$

Tento princíp je rozhodujúcim faktorom pri tvorbe dúhy a umožňuje nám predpovedať uhol, pod ktorým sa pozoruje maximálna intenzita svetla v rámci primárnej dúhy.



Obr. 2.3: Konštrukcia na odvodenie zákona lomu pomocou Fermatovho princípu. Svetelný lúč sa šíri z bodu  $A$  v jednom prostredí (s rýchlosťou  $y_i$ ) do bodu  $B$  v druhom prostredí (s rýchlosťou  $y_t$ ). Bod  $O$  je bod lomu na rozhraní dvoch prostredí. Lúče sa lámu tak, aby minimalizovali celkový čas prechodu  $t = \frac{\sqrt{a^2+x^2}}{y_i} + \frac{\sqrt{b^2+(c-x)^2}}{y_t}$ , čím sa odvodzuje Snellov zákon (Tiež podľa [3]).



## Kapitola 3

# Halové javy

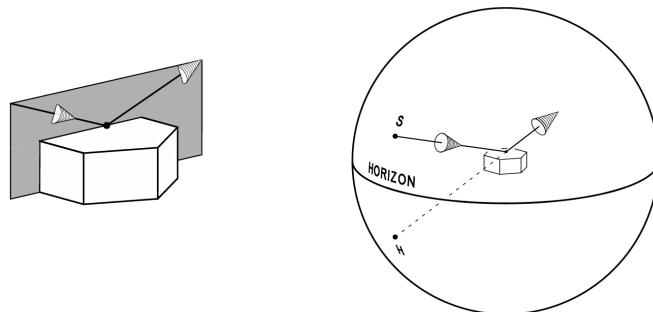
Halo vzniká pri lome a odraze svetla na ľadových kryštálikoch v atmosfére. Tento jav sa typicky vyskytuje, keď slnečné/mesačné svetlo interaguje s (hexagonálnymi) kryštálmi v oblačnosti. Proces je podobný vzniku dúhy, no vzhľadom na špecifickú geometriu kryštálov a ich orientácií vzniká halo rôznych tvarov a veľkostí. Pri tvorbe halo efektu sa svetlo láme pri prechode medzi rôznymi optickými prostrediami, pričom podobne ako pri dúhe, kde sa rôzne vlnové dĺžky (farby) odchyľia pod rôznym uhlom (znovu) podľa Snellovho zákona lomu [4]:

$$n_i \sin u_i = n_t \sin u_t.$$

Vzťah sa aplikuje na lúče svetla, ktoré prechádzajú cez ľadové kryštály, čím vznikajú rôzne optické efekty, ako je napríklad subsun.

Tento jav je zaujímavý aj z meteorologického hľadiska, pretože jeho výskyt môže naznačovať prítomnosť určitých typov oblakov – pretože halo sa najčastejšie objavuje vtedy, keď sú kryštály ľadu v atmosfére usporiadané do pravidelných tvarov, to je to, čo umožňuje jeho vznik. Jedným z efektov je tzv. "halo kruh/y", ktoré sa často objavujú okolo Slnka alebo Mesiaca, a to najmä pri určitých uhloch lomu svetla, ktoré závisia od geometrie kryštálov.

V prípade konkrétneho halového javu, známeho ako subsun ([5]), svetlo dopadajúce na kryštál sa odráža na jeho horizontálnej ploche a následne sa svetelný bod (halo) nachádza priamo pod Slnkom. Tento efekt je možné vidieť len vtedy, ak sa pozorovateľ nachádza nad kryštálmi, či už vo veľmi studených podmienkach, alebo z lietadla. Tieto podmienky spôsobujú, že subsun je pomerne ťažko viditeľný, aj keď je to bežný halový jav. Tento jav je ukázaný na nasledujúcom obrázku 3.1, kde sú znázornené dráhy svetla v súvislosti s jeho odrazom a lomom na kryštále.



Obr. 3.1: Schéma vzniku subsunu pri lome svetla na hornej baze orientovaného platového kryštálu. Lúč svetla prichádza z vonkajšieho prostredia, láme sa na hranici medzi vzduchom (index lomu  $n_1 = 1$ ) a ľadom (index lomu  $n_2 = 1.31$ ) na hornej ploche kryštálu, ktorá je horizontálna. Podľa zákona odrazu, bod halo (H) sa nachádza priamo pod bodom S (slnečným bodom) na tej istej sfére, čo je tzv. subhelicálny bod. Tento jav je bežným halovým javom, avšak ťažko viditeľným pri bežných podmienkach, pretože vyžaduje, aby sa pozorovateľ nachádzal nad ľadovými kryštálmi. Subsún je jasný bod priamo pod Slnkom, vzdialený od horizontu rovnakou vzdialenosťou, ako je Slnko nad horizontom. (Podľa [5])

## Kapitola 4

# Farba oblohy

### 4.1 Rayleighov rozptyl

Rayleighov rozptyl je proces, pri ktorom médium spôsobí zmenu smeru šírenia svetla bez zmeny jeho energie. Rozptyl teda nastáva, ak svetlo interaguje s časticami oveľa menšími než jeho vlnová dĺžka, ako sú napríklad molekuly vzduchu.

Tento typ rozptylu je typický pre plyny, kvapaliny alebo pevné látky – a je spôsobený drobnými neusporiadaním v médiu – napríklad kolísaním hustoty vzduchu alebo indexu lomu. Intenzita Rayleighovho rozptylu závisí od frekvencie svetla približne ako  $\nu^4$ <sup>1</sup>, čo znamená, že kratšie vlnové dĺžky (modré svetlo) sa rozptyľujú výrazne viac ako dlhšie (červené svetlo). Práve tento jav spôsobuje modrú farbu dennej oblohy.

Ak sú častice väčšie než približne  $\lambda_0/10$ <sup>2</sup>, dochádza k Mieovmu rozptylu, ktorého intenzita na vlnovej dĺžke až tak závislá nie je. Tento rozptyl je zodpovedný za biely závoj svetla okolo zdrojov pri hmle či oblakoch (Presne toto je možné pozorovať v zostrojenej simulácii).

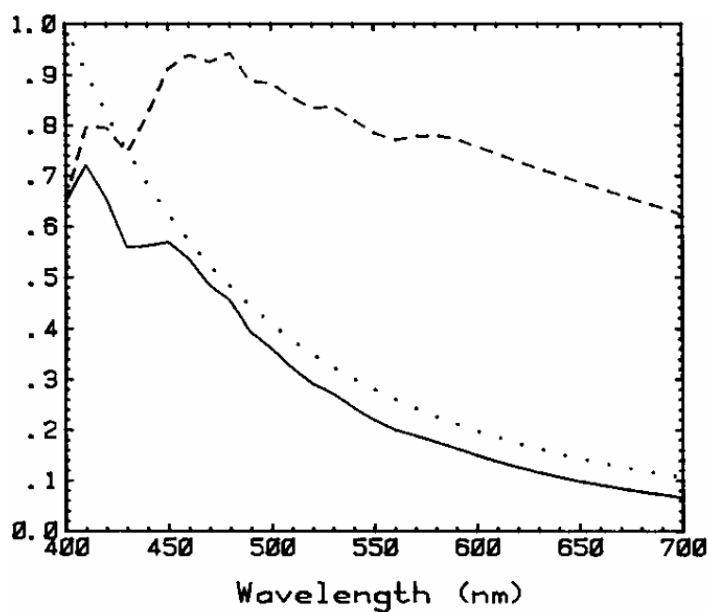
### 4.2 Zmena farby počas dňa

Počas dňa dochádza k zmene farby oblohy v dôsledku kombinácie Rayleighovho a Mieovho rozptylu. Na začiatku dňa je obloha najmodrejšia, keď prevláda Rayleighov rozptyl [2] (silnejší pre kratšie vlnové dĺžky, modrá farba). Ako sa však deň posúva a pozorovateľ sa približuje k Slnku, Mieov rozptyl začína zohrávať väčšiu rolu, čo vedie k zníženiu intenzity modrej farby a k jej kombinácii s bielym svetlom. Tento jav je vizuálne pozorovateľný ako postupný prechod z jasnej modrej oblohy k takým pastelovým farbám v blízkosti Slnka, keď sa zvyšuje prítomnosť bieleho svetla [2].

---

<sup>1</sup> $\nu$  je frekvencia svetla.

<sup>2</sup> $\lambda_0$  je vlnová dĺžka svetla vo vákuu.



Obr. 4.1: Rayleighov zákon rozptylu (bodky), spektrum slnečného svetla mimo atmosféru Zeme (čiarkovaná krivka) a výsledný spektrálny priebeh rozptýleného svetla ako ich súčin (plná krivka). Aj keď spektrum nie je výrazne modré, dominantná vlnová dĺžka je približne 475 nm, čo je v modrej oblasti (450–490 nm). Percepčne vnímame oblohu ako modrú, hoci obsahuje všetky vlnové dĺžky svetla. Obrázok tiež ilustruje, že čistota (purita) modrej farby oblohy je menej než 42 % — čisto rozptýlené Rayleighovým mechanizmom. (Podľa [1])

## Kapitola 5

# Simulácia atmosférickej optiky

V rámci tejto práce som vytvoril vlastnú interaktívnu vizualizáciu javov atmosférickej optiky, ktoré boli rozoberané v predchádzajúcich kapitolách. Cieľom bolo priblížiť, ako tieto javy vznikajú a aké faktory ich ovplyvňujú v reálnych atmosférických podmienkach. Program simuluje svetelné javy ako dúha, halo okolo slnka a zmenu farby oblohy počas dňa, to všetko v závislosti od parametrov prostredia.

### 5.1 Pozorovacie podmienky

Simulácia prebieha v trojrozmernom priestore, kde sa používateľ môže voľne pohybovať a meniť svoj uhol pohľadu, čím dochádza k zmene pozorovatelnosti optických javov. Interaktívne ovládanie umožňuje používateľovi priamo meniť nasledujúce parametre:

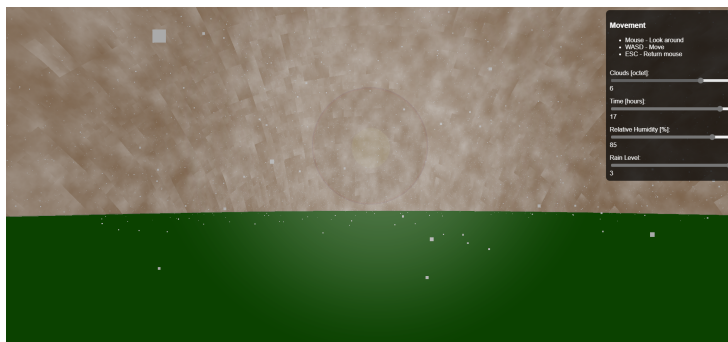
- **Uhol pohľadu** – používateľ sa môže pohybovať a otáčať v 3D priestore.
- **Oblačnosť (v oktetoch 0–8)** – ovplyvňuje množstvo dopadajúceho slnečného svetla, viditeľnosť halo efektov a dúhy.
- **Čas (6:00–18:00)** – mení výšku Slnka na oblohe a tým aj farbu oblohy a pozíciu dúhy.
- **Relatívna vlhkosť (0–100%)** – vplýva na výskyt halových javov, najmä v prítomnosti hustých oblakov.
- **Úroveň dažďa (0–3)** – určuje výskyt a intenzitu dúhy, pričom tiež ovplyvňuje oblačnosť a vlhkosť.

### 5.2 Optické javy v simulácii

- **Dážď** – spôsobuje vznik dúhy pri vhodnej pozícii Slnka.
- **Oblačnosť a vlhkosť** – umožňujú pozorovanie halových javov pri vysokej vlhkosti a prítomnosti ľadových kryštálov v oblačnosti.
- **Farba oblohy** – dynamicky sa mení v závislosti od polohy Slnka a rozptylu svetla (Rayleighov a Mieov rozptyl).

Simulácia vizuálne prepája fyzikálne zákonitosti s reálnymi pozorovaniami a poskytuje názorný nástroj na pochopenie atmosférických optických javov. Projekt je dostupný online na adrese:

<https://xbilko03.github.io/FY0/>



Obr. 5.1: Výsledný nástroj pre vizualizáciu optických javov v atmosfére – Na obrázku konkrétne vidieť slabý halo efekt v zamračenom počasí.

### 5.3 Záver

Cieľom tejto práce bolo z fyzikálneho hľadiska preštudovať atmosférické optické javy – dúha, halo efekty a farba oblohy. Následne ich implementovať do vizuálnej simulácie. Teoretická časť sa zamerala na vysvetlenie princípov rozptylu svetla a ich dôsledkov na vzhľad oblohy za rôznych podmienok.

Na základe získaných poznatkov bol vytvorený interaktívny 3D simulátor atmosférickej optiky. Umožňuje dynamicky meniť podmienky prostredia a pozorovať vznik a vývoj optických javov v reálnom čase.

Zadanie bolo úspešne splnené a výsledný projekt slúži ako názorná pomôcka pre pochopenie atmosférických javov vo vzťahu k ich fyzikálnemu základu.

# Literatúra

- [1] BOHREN, C. *Atmospheric Optics* [Archived article]. Archived December 6, 2013.
- [2] LYNCH, D. K. a LIVINGSTON, W. C. *Color and Light in Nature*. 2. vyd. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. ISBN 9780521775045.
- [3] PEDROTTI, F. L., PEDROTTI, L. S. a PEDROTTI, L. M. *Introduction to Optics*. 3. vyd. Pearson, 2007. ISBN 9780131499331.
- [4] SALEH, B. E. A. a TEICH, M. C. Fundamentals of Photonics. In: USA: Wiley, 2007, kap. 7, s. 592–682. ISBN 978-0-471-35832-9. PDF.
- [5] TAPE, W. a MOILANEN, J. *Atmospheric Halos and the Search for Angle  $x$* . American Geophysical Union, 2006. ISBN 978-0-87590-727-7. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11122/6400>.