



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**  
FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

**ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ**  
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

## **REALISTICKÉ VYKRESLOVÁNÍ ATMOSFÉRICKÝCH JEVŮ**

REALISTIC RENDERING OF ATMOSPHERIC PHENOMENA

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**ONDŘEJ SABELA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. MICHAL VLNAS**

**BRNO 2022**

## Zadání bakalářské práce



24379

Student: **Sabela Ondřej**

Program: Informační technologie

Název: **Realistické vykreslování atmosférických jevů**

**Realistic Rendering of Atmospheric Phenomena**

Kategorie: Počítačová grafika

Zadání:

1. Nastudujte možnosti realistického zobrazování atmosférických jevů, se zaměřením na Rayleighův a Mieův rozptyl.
2. Vyberte vhodnou techniku zobrazování a zvolte řešené efekty.
3. Navrhněte způsob implementace zvolené techniky a řešení vybraných jevů.
4. Implementujte navrženou techniku a vytvořte demonstrační aplikaci.
5. Vyhodnoťte dosažené výsledky a diskutujte další možný rozvoj.

Literatura:

- Kirk Riley, David S. Ebert, Martin Kraus, Jerry Tessendorf, and Charles Hansen. 2004. Efficient rendering of atmospheric phenomena. In *Proceedings of the Fifteenth Eurographics conference on Rendering Techniques (EGSR'04)*. Eurographics Association, Goslar, DEU, 375-386.
- Pharr, M., Jakob, W. a Humphreys, G. *Physically Based Rendering: From Theory to Implementation*. 3. vyd. San Francisco, CA, USA, ISBN 0128006455, 9780128006450

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 až 3 zadání.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Vlnas Michal, Ing.**

Vedoucí ústavu: Černocký Jan, doc. Dr. Ing.

Datum zadání: 1. listopadu 2021

Datum odevzdání: 11. května 2022

Datum schválení: 1. listopadu 2021

## Abstrakt

Cílem této práce je vývoj počítačového programu, který pomocí co nejjednodušší kombinace různých technik realistického zobrazování simuluje rozptyl světla v zemské atmosféře a mracích. Detailně vysvětuje fyzikální a fenomenologické pozadí základních vlastností pevných i průhledných materiálů. Představuje fyzikálně založené zobrazovací metody, které je možné k takové simulaci použít, a jejich optimalizace pomocí předpočítaných tabulek. Důraz je kláden na maximální věrnost principům ze skutečného světa. Výsledný program využívá akceleraci pomocí grafické karty a data pocházející plně z mikrofyzikálních měření atmosférických veličin. Jím vytvořené snímky venkovních scén je možné prakticky využít například jako pozadí venkovního prostředí pro design trojrozměrných modelů. Otevřený zdrojový kód programu může být také dobrým učebním združením pro vysvětlení použitých vykreslovacích technik.

## Abstract

The aim of this thesis is to develop a GPU accelerated computer program which is able to simulate light scattering in the Earth's atmosphere and clouds using the simplest possible combination of various realistic rendering techniques. A detailed explanation of the physical and phenomenological background of the basic characteristics of both solid and translucent materials is included. Physically based rendering methods which are able to simulate such phenomena are presented along with several optimizations, including precomputation and lookup tables, with a focus on functional fidelity to real-world principles. The presented solution is based on data from real-world microphysical measurements. The resulting outdoor scene images can be used as background environment maps in 3D modelling and design software. The open source code can also serve as a starting point for describing the implementation of the presented rendering techniques.

## Klíčová slova

fotorealistické zobrazování, Monte Carlo sledování cesty, Mieův rozptyl, Rayleighův rozptyl, procedurální terén, planeta, nepřímé osvětlení, fotometeor, gloriola, bílá duha.

## Keywords

photorealistic rendering, Monte Carlo path tracing, Mie scattering, Rayleigh scattering, procedural terrain, Earth, global illumination, photometeor, glory, fog bow.

## Citace

SABELA, Ondřej. *Realistické vykreslování atmosférických jevů*. Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Michal Vlnas

# Realistické vykreslování atmosférických jevů

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Michala Vlnase. Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpal.

.....  
Ondřej Sabela  
10. května 2022

## Poděkování

Rád bych nejprve poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Michalovi Vlnasovi za odborné směrování a rady, které mi poskytl, vstřícnost při domlouvání, mém častém zapomínání a přesouvání termínů. Vřelé poděkování patří mým přátelům, sourozencům, rodičům, Anežce nejvíce mé duši blízké a její rodině za psychickou podporu, trampolínu, hudbu, piknik, hromadu jídla, sladkostí, kafe a čokolády, které s nimi můžu sdílet.

# Obsah

|                   |   |           |
|-------------------|---|-----------|
| <b>1</b>          | <b>Úvod</b>   | <b>2</b>  |
| <b>2</b>          | <b>Principy a techniky realistického zobrazování</b>    | <b>3</b>  |
| 2.1               | Interakce světla s povrchem . . . . .                   | 3         |
| 2.2               | Přístupy radiometrie a fotometrie . . . . .             | 5         |
| 2.3               | Zobrazovací rovnice . . . . .                           | 8         |
| 2.4               | Homogenní a heterogenní prostředí . . . . .             | 16        |
| 2.5               | Metody zobrazování . . . . .                            | 20        |
| 2.6               | Krovkání paprsku . . . . .                              | 24        |
| 2.7               | Procedurální generování . . . . .                       | 27        |
| <b>3</b>          | <b>Světelné děje v zemské atmosféře</b>                 | <b>30</b> |
| 3.1               | Atmosférické jevy v ovzduší . . . . .                   | 30        |
| 3.2               | Rozptyl světla v mracích . . . . .                      | 32        |
| 3.3               | Existující řešení . . . . .                             | 35        |
| <b>4</b>          | <b>Návrh výpočetního modelu</b>                         | <b>36</b> |
| 4.1               | Terén a oblačnost . . . . .                             | 37        |
| 4.2               | Módy reálného času a nejvyšší kvality . . . . .         | 38        |
| 4.3               | Numerická integrace a předpočítání rozptylu . . . . .   | 39        |
| <b>5</b>          | <b>Implementace zobrazování atmosférických jevů</b>     | <b>41</b> |
| 5.1               | Přehled použitých technologií . . . . .                 | 41        |
| 5.2               | Hostitelský a grafický program . . . . .                | 42        |
| 5.3               | Procedurálně generovaná scéna . . . . .                 | 44        |
| 5.4               | Krovkání paprsku v procedurálních strukturách . . . . . | 44        |
| 5.5               | Použitá mikrofyzikální data . . . . .                   | 47        |
| 5.6               | Nastavení scény . . . . .                               | 48        |
| 5.7               | Testování a dosažené výsledky . . . . .                 | 48        |
| <b>6</b>          | <b>Závěr</b>  | <b>52</b> |
| <b>Literatura</b> |   | <b>53</b> |
| <b>A</b>          | <b>Manuál k aplikaci</b>                                | <b>60</b> |
| <b>B</b>          | <b>Obsah přiloženého média</b>                          | <b>67</b> |
| <b>C</b>          | <b>Vykreslovací řetězec</b>                             | <b>68</b> |

# Kapitola 1

## Úvod

Tato práce spadá do odvětví realistické trojrozměrné počítačové grafiky, která se snaží svými výsledky a postupy co nejvíce přiblížit vzhledu a fungování fyzického světa. Obsahuje popis fyzikálního a matematického základu některých optických jevů, s nimiž se lidé setkávají v podstatě na denní bázi, ale také úkazů, které se vyskytují jen velmi vzácně. Diskutuje metody, díky nimž je možné takovéto jevy počítačově simulovat a zobrazovat, jejich vylepšení a popisuje vývoj počítačového programu sloužícího pro praktickou ukázku probraných metod. Pokládá důraz na vykreslování venkovních scén s mraky, sluncem a oblohou.

Realistické zobrazovací simulace jsou důležité zejména pro grafiky a designéry, kteří při návrhu barev a materiálů svých výrobků pracují se zasazením takového předmětu do kontextu fyzického světa. Nejhojněji jsou však využívány ve filmovém průmyslu při vytváření efektů k záznamům pořízeným z kamer, ale i kompletně umělých animací.

V posledních desítkách let jde výzkum v oblasti počítačové grafiky kupředu právě směrem co největší realističnosti. Rozvíjí se především hardwarová akcelerace výpočtů, které byly dříve proveditelné pouze na univerzálních procesorech. Dnes se stávají proveditelnými na grafických kartách dostupných běžným uživatelům.

Cílem této práce bylo propojit současné vědecké poznatky o jevech přítomných ve fyzickém světě s možnostmi běžné výpočetní techniky a zpřístupnit je čtenáři. Dalším cílem pak bylo vytvoření počítačového programu, který tyto možnosti dokáže využít k umělé tvorbě umělecky použitelných obrázků.

Díky širokému využití volně dostupných zdrojů a výzkumných prací je tato práce zajímavá hlavně svým návrhem. Ten, ač je konceptuálně velmi jednoduchý, je podkladem pro vcelku složité efekty.

Druhá kapitola se zabývá lidským vnímáním světla, poznatky o fyzikální a matematické podstatě světelného záření v prostoru a technologiemi pro počítačovou simulaci založenou na těchto zákonech. Třetí kapitola je úzce zaměřena na složení zemské atmosféry a mraků, dále informuje čtenáře o původu běžných dějů v ovzduší i vzácných fotometeorů, a zhodnocuje dostupný software, který s nimi dokáže počítat. Ve 4. kapitole je čtenář seznámen s postupem zvoleným pro vykreslování virtuálních scén s dříve představenými jevy a zvažuje jeho složitost a možné optimalizace. Poslední kapitola je věnována vysvětlení funkčnosti a implementačních detailů počítačové aplikace, která tuto práci dovršuje.

## Kapitola 2

# Principy a techniky realistického zobrazování

Fyzikálně založené zobrazovací metody (angl. *Physically based rendering*, dále PBR) se snaží pomocí fyzikálních principů simulovat děje mezi částicemi světla a hmotou. Nahlížejí na zobrazovanou virtuální scénu jako na prostor, ve kterém jsou umístěny trojrozměrné předměty z určitého *materiálu*.

### 2.1 Interakce světla s povrchem

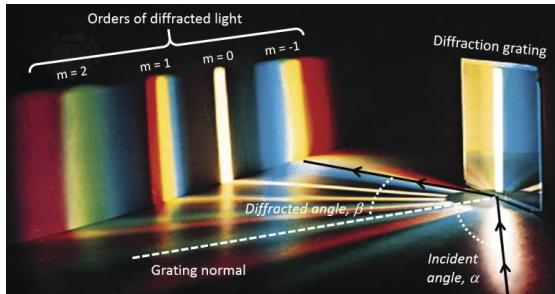
Na scénu dopadá světlo vrhané světelnými zdroji, které se pomocí průchodu materiály, nebo odrazů od předmětů dostane až do virtuální kamery umístěné ve scéně. Kamera je světelný senzor, jehož výstupem je matici pixelů, z nichž každý zachycuje světlo dopadající na senzor z trochu jiného úhlu a převádí jeho intenzitu na barvu zobrazenou na displeji počítače. Myšlenka senzoru vychází z faktu, že reálné světlo je elektromagnetické záření, které je detekovatelné lidským okem [59]. Principy metody PBR jsou podrobně vysvětleny například v publikaci Matta Pharra a kol. [42].

#### Optické jevy

Protože metody PBR jsou v základu založeny na zákonech geometrické optiky (jinak také paprskové optiky), předpokládají, v zájmu zjednodušení, že se částice světla – fotony – pohybují ve vakuu přímočaře nekonečnou rychlostí a neberou v potaz vlnové vlastnosti světla [71]. Světlo je zde představováno *paprsky* — každý pixel snímku představuje jeden do kamery příchozí paprsek. Při střetu paprsků s materiélem uvažuje jen dvě možné události.

- Odraz – úhel odrazu je vzhledem k rovině povrchu stejný jako úhel dopadu.
- Lom – v úhlu, který je závislý na *indexu lomu materiálů* podle Snellova zákona.

Jinými jevy, jako je ohyb (difrakce), rozklad (disperse), interference a polarizace světla, se zabývá vlnová optika. Kvantová optika pak tyto jevy popisuje na nižší úrovni jako rozptyl (angl. scattering). Radiometrie a fotometrie se pak zabývají měřením záření — díky nim je možné formulovat zákony pro počítačové zobrazování založené na fyzikálních principech a jednotkách.



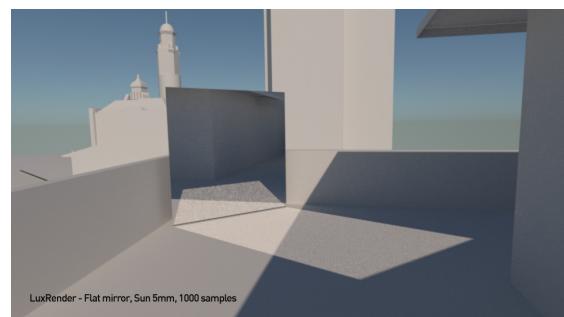
(a) Při průchodu přes difrakční mřížku se světlo rozkládá na jednotlivé složky<sup>1</sup>



(c) Kaustika je zakřivená oblast, která ohraničuje plochu dopadajících zlomených paprsků<sup>2</sup>

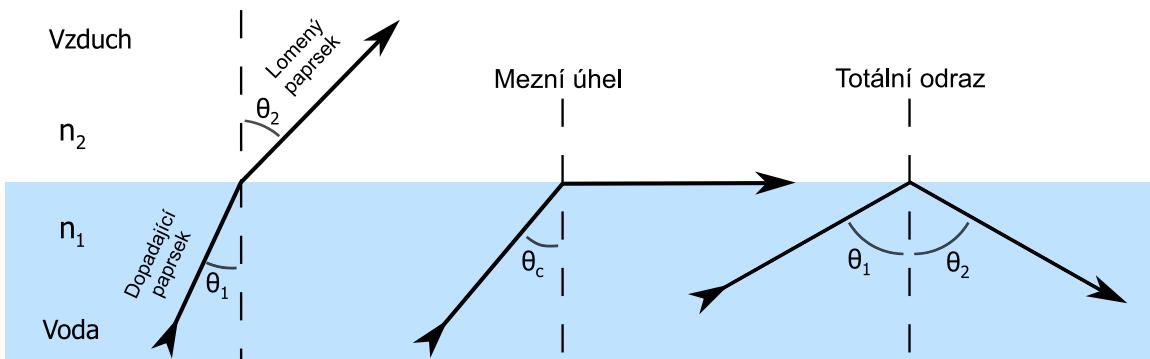


(b) Rozptyl záření na molekulách mléka činí paprsek viditelným. Převzato z [52]



(d) Kaustika rovného zrcadla<sup>3</sup>

Obrázek 2.1: Optické jevy v praxi



Obrázek 2.2: Vizualizace různých případů dopadu paprsku v geometrické optice<sup>4</sup>

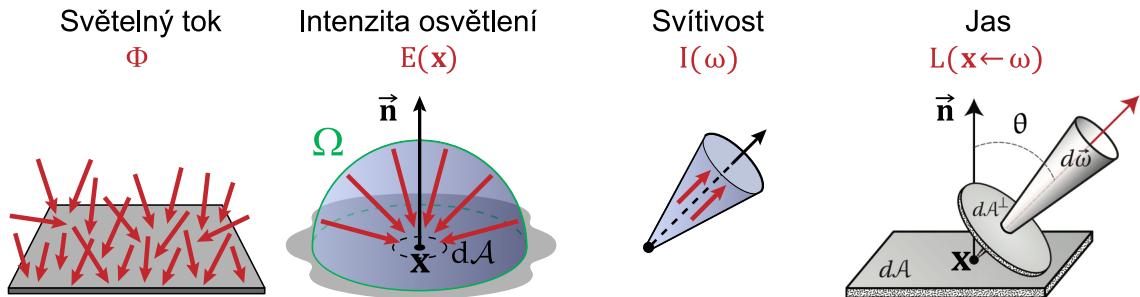
<sup>1</sup>Obrázek převzat z [https://www.newport.com/mam/celum/celum\\_assets/Figure\\_79-Photonics\\_Handbook\\_800w.jpg](https://www.newport.com/mam/celum/celum_assets/Figure_79-Photonics_Handbook_800w.jpg).

<sup>2</sup>Obrázek převzat z <http://news.povray.org/povray.binaries.images/attachment/%3Cweb.4ae1439cb3eb0601e4fc19be0%40news.povray.org%3E/gaf-caustic2.jpg>.

<sup>3</sup>Obrázek převzat z <https://blenderartists.org/uploads/default/original/3X/6/0/60771a7334cfdd52a5569a20829af71046e8901b.jpg>.

<sup>4</sup>Založeno na obrázku <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:RefractionReflection.svg&oldid=444553953> publikovaném pod licencí CC BY-SA 3.0.

## 2.2 Přístupy radiometrie a fotometrie



Obrázek 2.3: Vizualizace významu fotometrických veličin. Převzato z [1, 37].

| Veličina<br>(anglický název)             | Jednotka        | Rozměr  |
|--|-----------------|---|
| Zářivý tok (radian flux)                 | $\Phi_e$        | watt  |
| Zář (radiance)                           | $L_e$           | watt na steradián na metr čtverečný             |
| Spektrální zář (spectral radiance)       | $L_{e,\lambda}$ | watt na steradián na metr čtverečný na nanometr |
| Ozářenost (irradiance)                   | $E_e$           | watt na metr čtverečný                          |
| Spektrální ozáření (spectral irradiance) | $E_{e,\lambda}$ | watt na metr čtverečný na nanometr              |

Tabulka 2.1: Vybrané radiometrické veličiny [55]

| Veličina<br>(anglický název)                | Jednotka    | Rozměr                                |
|---|-------------|---------------------------------------|
| Světelný tok (luminous flux)                | $\Phi$      | lumen                                 |
| Jas (luminance)                             | $L$         | kandela na metr čtverečný             |
| Spektrální jas (spectral luminance)         | $L_\lambda$ | kandela na metr čtverečný na nanometr |
| Intenzita osvětlení (illumiance)            | $E$         | lux = lumen na metr čtverečný         |
| Spektrální osvětlení (spectral illuminance) | $E_\lambda$ | lumen na metr čtverečný na nanometr   |

Tabulka 2.2: Vybrané fotometrické veličiny [55]

Oba obory nahlízejí na světlo jako na elektromagnetické záření (nebo také elektromagnetické vlnění). Fotometrie se ale zabývá jen zářením, které je možné pozorovat lidským okem. Jak vysvětuje Bouthors [4], v radiometrii se při měření intenzity záření o určité

vlnové délce bere v potaz energie, kterou částice s touto vlnovou délkou představuje<sup>5</sup>, zatímco ve fotometrii se bere v potaz citlivost lidského oka na tuto vlnovou délku. Různé vlnové délky částic totiž lidské oko vidí jako různé barvy a na některé z nich je citlivější než na jiné. Při *realistickém zobrazování* je přínosné použít při výpočtech osvětlení scény přístup radiometrie a poté výsledně zobrazované záření převést do fotometrických veličin. Pro přesné dosazení do barevného prostoru CIE XYZ je převedení dokonce nutné. Zář  $L_e$  udanou ve wattech na metr čtvereční na prostorový úhel ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ), je tedy převedena na *jas*  $L$  udávaný v lumenech na metr čtvereční na prostorový úhel ( $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ), nebo někdy také v kandelách na metr čtvereční ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

Tyto jednotky bývají v rovinách pro zjednodušení často (i v této práci) souhrnně označovány  $L$  (s vynechaným indexem  $e$ ), protože z hlediska geometrické optiky pro ně platí **totožné zákony**. Převod mezi nimi je možný pomocí rovnice, která shromázdí příspěvek všech vlnových délek obsažených v elektromagnetickém záření do viditelné oblasti:

$$L_\lambda = K_m \int_{380\text{nm}}^{830\text{nm}} L_{e,\lambda} v(\lambda) d\lambda. \quad (2.1)$$

$K_m$  je konstanta  $683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$  označovaná v angličtině Maximum luminous efficacy (volně lze přeložit jako maximální světelná účinnost). Označuje schopnost světelných zdrojů produkovat viditelné světlo [10] a je převodní konstantou mezi výkonem  $W$  v jednotkách wattů a světelným tokem  $\Phi$  v lumenech.

$v(\lambda)$  je funkce světelné účinnosti (viz obrázek 2.4a) a přiděluje k vlnové délce  $\lambda$  schopnost její detekce lidským okem.

**380-830 nm** je rozsah vlnových délek viditelných lidským okem.

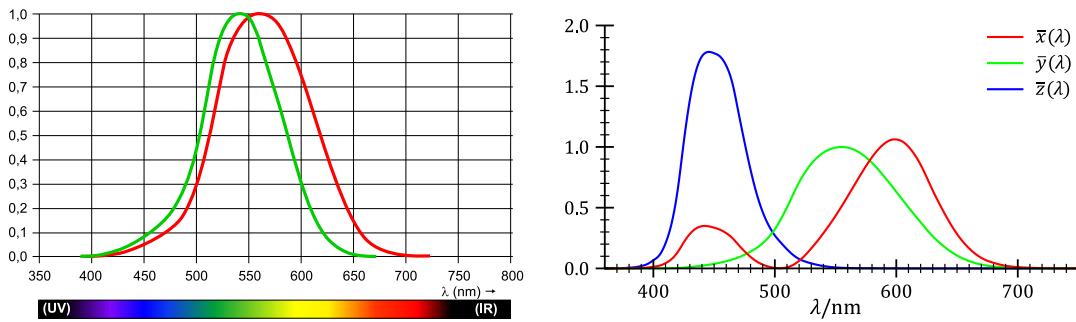
Protože v počítačové grafice je každý pixel obrazu většinou reprezentován hodnotami třech barev sRGB modelu, je nutné převést zář  $L_e$  (někdy udávanou jako spektrální zář, což odráží fakt, že má různou hodnotu pro různé vlnové délky) na *jas*  $L$  pro všechny tři barevné *kanály* – červený, zelený a modrý. Dále je pak nutné převést hodnoty jasu (označované jako XYZ) na hodnoty barevného modelu sRGB pomocí „funkcí pro odpovídající barvy“ (viz obrázek 2.4b) vydaných úřadem CIE (*Commission Internationale de l'éclairage* [67]). Všechny hodnoty XYZ, které jsou lidským okem pozorovatelné tvoří vlastně barevný prostor CIE XYZ (obrázek 2.5a). V této práci byla použita metoda převodu modelu CIE XYZ na sRGB E. Brunetona, kterou popsal ve svém článku *A Qualitative and Quantitative Evaluation of 8 Clear Sky Models* [5].

## Gamma korekce

„Lidé vnímají světlo nelineárně. Lidské oko má vyšší citlivost ve stínech, zatímco při jasném osvětlení je méně citlivé na rozpoznání rozdílů v osvětlení [70].“ Aby se při ukládání barevných hodnot zachovala vyšší úroveň detailů v tmavších oblastech snímku, používá se *gamma korekce*, což v praxi obnáší dosazení hodnoty jasu každého *kanálu* barvy do mocninné funkce  $y = x^{\frac{1}{\gamma}}$ . Výsledkem vyzáření této barvy z monitoru a její detekce lidským okem je pak inverzní operace  $y = x^\gamma$ . Standardně (z historických důvodů [70]) se používá konstanta  $\gamma = 2,2$ .

---

<sup>5</sup>Jde vlastně o různě rychle kmitající fotony. Čím kratší je vlnová délka, tím rychlejší je kmitání a tím více energie je přeneseno.



(a) Funkce světelné účinnosti pro červenou a zelenou barvu<sup>6</sup>

(b)  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  – funkce CIE pro odpovídající barvy<sup>7</sup>

Obrázek 2.4: Grafy funkcí pro převod jasových hodnot

## Mapování tónů

Monitory počítačů dokáží zobrazit každý z barevných kanálů jen v omezené jasové škále někdy nazývané jako Standard Dynamic Range. Výstup grafických karet podporuje v základu také jen omezený počet barevných tónů — Low Dynamic Range, dále LDR. Běžně se jedná o 8 bitů na barevný kanál. Realistické zobrazování ale produkuje v místech s vysokým jasem hodnoty (označované jako High Dynamic Range, dále HDR), které tuto škálu přesahují, čímž se ztrácí detaily v příliš jasných místech snímku. Některé monitory sice umí HDR v omezené míře zobrazit (implementují standardy jako třeba HDR10 - SMPTE ST.2084 [8]), ale stále se jedná jen o zlomek rozsahu hodnot, které je možné pozorovat v realitě a které *realistické zobrazování* produkuje. Aby bylo možné zachovat detaily v příliš jasných místech obrazu, běžně se provádí *mapování tónů* (angl. *Tonemapping*), pomocí funkcí – *mapovacích křivek*, které přenesou rozsah HDR do LDR. Tonemapping je nutné provést v barevném prostoru CIE XYZ ještě před *gamma korekcí*.

## Mapovací křivky

Graf průběhů některých z nich je možné vidět na obrázku 2.5b. Výsledky, které produkují jsou na obrázku 2.6.

**Academy Color Encoding System** (ACES) byl vyvinut pro filmový průmysl. Používá se při ukládání a zpracování obrazových dat z kamer.

- Obsahuje definice několika barevných prostorů, které obsahujou celý prostor CIE XYZ (znázorněn na obrázku 2.5a), a je součástí standardů vydaných SMPTE [56].
- Křivky, které definuje, musí být aplikované v příslušném barevném prostoru ACES. V *realistickém zobrazování* se používají upravené implementace, které další převod mezi barevnými prostory nevyžadují.

**Křivka z Unreal Engine 4** cílí na podobné výsledky jako filmové křivky z ACES, ale s jednodušší implementací.

## Expoziční operátor $y = 1 - e^{\frac{-x}{a}}$

<sup>5</sup>Obrázek převzat z <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:LuminosityCurve2.svg&oldid=491766403>.

<sup>6</sup>Obrázek převzat z [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:CIE\\_1931\\_XYZ\\_Colour\\_Matching\\_Functions.svg&oldid=444495774](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:CIE_1931_XYZ_Colour_Matching_Functions.svg&oldid=444495774).

- Rovněž nazýván **exponenciální**
- Umožňuje nastavit jeden celočíselný parametr  $a$  zvaný „expozice“.

**Reinhardův operátor**  $y = \frac{x}{1+x}$

- Ve své původní verzi obsahuje proces approximace tzv. *klíče scény*, jak popisuje [57], který je ovšem při vykreslování v reálném čase vynecháván.
- Jeho alternativní verze

$$y = \frac{x \cdot (1 + x \cdot w^{-2})}{1 + x} \quad (2.2)$$

umožňuje zadat parametr  $w$ , který označuje maximální jasovou hodnotu v obrazu, tzv. bílý bod. Ta je pak přenesena přesně na hodnotu 1 v LDR.

**Křivka ze hry Gran Turismo SPORT** <sup>8</sup> [61] je exemplářem křivky, kterou vyuvinulo herní studio pro své vlastní potřeby. Jeho klíčovými vlastnostmi jsou:

- Lineární průběh v oblasti středních tónů.
- Nastavitelný kontrast pro tmavé tóny.
- Lze nastavit maximální bílý bod (podobně jako u Reinhardova operátoru).
- Původní implementace je volně dostupná<sup>9</sup>.

**Křivka Timothyho Lottese** [29] pro VDR<sup>10</sup> představená společností AMD<sup>11</sup>

- Umožňuje uživateli programu upravit klíčové parametry – zohledňuje schopnosti jeho monitoru.
- Navrhнута s očekáváním použití procesu *adaptace oka* (angl. eye adaptation) – technika časově proměnlivého upravování expozice podle úrovně jasu oblasti, která je zrovna snímána kamerou [62].

## 2.3 Zobrazovací rovnice

Jak už bylo výše popsáno, geometrická optika počítá se světlem jako s paprsky. Interakci světelných paprsků s povrchem matematicky popisuje *Zobrazovací rovnice*, kterou představili David Immela a kol. [19] jako integrál osvětlení ze všech směrů a James Kajiya [22] jako integrál světla ze všech okolních ploch. Verzi D. Immely je možné zapsat

$$L_{o,\lambda}(\mathbf{x}, \omega_o, \lambda) = L_{e,\lambda}(\mathbf{x}, \omega_o, \lambda) + \int_{\Omega} f_r(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o) L_{i,\lambda}(\mathbf{x}, \omega_i, \lambda) |\cos \theta_i| d\omega_i. \quad (2.3)$$

- $L_{o,\lambda}(\mathbf{x}, \omega_o, \lambda)$  značí zář vlnové délky  $\lambda$ , které je odraženo z bodu  $\mathbf{x}$  ve směru vektoru  $\omega_o$ .
- $L_{e,\lambda}(\mathbf{x}, \omega_o, \lambda)$  je zář vlnové délky  $\lambda$ , které vyzařuje samotný materiál povrchu z bodu  $\mathbf{x}$  do směru  $\omega_o$ .

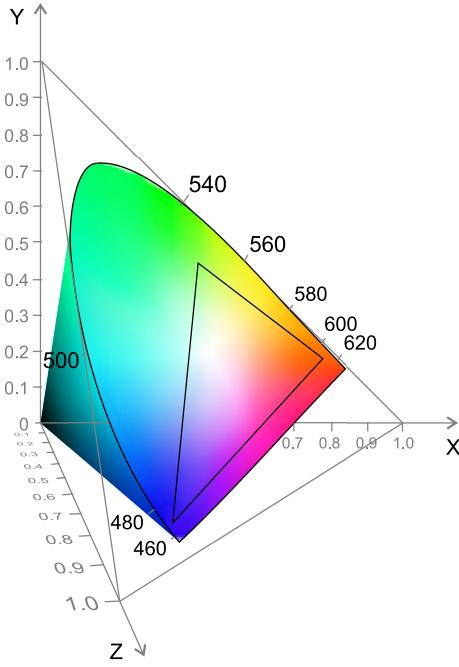
---

<sup>8</sup>Zde se konkrétně jedná o herní studio Polyphony Digital.

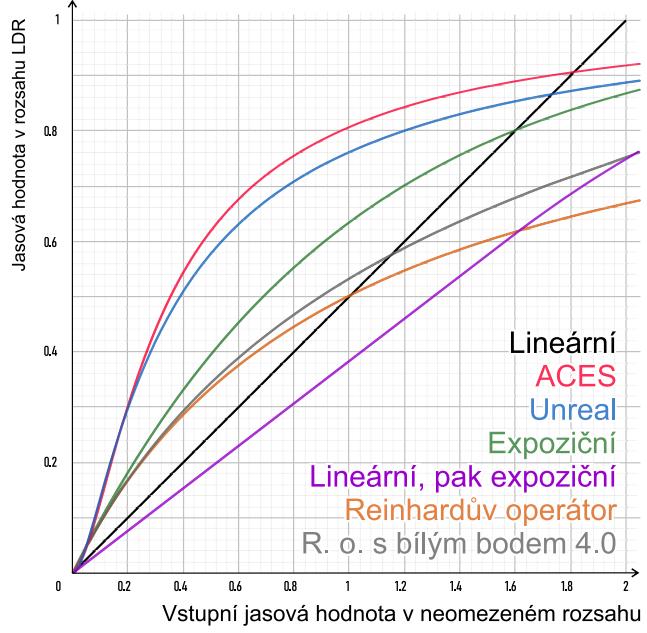
<sup>9</sup>Její formulaci lze nalézt online na adrese <https://www.desmos.com/calculator/mbkwnuihbd>.

<sup>10</sup>Variable Dynamic Range – nastavitelný (variabilní) tónový rozsah.

<sup>11</sup>Advanced Micro Devices – hardwarová společnost vyrábějící grafické karty.



(a) Trojrozměrný chromatický diagram barevného prostoru CIE XYZ s přibližným trojúhelníkovým vyznačením prostoru Rec 709 [48] používaného jako SDR u televizí. Inspirováno [58].



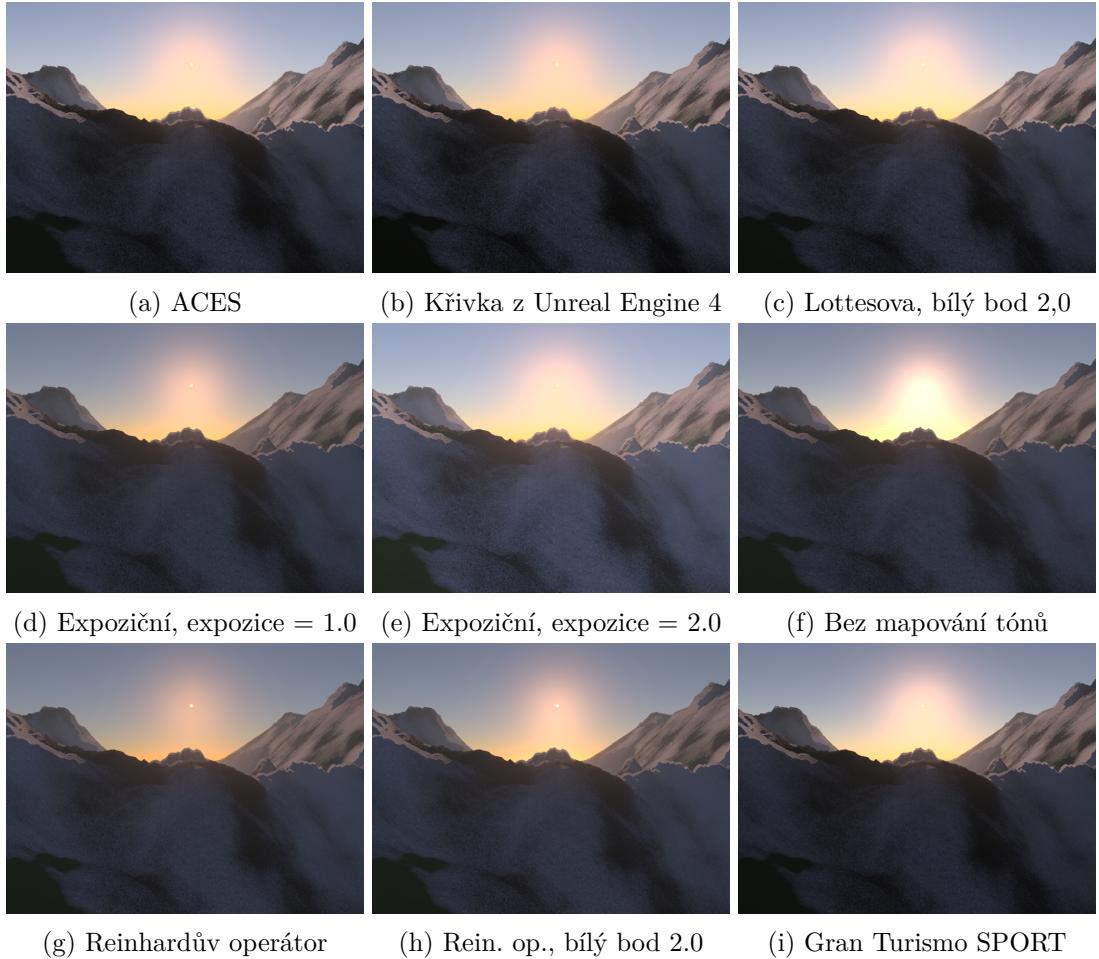
(b) Některé funkce pro mapování tónů

Obrázek 2.5: Řešení problémů jasového rozsahu

- $L_{i,\lambda}(\mathbf{x}, \omega_i, \lambda)$  je zář vlnové délky  $\lambda$  příchozího k povrchu do bodu  $\mathbf{x}$  ze směru  $\omega_i$  (světlo může přicházet ze světelného zdroje, nebo již odražené od jiného povrchu).
- $f_r(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o)$  je **obousměrná distribuční funkce odrazu** udávající schopnost materiálu odrážet světlo vlnové délky  $\lambda$  ze směru  $\omega_i$  do směru  $\omega_o$  v bodě  $\mathbf{x}$ .
- $\cos \theta_i$  je kosinus úhlu mezi  $\omega_i$  a normálovým vektorem povrchu  $\vec{\mathbf{n}}$ . Je aplikací Lambertova zákona popsaného níže.
- $\Omega$  označuje množinu všech směrů  $\omega_i$  z bodu  $\mathbf{x}$ . Tvoří na rovině povrchu polokouli.
- $\int_{\Omega} \dots d\omega_i$  je integrál záře dopadající do bodu  $\mathbf{x}$  ze všech směrů. Jedná se vlastně o intenzitu osvětlení  $E_i$ , jak je možno vidět na obrázku 2.7a (poznámka: plocha bodu  $\mathbf{x}$  je nekonečně malá, v počítačové grafice představuje 1 pixel, což na obrázku nelze snadno znázornit). Princip integrace záře do podoby *ozářenosti* je blíže popsán v [42, kapitola 5.5].
- $\mathbf{x} = dA$  představuje diferenciál plochy představovaný v počítačové grafice jedním pixelem.

### Lambertův kosinový zákon

Z definice *zářivosti* [69] vyplývá, že čím dále je povrch od zdroje, tím menší intenzita osvětlení připadá na metr čtverečný, protože ozářená plocha představuje pro příchozí osvětlení



Obrázek 2.6: Stejná scéna po použití různých křivek pro mapování tónů

menší prostorový úhel. Není-li *normálový vektor*<sup>12</sup> povrchu rovnoběžný s vektorem ve směru příchozího osvětlení  $\vec{I}$  – „je natočen šikmo“, pak souvislý metr čtverečný povrchu rovněž představuje menší prostorový úhel. Energie přijatá touto plochou je přímo úměrná kosinu úhlu mezi  $\vec{n}$  a  $\vec{I}$ , jak popisuje obrázek 2.7b a následující rovnice (volně převzato z [42, kapitola 5.4.1]):

$$E_2 = \frac{\Phi \cos \theta}{A}, \quad (2.4)$$

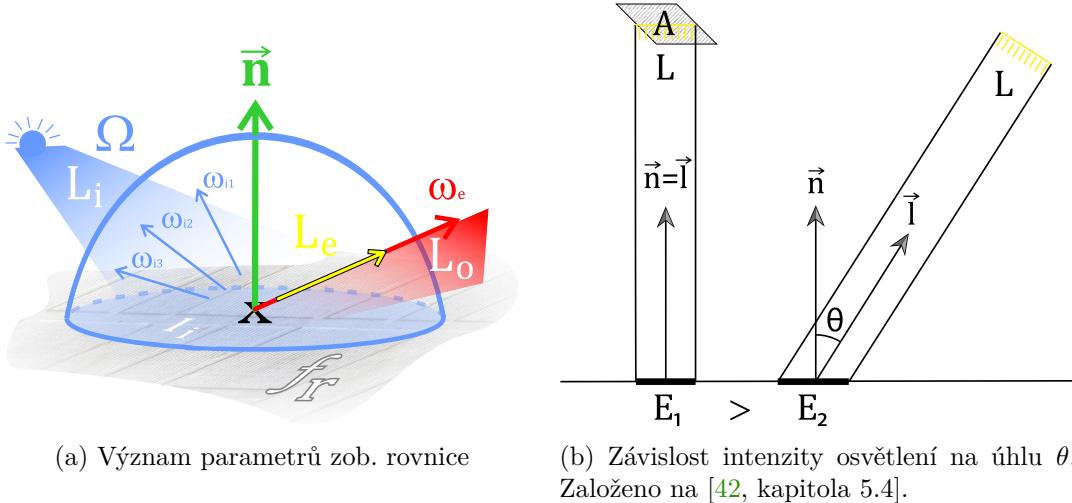
kde  $A$  označuje plochu světelného zdroje. V počítacové grafice se běžně nepočítá osvětlení na jednotku plochy, ale zář  $L_i$  dopadající na diferenciál plochy neboli jeden pixel snímku, a to s následujícím vztahem"

$$L_i = L \cos \theta, \quad (2.5)$$

přičemž  $L$  je zadaná zář světelného zdroje. Při výpočtu osvětlení je třeba dbát na fakt, že pokud je úhel  $\theta$  větší, než  $90^\circ$ , tato rovnice by produkovala záporné hodnoty, které je třeba zahodit a ponechat osvětlení na hodnotě 0.

---

<sup>12</sup>Vektor kolmý k rovině povrchu. Je znázorněn například na obrázcích 2.3 a označen symbolem  $\vec{n}$ .



Obrázek 2.7: Znázornění zobrazovací rovnice a Lambertova kosinového zákona

### Obousměrná distribuční funkce odrazu

Anglicky *Bidirectional reflectance distribution function* (zkrat. BRDF) udává hustotu pravděpodobnosti odrazu paprsku z určitého směru  $\omega_i$  do směru  $\omega_o$ . Jinými slovy popisuje závislost obražené záře na směrech příchozího a odchozího paprsku. Pro materiály propouštějící světlo je určena také obousměrná distribuční funkce propustnosti (*Bidirectional transmittance distribution function*, BTDF) definující vlastnosti materiálu, které souvisí s pohlcením záření. BRDF spolu s BTDF tvoří obousměř. distr. fun. rozptylu (*Bidirectional scattering distribution function*, BSDF). V realistickém vykreslování je na ni kladenno několik požadavků [42]:

- V žádném bodě nesmí být negativní
- Je reciproká, tedy  $f_r(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o) = f_r(\mathbf{x}, \omega_o, \omega_i)$ . To nám umožňuje zpětně trasovat světelné paprsky. Více v kapitole 2.5 Metody zobrazování.
- Splňuje zákon zachování energie (jinak také „konzervuje energii“):

$$\int_{\Omega} f_r(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o) |\cos \theta| d\omega_i \leq 1, \quad (2.6)$$

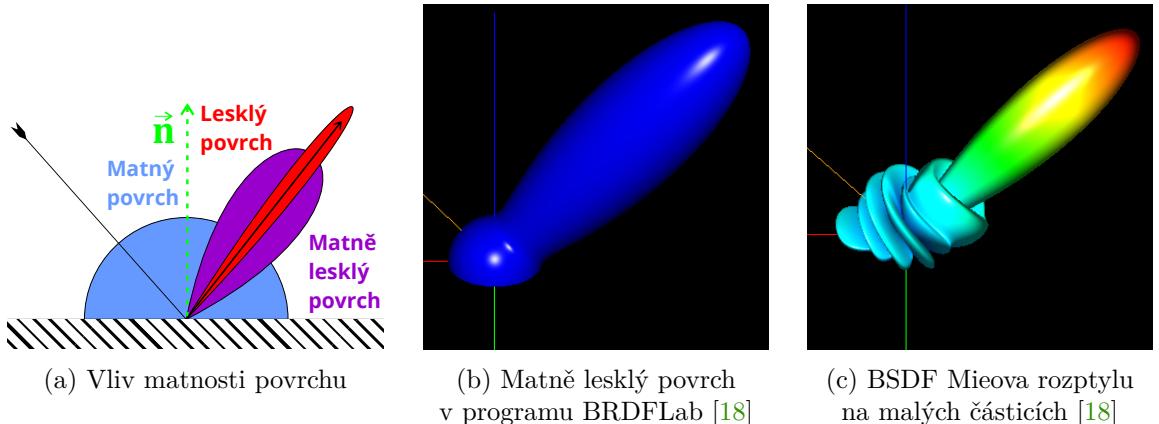
neboli když zintegrujeme její hodnoty pro všechny příchozí paprsky, výsledek by měl být menší, nebo roven 1 (materiál nemůže odrazit více světla, než přijal).

Pro dokonale matný (difuzní, například textil) materiál je (tzv. Lambertova) BRDF funkcí

$$f_r(\mathbf{x}) = \frac{\alpha(\mathbf{x})}{\pi}, \quad (2.7)$$

kde  $\alpha(\mathbf{x})$  je odrazivost (tzv. *albedo*) materiálu<sup>13</sup> v bodě  $\mathbf{x}$ . V případě dokonale lesklého materiálu (zrcadlo) má  $f_r$  hodnotu 1 v případech, kdy je úhel mezi  $\omega_i$  a  $\vec{n}$  roven úhlu mezi  $\omega_o$  a  $\vec{n}$ . V praxi je ale většina předmětů ze složitějších materiálů (viz obrázek 2.8) – mívali určitou difuzní a určitou lesklou (tzv. spekulární) složku. Pro zachycení těchto i dalších kombinovaných odrazových vlastností byly navrženy složitější distribuční funkce.

<sup>13</sup>Odravivost je vlastností fyzických materiálů, kterou vnímáme jako jejich barvu.



Obrázek 2.8: Vizualizace BRDF

**Phongův** osvětlovací model není fyzikálně korektní, ale zato jednoduchý. Materiálům jsou přiřazeny parametry tvrdost  $n$  (angl. hardness) a lesklost  $K_s$  (angl. specularity)<sup>14</sup>. Jeho původní verze nebyla navržena pro práci s distribučnímu funkciemi odrazu, ale její rovnice produkuje přímo barvu výsledných pixelů [11]:

$$I(\mathbf{x}) = \alpha(\mathbf{x})(1 - K_s)(\vec{n} \cdot \vec{l dir}) + K_s l(\vec{l dir} \cdot \omega_o)^n. \quad (2.8)$$

- $I(\mathbf{x})$  je barva pixelu zobrazujícího bod  $\mathbf{x}$ .
- $\vec{l dir}$  je obrácený směr příchodu světelných paprsků.
- $\omega_o$  je směr z bodu  $\mathbf{x}$  ke kameře.
- $l$  je barva světelného zdroje.

Lze jej použít i v PBR a to pomocí těchto formulací [27]:

$$K_s = \rho_s \frac{n+2}{2\pi}, \quad (2.9)$$

$$f_r = \frac{\alpha(\mathbf{x})}{\pi} + \frac{\rho_s(n+2)\cos^n \theta_r}{2\pi}. \quad (2.10)$$

- $\theta_r$  je úhel mezi  $\omega_i$  a  $\omega_o$ . Výraz  $\cos^n \theta_r$  má stejný význam jako  $(\vec{l dir} \cdot \omega_o)^n$  v předchozí rovnici.

**Blinnův-Phongův** osvětlovací model je podobný, jako Phongův, ale místo vektorů  $\vec{l dir}$  (respektive  $\omega_i$ ) a  $\omega_o$  počítá s vektorem  $\vec{h}$  „na půli cesty“ mezi těmito dvěma.

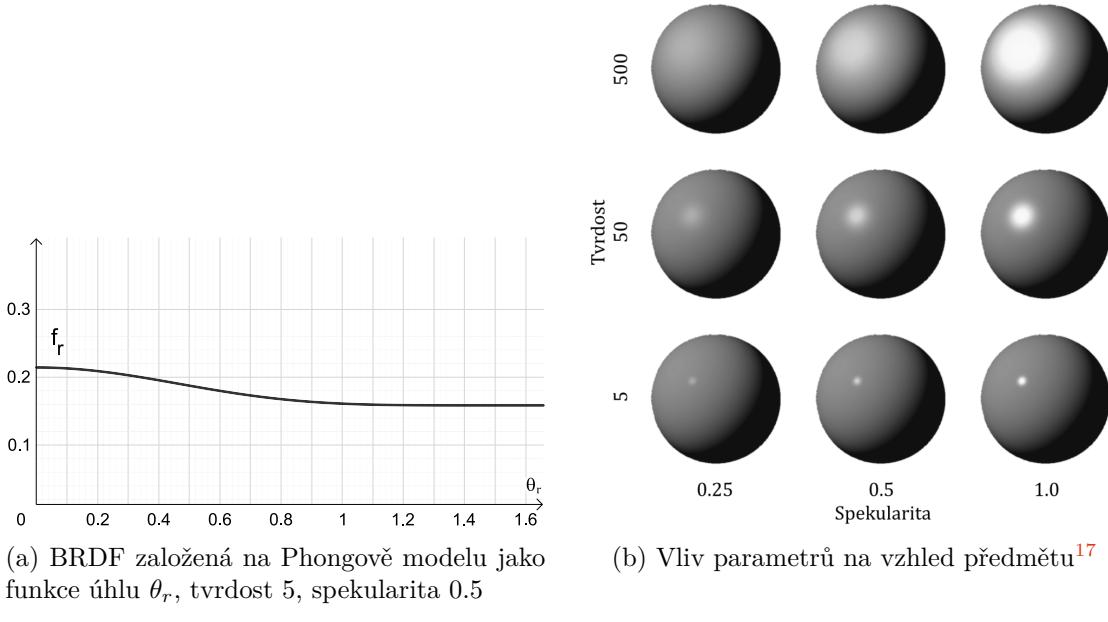
$$\vec{h} = \frac{\omega_i + \omega_o}{||\omega_i + \omega_o||} \quad (2.11)$$

**Wardova** empirická BRDF sice také pořád není založena na fyzikálních zákonech, ale poskytuje jednoduché rozhraní pro modelování *anizotropních odrazů*<sup>15</sup> z dat naměřených *gonioreflektometrem* – soustavou přístrojů pro měření odrazivých vlastností materiálu [66].

$$f_r = \rho_d \frac{c}{\pi} \frac{\rho_s}{4\pi\alpha_x\alpha_y\sqrt{\cos\theta_i\cos\theta_o}} e^{-\tan^2\theta_h(\frac{\cos^2\phi_h}{\alpha_x^2} + \frac{\sin^2\phi_h}{\alpha_y^2})} \quad (2.12)$$

<sup>14</sup>Jejich vliv je patrný na obrázku 2.9.

<sup>15</sup>Izotropní odraz je nezávislý na rotaci okolo  $\vec{n}$ . Anizotropní na něm naopak závisí, jako například u broušených materiálů.



Obrázek 2.9: Phongův osvětlovací model

- $\rho_s$  je spekularita materiálu. Pro dodržení zákona o zachování energie je nutné, aby platilo  $\rho_d = 1 - \rho_s$ .
- $\alpha_x$  a  $\alpha_y$  nastavují šířku odrazu. Pokud  $\alpha_x = \alpha_y$ , tak je odraz izotropní.
- $\phi_h$  označuje úhel mezi tangentou<sup>16</sup> povrchu a  $\vec{h}$

**Torranceova-Sparrowova** BRDF – založená na mikroploškové teorii (angl. microfacet theory). Ta říká, že jakýkoli povrch lze na mikroskopické úrovni popsat jako malá dokonale lesklá zrcadla, tzv. mikroplošky. Čím je materiál drsnější, tím více se od sebe navzájem liší natočení mikroplošek (viz obrázek 2.10). Vytváří jen izotropní odlesky [60].

**Orenův-Nayarův** model využívá teorie mikroplošek pro fyzikálně přesnější vykreslování velmi drsných povrchů (beton, omítka...), jak je možné vidět na obrázku 2.11.

**Cookova-Torranceova** BRDF oproti Torrance-Sparrow přidává efekty odrazu světla závislé na vlnové délce [12] (mohou být ovšem potlačeny, pokud je zanedbávají zvolené  $D$ ,  $F$ , a  $G$ ) a je definována flexibilněji a jednodušeji s cílem počítačového zobrazování. Často bývá implementována s parametry *roughness* — drsnost a *metallness* (1 pro kovové materiály, 0 pro nekovy). Není-li uvedeno jinak, rovnice byly převzaty z [64].

$$f_r = K_d \frac{\alpha(\mathbf{x})}{\pi} + \frac{DFG}{4(\omega_o \cdot \vec{n})(\omega_i \cdot \vec{n})} \quad (2.13)$$

- $\frac{\alpha(\mathbf{x})}{\pi}$  je difuzní složka. Je možné ji nahradit přesnější Orenovou-Nayarovou BRDF.

<sup>16</sup>Přímka, která má společný bod s normálou, je k ní kolmá a zároveň je rovnoběžná s rovinou povrchu.

<sup>17</sup>Obrázek převzat z <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Specularity-phong-showcase.png&oldid=480220501>.

- $D$  představuje nějakou distribuční funkci normálových vektorů. Udává množství mikroplošek, které jsou zarovnány s vektorem  $\vec{h}$ . Vyhovující je například Beckmanova, nebo zde použitá Trowbridgeova-Reitzova distribuce:

$$D_{TR}(\vec{n}, \vec{h}, roughness) = \frac{roughness^2}{\pi((\vec{n} \cdot \vec{h})^2(roughness^2 - 1) + 1)^2}. \quad (2.14)$$

- $F$  označuje Fresnelův člen. Popisuje míru odraženého světla pro různé  $\vec{h}$  a  $\vec{v}$ . Bere v potaz základní odrazivost  $F_0$ , kterou je nutné pro každý materiál zadat. Za účelem zrychlení se používá Schlickova approximace:

$$F_{Schlick}(\vec{h}, \omega_o, F_0) = F_0 + (1 - F_0)(1 - (\vec{h} \cdot \omega_o))^5. \quad (2.15)$$

V praxi se pro nekovy používá  $F_0 = 0,04$ , kterou uživatel může ovlivnit zadáním parametru *metallness*. Tímto ovlivní nejen Fresnelův člen, ale také poměr difuzní složky  $K_d$ .

$$F_0 = 0,04,$$

$$F_0 = F_0 * metallness + (1 - F_0) * \alpha(\mathbf{x}), \quad (2.16)$$

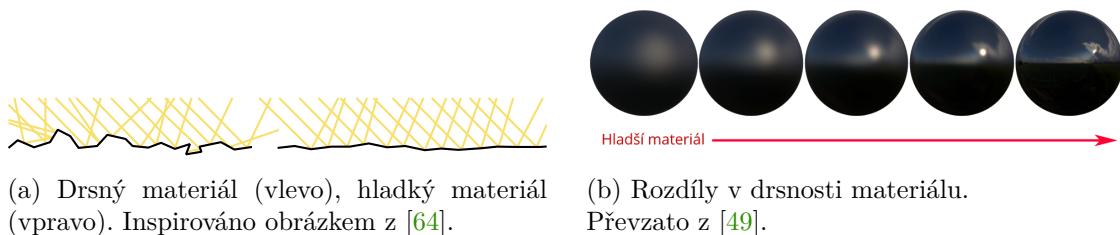
$$K_d = (1 - F)(1 - metallness). \quad (2.17)$$

- $G$  (zde Smithova metoda podle [65]) popisuje zastínění mikroplošek jinými mikroploškami:

$$G_{Smith} = G_1(\vec{n}, \omega_o, k)G_1(\vec{n}, \omega_i, k). \quad (2.18)$$



Obrázek 2.11: Hliněná váza. Převzato z [39].



Obrázek 2.10: Hladké materiály odrážejí všechny paprsky v podobném směru, což vytváří ostré odrazy. Drsné materiály odráží světlo do různých směrů, odrazy v nich jsou rozmařané.

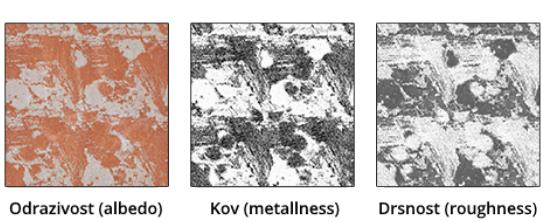
$G_1$  podle [64]:

$$G_{1_{SchlickGGX}}(\vec{n}, \omega, k) = \frac{\vec{n} \cdot \omega}{(\vec{n} \cdot \omega)(1 - k)k}, \quad (2.19)$$

$$k = \frac{(roughness + 1)^2}{8}. \quad (2.20)$$

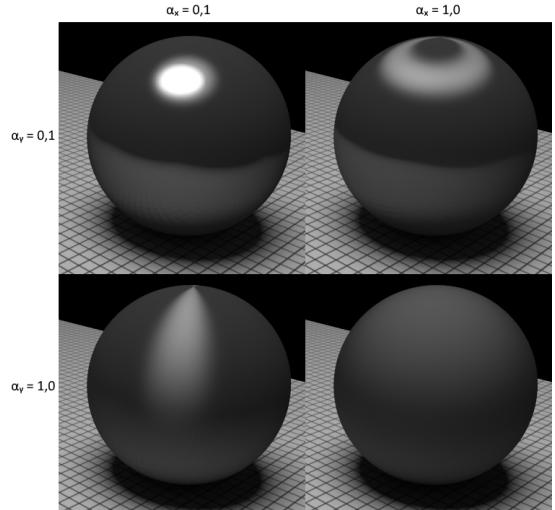
**Disney BRDF** byla vytvořena pro využití v počítačových animacích. Svůj princip přejímá z mikroploškových a anizotropních modelů, ale cílí hlavně na flexibilitu v uměleckých požadavcích. Její parametry proto nejsou založeny jen na fyzikálních zákonech, ale také tak, aby intuitivně popisovaly vzhled materiálu [7], jako například:

- barva odlesků (specularTint)
- hedvábné odlesky a jejich barva (sheen, sheenTint)
- podpovrchový rozptyl (subsurface)
- lak (clearcoat)

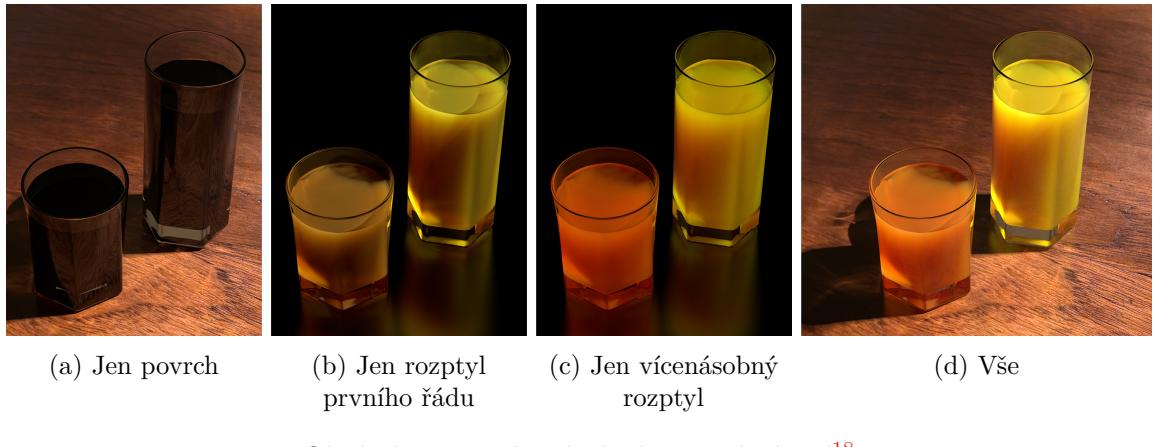


Obrázek 2.12: Použití textur jako parametrů. Přeloženo z [64].

Jak znázorňuje obrázek 2.12, parametry *roughness* a *metalliness* je možné uložit do tzv. texturových *map* a přiřadit tak různým místům na předmětu různé hodnoty.



Obrázek 2.13: Vliv parametrů  $\alpha_x$  a  $\alpha_y$  na výstup Wardovy BRDF. Převzato z [28].



Obrázek 2.14: Vícenásobný rozptyl záření<sup>18</sup>

## 2.4 Homogenní a heterogenní prostředí

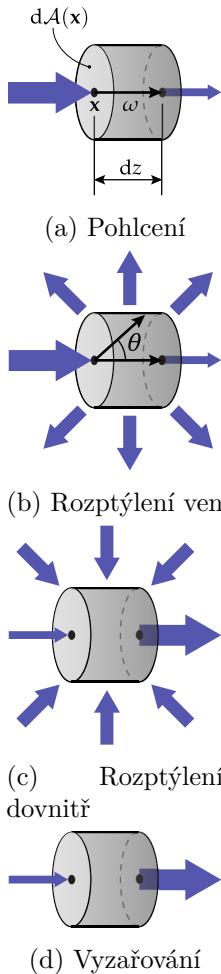
Dosud byl v této práci brán zřetel jen na předměty z pevného materiálu, od kterých se všechny paprsky odráží. Materiály předmětů však nemusí být pouze odrazivé a mohou všechny, nebo jen část paprsků propouštět dovnitř. Takový předmět je v angličtině nazýván *participating medium* (množné číslo *participating media* – „zúčastněná prostředí“). Probíhá v něm rozptyl záření. Jako **homogenní** ho označujeme ve chvíli, kdy vykazuje materiál ve všech místech prostředí stejné optické vlastnosti (například mléko ve sklenici na obrázku 2.1b); jeho BSDF je nezávislá na pozici v prostoru. Materiál **heterogenního** prostředí může mít v různých místech různou například hustotu.

O materiálu zúčastněného prostředí je možno prohlásit, že je složen z mnoha malých částic, na kterých probíhají elementární jevy kvantové optiky [42]. Poté, co se světlo rozptýlí na jedné částici, může narazit na další a rozptýlit se znova. Rozptyl je tedy *vícenásobný* a probíhá takřka donekonečna. Nicméně většinou je vzhled materiálu ovlivněn nejvíce rozptylem prvního řádu (jak ukazují obrázky 2.14). Realistické zobrazení pak spočívá v simulaci těchto dějů u všech častic, které mají vliv na právě propočítávaný pixel snímku. Při simulaci rozptylu prvního řádu se jedná jen o částice, které protíná paprsek příchozí do kamery. U vícenásobného rozptylu řádu  $n$  pak o částice ve vzdálenosti  $n - 1$  od častic v cestě paprsku.

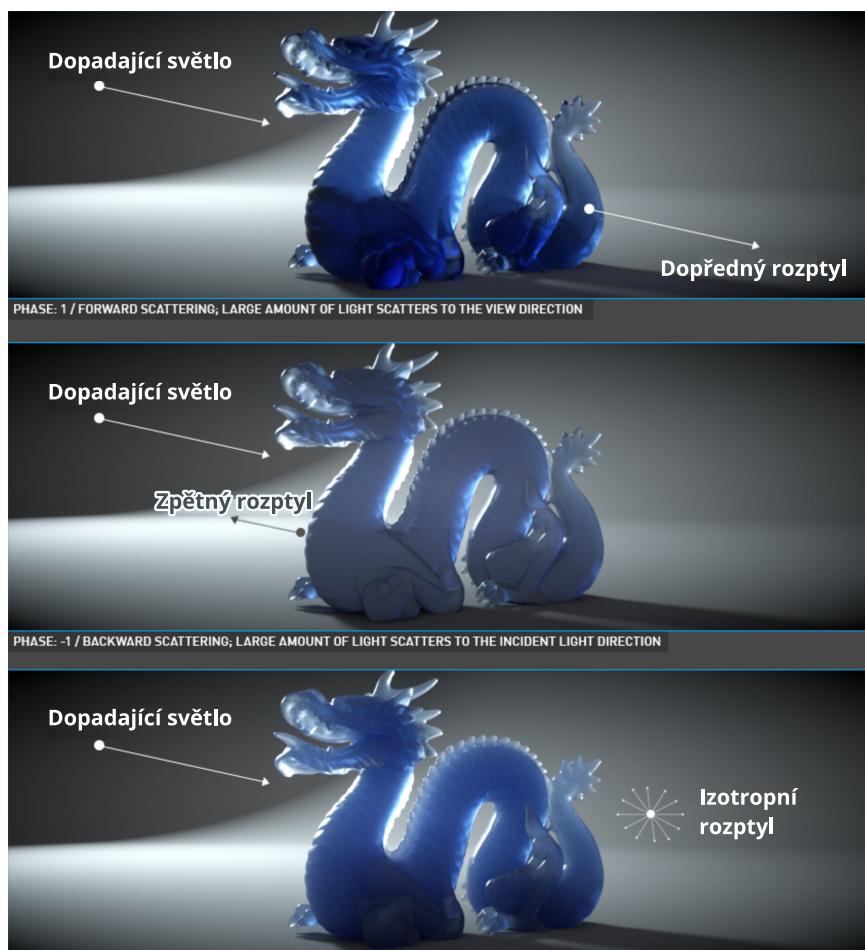
Následující odstavec je volně přeložen z [37, strana 30]. Fyzikální podstatu zúčastněných prostředí popisuje Teorie přenosu záření (také Radiační přenos, angl. *Radiative transfer*), kterou popsal Chandrasekhar [9]. Zavádí jevy **pohlcení**, **rozptýlení ven**, **rozptýlení dovnitř** (záření rozptýlené k částici od jiných častic) a **vhodné vyzařování** částice (emise). Pomocí této teorie je možné formulovat diferenciální *rovnici přenosu záření* z jedné strany válce diferenciální délky a objemu  $dV = dAdz$  na druhou:

$$dL(\mathbf{x}, \omega) = \underbrace{\kappa_a(\mathbf{x}) L_e(\mathbf{x}, \omega) dz}_{\text{vhodné vyzařování}} + \underbrace{\kappa_s(\mathbf{x}) L_i(\mathbf{x}, \omega) dz}_{\text{rozptýlení dovnitř}} \\ - \underbrace{\kappa_a(\mathbf{x}) L(\mathbf{x}, \omega) dz}_{\text{pohlcení}} - \underbrace{\kappa_s(\mathbf{x}) L(\mathbf{x}, \omega) dz}_{\text{rozptýlení ven}}. \quad (2.21)$$

<sup>18</sup>Obrázek převzat z [https://jannovak.info/publications/dissertation/dissertation\\_teaser.jpg](https://jannovak.info/publications/dissertation/dissertation_teaser.jpg).



Obrázek 2.16:  
Změny v přenosu  
záření [37]



Obrázek 2.17: Homogenní prostředí v programu Octane [72]

Složky rovnice jsou znázorněny na obrázku 2.16. Navíc je možné rovnici zintegrovat, čímž získáme vyjádření záře částic na cestě nekonečně dlouhého paprsku z  $\mathbf{x}$  ve směru  $\omega$ .

$$L(\mathbf{x}, \omega) = \int_0^\infty T(\mathbf{x}, \mathbf{x}_t)[\kappa_a(\mathbf{x}_t)L_e(\mathbf{x}_t, -\omega) + \kappa_s(\mathbf{x}_t)L_i(\mathbf{x}_t, -\omega)]dt \quad (2.22)$$

Z parametrů, které se při přenosu uplatňují jsou důležité zejména

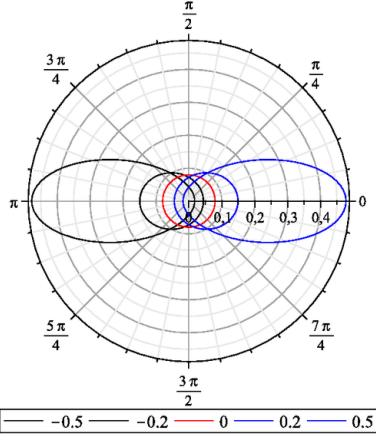
**Celková zář částice**  $L$  v bodě  $\mathbf{x}$  pro paprsek ve směru  $\omega$ .

**Koeficient rozptýlu** (angl. *scattering*)  $\kappa_s$  – míra záře, která se rozptýlí do okolních směrů.

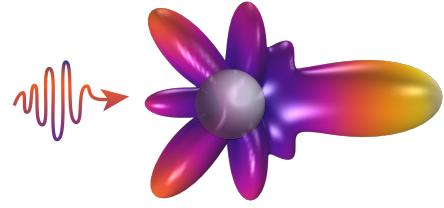
**Příchozí zář**  $L_i$  je integrací záře z okolních částic a světelných zdrojů ze všech směrů.

$$L_i(\mathbf{x}, \omega) = \int_{S^2} F(\omega \angle -\omega') L(\mathbf{x}, \omega') d\omega' \quad (2.23)$$

**Vlastní zář**  $L_e$  vyzařuje samotná částice na pozici  $\mathbf{x}$  pro paprsek se směrem  $\omega$ .



Obrázek 2.18: Polární diagram  $HG$  pro různé  $g^{19}$



Obrázek 2.19: Vizualizace rozptylu zaření na kruhové částici<sup>20</sup>

**Fázová funkce** (angl. *phase function*, dále f.f.)  $F(\theta)$  – hustota pravděpodobnosti rozptylu do konkrétního směru (v úhlu od směru vektoru  $\omega$ ). Integrace přes celý její definiční obor však nemusí být rovna 1 a pro použití ve statistických výpočtech se používá její normovaná verze.

- **Heneyeyova-Greensteinova** f.f. [17], dále  $HG$ , vytvořená původně pro mlhoviny obsahuje parametr  $g$ , který značí *anizotropii prostředí*<sup>21</sup>, nebo jinak řečeno také průměrný kosinus úhlu  $\theta$ .

$$F(\theta, g) = \frac{1 - g^2}{4\pi} \frac{1}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}} \quad (2.24)$$

Závislost funkce na anizotropii prostředí je patrná na obrázku 2.18.

- **Cornetteova-Shanksova** f.f. [13] z předchozí jmenované vychází a bývá používána pro aerosoly, protože lépe approximuje jejich chování.

$$F(\theta, g) = \frac{3(1 - g^2)}{2(2 + g^2)} \frac{(1 + \cos^2)}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}} \quad (2.25)$$

- **Dvouparametrová**  $HG$  obsahuje dvě vyhodnocení  $HG$ , jednou s kladným parametrem  $g_f$ , podruhé se záporným  $g_b$ . Původní  $HG$  totiž opomíjí zpětný rozptyl neboli odražení (ne doslova) paprsků směrem zpět ke světelnému zdroji (patrný na obrázku 2.17). Vyhodnocení jsou podle míry potřebné fyzikální korektnosti kombinovány zprůměrováním nebo i složitějšími způsoby (jeden z nich popisuje [24]).
- **Schlickova** f.f. [3], [37] je zjednodušením  $HG$ , neobsahuje zlomek v exponentu.

$$F(\theta, g) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 - g \cos \theta)^2} \quad (2.26)$$

<sup>18</sup>Obrázek převzat z [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Fonction\\_de\\_phase\\_Heneyey-Greenstein.png&oldid=591547804](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Fonction_de_phase_Heneyey-Greenstein.png&oldid=591547804).

<sup>19</sup>Obrázek upraven, jeho původní verze se nachází na <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Miewik.svg&oldid=640265953>.

<sup>21</sup>Čím vyšší je anizotropie rozptylu, tím větší jsou rozdíly v hodnotách fázové funkce  $\Rightarrow$  tím více je světlo soustředěno na jednu stranu.

- **Mieova** f.f. bude blíže popsána později v kapitole 3.1, v sekci **Mieův rozptyl**.

**Koeficient pohlcení** (absorpce, *absorption*)  $\kappa_a$  – míra záře pohlcené částicemi materiálu.

**Koeficient útlumu** (*extinction*)  $\kappa_e$  – celkový úbytek záře. Platí  $\kappa_e = \kappa_s + \kappa_a$ .

**Relativní hustota**  $\rho_r(\mathbf{x})$  – v místech s  $\rho_r(\mathbf{x}) < 1$  se jí koeficient  $\kappa_s$  a tím pádem i  $\kappa_e$  násobí.

S absolutní hustotou není třeba v teorii přenosu záření počítat, protože je zahrnuta v koeficientech  $\kappa$ .

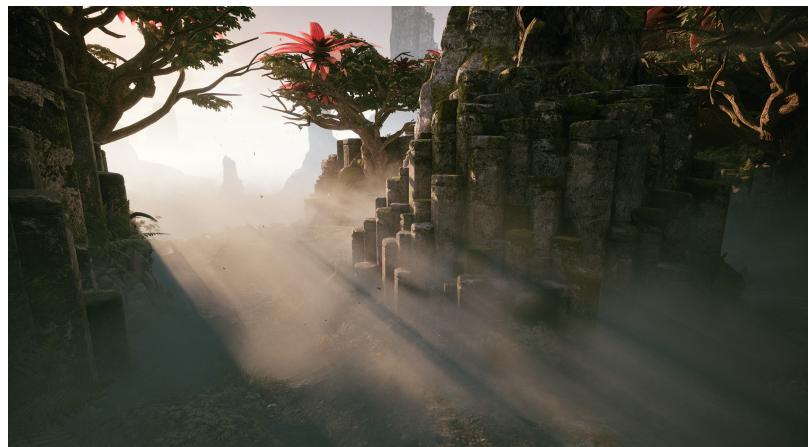
**Odrazivost jednoho rozptylu** (*Single scattering albedo*)  $\varpi_0$  – poměr mezi rozptylem a útlumem  $\kappa_s/\kappa_e$ . Pohybuje se v rozsahu  $\langle 0, 1 \rangle$ .

**Optická hloubka**  $\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$  – míra útlumu prostředí mezi body  $\mathbf{x}$  a  $\mathbf{x}'$ . Spočítá se jako součet útlumu všech částic ležících v cestě<sup>22</sup>.

**Propustnost**  $T(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = e^{-\tau}$  dle Beerova-Lambertova zákona – pokud bychom započítali jen útlum, zář paprsku bude na konci cesty  $\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}'$  vyjádřena  $L(\mathbf{x}') = L(\mathbf{x})T(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ .

Všechny koeficienty jsou udány v jednotkách  $\text{m}^{-1}$  a značí míru úbytku záře v důsledku konkrétního jevu na uražené vzdálenosti 1 m. Prakticky to znamená, že při převodu na vyšší řád jednotky ( $\text{km}^{-1}$ ) se koeficient násobí 1000 a při převodu na nižší ( $\text{cm}^{-1}$ ) zase dělí 100. Mohou být, stejně jako fázová funkce, rozdílné pro různé vlnové délky, díky čemuž prostředí získá zbarvení. Proces jejich výpočtu z naměřených vlastností materiálů je mimo cíle této práce. O vlastnostech a vykreslování participating media je možné se více dočít v disertační práci Jana Nováka [37].

Osvětlením polopruhledného prostředí jsou při zastínění pevnými objekty vytvořeny „mlžné paprsky“ (v angličtině *god rays*, *crepuscular rays*, *sunbeams*, *light shafts*), jak ukazuje obrázek 2.20.



Obrázek 2.20: Mlžné paprsky. Počítačově vykresleno programem Chaos® Corona.<sup>23</sup>

<sup>22</sup>Optická hloubka světla u stínových paprsků je pak značena  $\tau_l$ .

<sup>23</sup>Obrázek převzat z příspěvku na fóru <https://forum.corona-renderer.com/index.php?topic=33415.0>. Adresa samotného obrázku <https://forum.corona-renderer.com/index.php?action=dlattach;topic=33415.0;attach=148740;image>.

## 2.5 Metody zobrazování

Nedílným požadavkem kladeným na dnešní výzkum v oblastech počítačové grafiky je optimalizace výpočtů pro programovatelné grafické karty (případně více-jádrové procesory), jejímž hlavním cílem je co největší *parallelizace*. Grafický hardware je optimalizován zejména pro **rasterizaci primitivních tvarů** v reálném čase, ale zhruba od roku 2019 jsou na trhu dostupné grafické karty podporující hardwarově akcelerovaný **ray tracing** (česky *sledování paprsku*) [34]. Metody zobrazování jsou často kombinovány za účelem využití svých předností a potlačení nevýhod.

Procesor (anglicky *central processing unit*, dále CPU) a grafická karta (*graphics processing unit*, dále GPU) mají každý svou operační paměť a veškerá data, která má GPU používat, je nutné nejdříve z paměti procesoru zkopirovat. Tyto data jsou přenášeny v souvislých blocích tzv. *bufferech*. Zvláštním typem bufferu je buffer snímku (angl. framebuffer), do kterého je zapisován obraz určený přímo k vykreslení na monitoru počítače.

### Rasterizace

V rasterizaci jsou předměty ve scéně zpracovávány jeden po druhém. Případný kontext scény je nutné z paměti procesoru do grafické paměti dodat zvlášť [34, strana 1]. Předměty jsou komponovány z mnoha malých dvojrozměrných tvarů, tzv. *primitiv* – trojúhelníky, obdélníky, úsečky, body. Samotná primitiva se skládají z *vrcholů* (angl. *vertex*, množné číslo *vertices*). Jeden předmět po druhém jsou předány grafické kartě a ta provede několik snadných maticových transformací, díky kterým získá souřadnice *primitiv* ve výsledném snímku. Poté spouští pro každý předmět jeho **shader** – program, resp. kolekce programů, které vypočítají výslednou barvu vykreslených pixelů.

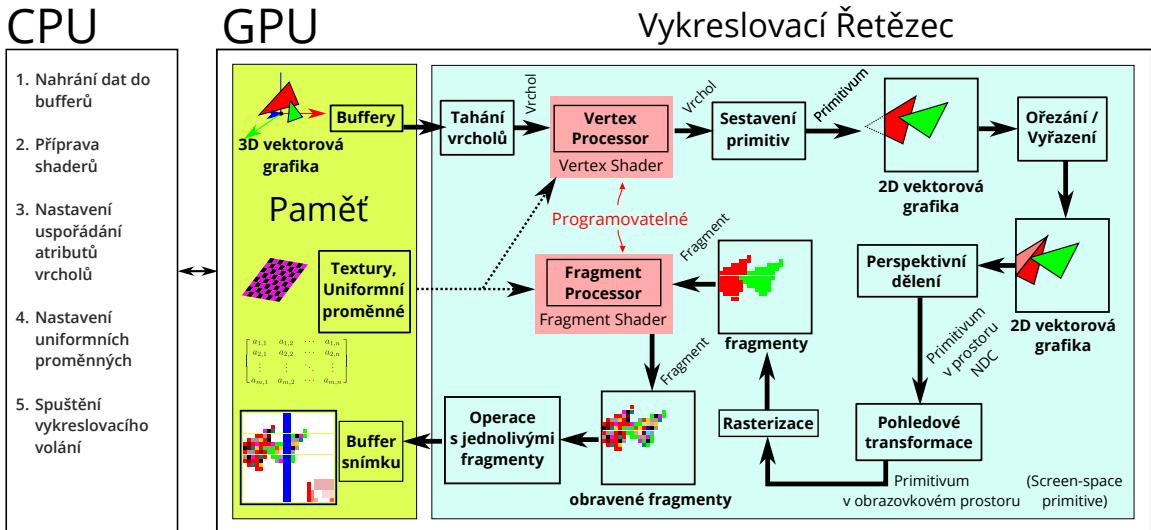
Pořadí vykreslení předmětů je v podstatě náhodné, a aby nebyly překreslovány přes sebe v případě zákrytu vzhledem k pohledu kamery, každý vykreslený pixel zapíše svoji vzdálenost od kamery do tzv. *hloubkového bufferu*, podle kterého se při vykreslování příštích předmětů kontroluje, jestli nejsou již zakryty. O rasterizaci je možné najít mnoho článků na webu, například [74, 73].

Pomocí shaderů se vypočítává také osvětlení nebo animace tvarů předmětů. Speciální variantou je **compute shader**, který je možné použít pro jakékoli obecné paralelní výpočty nezávisle na vykreslovací smyčce (obrázek 2.21), která je pro grafické karty typická.

Předností rasterizace je rychlosť výpočtu. Nevýhoda tkví v izolovanosti předmětů od celkové scény. Pro vykreslování odrazů a **nepřímého osvětlení**<sup>24</sup> je nutné použít speciální přístupy, jako například:

- Více kamer – jedna kamera je *primární*, jiná snímá například odraz od vodní hladiny.
- Screen space reflections – odrazy v obrazovkovém prostoru. Technika využívající předchozího vykresleného snímku a *hloubkového bufferu* k vykreslení odrazů míst, která jsou viditelná již primární kamerou.
- Baked global illumination – zapečené globální osvětlení. Celá scéna projde nejdříve výpočetně náročnou fází „zapečení“ (propočítávání nepřímého osvětlení) probíhajícího pomocí vykreslovací metody, která nepřímé osvětlení podporuje (třeba *sledování paprsku*). Výsledkem je světelná mapa (angl. lightmap), jež bude ve fázi vykreslování v reálném čase aplikována na předměty jako textura.

<sup>24</sup>Přímé osvětlení – pocházející přímo od světelného zdroje. Nepřímé osvetlení – světlo odrážené od jiných předmětů.



Obrázek 2.21: Vykreslovací smyčka programovatelného grafického procesoru. Přeloženo z [33], originál v příloze C.

### Metody sledování paprsku

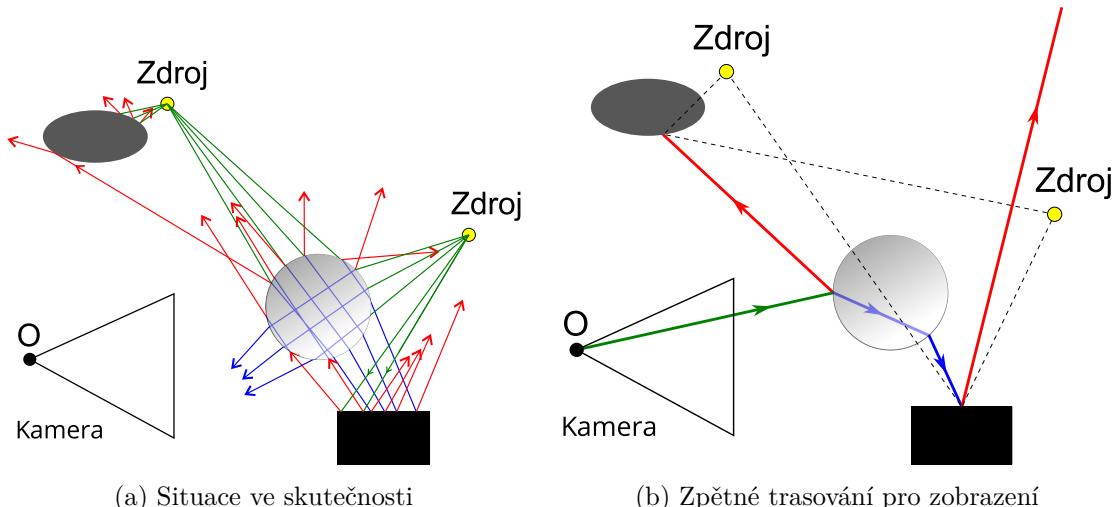
Anglicky *ray tracing*, dále m.s.p. Jedná se o v zásadě jednodušší koncept, než je rasterizace. Využívají dříve popsané reciprocity BRDF (strana 11). Základem všech je vyslání virtuálního paprsku z každého pixelu snímku, resp. snímače kamery (tzv. **primární** paprsek). Pokud se střetne s povrchem některého z předmětů, pixel získá barvu příslušného materiálu. Podle konkrétní metody pak z bodu kolize  $x$  mohou být vyslány další paprsky, jak je ilustrováno na obrázku 2.22b.

- **stínový** paprsek – vyslán postupně ke každému ze světelných zdrojů. Pomocí něj se zjišťuje zastínění bodu  $x$  ostatními předměty.
- **sekundární** paprsky zachycují nepřímé osvětlení z předmětů okolo bodu  $x$ .
  - **odražené** fungují jako nový „primární“ paprsek.
  - **lomené** – paprsky dovnitř (polo)průhledného materiálu. Uvnitř předmětu může být zlomen i vícekrát. Po opětovném dosažení povrchu pokračuje podobně jako odražený paprsek.

Sekundární paprsky mohou vícenásobně produkovat další sekundární paprsky. Touto technikou se vlastně algoritmus snaží zpětně trasovat paprsky, které by do příslušného pixelu snímku dorazily po své cestě ze světelného zdroje pomocí odrazů a průchodu předměty. Scénu je možné sestavit nejen z předmětů složených z primitiv podporovaných grafickým procesorem. Jednoduchými na realizaci jsou rovněž trojrozměrné analytické<sup>25</sup> tvary, nebo **SDF**<sup>26</sup>. Výhodou SDF je přesná definice zakřivených ploch a malá paměťová náročnost; paměť zabírá jen její definice v programu. Nevýhodou může být, že se složitostí tvaru předmětu rychle narůstá složitost vyhodnocení SDF.

<sup>25</sup> Analytické – takové tvary, pro něž existuje analytická rovnice kolize s polopřímkou/paprskem.

<sup>26</sup> SDF (angl. signed distance function), znaménková funkce vzdálenosti – pro každý bod v prostoru vrátí jeho vzdálenost od povrchu.



Obrázek 2.22: Primární paprsky – zelené, odražené – červené, lomené – modré, stínové – čárkované<sup>27</sup>.

# Variants

- Jako Ray tracing bývá někdy (ne vždy) označována varianta, kdy algoritmus počítá jen kolize primárních paprsků s předměty  $\Rightarrow$  ignoruje nepřímé osvětlení.
  - Distribuovaný ray tracing — sekundární paprsky jsou generovány pomocí rekurze.
  - Monte Carlo Path tracing (sledování cesty) — při střetu s povrchem je na základě vlastností jeho BRDF vyslány jen jeden sekundární paprsek.
  - Bidirectional path tracing (dvousměrné sledování cest) vysílá paprsky kromě kamery také ze zdrojů světla.

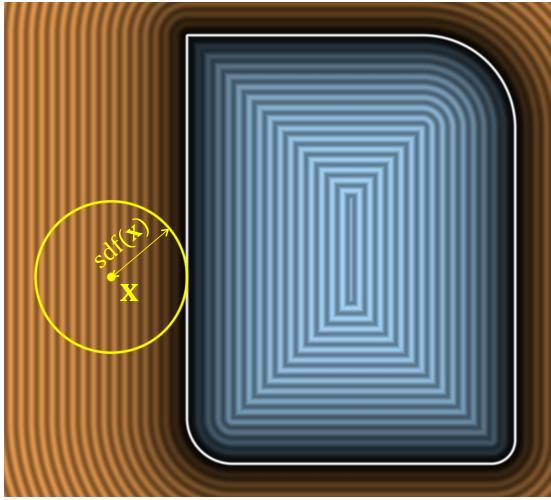
Výhodou m.s.p je jejich přesné zachycení nepřímého osvětlení. Nevýhodou pak výpočetní náročnost, žádné znovupoužití již vypočítaných informací (tuto funkci až například fotonové mapy, metropolis light transport, ...) a pomalá konvergence v případě Monte Carlo metod (projevuje se v obrazu jako šum).

## Monte Carlo integrace

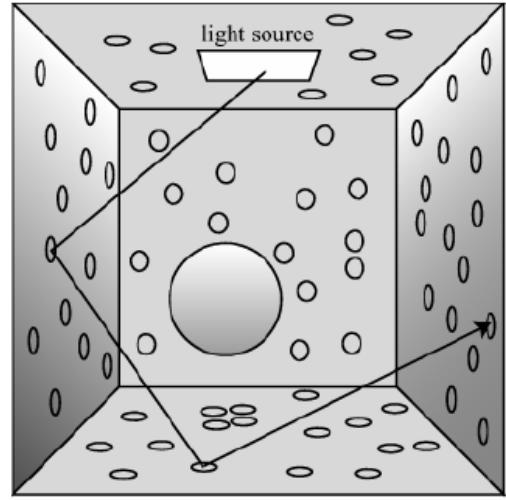
*Sledování cest* si klade za cíl vyhodnocení zobrazovací rovnice, což většinou není proveditelné analyticky (jen v případě jednoduchých tvarů). Integrál v zobrazovací rovnici je tedy počítán numericky. Monte Carlo je metodou pro odhad integrálu funkce pomocí:

- vícenásobného dosazení náhodné hodnoty za integrační proměnnou v jejím povoleném rozsahu, jak ilustruje obr. 2.25,
  - součtu všech vyhodnocení,
  - pokud není výběr  $x_i$  uskutečněn pomocí náhodné veličiny s rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti, je navíc každý integrand vydělen hustotou pravděpodobnosti pro  $x_i$ .

<sup>27</sup>Obrázek upraven. Původní verze se nachází na [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Recursive\\_ravtracing.svg&oldid=548777808](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Recursive_ravtracing.svg&oldid=548777808).



Obrázek 2.23: Výstup znaménkové funkce vzdálenosti. Vykreslen pomocí [47].



Obrázek 2.24: Princip fotonových map. Převzato z [26].

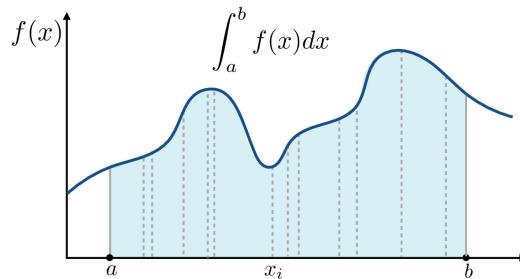
Podle [35, strana 5] lze integrál funkce  $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  za pomocí  $N$  náhodných výběrů z  $\Omega$  approximovat jako:

$$\int_{\Omega} f(x) dx = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f(x_i)}{p(x_i)}, \quad (2.27)$$

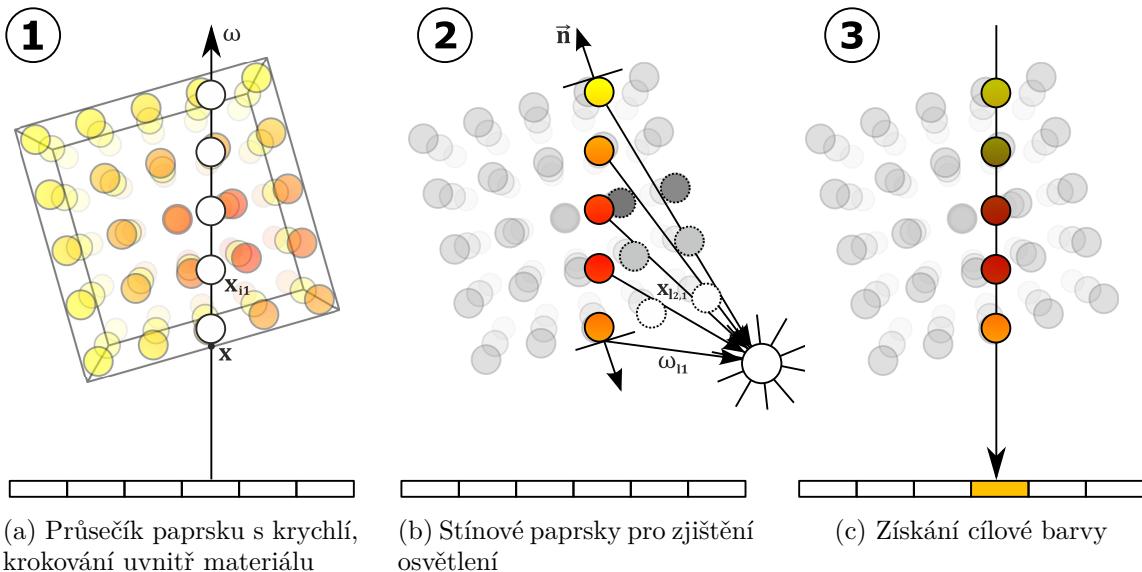
přičemž  $x_i$  je hodnota náhodné veličiny s hustotou pravděpodobnosti  $p(x_i)$ ,  $\Omega$  je výběrový prostor. Výsledek Monte Carlo integrace je tím přesnější, čím vyšší  $N$  zvolíme, což je důvod výše zmíněné pomalé konvergence.

### Fotonové mapy

Tento algoritmus těží ze znovupoužití informací o osvětlení ve scéně. Skládá se ze dvou fází. V první fázi jsou ze světelných zdrojů vysílány fotony představující určitý světelný tok  $\Phi$  – zlomek celkového výkonu zdroje. Při dosažení povrchu může být foton odražen, absorbován, nebo rozptýlen (události odpovídající Teorii přenosu záření na straně 16). Pokud není dosažený povrch lesklý, foton je uložen do globální *fotonové mapy*. Protože zobrazení kaustik (obrázek 2.1c na straně 4) vyžaduje k uspokojivým výsledkům mnohem více vyslaných fotónů než jiné nepřímé osvětlení, tvorí se zvláště jedna fotonová mapa pro kaustiky a druhá pro nepřímé osvětlení.



Obrázek 2.25: Svislé čáry představují jednotlivá vyhodnocení  $f(x)$  s náhodným  $x_i$  [14]



Obrázek 2.26: Fáze krování paprsku materiálem propouštějícím světlo<sup>29</sup>

Druhou fází algoritmu je některá z m.s.p. Pro výpočet přímého osvětlení není fotonové mapy třeba (postupuje se podle m.s.p.). V případě nepřímého osvětlení a kaustik se využijí hodnoty okolních fotonů. Nevýhodou fotonových map je vysoká paměťová náročnost a také to, že approximují nepřímé osvětlení jen přibližně (s vyšším počtem fotonů se blíží realitě). Podrobněji o variantách algoritmů sledování paprsku a fotonových mapách píše například M. Vlnas [63].

## 2.6 Krování paprsku

Anglicky *ray marching*. Používá se pro vykreslování materiálů propouštějících světlo (zúčastněných prostředí), povrchu předmětů popsaných SDF, nebo *voxely*<sup>28</sup>. Konkrétní algoritmus je vždy přizpůsoben konkrétnímu popisu materiálu, ale všechny spojuje posunování „kurzoru“ napříč prostorem. Na místě kurzoru jsou vždy vyhodnoceny vlastnosti materiálu (popsané BSDF) a osvětlení.

Často bývá kombinován s dalšími algoritmy (path tracing, rasterizace) — například, pokud je povrch předmětu ohrazen jednoduchým tvarem, získá se první průsečík s povrchem analyticky (jako na obrázku 2.26a), uvnitř se pokračuje krováním.

Krování paprsku lze považovat za numerickou integraci (přesněji Riemannův součet) jevů napříč částicemi materiálu. Jedná se vlastně o částečné vyhodnocení *rovnice přenosu záření* (rovnice 2.22) — bez rozptýlení dovnitř, pro jehož vyhodnocení by bylo třeba provést výpočetně náročné krování paprsků z každé částice do všech směrů. Jinými slovy, je zanedbán vícenásobný rozptyl.

<sup>28</sup> *Voxel* je zobecněním pojmu *pixel* v trojrozměrném prostoru. Vlastně se jedná o trojrozměrný pixel; jsou uloženy v mřížce, např. každá koule na obrázku 2.26 je voxel.

<sup>29</sup> Obrázek vytvořen s použitím

[https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Volume\\_ray\\_casting.svg&oldid=617838193](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Volume_ray_casting.svg&oldid=617838193).

---

**Algoritmus 1** Obecné krovkání paprsku

---

```

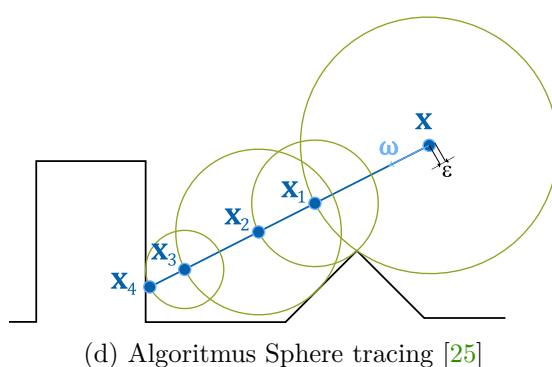
 $\mathbf{x} \leftarrow$  Průsečík pohledového paprsku s povrchem předmětu
 $\omega \leftarrow$  Vektor směru pohledového paprsku
 $N \leftarrow$  Maximální počet kroků
 $N_l \leftarrow$  Maximální počet kroků stínového paprsku
 $T \leftarrow 1$  ▷ Průběžná propustnost materiálu
 $L \leftarrow 0$ 
for  $i = 1, \dots, N$  do
     $\mathbf{x}_i \leftarrow \mathbf{x} + \omega * i * krok$  ▷ Posunutí kurzoru o zvolený krok.
▷ Může být konstantní, nebo proměnný.
    if UVNITŘPŘEDMĚTU( $\mathbf{x}_i$ ) then
        ▷ Vyhodnocení osvětlení
        for all  $\{L_i, \omega_l\} \in \mathbb{L}$  do ▷  $\mathbb{L}$  označuje množinu všech světelných zdrojů
            ▷  $L_i$  je zář světelného zdroje
            ▷  $\omega_l$  je vektor ke světelnému zdroji
             $T_l \leftarrow 1$  ▷ Propustnost pro stínový paprsek z  $\mathbf{x}_i$  ve směru  $\omega_l$ 
            for  $i_l = 1, \dots, N_l$  do
                 $\mathbf{x}_l \leftarrow \mathbf{x}_i + \omega_l * i_l * krok_l$  ▷ krokl stínového paprsku lze také volit konstantní, nebo proměnný
                if UVNITŘPŘEDMĚTU( $\mathbf{x}_l$ ) then
                     $T_l \leftarrow T_l * BTDF(\mathbf{x}_l, \omega_l, krok_l)$ 
                    if  $T_l = 0$  then
                        break
▷ Přičtení záře světelného zdroje s ohledem na BSDF materiálu
▷  $L \leftarrow L + (L_i * f_r(\mathbf{x}_i, \omega, \omega_l)) * T * T_l$ 
▷  $T \leftarrow T * BTDF(\mathbf{x}_i, \omega, krok)$ 
▷ if  $T = 0$  then
▷ return  $L$ 

```

---

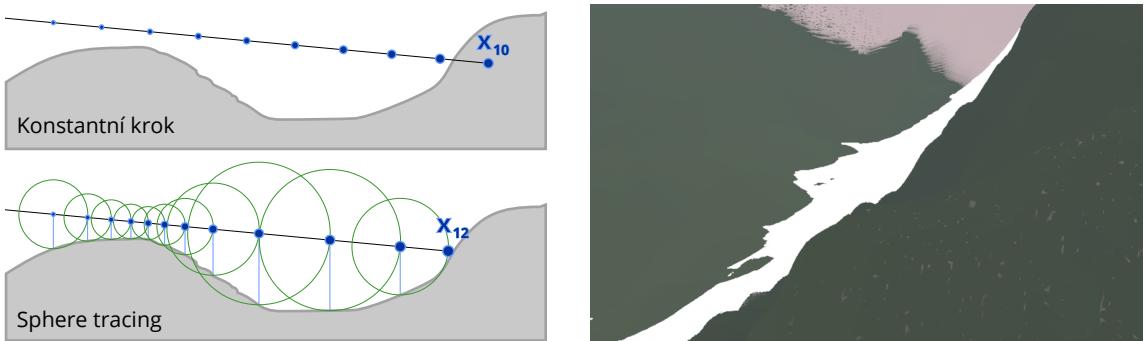
$L$  obsahuje výslednou zář příchozí k pohledovému paprsku  
**return**  $L$

---



(e) Pomocí SDF je možné modelovat i složité animované předměty [44]

Obrázek 2.27: Využití metod krovkání paprsku



(a) Sphere tracing výškové mapy je neefektivní pro paprsky rovnoběžné s povrchem

(b) Terén nad kopcem se nevykreslí kvůli vyčerpání maximálního počtu kroků  $N$

Obrázek 2.28: Problémy algoritmu Sphere tracing

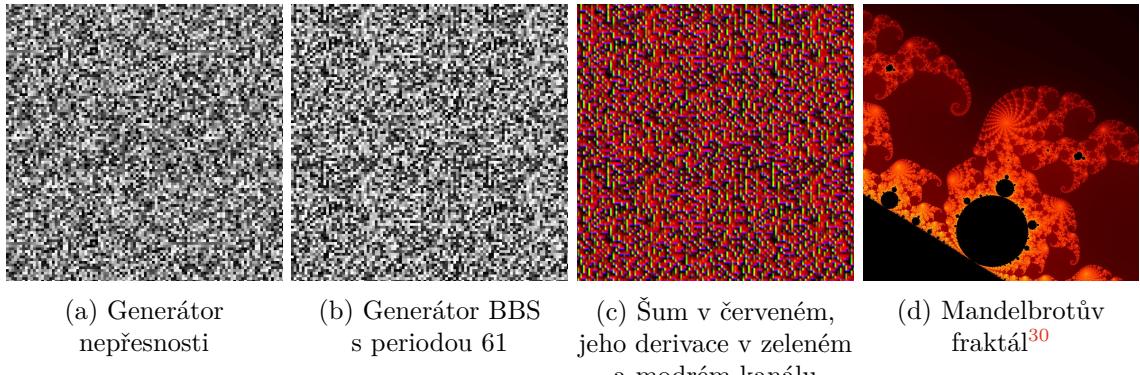
### Volba kroku

Ve variantě hledání povrchu předmětů popsaných SDF je vhodné provést optimalizaci výkonu a přesnosti pomocí proměnné délky kroku. Příští délka kroku je vždy nastavena na hodnotu, kterou SDF vrátila – je jisté, že do této vzdálenosti se žádný povrch nenachází; musí platit, že **koule má jen jeden tečný průsečík s povrchem**. Díky tomu je:

- ve většině případů snížen počet potřebných kroků kurzoru (obrázek 2.26d),
- počet kroků zvýšen pro paprsky zhruba rovnoběžné s povrchem (obrázek 2.28a).

Tato varianta krokování paprsku nese jméno Sphere tracing (trasování koule). Navíc bývá přidána tolerance  $\varepsilon$ . Pokud platí  $|sdf(\mathbf{x}_i)| < \varepsilon$ , je možné prohlásit povrch za dosažený. Tolerance může být konstantní nebo závislá například na uražené vzdálenosti od  $\mathbf{x}$ , což sníží náročnost vykreslení vzdálených bodů.

Podobně jako funkci *vzdálenosti* lze popsat povrch (zejména terén) i *výškovou mapou* – funkci výšky  $heightMap(x)$ . Sphere tracing výškové mapy je proveditelný jen s porušením podmínky jediného průsečíku koule s povrchem (viz obrázek 2.28a). Kvůli tomu je třeba provádět zpětný krok v případě, že se kurzor dostane pod povrch. Vylepšením může být i nastavování délky kroku jen na určité procento hodnoty (lze jej nazvat např. *procento optimismu*), kterou vrátí  $heightMap(x_i)$ .



Obrázek 2.29: Výstupy algoritmů důležitých pro realizaci procedurálních struktur

## 2.7 Procedurální generování

Procedurálně (matematickou funkcí, procedurou, algoritmem) je možné reprezentovat předměty nebo obrázky bez nutnosti jejich přesného ručního návrhu v grafickém nebo modelovacím softwaru. Tento pojem zahrnuje vytváření (zpravidla přirodně vyhlížejících):

- Nekonečných struktur – terén, asteroidy ve vesmíru, textura vodní hladiny, obrázek specifikovaný svým histogramem [16], ...
- Parametřitelných struktur – stromy s určitým počtem větví, hrad s určitým počtem věží, sněžná vločka, ...

V přírodě pozorujeme tzv. *soběpodobnost* tvarů na úrovni velkého měřítka. Například mraky jsou kulovité shluky kulovitých útvarů složených z kulatých kapek. Takové tvary označujeme jako fraktály [30]. Popsal je poprvé matematik B. Mandelbrot a později definoval také Mandelbrotovu množinu (obrázek 2.29d). V informatice jsou fraktály používány ke generování přirodně vyhlížejících tvarů. Na druhou stranu v přírodě nenacházíme absolutní přesnost v tvarech a vzorech. Žádné dva stromy, mraky nebo kopce nejsou totožné. Náhodnost spolu s fraktály vytvářejí dojem realističnosti.

Výpočetní technika nedokáže s opravdovou náhodou pracovat<sup>31</sup> a proto využívá tzv. pseudonáhodné generátory. Jsou jimi funkce s následujícími vlastnostmi [20, 40, strana 101]:

- Dlouhá perioda.
- Dostatečně rychlé změny.
- Pro vícekrát stejný vstup vrátí stejný výsledek.
- Výpočetně nenáročná.
- Přenositelná – stejný výstup na všech zařízeních.

<sup>30</sup>Obrázek převzat z <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Mandelpart2.jpg&oldid=458637248>.

<sup>31</sup>Skutečné náhodě je možné se přiblížit jen snímáním vnějšího světa. Například šumu z rádiového přijímače.

**Konguentní generátor** [40, strana 98] konečné posloupnosti s rovnoměrným rozložením popisuje rovnice

$$x_{n+1} = (ax_n + b) \bmod m. \quad (2.28)$$

Konstanty  $a$  (multiplikační),  $b$  (aditivní),  $m$  (modul – perioda) a počáteční hodnota  $x_0$  (anglicky označována jako *seed*) jsou vhodně zvoleny ve fázi vývoje konkrétní aplikace. Obsahuje jednu globální stavovou proměnnou  $x_n$ .

**Blum Blum Shub** (BBS) generátor popisuje vztah

$$x_{n+1} = x_n^2 \bmod M, \quad (2.29)$$

ve kterém  $M$  je součin dvou velkých prvočísel  $M = pq$ . Lze ho považovat za bezpečný pro kryptografické účely, ale bývá příliš složitý pro jiné [38].

**Generátor nepřesnosti** (obrázek 2.29a) využívá nepřesností čísel s plovoucí řádovou čárkou [53]. Porušuje sice podmínu přenositelnosti, ale je výpočetně velmi nenáročný.

Vstupní proměnné jsou vynásobeny číslem dostatečně velkým na to, aby se projevil nedostatečný rozsah typicky 32bitového datového typu *float*<sup>32</sup>. Chování v případě takových nepřesností není definováno a může na každém zařízení podávat jiné výsledky (nicméně při autorově testování dávala všechna zařízení stejné výsledky).

Ovlivňujícím faktorem je i neschopnost uložit některá čísla typu *float* přesně, což minimalizuje korelace mezi sousedními čísly. Například 0,1 se v paměti uloží jako 0,10000001490116119384765625.

Pro použití v shaderu běžícím na GPU se hodí právě poslední zmíněný přístup. Je totiž problematické ukládat globální stavovou proměnnou  $x_n$ . Jednou možností (paměťově náročnější) je předpočítání náhodných hodnot a jejich předání GPU v textuře. V případě *procedurálního generování* je často cílem získání náhodné hodnoty podle pozice určitého bodu v prostoru. Nabízí se nastavit  $x_n$ , příp.  $x_0$  právě na hodnotu souřadnic tohoto bodu, což by vyřešilo problém s ukládáním  $x_n$  a zachovalo dostatečnou „náhodnost“. Bohužel je tím změněn mechanismus výběru následující hodnoty. Mezi sousedními body v prostoru se totiž nemění číslo  $n$ , ale  $x_0$ , příp.  $x_n$ , což může způsobit vysokou korelací sousedních vyhodnocení [54].

Výstupem zmíněných generátorů jsou hodnoty s rychlými změnami. Pro postihnutí pomalých změn je nutné na výstup aplikovat filtr. Vyhlazený/filtrovaný výstup je obvykle označen jako **náhodný šum**. Kromě okamžité hodnoty šumu je možné získat její derivaci (resp. parciální derivace v případě vícerozměrného šumu), která bývá využívána pro vypočítání normály v případě, že je šum použit jako textura nějakého předmětu (viz obrázek 2.29c). K. Perlin [41] navrhl filtrování použitím interpolačního polynomu 5. řádu mimo jiné kvůli splnění podmínky spojitosti jeho 2. derivace. Definuje jej rovnice  $6t^5 - 15t^4 + 10t^3$ .

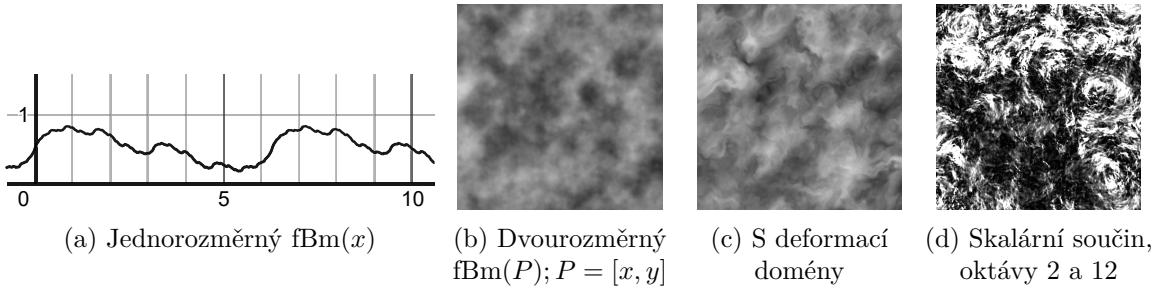
## Fraktálový Brownův pohyb

Angl. *fractal Brownian motion*, dále fBm. Jméno získal po biologovi R. Brownovi, který zkoumal pohyb částic v kapalině. Jedná se o matematický popis procesu „náhodné cesty“. V informatice bývá realizován jako součet několika „oktáv“ náhodného šumu:

$$\text{fBm}(P) = \sum_{i=0}^{O-1} ag^i \text{noise}(Pfl^i), \quad (2.30)$$

---

<sup>32</sup>Datový typ pro reprezentaci desetinných hodnot. Dokáže přesně uložit jakékoliv číslo v desítkové soustavě obsahující 7 číslic nebo číslo ve dvojkové soustavě v rozsahu  $2^n, -149 \leq n \leq 127$ .



Obrázek 2.30: fBm v různých prostorzech

- $P$  jsou vstupní souřadnice, pro které je fraktál počítán. Souřadnice mohou mít (stejně jako výstup fBm) jakýkoliv rozměr (znázorněno na obrázcích 2.30a, 2.30b).
- $\text{noise}(P)$  je funkce šumu. Může jí být takřka cokoliv od  $\sin(P)$ <sup>33</sup> až po generátor nepřesnosti.
- $a$  je amplituda první oktávy fBm, typicky 0,5.
- $g$  značí útlum každé další oktávy. Při použití  $a = 0,5; g = 0,5$  je teoretická maximální amplituda 1.
- $f$  značí frekvenci první oktávy a tím i celkovou frekvenci fBm.
- $l$  anglicky *lacunarity* označuje míru zvýšení frekvence každé další oktávy.

Často je žádoucí další úprava, například fBm s *deformací domény* definovaný jako  $\text{fBm}(P + \text{fBm}(P))$  vytváří dojem tekoucí kapaliny (na obrázku 2.30c). Působivou texturu mraků viděných z vesmíru lze vytvořit pomocí vícerozměrného šumu s parciálními derivacemi a skalárního součinu mezi jeho různými oktávami<sup>34</sup> (obrázek 2.30d).

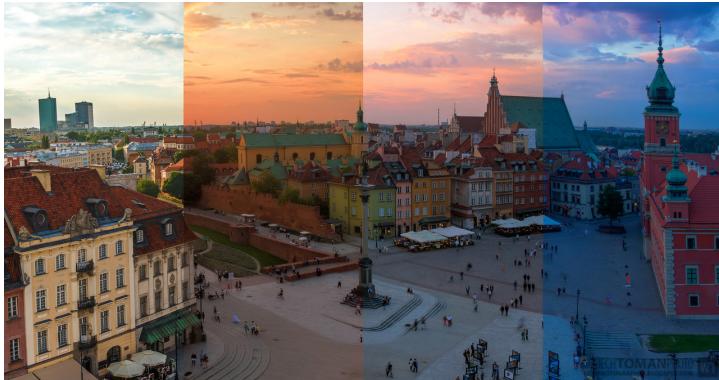
---

<sup>33</sup>Výstup fBm se  $\sin(P)$  jako funkcí šumu ilustruje obrázek 2.30a a jeho interaktivní verzi lze nalézt na adrese <https://www.desmos.com/calculator/3m3ib1irvz>.

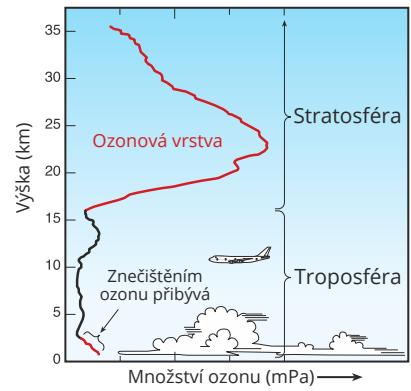
<sup>34</sup>Myšlenka převzata z ukázky na webu <https://www.shadertoy.com/view/st2cWc>.

# Kapitola 3

## Světelné děje v zemské atmosféře



Obrázek 3.1: Stejné místo v různé denní doby<sup>1</sup>



Obrázek 3.2: Vrstvy zemské atmosféry a poloha ozonové vrstvy. Přeloženo z [50].

Atmosféra je plynný obal země složený převážně z kyslíku a dusíku, jehož hustota klesá exponenciálně se vzdáleností od Země. Přesto rozložení jednotlivých plynů v atmosféře není vždy rovnoměrné. Příkladem je ozonová vrstva (znázorněna na obrázku 3.2). Podle [5] způsobuje ozonová vrstva nejen stínění neviditelného ultrafialového záření, ale také absorbuje určitou část viditelného spektra, proto se tato práce zabývá i jí. Kromě plynů hrají důležitou roli také *aerosoly* rozpuštěné v atmosféře (prach, voda, ...). Hustota jednotlivých složek v různé nadmořské výšce je podle [36] dobrě postihnutelná pomocí tzv. výšky měřítka  $H_0$ <sup>2</sup> a rovnice pro relativní hustotu:

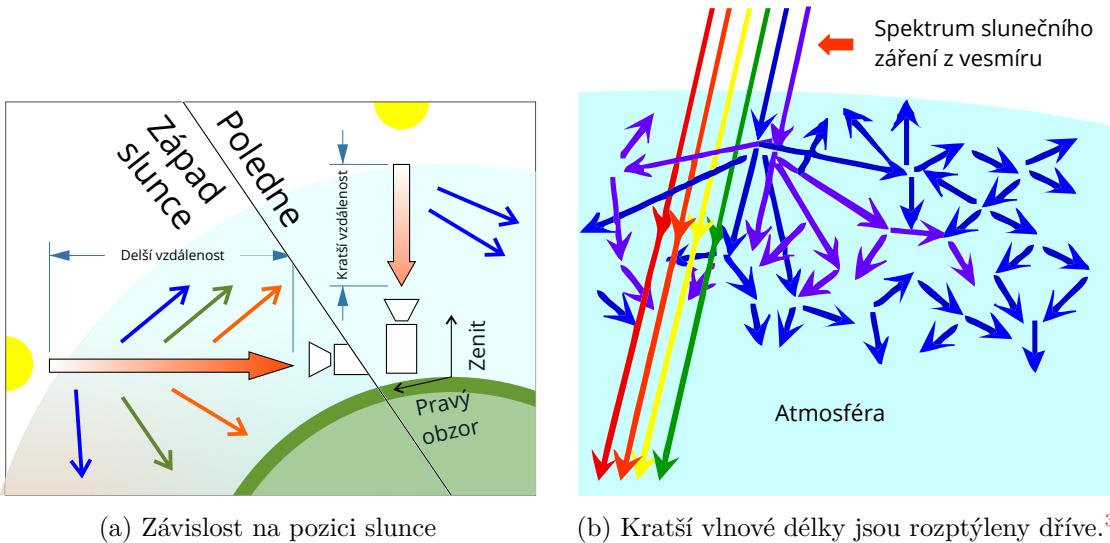
$$\rho_r(h) = e^{(\frac{-h}{H_0})}. \quad (3.1)$$

### 3.1 Atmosférické jevy v ovzduší

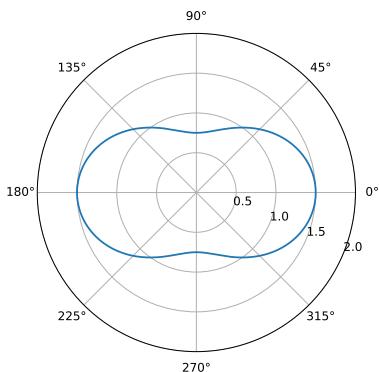
Za namodralou barvou atmosféry ve dne, načervenalými západy slunce i sníženou viditelností vzdálených budov (vše je možné vidět na obrázku 3.1) stojí rozptyl záření v atmosféře.

<sup>1</sup>Autorem fotografie je Wojciech Toman. Převzata z <http://hdr-photographer.com/2014/10/different-times-of-day/>.

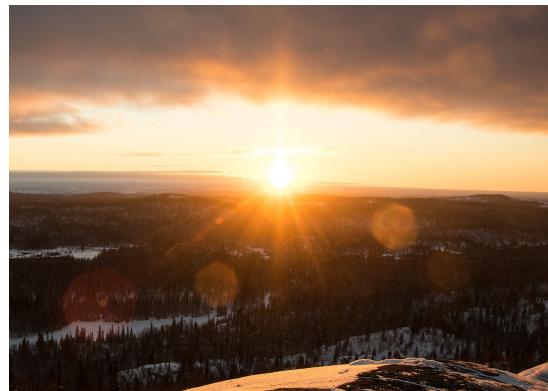
<sup>2</sup>Hodnota  $H_0$  je odvozena pomocí zákonu „Kdyby hustota atmosféry byla homogenní, její výška by byla rovna právě  $H_0$ .“



Obrázek 3.3: Znázornění vlastností Rayleighova rozptylu



Obrázek 3.4: Rayleighova fázová funkce



Obrázek 3.5: Odlesk čočky (angl. lens flare)<sup>4</sup>

Významnou v tomto okruhu se stala práce T. Nishity a kol. [36]. Konstatuje, že nejvíce ovlivňují barvu oblohy dva druhy rozptylu – *Rayleighův* probíhající na částicích vzduchu a *Mieův* na aerosolech.

### Rayleighův rozptyl

Fyzik J. W. Strutt, 3. baron Rayleigh popsal rozptyl světla zodpovědný za převážně modrou barvu oblohy. Probíhá na molekulách vzduchu, jež jsou více než  $10\times$  menší než vlnová délka slunečního záření (kyslík 332 pm, dusík 340 pm [2]). Příslušné rozptylové koeficienty vykazují na rozdíl od Rayleighovy fázové funkce (na obrázku 3.4) velkou závislost na vlnové

<sup>3</sup>Obrázek přeložen z [https://www.fxsolver.com/media/uploads/zinnia/Rayleigh\\_scattering\\_Head.er.gif](https://www.fxsolver.com/media/uploads/zinnia/Rayleigh_scattering_Head.er.gif).

<sup>4</sup>Fotografie publikována autorem pod licencí CC BY-SA 4.0 na [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:2016-12\\_Monts\\_Valin\\_winter\\_-\\_sunset\\_20.jpg&oldid=628477312](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:2016-12_Monts_Valin_winter_-_sunset_20.jpg&oldid=628477312).

délce<sup>5</sup>. Čím delší dráhu musí světlo k pozorovateli urazit, tím více modré části spektra se rozptylí. Z toho důvodu je pravý obzor červenější, než zenit (viz obrázky 3.3a a 3.3b).

**Mlha** je identickým jevem, jako barva oblohy (přispívá k ní i oblačnost; tou se zabývá příští kapitola), ale liší se v kratší vzdálenosti mezi předměty za ní a pozorovatelem. Zastíněním mlhy nebo oblohy vzniká efekt mlžných paprsků viditelný na obrázcích 2.20 a 3.8b (okolo mraku).

### Mieův rozptyl

Stojí za jasným oblakem (*aureolou*) okolo slunečního disku. Při západu slunce dostává oblak díky němu silně oranžovou barvu. Původcem těchto efektů jsou aerosoly, jejichž částice mívají velikosti v řádech mikrometrů.

Kolize elektromagnetického záření s částicí o velikosti srovnatelné s jeho vlnovou délkou [4, strana 61] (znázorněno na obrázku 2.18) na rozdíl od Rayleighova rozptylu vykazuje složitější vlastnosti vysoce závislé zejména na kombinaci *vlnová délka záření – velikost a tvar částice – materiál částice*. Z hlediska vlnové optiky lze mluvit o určitém druhu interference<sup>6</sup>. Pro popis tohoto děje na úrovni fotonů (hledisko kvantové optiky) je potřeba řešení *Maxwellových rovnic*<sup>7</sup>, s nímž přišli L. Lorenz a G. Mie [32]. Řešení má formu výpočetně náročného součtu nekonečné řady. Mieova fázová funkce je proto také výpočetně náročná a místo ní se pro zjednodušení používají různé approximace (Rayleighova approximace v případě častic vzduchu, van de Hulstova v případě větších častic). Sféra jeho aplikací je široká, od atmosférické meteorologie až po zdravotnictví, kterému Mieova teorie přináší způsoby jak detektovat rakovinu [68].

### Efekty oka a snímače

Jako atmosférický jev zdánlivě vypadají i paprsky a odlesky tvaru elipsy nebo mnohoúhelníku viditelné při přímém pohledu do slunce (viz obrázek 3.5). Jedná se však o rozptyl světla na sítnici oka a vnitřní odrazy v prostoru za čočkou (u kamer a fotoaparátů se jedná o rozptyl na drobných nedokonalostech materiálu čoček a zrcadel). Vykreslování odlesků čočky nebývá prováděno realistickými metodami, ale překrytím výsledného snímku sadou textur nebo procedurálně generovaných tvarů.

## 3.2 Rozptyl světla v mracích

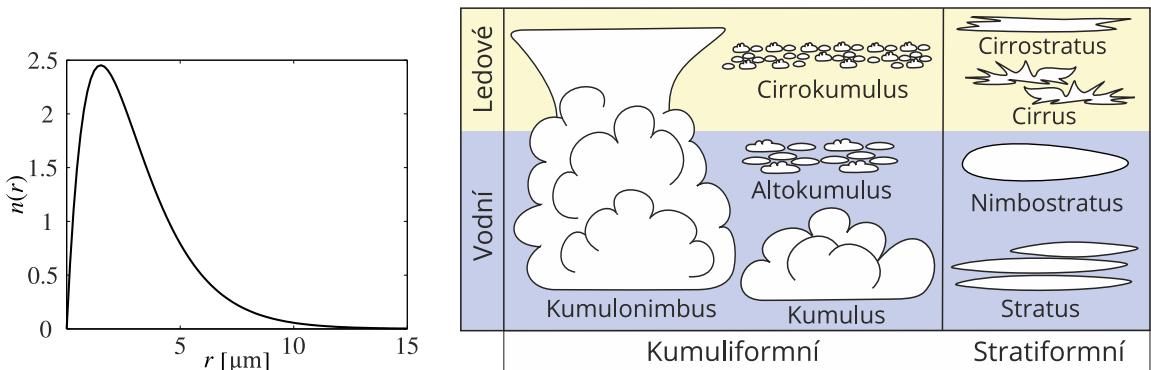
Mraky pohlcují jen minimum příchozího záření – většina je rozptýlena. Dominantní vliv zde má rozptyl *prvního rádu*, v jehož důsledku dostává strana přivrácená ke slunci bílou barvu, odvrácená tmavou a na okrajích mraků pozorujeme *stříbrné lemování* – na fotografii 3.8b. Vícenásobný rozptyl vytváří složitější efekty, například na obrázku 3.8a viditelné *tmavé vrásnění* na přivrácené straně hustého kumulu.

Různé druhy mraků (příklady na obr. 3.7) se objevují v různých oblastech atmosféry. Například poměrně teplý kumulus v nižších částech troposféry, studenější cirrus ve vyšší troposféře, polární zmrzlé mraky dokonce až v ozonové vrstvě a kumulonimbus může sahat od troposféry až ke hranici stratosféry. Liší se od sebe také velikostí vodních kapek a jejich

<sup>5</sup>Podle [36, strana 176]: „Intenzita rozptylu je nepřímo úměrná  $4 \cdot \sin^2(\theta)$  mocnině vlnové délky.“

<sup>6</sup>Interferenci vln lze dobře vysvětlit na příkladu vodní hladiny. Při střetu se dvě vlny vzájemně budou zesílit nebo vyrušit – podle toho, v jaké části vlnové křivky k tomu dojde.

<sup>7</sup>Popisují dynamické chování nestacionárního elektromagnetického pole [23].



Obrázek 3.6: „DSD typického mraku typu kumulus“ [4, s. 59]

Obrázek 3.7: Vybrané typy mraků. Vytvořeno s použitím obrázku z [4, s. 45].

distribucí – anglicky *droplet size distribution (DSD)*<sup>8</sup> [4, strana 58]. Protože mraky (a také mlha) jsou složeny z vodních kapek o velikostech v řádech mikrometrů (například střední hodnota  $10 \mu\text{m}$  pro kumulus [43, strana 13]), za správných okolností se projeví interferenční děje popsané Mieovou teorií a díky tomu lze pozorovat méně či více vzácné *fotometeory*. Například na kumulech se zjevují obrazce ve směru tzv. antisolárního bodu (směr stínu pozorovatele):

**Gloriola, nebo také Glórie** je malý duhový kruh okolo antisolárního bodu (obrázek 3.8c).

**Brockenské strašidlo** (angl. Brocken spectre) se objevuje na vzdálených hustých mlžných oparech při pohledu z hor do údolí. Uprostřed soustředných kruhů lidé spatřují svůj vlastní několikanásobně zvětšený stín – odtud název (obrázek 3.8e).

**Bílá duha** (angl. fogbow) je velký kruh nevýrazného zbarvení viditelný v mracích nebo mlze (obrázek 3.8c).

Cirrus se zase může stát dějištěm halových jevů. Ty jsou na rozdíl od jevů na kumulech umístěny okolo slunečního disku:

**Halo** je (ne vždy výrazně) duhový kruh způsobený *lomem* světla v ledových krystalech. Zejména u zmrzlých (přechlazených) polárních mraků se pojí s **parhelii** (paslunci, angl. sun dogs), která se zjevují na jeho okrajích (na obrázku 3.8d).

**Koróna** vypadá podobně jako Brockenské strašidlo. Rozdíl je jen v její poloze.

Halo a parhelia způsobuje kombinace odrazu, lomu a rozkladu světla na šestistěnných ledových krystalech. Původcem ostatních zmíněných fotometeorů je lom a ohyb záření na vodních kapkách. Ohyb lze simulovat pomocí Mieova rozptylu s různými f.f. pro různou vlnovou délku (spektrální f.f.  $F_\lambda(\theta)$ ). Uspokojivé výsledky přináší 3 vyhodnocení, každé pro jeden z barevných kanálů modelu RGB.

Viditelné jevy jsou výsledkem série rozptylu záření na kapkách různých velikostí. Proto nelze pro simulaci použít fázovou funkci pro kapku konkrétní velikosti. *Efektivní fázová funkce* celého mraku je získána pomocí integrování f.f. vynásobené normovanou DSD:

$$F_{e\lambda}(\theta) = \int_0^{\infty} F_\lambda(\theta) n(r) dr. \quad (3.2)$$

<sup>8</sup>Popisuje četnost kapek různého poloměru. Prakticky je výhodné ji upravit na *normovanou DSD*, jejíž integrál je roven 1. Příklad DSD ukazuje obr. 3.6.



(a) Tmavé vrásnění [4, s. 50]



(b) Stříbrné lemování [4, s. 48]



(c) Bílá duha a glórie [4, s. 49]



(d) Halo a parhelia v Alpách<sup>9</sup>



(e) Brockenské strašidlo<sup>10</sup>

Obrázek 3.8: Mieův rozptyl v mracích

<sup>9</sup> Autorem je Gabor Szilasi, dostupné pod licencí CC BY-SA 4.0 na adrese [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Halo\\_phantom-sun.jpg&oldid=591999888](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Halo_phantom-sun.jpg&oldid=591999888).

<sup>10</sup> Fotografie Micka Garratta pod licencí CC BY-SA 2.0. Převzata z [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Brocken\\_spectre\\_\(geograph\\_5150047\).jpg&oldid=556294271](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Brocken_spectre_(geograph_5150047).jpg&oldid=556294271).

### 3.3 Existující řešení

Kombinací několika technologií vyvinutých francouzským Národním institutem pro výzkum digitálních věd a technologií (INRIA) vznikla knihovna **Proland**<sup>11</sup>. Je určena k efektivnímu zobrazování planetárních terénů, atmosféry, stromů, řek, cest a vody. Jedná se ale spíše o vývojový prototyp.

Knihovna pro simulaci přenosu záření **libRadtran**<sup>12</sup>[31] si klade za cíl co nejvíce přesné výpočty. Je možné ji využít k sestavení referenčních modelů pro vykreslování zemské atmosféry, což bylo provedeno například v již zmíněné studii [5].

#### Řešení na produkční úrovni

Bývá zvykem integrovat fyzikálně založený vykreslovací software do programu pro vytváření nebo animaci 3D modelů. Získá se tím možnost náhledu scény v jejich vestavěném prohlížeči ještě před finálním vykreslením v plné kvalitě.

**Corona Renderer** patřící dnes pod společnost Chaos<sup>13</sup> je možné použít v rámci programů Autodesk 3ds Max a MAXON Cinema 4D. Pracuje výhradně na CPU, ale výhodou je možnost distribuce výkonu mezi více počítačů. Ukázkou výstupu je obrázek 2.20. Podporuje *participating media*, takže teoreticky je možné jej použít i k vykreslování fyzikálně přesné atmosféry nebo mraků. Je však třeba obojí vymodelovat a zadat vlastnosti prostředí manuálně. Kromě toho obsahuje implementace několika analytických atmosférických modelů (tyto není možné použít pro pohled na planetu z vesmíru).

Pro vykreslování na GPU využívá souběžně stejná společnost nástroj **V-Ray**<sup>14</sup>. Jedná se o kolekci pluginů, tentokrát pro software Autodesk 3ds Max a Maya, Trimble SketchUp, Rhino, Revit, MAXON Cinema 4D, Unreal Engine, Houdini, Nuke a Blender. Oproti Corona Rendereru je mnohem složitější na ovládání a dražší.

**OctaneRender**<sup>15</sup> (ukázka na obrázku 2.17) koná svou činnost plně na GPU. Je pomocí něj možné vykreslovat procedurální terén použitím vertex displacement (přemístění vrcholů modelu) a procedurální výškové mapy. Pro atmosféru a mraky platí stejný postup jako u Corona Rendereru.

**Unity**<sup>16</sup> a **Unreal Engine**<sup>17</sup> obsahují vlastní implementaci modelu E. Brunetona a F. Neyreta, který bude popsán v další kapitole, upravenou pro větší uměleckou flexibilitu.

---

<sup>11</sup>Web knihovny Proland: <https://proland.inrialpes.fr/>.

<sup>12</sup>Sada libRadtran je dostupná z <http://www.libradtran.org/doku.php?id=start>.

<sup>13</sup>Web Corona Rendereru: <https://corona-renderer.com/>.

<sup>14</sup>Stránka nástroje V-Ray: <https://www.chaos.com/3d-rendering-software>.

<sup>15</sup>Web Octane Rendereru: <https://home.otoy.com/render/octane-render/>.

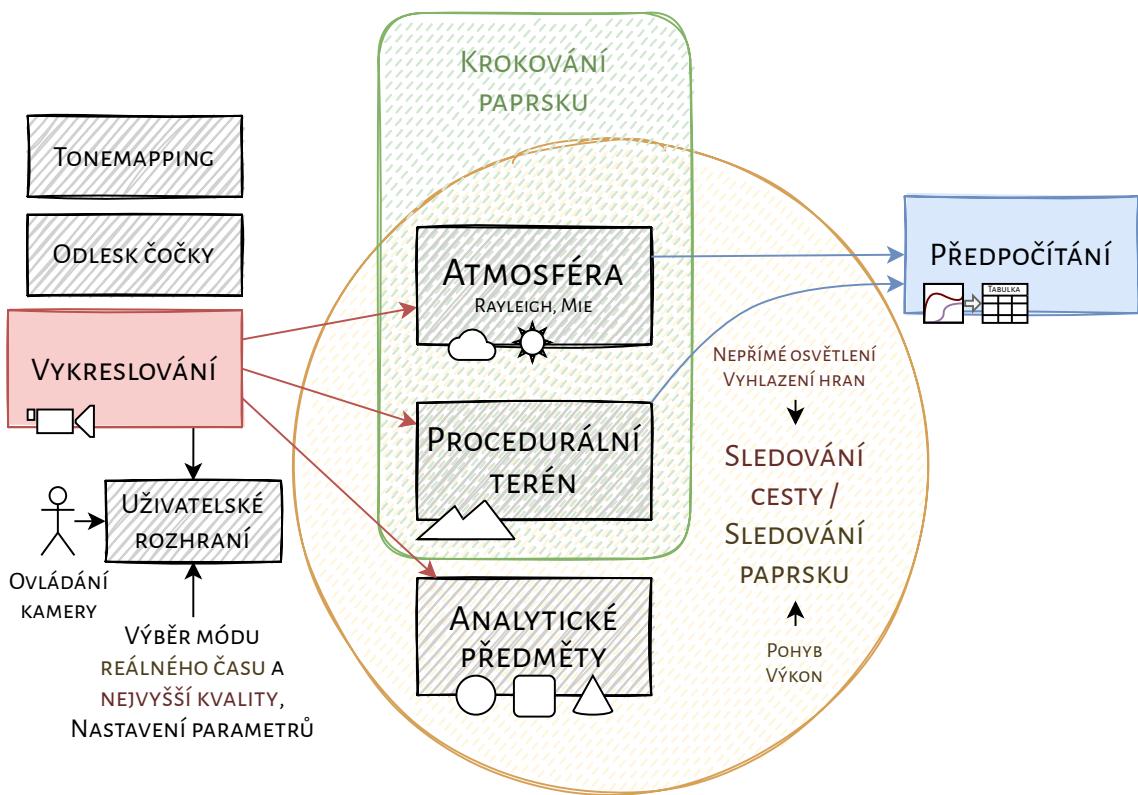
<sup>16</sup>Fyzikálně založená obloha v Unity: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.render-pipelines.high-definition@14.0/manual/Override-Physically-Based-Sky.html>.

<sup>17</sup>Komponenta atmosféry v Unreal Engine: <https://docs.unrealengine.com/5.0/en-US/sky-atmosphere-component-in-unreal-engine/>.

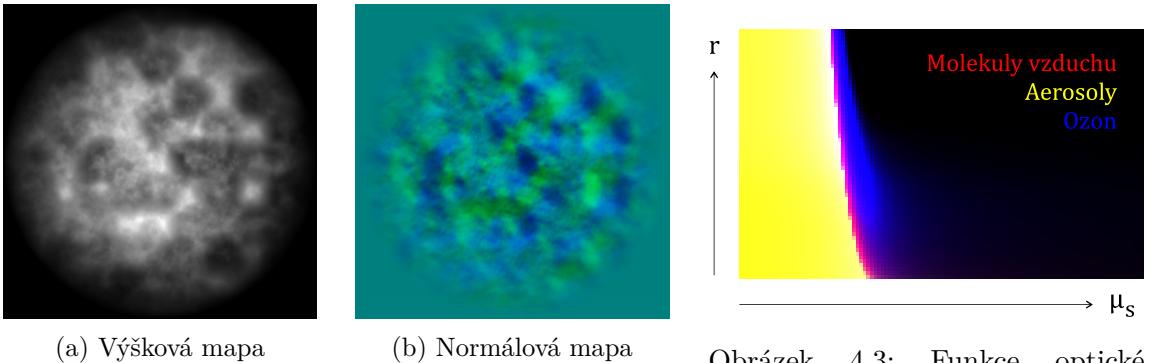
## Kapitola 4

# Návrh výpočetního modelu

Tato kapitola popisuje počítačový program, který je zhmotněním teorií z předchozích kapitol. Umožňuje grafickou kartou akcelerované vykreslování snímků libovolné velikosti s planetárním terénem, mraky, atmosférou a analytickými předměty pomocí **fyzikálně založeného sledování cesty** (physically based path tracing). Návrh hluboce ovlivňuje rozhodnutí nepoužívat žádné akcelerační struktury pro uložení předmětů ve scéně. Přesto se předpokládá možné umístění kamery do kteréhokoli bodu scény, ať už blízko povrchu planety nebo daleko ve vesmíru. Logické rozdělení funkcionality je popsáno blokovým diagramem na následujícím obrázku.



Obrázek 4.1: Diagram funkčních bloků návrhu.  
Šipka mříží vždy k bloku, jehož funkcionality je využívána.

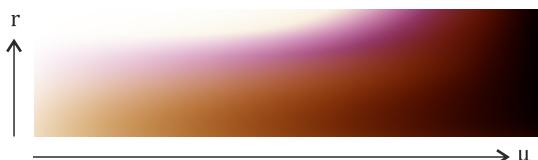


(a) Výšková mapa

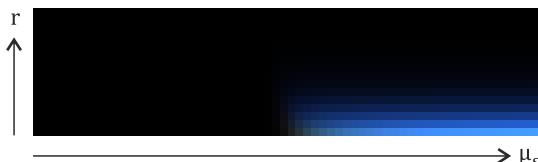
(b) Normálová mapa

Obrázek 4.2: Terén. Okraje jsou sníženy kvůli zajištění návaznosti mezi opakující se texturou.

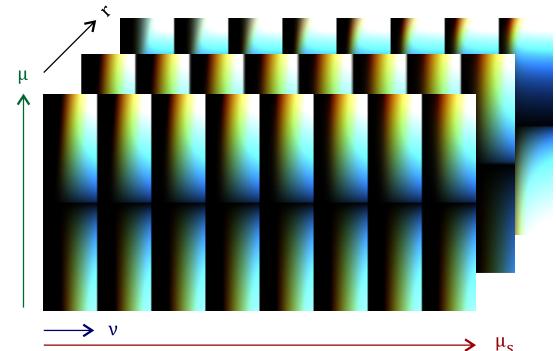
Obrázek 4.3: Funkce optické hloubky slunce pro rozptyl na různých složkách atmosféry předpočítaná do tabulky/textury.



(a) Funkce propustnosti. Rozměr  $256 \times 64$  px.



(b) Funkce nepřímého osvětlení.  $64 \times 16$  px.



(c) Funkce atmosférického rozptylu.  
Horizontální rozměr  $32 \times 8$  px, vertikální  $128$  px,  
hloubka  $32$  px.

Obrázek 4.4: Předpočítaný atmosférický rozptyl do tabulek/textur podle [6]

## 4.1 Terén a oblačnost

Uložení celého terénu o velikosti planety s rozumnou úrovní detailu do paměti není možné. Jedním řešením je rozložit jej na menší části a ty nahrávat do paměti na vyžádání. Stejný problém nastává s oblačností. Jednodušší a zde použitou metodou je generovat obojí procedurálně – pomocí SDF, nebo fraktálu. V této práci byly zvoleny dva fBm s různými úrovněmi rozlišení.

První úrovní je fBm (prezentovaný v kapitole 2.7) s nízkým rozlišením, jenž udává pokrytí terénem a mraky na planetárním měřítku. Druhou úrovní je také fBm, tentokrát s vysokým rozlišením. V případě terénu je navíc předpočítán a uložen jako tzv. výšková mapa o rozloze několika kilometrů. Výšková mapa je pro zjednodušení opakována, a proto terén při pohledu z vesmíru nevypadá příliš realisticky. Do stejné textury (obrázek 4.2a) je přínosné uložit také normálovou mapu (obrázek 4.2b), jinak by bylo nutné normály povrchu počítat v průběhu vykreslování pomocí rozdílu mezi sousedními body (tzv. central

differences method). Díky tomu, že GPU má k dispozici 4 barevné kanály<sup>1</sup>, je možné uložit výšku do červeného, jednu souřadnici normály do zeleného a druhou do modrého kanálu.

Vykreslení terénu zadaného výškovou mapu je možné více způsoby. Běžně se používá převedení mapy na primitivní tvary (trojúhelníky), které jsou následně vykresleny jako obyčejné analytické předměty. Množství vytvořených primitiv by ale bylo vysoké a vyžadovalo by použití akceleračních struktur. Místo toho je využit *sphere tracing* popsaný v sekci [Volba kroku](#) kapitoly 2.6, který další mezistupně převodu nevyžaduje.

## 4.2 Módy reálného času a nejvyšší kvality

Program nabízí možnost sledovat pohyb mraků a pohybovat s virtuální kamerou ve scéně v reálném čase. V tomto módu jsou pro vyšší výkon trasovány jen primární paprsky. Vlastně se jedná jen o *ray tracing*; ukázku tohoto procesu lze vidět na obrázku 4.5. Umožňuje aranžování scény bez nutnosti zvláště výkonného hardwaru. Pro trasování sekundárních paprsků je určen mód nejvyšší kvality, ve kterém program postupně doložitává další sekundární paprsky, a nakonec provede jejich integraci pomocí metody Monte Carlo.

### Časová složitost

V módu nejvyšší kvality je asymptotická časová složitost celé vykreslovací procedury pro jeden pixel přibližně rovna:

$$O(\underbrace{(N_p(1 + N_s)(1 + N_b))}_{\text{vyslané paprsky}}(N_o(N_o + N_{ts}) + \underbrace{N_t N_o + N_{ts} + N_c N_{csun} + N_a}_{\text{krokování terénu a prostředí}}(\underbrace{N_{t_{sh}} + N_o}_{\text{mlžné paprsky}})). \quad (4.1)$$

$N_p$  – počet primárních paprsků (výchozí 1).

$N_s$  – počet sekundárních paprsků vyslaných z průsečíku s povrchem (výchozí 1).

$N_b$  – maximální počet odrazů (výchozí 5).

$N_o$  – počet analytických předmětů ve scéně. Další výskytu značí detekcí zastínění.

$N_t$  – počet vzorků krokování terénu (výchozí 152).  $N_{ts}$  plní stejnou funkci ve fázi detekce zastínění analytických předmětů a terénu terénem (výchozí 42).

$N_c$  – počet vzorků integrace rozptylu v mracích (výchozí 128).

$N_{csun}$  – počet vzorků integrace optické hloubky slunce v mracích (výchozí 4).

$N_a$  – počet vzorků integrace rozptylu v atmosféře (výchozí 64). V každém kroku se také vyhodnocuje zastínění mlhy.

$N_{t_{sh}}$  – počet vzorků detekce zastínění mlhy terénem (výchozí 42).

V módu reálného času platí  $N_s = 0$ ;  $N_b = 0$ . Uživatel má možnost všechny tyto parametry nastavit. Cestou ke zrychlení za cenu porušení matematického základu (integrace zobrazovací rovnice) je například vyslání více sekundárních paprsků z jednoho primárního

---

<sup>1</sup>Záleží na výběru konkrétního formátu textury. Například RGBA32F ukládá 4 kanály jako čísla s plovoucí desetinnou čárkou s přesností 32 bitů. Čtvrtý kanál *alfa* bývá použit k uložení průhlednosti.

paprsku (klasický Monte Carlo path tracing vysílá pouze jeden) a jejich následné zprůměrování místo zvýšení počtu primárních paprsků. Primární paprsky se v rámci jednoho pixelu liší jen málo, proto jich není potřeba tolik jako sekundárních. Uživateli je tato možnost nabídnuta například pro ukrácení času ve fázi testování.

Přímé osvětlení je vypočítáno s ohledem na stíny. Detekce stínů probíhá u každého průsečíku paprsku s pevným povrchem a každé integrované částice všech prostředí díky vyslání *stínového paprsku* k jedinému zdroji světla – slunci. Zastínění (včetně mlžných paprsků) nepočítá s mraky – z výkonových důvodů (na testovaném hardwaru nebylo možné rozumného výkonu dosáhnout).

### 4.3 Numerická integrace a předpočítání rozptylu

Protože dominantní vliv na vzhled oblohy i mraků je rozptyl prvního řádu [36, strana 176], byla pro jejich zobrazování zvolena metoda **krokování paprsku** polopřůhledným prostředím zmíněná dříve v kapitole 2.6, která nebene v potaz vícenásobný rozptyl a lom paprsků.

Matematickou podstatou krokování paprsku jsou dva zanořené Riemannovy součty (numerické integrály). První integruje optickou hloubku a rozptyl v cestě sledovaného paprsku, druhý optickou hloubku od každé částice ke světelnému zdroji (zde pouze slunce<sup>2</sup>) s celkovou asymptotickou časovou složitostí  $O(n^2)$ . V případě **atmosféry** je druhý integrál závislý jen na:

- nadmořské výšce pozorovatele  $r$ ,
- úhlu mezi vektorem slunce  $\vec{\omega}_s$  (ze středu planety ke středu slunce) a normálou planety  $\vec{n}_p$  (vektor od středu planety k pozici kamery; nejde o přesnou normálu povrchu), přesněji jeho kosinu  $\mu_s$ <sup>3</sup>,

a proto se vyplatí jej předpočítat a uložit do textury (výsledek na obrázku 4.3). Práce E. Brunetona a F. Neyreta [6] navíc popisuje způsoby, jak přibližně předpočítat jakýkoliv řád atmosférického rozptylu a tím zjednodušit zobrazování oblohy, nepřímého osvětlení z oblohy i mlžných paprsků. Jejich metoda je rovněž v návrhu zastoupena (nicméně jen pro rozptyl prvního řádu) jako volitelná možnost. Používá několik předpočítaných textur, jež mají roli tabulek pro funkce závislosti atmosférického rozptylu na parametrech scény viditelných na obrázcích 4.4. Celkově je barva oblohy závislá na:

- již zmíněných  $\mu_s$  a  $r$ ,
- úhlech mezi pohledovým vektorem  $\vec{\omega}$  a:
  - normálou planety  $\vec{n}_p$ , resp. jeho kosinu  $\mu$ ,
  - vektorem slunce  $\vec{\omega}_s$ . Jeho kosinus je značen  $\nu$ .

Znázornění těchto veličin je patrné na obrázku 5.2 v další kapitole.

---

<sup>2</sup>V případě více světelných zdrojů je tedy nutné provést druhou zmíněnou integraci ke každému z nich.

<sup>3</sup>Je totiž jednodušší vypočítat kosinus úhlu mezi dvěma vektory (pomocí skalárního součinu), než původní úhel.

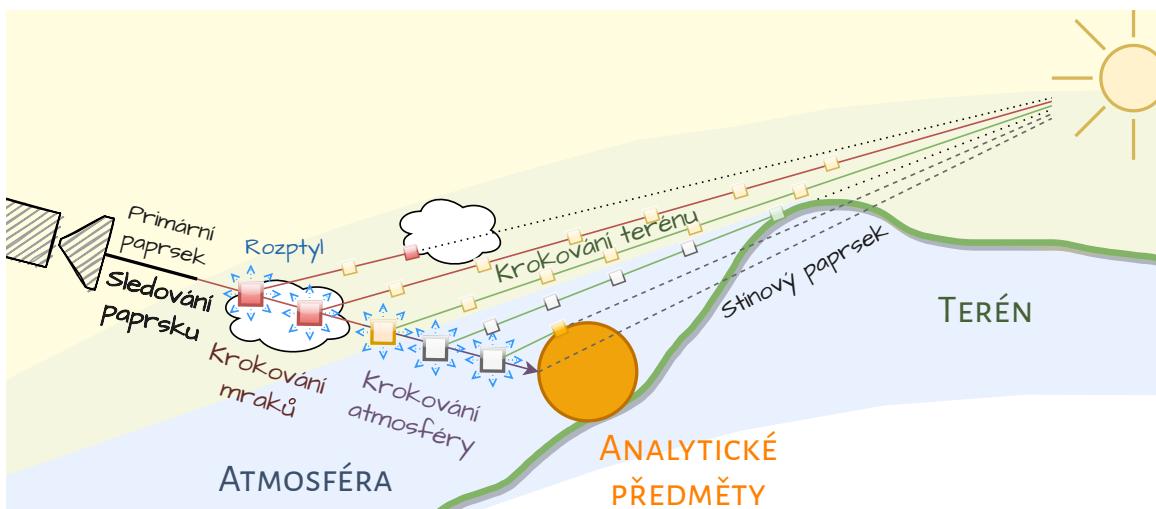
## Optimalizace

Navržené algoritmy jsou tzv. naivní a nedávají skoro žádný prostor pro optimalizace. Optimalní výkon a kvalita závisí na správném vyvážení zmíněných konstant ( $N_b, N_t, N_a, N_c, \dots$ ). Za cenu **ztráty přesnosti** je možné provést optimalizace detekce mlžných paprsků založené na empirických poznatcích:

1. Terén nikdy nezasahuje nad pozorovatele. Proto není pro určité hodnoty  $\mu > x$  nutné testovat zastínění terénem.
2. Pokud primární paprsek protnul terén ve bodě  $\mathbf{x}$  ve vzdálenosti  $d$  od kamery, je při krování *stínového paprsku* možné kurzor rovnou posunout o určitý násobek  $d$  (výchozí hodnota 0,8). Pokud by se *kurzor* octnul pod terénem, provede se krok zpět.
3. Pokud je kamera otočena k *antisolárnímu bodu*, je málo pravděpodobné, že budou mlžné paprsky viditelné. V určitém úhlu okolo antisolárního bodu (pro určité  $\nu < x$ ) detekce zastínění neprobíhá.
4. Pokud je slunce pod horizontem ( $\mu_s \lesssim 0$ ), terén a mlha jsou považovány za zastíněné.
5. Pokud v iteraci  $i = i_j$  krování paprsku atmosférou zároveň:
  - je známo, že paprsek míří k průsečíku s terénem,
  - stínový paprsek protnul terén,
  - kamera míří spíše ke středu planety než do nebe,

je pro všechny další iterace  $i > i_j$  předpokládáno zastínění mlhy terénem. Tato optimalizace je aplikována jen v prostoru v určité vzdálenosti od kamery. Je totiž značně agresivní a blízko kamery by vytvářela příliš mnoho viditelných artefaktů.

6. Pokud primární paprsek protnul terén v zastíněném bodě, jehož vzdálenost od kurzoru nepřekračuje zvolený prah, všechny další kroky kurzoru budou přeskočeny (mlha je považována za zastíněnou).



Obrázek 4.5: Náčrt všech procesů probíhajících v módu reálného času

# Kapitola 5

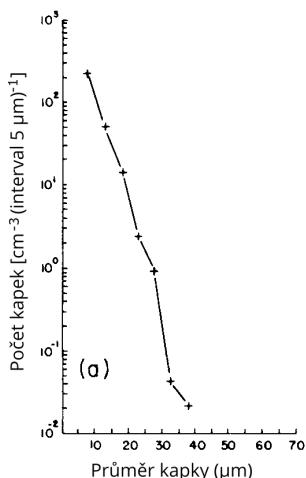
## Implementace zobrazování atmosférických jevů

Z hlediska implementace se jedná o dvě mezi sebou komunikující řešení – (tzv. hostitelský) program pro procesor v jazyce C++ a „grafický“ program ve formě shaderů v jazyce GLSL, jenž jsou prvním zmíněným komplikovaný a řízeny.

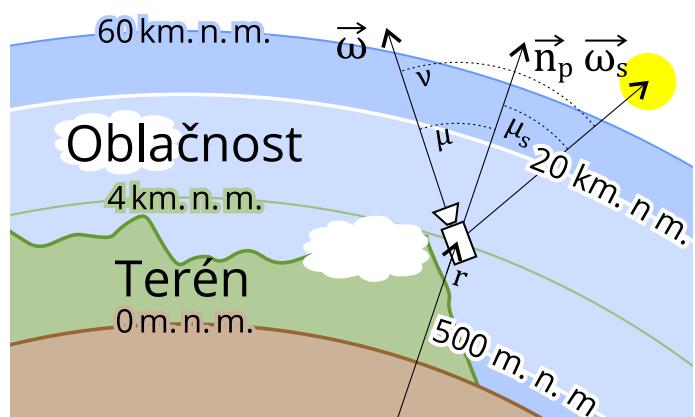
### 5.1 Přehled použitých technologií

Jazyk C++ s komplátorem MSVC 19.30.30706.

**Multiplatformní framework BGFX<sup>1</sup>** zapouzdřuje vykreslování pomocí běžných grafických knihoven (OpenGL, Vulkan, DirectX, WebGL, OpenGL ES). Pro multiplatformní shadery používá programovací jazyk vycházející z GLSL, který je nutné zkompilovat pro cílovou platformu<sup>2</sup>. Je dostupný pod licencí BSD. Zahrnuje pod sebou knihovny **bx** pro matematické výpočty a **bimg** pro práci s obrázky.



Obrázek 5.1: Naměřená DSD kumulu [43, s. 12]



Obrázek 5.2: Důležité veličiny ve scéně

<sup>1</sup>Zdrojový kód dostupný z repozitáře <https://github.com/bkaradzic/bgfx>.

<sup>2</sup>Shader prochází komplikací dvakrát. Poprvé komplátorem **shaderc** (součást BGFX) a podruhé jej kompliuje sama grafická karta při spuštění aplikace.

**ImGui** s licencí MIT pro vykreslování uživatelského rozhraní. Byla využita verze zahrnutá v knihovně BGFX.

**Simple DirectMedia Layer** (SDL) ve verzi 2.0.16 pod licencí *zlib license* pro ovládání kamery myší a klávesnicí<sup>3</sup>.

**MiePlot** verze 4.5.21 pro získání fázových funkcí mraků. Je volně dostupný pro nekomerční použití<sup>4</sup>.

**GLM** (OpenGL Mathematics) pro maticové a vektorové výpočty. Použita verze 0.9.9.8 s licencí The Happy Bunny License.

## 5.2 Hostitelský a grafický program

Práce hostitelského programu je rozdělena do dvou vláken. Činnost prvního vlákna zahrnuje:

**Ovládání pomocí GUI**<sup>5</sup> a klávesnice.

**Předávání** parametrů (ať už konstantních, vypočítaných, předpočítaných nebo v GUI nastavitelných) a předmětů nacházejících se ve scéně grafické kartě. Některé parametry jsou předány již při komplikaci (díky podobnosti GLSL a C++ je možné zkompilovat soubory s konstantami pro oba programy zároveň).

**Spouštění předpočítávací procedury** proběhne po startu programu nebo opětovně po manuálním stisknutí tlačítka.

**Odbavení zobrazovací smyčky** vykreslí jeden snímek, resp. dlaždici (viz níže) na obrazovku nebo **do souboru** pojmenovaného podle pořadového čísla snímku. Probíhá periodicky až do opuštění programu. V případě vykreslování do souboru samozřejmě čeká na vykreslení všech dlaždic.

Druhé vlákno zapouzdřuje knihovnu BGFX. Provádí přímou komunikaci s GPU. Veškeré volání funkcí „pro komunikaci s GPU“ (například `bgfx::frame()`) provedené v prvním vláknu jsou totiž pouze naplánovány a posléze vykonány ve druhém.

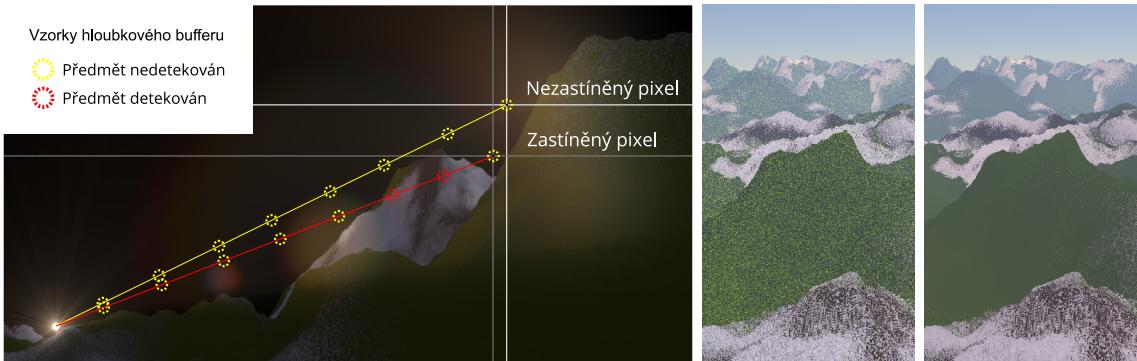
Shaderů je několik. Protože grafické procesory typicky neponechají shader spuštěný déle, než několik sekund (zajištěno systémem TDR – timeout detection & recovery – detekce a „zotavení z“ překročení časového limitu), je aplikováno tzv. dlaždicování vykreslování (angl. tiled rendering). V každém odbaveném snímku je vykreslena jen část konečně zobrazovaného pohledu. Uživatel by měl zvolit počet dlaždic podle schopností svého systému (čím více dlaždic zvolí, tím déle trvá vykreslení a zároveň je zajištěna větší jistota nepřekročení časového limitu TDR). Vstupem každého shaderu můžou být textury, buffery a proměnné parametry. Výstupem je vždy textura. Grafický program zahrnuje:

- Shadery pro předpočítání
  - Výškové a normálové mapy pro terén (viz kapitolu 4.1).
  - Atmosférického rozptylu (podle [6], popsáno v kapitole 4.3):
    - \* Barvy oblohy.

<sup>3</sup>SDL bylo použito v binární formě nyní dostupné na <https://www.libsdl.org/release/>.

<sup>4</sup>MiePlot lze získat z webu autora <http://www.philiplaven.com/mieplot.htm>.

<sup>5</sup>GUI – anglicky *graphical user interface*, grafické uživatelské rozhraní.



Obrázek 5.3: Zastínění odlesku čočky – vzorkování hloubkového bufferu

(a) Vypnutý (b) Empirický  
Obrázek 5.4: Mip mapping

- \* Propustnosti oblohy.
- \* Nepřímého osvětlení z oblohy.
- Integrálu optické hloubky ke slunci podle [36, kapitola 4.3.4].
- **Hlavní zobrazovací smyčka** provádí vždy jednu iteraci algoritmu sledování cesty. I při vysílání více sekundárních z jednoho primárního paprsku je v jedné iteraci vyhodnocován jen jeden paprsek za účelem lepšího rozložení výkonu v čase a menší pravděpodobnosti vypršení limitu TDR.
- *Post-processing* – shader pro finální kopírování výstupního obrazového bufferu ze zobrazovací smyčky do bufferu snímku<sup>6</sup>, vykreslení *odlesku čočky*<sup>7</sup> pomocí procedurální textury v obrazovkovém prostoru (angl. *screen-space*). Kontrola zastínění odlesku čočky probíhá pomocí vzorkování *hloubkového bufferu* (popsáno obrázkem 5.3) – síla odlesku je závislá na poměru pixelů zastiňujících slunce k pixelům nezastiňujícím slunce na cestě od právě vykreslovaného pixelu ke středu slunce na obrazovce. Jde o jediný klasický shader v aplikaci. Ostatní jsou totiž *compute shadery*.

Vykreslení uživatelského rozhraní je zapouzdřeno díky knihovně ImGui. Hlavní zobrazovací smyčka je z pohledu GPU jen jeden shader. Návrhově je samozřejmě dekomponován do mnoha souborů a funkcí.

**Vstupní funkce** vybírá příslušný subpixel<sup>8</sup> a dlaždici k vykreslení, spouští sledování cesty a ukládá výsledné hodnoty do výstupního obrazového bufferu.

**Sledování cesty** vysílá paprsky, hledá průsečík s analytickými předměty (implementovány jsou jen koule a kvádry), terénem, atmosférou a vrstvou mraků. Případně vypočítá přímé osvětlení terénu a analytických předmětů. Podle aktuálního nastavení generuje sekundární paprsky. Podporuje jen konstantní (difuzní) BRDF, protože tato práce je soustředěna více na vykreslování terénu než jiných pevných předmětů. Analytické předměty jsou součástí implementace hlavně kvůli testování nepřímého osvětlení, ne vlastností

<sup>6</sup>Buffery jsou odděleny z důvodu dlaždicovaného vykreslování

<sup>7</sup>Původ odlesků čočky vysvětluje kapitola 3.1. Procedurální textura vychází z ukázky na <https://www.shadertoy.com/view/4sX3Rs>.

<sup>8</sup>V módu *nejvyšší kvality* je v rámci jednoho pixelu každý další primární paprsek náhodně posunut za účelem vyhlazení hran (antialiasing). Pixel se proto prakticky skládá z více *subpixelů*.

různých BRDF. Vybírání směru pro sekundární paprsek probíhá s funkcí kosinus jako hustotou pravděpodobnosti (angl. *cosine weighted sampling*) [42, kapitola 13.6.3], čímž se v rovnici 2.3 zkrátí výraz  $|\cos_{\theta_i}|$  dělením  $p(x_i)$  v rovnici 2.27.

**Vliv ovzduší** je vyhodnocen při průsečíku s atmosférou (při umístěný kamery dovnitř atmosféry tedy vždy). Podle nastavení uživatele se použijí buď předpočítané hodnoty, nebo je provedeno krokování paprsku skrz atmosféru. Pro každou pozici kurzoru navíc probíhá detekce *zastínění mhy* opětovným krokováním terénu.

**Procedurální struktury** vyhodnocuje algoritmus krokování paprsku. Podrobně se jimi zabývá následující dvě kapitoly.

### 5.3 Procedurálně generovaná scéna

Oblačnost kolem planety a terén popisují dvě vrstvy fraktálu (fBm) založeném na náhodném šumu z generátoru nepřesnosti (viz kapitolu 2.7).

**Pokrytí oblačnosti na planetární úrovni** (ve velkém měřítku) – funkce  $\text{coverage}(\mathbf{x})$  – jedná se o „micro noise“, skalární součin mezi různými oktaťami popsáný na straně 29. Výchozí rozlišení (resp. násobitel velikosti  $q = 1/\text{rozlišení}$ ; za jednotku  $q$  lze považovat  $\text{m}^{-1}$ ) má hodnotu  $q_{\text{coverage}} = 0,005$ .

**Oblačnost na úrovni jednotlivých mraků** – popsána pomocí 6oktávového fBm. Při výpočtu optické hloubky slunce fraktál obsahuje pro lepší výkon pouze 3 oktať. Výchozí rozlišení ve třech osách  $q_{\text{clouds}} = (8 \cdot 10^{-5}; 16 \cdot 10^{-5}; 8 \cdot 10^{-5})$ . Pro kulatější tvary je výsledek umocněn na 1,05. Výstup tohoto fraktálu připomíná mraky typu altokumulus.

Pro relativní hustotu mraků v bodě  $\mathbf{x}$  platí:

$$\rho_{r_{\text{clouds}}}(\mathbf{x}) = \text{coverage}(\mathbf{x}q_{\text{coverage}}) - \text{fBm}_{\text{clouds}}(\mathbf{x}q_{\text{clouds}}). \quad (5.1)$$

Všechny výše zmíněné konstanty je možné konfigurovat v uživatelském rozhraní.

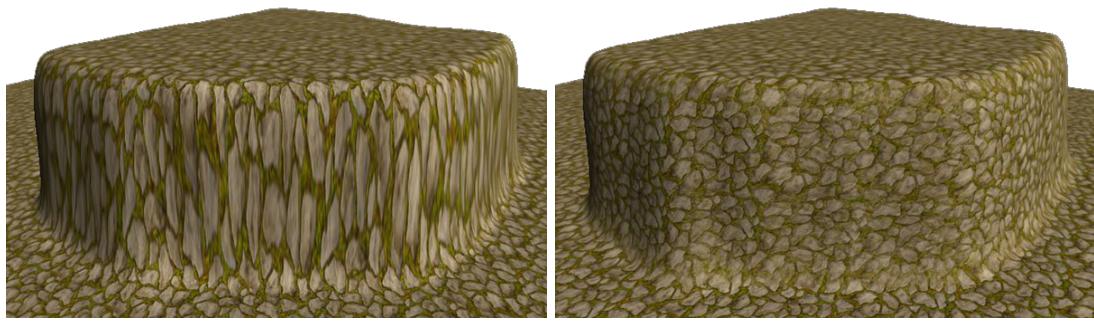
**Pokrytí planety kontinenty** – opět 6 oktať. Posléze je výstup fraktálu dosazen do výrazu  $(2x-1, 1)^{11}$  a ořezán na rozsah  $-0,1 < x < 1$ . Díky negativním hodnotám je možné skrýt některé části povrchu „pod hladinu moře“. Násobitel velikosti  $q_{\text{terrain}} = 2 \cdot 10^{-7}$ . U terénu nelze násobitele konfigurovat (kvůli předpočítání).

**Zvrásnění povrchu** – 9 oktať s parciálními derivacemi předpočítané a uložené v textuře – výškové mapě. Derivace jsou dále použity jako normálová mapa. Ta obsahuje jen 2 souřadnice normály. Třetí souřadnici v průběhu vykreslování dopočítá algoritmus *normal-mapping* s použitím normálového, tečného (tangentového) a bitangentového vektoru koule (znázorněny na obrázku 5.6), na kterou se povrch „nanáší“. Výšková mapa je pro zajištění návaznosti na okrajích snížena dosazením každého pixelu do rovnice  $height' = height(1 - ((2s-1)^2 + (2t-1)^2))$ , v níž  $s$  a  $t$  jsou souřadnice pixelu v rozsahu  $\langle 0, 1 \rangle$ . Násobitel velikosti  $q_{\text{heightMap}} = 3 \cdot 10^{-5}$ .

### 5.4 Krokování paprsku v procedurálních strukturách

#### V mracích

Probíhá s proměnnou délkou kroku. Při průsečíku s vrstvou obsahující oblačnost (znázorněna na obr. 5.2) se začne provádět krokování paprsku nejdříve s dlouhým krokem (jeho



(a) Mapování v rovině  $xz$

(b) Mapování ve třech rovinách

Obrázek 5.5: Texturování terénu<sup>11</sup>

délka se vypočítá vynásobením délky standardního kroku nastavitelnou konstantou s výchozí hodnotou 5). Vyhodnocuje se jen fraktál  $\text{coverage}(\mathbf{x})$ . Po detekování relativní hustoty přes nastavený práh (výchozí 0,001) je přepnuto na krátký (standardní) krok a kompletní vyhodnocování  $\rho_{r_{clouds}}(\mathbf{x})$ .

Před samotným krokováním lze volitelně kurzor posunout o náhodnou hodnotu ve výchozím rozsahu  $-350 < rand < 350$  závislou na směru paprsku za účelem neutralizace efektu *bandážování*<sup>9</sup>. V módu nejvyšší kvality náhodná hodnota závisí i na pořadovém čísle vzorku Monte Carlo integrace.

Neutralizace bandážování je aplikována i při výpočtu optické hloubky slunce navíc s narůstajícím maximálním rozptylem  $rand$  s každým dalším krokem kurzoru.

Schneider [51] navrhuje snadné vylepšení osvětlení pomocí empirického *powder* efektu, který approximuje tmavé vrásnění v důsledku vícenásobného rozptylu. Propustnost každé částice je vynásobena výrazem  $1 - e^{-\pi p}$  ořezaným na rozsah s volitelnou spodní hranicí  $\langle p_{min}, 1 \rangle$ . Vzhledem k tomu, že efekt bývá viditelný jen při pohledu do antisolárního bodu, je výraz vynásoben  $\nu$  (význam jednotlivých proměnných je diskutován v kapitolách 22 a 4.3). Výsledek s výchozími  $p = 6 \times 10^{-3}$ ;  $p_{min} = 0,97$  je viditelný na obrázku 5.7.

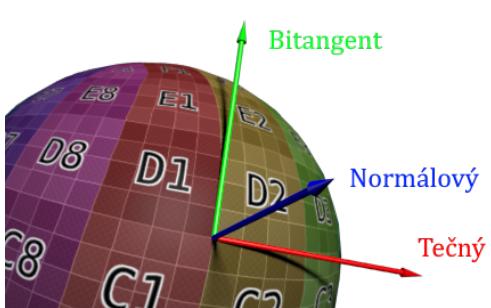
Stejně jako u terénu, barva mraků je ovlivněna ovzduším před nimi – mlhou. Aby nebylo nutné vyhodnocovat „zamlžení“ každého bodu mraků zvláště, je vyhodnoceno pouze pro bod s maximální detekovanou hustotou. Tento přístup tvoří artefakty, pokud pohledový paprsek protíná dlouhou vrstvu mraků – možným zlepšením je vypočítat zamlžení pro více různých nalezených míst s nejvyšší hustotou.

Kvůli vysokým hodnotám efektivních Mieových fázových funkcí (kolem  $10^5$ ) dosahuje zář mraků vyšších hodnot, než slunce. Nejjednodušším řešením je tyto hodnoty uměle omezit. K hladkému omezení (u hodnot blízkých hranici je použit interpolační polynom) záře na hodnotu 3 byla použita funkce Iñigo Quileze<sup>10</sup>.

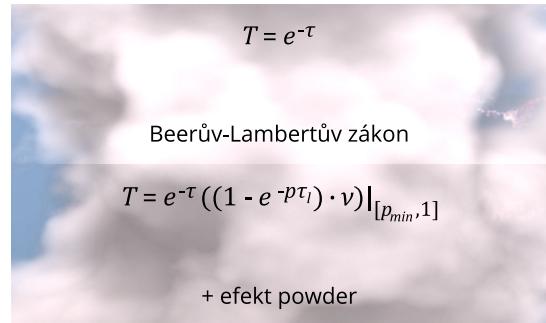
<sup>9</sup>Svislé bandážování, páskování obrazu, angl. banding – nepříjemný efekt vznikající při nedostatečném počtu kroků kurzoru.

<sup>10</sup>Její kód lze najít na <https://iquilezles.org/articles/smin/>.

<sup>11</sup>Obrázky převzaty z článku na <https://gamedevelopment.tutsplus.com/articles/use-tri-planar-texture-mapping-for-better-terrain--gamedev-13821>. Původní adresy <https://cdn.tutsplus.com/cdn-cgi/image/width=600/gamedev/uploads/2014/01/triPlanar-regularTerrain.jpg> a <https://cdn.tutsplus.com/cdn-cgi/image/width=600/gamedev/uploads/2014/01/triPlanar-Terrain.jpg>.



Obrázek 5.6: Vektory pro normal-mapping<sup>12</sup>



Obrázek 5.7: Efekt *powder*

**Krokování terénu** je založeno na článcích I. Quileze [45] a jeho kódu na serveru ShaderToy<sup>13</sup>. Značného zrychlení je zde dosaženo dynamickou tolerancí  $\varepsilon$  závislou na vzdálenosti od kamery. Hlavním rozdílem je nutnost použití 64bitového datového typu *double* (kvůli průměru planety 6360000 m). Při krokování terénu za účelem testování zastínění je použita odlišná přesnost a počet kroků než při zobrazování a je aplikována neutralizace bandážování. Quilez navrhuje snadnou approximaci měkkých stínů [46] čerpanou z uložené nejkratší vzdálenosti od povrchu, kterou kurzor vyhodnotil. Navzdory tomu, že není fyzikálně přesná, je pro zvýšení konvergence měkkých stínů tato možnost ve výsledném programu zahrnuta.

**Texturování terénu** probíhá pomocí *triplanárního mapování* (příklad na obrázku 5.5).

Spočívá ve vícenásobném vykreslení textury ve třech prostorových rovinách: *xy*, *xz* a *yz*. V každé rovině je prostorovým souřadnicím rozuměno jako souřadnicím textury. Konečná barva je váženým průměrem všech tří vykreslení. Váhy jednotlivých rovin berou v potaz směr normálového vektoru povrchu. Ač se triplanární mapování používá při generování procedurálních předmětů často (například v práci [15]), jeho nevýhodou je nepřijemné roztažení textur v místech se sklonem 45° k některé z rovin.

## Úroveň mip mapy

Při vykreslování vzdáleného objektu může být jeho textura natolik zmenšena, že dojde k aliasingu – interpolaci *texelů*<sup>14</sup> začne produkovat artefakty. Grafický procesor proto provádí:

- *mip-mapping* – každá textura má k sobě přiřazeno několik kopií (úrovní) sebe samé pro různé zlomky svého rozlišení.
- *filtrování* – vybere při vykreslování příslušnou úroveň *mip mapy* podle změny (parciální derivace) v texturových souřadnicích *s* a *t* mezi sousedními vykreslovanými pixely. Může dokonce interpolovat *texely* mezi více úrovněmi *mip mapy* zároveň. Nakonec provede standardní interpolaci mezi texely na sousedních souřadnicích.

<sup>12</sup>Obrázek pochází z adresy <http://www.opengl-tutorial.org/assets/images/tuto-13-normal-mapping/NTBFromUVs.png>. Převzat ze stránky <http://www.opengl-tutorial.org/intermediate-tutorials/tutorial-13-normal-mapping/>.

<sup>13</sup>Krokování terénu <https://www.shadertoy.com/view/MdX3Rr>, měkké stíny <https://www.shadertoy.com/view/lsKcDD>.

<sup>14</sup>Jeden pixel textury bývá pro odlišení od pixelů obrazovky nazýván *texel*.

Parciální derivace vypočítá GPU automaticky při volání `texture(...)`, pokud je dokáže z kódu shaderu odvodit. Kvůli složitosti algoritmu krokování paprsku (a použití compute shaderu) nedocházelo na testovaných GPU k vybrání správné úrovně mip mapy. K výběru vlastní úrovně pomocí funkce `textureLod(...)` byla použita následující empirická rovnice závislosti na vzdálenosti bodu od kamery  $t$ . Výsledek je patrný na obr. 5.4.

$$lodLevel = \frac{t^a}{b}; \quad a = 0, 5; \quad b = 5. \quad (5.2)$$

## 5.5 Použitá mikrofyzikální data

Pro pravé fyzikálně založené zobrazování je potřeba počítat nejen s realistickými zákony, ale i s fyzicky naměřenými veličinami. V herním nebo filmovém průmyslu bývají tyto hodnoty dále upraveny za účelem lepšího uměleckého dojmu. V této práci k tomu nedošlo.

### Ovzduší

Hodnoty převzaty z publikací [36] a [6]. U druhé jmenované byl zároveň využit otevřený zdrojový kód<sup>15</sup>. Složky vektorových spektrálních veličin přísluší k vlnovým délkám jednotlivých barevných kanálů: červený 680 nm, zelený 550 nm, modrý 440 nm.

**Spektrální koeficienty Rayleighova** rozptylu ( $\text{v m}^{-1}$ ) na molekulách vzduchu:

$$\kappa_{s_R} = (5, 802339 \cdot 10^{-6}; 1, 355776 \cdot 10^{-6}; 3, 31 \cdot 10^{-6}), \quad \kappa_{a_R} = (0; 0; 0).$$

$$\text{Na molekulách ozonu: } \kappa_{a_O} = (6, 497166 \cdot 10^{-7}; 1, 8809 \cdot 10^{-6}; 8, 501668 \cdot 10^{-8}).$$

**Mieův rozptyl**  $\kappa_{s_M} = 3, 996 \cdot 10^{-6}$ ,  $\kappa_{a_M} = 4, 4 \cdot 10^{-6}$ , anizotropie  $g = 0, 8$ .

### Výška měřítka

molekul vzduchu  $H_{0_R} = 7994\text{m}$ , aerosolů  $H_{0_M} = 1200\text{m}$ , ozonu  $H_{0_O} = 25\text{km}$ .

### Mraky

Data pro mraky pocházejí z měření v publikaci [21, strana 10].

**Koeficient útlumu**  $\kappa_e = 1, 0354 \cdot 10^{-2}$ .

**Odrazivost jednoho rozptylu**  $\varpi_0 = 0, 9512$ .

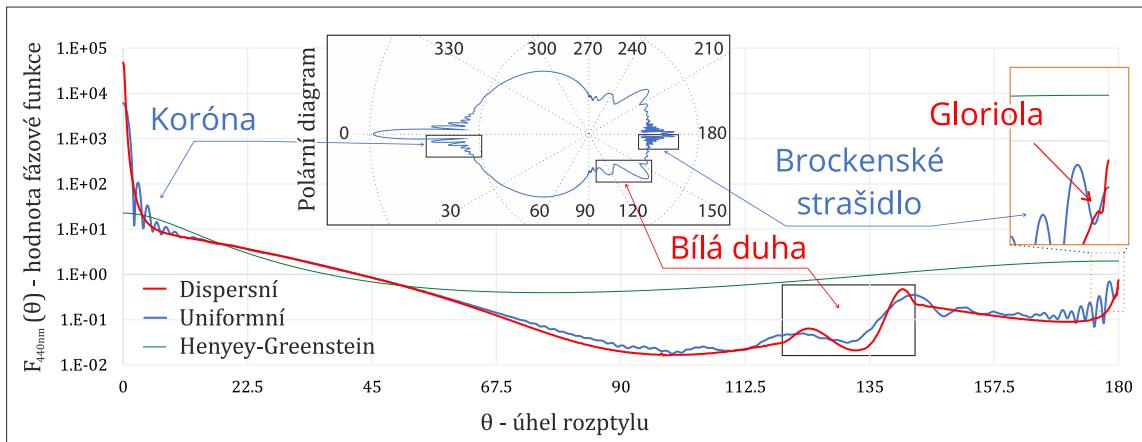
**Koeficient rozptylu**  $\kappa_s = \kappa_e \cdot \varpi_0 = 9, 848 \cdot 10^{-3}$ .

Protože fotometeory vyžadují pro své zobrazení specifické DSD závislé na druhu mraku a meteorologických okolnostech, ideální by bylo tyto okolnosti simulovat. Nicméně simulace počasí je mimo rozsah této práce, a proto program vždy použije jen jednu globální DSD. Uživatel má možnost vybrat si mezi:

- poměrně **Uniformními** velikostmi kapek (logaritmicky-normální rozložení, střední poloměr  $10 \text{ }\mu\text{m}$ , směrodatná odchylka 1%). Odrážejí přibližnou strukturu cirrusu, výsledkem je Koróna a Brockenské strašidlo.
- více **Dispersními** (gamma rozložení, střední poloměr  $5 \text{ }\mu\text{m}$ , tvarový parametr  $k = 2$ ). Odrážejí přibližnou strukturu kumulu, produkuje Bílou duhu a Gloriolu.

---

<sup>15</sup>Jedná se vlastně o referenční implementaci. Dostupný z [https://github.com/ebruneton/precomputed\\_atmospheric\\_scattering](https://github.com/ebruneton/precomputed_atmospheric_scattering).



Obrázek 5.8: Efektivní f.f. s vyznačenými oblastmi důležitými pro fotometeory

Použitá rozložení jsou přibližně založeny na měřeních prezentovaných v knize *Microphysics of Clouds and Precipitation* [43, na stranách 12–17] (příkladem jednoho měření je obrázek 5.1). Příslušné efektivní Mieovy fázové funkce kvůli své složitosti vyžadují uložení do tabulky – shader na grafické kartě je dostává ve formě jednorozměrné textury. Jejich graf znázorňuje obrázek 5.8 (varianta pro modrý kanál). Protože není možné získat efektivní fázovou funkci pro úplně všechny kapky v mraku, je vždy uvažována určitá míra kapek, které svou velkostí DSD neodpovídají. Prakticky to znamená, že fázová funkce DSD je v určitém (volitelném) poměru zkombinována s dvouparametrovou HG s parametry  $g_f = 0,8$ ;  $gb = -0,4$ .

## 5.6 Nastavení scény

Planeta je komponována jako dokonalá koule o průměru 6360 km (úroveň mořské hladiny) se zvrásněným povrchem dosahujícím do výšky 4 km. Dále nad ní leží vrstva mraků a atmosféry, jak je patrné na obrázku 5.2. Program nabízí široké možnosti nastavení parametrů, jejichž celkový popis najeznete v příloze A. Rámcově jde o kategorie:

**Kamera** – rychlosť pohybu, citlivosť myši.

**Světlo** – úhel slunce, kvalita stínů, kvalita mlžných paprsků, použitý tonemapping, použití fotometrických či radiometrických veličin, odlesk čočky.

**Atmosféra a mraky** – rozptylové a absorpcní koeficienty, anizotropie, výška atmosféry, vrstvy mraků, ozonu, approximace vícenásobného rozptylu.

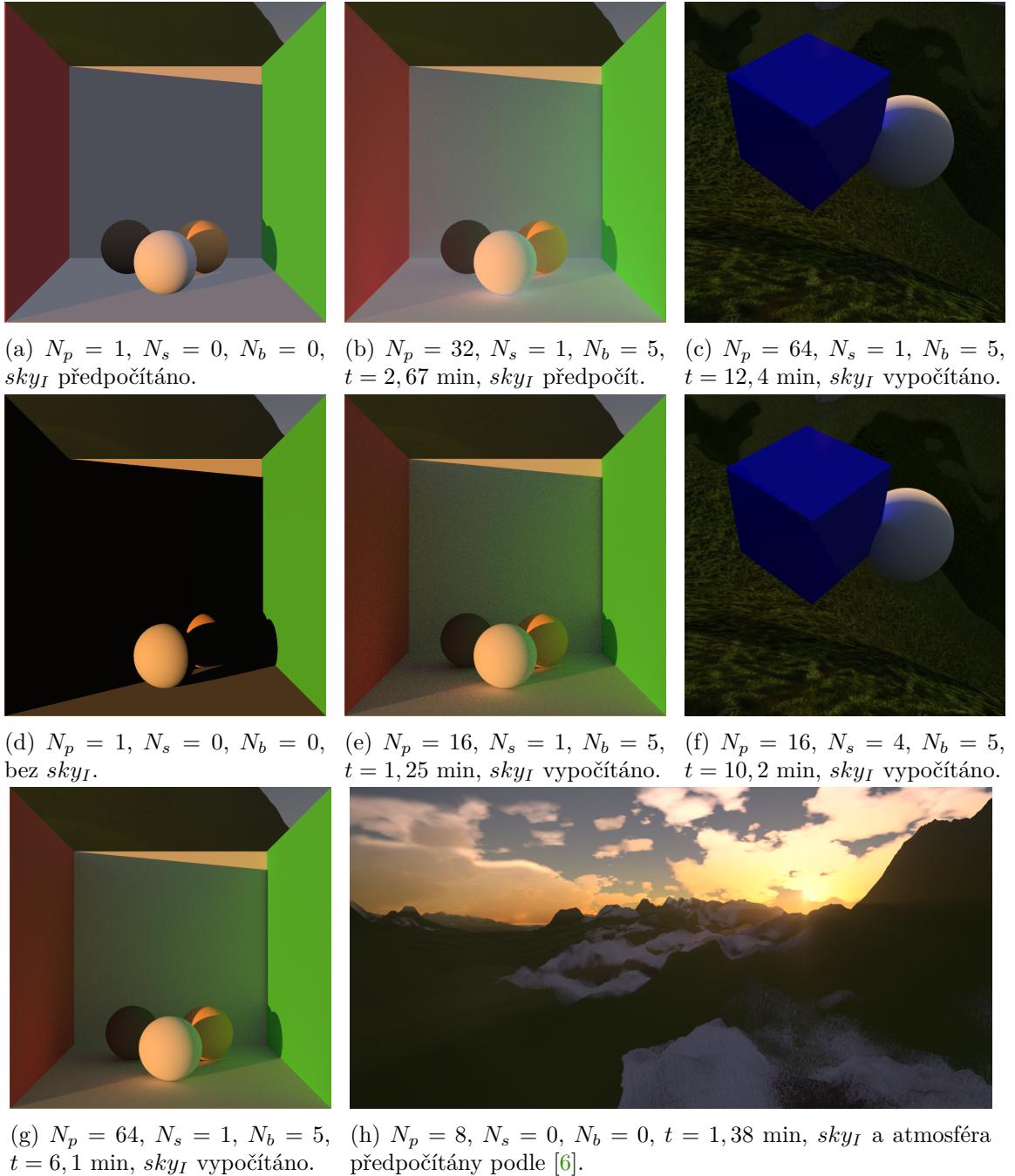
**Terén** – kvalita, vykreslovací vzdálenost, přechody mezi materiály (tráva, kameny, sníh).

**Výkon** – zapnutí nebo vypnutí funkcí: stíny, předpočítaná atmosféra, mlžné paprsky, použití empirických optimalizací ze sekce 4.3 předchozí kapitoly.

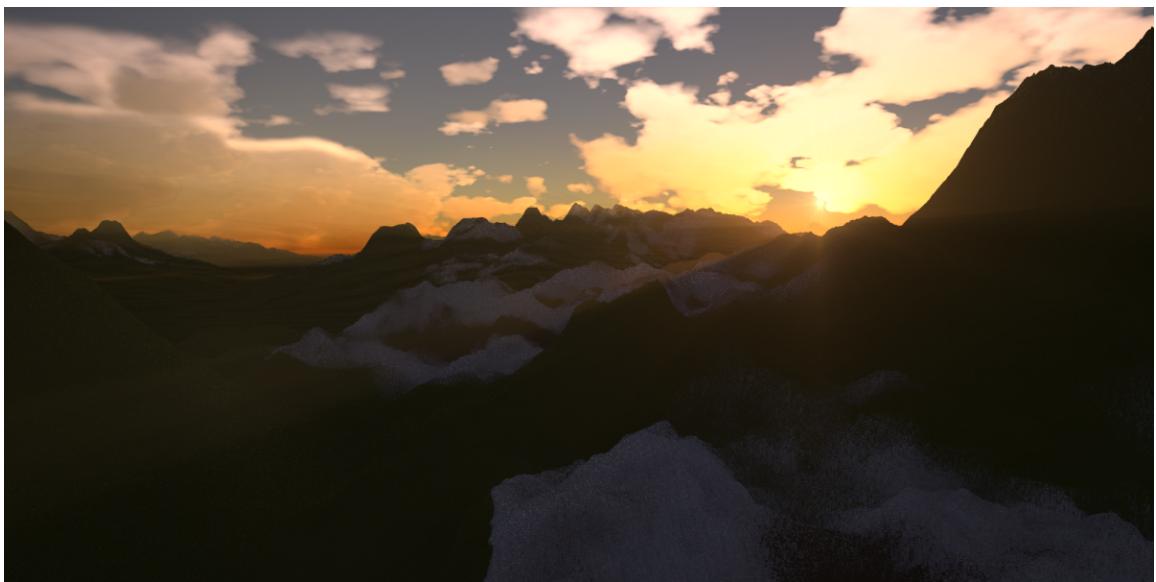
## 5.7 Testování a dosažené výsledky

Testování probíhalo na 64bitovém operačním systému Windows 10 s grafickými procesory NVIDIA GeForce GTX 1050 Mobile a Intel® UHD Graphics 630. Grafické karty od firmy

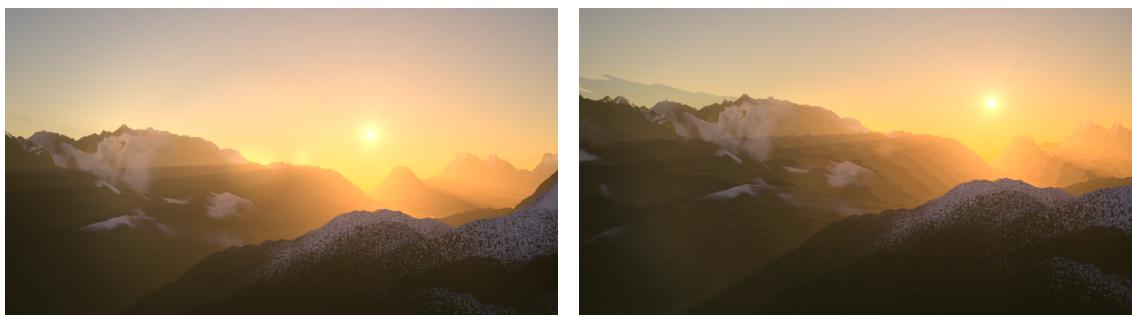
AMD vykazovaly problémy – buď neschopnost zkompilovat shadery, nebo jejich odlišnou interpretaci způsobující nepoužitelnost celého řešení. Na následujících stranách lze vidět porovnání dosažených výsledků s fotografiemi zachycujícími stejné jevy. Všechny výstupy programu (pokud není uvedeno jinak) na následujících třech stranách byly vykresleny s výchozími parametry v módu nejvyšší kvality s 32 primárními paprsky na pixel. Doba trvání jejich vykreslení (pokud je pro daný příklad důležitá) na prvním zmíněném GPU je označena  $t$ . Fotografie převzaty z galerií NASA a Unsplash s následnými úpravami.



Obrázek 5.9: Nepřímé osvětlení.  $sky_I$  označuje použití approximace osvětlení z oblohy.



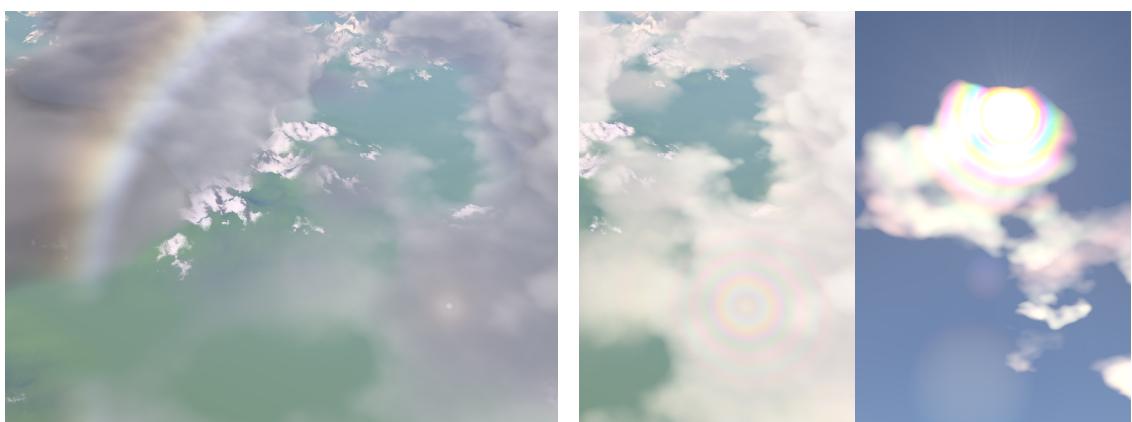
Obrázek 5.10:  $N_p = 8$ ,  $N_s = 1$ ,  $N_b = 5$ ,  $t = 1,86$  min,  $sky_I$  a atmosféra vypočítány.



(a) 100 vzorků atmosféry na pixel

(b) 16 vzorků atmosféry na pixel

Obrázek 5.11: Mlžné paprsky



(a) Uniformní – Bílá duha a gloriola

(b) Dispersní – Brockenské strašidlo, koróna

Obrázek 5.12: Fotometeory s různým DSD



(a) Realita<sup>16</sup>

(b) Výstup programu

Obrázek 5.13: Atmosférický rozptyl, pohled z vesmíru.



(a) Realita<sup>17</sup>

(b) Výstup programu

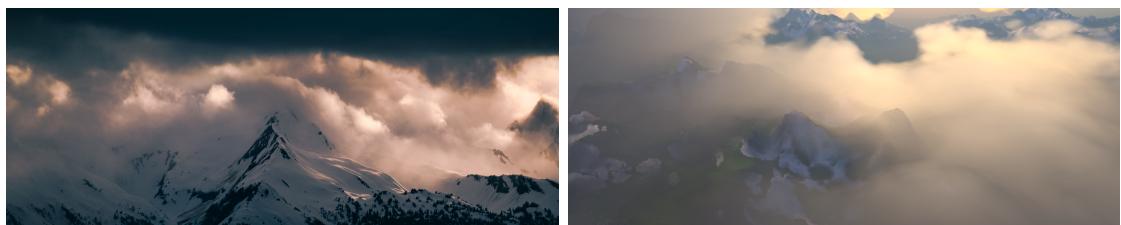
Obrázek 5.14: Boční osvětlení mraků. Aproximace vícenásobného rozptylu mracích vypnuta.



(a) Realita<sup>18</sup>

(b) Výstup programu

Obrázek 5.15: Boční osvětlení atmosféry.



(a) Realita<sup>19</sup>

(b) Výstup programu

Obrázek 5.16: Mraky dotýkající se zemského povrchu. Aproximace vícenásobného rozptylu v mracích vypnuta.

<sup>16</sup><https://www.nasa.gov/sites/default/files-thumbnails/image/iss057e000244.jpg>

<sup>17</sup><https://www.nasa.gov/sites/default/files-thumbnails/image/iss059e006522.jpg>

<sup>18</sup><https://www.nasa.gov/sites/default/files-thumbnails/image/iss064e029005.jpg>

<sup>19</sup><https://unsplash.com/photos/5djQ0zAEXvo>

# Kapitola 6

## Závěr

Cílem této práce bylo nastudovat podstatu světelných dějů v prostoru i zemské atmosféře a následně implementovat počítačový program pro vykreslování virtuální scény s terénem, ovzduším a mraky. Tyto cíle byly splněny.

V rámci vysvětlení nastudovaných znalostí se kapitola 2 zabývá základními poznatkami optiky z matematického hlediska (rozptyl záření, vnímání lidského oka) a jejich použitím v počítačové grafice pomocí teorií fyzikálně založených zobrazovacích metod, od těch určených pro pevné materiály (mikroplošková teorie) až po zobrazování homogenních a heterogenních prostředí (teorie přenosu záření). Ke konci pak také vysvětuje procedurální modelování přírodních struktur. Kapitola 3 se zaměřuje na specifitější jevy ovlivňující vzhled atmosféry (Rayleighův a Mieův rozptyl v ovzduší, Mieův rozptyl v mracích) a charakteristiku jejího složení.

Vývoj programu určeného pro vykreslování virtuální scény s procedurálním terénem, atmosférou a analytickými objekty pomocí metod *Monte Carlo sledování cesty a krokování paprsku* s využitím proměnné délky kroku je návrhově popsán diagramy v kapitole 4. Další kapitola 5 přidává k návrhu detaily ohledně fyzicky naměřených dat, použitých approximací složitějších efektů (Mieova fázová funkce, vícenásobný rozptyl v mracích, měkké stíny terénu), parametrů procedurálního generování a přístupů k vyrovnání se s omezeními, která současná výpočetní zařízení kladou (mip mapping v compute shaderu, TDR).

Výsledný program nabízí široká nastavení parametrů, možnost v módu reálného času procházet scénu virtuální kamerou, nebo naopak vykreslit v módu nejvyšší kvality co nejlepší stacionární snímek s nepřímým osvětlením a měkkými stíny. Budoucí rozšíření se nabízí hlavně v oblasti univerzálního vykreslování trojrozměrných modelů, jiných než difuzních materiálů, možnosti přidání dalších světelných zdrojů do scény a použití akceleračních struktur a stínových map, aby bylo možné počítat s více předměty ve scéně a se zastíněním mraků. Dalším eventuálním směrem je reprezentace terénu pomocí přesné SDF (bez použití fBm), nebo naopak podpora ručně vytvořeného modelu.

Díky této práci jsem získal mnoho nových znalostí z odvětví realistického zobrazování, procedurálního a náhodného generování, optiky a meteorologie. Mimo to jsem vlastně také získal snadný nástroj k vykreslování umělecky použitelných scenérií a nevšedních jevů.

# Literatura

- [1] ABDELLAH, M. *In Silico Brain Imaging: Physically-plausible Methods for Visualizing Neocortical Microcircuitry*. Lausanne, CH, 2017. 127 s. Disertační práce. EPFL.
- [2] BATSANOV, S. S. Van der Waals radii of elements. *Inorganic materials*. Springer. 2001, sv. 37, č. 9, s. 871–885. DOI: 10.1023/A:1011625728803.
- [3] BLASI, P., LE SAEC, B. a SCHLICK, C. A Rendering Algorithm for Discrete Volume Density Objects. *Computer Graphics Forum*. Blackwell Science Ltd and the Eurographics Association. 1993, sv. 12, č. 3, s. 201–210. DOI: 10.1111/1467-8659.1230201. ISSN 1467-8659. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1467-8659.1230201>.
- [4] BOUTHORS, A. *Rendu réaliste de nuages en temps réel*. 2008. [cit. 2022-03-31]. Disertační práce. Université Joseph-Fourier - Grenoble I. Dostupné z: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00319974>.
- [5] BRUNETON, E. A Qualitative and Quantitative Evaluation of 8 Clear Sky Models. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). 2016, sv. 23, č. 12, s. 2641–2655. DOI: 10.1109/tvcg.2016.2622272. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109%2Ftvcg.2016.2622272>.
- [6] BRUNETON, E. a NEYRET, F. Precomputed Atmospheric Scattering. *Computer Graphics Forum*. Wiley. jun 2008, sv. 27, č. 4, s. 1079–1086. Special Issue: Proceedings of the 19th Eurographics Symposium on Rendering 2008. DOI: 10.1111/j.1467-8659.2008.01245.x. Dostupné z: <https://hal.inria.fr/inria-00288758>.
- [7] BURLEY, B. a. Physically-based shading at Disney. In: [online]. Walt Disney Animation Studios, 2012, s. 12–13 [cit. 2022-04-08]. SIGGRAPH '94. Dostupné z: [https://media.disneyanimation.com/uploads/production/publication\\_asset/48/assets/2012\\_pbs\\_disney\\_brdf\\_notes\\_v3.pdf](https://media.disneyanimation.com/uploads/production/publication_asset/48/assets/2012_pbs_disney_brdf_notes_v3.pdf).
- [8] CHALMERS, A. a DEBATTISTA, K. HDR video past, present and future: A perspective. *Signal Processing: Image Communication*. 2017, sv. 54, s. 49–55. DOI: 10.1016/j.image.2017.02.003. ISSN 0923-5965. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092359651730019X>.
- [9] CHANDRASEKHAR, S. *Radiative transfer*. 1. vyd. Dover Publications, 1960. ISBN 978-0486605906.

- [10] CHOUDHURY, A. K. R. 1 - Characteristics of light sources. In: CHOUDHURY, A. K. R., ed. *Principles of Colour and Appearance Measurement*. Woodhead Publishing, 2014, kap. 1, s. 1–52 [cit. 2022-03-31]. DOI: 10.1533/9780857099242.1. ISBN 978-0-85709-229-8. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/luminous-efficacy>.
- [11] CHUAH, S.-P. a CHEUNG, N.-M. Bandwidth efficient mobile cloud gaming with layered coding and scalable phong lighting. In: *2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. 2014, s. 6006–6008. DOI: 10.1109/ICIP.2014.7026212. ISBN 978-1-4799-5751-4.
- [12] COOK, R. L. a TORRANCE, K. E. A Reflectance Model for Computer Graphics. In: *Proceedings of the 8th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1981, s. 309. SIGGRAPH '81. DOI: 10.1145/800224.806819. ISBN 0897910451. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/800224.806819>.
- [13] CORNETTE, W. M. a SHANKS, J. G. Physically reasonable analytic expression for the single-scattering phase function. *Appl. Opt.* OSA. Jun 1992, sv. 31, č. 16, s. 3152–3160. DOI: 10.1364/AO.31.003152. Dostupné z: <http://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-31-16-3152>.
- [14] DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCES. *Cs184/284a* [online]. University of California, Berkeley [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://cs184.eecs.berkeley.edu/sp19/lecture/12-20/integration>.
- [15] DOLEJŠKA, D. *Procedurální město*. Brno, CZ, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Dostupné z: <https://www.fit.vut.cz/study/thesis/21874/>.
- [16] HEITZ, E. a NEYRET, F. High-Performance By-Example Noise using a Histogram-Preserving Blending Operator. *Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques*. ACM. srpen 2018, sv. 1, č. 2, s. Article No. 31:1–25. ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on High-Performance Graphics 2018. DOI: 10.1145/3233304. Dostupné z: <https://hal.inria.fr/hal-01824773>.
- [17] HENYHEY, L. G. a GREENSTEIN, J. L. Diffuse radiation in the galaxy. *The Astrophysical Journal*. 1941, sv. 93, s. 76.
- [18] HERRANZ, A. F. *BRDFLab: A tool to design, fit and render BRDFs* [online]. [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <http://brdflab.sourceforge.net/>.
- [19] IMMEL, D. S., COHEN, M. F. a GREENBERG, D. P. A Radiosity Method for Non-Diffuse Environments. In: *Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1986, sv. 20, č. 4, s. 135 [cit. 2022-03-31]. SIGGRAPH '86. DOI: 10.1145/15922.15901. ISBN 0897911962. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/15922.15901>.
- [20] JAMES, F. A review of pseudorandom number generators. *Computer Physics Communications*. 1990, sv. 60, č. 3. DOI: 10.1016/0010-4655(90)90032-V. ISSN

0010-4655. Dostupné z:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001046559090032V>.

- [21] JOURDAN, O., OSHCHEPKOV, S., SHCHERBAKOV, V., GAYET, J.-F. a ISAKA, H. Assessment of cloud optical parameters in the solar region: Retrievals from airborne measurements of scattering phase functions. *Journal of Geophysical Research*. American Geophysical Union. 2003, sv. 108, D18. DOI: 10.1029/2003jd003493. Dostupné z: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01982546>.
- [22] KAJIYA, J. T. The Rendering Equation. In: *Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1986, sv. 20, č. 4, s. 143 [cit. 2022-03-31]. SIGGRAPH '86. DOI: 10.1145/15922.15902. ISBN 0897911962. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/15922.15902>.
- [23] KATEDRA FYZIKY POVRCHŮ A PLAZMATU. 5.1 Maxwellovy rovnice [online]. Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: [http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/elmag/5\\_1](http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/elmag/5_1).
- [24] KATTAWAR, G. W. A three-parameter analytic phase function for multiple scattering calculations. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1975, sv. 15, č. 9, s. 839–849. DOI: 10.1016/0022-4073(75)90095-3. ISSN 0022-4073. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022407375900953>.
- [25] KOLEKTIV AUTORŮ. Per-Pixel Displacement Mapping with Distance Functions. Addison-Wesley Professional. Leden 2005.
- [26] KŘIVÁNEK, J. *Computer graphics III – Photon mapping* [online]. Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://cgg.mff.cuni.cz/~jaroslav/teaching/2015-npgr010/slides/11%20-%20npgr010-2015%20-%20PM.pdf>.
- [27] LEWIS, R. R. Making shaders more physically plausible. *Computer Graphics Forum*. 1994, sv. 13, č. 2, s. 118. DOI: 10.1111/1467-8659.1320109. Dostupné z: <http://cseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.23.6310&rep=rep1&type=pdf>.
- [28] LIANG, C.-K. *DIS Project 3 - Ward's BRDF implementation on pbrt* [online]. 2006 [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: [http://chiakailiang.org/project\\_ward/](http://chiakailiang.org/project_ward/).
- [29] LOTTES, T. Advanced Techniques and Optimization of VDR Color Pipelines. In: 2016 [cit. 2022-04-01]. GDC 2016. Dostupné z: <https://gpuopen.com/wp-content/uploads/2016/03/GdcVdrLottes.pdf>.
- [30] MANDELBROT, B. B. *Fractals and the Geometry of Nature*. WH freeman New York, 1982 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: [https://users.math.yale.edu/~bbm3/web\\_pdfs/encyclopediaBritannica.pdf](https://users.math.yale.edu/~bbm3/web_pdfs/encyclopediaBritannica.pdf).
- [31] MAYER, B. a KYLLING, A. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2005, sv. 5, č. 7, s. 1855–1877. DOI: 10.5194/acp-5-1855-2005. Dostupné z: <https://acp.copernicus.org/articles/5/1855/2005/>.

- [32] MIE, G. Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. *Annalen der Physik*. 1908, sv. 330, č. 3, s. 377–445. DOI: 10.1002/andp.19083300302. Anglická verze „Contributions to the Optics of Turbid Media, Particularly of Colloidal Metal solutions“ je dostupná z <https://scattport.org/images/pdfs/SAND78-6018-Mie-1908-translation.pdf>. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/andp.19083300302>.
- [33] MILET, T. *Zadání projektu do předmětu IZG*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, 2021.
- [34] MONTOTO GONZÁLEZ, M. *Hands-on study on Vulkan and the hardware ray-tracing extensions*. Barcelona, ES, 2021. Bakalářská práce. Universitat Autònoma de Barcelona, Escola d'Enginyeria.
- [35] NIEDERREITER, H. *Random Number Generation and Quasi-Monte Carlo Methods*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. Dostupné z: <https://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/1.9781611970081>.
- [36] NISHITA, T., SIRAI, T., TADAMURA, K. a NAKAMAE, E. Display of the earth taking into account atmospheric scattering. In: *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. říjen 1993, s. 175–182. DOI: 10.1145/166117.166140.
- [37] NOVÁK, J. *Efficient Many-Light Rendering of Scenes with Participating Media*. Karlsruhe, DE, 2014. Disertační práce. Karlsruhe Institute of Technology.
- [38] OLANO, M. Modified Noise for Evaluation on Graphics Hardware. In: *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Conference on Graphics Hardware*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2005, s. 105–110. HWWS '05. DOI: 10.1145/1071866.1071883. ISBN 1595930868. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/1071866.1071883>.
- [39] OREN, M. a NAYAR, S. K. Generalization of Lambert's Reflectance Model. In: *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1994, s. 251. SIGGRAPH '94. DOI: 10.1145/192161.192213. ISBN 0897916670. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/192161.192213>.
- [40] PERINGER, P. a HRUBÝ, M. *Modelování a simulace*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, Sep 2021 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <http://www.fit.vutbr.cz/study/courses/IMS/public/prednasky/IMS.pdf>.
- [41] PERLIN, K. Improving Noise. In: *Proceedings of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2002, s. 682. SIGGRAPH '02. DOI: 10.1145/566570.566636. ISBN 1581135211. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/566570.566636>.
- [42] PHARR, M., JAKOB, W. a HUMPHREYS, G. *Physically Based Rendering: From Theory to Implementation*. 3rd. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2016 [cit. 2022-03-31]. ISBN 0128006455.

- [43] PRUPPACHER, H. R. a KLETT, J. D. *Microphysics of Clouds and Precipitation: Reprinted 1980*. Springer, Dordrecht, 1978. ISBN 978-94-009-9905-3. Původní vydavatel D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, NL. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-9905-3>.
- [44] QUILEZ, I. *Raymarching distance fields - 2008* [online]. [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://iquilezles.org/www/articles/raymarchingdf/raymarchingdf.htm>.
- [45] QUILEZ, I. *Value noise derivatives* [online]. 2008 [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://iquilezles.org/articles/morenoise/>.
- [46] QUILEZ, I. *Soft shadows in raymarched SDFs* [online]. 2010 [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://iquilezles.org/articles/rmshadows/>.
- [47] QUILEZ, I. *2D distance functions* [online]. [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://iquilezles.org/www/articles/distfunctions2d/distfunctions2d.htm>.
- [48] *BT.709 : Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange*. Standard. ITU-R. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.709-5-200204-S/en>.
- [49] RUSSELL, J. *Basic Theory of Physically-Based Rendering* [online]. Marmoset [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://marmoset.co/posts/basic-theory-of-physically-based-rendering/>.
- [50] SALAWITCH, R. J., FAHEY, D. W., HEGGLIN, M. I., MCBRIDE, L. A., TRIBETT, W. R. et al. *Twenty Questions and Answers About the Ozone Layer: 2018 Update, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018*. World Meteorological Organization, 2019. Dostupné z: <https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2018/downloads/twentyquestions.pdf>.
- [51] SCHNEIDER, A. a Vos, N. The Real-time Volumetric Cloudscapes of Horizon: Zero Dawn. [online]. 2015, [cit. 2022-05-01]. SIGGRAPH 2015. Dostupné z: <http://advances.realtimerendering.com/s2015/The%20Real-time%20Volumetric%20Cloudscapes%20of%20Horizon%20-%20Zero%20Dawn%20-%20ARTR.pdf>.
- [52] SCHULER, S. *Laser Tyndall Effect* [online]. Instructables [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://content.instructables.com/ORIG/F8D/2TXL/I66CY2ZV/F8D2TXLI66CY2ZV.jpg>.
- [53] SHARPE, B. *A fast and simple 32bit floating point hash function* [online]. [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://briansharpe.wordpress.com/2011/11/15/a-fast-and-simple-32bit-floating-point-hash-function/>.
- [54] SHARPE, B. *GPU Texture-Free Noise* [online]. [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://briansharpe.wordpress.com/2011/10/01/gpu-texture-free-noise/>.
- [55] SLINER, D. H. Radiometric Quantities and Units Used in Photobiology and Photochemistry: Recommendations of the Commission Internationale de l'Eclairage (International Commission on Illumination). *Photochemistry and Photobiology*. 2007, sv. 83, č. 2, s. 427. DOI: 10.1562/2006-11-14-RA-1081. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1562/2006-11-14-RA-1081>.

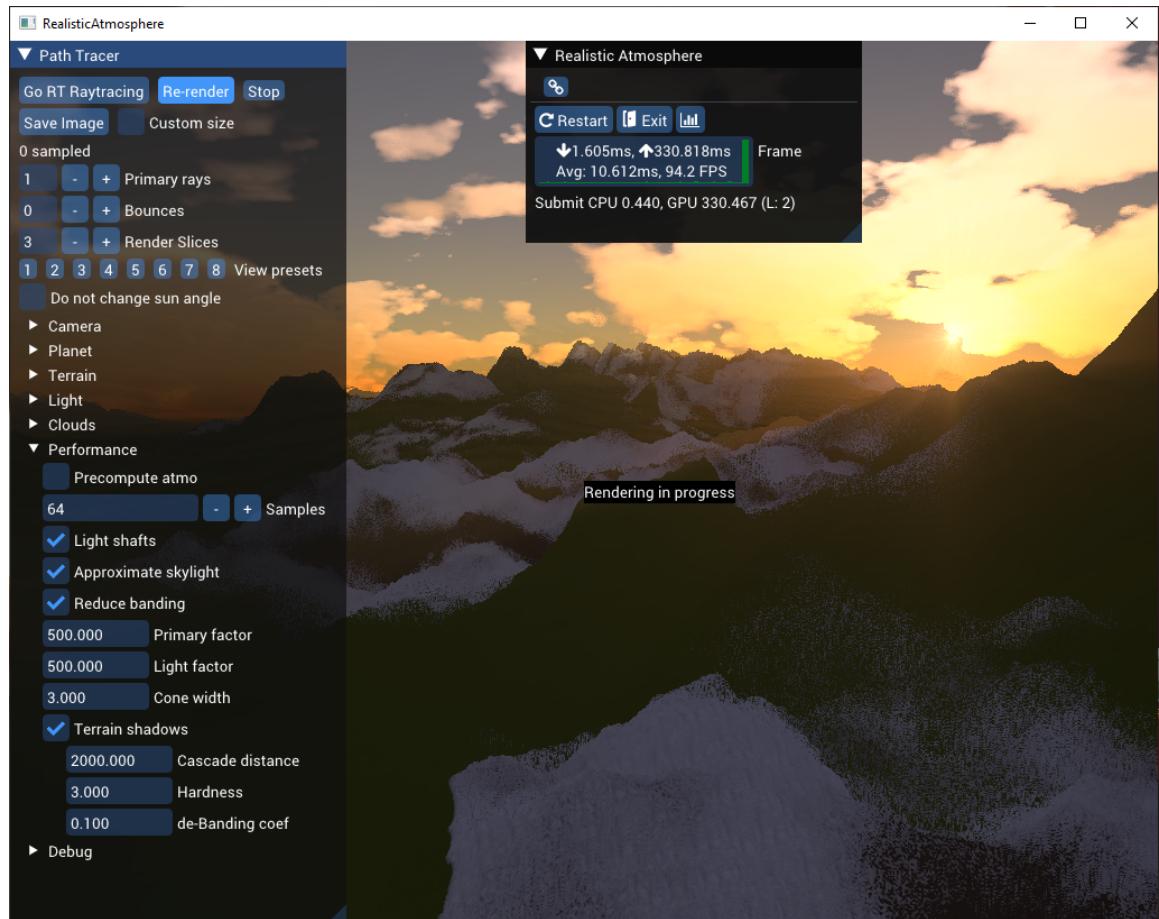
- [56] SMPTE. ST 2065-1:2012 - SMPTE Standard - Academy Color Encoding Specification (ACES). *ST 2065-1:2012*. April 2012, s. 1–23. DOI: 10.5594/SMPTE.ST2065-1.2012.
- [57] STANĚK, J. *Pořizování HDR obrazu ze sekvence snímků*. Brno, CZ, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/96412>.
- [58] SUDO NULL COMPANY. *About color spaces* [online]. Sudo Null Company, 30. may 2013 [cit. 2022-03-31]. Obrázek pod textem „CIE color body“ [Online; navštívěno 1. 04. 2022]. Dostupné z: <https://sudonull.com/post/126584-About-color-spaces>.
- [59] THE EDITORS OF ENCYCLOPAEDIA. *Light* [online]. Encyclopedia Britannica, Dec 2021 [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/light>.
- [60] TORRANCE, K. E. a SPARROW, E. M. Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces. *J. Opt. Soc. Am. OSA*. Sep 1967, sv. 57, č. 9, s. 1108. DOI: 10.1364/JOSA.57.001105.
- [61] UCHIMURA, H. a SUZUKI, K. *Practical HDR and Wide Color Techniques in Gran Turismo SPORT* [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: [http://cdn2.gran-turismo.com/data/www/pdi\\_publications/PracticalHDRandWCGinGTS\\_note\\_20181222.pdf](http://cdn2.gran-turismo.com/data/www/pdi_publications/PracticalHDRandWCGinGTS_note_20181222.pdf).
- [62] UNITY TECHNOLOGIES. *Unity - Manual: Eye Adaptation* [online], 24. května 2017 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://docs.unity3d.com/560/Documentation/Manual/PostProcessing-EyeAdaptation.html>.
- [63] VLNAS, M. *Fotorealistické zobrazování 3D scén*. Brno, CZ, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Dostupné z: <https://www.fit.vut.cz/study/thesis/22646/>.
- [64] VRIES, J. de. *LearnOpenGL - Theory*. [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://learnopengl.com/PBR/Theory>.
- [65] WALTER, B., MARSCHNER, S. R., LI, H. a TORRANCE, K. E. Microfacet Models for Refraction through Rough Surfaces. In: *Proceedings of the 18th Eurographics Conference on Rendering Techniques*. Goslar, DEU: Eurographics Association, 2007, s. 197. EGSR'07. ISBN 9783905673524.
- [66] WARD, G. J. Measuring and Modeling Anisotropic Reflection. In: *Proceedings of the 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1992, s. 265–272. SIGGRAPH '92. DOI: 10.1145/133994.134078. ISBN 0897914791. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/133994.134078>.
- [67] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *CIE 1931 color space — Wikipedia, The Free Encyclopedia* [online]. 2022 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=CIE\\_1931\\_color\\_space&oldid=1079190603](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=CIE_1931_color_space&oldid=1079190603).
- [68] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Mie scattering — Wikipedia, The Free Encyclopedia* [online]. 2022 [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Mie\\_scattering&oldid=1075866700](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Mie_scattering&oldid=1075866700).

- [69] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Radiant intensity* — Wikipedia, The Free Encyclopedia [online]. 2022 [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Radiant\\_intensity&oldid=1080060933](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Radiant_intensity&oldid=1080060933).
- [70] WIKIPEDIE. *Gama korekce* — Wikipedie: Otevřená encyklopédie [online]. 2021 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Gama\\_korekce&oldid=20716783](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Gama_korekce&oldid=20716783).
- [71] WIKIPEDIE. *Geometrická optika* — Wikipedie: Otevřená encyklopédie [online]. 2021 [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Geometrick%C3%A1\\_optika&oldid=20016553](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Geometrick%C3%A1_optika&oldid=20016553).
- [72] YARISCI, P. a PRIDDY, C. *OCTANE FOR CINEMA 4D MANUAL - Scattering medium* [online]. 2019.1. OTOY INC [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <http://www.aoktar.com/octane/OCTANE%20HELP%20MANUAL.html?ScatteringMedium.html>.
- [73] ŠANTRŮČEK, P. *Grafická pipeline: jak se tvorí obraz II* [online]. Svět hardware, 2015 [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/graficka-pipeline-jak-se-tvori-obraz-ii/40053>.
- [74] ŠANTRŮČEK, P. *Grafická pipeline III - Grafická karta* [online]. GPUreport, 2016 [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://gpureport.cz/clanky/49-graficka-pipeline3-gpu/raster-pipe.aspx?article=49&page=1>.

## Příloha A

# Manuál k aplikaci

Program **RealisticAtmosphere** je uzpísoben pro sestavení a spuštění na 64bitovém operačním systému Windows 10 s vývojovým prostředím Visual Studio 2022 a nainstalovanými sadami MSVC v143 a Windows 10 SDK 10.0.19041.0.



Obrázek A.1: Uživatelské rozhraní programu

## Sestavení

K sestavení slouží soubor *řešení RealisticAtmosphereBGFX.sln*. V průzkumníku řešení je nutné nastavit projekt **RealisticAtmosphere** jako spouštěný projekt kliknutím na položku kontextové nabídky *Set as Startup project*. Poté je již možné program zkompilovat a spustit tlačítkem ▶. S projektem se kompluluje i celý framework BGFX.

## Spuštění

Soubor **RealisticAtmosphere.exe** je závislý na obsahu adresářů **textures/** a **shaders/**. Je proto nutné, aby byly v jeho spouštěcím adresáři přítomny. Po spuštění jsou komplilovány shadery, což může na pomalejších grafických procesorech trvat i deset minut. Samovolné vypnutí programu bez zobrazení chybové hlášky může být způsobeno příliš pomalým hardwarem, což lze vyřešit spuštěním programu z příkazového řádku s parametrem **--cheap**.

## Nastavení

### Mód nejvyšší kvality

Tato nastavení nejsou dostupná v módu reálného času.

| Tlačítko            | Význam  |
|---------------------|---|
| Go to RT Raytracing | Přepne na mód reálného času. Všechna nastavení jsou pro jednotlivé módy oddělená. Při přepnutí je tedy vždy načtena sada nastavení pro daný mód.  |
| Re-render           | Vykreslí (znovu) snímek se současným nastavením.  |
| Save Image          | Uloží aktuálně zobrazený snímek do pracovního adresáře <sup>1</sup> do souboru <b>x.png</b> , kde <b>x</b> je pořadové číslo snímku (počítáno od začátku spuštění aplikace včetně snímků, které nebyly uloženy). Při navoleném vlastním rozlišení je zároveň provedeno kompletní vykreslení obrazu. |

| Proměnná       |       | Význam  |
|----------------|-------|---|
| Custom size    |       | Nastaví vlastní rozlišení pro ukládaný snímek. Při a po vykreslování snímku s vlastním rozlišením je obsah okna programu podivně zkreslen, což znemožní pozorovat průběh vykreslování – jedná se o známou chybu, kterou se zatím nepodařilo obejít. Odškrtnutím tohoto pole, nebo tlačítkem <b>Re-render</b> je vlastní nastavení rozlišení ztraceno. |
| Primary rays   | $N_p$ | Počet primárních paprsků na pixel. Čím vyšší, tím více budou ve snímku vyhlazený hrany a tím přesnější bude výpočet nepřímého osvětlení.  |
| Bounces        | $N_b$ | Maximální počet vícenásobných odrazů paprsku.   |
| Secondary rays | $N_s$ | Počet sekundárních paprsků vyslaných z průsečíku jednoho primárního paprsku. Je alternativou k $N_p$ . Při jeho zvýšení nejsou vyhlazený hrany, ale zvýší se přesnost nepřímého osvětlení.  |
| Render slices  | $sl$  | Počet řezů snímku v každé ose. Výsledný počet dlaždic je $sl^2$ . Pokud $sl = 1$ , tak je dlaždicované vykreslování vypnuto.  |

<sup>1</sup> Adresář, ze kterého byl program **RealisticAtmosphere.exe** spuštěn.

|                         |  |
|-------------------------|--|
| Predefined views        | Tlačítka pro přepnutí mezi předvolenými pohledy a úhly slunce. Po kliknutí je automaticky zahájeno vykreslování. |
| Do not change sun angle | Nenačítat z předvolby úhel slunce – ponechat aktuální.   |

## Kamera

Pohyb kamery je dostupný jen v módu reálného času. Ve výchozím stavu je pohled zamknutý. Odemknutí je možné klávesou **k** (nefunguje se zapnutým Caps Lock), opětovné zamknutí klávesou **1**.

| Proměnná      | Význam  |
|---------------|---|
| Type          | Druh projekce kamery.   |
| - Perspective | Perspektivní/standardní projekce.   |
| - Panorama    | 360° panoramatická projekce (příklad na obr. A.2). Vhodná k vykreslování snímků použitelných jako pozadí prostředí v programech pro 3D design. Ignoruje nastavené úhly rotace kamery. |
| - Fisheye     | Rybí oko (příklad na obrázku A.3).  |
| FOV           | Vertikální úhel zorného pole (angl. field of view).   |
| Speed         | Rychlosť pohybu   |
| RunSpeed      | Rychlosť pohybu při stisknutí klávesy <b>Shift</b> .  |
| Sensitivity   | Citlivosť pohybu myši.  |
| Pos           | Pozice kamery v prostoru.   |
| Rot           | Úhly rotace kamery v jednotkách stupňů.   |

## Planeta

Po změně těchto hodnot klikněte na tlačítko **Recompute** v podsekci **Performance** (Výkon) pro znovuvytvoření předpočítaných tabulek.

| Proměnná            | Význam  |
|---------------------|---|
| Center              | Souřadnice středu planety.  |
| Sun Angle           | Vertikální úhel slunce (geocentrický model, slunce se otáčí kolem planety). |
| Second Angle        | Horizontální úhel slunce.   |
| Radius              | Poloměr spodní hranice terénu.  |
| Atmosphere Radius   | Poloměr vrchní hranice atmosféry.   |
| Mountain Radius     | Poloměr vrchní hranice terénu.  |
| <b>Scattering</b>   | Podsekce s nastavením atmosférického rozptylu.                              |
| Rayleigh Scat       | $\kappa_{s_R}$ Rayleighův rozptyl, spektrální koeficienty.                  |
| Mie Scat            | $\kappa_{s_M}$ Mieův rozptyl, koeficient rozptylu.                          |
| M. Asymmetry Factor | $g$ Anizotropie Mieova rozptylu.  |
| M. Scale Height     | $H_{0M}$ Výška měřítka pro M. rozptyl.                                      |
| R. Scale Height     | $H_{0R}$ Výška měřítka pro R. rozptyl.                                      |

|                |  |
|----------------|--|
| <b>Ozone</b>   | Podsekce s nastavením ozonové vrstvy.                        |
| Extinct.       | $\kappa_{aO}$ Absorpční koeficient ozonové vrstvy.           |
| O. Peak Height | $H_{0O}$ Výška, ve které je koncentrace ozonu nejvyšší.      |
| O. Trop Coef   | Násobitel množství ozonu pod $H_{0O}$ .                      |
| O. Trop Const  | Minimální množství ozonu pod $H_{0O}$ .                      |
| O. Strat Coef  | Násobitel množství ozonu nad $H_{0O}$ .                      |
| O. Strat Const | Minimální množství ozonu nad $H_{0O}$ .                      |
| SunRadToLum    | Převodní konstanty pro zář slunce na jas (3 barevné kanály). |
| SkyRadToLum    | Převodní konstanty pro zář oblohy na jas (3 barevné kanály). |

## Ovládání klávesnicí

Ovládání je citlivé na velikost písmen. Je tedy třeba mít vypnutý Caps-Lock.

| Klávesy    | Význam   |
|------------|--|
| K, L       | Odemknout, zamknout kameru (jen v módu reálného času). |
| W, A, S, D | Pohyb kamery (jen v módu reálného času).               |
| Shift      | Rychlejší pohyb.                                       |
| F, G       | Zobrazit, skrýt GUI.                                   |
| Ctrl+1-9   | Aplikovat přednastavený pohled kamery a úhel slunce.   |

## Osvětlení

| Proměnná                  | Význam   |
|---------------------------|--|
| White balance             | Zapnout/vypnout vyvážení bílé (převzato z referenční implementace [6]).  |
| Tonemapping               | Výběr funkce pro mapování tónů (viz stranu 7).   |
| Exposure                  | Expozice – násobitel jasu obrazu (pouze pro některé funkce).   |
| White point               | Bílý bod – nastavení maximálního jasu obrazu (pouze pro některé funkce).   |
| Shadow near plane         | Minimální vzdálenost od povrchu, od které jsou vyhodnocovány stíny. Vyšší hodnoty předcházejí zastínění předmětu/terénu sebou samým. |
| Secondary ray offset      | Odsazení sekundárního paprsku. Vyšší hodnoty předcházejí blokaci sekundárních paprsků vyslaných z objektu jím samým.                 |
| Lens flare                | Zapnutí/vypnutí odlesku čočky. Není dostupný pro typy kamery <i>panoramic</i> a <i>rybí oko</i> .                                    |
| Visibility                | Síla odlesku čočky.  |
| Occlusion samples         | Počet kroků testování zastínění odlesku čočky.   |
| Photometric Units         | Povolí převod radiometrických veličin na fotometrické pomocí funkcí CIE pro odpovídající barvy a funkci citlivosti lidského oka.     |
| <b>Shafts Raymarching</b> | Sekce s nastavením krokování paprsků pro zastínění mlhy.   |
| Precision                 | Tolerance při detekci terénu.  |
| Far Plane                 | Maximální detekční vzdálenost terénu.  |
| Shadow steps              | Maximální počet kroků kurzu.   |
| Hit Optimism              | Míra optimismu (rozsah $\langle 0, 1 \rangle$ ) při krokování terénu (viz 2.6).  |

|                              |   |
|------------------------------|---|
| <b>Empiric optimizations</b> | Povolit empirické optimalizace představené v kapitole 4.3.  |
| ShadowedThres                | Toleranční vzdálenost pro optimalizaci 6.   |
| NoRayThres                   | Tolerance $x$ pro výraz $\mu > x$ v optimalizaci 1 a $\nu < x$ v optimalizaci 3.  |
| ViewThres                    | Tolerance $x$ pro výraz $\mu_s < x$ v optimalizaci 4.   |
| Gradient                     | Efekt optimalizace 3 je vážen podle rozdílu mezi hodnotami $\nu$ a $x$ – mezi oblastí s a bez optimalizace je vytvořen lineární přechod. Tato proměnná udává rychlosť přechodu. |
| CutoffDist                   | Hodnota $d$ pro optimalizaci 2.   |

## Terén

| Proměnná         | Význam   |
|------------------|--|
| Optimism         | Míra optimismu (rozsah $\langle 0, 1 \rangle$ ) při krování paprsku terénem (viz 2.6). |
| Far Plane        | Vykreslovací vzdálenost.   |
| Planet Steps     | Maximální počet kroků kurzoru.   |
| Precision        | $\epsilon$ – tolerance vzdálenosti od kurzoru, aby byl terén považován za dosažený.    |
| LOD A            | Koeficienty $a, b$ empirické rovnice pro vybírání úrovně mip mapy (viz rovnici 5.2).   |
| LOD B            |  |
| <b>Materials</b> | Nastavení přechodů mezi materiály terénu.  |

## Mraky

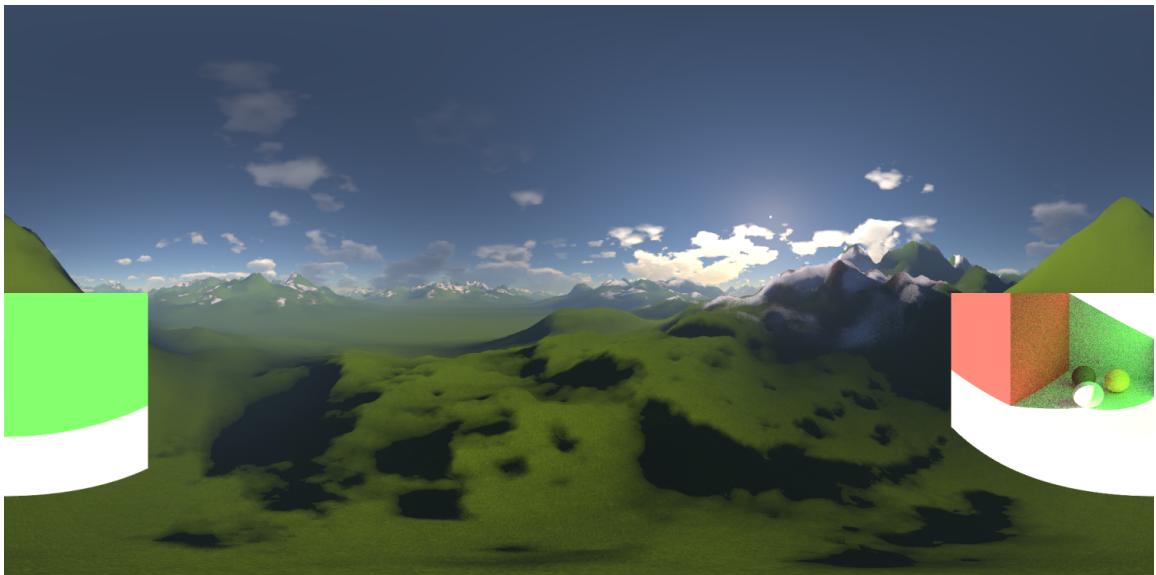
| Proměnná                                 | Význam   |
|--|--|
| Size                                     | $q_{clouds}$ – koeficient velikosti jednotlivých mraků.  |
| Pos                                      | Globální pozice celé vrstvy mraků.   |
| Wind                                     | Povolit vítr – pohyb mraků v módu reálného času.   |
| Speed                                    | Rychlosť větru ve směru os $x, y$ a $z$ .  |
| Steps                                    | Počet standardních kroků kurzoru.  |
| TerrainSteps                             | Počet standardních kroků kurzoru, pokud se za mraky nachází terén – terén je blíže, než okraj atmosféry – proto je v tomto případě možné počet kroků omezit. |
| Render Distance                          | Vykreslovací vzdálenost.   |
| <b>Cl. Lighting</b>                      | Nastavení osvětlení mraků.   |
| LimitLight                               | Maximální hodnota záře/jasu (podle stavu zaškrtnutí Photometric Units) mraků.  |
| SmoothLimit                              | Jemnost omezovací funkce záře/jasu. Musí být menší, než LimitLight.  |
| LightSteps                               | Počet vzorků optické hloubky slunce.   |
| LightFarPlane                            | Vzdálenost, do které je optická hloubka slunce maximálně vypočítávána.   |
| Primary factor,<br>Light factor,<br>Cone | Nastavení neutralizace bandážování, viz následující sekci Výkon.   |
| Coverage                                 | $q_{coverage}$ – koeficient rozměru fraktálu pro pokrytí planety oblačností.   |

|                        |  |
|------------------------|--|
| <b>Downsampling</b>    | Nastavení proměnné délky kroku.  |
| Amount                 | Délka dlouhého kroku (násobek délky standardního kroku).   |
| Threshold              | Hranice přepnutí z dlouhého na standardní krok.  |
| Sample thres           | Hranice vzorkování mraků.  |
| Layer start            | Spodní hranice výšky vrstvy oblačnosti.  |
| Layer end              | Vrchní hranice vrstvy oblačnosti.  |
| Density                | Relativní hustota mraků. Vyšší hodnoty vytváří dojem dešťových mraků.  |
| Sharpness              | Zakulacení fraktálu tvaru jednotlivých mraků.  |
| Lower gradient         | Šířka spodního hladkého přechodu vrstvy oblačnosti. Zjemňuje mraky blíže zemskému povrchu. Nastavte na 0 pro ostré mraky těsně nad zemí.   |
| Upper gradient         | Šířka vrchního přechodu vrstvy oblačnosti. Zjemňuje mraky těsně při horní hranici atmosféry.   |
| Gradient power         | Jemnost dvou předchozích zmíněných přechodů.   |
| Scattering             | $\kappa_s$ – Rozptylový koeficient.  |
| Extinction             | $\kappa_e$ – Koeficient útlumu světla.   |
| Aerosols               | Poměr počtu kapek v mraku ke kapkám odpovídajícím zvolené DSD.   |
| <b>Scattering</b>      | Nastavení rozptylu světla v mracích.   |
| DSD                    | Droplet Size Distribution – výběr mezi uniformním a dispersním rozložením velikostí vodních kapek. Uniformní vytváří Brockenské strašidlo a korónu. Dispersní vytváří bílou duhu a gloriolu. |
| Multiple scat. approx. | Povolí aproximaci vícenásobného rozptylu.  |
| Ambient                | Minimální jas/zář mraků.   |
| Powder density         | Relativní hustota mraků použitá pro powder efekt.  |
| Powder ambient         | Minimální návratová hodnota powder efektu.   |

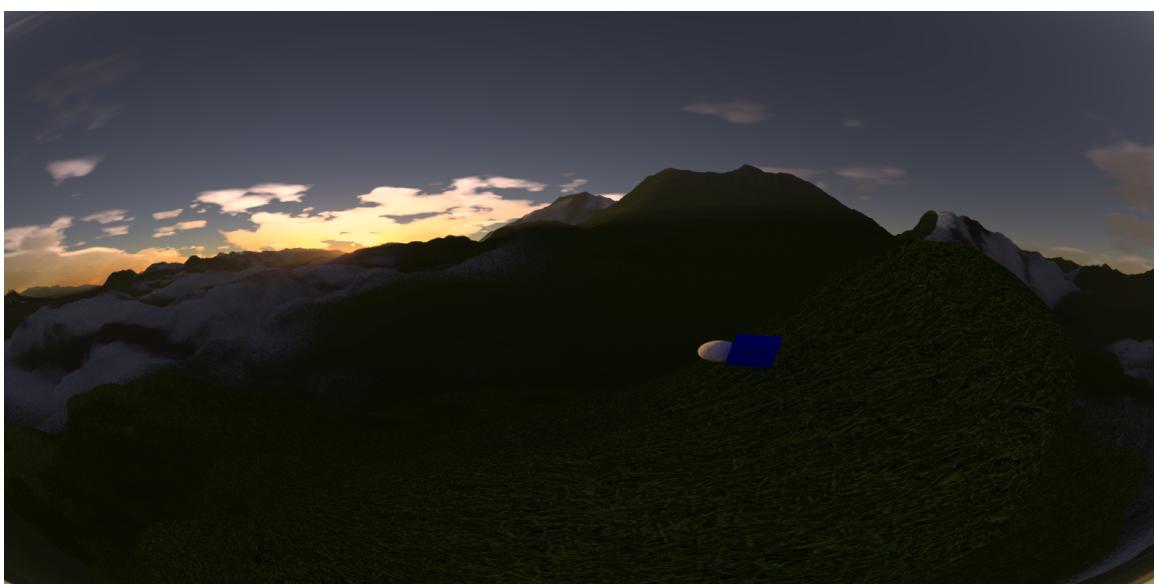
## Výkon

| Proměnná              | Význam  |
|-----------------------|---|
| Precompute atmo.      | Místo krovkování atmosféry použije předpočítaný rozptyl podle [6].  |
| Light shafts          | Povolí mlžné paprsky.   |
| Samples               | Počet vzorků výpočtu atmosférického rozptylu a mlžných paprsků.   |
| Approximate skylight  | Místo zachycení nepřímého osvětlení z atmosféry sekundárními paprsky použije předpočítanou tabulkou podle [6].  |
| <b>Reduce banding</b> | Neutralizace bandážování.   |
| Primary factor        | Maximální náhodný posun kurzoru v krovkování paprsku mraky.   |
| Light factor          | Maximální náhodný posun kurzoru vnořeného krovkování paprsku pro zjištění optické hloubky slunce v mracích.   |
| Cone                  | Šířka virtuálního kuželes, který ohraňuje oblast rozptylu náhodného posunu kurzoru. Při každém posunutí kurzoru je Light factor vynásoben Cone. Zjemní osvětlení mraků. |

|                        |   |
|------------------------|---|
| <b>Terrain shadows</b> | Nastavení stínů terénu.   |
| Cascade distance       | Vzdálenost druhé (méně přesné) kaskády. Stíny terénu jsou počítány ve dvou „kaskádách“ – úrovních přesnosti (blízko kamery přesněji, než dále od ní). |
| Sharpness              | Ostrost stínů. Příklady vlivu lze vidět v článku [46].  |
| de-Banding coef        | Maximální náhodné posunutí kurzoru při neutralizaci bandážování stínů terénu.   |



Obrázek A.2: Panoramatická 360° kamera



Obrázek A.3: Kamera s efektem rybího oka

## Příloha B

# Obsah přiloženého média

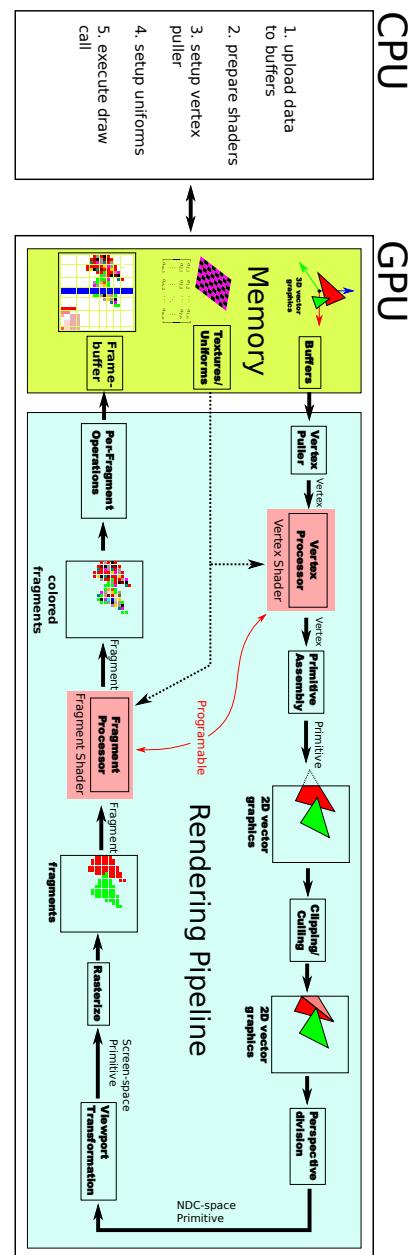
Adresářová struktura:

- **bin/** – adresář s programem **RealisticAtmosphere.exe** zkompilovaným pro 64bitový Windows 10.
- **samples/** – obsahuje ukázkové výstupy programu.
- **src/** – složka se zdrojovými kódy – projekt pro Visual Studio 2022.
- **thesis/** – složka s textem této práce v souboru **thesis.pdf** a složkou
  - **src/** – zdrojové soubory pro vysázení této práce.
- **README.txt** – Manuál k aplikaci (stejný jako předchozí příloha).

Po obhájení této práce bude zdrojový kód dostupný také v repozitáři  
<https://github.com/OSDVF/RealisticAtmosphere>.

## Příloha C

### Vykreslovací řetězec



Obrázek C.1: Původní obrázek s anglickou terminologií, převzato z [33]