

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd
Katedra informatiky a výpočetní techniky

Bakalářská práce

Studium atmosférických jevů a jejich aproximace v počítačové grafice

Plzeň, 2007

Martin Holubář

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů.

V Plzni dne 26. srpna 2007

Martin Holubář

Study of atmospherical phenomena and their approximation in computer graphic.

This bachelor thesis tries to understand the basic atmospherical phenomena, such a sky color, sky light and so on. The objective is to explain in the simplest possible way, how things in sky work together and result in a lot of faces of sky. Another objective is to approximate this in computer graphic, for the Pixar RenderMan environment.

Key words: modeling the sky, sky color, skylight

Obsah:

- 1. Úvod**
 - 2. Teoretický podklad**
 - 2.1. Atmosféra**
 - 2.1.1. Složení atmosféry**
 - 2.1.2. Atmosférická voda**
 - 2.1.3. Znečisťující příměsy**
 - 2.2. Vertikální členění atmosféry**
 - 2.2.1. Průběh teploty s výškou**
 - 2.2.2. Elektrické vlastnosti vzduchu**
 - 2.2.3. Intezita promíchávání vzduchu.**
 - 2.3. Světlo**
 - 2.3.1. Barva**
 - 2.3.2. Základní pohyb světla**
 - 2.4. Optika v atmosféře**
 - 2.4.1. Slunce jako zdroj světla**
 - 2.4.2. Rayleighův rozptyl**
 - 2.4.3. Miův rozptyl**
 - 2.5. Optické jevy**
 - 2.5.1. Zdánlivé zploštění oblohy**
 - 2.5.2. Astronomická a terestrická refrakce**
 - 2.5.3. Jevy způsobené rozptylem světla na vodních kapkách**
 - 2.5.4. Halové jevy**
 - 2.5.5. Ohybové jevy**
 - 2.6. Závěrem teoretického podkladu**
 - 3. Příprava modelu atmosféry**
 - 3.1. Atmosféra**
 - 3.2. Chod slunečních paprsků**
 - 3.3. Denní doba**
 - 4. Přejchod k modelu atmosféry**
 - 4.1. Nebeská hemisféra**
 - 4.2. Světelné paprsky**
 - 4.3. Základní barvy oblohy**
 - 4.4. Míchání základních barev oblohy**
 - 4.5. Vliv polohy slunce na míchání barev**
 - 4.6. Světlo**
 - 4.7. Shrnutí modelu**
 - 5. Implementace stanoveného modelu**
 - 5.1. Implementační prostředí**
 - 5.2. Vytvoření scény**
 - 5.3. Shader Obloha_0.sl**
 - 5.4. Shader obloha_01.sl**
 - 5.5. Osvětlení**
 - 5.5.1. Zvolený model osvětlení**
 - 5.5.2. Alternativní postup**
 - 5.5.3. Použití light shaderů, slunecni_svit.sl**
 - 5.6. Posouzení vhodnosti výbraného modelu**
 - 5.7. Závěrem implementační části**
 - 6. Závěr**
- Přílohy A,B**

1. Úvod

Následující práce se zabývá atmosférickými jevy z hlediska jejich napodobení v počítačové grafice, především pro fotorealistický rendering exteriérů. Výstupem této práce je shader pro prostředí Pixar RenderMan. Následující kapitoly dokumentují postup autora od nastudování základních fyzikálních jevů, přes abstrakci daného problému pro potřeby počítačové grafiky až ke konečné implementaci v podobě shaderu. Cílem této práce je přinést jednoduchý pohled na simulaci, či aproximaci atmosférických jevů v počítačové grafice v tom smyslu, že pomocí relativně jednoduchého způsobu dosáhne výsledků, které budou fotorealisticky věrné. Oním „relativně jednoduchým způsobem“ je míněno, že cesta k výsledku nebude vést přes složitý fyzikální model, který jistě vyžaduje netriviální znalosti matematiky, fyziky a i postupů používaných v počítačové grafice. Mnohem spíše je práce koncipována tak, aby i laik po jejím přečtení pronikl do dané problematiky a takřkajíc „měl jasno.“ Proto se práce zabývá teorií jen do určité míry, tak aby byly získány potřebné teoretické podklady, které poskytnou potřebný odrazový můstek pro další, tentokrát již víceméně empirický postup. Výsledkem práce je soubor RIB a tři soubory SL, které jsou schopny za pomoci dvou zadaných údajů vykreslit fotorealisticky věrnou oblohu a napodobit reálné osvětlení. Práce může posloužit jako základ ke studiu dalších atmosférických jevů.

2. Teoretický podklad

Na následujících řádcích jsou podle autorova názoru nejen důležité, ale i zajímavé fyzikální jevy, procesy a fakta týkající se Zemské atmosféry. Některé informace mohou někomu připadat až příliš detailní, nebo nadbytečné. Ve skutečnosti tomu tak opravdu je, proto poznamenejme, že určitě k dosažení požadovaného výsledku nebudeme všechny potřebovat. Autor je však v této formě uvádí záměrně. Jednak je důležité pochopit, že atmosféra není jenom „modrá barva nad hlavou,“ ale je to určité reálné prostředí, ve kterém probíhají více i méně složité fyzikální procesy, vyskytují se zde nejrůznější jevy a to vše se navzájem neustále ovlivňuje. Dalším důvodem je ukázat čtenáři, jak se takovéto na první pohled složité prostředí dá nakonec velmi jednoduchým způsobem implementovat v podobě shaderu pro Pixar RenderMan.

2.1. Atmosféra

Atmosféra je plynný obal Země, někdy nazývaný také jako ovzduší. Jeho primární funkcí je především ochrana pozemského života, neboť jeho součástí je ozonová vrstva. Vrstva kyslíku O_3 , která zamezuje většině škodlivému záření z vesmíru proniknout až na zemský povrch. Atmosféra je ale také prostředí, kde se odehrává velké množství nejrůznějších procesů a úkazů od prostého foukání větrů až po jeden z nejzajímavějších úkazů – polární záři. Pro tuto práci je atmosféra stěžejním prostředím, proto jí dále budeme věnovat pozornost především z hlediska jejího složení a uspořádání.

2.1.1. Složení atmosféry

Zemskou atmosféru můžeme dělit na tři složky:

Suchá a čistá atmosféra

Je tvořená směsí plynů, především dusíkem a kyslíkem (asi 78% a 21%). Ve velmi malé míře je v atmosféře zastoupen argon (asi 0,934%) a oxid uhličitý (asi 0,0314%). Dále se zde nachází řada vzácných plynů, jako je krypton a neon (řádově 10^{-4} %). Atmosféra obsahuje i některé prvky pouze stopově, například jod. Pro zajímavost můžeme napsat procentuální zastoupení samotného ozonu, tedy kyslíku O_3 . V létě je to přibližně 0,000007% a v zimě asi 0,000002%.

Atmosférická voda

Voda je rovněž důležitou součástí atmosféry. Za běžných podmínek se může vyskytovat ve třech skupenstvích – vodní pára, drobné vodní kapičky a ledové částičky. Nutno podotknout, že množství atmosférické vody je značně časově a prostorově proměnlivé.

Znečišťující příměsy

Významnou složkou atmosféry jsou různé příměsy, především aerosolového charakteru (mluvíme o tzv. atmosférickém aerosolu). Aerosol obecně definujeme jako soustavu pevných, nebo kapalných částic rozptýlených v plynném prostředí. Atmosférický aerosol tvoří půdní a prachové částice, jemné krystalky mořských solí, vulkanický popel, kosmický prach, produkty hoření meteoritů, malá semínka rostlin, spóry, výtrusy, bakterie a mnoho dalších částic ať už přírodního charakteru, nebo jako důsledek lidské činnosti. Atmosférický aerosol je z hlediska atmosférické optiky velmi důležitý, neboť právě jeho částičky jsou překážkami světelných paprsků. Světelný paprsek procházející atmosférou je jimi velmi ovlivňován. Je jimi odražen, pohlcován a rozkládán, což je základem celé řady atmosférických optických jevů. Pro příklad lze uvést ty částičky, které mohou působit jako kondenzační jádra. Jejich působením dochází k přeměně atmosférické páry na malé vodní kapičky, čímž dochází ke snižování průchodnosti světelného záření.

2.2. Vertikální členění atmosféry

Do několika vrstev můžeme členit atmosféru hned podle několika faktorů. Každá vrstva atmosféry a je jedno, podle čeho ji dělíme, má odlišné fyzikální vlastnosti, což znamená, že každá vrstva, resp. přechody mezi nimi ovlivňují světelné paprsky odlišným způsobem. Je zřejmé, že spodní vrstvy atmosféry mají odlišné složení od vrstev vysoko nad zemským povrchem, stejně tak jako je zřejmé, že žádná z vrstev není homogenní, nebo izotropní. Atmosféru dělíme podle těchto faktorů: průběh teploty s nadmořskou výškou, elektrické vlastnosti vzduchu a intenzita promíchávání vzduchu.

2.2.1. Průběh teploty s výškou

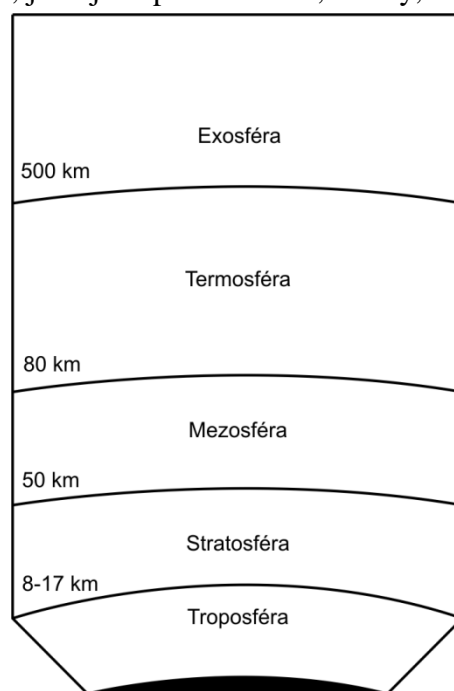
Tento faktor rozděluje celou atmosféru na šest základních vrstev (viz. obr 2.1).

Troposféra

Vrstva nejbliže k zemskému povrchu. Její horní mez není všude stejná. Na pólech dosahuje do výše přibližně 8 – 9 km a nad rovníkem asi 17 – 18 km. Toto zploštění vzniká vlivem odstředivé síly v důsledku rotace Země kolem své vlastní osy. V této vrstvě jsou soustředěny $\frac{3}{4}$ hmotnosti celé atmosféry a téměř všechna atmosférická voda. To je také důvodem toho, že v troposféře vzniká valná většina jevů, jako je například mlha, mraky, nebo déšť. Pro troposféru je charakteristický pokles teploty s výškou. V našich zeměpisných šířkách dosahuje teplot kolem $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$, nad rovníkem klesá teplota až na nějakých $-88\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Stratosféra

Začíná od horní hranice troposféry a dosahuje do výše zhruba 50 km nad zemským povrchem. V její spodní polovině se teplota vzduchu s výškou téměř nemění. Ve vyšších hladinách dokonce roste tak, že u horní hranice stratosféry může teplota vzduchu dosahovat dokonce kladných hodnot. Je to způsobeno tím, že v horní polovině stratosféry se nachází tzv. ozonoféra, tedy vrstva s relativně vysokým obsahem ozonu. Zvýšená teplota je důsledkem pohlcování ultrafialového záření ozonem. Množství atmosférické vody ve stratosféře je velmi malé, proto se zde netvoří téměř žádné mraky. Vyjímkou jsou pouze vzácná perleťová oblaka. Není tu ani déšť, ani sněh.



obr. 2.1: vrstvy atmosféry

Mezosféra

Nachází se zhruba od 50 do 80 km nad zemským povrchem. Téměř u její horní hranice se někdy tvoří tzv. noční, nebo-li stříbřité oblaky. Teplota vzduchu u horní hranice mezofsféry je přibližně -80 až $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Termosféra

Vrstva sahající až do výšky 500 km nad zemský povrch. Teplota nejprve s výškou výrazně roste, potom zůstává přibližně konstantní a dosahuje řádově stovek $^{\circ}\text{C}$. Právě v této vrstvě se může vyskytovat tzv. polární záře.

Exosféra

Poslední vrstva atmosféry. Její horní hranice neexistuje, protože exosféra volně přechází v meziplanetární prostor. Někdy se však její horní hranice uvažuje ve výškách několika tisíců kilometrů (až 30 000 km) nad zemským povrchem, kde je ještě pohyb částic velmi řídkých plynů ovlivňován rotací Země.

2.2.2. Elektrické vlastnosti vzduchu

Z tohoto hlediska můžeme atmosféru dělit na dvě vrstvy. Neutrosféru a ionosféru. Neutrosféra dosahuje zhruba do výšky 60 km. Elektrická vodivost vzduchu působená ionizací molekul jednotlivých plynných složek ovzduší je v neutrosféře velmi malá, ale působením kosmického záření s výškou roste, až právě ve výškách kolem 60 km se začínají projevovat charakteristické jevy související s odrazem krátkých rádiových vln. Od této výšky směrem nahoru se tedy rozkládá ionosféra.

2.2.3. Intenzita promíchávání vzduchu

Do výšek 90 až 100 km nad úroveň zemského povrchu je intenzita turbulentního promíchávání vzduchu dostatečná k tomu, aby se procentuální zastoupení plynných složek s výškou prakticky neměnilo. Proto se tato část atmosféry nazývá homosféra. Ve větších výškách turbulentní promíchávání slábne a dochází k tomu, že s rostoucí výškou ubývají relativně těžší plyny. Nejsvrchnější části zemské atmosféry jsou proto tvořeny převážně vodíkem. Nad hranicí homosféry se nachází tzv. heterosféra.

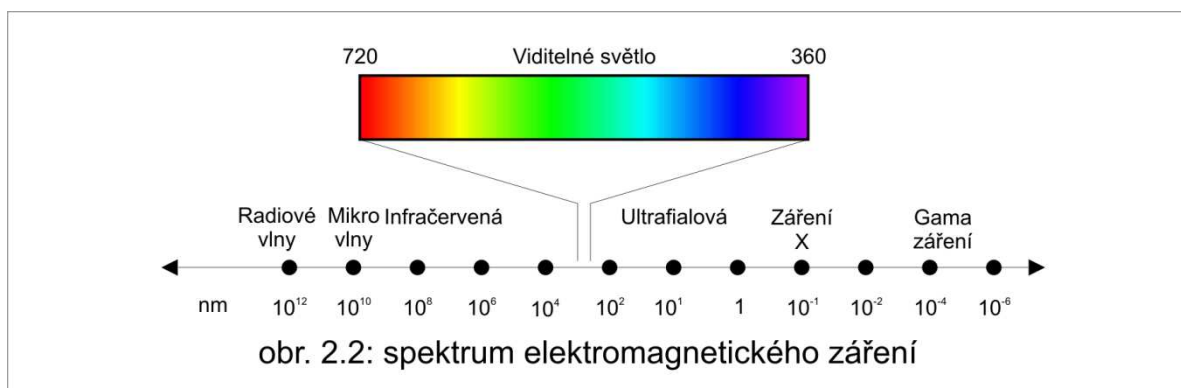
2.3. Světlo

Za „světlo,“ nebo také někdy „viditelné světlo,“ považujeme viditelnou část elektromagnetického spektra. Čili světlo je takové elektromagnetické záření, které dokáže lidské oko zaznamenat. Mezi elektromagnetická záření, která lidské oči nevnímají, patří například gama záření, nebo infračervené záření. Různá elektromagnetická záření mají různé vlastnosti a o okolních objektech a jevech nám mohou poskytovat různé informace. Charakteristika (a není jediná), která určuje vlastnosti záření, se nazývá vlnová délka. Například výše zmíněné gama záření má vlnovou délku řádově 10^{-4} nm. Díky takto krátké vlnové délce má gama záření vysokou schopnost prostupovat nejrůznějšími materiály, kterou nemá například infračervené záření, jehož vlnová délka je ještě větší, než vlnová délka světla.

2.3.1. Barva

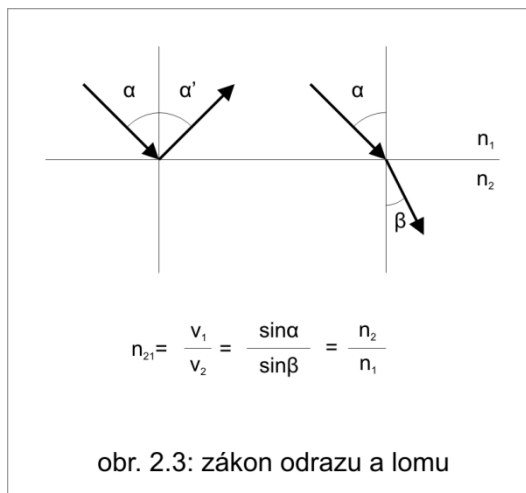
Vlnová délka viditelného světla se pohybuje v rozmezí přibližně 380 až 720 nm. V tomto intervalu potom vnímáme záření s určitou vlnovou délkou jako barvu. Například záření s vlnovou délkou 720 nm je červené. Princip toho, že se nám některý objekt jeví jako barevný je velmi jednoduchý. Světelné zdroje, jako je například Slunce, vysílá do okolí světlo všech frekvencí v daném pásmu, které se skládají ve výsledné bílé světlo. Takové světlo nazýváme jako achromatické. Při dopadu takového světla například na nějaký objekt, je část těchto

frekvencí pohlcena a část odražena. Kombinaci frekvencí v odraženém světle potom vnímáme jako určitou barvu. Světelné spektrum zachycuje obrázek 2.2., barevně v příloze B.4



2.3.2. Základní pohyb světla

Světlo se šíří po přímých drahách rychlostí přibližně $300\,000\text{ km s}^{-1}$. Dále také můžeme říci, že z nějakého bodu A do jiného bodu B se světlo šíří po časově nejkratší trase, což nemusí znamenat tu nejkratší, co se vzdálenosti týče. Souvisí to především s tím, že v některých prostředích, resp. materiálech se světlo pohybuje pomaleji. Existují dvě základní pravidla pohybu světla. Zákon odrazu a zákon lomu. Zákon odrazu nám říká, že úhel odrazu světelného paprsku (například od nějakého objektu), se rovná rovná úhlu dopadu světelného paprsku na tento objekt. Zákon lomu zase pojednává o přechodu světelného paprsku mezi dvěma prostředími, která mají odlišnou optickou hustotu. Na obrázku 2.3 jsou zakresleny oba zákony. Zákon odrazu je patrný ihned, neboť úhel $\alpha = \alpha'$. Vzorec pod obrázkem se vztahuje k zákonu lomu. Veličina n_{21} se nazývá relativní index lomu prostředí 2 vzhledem k prostředí 1. Definujeme ji jako podíl rychlostí šíření paprsků v_1 ku v_2 . Veličiny n_1 a n_2 jsou absolutní indexy lomu prostředí 1 resp. prostředí 2. Na obrázku je znázorněn případ, kdy je prostředí 1 opticky řidší než prostředí 2. Pokud světelný paprsek přechází z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího (typicky například přechod vzduch – vodní hladina), dochází k tzv. lomu ke kolmici a tedy musí platit, že $\alpha > \beta$. Pokud je tomu naopak, mluvíme o tzv. lomu od kolmice.



2.4. Optika v atmosféře

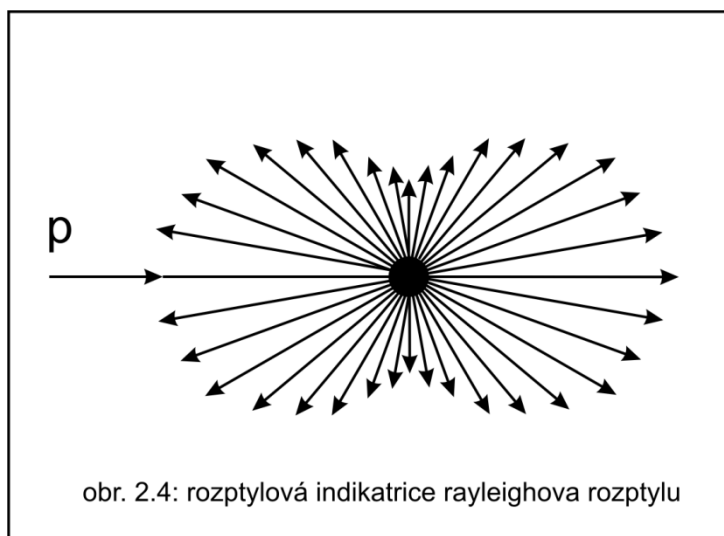
2.4.1. Slunce jako zdroj světla

Základním zdrojem pro všechny procesy na zemském povrchu a atmosféře je právě sluneční záření, které můžeme rozdělit na dvě části. Sluneční paprsky, které přicházejí ze Slunce přímo do oka pozorovatele nazýváme jako sluneční záření přímé. Vzhledem k velké vzdálenosti Země od Slunce považujeme takovýto svazek slunečních paprsků za rovnoběžný. Kdyby existovalo pouze přímé sluneční záření, byla by obloha i během dne černá jako v noci. To, co vnímáme jako světlo oblohy je totiž ona druhá složka slunečního záření, tzv. sluneční

záření rozptýlené (difúzní). To vzniká jako důsledek rozptylu přímých slunečních paprsků na molekulách plynných složek vzduchu, na vodních kapičkách, ledových krystalcích, nejružnějších aerosolových částicích vyskytujících se v ovzduší (jako jsou výše zmíněné znečišťující příměsy v atmosféře).

2.4.2. Rayleighův rozptyl

Tato teorie se zabývá rozptylem světla především na molekulách vzduchu (proto je někdy označován jako tzv. molekulární rozptyl), ale také na velmi malých částicích (které jsou menší než $1/10$ vlnové délky světla). Účinnost tohoto molekulárního rozptylu je nepřímo úměrná čtvrté mocnině vlnové délky rozptylovaného záření. Proto jsou v rozptýleném záření nejvíce zastoupeny krátké vlnové délky, které lidské oko vnímá ve viditelném spektru jako fialovou a modrou barvu. Tímto se vysvětluje i modrá barva oblohy. Logicky vzato by měla



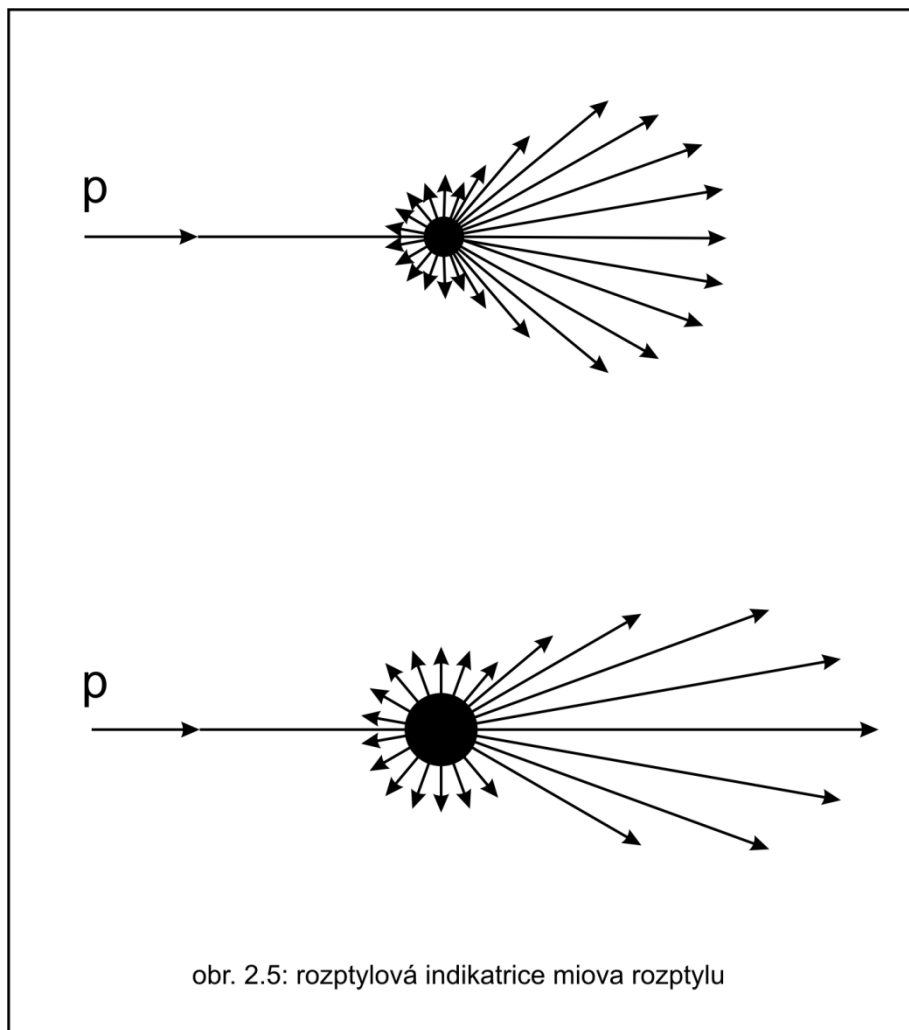
být obloha fialová, protože fialové světlo má v oblasti viditelného světla nejkratší vlnovou délku. Ve skutečnosti je fialová složka ve světle zastoupena méně než modrá a navíc lidské oko vnímá citlivěji barvu modrou. Proto se nám obloha zdá právě modrá.

Rovněž důležitým poznatkem je rozdělení účinností rozptylu do různých směrů vzhledem ke směru dopadajících slunečních paprsků. To znázorňuje na obrázku prostorový diagram (tzv. indikatrice). Jak je z obrázku 2.4 patrné, molekulární rozptyl má celkem symetrický charakter.

2.4.3. Miův rozptyl

Miova teorie se zabývá rozptylem slunečního záření na částicích (jako jsou molekuly vody, prachové částice atd.), které jsou ve srovnání s molekulami vzduchu o několik řádů větší. Rozptyl světla na těchto částicích má vzhledem k vlnové délce neutrální charakter. To znamená, že všechny složky světla jsou rozptylovány stejnou měrou a rozptýlené světlo má tedy opět bílou barvu. Pokud je tedy obloha resp. atmosféra znečištěna vodními kapičkami, prachovými částicemi, nebo třeba například pylem, nabývá obloha bělavého vzhledu. Naopak modrofialová barva značí velkou průhlednost a čistotu atmosféry. I bílá barva mraků (což je v podstatě shluk vodních kapiček), je důsledkem Miova rozptylu.

Rozdělení účinností rozptylu již není tak symetrické jako v předchozím případě. Velká většina záření je rozptylována do směrů blízkých směru původních slunečních paprsků. Čím větší je částice, tím je tato asymetrie patrnější, jak lze vidět z obrázku 2.5.



2.5. Optické jevy

2.5.1. Zdánlivé zploštění oblohy

Jeden ze základních optických jevů, který se týká naší atmosféry resp. oblohy. Důvodů, proč se nám obloha ve svislém směru jeví jako zploštělá do tvaru kulového vrchlíku je mnoho. Například poblíž obzoru máme možnost úhlovou velikost nebeských objektů porovnávat s objekty pozemskými, kdežto přímo nad sebou tuto možnost nemáme. Dalším důvodem může být i propustnost vzduchu, která je u obzoru nejmenší. Díky tomu vidíme vzdálené objekty u obzoru méně ostře a tudíž se nám zdají jako vzdálenější.

Se zdánlivým zploštěním oblohy souvisí další optické jevy. Například úhlové rozměry Slunce a Měsíce se nám zdají 4x až 5x větší než ve skutečnosti jsou-li poblíž horizontu a naopak se nám jeví menší, nacházejí-li se tato nebeská tělesa ve výškách větších než 35 stupňů. Velmi dobře je tento jev patrný i při pozorování duhy, která se u obzoru zdánlivě rozšiřuje, ale s rostoucí výškou nad obzorem se zase naopak zužuje.

2.5.2. Astronomická a terestrická refrakce

Hlavním důvodem těchto dvou jevů a celé řady dalších jevů jimi podmíněných je výše popsaná nehomogenita atmosféry. Stručně řečeno, paprsek přicházejícího z mimozemského

světelného zdroje při průchodu atmosférou prostupuje stále hustšími vrstvami vzduchu. Jak je výše uvedeno, dochází na každém rozhraní dvou vrstev k lomu paprsku ke kolmici. Výsledkem je zakřivení trajektorie tohoto paprsku. Nachází-li se pozorovaný objekt vně atmosféry, mluvíme o astronomické refrakci, pro pozorované objekty uvnitř atmosféry používáme termín terestrická refrakce.

Jevy podmíněné astronomickou refrakcí

Prodloužení délky dne

Díky astronomické refrakci jsou zenitové vzdálenosti těles na obloze menší než ve skutečnosti. Důsledkem toho je, že vidíme například slunce ještě určitou dobu po západu. Analogicky je tomu tak i při jeho východu. Tím dochází k prodloužení dne, které se v našich zeměpisných šířkách pohybuje okolo 8 až 10 minut. Za polárním kruhem se však může trvání polárního dne prodloužit až o několik dní.

Změna tvaru slunečního a měsíčního kotouče v blízkosti obzoru

Tento jev se dá vysvětlit tak, že následkem astronomické refrakce je spodní okraj Slunce u obzoru vertikálně zvýšen více, než jeho horní okraj. Proto se nám zdá, že je Slunce zploštělé.

Zelený paprsek

Přímý sluneční paprsek procházející atmosférou šikmo k zemskému povrchu se vlivem astronomické refrakce rozkládá tak jako na hranolu. Protože velikost indexu lomu roste s klesající vlnovou délkou, bude refrakce větší pro paprsky s kratšími vlnovými délkami. Nejvíce se projeví u modrofialových paprsků viditelné oblasti spektra, nejméně u červených. V praxi to znamená, že modré paprsky slunečního světla přicházejí k pozorovateli strměji, než červené. Nejvýše je tedy modrý obraz slunečního kotouče, následovaný obrazy spektrálních barev až po červený obraz, který je nejnižší. Při západu Slunce, kdy se žluté a červené kotouče dostali pod obzor, přicházejí k pozorovateli pouze horní okraje modrých a zelených kotoučů. Modré světlo je při průchodu atmosférou zeslabováno silněji než zelené. A to je důvod, proč se nám při západu Slunce, kdy je nad obzorem již pouze malá část slunečního kotouče, jeví slunce jako zelené. Tento jev zpravidla trvá pouhých několik zlomků sekundy, maximálně několik vteřin.

Jevy podmíněné terestrickou refrakcí

Svrchní a spodní zrcadlení

Svrchní zrcadlení je typické pro oblasti s velkými teplotními inverzemi. Například v polárních oblastech, kde ledový povrch silně ochlazuje spodní vrstvu atmosféry. Postupuje-li v takovém případě paprsek šikmo vzhůru od zemského povrchu, dochází v důsledku klesající hustoty vzduchu ke snižování indexu lomu a tím i k lomu od kolmice. V případech, kde hustota klesá s rostoucí výškou příliš rychle, může dojít až k totálnímu odrazu. Tím je paprsek odražen zpět k zemskému povrchu, kde při cestě naopak v důsledku rostoucí hustoty s klesající výškou dochází k lomu ke kolmici, až nakonec paprsek přichází do oka pozorovatele,

který ve směru tečny příchozího paprsku může vidět převrácený obraz situace v původním místě.

Spodní zrcadlení se naopak vyskytuje v oblastech, kde hustota vzduchu nabývá větších hodnot s rostoucí výškou. Patří sem zejména oblasti pouštní, kde je zemský povrch extrémně ohříván, čímž dojde i k zahřání vrstvy vzduchu ve výšce několika centimetrů až metrů nad povrchem. V takovém případě se opět výchozí paprsek láme nejprve od kolmice až do místa, kde dojde k totálnímu odrazu a odkud se zase láme ke kolmici, až dojde do oka pozorovatele. Ten může vidět ve směru tečny příchozího paprsku vidět převrácený obraz původní situace.

Mihotání vzdálených objektů

Jedná se o běžný optický jev, který můžeme pozorovat například u hvězd. Jelikož se vzduch v atmosféře neustále promíchává, paprsek přicházející od vzdálené hvězdy při průchodu atmosférou prostupuje střídavě oblasti s teplejším a chladnějším vzduchem. Jsou to tedy oblasti, kde se hustota vzduchu v prostoru i čase neustále mění. Paprsek se tedy střídavě láme ke kolmici a od kolmice. Tím se obraz přicházející od vzdálených objektů neustále posouvá a vzniká dojem mihotání.

2.5.3. Jevy způsobené rozptylem světla na vodních kapkách

Duha

Velmi známý a tedy ne neobvyklý jev, který pozorujeme jako barevný oblouk na obloze se středem v místě, kam směřuje stín pozorovatelovy hlavy. Podmínkou vzniku tohoto jevu je přítomnost dostatečného počtu vodních kapek, proto vzniká především při dešti. Kružnice má poloměr přibližně 42 stupňů a proto ji lze pozorovat pouze v případech, kdy se Slunce nachází níže než 42 stupňů nad obzorem.

Princip vzniku duhy je velmi jednoduchý. Sluneční paprsky vstupují do vodních kapek v atmosféře. Voda je opticky hustší prostředí, než vzduch a proto se paprsek na přechodu vzduch voda láme ke kolmici a postupuje dále kapkou vody. Stejně jako u optického hranolu, kde je přechod do opticky hustšího prostředí i v kapce dojde k rozložení světelného paprsku na jednotlivé barvy viditelného spektra. Je to dáno tím, že se paprsek každé barvy láme pod trochu jiným úhlem. Paprsek postupuje dále vodní kapkou a odráží se zpět od její protější vnitřní strany. Poté opět lomem vystupuje z kapky a vzniká duha.

Vystupující paprsky se budou nejvíce koncentrovat kolem úhlu 42 stupňů, pod kterým se paprsek v kapce odráží. Výše popsaný průběh neprobíhá jen v jedné rovině, ale v celé kapce ve všech rovinách. Proto má duha tvar symetrického oblouku. Záření jednotlivých barev se bude koncentrovat pod trochu odlišnými úhly. Následkem toho pozorujeme duhu jako spojitě barevné pruhy.

Tomuto jednochuchému duhovému oblouku se říká primární duha. Pokud je však déšť dostatečně intenzivní, vytvoří se nad primární druhou ještě větší duhový oblouk sekundární duhy. Ten vzniká tak, že se paprsek postupující kapkou odrazí od její vnitřní strany dvakrát, podruhé pod úhlem 51 stupňů. V důsledku dvojitého odrazu jsou barevné pásy sekundární duhy v opačném pořadí vůči primární duze.

Duhový rozklad můžeme pozorovat rovněž u vodopádů, kde se tříští voda a vytváří se jemné kapičky, nebo i fontán.

2.5.4. Halové jevy

Podmínkou pro vznik těchto jevů je přítomnost řídkého mraku tvořeného ledovými krystalky mezi Sluncem nebo Měsícem a okem pozorovatele. Nejčastěji mají takové složení jemné řasové mraky vyskytující se ve výškách kolem šesti kilometrů nad zemským povrchem. Podobné složení mají ale například i přízemní vrstvy ovzduší za chladu.

Ledové krystalky mají rozličné tvary . Pro vznik halových jevů jsou důležité především ty, co mají tvar pravidelného šestibokého hranolu a pravidelné šestiboké destičky. Paprsky procházející atmosférou se na těchto krystalcích lámou a odráží a tím dochází ke vzniku halových jevů, které můžeme potom pozorovat jako prstence (řecky halo), oblouky či skvrny kolem Slunce, nebo Měsíce.

Dalším faktorem, který ovlivňuje vznik těchto jevů, je orientace krystalků ledu. Vznik některých jevů jako je na příklad velmi časté malé halo nevyžaduje žádné pravidelné uspořádání krystalků. Naproti tomu celkem vzácný Parryho oblouk vyžaduje shodnou orientaci podobných krystalků. Poslední, co ovlivňuje vznik halových jevů, je výška Slunce či Měsíce nad obzorem. V případě, že halový jev vznikne odrazem paprsků od krystalků, má výsledný efekt bělavou barvu. V případech, kdy se paprsek v krystalcích láme, vznikají jevy s barevným nádechem, kde červená barva směřuje ke Slunci. Mezi jevy vznikající odrazem paprsků patří například halový sloup či Parhelický kruh. K jevům vznikajícím lomem paprsků patří na příklad malé halo a cirkumzenitální oblouk.

2.5.5. Ohybové jevy

Souhrnný název pro další skupinu jevů, které můžeme na obloze pozorovat. Na rozdíl jevů halových, které vznikají díky oblakům z ledových krystalků, ohybové jevy vděčí za svůj vznik oblakům z kapiček vody.

Koróna

Tento jev vzniká ohybem světla na drobných kapičkách vody v oblacích či mlze a projevuje se jako soustava soustředných prstenců barevného spektra. Jejich poloměr závisí na velikosti kapiček a na vlnové délce světla. Protože má červené světlo největší vlnovou délku, je červený prstenec nejdále od Slunce či Měsíce. Naopak nejbliže se nachází prstenec modré barvy. Ne vždy je koróna duhová, může mít totiž pouze bělavé zbarvení.

Zvláštním druhem jsou koróny vznikající ohybem světla na drobných pevných částicích v atmosféře. Například na jaře se ve vzduch vyskytuje velké množství pylu, který může přispět ke vzniku pylové korony. Takové jevy jsou ale velmi vzácné.

Pojem koróna se užívá i v astronomii, ale má trochu odlišný význam. V tomto vědním oboru se pod pojmem koróna myslí atmosféra Slunce. Nejlépe je tento jev pozorovatelný při úplném zatmění slunce.

Irizace oblaků

Tento úkaz vzniká díky ohybu a interferenci světla na vodních kapkách především tenkých oblaků, kterým se duhově zbarví okraje. V případě velmi tenkých oblaků může pozorovat dokonce tzv. perleťová oblaka, která vypadají jako barevné plochy ve tvaru pásů. Takto tenké mraky nacházíme ve výšce kolem 20 až 30 km nad zemským povrchem, tedy ve stratosféře, kde seběžné mraky vůbec nevytvářejí. Díky podchlazeným kapičkám vody těchto tenkých mraků dochází k jejich výrazné irizaci.

Speciálním případem irizace oblaků jsou i tzv. noční stříbrná oblaka. Je to velmi vzácný jev a k jeho vzniku je potřeba souhra několika faktorů. Jednak je to výška nad zemským povrchem, ve které se tato oblaka tvoří, která je 80 až 85 kilometrů, což se z hlediska členění atmosféry nachází na přechodu mezi mezoférou a troposférou. Další důležitou věcí je teplota prostředí, která jen po dobu několika týdnů klesá na potřebných -130 stupňů Celsia. Pak již zbývají jen drobné částečky ledu, které jsou pro takové výšky ne příliš obvyklé. Dostanou se sem z části díky přenosu par z nižších vrstev a z části se tam přímo tvoří, pravděpodobně díky štěpení metanu.

Gloriola

Tento úkaz se velmi podobá koróně. Jedná se opět o soustředné prstence jednotlivých barev viditelného spektra. Ty se ale v tomto případě tvoří stínů, které jsou protilehlé Slunci a jsou vrhány do vrstev mraků, nebo mlhy. Zde se zpětným odrazem světelný paprsek rozloží na barevné spektrum a vytvoří ony prstence. Někdy lze pozorovat gloriolu kolem stínu vrženého do ranní rosy.

2.6. Závěrem teoretického podkladu

Je zřejmé, že zemská atmosféra je velmi složité prostředí se spoustou jevů a procesů, které jsou navzájem propojeny a které se navzájem ovlivňují. Pokusme se tedy nyní přenést něco z tohoto komplexního prostředí do počítačové grafiky.

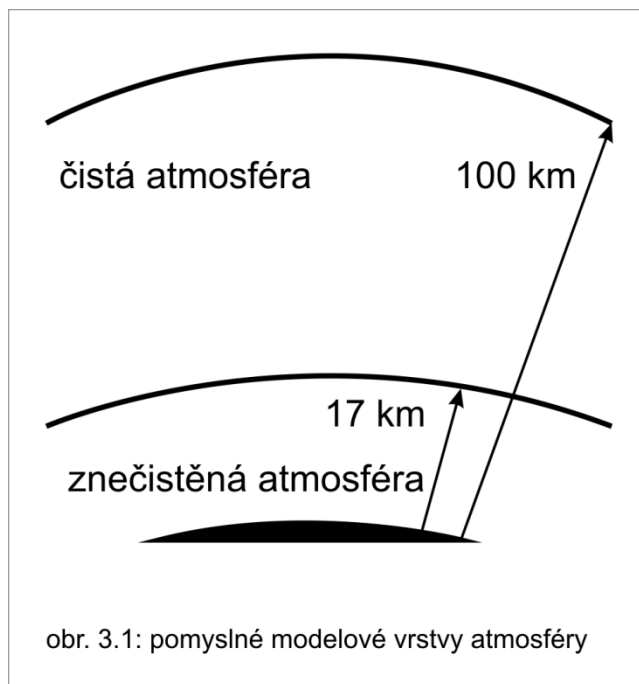
3. Příprava modelu atmosféry

Jak je v úvodu zmíněno, cílem této práce není přesný fyzikální model optických jevů v atmosféře, ale pouze jejich aproximace, která při relativní jednoduchosti poskytne fotorealisticky věrný výsledek. V rámci dalšího postupu budou tedy jevy, jako je například duha vynechány, neboť zasahují nad rámec stanovených cílů.

V následujících odstavcích budou z teoretického podkladu vybrány důležité informace, bude vysvětlen jejich význam z hlediska abstrakce problému pro další postup, zároveň s tím poslouží k vytvoření dále používaného modelu.

3.1. Atmosféra

Z první kapitoly víme, že atmosféru lze dělit podle několika kritérií. Bavíme-li se o atmosféře v souvislosti s počítačovou grafikou a i v souvislosti s touto prací, máme na mysli především barvu oblohy. Ze všech kritérií členění atmosféry je z tohoto pohledu jistě tím nejdůležitějším chemické složení atmosféry vzhledem k nadmořské výšce, neboť vlastnosti



obr. 3.1: pomyslné modelové vrstvy atmosféry

částic atmosféry (především jejich velikost) ovlivňují průchod světelných paprsků.

Víme, že drtivá většina atmosférické vody je soustředěna v troposféře. Rovněž různé znečišťující příměsi se nacházejí především v této vrstvě. Troposféra je tedy prostředím, kde převládá Miuův světelný rozptyl. Mimo troposféru, tedy ve vyšších atmosférických vrstvách, je zastoupení vody a znečišťujících příměsí téměř zanedbatelné. Dominantní složkou jsou molekuly plynů a proto v tomto prostředí bude zcela převládat Rayleighův světelný rozptyl.

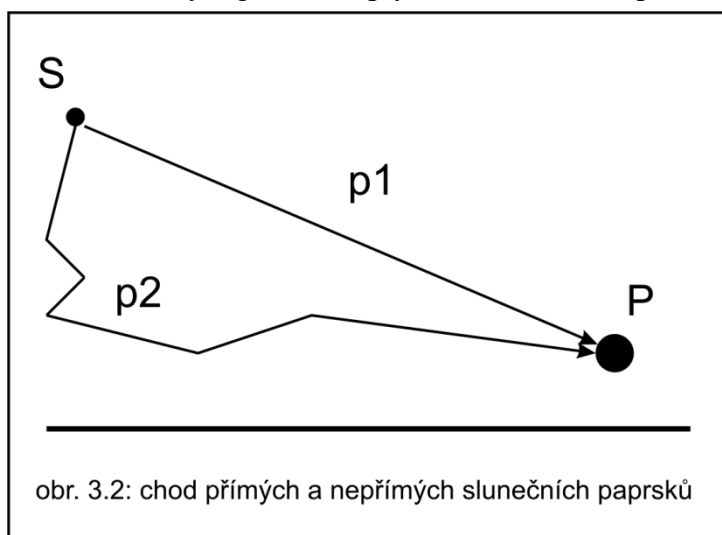
Na základě toho můžeme atmosféru chápat tak jak je uvedeno na obrázku 3.1. Zemský povrch je obalen vrstvou přibližně 17 km vysokou, kterou budeme dále nazývat „znečištěnou atmosférou.“ Znečištěná atmosféra je zase obalena vrstvou, kterou budeme dále nazývat „čistou atmosférou“ a s odkazem na [10] stanovíme nadmořskou výšku její působnosti na 100 km. Pouze poznamenejme, že výškové údaje jsou čistě pro představivost a dále nebudou potřeba.

3.2. Chod slunečních paprsků

Průchod paprsků atmosférou znázorňuje na obrázku 3.2 polopřímka p1 představující přímé sluneční paprsky a lomená čára p2 představující rozptýlené sluneční paprsky. Písmeno P označuje pozorovatele.

Nyní si představme průchod světelných paprsků takovouto atmosférou. Paprsky přímého slunečního záření, které mají největší intenzitu, jsou v čisté atmosféře ovlivněny Rayleighovým rozptylem jen v malé míře. Jejich barva před vstupem do znečištěné atmosféry je proto víceméně pořád bílá. Ve znečištěné atmosféře dojde k jejich rozptylu na molekulách vody a molekulách znečišťujících příměsí. Připomeňme, že přímé sluneční záření jsou paprsky které jdou od Slunce „přímo“ do oka pozorovatele. Navíc podíváme-li se opět na obrázek indikatrice Miova rozptylu (obr. 2.5), je zřejmé k čemu dojde. Většina světla je rozptýlena především ve směru k pozorovateli a jeho barva bude vesměs bílá.

Jinak to bude s paprsky rozptýleného slunečního záření. Ty jsou při cestě čistou atmosférou rozptylovány molekulárním rozptylem do všech směrů přibližně stejně (viz. indikatrice Rayleighova rozptylu – obr. 2.4) s převažujícím rozptylem modré barvy. Díky



tomu získá obloha typickou modrou barvu. Dále jsou potom rozptylovány i ve znečištěné atmosféře, kde dochází také k jejich opětovnému skládání a protože je Miuův rozptyl vzhledem k vlnové délce rozptylovaného světla neutrální, přechází rozptýlené světlo směrem k horizontu až to téměř bílé barvy. Do značné míry se na tom podílí i fakt, že paprsky, které směřují do oka pozorovatele a jsou blízko horizontu, musejí urazit atmosférou delší vzdálenost.

3.3. Denní doba

Do této chvíle bylo mlčky předpokládáno, že se bavíme o obloze za dne. Protože však jedním z cílů této práce bylo zohlednit denní dobu, bude nutné podívat se na tento problém podrobněji. Simulace či aproximace západu slunce není zase až tak jednoduchou záležitostí,

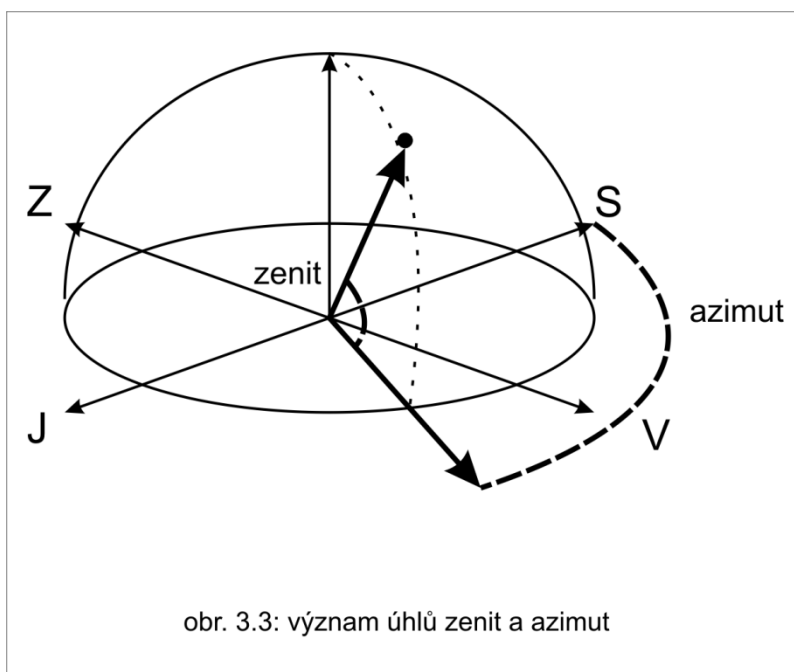
neboť západ slunce jako takový má mnoho tváří (viz barevná příloha). Rozumnou cestou jak se s tímto problémem vypořádat, je nalezení toho, co mají všechny „tváře“ západu společné.

Co můžeme říci o západu slunce jistě, je fakt, že s klesající výškou nad horizontem klesá i intenzita slunečního záření. To má vlastně stejný původ jako již výše zmiňované bledání rozptýleného slunečního záření směrem k horizontu. V tuto chvíli totiž musejí i přímé sluneční paprsky urazit atmosférou větší vzdálenost, tudíž na své cestě mají více překážek a jsou více pohlcovány prostředím.

Nyní je potřeba udělat si malou odbočku směrem k teorii. Té byla sice věnována první kapitola, ale následující jev bylo logičtější zmínit až ve chvíli, kdy už máme nějakou představu o modelu atmosféry a můžeme konkrétněji pracovat s pojmy, jako je pozorovatel a cesta paprsku atmosférou. Oním jevem je myšleno červenání oblohy a slunečního disku právě při západu slunce a ač se to na první pohled nejeví, je to důsledkem Rayleighova rozptylu. Do teď jsme brali v úvahu pouze onu převládající modrou složku rozptýleného světla. Otázkou je, co se děje s ostatními světelnými frekvencemi, které tvoří jakýsi „zbytek“ po Rayleighově rozptylu. Je zřejmé že se tento zbytek nemůže nikam ztratit, to by odporovalo fyzikálním zákonům. Faktem je, že modrá složka světla je rozptýlena s větší intenzitou a tím spíše je okem pozorovatele více vnímána, pokud tomu je ve směru optické cesty k pozorovateli. Zbylá světelná složka se tedy více projevuje ve směrech, které jsou od optické cesty k pozorovateli odchýlené. Přidáme-li k tomu klesající intenzitu rozptylované modré složky způsobenou přibližováním se slunce k horizontu, je sílí se vliv zbylých převážně červených složek světla zřejmý.

Vraťme se nyní opět k vytvářenému modelu oblohy a zapřemýšlejme, jak vyřešit problém denní doby. Existují matematické postupy, které ze zadaného času a zeměpisné polohy pozorovatele dokážou vypočítat

polohu slunce na obloze. Jistě každý chápe, že tento postup však není příliš intuitivní pro budoucího uživatele. Pro něj bude mnohem výhodnější, když si sám zadá polohu slunce na obloze a shader za něj dopočítá to podstatné, tedy barvu oblohy, intenzitu slunečního svitu atd., než aby složitě zadával časové údaje, dokud slunce nebude tam, kde ho chtěl mít. A to je ve své podstatě řešení celé úlohy. Polohu slunce budeme reprezentovat dvěma úhly, azimut, zenit (viz. obr. 3.3). Z této polohy budeme později určovat barevné změny na obloze.



obr. 3.3: význam úhlů zenit a azimut

4. Přejít k modelu atmosféry

Úkolem několika předchozích odstavců bylo sjednotit z teoretického podkladu důležité a pro další práci nezbytné informace a vytvořit z nich zjednodušený model atmosféry nezávislý na konkrétním implementačním prostředí. V případě této práce je již od začátku

jasné, že se bude výsledek implementovat jako shader pro prostředí Pixar RenderMan. Následně vytvářený model atmosféry bude tedy již přispůsobován pro toto prostředí.

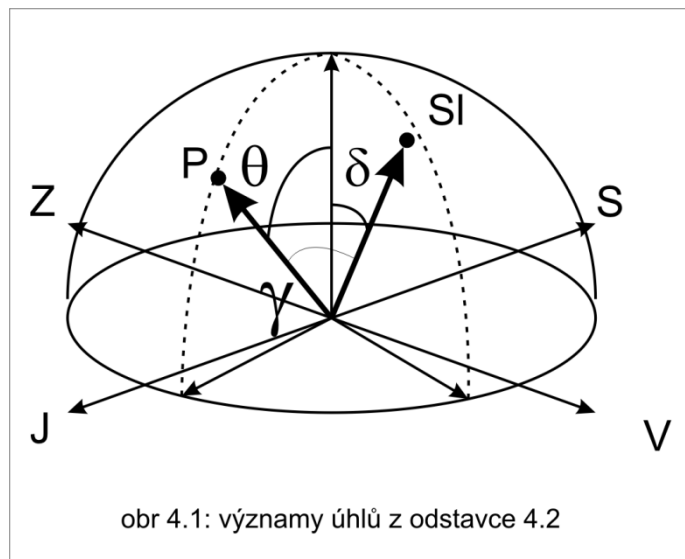
4.1. Nebeská hemisféra

Některé fyzikálně orientované modely zjednodušují atmosféru na dvě soustředné polokoule. Vnější polokoule zastupuje svrchní vrstvy atmosféry a sluneční paprsky jsou zde nejvíce ovlivňovány Rayleighovým rozptylem. Vnitřní polokoule zase představuje spodní vrstvy resp. vrstvu atmosféry a paprsky jsou zde ovlivňovány Mieovým rozptylem a případně jevy, jako je například opar, nebo smog. Výpočet barvy oblohy je realizován tak, že se simuluje cesta paprsku takto namodelovaným prostředím a vypočítává se účinek částic v daném objemu na paprsek. Na podobném principu fungují některé volumetrické shadery. Např. viz kniha [18].

V našem případě však s objemy a částicemi nepracujeme, tudíž můžeme uvažovat atmosféru, resp. nebeskou klenbu jako jednoduchou hemisféru, kterou budeme dále v textu nazývat nebeskou hemisférou.

4.2. Světelné paprsky

Jak již víme, objekty na zemském povrchu jsou ovlivňovány přímými a nepřímými slunečními paprsky. Přímé paprsky k pozorovateli přicházejí po přímce přímo od slunce. Nepřímé paprsky jsou však na svých drahách nesčetněkrát vychylovány do jiných směrů. V praxi to vypadá tak, že k pozorovateli přicházejí ze všech směrů. V postatě si můžeme představit nebe jako jeden velký zdroj světla. Každý bod na obloze vysílá k pozorovateli světelný paprsek o určité intenzitě a barvě. Samozřejmě intenzita paprsků ze směru, kde se nachází slunce, je největší.



obr 4.1: významy úhlů z odstavce 4.2

Dáme-li to do kontextu s modelovou nebeskou hemisférou, potřebujeme zjistit intenzitu světla v každém bodě hemisféry. K tomu nám pomůže funkce, kterou stanovila standardizační komise CIE:

$$L_z = Y_z \frac{(0.91 + 10e^{-3\gamma} + 0.45 \cos^2 \gamma)(1 - e^{-0.32/\cos \theta})}{(0.91 + 10e^{-3\delta} + 0.45 \cos^2 \delta)(1 - e^{-0.32})} \quad (4.1)$$

$$Y_z = (4.0453T - 4.9710) \tan \chi - 0.2155T + 2.4192 \quad (4.2)$$

$$\chi = \left(\frac{4}{9} - \frac{T}{120} \right) (\pi - 2\delta) \quad (4.3)$$

Tato funkce vypočítá zářivost každého bodu na obloze v závislosti na poloze Slunce a v závislosti na tom, kde se daný bod nachází na obloze vzhledem ke Slunci. Významy úhlových proměnných jsou zřejmé z obrázku 4.1. Y_z je zářivost zenitu a počítá se podle rovnice (4.2), kde χ se počítá z rovnice (4.3), kde T udává hodnotu turbidity, která představuje cosi jako koeficient znečištění oblohy a pro čistou oblohu má hodnotu 2. L_z je počítaná zářivost daného bodu P v závislosti na jeho poloze vůči slunci Slunci.

4.3. Základní barvy oblohy

V tuto chvíli máme již definovanou nebeskou hemisféru a víme, s jakou intenzitou září každý její bod. K tomu, abychom dosáhli věrného napodobení oblohy však kromě intenzity samotného bodu potřebujeme také znát jeho barvu. Na první pohled se to může zdát jako velmi složité, neboť obloha může mít nesčetně různých podob. Vodítkem pro další postup je připomenutí si, co se s paprsky v atmosféře děje. Jsou rozptylovány, odchylovány od původních drah, jsou pohlcovány a - což je patrně pro další úvahu nejdůležitější - jsou opětovně skládány. Právě na skládání paprsků resp. barev je založen další postup. Jeho smyslem je najít jakési „základní barvy“ oblohy a jejich mícháním dosáhnout realistické barvy oblohy.

Žřejmou otázkou je, zda-li vůbec existují nějaké základní barvy oblohy a pokud ano, jak je můžeme nalézt. Vyjděme z teoretického podkladu. V horních vrstvách atmosféry dominuje Rayleighův rozptyl, jeho výsledkem je specifická modrá barva. Ve spodních vrstvách atmosféry dominuje Mieův rozptyl, jehož výsledkem je jiná modrá barva s velmi, velmi jemným nařialovělým nádechem. Další důležitou barvou je již výše zmiňovaná načervenalá barva, která je zbytkem po Rayleighově rozptylu. Poslední pro nás důležitou barvou je barva přímých slunečních paprsků, která je bílá (slunce je totiž zdrojem achromatického světla).

Se stavovením prvních dvou modrých barev nám pomůže práce [9]. Následující dva vzorce představují rozptylové koeficienty pro oba druhy rozptylu:

$$\beta_{\text{rayleigh}} = \frac{8\pi^2(n^2 - 1)^2}{3N\lambda^4} \left(\frac{6 + 3p_n}{6 - 7p_n} \right) \quad (4.4)$$

$$\beta_{\text{mie}} = 0.434c\pi \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{\nu-2} K \quad (4.5)$$

$$c = (0.6544T - 0.6510) \times 10^{-16} \quad (4.6)$$

V rovnici (4.2) je n index lomu vzduchu a rovná se $n = 1.0003$, N je počet molekul na jednotkový objem a rovná se $N = 2.545 \times 10^{25}$ a p_n je depolarizační faktor se standartní hodnotou pro vzduch $p_n = 0.035$. Důležitou veličinou je λ , která představuje vlnovou délku daného záření. Pro nás jsou důležité tři barvy k vytvoření RGB vektoru. Červená, zelená a modrá s vlnovými délkami postupně $\lambda_1 = 700$, $\lambda_2 = 541$, $\lambda_3 = 435,8$.

V rovnici (4.3) je c koncentrační faktor a počítá pomocí rovnice (4.4), kde $T = 2$. Písmeno ν označuje tzv. Jungův exponent s hodnotou $\nu = 4$. Pro hodnotu K platí, že pro λ_1 je $K_1 = 0,687$; pro λ_2 je $K_2 = 0,677$ a pro λ_3 je $K_3 = 0,663$.

Tyto vzorce určují, kolik světla určité vlnové délky zůstane v rozptýleném světle. Zkusme tedy aplikovat tyto vzorce na náš případ. V dalším textu budeme barvy reprezentovat uspořádanou trojicí čísel, tzv. RGB vektorem. Jeho jednotlivé složky udávají jakou intenzitou

se daná barevná složka podílí na výsledné barvě. 0 znamená, že daná barevná složka není zastoupena vůbec, 1 znamená pro danou barevnou složku plnou intenzitu. Bílá barva tedy bude charakterizována vektorem $b = (1, 1, 1)$, zcela černá barva zase $b = (0, 0, 0)$. Dosadíme-li do vzorce (4.2) postupně vlnové délky jednotlivých složek vektoru, dostaneme tři hodnoty. Abychom však pracovali s rozumnými čísly, vydělíme všechna čísla největší hodnotou. Tím zajistíme, že všechny hodnoty budou v intervalu $\langle 0, 1 \rangle$. Tímto postupem vznikne následující RGB vektor: $rayl = (0.150, 0.420, 1)$. Tento vektor reprezentuje modrou barvu, která vzniká při Rayleighově rozptylu, kterou budem dále pracovně nazývat barva rayleighova rozptylu. Zopakujeme-li stejný postup pro druhý vzorec, dostaneme vektor: $mie = (0.402, 0.662, 1)$. Ten reprezentuje modrou barvu, vzniklou miovým rozptylem, kterou budeme dále pracovně nazývat jako barva miova rozptylu.

Ke stanovení načervenalé barvy žádné vzorce nevyužijeme, neboť i po důkladném studiu dostupných materiálů nebyl žádný nalezen. Některé publikace zabývající se počítačovou grafikou jako například [10] uvádějí svůj postup, jak tuto barvu získat. V zásadě existují dva způsoby. Ten první vezme složky RGB vektoru barvy rayleighova rozptylu a jednoduše prohodí R a B složku. Druhý způsob získá složky vektoru načervenalé barvy tak, že jednotlivé složky vektoru barvy rayleighova rozptylu odečtou od jedničky. V zásadě je ale možné říci, že v každé práci, která se podobnou tematikou zabývala si tuto načervenalou barvu určili empiricky po svém, tak aby vyhovovala dané implementaci. V této práci byl použit první z uvedených postupů, s tím, že byl výsledný vektor později korigován. Tímto postupem byly stanoveny dva vektory: $cervenani1 = (1, 0.65, 0.5)$ a $cervenani2 = (0.910, 0.557, 0.373)$. Důvod, proč bylo zapotřebí stanovit hned dva vektory bude vysvětlen později.

Jako poslední je na řadě bílá barva, která byla již v podstatě uvedena jako příklad tvorby RGB vektorů. Pro přesnost tedy: $bila = (1, 1, 1)$. Nyní máme stanoveny čtyři resp. pět základních barev oblohy.

4.4. Míchání základních barev oblohy

V tuto chvíli máme vše potřebné pro výpočet barvy oblohy. Pro další postup bude třeba rozdělit si oblohu na tři části. Za první část oblohy budeme uvažovat samotný sluneční disk, jehož barvu budeme dále pracovně jednoduše nazývat jako barva disku. Sluneční záření mimo slunečnou disk uvažujeme jako druhou část oblohy a dále ji pracovně nazývejme barvou okolí disku. Poslední uvažovanou částí oblohy bude ona základová modrá barva dále v textu označovaná jako podklad oblohy.

Nejprve se podíváme na výpočet jednotlivých částí oblohy za dne. Barvu disku a barvu okolí disku v daném bodě oblohy získáme velmi jednoduše – je to v podstatě výsledek výše zmiňované funkce (4.1). Barvu podkladu oblohy získáme také velmi jednoduše. Jak již bylo několikrát řečeno, ve spodních vrstvách atmosféry převažuje Míův rozptyl, ve svrchních Rayleighův. Tuto skutečnost můžeme na naší modelové obloze ztvárnit tak, že spodek hemisféry obarvíme barvou miova rozptylu, její nevyšší body barvou rayleighova rozptylu. Ostatní body barvy oblohy získáme jako plynulý barevný přechod mezi spodem a vrškem hemisféry, tj. Barva bodu bude vytvořena smícháním dvou výše zmíněných barev v určitém poměru závislém na tom, jak vysoko se v nebeské hemisféře nacházíme. Výsledná barva v daném bodě oblohy je dána součtem vektorů barev všech tří částí oblohy.

Výpočet barvy jednotlivých částí oblohy při západu slunce je téměř identický. Jediným rozdílem je to, že mezi sebou vynásobíme i -té složky vektoru barvy části oblohy a vektoru červenání. Tím zajistíme, že načervenalá barva ovlivní výslednou barvu oblohy.

4.5. Vliv polohy slunce na míchání barev

Poloha slunce a to především jeho výška nad horizontem bude hlavní faktor, který bude ovlivňovat výpočet barvy oblohy, protože právě výška slunce nad horizontem (a tím máme na mysli výšku úhlovou – dále v textu označovanou jako zenit) je určujícím faktorem denní doby. Popíšme si zjednodušený průběh toho, co se během dne s oblohou děje, bavíme-li se o čisté obloze. Při východu slunce (který je v podstatě téměř stejný jako západ), obloha přechází přes mnoho různých barev, což je důsledkem postupného klesání vlivu červené barvy a sílí barvy rayleighova rozptylu. To probíhá do určité úhlové výšky slunce, kdy už je obloha typicky modrá. Přes den se tento stav nemění, obloha zůstává modrá, jen sluneční disk mění svoji polohu. V momentě kdy se sluneční disk dostane na druhé straně oblohy do stejné úhlové výšky jako při východu slunce, začne opačný proces než ráno. Klesá intenzita modré barvy oblohy a sílí vliv barvy červené.

Pokud to dáme do spojitosti s naší modelovanou oblohou, tak v případě modré denní oblohy máme vše hotové, neboť to již umíme vytvořit pomocí fce (4.1) a výše popsaného míchání barev přes den. Jediné co zbývá, je tedy vyřešení východu resp. západu slunce. Zřejmě první věcí, která nás zajímá je ona určitá úhlová výška tvořící hranici mezi východem resp. západem slunce a běžnou denní dobou. Vzhledem k nesčetným barevným variacím oblohy závislým na mnoha faktorech, není potřeba naprosto přesný údaj, proto postačí uvést, že tato úhlová výška byla odpozorována na přibližně 40 stupňů. Nyní uvažujme následující. Smícháme-li základní barvy oblohy dle výše popsaného postupu pro výpočet barvy oblohy za dne, získáváme „čistě denní“ oblohu, která je zcela bez vlivu východu/západu slunce. Smícháme-li základní barvy oblohy dle výše uvedeného postupu pro východ/západ slunce, tj. vynásobíme červenou barvou, získáme barvu oblohy v nejnižší poloze slunce, kdy se vliv červené barvy projevuje nejvíce. Potřebujeme tedy najít takový princip, který s rostoucí/klesající výškou slunečního disku utlumí/posílí vliv červené barvy. V tuto chvíli pouze řekněme, že tento princip lze velmi snadno realizovat při samotné implementaci tohoto modelu. Proto v tuto chvíli budeme předpokládat, že to funguje, bližší vysvětlení ale ponecháme na implementační část práce.

4.6. Světlo

Protože výsledkem této práce bude fotorealistický rendering pomocí nějakého rendereru, je zřejmé, že časem budeme vytvářet nějakou scénu. Aby byla scéna kompletní je potřeba vyřešit její osvětlení. To se nakonec ukázalo jako největší úskalí této práce. Vytvoříme-li si totiž fotorealistickou oblohu, je zřejmé, že naším cílem je i vytvořit takové osvětlení, které je touto oblohou ovlivňováno, aby modelovaný zemský povrch a objekty na něm vypadal také co nejvěrněji. Protože se světlo ukázalo jako velmi závislé na konkrétním implementačním prostředí, přenecháme tento odstavec zcela do implementační části, kde se budou lépe popisovat problémy s ním spojené.

4.7. Shrnutí modelu

Tím končí vytváření našeho modelu oblohy. Nyní si zrekapitulujme, co se budeme snažit naimplementovat. Základem je nebeská hemisféra jakožto geometrický objekt, na který budeme oblohu vytvářet. Dále potřebujeme funkci (4.1), která nám vypočítá intenzitu bodu na obloze v závislosti na jeho poloze od slunce. Důležitými proměnnými této funkce jsou dva úhly – azimut a zenit – které jednoznačně určují polohu slunce na nebeské hemisféře. Tyto úhly si bude volit budoucí uživatel shaderu. Další důležitou součástí modelu jsou čtyři základní barvy oblohy. Barva rayleighova rozptylu, barva miova rozptylu, červenání 1 a červenání 2. Jejich mícháním s využitím funkce (4.1) budeme vypočítávat barvu jednotlivých

bodů na obloze. Posledním údajem je hraniční úhel 40 stupňů. Jednoznačně určuje, kdy se na barvě oblohy neprojevuje západ, resp. východ slunce.

5. Implementace stanoveného modelu

5.1. Implementační prostředí

V úvodu jsme se mohli dočíst, že výsledkem práce má být shader pro prostředí Pixar Renderman. Oficiálně se toto prostředí jmenuje RenderMan Interface a jeho tvůrcem je známé studio Pixar. Laicky řečeno, jedná se o soubor datových typů a funkcí používaných k přenosu dat mezi dvěma procesy. Prvním procesem je modelování scény (scene modeling), druhým je výpočet scény (tzv. rendering, v češtině se běžně používá slovo renderování), tj. vypočítání toho, kde a jaké objekty ve scéně najdeme, jaký bude jejich povrch, jak budou nasvětleny atd. Modelování scény se v našem případě bude realizovat vytvářením RIB (RenderMan Interface Bytestream), což je v podstatě soubor postupně jdoucích příkazů psaných podle specifikace, které vytvářejí samotnou scénu. Společně s RIB soubory se vytvářejí i SL (Shading Language) soubory – shadery. Shader je program, který podle zadaných parametrů vypočítává konkrétní barvu povrchu objektů v daném konkrétním bodě, vlastnosti různých typů osvětlení a i například vlastnosti různých objemových prvků (například prášné prostředí atd.). Takto zhotovené soubory předáme nějakému renderovacímu programu, který postupně prochází příkazy v RIB souboru, kde je potřeba, zavolá SL soubor a vykreslí scénu popsanou v těchto souborech.

Je tedy zřejmé, že k další práci potřebujeme nějaký renderovací program. Vynecháme-li licensovaný Pixar PrMan (Photo realistic RenderMan), připadají v úvahy tři volně dostupné programy. BMRT (Blue Moon Rendering Tools), Pixie a Aqsis. Z těchto variant byl vybrán program Pixie. Jedním z hlavních důvodů byla především celkem kvalitní dokumentace, takže i člověk, který nikdy nepřišel s vytvářením a především následným renderováním RIB s SL souborů do styku, se poměrně rychle zorientuje, což usnadňuje práci. Nutno podotknout, že samotné vytváření RIB a SL souborů je nutno nastudovat z některé publikací, které se tímto tématem zabývají. Například [5], nebo [7] jsou velmi vhodné a postačující k tomu, aby člověk, který nikdy nic podobného nedělal se naučil vše důležité. Dalším kritériem, které ovlivnilo výběr, byla zásoba příkladů, udělaná jako součást dokumentace a i velká knihovna již naimplementovaných shaderů. Jako doplňující poznámku můžeme uvést, že výsledek byl sice optimalizován pro Pixie, ale místy byly v rámci implementace vyzkoušeny i ostatní dva programy, především tedy BMRT.

Protože cílem této práce je fotorealistický rendering a nikoliv popis elementárních příkazů RIB a SL souborů, nebudou nikde vysvětleny jednotlivé elementární příkazy použité v těchto souborech. Pokud se pohybujete v implementační části této práce, je předpokládáno, že máte alespoň základní znalosti z počítačové grafiky a pojmy jako je například scéna, systém souřadnic, či transformace Vám jsou známy. Autor zároveň doufá, že zdrojové kódy jsou podrobně okomentované, tak aby jejich čtení bylo pro zkušenější čtenáře maximálně pohodlné.

5.2. Vytvoření scény

Ze všeho nejdříve musíme vytvořit virtuální svět resp. scénu, do které umístíme naši nebeskou hemisféru. Tento krok je realizován vytvořením jednoduchého RIB souboru. Jeho kompletní přepis, stejně jako přepisy všech ostatních souborů naleznete na přiloženém CD. Tento soubor nám zajistí vytvoření virtuálního světa, do kterého postupně umístí nejprve nebeskou hemisféru a poté „terén, který je prozatím tvořen pouze kruhem tvořícím základnu oné hemisféry. Ve scéně se zatím nenachází žádný zdroj světla. Tímto krokem jsme s RIB soubory téměř skončili, protože ostatní důležité věci se budou odehrávat v samotných shaderech.

5.3. Shader obloha_0.sl

Toto je první shader vytvořený podle požadavků modelu. Nyní si jej blíže popíšeme. Protože fragmenty kódů budeme zároveň vysvětlovat, budeme je psát bez komentářů, ty se nacházejí v přepisech souborů v přílohách. Všechny funkce definované v tomto shaderu:

```
point spoctiPolohuSlunce(float azimut, zenit, polomerPolokoule)
float spoctiUhelTheta(point bod, pocatek)
float spoctiUhelGama(point slunce, pocatek, bod)
float spoctiYz(float deltaRad)
float spoctiFCIintenzity(float deltaRad, thetaRad, gamaRad)
```

mají pouze přípravný charakter pro samotný výpočet barvy oblohy. Jejich funkce je zřejmá z jejich názvu a v jejich tělech se používají pouze jednoduché matematické principy, není tedy potřeba je vysvětlovat, proto postupme rovnou dále k následujícím řádkům shaderu:

```
slunce = spoctiPolohuSlunce(azimutRad,zenitRad, polomerPolokoule);
thetaRad = spoctiUhelTheta(PP, pocatek);
gamaRad = spoctiUhelGama(slunce, pocatek, PP);
```

Po vykonání těchto příkazů známe všechny úhly potřebné pro funkci (4.1) a jsme tedy připraveni pro výpočet intenzity bodu na obloze. To obstarávají následující tři příkazy:

```
intenzita = spoctiFCIintenzity(deltaRad, thetaRad, gamaRad);
intenzitaMax = spoctiFCIintenzity(thetaRad, thetaRad, 0);
intenzitaFinal = (intenzita/intenzitaMax);
```

První příkaz spočítá intenzitu bodu na obloze, druhý vypočítá intenzitu nejzářivějšího bodu na obloze – středu slunečního disku. Třetí příkaz zajistí, že vypočítaná intenzita bude v intervalu $\langle 0,1 \rangle$, což mimo jiné znamená, že nejzářivější bod oblohy bude mít intenzitu 1.

Následující řádky shaderu již provádějí samotný výpočet barvy jednotlivých komponent oblohy - podkladu oblohy, barvy disku a barvy okolí disku - pro konkrétní bod oblohy:

```
Cobloha = (((mix(mie, rayl, zcomp(PP)/polomerPolokoule)) + 0.1) *
* (1 - intenzitaFinal));

Cslunce = ( intenzitaFinal );
```

Barva podkladu oblohy (Cobloha) je vytvořena pomocí standartní funkce shaderu – mix(), která podle daného koeficientu namíchá dvě barvy. V tomto případě je oním koeficientem výška aktuálně počítaného bodu v nebeské hemisféře. Barvy, které míchá jsou: mie – barva miova rozptylu a rayl – barva rayleighova rozptylu. Tím je realizován princip popisovaný při vytváření modelu v části 4.5. Barva disku a barva okolí disku v daném bodě oblohy je v tomto shaderu ještě vypočítávána jako jedna barva (Cslunce). Je zřejmé, že barva slunce a jeho okolí je bílá, tudíž můžeme rovnou použít vypočítanou intenzitu, která tím, že se pohybuje ve výše uvedeném intervalu, představuje různé stupně bílé barvy.

Dalším bodem v našem modelu bylo naimplementovat vliv úhlové výšky slunce na ovlivňování barvy oblohy červenou barvou. Zatím jsme se dotali k určení barev, které jsou mezními případy. Jednak je to barva daného bodu oblohy za dne, která není červenou barvou vůbec ovlivněna (Cden). Tu získáme příkazem:

```
Cden = (Cobloha + Cslunce);
```

který jednoduše sečte barvy jednotlivých komponent. Dále potřebujeme barvu oblohy v daném bodě při úplném západu slunce (Czapad), kdy červená barva ovlivňuje oblohu nejvíce:

```
Czapad = (Cobloha + Cslunce) * barvaZapadu_1;
```

Získáme ji tak, že předchozí barvu vynásobíme červenou barvou. V části popisující model, bylo řešení principu, který s klesajícím/stoupajícím sluncem bude posilovat/zeslabovat vliv oné červené barvy, schálně odsunuto na později. Nyní je vhodná doba princip odhalit. Jak bylo řečeno, je velmi snadný při samotné implementaci, neboť ho lze realizovat užitím další standartní funkce SL – smoothstep(min, max, hodnota). Pokud platí: hodnota < min, vrací tato funkce 0. V případě že: hodnota > max, vrací 1. A konečně pro: hodnota >= min a hodnota <= max, vrátí hodnotu mezi 0 a 1, podle toho jak velká hodnota je. Pokud za min a max dosadíme nulovou úhlovou výšku slunce a 40ti stupňovou úhlovou výškou slunce:

```
koeficientZapadu = smoothstep(0, 40, zenit);
```

získáme koeficient, který určuje, jak moc se červená barva podílí na výsledné barvě oblohy v daném bodě. Koeficient využijeme následujícím způsobem:

```
Ci = Cden * (Czapad + koeficientZapadu);
```

Příkaz znamená toto. Pokud bude úhlová výška slunce větší než 40 stupňů, bude koeficientZapadu = 1, to je v řeči SL rovno bílé barvě. Jejím přičtením k barvě Czapad dojde úplnému zesvětlení barvy Czapad a tudíž červená barva oblohu vůbec neovlivňuje. Naopak, je-li úhlová výška slunce malá, bude koeficient nabývat hodnot blízkých k nule a obloha bude nezesvětlenou barvou Czapad silně ovlivněna. Ci je výsledná barva, kterou shader obarví aktuálně počítaný bod nebeské hemisféry.

A to je celý princip jak vypočítat barvu oblohy v každém jejím bodě. Výsledky tohoto shaderu jsou uvedeny v barevné jako obrázky v příloze B, B.1. Pokud je prozkoumáme, dá se říci, že na první pokus je výsledek celkem slušný. Evidentním nedostatkem je však absence slunečního disku. Řešení tohoto problému je realizováno v druhém shaderu.

5.4. Shader obloha_01.sl

Pokud se podíváte do hlavičky tohoto shaderu, zjistíte, že má mnohem více parametrů, než shader obloha_0.sl a to především proto, že se některé proměnné přesunuly z těla shaderu do jeho hlavičky. Tato změna umožní uživateli více zkoumat na vlastní pěst. Například pokud nesouhlasí s hodnotami základních barev oblohy, jednoduše si může zadat svoje a to je jistě výhoda. Můžeme už také vysvětlit, proč byly stanoveny barvy dvě barvy červenání. Hlavním důvodem k tomu byla snaha zvýraznit sluneční disk při západu slunce. Disku bude přiřazena barva červenání1, která je oproti barvě červenání2 méně sytá. Mělo by to vytvořit dojem bledšího slunečního disku na sytější pozadí, což se podařilo.

Změnily se i proměnné, které představovaly barvy jednotlivých částí oblohy. Nyní tu jsou proměnné CdiskDen, CokoliDiskuDen a CoblohaDen. Z jejich názvů je patrné, že které

části oblohy která patří. Koncovka „Den“ značí, že tyto barvy jsou denní, čili nejsou ovlivněné západem slunce. Změnilo se totiž i řešení výpočtu západu slunce, nyní se provádí již na úrovni jednotlivých komponent oblohy, narozdíl od předešlého shaderu. Proto ke každé proměnné udržující „denní“ barvu existuje proměnná představující barvu komponenty při úplném západu slunce. Jsou to CdiskZapad, CokoliDiskuZapad, CoblohaZapad. Proměnné CdiskAktualni, CokoliDiskuAktualni a CoblohaAktualni potom představují barvy, které v sobě již zahrnují případný vliv západu slunce. Proměnná CslunceAktualni potom opět představuje barvu disku a barvu okolí disku dohromady, tentokrát však z důvodu již zmíněné snahy o zvýraznění slunečního disku. Nová proměnná rozmazaniDisku potom zase poslouží k tomu, aby okraje slunečního disku nebyly příliš ostré, což by působilo rušivým dojmem.

Až do výpočtu intenzity daného bodu na obloze je tělo shaderu identické s předchozím shaderem. Smysl následujících příkazů:

```
CblohaDen = (mix(mie, ray1, zcomp(PP)/polomerPolokoule)) * (1 -
intzitaFinal);
CblohaZapad = (mix(mie, ray1, zcomp(PP)/polomerPolokoule)) * (1 -
intenzitaFinal) * *cervenani2;
CdiskDen = intenzitaFinal * koeficientZesileni;
CdiskZapad = intenzitaFinal * koeficientZesileni * červenani1;
CokoliDiskuDen = intenzitaFinal * koeficientZesileni;
CokoliDiskuZapad = intenzitaFinal * koeficientZesileni * červenani2 *
cervenani2;
```

již každý intuitivně chápe. Jedná se o výpočet barev jednotlivých částí atmosféry a to jak za dne, tak i při úplném západu slunce. Další nový příkaz:

```
rozmazaniDisku = smoothstep(3, 4, gamaDeg);
```

počítá koeficient rozmazání disku. Příkazy:

```
CdiskAktualni = mix(CdiskZapad, CdiskDen, koeficientZapadu);
CokoliDiskuAktualni = mix(CokoliDiskuZapad, CokoliDiskuDen,
koeficientZapadu);
CblohaAktualni = mix(CblohaZapad, CoblohaDen, koeficientZapadu);
CslunceAktualni = mix(CdiskAktualni, CokoliDiskuAktualni,
rozmazaniDisku);
```

zřejmě vypočítávají aktuální barvy jednotlivých komponent atmosféry. Princip funguje tak, že u každé komponenty je míchána její barva za dne s barvou při západu slunce v poměru určeném koeficientemZapadu. Proměnná rozmazaniDisku určuje, v jaké vzdálenosti od středu slunce je použita ještě barva CdiskAktualni a kdy je již použita barva CokoliDisku. Ve vzdálenosti, kde se obě barvy míchají, vzniká rozmazaný okraj slunečního disku.

Výsledky tohoto shaderu si můžeme prohlédnout na obrázcích v příloze B, B.2. Pravděpodobně kvalitním teoretickým podkladem a vhodným modelem se podařilo dosáhnout natolik uspokojivého výsledku, že shader obloha_1.sl může být považován za konečný. Tím končíme s výpočtem barvy oblohy a přesuneme se do části, kde se řeší problematika osvětlení.

5.5. Osvětlení

Jak bylo při vytváření modelu avizováno, stalo se osvětlení největším problémem při vytváření této práce. Řešení tohoto problému zabralo neuvěřitelné množství času, dokonce můžeme říci až neúměrné oproti dosavadním pracem na barvě oblohy a i přes veškeré vynaložené úsilí se nakonec přistoupilo k nejběžnější metodě osvětlení, která nedokáže naplno využít dosavadních úspěšných výsledků.

5.5.1. Zvolený model osvětlení

Jednou z prvních myšlenek, jak realizovat osvětlení, bylo využít tzv. raytracingu (metody sledování paprsku) bez použití tzv. light shaderů (zdroje světla ve scéně). Bod P představuje bod na povrchu objektu, jehož barva je právě vypočítávána. N představuje normálu v tomto bodě. K je polokoule, jejíž základna je kolmá na normálu. Smyslem této metody bylo vyslat z bodu P soubor několika paprsků, tak aby protínaly polokouli K. Myšlené paprsky by pak dále pokračovaly ve své cestě, až by protkly nebeskou hemisféru, každý v jiném daném bodě. Poté by každý paprsek předal informaci o barvě nebeské hemisféry v tom každém daném bodě. Takhle by se nasbíralo několik vzorků barvy oblohy a z nich by se poté interpolovala barva, která by představovala barvu světla, které dopadá na bod P objektu.

Přestože má program Pixie velmi slušnou základnu funkcí pro raytracing, tato myšlenka se nepodařila implementovat. Hlavní problém se nacházel v tom, že bez použití light shaderů, měl každý bod oblohy jakoby stejnou intenzitu záření. Tím nastala nepříjemná situace. Barva modrých částí oblohy, které mají podle funkce (4.1) menší intenzitu záření, než například bílá barva slunce a jeho kolí. Všechny barevné vzorky získané při vysílání paprsků byly tedy brány se stejnou vahou. Výsledkem toho bylo, že výsledná barva světla, která je v normálním světě přes den bílá, měla nyní matnou modrou barvu, protože modré barvy je na obloze více, než té bílé.

Jedním z možných řešení tohoto problému bylo najít způsob, jak zpátky zapracovat výsledky funkce (4.1). Možnost uměle dodávat barevným vzorkům váhy podle úhlu, kterým směřují se ukázalo jako nesmyslné, protože správný výsledek by byl zaručen pouze v případě, že by byly vysílány ze středu nebeské hemisféry. Na objektech rozmístěných po celé scéně by se došlo k chybným výsledkům. Jak již bylo jednou řečeno, i přes veškeré úsilí se tento problém nepodařilo vyřešit a nezbývalo, než se poohlédnout po jiných metodách.

5.5.2. Alternativní postup

Jednou z dalších myšlenek jak realizovat osvětlení byla snaha použít tzv. plošné zdroje světla. Bodový zdroj světla vysílá paprsky pouze z jednoho bodu, oproti tomu plošné zdroje světla vyzařují světlo na celé své ploše. Toho bylo možné velmi dobře využít. Ze sférické hemisféry by se udělal jeden velký zdroj světla u kterého bychom mohli nejenom kontrolovat intenzitu světla v každém bodě, ale navíc také i barvu světla. Čili jednoduše bychom vypočítali barvu oblohy, což již umíme, a pak bychom mohli zvoleným směrem vyslat světelný paprsek dané barvy s intenzitou vypočítanou podle funkce (4.1).

Bohužel pokusy realizovat tuto myšlenku v rendereru Pixie skončily hned na samém začátku. Plošné zdroje světla vůbec nefungovaly a to i přesto, že v dokumentaci je jeden příklad který je používá. Při renderování nebyla sice ohlášena žádná chyba, ale ani scéna nebyla osvětlená. Proto přišel na řadu renderer BMRT. V něm plošné zdroje světla fungovaly a podařilo se bez problémů vytvořit light shader podle výše zadaných požadavků. Problém však nastal při samotném renderování. Výpočet takového plošného zdroje světla byl pravděpodobně příliš náročný, neboť zhruba po deseti minutách renderování nebylo vypočítáno ani 50% obrázku. Je zřejmé že taková doba je pro další práci neúnosná.

5.5.3. Použití light shaderů, shader slunecni_svetlo.sl

Současná situace vedla k podrobnému studiu dokumentací obou rendererů, aby se vyloučila možnost neúspěchu v důsledku chybného nastavování některých parametrů rendererů. Avšak ani poté se nepokročilo nikam. Nakonec nezbylo, než použít klasické základní light shadery a to konkrétně zdroj rovnoběžných paprsků, které nejuvěrněji simulují sluneční paprsky. Abychom alespoň trochu využili naší vypočítané oblohy, obohatíme tento zdroj světla o výpočet barvy slunečního disku v závislosti na jeho poloze na obloze. Tuto barvu pak přiřadíme světelným paprskům zdroje. V praxi to znamená, že v shaderu použijeme nám již dobře známe výpočty z předešlých shaderů. Protože všechny příkazy jsou nám již dobře známé, není třeba tento shader rozebírat do podrobnosti. Výsledky s tímto druhem osvětlení naleznete v příloze B, části B.3. Je na nich celkem dobře vidět, že se dopadající světlo opravdu mění svoji barvu podle polohy slunce na nebeské hemisféře.

5.6. Posouzení vhodnosti vybraného modelu

Teprve v kontextu s implementací můžeme posoudit do jaké míry byl zvolený model vhodný či nevhodný. Co se barvy oblohy týče, lze říci, že model splnil svoji funkci více než dobře, neboť se přes svoji relativní jednoduchost (srovnejte třeba s [9]) dokázal celkem věrně přiblížit k realitě. V podstatě se dá bez nadsázky tvrdit, že pomocí dvou úhlů, které zadává uživatel, dokážeme vytvořit jasnou a čistou oblohu. Jediným vážnějším omezením, je fakt, že pro postup výpočtu barvy se používá ona funkce (4.1), slunce tedy nemůže klesnout níže než na hranici 0 stupňů.

Vzhledem k osvětlení tento model pokulhává, když vezmeme v potaz, jaké potíže to přineslo. Útěchou snad může být fakt, že osvětlení a samotná distribuce světla patří v počítačové grafice k nejtežším úlohám, které jsou mnohdy oříškem pro grafiky, kteří se v prostředí počítačové grafiky pohybují již několik let.

5.7. Závěrem implementační části

Tímto můžeme skončit s implementací. Výsledkem je jeden RIB soubor (scena.rib) a tři SL soubory (obloha_0.sl, obloha_1.sl a slunecni_svit.sl), se kterými se dá poměrně hodně experimentovat a tudíž i vylepšovat dosažené výsledky. Přestože současný model osvětlení není tím nejvhodnějším, svoji funkci plní a navíc se bez nutných úprav dají použít další, již implementované shadery, které jsou součástí například rendereru Pixie. Lze tak například zkoumat osvětlení na různých materiálech, jako je sklo, nebo lesklé kovy. V tom vidí autor práce velkou výhodu, především pro ty, kteří do oblasti počítačové grafiky teprve pronikají.

6. Závěr

Na předšlých stránkách je zdokumentován pracovní postup autora této práce, zatím největšího projektu, který kdy vytvářel. V tomto směru se autor cítí velmi obohacen, neboť začínat téměř od nuly, nejprve si shánět potřebné materiály, z nich vybírat jen ty důležité, a na nich začít stavět něco téměř „na vlastní pěst,“ je jistě velmi cennou zkušeností do budoucna. Rovněž velký přínos vidí autor v tom, že jako začátečník v oblasti počítačové grafiky, kterou se chce dále zabývat, byl postaven před některé pokročilé problémy této oblasti. To nutně vyústilo v rozsáhlé nastudování dalších a dalších znalostí a poznatků, kterých bylo získáno během této práce více než dost.

Při pohledu na výsledné obrázky autor cítí dobrý pocit z dosažených výsledků, ale i zklamání z toho, že jeden zdánlivě neřešitelný problém (konkrétně ono osvětlení) zabral autorovi neúnosné množství času, čímž zabránil v dosažení výsledků ještě lepších, na které si autor myslí, že mohl dosáhnout. Přeci jenom v textu nekolikrát zaznělo, že atmosféra je velmi složitá a komplexní prostředí a jevů, které se dají napodobovat je velké množství.

V úvodu je řečeno, že tato práce má být srozumitelná i pro laiky. V tomto směru si autor myslí, že dokázal i složitější problémy podat způsobem celkem srozumitelným, tak aby se ani laik neutápěl ve spoustě vzorečků, matematických výpočtů a přemíry nesrozumitelných, či příliš odborných pojmů

To co si autor z této práce odnáší jako největší přínos pro sebe je schopnost začít něco od nuly a dokončit to, spousta nově nabytých vědomostí a příjemný pocit nad dokončením prací.

Do budoucna určitě autor nepočítá, že by se zcela přestal tematikou této práce zabývat. Naopak. Jak je výše psáno v atmosféře je spousta jevů, které se dají napodobovat pomocí počítačové grafiky. A když už bylo vynaloženo tolik práce na výrobu oblohy a jejího osvětlení, bylo by škoda nepokusit se tuto virtuální oblohu obohatit o zajímavé optické jevy, případně k této obloze dodat komplexní terén a zvýšit tím opět zase o kousek vlastní vědomosti a schopnosti.

Seznam použitých zdrojů:

- [1] Hosnedl Jan. Optické jevy v atmosféře. První vydání. Plzeň. 2001
ISBN – 80-7082-817-X
- [2] Jan Bendnář. Meteorologie: úvod do studia dějů v zemské atmosféře. První vydání.
Praha. 2003. ISBN-80-7178-653-5
- [3] Jan Bednář. Pozoruhodné jevy v atmosféře. První vydání. Praha. 1989.
ISBN 80-200-0054-2
- [4] Jan Bednář. Fyzika mezní vrstvy atmosféry. První vydání. Praha. 1985
- [5] Anthony A. Apodaca. Advanced RenderMan.
ISBN-1-55860-618-1
- [6] Steve Upstill. The RenderMan Companion. 2001
ISBN 0201508680
- [7] Ian Stephenson. Essential RenderMan.
ISBN 1852336080
- [8] David S. Ebert, F. Kenton Musgrave, Darwyn Peachey, Ken Perlin, Stewen Worley.
Texturing&Modeling. Třetí vydání. 2003.
ISBN – 1-55860-848-6
- [9] A. J. Preetham. Peter Shirley. Brian Smits. A practical analytic model for daylight.
www.cs.utah.edu
- [10] R. Victor Klassen. Modeling the Effect of the Atmosphere on Light
- [11] ukazy.astro.cz
- [12] hyperphysics.phy-astr.gsu.edu

Příloha A

Na přiloženém CD lze nalézt mimo jiné i soubory, které byly při této práci vytvořeny a všechny prostředky, které jsou třeba k tomu, aby se daly soubory využít. Konkrétně je na CD přiložena volně dostupná verze rendereru Pixie ve verzi Pixie 2.2.2. Než se může začít renderovat, je potřeba udělat několik následujících kroků:

1. Spustíte soubor *Pixie-2.2.2-Setup.exe*. Budete provedeni krok po kroku velmi jednoduchou instalací programu Pixie.
2. Přesuňte se do adresáře, kam jste si program nainstalovali. Do adresáře *Pixie\bin* zkopírujte z CD soubory *scena_0.rib*, *scena_1.rib*, *obloha_0.sl*, *obloha_1.sl* a *slunecni_svetlo.sl*.
3. Nejprve je potřeba přeložit samotné shadery. V adresáři *Pixie\bin* otevřete příkazovou řádku. Soubor se přeloží tak, že zadáte příkaz: “sdrcl jmenoSouboru.sl”, například tedy: “sdrcl obloha_0.sl”. Tento postup opakujte na všechny soubory s příponou sl, které na CD naleznete.

Nyní už je vše připraveno. Pokud chcete renderovat obrázek, opět si otevřete příkazovou řádku a zadejte : “rndr jmenoSouboru.rib”, tedy v našem případě například: “rndr scene_1.rib”.

Pro práci se shaderem *obloha_0.sl* používejte *scena_0.rib*, pro shader *obloha_1.sl* potom *scena_1.rib*.

Co se parametrů jednotlivých shaderů týče, ty nejdůležitější jsou v obou případech parametry *zenit* a *azimut*. Jejich změnou dochází ke změně polohy Slunce na obloze a tudíž ke změně barvy oblohy. Doporučené hodnoty pro parametry jsou: *zenit* = (0.1 – 90) a *azimut* = (0 – 360). Pokud zadáte hodnoty vyšší, nebo nižší, než jsou ty uvedené, nejen že není výsledek zaručen, je dokonce vysoce pravděpodobné, že vzniklý obrázek bude zcela nesmyslný, pakliže vůbec nějaký vznikne.

Ostatní parametry je doporučeno neměnit. Pokud změníte základní nastavené hodnoty parametrů představujících základní barvy oblohy, rovněž se nedá zaručit žádný smysluplný výsledek. Parametr *polomerPolokoule* je vhodné měnit, měníte-li v RIB souboru poloměr hemisféry, na kterou oblohu kreslíte.

Příloha B

B.1

Obrázky výsledku implementace shaderu *obloha_0.sl* pro zenitový úhel 50, 40, 20 a 5 stupňů.



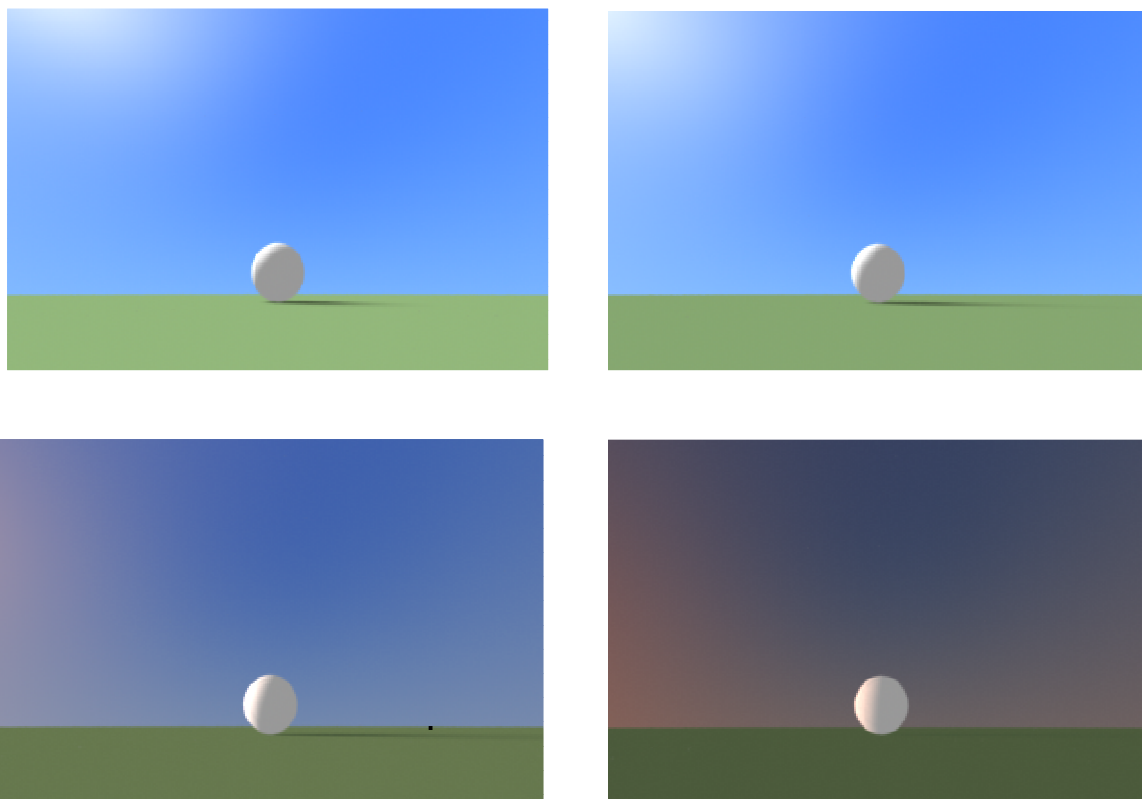
B.2

Obrázky výsledku implementace shaderu *obloha_1.sl* pro zenitový úhel 50, 40, 20 a 5 stupňů.



B.3

Obrázky výsledku implementace osvětlení pomocí shaderu *slunecni_svetlo.sl* pro zenitové úhly 50, 40, 20 a 5 stupňů. Slunce svítí z levé strany.



B.4

