

| 学号 | 姓名 | 论文规范性 (10) | 问题分析与调研 (30) | 方案创新性 (20) | 实验结果分析与讨论 (40) | 结课论文总成绩 (100) |
|----------|----|------------|--------------|------------|----------------|---------------|
| 20301106 | 刘畅 | 6 | 15 | 10 | 19 | 50 |

存在大篇幅抄袭嫌疑

计算机图形学期末课程论文

题 目： 基于预计算表的大气渲染技术

学 号： 20301106

姓 名： 刘畅

摘 要

本文探讨了基于物理模型的大气层光效渲染，结合了 Rayleigh 和 Mie 散射模型以实现更真实的大气光效。并且通过模型和公式实现实验阳光在大气中传播和散射过程的精确模拟。

关键词：大气散射渲染，Mie 散射，体积光，Rayleigh 散射

ABSTRACT

This article explores atmospheric lighting rendering based on physical models, combining Rayleigh and Mie scattering models to achieve more realistic atmospheric lighting effects. And precise simulation of the propagation and scattering of experimental sunlight in the atmosphere is achieved through models and formulas.

Keywords: atmospheric scattering rendering, Mie scattering, volume light, Rayleigh scattering

目 录

| | |
|----------------|-------------------------------------|
| 摘 要 | I |
| ABSTRACT | II |
| 目 录 | II |
| 第一章 绪论 | 1 |
| 1.1 引言 | 1 |
| 1.2 方法描述 | 1 |
| 第二章 实验部分 | 4 |
| 2.1 实验设置 | 4 |
| 2.2 实验过程 | 6 |
| 2.3 实验结果 | Error! Bookmark not defined. |
| 第三章 结论部分 | 13 |
| 3.1 结论 | 13 |
| 参考文献 | 14 |

第一章 绪论

1.1 引言

一种渲染，可以从地面到外太空的任何角度实时渲染大气，同时考虑 Mie 散射，体积分光，Rayleigh 散射。该法再现了光散射的许多效果，例如所有视图和光线方向的日光和黄昏天空颜色和空中视角，或者大气层内的地球和山脉阴影（光轴）。该法基于光传输方程的公式，该公式可对所有视点、视点方向和太阳方向进行预计算。展示了如何紧凑地存储这些数据，并提出了一种符合 GPU 的算法来在几秒钟内对其进行预计算。这些预先计算的数据使能够在运行时评估恒定时间内的光传输方程，而无需任何采样，同时考虑阴影和光轴的地面。

1.2 方法描述

大气散射现象：

大气散射是指，太阳光在射入大气层时，与大气中的空气分子或空气溶胶等发生相互作用，使得入射的光能以一定的规律在各个方向上进行重新分布的现象。太阳光在射入大气层时，遇到大气分子、尘埃、雨滴等颗粒后，都会发生散射现象。其中一部分的光能会被这些粒子吸收转化为热能，而另一部分光能则会以该粒子为中心，向四面八方扩散开来。所以，在经过了大气的散射作用之后，有部分太阳光将无法抵达地球表面。大气散射在自然界中是一种十分重要而又普遍存在的物理现象，人们平时用肉眼观察到的光很大一部分都是散射光。如果没有大气散射，那么只要不是太阳光直接照射到的位置，都将是完全黑暗的。

空气物理模型:空气中的介质颗粒根据其直径大小的不同可分为两种：直径远小于光线波长的空气微粒、与直径与光线波长相当的空气溶胶。由前者引起的散射我们称为 Rayleigh 散射，它是导致晴朗天空呈现蓝色的主要原因。由后者引起的散射我们称为 Mie 散射，它是导致阴霾的天空呈现灰色的原因，因为阴天的空气中存在大量与光波直径相当的水滴。

①Rayleigh 散射：由空气中远小于波长的微粒(如空气分子)引起的散射称作瑞利散射。Rayleigh 散射强度与光线波长的四次方成反比，这意味着白光中波长较短的颜色光(蓝色)会比波长较长的光(红色)有更强的散射强度，导致天空在白天偏向蓝色，而在黄昏偏向橙红色。当日出或日落的时候，由于太阳的位置接近地平线，阳光斜射入大气，会在大气层中穿过很长的距离。在这个过程中，太阳光中的蓝色光几乎都会被散射殆尽无法抵达人眼，只剩下了波长较长的红色光，所以在太阳及其周围的天空都会呈现橘红色。

Rayleigh 散射的散射系数可以使用如下公式计算：

$$\beta_R(\theta) = \frac{2\pi^2(n^2 - 1)^2}{3N\lambda^4} p_R(\theta)$$

其中 θ 是视线与太阳光线的夹角， N 是大气分子密度， n 是大气的折射率， λ 是入射光的波长， $p_R(\theta)$ 是单位化的相位函数。由上可知，Rayleigh 散射明显与波长的四次方成反比，在实现中我们可用一个 RGB 向量来表示，散射系数可表示为：

$$\beta_{R.rgb} = (5.81, 13.5, 33.1) \times 10^{-6}$$

由于 Rayleigh 散射几乎是各向同性的，即光线会被粒子向各个方向均匀散射，其相位函数可以表示为：

$$\beta_R(\theta) = \frac{3}{16\pi}(1 + \cos^2 \theta)$$

② Mie 散射：在空气中直径与波长相当的微粒(如尘埃、雾滴等)所导致的散射现象称作 Mie 散射。与 Rayleigh 散射不同，Mie 散射与波长无关，散射方向表现出明显的各向异性，光线会被粒子更多的向后方散射。而当阴雨天气时，空气中存在大量的水滴颗粒，Mie 散射导致天空呈现灰白色。现今经常出现的雾霾天气，同样是因为空气中悬浮的大颗粒过多而导致的 Mie 散射现象。

由于 Mie 散射与波长无关，故可以用标量表示，Mie 散射系数为：

$$\beta_{M.rgb} = 2 \times 10^{-5}$$

Mie 散射的方向是各向异性的，光线会被更多的向后方散射，其相位函数为：

$$\beta_R(\theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{3(1 - g^2)}{2(2 + g^2)} \frac{1 + \cos^2 \theta}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{\frac{3}{2}}}$$

θ 是光线方向与视线方向的夹角，而 g 表示散射的对称性。若 g 是正值，则大多数光线会被粒子向后方散射；若 g 是负值，则更多的光线会被向前方散射。通常， g 取值 $[-0.75, 0.99]$

③ 大气密度：对于瑞利散射和米氏散射，它们对太阳光的散射作用都和空气粒子的密度有关。许多大气模型都假设摄像机总是在地面上或者是在十分接近地面的位置，这样就可以认为空气具有一个恒定的粒子密度，这就在很大程度上简化了 Nishita 在 1993 年提出的散射积分方程，并在近地空间可以得到很好的渲染效果。然而在远离地表的高空，这种做法得到的渲染结果并不准确。

实际中的大气密度在地球引力的作用下，越靠近地表空气密度越高，越远离地表空气越稀薄。所以，我们假定空气粒子的密度是沿着海拔高度 h 呈指数递减的：

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{h}{H}}$$

其中 ρ_0 是在海平面的空气密度。

h 为当前采样点的海拔高度, H_{HH} 是缩放高度 (在实现中可设为大气层高度)。理论上说大气层并没有确定的高度, 但在实现中我们需要一个统一高度来渲染天空穹顶, 这样空气密度随着高度的增加而呈指数递减。对于 Rayleigh 散射与 Mie 散射我们分别使用不同的缩放高度: $H_R = 7994 \text{ km}$ $H_M = 1200 \text{ km}$ 。这是因为影响 Mie 散射的大颗粒(尘埃、水滴等)更多的存在于近地表的对流层中, 再往上 Mie 散射效果不明显, 但 Rayleigh 散射的作用依然存在。

3、光线内散射

太阳光在大气中传输的时候会与空气中的微粒产生交互作用。有两种重要的交互方式: 散射, 它改变了光线的方向; 吸收, 它将光能吸收并转变为其它形态的能量 (如热能)。而散射效果对场景中物体的影响又分为两个方面: 一方面是一部分由物体反射的光被散射到视线之外, 并不能到达摄像机, 因而被衰减, 称作外散射; 另一方面是一部分太阳光被空气中的粒子散射正对向摄像机, 这些正朝向视线的散射被称作内散射。

最后抵达视点被人眼所观察到的光线可分为两部分: 衰减后的物体反射辐射度、被内散射的大气散射辐照度

$$L_{viewer} = L_{object} \cdot e - T(O \rightarrow C) + L_{scatter}$$

第二章 实验部分

2.1 实验设置

① 实验平台:

操作系统: Windows8.1

IDE: Qt Creator

语言: C++

API: OpenGL3.3+, Qt 5.7

② 可调参数:

太阳光谱: 选择常量值还是真实值 (通过真实的太阳光谱线性插值)

臭氧层: 是否开启臭氧层 (臭氧层也会吸收一部分光线)

散射重数: 最低为 1 (即只考虑单重散射)

体积光:是否开启丁达尔效应

Rayleigh 散射:是否开启 rayleigh 散射

Mie 散射:是否开启 Mie 散射

Mie 散射对称系数:控制 Mie 散射的方向性, 为正则向后散射, 为负则向前散射

2.2 实验过程

光线衰减因子

① 点 **p** 到大气顶层的距离

② 计算点 **p** 到 **i** (与大气顶层的交点) 的光学长度

```
Input:()
    SAMPLE_COUNT:=500;
    STEP=d/SAMPLE_COUNT;
    sum:=0;
    for x from 0 to SAMPLE_COUNT:
        Calculate current sample point(r_d,u_d);
        Density = genDensity(r_u,u_d);
        sum += Density*STEP;
    return sum;
```

③ 坐标映射: 我们把预计算的结果存入一张 **2D** 的纹理中, 所以需要将 **(r,u)** 映射到纹理坐标 (u_r, u_u) 中。

```
Input(r,u)
    d:=Calculate distance to top atmosphere;
    (p,H):=Calculate the tangele length;
    dmin():=top_radius -r;
    dmax():=p+H;
    u_r:=p/H;
    u_u:=(d-dmin)/(dmax-dmin)
    return (u_r,u_u);
```

④ 点 **p** 到太阳的光线衰减因子

```
DimemsionLessSpectrum GetTransmittanceToSun(
    IN(AtmosphereParameters)atmosphere,
    IN(TransmittanceTexture)transmittanceTexture
    Length r,Number mu_s{
        Number sin_theta_h = atmosphere.bottom_radius / r ;
        Number cos_theta_h = -sqrt(max(1.0-sin_theta_h^2,0.0));
        rerurn (GetTransmittanceToSun)
    }
)
```

单重散射

① 内散射积分

$$L_{\text{scatter}} = \int P_i L_{\text{sun}} \cdot e^{-T(A(s))} \\ \rightarrow P(s) \cdot (\beta_R s e^{-H_R h(s)} p_R(\theta) + \beta_M s e^{-H_M h(s)} p_M(\theta)) ds$$

② 相位函数

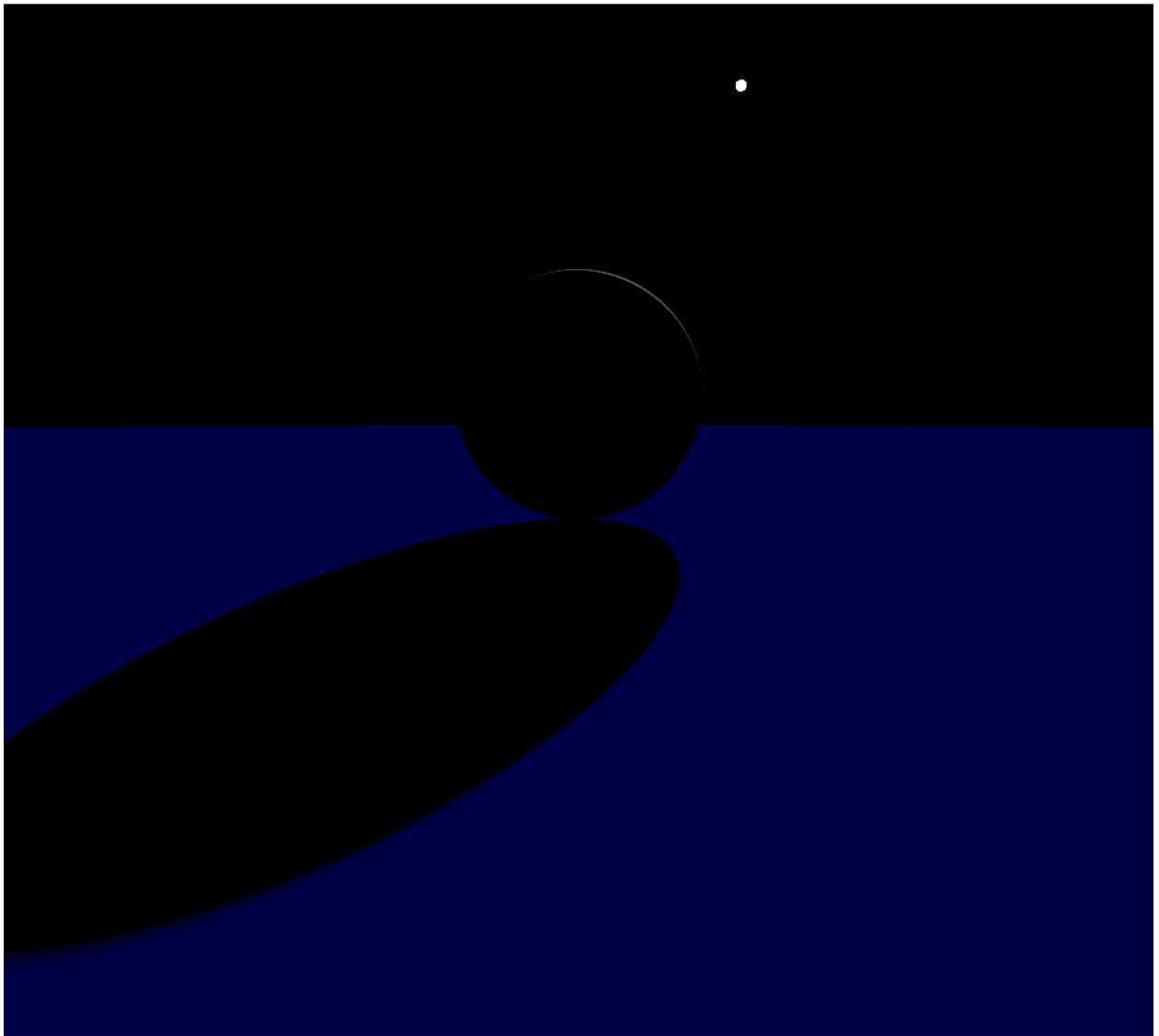
③ 坐标映射

多重散射

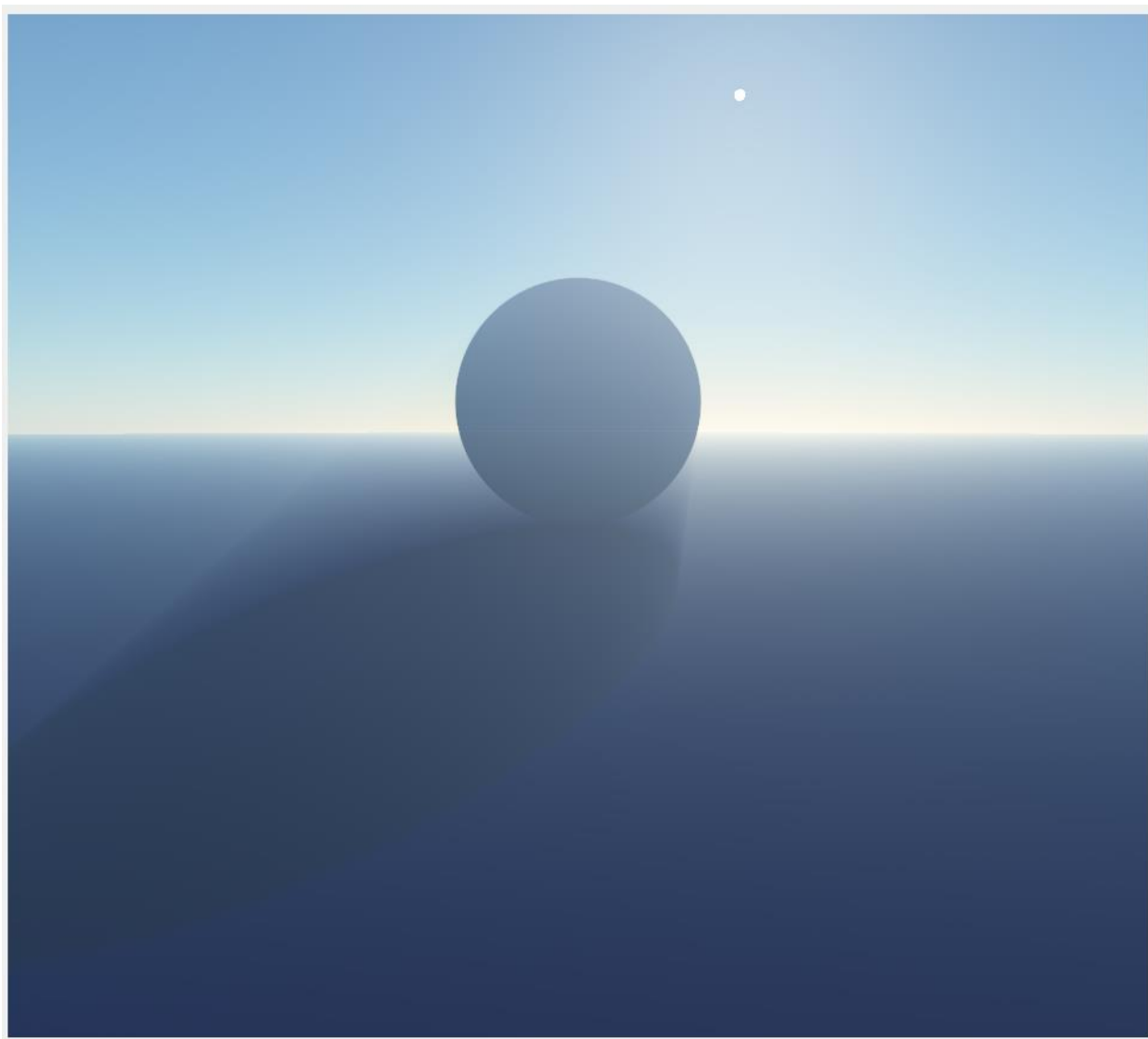
$$L = L_0 + L_1 + L_2 + \dots = L_0 + L^*$$

2.3 实验结果

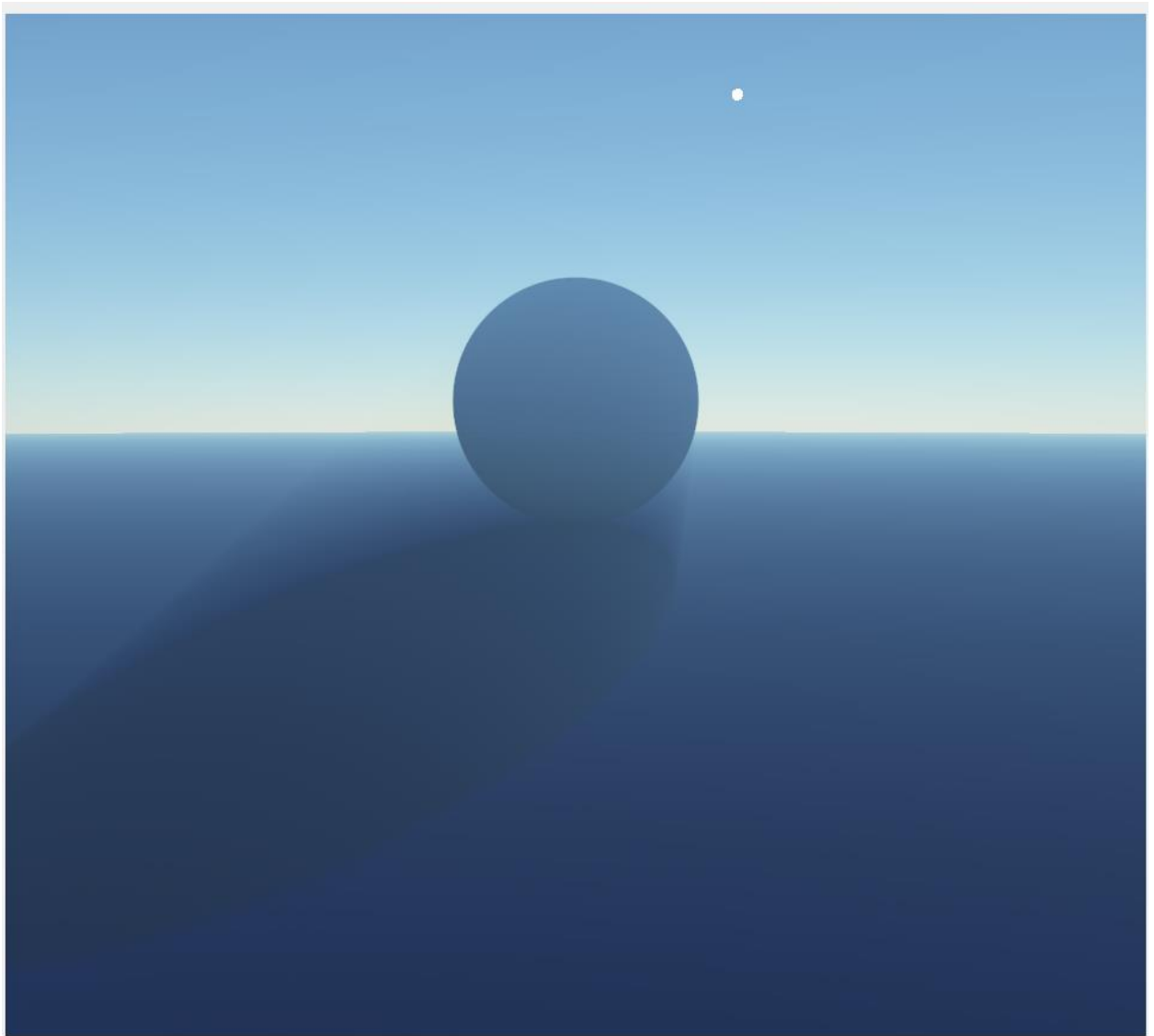
① Rayleigh 散射和 Mie 散射均关闭



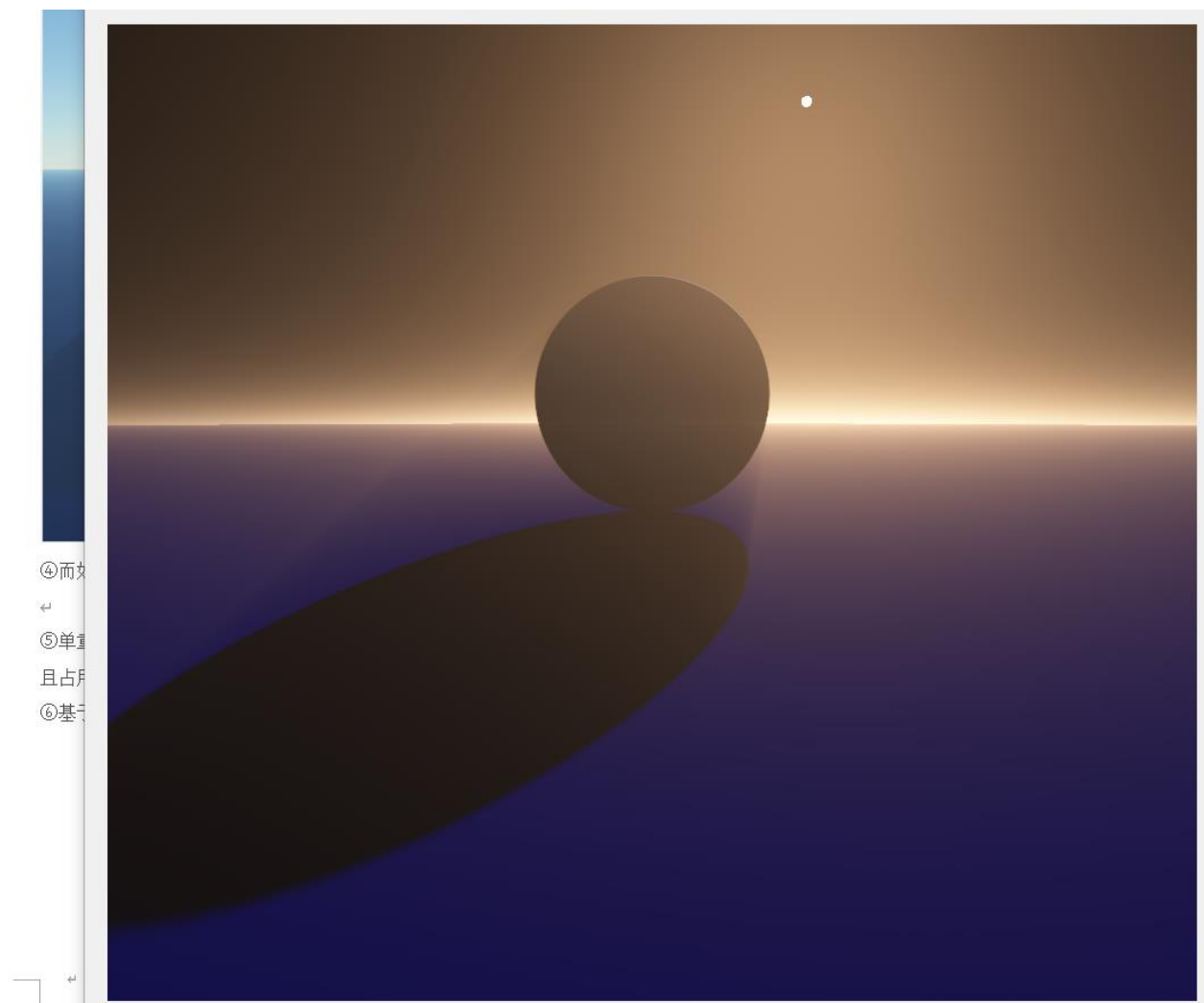
②现在把 Rayleigh 散射和 Mie 散射都开启。



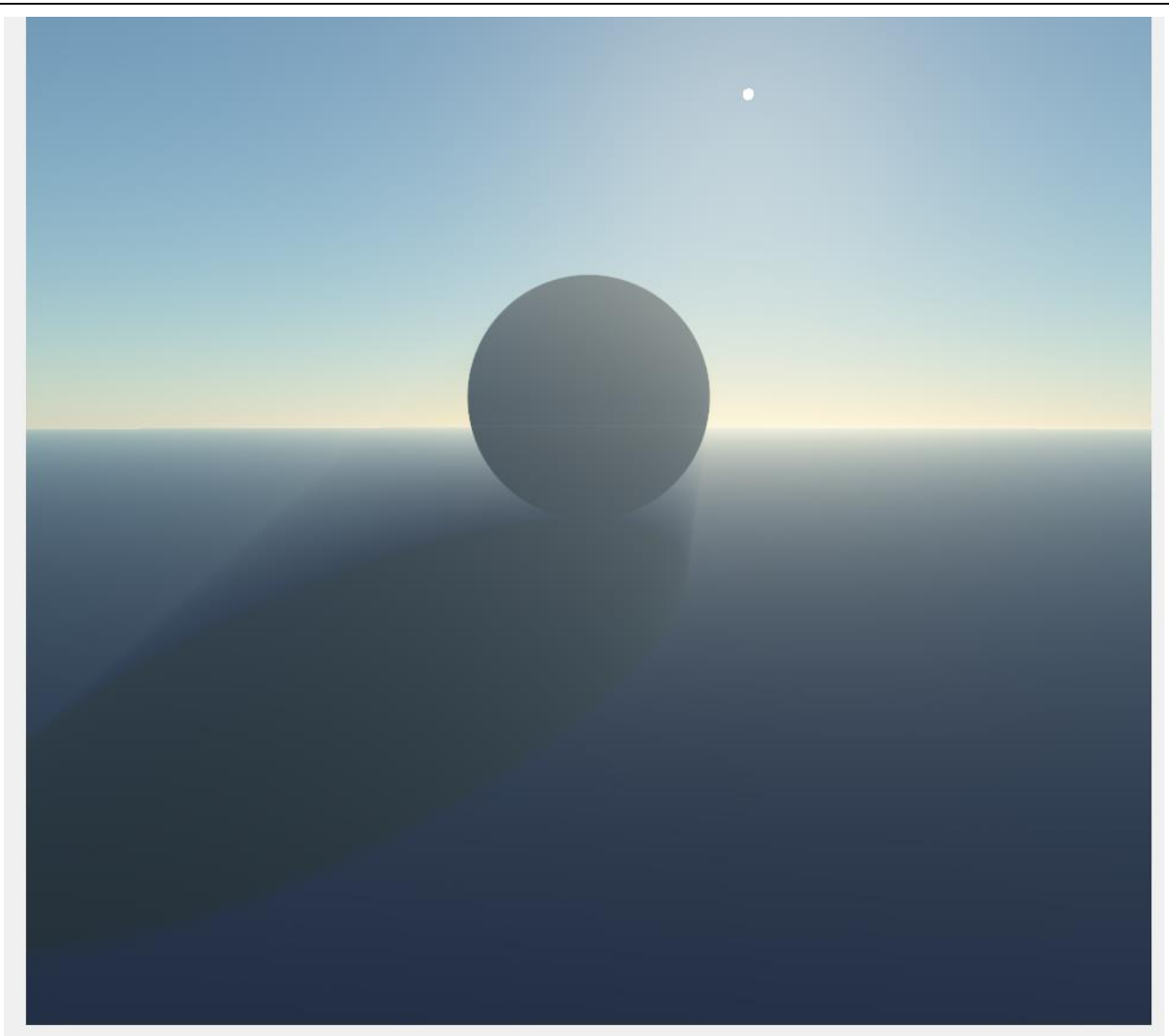
③仅开启 **Rayleig** 散射，这时由于没有 **Mie** 散射，也就是我们剔除了气溶胶的作用，天空的朦胧感降为 0。

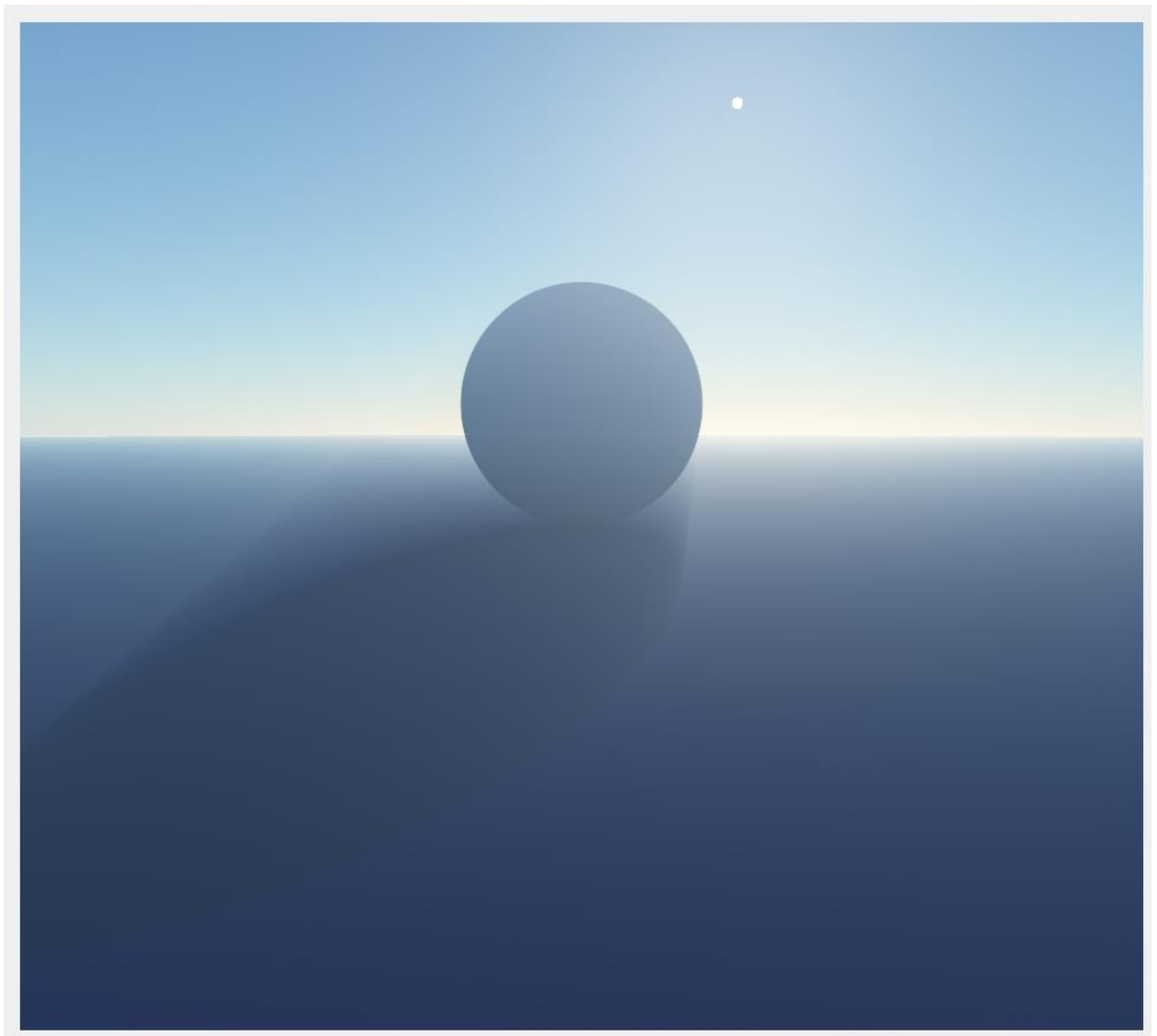


④而如果仅开启 **Mie** 散射，那么天空不会呈现蓝色，而是呈现如下情况。



⑤单重散射、多重散射的对比。





⑥基于阴影体的体积光实现



第三章 结论

3.1 结论

把 Rayleigh 散射和 Mie 散射都关闭了，也就是说相当于没有大气层的存在，和月球上的情况相似，所以天空不再是蓝色而是黑色（直接看到外太空了），太阳周围也不会出现光晕。而且由于没有散射，那么阴影部分（非太阳直射的地方）将完全漆黑。仅开启 Rayleigh 散射，这时由于没有 Mie 散射，也就是我们剔除了气溶胶的作用，天空的朦胧感降为 0.00，天空看着很清澈，这与我们的生活经验一致。而如果仅开启 Mie 散射，那么天空不会呈现蓝色，而是呈现如下情况。可以看出，Mie 散射呈现的是一种丁达尔效应的朦胧感。单重散射、多重散射升的效果很小。

参考文献

- [1] ebruneton.github.io/precomputed_atmospheric_scattering/ 《Precomputed Atmospheric Scattering》
- [2] 洋葱_ywc 【计算机图形学】基于 GPU 预计算的大气层光效渲染
- [3] Zealot_Alie 基于物理的大气渲染-单次散射
- [4] 艾祖亮 《多重散射的天空光照效果建模与实时绘制》
- [5] PreethamSig2003CourseNotes

附录 A 附录名称

对于一些不宜放入正文中、但作为毕业设计（论文）又不可残缺的组成部分或具有重要参考价值的内容，可编入毕业设计（论文）的附录中，例如，正文内过于冗长的公式推导、方便他人阅读所需的辅助性数学工具或表格、重复性数据和图表、非常必要的程序说明和程序全文、关键调查问卷或方案等。

附录的格式与正文相同，如有多个附录需依顺序用大写字母 A，B，C，……编序号，如附录 A，附录 B，附录 C，……。只有一个附录时也要编序号，即附录 A。每个附录应有标题，如：“附录 A 参考文献著录规则及注意事项”。

附录一般与论文全文装订在一起，与正文一起编页码。

致 谢

学位论文正文和附录之后，一般应放置致谢（后记或说明），主要感谢指导老师和对论文工作有直接贡献和帮助的人士和单位。致谢言语应谦虚诚恳，实事求是。字数一般不超过 1000 个汉字。

“致谢”用三号黑体加粗居中，两字之间空 4 个半角空格。致谢内容为小四号宋体，1.5 倍行距。