

# Компьютерная графика

Лекция 12: Anti-aliasing, multisampling, volume rendering  
equation, scattering, volume slicing, raymarching

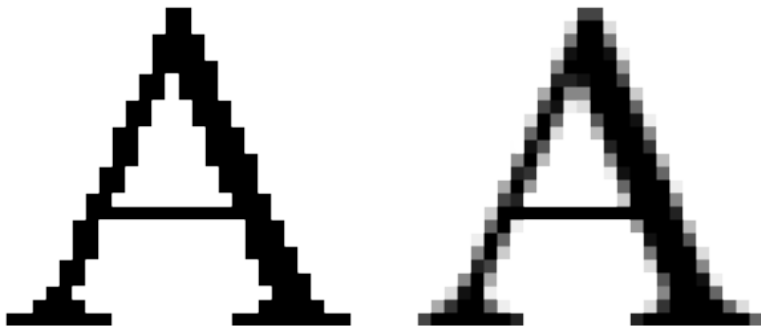
2022

# Aliasing

- ▶ Термин из обработки сигналов: артефакт, возникающий при восстановлении сигнала по недостаточно большому количеству измерений

# Aliasing

- ▶ Термин из обработки сигналов: артефакт, возникающий при восстановлении сигнала по недостаточно большому количеству измерений
- ▶ В графике: 'лесенка' из пикселей на границе объекта



# Anti-aliasing: методы

- ▶ Вручную сглаживать градиентом (2D, карты, UI)

# Anti-aliasing: методы

- ▶ Вручную сглаживать градиентом (2D, карты, UI)
- ▶ Supersampling (SSAA): рисовать увеличенную (x4) картинку в текстуру, затем уменьшать размер до требуемого, усредняя значения пикселей
  - ▶ Работает приемлемо, но очень дорого

# Anti-aliasing: методы

- ▶ Вручную сглаживать градиентом (2D, карты, UI)
- ▶ Supersampling (SSAA): рисовать увеличенную (x4) картинку в текстуру, затем уменьшать размер до требуемого, усредняя значения пикселей
  - ▶ Работает приемлемо, но очень дорого
- ▶ Multisampling (MSAA)

# Anti-aliasing: методы

- ▶ Вручную сглаживать градиентом (2D, карты, UI)
- ▶ Supersampling (SSAA): рисовать увеличенную (x4) картинку в текстуру, затем уменьшать размер до требуемого, усредняя значения пикселей
  - ▶ Работает приемлемо, но очень дорого
- ▶ Multisampling (MSAA)
- ▶ Пост-обработка (FXAA, SMAA, TAA)

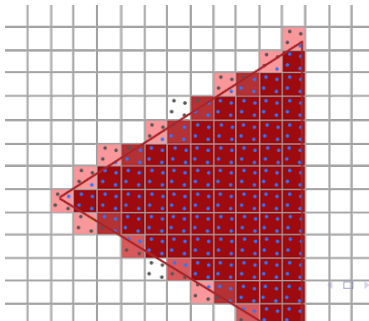
# Multisampling

- ▶ Алиасинг обычно возникает на границе треугольников (проблемы внутри решаются мипмар'ами текстур)



# Multisampling

- ▶ Алиасинг обычно возникает на границе треугольников (проблемы внутри решаются мипмар'ами текстур)
- ▶ Идея:
  - ▶ Выберем набор случайных точек (семплов) внутри пикселя (обычно от 2 до 16), будем хранить в каждом пикселе цвет каждой точки
  - ▶ Запустим фрагментный шейдер один раз на пиксель
  - ▶ Запишем результат в те точки, которые покрывает треугольник
  - ▶ При выводе на экран усредним значения в точках



# Multisampling в OpenGL

- ▶ Тестура с `target = GL_TEXTURE_2D_MULTISAMPLE` (данные инициализируются через `glTexImage2DMultisample`, позволяет задать количество семплов)
  - ▶ Нет мипмар'ов и фильтрации, читать из шейдера можно только через `glTexelFetch` (позволяет прочитать конкретный семпл)

# Multisampling в OpenGL

- ▶ Тестура с `target = GL_TEXTURE_2D_MULTISAMPLE` (данные инициализируются через `glTexImage2DMultisample`, позволяет задать количество семплов)
  - ▶ Нет мипмар'ов и фильтрации, читать из шейдера можно только через `glTexelFetch` (позволяет прочитать конкретный семпл)
- ▶ Renderbufer: `glRenderbufferStorageMultisample`

# Multisampling в OpenGL

- ▶ Тестура с `target = GL_TEXTURE_2D_MULTISAMPLE` (данные инициализируются через `glTexImage2DMultisample`, позволяет задать количество семплов)
  - ▶ Нет мипмар'ов и фильтрации, читать из шейдера можно только через `glTexelFetch` (позволяет прочитать конкретный семпл)
- ▶ Renderbufer: `glRenderbufferStorageMultisample`
- ▶ Рисование во фреймбуфер с такими текстурами/renderbuffer'ами будет автоматически делать multisampling

# Multisampling в OpenGL

- ▶ Тестура с `target = GL_TEXTURE_2D_MULTISAMPLE` (данные инициализируются через `glTexImage2DMultisample`, позволяет задать количество семплов)
  - ▶ Нет mipmap'ов и фильтрации, читать из шейдера можно только через `glTexelFetch` (позволяет прочесть конкретный семпл)
- ▶ Renderbufer: `glRenderbufferStorageMultisample`
- ▶ Рисование во фреймбуфер с такими текстурами/renderbuffer'ами будет автоматически делать multisampling
- ▶ Вывести multisampled текстуру/renderbuffer на экран (multisample resolve) можно с помощью `glBlitFramebuffer`

## FXAA, SMAA, TAA

- ▶ FXAA (Fast approXimate Anti-Aliasing): специальный шейдер пост-обработки, на основе эвристик вычисляющий места, в которых нужно сгладить изображение
  - ▶ Недорогой алгоритм, приемлемо работает

# FXAA, SMAA, TAA

- ▶ FXAA (Fast approXimate Anti-Aliasing): специальный шейдер пост-обработки, на основе эвристик вычисляющий места, в которых нужно сгладить изображение
  - ▶ Недорогой алгоритм, приемлемо работает
- ▶ SMAA (Subpixel Morphological Anti-Aliasing): как FXAA, но больше эвристик
  - ▶ Дороже чем FXAA, результат лучше

# FXAA, SMAA, TAA

- ▶ FXAA (Fast approXimate Anti-Aliasing): специальный шейдер пост-обработки, на основе эвристик вычисляющий места, в которых нужно сгладить изображение
  - ▶ Недорогой алгоритм, приемлемо работает
- ▶ SMAA (Subpixel Morphological Anti-Aliasing): как FXAA, но больше эвристик
  - ▶ Дороже чем FXAA, результат лучше
- ▶ TAA (Temporal Anti-Aliasing): усредняем значение пикселя со значением этого же пикселя на предыдущем кадре с учётом изменившегося положения камеры (temporal reprojection)
  - ▶ Нужны эвристики чтобы отличить тот же пиксель с предыдущего кадра от случайно туда попавшего пикселя
  - ▶ Нужно знать скорость движения пикселей для движущихся объектов, чтобы правильно работал temporal reprojection
  - ▶ Приводит к лёгкому размытию при движении (из-за чего его часто ругают)
  - ▶ Обычно используется в крупных движках



## Anti-aliasing: ссылки

- ▶ [khronos.org/opengl/wiki/Multisampling](https://www.khronos.org/opengl/wiki/Multisampling)
- ▶ [learnopengl.com/Advanced-OpenGL/Anti-Aliasing](https://learnopengl.com/Advanced-OpenGL/Anti-Aliasing)
- ▶ Статья про разные методы антиалиасинга

# Volume rendering

- ▶ Рендеринг объектов, заданных распределением свойств в пространстве:

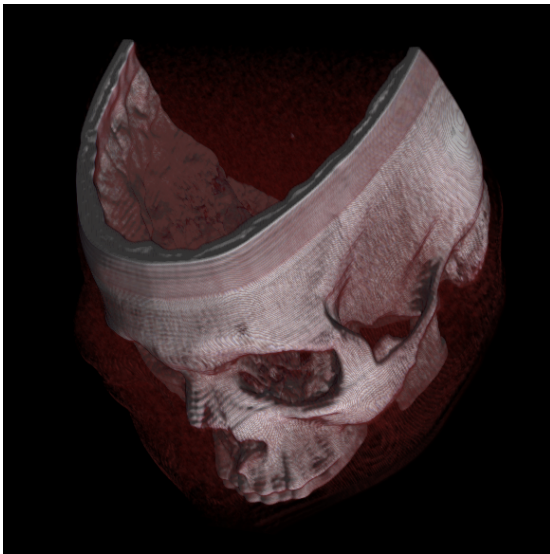
# Volume rendering

- ▶ Рендеринг объектов, заданных распределением свойств в пространстве:
  - ▶ Цвет
  - ▶ Прозрачность
  - ▶ Параметры рассеивания

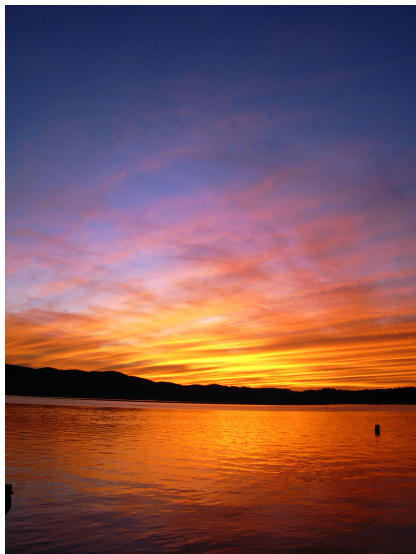
# Volume rendering

- ▶ Рендеринг объектов, заданных распределением свойств в пространстве:
  - ▶ Цвет
  - ▶ Прозрачность
  - ▶ Параметры рассеивания
- ▶ Медицина: КТ-сканы, МРТ-сканы
- ▶ Физика: атмосфера, космические объекты (туманности), жидкости и газы
- ▶ Аппроксимации, основанные на теории volume рендеринга: дым, туман, облака, небо, subsurface scattering

## Volume-rendering черепа



# He6o (Nishita model)





# Volume rendering: теория

- ▶ Свет, попавший в некую трёхмерную среду, может:



# Volume rendering: теория

- ▶ Свет, попавший в некую трёхмерную среду, может:
  - ▶ Поглотиться (absorption)

# Volume rendering: теория

- ▶ Свет, попавший в некую трёхмерную среду, может:
  - ▶ Поглотиться (absorption)
  - ▶ Рассеяться (scattering), т.е. изменить направление

# Volume rendering: теория

- ▶ Свет, попавший в некую трёхмерную среду, может:
  - ▶ Поглотиться (absorption)
  - ▶ Рассеяться (scattering), т.е. изменить направление
  - ▶ Пройти насквозь

# Volume rendering: теория

- ▶ Свет, попавший в некую трёхмерную среду, может:
  - ▶ Поглотиться (absorption)
  - ▶ Рассеяться (scattering), т.е. изменить направление
  - ▶ Пройти насквозь
- ▶ Кроме того, среда может сама излучать свет (emission)

# Volume rendering: теория

- ▶ Свет, попавший в некую трёхмерную среду, может:
  - ▶ Поглотиться (absorption)
  - ▶ Рассеяться (scattering), т.е. изменить направление
  - ▶ Пройти насквозь
- ▶ Кроме того, среда может сама излучать свет (emission)
- ▶ Absorption + scattering = extinction

# Volume rendering: теория

- ▶ Свет, попавший в некую трёхмерную среду, может:
  - ▶ Поглотиться (absorption)
  - ▶ Рассеяться (scattering), т.е. изменить направление
  - ▶ Пройти насквозь
- ▶ Кроме того, среда может сама излучать свет (emission)
- ▶ Absorption + scattering = extinction
- ▶ Распространение света в такой среде описывается интегро-дифференциальным уравнением для точки (как меняется свет, идущий через точку в таком-то направлении) либо интегральным уравнением для отрезка (как меняется свет, идущий из одной точки в другую точку)

## Volume rendering: теория

- ▶ Коэффициенты поглощения  $k_a$ , рассеяния  $k_s$  и излучения  $k_e$  могут зависеть от

# Volume rendering: теория

- ▶ Коэффициенты поглощения  $k_a$ , рассеяния  $k_s$  и излучения  $k_e$  могут зависеть от
  - ▶ Точки пространства



# Volume rendering: теория

- ▶ Коэффициенты поглощения  $k_a$ , рассеяния  $k_s$  и излучения  $k_e$  могут зависеть от
  - ▶ Точки пространства
  - ▶ Направления движения света

# Volume rendering: теория

- ▶ Коэффициенты поглощения  $k_a$ , рассеяния  $k_s$  и излучения  $k_e$  могут зависеть от
  - ▶ Точки пространства
  - ▶ Направления движения света
  - ▶ Длины волны

# Volume rendering: теория

- ▶ Коэффициенты поглощения  $k_a$ , рассеяния  $k_s$  и излучения  $k_e$  могут зависеть от
  - ▶ Точки пространства
  - ▶ Направления движения света
  - ▶ Длины волны
  - ▶ Угла (рассеяние)

# Volume rendering: теория

- ▶ Коэффициенты поглощения  $k_a$ , рассеяния  $k_s$  и излучения  $k_e$  могут зависеть от
  - ▶ Точки пространства
  - ▶ Направления движения света
  - ▶ Длины волны
  - ▶ Угла (рассеяние)
- ▶  $k_a$  и  $k_s$  обычно задаются в единицах  $m^{-1}$ : отношение количества поглощённого/рассеянного света к длине пройденного пути (для бесконечно малых отрезков)

# Volume rendering: теория

- ▶ Коэффициенты поглощения  $k_a$ , рассеяния  $k_s$  и излучения  $k_e$  могут зависеть от
  - ▶ Точки пространства
  - ▶ Направления движения света
  - ▶ Длины волны
  - ▶ Угла (рассеяние)
- ▶  $k_a$  и  $k_s$  обычно задаются в единицах  $\text{м}^{-1}$ : отношение количества поглощённого/рассеянного света к длине пройденного пути (для бесконечно малых отрезков)
- ▶ Аналогично,  $k_e$  задаётся в единицах люкс· $\text{м}^{-1}$

# Volume rendering: теория

- ▶ Коэффициенты поглощения  $k_a$ , рассеяния  $k_s$  и излучения  $k_e$  могут зависеть от
  - ▶ Точки пространства
  - ▶ Направления движения света
  - ▶ Длины волны
  - ▶ Угла (рассеяние)
- ▶  $k_a$  и  $k_s$  обычно задаются в единицах  $\text{м}^{-1}$ : отношение количества поглощённого/рассеянного света к длине пройденного пути (для бесконечно малых отрезков)
- ▶ Аналогично,  $k_e$  задаётся в единицах люкс· $\text{м}^{-1}$ 
  - ▶ N.B.: часто как  $k_e = k_a + k_s$  обозначают коэффициент исчезновения (extinction)

# Volume rendering: теория

- ▶ Коэффициенты поглощения  $k_a$ , рассеяния  $k_s$  и излучения  $k_e$  могут зависеть от
  - ▶ Точки пространства
  - ▶ Направления движения света
  - ▶ Длины волны
  - ▶ Угла (рассеяние)
- ▶  $k_a$  и  $k_s$  обычно задаются в единицах  $\text{м}^{-1}$ : отношение количества поглощённого/рассеянного света к длине пройденного пути (для бесконечно малых отрезков)
- ▶ Аналогично,  $k_e$  задаётся в единицах люкс· $\text{м}^{-1}$ 
  - ▶ N.B.: часто как  $k_e = k_a + k_s$  обозначают коэффициент исчезновения (extinction)
- ▶ Эти параметры могут также задаваться на единицу плотности вещества (тогда при использовании их надо домножить на плотность)

## Volume rendering: absorption

- ▶ Пусть есть среда с постоянным коэффициентом поглощения  $k_a$



## Volume rendering: absorption

- ▶ Пусть есть среда с постоянным коэффициентом поглощения  $k_a$ 
  - ▶ Вдоль бесконечно малого расстояния  $\Delta x$  поглотится  $k_a \Delta x$  света

# Volume rendering: absorption

- ▶ Пусть есть среда с постоянным коэффициентом поглощения  $k_a$ 
  - ▶ Вдоль бесконечно малого расстояния  $\Delta x$  поглотится  $k_a \Delta x$  света
- ▶ Как много света  $I(p, \omega)$ , выходящего из некой точки  $p$  в направлении  $\omega$ , поглотится на отрезке длины  $L$ , т.е. на отрезке  $[p, p + L\omega]$ ?

# Volume rendering: absorption

- ▶ Пусть есть среда с постоянным коэффициентом поглощения  $k_a$ 
  - ▶ Вдоль бесконечно малого расстояния  $\Delta x$  поглотится  $k_a \Delta x$  света
- ▶ Как много света  $I(p, \omega)$ , выходящего из некой точки  $p$  в направлении  $\omega$ , поглотится на отрезке длины  $L$ , т.е. на отрезке  $[p, p + L\omega]$ ?
- ▶ Разобьём отрезок на  $N$  частей равной длины  $\Delta x = \frac{L}{N}$

# Volume rendering: absorption

- ▶ Пусть есть среда с постоянным коэффициентом поглощения  $k_a$ 
  - ▶ Вдоль бесконечно малого расстояния  $\Delta x$  поглотится  $k_a \Delta x$  света
- ▶ Как много света  $I(p, \omega)$ , выходящего из некой точки  $p$  в направлении  $\omega$ , поглотится на отрезке длины  $L$ , т.е. на отрезке  $[p, p + L\omega]$ ?
- ▶ Разобьём отрезок на  $N$  частей равной длины  $\Delta x = \frac{L}{N}$
- ▶ На первом отрезке поглотится  $k_a \frac{L}{N}$  света, т.е. останется  $1 - k_a \frac{L}{N}$ . На втором поглотится  $k_a \frac{L}{N}$  от того, что осталось после первого отрезка, и всего останется  $(1 - k_a \frac{L}{N})^2$

# Volume rendering: absorption

- ▶ Пусть есть среда с постоянным коэффициентом поглощения  $k_a$ 
  - ▶ Вдоль бесконечно малого расстояния  $\Delta x$  поглотится  $k_a \Delta x$  света
- ▶ Как много света  $I(p, \omega)$ , выходящего из некой точки  $p$  в направлении  $\omega$ , поглотится на отрезке длины  $L$ , т.е. на отрезке  $[p, p + L\omega]$ ?
- ▶ Разобьём отрезок на  $N$  частей равной длины  $\Delta x = \frac{L}{N}$
- ▶ На первом отрезке поглотится  $k_a \frac{L}{N}$  света, т.е. останется  $1 - k_a \frac{L}{N}$ . На втором поглотится  $k_a \frac{L}{N}$  от того, что осталось после первого отрезка, и всего останется  $(1 - k_a \frac{L}{N})^2$
- ▶ Всего после  $N$  отрезков останется  $(1 - k_a \frac{L}{N})^N$  света

# Volume rendering: absorption

- ▶ Пусть есть среда с постоянным коэффициентом поглощения  $k_a$ 
  - ▶ Вдоль бесконечно малого расстояния  $\Delta x$  поглотится  $k_a \Delta x$  света
- ▶ Как много света  $I(p, \omega)$ , выходящего из некой точки  $p$  в направлении  $\omega$ , поглотится на отрезке длины  $L$ , т.е. на отрезке  $[p, p + L\omega]$ ?
- ▶ Разобьём отрезок на  $N$  частей равной длины  $\Delta x = \frac{L}{N}$
- ▶ На первом отрезке поглотится  $k_a \frac{L}{N}$  света, т.е. останется  $1 - k_a \frac{L}{N}$ . На втором поглотится  $k_a \frac{L}{N}$  от того, что осталось после первого отрезка, и всего останется  $(1 - k_a \frac{L}{N})^2$
- ▶ Всего после  $N$  отрезков останется  $(1 - k_a \frac{L}{N})^N$  света
- ▶ В пределе:  $\lim_{N \rightarrow \infty} (1 - k_a \frac{L}{N})^N = \exp(-k_a L)$

## Volume rendering: absorption

- ▶ В пределе:  $I(p + L\omega, \omega) = \exp(-k_a L) I(p, \omega)$

## Volume rendering: absorption

- ▶ В пределе:  $I(p + L\omega, \omega) = \exp(-k_a L) I(p, \omega)$ 
  - ▶ При  $L, k_a \in [0, \infty)$  имеем  $\exp(-k_a L) \in (0, 1]$
  - ▶ Если  $L = 0$ , то весь свет останется (ничего не поглотится)
  - ▶ Если  $L \rightarrow \infty$  и  $k_a > 0$ , то весь свет поглотится



## Volume rendering: absorption

- ▶ В пределе:  $I(p + L\omega, \omega) = \exp(-k_a L) I(p, \omega)$ 
  - ▶ При  $L, k_a \in [0, \infty)$  имеем  $\exp(-k_a L) \in (0, 1]$
  - ▶ Если  $L = 0$ , то весь свет останется (ничего не поглотится)
  - ▶ Если  $L \rightarrow \infty$  и  $k_a > 0$ , то весь свет поглотится
- ▶ Если  $k_a$  не постоянна, получим  $\exp\left(-\int_0^L k_a(p + t\omega) dt\right)$

## Volume rendering: absorption

- ▶ В пределе:  $I(p + L\omega, \omega) = \exp(-k_a L) I(p, \omega)$ 
  - ▶ При  $L, k_a \in [0, \infty)$  имеем  $\exp(-k_a L) \in (0, 1]$
  - ▶ Если  $L = 0$ , то весь свет останется (ничего не поглотится)
  - ▶ Если  $L \rightarrow \infty$  и  $k_a > 0$ , то весь свет поглотится
- ▶ Если  $k_a$  не постоянна, получим  $\exp\left(-\int_0^L k_a(p + t\omega) dt\right)$
- ▶ К тому же результату можно прийти, написав дифференциальное уравнение:
$$\frac{d}{dt} I(p + t\omega, \omega) = -k_a(p + t\omega) I(p + t\omega, \omega)$$

## Volume rendering: absorption

- ▶ В пределе:  $I(p + L\omega, \omega) = \exp(-k_a L) I(p, \omega)$ 
  - ▶ При  $L, k_a \in [0, \infty)$  имеем  $\exp(-k_a L) \in (0, 1]$
  - ▶ Если  $L = 0$ , то весь свет останется (ничего не поглотится)
  - ▶ Если  $L \rightarrow \infty$  и  $k_a > 0$ , то весь свет поглотится
- ▶ Если  $k_a$  не постоянна, получим  $\exp\left(-\int_0^L k_a(p + t\omega) dt\right)$
- ▶ К тому же результату можно прийти, написав дифференциальное уравнение:
$$\frac{d}{dt} I(p + t\omega, \omega) = -k_a(p + t\omega) I(p + t\omega, \omega)$$
- ▶ Величина  $\int_0^L k_a(p + t\omega) dt$  называется *оптической глубиной* (*optical depth*)

## Volume rendering: emission

- ▶ Пусть есть среда с постоянным коэффициентом излучения  $k_e$ , т.е. для бесконечно малого расстояния  $\Delta x$  излучится  $k_e \Delta x$  света

## Volume rendering: emission

- ▶ Пусть есть среда с постоянным коэффициентом излучения  $k_e$ , т.е. для бесконечно малого расстояния  $\Delta x$  излучится  $k_e \Delta x$  света
- ▶ Как много света излучится на отрезке длины  $[p, p + L\omega]$  в направлении  $\omega$ ?

## Volume rendering: emission

- ▶ Пусть есть среда с постоянным коэффициентом излучения  $k_e$ , т.е. для бесконечно малого расстояния  $\Delta x$  излучится  $k_e \Delta x$  света
- ▶ Как много света излучится на отрезке длины  $[p, p + L\omega]$  в направлении  $\omega$ ?
- ▶  $I(p + L\omega, \omega) = I(p, \omega) + k_e L$

## Volume rendering: emission

- ▶ Пусть есть среда с постоянным коэффициентом излучения  $k_e$ , т.е. для бесконечно малого расстояния  $\Delta x$  излучится  $k_e \Delta x$  света
- ▶ Как много света излучится на отрезке длины  $[p, p + L\omega]$  в направлении  $\omega$ ?
- ▶  $I(p + L\omega, \omega) = I(p, \omega) + k_e L$
- ▶ Если  $k_e$  не постоянна:

$$I(p + L\omega, \omega) = I(p, \omega) + \int_0^L k_e(p + t\omega) dt$$

## Volume rendering: absorption + emission

- ▶ Пусть есть среда с постоянным коэффициентом поглощения  $k_a$  и излучения  $k_e$ , т.е. для бесконечно малого расстояния  $\Delta x$  излучится  $k_e \Delta x$  и поглотится  $k_a \Delta x$  света



## Volume rendering: absorption + emission

- ▶ Пусть есть среда с постоянным коэффициентом поглощения  $k_a$  и излучения  $k_e$ , т.е. для бесконечно малого расстояния  $\Delta x$  излучится  $k_e \Delta x$  и поглотится  $k_a \Delta x$  света
- ▶ Как много света излучится на отрезке длины  $L$ ?

## Volume rendering: absorption + emission

- ▶ Пусть есть среда с постоянным коэффициентом поглощения  $k_a$  и излучения  $k_e$ , т.е. для бесконечно малого расстояния  $\Delta x$  излучится  $k_e \Delta x$  и поглотится  $k_a \Delta x$  света
- ▶ Как много света излучится на отрезке длины  $L$ ?
- ▶ Разобьём отрезок на  $N$  частей равной длины  $\Delta x = \frac{L}{N}$

## Volume rendering: absorption + emission

- ▶ Пусть есть среда с постоянным коэффициентом поглощения  $k_a$  и излучения  $k_e$ , т.е. для бесконечно малого расстояния  $\Delta x$  излучится  $k_e \Delta x$  и поглотится  $k_a \Delta x$  света
- ▶ Как много света излучится на отрезке длины  $L$ ?
- ▶ Разобьём отрезок на  $N$  частей равной длины  $\Delta x = \frac{L}{N}$
- ▶ На первом отрезке излучится  $k_e \Delta x$  света. На втором отрезке излучится  $k_e \Delta x$  света, плюс  $(1 - k_a \Delta x) k_e \Delta x$  от первого отрезка, в сумме  $(1 + (1 - k_a \Delta x)) k_e \Delta x$

## Volume rendering: absorption + emission

- ▶ Пусть есть среда с постоянным коэффициентом поглощения  $k_a$  и излучения  $k_e$ , т.е. для бесконечно малого расстояния  $\Delta x$  излучится  $k_e \Delta x$  и поглотится  $k_a \Delta x$  света
- ▶ Как много света излучится на отрезке длины  $L$ ?
- ▶ Разобьём отрезок на  $N$  частей равной длины  $\Delta x = \frac{L}{N}$
- ▶ На первом отрезке излучится  $k_e \Delta x$  света. На втором отрезке излучится  $k_e \Delta x$  света, плюс  $(1 - k_a \Delta x) k_e \Delta x$  от первого отрезка, в сумме  $(1 + (1 - k_a \Delta x)) k_e \Delta x$
- ▶ На третьем отрезке в сумме  $(1 + (1 - k_a \Delta x) + (1 - k_a \Delta x)^2) k_e \Delta x$

## Volume rendering: absorption + emission

- ▶ Пусть есть среда с постоянным коэффициентом поглощения  $k_a$  и излучения  $k_e$ , т.е. для бесконечно малого расстояния  $\Delta x$  излучится  $k_e \Delta x$  и поглотится  $k_a \Delta x$  света
- ▶ Как много света излучится на отрезке длины  $L$ ?
- ▶ Разобьём отрезок на  $N$  частей равной длины  $\Delta x = \frac{L}{N}$
- ▶ На первом отрезке излучится  $k_e \Delta x$  света. На втором отрезке излучится  $k_e \Delta x$  света, плюс  $(1 - k_a \Delta x) k_e \Delta x$  от первого отрезка, в сумме  $(1 + (1 - k_a \Delta x)) k_e \Delta x$
- ▶ На третьем отрезке в сумме  $(1 + (1 - k_a \Delta x) + (1 - k_a \Delta x)^2) k_e \Delta x$
- ▶ На  $N$  отрезках:  $\frac{1 - (1 - k_a \Delta x)^N}{k_a \Delta x} k_e \Delta x = \frac{1 - (1 - k_a \Delta x)^N}{k_a} k_e$

## Volume rendering: absorption + emission

- ▶ Пусть есть среда с постоянным коэффициентом поглощения  $k_a$  и излучения  $k_e$ , т.е. для бесконечно малого расстояния  $\Delta x$  излучится  $k_e \Delta x$  и поглотится  $k_a \Delta x$  света
- ▶ Как много света излучится на отрезке длины  $L$ ?
- ▶ Разобьём отрезок на  $N$  частей равной длины  $\Delta x = \frac{L}{N}$
- ▶ На первом отрезке излучится  $k_e \Delta x$  света. На втором отрезке излучится  $k_e \Delta x$  света, плюс  $(1 - k_a \Delta x) k_e \Delta x$  от первого отрезка, в сумме  $(1 + (1 - k_a \Delta x)) k_e \Delta x$
- ▶ На третьем отрезке в сумме  $(1 + (1 - k_a \Delta x) + (1 - k_a \Delta x)^2) k_e \Delta x$
- ▶ На  $N$  отрезках:  $\frac{1 - (1 - k_a \Delta x)^N}{k_a \Delta x} k_e \Delta x = \frac{1 - (1 - k_a \Delta x)^N}{k_a} k_e$
- ▶ В пределе:  $\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1 - (1 - k_a \Delta x)^N}{k_a} k_e = \frac{1 - \exp(-k_a L)}{k_a} k_e$

## Volume rendering: absorption + emission

$$\blacktriangleright I(p + L\omega, \omega) = \frac{1 - \exp(-k_a L)}{k_a} k_e$$

## Volume rendering: absorption + emission

- ▶  $I(p + L\omega, \omega) = \frac{1 - \exp(-k_a L)}{k_a} k_e$
- ▶ Сингулярность при  $k_a = 0$ , в пределе  $k_a \rightarrow 0$  получим  $Lk_e$



## Volume rendering: absorption + emission

- ▶  $I(p + L\omega, \omega) = \frac{1 - \exp(-k_a L)}{k_a} k_e$
- ▶ Сингулярность при  $k_a = 0$ , в пределе  $k_a \rightarrow 0$  получим  $Lk_e$
- ▶ В пределе при  $L \rightarrow \infty$  получим  $\frac{k_e}{k_a}$

## Volume rendering: absorption + emission

- ▶  $I(p + L\omega, \omega) = \frac{1 - \exp(-k_a L)}{k_a} k_e$
- ▶ Сингулярность при  $k_a = 0$ , в пределе  $k_a \rightarrow 0$  получим  $Lk_e$
- ▶ В пределе при  $L \rightarrow \infty$  получим  $\frac{k_e}{k_a}$
- ▶ Если  $k_a$  и  $k_e$  не постоянны, получим

$$I(p + L\omega, \omega) = \int_0^L k_e(p + t\omega) \exp\left(-\int_t^L k_a(p + s\omega) ds\right) dt$$

## Volume rendering: absorption + emission

- ▶  $I(p + L\omega, \omega) = \frac{1 - \exp(-k_a L)}{k_a} k_e$
- ▶ Сингулярность при  $k_a = 0$ , в пределе  $k_a \rightarrow 0$  получим  $Lk_e$
- ▶ В пределе при  $L \rightarrow \infty$  получим  $\frac{k_e}{k_a}$
- ▶ Если  $k_a$  и  $k_e$  не постоянны, получим

$$I(p + L\omega, \omega) = \int_0^L k_e(p + t\omega) \exp\left(-\int_t^L k_a(p + s\omega) ds\right) dt$$

- ▶ Соответствующее дифференциальное уравнение:  
 $\frac{d}{dt} I(p + t\omega, \omega) = k_e(p + t\omega) - k_a(p + t\omega) I(p + t\omega, \omega)$

## Volume rendering: absorption + emission

- ▶ Если  $I(p, \omega) \neq 0$ , то
$$I(p + L\omega, \omega) = \exp(-k_a L) I(p, \omega) + (1 - \exp(-k_a L)) \frac{k_e}{k_a}$$

## Volume rendering: absorption + emission

- ▶ Если  $I(p, \omega) \neq 0$ , то
$$I(p + L\omega, \omega) = \exp(-k_a L) I(p, \omega) + (1 - \exp(-k_a L)) \frac{k_e}{k_a}$$
- ▶ Если коэффициенты не постоянны, то

$$I(p + L\omega, \omega) = I(p, \omega) \exp \left( - \int_0^L k_a(p + t\omega) dt \right) + \int_0^L k_e(p + t\omega) \exp \left( - \int_t^L k_a(p + s\omega) ds \right) dt \quad (1)$$

## Volume rendering: absorption + emission

- ▶  $\exp(-k_a L)I(p, \omega) + (1 - \exp(-k_a L))\frac{k_e}{k_a}$  можно интерпретировать как линейную интерполяцию между  $I(p, \omega)$  и  $\frac{k_e}{k_a}$  с коэффициентом  $1 - \exp(-k_a L)$

# Volume rendering: absorption + emission

- ▶  $\exp(-k_a L)I(p, \omega) + (1 - \exp(-k_a L))\frac{k_e}{k_a}$  можно интерпретировать как линейную интерполяцию между  $I(p, \omega)$  и  $\frac{k_e}{k_a}$  с коэффициентом  $1 - \exp(-k_a L)$
- ▶ Формализует полупрозрачность:
  - ▶  $I(p, \omega)$  – свет, приходящий сзади объекта в сторону камеры
  - ▶  $k_e/k_a$  – цвет (излучение) самого объекта
  - ▶  $\exp(-k_a L)$  – непрозрачность (opacity)
  - ▶  $1 - \exp(-k_a L)$  – прозрачность (transparency)

# Volume rendering: absorption + emission

- ▶  $\exp(-k_a L)I(p, \omega) + (1 - \exp(-k_a L))\frac{k_e}{k_a}$  можно интерпретировать как линейную интерполяцию между  $I(p, \omega)$  и  $\frac{k_e}{k_a}$  с коэффициентом  $1 - \exp(-k_a L)$
- ▶ Формализует полупрозрачность:
  - ▶  $I(p, \omega)$  – свет, приходящий сзади объекта в сторону камеры
  - ▶  $k_e/k_a$  – цвет (излучение) самого объекта
  - ▶  $\exp(-k_a L)$  – непрозрачность (opacity)
  - ▶  $1 - \exp(-k_a L)$  – прозрачность (transparency)
- ▶ Формализует туман:
  - ▶  $k_e/k_a$  – цвет тумана
  - ▶  $k_a$  – коэффициент ‘густоты’ тумана (чем больше, тем сильнее туман)



## Туман: код шейдера

```
vec3 color = ...;  
vec3 fog_color = ...;  
float fog_absorption = ...;  
  
float camera_distance = length(camera_position - position);  
float optical_depth = camera_distance * fog_absorption;  
float fog_factor = 1 - exp(-optical_depth);  
color = mix(color, fog_color, fog_factor);
```

## Volume rendering: рассеяние (scattering)

- ▶ Любая среда не только поглощает и излучает свет, но и *рассеивает* его, т.е. меняет направление его движения

## Volume rendering: рассеяние (scattering)

- ▶ Любая среда не только поглощает и излучает свет, но и *рассеивает* его, т.е. меняет направление его движения
- ▶ Рассеяние описывается фазовой функцией (phase function):  
 $f(p, \theta)$  – количество света, рассеянное на угол  $\theta$  в точке  $p$

## Volume rendering: рассеяние (scattering)

- ▶ Любая среда не только поглощает и излучает свет, но и *рассеивает* его, т.е. меняет направление его движения
- ▶ Рассеяние описывается фазовой функцией (phase function):  $f(p, \theta)$  – количество света, рассеянное на угол  $\theta$  в точке  $p$
- ▶ Аналог BRDF для volume rendering'a

## Volume rendering: рассеяние (scattering)

- ▶ Любая среда не только поглощает и излучает свет, но и *рассеивает* его, т.е. меняет направление его движения
- ▶ Рассеяние описывается фазовой функцией (phase function):  $f(p, \theta)$  – количество света, рассеянное на угол  $\theta$  в точке  $p$
- ▶ Аналог BRDF для volume rendering'а
- ▶ Вид функции зависит от конкретных составляющих среды, часто выводится из решения уравнений Максвелла

# Рассеяние Релея (Rayleigh)

- ▶ Рассеяние света частицами намного меньшими длины волны (например, молекулами газов  $N_2$  и  $O_2$ )

# Рассеяние Релея (Rayleigh)

- ▶ Рассеяние света частицами намного меньшими длины волны (например, молекулами газов  $N_2$  и  $O_2$ )
- ▶  $f \cong \frac{1 + \cos(\theta)^2}{\lambda^4}$

# Рассеяние Релея (Rayleigh)

- ▶ Рассеяние света частицами намного меньшими длины волны (например, молекулами газов  $N_2$  и  $O_2$ )
- ▶  $f \cong \frac{1 + \cos(\theta)^2}{\lambda^4}$
- ▶ Больше рассеяния вперёд и назад, чем в стороны



# Рассеяние Релея (Rayleigh)

- ▶ Рассеяние света частицами намного меньшими длины волны (например, молекулами газов  $N_2$  и  $O_2$ )
- ▶  $f \cong \frac{1 + \cos(\theta)^2}{\lambda^4}$
- ▶ Больше рассеяния вперёд и назад, чем в стороны
- ▶ Короткие волны (e.g. синие) рассеиваются намного больше длинных (e.g. красных)

# Рассеяние Релея (Rayleigh)

- ▶ Рассеяние света частицами намного меньшими длины волны (например, молекулами газов  $N_2$  и  $O_2$ )
- ▶  $f \cong \frac{1 + \cos(\theta)^2}{\lambda^4}$
- ▶ Больше рассеяния вперёд и назад, чем в стороны
- ▶ Короткие волны (e.g. синие) рассеиваются намного больше длинных (e.g. красных)
- ▶ Главный эффект, ответственный за цвет неба:

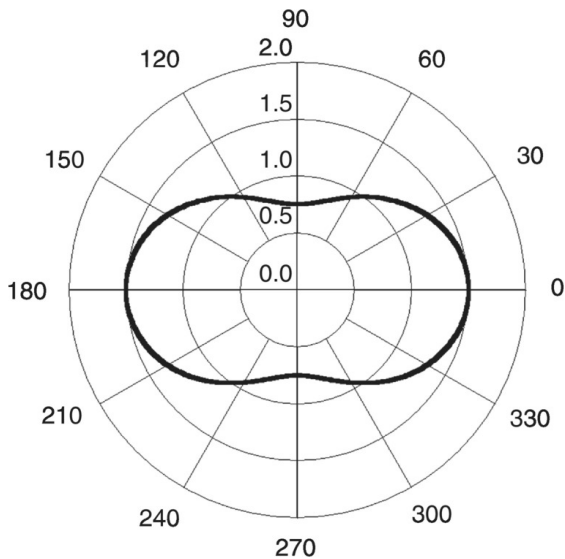
# Рассеяние Релея (Rayleigh)

- ▶ Рассеяние света частицами намного меньшими длины волны (например, молекулами газов  $N_2$  и  $O_2$ )
- ▶  $f \cong \frac{1 + \cos(\theta)^2}{\lambda^4}$
- ▶ Больше рассеяния вперёд и назад, чем в стороны
- ▶ Короткие волны (е.g. синие) рассеиваются намного больше длинных (е.g. красных)
- ▶ Главный эффект, ответственный за цвет неба:
  - ▶ Свет, проходящий сквозь атмосферу, рассеивается в основном в синем диапазоне, поэтому небо синее

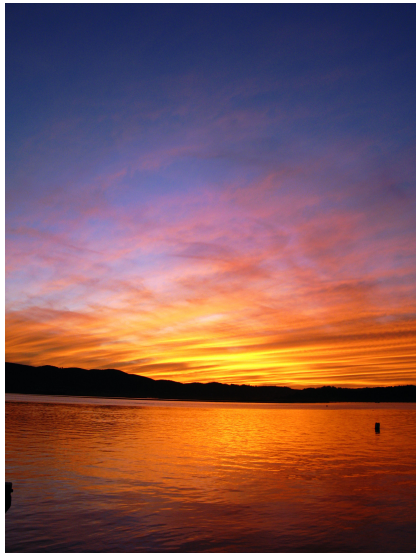
# Рассеяние Релея (Rayleigh)

- ▶ Рассеяние света частицами намного меньшими длины волны (например, молекулами газов  $N_2$  и  $O_2$ )
- ▶  $f \cong \frac{1 + \cos(\theta)^2}{\lambda^4}$
- ▶ Больше рассеяния вперёд и назад, чем в стороны
- ▶ Короткие волны (e.g. синие) рассеиваются намного больше длинных (e.g. красных)
- ▶ Главный эффект, ответственный за цвет неба:
  - ▶ Свет, проходящий сквозь атмосферу, рассеивается в основном в синем диапазоне, поэтому небо синее
  - ▶ Свет, идущий от солнца на закате/восходе, дольше идёт через атмосферу и теряет весь синий свет и часть зелёного, поэтому выглядит оранжевым или красным

## Рассеяние Релея: phase function



## Рассеяние Релея: цвет неба



# Рассеяние Ми (Mie)

- ▶ Рассеяние света частицами сравнимыми по размеру с длиной волны (например, каплями воды)

# Рассеяние Ми (Mie)

- ▶ Рассеяние света частицами сравнимыми по размеру с длиной волны (например, каплями воды)
- ▶ Точная формула – разложение в ряд по сферическим гармоникам



# Рассеяние Ми (Mie)

- ▶ Рассеяние света частицами сравнимыми по размеру с длиной волны (например, каплями воды)
- ▶ Точная формула – разложение в ряд по сферическим гармоникам
- ▶ Обычно для рендеринга используются аппроксимации

# Рассеяние Ми (Mie)

- ▶ Рассеяние света частицами сравнимыми по размеру с длиной волны (например, каплями воды)
- ▶ Точная формула – разложение в ряд по сферическим гармоникам
- ▶ Обычно для рендеринга используются аппроксимации
- ▶ Влияет на цвет неба (частицы воды, аэрозоли) и облаков

# Henye-Greenstein phase function (1941)

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

- ▶  $g$  – настраиваемый параметр (средний косинус угла рассеяния)
- ▶ Часто используется как аппроксимация вместо более сложных функций

## Volume rendering: рассеяние

- ▶ Значительно усложняет уравнения: свет, пришедший из любого направления, может рассеяться в сторону камеры в любой точке

# Volume rendering: рассеяние

- ▶ Значительно усложняет уравнения: свет, пришедший из любого направления, может рассеяться в сторону камеры в любой точке
- ▶ При расчёте рассеяния различают
  - ▶ Zero scattering: рассеяние не учитывается
  - ▶ Single scattering: учитывается свет, пришедший из источника света и рассеявшийся сразу в направлении камеры (самое часто используемое приближение)
  - ▶ Multiple scattering: свет, пришедший из источника света, может рассеяться много раз и в итоге прийти в камеру

# Volume rendering: применения

- ▶ Для визуализации трёхмерных данных (МРТ-сканы и т.п.) обычно игнорируют рассеяние, и считают среду полупрозрачной и излучающей свет

# Volume rendering: применения

- ▶ Для визуализации трёхмерных данных (МРТ-сканы и т.п.) обычно игнорируют рассеяние, и считают среду полупрозрачной и излучающей свет
  - ▶ Вместо  $k_a$  часто хранят некую "непрозрачность" (как значение альфа-канала), не имеющую физического смысла

# Volume rendering: применения

- ▶ Для визуализации трёхмерных данных (МРТ-сканы и т.п.) обычно игнорируют рассеяние, и считают среду полупрозрачной и излучающей свет
  - ▶ Вместо  $k_a$  часто хранят некую "непрозрачность" (как значение альфа-канала), не имеющую физического смысла
  - ▶ Цвет излучаемого света может храниться в текстуре, а может зависеть от значения альфа-канала (transfer function)



# Volume rendering: применения

- ▶ Для визуализации трёхмерных данных (МРТ-сканы и т.п.) обычно игнорируют рассеяние, и считают среду полупрозрачной и излучающей свет
  - ▶ Вместо  $k_a$  часто хранят некую "непрозрачность" (как значение альфа-канала), не имеющую физического смысла
  - ▶ Цвет излучаемого света может храниться в текстуре, а может зависеть от значения альфа-канала (transfer function)
- ▶ Для визуализации неба, облаков и т.д. рассеяние – обязательная составляющая, коэффициенты часто берут из реальных данных

# Volume rendering: представление данных

- ▶ 3D текстура

# Volume rendering: представление данных

- ▶ 3D текстура
- ▶ Явная функция

# Volume rendering: представление данных

- ▶ 3D текстура
- ▶ Явная функция
- ▶ Интерполяция по сетке из кубов/тетраэдров/etc

# Volume rendering: методы

- ▶ Slicing
- ▶ Splatting
- ▶ Raymarching

## Volume rendering: slicing

- ▶ Объект "разрезается" набором равноудалённых плоскостей, перпендикулярных направлению на камеру (чем больше, тем дороже и точнее)

## Volume rendering: slicing

- ▶ Объект "разрезается" набором равноудалённых плоскостей, перпендикулярных направлению на камеру (чем больше, тем дороже и точнее)
- ▶ Каждый слой (slice) рисуется как текстурированный многоугольник, читая данные из 3D текстуры или из явной функции, задающей объект

## Volume rendering: slicing

- ▶ Объект "разрезается" набором равноудалённых плоскостей, перпендикулярных направлению на камеру (чем больше, тем дороже и точнее)
- ▶ Каждый слой (slice) рисуется как текстурированный многоугольник, читая данные из 3D текстуры или из явной функции, задающей объект
- ▶ Слои накладываются друг на друга с blending'ом



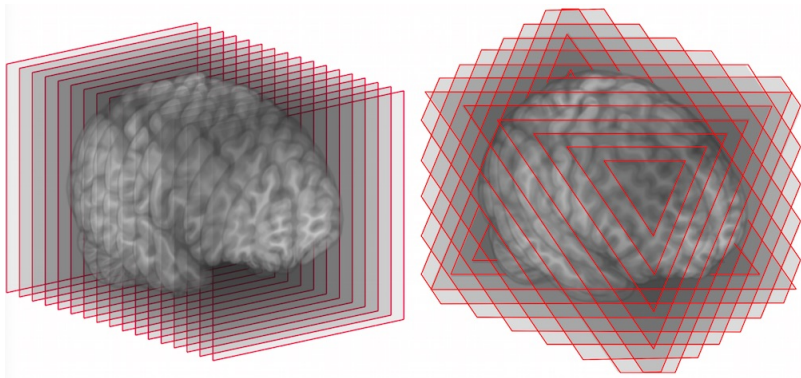
## Volume rendering: slicing

- ▶ Объект "разрезается" набором равноудалённых плоскостей, перпендикулярных направлению на камеру (чем больше, тем дороже и точнее)
- ▶ Каждый слой (slice) рисуется как текстурированный многоугольник, читая данные из 3D текстуры или из явной функции, задающей объект
- ▶ Слои накладываются друг на друга с blending'ом
- ▶ Нужно отсортировать слои от дальнего к ближнему (back-to-front) или наоборот (front-to-back), об этого будет зависеть режим blending'a

## Volume rendering: slicing

- ▶ Объект "разрезается" набором равноудалённых плоскостей, перпендикулярных направлению на камеру (чем больше, тем дороже и точнее)
- ▶ Каждый слой (slice) рисуется как текстурированный многоугольник, читая данные из 3D текстуры или из явной функции, задающей объект
- ▶ Слои накладываются друг на друга с blinding'ом
- ▶ Нужно отсортировать слои от дальнего к ближнему (back-to-front) или наоборот (front-to-back), об этого будет зависеть режим blinding'a
- ▶ В значении альфа-канала нужно учесть расстояние между слоями

## Volume rendering: slicing



# Volume rendering: slicing

- ▶ Нужно обновлять геометрию slice'ов при каждом изменении камеры

## Volume rendering: slicing

- ▶ Нужно обновлять геометрию slice'ов при каждом изменении камеры(это проще, чем звучит)

# Volume rendering: slicing

- ▶ Нужно обновлять геометрию slice'ов при каждом изменении камеры(это проще, чем звучит)
- ▶ Использует встроенный механизм (blending)  $\Rightarrow$  работает достаточно быстро

# Volume rendering: slicing

- ▶ Нужно обновлять геометрию slice'ов при каждом изменении камеры(это проще, чем звучит)
- ▶ Использует встроенный механизм (blending)  $\Rightarrow$  работает достаточно быстро
- ▶ Тяжело учесть освещение/рассеяние

# Volume rendering: slicing

- ▶ Нужно обновлять геометрию slice'ов при каждом изменении камеры(это проще, чем звучит)
- ▶ Использует встроенный механизм (blending)  $\Rightarrow$  работает достаточно быстро
- ▶ Тяжело учесть освещение/рассеяние
- ▶ Часто применяется в медицине



## Volume rendering: splatting

- ▶ Объект рисуется как набор частиц (splats) внутри объёма объекта

# Volume rendering: splatting

- ▶ Объект рисуется как набор частиц (splats) внутри объёма объекта
- ▶ Частицы рисуются как прямоугольники, перпендикулярные направлению на камеру (billboards), с gaussian-текстурой и значениями цвета/прозрачности, взятыми из центра частицы

## Volume rendering: splatting

- ▶ Объект рисуется как набор частиц (splats) внутри объёма объекта
- ▶ Частицы рисуются как прямоугольники, перпендикулярные направлению на камеру (billboards), с gaussian-текстурой и значениями цвета/прозрачности, взятыми из центра частицы
- ▶ Так же, как в slicing'е, нужно отсортировать частицы, правильно настроить blending и значение альфа-канала

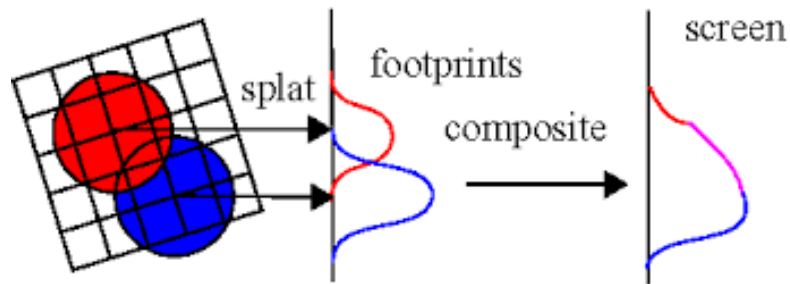
## Volume rendering: splatting

- ▶ Объект рисуется как набор частиц (splats) внутри объёма объекта
- ▶ Частицы рисуются как прямоугольники, перпендикулярные направлению на камеру (billboards), с gaussian-текстурой и значениями цвета/прозрачности, взятыми из центра частицы
- ▶ Так же, как в slicing'е, нужно отсортировать частицы, правильно настроить blending и значение альфа-канала
- ▶ Не нужно менять геометрию каждый кадр, но нужно сортировать частицы

## Volume rendering: splatting

- ▶ Объект рисуется как набор частиц (splats) внутри объёма объекта
- ▶ Частицы рисуются как прямоугольники, перпендикулярные направлению на камеру (billboards), с gaussian-текстурой и значениями цвета/прозрачности, взятыми из центра частицы
- ▶ Так же, как в slicing'е, нужно отсортировать частицы, правильно настроить blending и значение альфа-канала
- ▶ Не нужно менять геометрию каждый кадр, но нужно сортировать частицы
- ▶ Сложнее добиться красивой картинки при малом числе частиц

## Volume rendering: splatting



## Ray\*

Есть несколько алгоритмов, название которых звучит как ray-<глагол>:

Есть несколько алгоритмов, название которых звучит как ray-<глагол>:

- ▶ Raycasting – алгоритм, использовавшийся в старых 3D играх: находится пересечение луча из камеры в конкретном направлении в плоскости XZ со стенами сцены; по расстоянию до пересечения можно вычислить, как рисовать целый столбец пикселей с одинаковой экранной X-координатой



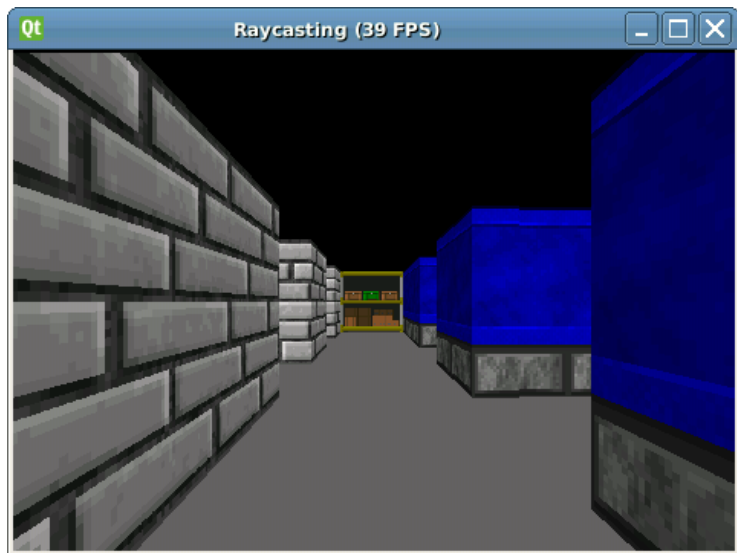
Есть несколько алгоритмов, название которых звучит как ray-<глагол>:

- ▶ Raycasting – алгоритм, использовавшийся в старых 3D играх: находится пересечение луча из камеры в конкретном направлении в плоскости XZ со стенами сцены; по расстоянию до пересечения можно вычислить, как рисовать целый столбец пикселей с одинаковой экранной X-координатой
- ▶ Raytracing – алгоритм, использующийся для фотореалистичного рендеринга: находится пересечение луча из камеры с ближайшим объектом сцены (обычно используя вспомогательные структуры данных для ускорения), после чего из точки пересечения рекурсивно бросаются новые лучи

Есть несколько алгоритмов, название которых звучит как ray-<глагол>:

- ▶ Raycasting – алгоритм, использовавшийся в старых 3D играх: находится пересечение луча из камеры в конкретном направлении в плоскости XZ со стенами сцены; по расстоянию до пересечения можно вычислить, как рисовать целый столбец пикселей с одинаковой экранной X-координатой
- ▶ Raytracing – алгоритм, использующийся для фотореалистичного рендеринга: находится пересечение луча из камеры с ближайшим объектом сцены (обычно используя вспомогательные структуры данных для ускорения), после чего из точки пересечения рекурсивно бросаются новые лучи
- ▶ Raymarching – алгоритм, использующийся для volume рендеринга, screen-space отражений, SDF, и подобного: вдоль луча из камеры выбирается дискретный набор точек (часто - с фиксированным шагом), в этих точках вычисляются значения некоторой функции и (в случае volume рендеринга) по этим точкам вычисляется искомый интеграл

# Raycasting



# Volume rendering: raymarching

- ▶ Рисуется некая грубая оболочка объекта, часто – AABB (axis-aligned bounding box), на неё удобно накладывать 3D-текстуру
  - ▶ Можно с **front-face culling**, чтобы алгоритм работал даже в случае, если камера находится внутри объекта

# Volume rendering: raymarching

- ▶ Рисуется некая грубая оболочка объекта, часто – AABB (axis-aligned bounding box), на неё удобно накладывать 3D-текстуру
  - ▶ Можно с **front-face culling**, чтобы алгоритм работал даже в случае, если камера находится внутри объекта
- ▶ Во фрагментный шейдер передаются координаты точки объекта; по ней вычисляется луч из камеры в точку объекта:  $c + d \cdot t$ , где  $c$  – позиция камеры,  $d$  – единичный вектор направления

# Volume rendering: raymarching

- ▶ Рисуется некая грубая оболочка объекта, часто – AABV (axis-aligned bounding box), на неё удобно накладывать 3D-текстуру
  - ▶ Можно с **front-face culling**, чтобы алгоритм работал даже в случае, если камера находится внутри объекта
- ▶ Во фрагментный шейдер передаются координаты точки объекта; по ней вычисляется луч из камеры в точку объекта:  $c + d \cdot t$ , где  $c$  – позиция камеры,  $d$  – единичный вектор направления
- ▶ Вычисляется пересечение луча с AABV – отрезок значений  $[t_{min}, t_{max}]$ , для которых соответствующие точки луча лежат внутри AABV
  - ▶ Если  $t_{min} < 0$ , нужно сделать его равным 0, иначе в рендеринг попадут точки, находящиеся сзади камеры

## Volume rendering: raymarching

- ▶ Выбирается количество частей  $N$  разбиения отрезка  $[t_{min}, t_{max}]$  (фиксированное, или в зависимости от длины отрезка)

# Volume rendering: raymarching

- ▶ Выбирается количество частей  $N$  разбиения отрезка  $[t_{min}, t_{max}]$  (фиксированное, или в зависимости от длины отрезка)

- ▶ Вдоль отрезка вычисляется аппроксимация интеграла

$$\int_0^L \exp\left(-\int_x^L k_a(s) ds\right) k_e(t) dt \text{ в виде}$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} \exp\left(-\sum_{j=i}^{N-1} k_a(t_j) \Delta t\right) k_e(t_i) \Delta t$$



# Volume rendering: raymarching

- ▶ Выбирается количество частей  $N$  разбиения отрезка  $[t_{min}, t_{max}]$  (фиксированное, или в зависимости от длины отрезка)

- ▶ Вдоль отрезка вычисляется аппроксимация интеграла

$$\int_0^L \exp\left(-\int_x^L k_a(s) ds\right) k_e(t) dt \text{ в виде}$$

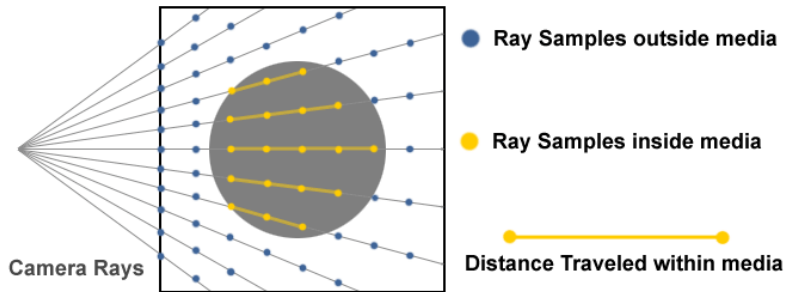
$$\sum_{i=0}^{N-1} \exp\left(-\sum_{j=i}^{N-1} k_a(t_j) \Delta t\right) k_e(t_i) \Delta t$$

- ▶ В качестве  $t_i$  лучше брать центр  $i$ -ого отрезка

# Volume rendering: raymarching

- ▶ Выбирается количество частей  $N$  разбиения отрезка  $[t_{min}, t_{max}]$  (фиксированное, или в зависимости от длины отрезка)
- ▶ Вдоль отрезка вычисляется аппроксимация интеграла  $\int_0^L \exp\left(-\int_x^L k_a(s) ds\right) k_e(t) dt$  в виде  $\sum_{i=0}^{N-1} \exp\left(-\sum_{j=i}^{N-1} k_a(t_j) \Delta t\right) k_e(t_i) \Delta t$
- ▶ В качестве  $t_i$  лучше брать центр  $i$ -ого отрезка
- ▶ Важно следить за направлением: интеграл выводился для луча идущего **в направлении камеры**, а интегрирование мы можем делать как **в направлении камеры** (back-to-front, от  $t_{max}$  к  $t_{min}$ ), так и **в направлении от камеры** (front-to-back, от  $t_{min}$  к  $t_{max}$ )

# Volume rendering: raymarching



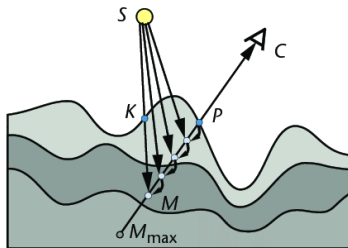
# Volume rendering: raymarching

- ▶ Для учёта рассеяния/освещения можно посылать дополнительные лучи, обрабатываемые тем же алгоритмом

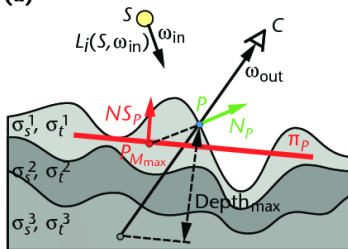
# Volume rendering: raymarching

- ▶ Для учёта рассеяния/освещения можно посылать дополнительные лучи, обрабатываемые тем же алгоритмом
- ▶ Например, послать луч в сторону источника света, вычислить вдоль него optical depth, и по ней получить значение освещённости в точке как количество света, которое не поглотилось и не рассеялось (в GLSL это будет цикл внутри внешнего цикла)

# Volume rendering: raymarching



(a)



(b)

## Raymarching (только absorption): алгоритм

```
dt = (t_max - t_min) / N
opt_depth = 0
for i in 0..N-1:
    t = t_min + (i + 0.5) * dt
    p = start + t * direction
    opt_depth += k_a(p) * dt
abs_factor = exp(-opt_depth)
color = back_color * abs_factor
```

## Raymarching (только absorption): альтернативный алгоритм

```
dt = (t_max - t_min) / N
color = back_color
for i in 0..N-1:
    t = t_min + (i + 0.5) * dt
    p = start + t * direction
    color *= exp(- k_a(p) * dt)
```



## Raymarching (absorption+emission): front-to-back алгоритм

```
dt = (t_max - t_min) / N
opt_depth = 0
color = back_color
for i in 0..N-1:
    t = t_min + (i + 0.5) * dt
    p = start + t * direction
    opt_depth += k_a(p) * dt
    color += exp(-opt_depth) * k_e(p) * dt
```

## Raymarching (absorption+emission): альтернативный front-to-back алгоритм

```
dt = (t_max - t_min) / N
color = back_color
for i in 0..N-1:
    t = t_min + (i + 0.5) * dt
    p = start + t * direction
    color += k_e(p) * dt
    color *= exp(- k_a(p) * dt)
```

## Raymarching (+single scattering в направлении света): front-to-back алгоритм

```
dt = (t_max - t_min) / N
color = back_color
for i in 0..N-1:
    t = t_min + (i + 0.5) * dt
    p = start + t * direction

    light_opt_depth = 0
    // [s_min .. s_max] - пересечение луча
    // в направлении света с AABB объекта
    ds = (s_max - s_min) / M
    for j in 0..M-1:
        s = s_min + (j + 0.5) * ds
        q = p + s * light_direction
        light_opt_depth += (k_a(q) + k_s(q)) * ds

    color += light_color * exp(-light_opt_depth)
        * k_s(p) * dt
        * phase_f(p, light_direction, direction)

color += k_e(p) * dt
color *= exp(- (k_a(p) + k_s(p)) * dt)
```

## Volume rendering: оптимизации

- ▶ Для хорошего качества нужно довольно много шагов вдоль луча (десятки, сотни)

## Volume rendering: оптимизации

- ▶ Для хорошего качества нужно довольно много шагов вдоль луча (десятки, сотни)
- ▶ С учётом внутреннего цикла для рассеяния/освещённости получается ещё на порядок больше

# Volume rendering: оптимизации

- ▶ Для хорошего качества нужно довольно много шагов вдоль луча (десятки, сотни)
- ▶ С учётом внутреннего цикла для рассеяния/освещённости получается ещё на порядок больше
- ▶ Работает очень медленно

# Volume rendering: оптимизации

- ▶ Для хорошего качества нужно довольно много шагов вдоль луча (десятки, сотни)
- ▶ С учётом внутреннего цикла для рассеяния/освещённости получается ещё на порядок больше
- ▶ Работает очень медленно
- ▶ Типичные оптимизации:
  - ▶ Использовать mipmap'ы 3D текстуры для хранения максимальной (вместо усреднённой) полупрозрачности; модифицировать алгоритм, чтобы он пропускал большие полностью прозрачные куски

# Volume rendering: оптимизации

- ▶ Для хорошего качества нужно довольно много шагов вдоль луча (десятки, сотни)
- ▶ С учётом внутреннего цикла для рассеяния/освещённости получается ещё на порядок больше
- ▶ Работает очень медленно
- ▶ Типичные оптимизации:
  - ▶ Использовать mipmap'ы 3D текстуры для хранения максимальной (вместо усреднённой) полупрозрачности; модифицировать алгоритм, чтобы он пропускал большие полностью прозрачные куски
  - ▶ Заканчивать алгоритм при front-to-back проходе, когда текущий вычисленный цвет уже имеет непрозрачность выше некоего порогового значения (напр. 0.99)



# Volume rendering: оптимизации

- ▶ Для хорошего качества нужно довольно много шагов вдоль луча (десятки, сотни)
- ▶ С учётом внутреннего цикла для рассеяния/освещённости получается ещё на порядок больше
- ▶ Работает очень медленно
- ▶ Типичные оптимизации:
  - ▶ Использовать mipmap'ы 3D текстуры для хранения максимальной (вместо усреднённой) полупрозрачности; модифицировать алгоритм, чтобы он пропускал большие полностью прозрачные куски
  - ▶ Заканчивать алгоритм при front-to-back проходе, когда текущий вычисленный цвет уже имеет непрозрачность выше некоего порогового значения (напр. 0.99)
  - ▶ Рисовать объект в меньшем разрешении

# Volume rendering: ссылки

- ▶ GPU Gems, Chapter 39. Volume Rendering Techniques
- ▶ GPU Gems 2, Chapter 16. Accurate Atmospheric Scattering
- ▶ Тьюториал по slicing (старый OpenGL!)
- ▶ Подробнее про цвет неба
- ▶ A Scalable and Production Ready Sky and Atmosphere Rendering Technique (статья 2020 года)
- ▶ Видео-тьюториал про рендеринг атмосферы