

PGR - Fragment Shader, Světlo, Barvy,

Tomáš Milet

Brno University of Technology, Faculty of Information Technology

Božetěchova 1/2. 612 66 Brno - Královo Pole

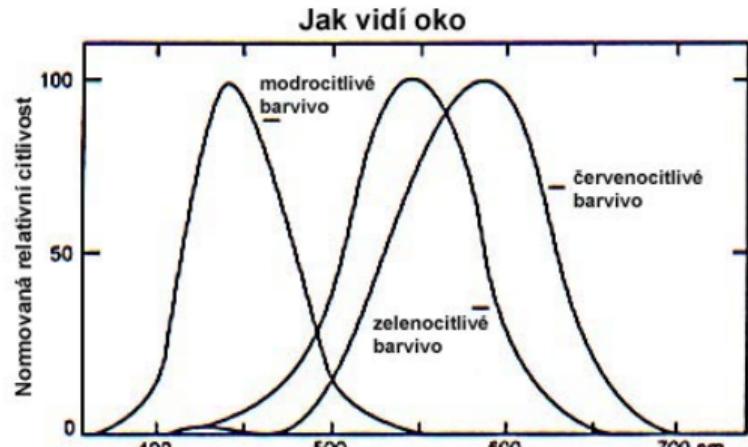
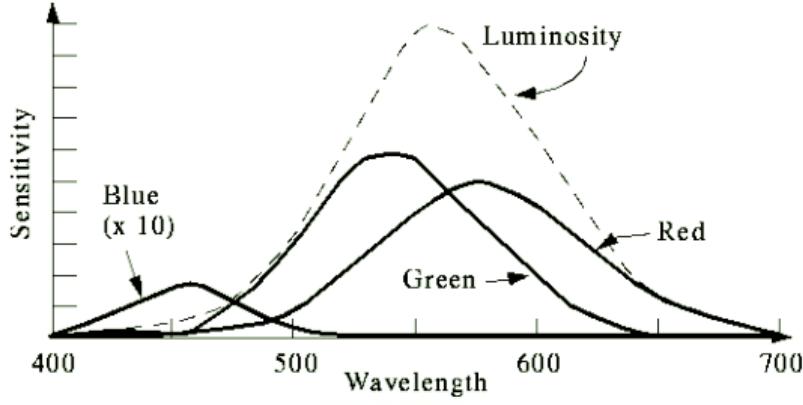
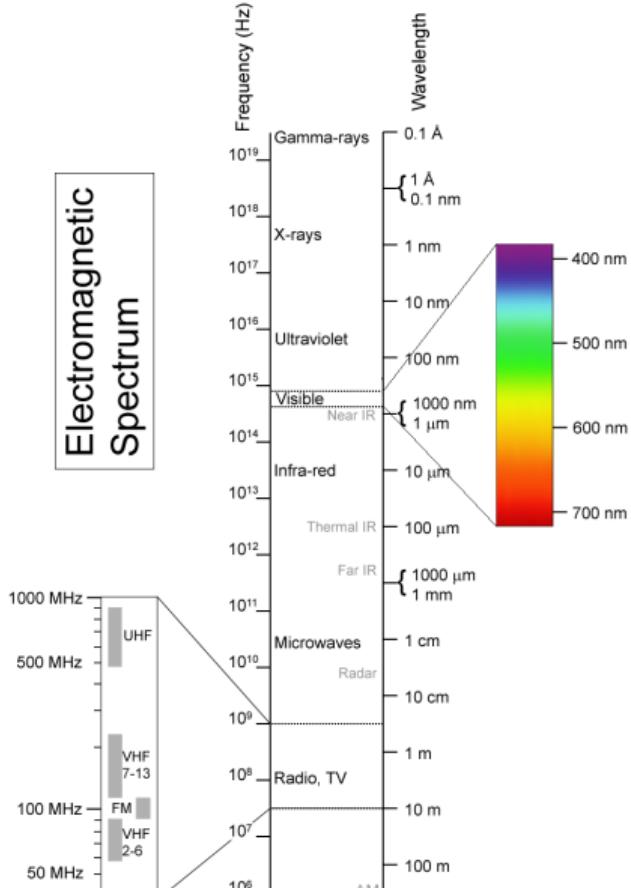
imilet@fit.vutbr.cz

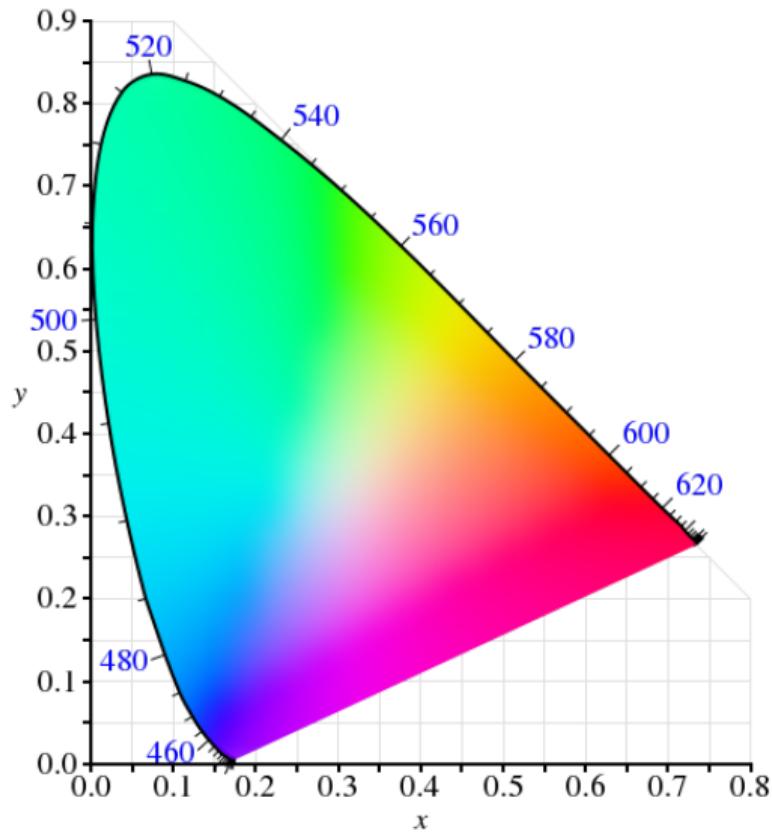


11. listopadu 2021

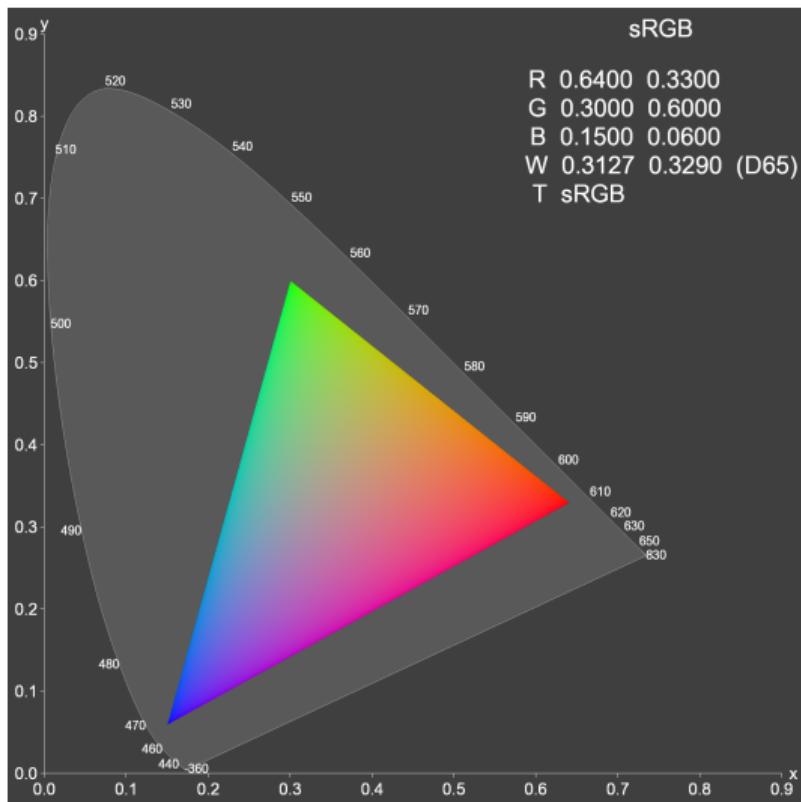
Barva

Electromagnetic Spectrum





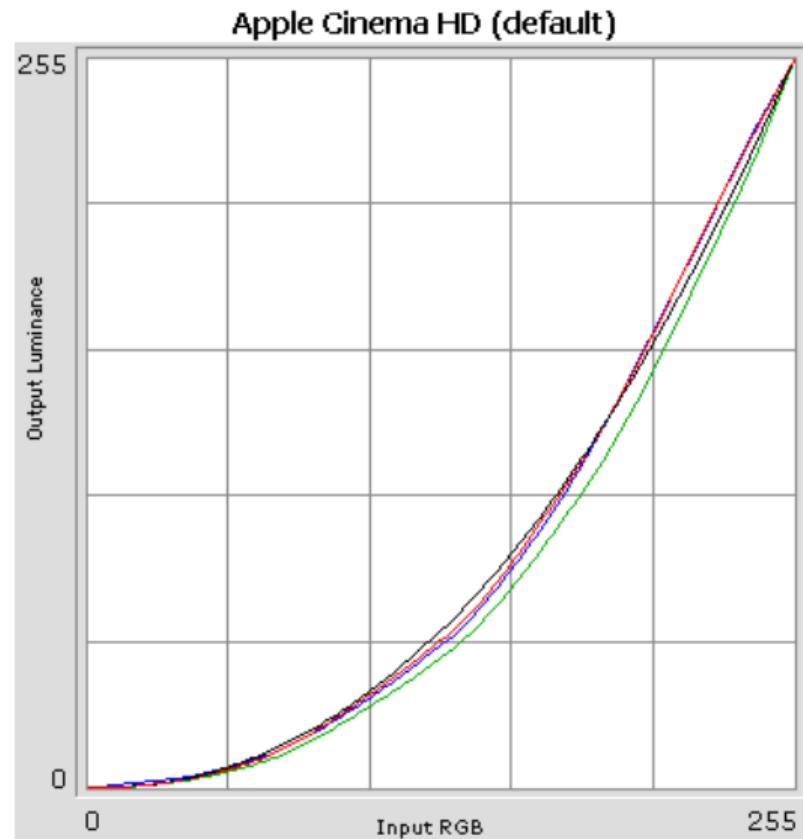
• CIE 1931



Logaritmická citlivost oka

$$C_{\text{srgb}} = \begin{cases} 12.92C_l, & C_l \leq t \\ (1 + a)C_l^{\frac{1}{2.4}} - a, & C_l > t \end{cases}$$

$a = 0.055$
 $t = 0.0031308$



Pipeline :

- float RGB(A) (vec3)
 - (0,0,0) (1,0,0) (0,1,0) (0,0,1)
- ! Lineární barevný prostor - interpolace, blending.

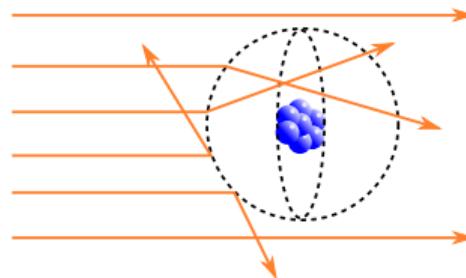
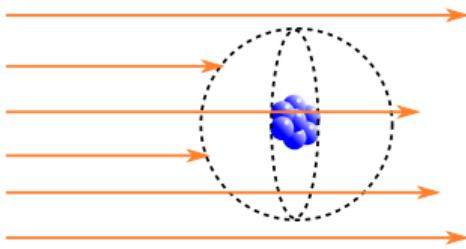
Pipeline :

- float RGB(A) (vec3)
 - (0, 0, 0) (1, 0, 0) (0, 1, 0) (0, 0, 1)
- ! Lineární barevný prostor - interpolace, blending.

Vstupy a framebuffer :

- Nejčastější RGB8
- Další : RGB16, RGB565, ...
- Lineární, nebo sRGB
- Ruční konverze?
- glEnable(GL_SRGB);

Interakce světla a hmoty



Clear media



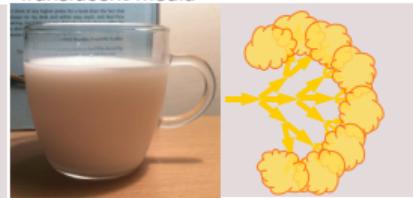
Clear absorbent media



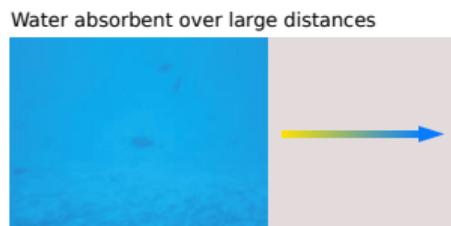
Cloudy media

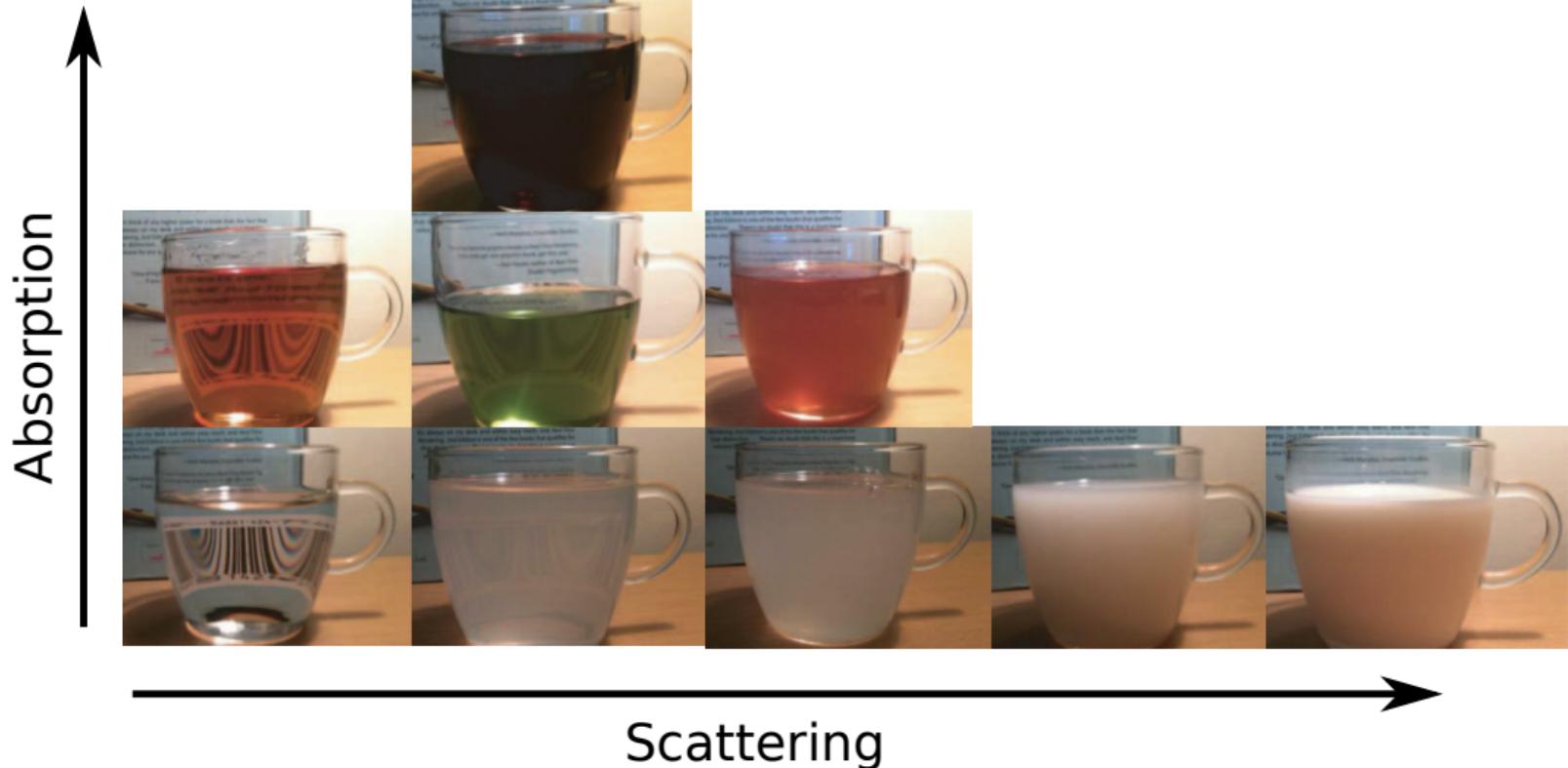


Translucent media

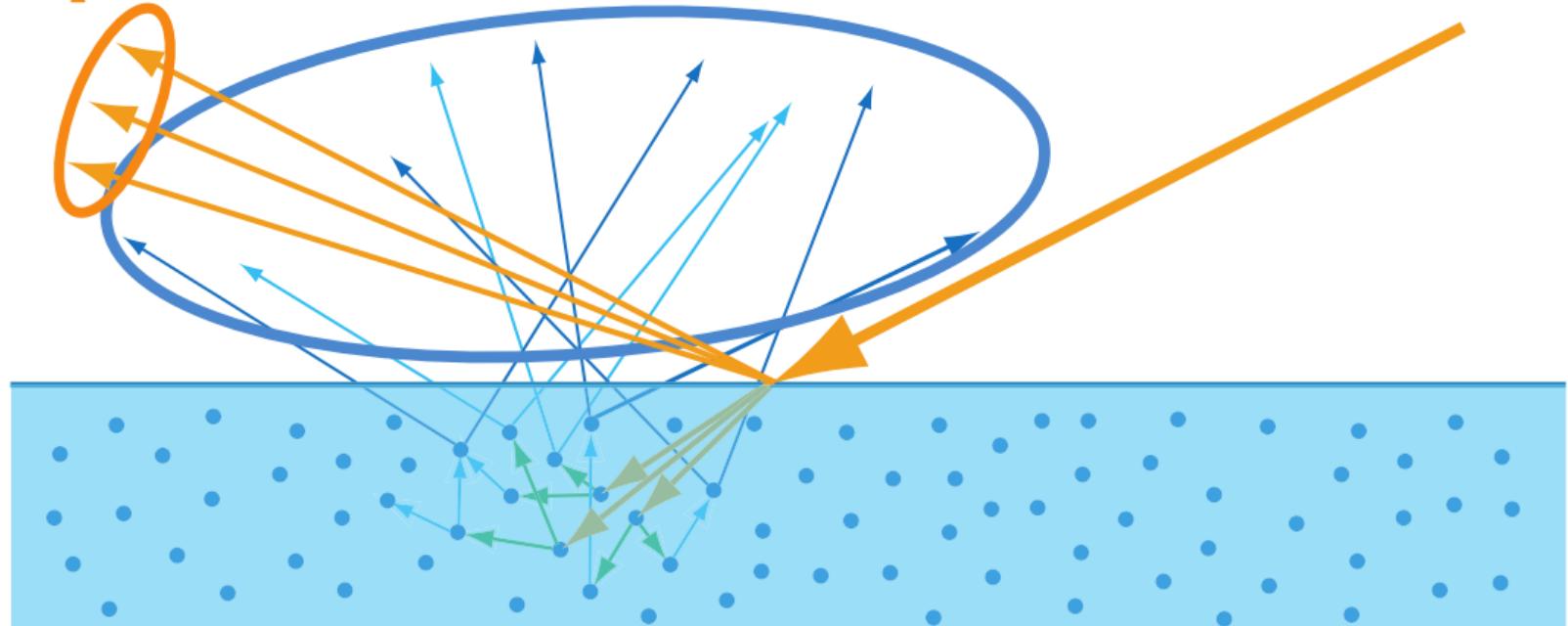


Air scattering over large distances

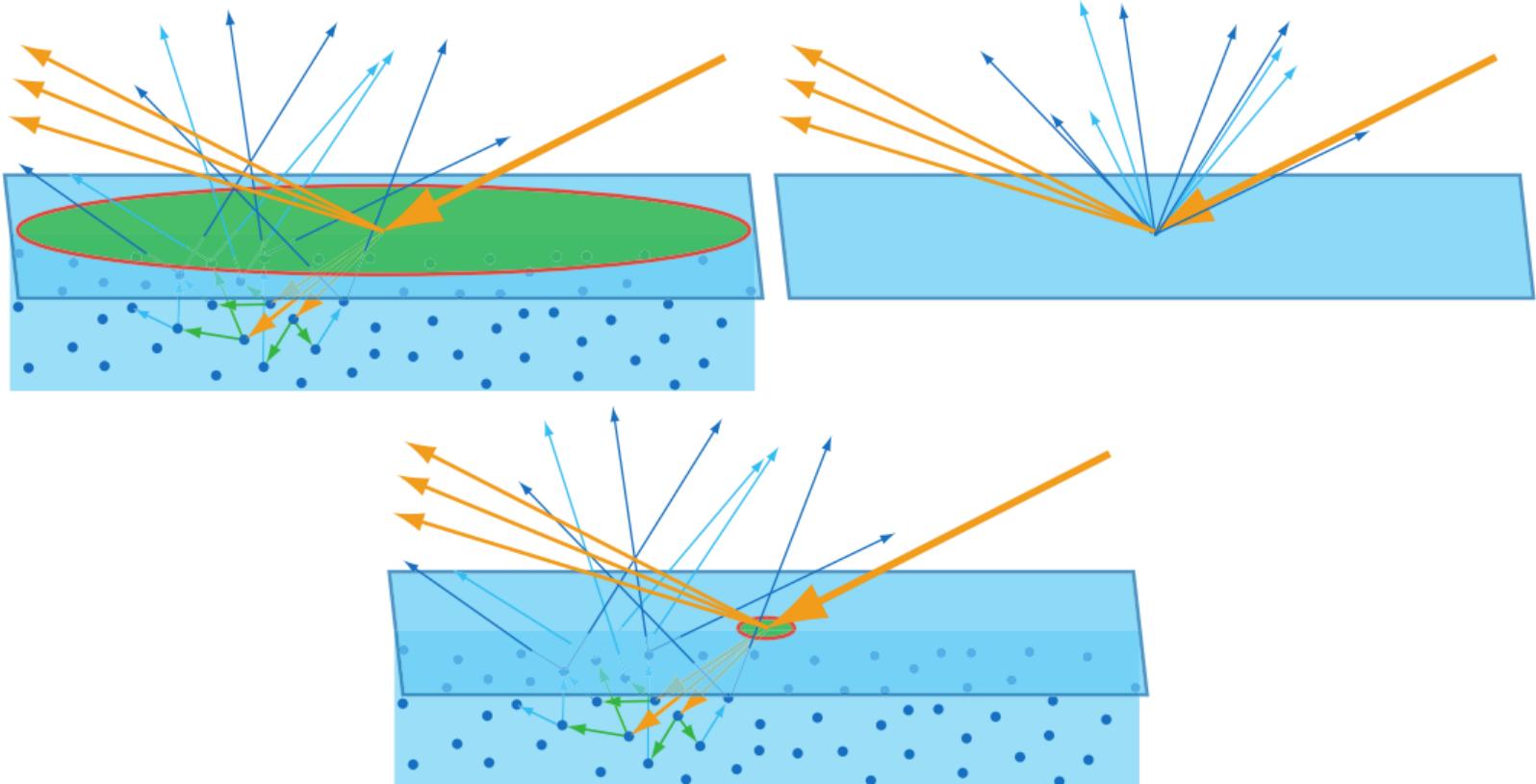


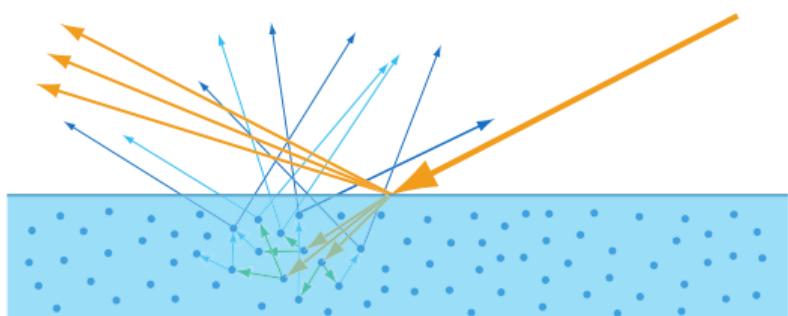
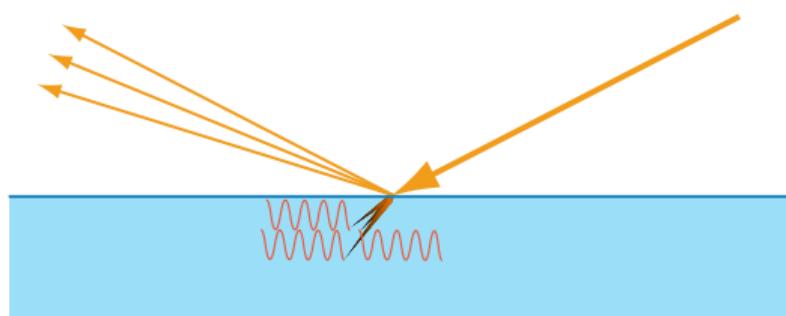


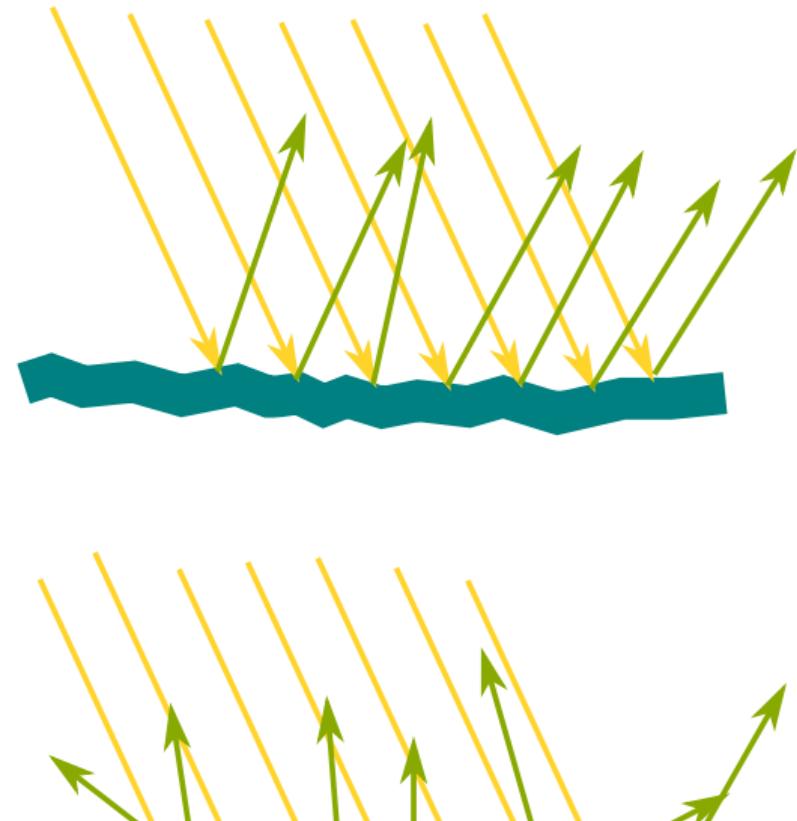
specular **diffuse**

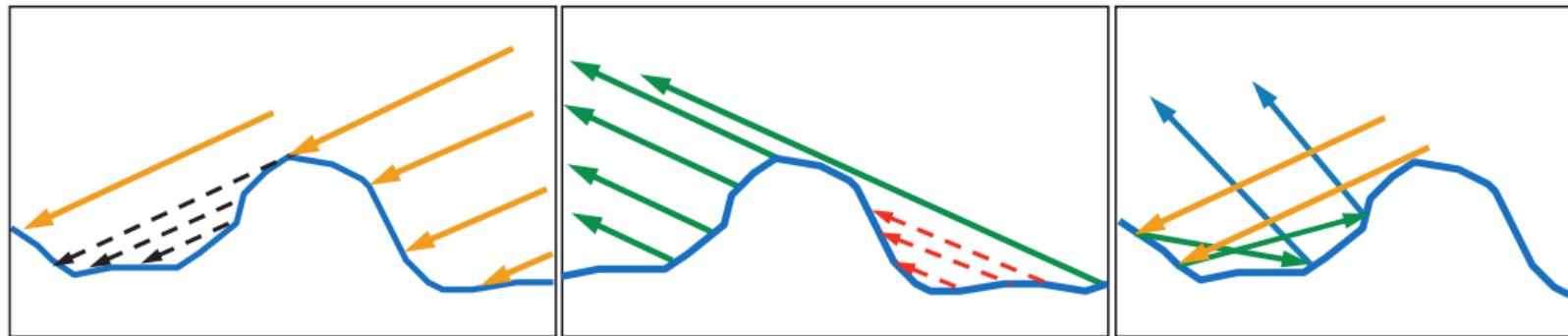


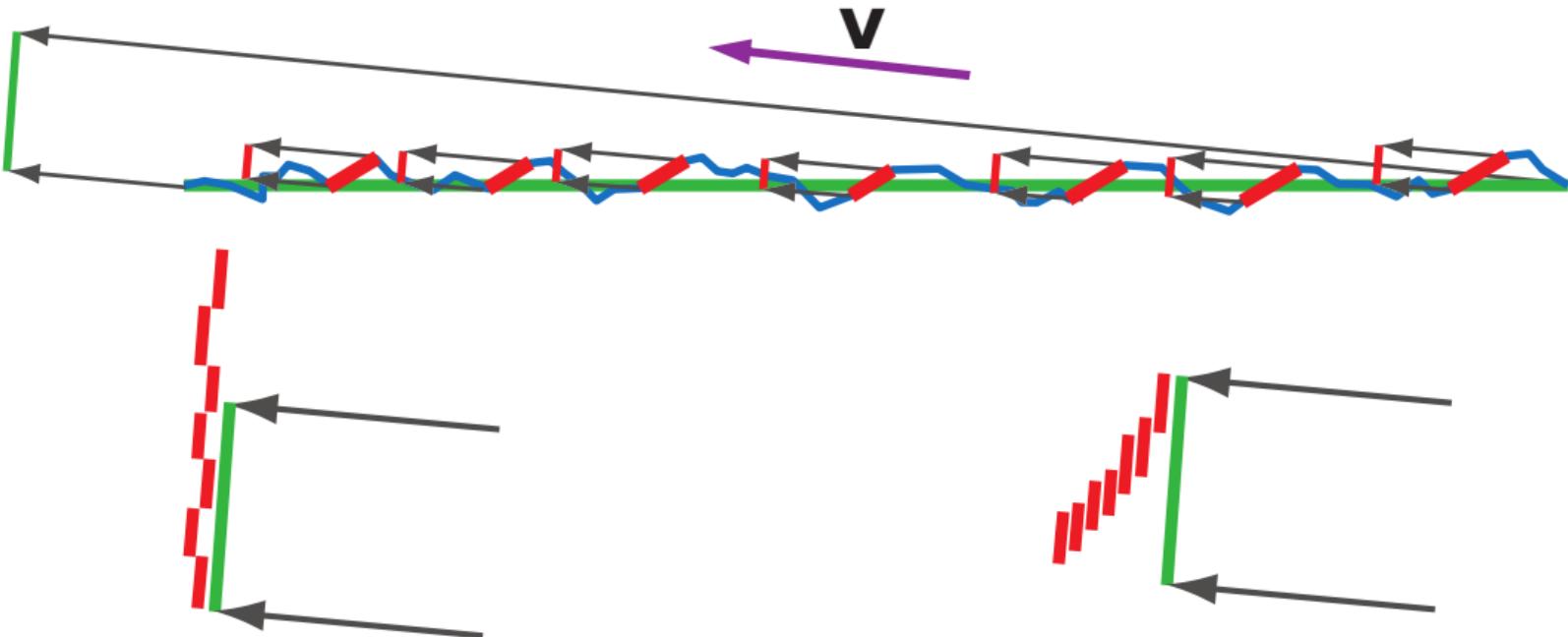
Subsurface scattering









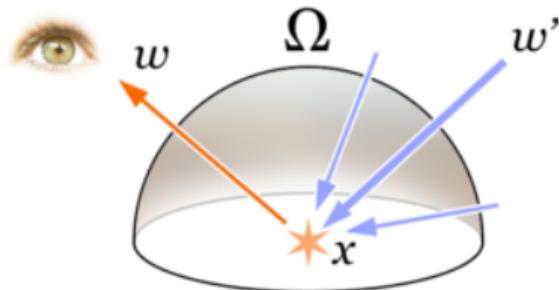








$$L_o(\mathbf{x}, \omega, \lambda, t) = L_e(\mathbf{x}, \omega, \lambda, t) + \int_{\Omega} f_r(\mathbf{x}, \omega', \omega, \lambda, t) L_i(\mathbf{x}, \omega', \lambda, t) (-\omega' \cdot \mathbf{n}) d\omega'$$



Siggraph 1986 :

$$I(x, x') = g(x, x') \left[e(x, x') + \int_S p(x, x', x'') I(x', x'') dx'' \right]$$

- Odraz světla v "jednom bodu".
- Diferenciální ploška scény.

- Odraz světla v "jednom bodu".
- Diferenciální ploška scény.

$$L_{\{o,e,i\}}(\mathbf{x}, \omega, \lambda, t)$$

- Radiance
- $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}(\cdot m^{-1})$

- Odraz světla v "jednom bodu".
- Diferenciální ploška scény.

$$L_{\{o,e,i\}}(\mathbf{x}, \omega, \lambda, t)$$

- Radiance
- $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}(\cdot m^{-1})$

$$f_r(\mathbf{x}, \omega', \omega, \lambda, t)$$

- BRDF
- sr^{-1}

- Bidirectional Reflectance Distribution Function.
- Hustota pravděpodobnosti (skoro).

- Bidirectional Reflectance Distribution Function.
- Hustota pravděpodobnosti (skoro).

Reciprocity

$$f_r(\mathbf{x}, \omega', \omega) = f_r(\mathbf{x}, \omega, \omega')$$

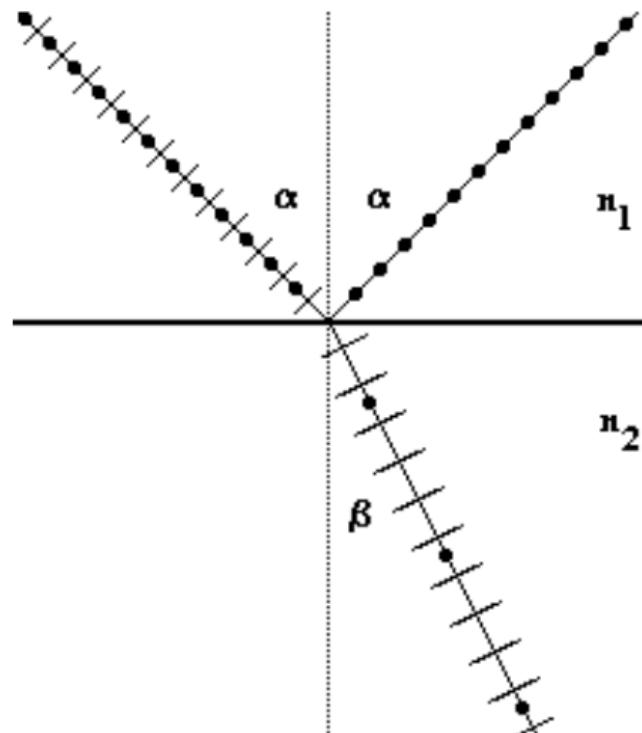
Zákon zachování energie

$$\int_{\Omega} f_r(\mathbf{x}, \omega', \omega) (\omega \cdot \mathbf{n}) d\omega \leq 1$$

Izotropie x Anizotropie

- Phong
- Blinn-Phong
- Cook-Torrance
- GGX
- ...

- Phong
 - Blinn-Phong
 - Cook-Torrance
 - GGX
 - ...
-
- Pragmatické x Fyzikální
 - Výběr podle aplikace.



- Odraz a lom na hranicích prostředí.
- Indexy lomu (rychlosť v daném prostředí).
- Polarizace odrazem.

Fresnellovy vzorce

$$R_s = \left| \frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t} \right|^2$$

- Závislé na polarizaci.
- Nepraktické.

Fresnellovy vzorce

$$R_s = \left| \frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t} \right|^2$$

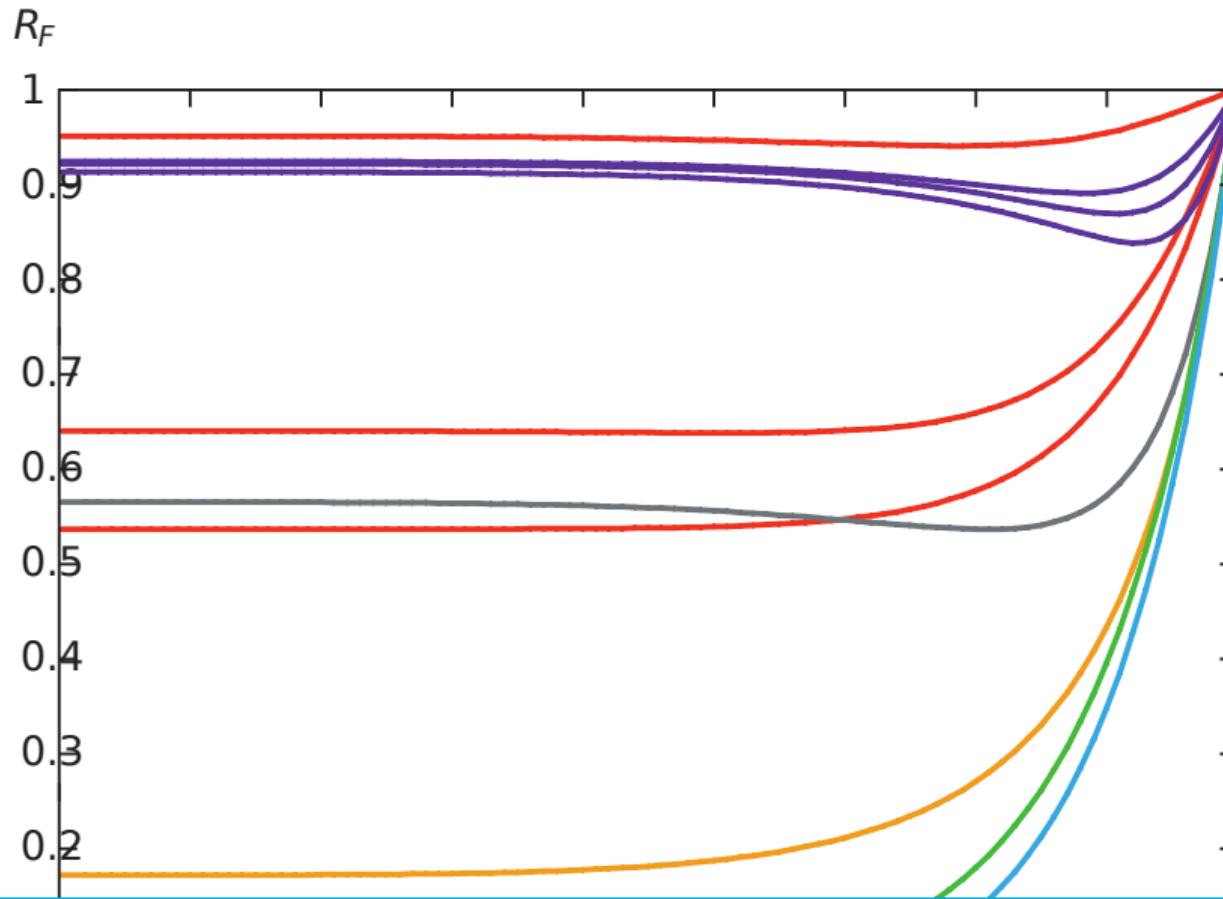
- Závislé na polarizaci.
- Nepraktické.

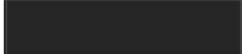
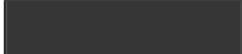
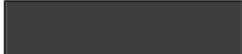
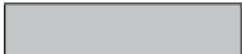
Schlickova aproximace

$$R(\theta) = R_0 + (1 - R_0)(1 - \cos \theta)^5$$

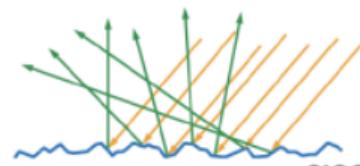
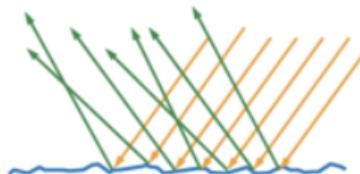
- R_0 je vlastnost materiálu.
- Pro izolanty $R_0 \approx 0.04$.
- $\cos \theta \rightarrow 0 \dots R \rightarrow 1$

Fresnel reflectance

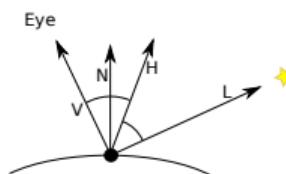


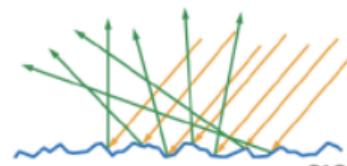
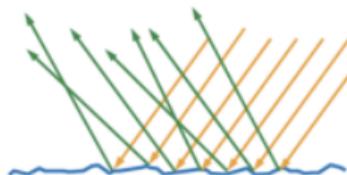
Material	$F(0^\circ)$ (Linear)	$F(0^\circ)$ (sRGB)	Color
Water	0.02,0.02,0.02	0.15,0.15,0.15	
Plastic/Glass(Low)	0.03,0.03,0.03	0.21,0.21,0.21	
PlasticHigh	0.05,0.05,0.05	0.24,0.24,0.24	
Glass(High)/Ruby	0.08,0.08,0.08	0.31,0.31,0.31	
Diamond	0.17,0.17,0.17	0.45,0.45,0.45	
Iron	0.56,0.57,0.58	0.77,0.78,0.78	
Copper	0.95,0.64,0.54	0.98,0.82,0.76	
Gold	1.00,0.71,0.29	1.00,0.86,0.57	
Aluminum	0.91,0.92,0.92	0.96,0.96,0.97	
Silver	0.95,0.93,0.88	0.98,0.97,0.95	



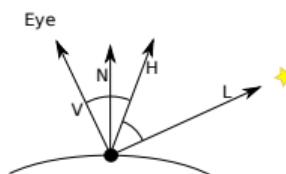


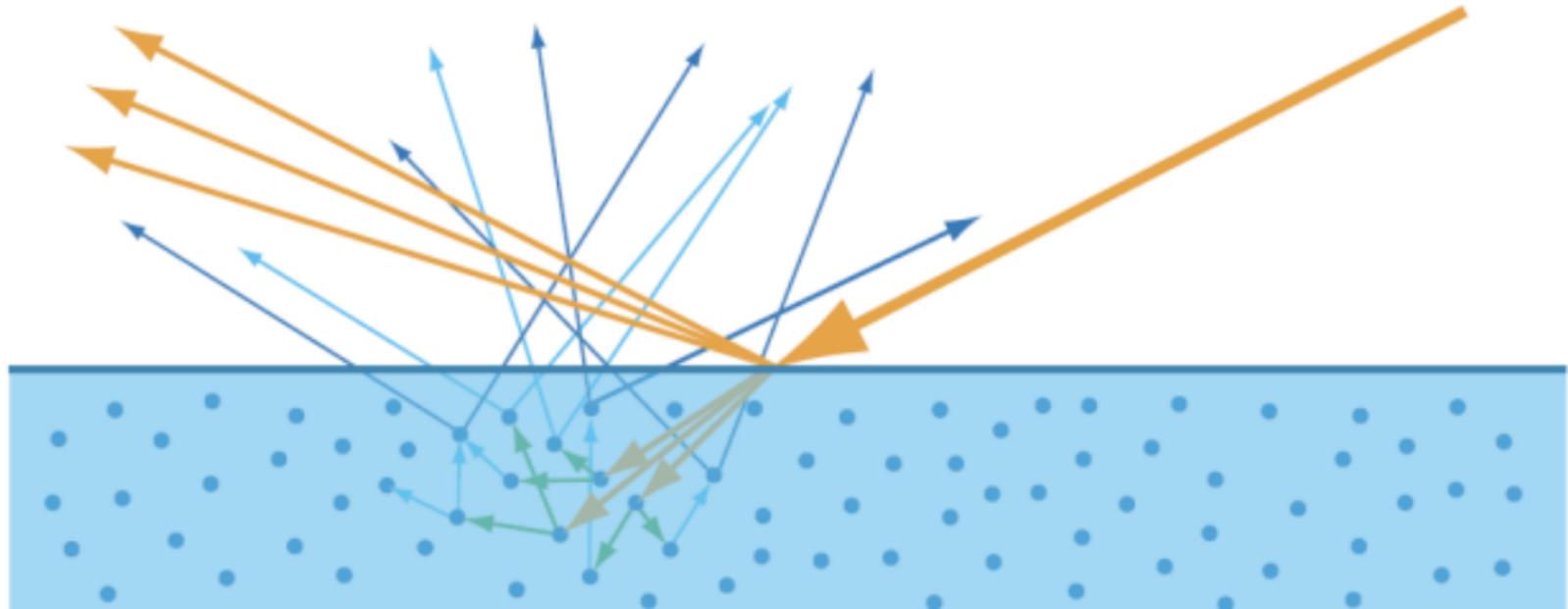
SIGGRAPH2014





SIGGRAPH2014





Specular

- "Zrcadlový" odraz
- Dominantní pro kovy

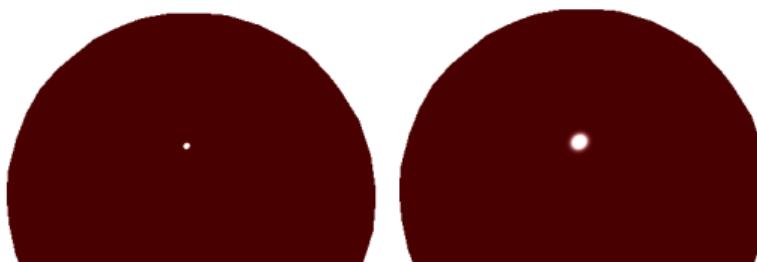
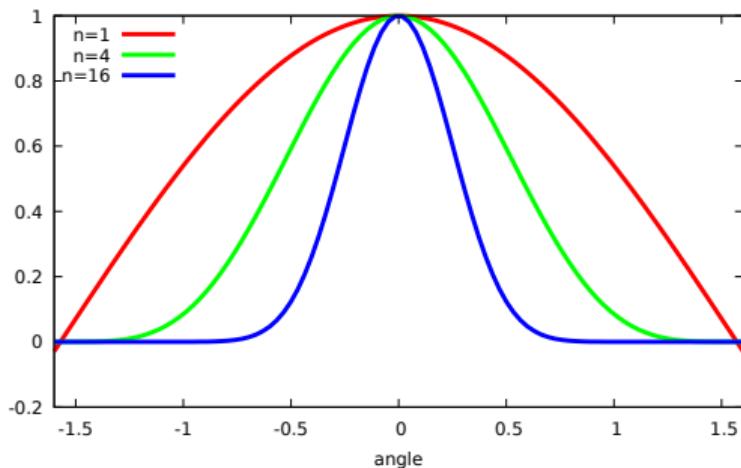
Diffuse

Spekulární odraz

$$f_r(\mathbf{x}, \mathbf{l}, \mathbf{v}) = \frac{F(\mathbf{l}, \mathbf{h}) G(\mathbf{l}, \mathbf{v}, \mathbf{h}) D(\mathbf{h})}{4(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})}$$

- F - Fresnell/Schlick
- D - Distribuční funkce plošek
- G - Geometrické zastínění plošek

$$D(\mathbf{h}) = (\mathbf{n} \cdot \mathbf{h})^{\text{shininess}}$$



$$f_r(\mathbf{x}, \mathbf{l}, \mathbf{v}) = (R_0 + (1 - R_0)(1 - (\mathbf{l} \cdot \mathbf{h}))^5)(\mathbf{n} \cdot \mathbf{h})^{\text{shininess}}$$

Co chybí?

- Barva materiálu (izolantú). R_0 je "barva kovu".
- ! Lomené paprsky.
- Zachování energie.

$$f_r(\mathbf{x}, \mathbf{l}, \mathbf{v}) = \frac{k_d}{\pi}$$

- Nezáleží na poloze pozorovatele.
- $1/\pi$ je zachování energie.

$$\int_{\Omega} 1/\pi d\omega = 1$$

$$\left(\frac{k_s}{\pi} + k_n(R_0 + (1 - R_0)(1 - (\mathbf{l} \cdot \mathbf{h}))^5)(\mathbf{n} \cdot \mathbf{h})^{\text{shininess}} \right) (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})$$

$$k_n = \frac{(\text{shininess} + 2)(\text{shininess} + 4)}{8\pi(2^{-\frac{\text{shininess}}{2}} + \text{shininess})}$$

- $\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}$ z renderovací rovnice.
- Zachování energie pro specular.
- Odvození na <http://www.farbrausch.de/~fg/stuff/phong.pdf>

$$L_o(\mathbf{x}, \omega, \lambda, t) = L_e(\mathbf{x}, \omega, \lambda, t) + \int_{\Omega} f_r(\mathbf{x}, \omega', \omega, \lambda, t) L_i(\mathbf{x}, \omega', \lambda, t) (-\omega' \cdot \mathbf{n}) d\omega'$$

- Bod má nulovou plochu.
- Bodové zdroje jsou singularity.
- Jak upravit renderovací rovnici? Jaké L_i ?

$$L_o(\mathbf{x}, \omega, \lambda, t) = L_e(\mathbf{x}, \omega, \lambda, t) + \int_{\Omega} f_r(\mathbf{x}, \omega', \omega, \lambda, t) L_i(\mathbf{x}, \omega', \lambda, t) (-\omega' \cdot \mathbf{n}) d\omega'$$

- Bod má nulovou plochu.
- Bodové zdroje jsou singularity.
- Jak upravit renderovací rovnici? Jaké L_i ?
- Nastavíme ho přes barvu ideálního difúzního povrchu.

$$L_o = \int_{\Omega} \frac{1}{\pi} L_i(-\omega' \cdot \mathbf{n}) d\omega'$$

$$L_i = \pi L_o$$

$$L = \sum_i \left(\frac{k_s}{\pi} + k_n F(R_0, \mathbf{l}_i, \mathbf{h}_i) (\mathbf{n} \cdot \mathbf{h}_i)^{\text{shininess}} \right) (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}_i) \pi L_i$$

- Sčítáme přes světla.
- π se vykrátí.

$$L = \sum_i \left(\frac{k_s}{\pi} + k_n F(R_0, \mathbf{l}_i, \mathbf{h}_i) (\mathbf{n} \cdot \mathbf{h}_i)^{\text{shininess}} \right) (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}_i) \pi L_i$$

- Sčítáme přes světla.
- π se vykrátí.

Co tam chybí?

$$L = \sum_i \left(\frac{k_s}{\pi} + k_n F(R_0, \mathbf{l}_i, \mathbf{h}_i) (\mathbf{n} \cdot \mathbf{h}_i)^{\text{shininess}} \right) (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}_i) \pi L_i$$

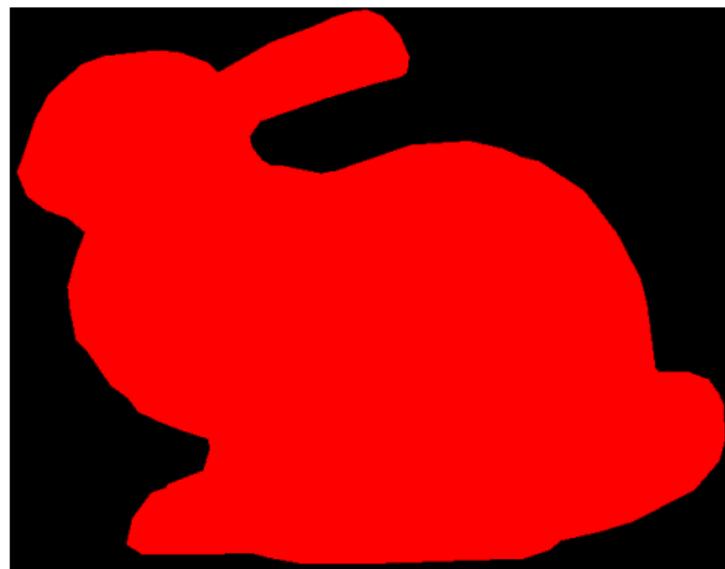
- Sčítáme přes světla.
- π se vykrátí.

Co tam chybí?

- Vzdálenost od světla $L_i = f(|\mathbf{p}_i - \mathbf{x}|^2)$
- Světelný kužel.
- Vícenásobný odraz světla.

$$L_o = \sum_i k_a L_i$$

$$k_a = k_d$$



- Hrubá aproximace mnohonásobného odrazu světla.

- Kolmé k povrchu
- $|N| = 1$ (normalizované)
- 1 na trojúhelník/1 na vrchol
- $\vec{N}_{\text{face}} = \vec{AB} \times \vec{AC}$
- $\vec{N}_{\text{vertex}} = \text{normalize} \left(\sum_{i=1}^n N_{\text{face}i} \right)$
- Průměr vážený plochou trojúhelníků
- Transformace :
 - Rotace + posun - $N_{\text{eye}} = \text{ModelView} \cdot N_{\text{model}}$
 - Scale - $N_{\text{eye}} = (\text{ModelView}^T)^{-1} \cdot N_{\text{model}}$
- ! Při scale je nutné vektory po transformaci znova normalizovat!

"Flat" stínování

- Osvětlují se celé trojúhelníky.
- Nic se neinterpoluje.

Gouraudovo stínování - "per vertex lighting"

- Osvětlení se počítá pro vrcholy.
- Interpolují se barvy.
- Dnes už nemá smysl.

Phongovo stínování - "per fragment lighting"

- Osvětlení se počítá pro fragmenty.
- Interpolují se normálové vektory.



Textury

- Textura je rastrový obrázek, který se namapuje na geometrii.
- V OpenGL je to objekt.

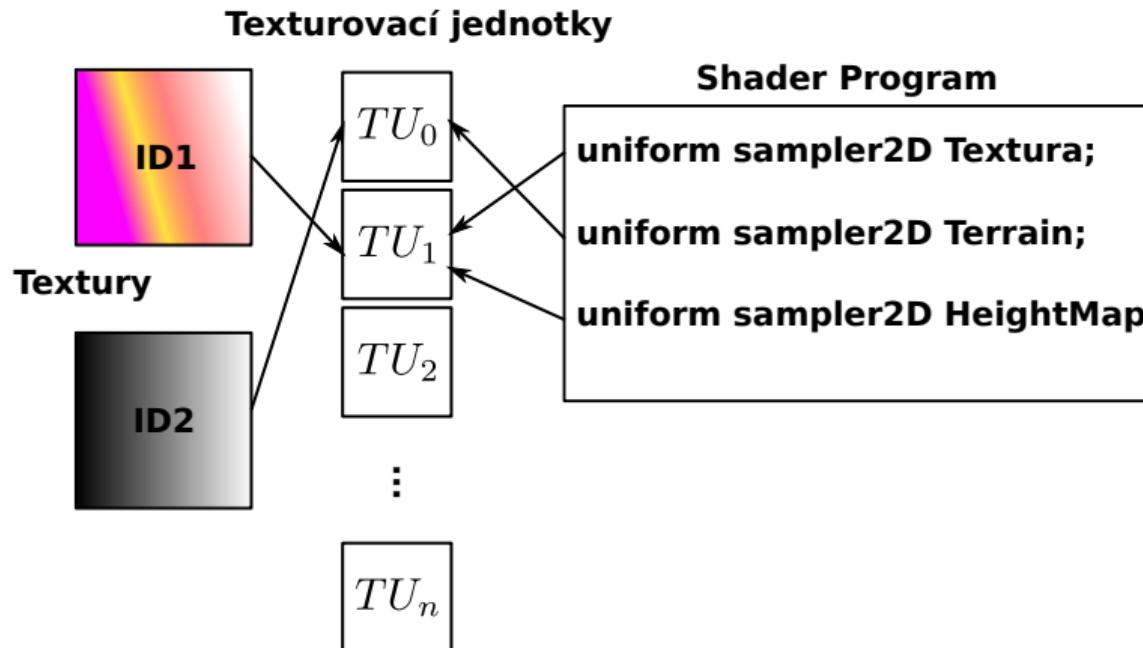
```
//vytvoreni jmena textury
glCreateTextures(GL_TEXTURE_2D, 1, &tColor); //vygenerovani jmeno textury pro barvu

//nastaveni parametru textury
//filtering
glTextureParameteri(tColor, GL_TEXTURE_MAG_FILTER, GL_NEAREST);
glTextureParameteri(tColor, GL_TEXTURE_MIN_FILTER, GL_NEAREST);

//wrapping
glTextureParameteri(tColor, GL_TEXTURE_WRAP_S, GL_CLAMP_TO_EDGE);
glTextureParameteri(tColor, GL_TEXTURE_WRAP_T, GL_REPEAT);

//alokace a nahrani dat na GPU
glTextureImage2DEXT(tColor, GL_TEXTURE_2D, 0, //alokujeme misto
    GL_RGBA32F, //format ulozeni na GPU (4*float pro pixel)
    WIDTH, HEIGHT, 0, GL_RGBA, //format ulozeni dan na CPU
    GL_UNSIGNED_BYTE, //typ dat na CPU
    Data); //data na CPU
```

- V Shader Programu se k nim přistupuje přes uniformní proměnné.
- Textura se naváže k texturovací jednotce.
- Uniformní proměnná se naváže na texturovací jednotku.



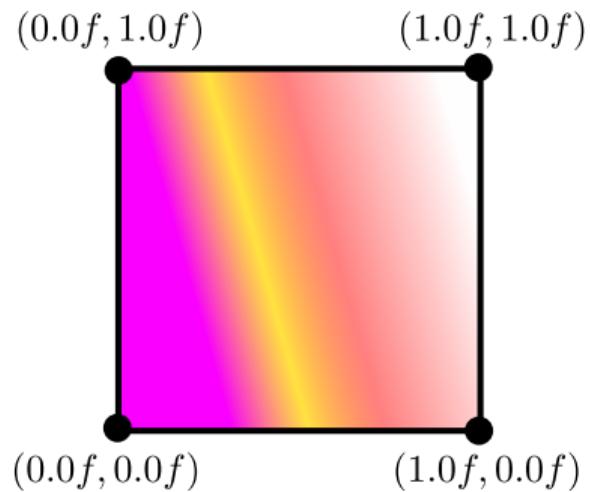
Shader Program:

```
#version 330
layout(binding=0) uniform sampler2D Textura;
layout(binding=1) uniform sampler2D Terrain;
layout(binding=1) uniform sampler2D HeightMap;
void main() {
    texture(Texture, coords);
    //...
```

Aplikace:

```
//pripojemni textur k texurovacim jednotkam
glBindTextureUnit(0, ID2);
glBindTextureUnit(1, ID1);
```

- Textura se adresuje texturovacími koordináty.
- Velikost Textury nehráje roli.
- Levý dolní roh 2D textury má souřadnice $(0.0f, 0.0f)$
- Pravý horní roh 2D textury má souřadnice $(1.0f, 1.0f)$



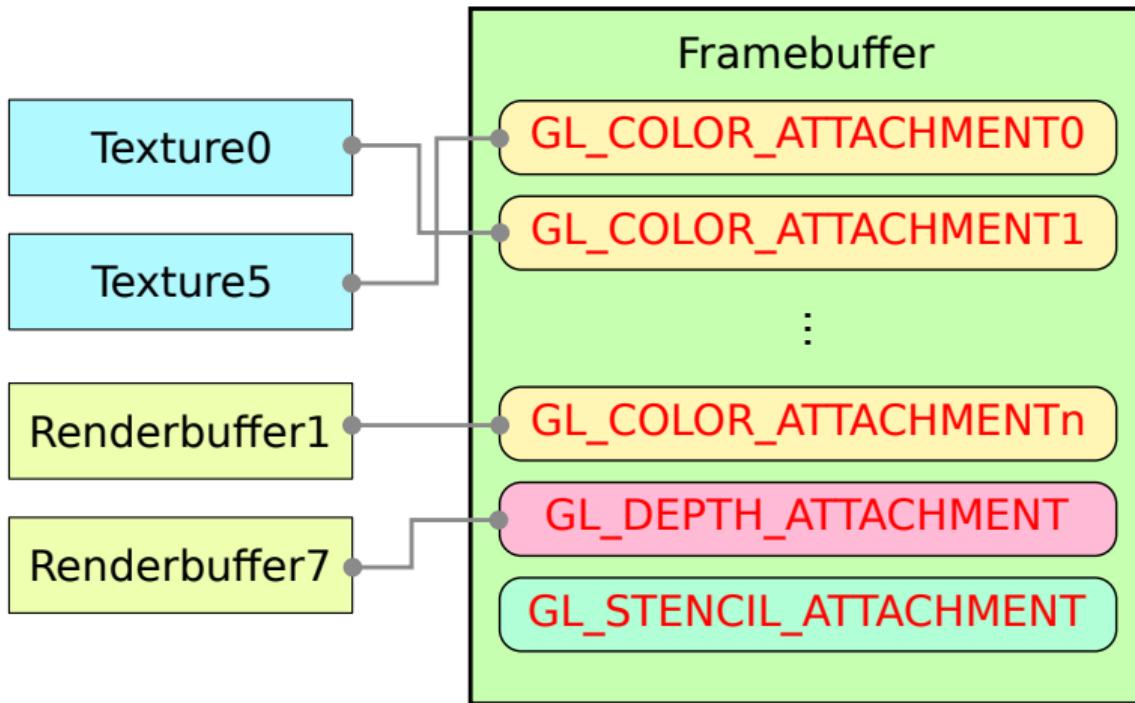
- Více obrázků v jedné textuře.
- Staří jedna texturovací jednotka.
- Zamezíme přepínání.



<http://www.scriptspot.com/3ds-max/scripts/texture-atlas-generator>

Framebuffer

- Obvykle se scéna renderuje do defaultního framebufferu obrazovky.
- Od verze OpenGL 3.3 je umožněno vytvoření vlastního framebufferu a vykreslovat scénu do něj.
- Framebuffer se skládá z několika 2D polí (hloubkový buffer, stencil buffer, několik barevných bufferů).
- FBO umožňují renderování do textur.
- Umožňují renderovat uživatelské informace (normály, pozici, hloubku, ...) (Multiple Render Targets).
- Jsou základem pro různé grafické efekty např. vody, SSAO.
- Umožňují odložené stínování (deferred shading).
- Layered rendering



- 1 Získání jména FBO.
- 2 Aktivování FBO.
- 3 Připojení textur/renderbufferů k attachmentům.
- 4 Nastavení seznamu attachmentů.
- 5 Deaktivace FBO.
- 6 ...
- 7 Aktivování FBO.
- 8 Vykreslení scény.
- 9 Deaktivace FBO.
- 10 Zpracování vyrenderovaných textur.

- Vytvoření VBO identifikátorů:

```
void glCreateFramebuffers(GLsizei n, GLuint * buffers);
```

- Uvolnění VBO identifikátorů:

```
void glDeleteFramebuffers(GLsizei n, GLuint * buffers);
```

- Pro ověření stavu FBO použijeme tuto funkci

```
GLenum glCheckNamedFramebufferStatus(GLuint fbo, GLenum target);
```

- Pokud funkce vraci **GL_FRAMEBUFFER_COMPLETE** je vše v pořádku.

- Aktivování/deaktivování FBO:

```
void glBindFramebuffer(GLenum target, GLuint framebuffer);
```

target GL_FRAMEBUFFER stejný buffer pro čtení i zápis,
GL_READ_FRAMEBUFFER, GL_DRAW_FRAMEBUFFER.

framebuffer Jméno FBO získané [glCreateFramebuffers](#). Pokud nastaveno na 0
deaktivuje buffer.

- Attachment představuje jeden podbuffer FBO - například hloubkový buffer. Připojení textur k attachmentům:

```
void glNamedFramebufferTexture(GLuint fbo, GLenum attachment,  
    GLuint texture, GLint level);
```

fbo framebuffer

attachment Které informace budeme zapisovat do textury.

GL_DEPTH_ATTACHMENT - hloubkový buffer.

GL_STENCIL_ATTACHMENT - stencil buffer. GL_COLOR_BUFFERx - barva, nebo jiná informace. Specifikováno pomocí fragment shaderu (layout).

texture Identifikátor textury.

level Stupeň mipmappingu.

- Layered rendering

```
void glNamedFramebufferTextureLayer(GLuint fbo, GLenum attachment,  
    GLuint texture, GLint level, GLint layer);
```

- Nastavením seznamu attachmentů definujeme, do kterých barevných bufferů se bude kreslit.

```
void glNamedFramebufferDrawBuffers(GLuint id, GLsizei n, const GLenum * bufs);
```

id framebuffer

n Počet bufferů, do kterých budeme kreslit.

bufs Seznam GL_COLOR_BUFFERx. Pořadí specifikuje, ke kterému layout ve fragment shaderu bude buffer navázán.

Do textur budeme vykreslovat barvu, normálu a hloubku. Fragment shader:

```
#version 430
layout(location=0)out vec4 fragColor; //jeden výstup - drawbuffer0
layout(location=1)out vec3 fragNormal; //druhy výstup - drawbuffer1
//...
void main(){
//...
fragColor=vec4(fCol,1); //zapis barvy
fragNormal=(fNor+1)/2; //zapis normaly
}
```

Aplikace - inicializace:

```
glTexImage2D(GL_TEXTURE_2D, 0, GL_RGBA8F, WIDTH, HEIGHT, 0, GL_RGBA,
    GL_UNSIGNED_BYTE, NULL); //alokujeme misto
//...
glTexImage2D(GL_TEXTURE_2D, 0, GL_RGB32F, WIDTH, HEIGHT, 0, GL_RGBA,
    GL_UNSIGNED_BYTE, NULL); //alokujeme misto
//...
glTexImage2D(GL_TEXTURE_2D, 0, GL_DEPTH_COMPONENT24,
    WIDTH, HEIGHT, 0, GL_DEPTH_COMPONENT, GL_UNSIGNED_BYTE, NULL);

glCreateFramebuffers(1, &fbo); //vygenerujeme nazev pro FBO

//navazani textur
glNamedFramebufferTexture(fbo, GL_DEPTH_ATTACHMENT,
    tDepth, 0); //navazeme texturu pro hloubku
glNamedFramebufferTexture(fbo, GL_COLOR_ATTACHMENT3,
    tColor, 0); //navazeme texturu pro barvu
glNamedFramebufferTexture(GL_FRAMEBUFFER, GL_COLOR_ATTACHMENTS5,
    tNormal, 0); //navazeme texturu pro normalu

GLenum drawBuffers[]={
    GL_COLOR_ATTACHMENT3, //layout (location=0)out vec4 fragColor;
    GL_COLOR_ATTACHMENT5 //layout (location=1)out vec3 fragNormal;
};
glNamedFramebufferDrawBuffers(fbo, 2, drawBuffers); //nastavime seznam ciliu

if(glCheckNamedFramebufferStatus(fbo, GL_FRAMEBUFFER) != GL_FRAMEBUFFER_COMPLETE)
    std::cerr<<"chyba\n";
glBindFramebuffer(GL_FRAMEBUFFER, 0);
```

Aplikace - kreslení:

```
glBindFramebuffer(GL_FRAMEBUFFER, FBO); //aktivujeme FBO
glDrawArrays(...);
glBindFramebuffer(GL_FRAMEBUFFER, 0); //deaktivování FBO
```

Hierarchický depth buffer

GLSL - CreateHierarchy:

```
//vertex shader///////////////  
#version 430  
void main(){  
    gl_Position=vec4(0);  
}  
//geometry shader///////////////  
#version 430  
layout(points)in;  
layout(triangle_strip,max_vertices=4)out;  
void main(){  
    gl_Position=vec4(-1,-1,0,1);EmitVertex();  
    gl_Position=vec4(+1,-1,0,1);EmitVertex();  
    gl_Position=vec4(-1,+1,0,1);EmitVertex();  
    gl_Position=vec4(+1,+1,0,1);EmitVertex();  
}  
//fragment shader///////////////  
#version 430  
layout(binding=0)uniform sampler2D Last;//last mipmap  
layout(location=0)out vec2 fDepth;//output depth  
ivec2 Coord=ivec2(gl_FragCoord.xy); //coordinates  
void main(void){  
    vec2 A=texelFetch(Last,Coord*2+ivec2(0,0),0).xy;  
    vec2 B=texelFetch(Last,Coord*2+ivec2(1,0),0).xy;  
    vec2 C=texelFetch(Last,Coord*2+ivec2(0,1),0).xy;  
    vec2 D=texelFetch(Last,Coord*2+ivec2(1,1),0).xy;  
    fDepth=vec2(min(min(A.x,B.x),min(C.x,D.x)),max(max(A.y,B.y),max(C.y,D.y)));  
}
```

Aplikace - inicializace:

```
glCreateTextures(GL_TEXTURE_2D, 1, &Depth);
//textura obsahujici minimalni a maximalni hloubku
glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, Depth);
glTextureParameteri(Depth, GL_TEXTURE_MAG_FILTER, GL_NEAREST);
glTextureParameteri(Depth, GL_TEXTURE_MIN_FILTER, GL_NEAREST_MIPMAP_NEAREST);
int Size=WSize;
int Level=0;
while(Size>0){//smycka pres levely
    glTextureImage2DEXT(Depth, GL_TEXTURE_2D, Level++, GL_RG32F, Size, Size, 0, GL_RG,
        GL_FLOAT, NULL); //alokace vrstvy
    Size/=2;
}
//render buffer s hloubkou
glCreateRenderbuffers(1, &RBO_Depth);
glNamedRenderbufferStorage(RBO_Depth, GL_DEPTH_COMPONENT, WSize, WSize);

glCreateFramebuffers(1, &FBO); //vygenerujeme nazev pro FBO
```

Aplikace - render2 - tvorba hierarchie:

```
glUseProgram(CreateHierarchy);
int Level=1;
int ActSize=WSize/2;
glBindFramebuffer(GL_FRAMEBUFFER,HFBO); //bind framebuffer
glBindTextureUnit(0,Depth); //bind depth texture to tex. unit 0
while(ActSize>0){ //while there are
    glViewport(0,0,ActSize,ActSize); //set viewport
    glTexParameteri(Depth,GL_TEXTURE_BASE_LEVEL,Level-1); //starting mipmap level
    glTexParameteri(Depth,GL_TEXTURE_MAX_LEVEL,Level-1); //max mipmap level
    glNamedFramebufferTexture(FBO,GL_COLOR_ATTACHMENT0,Depth,Level);
    GLenum DrawBuffers[]={GL_COLOR_ATTACHMENT0};
    glNamedFramebufferDrawBuffers(1,DrawBuffers);
    glDrawArrays(GL_POINTS,0,1);
    Level++; //increment level of mipmap
    ActSize/=2; //actual size of mipmap
}
glBindFramebuffer(GL_FRAMEBUFFER,0); //unbind framebuffer
glTexParameteri(Depth, GL_TEXTURE_BASE_LEVEL, 0); //starting mipmap level
glTexParameteri(Depth, GL_TEXTURE_MAX_LEVEL, Level-1); //max mipmap level
glViewport(0,0,WSize,WSize); //reset viewport
```

Layered Rendering

Cube map rendering - CPU

```
GLuint cubeMap;
glCreateTextures(GL_TEXTURE_CUBE_MAP, 1, &cubeMap);
for(size_t i=0;i<6;++i)
    glTextureImage2DEXT(cubeMap, GL_TEXTURE_CUBE_MAP_POSITIVE_X+i, 0,
        GL_RGBA8, width, height, 0, GL_RGBA, GL_UNSIGNED_BYTE, nullptr);
//it will attach all six sides of cube map
glNamedFramebufferTexture(cubeMap, GL_COLOR_ATTACHMENT0, cubeMap, 0);
```

Cube map rendering - Vertex Shader

```
layout(location=0) in vec3 position;
uniform float near = 0.1;
uniform float far = 1000;
uniform vec4 lightPosition = vec4(0,0,0,1);
out int vInstanceID;
void main() {
    const mat4 views[6] = {
        mat4(vec4(+0,+0,-1,0), vec4(+0,-1,+0,0), vec4(-1,+0,+0,0), vec4(0,0,0,1)),
        mat4(vec4(+0,+0,+1,0), vec4(+0,-1,+0,0), vec4(+1,+0,+0,0), vec4(0,0,0,1)),
        mat4(vec4(+1,+0,+0,0), vec4(+0,+0,-1,0), vec4(+0,+1,+0,0), vec4(0,0,0,1)),
        mat4(vec4(+1,+0,+0,0), vec4(+0,+0,+1,0), vec4(+0,-1,+0,0), vec4(0,0,0,1)),
        mat4(vec4(+1,+0,+0,0), vec4(+0,-1,+0,0), vec4(+0,+0,-1,0), vec4(0,0,0,1)),
        mat4(vec4(-1,+0,+0,0), vec4(+0,-1,+0,0), vec4(+0,+0,+1,0), vec4(0,0,0,1))
    };

    mat4 projection = mat4(
        vec4(1,0,0,0),
        vec4(0,1,0,0),
        vec4(0,0,-(far+near)/(far-near),-1),
        vec4(0,0,-2*far*near/(far-near),0));
    gl_Position = projection*views[gl_InstanceID]*vec4(position-lightPosition.xyz,1);
    vInstanceID = gl_InstanceID;
}
```

Cube map rendering - Geometry shader

```
layout(triangles) in;
layout(triangle_strip, max_vertices=3) out;
in int vInstanceID[];
void main(){
    gl_Layer = vInstanceID[0];
    gl_Position = gl_in[0].gl_Position; EmitVertex();
    gl_Position = gl_in[1].gl_Position; EmitVertex();
    gl_Position = gl_in[2].gl_Position; EmitVertex();
    EndPrimitive();
}
```

Thank you for your attention! Questions?