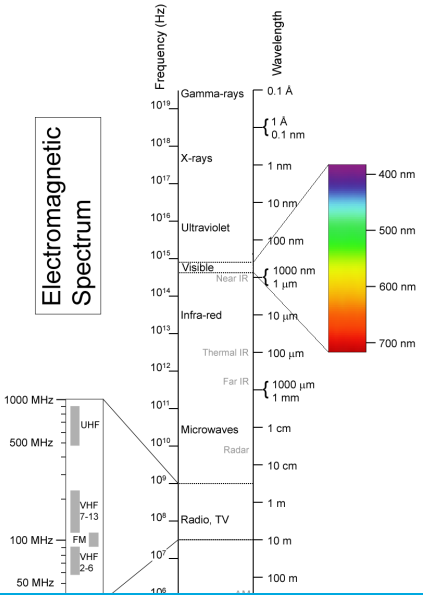
PGR - Fragment Shader, Světlo, Barvy,

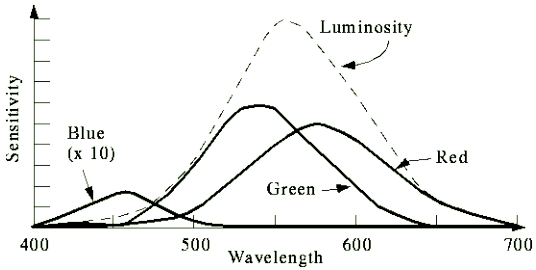
Tomáš Milet

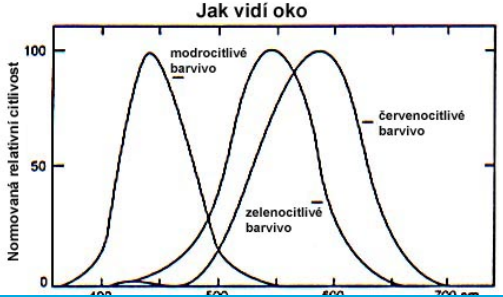
Brno University of Technology, Faculty of Information Technology
Božetěchova 1/2. 612 66 Brno - Královo Pole
imilet@fit.vutbr.cz

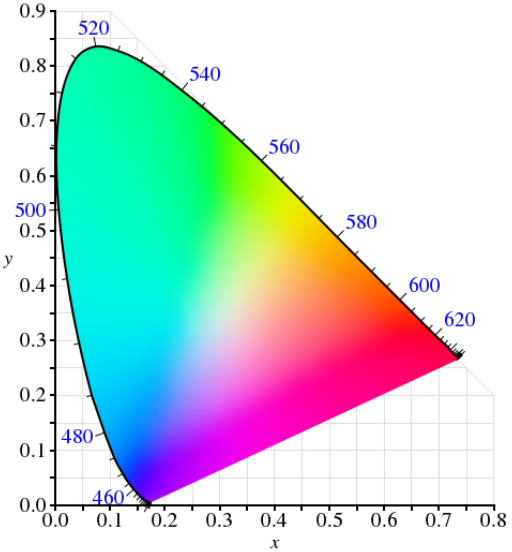
11. listopadu 2021

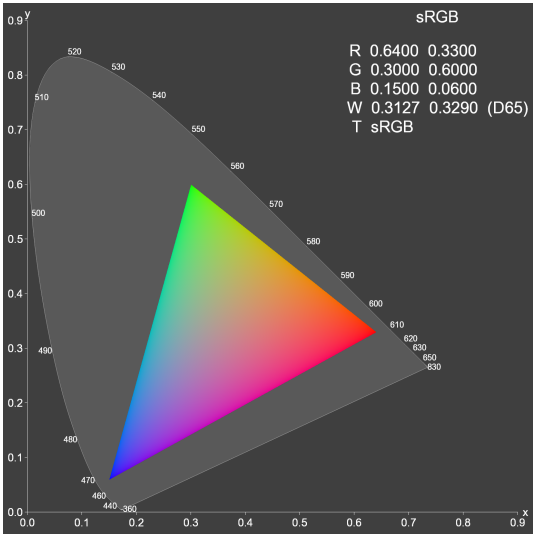
Barva


Electromagnetic Spectrum
Frequency (Hz)
Wavelength
Gamma-rays
X-rays
Ultraviolet
Visible
Near IR
Infra-red
Thermal IR
Far IR
Microwaves
Radar
Radio, TV
0.1 Å
1 Å
0.1 nm
1 nm
10 nm
100 nm
1000 nm
1 μm
10 μm
100 μm
1000 μm
1 mm
1 cm
10 cm
1 m
10 m
100 m
400 nm
500 nm
600 nm
700 nm
1000 MHz
500 MHz
100 MHz
50 MHz
UHF
VHF 7-13
FM
VHF 2-6


Luminosity
Sensitivity
Blue
(x 10)
Green
Red
400
500
600
700
Wavelength


Jak vidí oko
Normovaná relativní citlivost
100
50
0
modrocitlivé barvivo
červenocitlivé barvivo
zelenocitlivé barvivo


520
540
560
580
600
620
500
480
460
y
x
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9


sRGB
R 0.6400 0.3300
G 0.3000 0.6000
B 0.1500 0.0600
W 0.3127 0.3290 (D65)
T sRGB
y
x

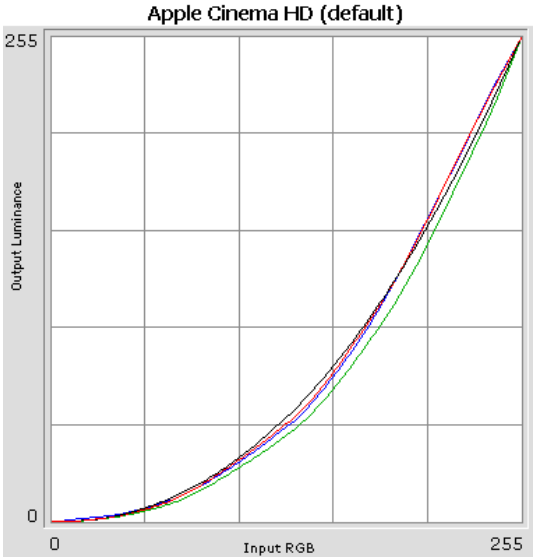
- CIE 1931

Logaritmická citlivost oka

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

$$a = 0.055$$

$$t = 0.0031308$$



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)
- $(0,0,0)$ $(1,0,0)$ $(0,1,0)$ $(0,0,1)$

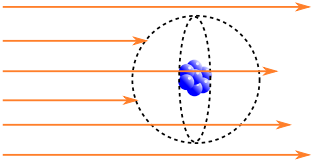
! Lineární barevný prostor - interpolace, blending.

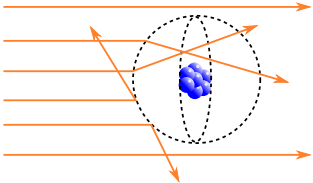
Vstupy a framebuffer :

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

Interakce světla a hmoty

Absoption, scattering



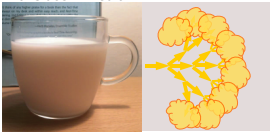


Clear media

Clear absorbent media

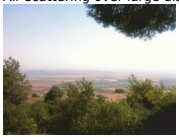
Cloudy media

Translucent media

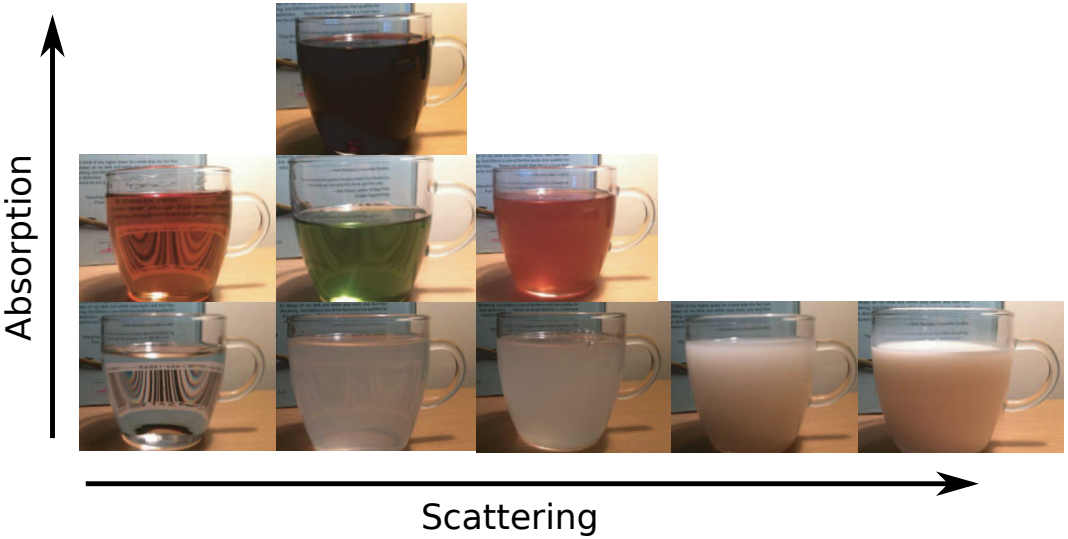


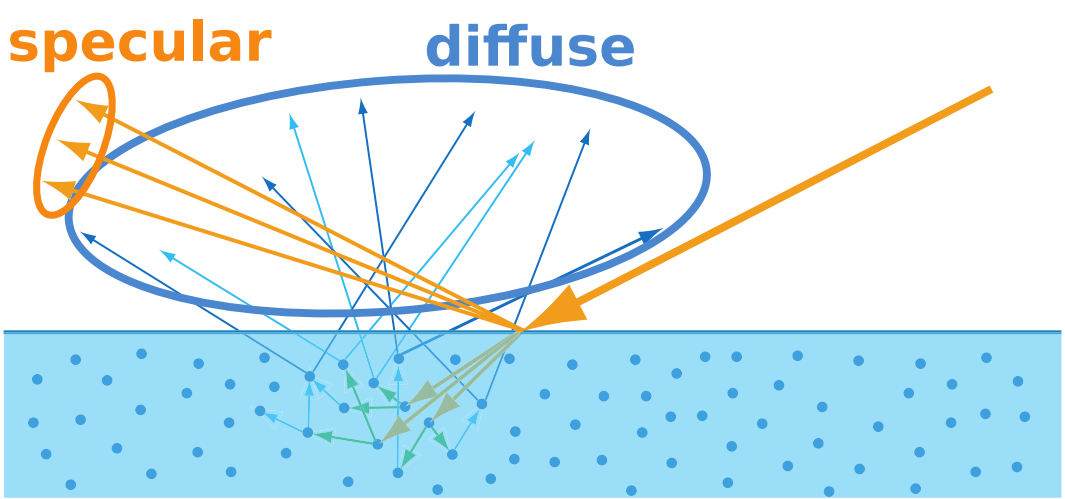
Water absorbent over large distances

Air scattering over large distances

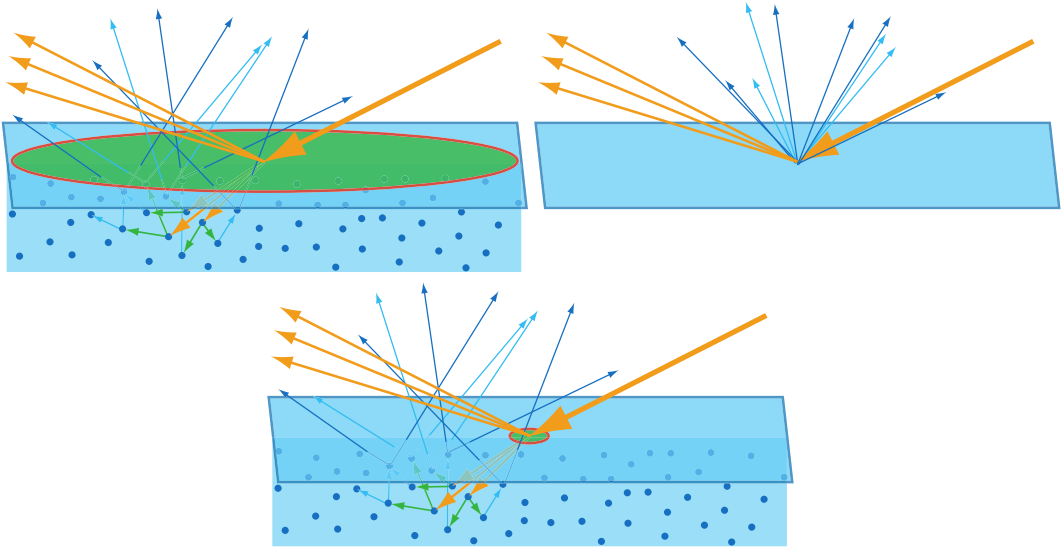


Absoption, scattering

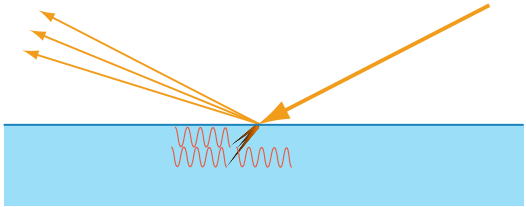


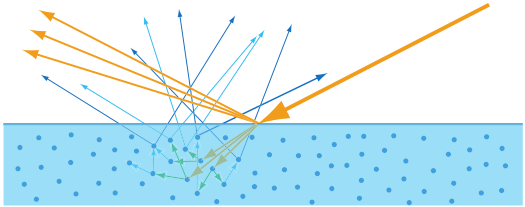

specular
diffuse

Subsurface scattering

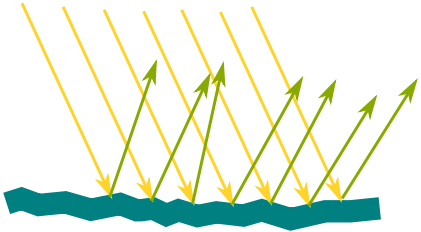


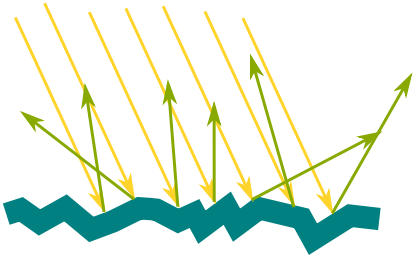
Lom světla kovů



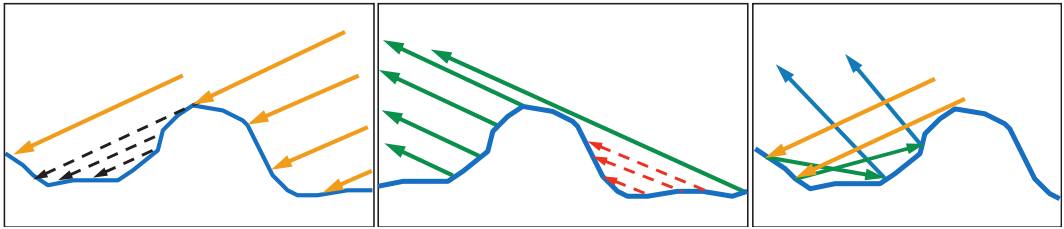


Drsnost povrchu a mikroplošky

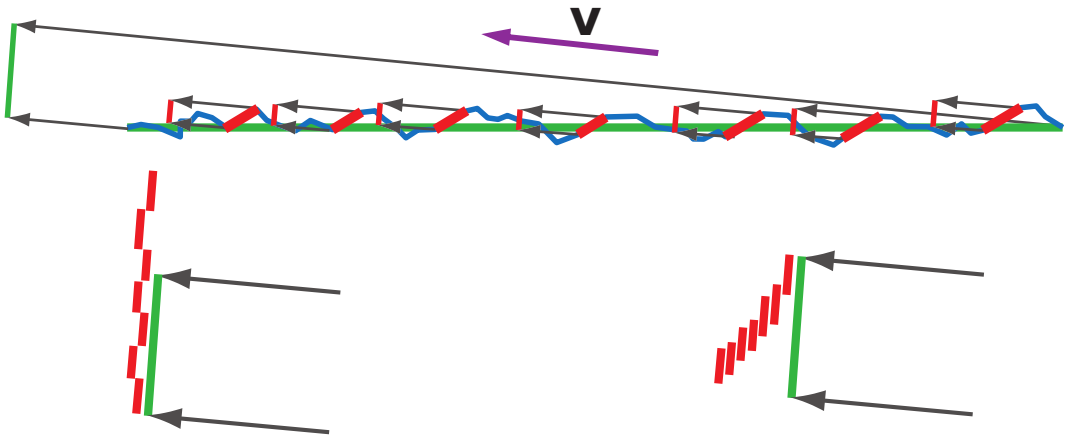




Zastínění mikroplošek



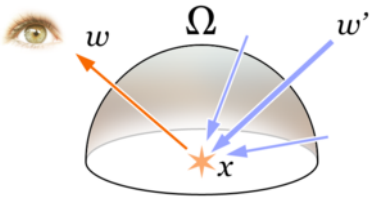
Zastínění mikroplošek




physically based rendering

Dneska jen kousek :(

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



Siggraph 1986 :

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

Lokální osvětlovací model

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

Lokální osvětlovací model

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

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

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

Lokální osvětlovací model

- 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).

Reciprocita

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

Zákon zachování energie

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

Izotropie x Anizotropie

Varianty BRDF

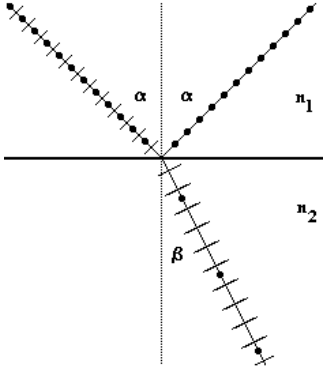
- Phong
- Blinn-Phong
- Cook-Torrance
- GGX
- ...

Varianty BRDF

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

- Pragmatické x Fyzikální
- Výběr podle aplikace.

Odraz a lom světla



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

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}$$

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

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

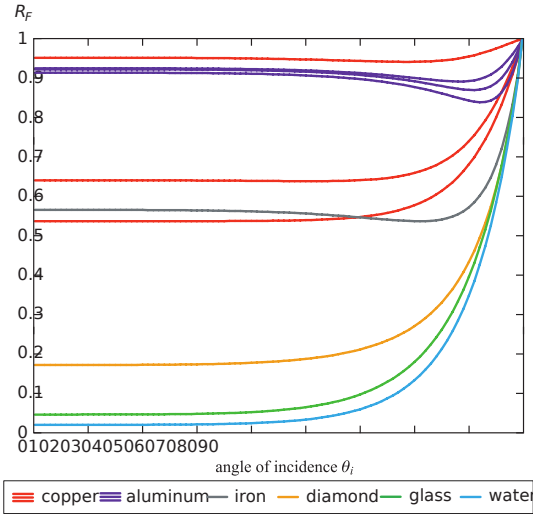
- Závislé na polarizaci.
- Nepraktické.

Schlickova aproximace

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

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

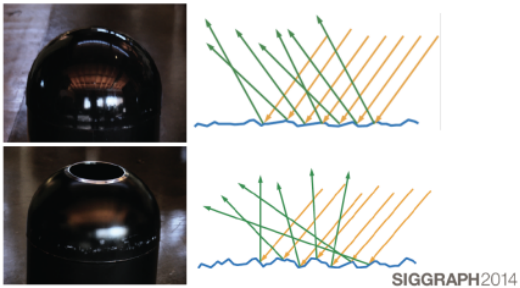
Fresnel reflectance



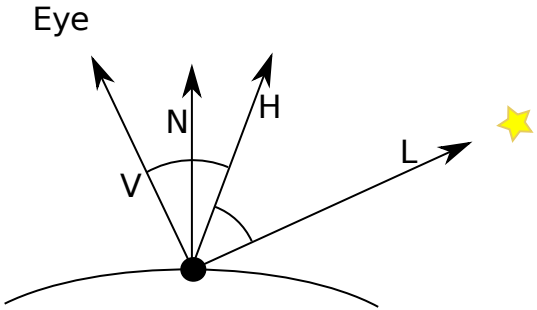
Fresnel reflectance

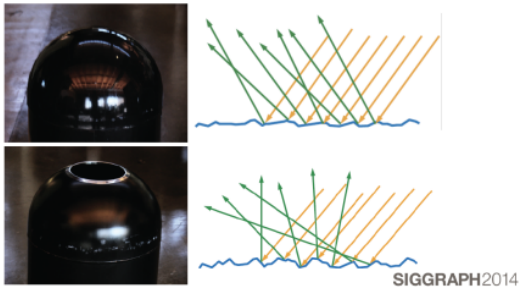
Material	$F(0^\circ)$ (Linear)	$F(0^\circ)$ (sRGB)	Color
Water	0.02,0.02,0.02	0.15,0.15,0.15	
Plastic/Glass(Low)	0.03,0.03,0.03	0.21,0.21,0.21	
PlasticHigh	0.05,0.05,0.05	0.24,0.24,0.24	
Glass(High)/Ruby	0.08,0.08,0.08	0.31,0.31,0.31	
Diamond	0.17,0.17,0.17	0.45,0.45,0.45	
Iron	0.56,0.57,0.58	0.77,0.78,0.78	
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	

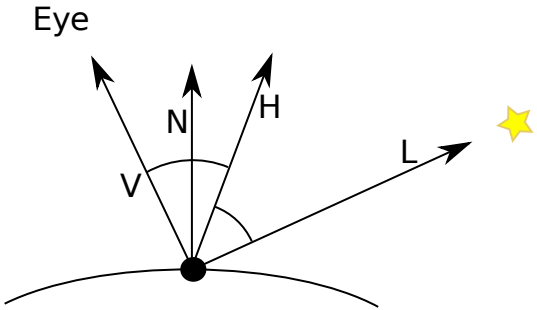
Nedokonalý povrch



Které plošky jsou správně orientované?







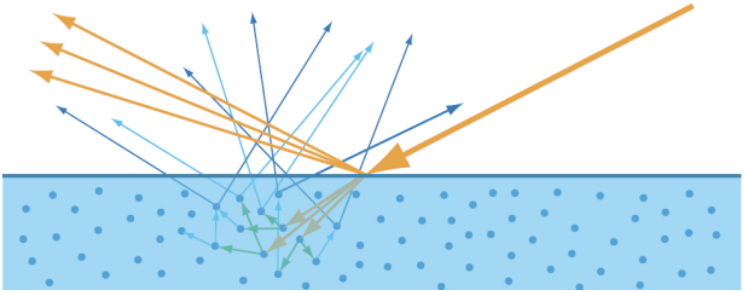
Které plošky jsou správně orientované?

- Odrážejí ze světla do pozorovatele.
- Mají normálu přesně mezi.

! Half vector.

$$\mathbf{h} = \frac{\mathbf{l} + \mathbf{v}}{2}$$

Diffuse + Specular



Specular

- "Zrcadlový" odraz
- Dominantní pro kovy

Diffuse

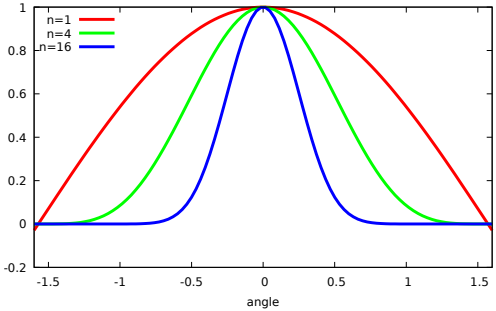
- Odraz uvnitř materiálu.
- Dominantní pro izolanty.

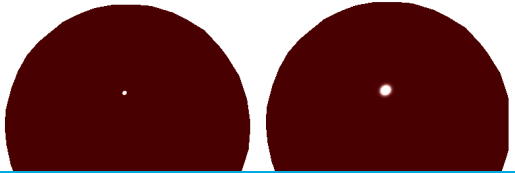
Spekulární odraz

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

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

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





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

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.

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

Diffuse + Specular

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

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

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

Bodový zdroj světla

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

- 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.

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

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

- Sčítáme přes světla.
- π se vykrátí.

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

- Sčítáme přes světla.
- π se vykrátí.

Co tam chybí?

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

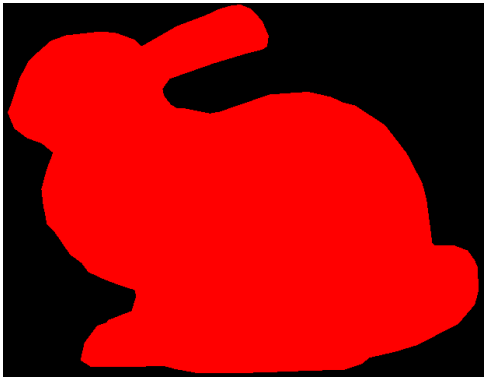
- Sčítáme přes světla.
- π se vykrátí.

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

- $\vec{N_{\text{face}}} = \vec{AB} \times \vec{AC}$
- $\vec{N_{\text{vertex}}} = \mathbf{normalize}\left(\sum_{i=1}^{n} N_{\text{face}i}\right)$
- Prúměr vážený plochou trojúhelníků

- Transformace :
  - Rotace + posun - $N_{\text{eye}} = \mathit{ModelView} \cdot N_{\text{model}}$
  - Scale - $N_{\text{eye}} = (\mathit{ModelView}^T)^{-1} \cdot N_{\text{model}}$
  - ! Při scale je nutné vektory po transformaci znovu 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

Textury - nahrání rastrových dat

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

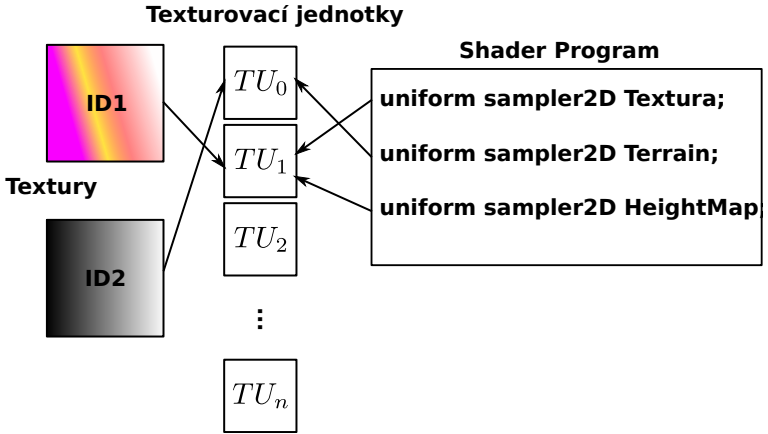
```
//vytvoreni jmena textury
glCreateTextures(GL_TEXTURE_2D,1,&tColor);//vygenerovani jmeno textury pro barvu

//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:

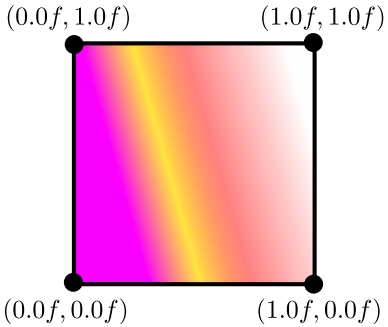
```
#version 330
layout(binding=0)uniform sampler2D Textura;
layout(binding=1)uniform sampler2D Terrain;
layout(binding=1)uniform sampler2D HeightMap;
void main(){
  texture(Texture,coords);
  //...
```

Aplikace:

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

Adresování textur

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



Atlas textur

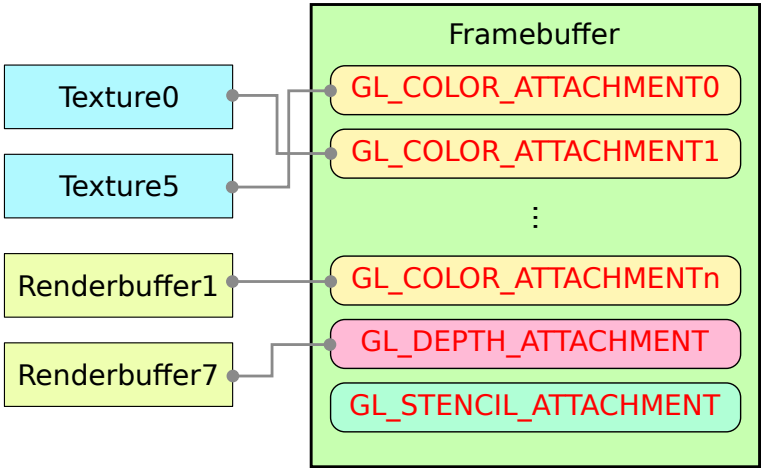
- Více obrázků v jedné textuře.
- Stačí jedna texturovací jednotka.
- Zamezíme přepínání.

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

Framebuffer

Frame Buffer Object (FBO)

- 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


Framebuffer
Texture0
Texture5
Renderbuffer1
Renderbuffer7
GL_COLOR_ATTACHMENT0
GL_COLOR_ATTACHMENT1
GL_COLOR_ATTACHMENTn
GL_DEPTH_ATTACHMENT
GL_STENCIL_ATTACHMENT

Použití FBO

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/uvolnění FBO identifikátorů

- Vytvoření VBO identifikátorů:

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

- Uvolnění VBO identifikátorů:

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

Ověření stavu FBO

- 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.

Připojení textur

- 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);
```

Nastavení seznamu attachmentů (MRT)

- 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 vystup - drawbuffer0
layout(location=1)out vec3 fragNormal;//druhy vystup - 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_ATTACHMENT5,
  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 cilu

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

Kompletní příklad

Aplikace - kresleni:

```
glBindFramebuffer(GL_FRAMEBUFFER,FBO);//aktivujeme FBO
glDrawArrays(...);
glBindFramebuffer(GL_FRAMEBUFFER,0);//deaktivovani 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
  glTextureParameteri(Depth,GL_TEXTURE_BASE_LEVEL,Level-1);//starting mipmap level
  glTextureParameteri(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 framebffer
glTextureParameteri(Depth, GL_TEXTURE_BASE_LEVEL, 0);//starting mipmap level
glTextureParameteri(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?