

Pořízení obrazu a jeho fyzikální základy

Václav Hlaváč

České vysoké učení technické v Praze

Český institut informatiky, robotiky a kybernetiky

160 00 Praha 6, Jugoslávských partyzánů 1580/3

<http://people.ciirc.cvut.cz/hlavac>, vaclav.hlavac@cvut.cz

také z Centra strojového vnímání, <http://cmp.felk.cvut.cz>

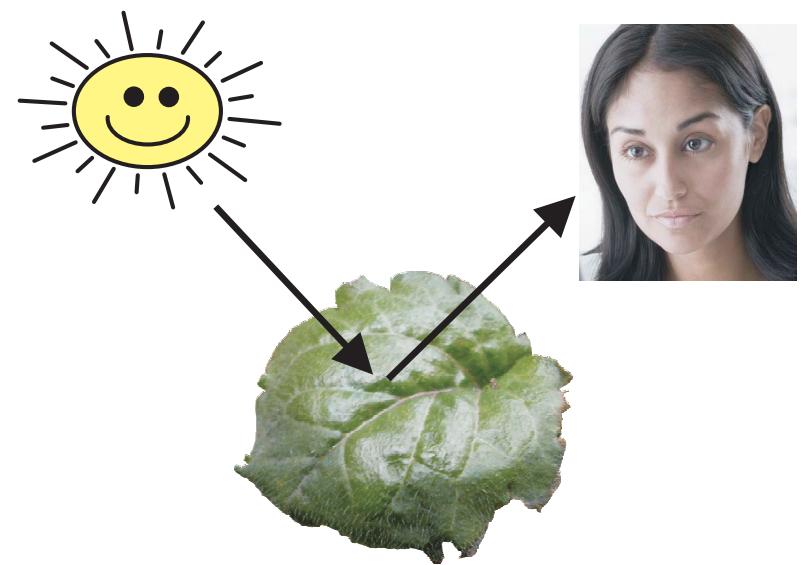
Osnova přednášky:

- ◆ Tři důvody proč studovat pořízení obrazu.
- ◆ Elektromag. záření, jeho interakce s povrchem objektů.
- ◆ Radiometrie, fotometrie, pojmy.
- ◆ Rovnice ozáření.
- ◆ Odrazivost povrchu, BRDF.
- ◆ Matematické modely odrazivosti.
- ◆ Lambertovské povrchy.

Tři důvody proč studovat pořízení obrazu

Znalost geometrických a radiometrických vztahů mezi 3D scénou a jejím obrazem dovoluje porozumět:

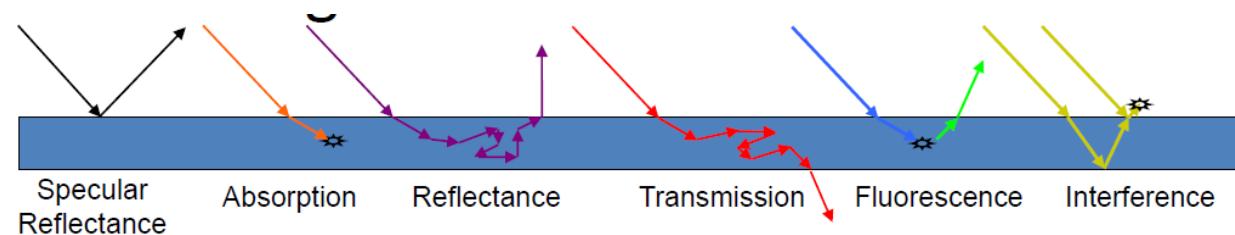
1. V počítačové grafice: Jak zobrazit realisticky vypadající obraz ze 3D modelu objektu/scény?
2. V počítačovém vidění: Jak vytvářet stroje, které 'vidí'?
3. V počítačovém vidění: Proč ztroskotává snaha invertovat úlohu pořízení obrazu ve většině prakticky použitelných případů?



Tři druhy energie pro zobrazování

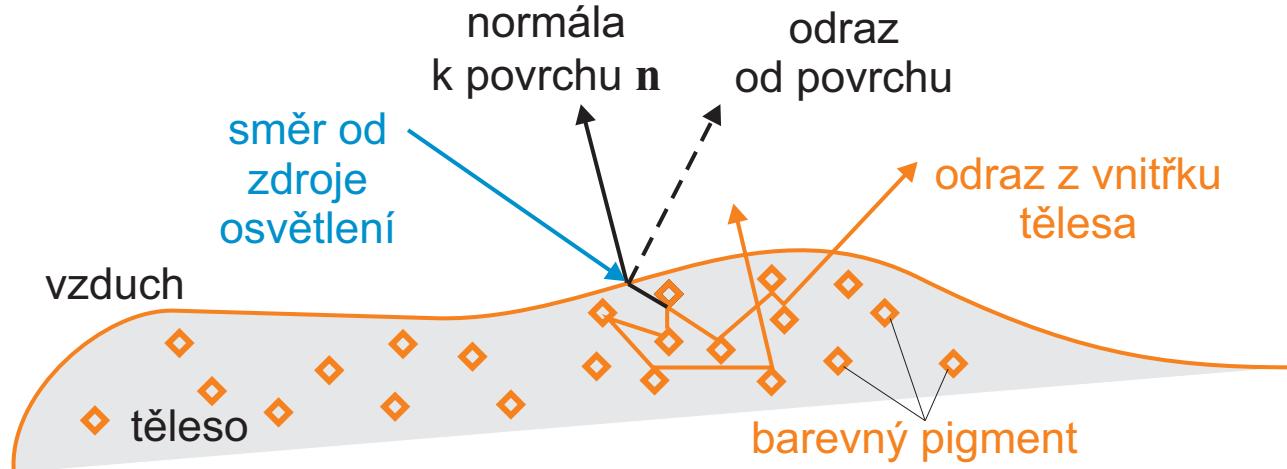
1. Elektromagnetické záření (viz dále). *Světlo je “vizuálně vnímaná zářivá energie”.*
2. Záření částic, např. elektronů a neutronů.
3. Akustické vlny v plynech, kapalinách a tuhých tělesech. V plynech a kapalinách se šíří pouze podélná vlna a v tuhých látkách se přidává i příčná vlna. Rychlosť šíření akustických vln je přímo úměrná elastickým vlastnostem média, kterým prospupuje.

- ◆ Záření interaguje s hmotou, a to buď na povrchu objektů nebo v jejich objemu.



- ◆ Záření je z objektů vyzařováno buď díky vlastnímu tepelnému pohybu molekul (horké zářící těleso) nebo díky vnější stimulaci (např. odražené záření, luminiscence, aj.).

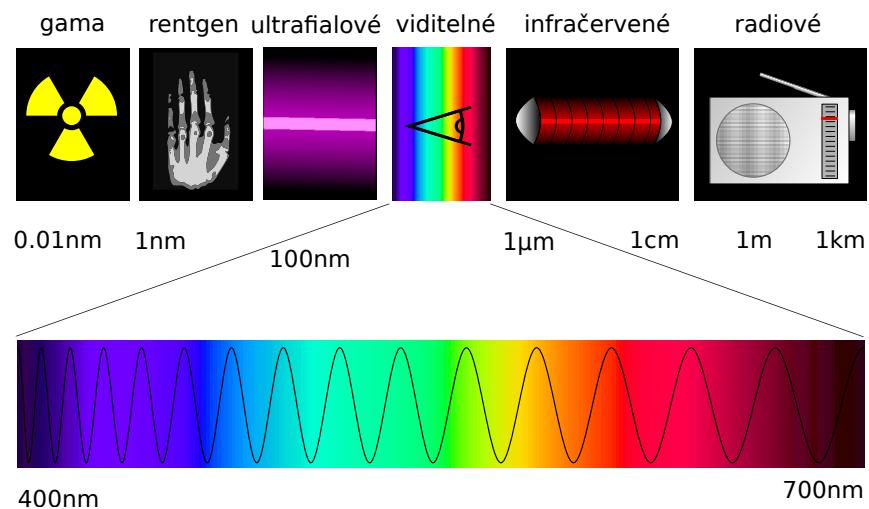
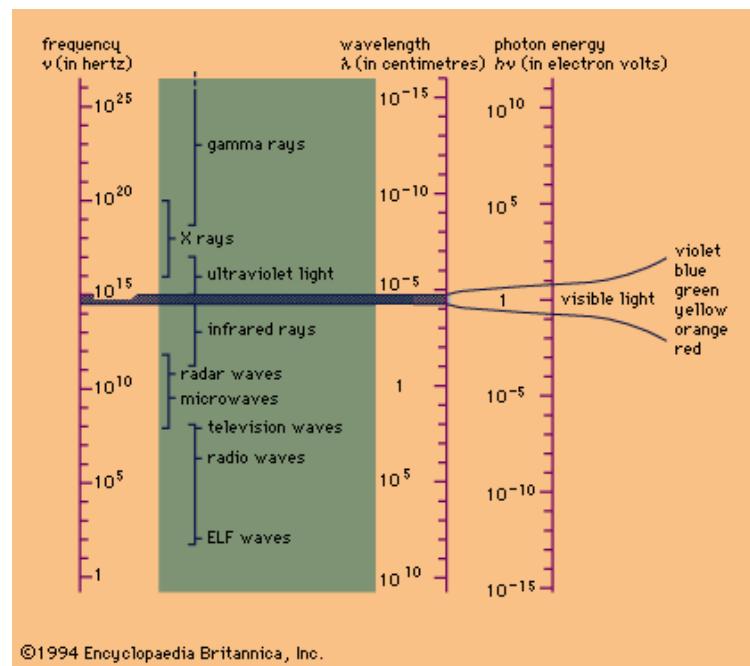
Odraz z povrchu a pod povrchem



- ◆ Odraz z povrchu – odlesky jsou velmi směrové.
- ◆ Odraz pod povrchem – absorbce, difúze a odraz do všech směrů. Barevný pigment uvnitř látek pohlcuje část barevného spektra osvětlovače a dává vzniknout vnímání barev člověkem.
- ◆ Kovy odrážejí pouze z povrchu.
- ◆ Dielektrika (plastické hmoty, barevné nátěry) mají oba odrazové mechanismy, odraz z povrchu i odraz pod povrchem.

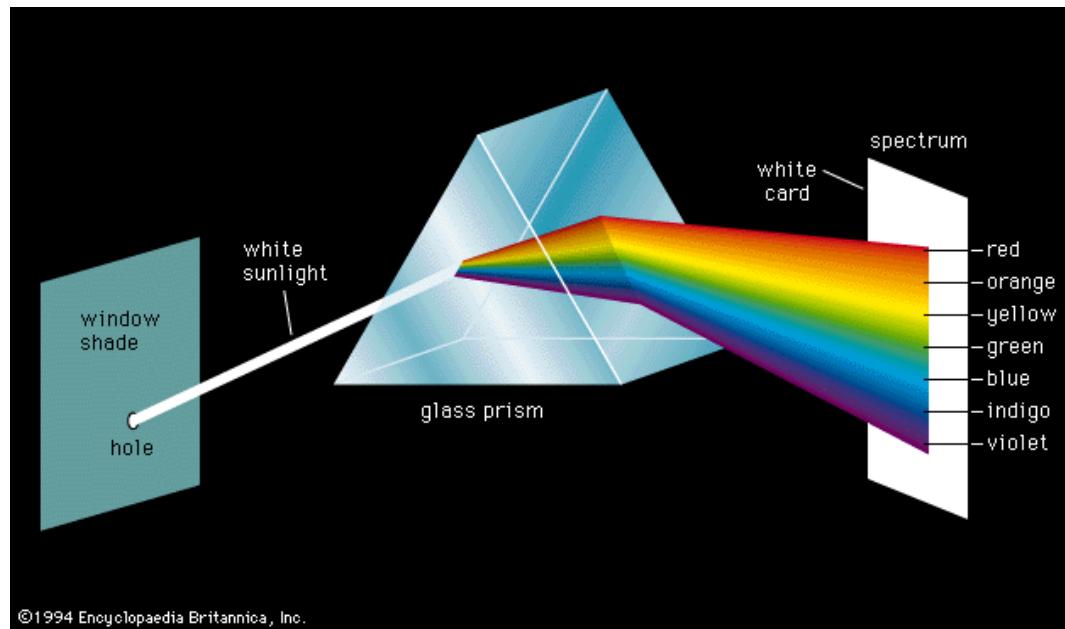
Elektromagnetické záření (1)

Včetně γ záření, rentgenového záření (angl. X rays), ultrafialového záření, viditelného světla, infračerveného záření, mikrovln a radiových vln.



Elektromagnetické záření (2)

- ◆ Záření se šíří ve vakuu rychlostí světla. Látkami se záření šíří pomaleji a navíc v závislosti na vlnové délce.
- ◆ Zde se soustředíme pouze na viditelnou část elektromagnetického záření. Isaac Newton ukázal spektrum pomocí skleněného hranolu v roce 1666.



Informace využitelná pro analýzu obrazu

1. **Frekvence** záření nebo jinak vyjádřeno vlnovou délku.
2. **Amplituda**, tj. intenzita.
3. **Mód polarizace** pro příčné vlny.
4. **Fáze**, která je ale přístupná pouze při použití koherentních zobrazovacích technik, jakými je interferometrie nebo holografie.

Dále budeme studovat vznik obrazu díky odrazu záření od povrchů neprůhledných objektů ve spektru viditelného světla (z radiometrického hlediska).

Radiometrie a fotometrie

Radiometrie je část fyziky, která se zabývá tokem a přenosem vyzářené energie.

- ◆ Radiometrie dovoluje vysvětlit mechanismus vzniku obrazu.
 - ◆ Neformálně řečeno, jas v daném pixelu závisí na tvaru objektu, odrazivých vlastnostech jeho povrchu, poloze pozorovatele a poloze a typu světelných zdrojů.
-

Fotometrie, která využívá veličiny popisující odezvu vjemů zrakového smyslu u člověka.

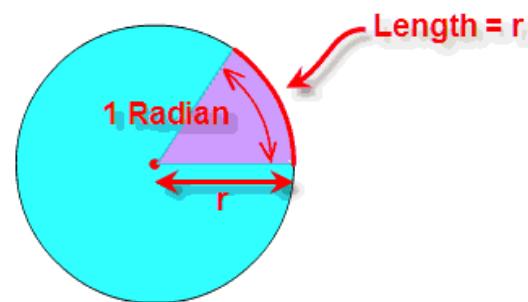
- ◆ Fotometrické veličiny závisí na spektrální charakteristice zdroje záření a citlivosti světločivých buněk na sítnici oka.

Úhel na ploše a v prostoru

Pomocné SI jednotky [rad], [sr]

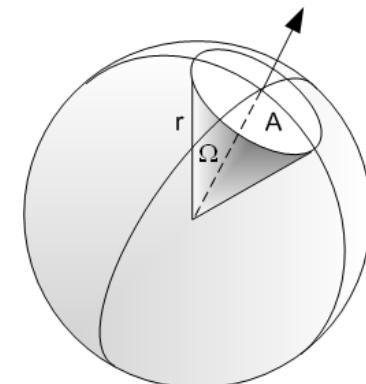
Úhel na ploše – radián [rad].

- ◆ Radián udává úhel na ploše vymezený dvěma poloměry kruhu, které na obvodu kruhu ohraničují oblouk o délce rovné poloměru.
- ◆ Oblouk v délce celého obvodu kruhu má délku 2π [rad].



Prostorový úhel – steradián [sr].

- ◆ Steradián udává (prostorový) úhel kužele Ω s vrcholem ve středu koule a podstavou na povrchu koule, která je rovná ploše A čtverce o straně rovné poloměru koule.
- ◆ Celému povrchu koule odpovídá prostorový úhel 4π [sr].



Vyzařování do prostoru

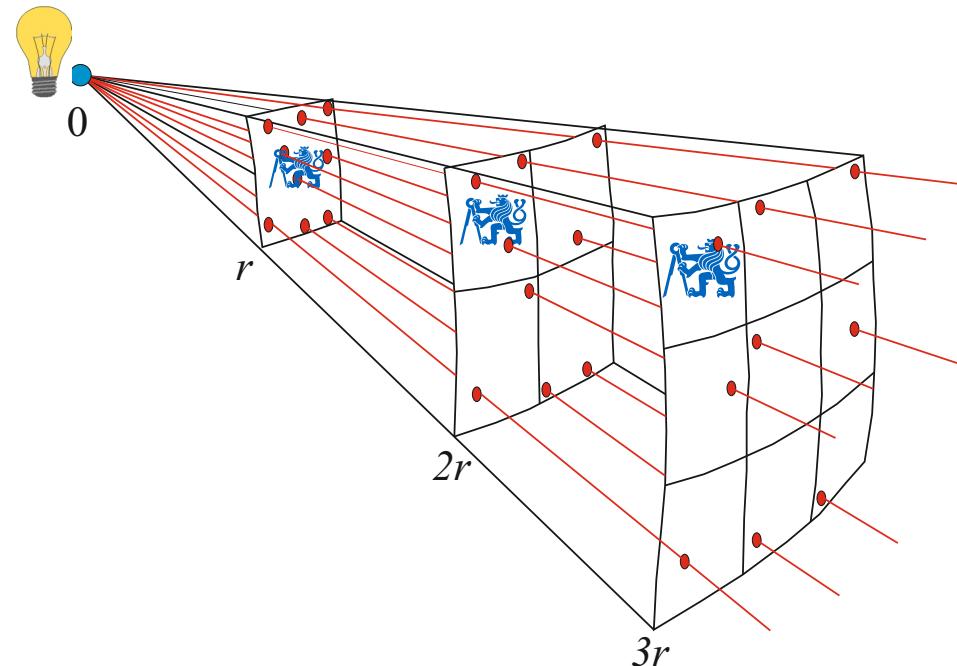
- ◆ Povrch tělesa může energii odrážet do celé polokoule, a to do různých směrů různě.
- ◆ Prostorový úhel Ω daný plochou A na povrchu jednotkové koule omezený kuželem s vrcholem ve středu jednotkové koule.
- ◆ Celé polokouli odpovídá prostorový úhel 2π [sr].

Proč?

Jelikož plocha celé jednotkové koule (poloměr=1) odpovídá 4π .

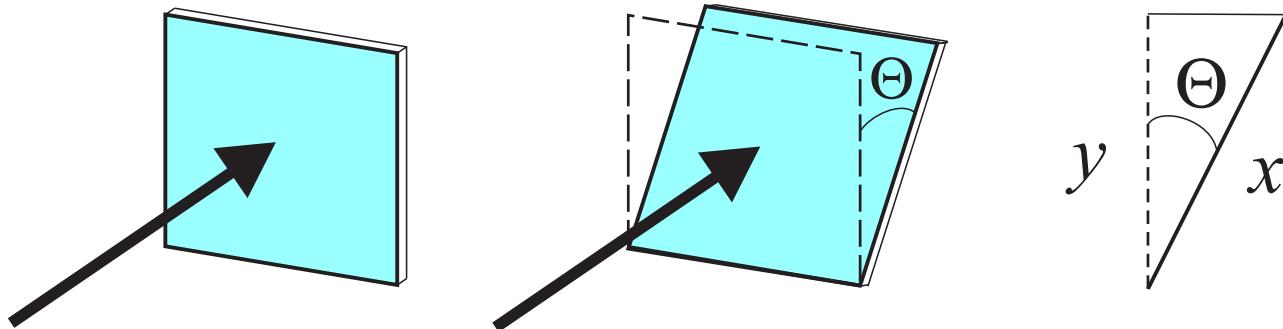
Pokles intenzity se čtvercem vzdálenosti

Uvažujme kuželový tvar paprsků světla z bodového zdroje a dopadající na plochu v různých vzdálenostech. Intenzita klesá s druhou mocninou vzdálenosti plochy od zdroje. Zdůvodnění, viz obrázek.



Kosinové zmenšení vlivu na skloněnou plochu

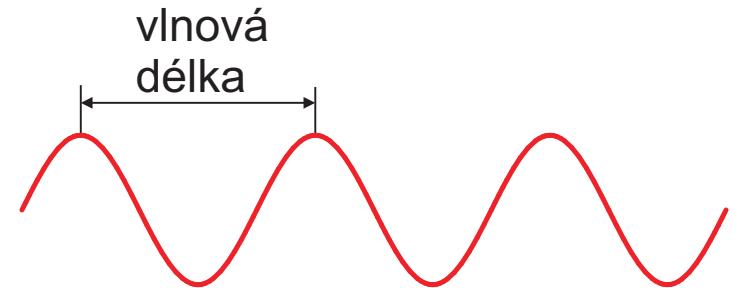
- ◆ Záření má největší účinek když dopadá na rovinou plošku kolmou k přicházejícím paprskům. Když je ploška natočena, potom účinek záření klesá.



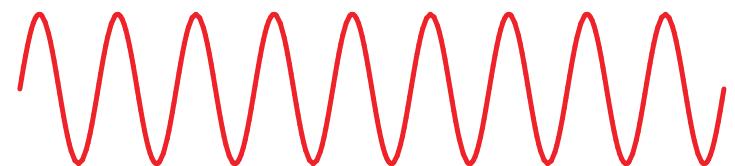
- ◆ $\cos \Theta = \frac{y}{x} \Rightarrow y = x \cos \Theta$.
- ◆ Obdobně, když původní roviná ploška má plochu A , potom se po sklopení o úhel Θ její účinná plocha zmenší na $A' = A \cos \Theta$.

Fotony a vlny

- ◆ Světlo se v některých experimentech chová jako částice (Isaac Newton, ~1670) a někdy jako vlna (Christian Huygens, ~1670).
- ◆ Rozpor vyřešila až kvantová mechanika (Max Planck, Albert Einstein) zavedením pojmu foton.
- ◆ Foton si lze představit jako nejmenší dávku (kvantum) energie o určité frekvenci (vlnové délce) šířící se prostorem (rychlostí světla ve vakuu).
- ◆ Každý foton nese určitou energii e odpovídající jeho frekvenci (vlnové délce).



nízká energie, dlouhá vlnová délka



vysoká energie, krátká vlnová délka

Fotony, světelná energie, zářivý tok

- ◆ Fotony se pohybují přímočaře dokud nenarazí na nějakou překážku, např. vnější povrch tělesa o ploše A .
- ◆ Foton může po dopadu na povrch tělesa změnit směr svého pohybu (např. odrazit se nebo rozptýlit se) nebo zaniknout (tj. přeměnit se v jinou formu energie). Chování fotonu na povrchu v tuto chvíli pro naše úvahy není podstatné.
- ◆ Světelná energie Q odpovídá množství fotonů, které dopadly na vnější stranu plochy povrchu tělesa A za určitý časový interval.
- ◆ Definice zářivého toku Φ [$W = Js^{-1}$] uvažuje limitně malý časový interval

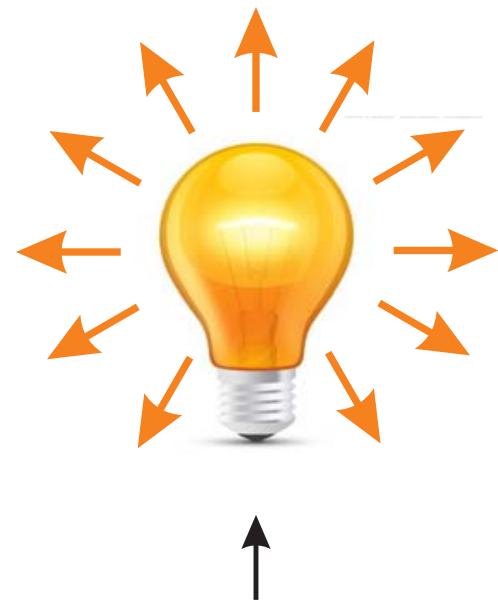
$$\Phi(S, t) = \frac{dQ}{dt} .$$

Např. fotony se počítají po dobu 1 s. Potom uvažujeme jen interval 1 ms a energii 1000 e, dále interval 1 μ s a 10^6 e, atd.

Pojmy a veličiny (1)

- ◆ Zářivý tok Φ [$\text{W} = \text{Js}^{-1}$].
- ◆ Světelný tok Φ_{ph} [lm] (=lumen); $\text{lm} = \text{cd} \cdot \text{sr}$ (kandela krát steradián);
 $1 \text{ [W]} = 683 \text{ [lm]}$ pro vlnovou $\lambda = 555 \text{ [nm]}$ (zelená) a fotooptické (čípkové) vidění.
- ◆ Světelná účinnost [lm/W] udává, jak úspěšně zdroj světla přeměňuje vstupní energii na viditelné světlo, tj. jak převádí wattu na lumeny.
- ◆ Poměrná světelná účinnost [%] udává relativní hodnotu vzhledem k maximální možné hodnotě pro určitou vlnovou délku, např. 683 [lm/W] pro monochromatický 555 [nm] zdroj.

Zářivý tok [W]
nebo
světelný tok [lm]



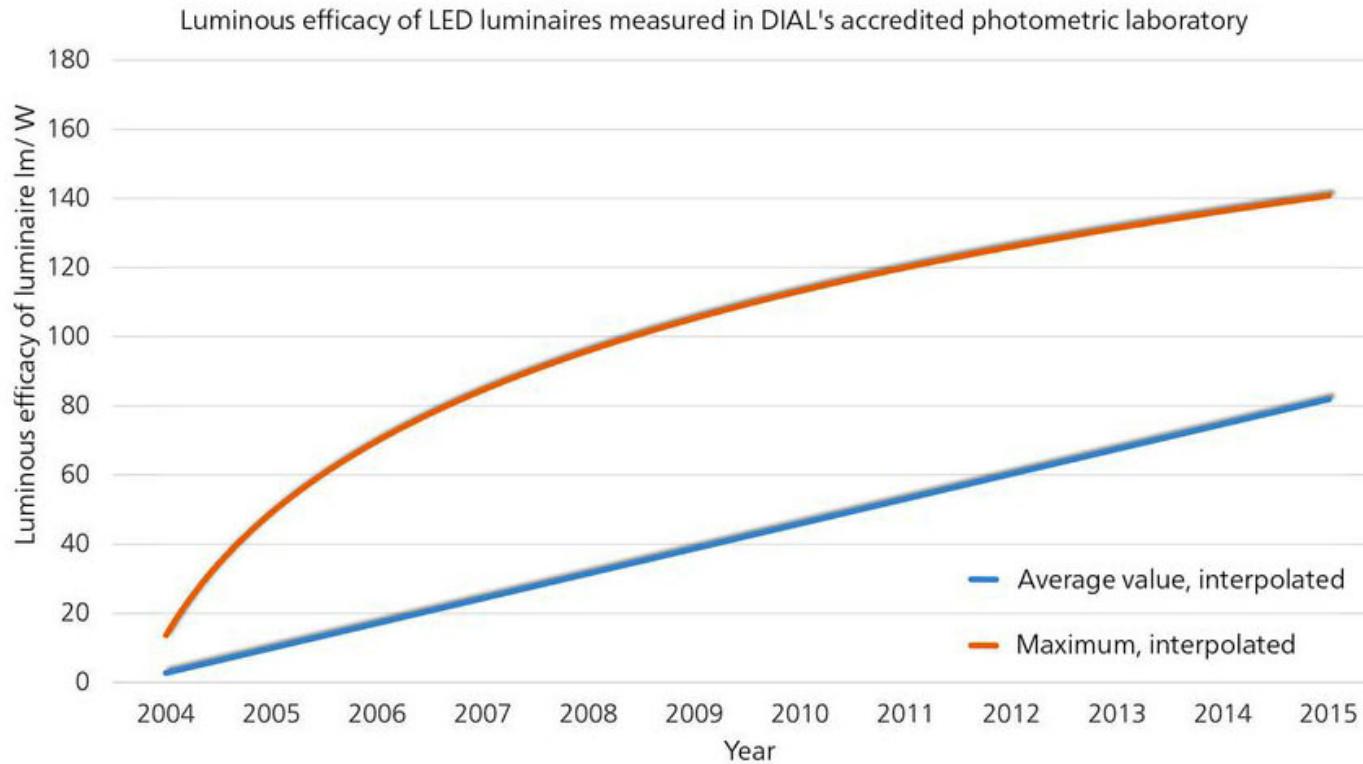
Elektrický příkon [W]



Příklady světelné účinnosti světelných zdrojů

Zdroj světla	Příkon [W]	Světelný tok [lm]	Světelná účinnost [lm/W]	Poměrná svět. účinnost [%]
svíčka	3,3	1	0,3	0,0044
žhnoucí vlákno	100	1750	18	2,6
wolframová halogen.	100	1880	19	2,8
LED, náhrada 40 W	8	420	69	7,7
kompaktní zářivka	13	900	69	10,1
zářivka	32	2950	92	13,9
halogenová	175	14000	80	11,7
vysokotlaká sodíková	150	16000	107	15,6

Růst světelné účinnosti LED zdrojů světla



Viz analýza DIAL s detailem a teoretickými limity světelné účinnosti různých zdrojů světla.

Světelný tok závisí na vlnové délce λ

Nechť

- ◆ $K(\lambda)$ je světelná účinnost [lm W^{-1}],
- ◆ $S(\lambda)$ [W] je výkon příslušného zdroje záření,
- ◆ λ [m] je vlnová délka.

Potom světelný tok Φ_{ph} udává celkovou vnímanou odezvu vjemu člověkem

$$\Phi_{ph} = \int_{\lambda} K(\lambda) S(\lambda) \, d\lambda .$$

Pojmy a veličiny (2)

- ◆ Ozáření (též intenzita ozáření) E [W m^{-2}] udává výkon světelné energie, které dopadá na jednotku plochy povrchu tělesa, $E = \delta\Phi/\delta A$, kde δA je nekonečně malá ploška na povrchu. E nezávisí na tom, odkud energie přichází.

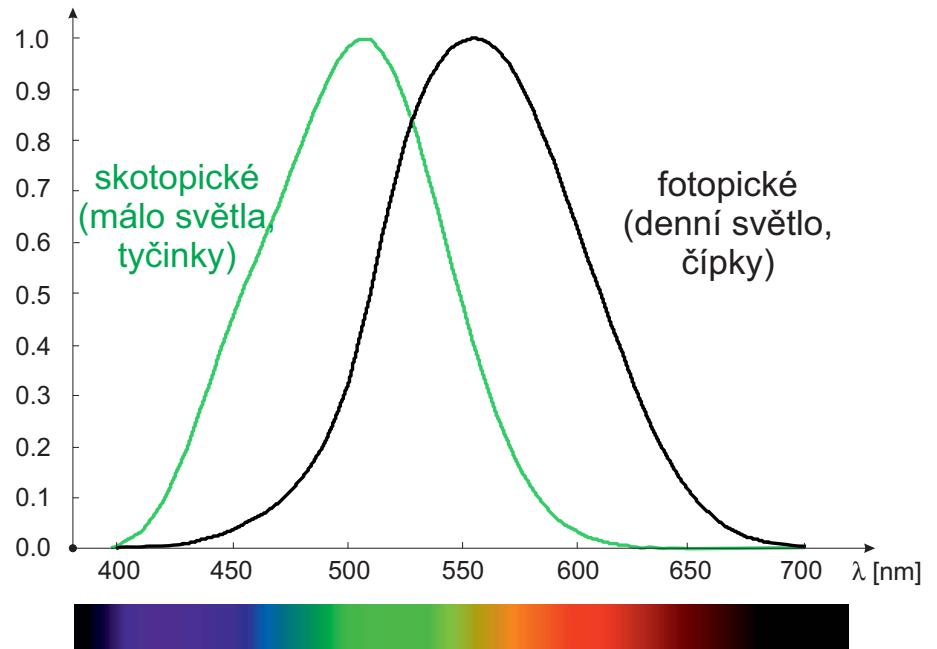
- ◆ Odpovídající fotometrická veličina je osvětlení E_{ph} [lm m^{-2}].
- ◆ Svítivost je fotometrická veličina poskytující míru množství energie světelného zdroje váženou vlnovou délkou do určitého prostorového úhlu [cd] (=kandela, základní SI jednotka).

Kandela je svítivost světelného zdroje, který v daném směru vyzařuje monochromatické záření o frekvenci 540 THz (555 nm, zelená) a jehož zářivá intenzita v tomto směru činí 1/683 wattů na jeden steradián.

Svítivost svíčky je přibližně 1 cd, což dalo veličině název.

Spektrální citlivost oka na jas

- ◆ Citlivostní funkce osvětlení udává relativní průměrnou spektrální citlivost lidského vnímání na jas. Popisuje subjektivní vjem, který z dvojice různě barevných světel je jasnější. Slouží k popisu citlivosti na různé vlnové délky.
- ◆ Byla vytvořena Mezinárodní komisí pro osvětlení (CIE) v roce 1931. Existují novější vylepšení.



Citlivostní funkce, normalizovaná podle maxima.

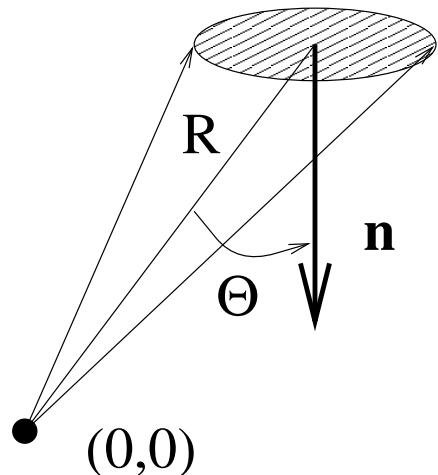
Pojmy a veličiny (3)

- ◆ Ve zpracování obrazu se obvykle neformálně používá fotometrická veličina **jas** L_{ph} [$\text{lm m}^{-2} \text{sr}^{-1}$] (též měrná svítivost, stupeň šedi pro označení veličiny, kterou měří kamera).
- ◆ Radiometrický ekvivalent jasu je **zář** (též měrná zářivost) L [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$] udává zářivý tok, který se z jednotky plochy kolmé ke směru pozorování vyzáří do jednotkového prostorového úhlu [sr].

Efektivní zmenšení plošky jejím natočením (připomenutí)

Malá ploška A ve větší vzdálenosti R od počátku souřadného systému, tj. $R^2 \gg A$, s úhlem Θ mezi normálou k ploše a spojnicí polopřímkou od počátku k ploše odpovídá prostorovému úhlu Ω ,

$$\Omega = \frac{A \cos \Theta}{R^2} .$$



Přirozená vinětace

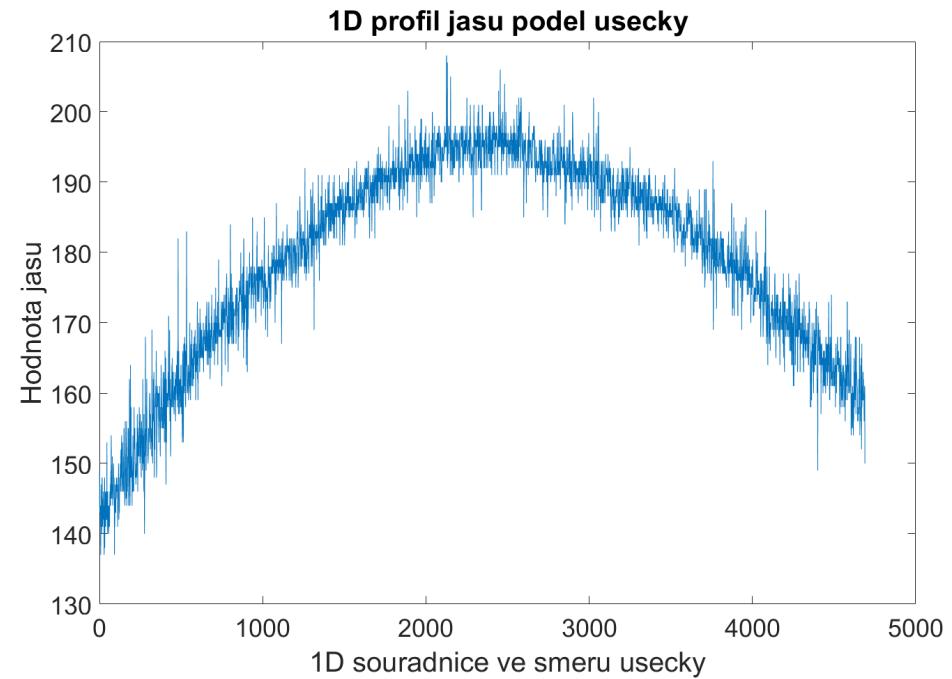
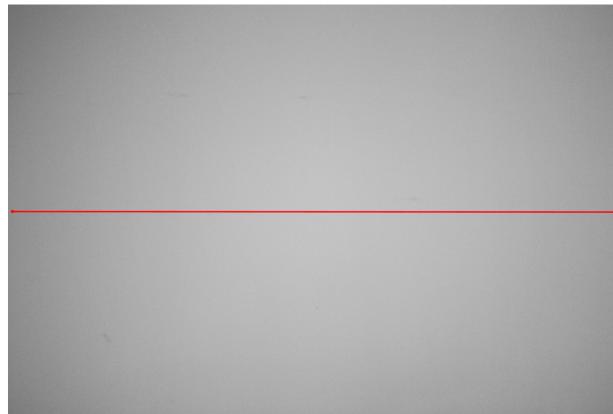
- ◆ Přirozená vinětace je systematická optická vada.

Pozn. Existuje i optická a mechanická vinětace, o nichž se v této přednášce později zmíníme.

- ◆ Popisuje jev, kdy jsou více zeslabovány paprsky s větším úhlem α (dále od optické osy). Zeslabení je dáno činitelem $\cos^4 \alpha$, což odvodíme záhy v rovnici ozáření.
- ◆ Tato chyba je více patrná u širokoúhlých objektivů než u teleobjektivů.
- ◆ Jelikož je přirozená vinětace systematickou chybou, lze ji pro radiometricky kalibrovanou kameru a pevnou ohniskovou vzdálenost kompenzovat.
- ◆ Nejdříve ilustrujeme přirozenou vinětaci na praktickém příkladu a potom ji odvodíme (rovnice ozáření).

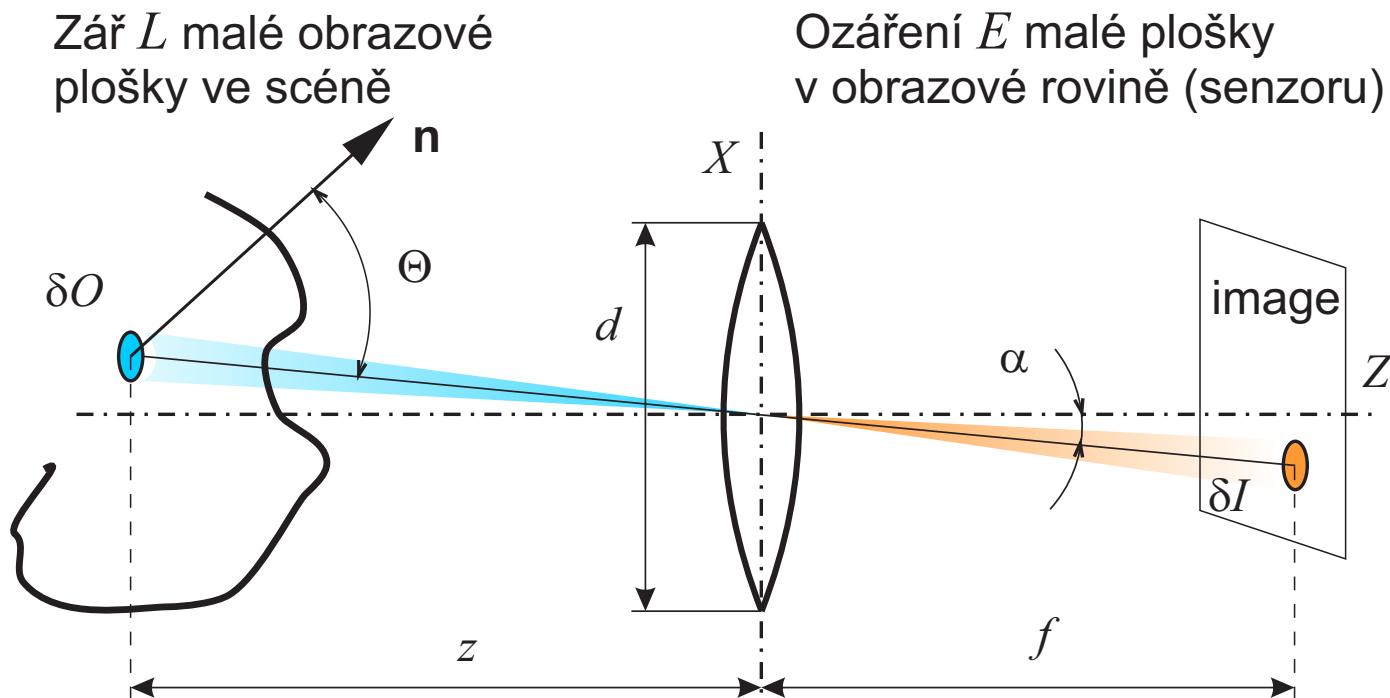
Přirozená vinětace, praktický příklad

List bílého papíru osvětlený přirozeným rozptýleným světlem vyfotografovaný slušným objektivem s pevnou ohniskovou vzdáleností Canon EF 50 mm f/1.8 II a světelností 1:1,8.



Rovnice ozáření (1)

Hledáme vztah mezi ozářením E dopadajícím na senzor v obrazové rovině v závislosti na září L v pozorované scéně.



Uvažujeme nejdříve model dírkové komory.

Rovnice ozáření (2)

- ◆ Paprsek procházející středem čočky se neláme, a proto se prostorový úhel odpovídající elementární plošce ve scéně rovná prostorovému úhlu příslušejícímu elementární ploše v obraze.
- ◆ Nakloněná ploška δI , jak je viděna ze středu soustavy, je $\delta I \cos \alpha$. Její vzdálenost od středu optické soustavy je $f / \cos \alpha$.
- ◆ Prostorový úhel odpovídající ploše δI v obrazové rovině je

$$\frac{\delta I \cos \alpha}{\left(\frac{f}{\cos \alpha}\right)^2} .$$

- ◆ Analogicky, prostorový úhel odpovídající nakloněné ploše δO na povrchu scény je

$$\frac{\delta O \cos \Theta}{\left(\frac{z}{\cos \alpha}\right)^2} .$$

Rovnice ozáření (3)

Z rovnosti prostorových úhlů plyne

$$\frac{\delta O \cos \Theta}{\left(\frac{z}{\cos \alpha}\right)^2} = \frac{\delta I \cos \alpha}{\left(\frac{f}{\cos \alpha}\right)^2}$$

$$\frac{\delta O \cos \Theta}{\frac{z^2}{\cos^2 \alpha}} = \frac{\delta I \cos \alpha}{\frac{f^2}{\cos^2 \alpha}}$$

$$\frac{\delta O \cos \Theta}{z^2} = \frac{\delta I \cos \alpha}{f^2}$$

$$\frac{\delta O}{\delta I} = \frac{\cos \alpha}{\cos \Theta} \cdot \frac{z^2}{f^2}$$

Rovnice ozáření (4)

Nyní stanovme, jaké množství světla projde přes čočku, je-li její průměr d . Prostorový úhel Ω_L , kterým je čočka viděna z elementární plošky na objektu, je dán vztahem

$$\Omega_L = \frac{\pi}{4} \frac{d^2 \cos \alpha}{\left(\frac{z}{\cos \alpha}\right)^2} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{z}\right)^2 \cos^3 \alpha.$$

Nechť L je zář povrchu objektu otočeného směrem k čočce. Potom elementární příspěvek zářivého toku $\Phi [W]$ dopadajícího na čočku je

$$\delta\Phi = L \delta O \ \Omega_L \cos \Theta = \pi L \delta O \ \left(\frac{d}{z}\right)^2 \frac{\cos^3 \alpha \cos \Theta}{4}.$$

Rovnice ozáření (5)

Světelná energie je čočkou soustředěna do obrazu. Zanedbáme ztráty v čočce a uvažujeme, že žádné další světlo na element obrazu nedopadá. Potom pro ozáření E elementární plošky platí

$$E = \frac{\delta\Phi}{\delta I} = L \frac{\delta O}{\delta I} \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{z}\right)^2 \cos^3 \alpha \cos \Theta .$$

Po substituci za $\frac{\delta O}{\delta I}$ dostaneme rovnici ozáření udávající, jaká je ozáření E obrazového senzoru vyvolané září L na povrchu pozorované scény

$$E = L \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{f}\right)^2 \cos^4 \alpha .$$

$n_f = \frac{f}{d}$ je f -číslo objektivu

- ◆ V rovnici ozáření

$$E = L \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{f} \right)^2 \cos^4 \alpha .$$

se objevil činitel $\frac{d}{f}$.

- ◆ Jeho obrácená hodnota $n_f = \frac{f}{d}$ se nazývá f -číslo objektivu.
- ◆ f -číslo n_f je důležitým parametrem objektivu, který udává nakolik se objektiv liší od dírkové komory.

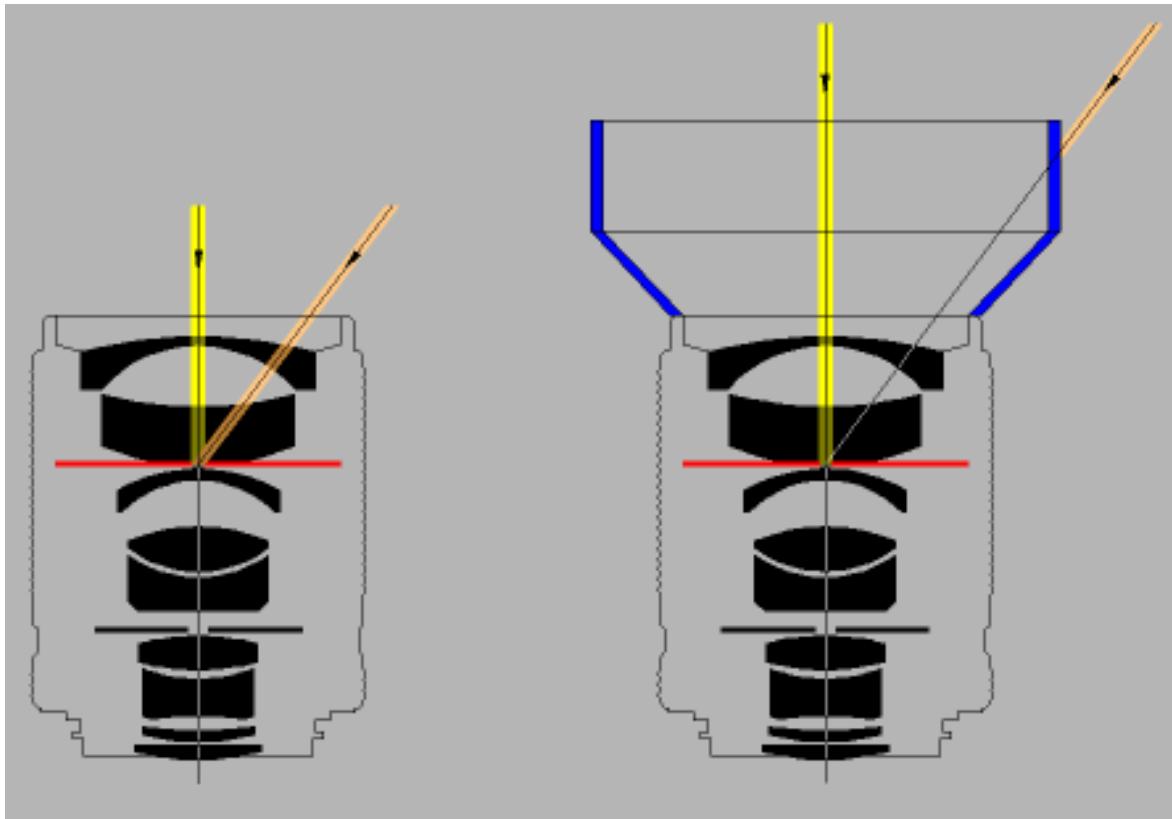
Optická vinětace

- ◆ Jelikož optické soustavy mají tloušťku několika milimetrů až centimetrů, nemusí být pro paprsky vstupující do objektivu dostupný celý clonový otvor.
- ◆ Jev se uplatňuje při více otevřených clonových otvorech.

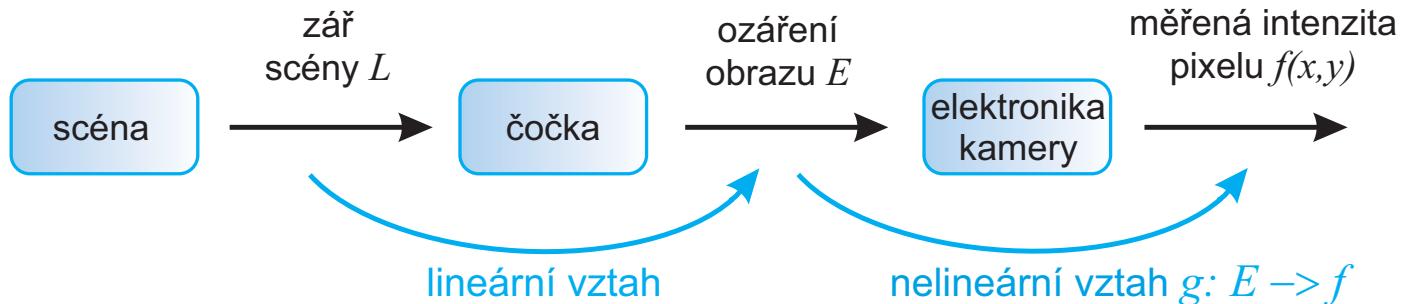


Mechanická vinětace

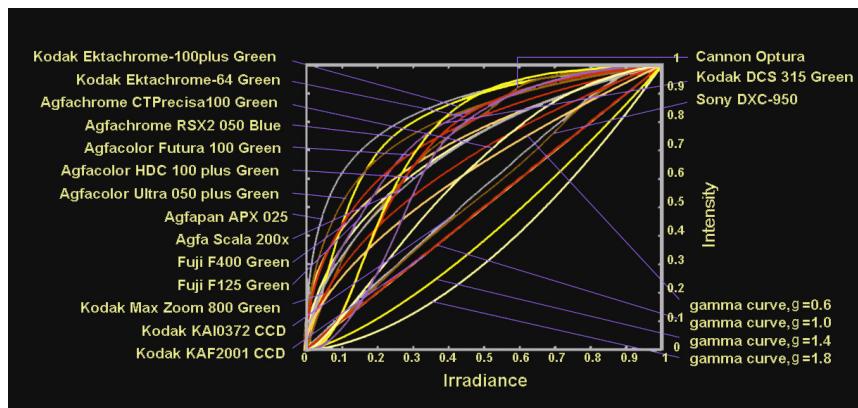
Týká se jen nepozorných uživatelů.



Vztah mezi září scény L intenzitou pixelu $f(x, y)$

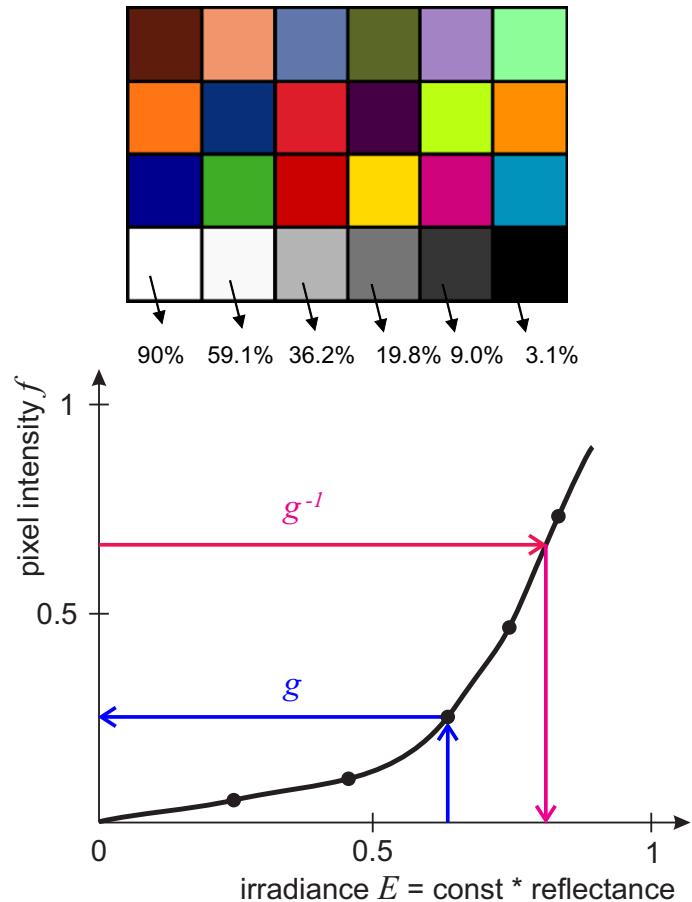


Nelineární vztah v 'elektronice kamery' viz M.D. Grossberg and S.K. Nayar: Modeling the Space of Camera Response Functions, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.26, No.10, Oct 2004, pp. 1272-1282.



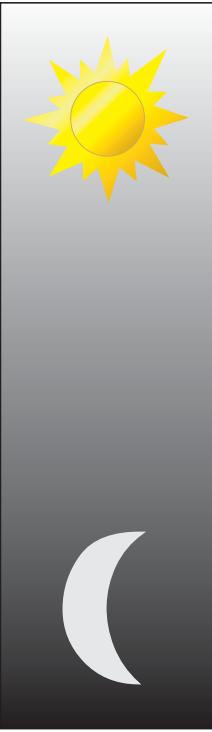
Radiometrická kalibrace

- ◆ Důležité pro ‘měřičské’ aplikace jako fotometrické stereo, odstraňování vlivu počasí, zpodobnění pomocí obrazů (= image-based rendering).
- ◆ Inverzní vztah g^{-1} : $f \rightarrow E$ se určuje pokusně. Jednoznačný inverzní vztah existuje díky monotonicitě g .
- ◆ Používá se šedá/barevná kalibrační tabulka se známými koeficienty odrazivosti.
- ◆ Kamera se exponuje několikrát pro různé intenzity světla.



Vysoký dynamický rozsah, formulace úlohy

Různé osvětlení [$\text{lux} = \text{lumen} / m^2$; symbol lx] = světelný tok na jednotku plochy.



	Total lighting range	
Direct sun	100,000 lux	Camera sensor range
Sunny day	50,000 lux	
Cloudy day	5,000 lux	
Office	400 lux	
Home lighting	10 lux	
Street lamps	1 lux	
Full moon	0.1 lux	
Quarter moon	0.01 lux	
Clear moonless night	0.001 lux	
Cloudy moonless night	0.0001 lux	

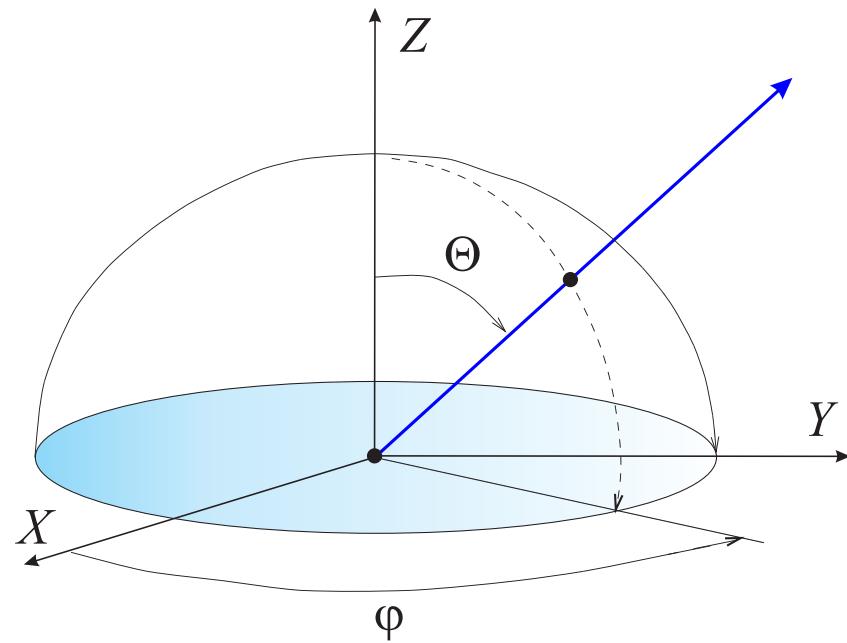
Vysoký dynamický rozsah, foto příklad



Poděkování: fotografie Whitson Gordon

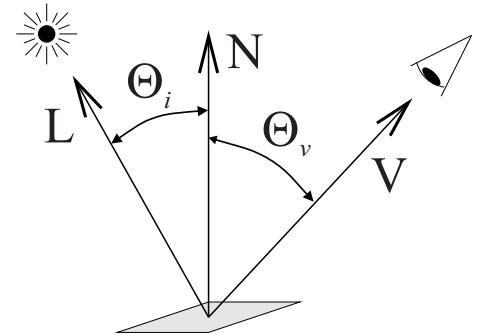
Směry vyjádřené azimutem a elevančním úhlem

- ◆ Potřebujeme vyjádřit směr ve 3D prostoru, což uděláme pomocí směru daného vektorem.
- ◆ Směr vektoru je dán azimutem ϕ a elevačním úhlem Θ podobně jako ve sférických souřadnicích.



Záře viděná pozorovatelem

- ◆ Předpokládáme nekonečně malou plošku na povrchu neprůhledného objektu. Orientace plošky je dána jejím normálovým vektorem \mathbf{N} .
- ◆ Ploška je osvětlena zdrojem světla, který poskytuje záři $L(\Theta_i, \phi_i)$. Záře na ploše vytváří ozáření $E(\Theta_i, \phi_i)$.
- ◆ Když ploška na povrchu nevyzařuje vlastní záření, potom pozorovatel ‘vidí’ záři $L(\Theta_v, \phi_v)$.
- ◆ Záře $L(\Theta_v, \phi_v)$ závisí na směrovém vektoru \mathbf{L} ke zdroji světla (zde uvažujeme nejjednodušší případ, bodový zdroj), na směrovém vektoru \mathbf{V} k pozorovateli, na orientaci plošky \mathbf{N} a na odrazivosti f_r plošky.



- ◆ \mathbf{L} z angl. Light (směr k)
- ◆ \mathbf{N} z normálový vektor
- ◆ \mathbf{V} z angl. Viewer (směr k)

Odrazivost f_r malé plošky na povrchu

- ◆ Předpokládáme nekonečně malou plošku na povrchu neprůhledného objektu. Orientaci plošky udává její normálový vektor \mathbf{N} .
- ◆ Předpokládáme, že ploška nevyzařuje vlastní energii.
- ◆ Ploška je ozářena osvětlovačem poskytujícím ozáření na ploše povrchu $E(\Theta_i, \phi_i)$.
- ◆ Přicházející energie způsobí, že ploška vyzařuje směrem k pozorovateli záři $L(\Theta_v, \phi_v)$.
- ◆ Zář L plošky povrchu závisí na přicházejícím ozáření E . Závislost ovlivňuje odrazivost povrchu f_r , tj. schopnost povrchu přeměnit přicházející ozáření $E(\Theta_i, \phi_i)$ na zář $L(\Theta_v, \phi_v)$.

BRDF

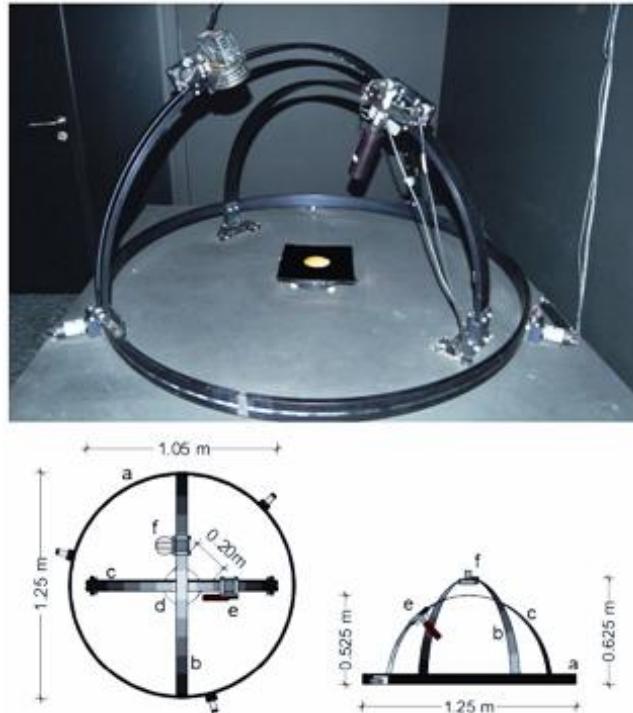
- ◆ BRDF – dvousměrová distribuční funkce odrazu f_r
 (angl. Bidirectional Reflectance Distribution Function)
- ◆ BRDF udává pro určitý materiál poměr mezi změřenou září L odraženou od povrchu v jistém směru při ozáření E . Vliv fáze záření je pro jednoduchost zanedbán.

$$f_r(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_v, \varphi_v) = \frac{\delta L(\Theta_v, \varphi_v)}{\delta E(\Theta_i, \varphi_i)} \quad [\text{sr}^{-1}] .$$

- ◆ BRDF představuje složitý model nutný pro povrchy s orientovanou mikrostrukturou, např. polodrahokam tygří oko (křemen prostoupený vlákny krokydolitu, žlutohnědá barva, měňavý třpyt), paví pera nebo např. hrubý řez hliníkem.
- ◆ Helmholtzova reciprocity vyplývající z druhého termodynamického zákona

$$f_r(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_v, \varphi_v) = f_r(\Theta_v, \varphi_v; \Theta_i, \varphi_i) .$$

Měření BRDF na goniometru



Zdroj: Dimitrios Biliouris et al.: RPV Model Parameters Based on Hyperspectral Bidirectional Reflectance Measurements of *Fagus sylvatica* L. Leaves. *Remote Sens.* 2009, 1(2), 92–106; doi:10.3390/rs1020092

Příklad složité BRDF - zmrzlý sníh



Zmrzlý sníh, detail



Zmrzlý sníh, závislost na orientaci



Zjednodušená BRDF

- ◆ Většina prakticky významných povrchů je isotropická, což znamená, že jejich BRDF je nezávislá na otočení podél normály k povrchu. Potom f_r závisí pouze na absolutní hodnotě rozdílu azimutů směrů ke světelnému zdroji a pozorovateli $\varphi_i - \varphi_v$, tedy na $f_r(\Theta_i, \Theta_v, |\varphi_i - \varphi_v|)$.
- ◆ Zjednodušení platí pro matné (lambertovské) povrchy, ideálně zrcadlící povrh a jejich kombinace.

Koeficient odrazivosti = albedo

- ◆ Albedo vyjadřuje, jaký podíl dopadající energie je povrchem odražen zpět do poloprostoru.
- ◆ Zjednodušení: zanedbáme vliv barvy povrchu a také závislost albeda na vlnové délce λ .
- ◆ $E_i(\lambda)$ je zář způsobenou ozářenou ploškou povrchu a $E_r(\lambda)$ je tok energie na jednotku plochy vyzářený ploškou zpět do poloprostoru.
- ◆ Hledaný podíl je potom integrálem záře L z povrchu v prostorovém úhlu Ω , který odpovídá celému poloprostoru

$$E_r = \int_{\Omega} L \, d\Omega .$$

Funkce odrazivosti $R(\Omega)$

- ◆ $R(\Omega)$ modeluje vliv lokálních změn geometrie povrchu na rozptýlení odražené energie v prostoru.
- ◆ Ω je nekonečně malý prostorový úhel kolem směru pohledu,

$$\int_{\Omega} R \, d\Omega = 1 .$$

- ◆ Obecně závisí odrazivé vlastnosti povrchu na třech úhlech, popisujících vzájemný vztah mezi směrem ke zdroji světla \mathbf{L} , směrem k pozorovateli \mathbf{V} , lokální orientaci povrchu danou normálnou \mathbf{n} .

Funkce odrazivosti (2)

- ◆ Kosiny vektorů (směrů) ke zdroji světla \mathbf{L} , k pozorovateli \mathbf{V} a lokální orientace povrchu danou normálou \mathbf{n} lze napsat jako skalární součin vektorů, což označuje (\cdot) .
- ◆ Potom je funkce odrazivosti $R(\mathbf{n} \cdot \mathbf{L}, \mathbf{n} \cdot \mathbf{V}, \mathbf{V} \cdot \mathbf{L})$.

Speciální případ = Lambertovský povrch

- ◆ Lambertovský povrch (také ideálně matný, ideálně difúzní povrch) odráží světelnou energii rovnoměrně do všech směrů.
- ◆ Proto je zář (a také jas) ze všech směrů konstantní,

$$f_{\text{Lambert}}(\Theta_i, \Theta_v, \varphi_i - \varphi_v) = \frac{\rho(\lambda)}{\pi} .$$

- ◆ Název dal Johann Heinrich Lambert podle jeho knihy Photometria vydané v latině v roce 1760. Zde bylo poprvé použito slovo “albedo”.

Lambertovský povrch (2)

- ◆ Pro konstantní albedo $\rho(\lambda)$ lze odrazivost lambertovského povrchu vyjádřit ve tvaru kosinového zákona

$$R = \frac{1}{\pi} \mathbf{n} \cdot \mathbf{L} = \frac{1}{\pi} \cos \Theta_i .$$

- ◆ Všimněte si, že funkce odrazivosti lambertovského povrchu nezávisí směru pohledu \mathbf{V} .
- ◆ Lambertovský model odrazivosti je pro svou jednoduchost velmi oblíbený.

Číselné hodnoty odrazivosti pro lambertovské povrchy

- ◆ Pro lambertovský povrch osvětlený rovnoběžnými paprsky světla s polárním úhlem Θ a ozářením E .
- ◆ Pozorovaná je zář L .
- ◆ Příklady materiálů, jejichž odrazivost lze považovat za lambertovskou s hodnotami odrazivosti $\rho(\lambda)$ pro λ odpovídající asi středu viditelného spektra.
- ◆ Bílý piják 0,8. Bílý psací papír 0,68. Bílý strop nebo žlutý papír 0,6. Tmavě hnědý papír 0,14. Tmavý samet 0,004.

Ideální zrcadlový povrch

- ◆ Odráží ozáření ze směru (Θ_i, φ_i) do směru $(\Theta_i, \varphi_i + \pi)$.
- ◆ Vlastní povrch tedy není vidět, ale ukazuje jen zdánlivý zrcadlově převrácený obraz zdrojů osvětlení.

Kodak Ektachrome-100plus Green
Kodak Ektachrome-64 Green
Agfachrome CTPrecisa100 Green
Agfachrome RSX2 050 Blue
Agfacolor Futura 100 Green
Agfacolor HDC 100 plus Green
Agfacolor Ultra 050 plus Green
Agfapan APX 025
Agfa Scala 200x
Fuji F400 Green
Fuji F125 Green
Kodak Max Zoom 800 Green
Kodak KAI0372 CCD
Kodak KAF2001 CCD

