

Geometrická optika



PINK FLOYD

1. Světlo a jeho vnímání

Zdroje světla

- **přirozené** → fyzikální, chemické (Slunce, hvězdy, oheň, Měsíc – odrazem, blesk)
→ biologické (luminiscence světlušek)
- **umělé** → svíčky, žárovky, doutnavky, LED, laser



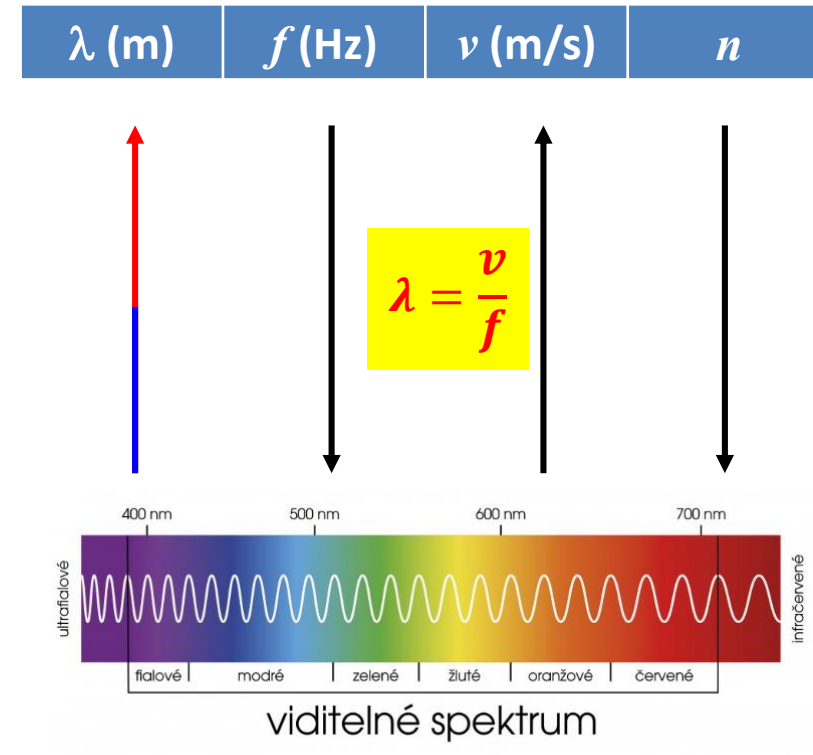
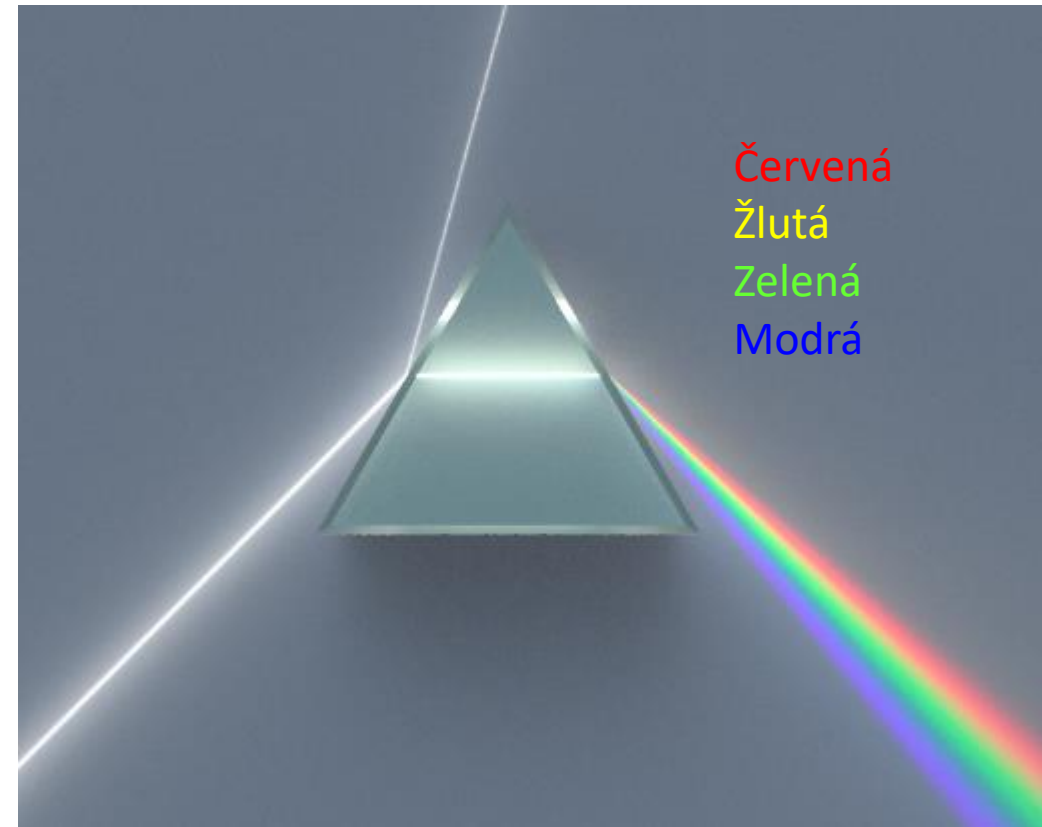
Rychlost světla

- $c = 299\,792\,458 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- **maximální rychlost** částic, objektů i fyzikálních interakcí **ve vakuu**
- **foton** – částice ze kterých je tvořen světelný paprsek

1. Světlo a jeho vnímání.

Disperze světla

- rozklad bílého světla na barevné složky při lomu → hranolové spektrum, mřížkové spektrum



- barva světla = frekvence f (Hz)
- při průchodu světla rozhraním dvou prostředí se nemění frekvence (barva) světla
- nejvíce se láme fialové světlo, nejméně červené

1. Světlo a jeho vnímání.

Hranolové spektrum

- **hranolové spektrum** → nerovnoměrné rozložení barev, úzká červená, široká modrá
- pořadí barev: červená, oranžová, žlutá, zelená, modrá, indigová fialová
- **duha** – stejné barvy



Hranolové spektrum



Duha

1. Světlo a jeho vnímání.

Barva světla

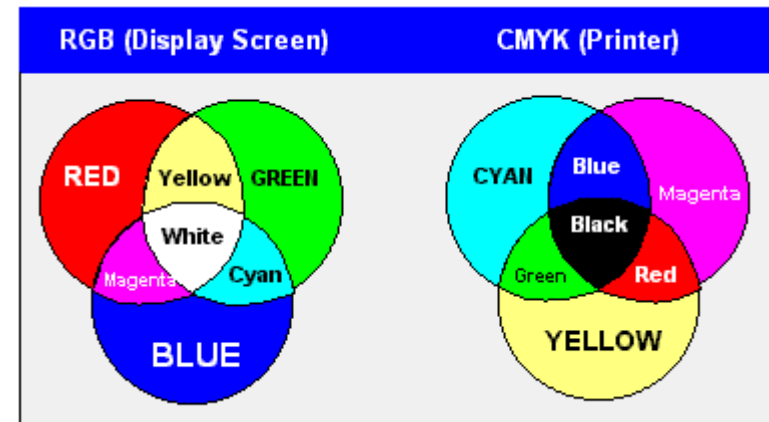


- Newtonův kotouč 1686
- https://www.youtube.com/watch?v=VaQFYu5b_R8

- **barevné spektrum** → složením monochromatických světél vzniká bílé světlo
- **barva světla** → odstín (tón, frekvence) barvy
→ sytost barvy
- **odstín barvy** → závisí na poměru složek RGB, resp. CMYK
→ barva předmětu závisí také na barvě světla, kterým je předmět osvětlen
- **sytost barvy** → dána podílem bílé složky ve světle dané barvy

Míšení barev

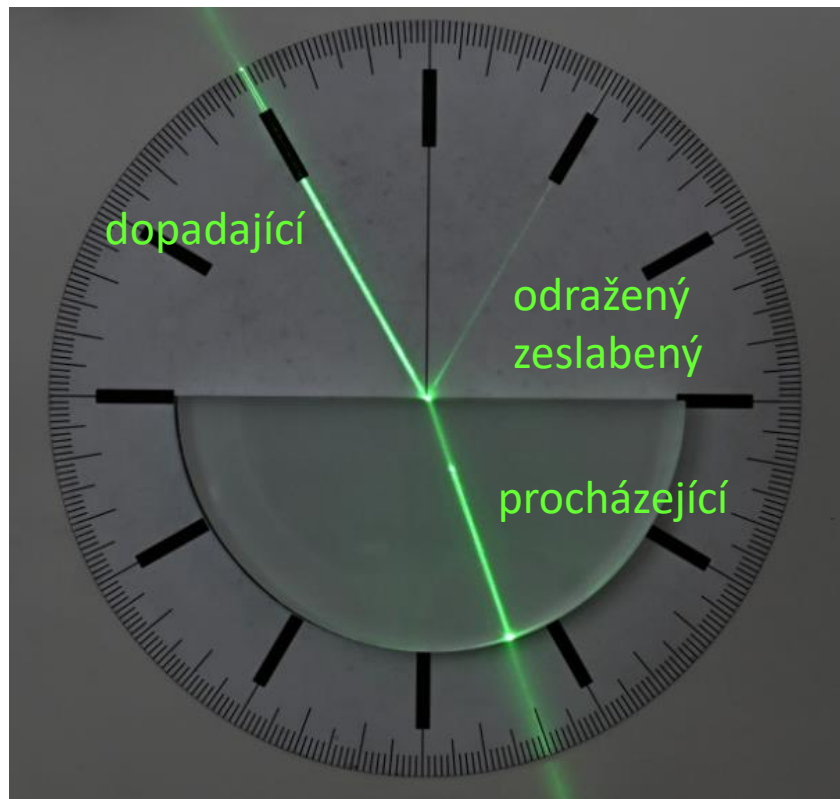
- **aditivní (RGB model)**
→ složením jednotlivých barev vzniká výsledná bílá
→ $R+G = \text{žlutá}$, $R + G + B = \text{bílá}$ → TV, displeje
- **subtraktivní (CMYK)** → složením vzniká černá
→ barevné tiskárny



2. Základní vlastnosti světla

Reflexe, absorpce, transmise

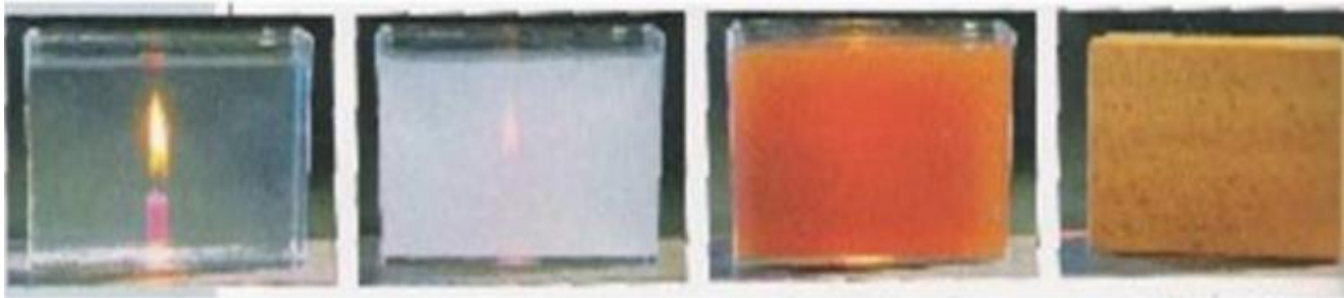
- **reflexe** → odraz paprsku od předmětu (zrcadlo)
- **absorpce** → pohlcení části paprsků po průchodu (zeslabení světla)
- **transmise** → průchod paprsků z jednoho prostředí do druhého (lom světla)



2. Základní vlastnosti světla

Optická prostředí

- **průhledné** → paprsky po průchodu zachovávají rovnoběžnost
- **průsvitné** → rozptyl paprsků po průchodu způsobuje neostré obrysy
- **neprůhledné** → odraz paprsků od tělesa, případně pohlcení světla



průhledné

průsvitné

málo průsvitné

neprůhledné



2. Základní vlastnosti světla

Základní principy šíření světla

- 1. Princip přímočarého šíření** → v homogenním prostředí se světlo šíří po přímce



2. Základní vlastnosti světla

Základní principy šíření světla

2. **Princip nezávislosti chodu** → protínající se paprsky se vzájemně neovlivňují



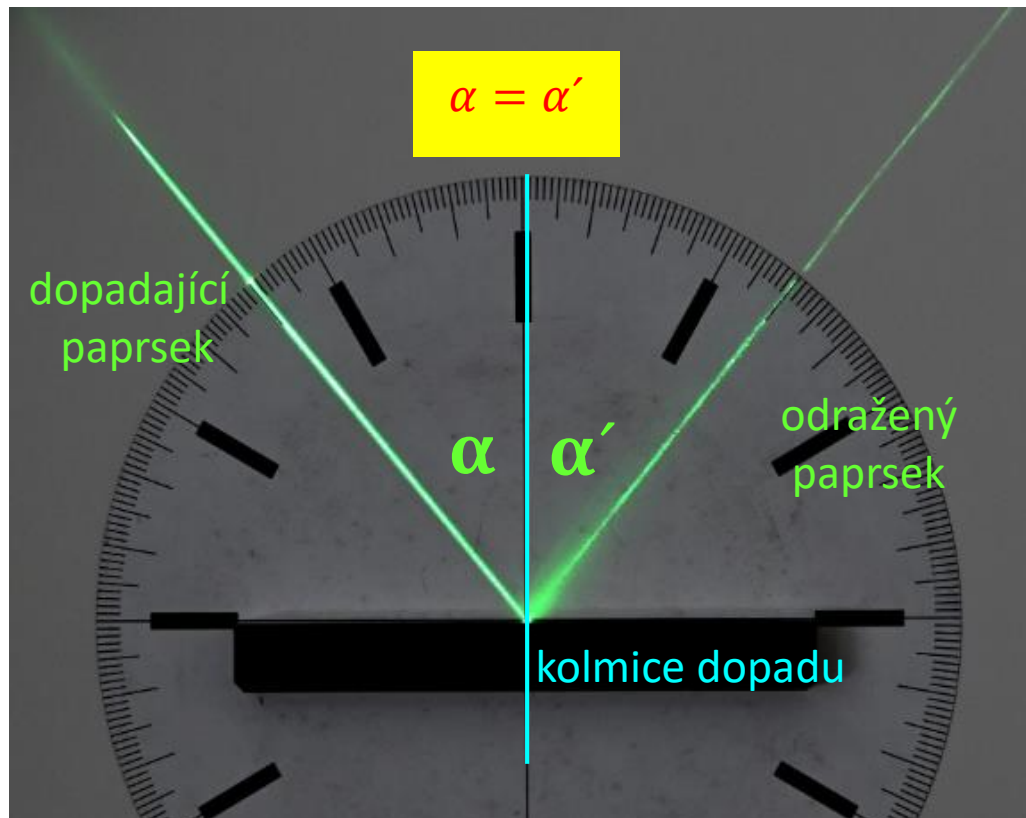
3. Odraz a lom světla

Zákon odrazu

Úhel odrazu je stejný jako úhel dopadu.

Kolmice dopadu – přímka kolmá na odrazné prostředí.

Úhel dopadu i odrazu se měří od kolmice dopadu k paprsku.



3. Odraz a lom světla

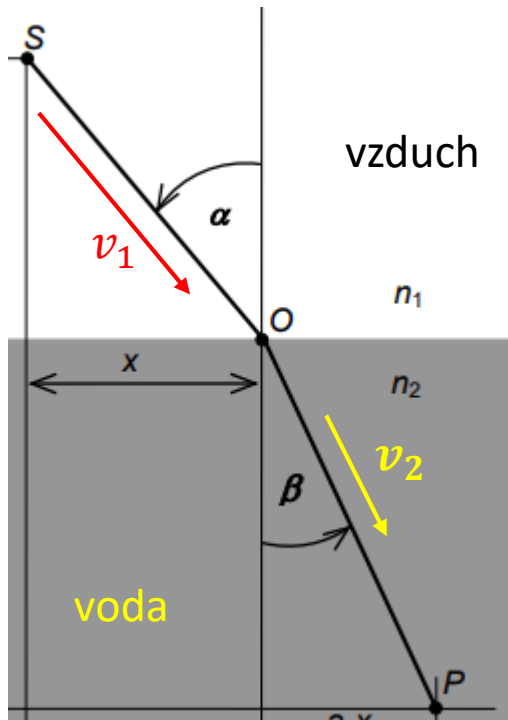
Lom světla

Úhel dopadu i lomu se měří od kolmice dopadu k paprsku.

Absolutní index lomu - n

- udává, kolikrát se v daném prostředí šíří světlo pomaleji oproti vakuu
- c – rychlost světla ve vakuu
- v – rychlost světla v daném prostředí

$$n = \frac{c}{v}$$



Prostředí	Index lomu n	Rychlost světla v prostředí v (km/s)
vzduchoprázdnno	1	300 000
vzduch za normálního tlaku	1,0026	299 200
led	1,31	229 000
voda	1,33	226 000
etanol	1,36	221 000
sklo	1,5 až 1,9	200 000 až 160 000
sůl	1,52	197 000
safír	1,77	169 000
diamant	2,42	124 000

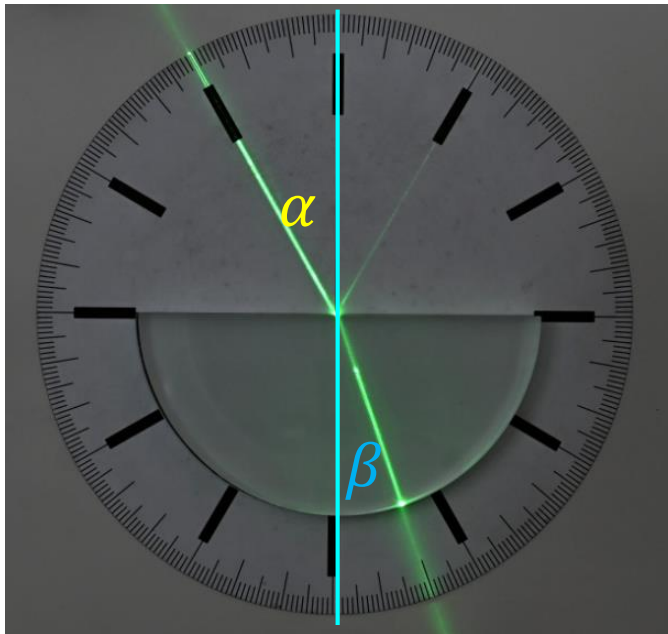
3. Odraz a lom světla

Lom ke kolmici $\beta < \alpha$

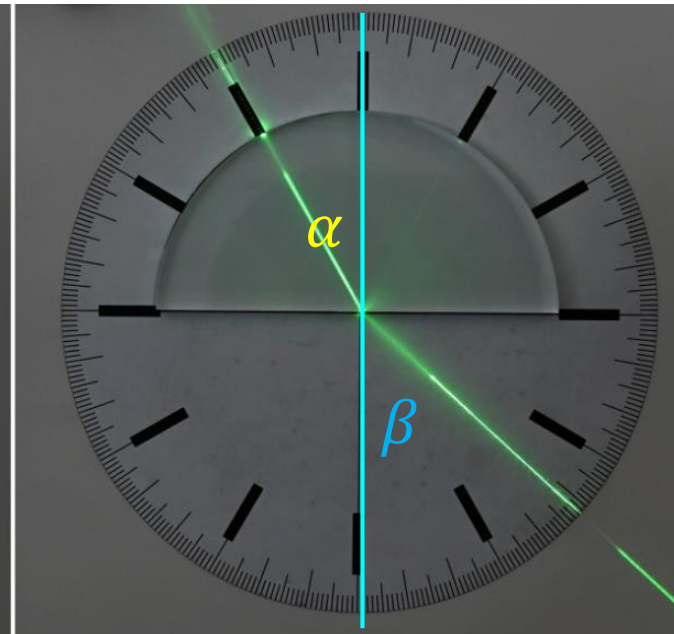
Světlo se šíří z prostředí opticky řidšího (např. vzduch) do prostředí opticky hustšího (např. voda, sklo).

Lom od kolmice $\beta > \alpha$

Světlo se šíří z prostředí opticky hustšího (voda, sklo) do prostředí opticky řidšího (vzduch).



Lom ke kolmici.

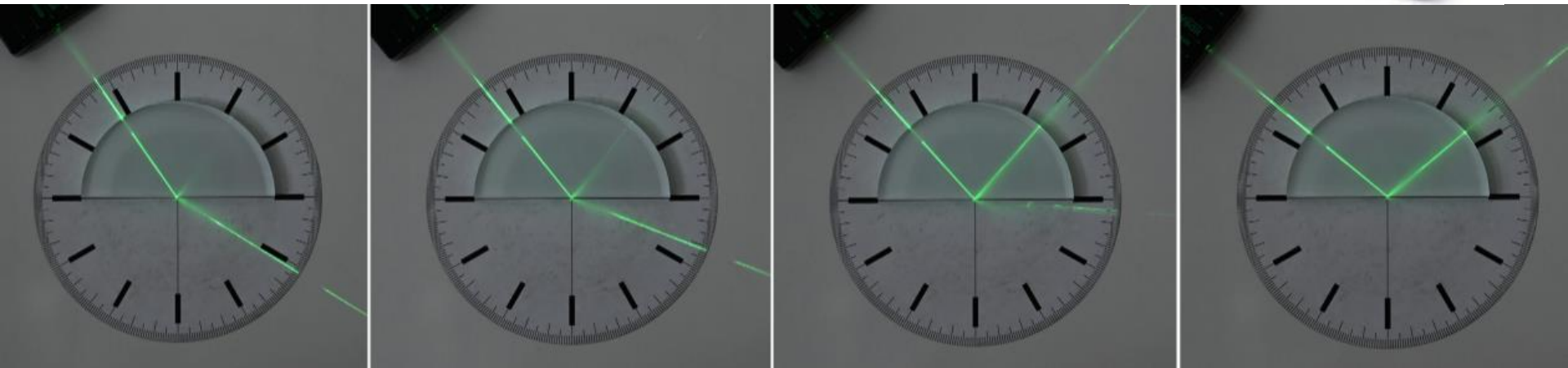


Lom od kolmice.

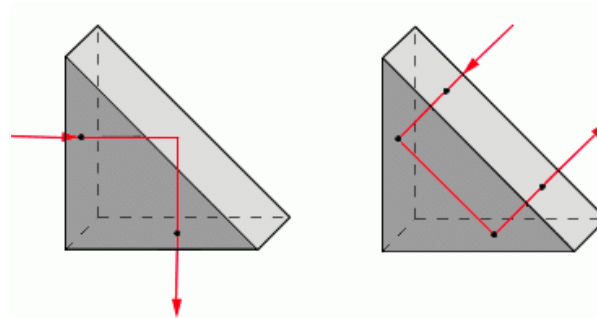
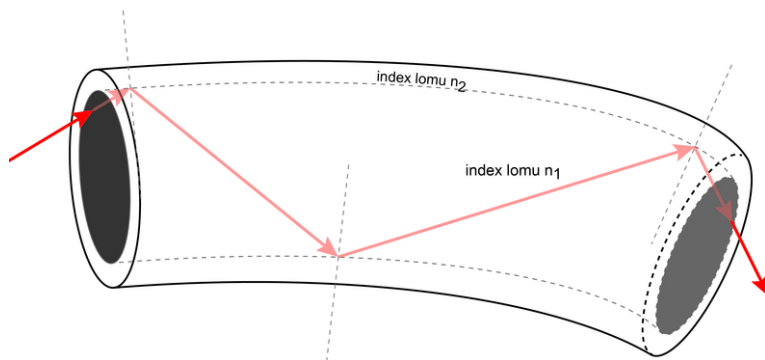
3. Odraz a lom světla

Lom od kolmice – totální odraz

mezní úhel - α_m
→ úhel lomu $\beta = 90^\circ$

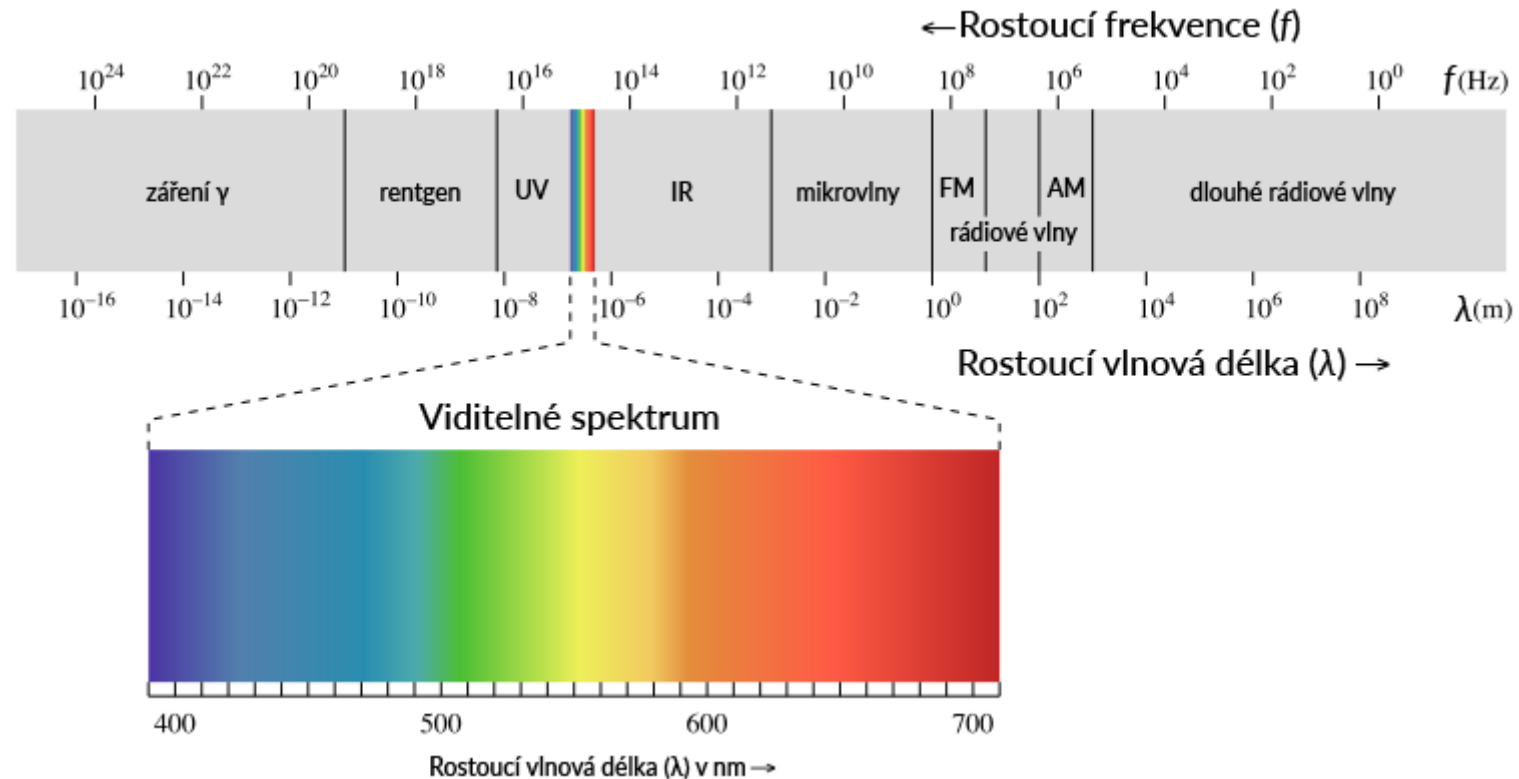


- využití: optická vlákna, refraktometry, triedry, odrazky



4. Světlo jako elektromagnetické vlnění

Elektromagnetické spektrum



Viditelné spektrum

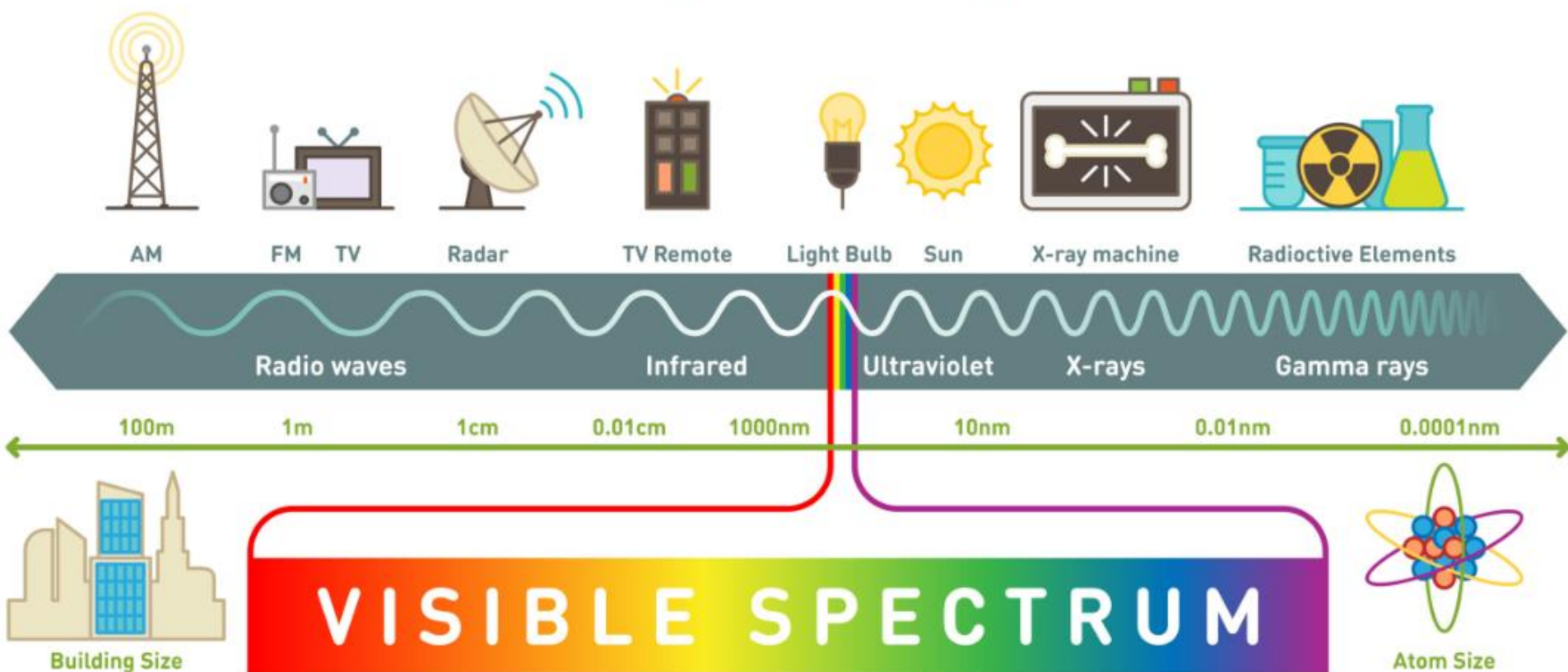
$$\lambda = (390 - 760) \text{ nm}$$

- **bílé světlo** – polyfrekvenční – složené z více barev
Př. sluneční světlo, žárovka
- **monofrekvenční** (monochromatické) **světlo** – zdroj září na 1 frekvenci, např. přibližně laser

4. Světlo jako elektromagnetické vlnění

Elektromagnetické spektrum

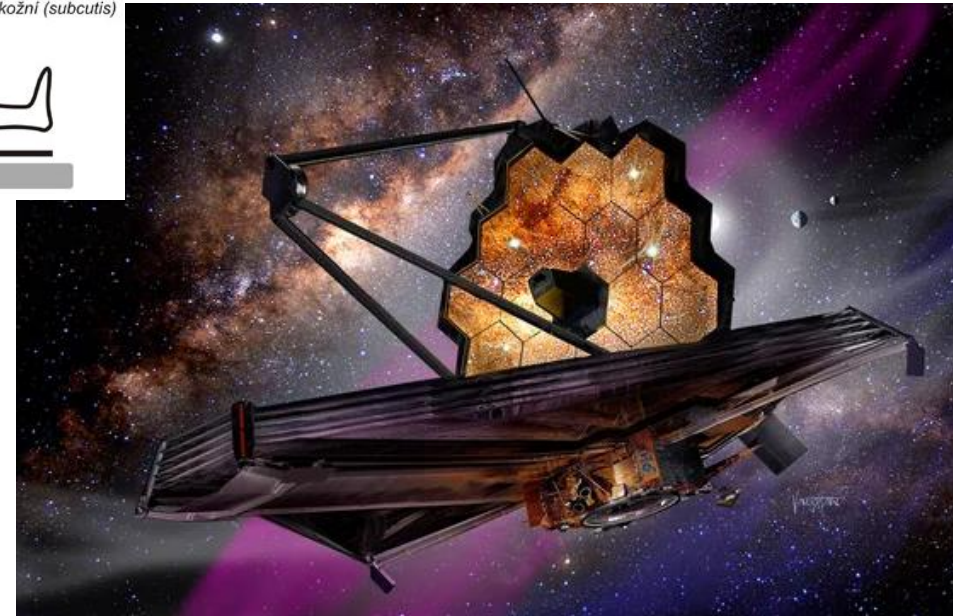
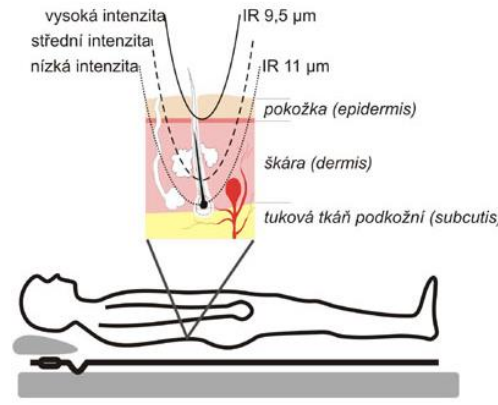
Electromagnetic Spectrum



4. Světlo jako elektromagnetické vlnění

Infračervené záření (IČ, IR)

- zdrojem jsou všechna tělesa zahřátá na teplotu $0 \text{ K} < T < 3000 \text{ °C}$
- využití: ovladače TV, bezkontaktní měření teploty, infrakamery, IR filtry při fotografování, IR spektroskopie, meteorologie, JWST – zkoumání vesmíru



4. Světlo jako elektromagnetické vlnění

Ultrafialové záření (UV)

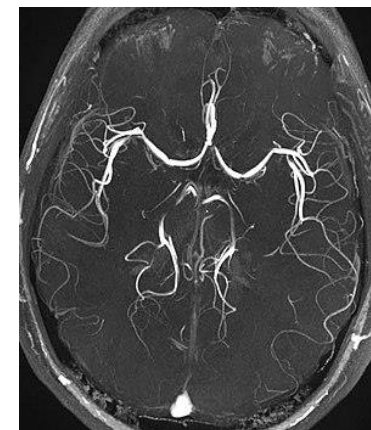
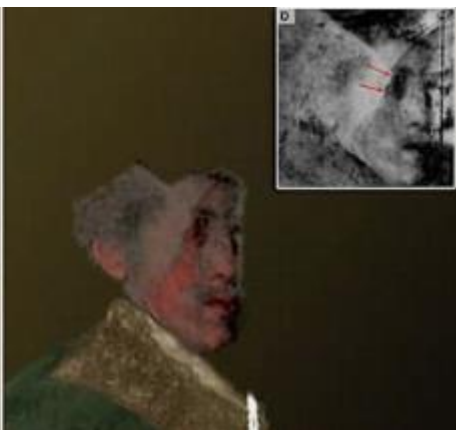
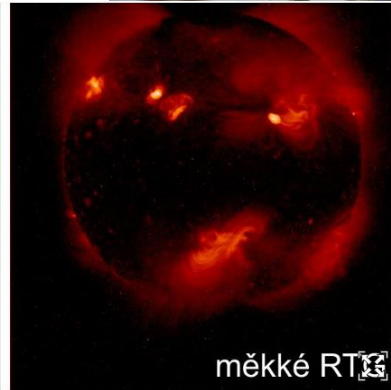
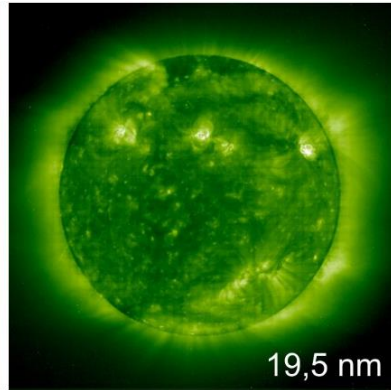
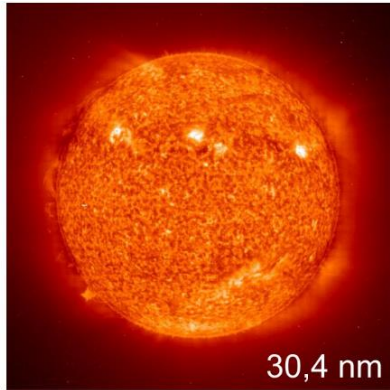
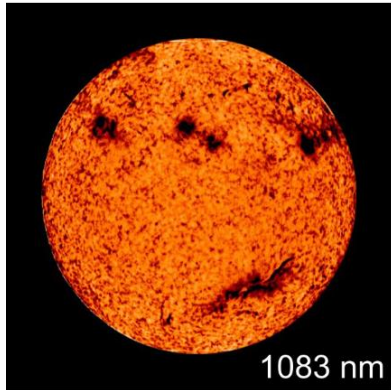
- má více energie než IČ záření i viditelné světlo
- využití: UV lampy na kontrolu bankovek, dezinfekce a sterilizace, značkovací látky v genetice, čištění vody, detektory požáru, opalování – solária, výmaz EPROM, archeologie, obrazy, kriminalistika



4. Světlo jako elektromagnetické vlnění

RTG záření

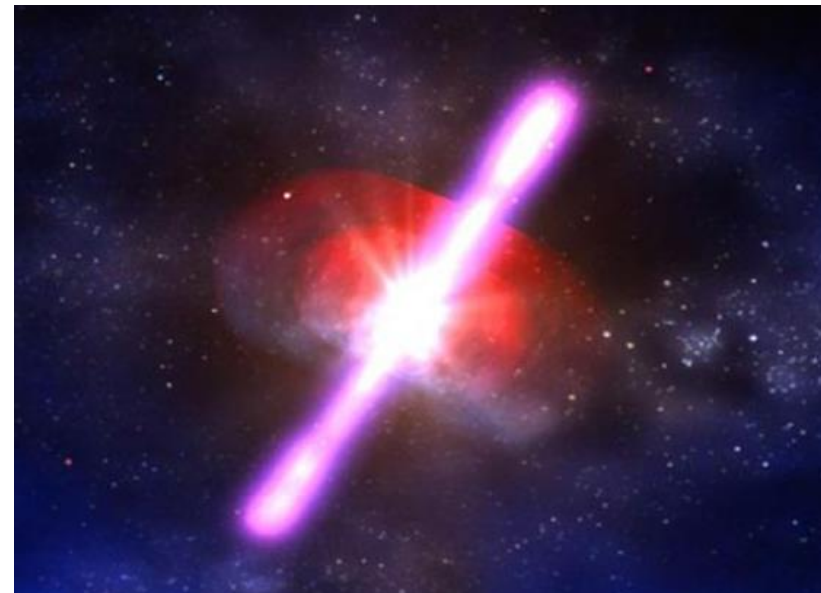
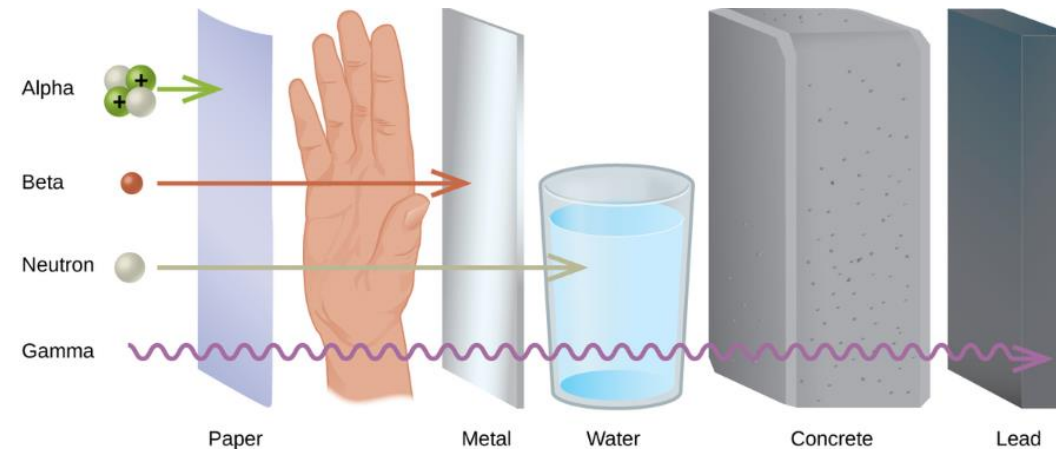
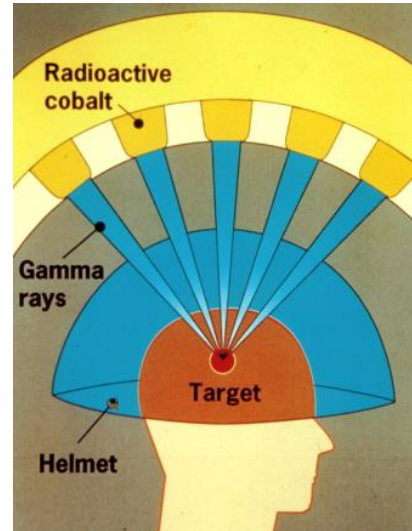
- **W.C. Roentgen (1845 – 1923):** objev náhodou 1895
- využití: RTG diagnostika, CT, RTG defektoskopie, archeologie, astronomie, skiografie, angiografie



4. Světlo jako elektromagnetické vlnění

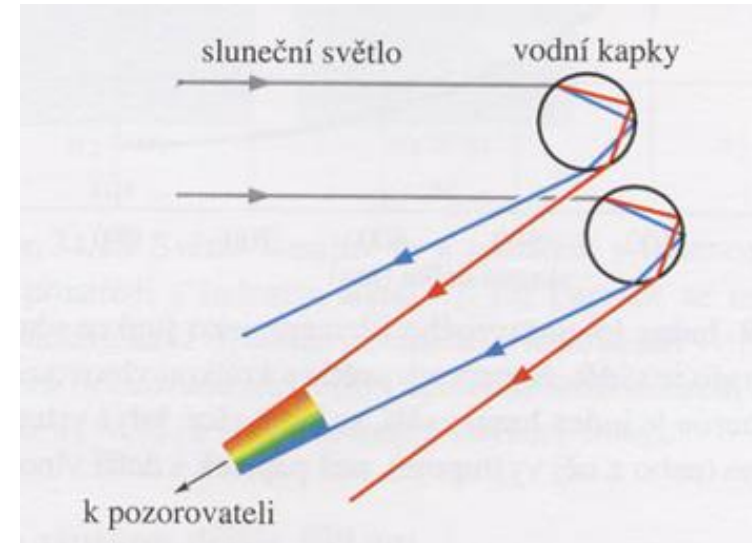
Gama záření

- pronikavé ionizující záření
- **energie $E > 10 \text{ keV}$** (naměřené max. 1400 TeV)
- **nebezpečné pro živé organismy**
- využití: hubení bakterií, sterilizace potravin, léčba nádorů, astronomie



5. Optické jevy v atmosféře.

Duha



- chromatická disperze vzniklá rozkladem bílého slunečního světla na kapách vody
- kapky nejvýše na obloze → ze všech lomených barev vidíme jen červenou
- kapky nejnižší na obloze → ze všech lomených barev vidíme jen modrou
- pozorovací úhel cca 42°
- **sekundární duha**: inverzní pořadí barev
- tvar duhy → kruh, ze kterého vidíme běžně jen jeho část nad obzorem

5. Optické jevy v atmosféře.

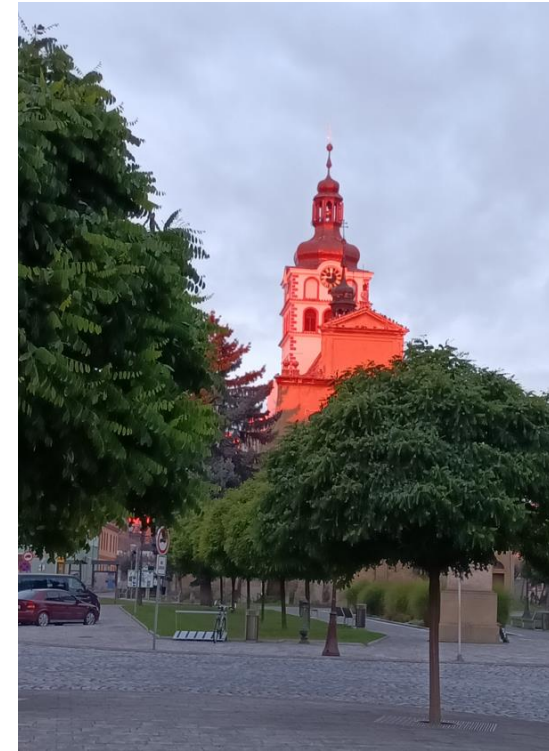
Modrá barva oblohy



- 1899 – **Rayleighův rozptyl** světla na molekulách plynů ve vzduchu
- **malé vlnové délky se rozptylují více než velké** → modré světlo má menší λ než červené
- **A. Einstein** – rozptyl se děje na fluktuacích hustoty vzduchu, které vytváří tzv. rozptylující centra

5. Optické jevy v atmosféře.

Červánky a green flash (zelený záblesk)



- **Rayleighův rozptyl** světla na částicích prachu v době východu a západu slunce + lom paprsků v atmosféře
- **červené světlo** → více se ohýbá, méně se láme, je tedy déle vidět
- **červené světlo** → méně se rozptyluje, je tedy intenzivnější než modrá
- **green flash** → zelené světlo při západu nebo východu slunce, je-li Slunce těsně pod horizontem

5. Optické jevy v atmosféře.

Měsíční a sluneční haló

- lom světla světla **na ledových krystalcích** v atmosféře



5. Optické jevy v atmosféře.

Měsíční korona

- **ohyb světla** světla na kapkách vody, mlhy v chladném období



5. Optické jevy v atmosféře.

Fata morgana

- **lom světla** světla **na rozhraní studeného a horkého vzduchu**
- **dolní:** silnice – horký vzduch (n_1) – studený vzduch (n_2) → $n_2 > n_1$ → totální odraz oblohy



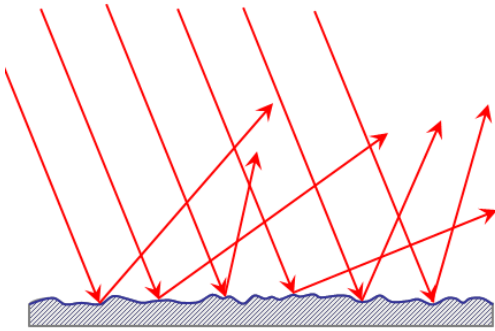
- **horní:** nad vrstvou studeného vzduchu je vrstva teplejšího → lze vidět předměty za horizontem
opačný totální odraz, někdy předměty jsou vidět převrácené → zrcadlový obraz města



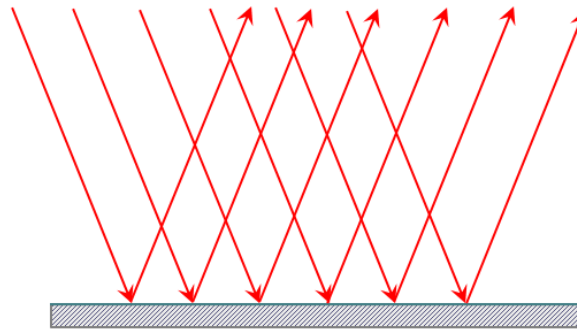
6. Rovinné zrcadlo.

Zrcadlo

- povrch odrážející úzký svazek paprsků téměř do jednoho směru
- nerovnosti plochy způsobují rozptyl paprsků



Rozptyl světla



Odráž světla

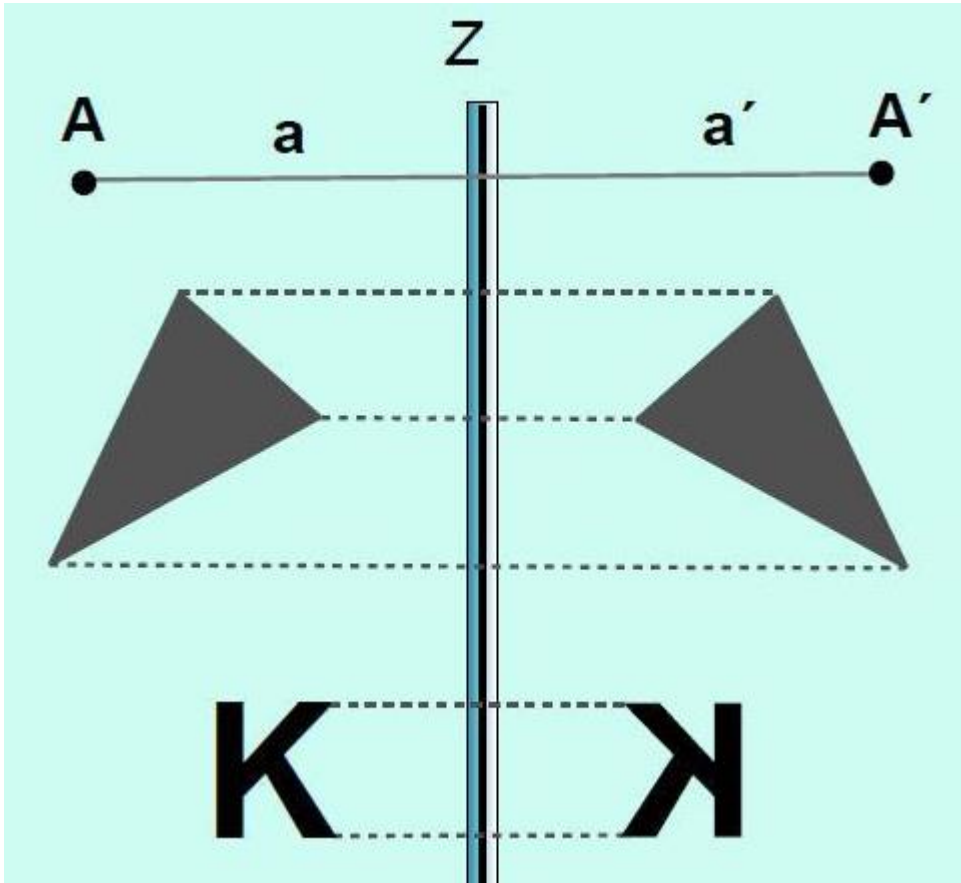


- Příklad: vyleštěný kov, pokovené sklo
- Archimedes zapaloval římské lodě vyleštěnými štíty vojáků



6. Rovinné zrcadlo.

Zobrazení zrcadlem



Vlastnosti obrazu

- neskutečný
- vzpřímený
- stejně veliký $\rightarrow |Z| = 1$
- souměrný podle roviny zrcadla
- stranově převrácený

6. Rovinné zrcadlo.

Bar ve Folies - Bergère

- 1882 E. Manet - impresionista



Najděte aspoň 3 chyby v optickém zobrazení.

7. Kulové zrcadlo.

Duté kulové zrcadlo



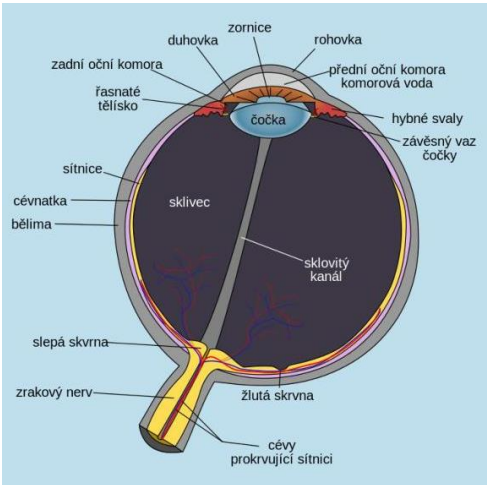
Vypuklé kulové zrcadlo



8.1 Optické zobrazování.

Zobrazování optickými soustavami

- optická soustava – oko, fotoaparát, dalekohled, mikroskop, dataprojektor, teodolit, spektroskop, sextant, polarimetr
- funkce přístrojů je založena na:
 - přímočaré šíření světla
 - zákony odrazu a lomu
 - princip nezávislosti chodu paprsků

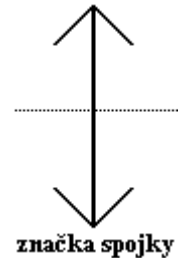
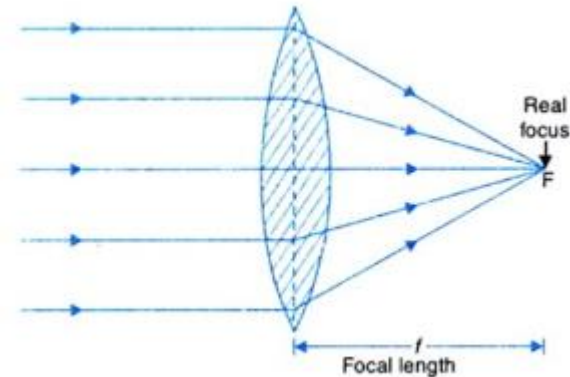


8.2 Čočky.

- **čočka**: průhledný materiál (sklo, plast), který mění chod paprsků pomocí lomu světla
- dva typy: spojky a rozptylky
- využití: optické přístroje (lupa, dalekohled, mikroskop, spektroskop, dataprojektor, fotoaparát, theodolit,)

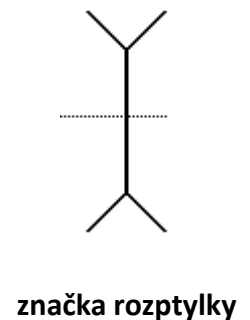
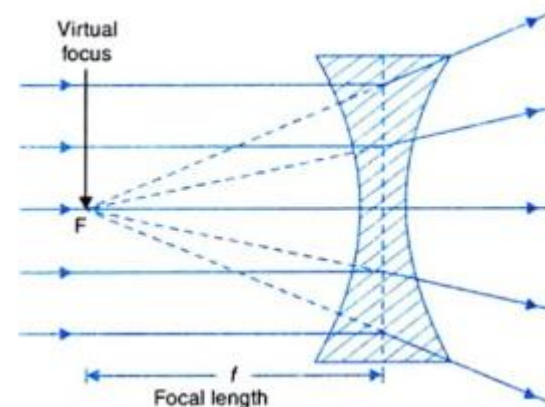
Spojky

- z rovnoběžného svazku udělá sbíhavý
- význačné body a paprsky:
 - **F** – **reálné ohnisko** čočky
 - **O** – optický střed čočky
- **ohnisková vzdálenost** – $f = |FO|$



Rozptylky

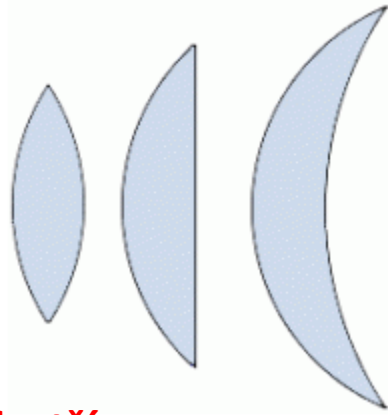
- z rovnoběžného svazku udělá rozbíhavý
- Význačné body:
 - **F** – **virtuální ohnisko** čočky
 - **O** – optický střed čočky



8. Čočky.

Typy spojek

- dvojvypuklá
- ploskovypuklá
- dutovypuklá



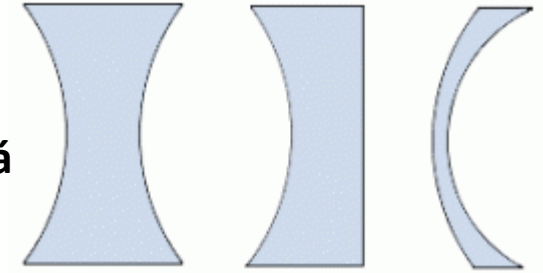
- uprostřed jsou nejtlustší

Význačné paprsky

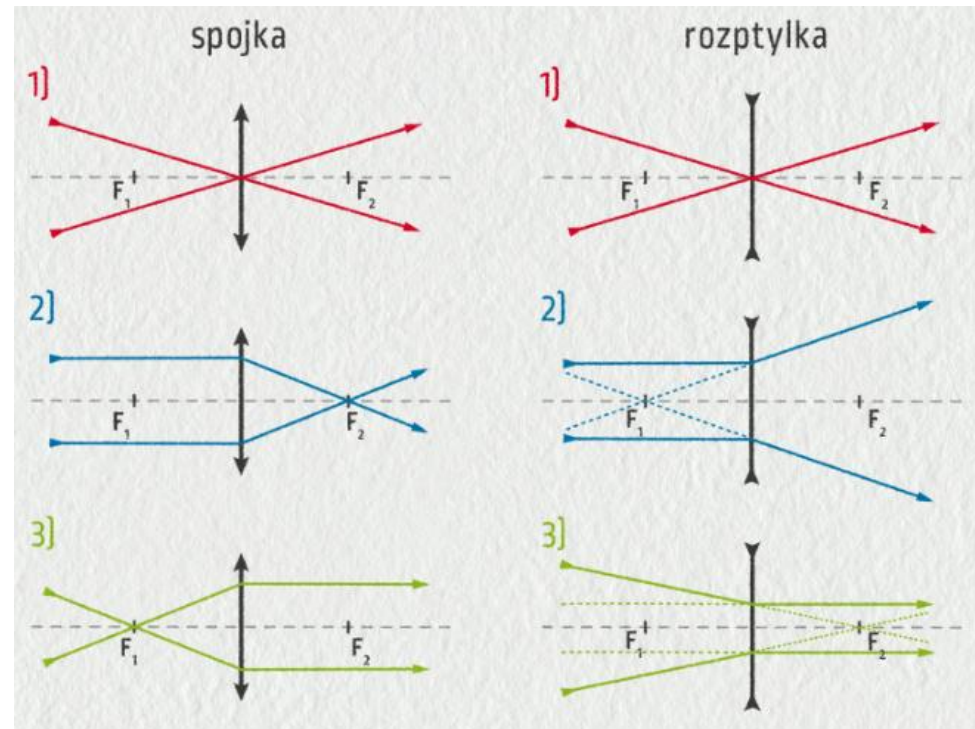
- 1. paprsek procházející optickým středem čočky nemění svůj směr
- 2. paprsek jdoucí rovnoběžně s optickou osou se láme do ohniska
- 3. paprsek procházející předmětovým ohniskem je po průchodu čočkou rovnoběžný s optickou osou

Typy rozptylek

- dvojdutá
- ploskodutá
- vypuklodutá

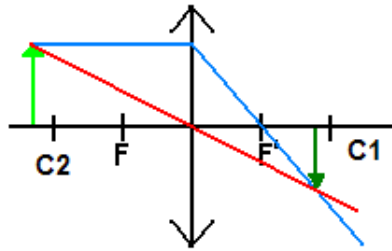


- uprostřed jsou nejtenčí

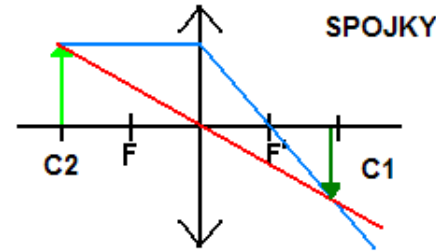


8.3 Zobrazení tenkou čočkou.

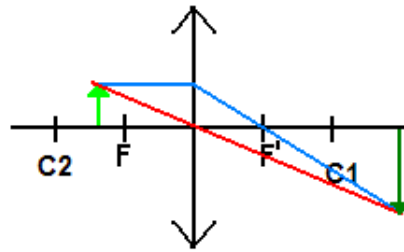
Zobrazení spojkou a rozptylkou



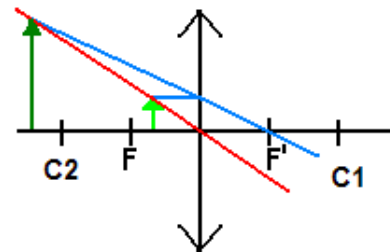
skutečný, převrácený, zmenšený



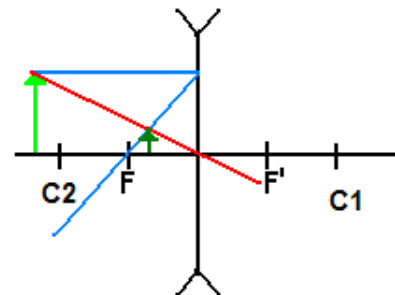
skutečný, převrácený, stejně velký



skutečný, převrácený, zvětšený



zdánlivý, přímý, zvětšený

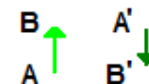


zdánlivý, přímý, zmenšený - **vždy stejné**

SPOJKY

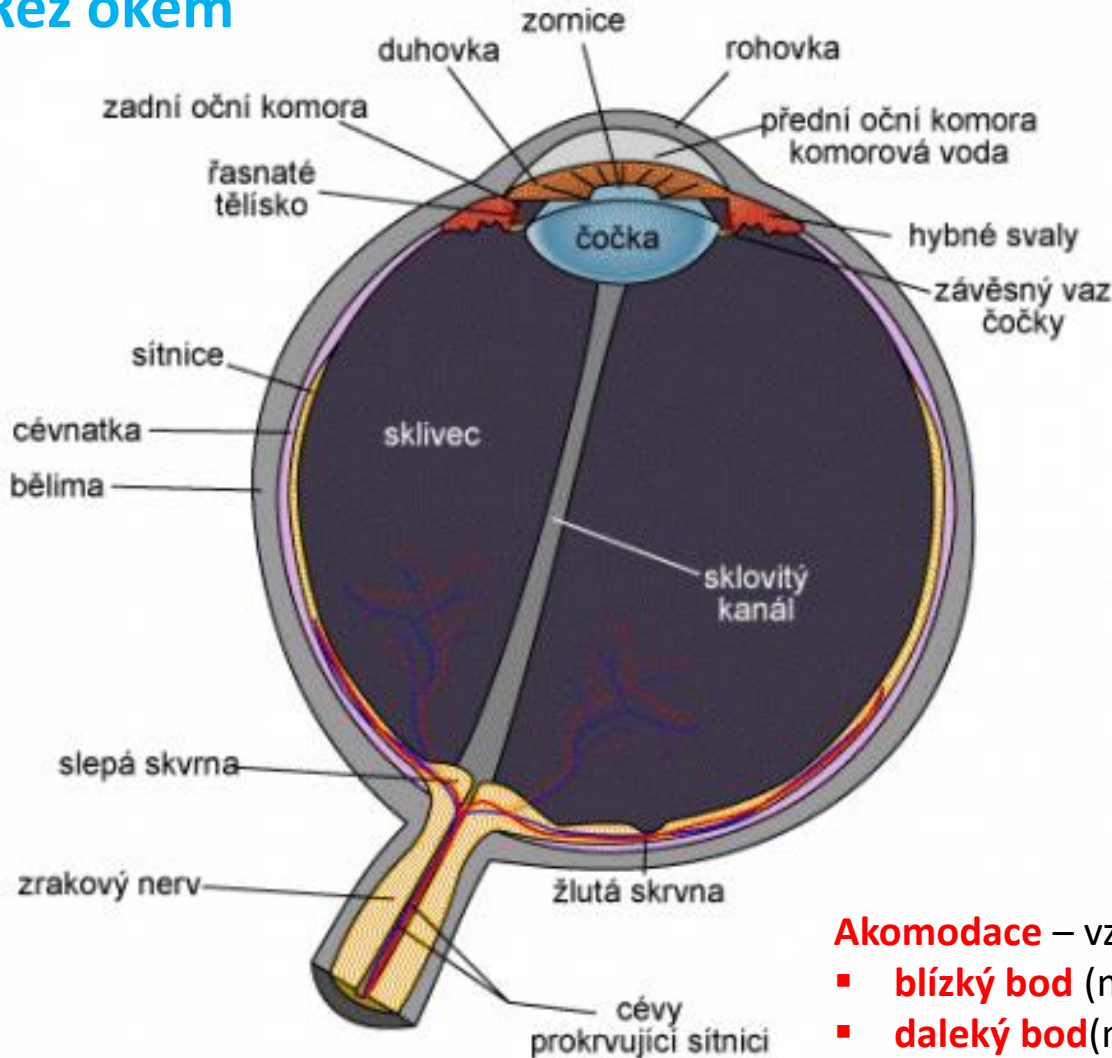
ROZPTYLKA

šipky popsat:



9.1 Oko – stavba oka.

Řez okem



Optická soustava oka

Rohovka – hlavní lámavá plocha

Spojná čočka – složena z různých vrstev o různém indexu lomu

- jemné doladění obrazu

Oční mok – kapalina za rohovkou

Sklivec – 98 % voda, 2 % NaCl, udržuje nitrooční tlak

Duhovka – zornice (otvor) řídí intenzitu světla, 2-8 mm

Sítnice – tyčinky a čípky, žlutá skvrna, slepá skvrna.

Na sítnici vzniká převrácený zmenšený reálný obraz vytvořený oční čočkou.

Přímý obraz vytváří až mozek

- mimina vidí do určitého věku „vzhůru nohama“

Akomodace – vznik ostrého obrazu pomocí ciliárních svalů,

- **blízký bod** (max. akomodace)

- **daleký bod** (min. akomodace), mění se s věkem roky/akomod.vzdál.(cm):

10/7	20/10	30/14	40/22	50/40	60/200
------	-------	-------	-------	-------	--------

Konvenční zraková vzdálenost – $d = 25\text{ cm}$

9.2 Princip barevného vidění.

Princip barevného vidění

Sítnice – převedení optického obrazu na elektrické signály (malý elektrický proud), které se šíří nervovými vlákny do mozku

→ **Tyčinky** – řídí intenzitu světla, umožňují vidět za šera, citlivé na modrou oblast světla, červená světlo vidí jako „černé“, cca 120 miliónů

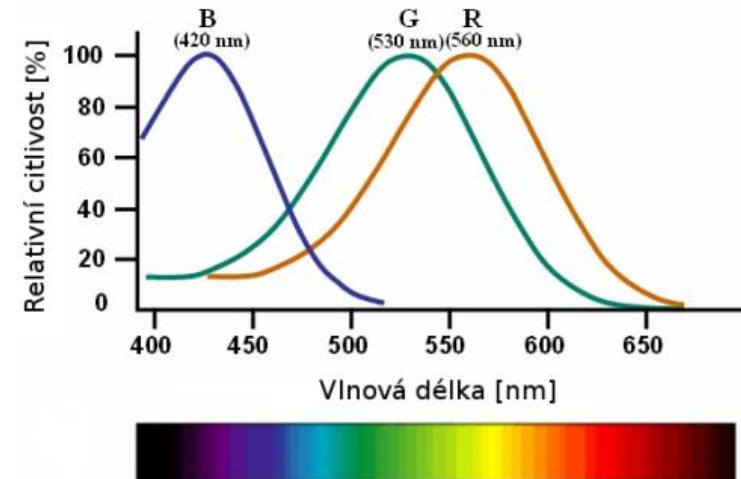
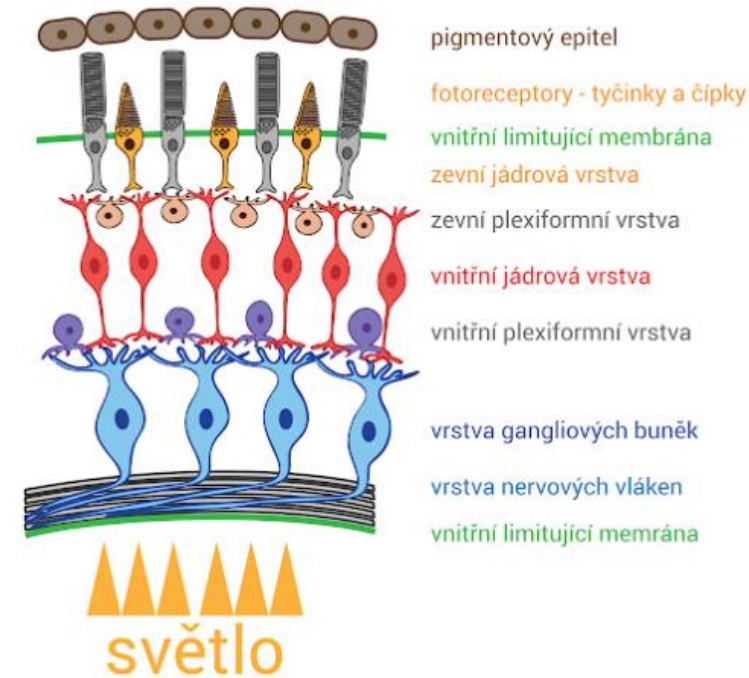
→ **Čípky** – světlo citlivé buňky obsahující cca 8 miliónů barevných pigmentů (RGB)

kombinace signálů z čípků umožňuje barevné vidění

→ **nejcitlivější je oko na vlnovou délku 555 nm**

Žlutá skvrna – uprostřed zorného pole na sítnici, obsahuje pouze čípky

Slepá skvrna – vývod zrakového nervu bez světlo citlivých buněk



9.3 Oční vady.

Oční vady

Dalekozrakost

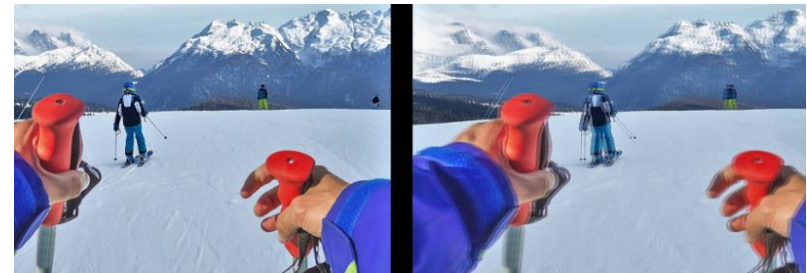
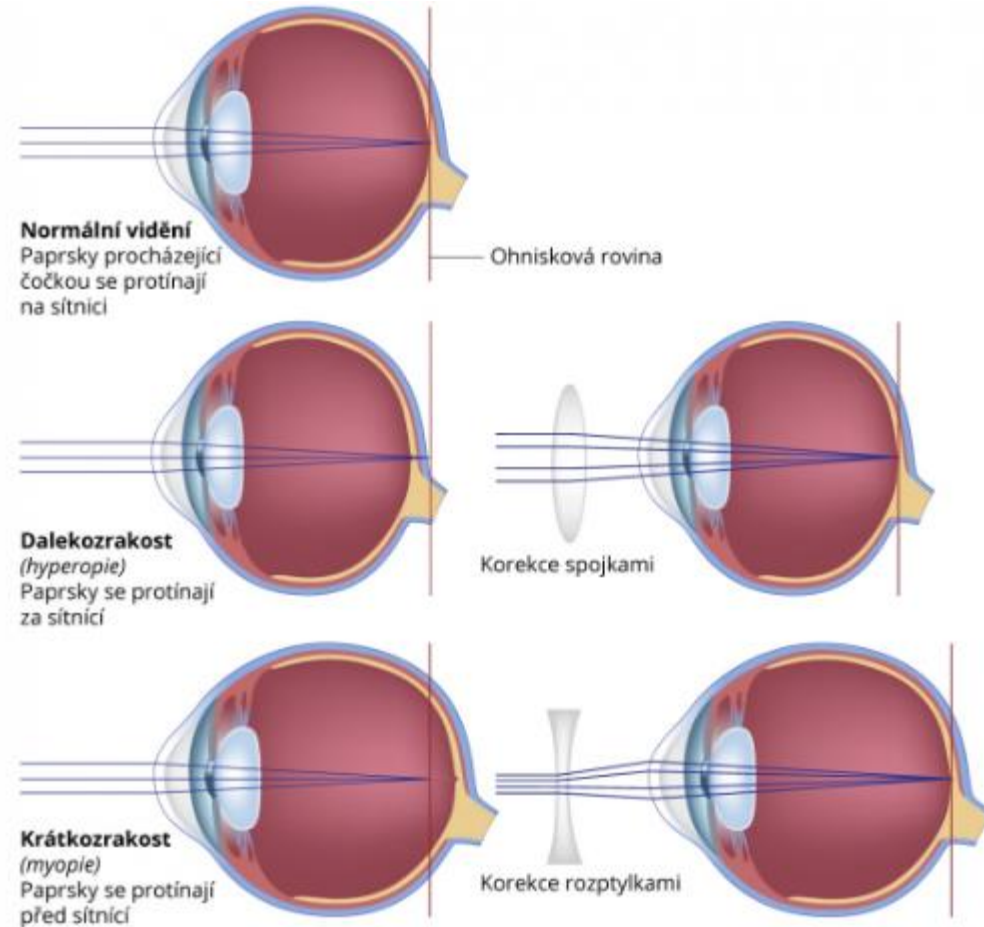
- obraz vzniká za sítnicí
- oko vidí dobře na dálku, špatně na vlízko
- korekce spojkou

Krátkozrakost

- obraz vzniká před sítnicí
- oko vidí dobře na blízko, špatně do dálky
- korekce rozptylkou

Astigmatismus – způsobený změněným zakřivením rohovky

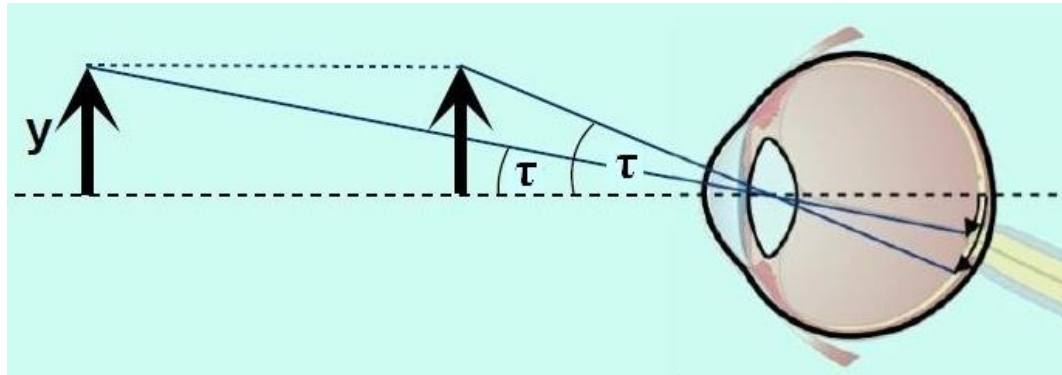
- zkreslený obraz na blízko i na dálku
- léčba: brýle, kontaktní čočky, operace



10.1 Zorný úhel.

Zorný úhel – τ

- úhel, pod kterým pozorujeme předměty
- velikost zorného úhlu určuje velikost obrazu na sítnici a tím i kvalitu vidění
- **ke zvětšení zorného úhlu používáme různé optické přístroje: lupu, mikroskop, dalekohled**
- vzdálené předměty pozorujeme pod menším zorným úhlem



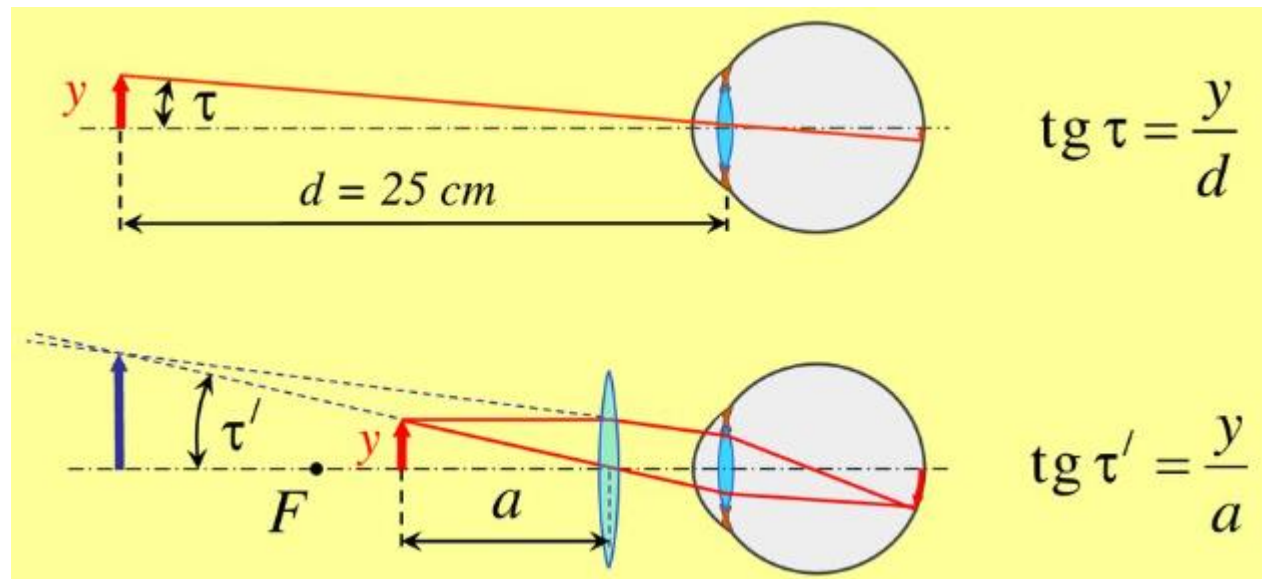
Rozlišovací schopnost oka

- minimální zorný úhel, při kterém rozlišíme ještě dva body od sebe
- $\tau_{min} \geq 1'$ (úhlová minuta) – cca 100 km na povrchu Měsíce z pohledu ze Země
- z konvenční zrakové vzdálenosti $d = 25 \text{ cm}$ je to **$y = 0,072 \text{ mm}$**

10.2 Lupa.

Lupa

- **spojná čočka, která zvětšuje zorný úhel** (nezvětšuje tedy daný předmět, jak se někdy nesprávně říká)
- ohnisková vzdálenost: $f < 25 \text{ cm}$



úhlové zvětšení lupy - γ

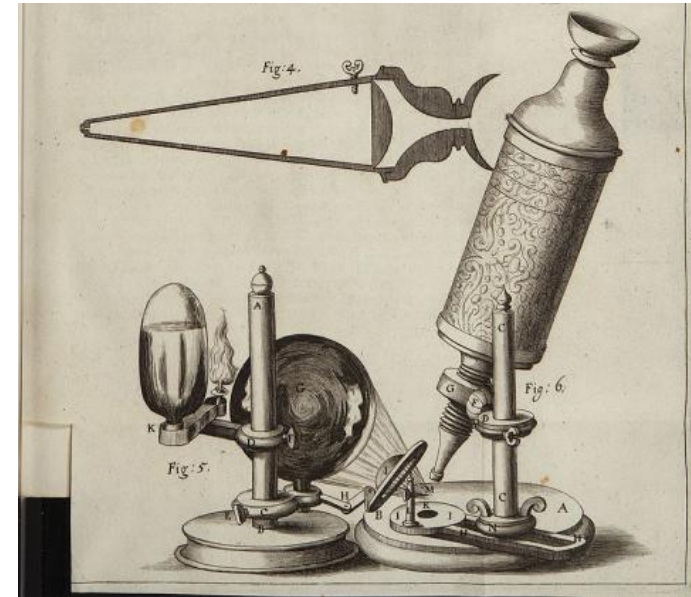
- max. zvětšení: cca 6x, pak se projevují vady čočky
- větší zvětšení: kombinace čoček: mikroskop, dalekohled

$$\gamma = \frac{\tau'}{\tau} = \frac{d}{f} \cong \frac{d}{a}$$

11. Mikroskop.

Historie mikroskopu

- **Zacharias Jansen (1580 – 1638)** – holandský optik, padělatel peněz, spory ohledně jeho prvenství
- **Galileo Galilei (1564 – 1642)** – toskánský astronom
→ vynálezce teploměru (1606), dalekohledu (1609), mikroskopu (1610, výroba od 1623)
- **Robert Hooke (1635 – 1703)** – anglický vědec
→ 1661 objev vlásečnic a červených krvinek
→ 1665 *Micrographia* – kniha s mnoha mikroskopickými pozorováními, zavedl pojem **buňka**
- **Antoni van Leeuwenhoek (1632 – 1723)** – holandský přírodovědec
→ zakladatel mikrobiologie, zdokonalil Hookův mikroskop
→ 1676 pozoroval bakterie
- **René Descartes (1596 – 1650)** – francouzský filozof, matematik, fyzik
→ 1637 popis mikroskopu v díle *Optica*

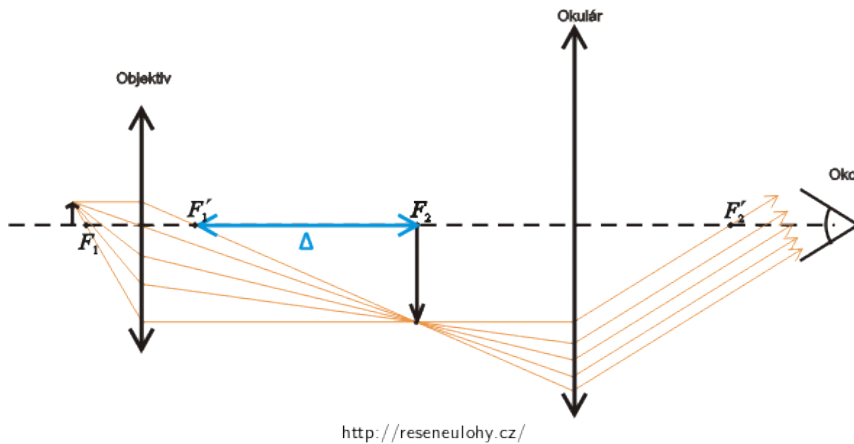


Hookův mikroskop

11. Mikroskop.

Stavba mikroskopu

- základem jsou 2 spojné čočky
→ **objektiv** s ohniskovou vzdáleností f_1 – čočka blízko preparátu
→ **okulár** s ohniskovou vzdáleností f_2 – čočka u oka
- optimální zobrazení je takové, aby **obraz z objektivu vznikl v ohniskové rovině okuláru**



úhlové zvětšení mikroskopu - γ

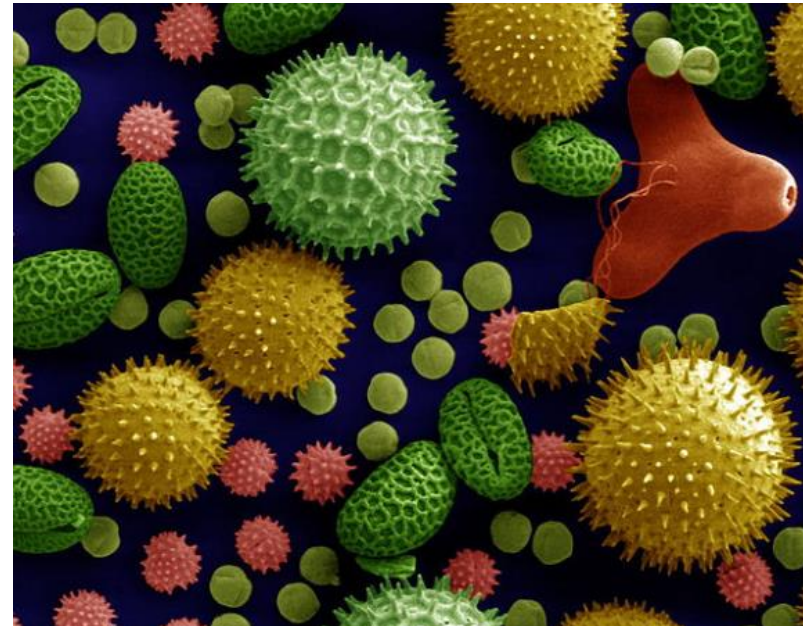
- max. zvětšení: cca 2000x, pak se projevují vlnové vlastnosti světla
- větší zvětšení: místo světla použít elektronový paprsek → elektronový mikroskop

$$\gamma = Z_{\text{objektiv}} \cdot Z_{\text{okulár}}$$

11. Mikroskop.

Elektronový mikroskop

- místo světla (fotonů) je materiál prosvícen paprskem elektronů
- zvětšení až 1 000 000x
- **TEM** – **transmisní elektronový mikroskop**, urychlovací napětí 100-400 kV, paprsky prochází vzorkem, 1931 první prototyp, 1986 NC
- **SEM** – **rastrovací elektronový mikroskop**, zobrazuje povrch vzorku pomocí odražených elektronů, urychlovací napětí do 30 kV, 1942 první prototyp



12. Dalekohledy.

Rozdělení dalekohledů

- čočkové - refraktory

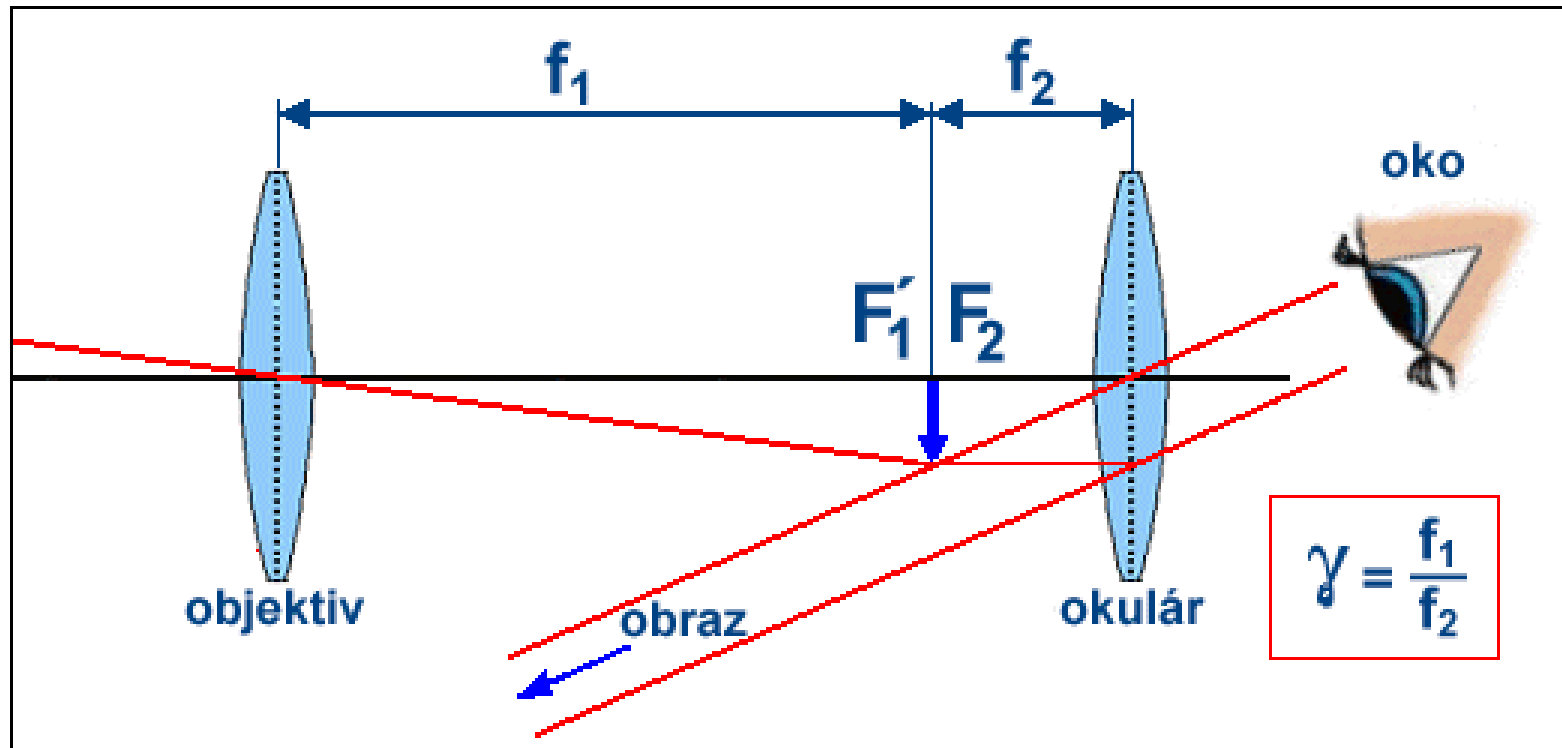


- zrcadlové - reflektory



12. Dalekohledy.

Keplerův hvězdářský dalekohled



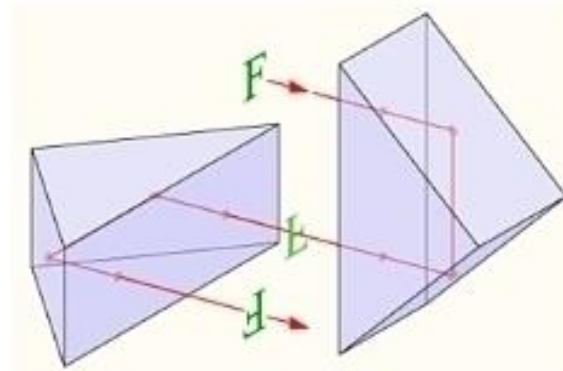
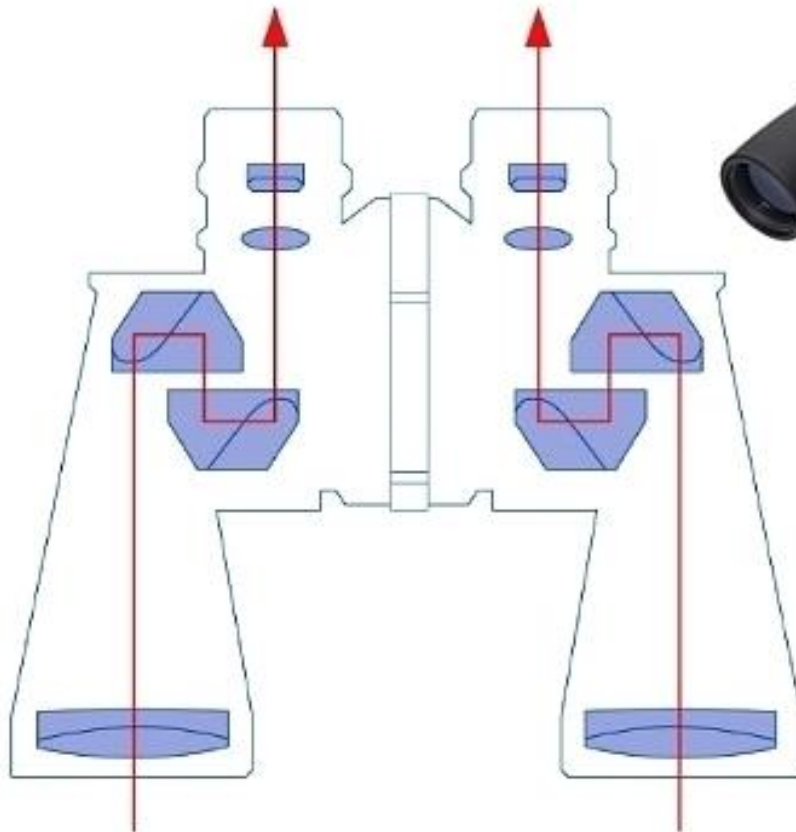
Optické schéma Keplerova dalekohledu

- **objektiv i okulár: spojka**
- vlastnosti obrazu: zvětšený, skutečný, převrácený (nevdí u pozorování hvězd)

12. Dalekohledy.

Triedr

- principem jde o upravený Keplerův dalekohled
- Konstrukce s hranoly umožňuje podstatné zkrácení těla dalekohledu.
- Vlastnosti obrazu: zvětšený, skutečný, přímý

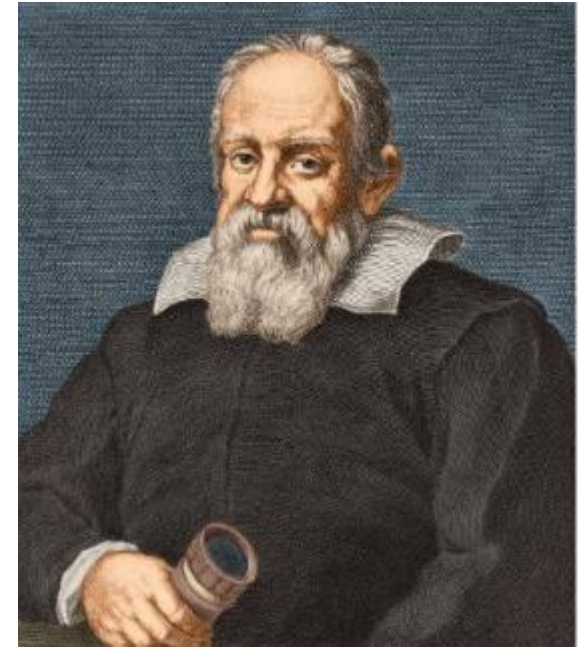


12. Dalekohledy.

Galileův dalekohled – divadelní kukátko

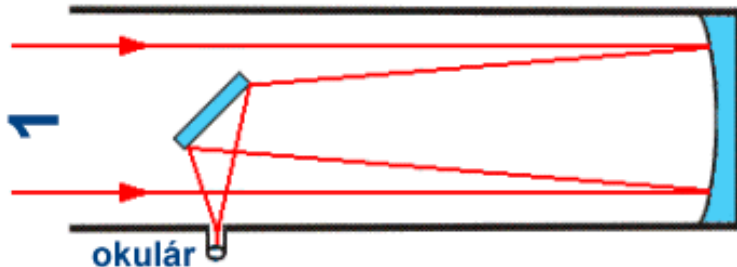
1609 – Galileo Galilei

- zakreslil měsíční povrch, sluneční skvrny
- objev 4 Jupiterových měsíců: Io, Europa, Ganymedes, Callisto
- **objektiv: spojka**
- **okulár: rozptylka**
- vlastnosti obrazu: zvětšený, **neskutečný**, přímý



Newtonův zrcadlový dalekohled

- **objektiv: parabolické zrcadlo**
odrážející paprsky přes rovinné zrcadlo do okuláru



Největší zrcadlový dalekohled v ČR

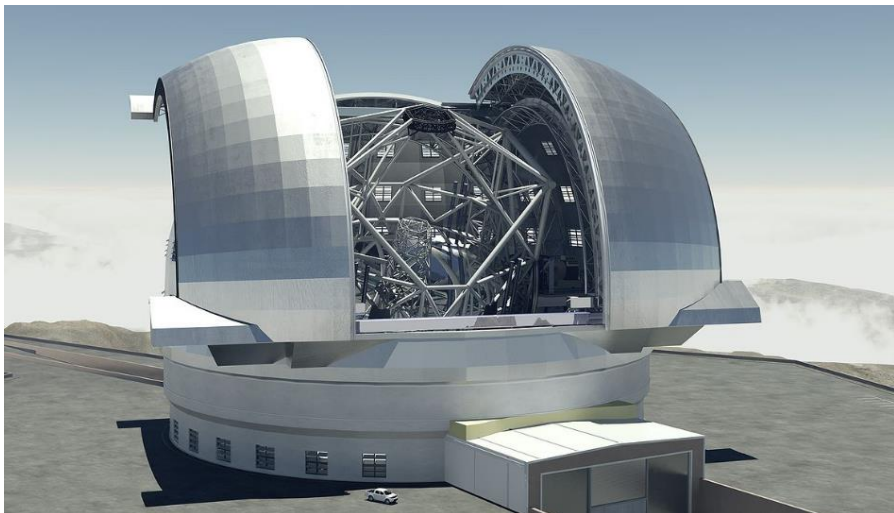
od roku 1967 na observatoři v Ondřejově.
Parabolické zrcadlo o průměru 208 cm má hmotnost 2340 kg a ohniskovou vzdálenost 9 m. Přesnost jeho tvaru je neuvěřitelná - největší odchylka od ideální plochy je pouhá deseti tisícina milimetru!

12. Dalekohledy.

Největší pozemské dalekohledy



- **Keck I a II – 1993 na Havajských ostrovech**
- 36 zrcadel ve tvaru šestiúhelníků dokáže pracovat jako 1 zrcadlo o průměru 10 m
- dokáží zaregistrovat plamen svíčky na Měsíci
- řídí Caltech a NASA



- **ELT – Extra Large Telescope – 2027**
- 798 zrcadel ve tvaru šestiúhelníků dokáže pracovat jako 1 zrcadlo o průměru 39,3 m
- zkoumání povahy a rozložení temné hmoty a temné energie
- objevy týkající se formování a evoluce největších struktur vesmíru.

12. Dalekohledy.

Největší vesmírné dalekohledy

HST – Hubble Space Telescope



- pracuje od roku 1990
- plánovaná životnost: 15 let
- oběžná dráha: 567 km nad Z.
- **průměr zrcadla: 2,4 m**
- ostré snímky vesmíru
- spektrum: IČ, viditelné, UV

- od roku 2014, 2018, 2020, **18.12. 2021**, náhrada za HST
- oběžná dráha: librační centrum L2: 1,5 mil. km od Země
- plánovaná životnost: 5 let (palivo na 10 let)
- poznání vývoje prvních galaxií a hvězd po Velkém třesku, pátrání po životě mimo Sluneční soustavu.
- spektrum: IČ

JWST – James Webb Space Telescope

