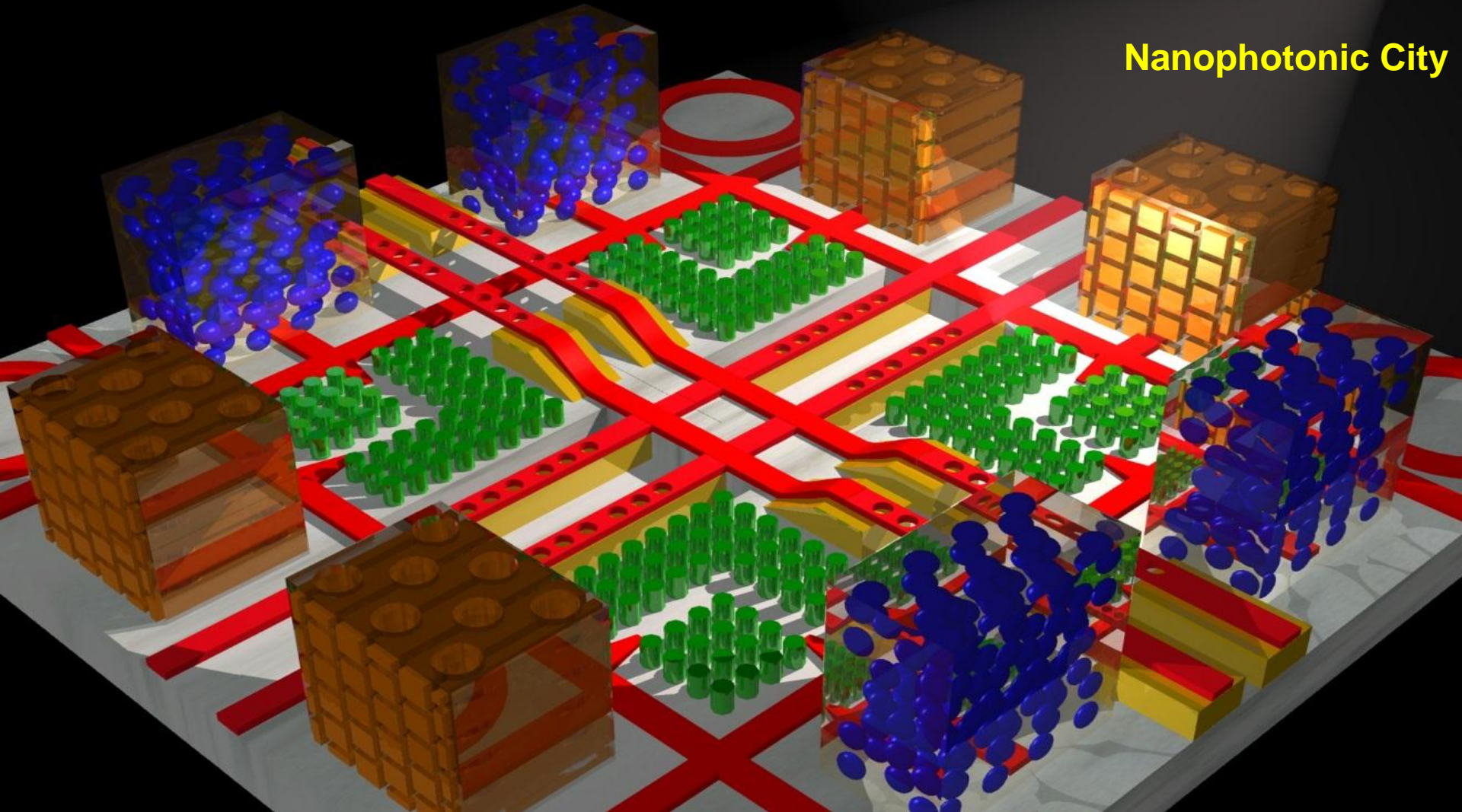


Týden vědy 2024 – KLFF FJFI ČVUT v Praze – 17-21/6/2024

John D. Joannopoulos, Steven G. Johnson, Joshua N. Winn, and Robert D. Meade,
Photonic Crystals: Molding the Flow of Light

<http://ab-initio.mit.edu/book/>

Nanophotonic City



Týden vědy 2024

ČVUT v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
Trojanova 13, 120 00 PRAHA 2

Milan Šiňor

Katedra laserové fyziky a fotoniky



Praha 1, Břehová 7



Praha 1, Trojanova 13

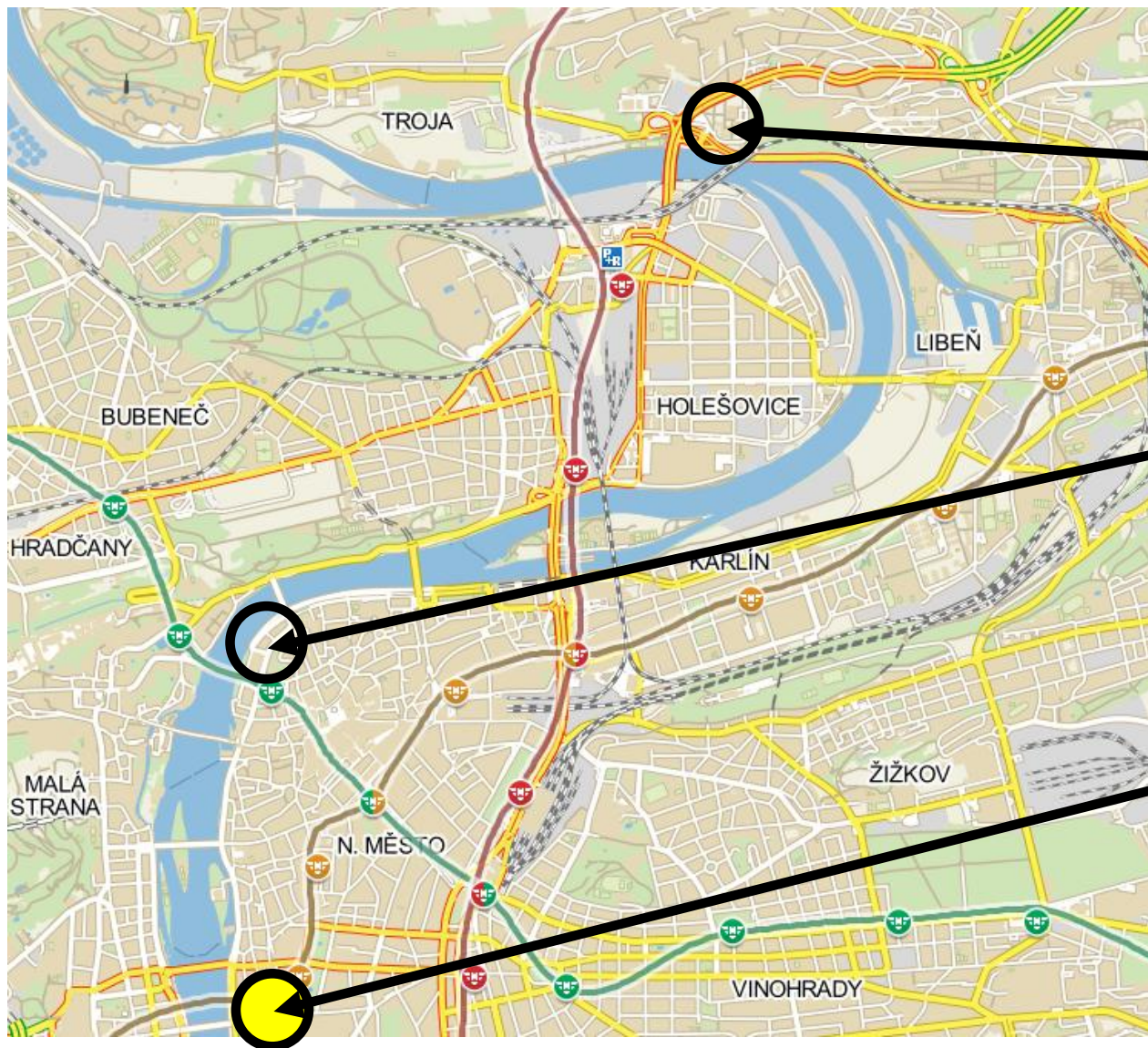


Praha 8, V Holešovičkách 2



Týden vědy 17. - 21. června 2024

FJFI ČVUT v Praze



**Praha 8
V Holešovičkách 2
(Troja)**

**Praha 1
Břehová 7
(Břehovka)**



**Praha 2
Trojanova 13
(Trojanka)**

FJFI ČVUT v Praze

* 1707 – České vysoké učení technické v Praze – 8 fakult

* 1955 – FTJF - Fakulta technické a jaderné fyziky (Univerzita Karlova)

→ 3 katedry: katedra jaderné fyziky (prof. Václav Petržílka), jaderné chemie (prof. František Běhounek), jaderného inženýrství (prof. Bohumil Kvasil)

⇒ 1959 – Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská (ČVUT v Praze)

→ 1960 absolvovalo prvních 63 inženýrů, dnes – více než **5.000 absolventů**
(cca 20% žen)

Dnes - 10 kateder FJFI:

- Katedra matematiky
- Katedra fyziky
- Katedra humanitních věd a jazyků
- Katedra inženýrství pevných látek
- [Katedra fyzikální elektroniky](#)
- Katedra materiálů
- Katedra jaderné chemie
- Katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření
- Katedra jaderných reaktorů
- Katedra softwarového inženýrství



FJFI ČVUT v Praze – studijní programy → KFE

12 programů v BS (3):

Matematika

- Matematické inženýrství (Matematické modelování, Matematická fyzika, Matematická informatika)
- Aplikované matematicko-stochastické
- Aplikovaná algebra a analýza

Informatika

- Aplikovaná informatika
- *Aplikace informatiky v přírodních vědách*

Jaderné programy

- Jaderné inženýrství (Aplikovaná fyzika ionizujícího záření, Jaderné reaktory, Radioaktivita v životním prostředí)
- Jaderná a částicová fyzika
- Jaderná chemie
- Radiologická technika
- Vyřazování jaderných zařízení z provozu

Fyzika

- *Kvantové technologie*
- *Fyzikální inženýrství* (Inženýrství pevných látek, Fyzikální inženýrství materiálů, *Laserová technika a fotonika, Počítačová fyzika*)

16 programů v NMS (2):

Matematika

- Matematické inženýrství
- Matematická informatika
- Matematická fyzika
- Aplikovaná algebra a analýza
- Aplikované matematicko-stochastické metody

Informatika

- *Aplikace informatiky v přírodních vědách*

Jaderné programy

- Jaderná a částicová fyzika
- Jaderné inženýrství (Aplikovaná fyzika ionizujícího záření, Jaderné reaktory)
- Jaderná chemie
- Radiologická fyzika
- Vyřazování jaderných zařízení z provozu

Fyzika

- Inženýrství pevných látek
- Fyzikální inženýrství materiálů
- Fyzika plazmatu a termojaderné fúze
- *Kvantové technologie*
- *Fyzikální elektronika*

(*Laserová fyzika a technika, Fotonika, Počítačová fyzika :-)*)

9 oborů v PhD (4+):

Matematika

- Matematické inženýrství

Informatika

- Aplikovaná informatika

Jaderné programy

- Bezpečnost a zabezpečení jaderných zařízení a forenzní analýzy jaderných materiálů
- Jaderné inženýrství
- Jaderná chemie
- Radiologická fyzika

Fyzika

- *Fyzikální inženýrství*
- *Kvantové technologie*
- Fyzika vysokoteplotního plazmatu a termojaderné fúze

Katedra fyzikální elektroniky (Trojanova + Troja)

Studium

- Programy bakalářského studia (3):

Fyzikální inženýrství

→ Laserová technika a fotonika

→ Počítačová fyzika

- Programy magisterského studia (2):

Fyzikální elektronika

→ Laserová fyzika a technika

→ Fotonika

→ Počítačová fyzika

- Programy doktorského studia (4+):

→ Fyzikální inženýrství

→ Kvantové technologie

Výzkum (5 výzkumných skupin)

- Pevnolátkové lasery
- Počítačová fyzika
- Rentgenová fotonika
- Fotonika a kvantové technologie
- Molekulová fotofyzika a spektroskopie
- Pokročilé kosmické technologie

1) Nanočástice a nanostruktury

- ⇒ Teoretické studium a modelování kvantových nanočástic a nanostruktur
- ⇒ Polovodičové koloidní nanočástice, metalické nanočástice + nanostruktury, samouspořádání, molekulární litografie
- ⇒ Aplikace – spektroskopie (SERS), bio + medicínské aplikace, ...
- ⇒ Realizace pokročilých terčů na bázi nanostruktur pro fúzní experimenty

2) Fotonické / plazmonické (nano)struktury – teorie, modelování, návrh, realizace

- ⇒ Teorie a modelování fotonických struktur, vývoj a aplikace přibližných + numerických modelů a metod (RCWA, aRCWA, FTDT, PWE, ...)
- ⇒ Studium vybraných fotonických, plazmonických a difraktivních struktur (fotonické krystaly, subvlnové apertury, plazmonické nanostruktury)
- ⇒ Nové pokročilé (umělé) materiály - metamateriály
- ⇒ Nelineární efekty
- ⇒ Realizace a modelování opálových struktur a fotonických krystalů
- ⇒ Studium přírodních iridiscentních fotonických struktur / realizace nanostruktur pomocí biomimetiky

Jak se světlo šíří a rezonuje v nanostrukturách - simulace na počítači

Dnešní sofistikované softwarové nástroje pro simulaci šíření a interakce světelného záření se strukturami o velmi malých rozměrech, rozličných tvarů, materiálového složení i funkčnosti, umožňují na jednoduchých příkladech pochopit řadu zajímavých fyzikálních efektů a procesů, které zde probíhají a které mohou inspirovat pro následnou přípravu takovýchto struktur. Tento miniprojekt nabízí, prostřednictvím vyzkoušení si těchto nástrojů, poodhalit tuto zajímavou oblast moderní fotoniky a plazmoniky.

Účastníci:

Program - Trojanova

Pondělí 19.6. - 9:30 – cca 16:00 (→ Břehová - 16:30)

- *Úvodní prezentace (Ivan Richter)*
- *Praktická část – Pavel Kwiecien, Milan Burda*
- *Představení softwaru pro simulace: Lumerical FDTD + Mode Solutions*
- *Vlastní experimenty a simulace s nástroji*
- *Několik základních úloh:*
 - **Porovnání geometrické a vlnové optiky (rozhraní tvaru V)**
 - **Vlnovody - planární vlnovod - 1D, 2D, optická vlákna + zahnuté vlnovody**
 - **Fotonické krystaly, vlákna z fotonických krystalů**
 - **Tepelné efekty**

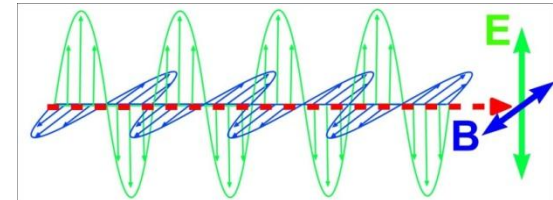
Úterý 20.6. - 9:00 – cca 18.00 (18.00 → deadline - prezentace + text)

- *Dokončení počítačových experimentů*
- *Prezentace*
- *Textový příspěvek*

Popis světla → veličiny → elektromagnetické pole

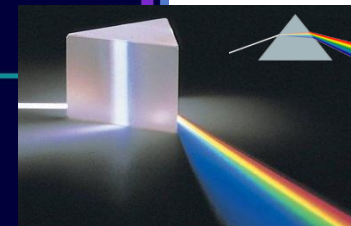
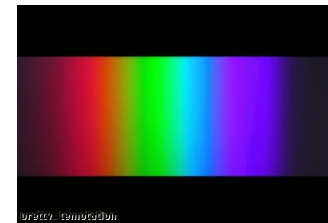
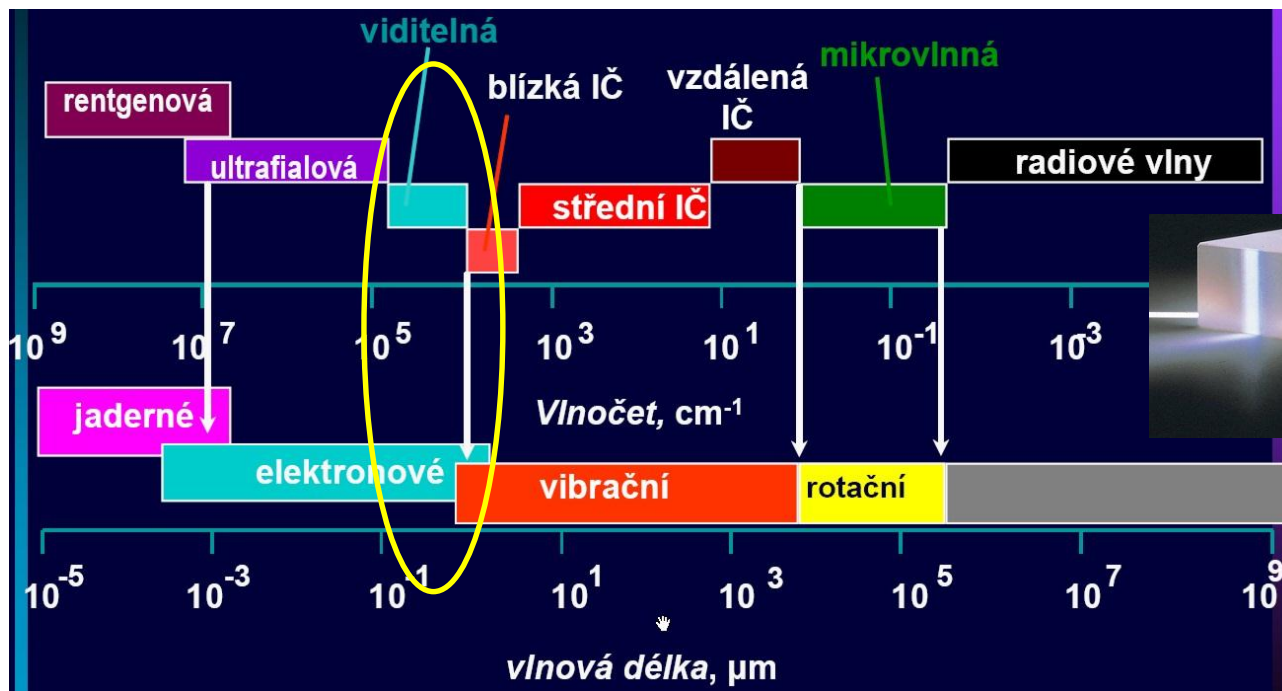
Světlo = elektromagnetické vlnění – elektrická a magnetická složka

- ⇒ Vlnová délka, frekvence
- ⇒ Rychlost šíření – index lomu – permitivita, permeabilita
- ⇒ Intenzita (zářivý tok)
- ⇒ Foton, částice, energie fotonu

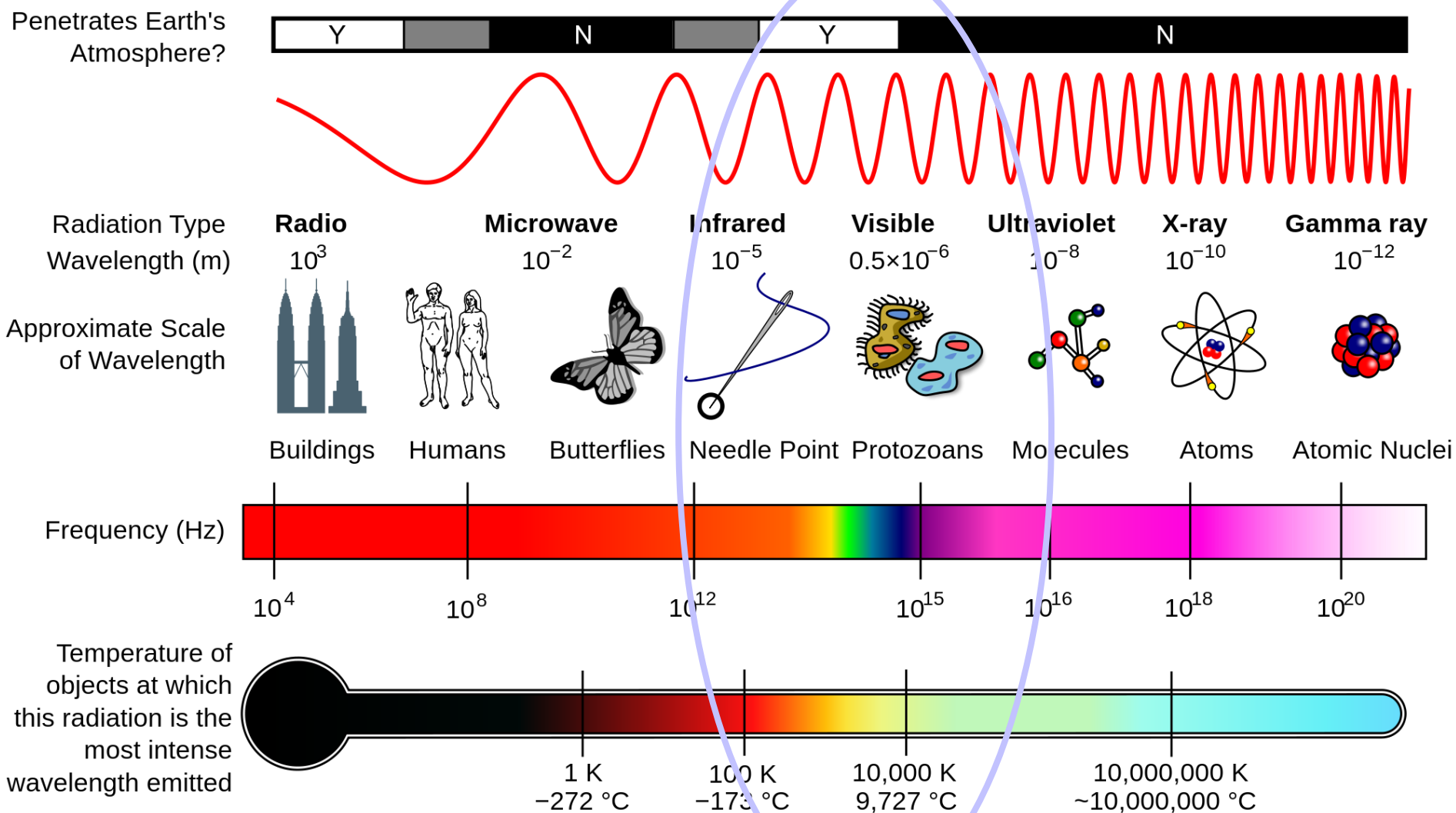


Elektrodynamika ⇒ Maxwellovy rovnice

Elektromagnetické spektrum - Frekvence 3.8×10^{14} Hz až 7.5×10^{14} Hz ⇒ Interakce s prostředím
 - Vlnová délka 800nm – 400nm = $8-4 \times 10^{-7}$ m



Spektrum elektromagnetického záření



Světlo – barvy – vlnové délky, barevný trojúhelník

Barva	Rozsah vlnových délek	Rozsah frekvencí
červená	~ 625 – 800 nm	~ 480 – 375 THz
oranžová	~ 590 – 625 nm	~ 510 – 480 THz
žlutá	~ 565 – 590 nm	~ 530 – 510 THz
zelená	~ 520 – 565 nm	~ 580 – 530 THz
tyrkysová	~ 500 – 520 nm	~ 600 – 580 THz
modrá	~ 430 – 500 nm	~ 700 – 600 THz
fialová	~ 400 – 430 nm	~ 750 – 700 THz

Vnímání barvy světla je dáno zrakovým vjemem, který je vyvolán zářením vnikajícím do oka.

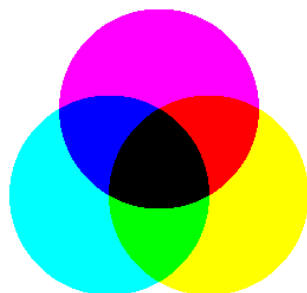
Barvu světla můžeme popsat v pojmech, jako jsou vlnová délka a intenzita elektromagnetického vyzařování.

Viditelné světlo je ohraničeno barvou **červenou** (nejdelší vlnová délka) a **modrou** (nejkratší vlnová délka). **Zelená** barva je někde mezi těmito barvami.

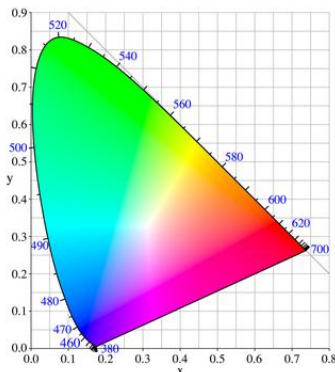
V oku je na sítnici pole sensorů, které je citlivé na tyto tři specifické vlnové délky.



Aditivní skládání barev
RGB – 8 základních
barev



Subtraktivní skládání
barev CMYK



Barevný
trojúhelník

Měření barev COLORIMETR

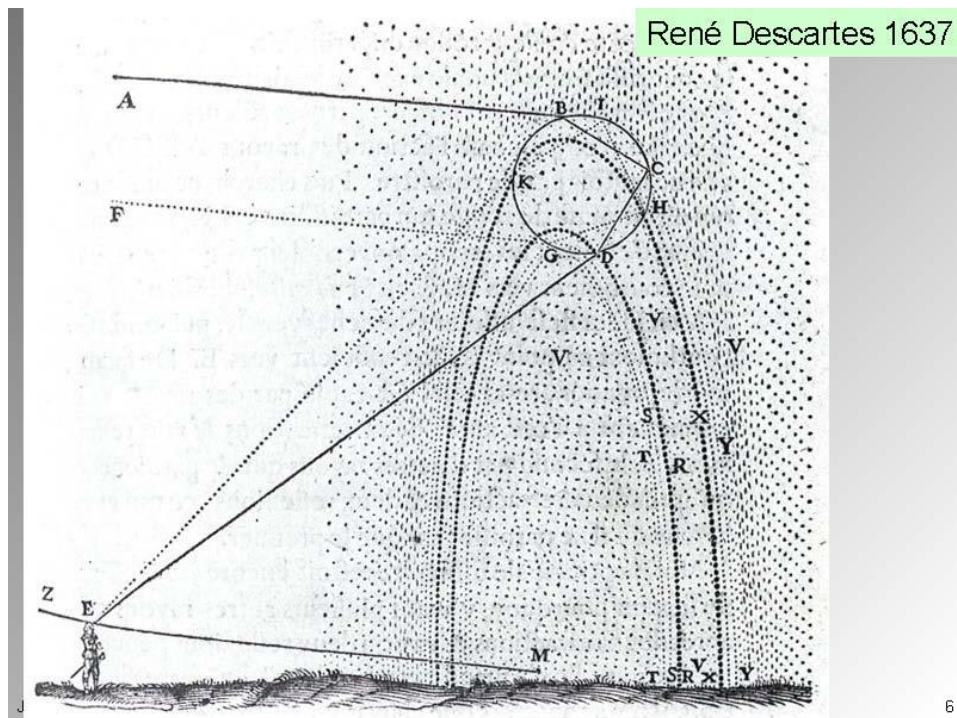
Měří **RGB hodnoty** (RedGreenBlue) – vzorek je osvětlen požadovaným zdrojem světla a intenzita odraženého světla se pak **přes tři barevné filtry** měří napětím na fotodiodách, které určuje intenzitu v jednotlivých RGB kanálech (obdobně, jako je tomu v lidském oku). Výsledkem jsou pak hodnoty v tzv. **prostoru XYZ**. Tyto přístroje jsou méně přesné (barevná odchylka dE 10-15!) a méně univerzální.

SPEKTROMETR

Princip měření je založen na tom, že každá barva spektra **vyzařuje energii** o různé vlnové délce.

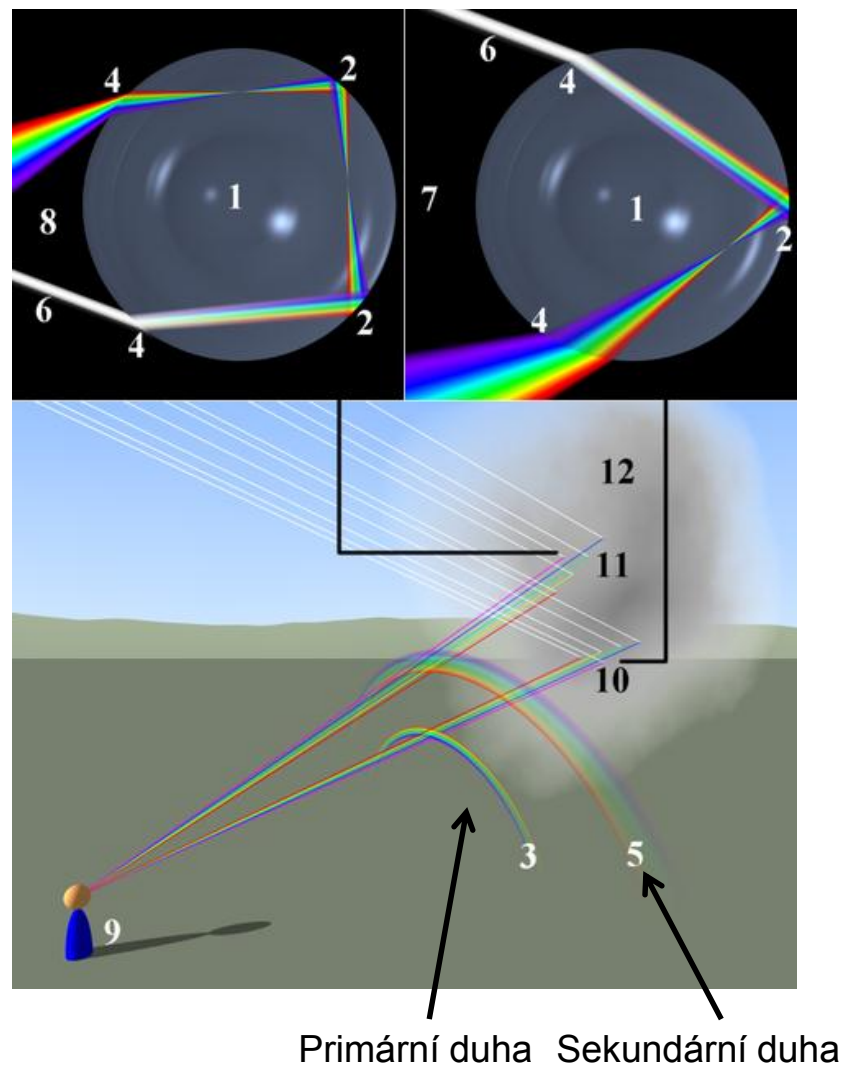
Vlnová délka tohoto záření je měřena v nanometrech. Spektrometr měří tak, že ve stejných krocích postupně odečítá hodnoty celého viditelného spektra. Kvalitní spektrometry zpravidla mají krok měření 5nm i méně!

Světlo v přírodě – DUHA (1)



Historie pozorování

- René Descartes 1637
- Isaac Newton 1670 - proč je duha barevná
- pořadí barev, $n=1.33$ (červená), $n=1.34$ (fialová)
- George Airy 1820 - podružné oblouky duhy závislost na velikosti kapek



Světlo v přírodě – DUHA (2)

Duha

- ⇒ Hlavní oblouk 42° , vedlejší oblouk 51° – obrácené pořadí barev
- ⇒ I. Newton (1670) – barevnost duhy, pořadí barev - spektrum:

- červená: $n = 1.33 \Rightarrow$ úhel deviace 42.5°

- fialová: $n = 1.34 \Rightarrow$ úhel deviace 41.5°



Duha ve vodní tříšti



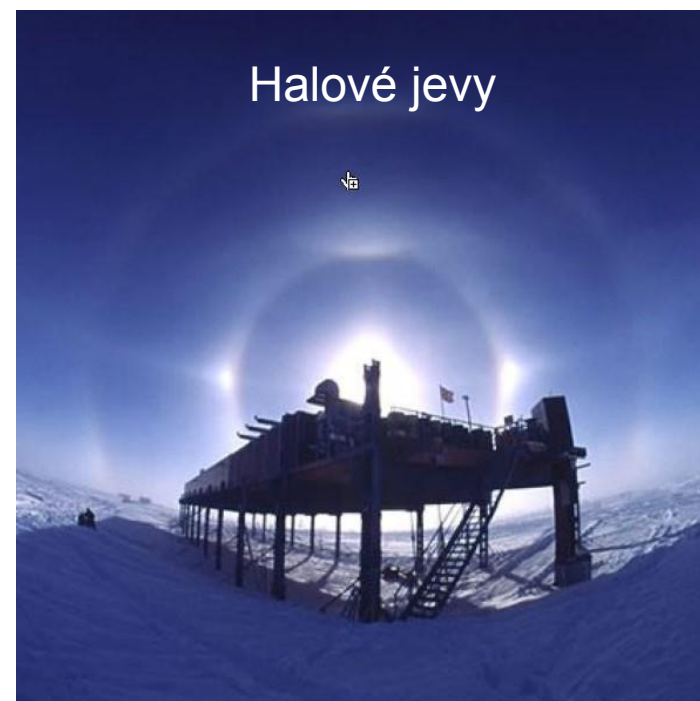
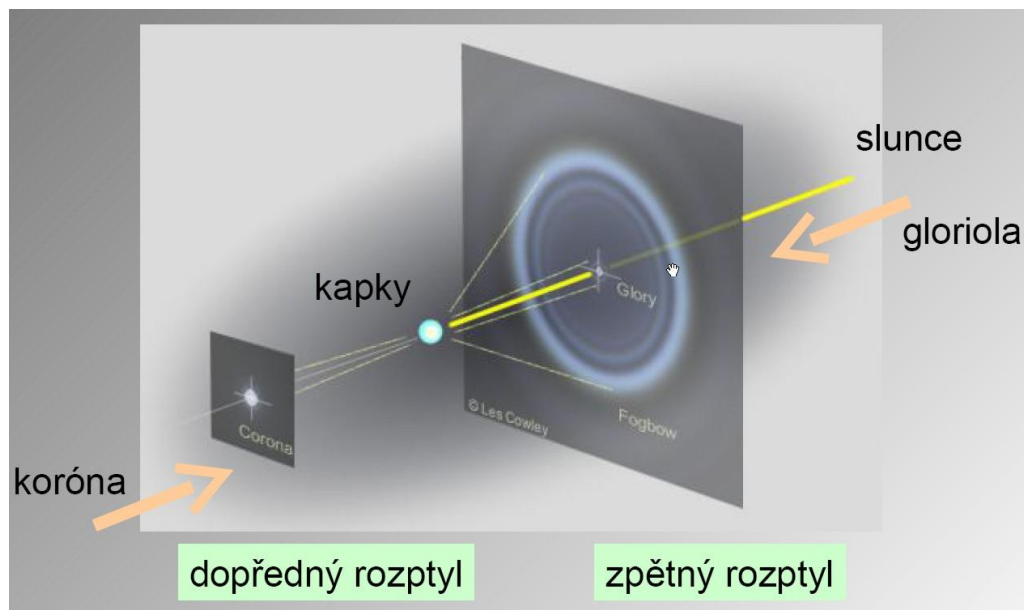
Světlo v přírodě – DUHA (3)

- ⇒ Standardně < půlkružnice, v horách – možno větší
- ⇒ Speciální případy – noční duha, **odražená duha**, duha ve vodní tříšti, rozštěp duhy, bílá duha, ...



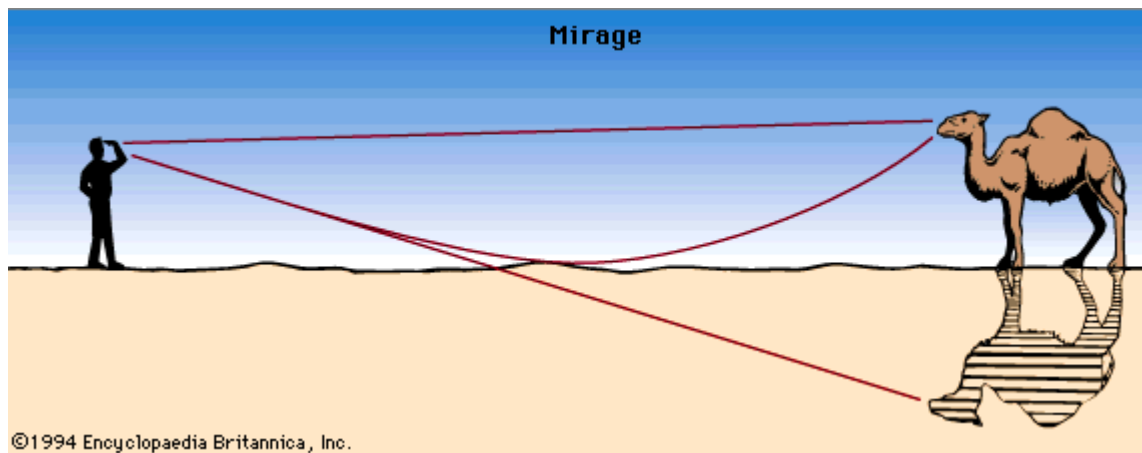
Světlo v přírodě – další efekty (1)

- **Koróna** (ohyb na vodních kapkách, 1852 – E. Verdet, 0° - 10°)
- **Gloriola** (opoziční efekt, svatozář, Brockenský přízrak)
- **Kondenzační čáry** (letadla)
- **Halové jevy** (lom a odraz slunečních paprsků na krystalcích ledu $\sim 100 \mu\text{m}$, malé halo $\sim 22^{\circ}$, velké halo 46°), halový strom
- **Parhelium** (vedlejší slunce)
- **Irizace** (vedlejší slunce), polární záře

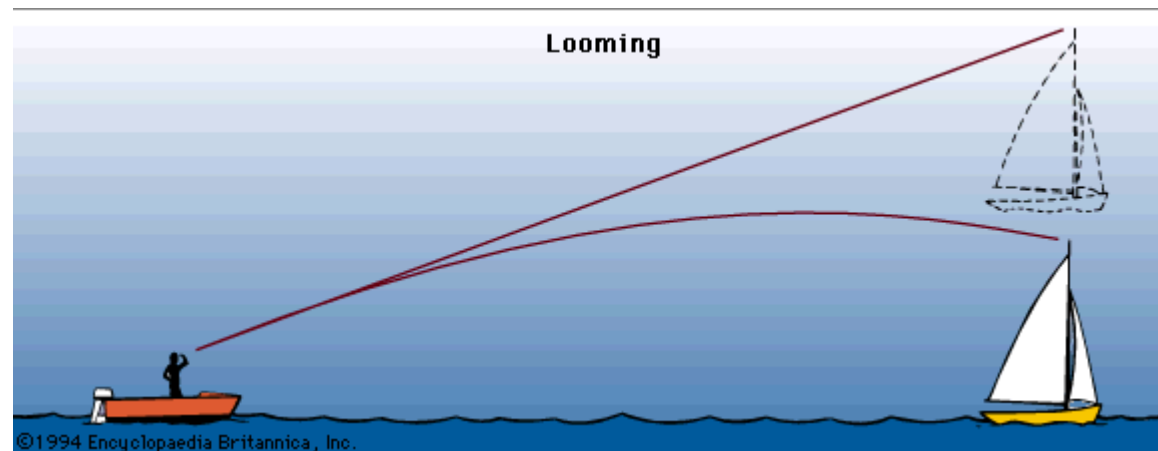


Světlo v přírodě – další efekty (3)

- Vzdušné zrcadlení: spodní zrcadlení (MIRAGE), svrchní zrcadlení (Fata Morgana)



Svrchní zrcadlení (Fata Morgána)
 Fata Morgána - víla,
 nevlastní sestra krále
 Artuše ovládající vzdušné
 přeludy zjevující se
 v Messinské úžině na Sicílii



Zdroje světla

- ZDROJE SVĚTLA – záření černého tělesa, širokopásmové ↔ monochromatické, koherentní
- Světelný zdroj je elektromagnetické záření v rozsahu viditelných vlnových délek (zhruba 380-780nm)
- Záření můžeme pozorovat lidským okem jako viditelné světlo

Rozlišujeme světelné zdroje:

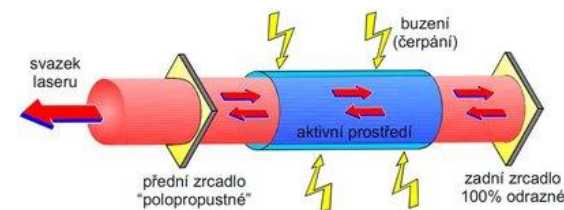
Přírodní ⇒ kosmická tělesa - Slunce, hvězdy, Měsíc (zdroj sekundární), chemická reakce-oheň, biologické zdroje - světlušky a mořští živočichové, elektrické výboje - blesk, tektonické jevy - žhnoucí láva

Umělé (vytvořené člověkem) – rozdělení dle podstaty vzniku světla:

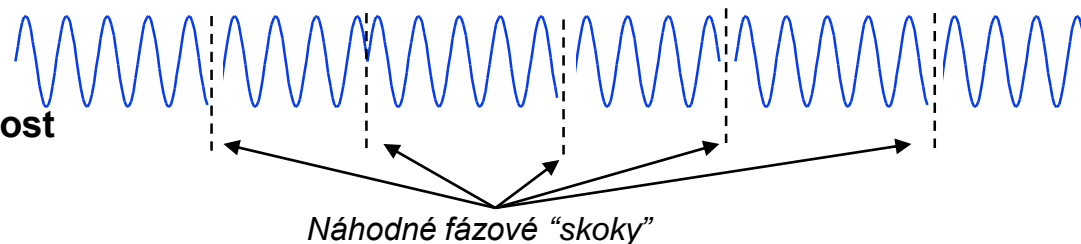
- ⇒ princip tepelného záření (žárovky) – **inkandescence**
- ⇒ záření elektrického výboje v plynech a parách kovů (zářivky, výbojky)
- ⇒ **luminiscence** (svítivé diody - LED)



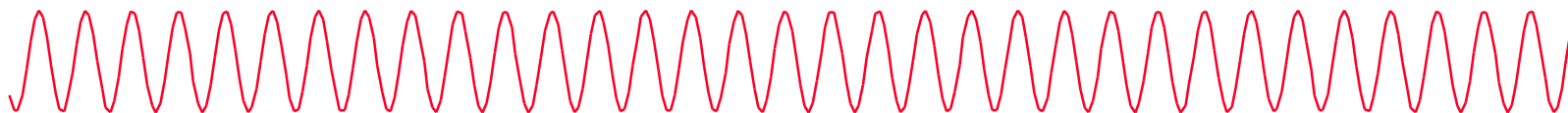
- ⇒ **lasery** - kolimovanost
- monochromaticnost
- koherence



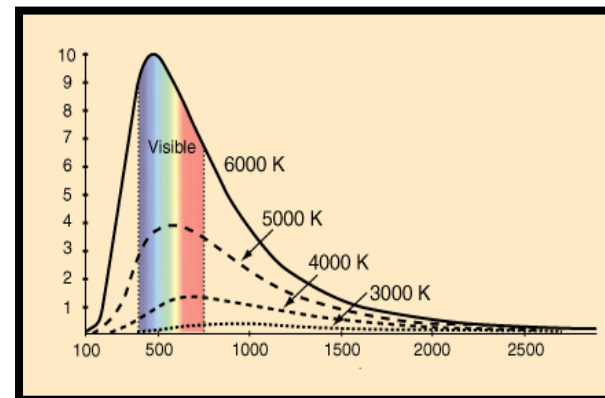
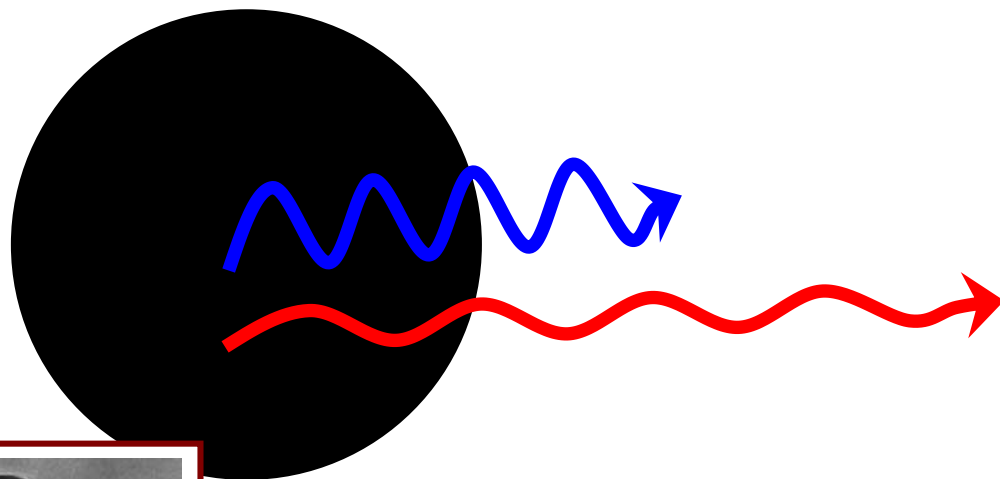
Nekoherentní světlo: (žárovka)



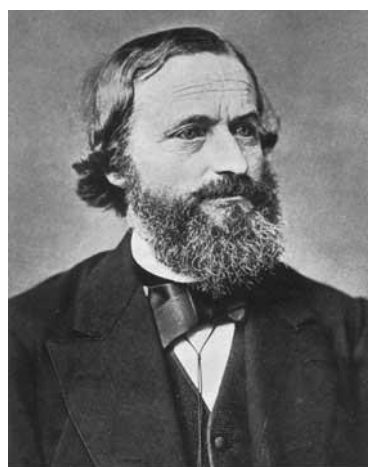
Koherentní světlo: (laser)



Chaotické světlo - absolutně černé těleso



Spektrum záření A.Č.T.



Library of Congress

Gustav Robert Kirchhoff
1824 - 1887

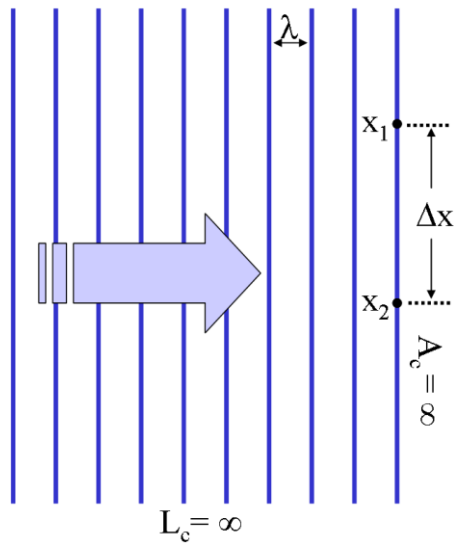
→ Těleso pohltí všechno záření na něj dopadající – nic neodráží. Všechno záření, které z něj vychází, má původ v jeho vlastních zdrojích.

→ Záření nezávisí na druhu materiálu – souvisí pouze s teplotou tělesa.

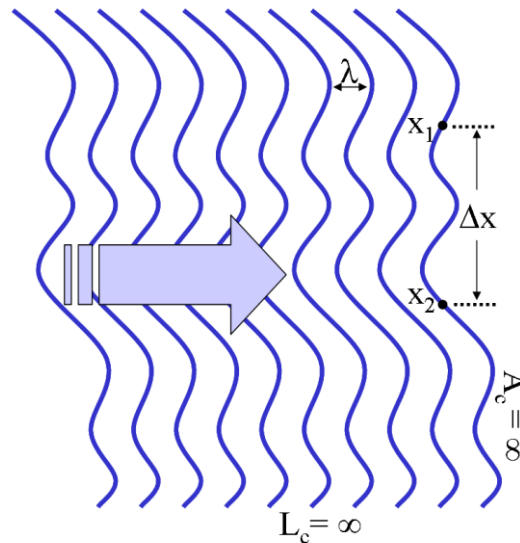
→ 1860 - G. Kirchhoff

→ Nekoherentní záření

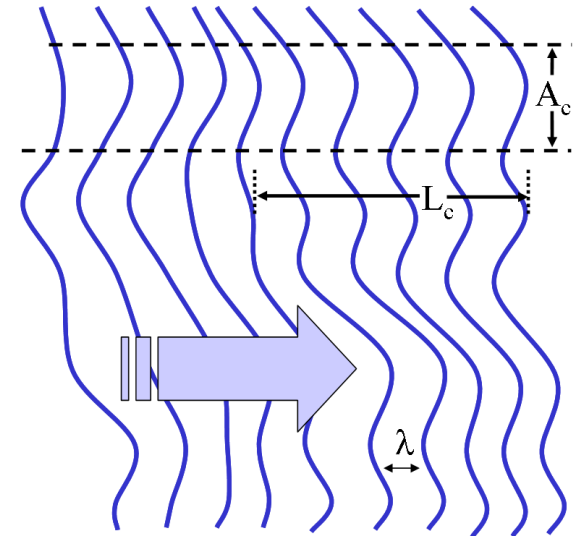
Prostorová koherence světla



A plane wave
with an **infinite**
coherent lens

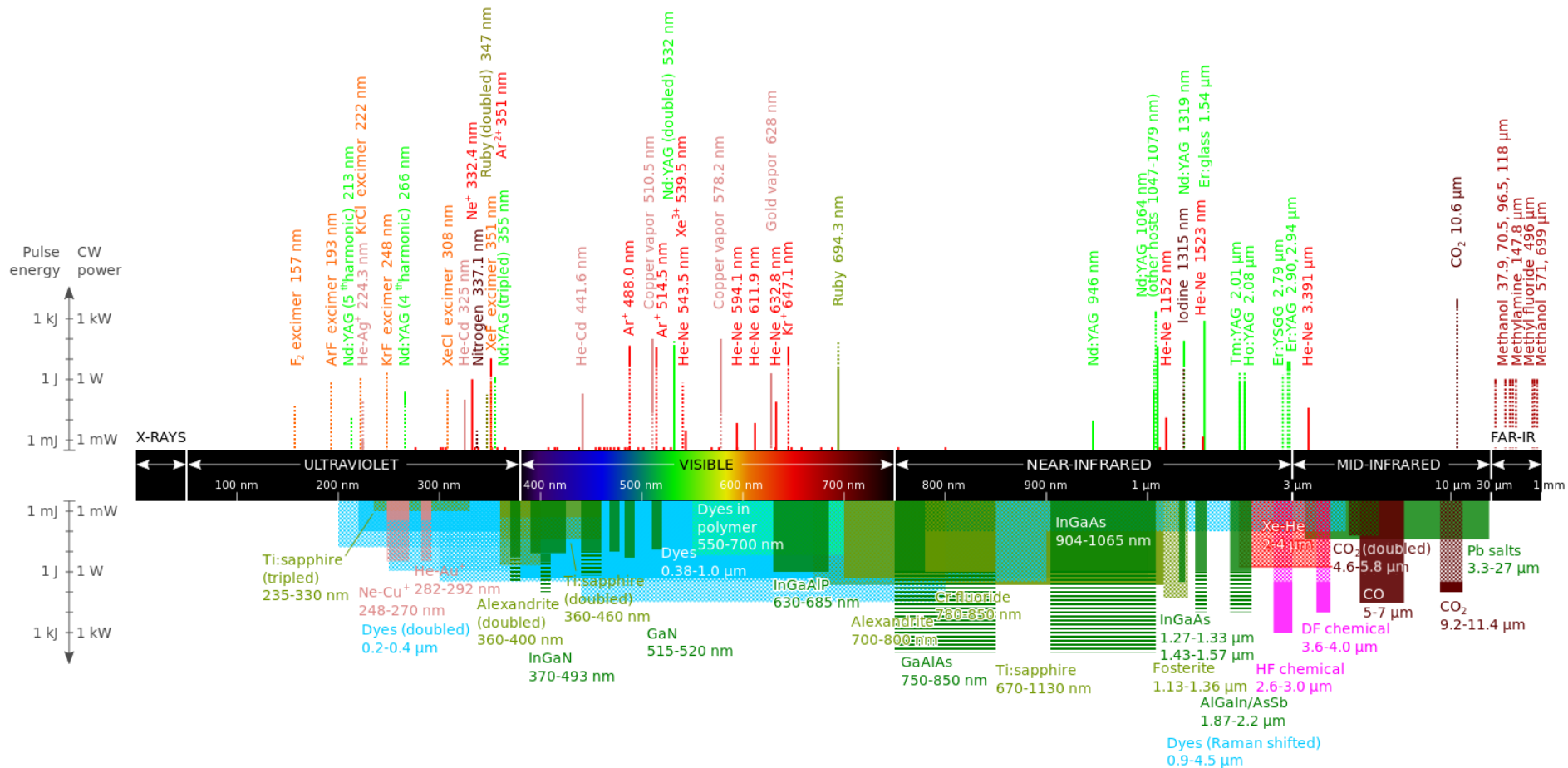


A wave with
a varying profile
(wavefront) and
infinite coherence
length.

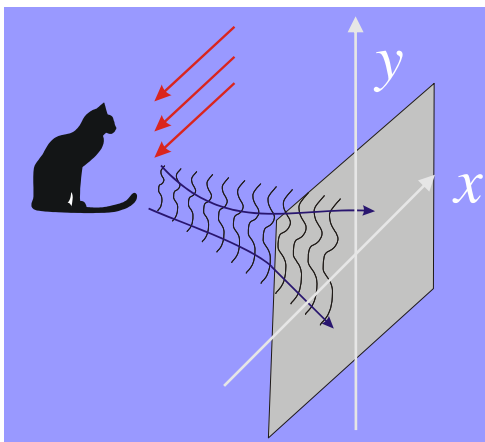


A wave with
a varying profile
(wavefront) and
finite coherence
length.

Zdroje světla - lasery ...



Interakce světla s prostředím – OPTICKÉ JEVY



Transformace vlny
objektem

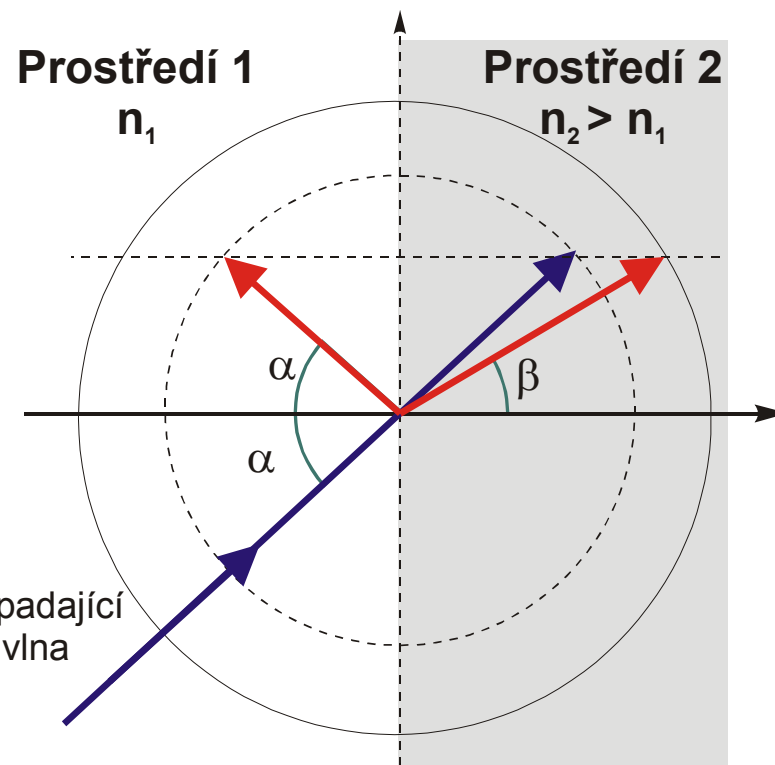
→ Odraz – reflexe
(na fázovém rozhraní)

→ Lom – refrakce
(na fázovém rozhraní)

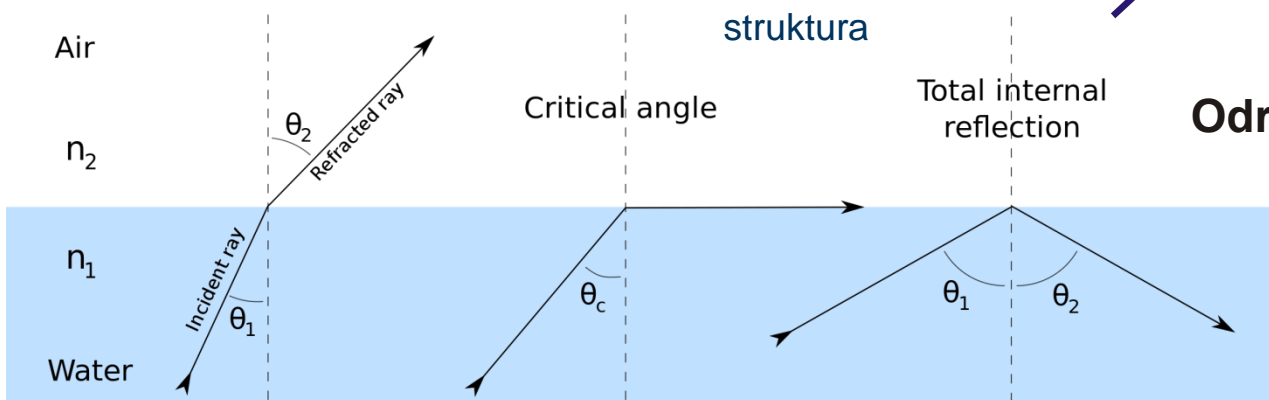
→ Absorpce (změna R, T)

→ Interference

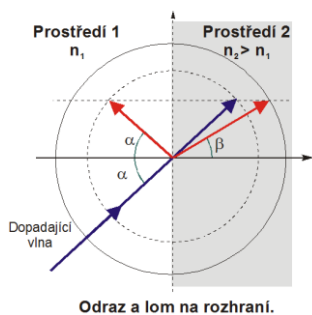
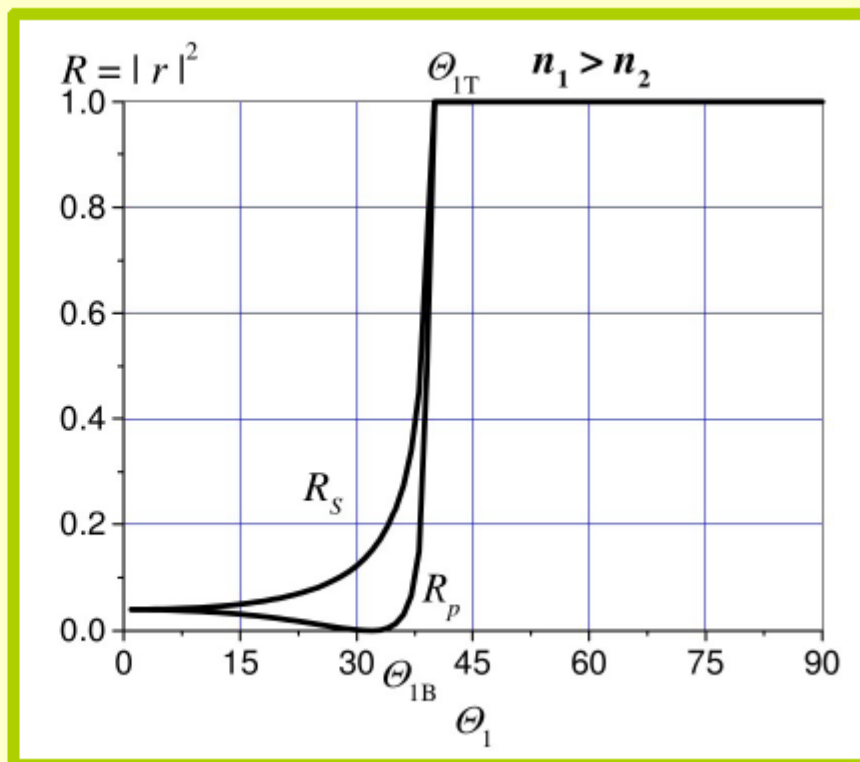
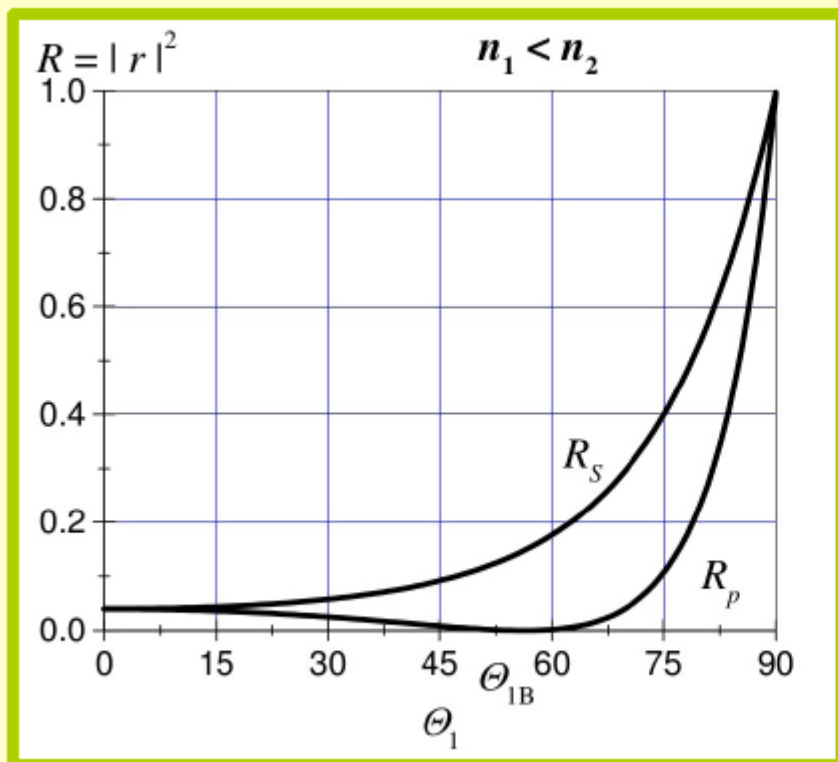
→ Difrakce + rozptyl
– mřížka, obecná
struktura



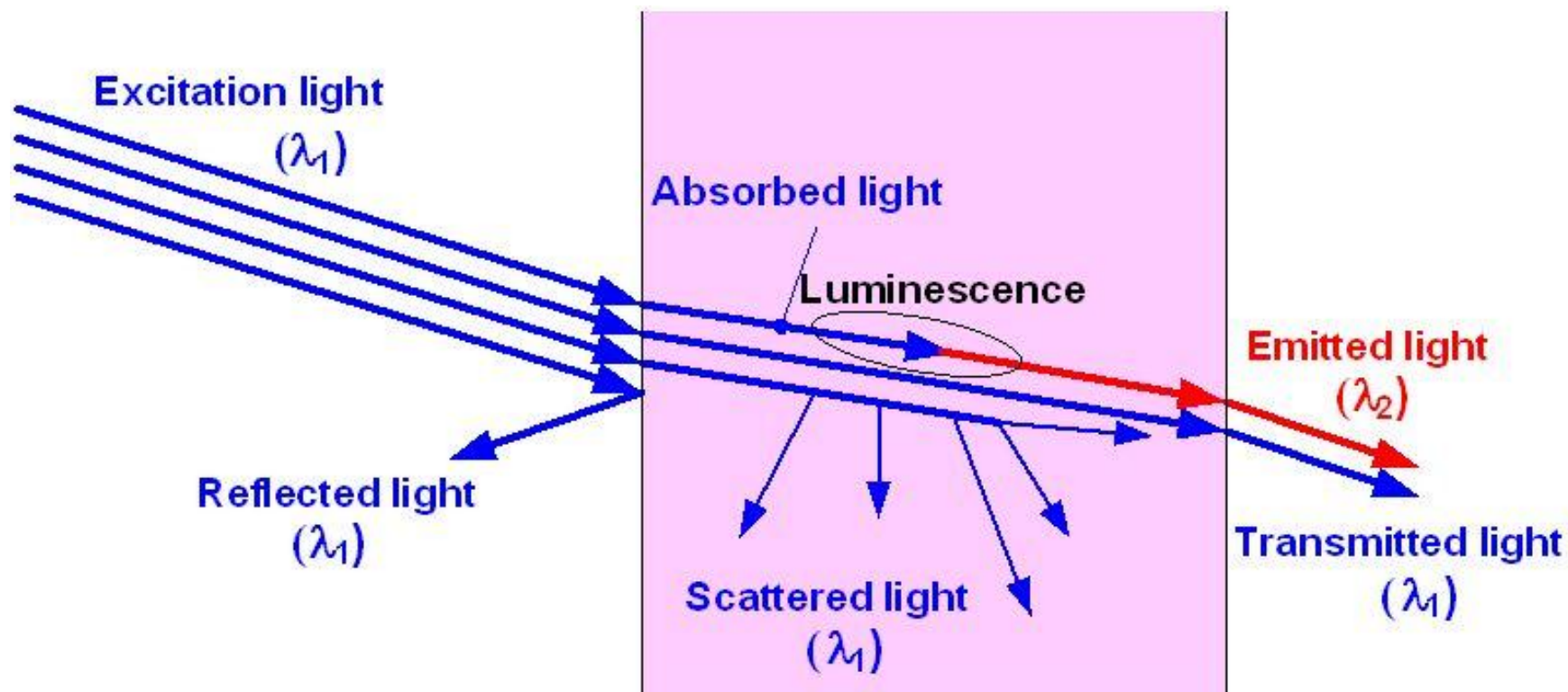
Odraz a lom na rozhraní.



Reflektivita vlny na rozhraní

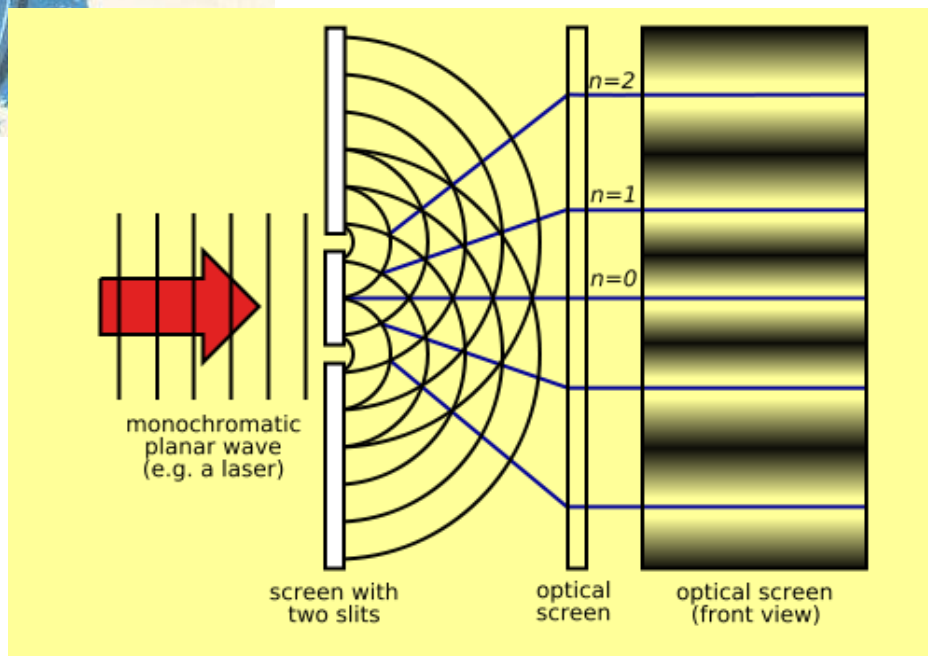
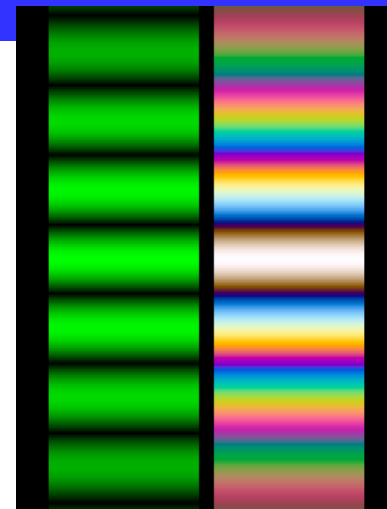
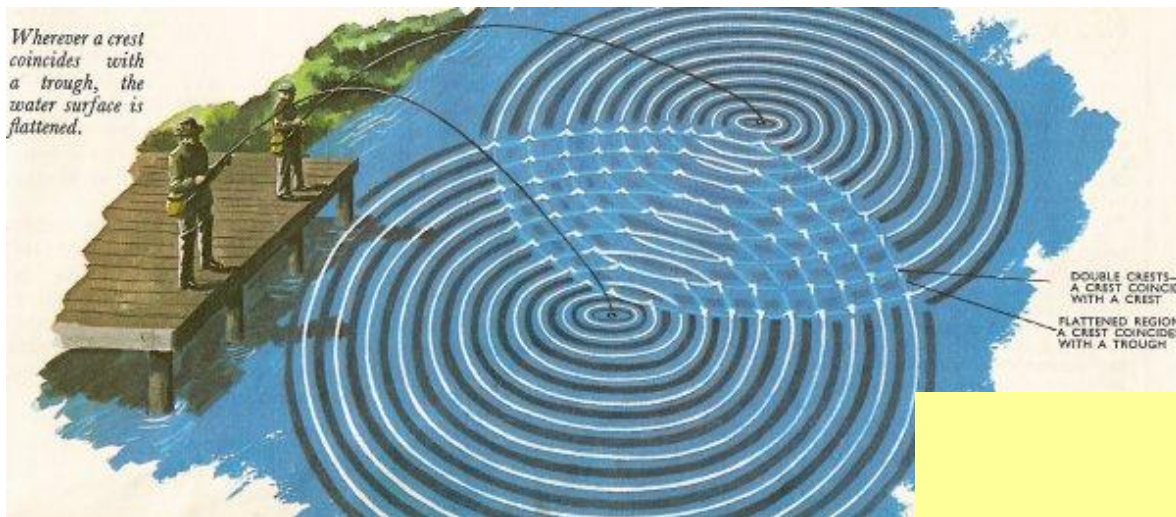


Interakce světla s prostředím



Interference

Interference dvou vln – vodní hladina



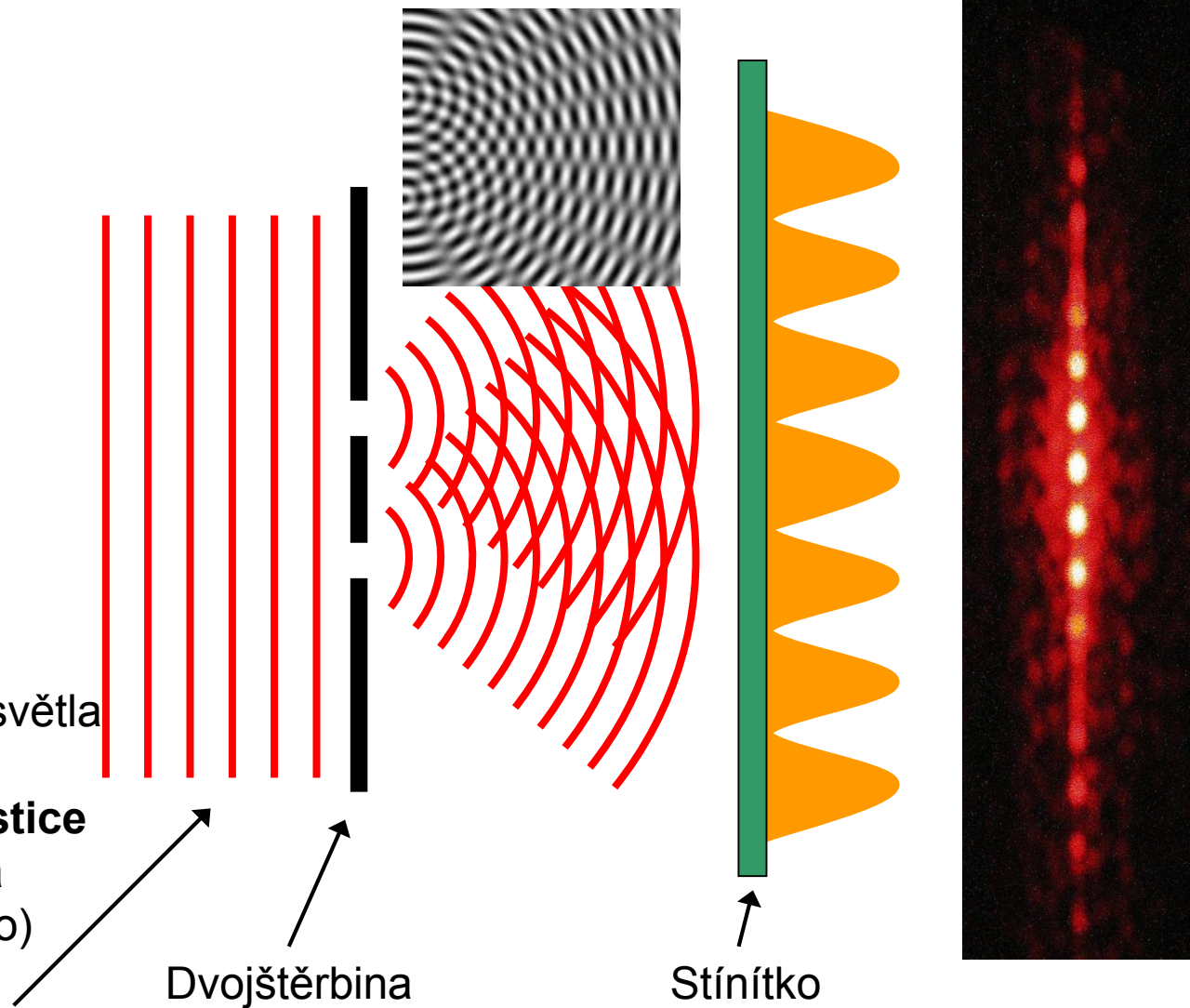
Vlnové vlastnosti světla – Youngův pokus



Thomas Young
(1773 - 1829)

ALE: částicový charakter světla

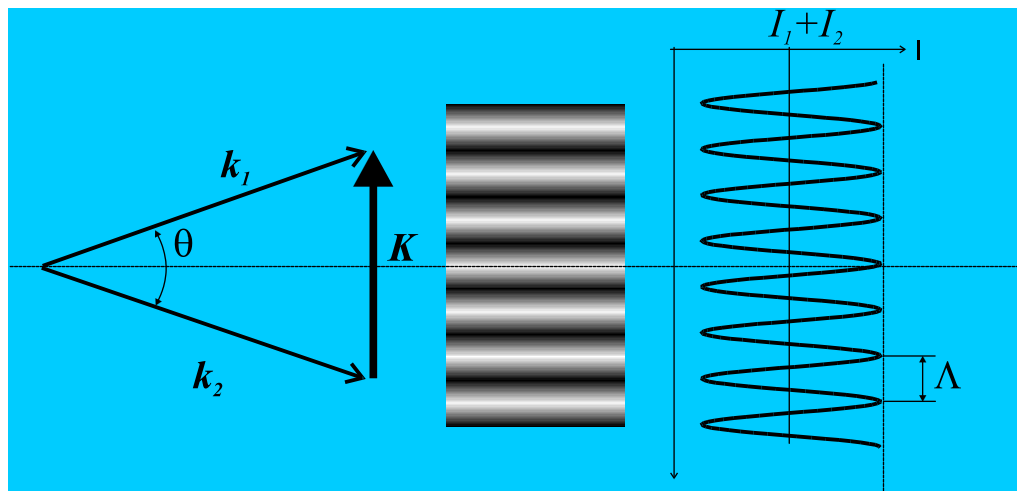
DUALISMUS – vlna x částice
Zdroj světla
(koherentního)



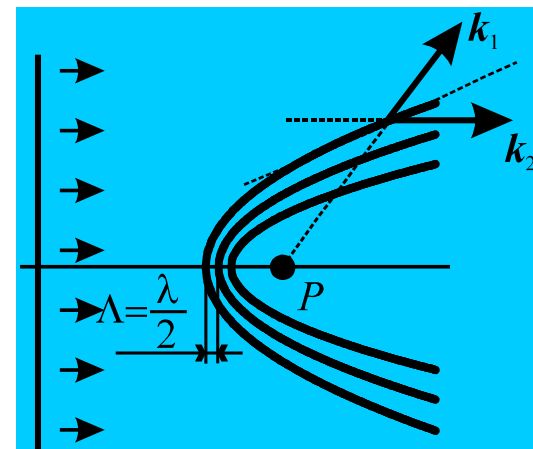
Dvojštěrbina

Stínítko

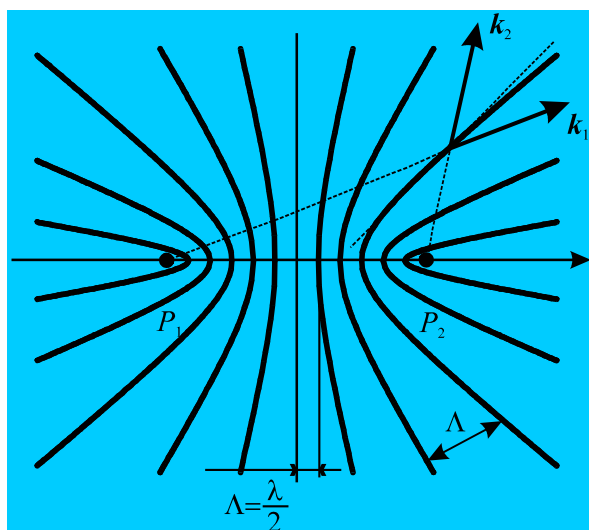
Vlnové vlastnosti světla – interference dvou vln



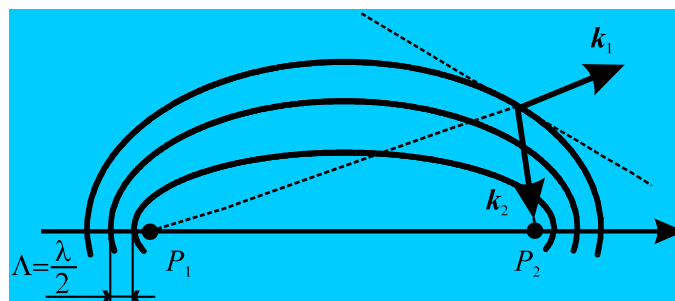
Interference dvou
ROVINNÝCH vln



Interference vlny rovinné
a konvergující

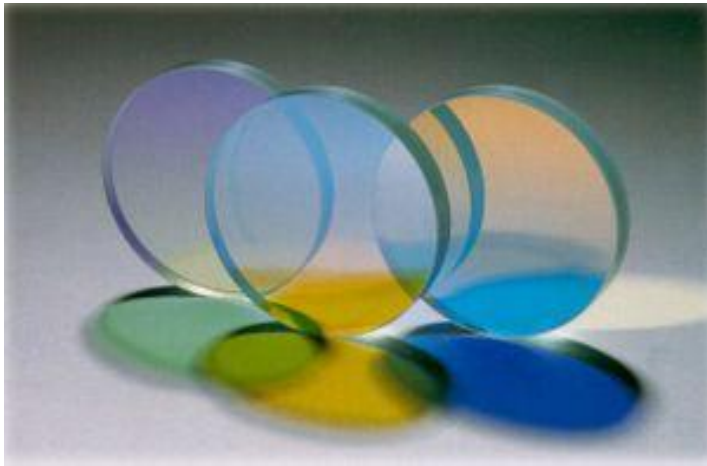


Interference dvou
divergentních vln

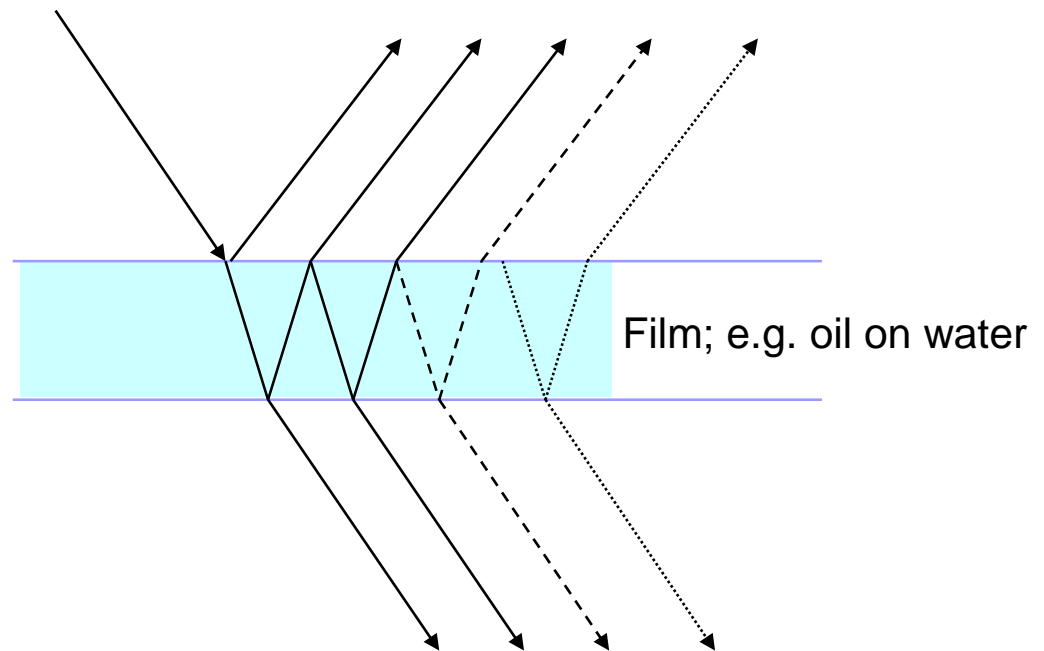


Interference dvou
konvergentních vln

Interference vln – tenká optická vrstva



Rays reflected off the lower surface travel a longer optical path than rays reflected off upper surface.



If the optical paths differ by a multiple of λ , the reflected waves add.

If the paths cause a phase difference π , reflected waves cancel out.



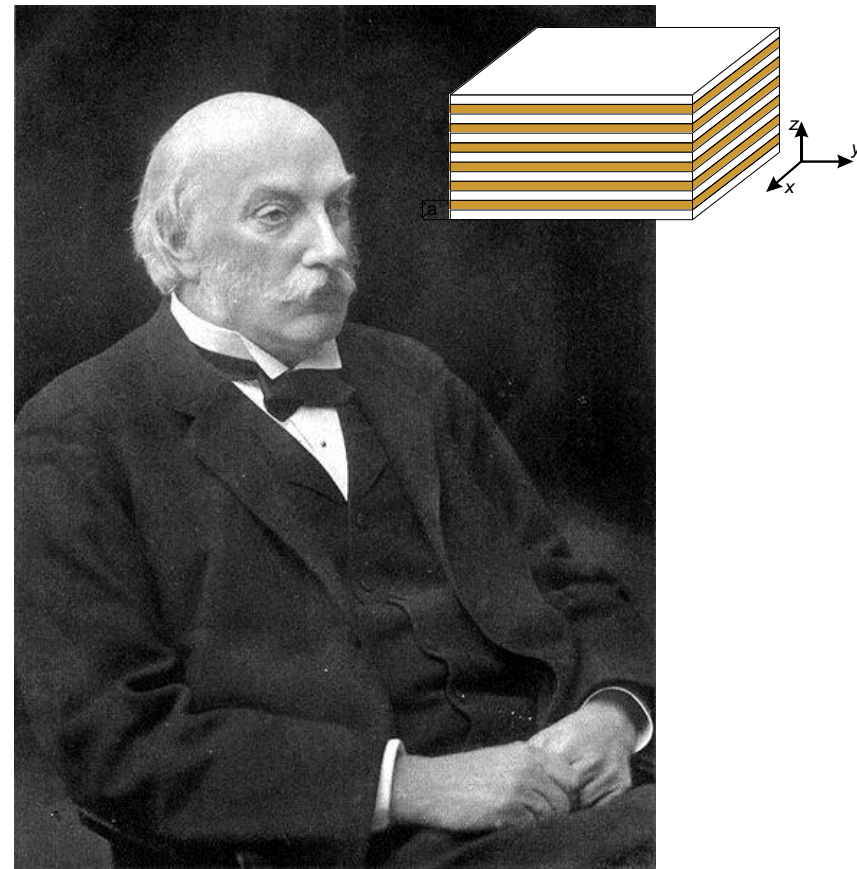
1887 – Lord Rayleigh – teorie multivrstev

THE
LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN
PHILOSOPHICAL MAGAZINE
AND
JOURNAL OF SCIENCE.

[FIFTH SERIES.]

AUGUST 1887.

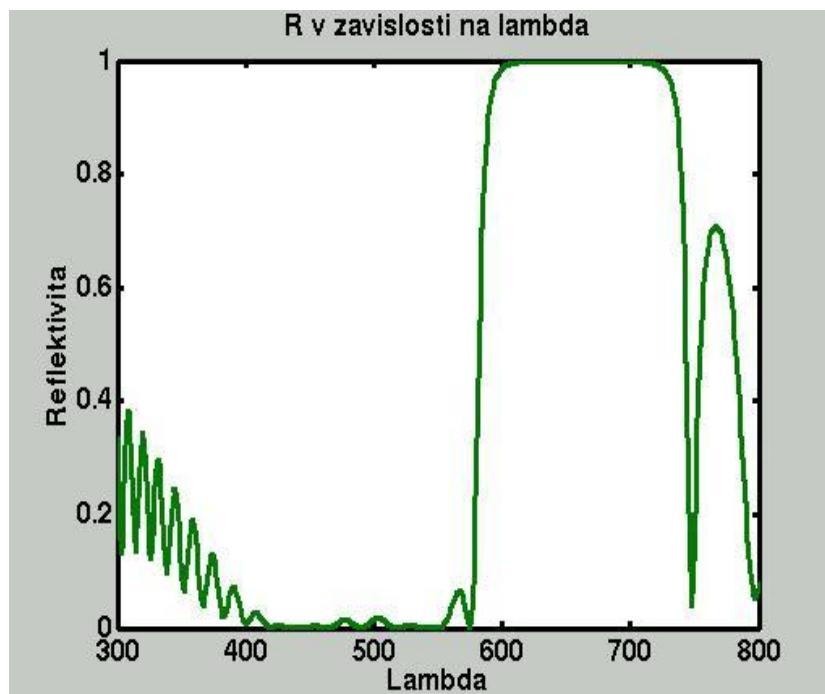
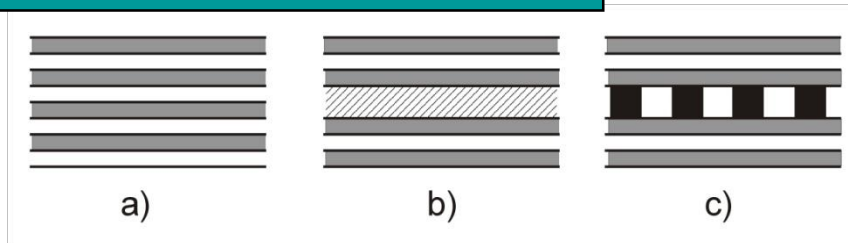
XVII. *On the Maintenance of Vibrations by Forces of Double Frequency, and on the Propagation of Waves through a Medium endowed with a Periodic Structure.* By Lord RAYLEIGH, Sec. R. S., Professor of Natural Philosophy in the Royal Institution*.



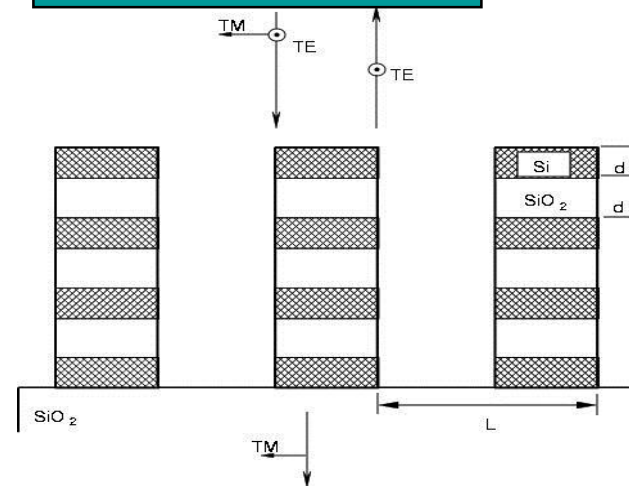
John William Strutt (*12-Nov-1842; † 30-Jun-1919)
Lord Rayleigh the Third Baron of Terling Place

Optické multivrstvy

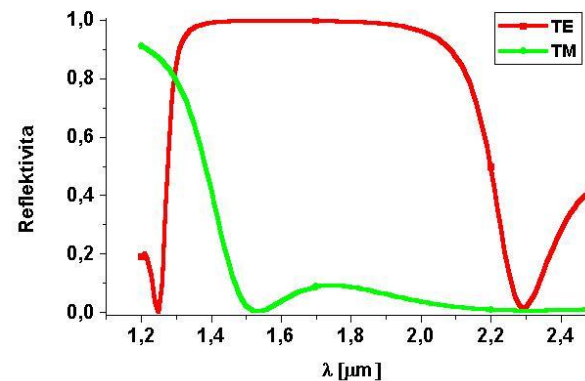
Schema multivrstvy (ML)



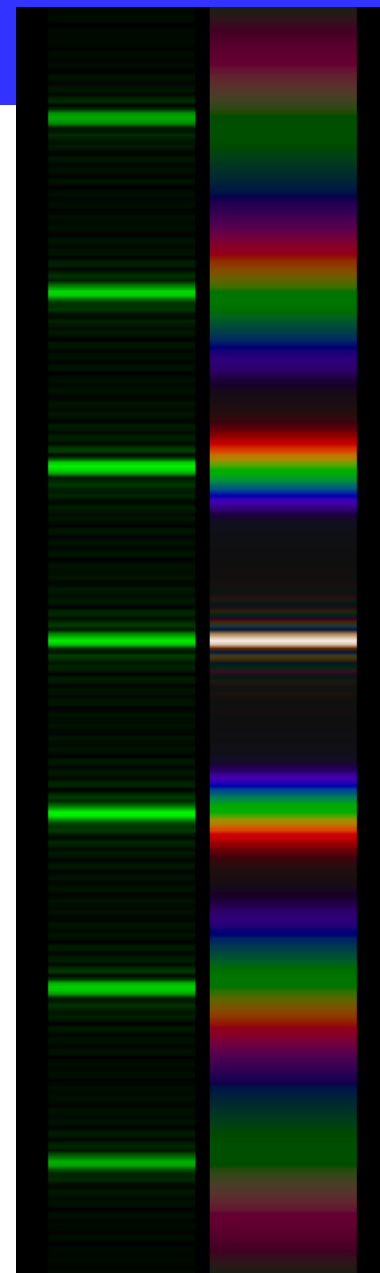
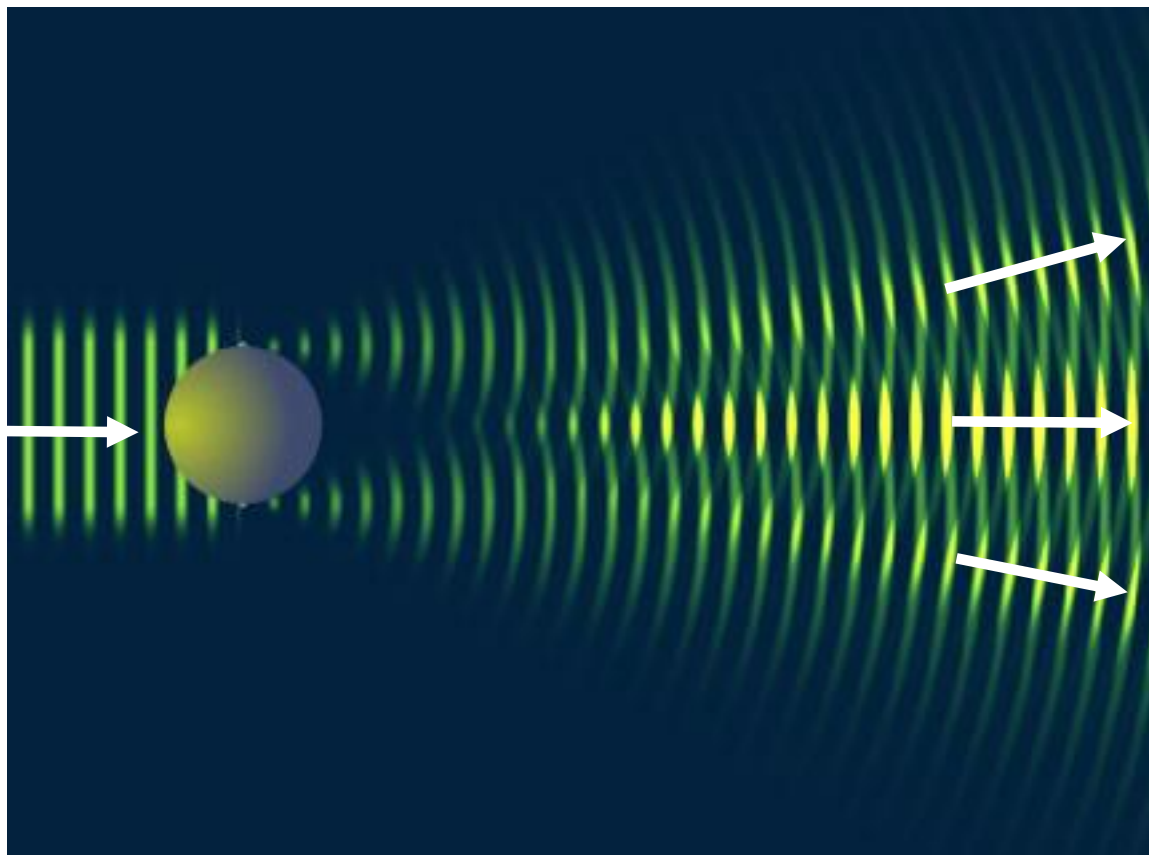
Polarizační dělič - schema



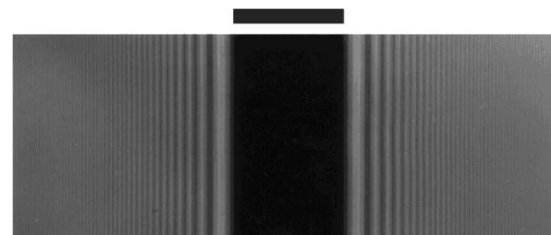
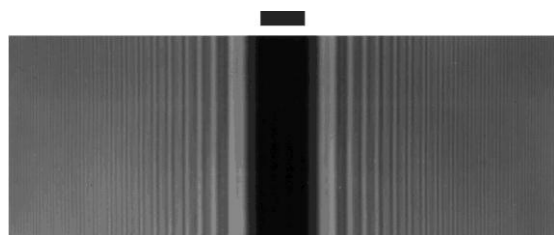
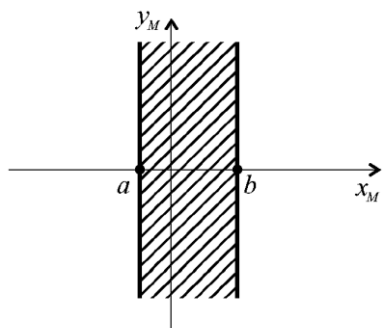
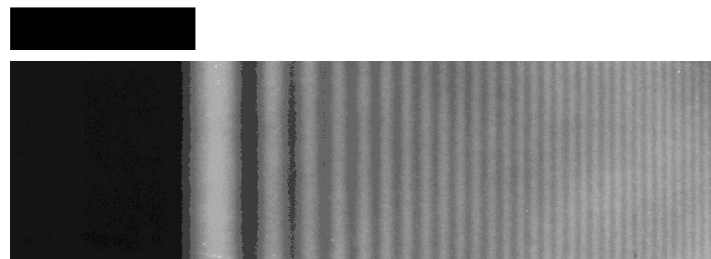
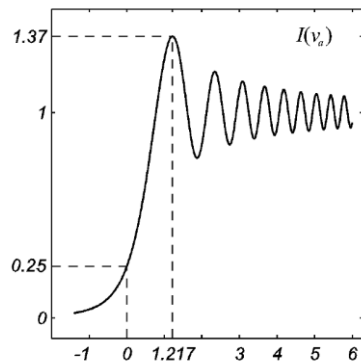
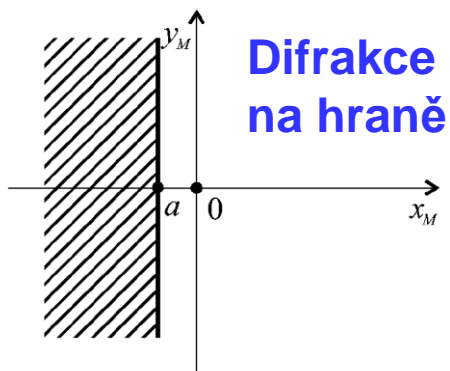
Polarizační dělič - simulace



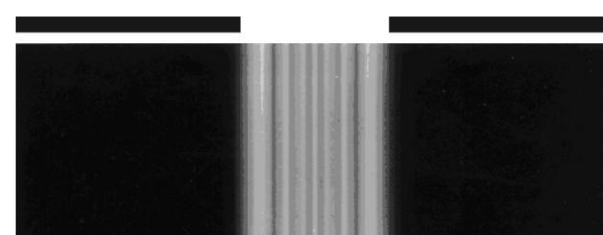
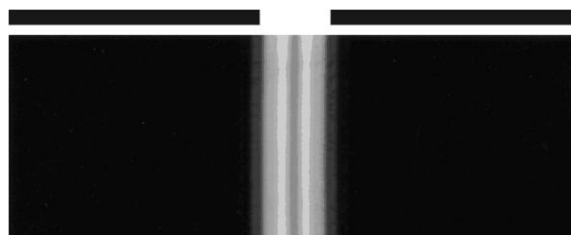
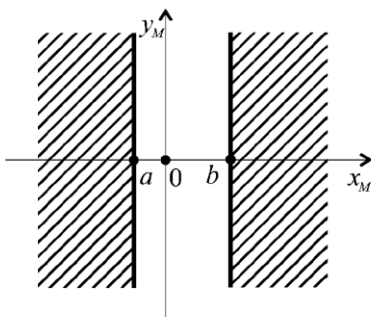
Jev ohybu světla – difrakce



Difrakce - hrana, drát, štěrbině, ...

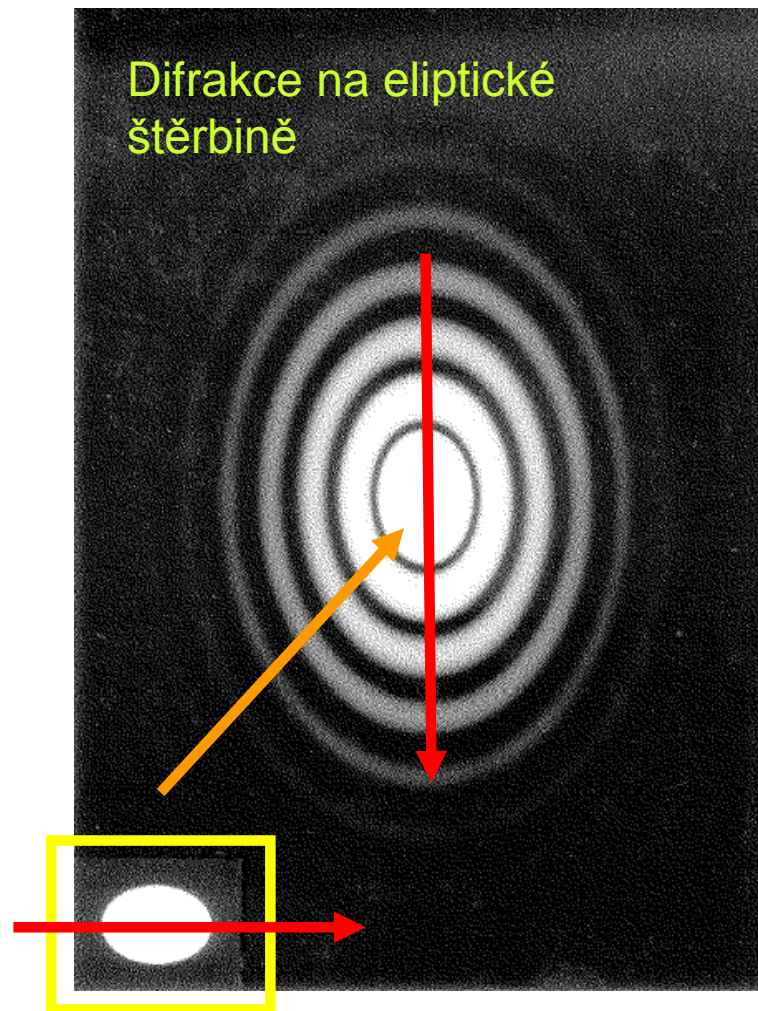
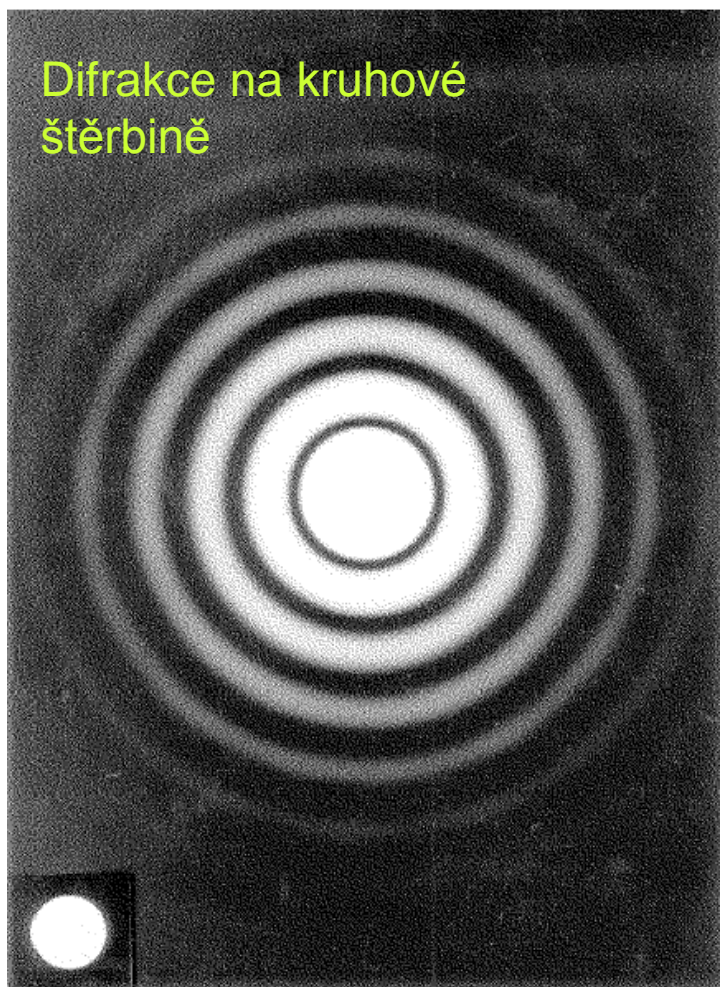


Difrakce na „drátu“



Difrakce na štěrbině

DIFRAKCE – kruhová, eliptická štěrbiná

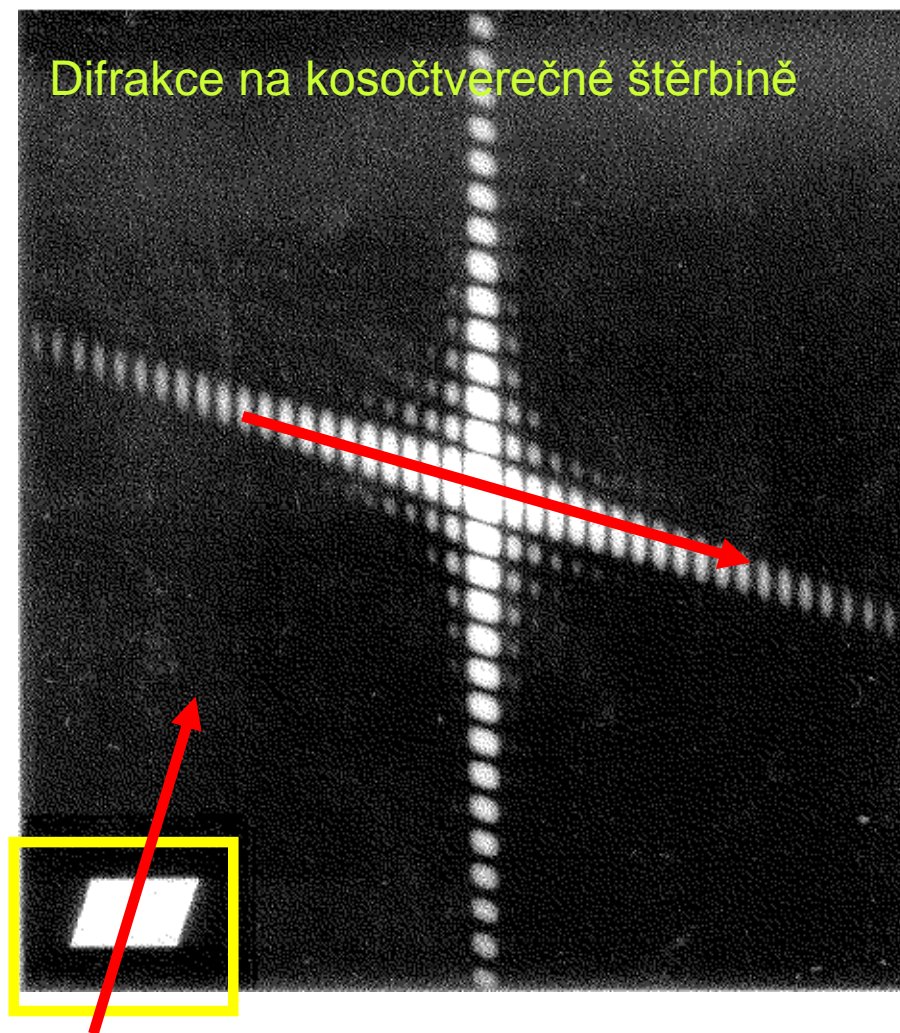


DIFRAKCE – čtvercová, zkosená štěrbina

Difrakce na čtvercové štěrbině

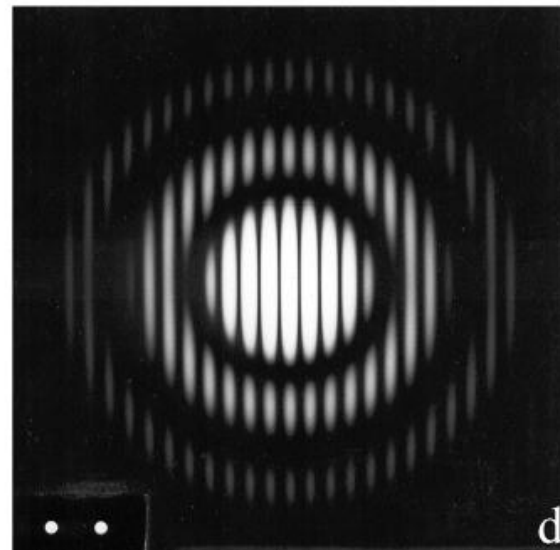
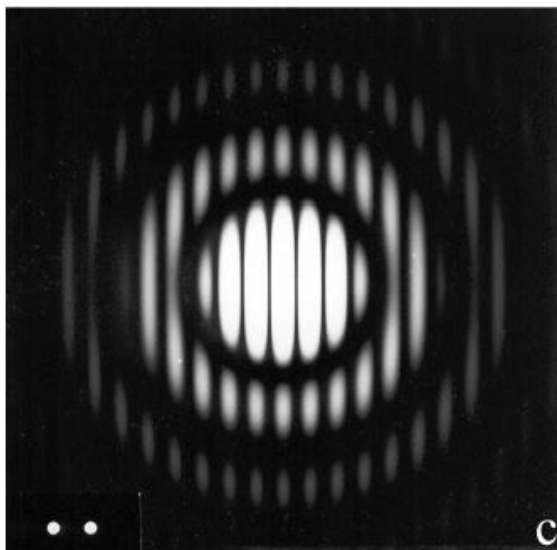
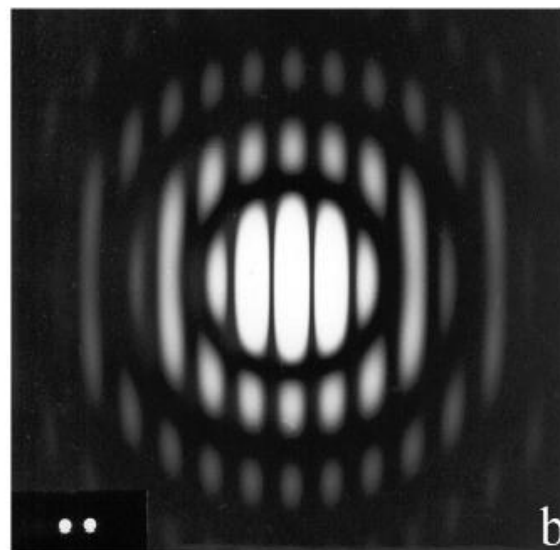
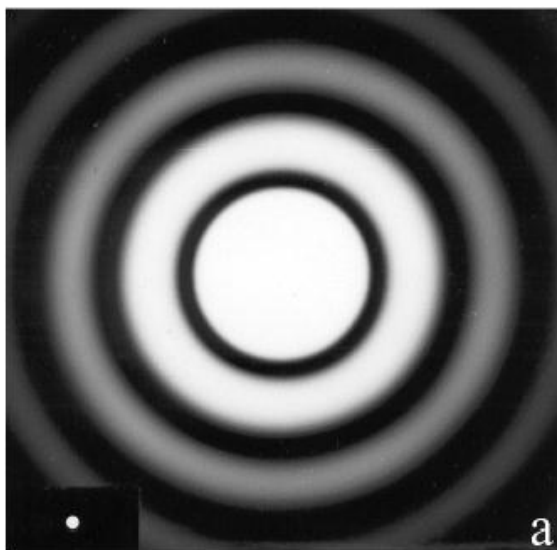


Difrakce na kosočtverečné štěrbině

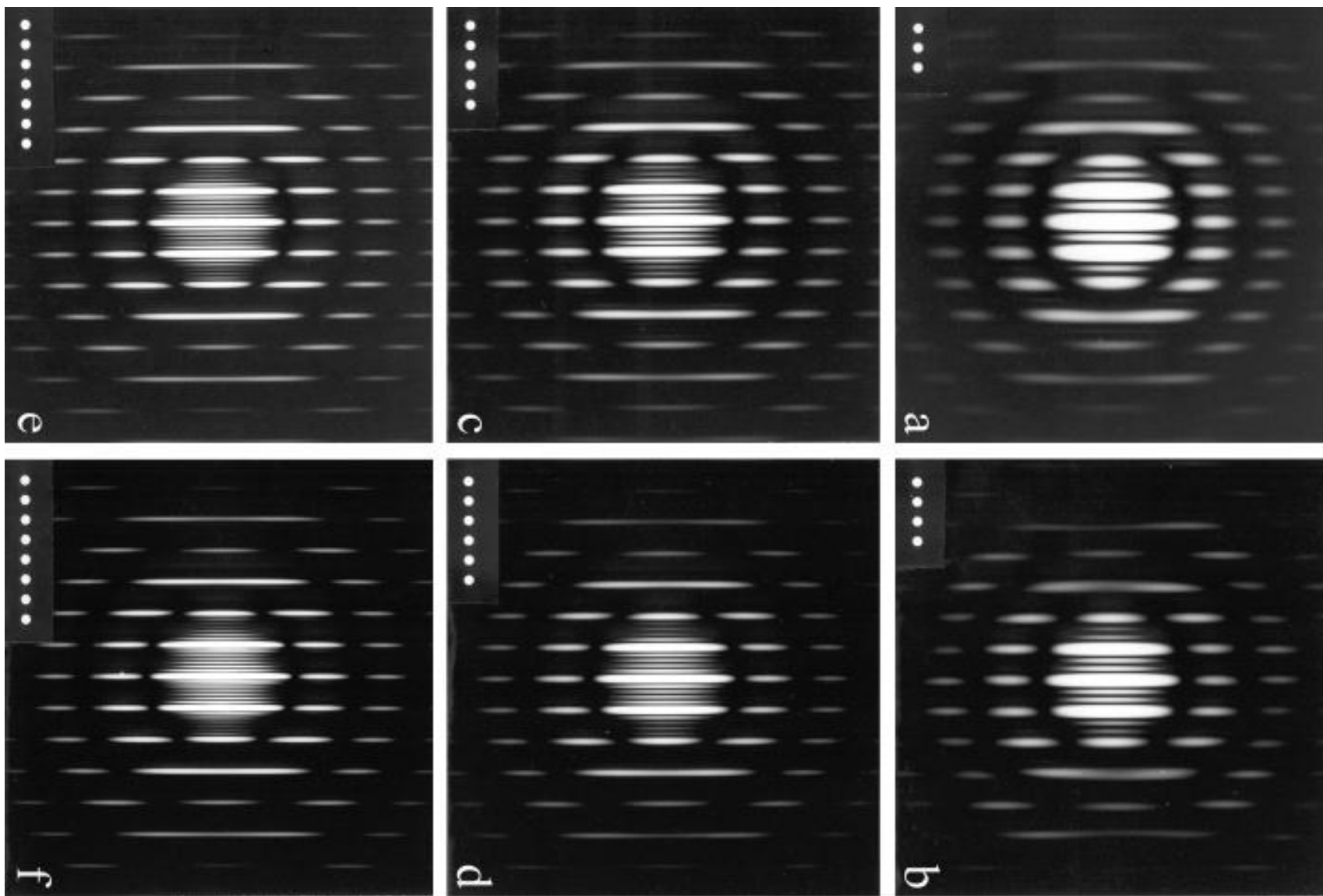


Jev ohybu světla – difrakce - dvojjapertura

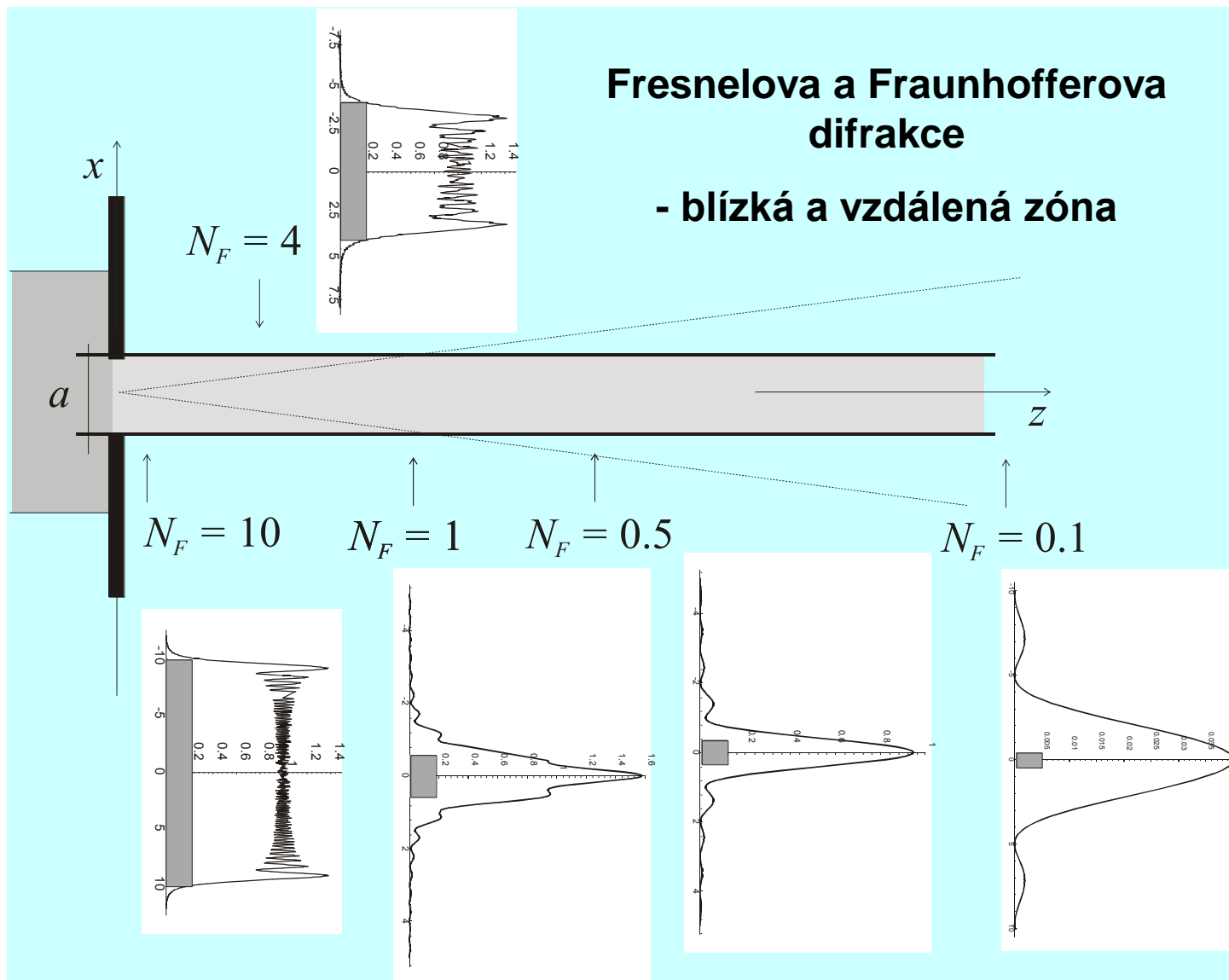
Difrakce
na 2
kruhových
štěrbínách
-
dvojjapertura



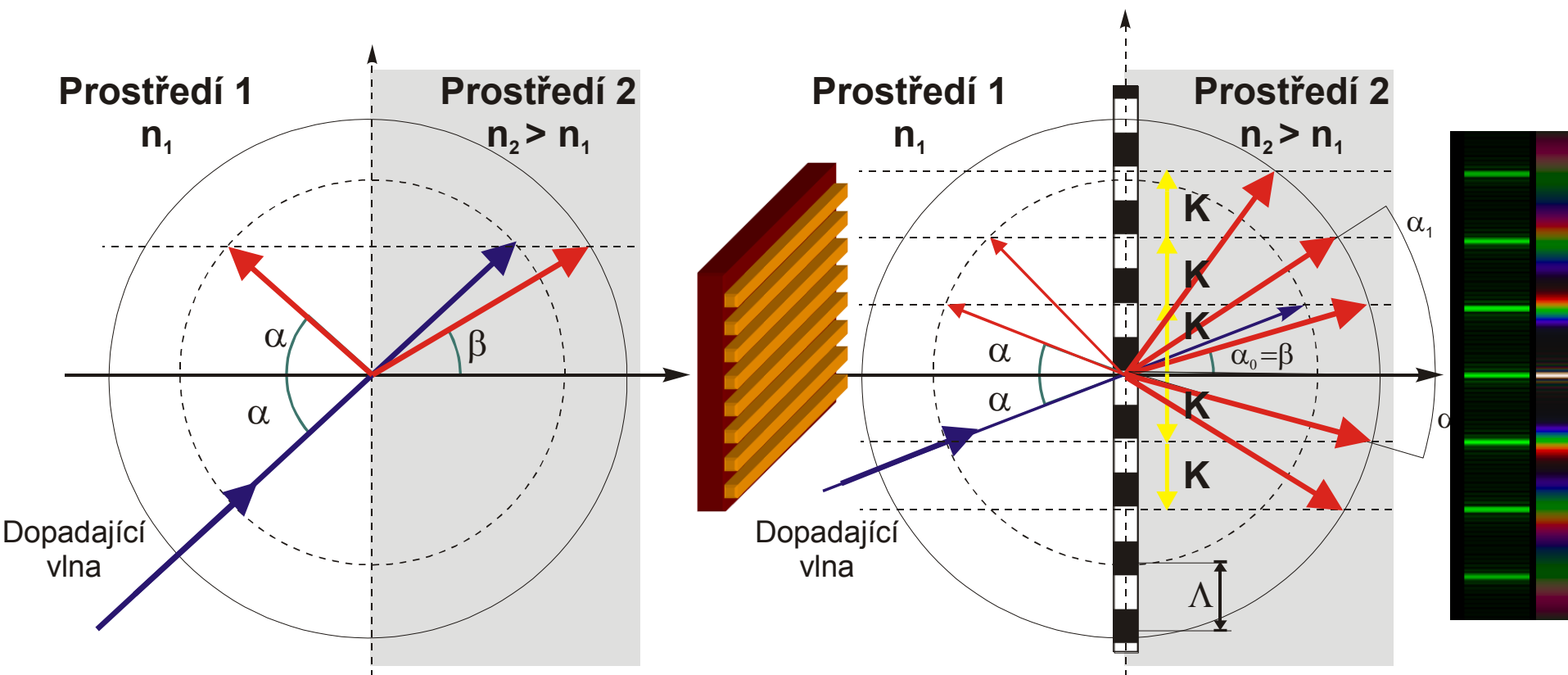
Jev ohybu světla – difrakce + interference – mřížka



Difrakce světla – blízká a vzdálená zóna



Interakce světla s prostředím – difrakce – mřížka



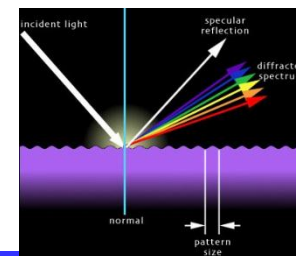
Odraz a lom na rozhraní.

Ohyb světla difrakční strukturou.

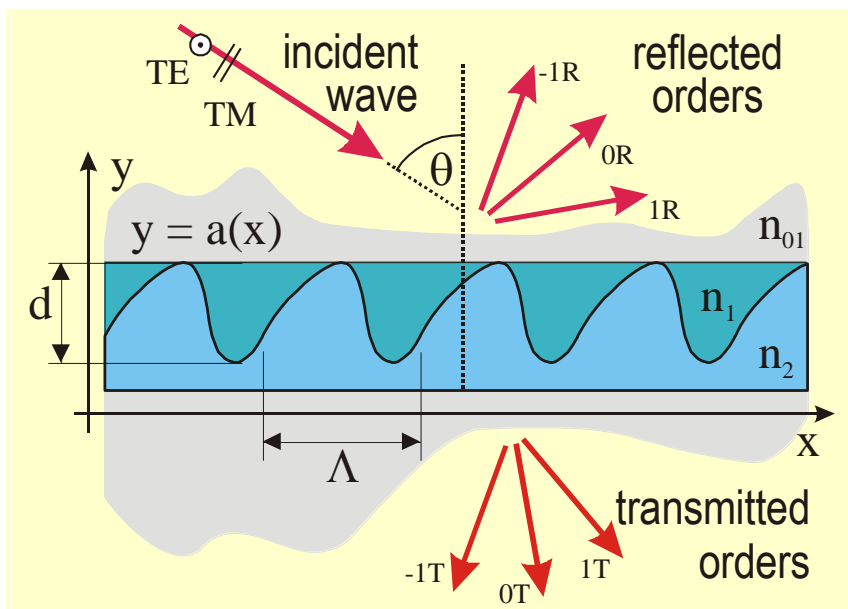
Mřížková rovnice:

$$(\mathbf{k}_d - \mathbf{k}_i - m\mathbf{K}) \times \mathbf{v} = \mathbf{0}$$

$$K = 2\pi/\Lambda$$



Základní 1D struktura – mřížka (GRATING)



Aspekty

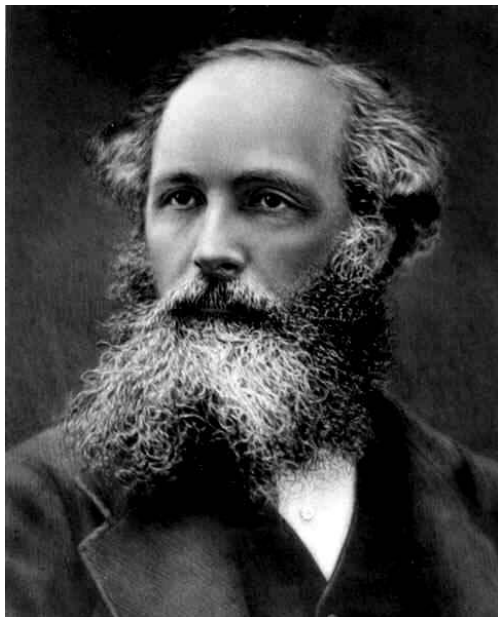
- charakteru pole
- charakteru materiálového prostředí
- metodiky přístupu

Difrakce na difrakční mřížce - multiparametrický problém

Charakteristiky:

- ✓ mřížkový profil $a(x)$
- ✓ úhel dopadu elmg. vlny (q)
- ✓ vlnová délka elmg. vlny (l)
- ✓ polarizace elmg. vlny (TE, TM, kombinovaná)
- ✓ mřížková perioda (L)
- ✓ tloušťka mřížkového prostředí (d)
- ✓ materiálové charakteristiky
 - indexy lomu
- ✓ geometrie interakce (klasická, kónická, Littrowova, ...)
- ✓ ...

Electromagnetic phenomena - Maxwell equations



James Clerk Maxwell
(1831-1879)



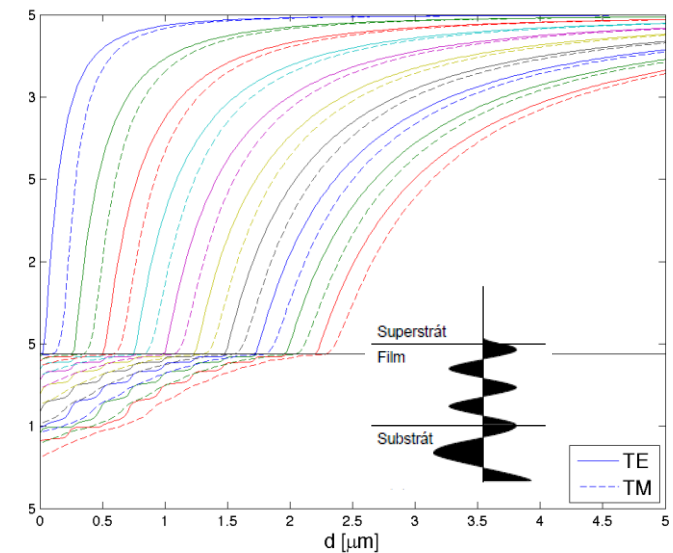
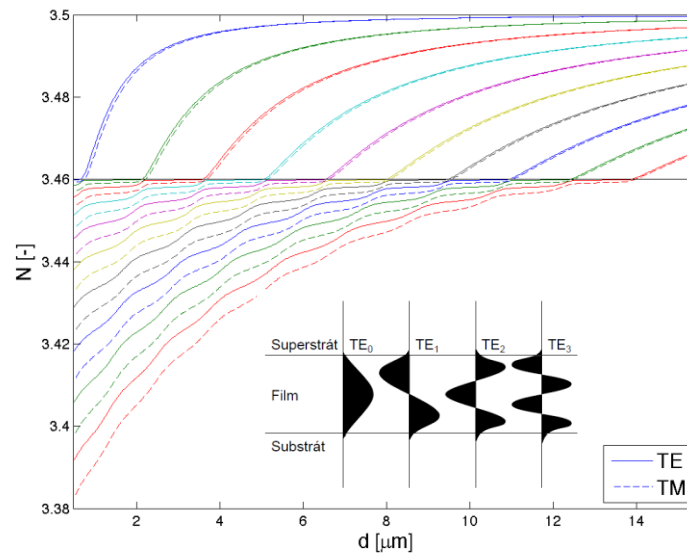
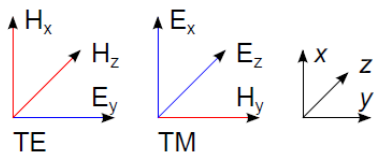
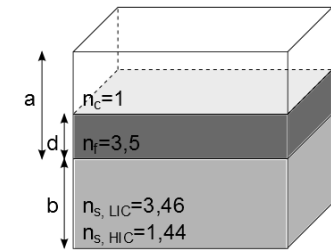
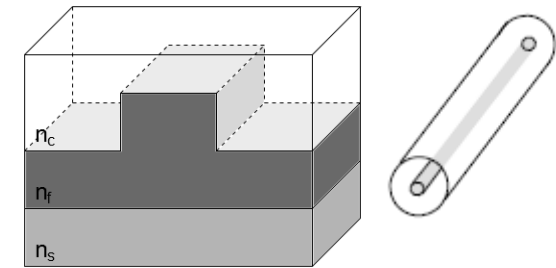
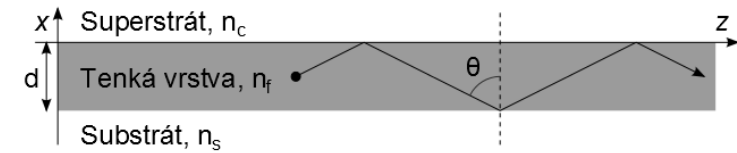
Oliver Heaviside
(1850-1925)

LAW	DIFFERENTIAL FORM	INTEGRAL FORM
GAUSS'S LAW	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$	$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = Q$
FARADAY'S LAW	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s}$
GAUSS'S LAW FOR MAGNETISM	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$
AMPERE'S LAW	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	$\oint_c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s (\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}) \cdot d\mathbf{s}$

- + Materiálové vztahy – modely prostředí
- + Okrajové podmínky
- + Modely disperze
- + ...

Optické vlnovody - základy

- Dielektrické vlnovody
- „indexové vedení“ EM pole
 - Geometrické přiblížení – úplný odraz
 - Vlnové přiblížení – rigorózní řešení vlnových rovnic
- Planární (1D), resp. kanálkové (2D)
- TE × TM polarizace / módy, resp. kvazi-TE × kvazi-TM módy
- Efektivní index lomu
- Jednomódové × vícemódové vlnovody
- Skoková × gradientní změna indexu lomu
- Malý × velký kontrast indexu lomu (lokalizace pole, hustota integrace, výrobní tolerance)



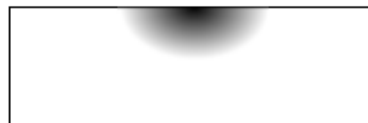
Optické vlnovody – příklady struktur



(a) Pruhový kanálkový vlnovod.



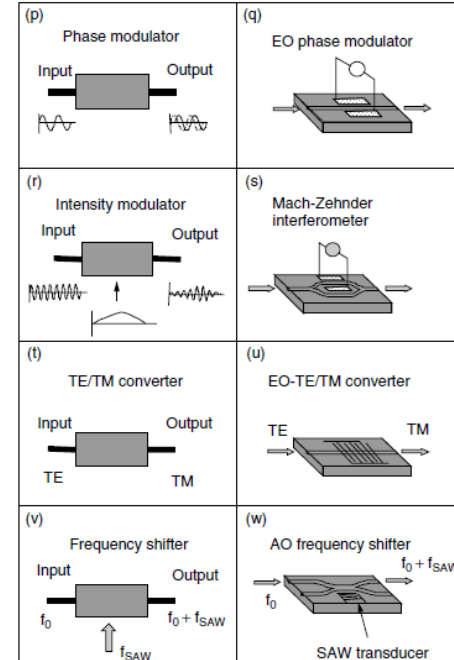
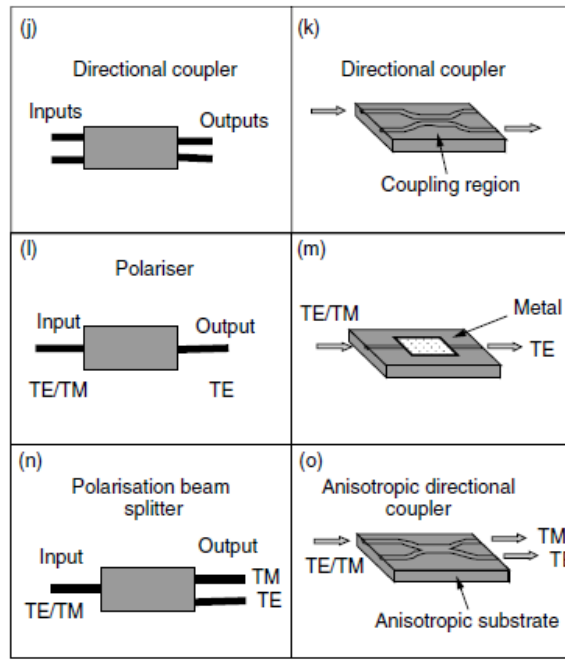
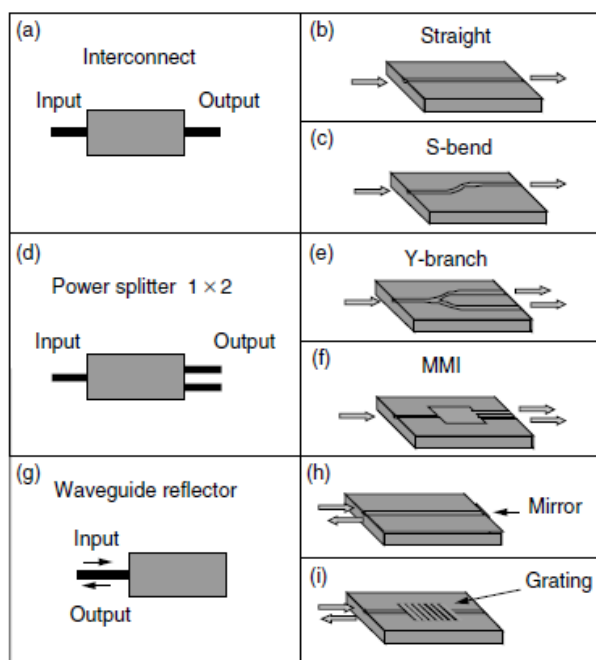
(b) Vnořený kanálkový vlnovod.



(c) Vnořený kanálkový vlnovod s gradientní změnou indexu lomu.

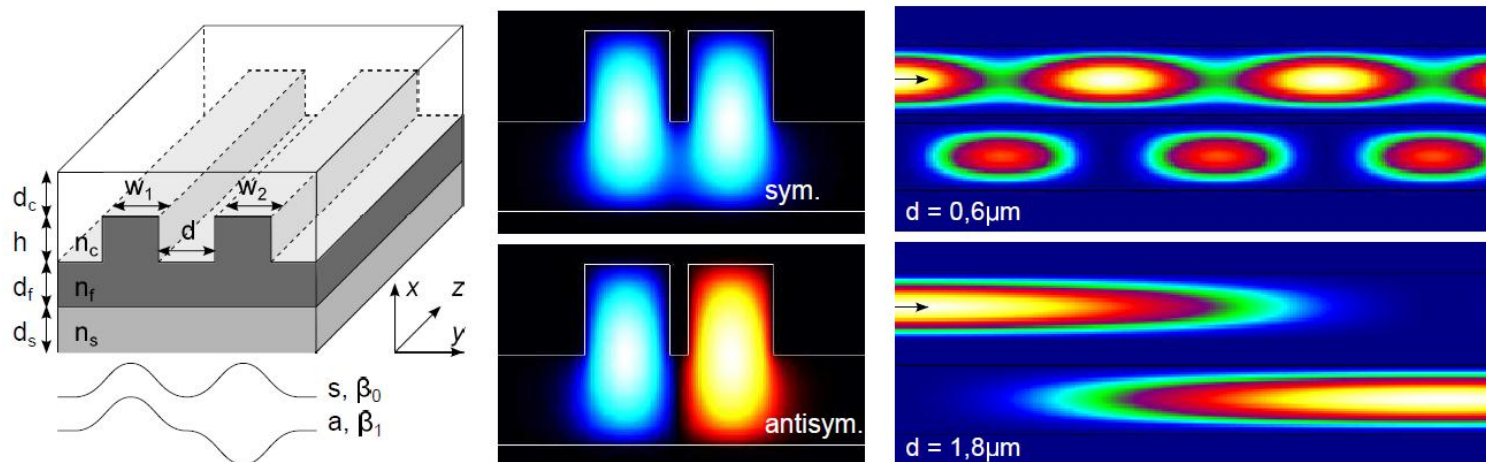


(d) Hřebenový vlnovod.

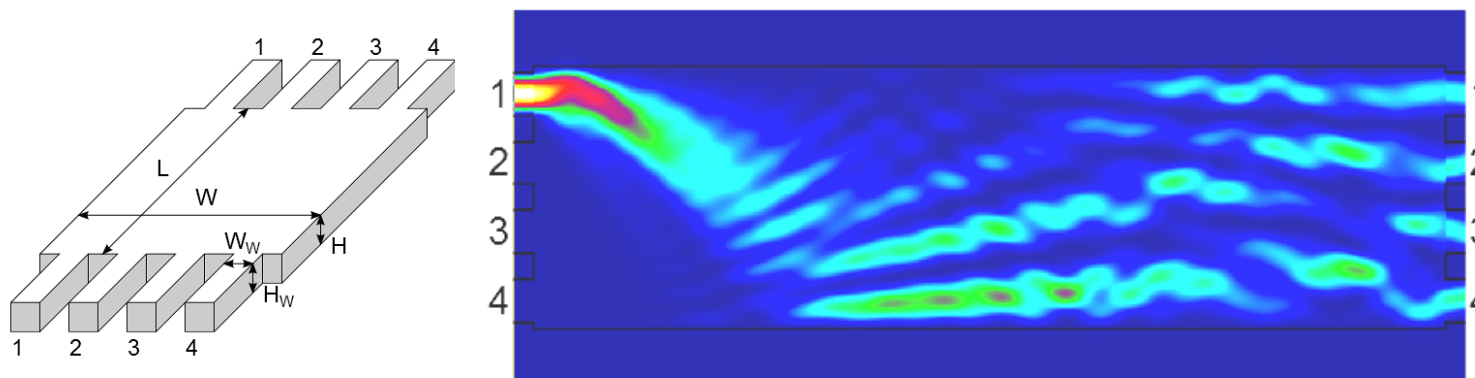


Optické vlnovody – složitější struktury

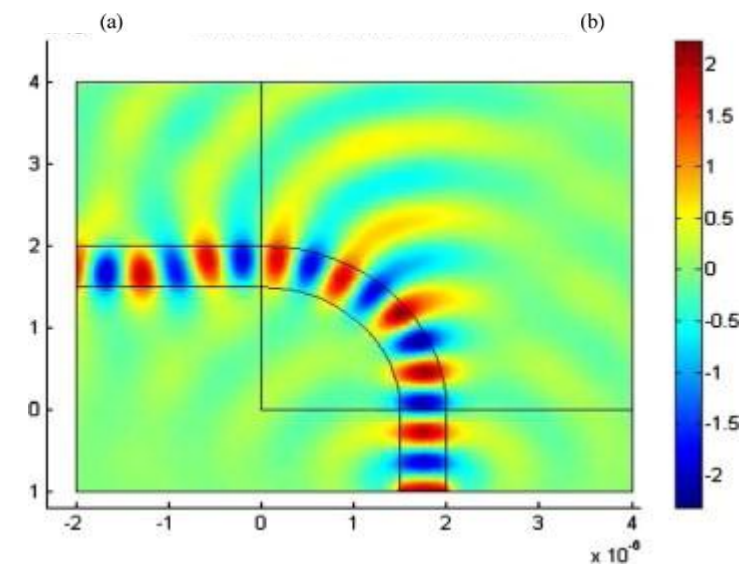
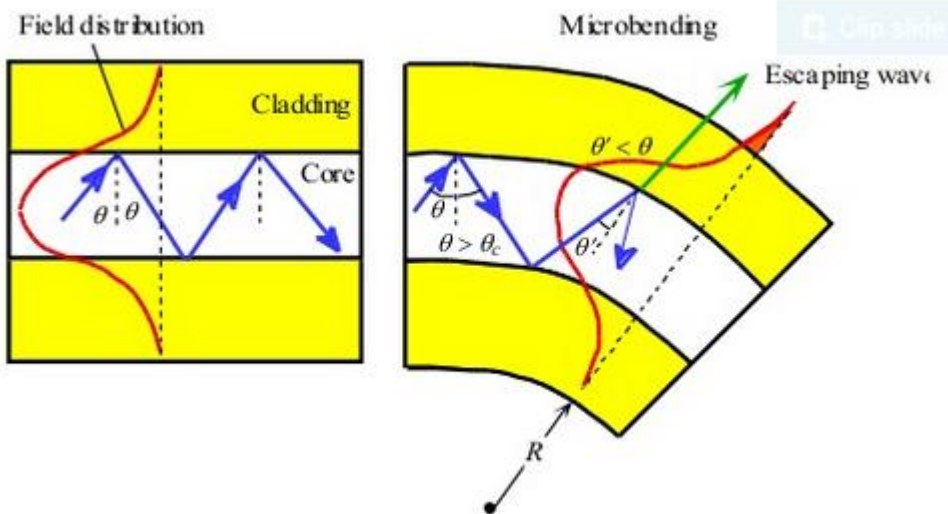
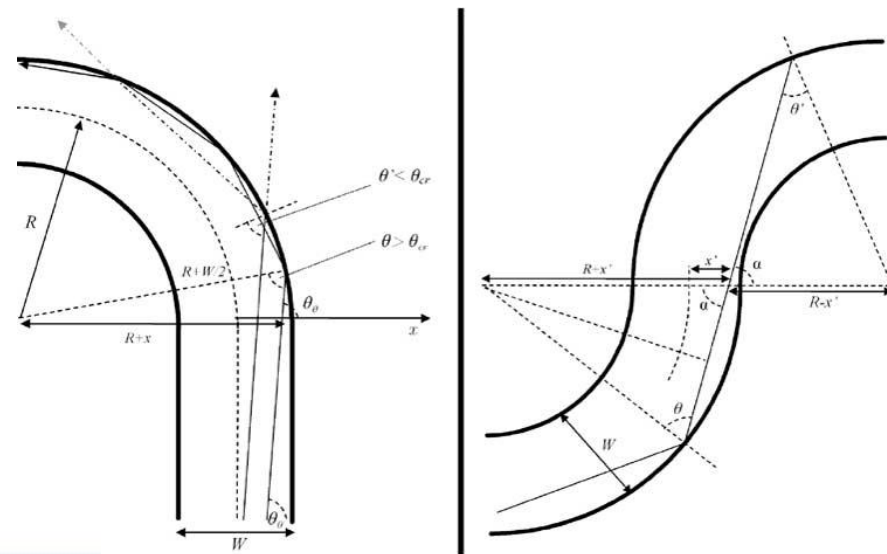
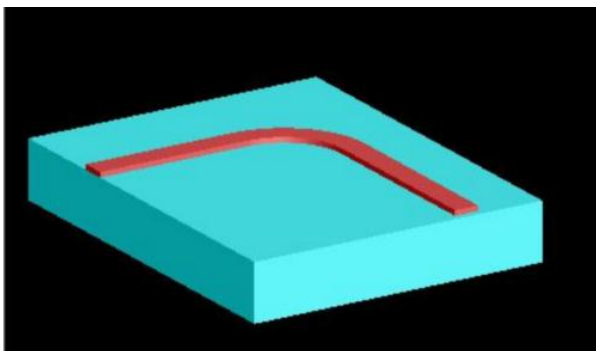
→ Směrový vazební člen (directional coupler)



→ Multimódový interferenční prvek (MMI)



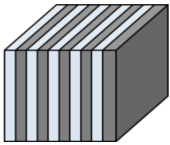
Zakřivené vlnovody - ztráty



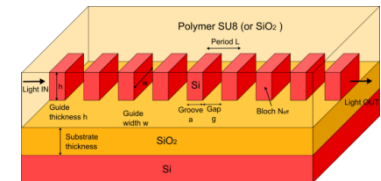
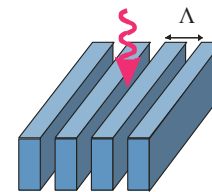
Fotonické mikro a nanostruktury

- **Charakt. rozměr** (perioda) – srovnatelný s vlnovou délkou: $\Lambda \approx \lambda$, menší než vlnová délka: $\Lambda \ll \lambda$
- **Periodické / kvaziperiodické systémy** (1D, 2D, 3D)
- **Modulace parametru optického prostředí** (fáze, amplituda, oboje) – elektrické / magnetické vlastnosti
- **Formování (transformace) optické vlny**

- Systémy **optických tenkých vrstev**: dielektrická zrcadla, antireflexní / vysoce reflexní povrchy, ...

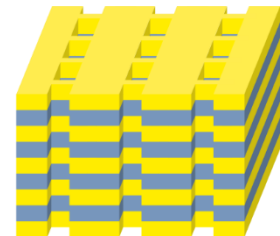
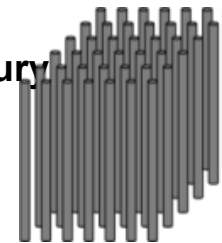
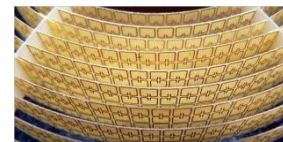
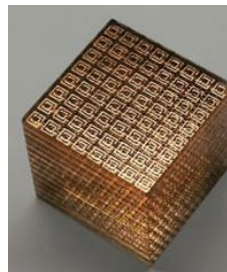


- Periodické struktury – **difrakční mřížky**, obecné difraktivní struktury



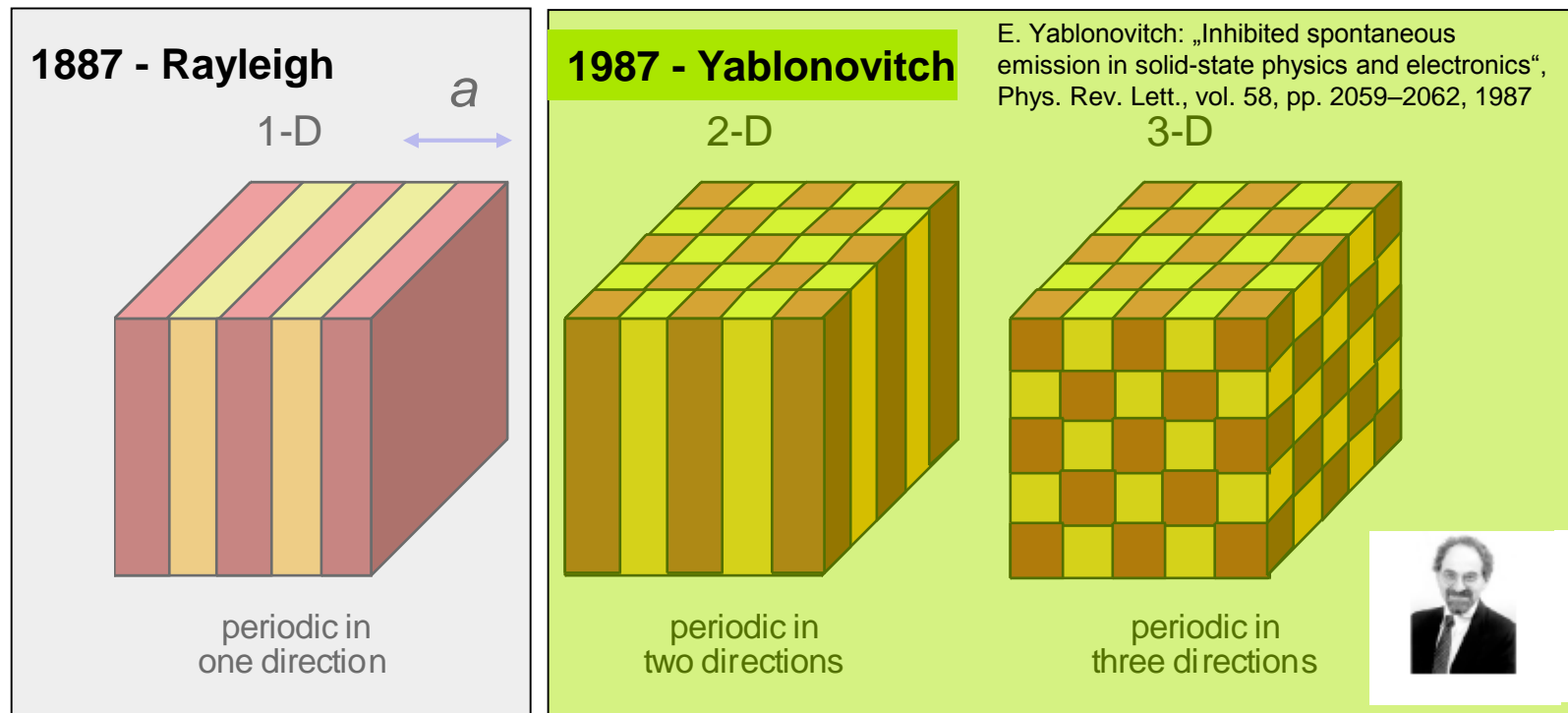
- Obecnější periodické struktury – **fotonické krystaly, plazmonické struktury**

- Nové typy materiálů - **metamateriály**



Fotonické krystaly – Photonic crystals (PhC)

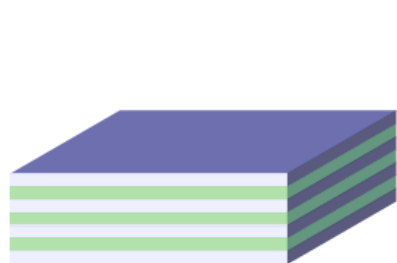
- Umělá periodická prostředí - uspořádání oblastí – odlišné indexy lomu
- Perioda (charakt. rozměr) – srovnatelný s vlnovou délkou: $\Lambda \approx \lambda$
- Další režimy: $\Lambda \gg \lambda$, $\Lambda \ll \lambda$



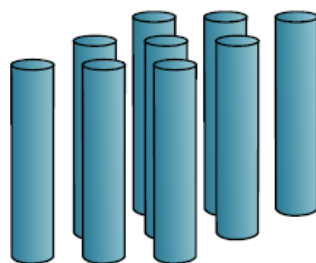
- Problém přesné definice – Yablonovitch (UCLA), S. John (Toronto), optika, pevné látky, ...
- Rozmanitost terminologie – (1D) – optické tenké vrstvy, reflexní objemová mřížka, ...

Fotonické krystaly - základy

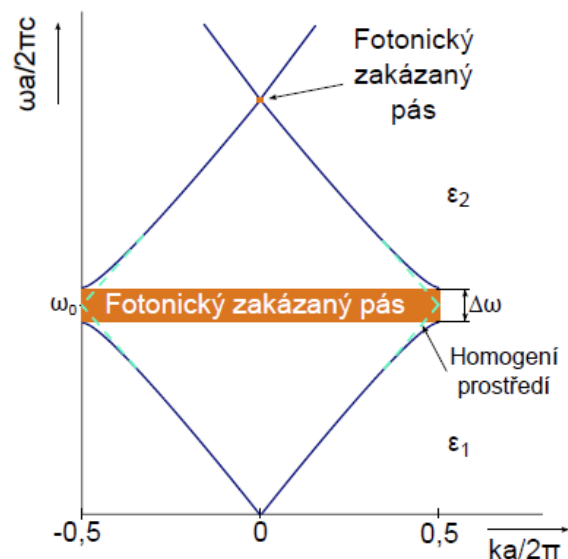
- ▶ Periodická modulace dielektrické konstanty
- ▶ Fotonický zakázaný pás (Nemožnost šíření záření o daných frekvencích v prostorových směrech)
- ▶ 1D, 2D, 3D struktury (kubická plošně centrovaná (FCC) mřížka)
- ▶ Modelování → Metoda rovinných vln (MPB), FDTD (Meep)



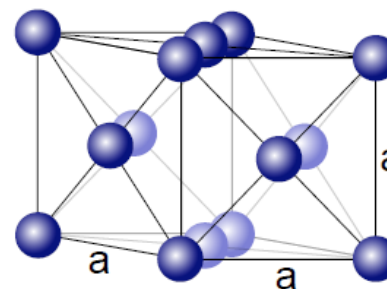
1D



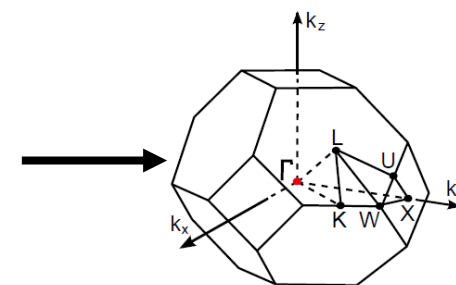
2D



Pásová struktura



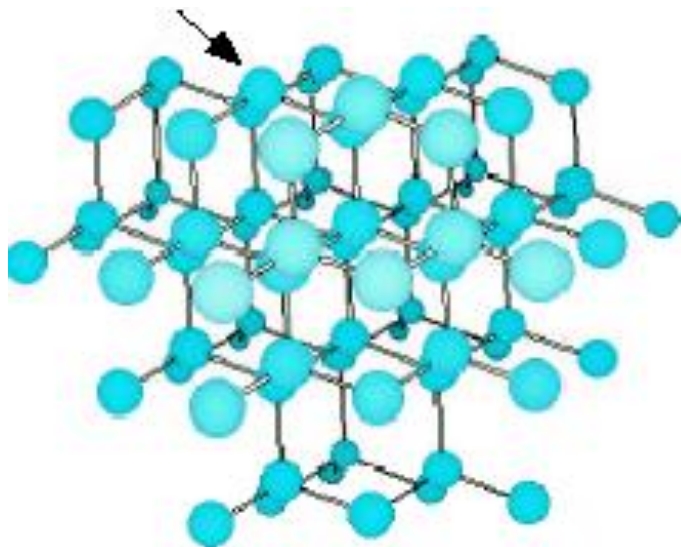
3D, FCC



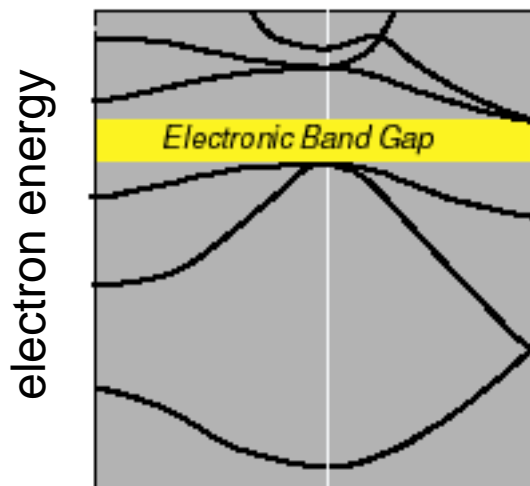
Klasický (elektronický) × fotonický krystal

Periodic
Medium

atoms in diamond structure



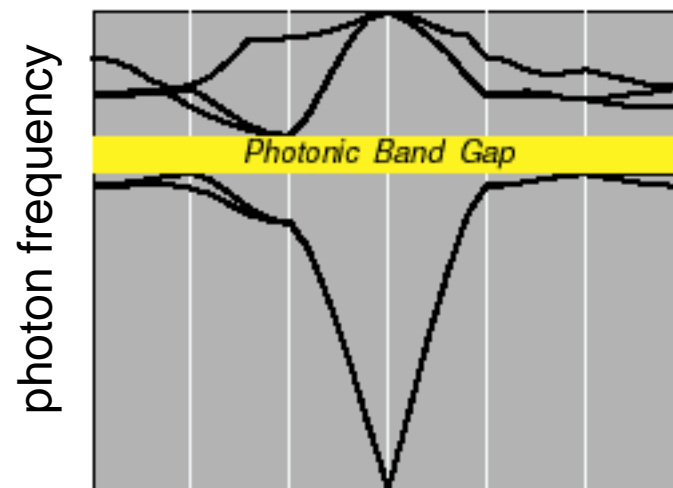
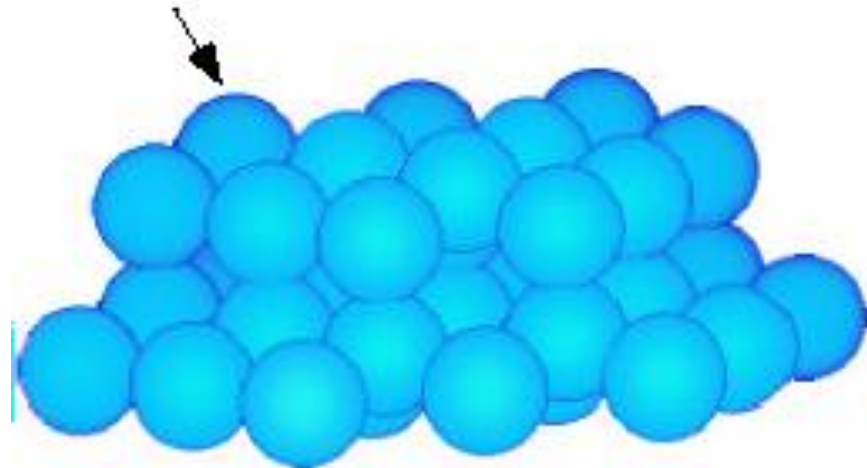
Bloch waves:
Band Diagram



wavevector

interacting: hard problem

dielectric spheres, diamond lattice



wavevector

non-interacting: "easy" problem

Fotonický krystal - vlastnosti

Historie PhC - 2 základní cíle:

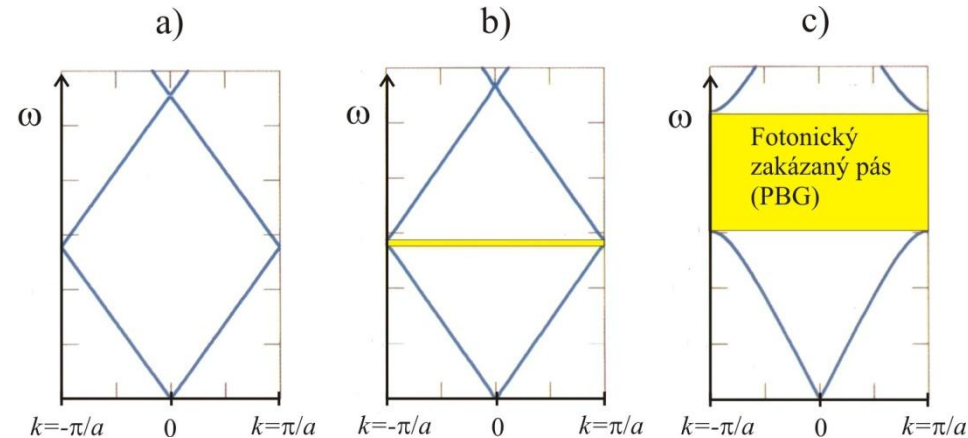
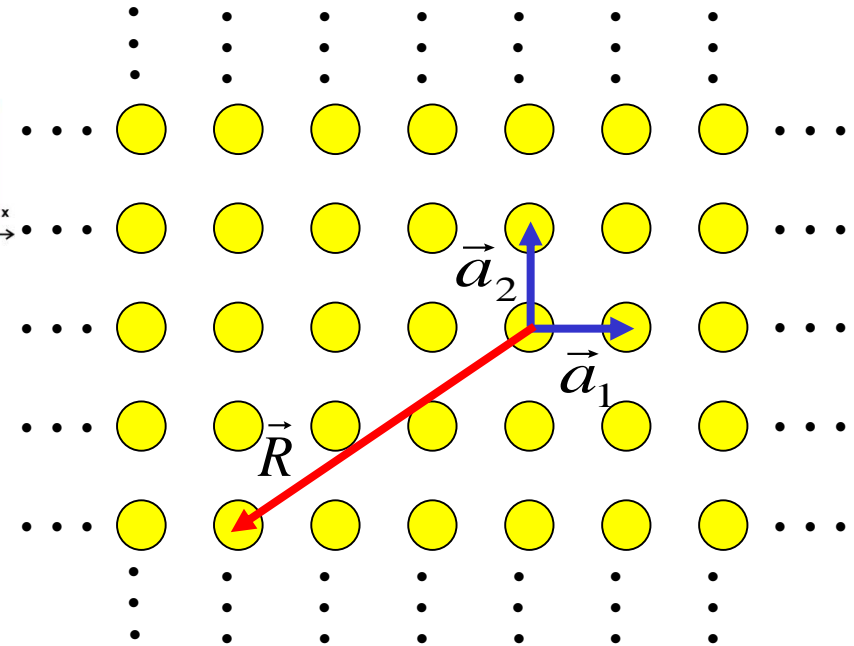
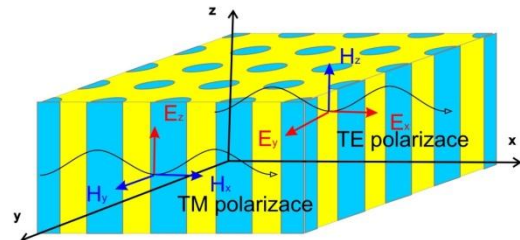
- 1) Lokalizace světla
- 2) Zákaz spontánní emis

Vlastnosti PhC

- Fotonický zakázaný pás
- Vysoký indexový kontrast
- Modifikace hustoty stavů a grupové rychlosti – *slow light*
- Anomální refrakční vlastnosti
- Vedení + lokalizace světla – beze ztrát
- Nové disperzní prostředí pro: (QM) interakci

světla s látkou – Purcellův efekt

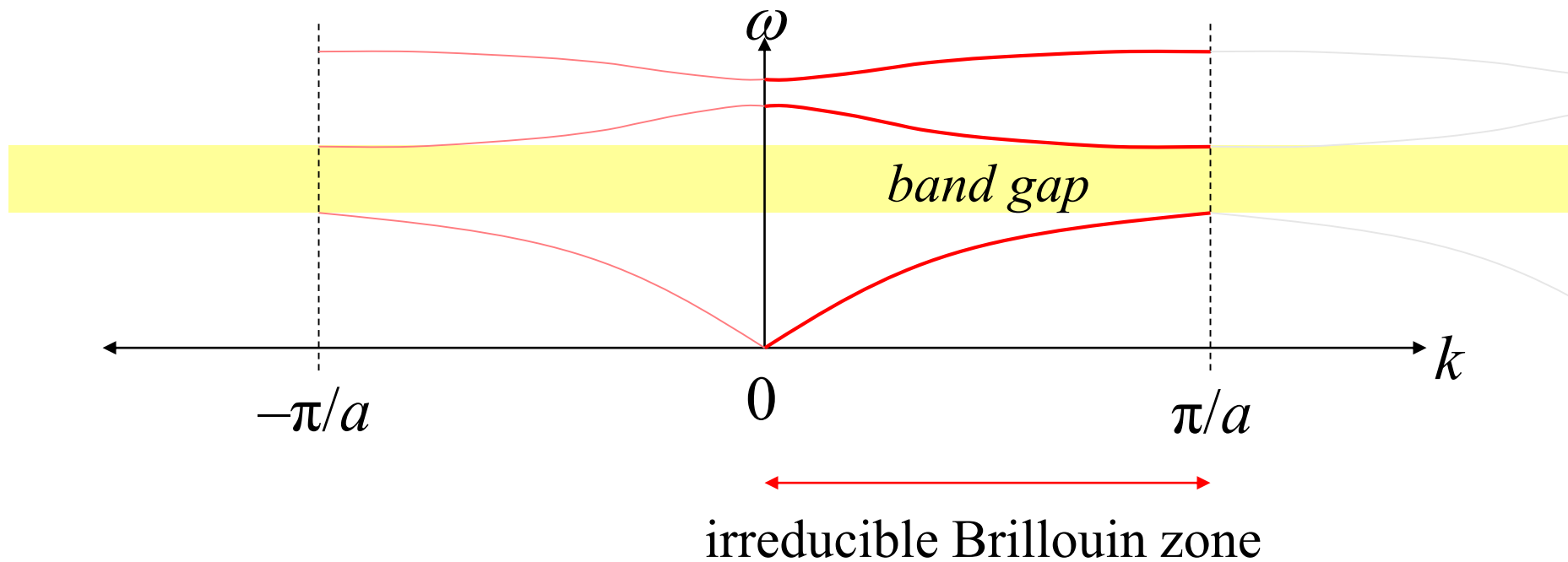
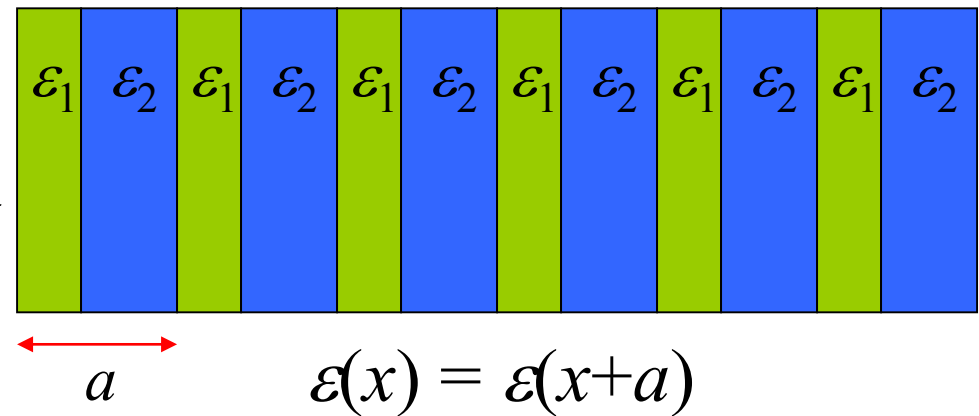
- Ovlivnění spontánní emis v PhC
- Defekty (+ zesílení) – flexibilita – fotonické struktury
- Nelinearity, infiltrace, ...



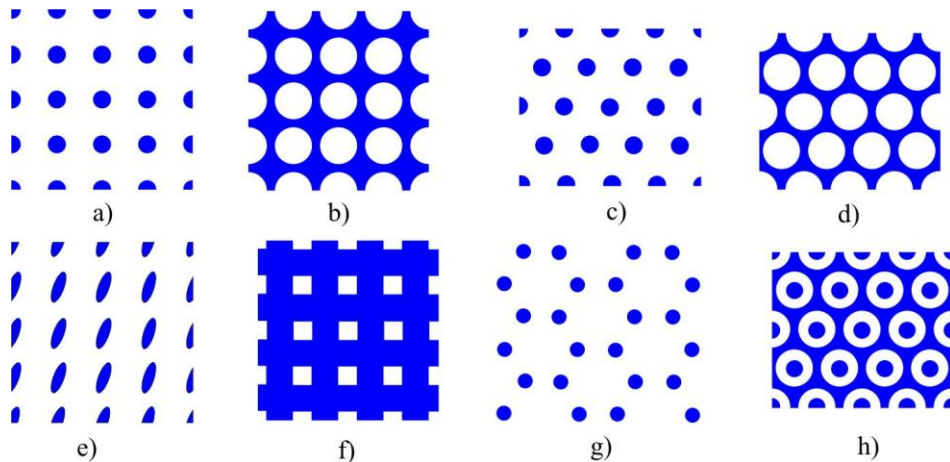
1D - PhC

k is periodic:

$k + 2\pi/a$ equivalent to k
 “quasi-phase-matching”

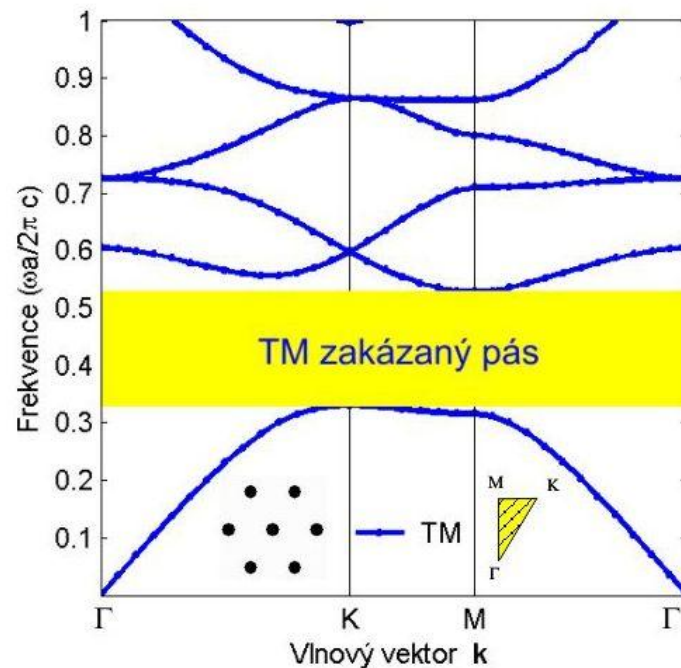
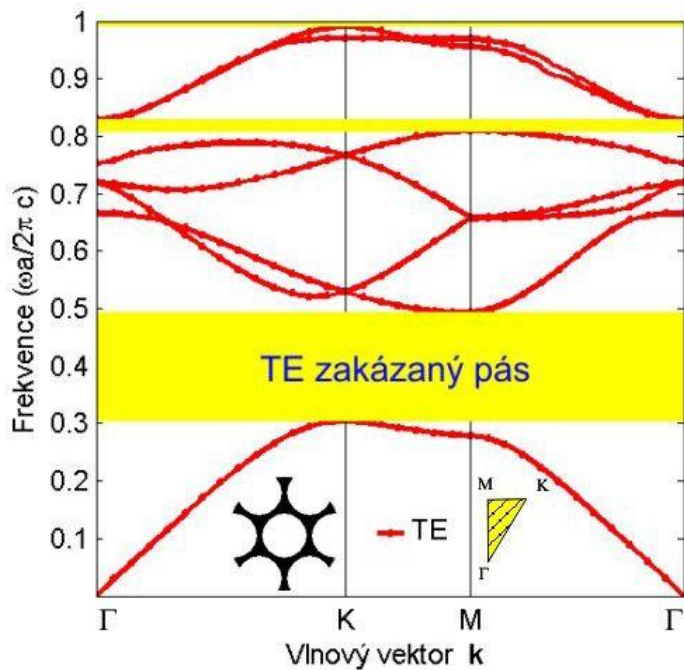


2D - PhC

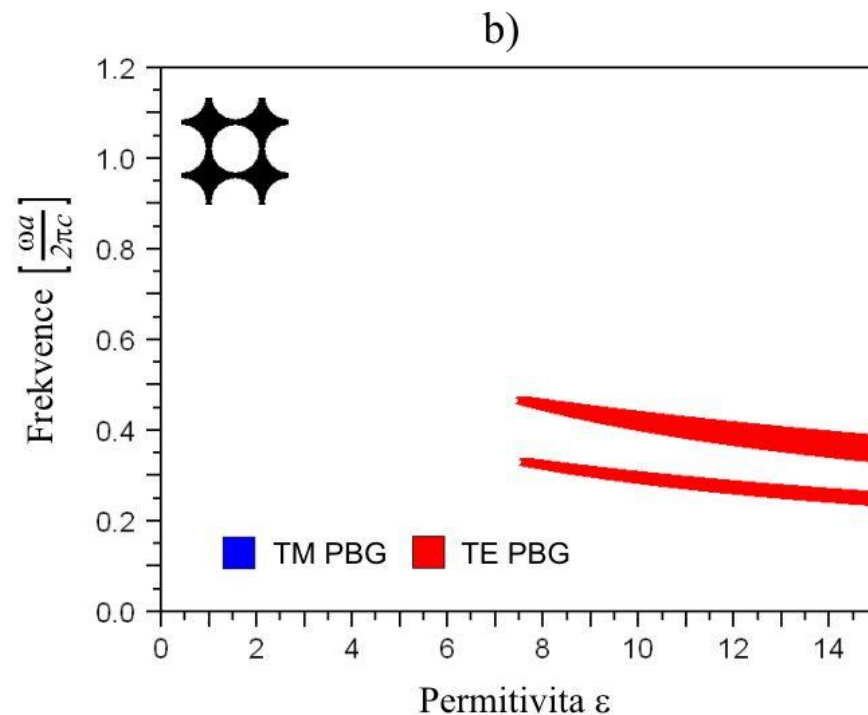
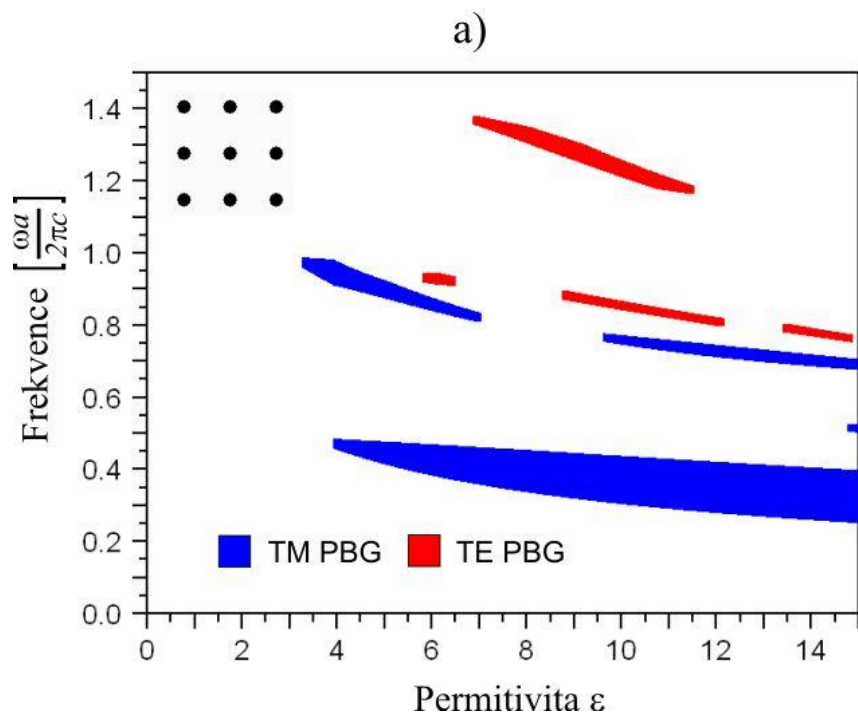


Ukázka možných realizací ideálního 2D PhC

- a) Struktura **dielektrických sloupců** ve čtvercovém uspořádání.
- b) Struktura **vzduchových děr** v dielektriku ve čtvercovém uspořádání.
- c) Struktura dielektrických sloupců v trojúhelníkovém uspořádání.
- d) Struktura vzduchových děr v dielektriku v trojúhelníkovém uspořádání.
- e) Struktura dielektrických sloupců eliptického průřezu obecného sklonu ve čtvercovém uspořádání.
- f) Struktura dielektrických žil obklopující vzduchové díry čtvercového průřezu.
- g) Grafitová struktura.
- h) Další z možných realizací 2D PhC.



2D – PhC – „gap“ mapy – závislost na materiálu

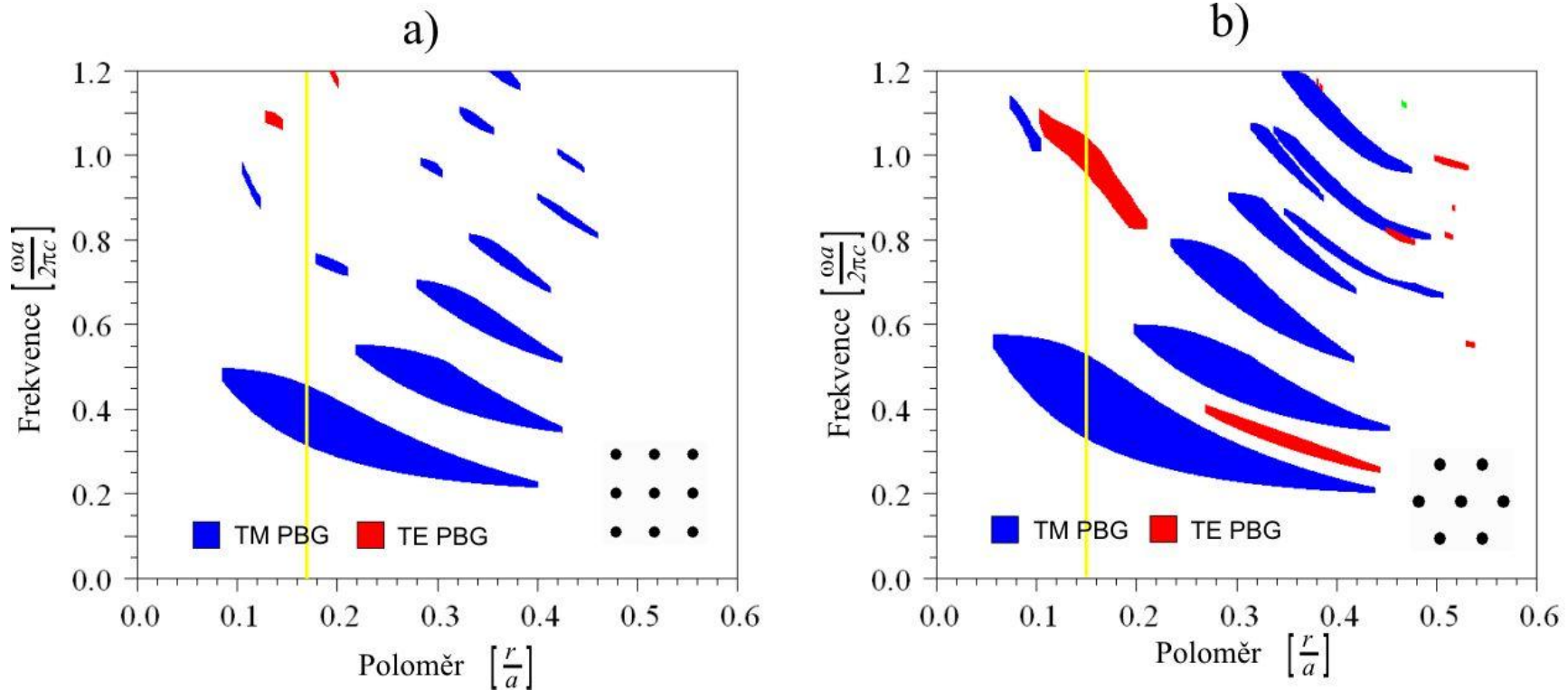


Závislost existence a polohy PBG na permitivitě.

a) PhC tvořený dielektrickými sloupci s poloměrem $r = 0,2a$ ve čtvercovém uspořádání.

b) PhC tvořený vzduchovými dírami s poloměrem $r = 0,4a$ v dielektriku ve čtvercovém uspořádání.

2D – PhC – „gap“ mapy – geometrie



Závislost existence a polohy PBG na poloměru sloupců.

- a) PhC tvořený dielektrickými sloupci s permitivitou $\epsilon = 11.4$ ve čtvercovém uspořádání.
 b) PhC tvořený dielektrickými sloupci s permitivitou $\epsilon = 11.4$ v trojúhelníkovém uspořádání.

Žlutě je vyznačen poloměr kterému odpovídá maximální TE PBG.

2D – PhC + defekty – 2.5 D

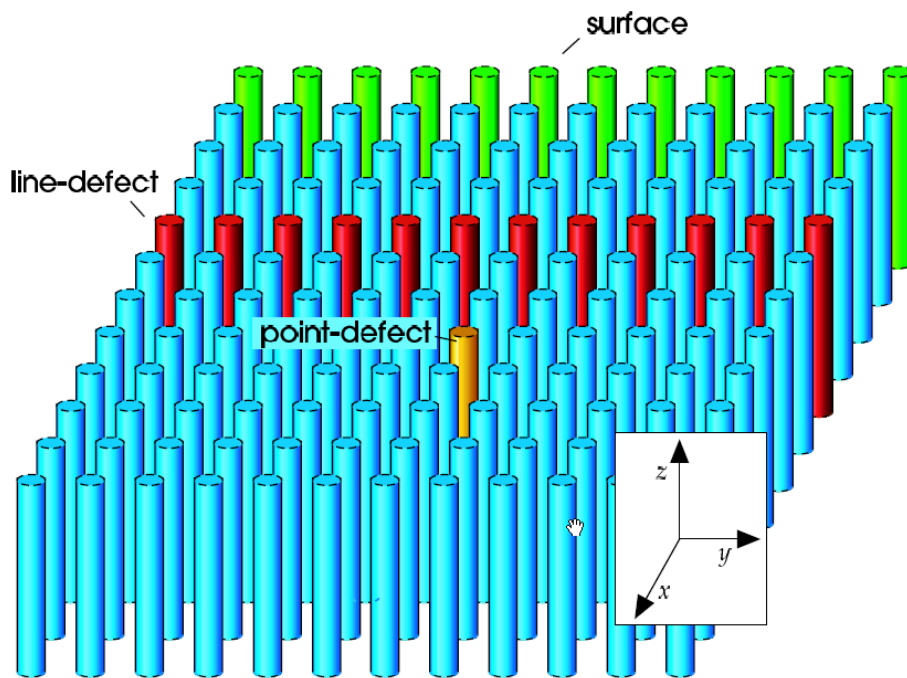
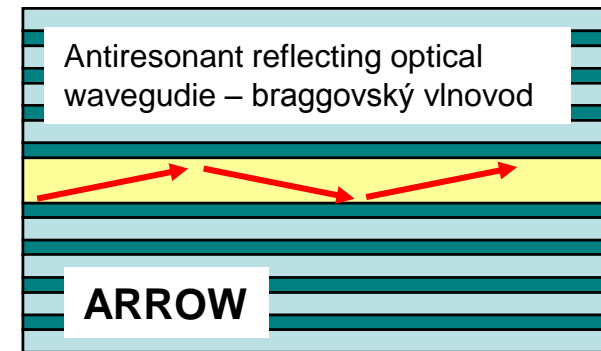
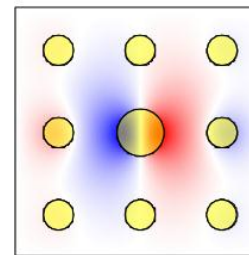


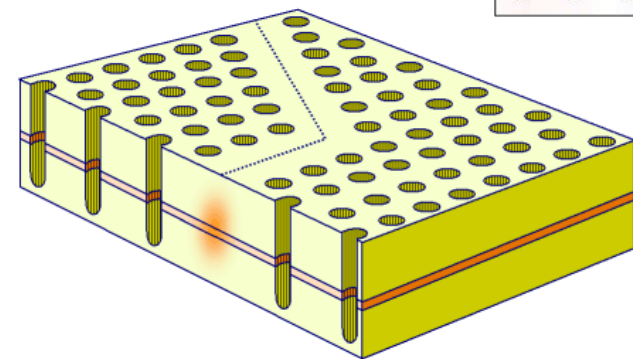
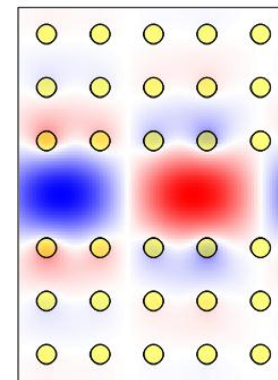
Figure 12: Schematic illustration of possible sites of point, line, and surface defects. Perturbing one column in the bulk of the crystal (yellow) might allow a defect state to be localized in both x and y . Perturbing one row in the bulk of the crystal (red) or truncating the crystal at a surface (green) might allow a state to be localized in one direction (x). The rods are assumed to extend indefinitely in the z direction.



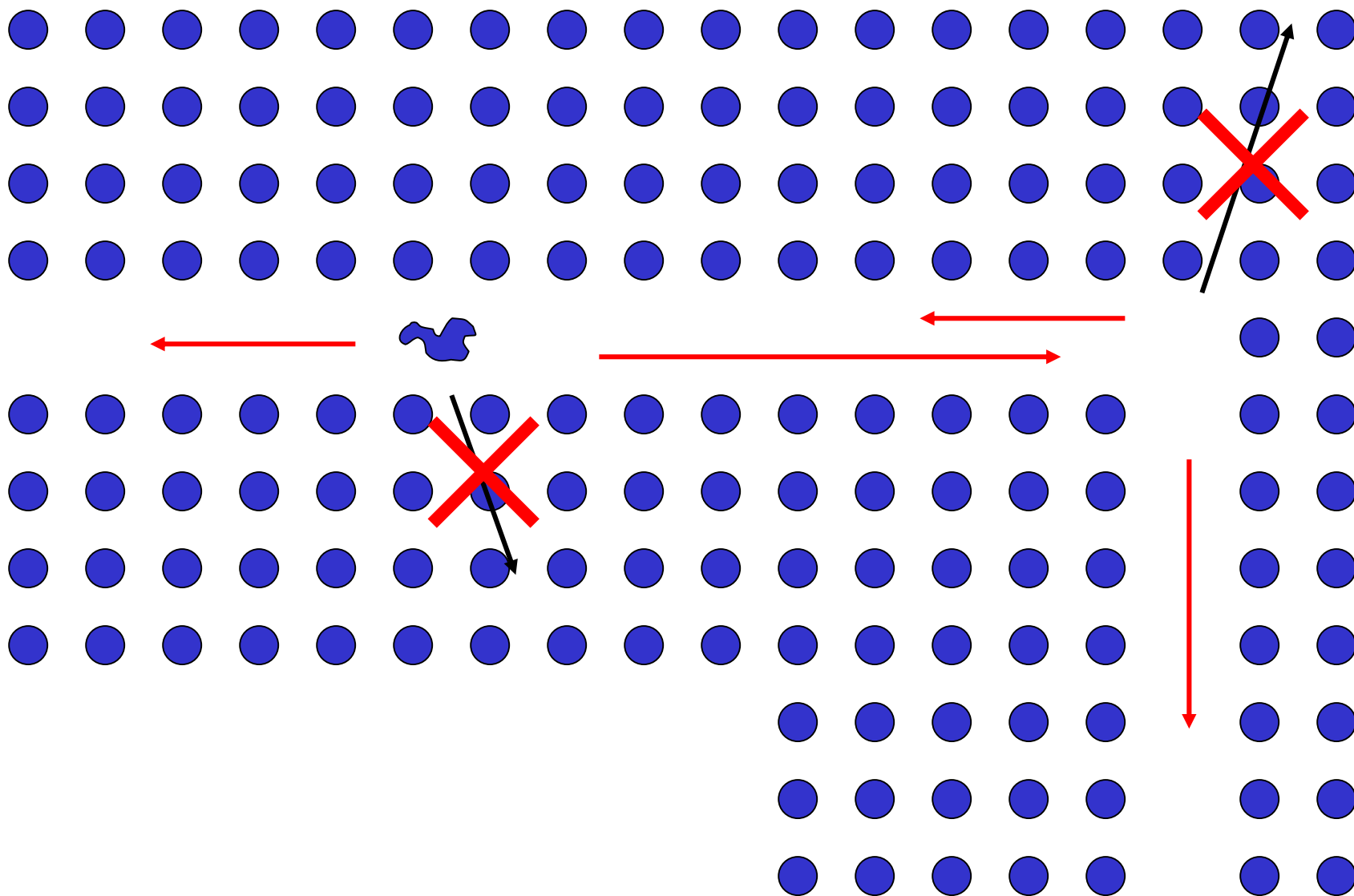
microcavities



waveguides



2D – PhC + defekty – 2.5 D – ukázka šíření



3D - PhC

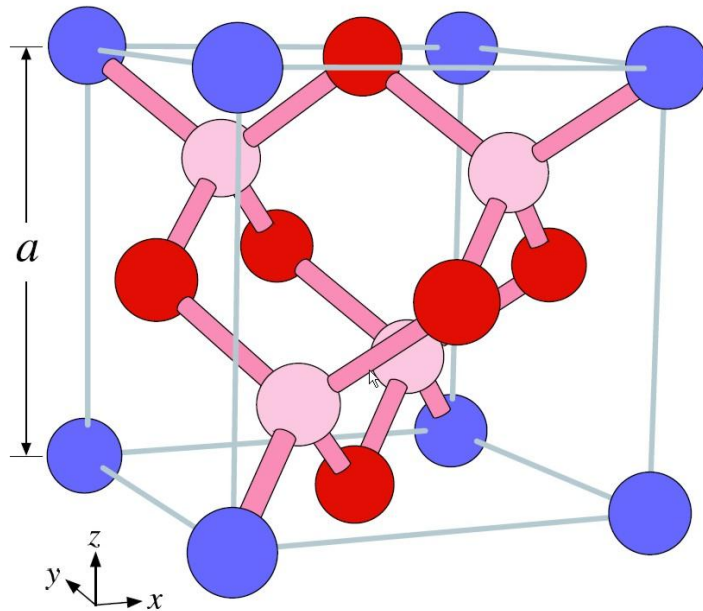
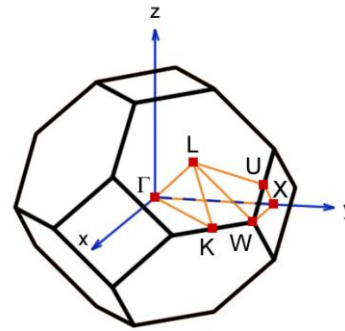


Figure 1: Ball-and-stick ("atomic") representation of several three-dimensional lattices in a cubic supercell, with a lattice constant a . The blue balls alone form a simple cubic lattice. Adding the dark red balls produces a face-centered cubic (fcc) lattice. Adding the pink balls as well produces a diamond lattice, with stick "bonds" (four bonds per ball).



FCC struktura

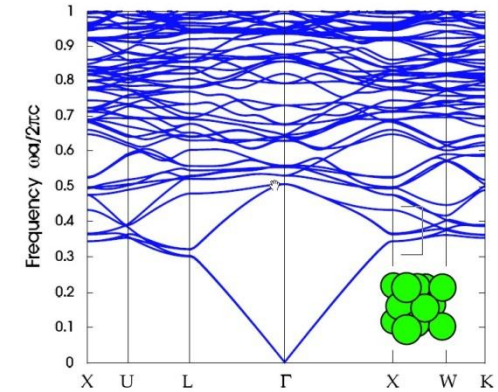


Figure 2: The photonic band structure for the lowest-frequency electromagnetic modes of a face-centered cubic (fcc) lattice of close-packed dielectric spheres ($\epsilon = 13$) in air (inset). Note the absence of a complete photonic band gap. The wave vector varies across the irreducible Brillouin zone between the labelled high-symmetry points; see appendix B for a discussion of the Brillouin zone of an fcc lattice.

Diamantová struktura

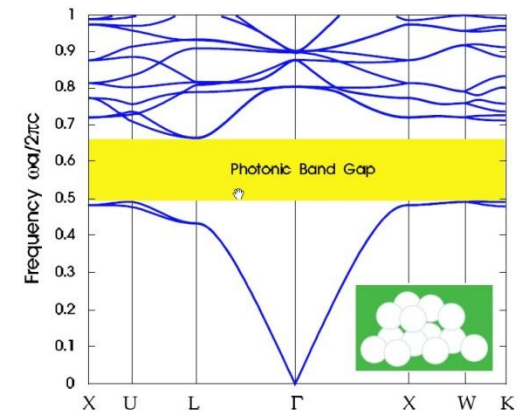
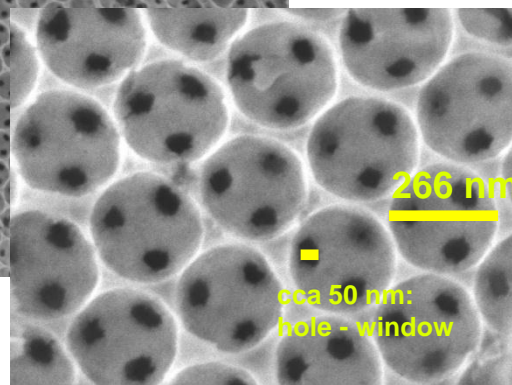
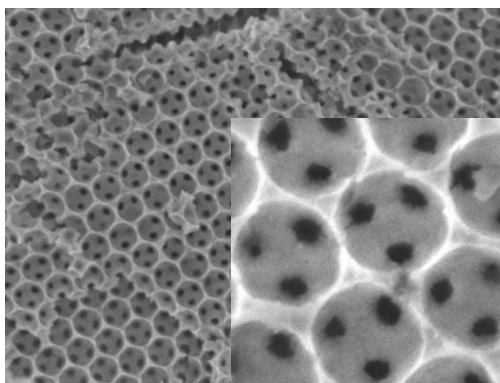
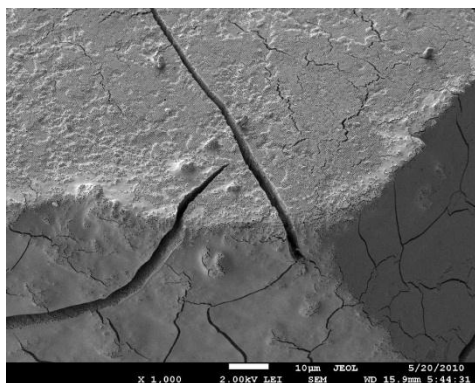
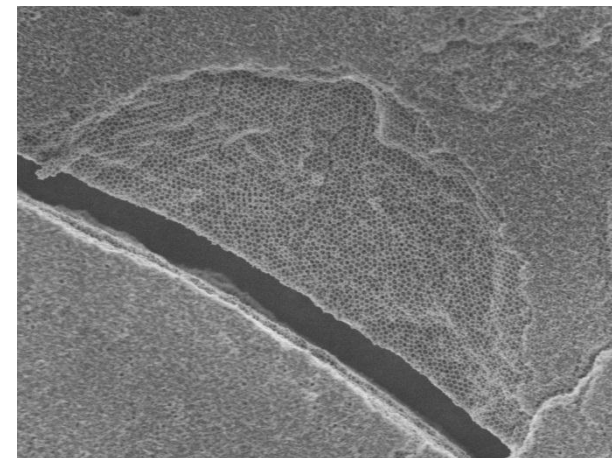
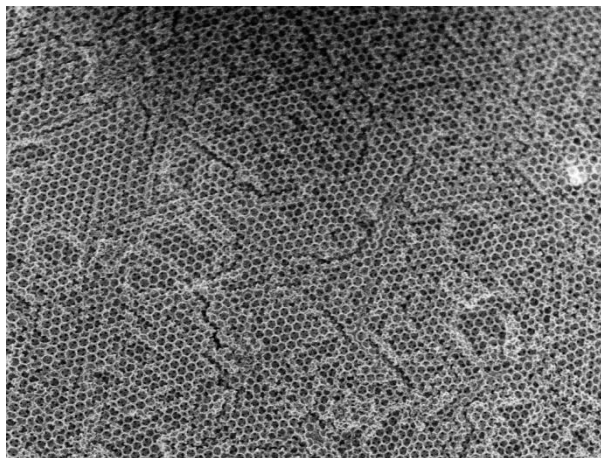
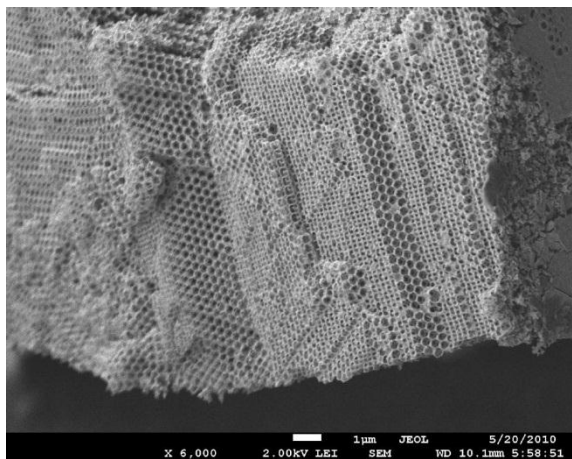


Figure 3: The photonic band structure for the lowest bands of a diamond lattice of air spheres in a high dielectric ($\epsilon = 13$) material (inset). A complete photonic band gap is shown in yellow. The wave vector varies across the irreducible Brillouin zone between the labelled high-symmetry points; see appendix B for a discussion of the Brillouin zone of an fcc lattice.

3D – PhC – syntetické opály – KFE FJFI

- PhC opal / inverse opal structures

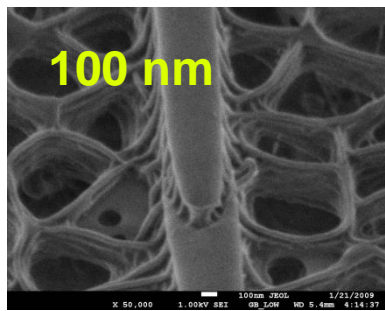
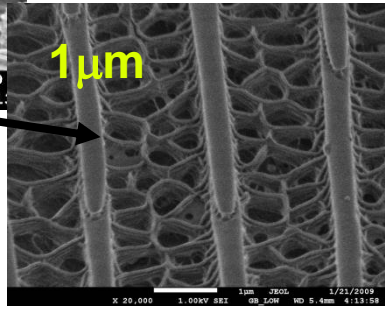
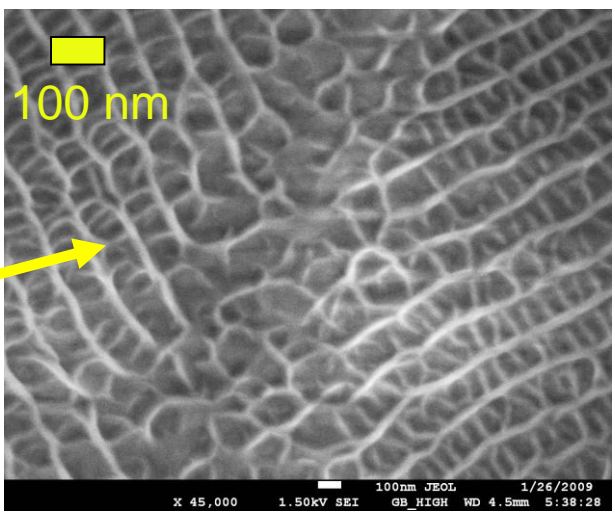
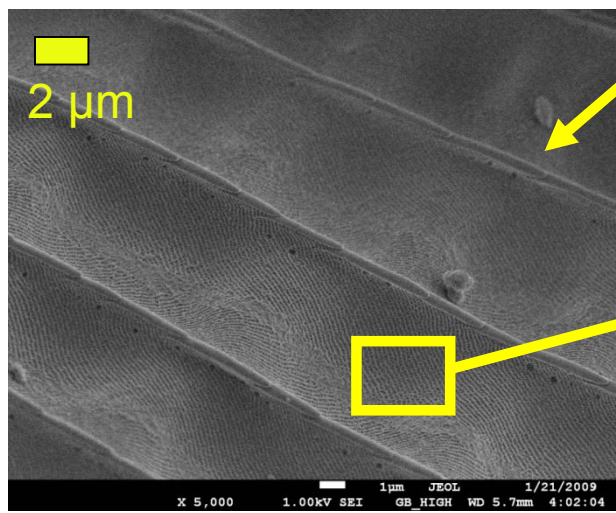
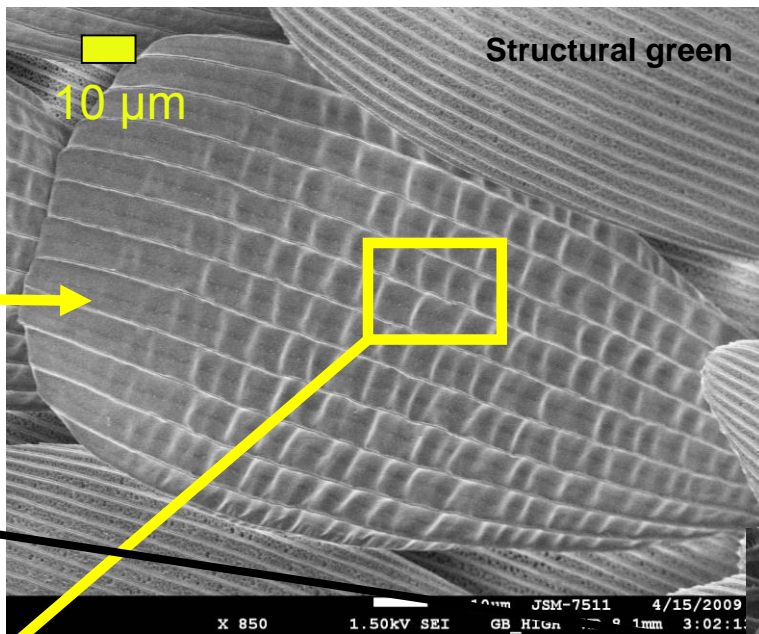
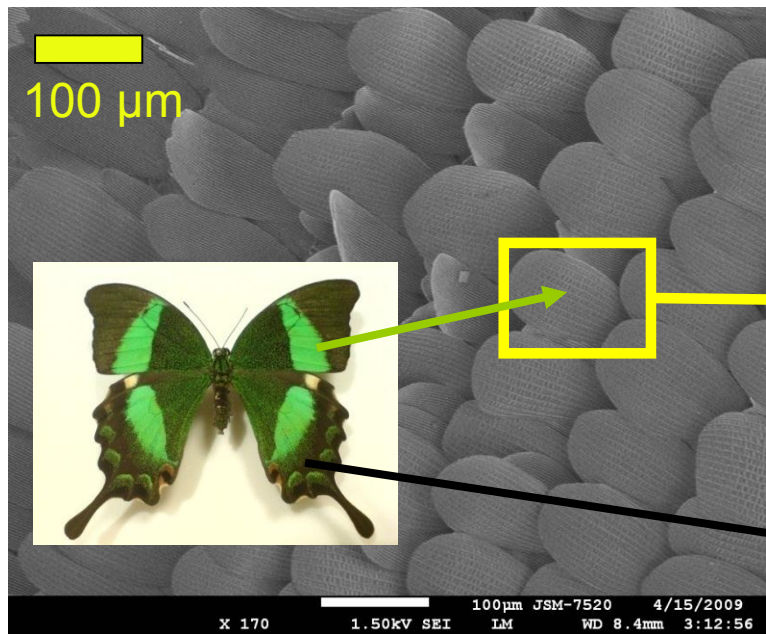
Materials: ZnO, Ni (magnetic properties)



Ni- inverse opal PhC
 - 266 nm – diameter of original polystyrene beads

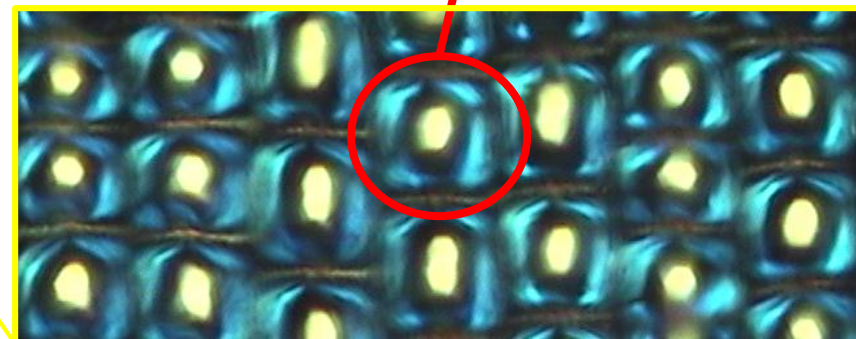
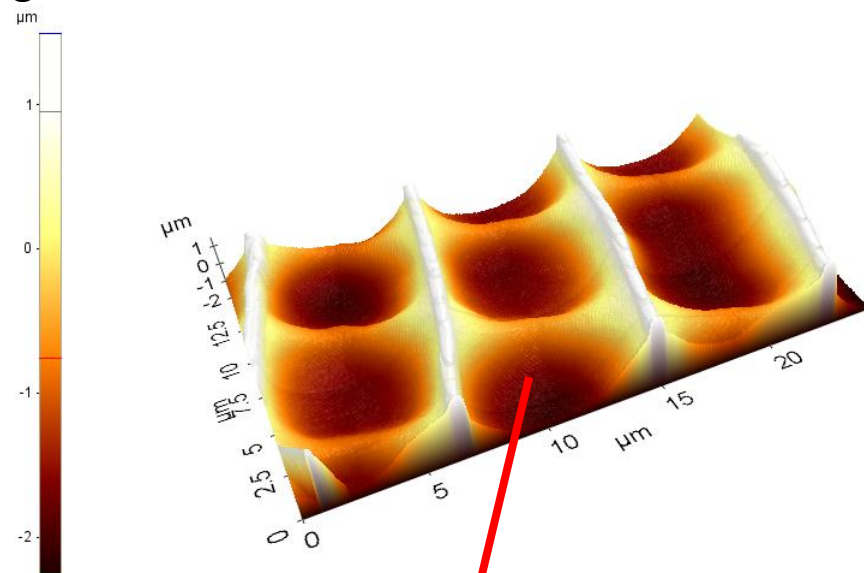
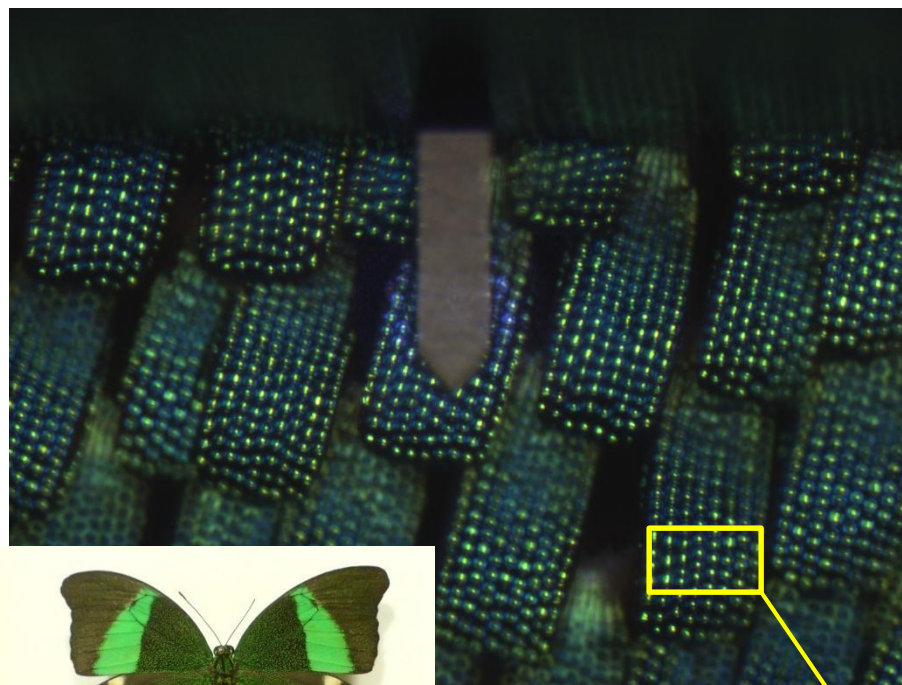
- cca 50 nm – diameter of holes

Inspirace - přírodní iridiscence - *Papilio palinurus*

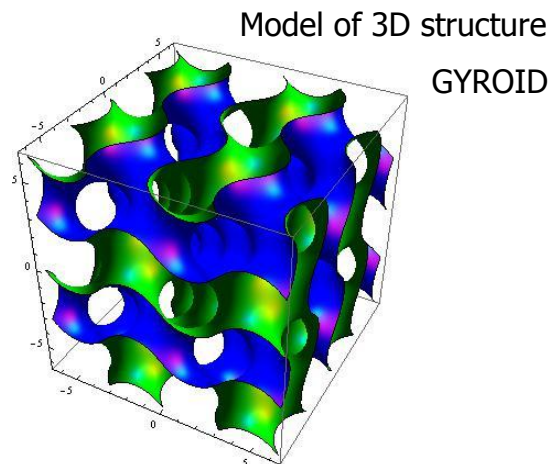


Přírodní iridiscence - *Papilio palinurus*

Papilio palinurus - Butterfly wing scales - **AFM analysis**
AFM topography - concave micro-mirrors on wing scales



3D fotonická PhC struktura v přírodě



Butterflies – Papilionids

→ Parides Sesostris

→ Scales:

- 3D cuticular structure

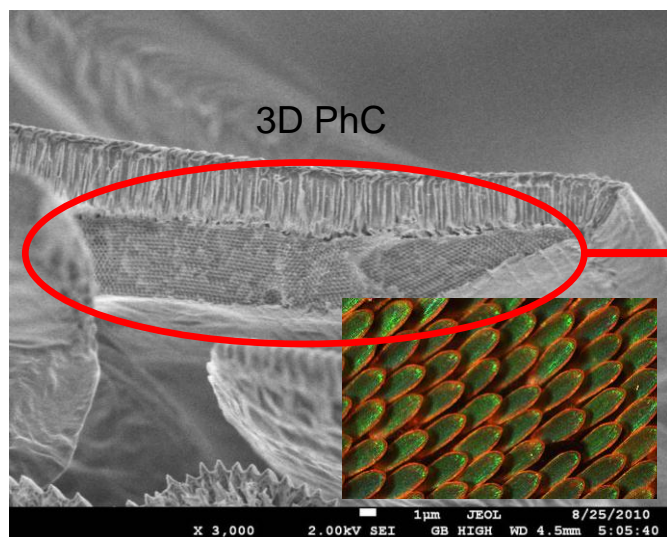
- **3D PhC – gyroidal
type – minimal surface**

(A. Schoen, 1970)

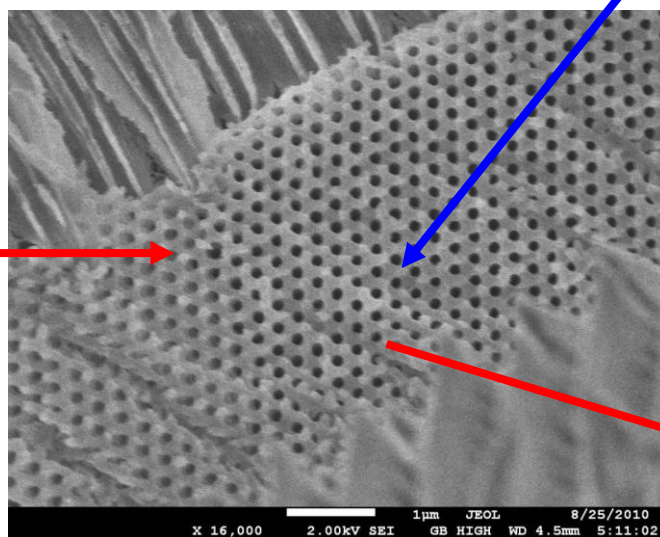
→ “Biological” PhC

→ Parameters: lattice,
filling fractions

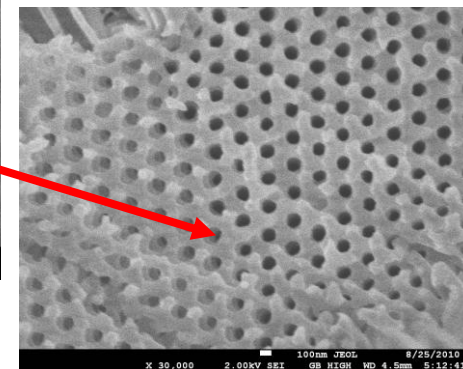
→ COMPLETE PB gap!



SEM picture of fractured
butterfly scale – P. Sesostris



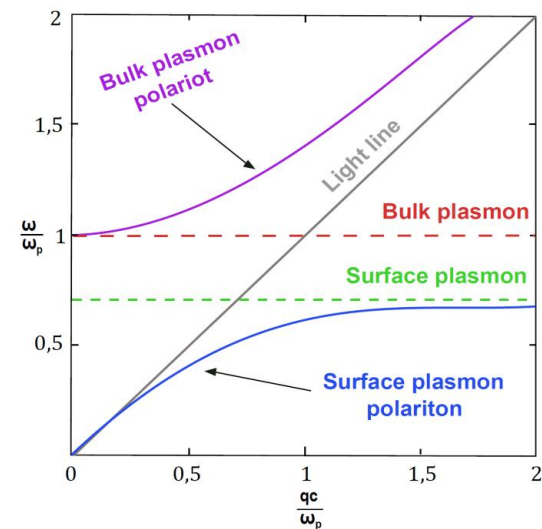
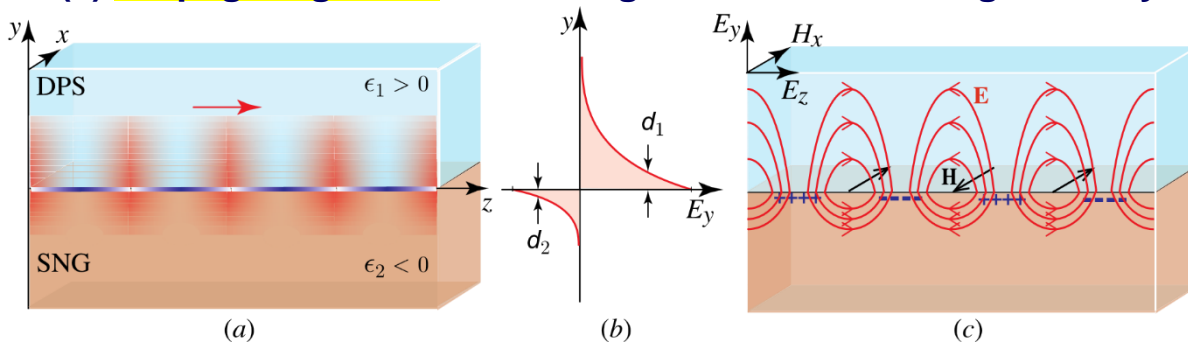
Zoom – 3D gyroidal
structure



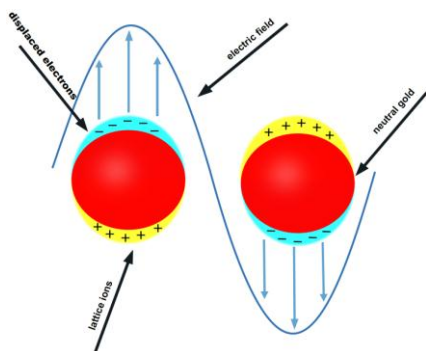
Nanoplasmonics → Propagating / Localized Resonance

→ Bulk × Surface plasmons (polaritons - SPP) → 2 types: propagating × localized → combined, spoof

(1) **Propagating SPP:** electromagnetic modes + charge density oscillations at the interfaces

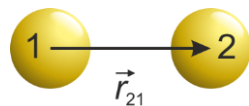


(2) **Localized SP** → localized surface plasmon resonance (SPR)
King Lycurgus Cup.

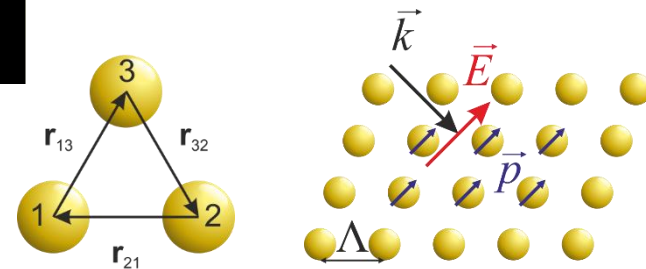


→ Isolated Nanoparticles (NP)

→ Clustered NPs
→ (dimer, trimer, ...)



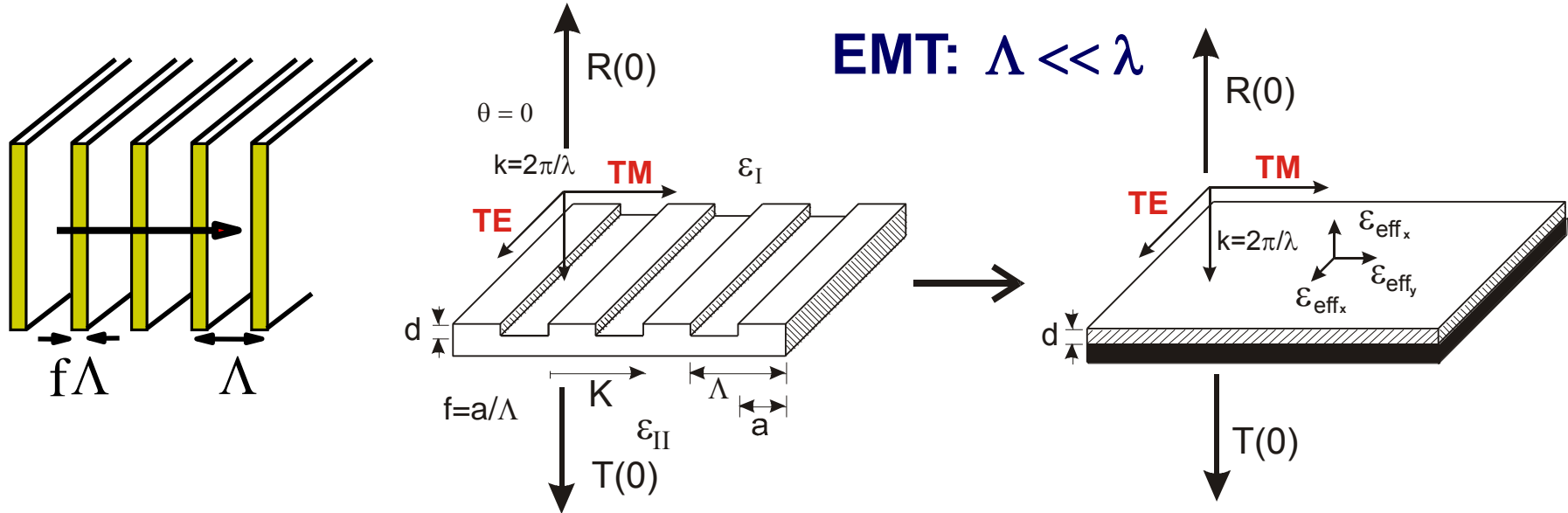
→ Arrayed NPs / clusters



J. Fiala, I. Richter, OQE 41, 409 (2010).

J. Fiala, P. Kwiecien, I. Richter, PIERS 2013, 439 (2013)

3) EMT - Effective Medium Method – Zero-order gratings



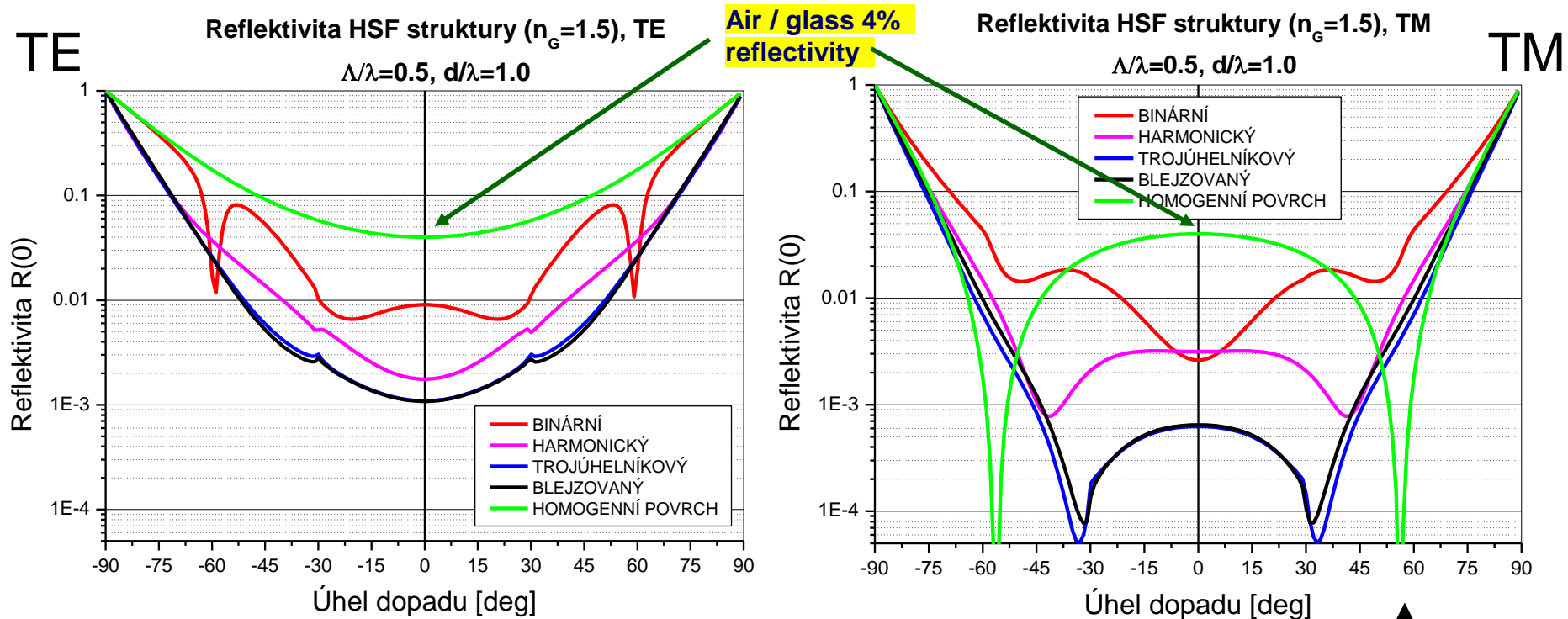
HIGH-SPATIAL FREQUENCY GRATINGS – zero order diffraction orders

- Effective medium theory (EMT) – homogeneous anisotropic layer approximation

→ elmg. wave **does not feel a nanostructure details** – **effective characteristics**

- Optics of thin layers
- Unique properties: **antireflectivity**, phase retardation, polarization / spectral selectivity
- **Artificial anisotropy** → **form birefringence**, artificial materials (PhC), metamaterials, ...
- Natural nanophotonic structures

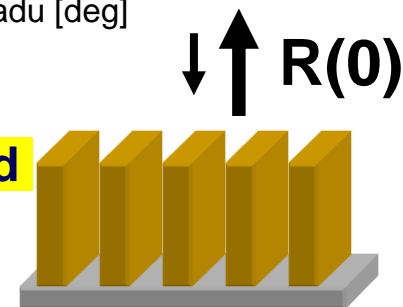
3) Example – Antireflectivity of Zero-order gratings



- **Reflectivity** of high-spatial frequency structures

compared to homogeneous boundary – **strongly reduced**

- Relief profiles of microstructures: binary, harmonic, triangle, blazed



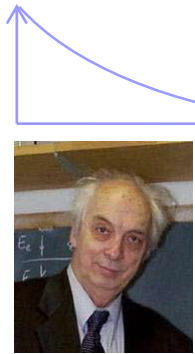
- TE a TM polarization, relative period $\Lambda/\lambda = 0.5$, relative thickness $d/\lambda = 1.0$

Optická neviditelnost → metamateriály

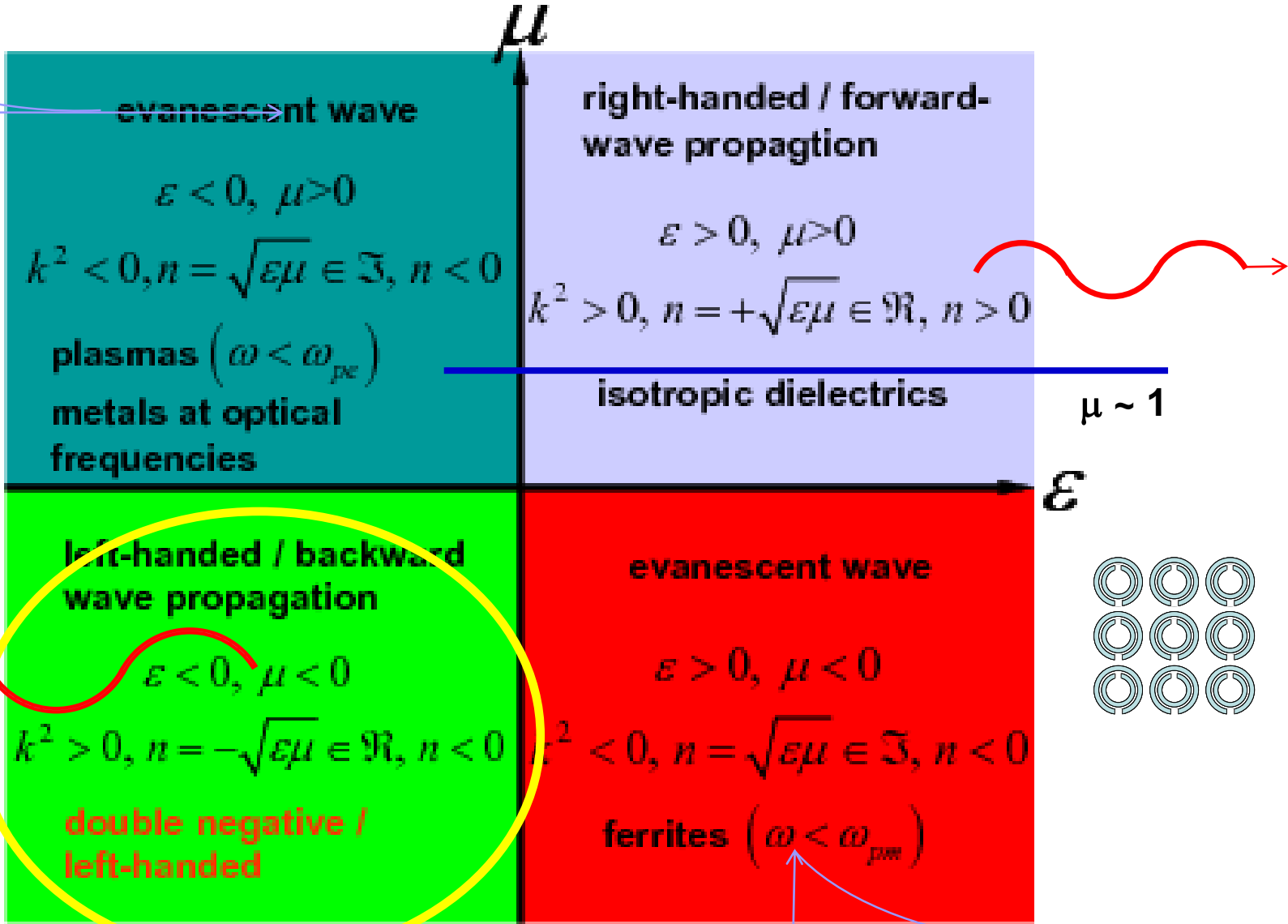
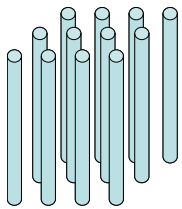


Metamateriály (MTM)

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \rightarrow n = \pm \sqrt{\varepsilon \mu}^{66}$$



VESELAGO (1968)



Metamateriály – historie – 2000 – 2015 (15 let)

Terminologie : metamateriál, LHM, DNG, NRI, BW, Veselago medium, NPV, ...

Historie:

- **Veselago 1968** :

idea existence materiálu kde $\epsilon < 0$ i $\mu < 0$



- **Sir John Pendry 1999**: (Imperial College)

Návrh umělého materiálu - periodická struktura

„tenkých“ drátů a „rozdělených kroužků“

(SRR - split ring resonators)

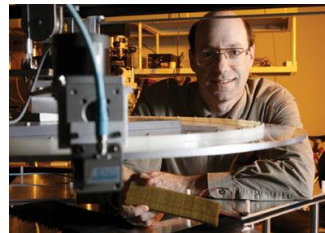


- **Smith 2000**: (San Diego)

Realizace 1. struktury: $\epsilon < 0$ a $\mu < 0$,

demonstrace záporného indexu lomu

Mikrovlny – ideální vodiče

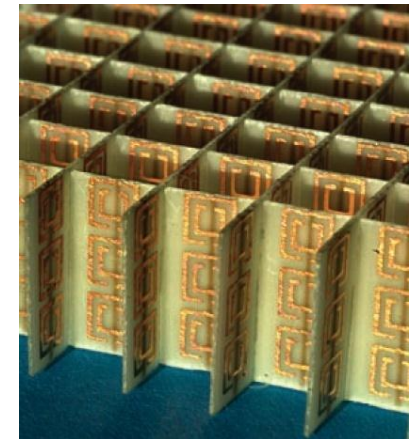


Problémy - výzvy:

(a) posun do optického pásma (IR, VIS, UV)

(b) zjednodušení struktury ($\epsilon < 0$ and $\mu < 0$ – stejný prvek!)

- realizovatelnost



UCSD, PRL 84, 4184 (2000)

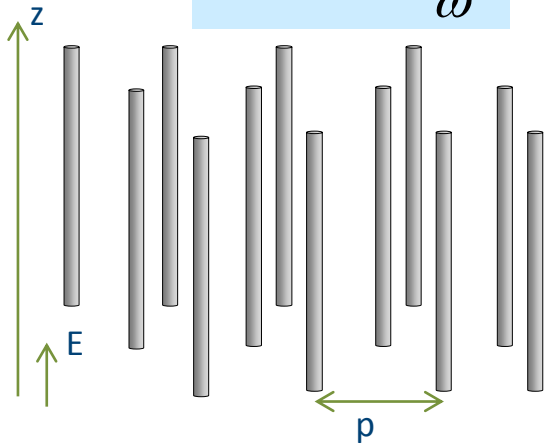


Struktura metamateriálu

Struktura se zápornou permitivitou

→ Soustava tenkých tyčí – periodická mřížka (Pendry)

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

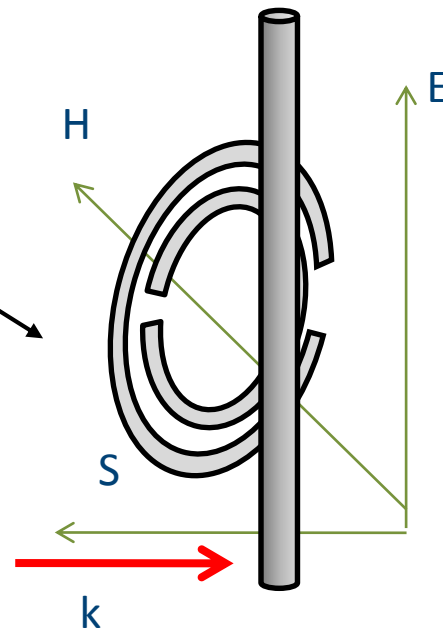
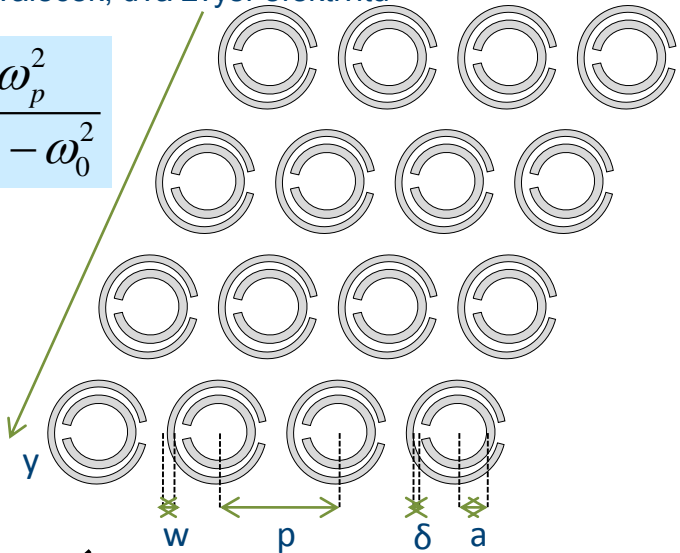


Struktura se zápornou permeabilitou

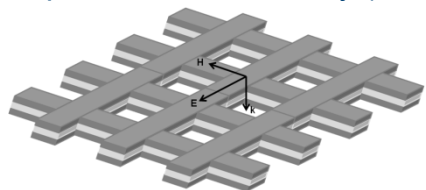
Periodická soustava dutých kovových válečků, vždy dva zasunuté do sebe, podélně rozříznuté

→ Jednotlivý kroužek představuje rezonátor (split ring resonator - SRR)
→ Ideově stačí jeden váleček, dva zvýší efektivitu

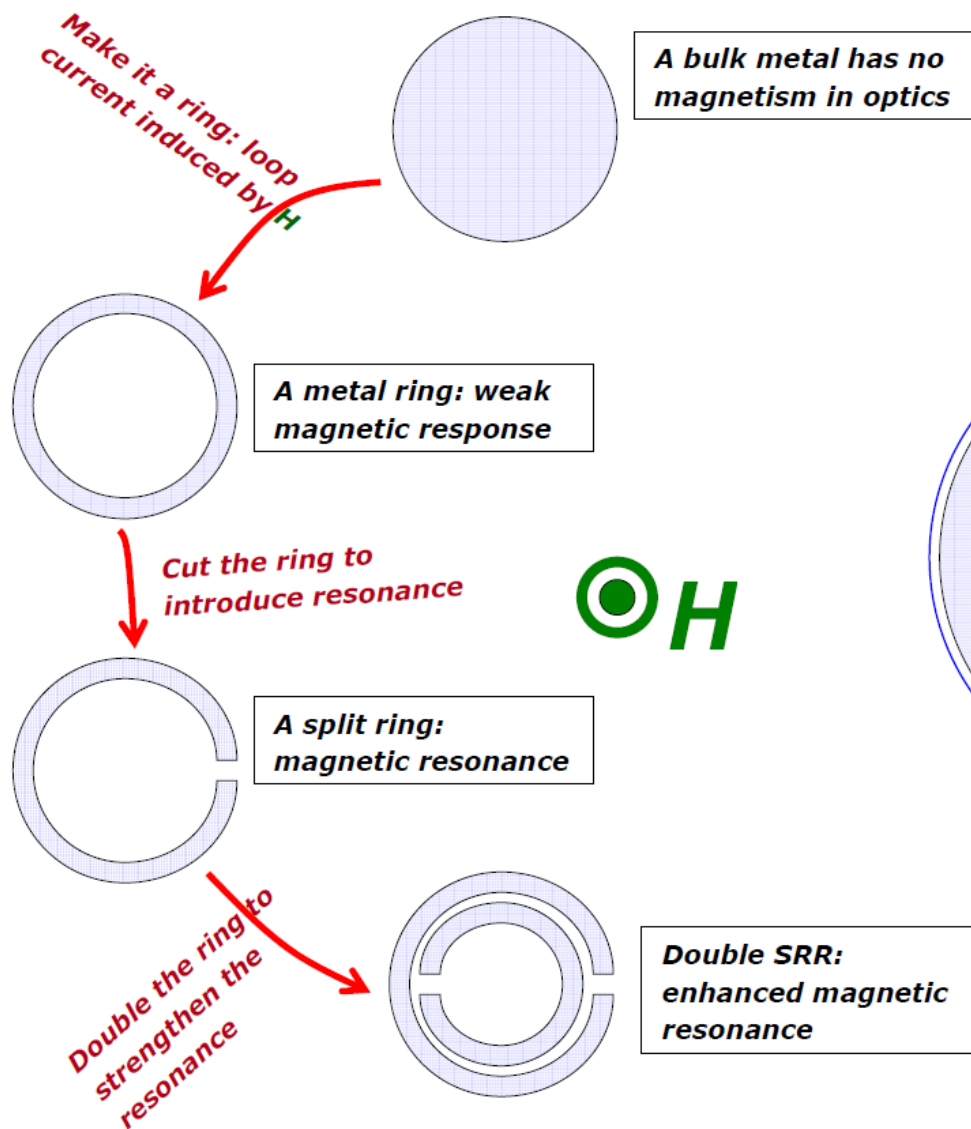
$$\mu(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_0^2}$$



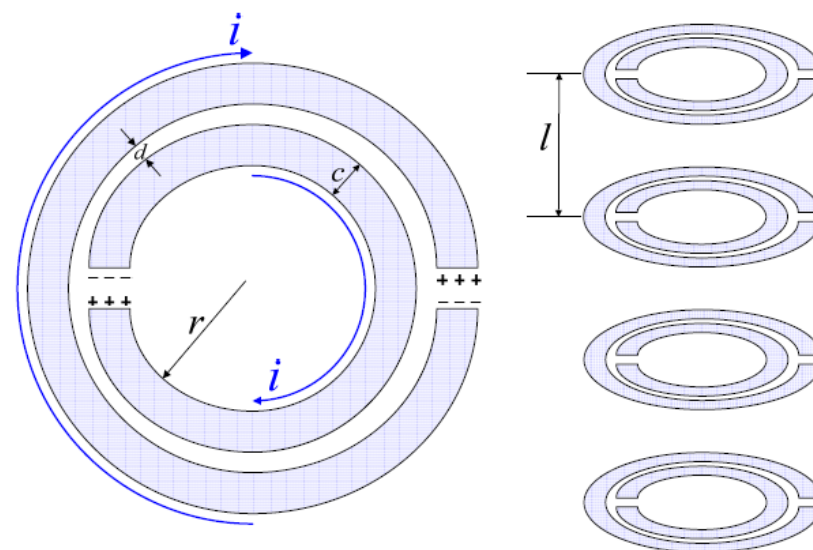
Dnes: posun do optického pásma
→ plazmonické struktury (fishnet, ...)



Magnetická rezonance



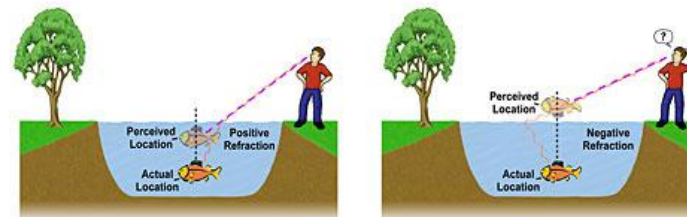
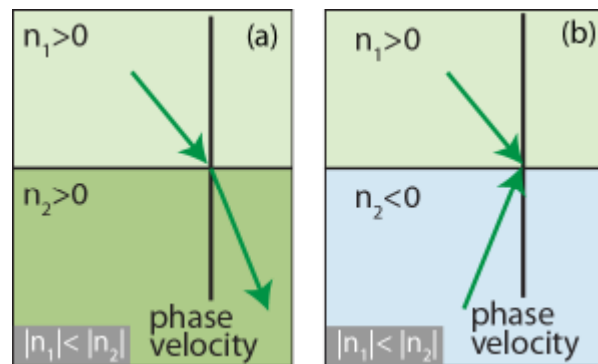
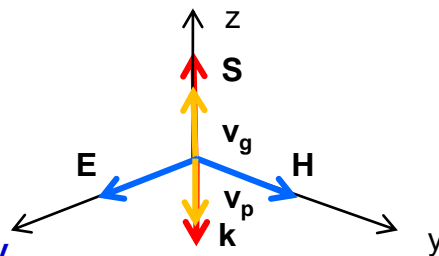
Split-ring resonator (SRR)



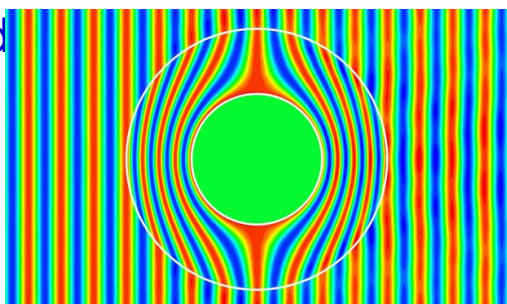
Theory: Pendry et al., 1999.
Experiment: Smith et al., 2000.

MTM – unikátní elektromagnetické vlastnosti

- Negative electrical permittivity, negative magnetic permeability → negative refractive index
- Negative refraction
- Backward propagation
→ opposite phase / group velocity

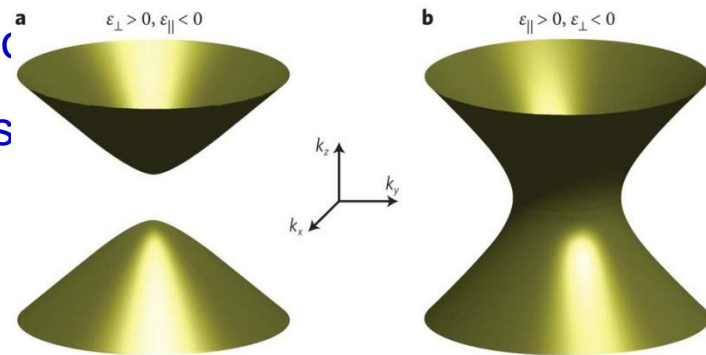


- Flat perfect lenses
- Opposite Doppler, Cherenkov, ...
- Large: ϵ , μ , n → device miniaturization
- $\epsilon \rightarrow 0$ (ENZ) or /and



optics

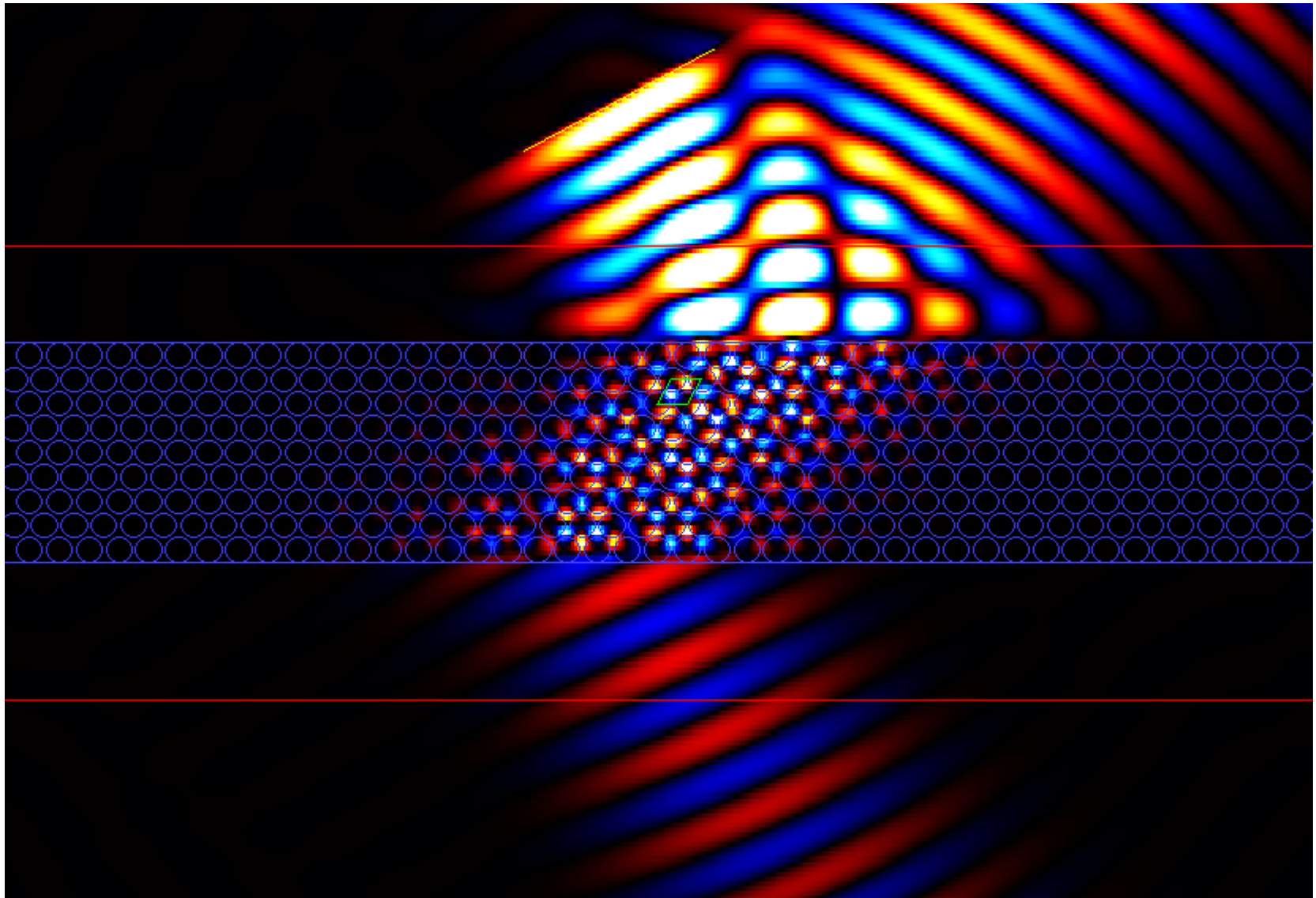
Hyperbolic
sensors



- $\epsilon < 1$ or /and $\mu < 1$
→ cloaking

- New possibilities for light manipulation

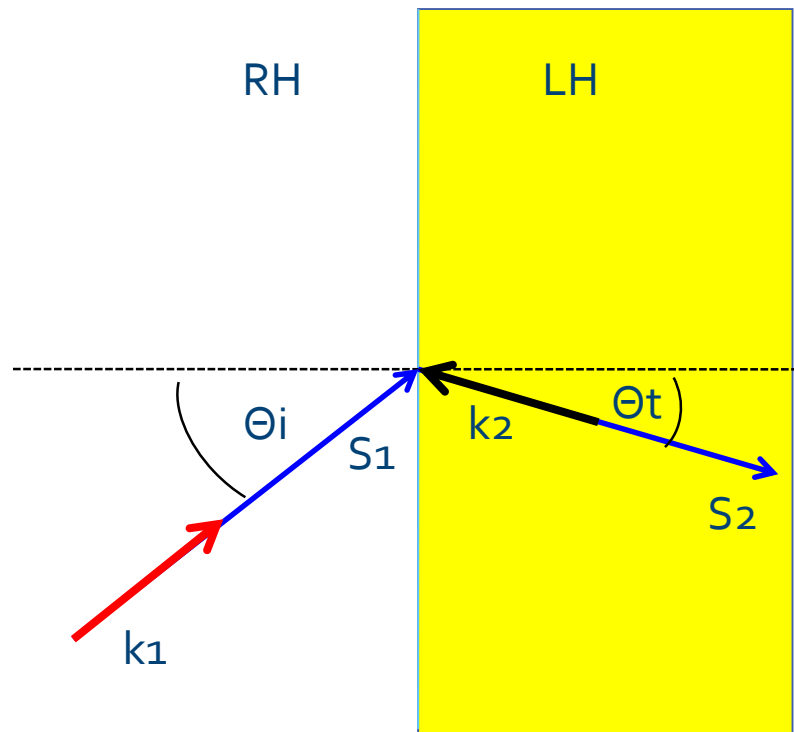
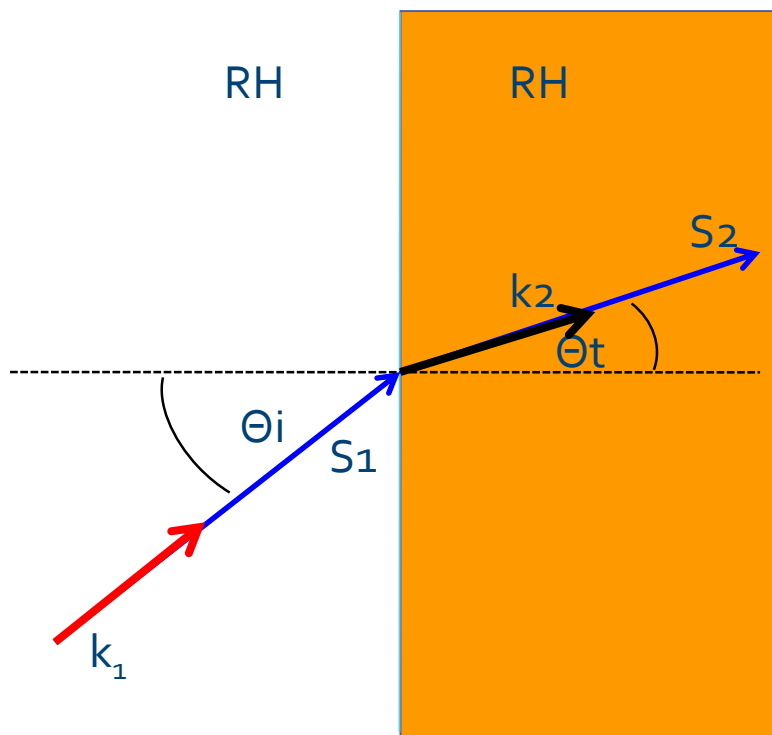
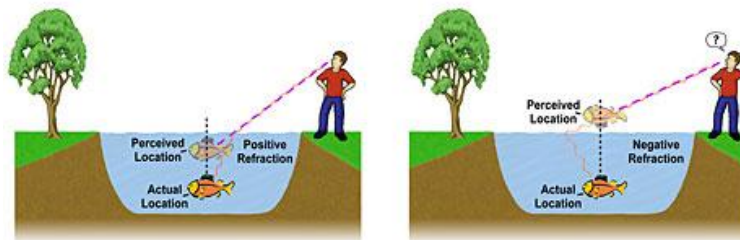
Simulace - průchod světla strukturou metamateriálu



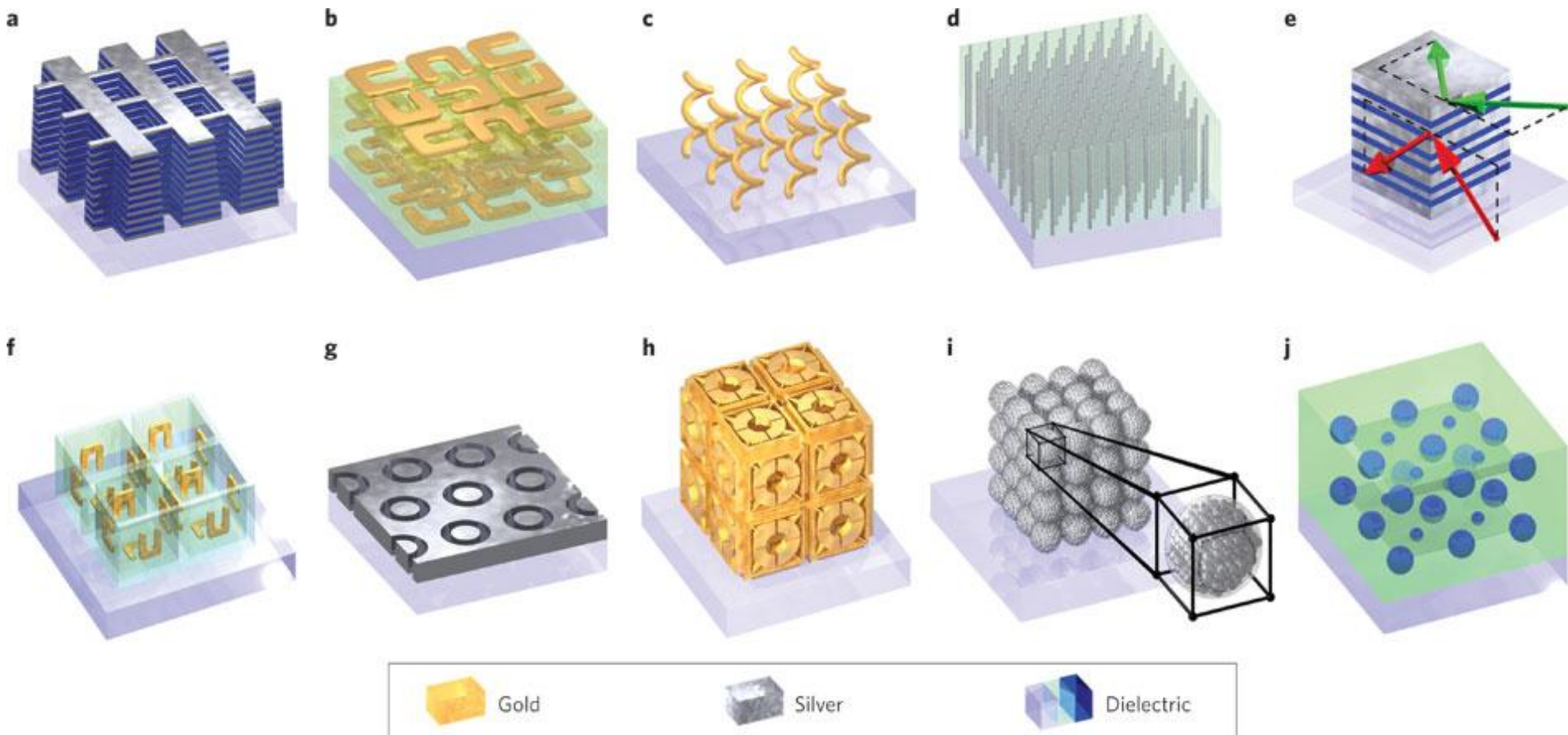
Negativní lom světla: RHM × LHM

Snellův zákon lomu:

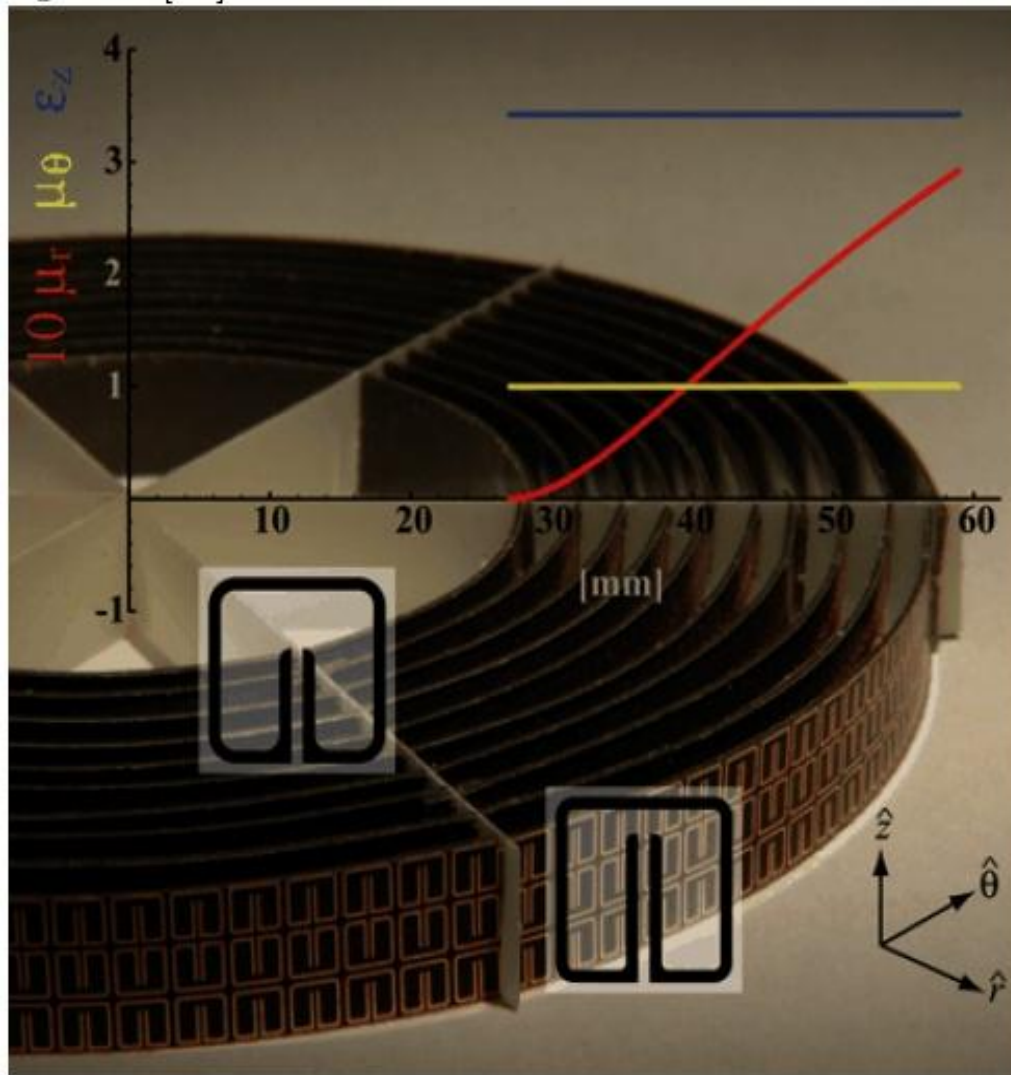
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$



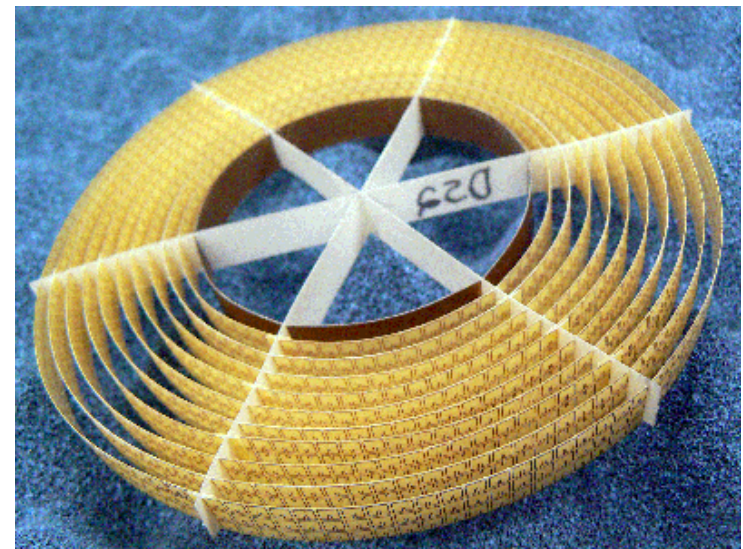
Ukázka různých aktuálních metamateriálů



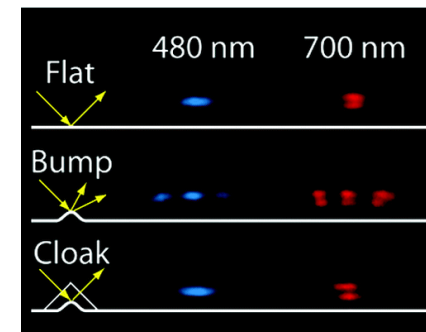
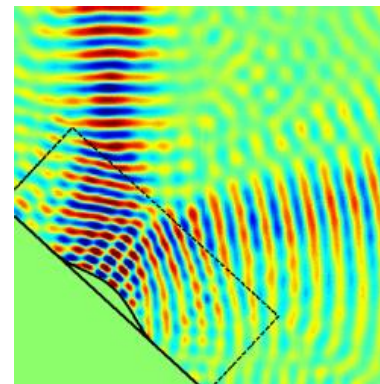
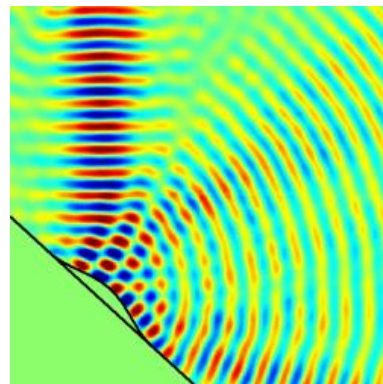
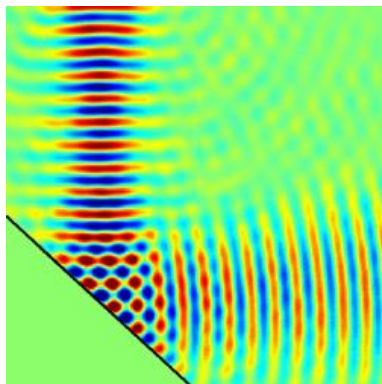
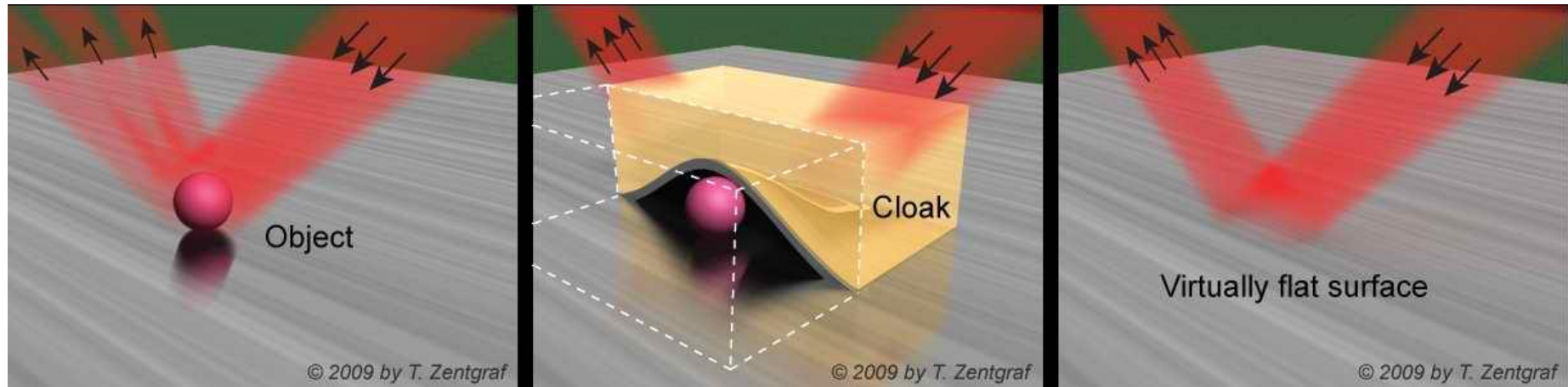
Optical cloaking: 1st experiment



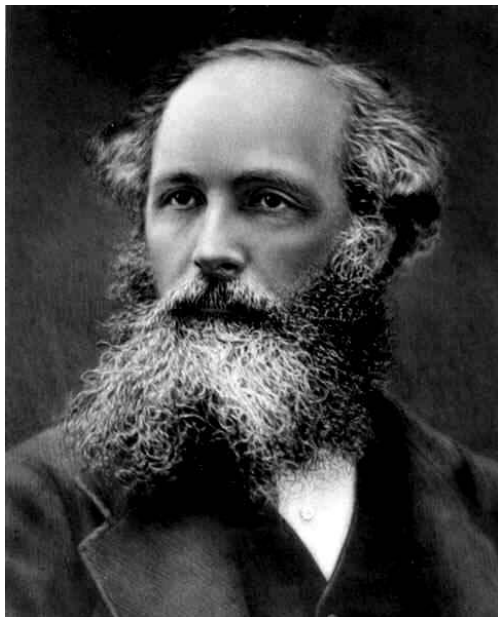
D. Schuring, Science 314, 2006.



Optical cloaking: carpet cloak



Electromagnetic phenomena - Maxwell equations



James Clerk Maxwell
(1831-1879)



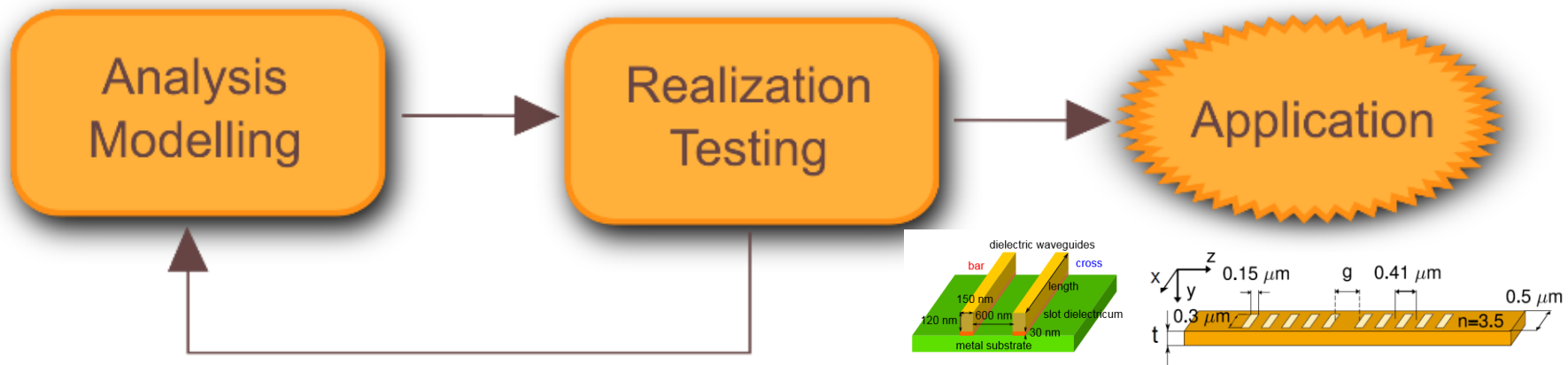
Oliver Heaviside
(1850-1925)

LAW	DIFFERENTIAL FORM	INTEGRAL FORM
GAUSS'S LAW	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$	$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = Q$
FARADAY'S LAW	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s}$
GAUSS'S LAW FOR MAGNETISM	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$
AMPERE'S LAW	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	$\oint_c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s (\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}) \cdot d\mathbf{s}$

- + Materiálové vztahy – modely prostředí
- + Okrajové podmínky
- + Modely disperze
- + ...

Modeling of photonic / plasmonic (nano)structures

- Photonic devices → **(nano)photonic / plasmonic structures**, $\text{sub}\lambda$ devices, ...
- **Theoretical research – new phenomena – functionalities**
- The complexity of the problem makes it impossible to perform an exact analytical computation of the electromagnetic field distribution → **approximate models + numerical modeling**



- **Waveguide / structure mode calculation**: mode propagation constants, shapes, ...
- **Light propagation modeling**: transmission/reflection spectra, field profiles, ...
- **Miscellaneous + postprocessing**: Bloch modes, band diagram, Q quality factor, field enhancement factors (SERS), ...

Computer Lab for Nanophotonics

- Modal methods (FMM / aFMM) – in house + approximate techniques
- Direct numerical techniques – FDTD / FEM / FETD
- Integral techniques – Boundary element method
- **Software tools available:**

→ Matlab



→ Comsol Multiphysics



→ Photon Design



- FimmWave

- FimmProp

- CrystalWave / Omnisim

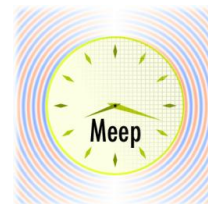
→ Lumerical FDTD



→ RSOFT



→ Meep / MPB



→ JCM Wave (FEM)



→ CST Studio (FEM)

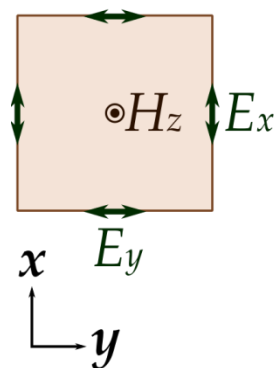


→ MNPBEM (BEM)

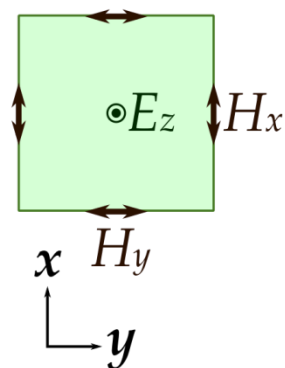


strukturách

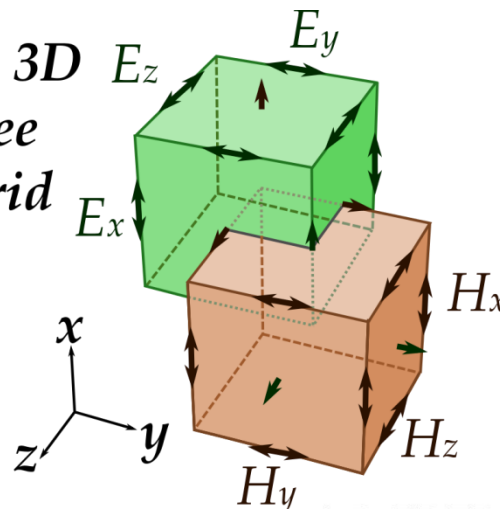
a) TE



b) TM

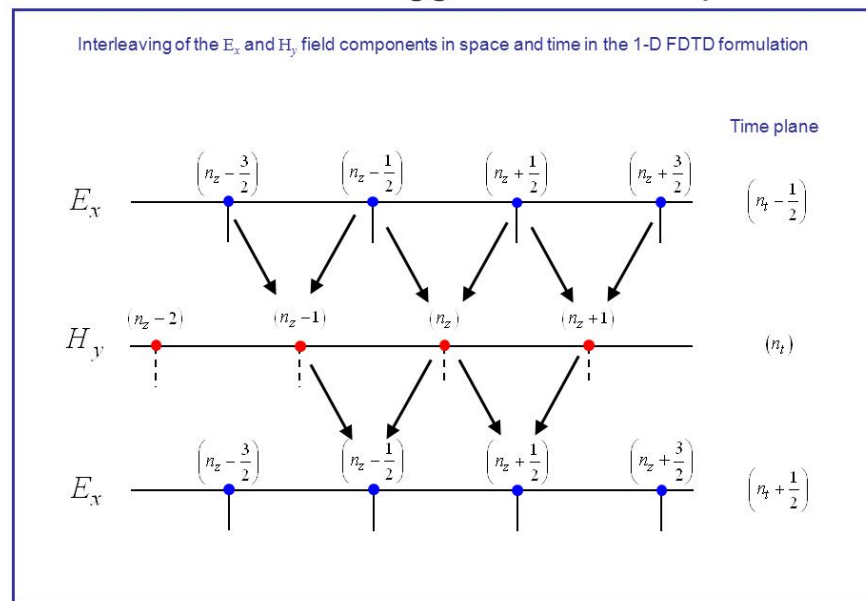
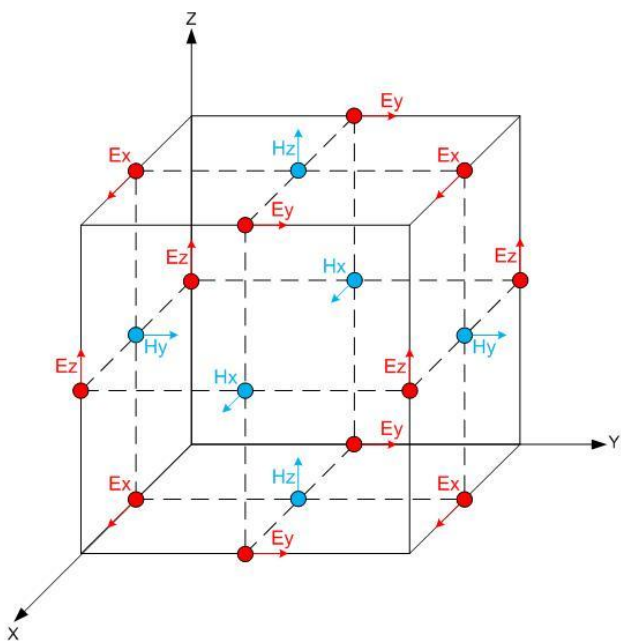


c) 3D Yee grid



- Yeeova výpočetní buňka

1-D FDTD – Staggered Grid in Space



Metody FDTD – Lumerical FDTD Solutions

The screenshot displays the Lumerical FDTD Solutions software interface. The main workspace is divided into several views:

- XY view:** Shows a 3D perspective of a bullseye structure on a substrate. The bullseye is a circular structure with a central hole, surrounded by concentric rings. The substrate is a blue rectangular block.
- XZ view:** Shows a 2D cross-section of the bullseye structure along the X-axis. The bullseye is a green rectangular block, and the substrate is a blue rectangular block.
- YZ view:** Shows a 2D cross-section of the bullseye structure along the Y-axis. The bullseye is a blue rectangular block, and the substrate is a blue rectangular block.

The interface includes a menu bar (File, Edit, View, Setting, Simulation, Help), toolbars for Materials, Structures, Attributes, Components, Groups, Simulation, Analysis, Import, Sources, Monitors, Resources, Check, and Run. The Objects Tree on the left lists the components of the simulation, including the Bullseye, mesh, source_broadband, XY_field, XZ_field, XZ_index, time_out, time_in, farfield_unpolarized, field_400nm, and index_400nm. The Script File Editor on the right contains a MATLAB script for simulating the bullseye structure and calculating its transmission and reflection coefficients.

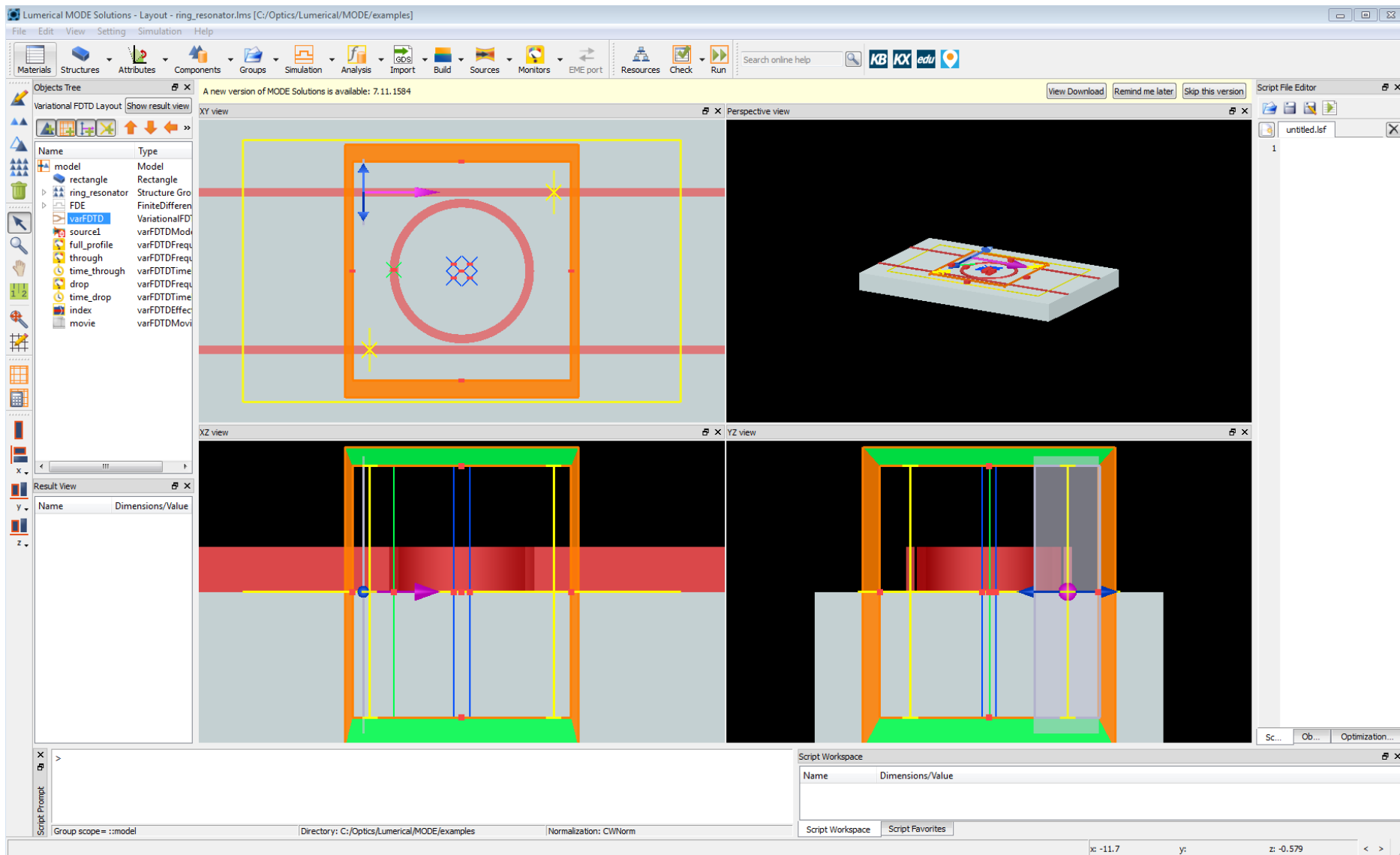
```

1 #####
2 # Scriptfile: ap_arr
3 #
4 # Description: This
5 # and refld
6 # for the
7 # creates
8 #
9 # Copyright 2012, Lu
10 #####
11
12 # calculate the tran
13 f = getdata("R","f");
14 lambda = c/f;
15 T = transmission("T");
16 R = -transmission("R");
17 plot(lambda*1e9,R,T);
18 legend("R","T","R+T");
19 plot(lambda*1e9,T,"w");
20 s=100e-9;
21 period=400e-9;
22 plot(lambda*1e9,T/(p
23
24 # look at the field
25 E2_r = getelectric("
26 E2_t = getelectric("
27 E2_xz = getelectric(
28 x = getdata("profile
29 y = getdata("profile
30 z = getdata("profile
31 image(x*1e6,y*1e6,E2
32 image(x*1e6,y*1e6,E2
33 image(x*1e6,z*1e6,E2
34
35

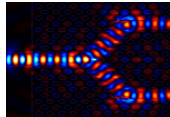
```

The Windows taskbar at the bottom shows the system tray with the date and time (19:49, 19.6.2016) and the language (Czech Republic).

Lumerical Mode Solutions



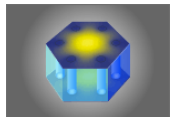
Photon Design: <http://www.photond.com/>



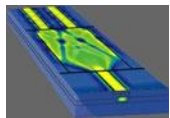
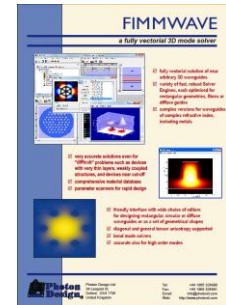
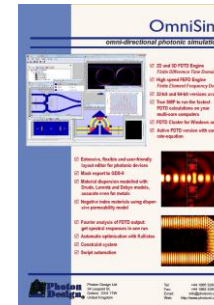
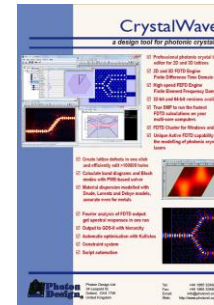
- **CrystalWave – Photonic Crystal Design Suite**



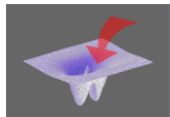
- **OmniSim – Guided Wave Structure Design**



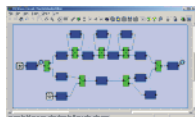
- **FIMMWAVE – Waveguide Mode Solvers**



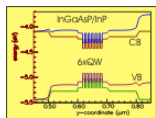
- **FIMMPROP – Fully Vectorial Bidirectional Optical Propagation**



- **Kallistos – Automatic Design Optimisation**



- **PICWave – Photonic Circuit and Laser Diode Simulator**

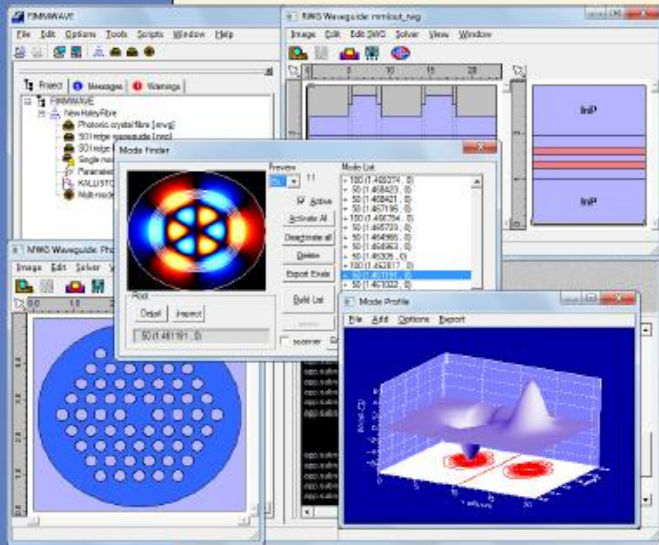


- **Harold – An Advanced Heterostructure Model**

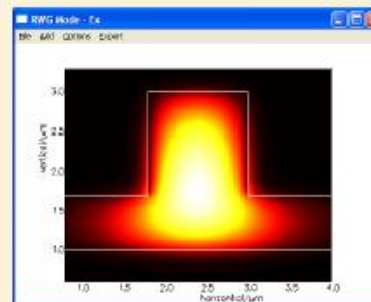
FIMMWAVE

a fully vectorial 3D mode solver

- ☑ fully vectorial solution of near arbitrary 3D waveguides
- ☑ variety of fast, robust Solver Engines, each optimised for rectangular geometries, fibres or diffuse guides
- ☑ complex versions for waveguides of complex refractive index, including metals



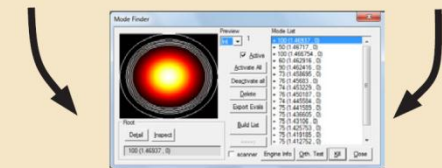
- ☑ very accurate solutions even for “difficult” problems such as devices with very thin layers, weakly coupled structures, and devices near cut-off
- ☑ comprehensive material database
- ☑ parameter scanners for rapid design



Professional waveguide design interface



The rectangular waveguide editor The circular waveguide editor

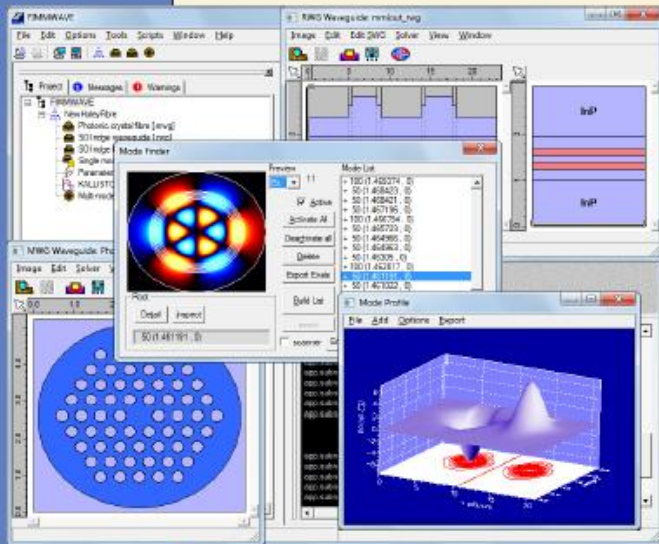


The mode finder

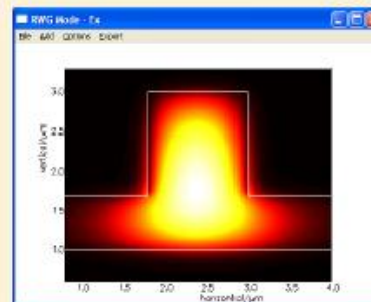
FIMM WAVE

a fully vectorial 3D mode solver

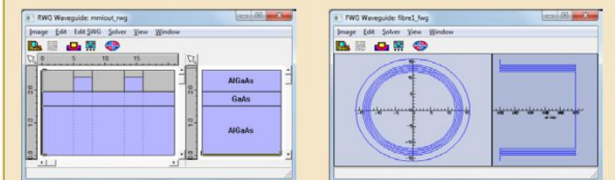
- ☑ fully vectorial solution of near arbitrary 3D waveguides
- ☑ variety of fast, robust Solver Engines, each optimised for rectangular geometries, fibres or diffuse guides
- ☑ complex versions for waveguides of complex refractive index, including metals



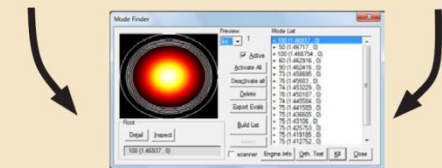
- ☑ very accurate solutions even for "difficult" problems such as devices with very thin layers, weakly coupled structures, and devices near cut-off
- ☑ comprehensive material database
- ☑ parameter scanners for rapid design



Professional waveguide design interface



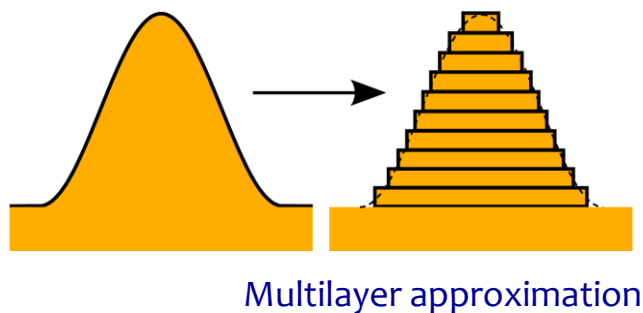
The rectangular waveguide editor The circular waveguide editor



The mode finder

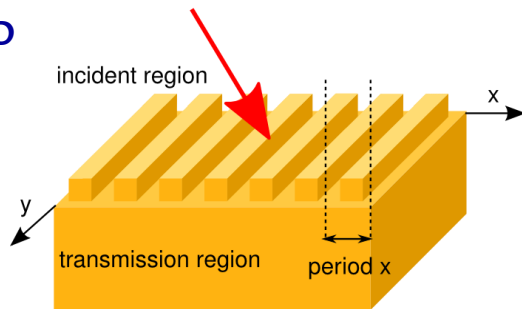
Rigorous computation – periodic modal FMM

RCWA – Fourier Modal Method (FMM)

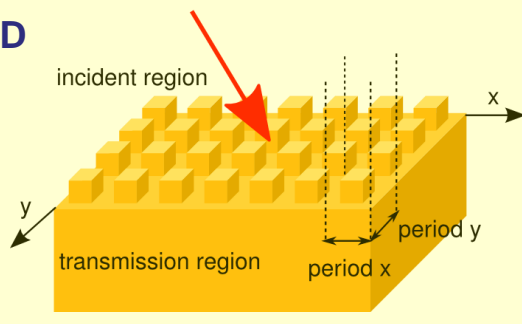


- Periodic structures - diffraction gratings
- Multilayer approximation of the grating profile – binary layers
- Corresponding electromagnetic boundary conditions
- General applicability to a wide range of profiles
- Correct Fourier factorization needed
- Matrix algorithms (enhanced T, S)

1D



2D

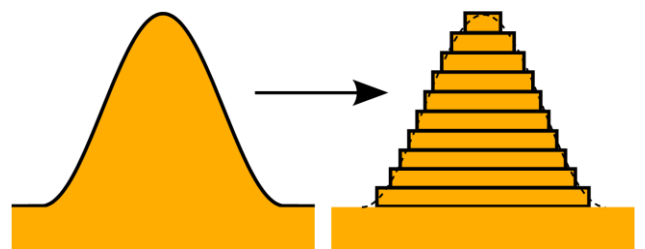


Procedure:

- Dividing profile into layers + boundary conditions
- Fourier expansion – discretization (dielectric permittivity, fields in each layer)
- Space harmonic (FB modes) formulation of fields in layers
- Solution of wave equation: system of coupled equations – the eigenvalue problem in each layer
- Matching boundary conditions on each boundary
- Reconstructing fields, calculating diffraction efficiencies

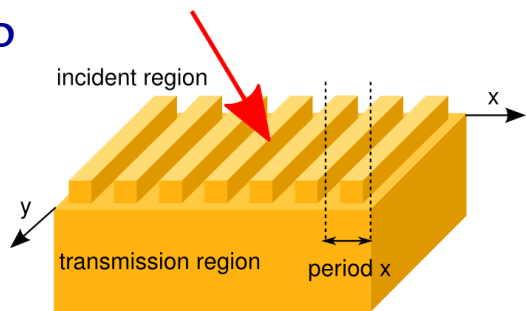
Rigorous computation – periodic / aperiodic FMM

- 1) 1D FMM (RCWA) – periodic \rightarrow 1D FMM + absorbing layers = **2D aFMM**
- 2) 2D FMM (RCWA) – periodic \rightarrow 2D FMM + absorbing layers = **3D aFMM**

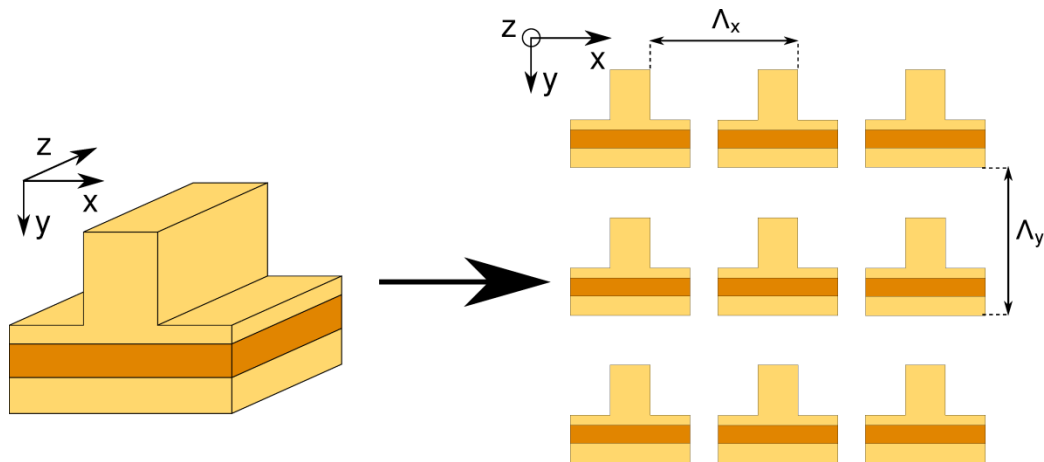
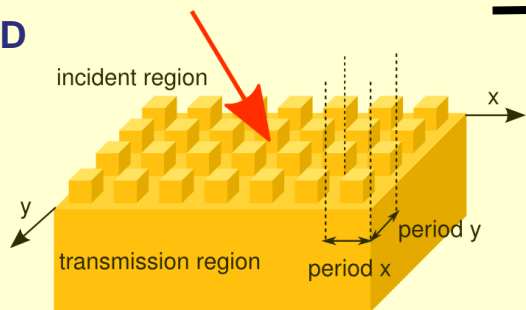


Multilayer approximation

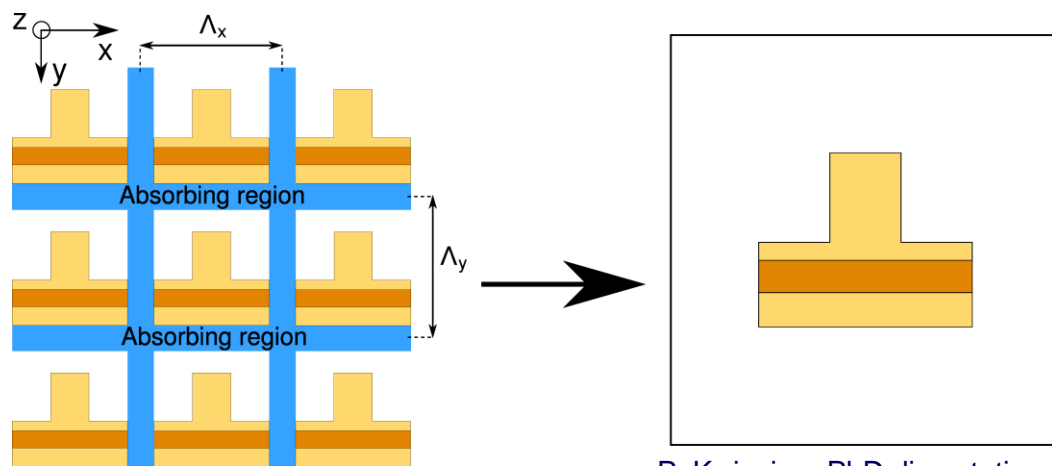
1D



2D



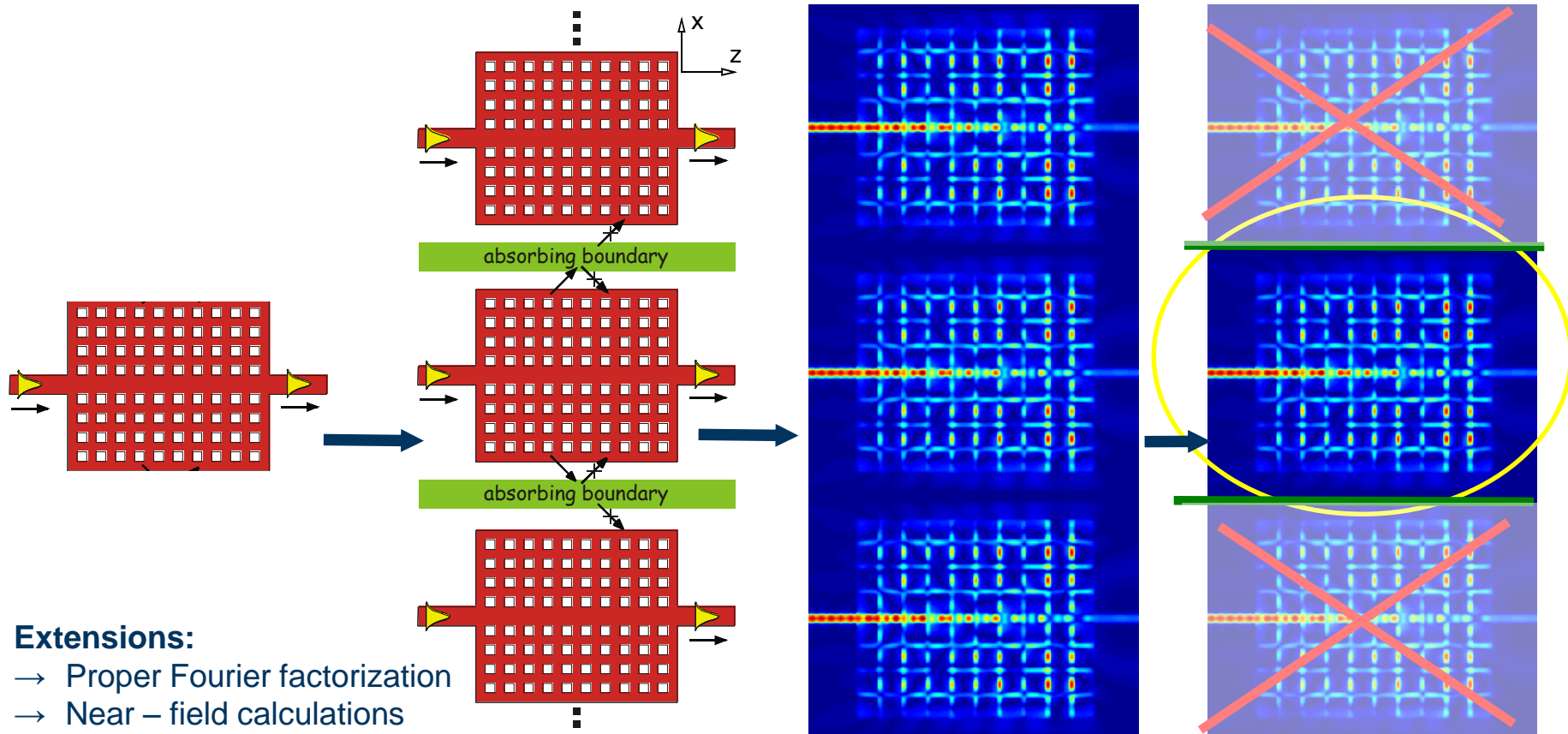
Absorbing PML layers - Complex coordinate transformation



P. Kwiecien, PhD dissertation, 2015.

aFMM – artificial periodization – isolated structures

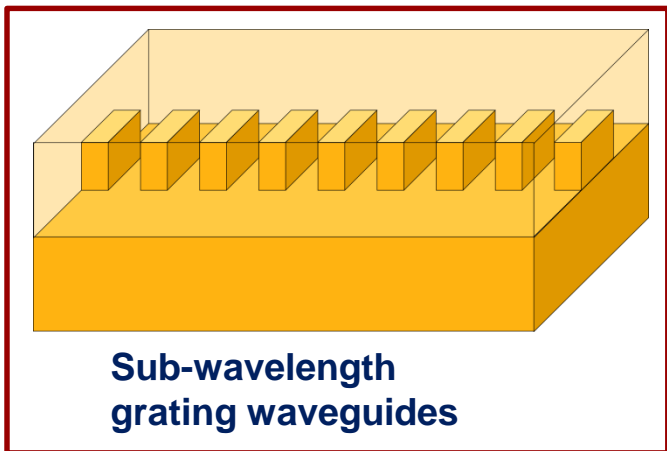
aFMM: artificial periodization + efficient boundary (absorbing) conditions



Extensions:

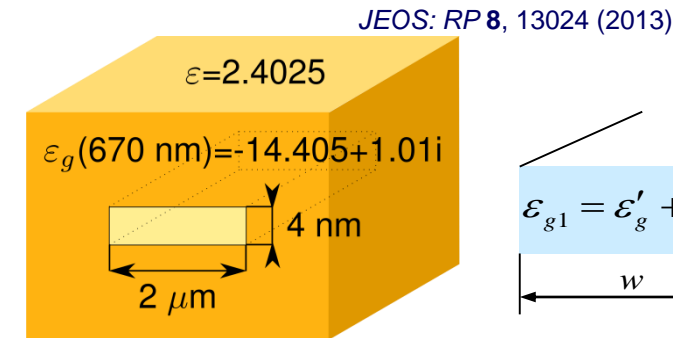
- Proper Fourier factorization
- Near – field calculations
- Full anisotropy → Magnetooptics
- Adaptive spatial resolution
- Structural symmetries
- Advanced scattering and enhanced transmittance matrix algorithms
- Nonlocal metallic media

Recently studied photonic / plasmonic structures - 1



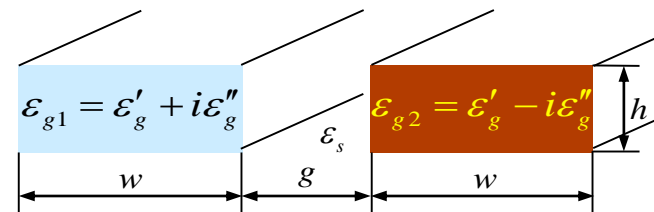
Sub-wavelength grating waveguides

Optics Express **26**, 179 (2018)

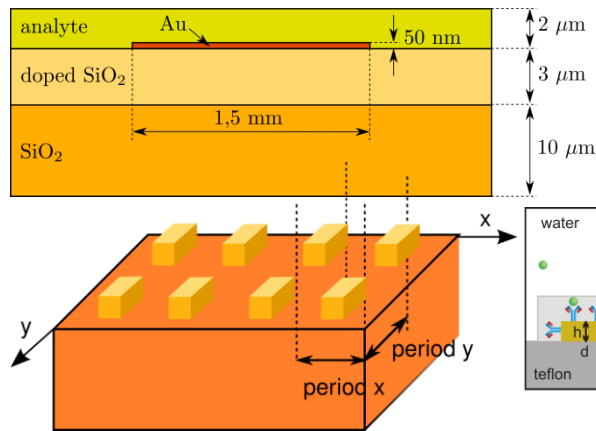


Plasmonic waveguides

JEOS: RP 8, 13024 (2013)

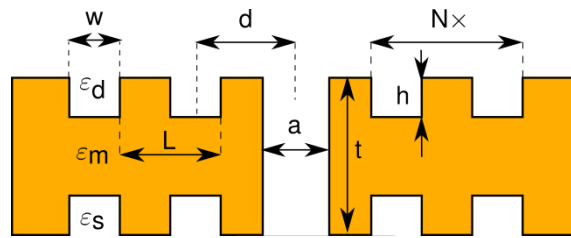


**Loss / gain structures
PT-symmetry**

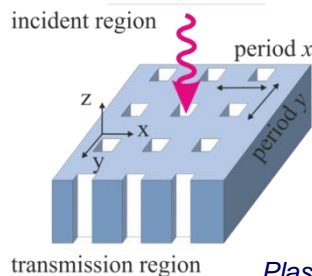


**Surface plasmon resonance sensors
waveguides / structures**

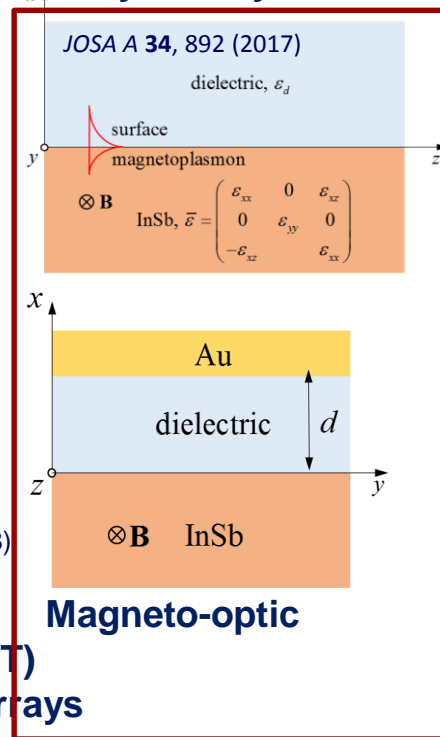
Plasmonics **12**, 20 (2014)



**Sub-wavelength metallic apertures (EOT)
nanohole arrays**



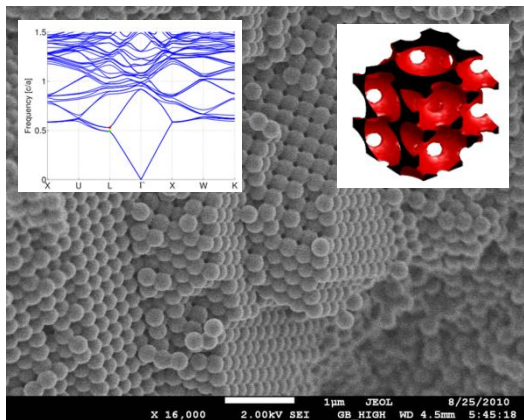
Plasmonics **13**, 835 (2018)
OQE **41**, 409 (2009)



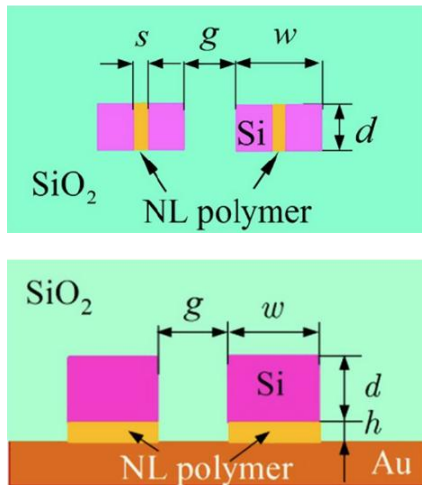
Magneto-optic

Recently studied photonic / plasmonic structures – 2

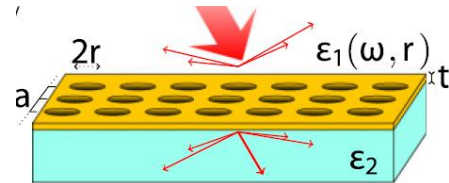
Photonic crystal structures direct / inverse 3D opals



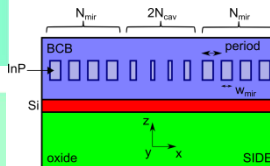
OQE 47, 3201 (2015)



Nonlocal resonant effects

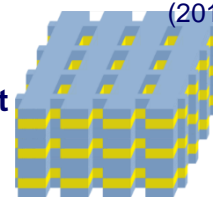


Optics Express 21, 6794 (2013)



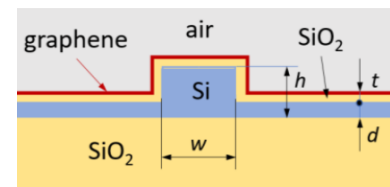
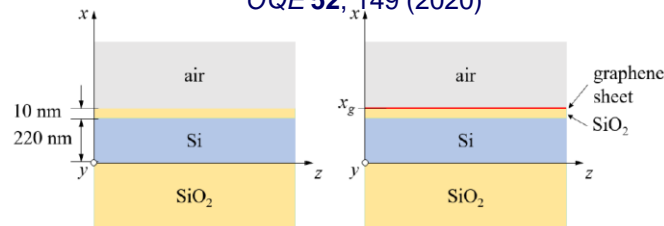
PhC-based resonant nanostructures

PIERS 2013, 439 (2013)

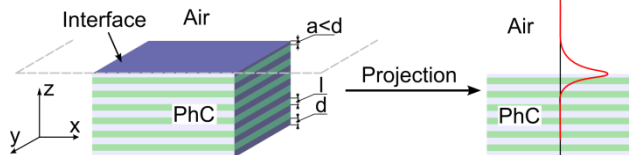
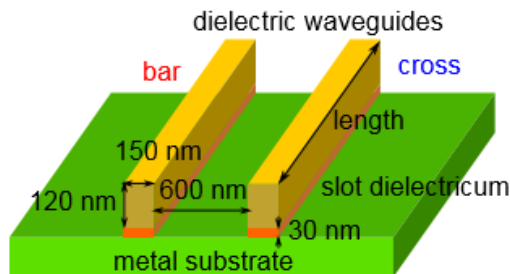
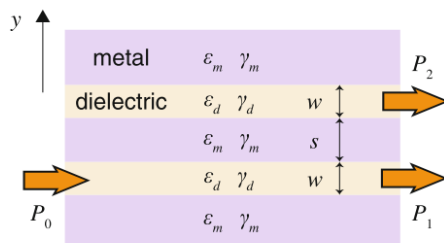


Fishnet LH metamaterial

Journal of Optics 22, 095801 (2020)
OQE 52, 149 (2020)

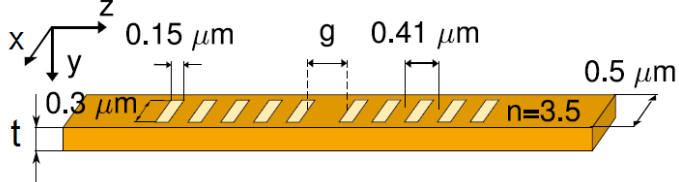


Graphene plasmonics



Surface states in photonic crystals

EPJ Web of Conferences 48, 00030 (2013)

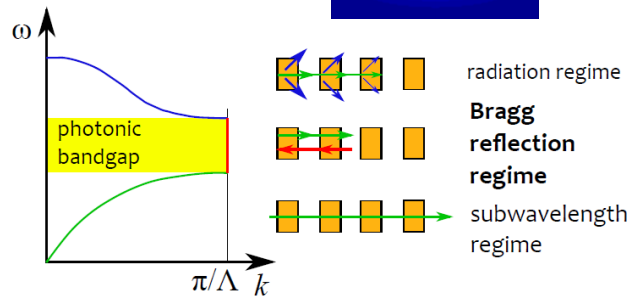
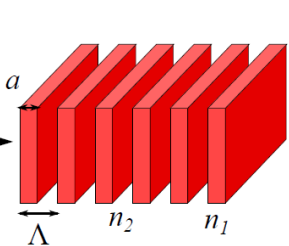
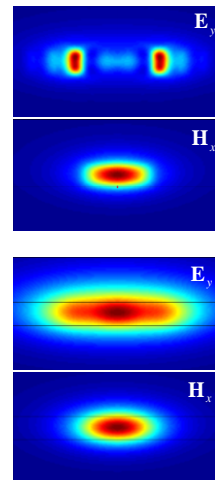
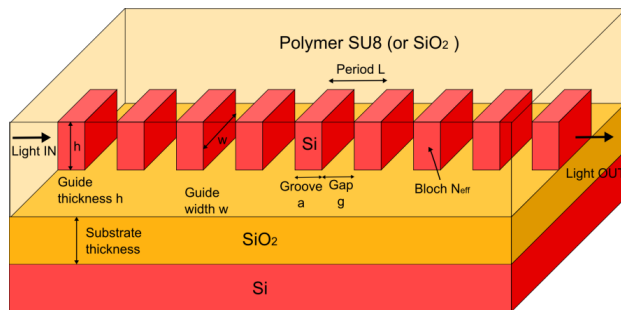
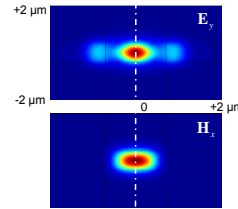
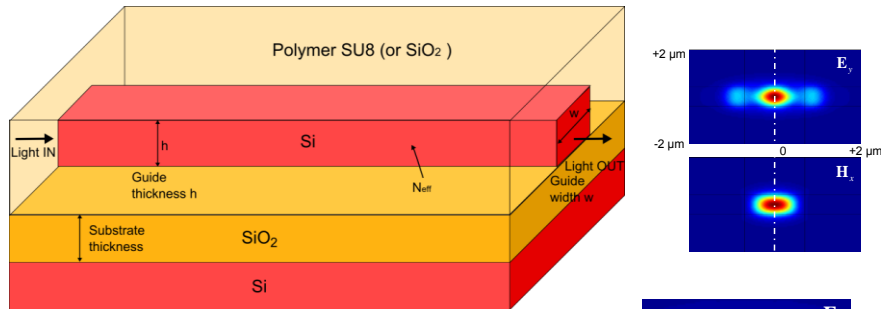


Local linear / nonlinear resonant effects
Plasmonic waveguides couplers

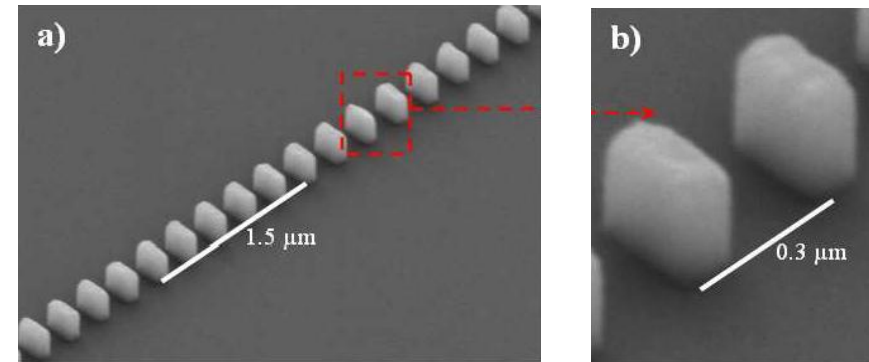
Example 1 – Sub λ metamaterial guided-wave structures

Subwavelength grating (metamaterial) guided-wave structures

Cooperation: NRC, Canada
University of Malaga, Spain
University of Žilina, Slovakia

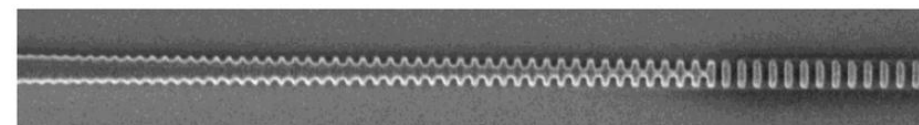


- **SWG waveguide** - a new type of SOI microphotonic waveguide
- Applications: fiber-chip coupling, waveguide crossing, refractive index engineering
- **Our participation – theory, interpretation**
- 2D x 3D model test - **Full 3D modeling needed!**



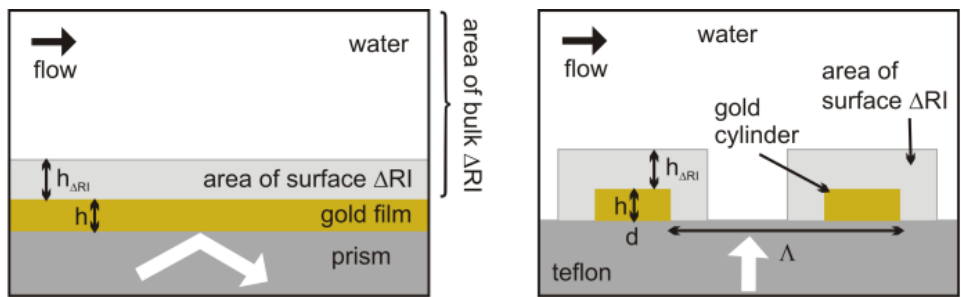
Scanning electron microscope (SEM) images of fabricated structures including: a) SWG straight waveguide with $\Lambda = 300$ nm, $w = 250$ nm and a duty cycle of 33%. b) Detail of two SWG segments.

P. J. Bock, Optics Express, 18(19), 20251 (2010)



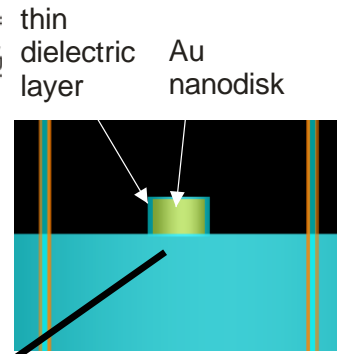
Nanowire → SWGW coupler

Example 2 - SPR-based resonant structures → SPR sensor



Cooperation: IPE AS CR - B. Špačková, N.Scott Lynn, J. Homola

Rich physics:
 - Fano resonances
 - Rayleigh resonances
 ⇒ **COUPLING**

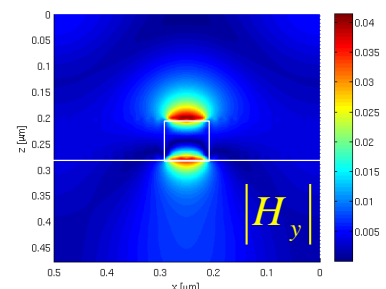
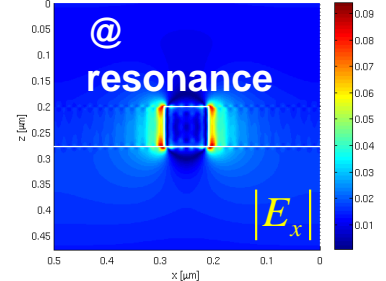
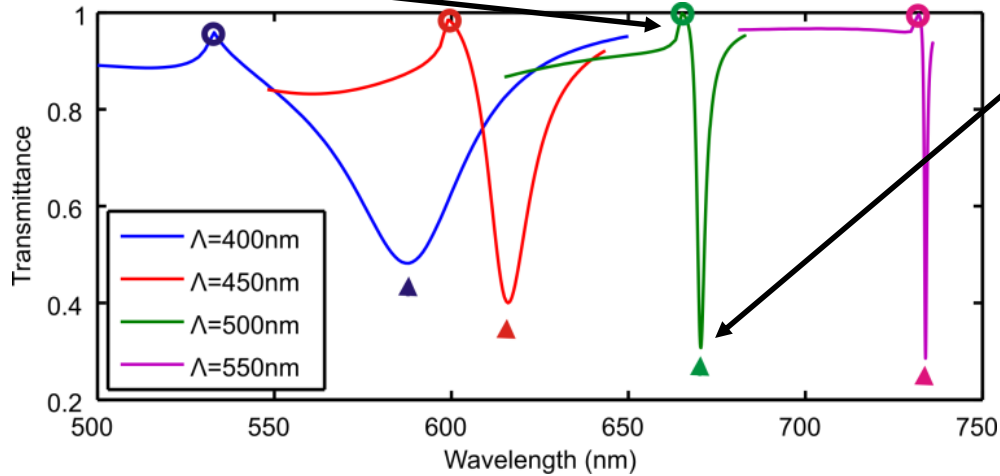
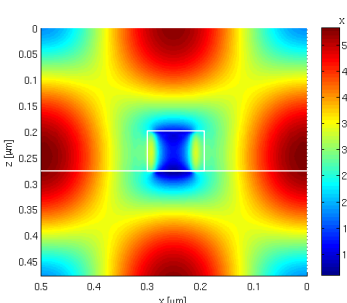
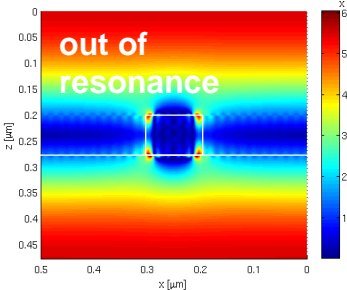


(a) Simulated structures. (a) SPP-based sensor structure – gold thin film on prism, (b) LSP-based sensor structure – two-dimensional periodic array of gold cylinders.

$\lambda=665.1 \text{ nm}$

FDTD x RCWA comparison

$\lambda=670.4 \text{ nm}$



Transmission spectra of the nanoparticle array with different periods of the structure Λ , $r = 40 \text{ nm}$, $h = 80 \text{ nm}$. Lattice surface resonances and Rayleigh anomalies are marked by arrows and circles resp.

B. Špačková, et al., IEEE Sensors, 2012

Týden vědy na FJFI – program 19.6. + 20.6. 2023

Program - Trojanova

Pondělí 19.6. - 9:30 – cca 16:00 (→ Břehová - 16:30)

- *Úvodní prezentace (Ivan Richter)*
- *Praktická část – Pavel Kwiecien, Milan Burda*
- *Představení softwaru pro simulace: Lumerical FDTD + Mode Solutions*
- *Vlastní experimenty a simulace s nástroji*
- *Několik základních úloh:*
 - **Porovnání geometrické a vlnové optiky (rozhraní tvaru V)**
 - **Vlnovody - planární vlnovod - 1D, 2D, optická vlákna + zahnuté vlnovody**
 - **Fotonické krystaly, vlákna z fotonických krystalů**
 - **Tepelné efekty**

Úterý 20.6. - 9:00 – cca 18.00 (18.00 → deadline - prezentace + text)

- *Dokončení počítačových experimentů*
- *Prezentace*
- *Textový příspěvek*

Děkuji za Vaši pozornost

Otázky, prosím?