

Teorie neviditelnosti

Zajímavá fyzika

St Andrews



Malé, velmi příjemné městečko na pobřeží Severního moře

Nejstarší univerzita ve Skotsku (založena r. 1413), pátá nejlépe hodnocená v Británii, studoval zde i princ William

Stáže: 6 měsíců v roce 2007, po třech měsících v letech 2008, 2010 a 2011



Prof. Ulf Leonhardt

Jak učinit předmět neviditelným?

Tři možnosti

Jak učinit předmět neviditelným?

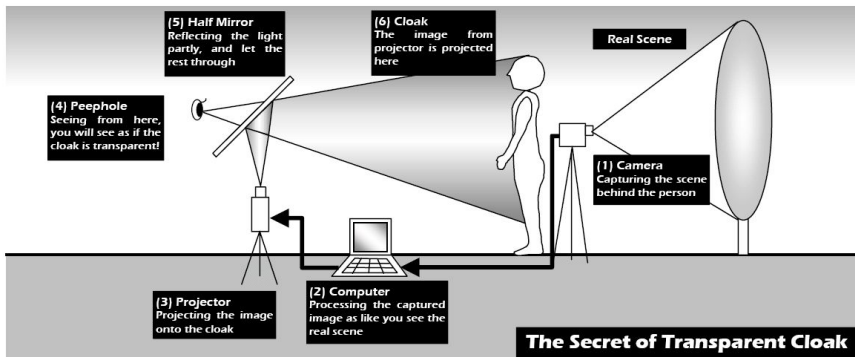
1. Světlo projde **skrze objekt**

Wellsův „Neviditelný“



Jak učinit předmět neviditelným?

2. Scéna za objektem je monitorována a promítána na jeho přední stranu – **kamufláž**



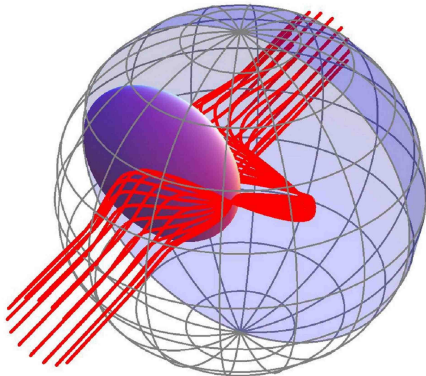
Jak učinit předmět neviditelným?

2. Scéna za objektem je monitorována a promítána na jeho přední stranu – **kamufláž**



Jak učinit předmět neviditelným?

3. Světelné paprsky objekt **obejdou** a vrátí se do původního směru – **neviditelný plášť**

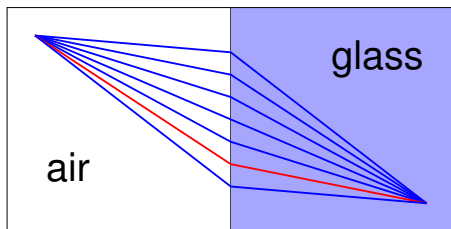


Neviditelné pláště jsou založeny na **transformační optice**

Transformační optika

[Dolin 1961, Pendry 1996, Leonhardt 2006]

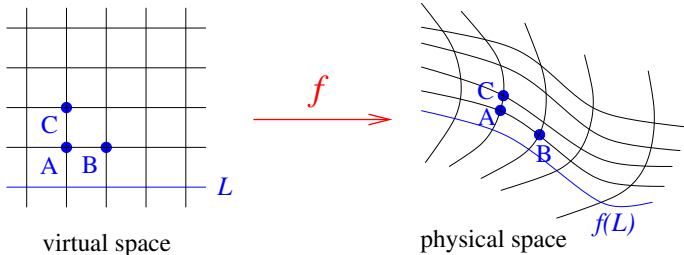
Optické prostředí **mění geometrii** prostoru pro světlo



Fermatův princip: princip nejmenšího času, ale i nejkratší **optické dráhy**

$$s = \int n dl$$

Světelné paprsky se šíří po **geodetikách** vzhledem k „optické metrice“



Světlo se šíří ve **virtuálním prostoru** s konstantním indexem lomu, paprsky jsou přímky

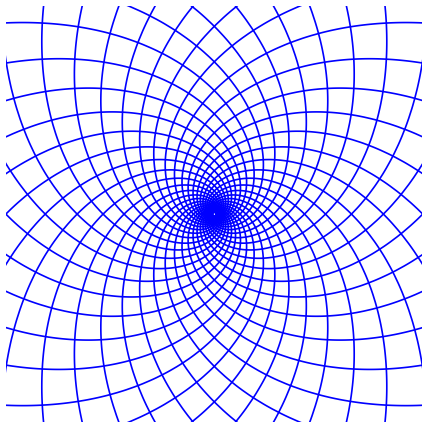
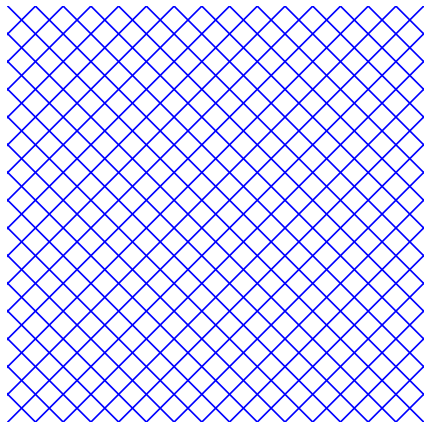
Virtuální prostor zobrazíme funkcí f do **fyzikálního prostoru**

Geometrická vzdálenost se nezachovává, obecně $dI^2 \neq dI'^2$

Vyplněním fyzikálního prostoru vhodným optickým prostředím lze obě **optické dráhy** učinit stejnými

Ve fyzikálním prostoru se světlo bude šířit po obrazech $f(L)$ přímek L ve virtuálním prostoru

Index lomu je obecně **anizotropní** (v různých směrech různý)



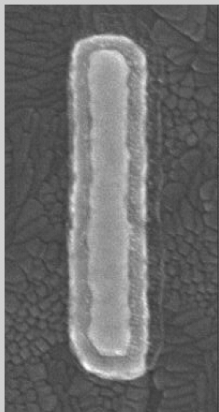
Je nutné kontrolovat elektrickou i magnetickou odezvu materiálu, ideálně platí $\hat{\epsilon} = \hat{\mu}$ („impedance matching“)

Metamateriály

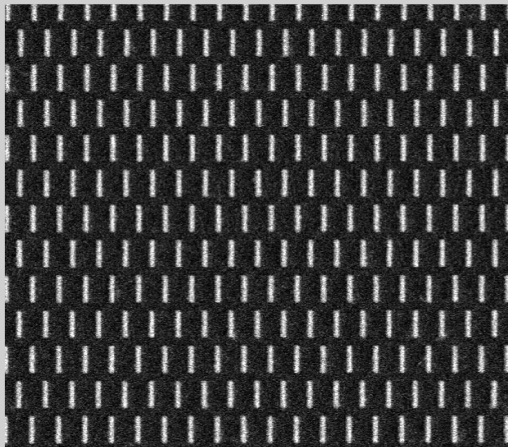
Praktická realizace transformační optiky – **metamateriály**, lze s nimi měnit index lomu ve velkém rozsahu

Metamateriály mají **pravidelnou strukturu** menší než λ („umělé atomy“)

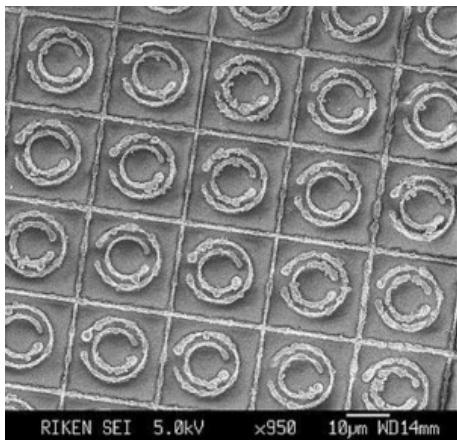
Probíhá bouřlivý výzkum a vývoj těchto materiálů

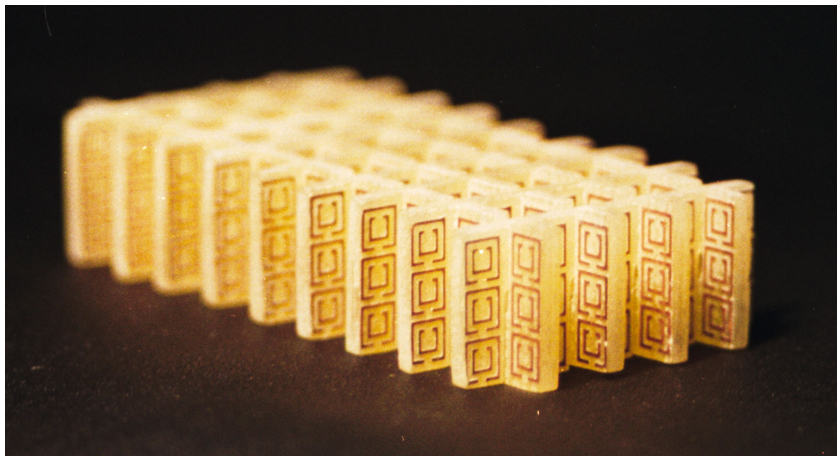


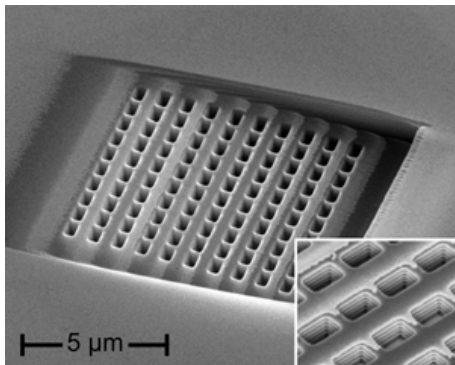
200 nm

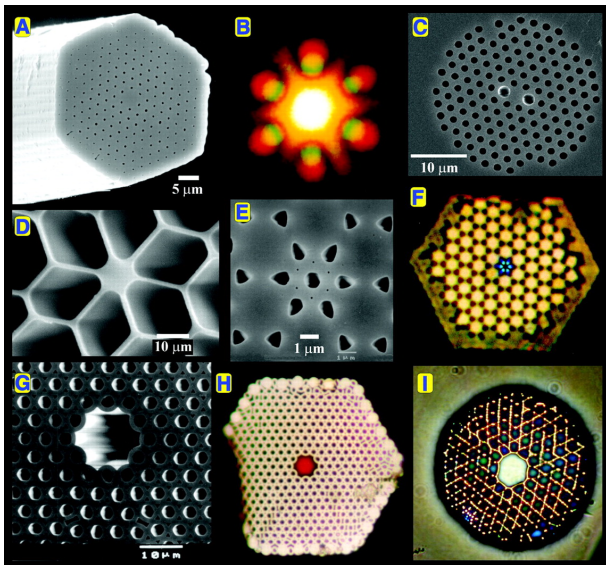


5 μm



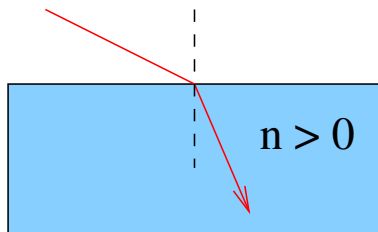






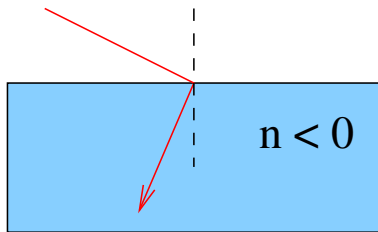
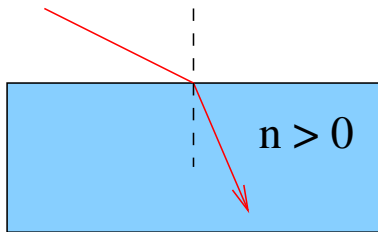
Lom a ohyb světla

Světlo na ostrém rozhraní dvou optických prostředí:



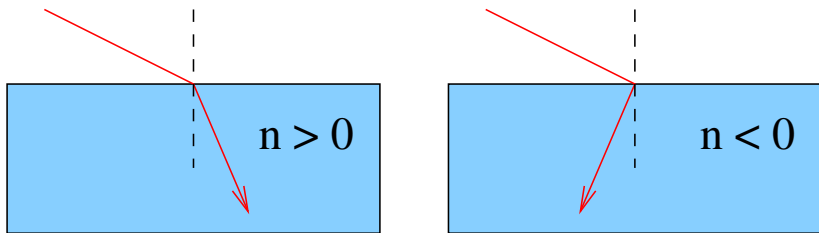
Lom a ohyb světla

Světlo na ostrém rozhraní dvou optických prostředí:

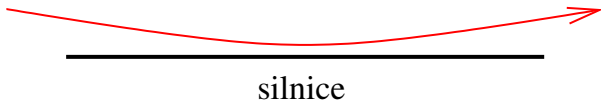


Lom a ohyb světla

Světlo na ostrém rozhraní dvou optických prostředí:

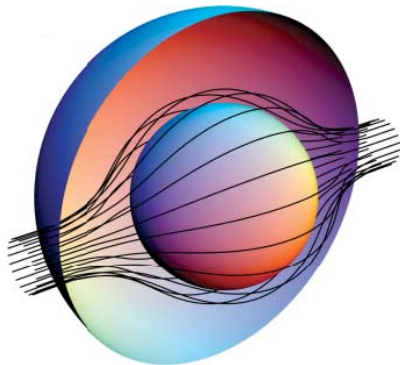


Světlo v prostředí, kde se index lomu mění postupně (spojitě):



Neviditelnost

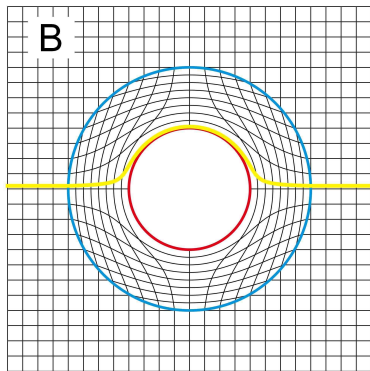
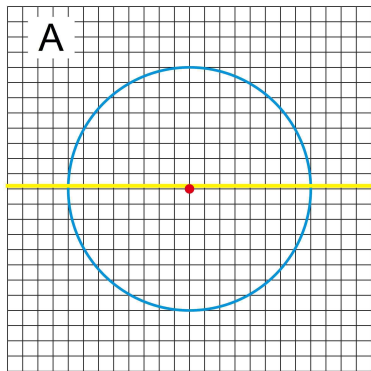
Základní myšlenka – odchýlíme světelné paprsky tak, aby obešly předmět a vrátily se do původního směru



[J. B. Pendry, D. Schurig, D. R. Smith, *Science* 312, 1780 (2006)]

Světlo nepřijde s předmětem do kontaktu, předmět je **neviditelný**

Neviditelnost a transformační optika

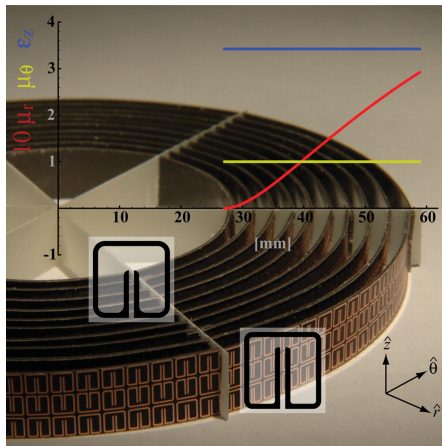


Zásadní problém – rychlost světla v některých místech prostoru jde k nekonečnu

Toho lze docílit jen pomocí rezonančních efektů, tedy pro jednu barvu světla

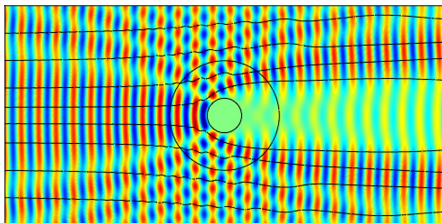
Neviditelnost

V roce 2006 byla neviditelnost realizována pro **mikrovlny**
[D. Schurig et al, Science 314, 977 (2006)]



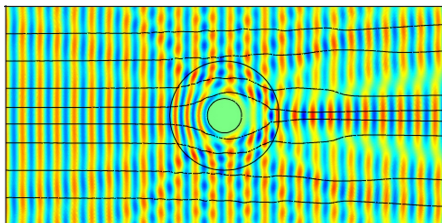
Neviditelnost

V roce 2006 byla neviditelnost realizována pro **mikrovlny**
[D. Schurig et al, *Science* 314, 977 (2006)]



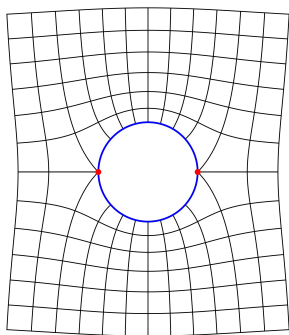
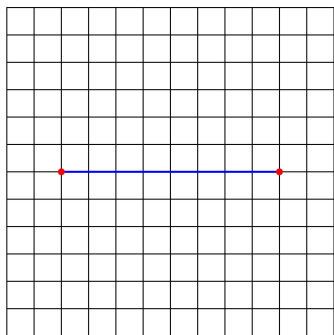
Neviditelnost

V roce 2006 byla neviditelnost realizována pro **mikrovlny**
[D. Schurig et al, *Science* 314, 977 (2006)]



Jiný typ pláště – „Hiding under the carpet“

[J. Li, J. B. Pendry, *Phys. Rev. Lett.* 101, 203901 (2008)]



Jiný typ pláště – „Hiding under the carpet“

[J. Li, J. B. Pendry, *Phys. Rev. Lett.* 101, 203901 (2008)]



Jiný typ pláště – „Hiding under the carpet“

[J. Li, J. B. Pendry, *Phys. Rev. Lett.* 101, 203901 (2008)]



Realizace pro mikrovlny:

[R. Liu, et al., *Science* 323, 366 (2009)]

Realizace pro infračervené světlo:

[L. Gabrielli et al., *Nature Photonics* (in press)];

[J. Valentine et al., *Nature Materials* 8, 568 (2009)]

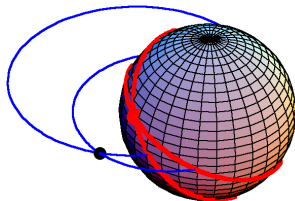
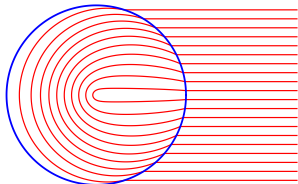
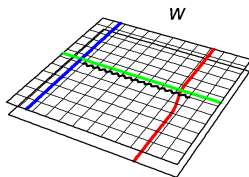
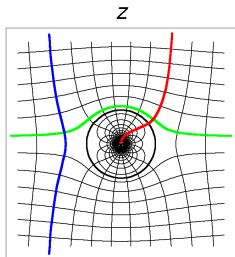
Existuje vůbec všesměrový plášť bez optických singularit?

Existuje vůbec všesměrový plášť bez optických singularit?

Ano!

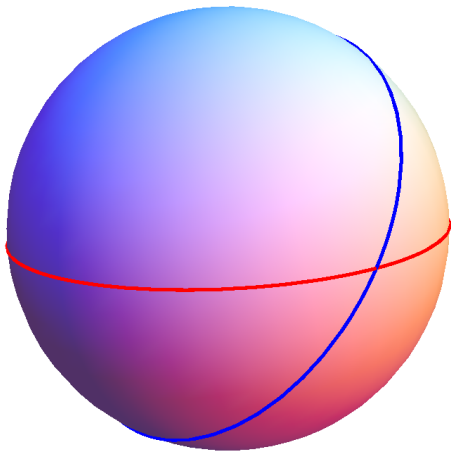
Spojení několika myšlenek

Neukleidovská geometrie, Maxwellovo rybí oko,
optická konformní zobrazení, transmutace singularit



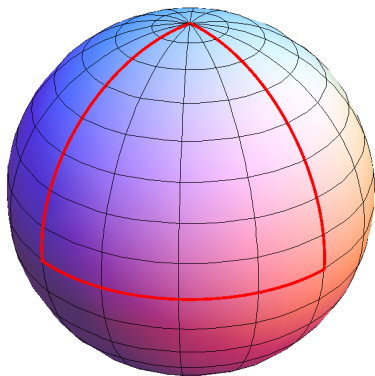
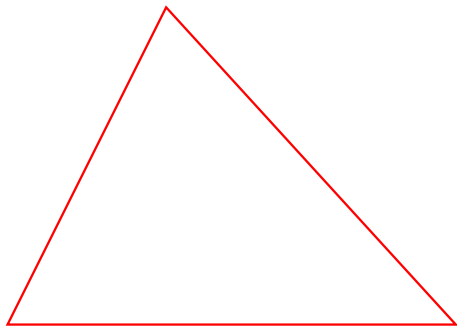
Neeukleidovská geometrie

Světlo se na zakřiveném povrchu pohybuje po **geodetikách** – „nejpřímějších“ možných křivkách



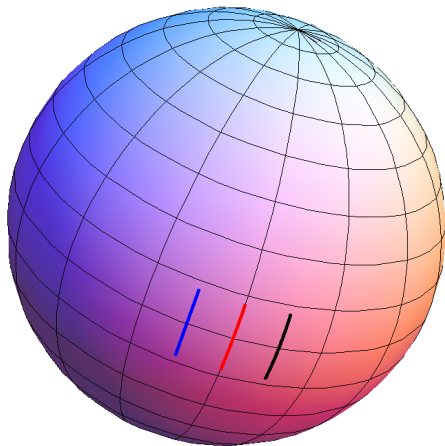
Neeukleidovská geometrie

Součet úhlů v trojúhelníku nemusí být 180 stupňů



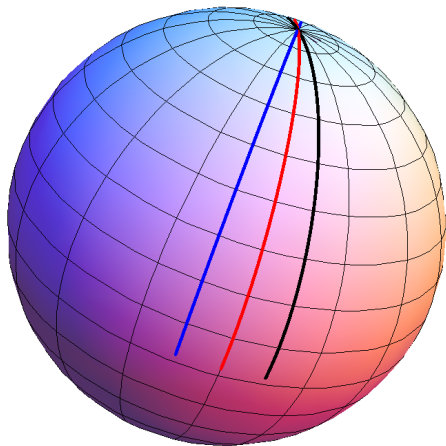
Neukleidovská geometrie

Rovnoběžky v neukleidovském prostoru se mohou protínat



Neukleidovská geometrie

Rovnoběžky v neukleidovském prostoru se mohou protínat



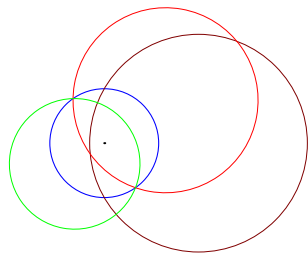
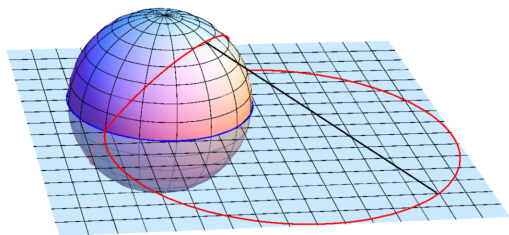
Maxwellovo rybí oko

Maxwell (1854), Luneburg (1944)

Virtuální prostor je sféra (neeuclidovský!)

Stereografická projekce zobrazuje virtuální prostor na fyzikální

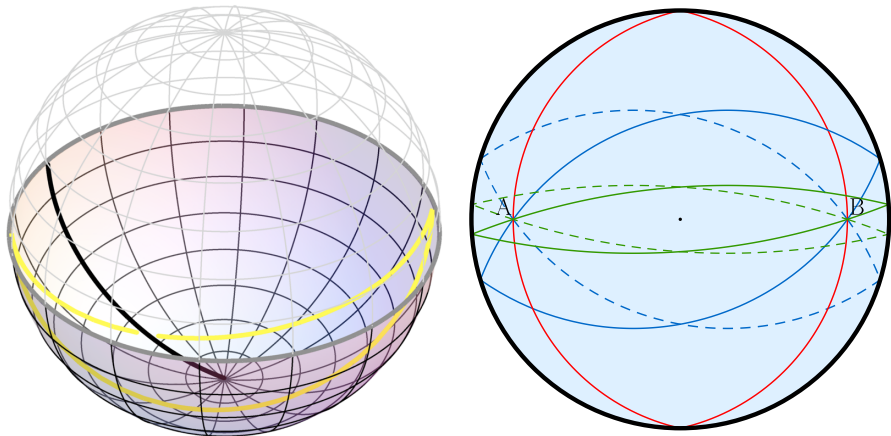
Každý bod má ostrý **obraz** !



$$n = \frac{2}{1 + r^2/a^2}$$

Maxwellovo rybí oko se zrcadlem

Umísíme zrcadlo podél rovníku virtuální sféry

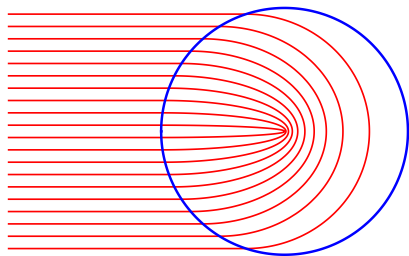


Velikost čočky a rozsah indexu lomu se zmenší, ale optické kvality zůstanou

Transmutace singularit indexu lomu

Eatonova čočka (1952) – dokonalý **retroreflektor**

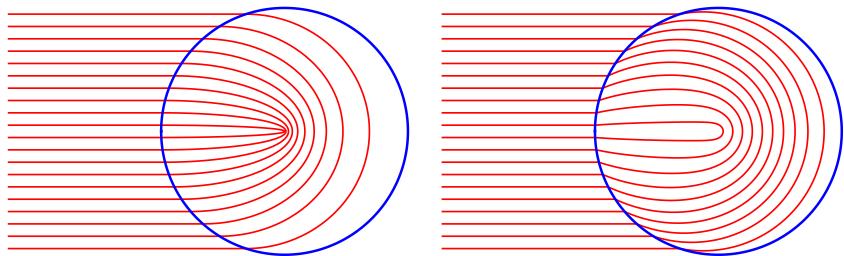
Problém: ve středu Eatonovy čočky jde **index lomu k nekonečnu**



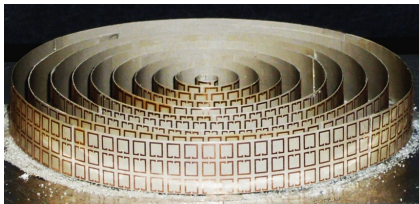
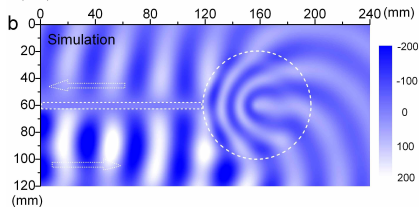
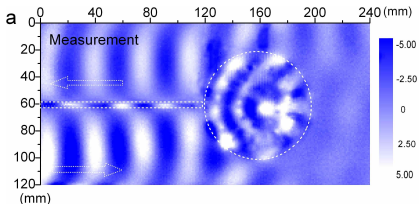
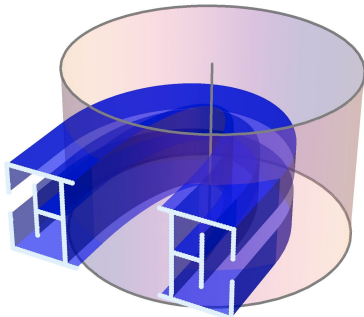
Transmutace singularit indexu lomu

Eatonova čočka (1952) – dokonalý **retroreflektor**

Problém: ve středu Eatonovy čočky jde **index lomu k nekonečnu**



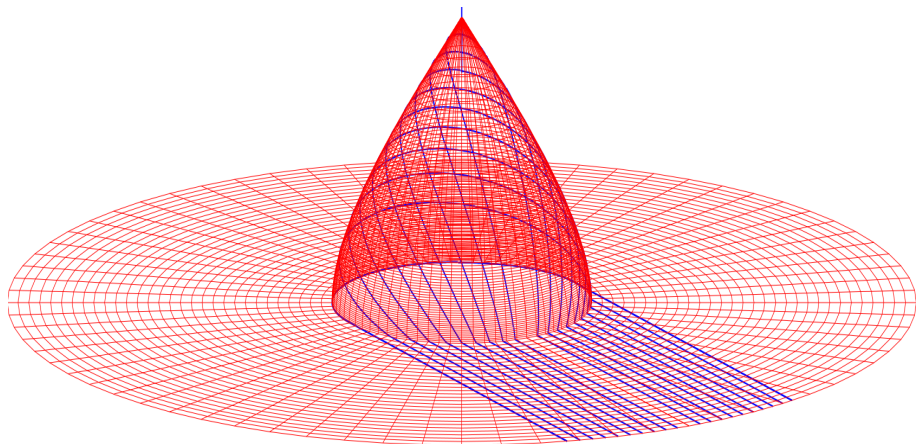
Singularitu lze ale odstranit vhodnou geometrickou transformací
[T. Tyc, U. Leonhardt, *New J. Phys.* 10, 115038 (2008)]



[Y. G. Ma, C. K. Ong, T. Tyc, U. Leonhardt, *Nature Materials* 8, 639 (2009)]

Eatonova čočka a transformační optika

Virtuální prostor pro Eatonovu čočku



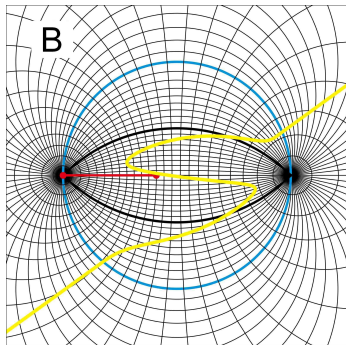
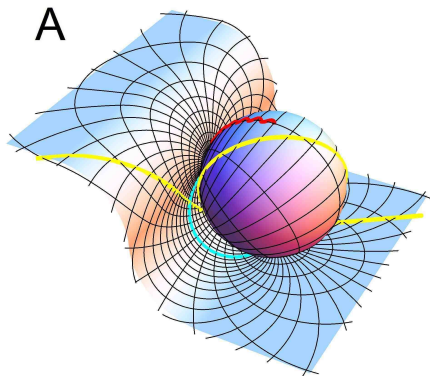
Expozice University of St Andrews a MU na Science Live v Royal Society, Londýn, červenec 2011



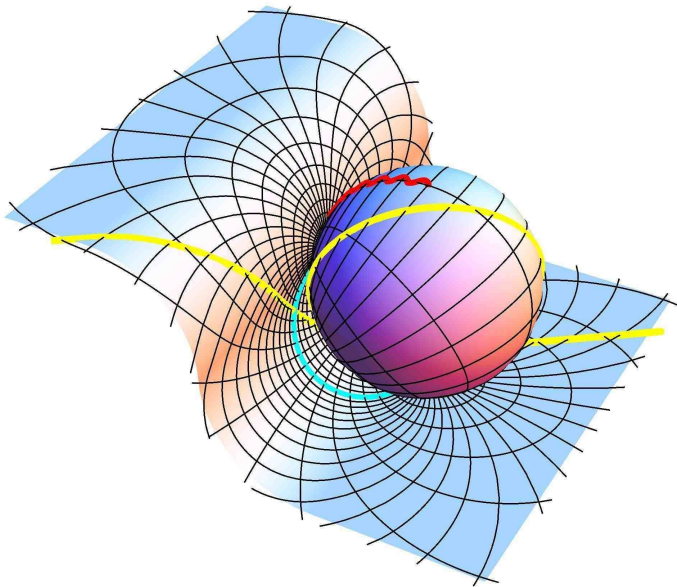


Neviditelnost využívající zakřivený prostor

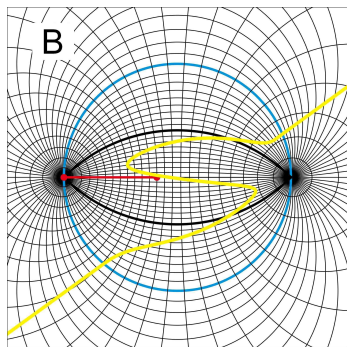
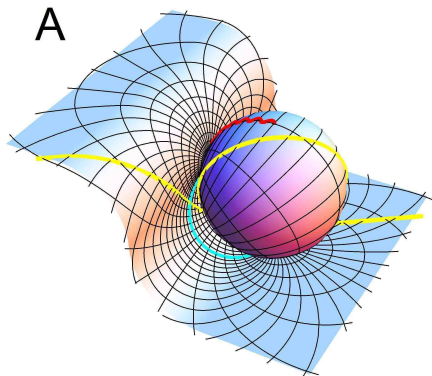
Náš návrh neviditelnosti využívá geometrii zakřiveného prostoru
[U. Leonhardt a T. Tyc, *Science* 323, 110 (2009)]



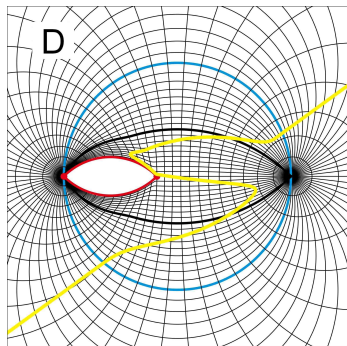
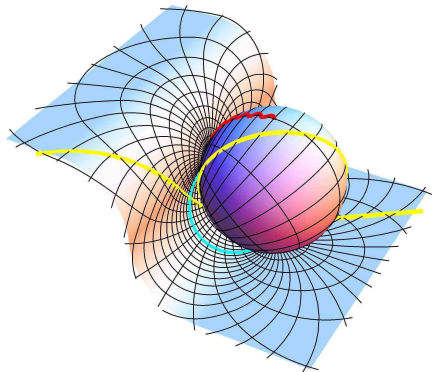
Neviditelnost využívající zakřivený prostor



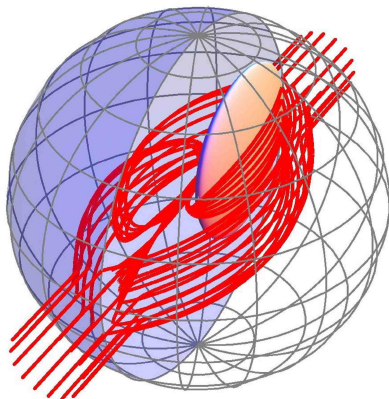
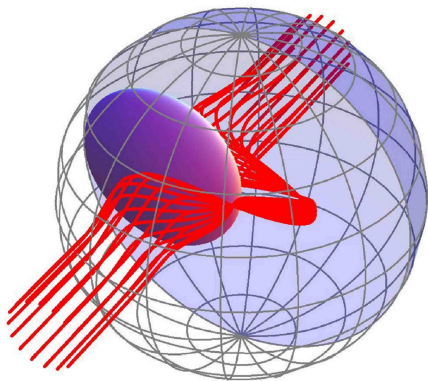
Neviditelnost využívající zakřivený prostor



Neviditelnost využívající zakřivený prostor



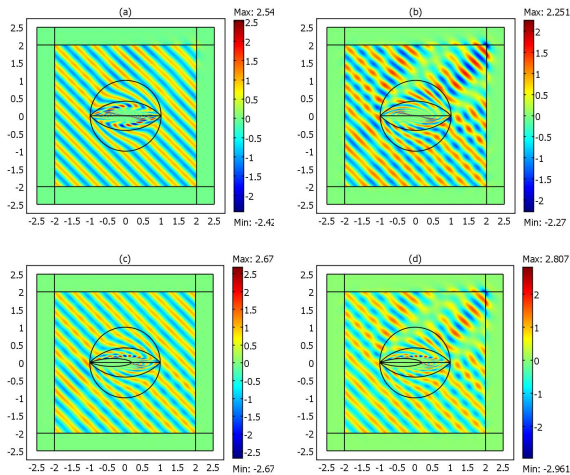
Trajektorie paprsků ve 3D



Vlny v neviditelném plášti

Numerické simulace – Huanyang Chen, Suzhou, Čína

[*T. Tyc, H. Chen, C.-T. Chan, U. Leonhardt, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 16, 418 (2010)*]



Invisibility cloaking without superluminal propagation

Janos Perczel¹, Tomáš Tyc² and Ulf Leonhardt¹

¹ School of Physics and Astronomy, University of St Andrews, North Haugh, St Andrews KY16 9SS, UK

² Faculty of Science, Kotlarska 2 and Faculty of Informatics, Botanicka 68a, Masaryk University, 61137 Brno, Czech Republic

E-mail: jp394@st-andrews.ac.uk, tomtyc@physics.muni.cz and ulf@st-andrews.ac.uk

New Journal of Physics **13** (2011) 083007 (18pp)

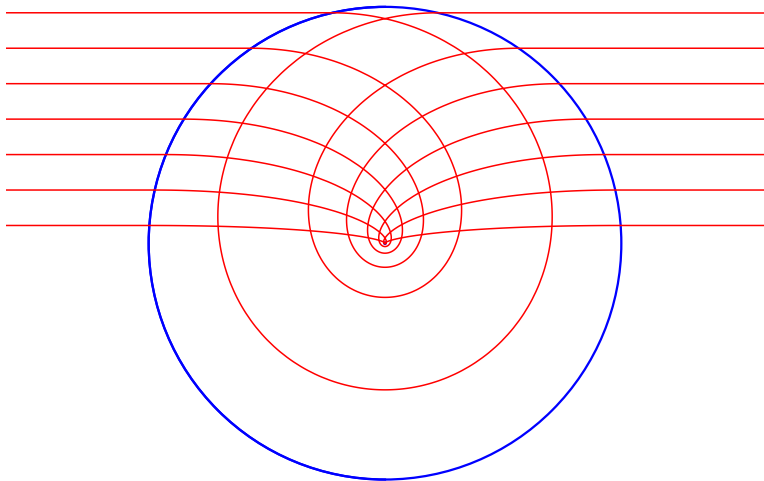
Received 1 May 2011

Published 8 August 2011

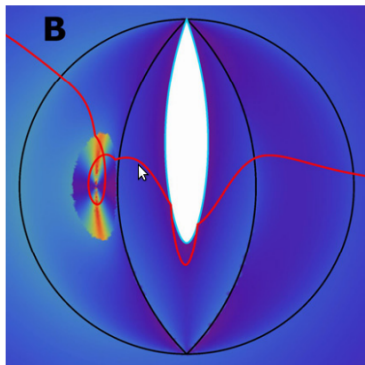
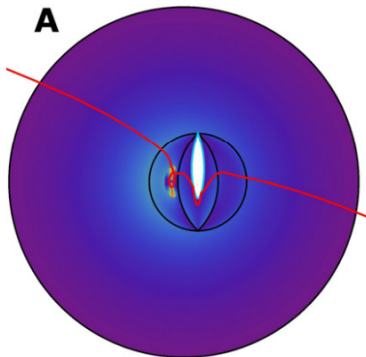
Online at <http://www.njp.org/>

doi:10.1088/1367-2630/13/8/083007

Neviditelná koule, index lomu roste směrem ke středu

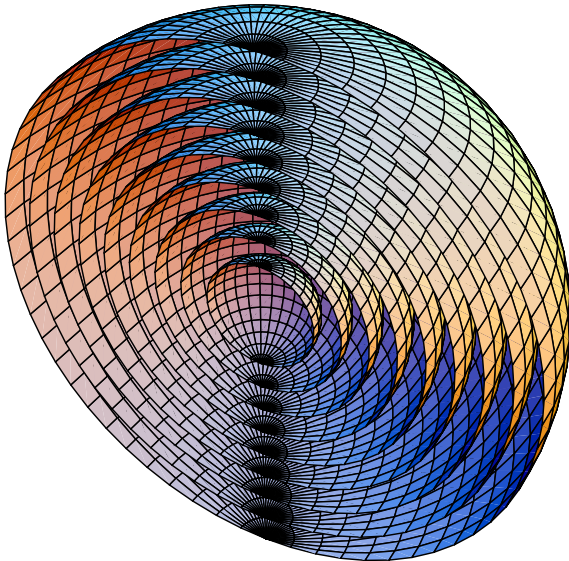


Kombinací neukleidovského pláště a neviditelné koule snížíme všude rychlost světla pod c !

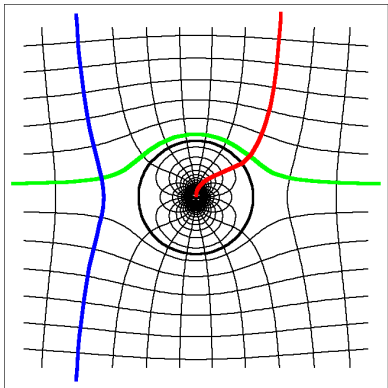


- Moderní metamateriály umožňují realizaci neviditelnosti
- Zatím lze uskutečnit pro mikrovlny, ale pracuje se na metamateriálech pro optické frekvence
- Náš nový návrh neviditelnosti – rychlost světla je všude konečná, médium není singulární
- Některé paprsky budou zpožděny
- Rychlost světla může být dokonce všude nižší než ve vakuu
- Řada krásných a názorných představ, geometrie, „jednoduchá fyzika“
- Velmi vzrušující oblast výzkumu

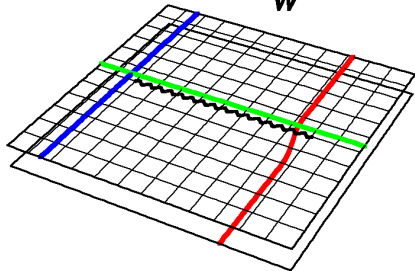
Superanténa

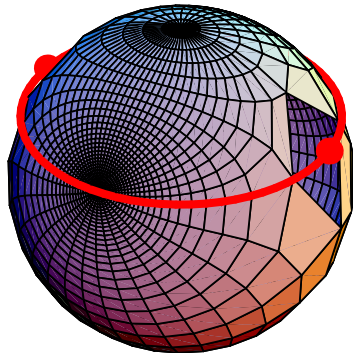
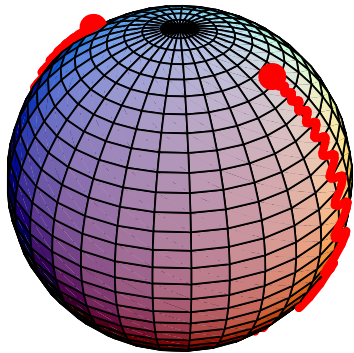


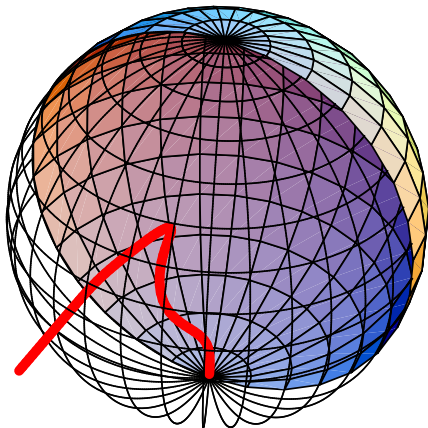
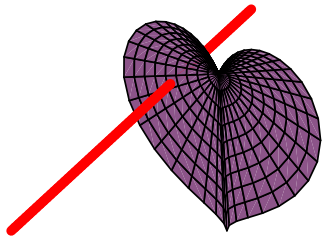
Z

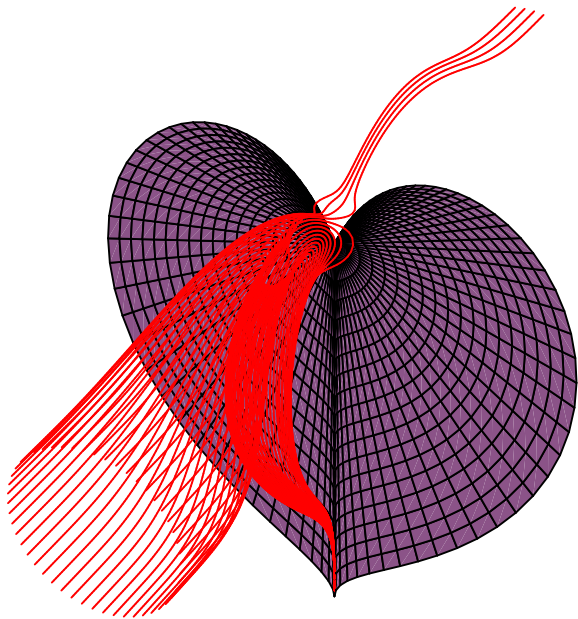


W

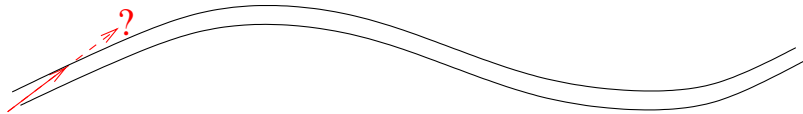




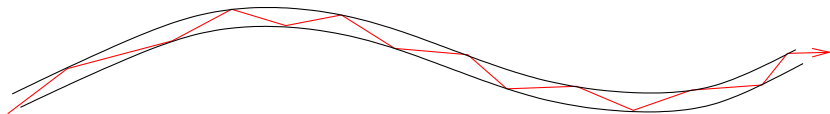




Proč světlo zůstává v optické vlákně?

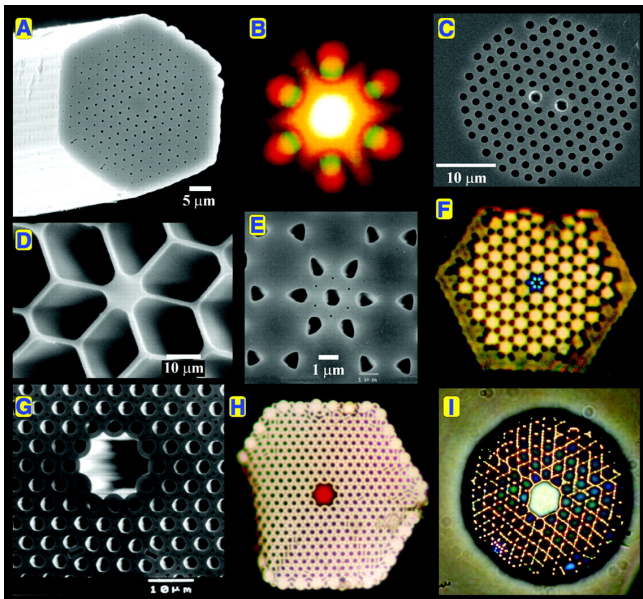


Proč světlo zůstává v optickém vlákně?



... nastává úplný odraz!

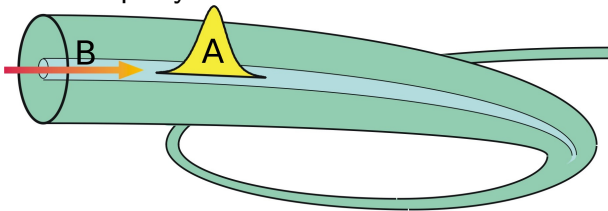
Mikrostrukturovaná optická vlákna



Černá díra v optickém vlákně

V mikrostrukturovaných vláknech lze energii pulzu koncentrovat na nepatrnou plošku

Velice silné světelné pulzy ve vlákně se mohou **ovlivňovat**



Pulz B dohání **velmi krátký pulz** A poněkud jiné barvy

Jak se B blíží k A, je pulzem A **zpomalen** a nikdy jej nemůže předhonit

Pro světlo B se tak vytvoří bariéra, kterou nemůže proniknout – podobně jako pro světlo, snažící se vymanit z gravitační **černé díry**

Pro gravitační černé díry předpovídá teorie „vypařování“ –
Hawkingovo záření – proto černé díry nejsou úplně černé

Podobný efekt očekáváme v optickém vlákně, měly by se objevit
fotony určitých vlastností

Experiment na univerzitě v St Andrews – velmi slibné výsledky

