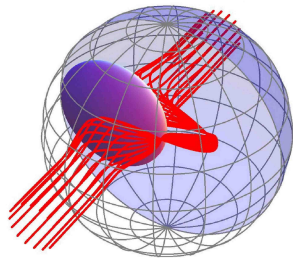
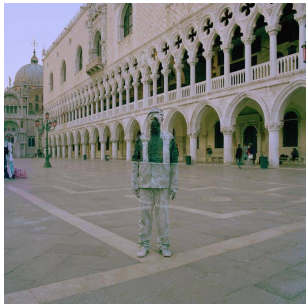


Budeme neviditelní?

Tomáš Tyc

Přírodovědecká fakulta MU



Jak učinit předmět neviditelným?

Jak učinit předmět neviditelným?

1. možnost: světlo projde **skrze objekt**

Wellsův „Neviditelný“



Jak učinit předmět neviditelným?

2. možnost: kamufláž



Jak učinit předmět neviditelným?

Neviditelný muž – Liu Bolin

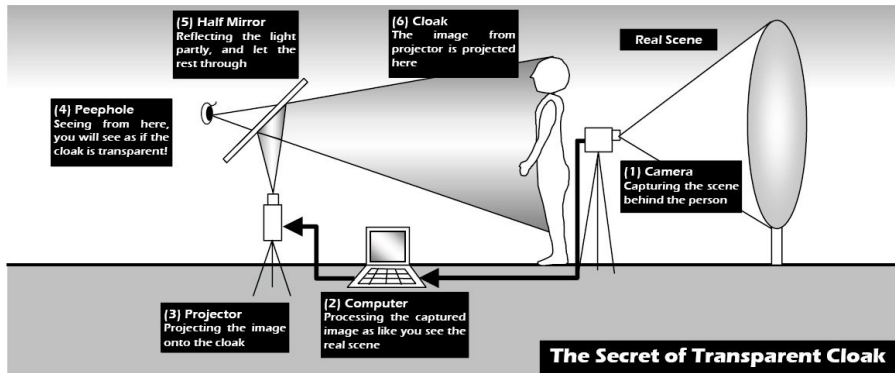


Jak učinit předmět neviditelným?



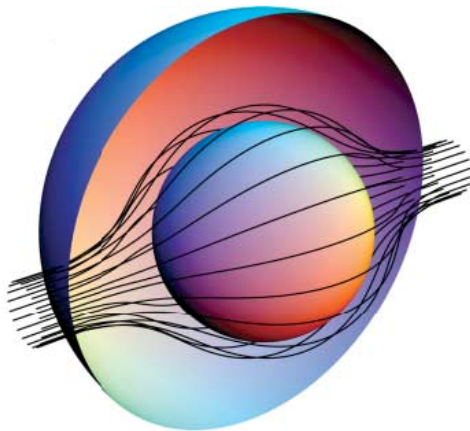
Jak učinit předmět neviditelným?

Scéna za objektem je monitorována a promítána na jeho přední stranu



Jak učinit předmět neviditelným?

3. možnost: světelné paprsky objekt **obejdou** a vrátí se do původního směru – **neviditelný plášť**



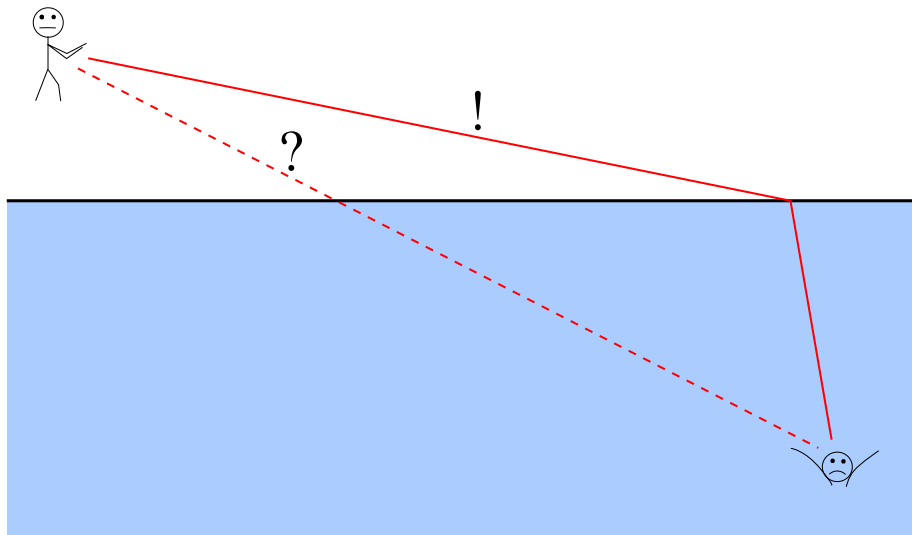
Záchrana tonoucího



?

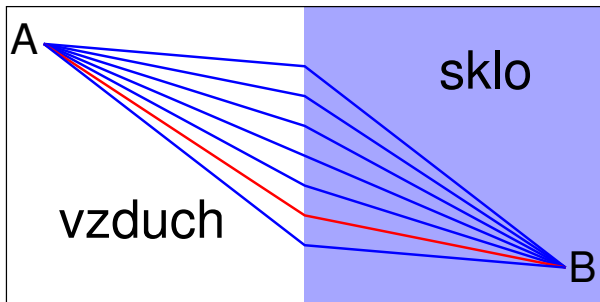


Záchrana tonoucího



Fermatův princip

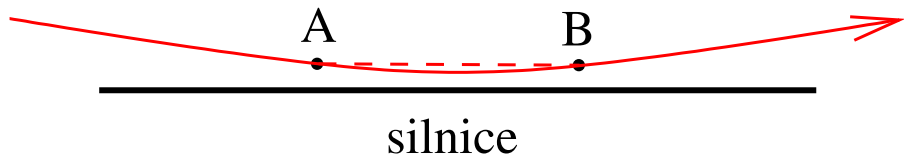
Světelné paprsky se snaží dostat z jednoho místa na druhé za nejkratší čas



Světlo minimalizuje dráhu měřenou nikoli obyčejnou délkou, ale optickou délkou

Fermatův princip

Světlo v prostředí, kde se index lomu mění spojitě



Metamateriály

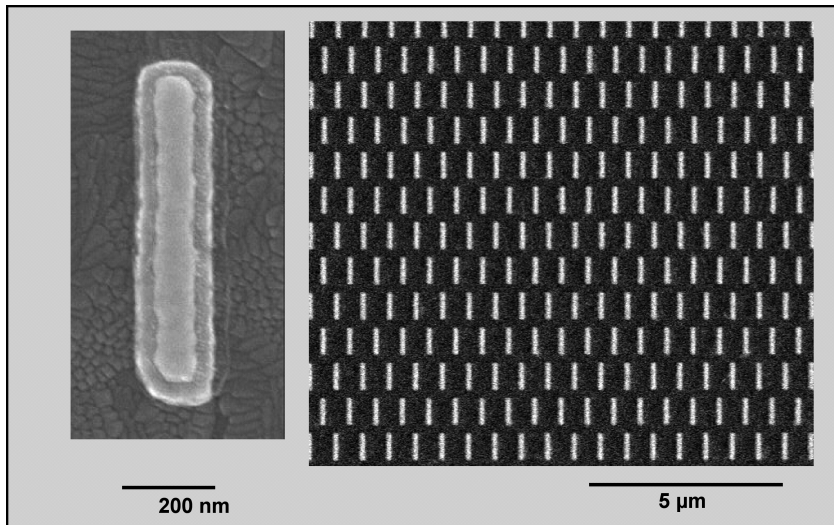
Ještě exotičtější optické vlastnosti nabízejí tzv. **metamateriály**

Světlo se může velmi zpomalit nebo naopak zrychlit

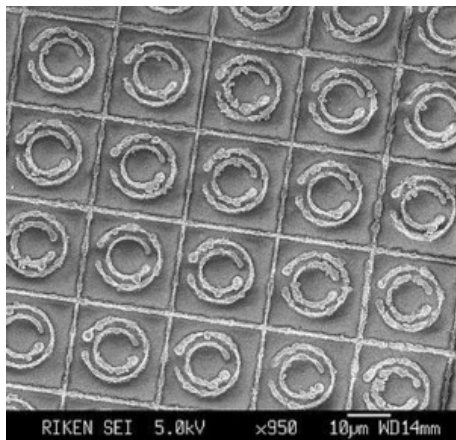
Fungují na principu „umělých atomů“

Elementy **menší než vlnová délka** použitého světla

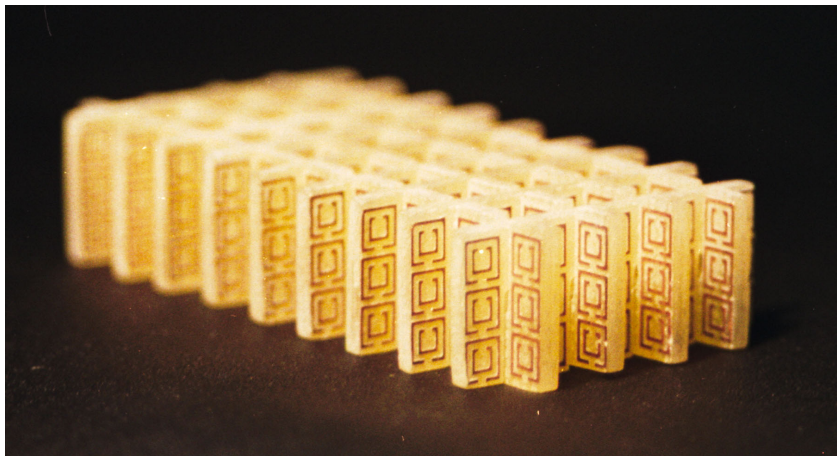
Metamateriály



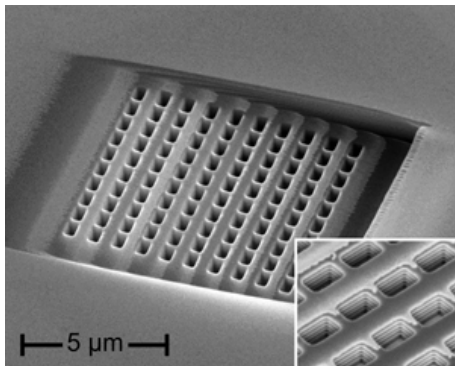
Metamateriály



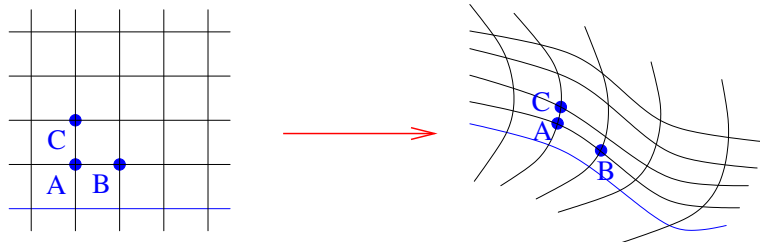
Metamateriály



Metamateriály



Transformační optika



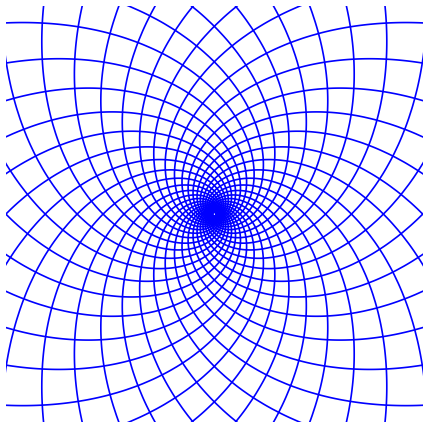
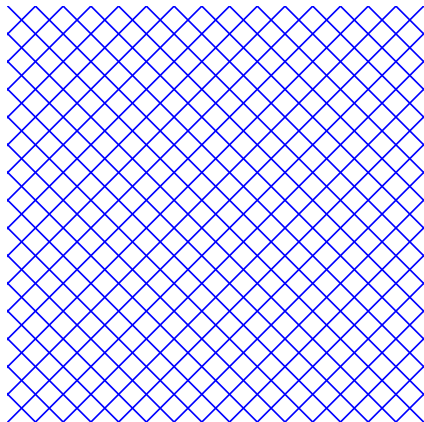
Světlo se šíří ve **virtuálním prostoru** s konstantním indexem lomu, paprsky jsou přímky

Geometrická vzdálenost se nezachovává

Pomocí vhodného optického prostředí 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“)

Transformační optika

Index lomu je obecně **anizotropní**

Je nutné mít pod kontrolou jak elektrické, tak magnetické vlastnosti materiálu

Praktická realizace – metamateriály

Dva průkopnické články:

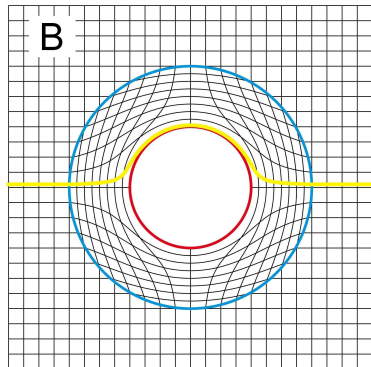
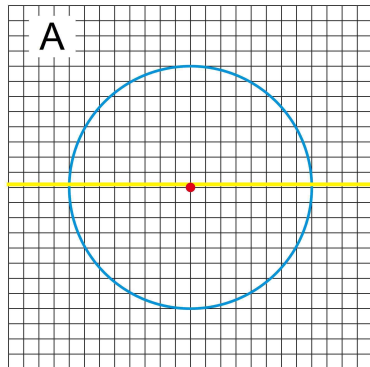
[U. Leonhardt, Science 312, 1777 (2006)]

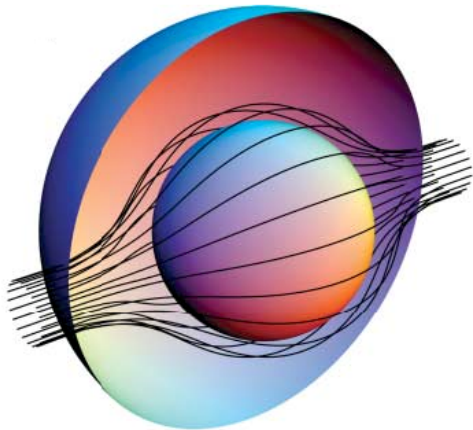
[J. B. Pendry, D. Schurig, D. R. Smith, Science 312, 1780 (2006)]

Neviditelnost

Eukleidovský neviditelný plášť

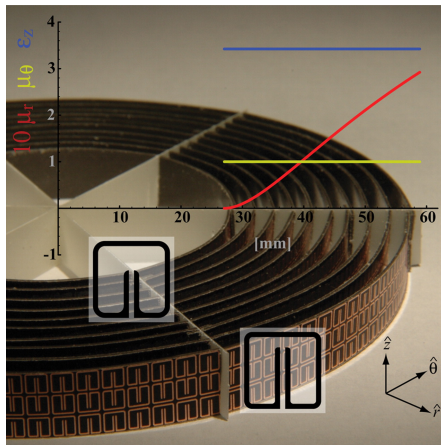
[*J. B. Pendry, D. Schurig, D. R. Smith, Science 312, 1780 (2006)*]





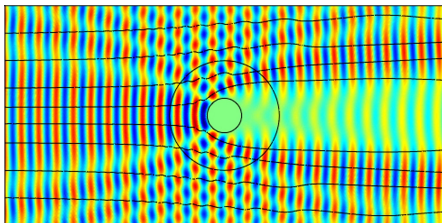
Experiment

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



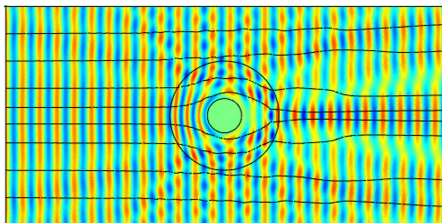
Experiment

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

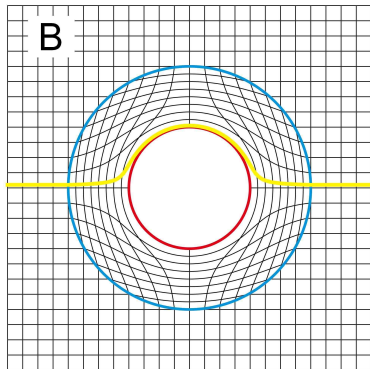
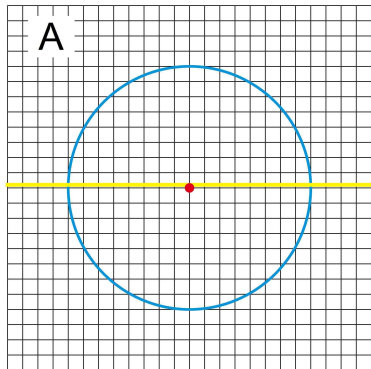


Experiment

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



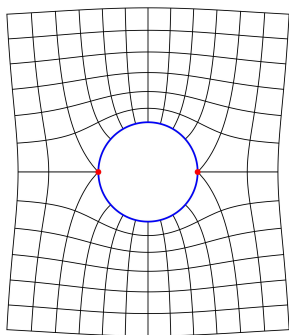
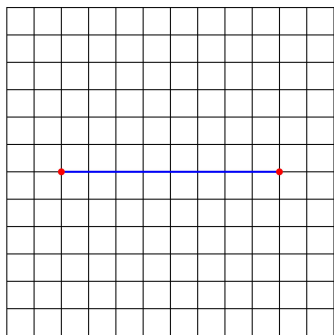
Problém



Problém – **rychlost světla** v některých místech prostoru jde k **nekonečnu** a toho lze docílit jen pro jednu barvu světla

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* (2009)];

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

Carpet cloaks ale nefungují pro všechny úhly pohledu!

Carpet cloaks ale nefungují pro všechny úhly pohledu!

Lze navrhnout všesměrový plášť bez optických singularit?

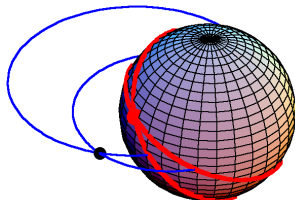
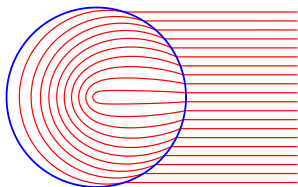
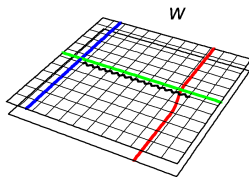
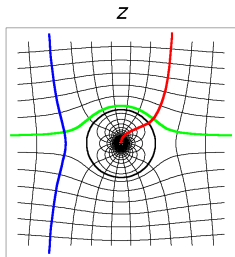
Carpet cloaks ale nefungují pro všechny úhly pohledu!

Lze navrhnout všesměrový plášť bez optických singularit?

Ano!

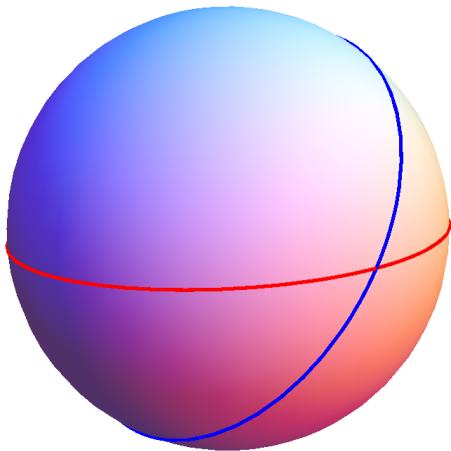
Neukleidovský plášť

Ingrediencie: Optická konformní zobrazení, transmutace singularit, neukleidovská geometrie



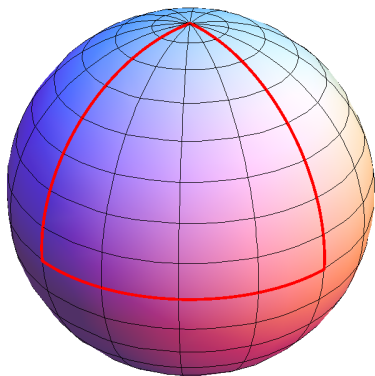
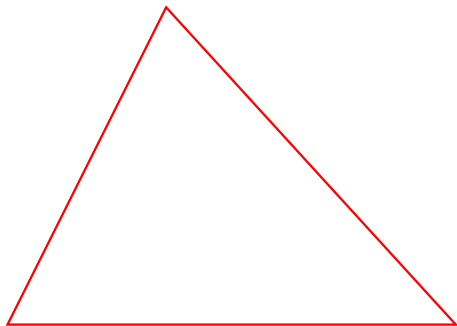
Neeukleidovská geometrie

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



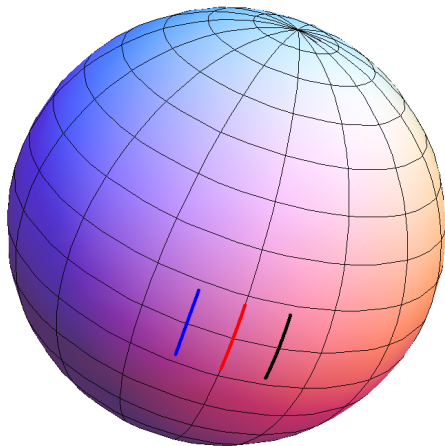
Neeukleidovská geometrie

Součet úhlů v trojúhelníku nemusí být 180 stupňů



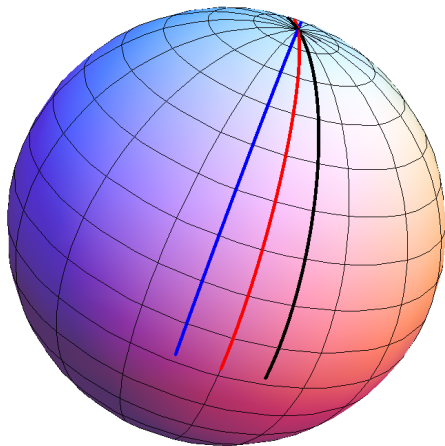
Neukleidovská geometrie

Rovnoběžky v neukleidovském prostoru se mohou protínat



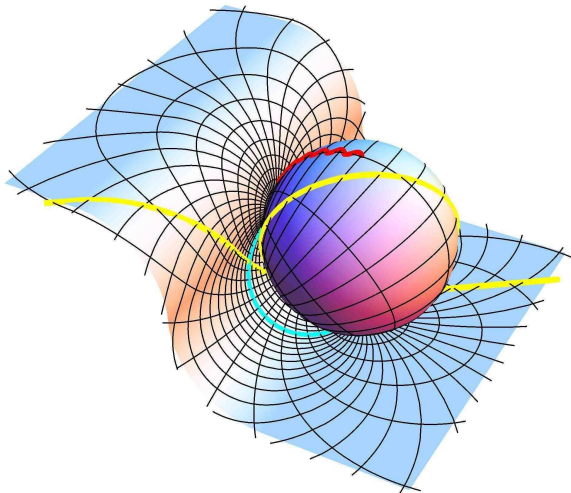
Neukleidovská geometrie

Rovnoběžky v neukleidovském prostoru se mohou protínat

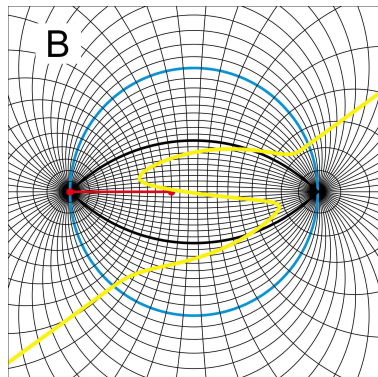
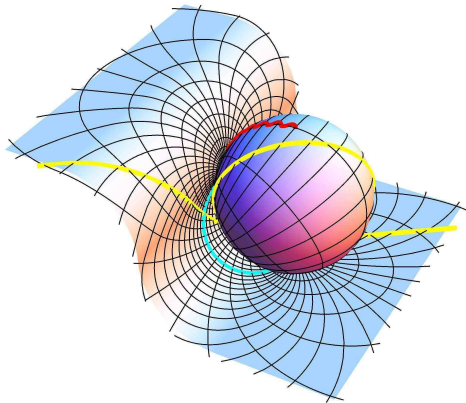


Neviditelnost využívající zakřivený prostor

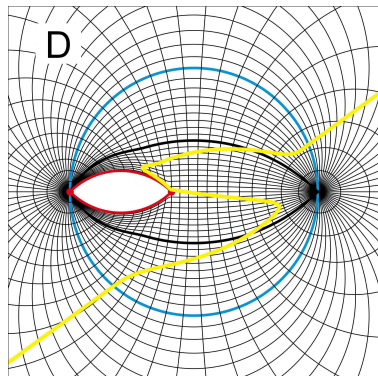
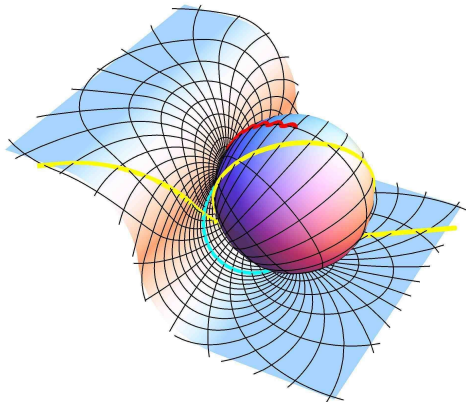
Náš návrh neviditelnosti využívá geometrii zakřiveného prostoru
[*U. Leonhardt a T. Tyc, Science 323, 110 (2009)*]



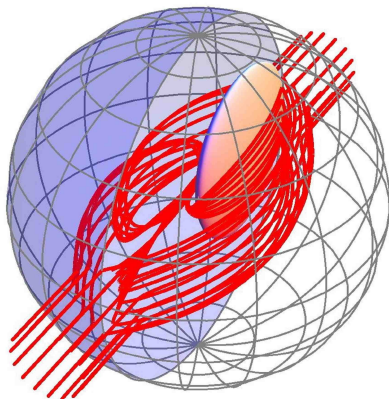
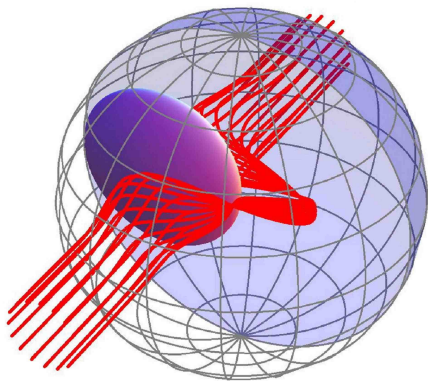
Neviditelnost využívající zakřivený prostor



Neviditelnost využívající zakřivený prostor



Trajektorie paprsků ve 3D



New Journal of Physics

The open-access journal for physics

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

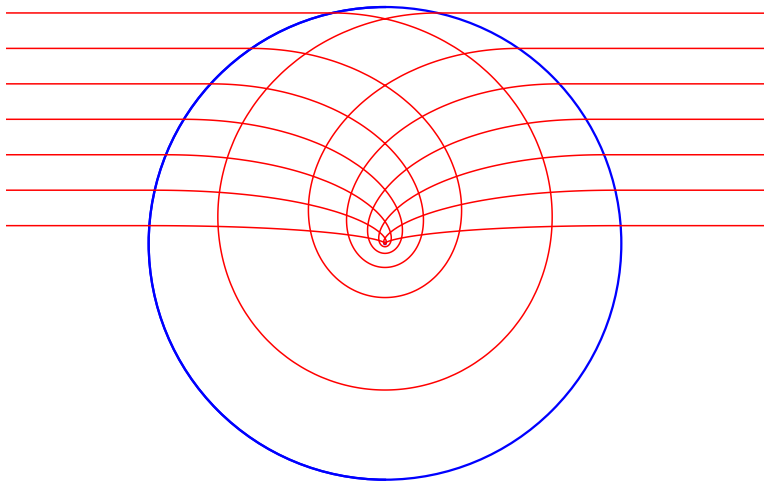
Published 8 August 2011

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

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

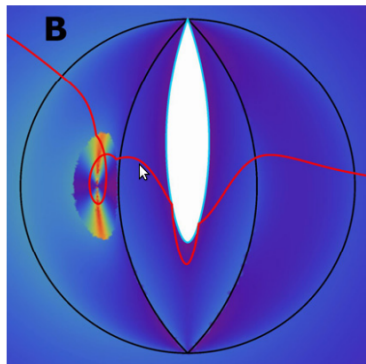
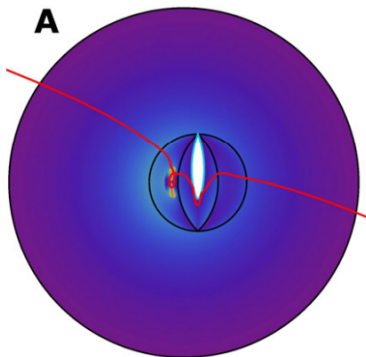
Plášť s rychlostí světla všude menší než ve vakuu

Neviditelná koule, index lomu roste směrem ke středu



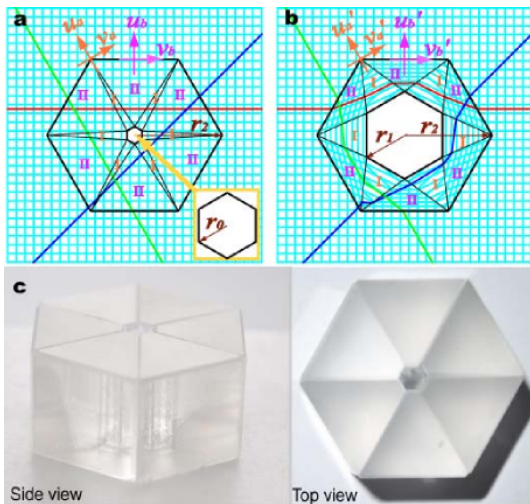
Plášť s rychlostí světla všude menší než ve vakuu

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

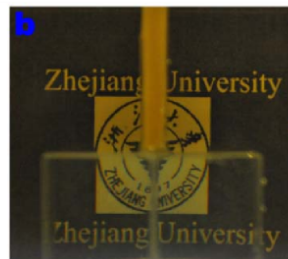
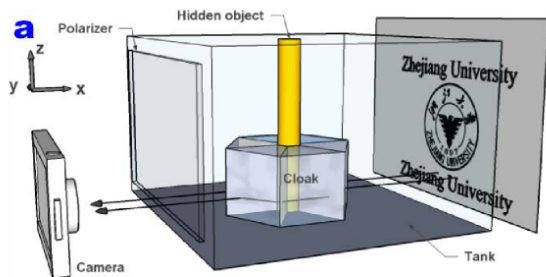


Mnohoúhelníkový plášť

[H. Chen, B. Zheng, *Scientific Reports* 2, 255 (2012)]



Mnohoúhelníkový plášť



Nevýhody neviditelného pláště

Neviditelné pláště jsou zajímavé, ale mají i své nevýhody

Nevýhody neviditelného pláště

Neviditelné pláště jsou zajímavé, ale mají i své nevýhody

V plášti by nešlo se pohybovat

Nevýhody neviditelného pláště

Neviditelné pláště jsou zajímavé, ale mají i své nevýhody

V plášti by nešlo se pohybovat

Neviditelný by neviděl ven

Nevýhody neviditelného pláště

Neviditelné pláště jsou zajímavé, ale mají i své nevýhody

V plášti by nešlo se pohybovat

Neviditelný by neviděl ven

Nemohl by k němu vzduch, takže by se po čase udusil

Nevýhody neviditelného pláště

Neviditelné pláště jsou zajímavé, ale mají i své nevýhody

V plášti by nešlo se pohybovat

Neviditelný by neviděl ven

Nemohl by k němu vzduch, takže by se po čase udusil

Velmi omezené využití, pokud vůbec nějaké

Nevýhody neviditelného pláště

Kolik elementů obsahuje 1 m³ pláště?

Jeden element: $\frac{1}{5000}$ mm

Na 1 metr ... 5 000 000 elementů

Na 1 metr krychlový ... $5\,000\,000^3 =$
 $125\,000\,000\,000\,000\,000\,000 = 1,25 \cdot 10^{20}$ elementů

Od Velkého třesku uplynulo asi 15 miliard let = $4,4 \cdot 10^{17}$ sekund

Vyrobít 300 elementů každou sekundu od Velkého třesku až doteď!

- Moderní optika ukázala, že neviditelnost je možná
- Metamateriály slibují její realizaci
- Zatím ji lze uskutečnit jen pro mikrovlny, ale pracuje se na metamateriálech pro optické frekvence
- Neeukleidovský plášť umožňuje funkčnost pro širší oblast spektra
- Prakticky – neuvěřitelně drahá věc, která se téměř k ničemu nehodí
- Teorie neviditelnosti je ale velmi krásná
- Další cesty – holografická neviditelnost, . . .

