

O Índice de Refração: Metamateriais e o Manto da Invisibilidade?

Raimundo Rocha dos Santos
IF/UFRJ
rrds@if.ufrj.br



Apoio financeiro:



Background picture from NI
Zheludev, OPN, March 2011

ÚLTIMAS NOTÍCIAS [\(11:00\) Com Neymar discreto, moicano de El Shaarawy vira o centro das atenções](#)

LOGIN CADASTRE-SE
PESQUISAR

RIO DE JANEIRO
Sol entre nuvens
MÁXIMA: 30° / MÍNIMA: 16°

CAPA PAÍS RIO ECONOMIA MUNDO TECNOLOGIA CULTURA ESPORTES MAIS +
TÓPICOS [COPA DAS CONFEDERAÇÕES](#) • [BRASILEIRÃO 2013](#) • [JORNADA MUNDIAL DA JUVENTUDE](#)

MORTE SOBRE RODAS

Acidente com ônibus escolar mata duas crianças e fere 21 no interior do Estado do Rio

Desastre aconteceu na RJ-140, entre Silva Jardim e Casemiro de Abreu



Trânsito: perda de R\$ 800 mil em acidente fatal

Para cada vítima em situação grave, valor, em média, é de R\$ 200 mil, segundo Ipea

Artigo: Trânsito de paulista, por Gilberto Scofield Jr.

Trofes representam 12% de todas as ligações recebidas pelo Corpo de Bombeiros no estado

Choque entre carro e ônibus na Avenida Beira Mar complica o trânsito na Zona Sul do Rio

Sete pessoas ficaram feridas na Glória. Via segue parcialmente fechada no sentido Centro

Empresa responsável por material que caiu na Av. Brasil pode perder direito de transportar cargas no Rio

Val Rio: baixe o aplicativo de trânsito do GLOBQ



Bairros Espalhe uma onda de romantismo no Dia dos Namorados

Confederações Seleção treina com portões abertos para o público

Dólar abre em queda, a R\$ 2,12, seguindo o mercado externo

Moedas de países emergentes têm dia de recuperação, após avanço do dólar nos últimos dias

[Dólar rouba lucro de empresas](#)

Preparação para o Mundial de 2014 em câmera lenta

A contagem de regresso, falta um ano para o início da Copa

[Engenhão: Reforma ainda não tem data para começar](#)

Conselho teme uso do FGTS em novo programa do governo

Conselheiros temem desvio do fundo de garantia para financiar compra de móveis e eletrodomésticos

Gigantes de TI pedem transparência ao governo dos EUA

Microsoft, Twitter, Facebook e Google querem divulgar detalhes sobre acesso oficial a dados dos usuários

Artigo: O futuro do jornalismo estava na Gávea, por Elio Gaspari
["Fala que eu te escuto"](#)

Premier turco se reúne com manifestantes após expulsão de praça

Pelo menos 200 policiais permanecem nas proximidades do Parque Gezi, depois da retirada à força dos manifestantes

Invisibilidade à vista Cientista faz filho desaparecer

PUBLICIDADE

COMPROU, GANHOU!
ARMÁRIOS PARA TODO O APARTAMENTO. OPORTUNIDADE LIMITADA.

11:00 12/06/13 ANCELMO.COM A versão de Vera Gimenez



+ BLOGS E COLUNISTAS

PATRICIA KOGUT
["O melhor do Brasil" espera aval do Juizado de Menores para quarto](#)
11:00 12/06/13



BLOG DO NOBLAT
[A charge de Chico Caruso](#)
10:30 12/06/13



BLOG DO MERVAL
[Fora da zona de conforto](#)
10:19 12/06/13



BLOG DO XEXÉO
[Bolsonaro, o homem](#)
06:00 12/06/13



RENATO M. PRADO
[Desejo inconfidido](#)
10:12 11/06/13



RÁDIO DO MORENO
[Justiça cara](#)
09:31 11/06/13



[VER TODOS OS BLOGS](#)

notícias esportes entretenimento vídeos

CENTRAL E-MAIL ENTRAR >

PRINCÍPIOS EDITORIAIS | EDIÇÃO DIGITAL | CELULAR | KINDLE | IPAD

ULTIMAS NOTÍCIAS (11:00) Com Neymar discreto, moicano de El Shaarawy vira o centro das atenções

LOGIN CADASTRE-SE

PESQUISAR OK

RIO DE JANEIRO
Sol entre nuvens
MÁXIMA: 30° / MÍNIMA: 16°

CAPA PAÍS RIO ECONOMIA MUNDO TECNOLOGIA CULTURA ESPORTES MAIS +

TÓPICOS COPA DAS CONFEDERAÇÕES • BRASILEIRÃO 2013 • JORNADA MUNDIAL DA JUVENTUDE

MORTE SOBRE RODAS

Acidente com ônibus escolar mata duas crianças e fere 21 no interior do Estado do Rio

Desastre aconteceu na RJ-140, entre Silva Jardim e Casemiro de Abreu



Trânsito: perda de R\$ 800 mil em acidente fatal

Para cada vítima em situação grave, valor, em média, é de R\$ 200 mil, segundo Ipea

Artigo: Trânsito de paulista, por Gilberto Scofield Jr.

Trofes representam 12% de todas as ligações recebidas pelo Corpo de Bombeiros no estado

Choque entre carro e ônibus na Avenida Beira Mar complica o trânsito na Zona Sul do Rio

Sete pessoas ficaram feridas na Glória. Via segue parcialmente fechada no sentido Centro

Empresa responsável por material que caiu na Av. Brasil pode perder direito de transportar cargas no Rio

Val Rio: baixe o aplicativo de trânsito do GLOBQ



Bairros Espalhe uma onda de romantismo no Dia dos Namorados

Confederações Seleção treina com portões abertos para o público

Dólar abre em queda, a R\$ 2,12, seguindo o mercado externo

Moedas de países emergentes têm dia de recuperação, após avanço do dólar nos últimos dias

Dólar rouba lucro de empresas

Preparação para o Mundial de 2014 em câmera lenta

A contar de hoje, falta um ano para o início da Copa

Engenhão: Reforma ainda não tem data para começar

Conselho teme uso do FGTS em novo programa do governo

Conselheiros temem desvio do fundo de garantia para financiar compra de móveis e eletrodomésticos

Gigantes de TI pedem transparência ao governo dos EUA

Microsoft, Twitter, Facebook e Google querem divulgar detalhes sobre acesso oficial a dados dos usuários

Artigo: O futuro do jornalismo estava na Gávea, por Elio Gaspari "Fala que eu te escuto"

Premier turco se reúne com manifestantes após expulsão de praça

Pelo menos 200 policiais permanecem nas proximidades do Parque Gezi, depois da retirada à força dos manifestantes

Invisibilidade à vista Cientista faz filho desaparecer

PUBLICIDADE

COMPROU, GANHOU!
ARMÁRIOS PARA TODO O APARTAMENTO. OPORTUNIDADE LIMITADA.

11:00 12/06/13

ANCELMO.COM A versão de Vera Gimenez



+ BLOGS E COLUNISTAS

PATRICIA KOGUT

"Conselho do Brasil" espera aval do

Julgado de Menores para quarto

11:00 12/06/13



BLOG DO NOBLAT

A charge de Chico Caruso

10:30 12/06/13



BLOG DO MERVAL

Fora da zona de conforto

10:19 12/06/13



BLOG DO XEXÉO

Buscador, o nemieno

06:00 12/06/13



RENATO M. PRADO

Desejo inconfidido

10:12 11/06/13



RÁDIO DO MORENO

Justiça cara

09:31 11/06/13



VER TODOS OS BLOGS

MORTE SOBRE RODAS

Acidente com ônibus escolar mata duas crianças e fere 21 no interior do Estado do Rio

Desastre aconteceu na RJ-140, entre Silva Jardim e Casemiro de Abreu



Trânsito: perda de R\$ 800 mil em acidente fatal

Para cada vítima em situação grave, valor, em média, é de R\$ 200 mil, segundo Ipea

Artigo: Trânsito de paulista, por Gilberto Scofield Jr.

Trofes representam 12% de todas as ligações recebidas pelo Corpo de Bombeiros no estado

Choque entre carro e ônibus na Avenida Beira Mar complica o trânsito na Zona Sul do Rio

Sete pessoas ficaram feridas na Glória. Via segue parcialmente fechada no sentido Centro

Empresa responsável por material que caiu na Av. Brasil pode perder direito de transportar cargas no Rio

Val Rio: baixe o aplicativo de trânsito do GLOBO



Bairros Espalhe uma onda de romantismo no Dia dos Namorados

Confederações Seleção treina com portões abertos para o público

Dólar abre em queda, a R\$ 2,12, seguindo o mercado externo

Moedas de países emergentes têm dia de recuperação, após avanço do dólar nos últimos dias

Dólar rouba lucro de empresas

Preparação para o Mundial de 2014 em câmera lenta

A contagem de regresso, falta um ano para o início da Copa

Engenhão: Reforma ainda não tem data para começar

Conselho teme uso do FGTS em novo programa do governo

Conselheiros temem desvio do fundo de garantia para financiar compra de móveis e eletrodomésticos

Gigantes de TI pedem transparência ao governo dos EUA

Microsoft, Twitter, Facebook e Google querem divulgar detalhes sobre acesso oficial a dados dos usuários

Artigo: O futuro do jornalismo estava na Gávea, por Elio Gaspari "Fala que eu te escuto"

Premier turco se reúne com manifestantes após expulsão de praça

Pelo menos 200 policiais permanecem nas proximidades do Parque Gezi, depois da retirada da força dos manifestantes

Invisibilidade à vista Cientista faz filho desaparecer

PUBLICIDADE
COMPROU, GANHOU!
ARMÁRIOS PARA TODO O APARTAMENTO. OPORTUNIDADE LIMITADA.

11:00 12/06/13
ANCELMO.COM
A versão de Vera Gimenez

• BLOGS E COLUNISTAS
PATRICIA KOGUT
"Comer" do Brasil: espera aval de Juiz de Menores para quarto
11:00 12/06/13

BLOG DO NORLAT
A charge de Chico Caruso
10:30 12/06/13

BLOG DO MERVAL
Essa zona de conforto
07:19 12/06/13

BLOG DO XEXÉO
Bolsonaro: o primeiro
06:00 12/06/13

RENATO M. PRADO
Desejo incoerente
10:12 11/06/13

RÁDIO DO MORENO
Justiça cara
09:31 11/06/13

VER TODOS OS BLOGS

Invisibilidade à vista Cientista faz filho desaparecer



Técnica com espelhos e luz pode ser usada para esconder policiais

Esboço do seminário

Esboço do seminário

- Noção de campo

Esboço do seminário

- Noção de campo
- O campo eletromagnético

Esboço do seminário

- Noção de campo
- O campo eletromagnético
- Ondas eletromagnéticas (EM)

Esboço do seminário

- Noção de campo
- O campo eletromagnético
- Ondas eletromagnéticas (EM)
- Ondas EM em meios materiais: índice de refração; dispersão.

Esboço do seminário

- Noção de campo
- O campo eletromagnético
- Ondas eletromagnéticas (EM)
- Ondas EM em meios materiais: índice de refração; dispersão.
- Refração negativa e Metamateriais

Esboço do seminário

- Noção de campo
- O campo eletromagnético
- Ondas eletromagnéticas (EM)
- Ondas EM em meios materiais: índice de refração; dispersão.
- Refração negativa e Metamateriais
- Consequências

Esboço do seminário

- Noção de campo
- O campo eletromagnético
- Ondas eletromagnéticas (EM)
- Ondas EM em meios materiais: índice de refração; dispersão.
- Refração negativa e Metamateriais
- Consequências
- Conclusões

O Método Científico

A FÍSICA É UMA CIÊNCIA
EXPERIMENTAL, CUJA
LINGUAGEM É A
MATEMÁTICA

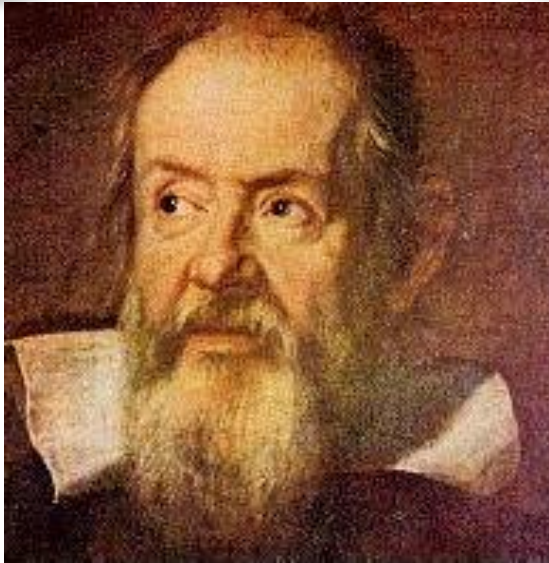


Galileu Galilei

O Método Científico

Observação do fenômeno

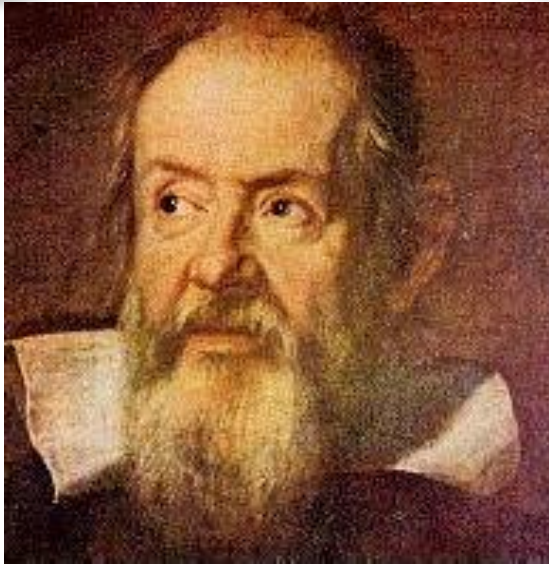
A FÍSICA É UMA CIÊNCIA
EXPERIMENTAL, CUJA
LINGUAGEM É A
MATEMÁTICA



Galileu Galilei

O Método Científico

A FÍSICA É UMA CIÊNCIA
EXPERIMENTAL, CUJA
LINGUAGEM É A
MATEMÁTICA



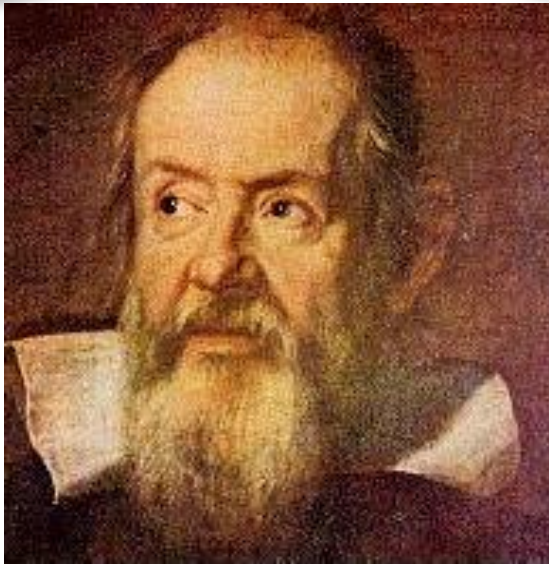
Galileu Galilei

Observação do fenômeno



O Método Científico

A FÍSICA É UMA CIÊNCIA
EXPERIMENTAL, CUJA
LINGUAGEM É A
MATEMÁTICA



Galileu Galilei

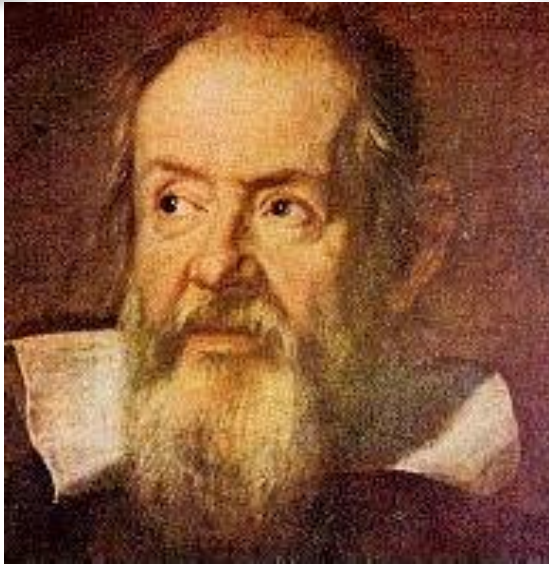
Observação do fenômeno



Experimentação

O Método Científico

A FÍSICA É UMA CIÊNCIA
EXPERIMENTAL, CUJA
LINGUAGEM É A
MATEMÁTICA



Galileu Galilei

Observação do fenômeno

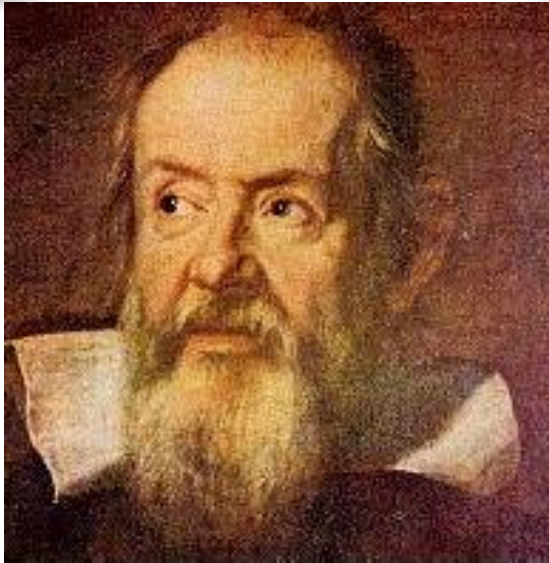


Experimentação



O Método Científico

A FÍSICA É UMA CIÊNCIA
EXPERIMENTAL, CUJA
LINGUAGEM É A
MATEMÁTICA



Galileu Galilei

Observação do fenômeno



Experimentação



Modelagem

O Método Científico

A FÍSICA É UMA CIÊNCIA
EXPERIMENTAL, CUJA
LINGUAGEM É A
MATEMÁTICA



Galileu Galilei

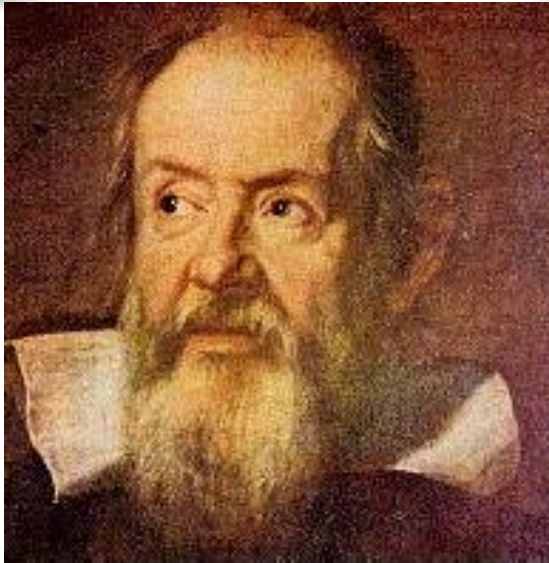
Observação do fenômeno

Experimentação

Modelagem

O Método Científico

A FÍSICA É UMA CIÊNCIA
EXPERIMENTAL, CUJA
LINGUAGEM É A
MATEMÁTICA



Galileu Galilei

Observação do fenômeno

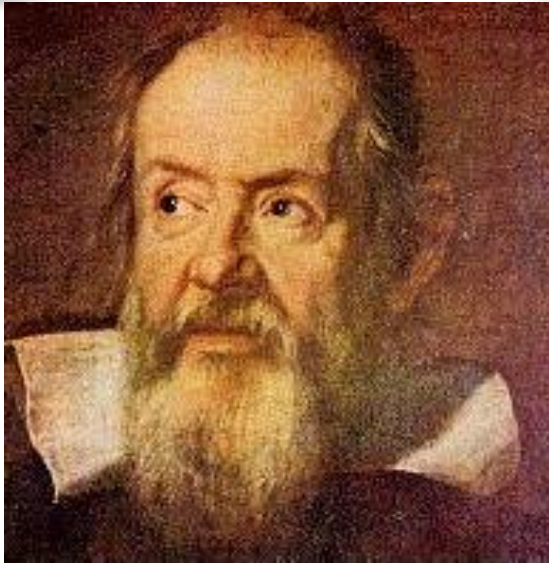
Experimentação

Modelagem

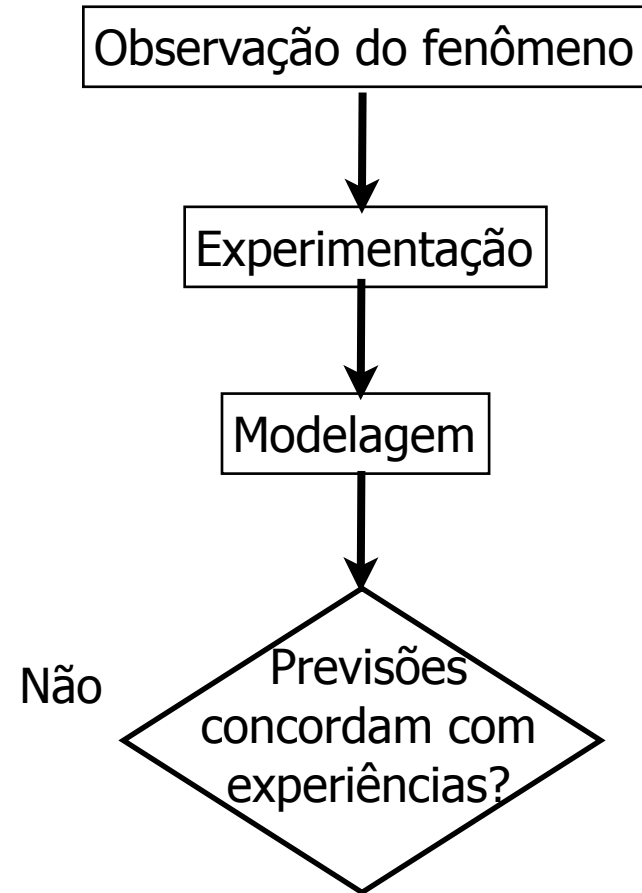
Previsões
concordam com
experiências?

O Método Científico

A FÍSICA É UMA CIÊNCIA
EXPERIMENTAL, CUJA
LINGUAGEM É A
MATEMÁTICA

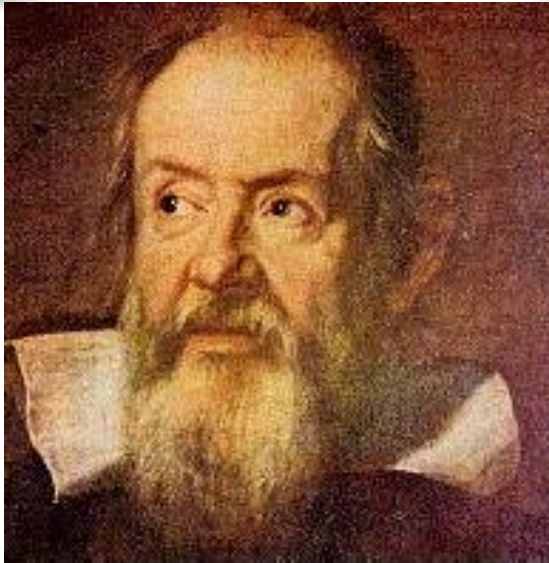


Galileu Galilei

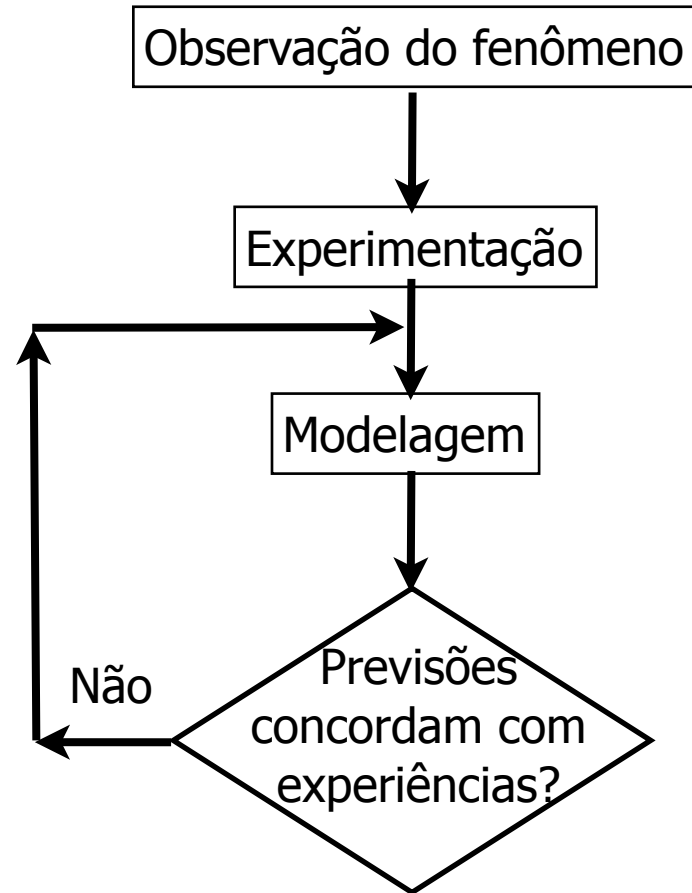


O Método Científico

A FÍSICA É UMA CIÊNCIA
EXPERIMENTAL, CUJA
LINGUAGEM É A
MATEMÁTICA

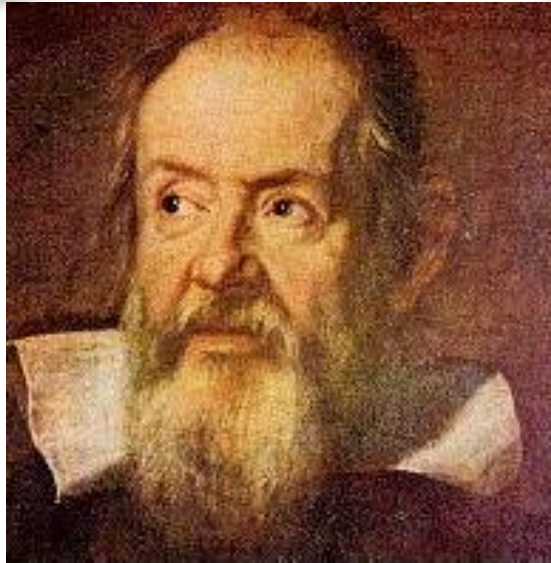


Galileu Galilei

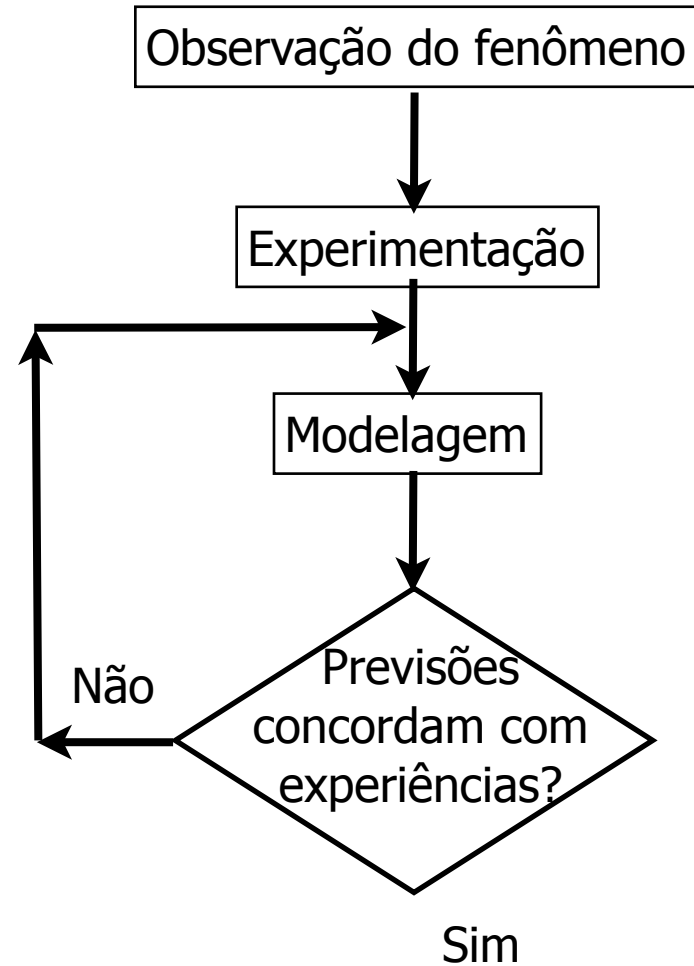


O Método Científico

A FÍSICA É UMA CIÊNCIA
EXPERIMENTAL, CUJA
LINGUAGEM É A
MATEMÁTICA



Galileu Galilei

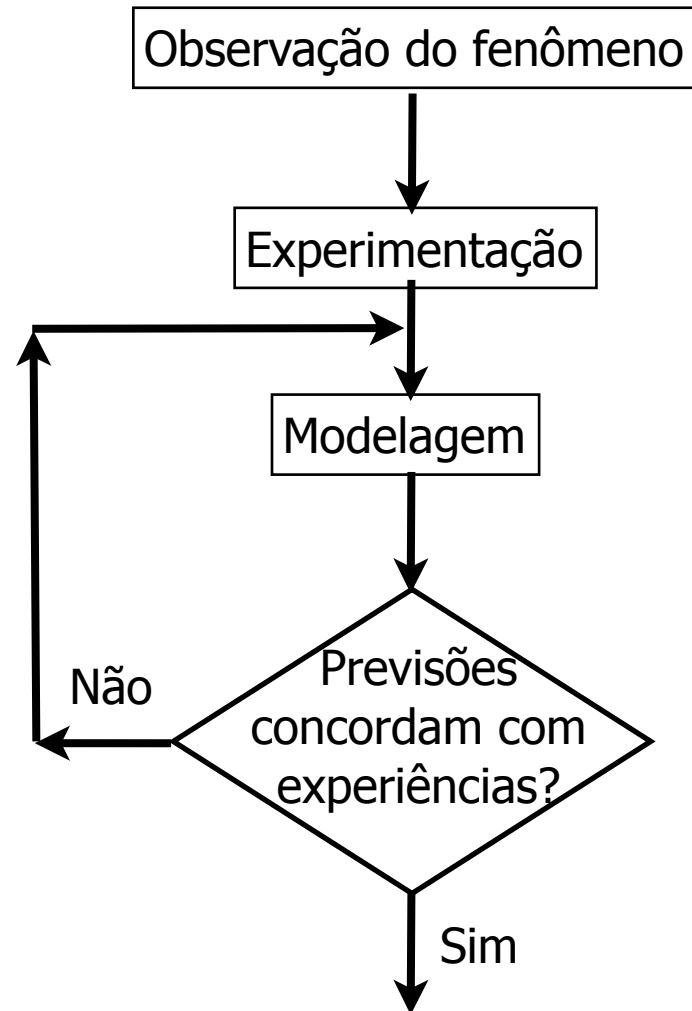


O Método Científico

A FÍSICA É UMA CIÊNCIA
EXPERIMENTAL, CUJA
LINGUAGEM É A
MATEMÁTICA



Galileu Galilei

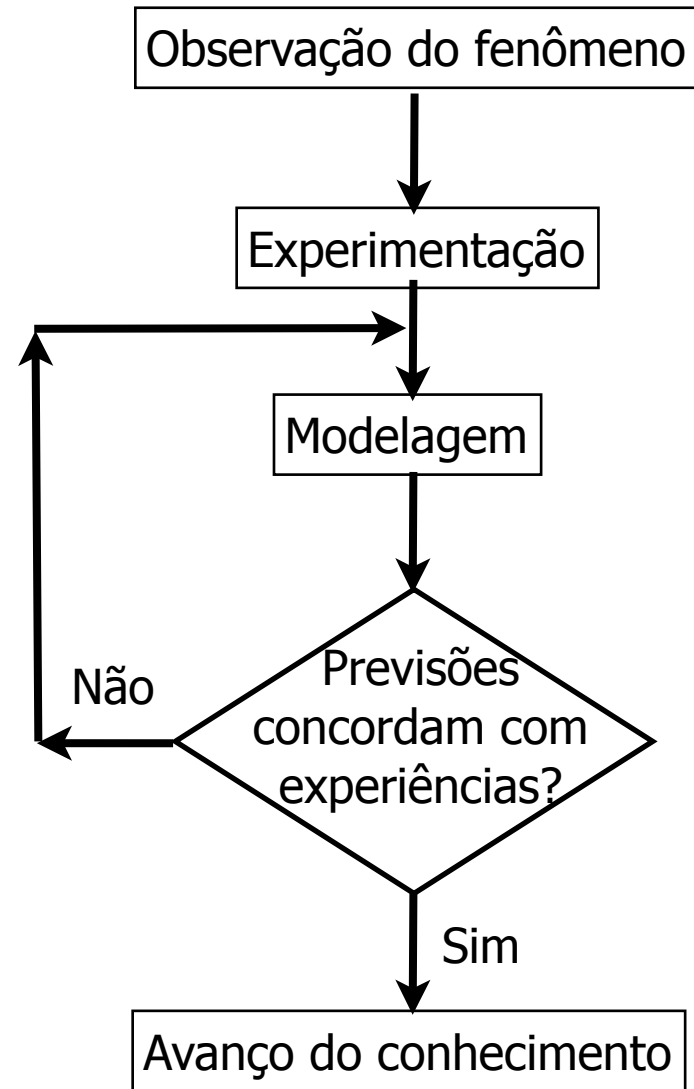


O Método Científico

A FÍSICA É UMA CIÊNCIA
EXPERIMENTAL, CUJA
LINGUAGEM É A
MATEMÁTICA



Galileu Galilei

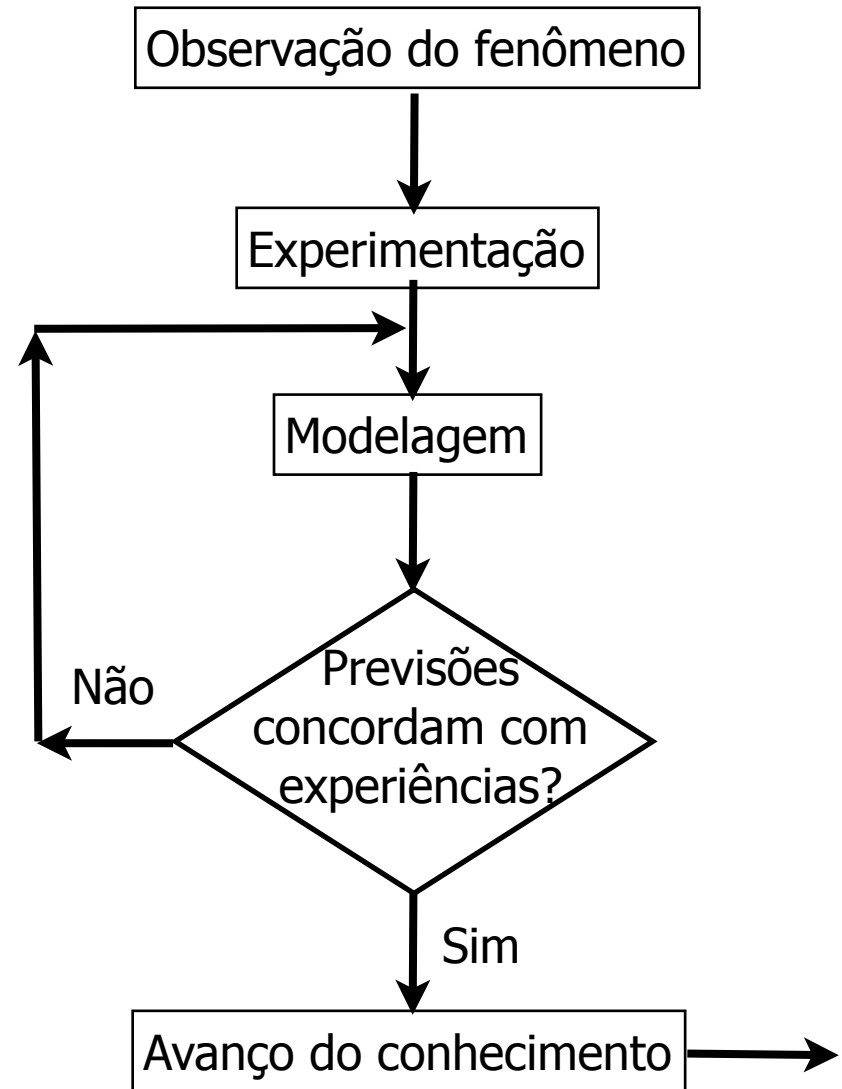


O Método Científico

A FÍSICA É UMA CIÊNCIA
EXPERIMENTAL, CUJA
LINGUAGEM É A
MATEMÁTICA



Galileu Galilei

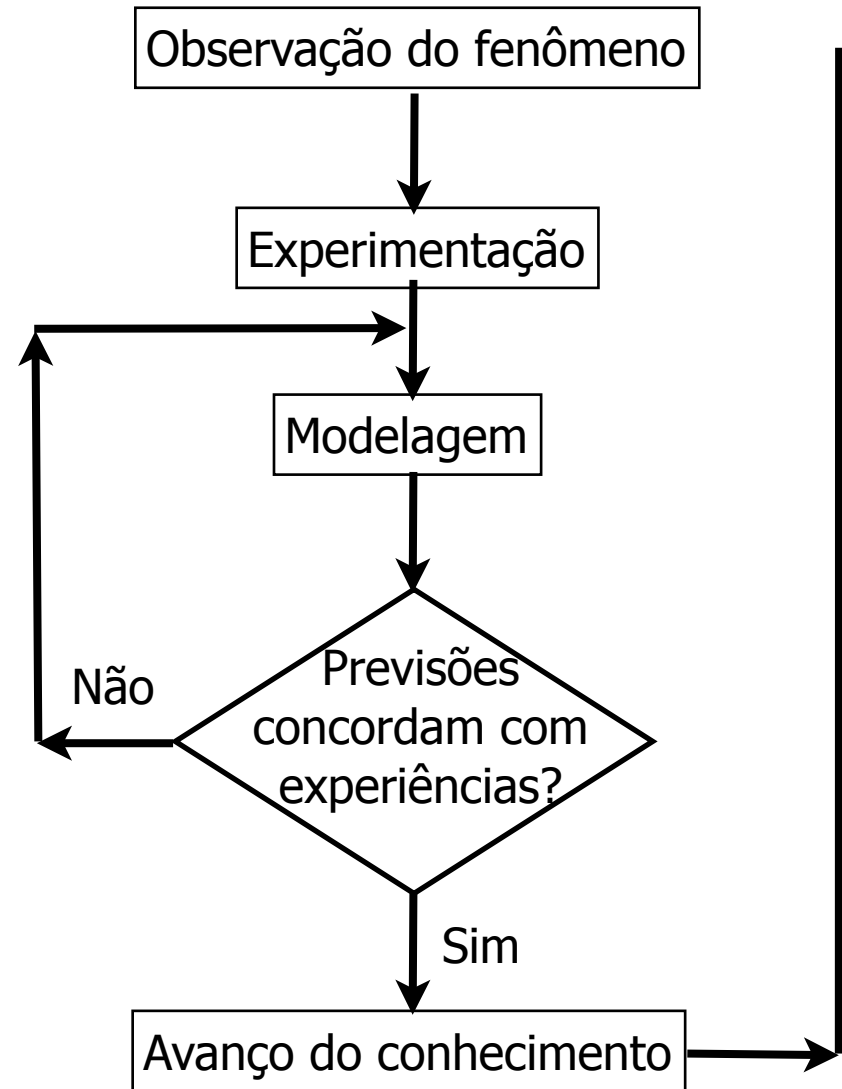


O Método Científico

A FÍSICA É UMA CIÊNCIA
EXPERIMENTAL, CUJA
LINGUAGEM É A
MATEMÁTICA

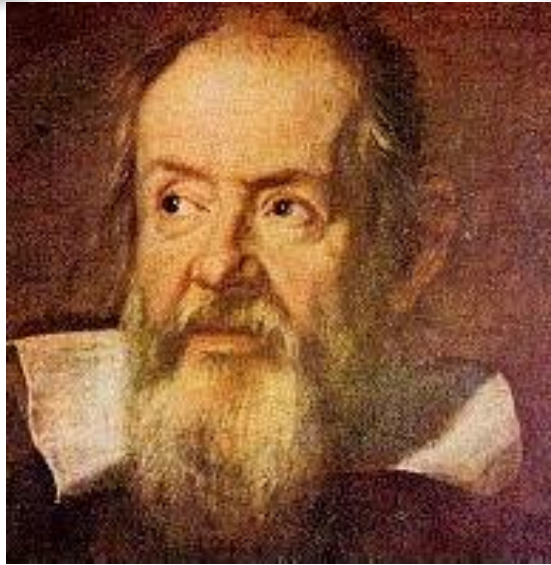


Galileu Galilei

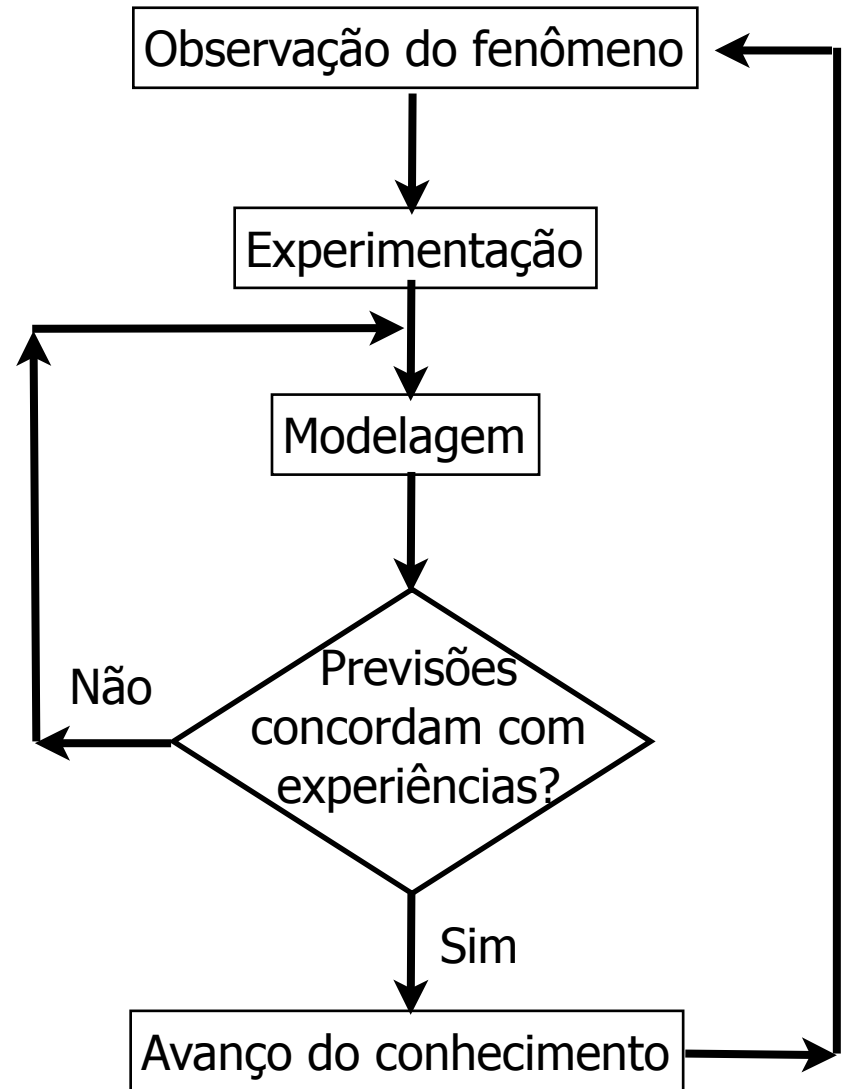


O Método Científico

A FÍSICA É UMA CIÊNCIA
EXPERIMENTAL, CUJA
LINGUAGEM É A
MATEMÁTICA



Galileu Galilei

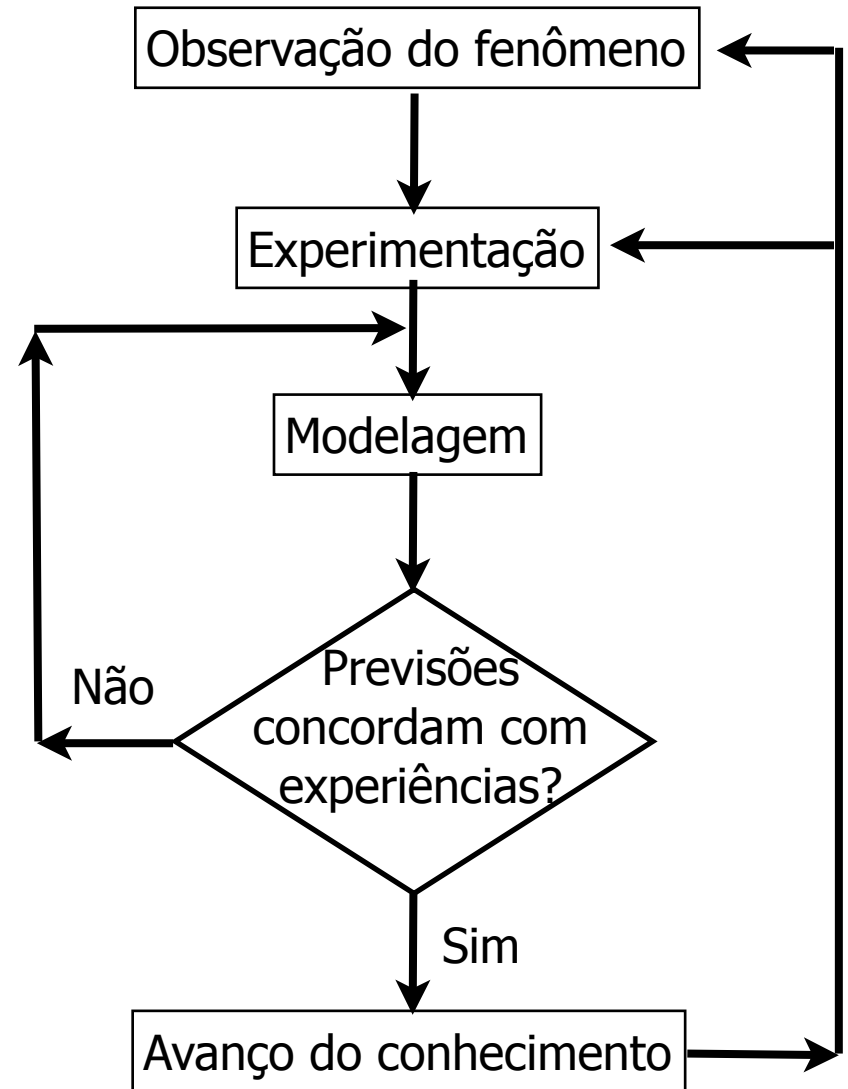


O Método Científico

A FÍSICA É UMA CIÊNCIA
EXPERIMENTAL, CUJA
LINGUAGEM É A
MATEMÁTICA



Galileu Galilei

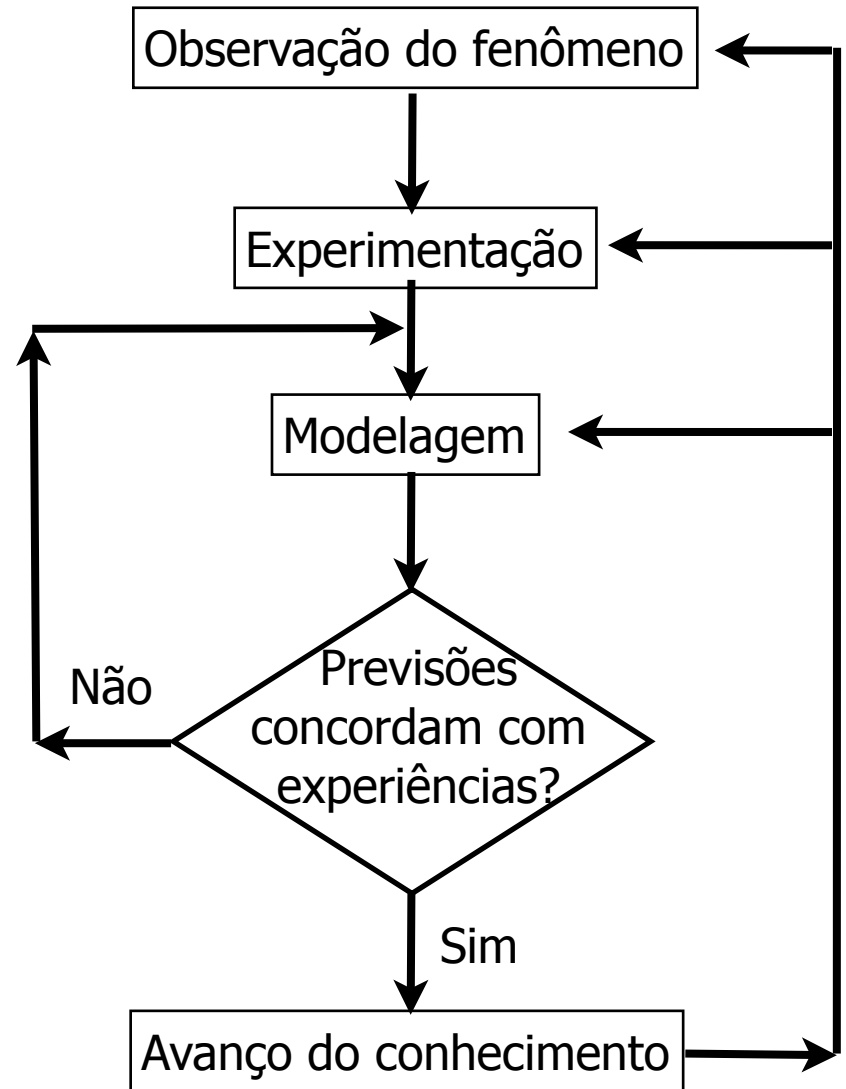


O Método Científico

A FÍSICA É UMA CIÊNCIA
EXPERIMENTAL, CUJA
LINGUAGEM É A
MATEMÁTICA



Galileu Galilei

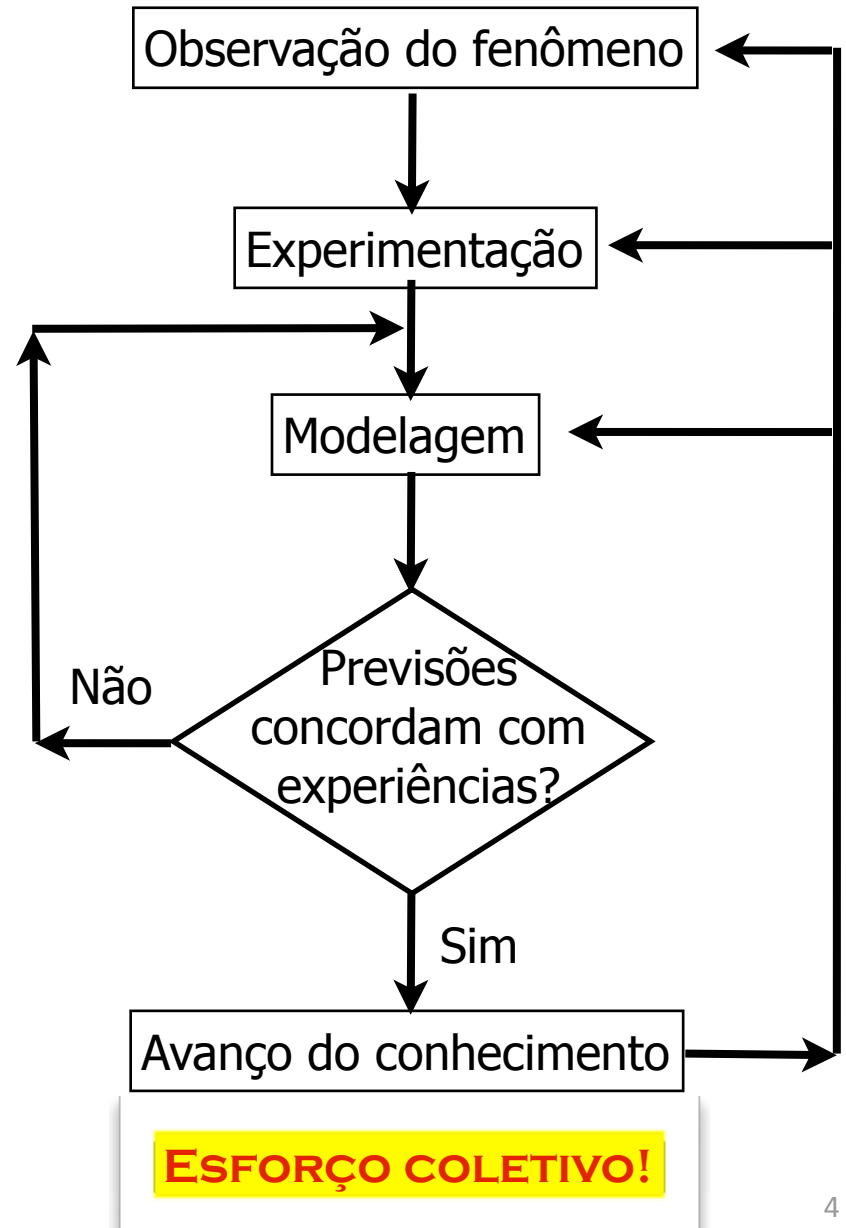


O Método Científico

A FÍSICA É UMA CIÊNCIA
EXPERIMENTAL, CUJA
LINGUAGEM É A
MATEMÁTICA



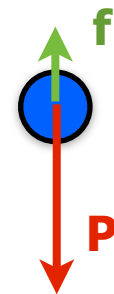
Galileu Galilei



Bola largada: queda livre



Descrição: com quem a bola interage?



1) com a Terra: força peso, **P**

2) com o ar: força de atrito viscoso, **f**

Primeira descrição:
substituição ar → vácuo
Olhar apenas efeitos devidos a **P**

Bola largada: queda livre no vácuo

Descrição: com quem a bola interage?



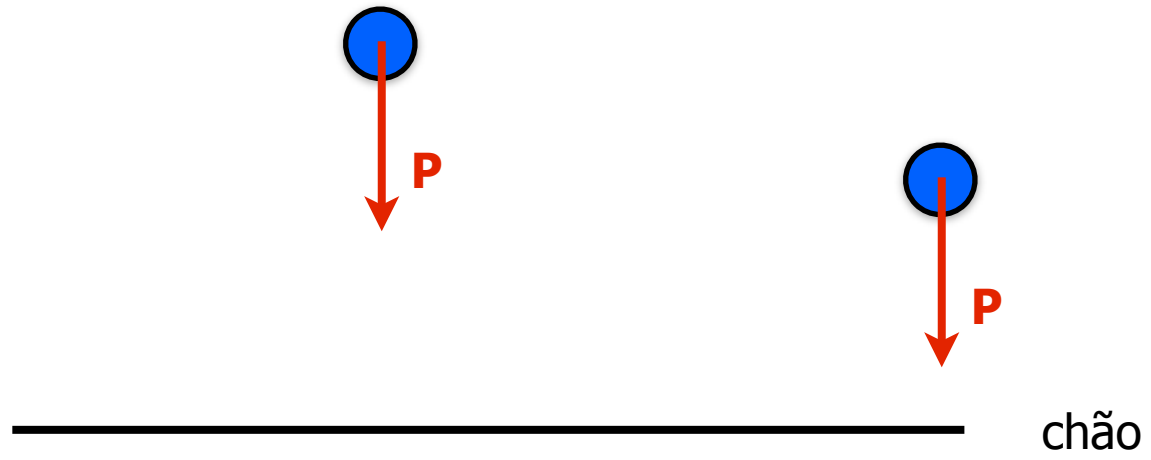
só com a Terra: força peso, \mathbf{P}
 $|\mathbf{P}| = mg, g = 9,8 \text{ m/s}^2$

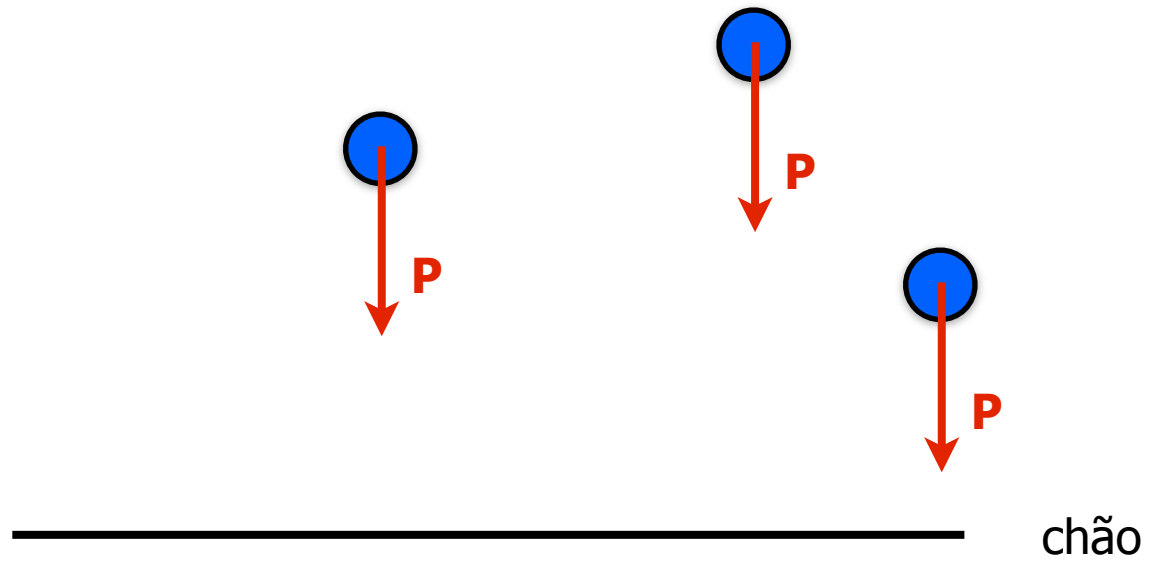
ilustração: http://www.mwit.ac.th/~physicslab/applet_04/physics_classroom/Class/1DKin/U1L5a.html

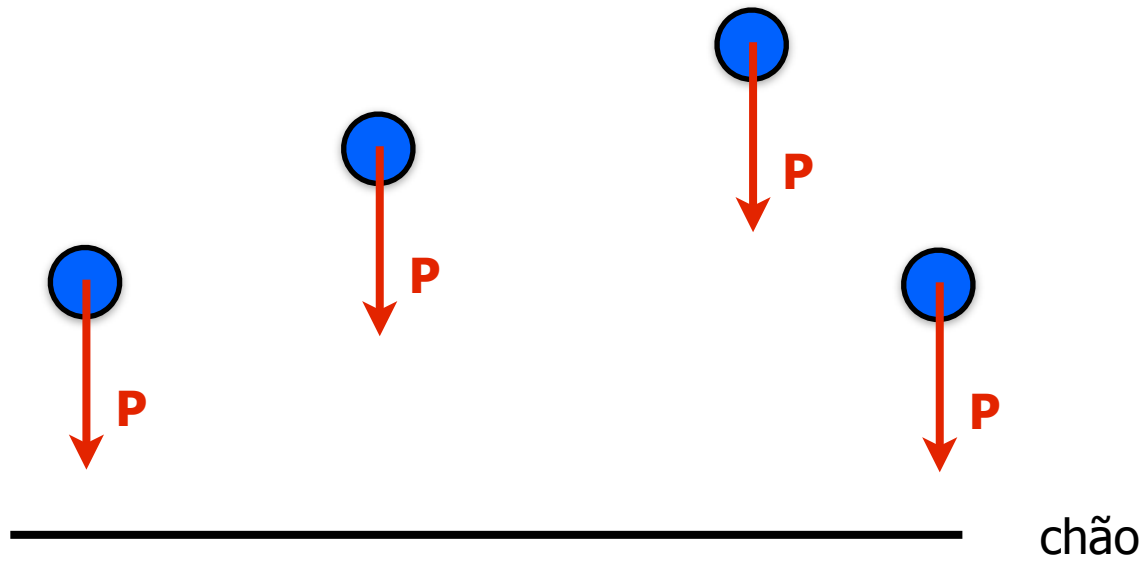
_____ chǎo

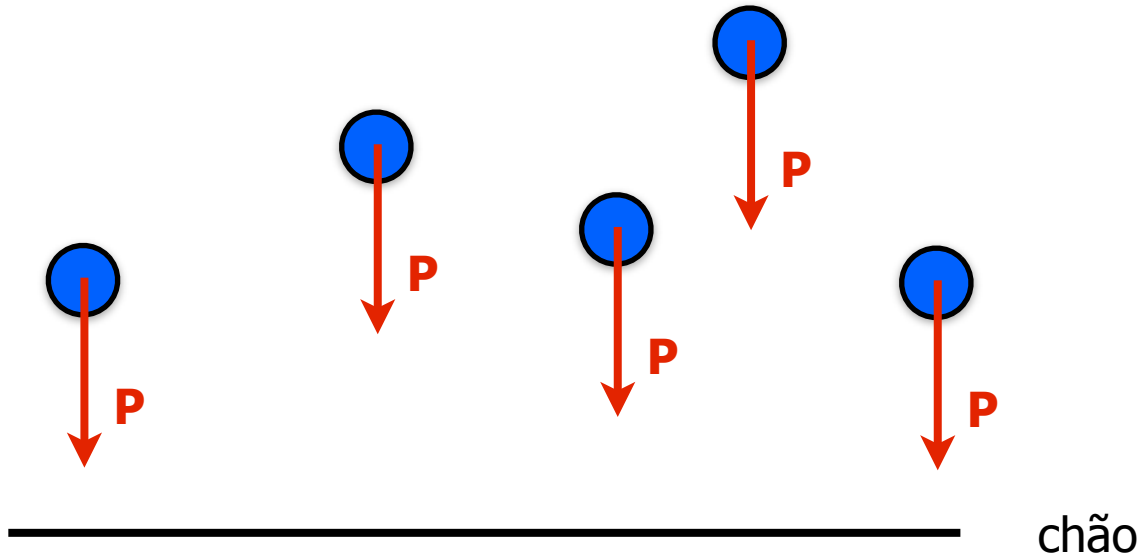


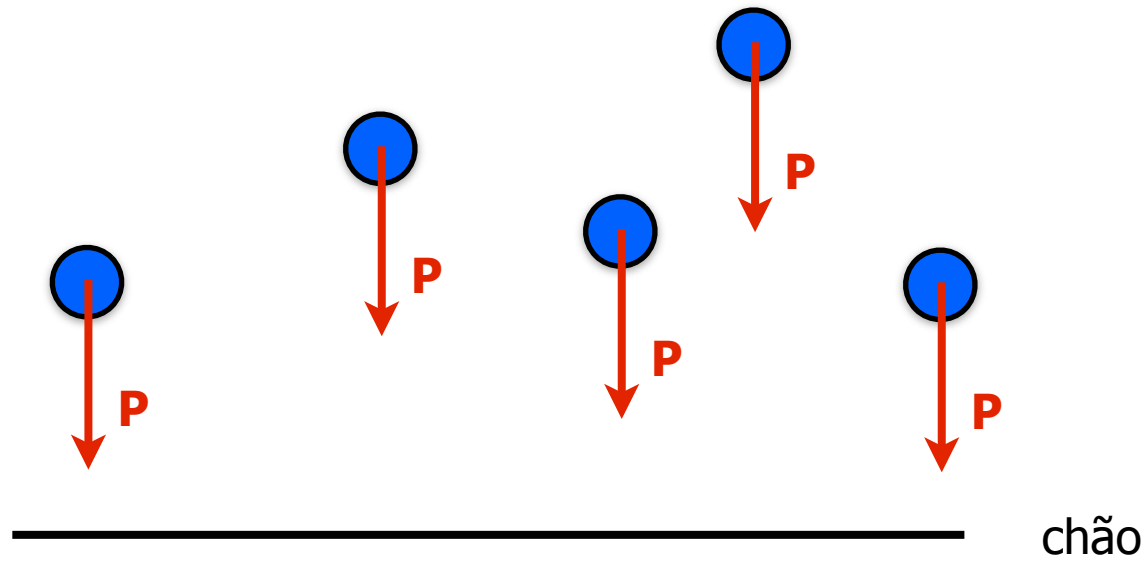
chão



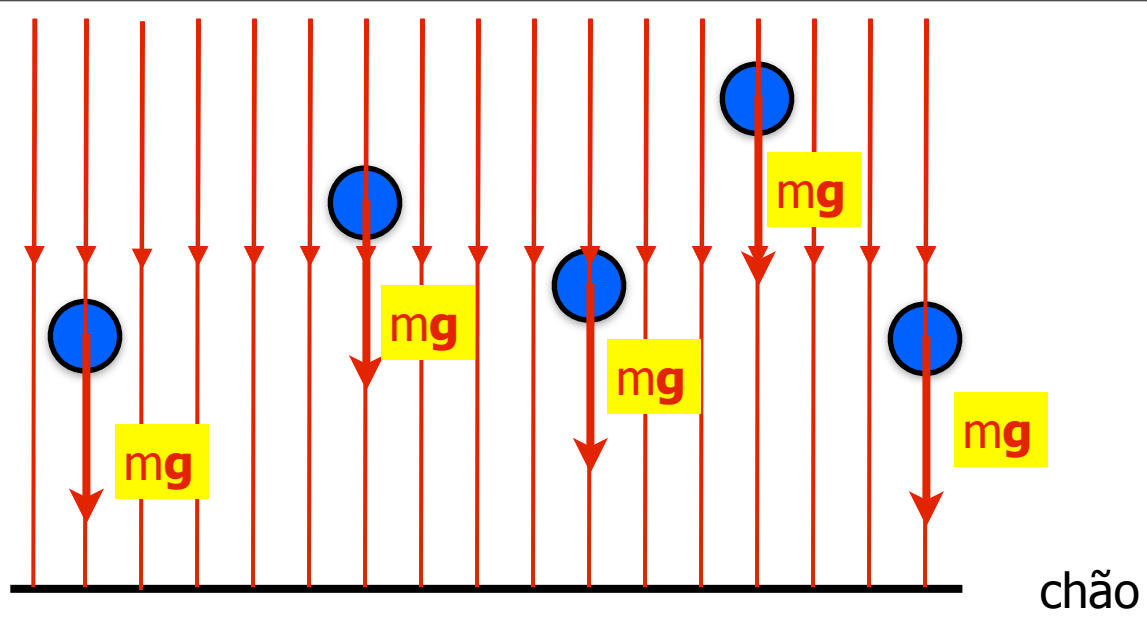


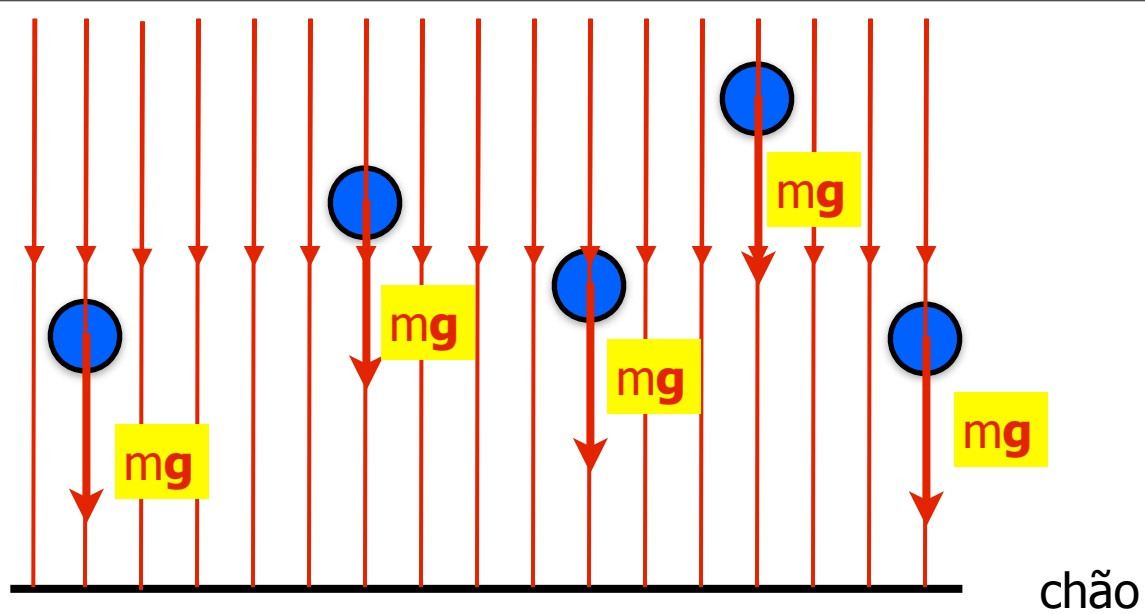




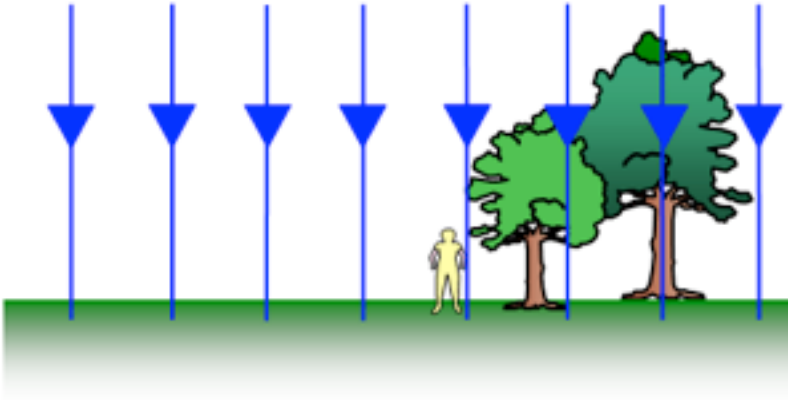


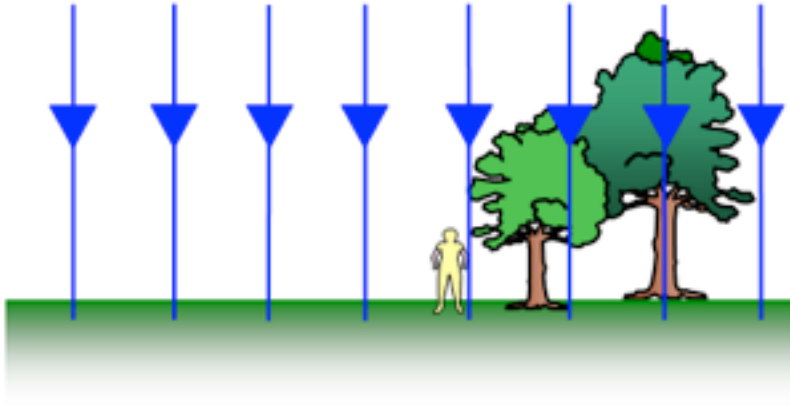
Em qualquer ponto próximo à superfície da Terra, a bola sente a mesma força peso



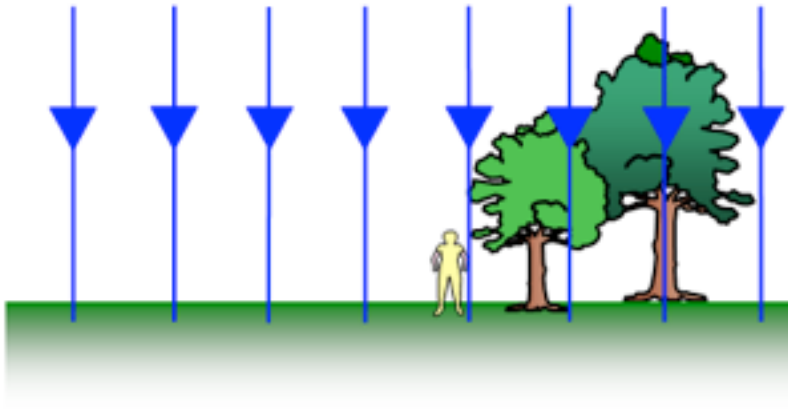


Descrição equivalente: a Terra gera um campo gravitacional, g , em todos os pontos próximos à superfície, tal que uma partícula de massa m ao ser colocada em qualquer ponto, sofre uma força mg .



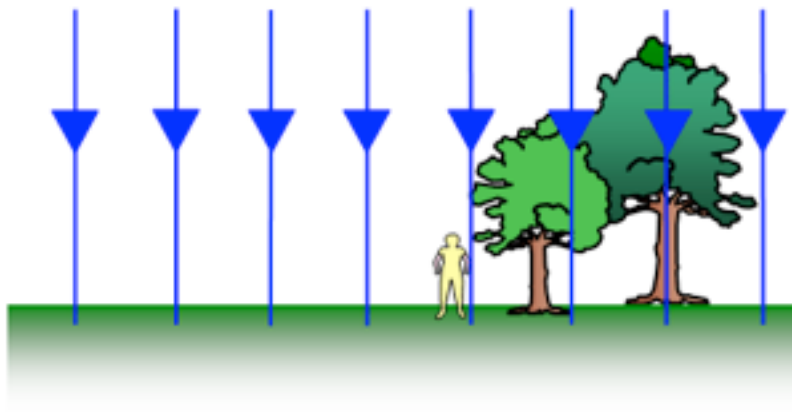


Na realidade, g só é aproximadamente constante para pontos próximos à superfície da Terra



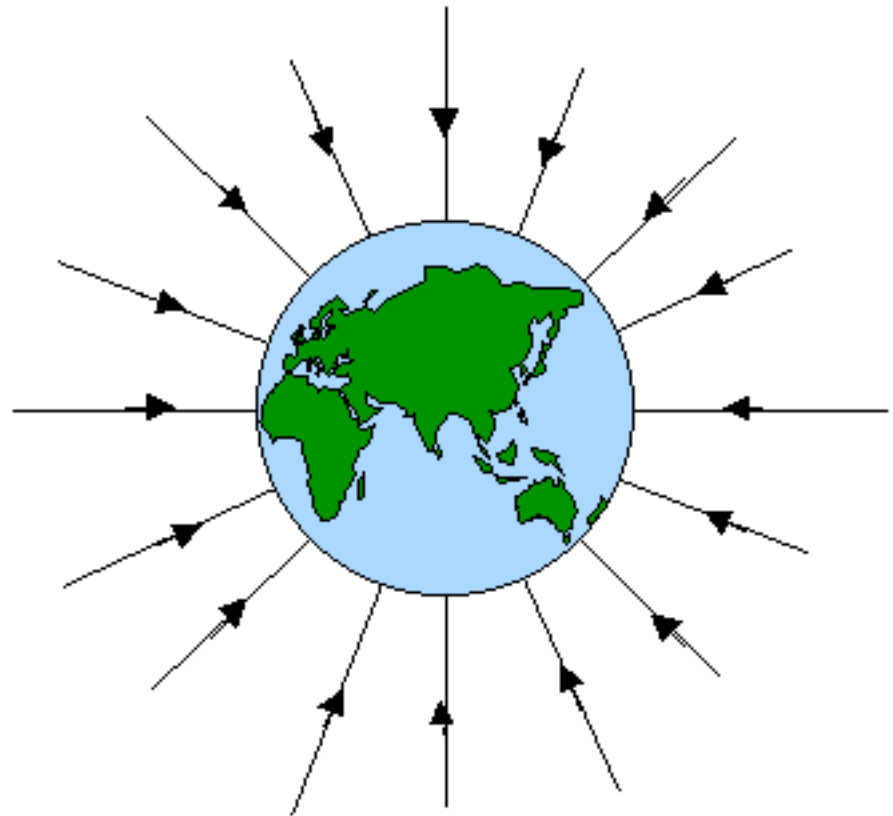
Em escalas da ordem do raio da Terra, os efeitos da dependência com a distância ao centro da Terra são sentidos

Na realidade, g só é aproximadamente constante para pontos próximos à superfície da Terra



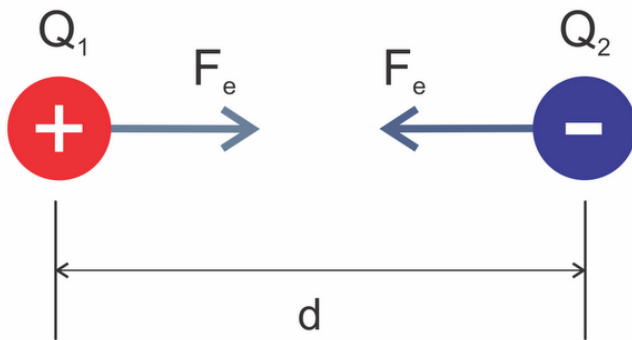
Na realidade, g só é aproximadamente constante para pontos próximos à superfície da Terra

Em escalas da ordem do raio da Terra, os efeitos da dependência com a distância ao centro da Terra são sentidos



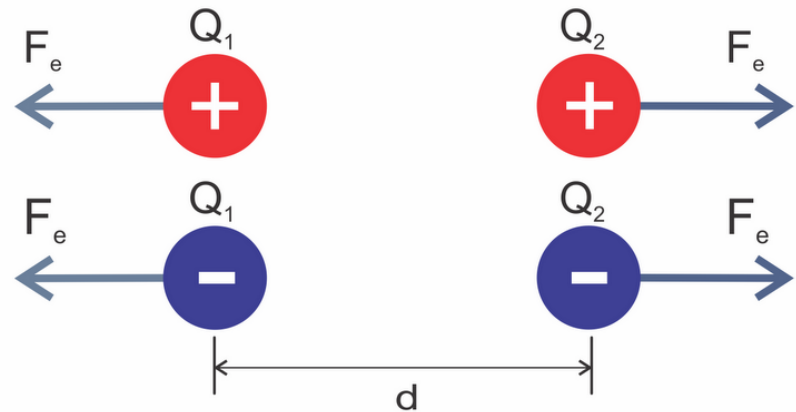
Força elétrica (eletrostática)

Atração



Cargas de sinais contrários

Repulsão

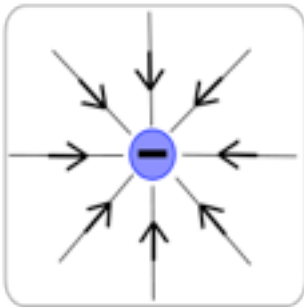
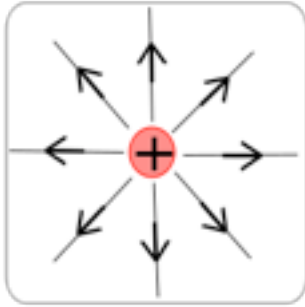


Cargas de mesmo sinal

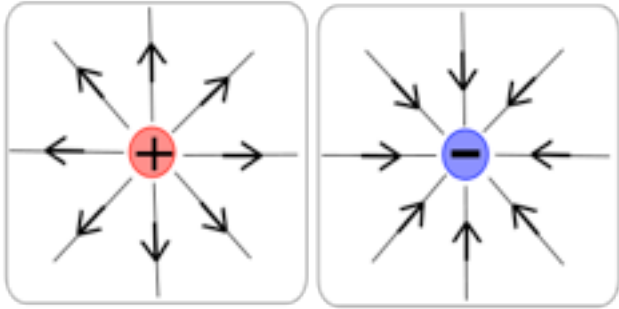
O Campo Elétrico



O Campo Elétrico

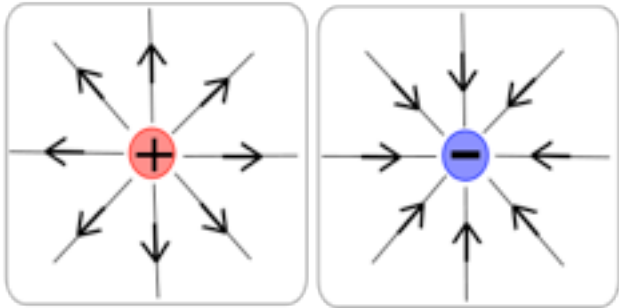


O Campo Elétrico



Cargas elétricas vêm em dois "sabores": positivas e negativas

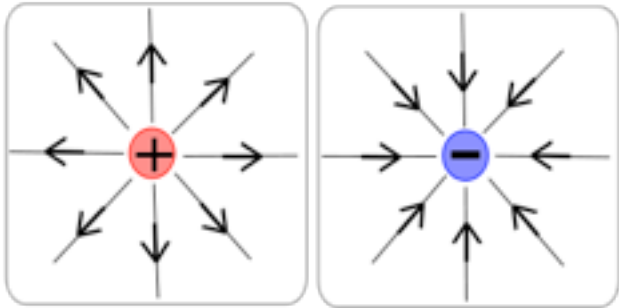
O Campo Elétrico



Cargas elétricas vêm em dois "sabores": positivas e negativas

O campo de cargas + é divergente

O Campo Elétrico

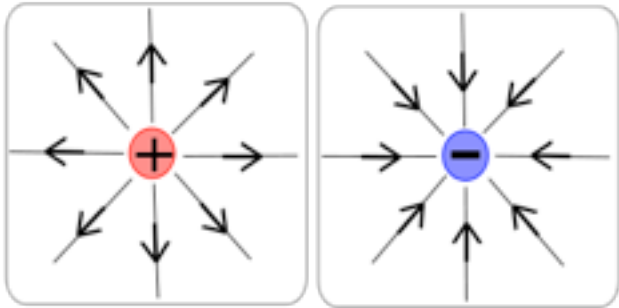


Cargas elétricas vêm em dois "sabores": positivas e negativas

O campo de cargas +
é divergente

O campo de cargas -
é convergente

O Campo Elétrico



Cargas elétricas vêm em dois "sabores": positivas e negativas

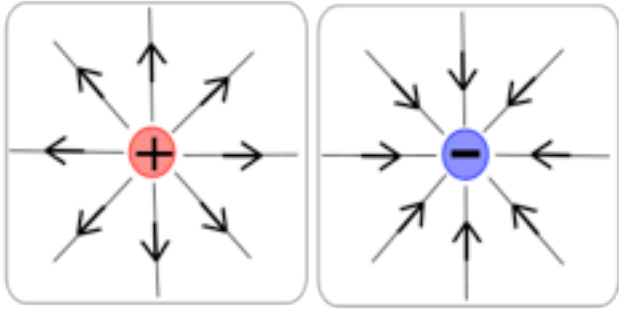
O campo de cargas + é divergente

O campo de cargas - é convergente

Força numa carga de prova q

$$\vec{F} = q\vec{E} \text{ ou } \mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

O Campo Elétrico



O campo elétrico (o gravitacional tb!) satisfaz ao princípio da superposição: o campo devido a duas (ou mais) cargas é a soma dos campos de cada uma se a outra estivesse ausente.

Cargas elétricas vêm em dois "sabores": positivas e negativas

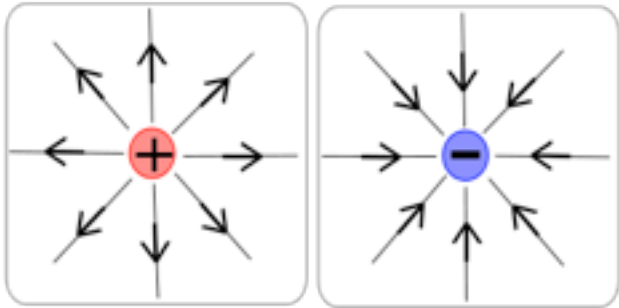
O campo de cargas +
é divergente

O campo de cargas -
é convergente

Força numa carga de prova q

$$\vec{F} = q\vec{E} \text{ ou } \mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

O Campo Elétrico



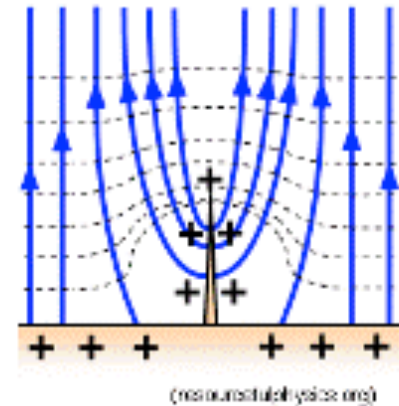
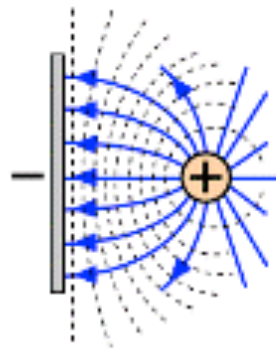
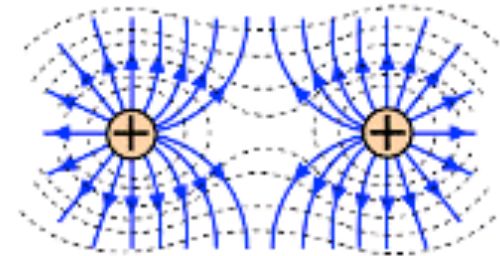
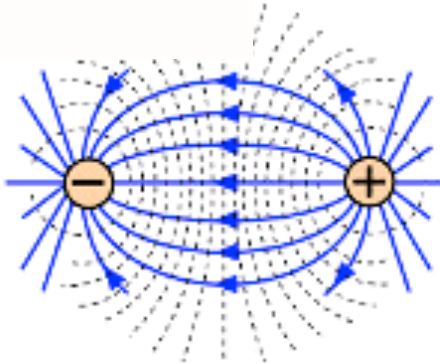
Cargas elétricas vêm em dois "sabores": positivas e negativas

O campo de cargas + é divergente

O campo de cargas - é convergente

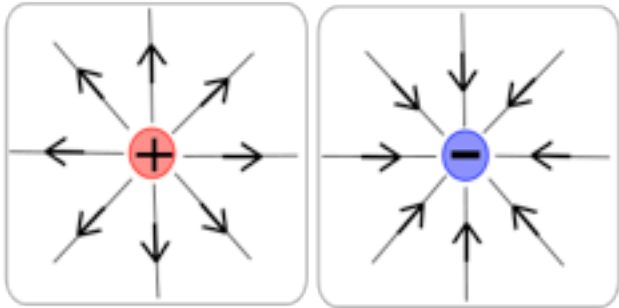
Força numa carga de prova q
 $\vec{F} = q\vec{E}$ ou $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$

O campo elétrico (o gravitacional tb!) satisfaz ao princípio da superposição: o campo devido a duas (ou mais) cargas é a soma dos campos de cada uma se a outra estivesse ausente.



http://tap.iop.org/fields/electrical/406/page_46863.html

O Campo Elétrico

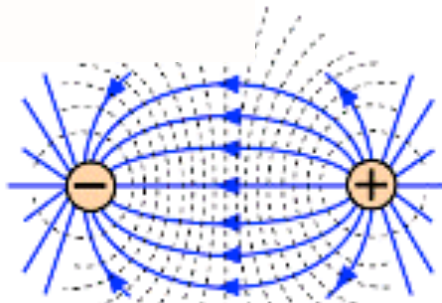


Cargas elétricas vêm em dois "sabores": positivas e negativas

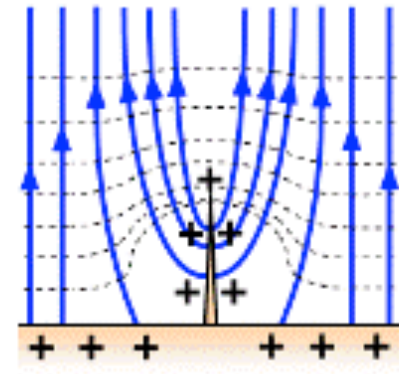
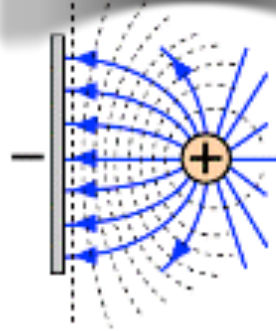
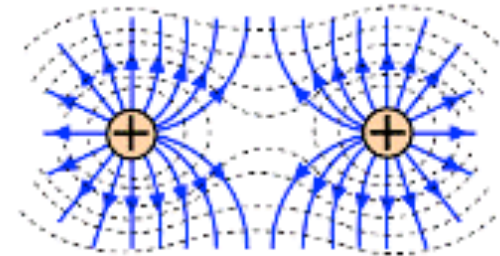
O campo de cargas + é divergente

O campo de cargas - é convergente

Força numa carga de prova q
 $\vec{F} = q\vec{E}$ ou $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$



dipolo elétrico



(nos ourscatlab/physics.org)

O campo elétrico (o gravitacional tb!) satisfaz ao princípio da superposição: o campo devido a duas (ou mais) cargas é a soma dos campos de cada uma se a outra estivesse ausente.

http://tap.iop.org/fields/electrical/406/page_46863.html

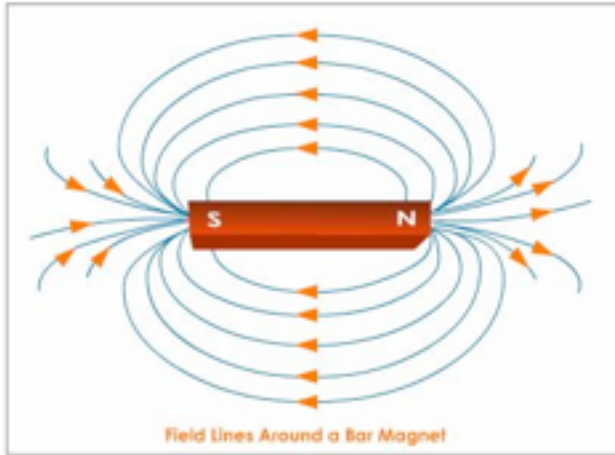
O Campo Magnético

O Campo Magnético

O campo magnético de um ímã,...

O Campo Magnético

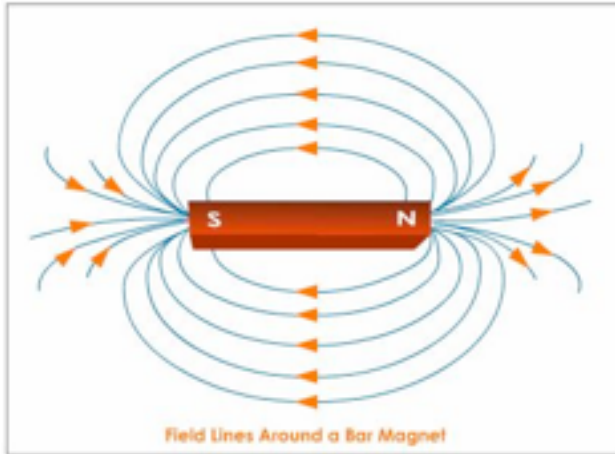
O campo magnético de um ímã,...



<http://images.tutorvista.com/content/magnetic-effects-electric-current/bar-magnet-magnetic-field.jpeg>

O Campo Magnético

O campo magnético de um ímã,...

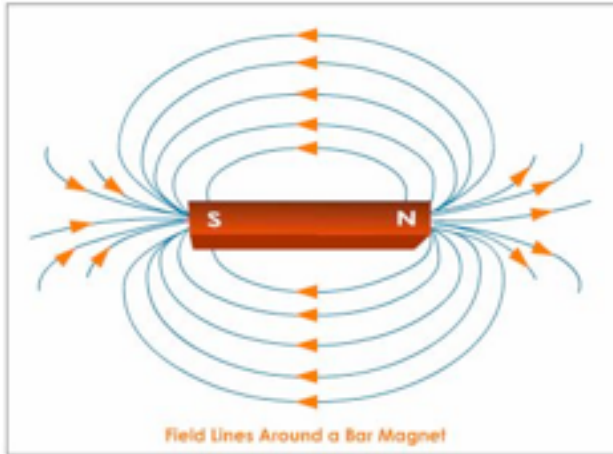


<http://images.tutorvista.com/content/magnetic-effects-electric-current/bar-magnet-magnetic-field.jpeg>

...visualizado com limalha de ferro,...

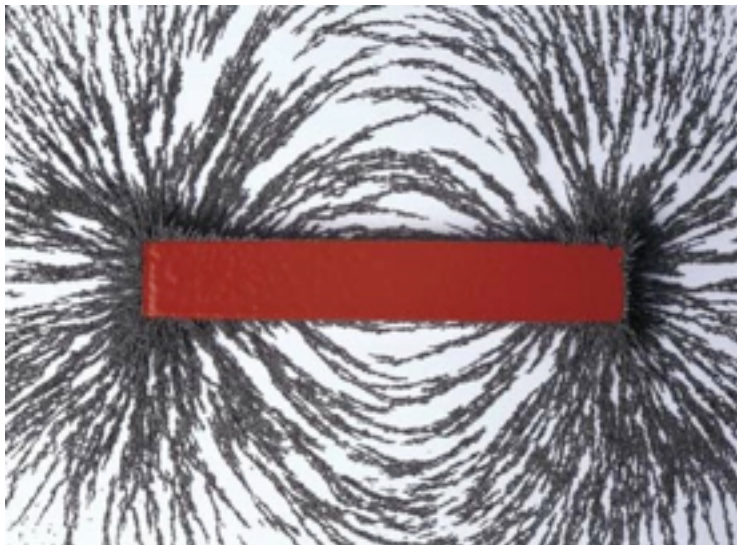
O Campo Magnético

O campo magnético de um ímã,...



<http://images.tutorvista.com/content/magnetic-effects-electric-current/bar-magnet-magnetic-field.jpeg>

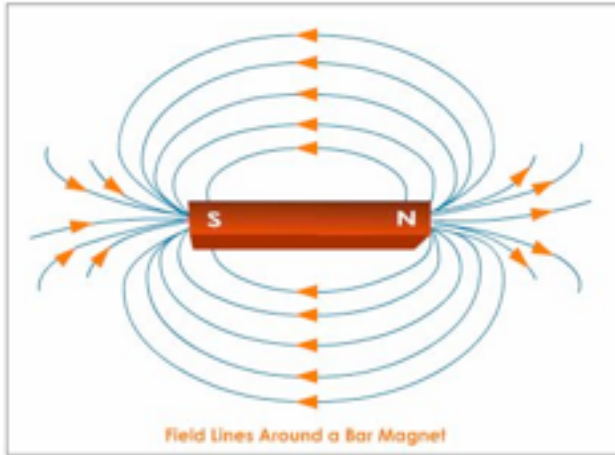
...visualizado com limalha de ferro,...



<http://static.geekbeat.tv/wp-content/uploads/2011/12/Magnetic-Field-Lines-Around-a-Bar-Magnet1.jpg>

O Campo Magnético

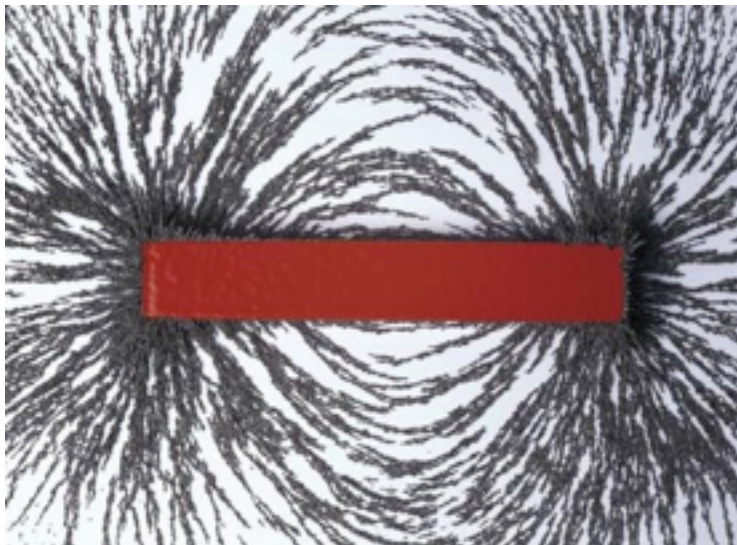
O campo magnético de um ímã,...



...é semelhante ao campo magnético da Terra.

<http://images.tutorvista.com/content/magnetic-effects-electric-current/bar-magnet-magnetic-field.jpeg>

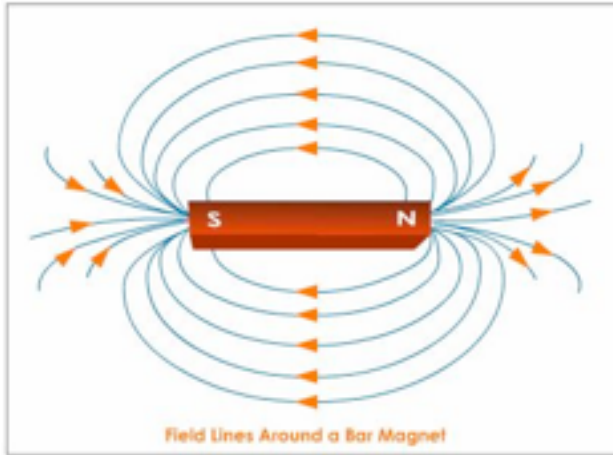
...visualizado com limalha de ferro,...



<http://static.geekbeat.tv/wp-content/uploads/2011/12/Magnetic-Field-Lines-Around-a-Bar-Magnet1.jpg>

O Campo Magnético

O campo magnético de um ímã,...



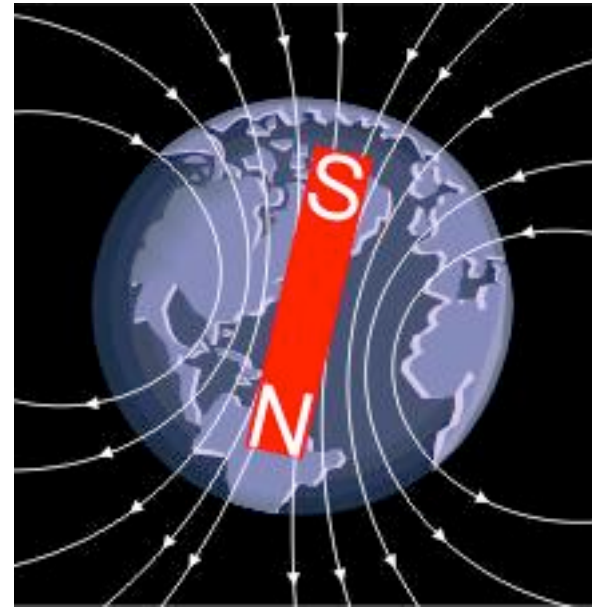
<http://images.tutorvista.com/content/magnetic-effects-electric-current/bar-magnet-magnetic-field.jpeg>

...visualizado com limalha de ferro,...



<http://static.geekbeat.tv/wp-content/uploads/2011/12/Magnetic-Field-Lines-Around-a-Bar-Magnet1.jpg>

...é semelhante ao campo magnético da Terra.



<http://cdn.physorg.com/newman/gfx/news/2009/EarthsMagneticField.jpg>

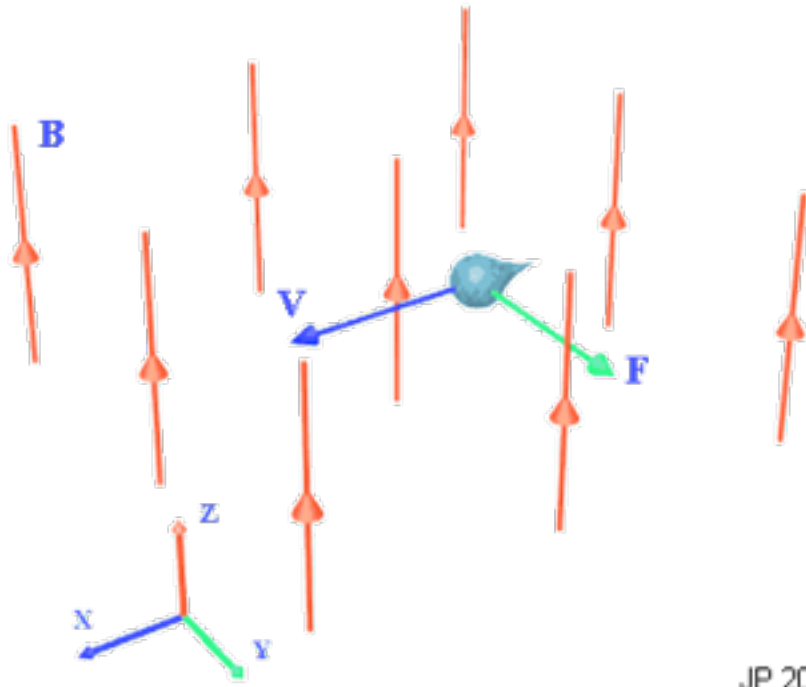
O Campo Magnético

O Campo Magnético

Movimento de uma carga q em um campo magnético \mathbf{B}

O Campo Magnético

Movimento de uma carga q em um campo magnético \mathbf{B}

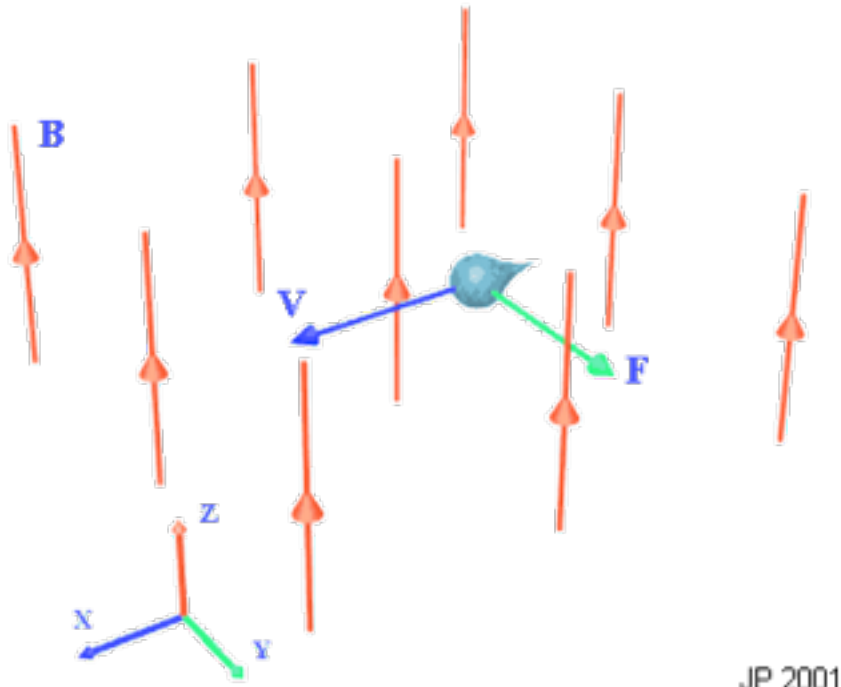


JP 2001

http://www.coilgun.eclipse.co.uk/images/theory_pages_images/general_diagrams/force_on_moving_charge.gif

O Campo Magnético

Movimento de uma carga q em um campo magnético \mathbf{B}



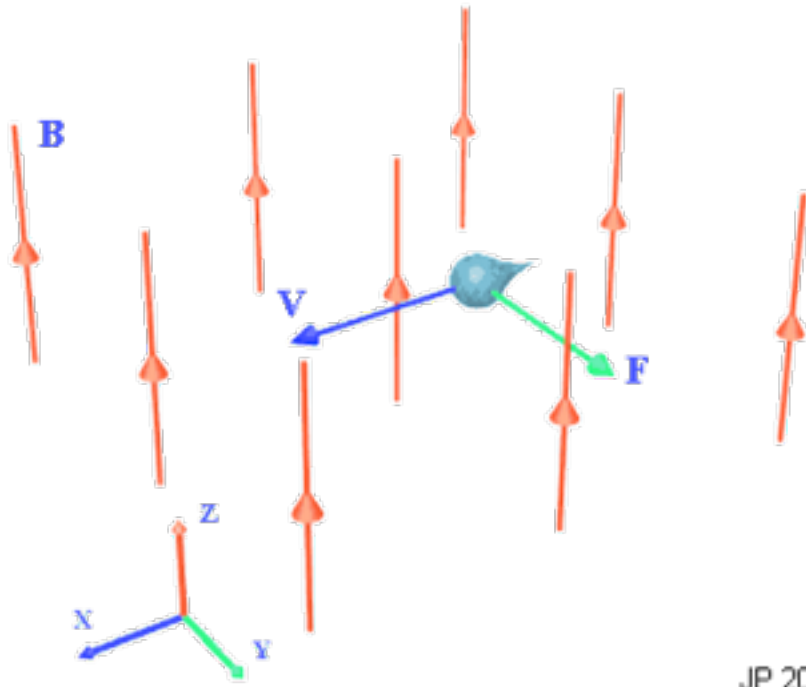
JP 2001

$$\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

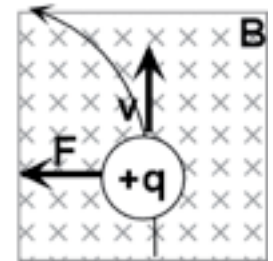
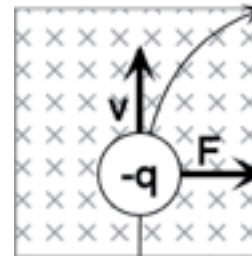
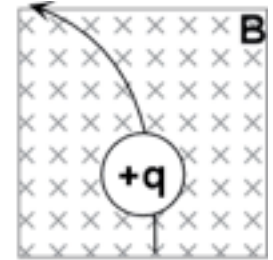
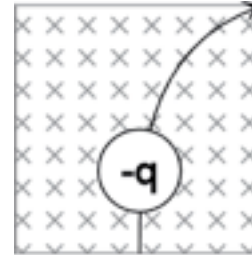
http://www.coilgun.eclipse.co.uk/images/theory_pages_images/general_diagrams/force_on_moving_charge.gif

O Campo Magnético

Movimento de uma carga q em um campo magnético \mathbf{B}



JP 2001



$$\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

http://www.coilgun.eclipse.co.uk/images/theory_pages_images/general_diagrams/force_on_moving_charge.gif

http://physicslearning2.colorado.edu/pira/images/ResourceCD/ResourceImages/PhysicsDrawings/Charge_In_Mag_Field.gif

O Campo Eletromagnético

O Campo Eletromagnético

Eletricidade e Magnetismo: unificados por James Clerk Maxwell, c. 1860.

O Campo Eletromagnético

Eletricidade e Magnetismo: unificados por James Clerk Maxwell, c. 1860.

Fontes de campo magnético:

O Campo Eletromagnético

Eletricidade e Magnetismo: unificados por James Clerk Maxwell, c. 1860.

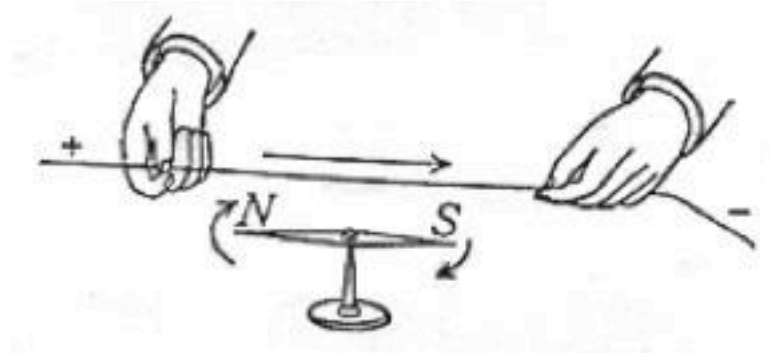
Fontes de campo magnético:

cargas elétricas em movimento =
correntes elétricas

O Campo Eletromagnético

Eletricidade e Magnetismo: unificados por James Clerk Maxwell, c. 1860.

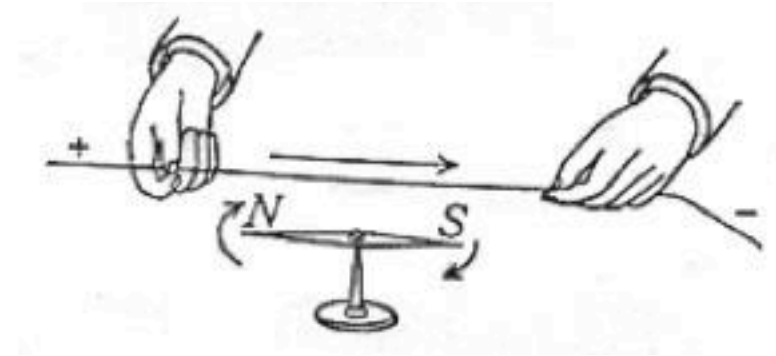
Fontes de campo magnético:
cargas elétricas em movimento =
correntes elétricas



O Campo Eletromagnético

Eletricidade e Magnetismo: unificados por James Clerk Maxwell, c. 1860.

Fontes de campo magnético:
cargas elétricas em movimento =
correntes elétricas
campos elétricos variáveis no
tempo

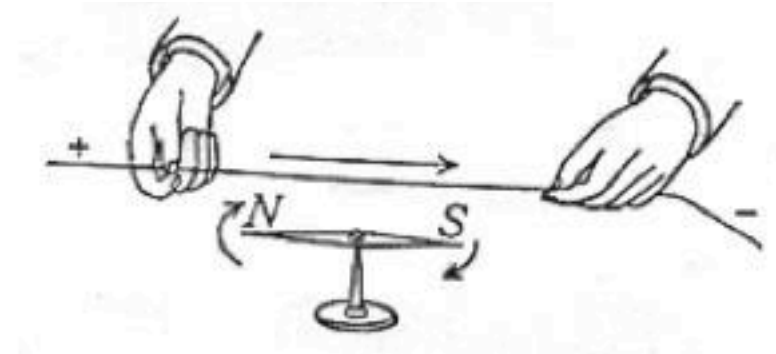


O Campo Eletromagnético

Eletricidade e Magnetismo: unificados por James Clerk Maxwell, c. 1860.

Fontes de campo magnético:
cargas elétricas em movimento =
correntes elétricas
campos elétricos variáveis no
tempo

Fontes de campo elétrico:

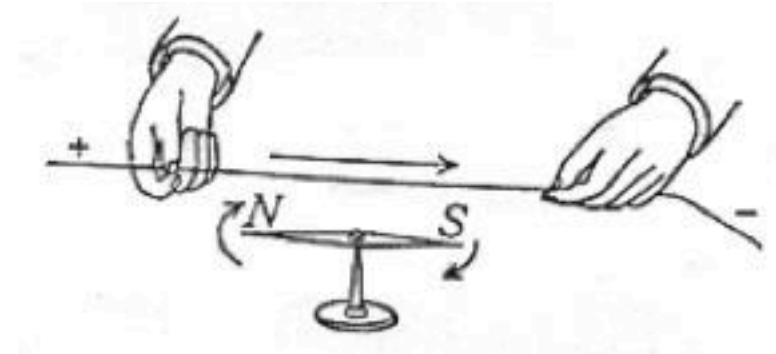


O Campo Eletromagnético

Eletricidade e Magnetismo: unificados por James Clerk Maxwell, c. 1860.

Fontes de campo magnético:
cargas elétricas em movimento =
correntes elétricas
campos elétricos variáveis no
tempo

Fontes de campo elétrico:
cargas elétricas estáticas

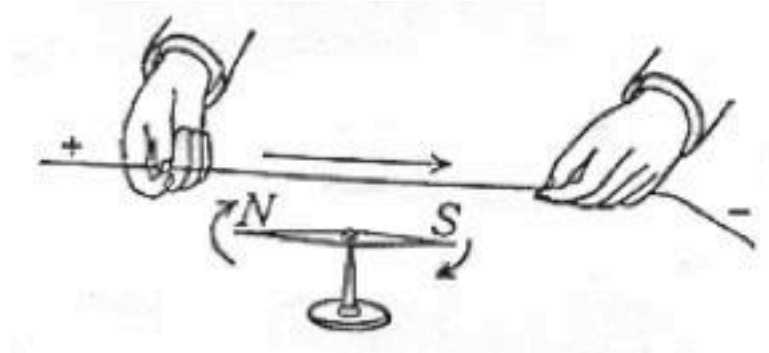


O Campo Eletromagnético

Eletricidade e Magnetismo: unificados por James Clerk Maxwell, c. 1860.

Fontes de campo magnético:
cargas elétricas em movimento =
correntes elétricas
campos elétricos variáveis no
tempo

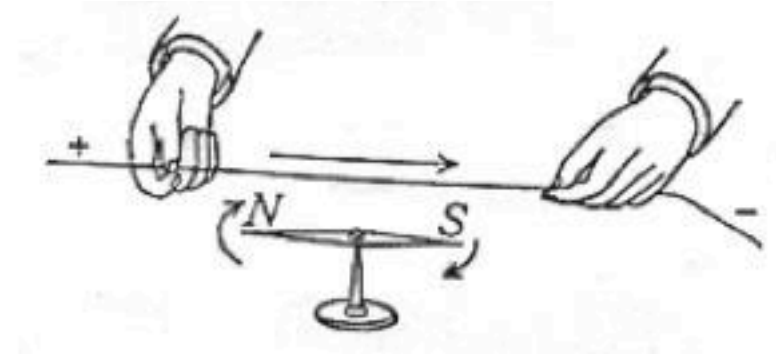
Fontes de campo elétrico:
cargas elétricas estáticas
campos magnéticos variáveis no tempo



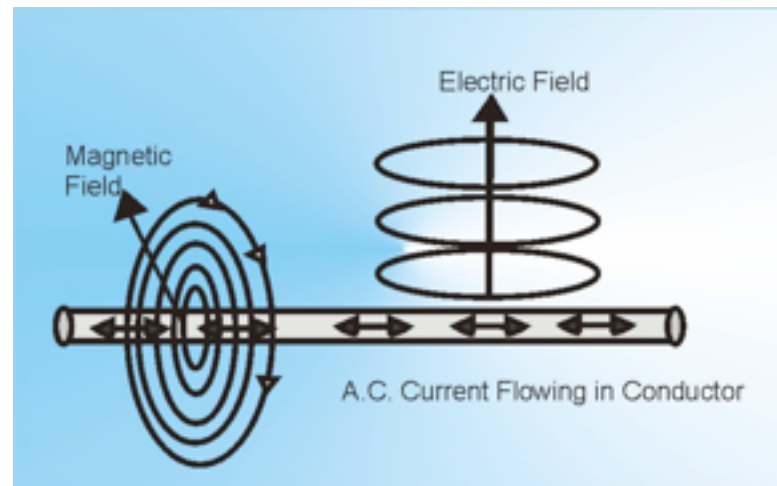
O Campo Eletromagnético

Eletricidade e Magnetismo: unificados por James Clerk Maxwell, c. 1860.

Fontes de campo magnético:
cargas elétricas em movimento =
correntes elétricas
campos elétricos variáveis no
tempo

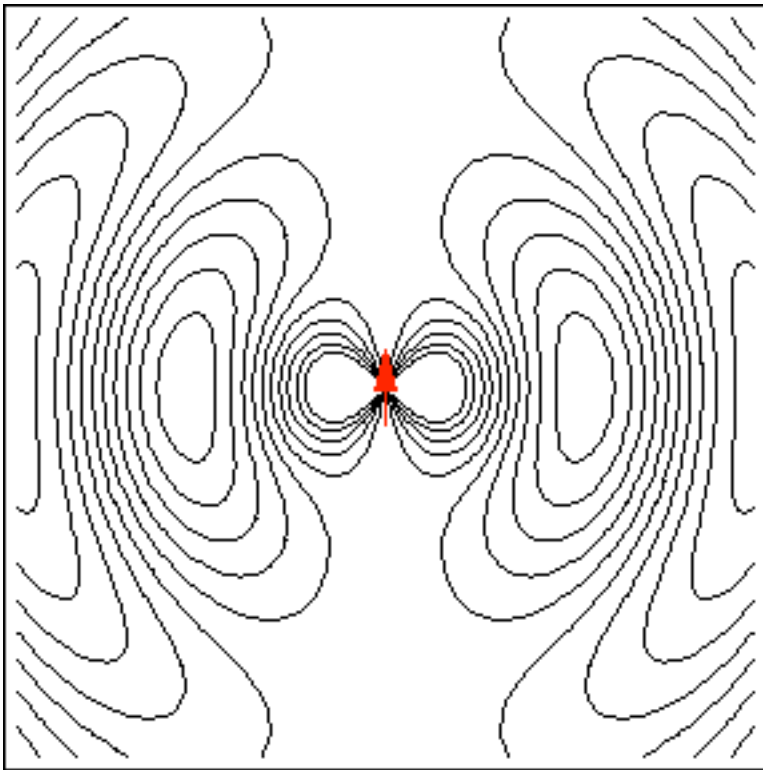


Fontes de campo elétrico:
cargas elétricas estáticas
campos magnéticos variáveis no tempo



http://www.assignmenthelp.net/assignment_help/Electromagnetic-Fields.php

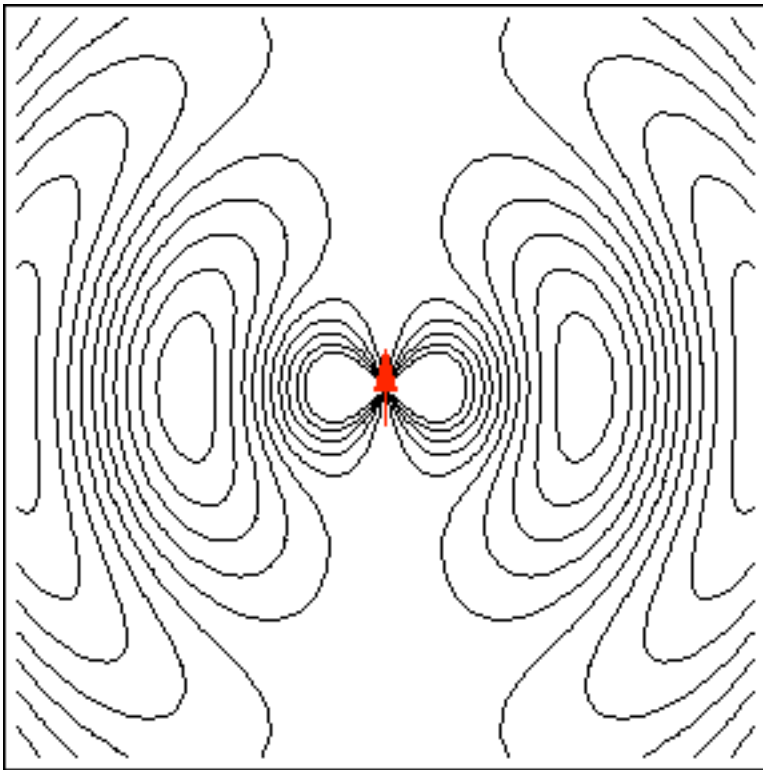
[http://www-antenna.ee.titech.ac.jp/~hira/hobby/edu/em/
staticem/staticem.html](http://www-antenna.ee.titech.ac.jp/~hira/hobby/edu/em/staticem/staticem.html)



<http://www-antenna.ee.titech.ac.jp/~hira/hobby/edu/em/staticem/staticem.html>



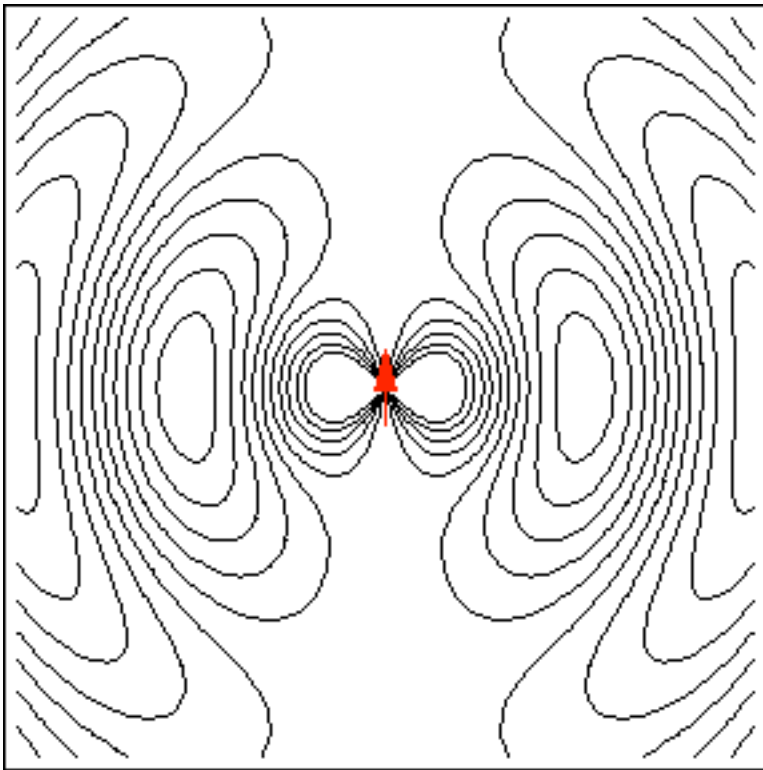
Campo **E** gerado
por antena de dipolo



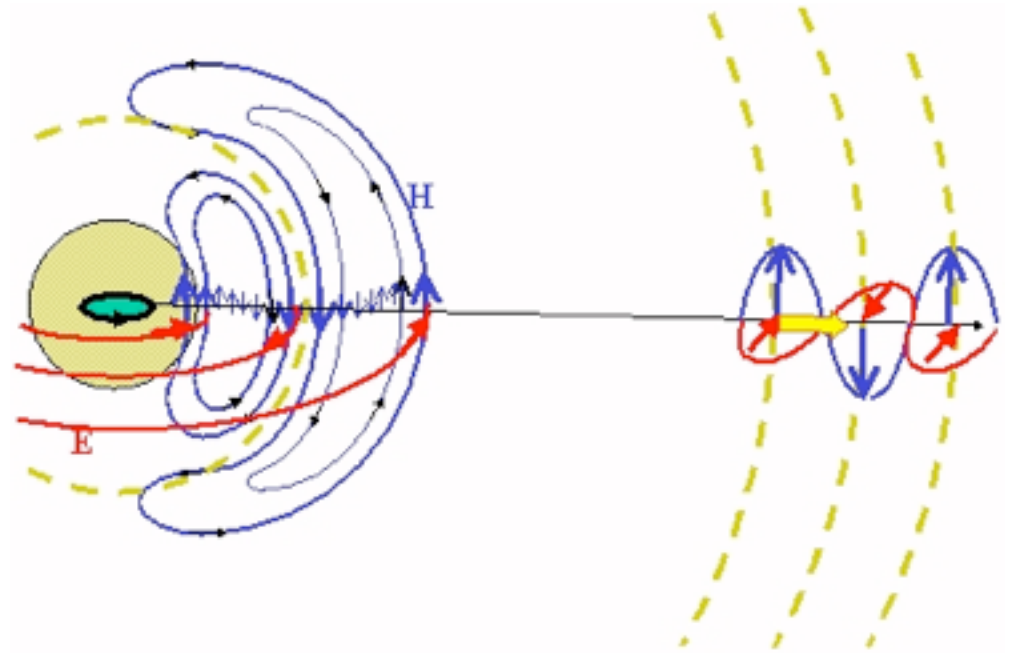
<http://www-antenna.ee.titech.ac.jp/~hira/hobby/edu/em/staticem/staticem.html>



Campo **E** gerado
por antena de dipolo



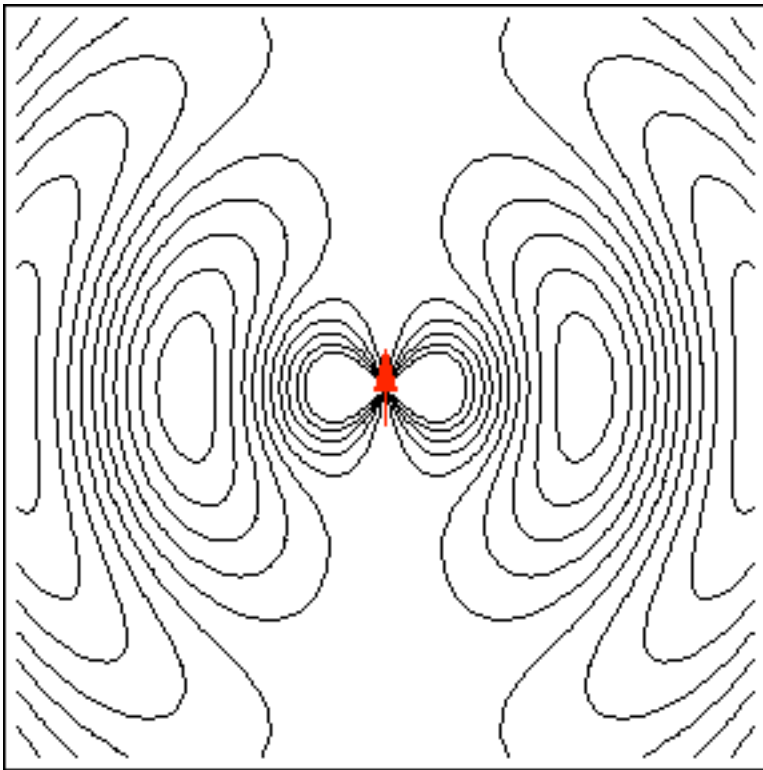
<http://www-antenna.ee.titech.ac.jp/~hira/hobby/edu/em/staticem/staticem.html>



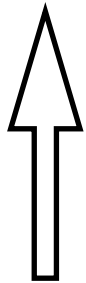
<http://www.microwaves101.com/encyclopedia/images/Absorbing/ARC-4.jpg>



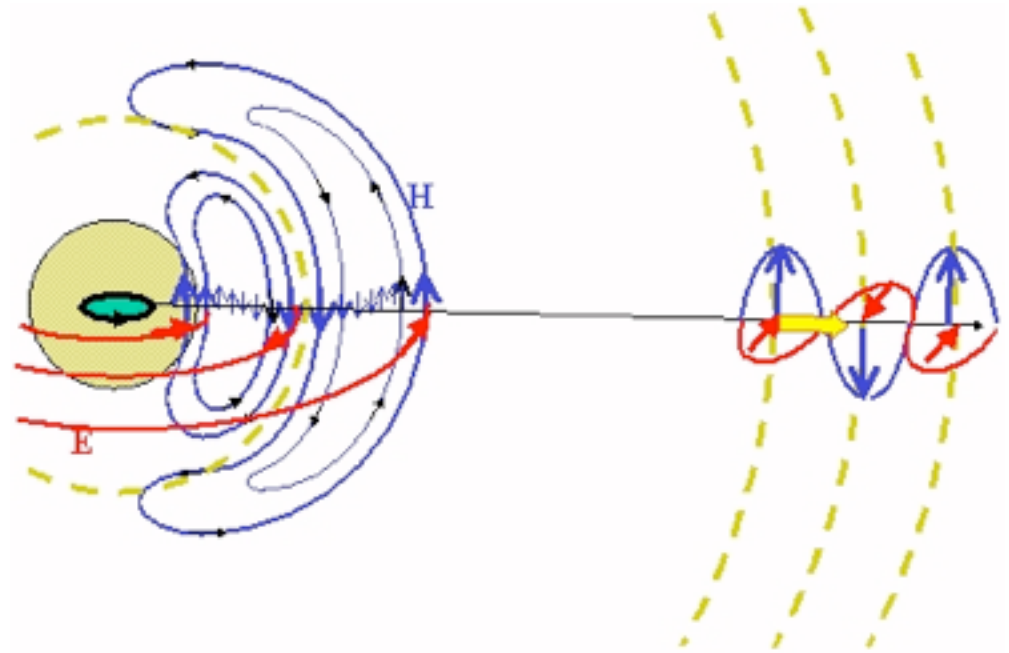
Campo **E** gerado
por antena de dipolo



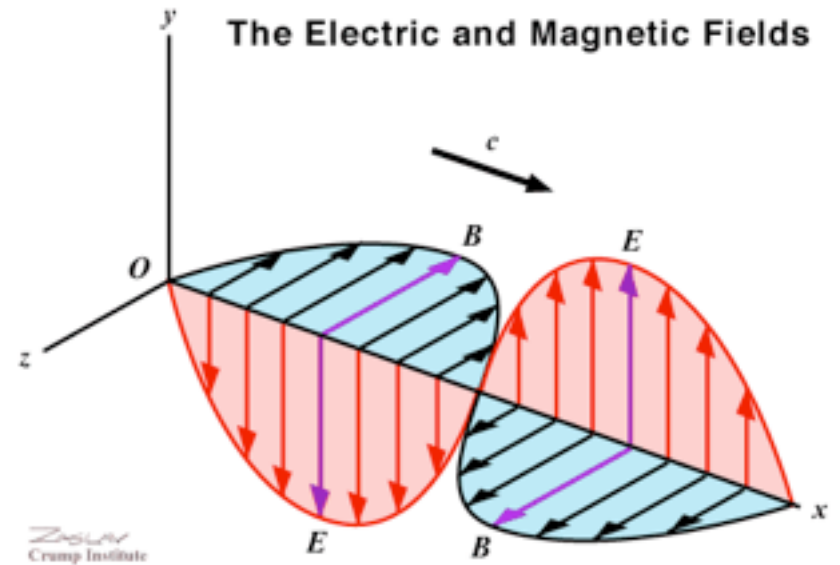
<http://www-antenna.ee.titech.ac.jp/~hira/hobby/edu/em/staticem/staticem.html>



Campo **E** gerado por antena de dipolo

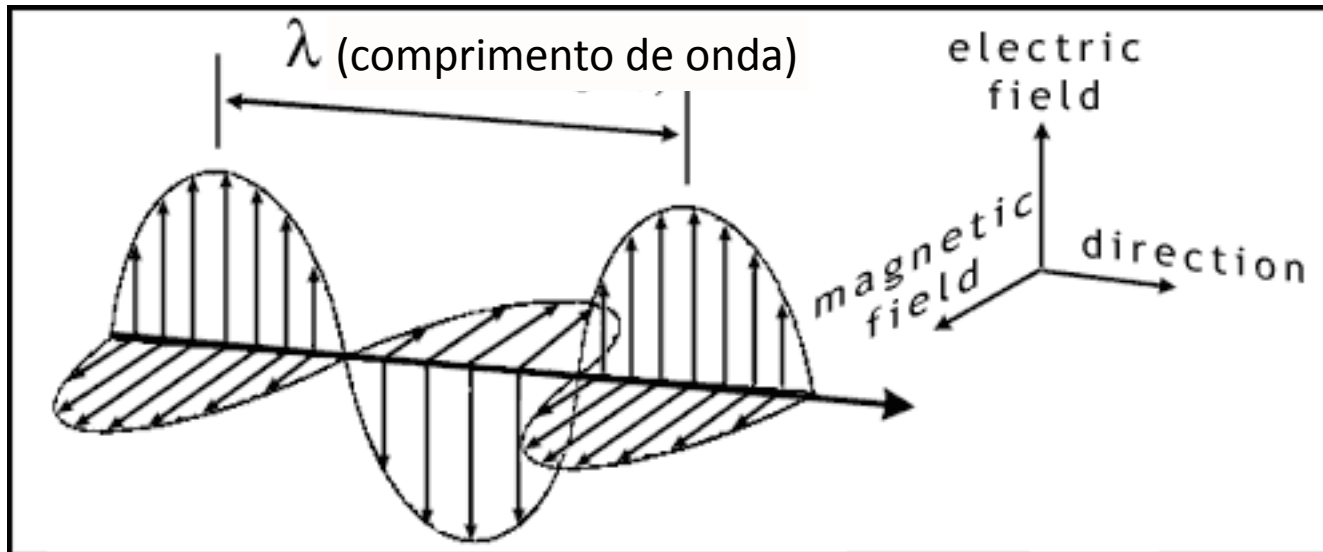


<http://www.microwaves101.com/encyclopedia/images/Absorbing/ARC-4.jpg>

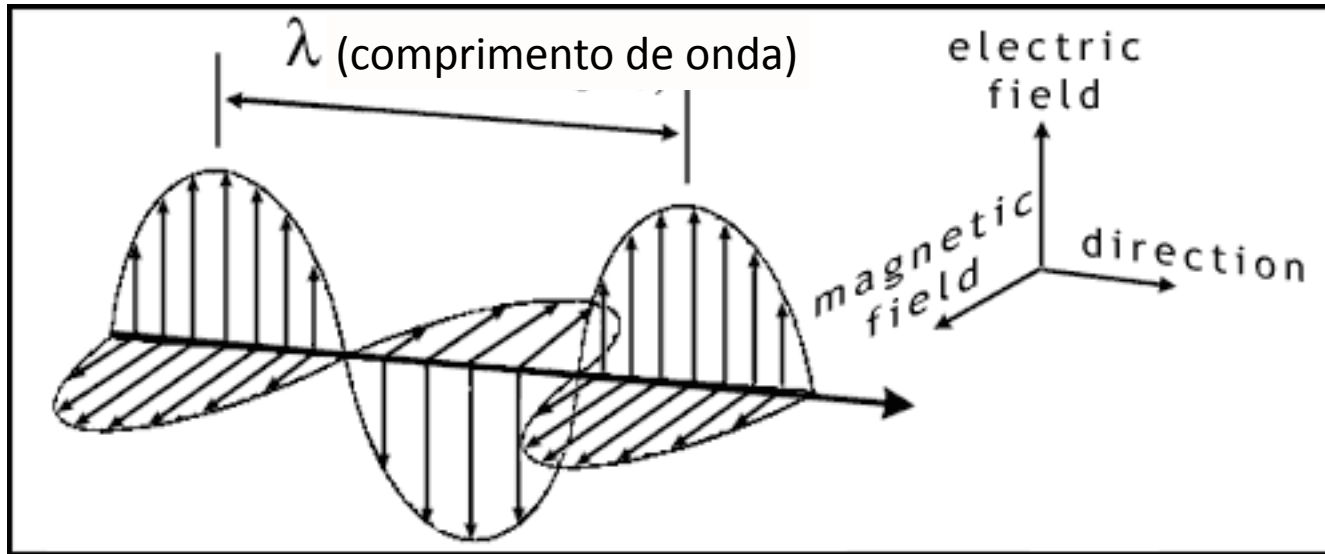


Caracterizando uma onda eletromagnética

Caracterizando uma onda eletromagnética

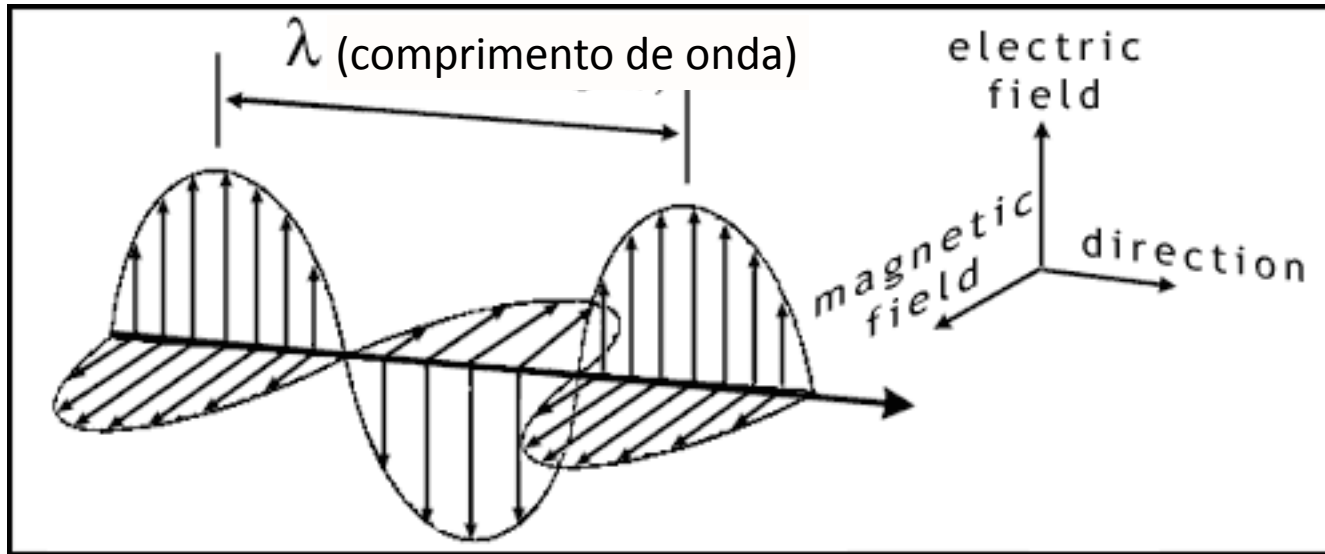


Caracterizando uma onda eletromagnética



$$v = \lambda f$$

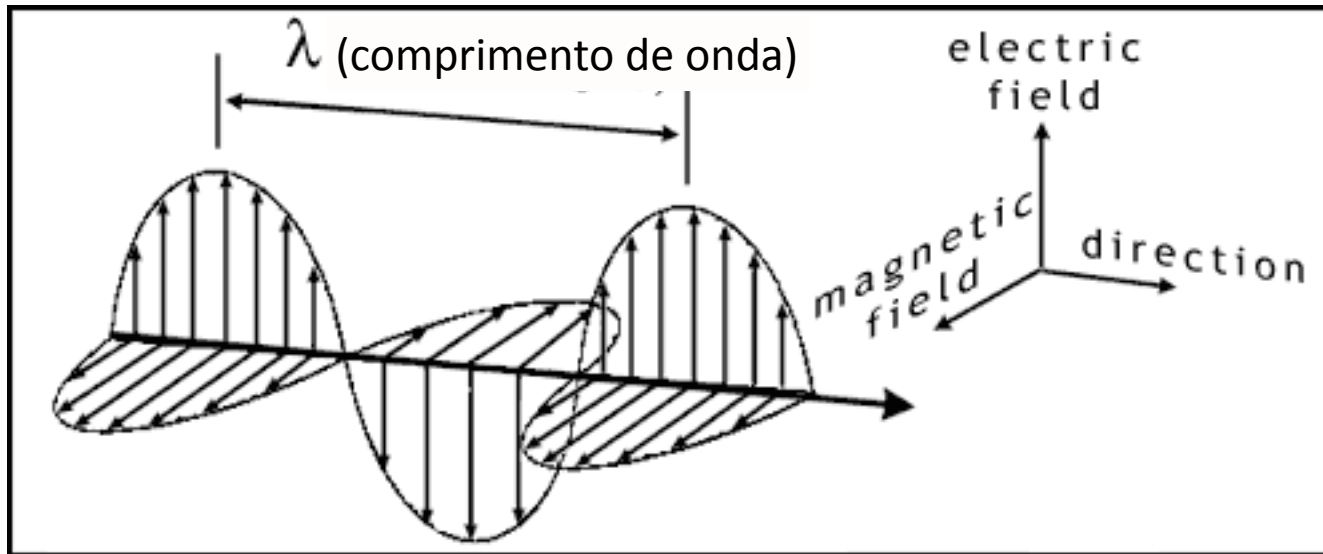
Caracterizando uma onda eletromagnética



$$v = \lambda f$$

velocidade de propagação - propriedade do meio

Caracterizando uma onda eletromagnética

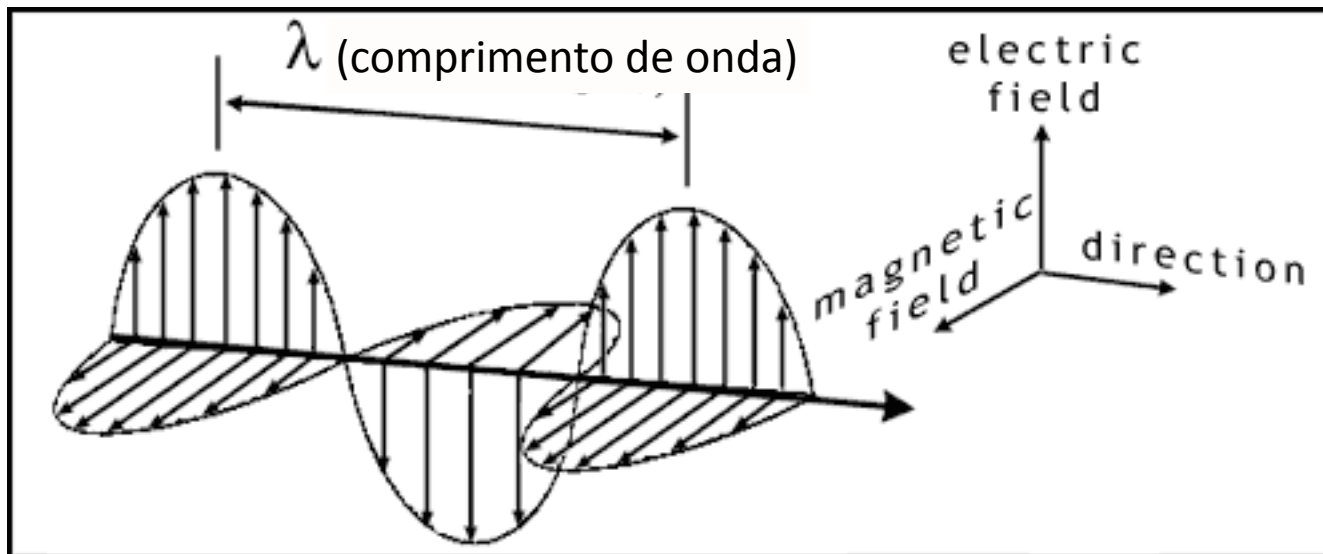


$$v = \lambda f$$

velocidade de propagação - propriedade do meio

No vácuo: $v = c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

Caracterizando uma onda eletromagnética



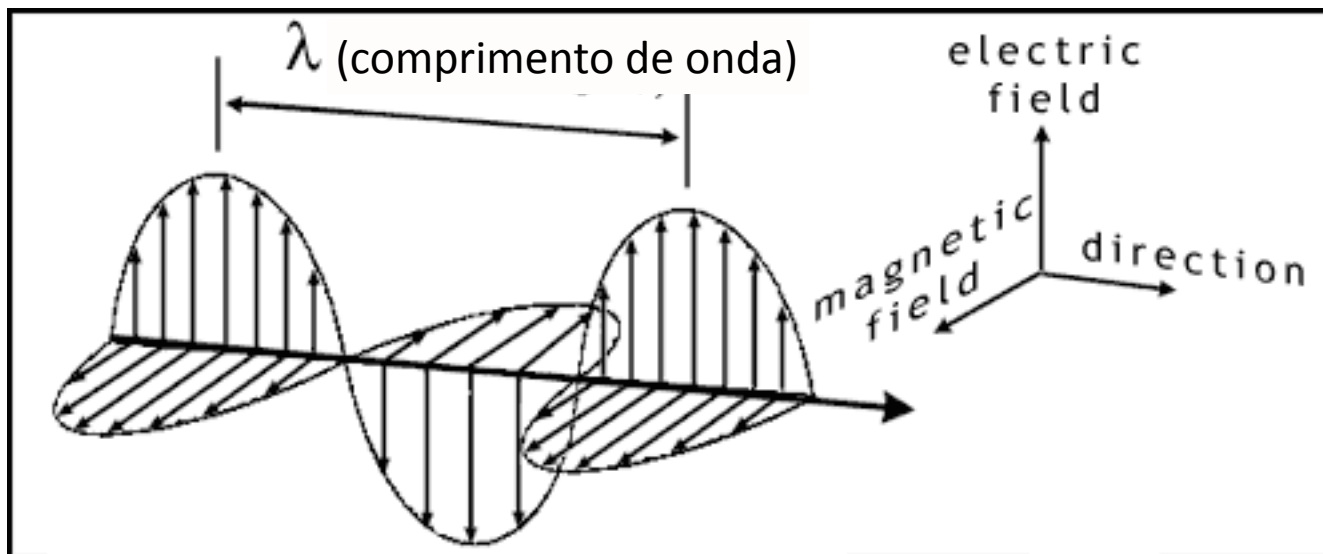
velocidade de propagação - propriedade do meio

No vácuo: $v = c = 3 \times 10^8$ m/s

$$v = \lambda f$$

frequência da onda - determinada pela fonte da onda (p.ex., antena);
Unidade: Hertz (Hz)
Freq. angular: $\omega = 2\pi f$ (rd/s)

Caracterizando uma onda eletromagnética



velocidade de propagação - propriedade do meio

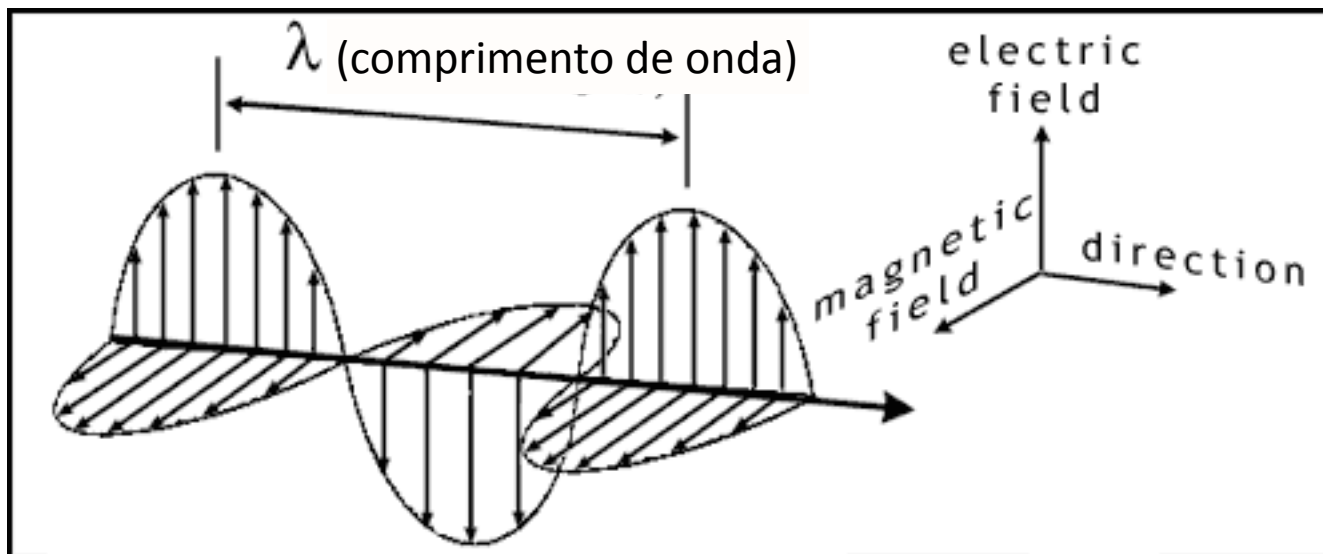
No vácuo: $v = c = 3 \times 10^8$ m/s

$$v = \lambda f$$

comprimento de onda - se ajusta aos valores da velocidade e frequência

frequência da onda - determinada pela fonte da onda (p.ex., antena);
Unidade: Hertz (Hz)
Freq. angular: $\omega = 2\pi f$ (rd/s)

Caracterizando uma onda eletromagnética



velocidade de propagação - propriedade do meio

No vácuo: $v = c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

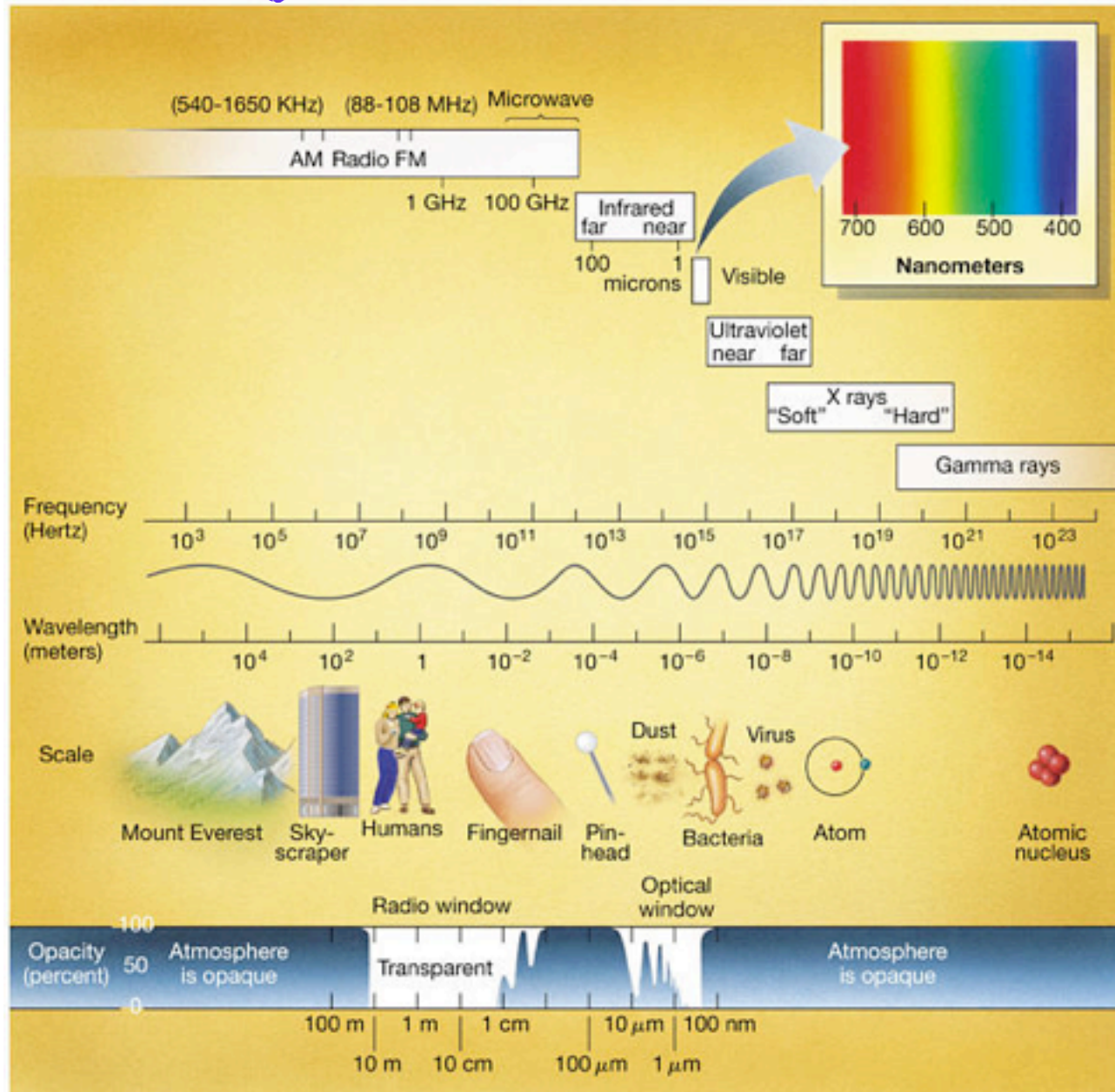
$$v = \lambda f$$

comprimento de onda - se ajusta aos valores da velocidade e frequência

frequência da onda - determinada pela fonte da onda (p.ex., antena);
Unidade: Hertz (Hz)
Freq. angular: $\omega = 2\pi f$ (rd/s)

Como $|\mathbf{B}| = |\mathbf{E}|/c$, os efeitos de uma onda EM num meio são devidos, principalmente, a \mathbf{E}

O espectro eletromagnético



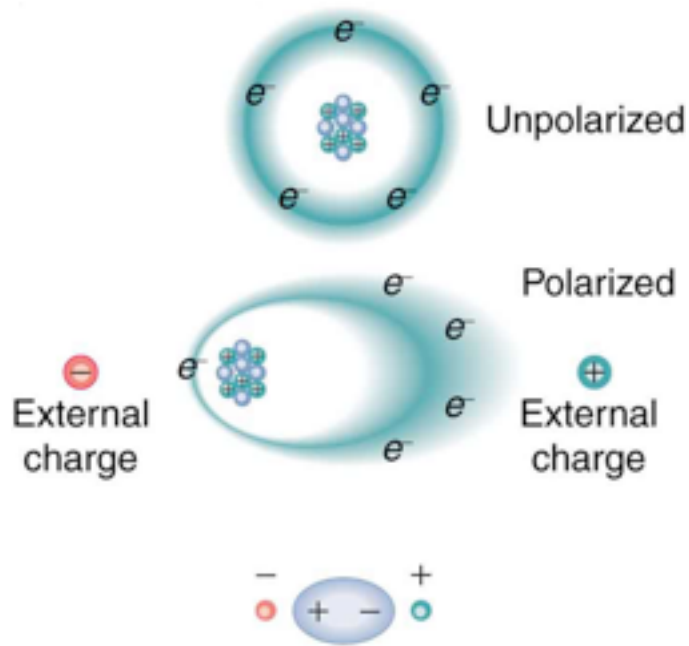
Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

Interação com matéria

Átomo (neutro) em presença de campo eletrostático...

Interação com matéria

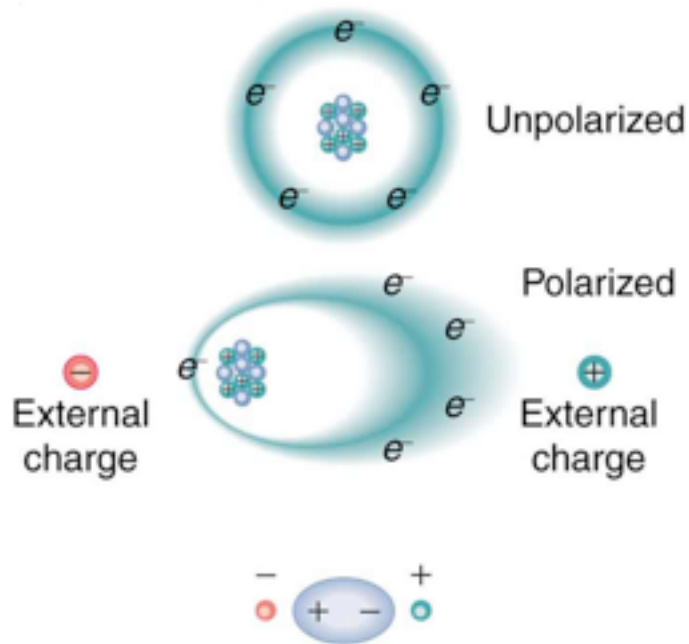
Átomo (neutro) em presença de campo elétrico...



[http://cnx.org/content/m42333/latest/Figure_20_05_06\(a\).jpg](http://cnx.org/content/m42333/latest/Figure_20_05_06(a).jpg)

Interação com matéria

Átomo (neutro) em presença de campo elétrico...



Large-scale view of polarized atom

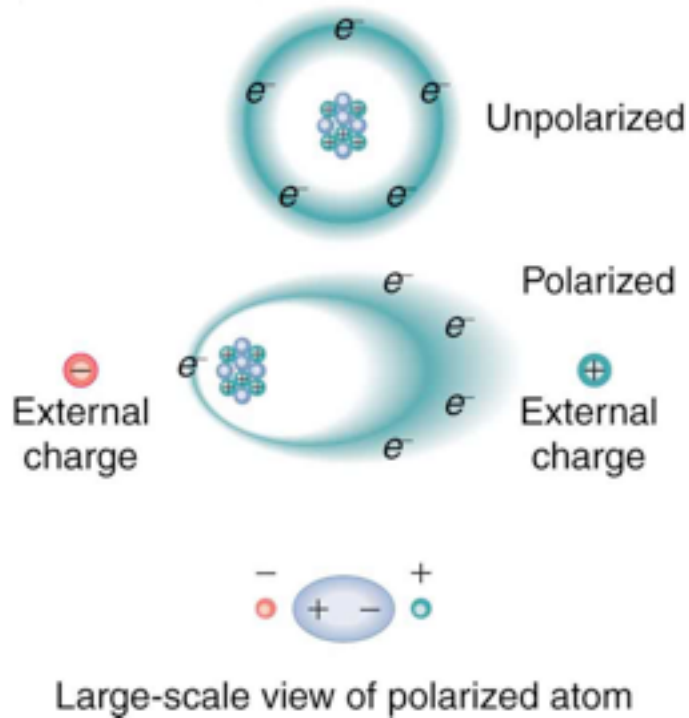
[http://cnx.org/content/m42333/latest/Figure_20_05_06\(a\).jpg](http://cnx.org/content/m42333/latest/Figure_20_05_06(a).jpg)

...pode formar um dipolo elétrico...

Interação com matéria

Átomo (neutro) em presença de campo elétrico...

...e muitos dipolos juntos blindam o campo aplicado...

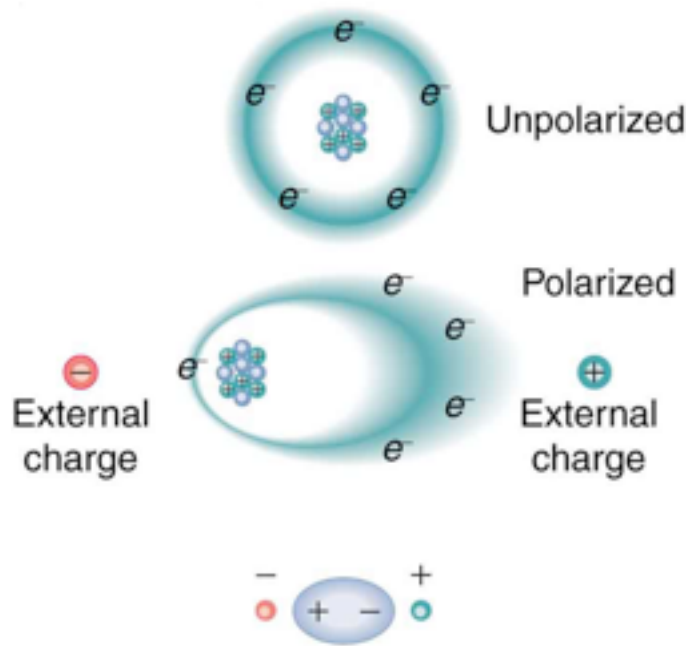


[http://cnx.org/content/m42333/latest/Figure_20_05_06\(a\).jpg](http://cnx.org/content/m42333/latest/Figure_20_05_06(a).jpg)

...pode formar um dipolo elétrico...

Interação com matéria

Átomo (neutro) em presença de campo elétrico...

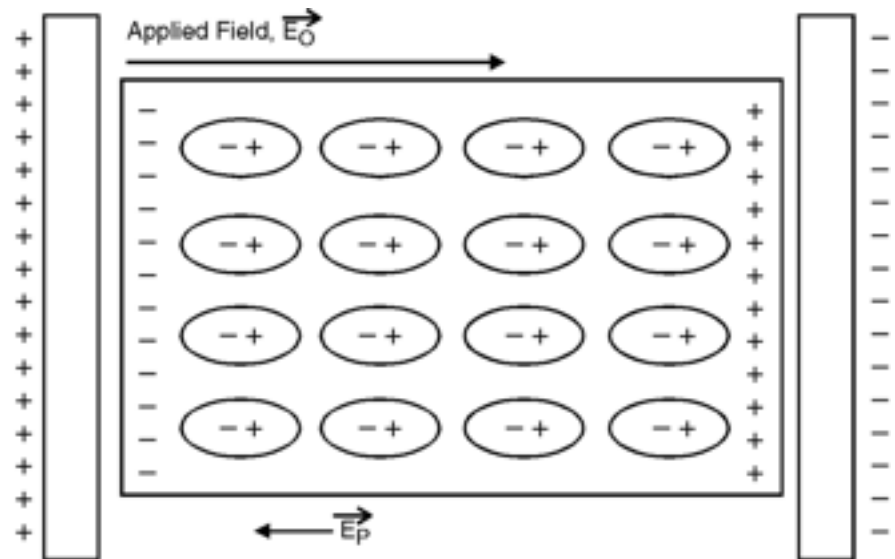


Large-scale view of polarized atom

[http://cnx.org/content/m42333/latest/Figure_20_05_06\(a\).jpg](http://cnx.org/content/m42333/latest/Figure_20_05_06(a).jpg)

...pode formar um dipolo elétrico...

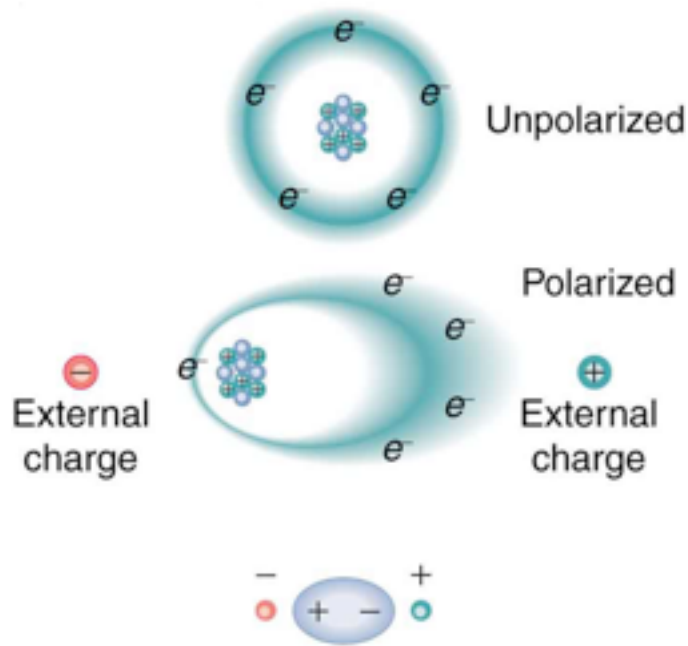
...e muitos dipolos juntos blindam o campo aplicado...



<http://www.winnerscience.com/wp-content/uploads/2011/07/Figure-Polarization.png>

Interação com matéria

Átomo (neutro) em presença de campo elétrico...

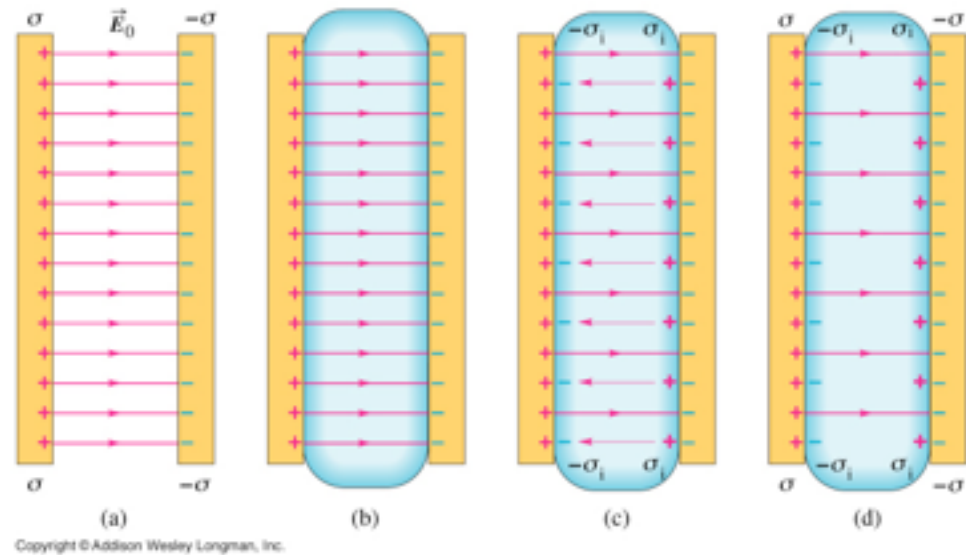


Large-scale view of polarized atom

[http://cnx.org/content/m42333/latest/Figure_20_05_06\(a\).jpg](http://cnx.org/content/m42333/latest/Figure_20_05_06(a).jpg)

...pode formar um dipolo elétrico...

...e muitos dipolos juntos blindam o campo aplicado...

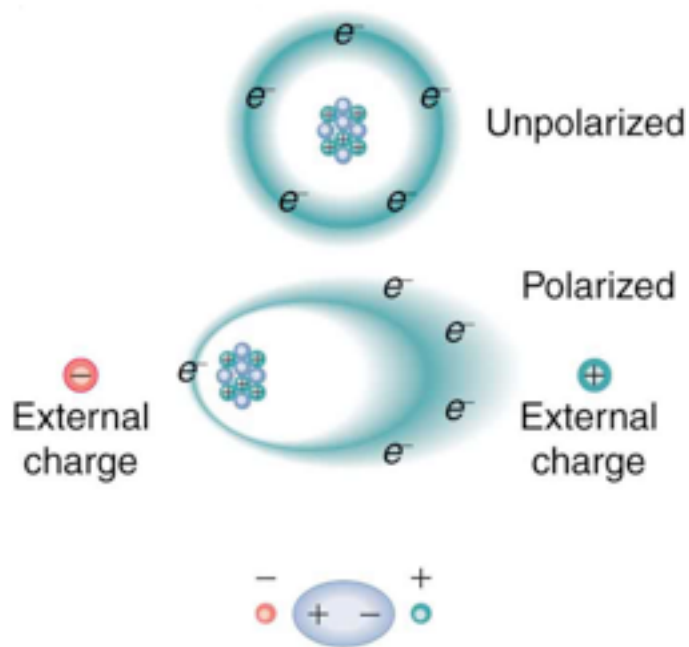


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

http://www.physics.sjsu.edu/becker/physics51/images/25_15EinCapwDielectric.JPG

Interação com matéria

Átomo (neutro) em presença de campo elétrico...

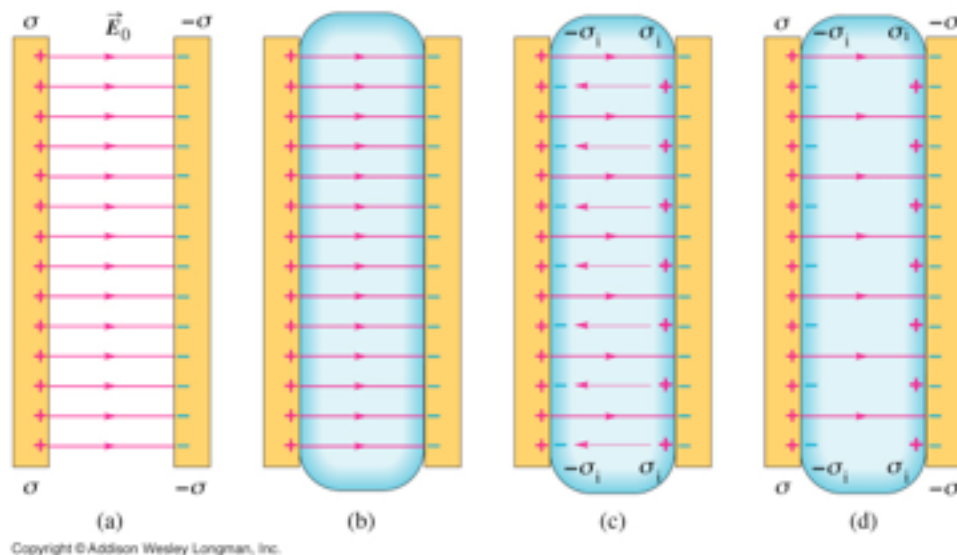


Large-scale view of polarized atom

[http://cnx.org/content/m42333/latest/Figure_20_05_06\(a\).jpg](http://cnx.org/content/m42333/latest/Figure_20_05_06(a).jpg)

...pode formar um dipolo elétrico...

...e muitos dipolos juntos blindam o campo aplicado...



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

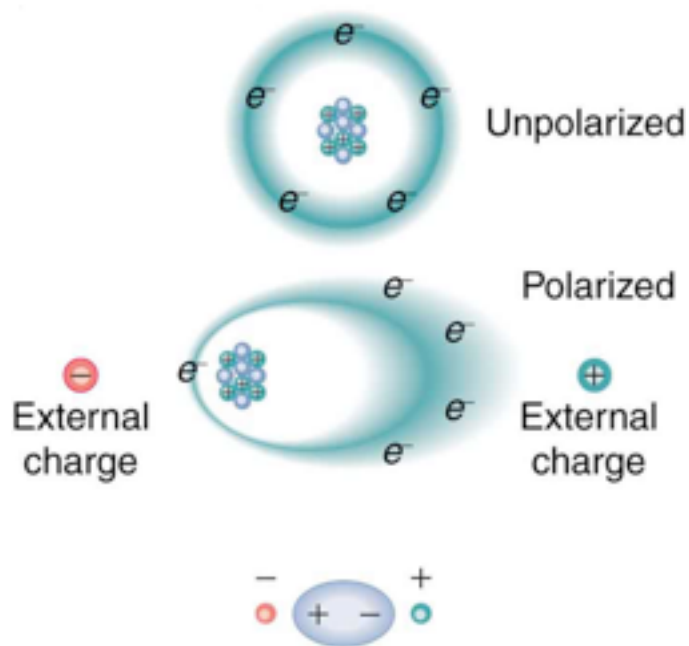
http://www.physics.sjsu.edu/becker/physics51/images/25_15EinCapwDielectric.JPG

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 - \mathbf{E}_P$$

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{E}_0}{\epsilon}$$

Interação com matéria

Átomo (neutro) em presença de campo elétrico...

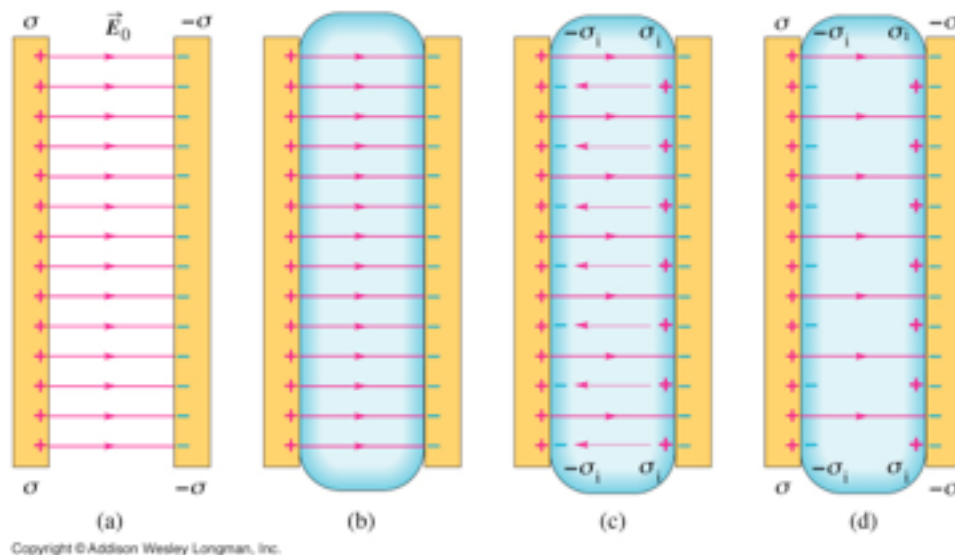


Large-scale view of polarized atom

[http://cnx.org/content/m42333/latest/figure_20_05_06\(a\).jpg](http://cnx.org/content/m42333/latest/figure_20_05_06(a).jpg)

...pode formar um dipolo elétrico...

...e muitos dipolos juntos blindam o campo aplicado...



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

http://www.physics.sjsu.edu/beckler/physics51/images/25_15EinCapwDielectric.JPG

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 - \mathbf{E}_P$$

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{E}_0}{\epsilon}$$

ϵ é a
constante
dielétrica do
meio

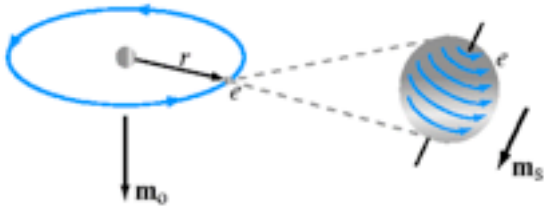
Interação com matéria

Interação com matéria

Alguns átomos têm momento de dipolo magnético ("corrente orbital" + spin)

Interação com matéria

Alguns átomos têm momento de dipolo magnético ("corrente orbital" + spin)

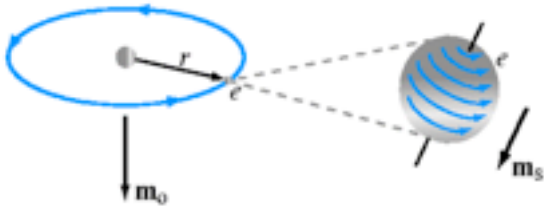


(a) Orbiting electron

(b) Spinning electron

Interação com matéria

Alguns átomos têm momento de dipolo magnético ("corrente orbital" + spin)



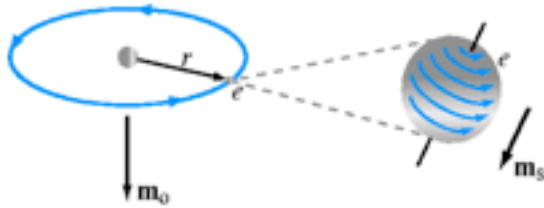
(a) Orbiting electron

(b) Spinning electron

Material (p.ex., Fe) em presença de campo magnetostático aplicado...

Interação com matéria

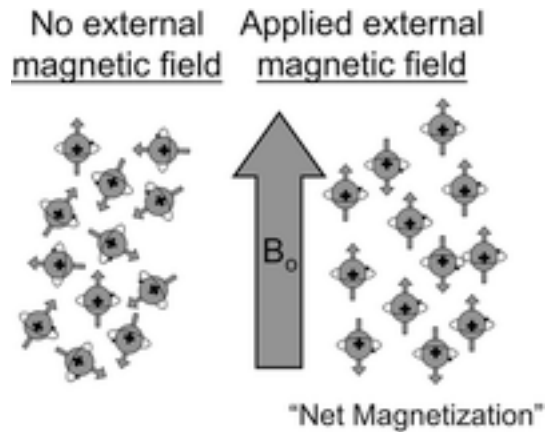
Alguns átomos têm momento de dipolo magnético ("corrente orbital" + spin)



(a) Orbiting electron

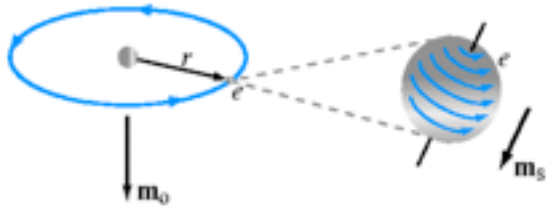
(b) Spinning electron

Material (p.ex., Fe) em presença de campo magnetostático aplicado...



Interação com matéria

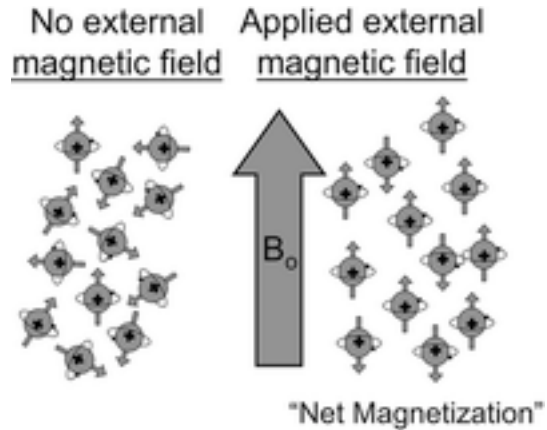
Alguns átomos têm momento de dipolo magnético ("corrente orbital" + spin)



(a) Orbiting electron

(b) Spinning electron

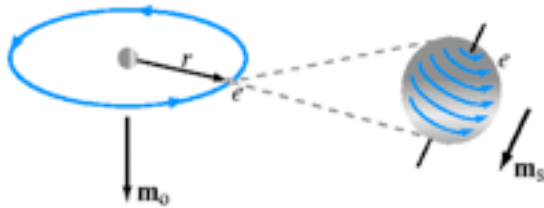
Material (p.ex., Fe) em presença de campo magnetostático aplicado...



...tem seus dipolos magnéticos alinhados com o campo externo...

Interação com matéria

Alguns átomos têm momento de dipolo magnético ("corrente orbital" + spin)

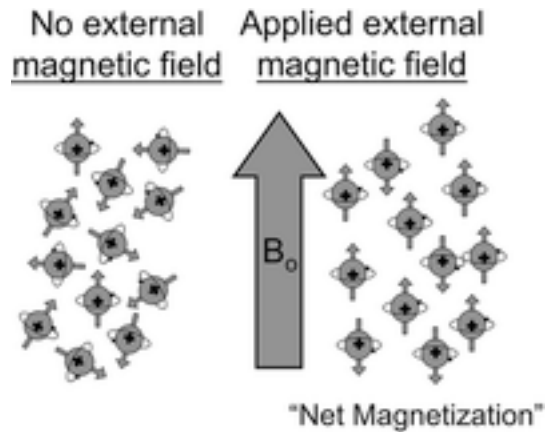


(a) Orbiting electron

(b) Spinning electron

...e podem reforçar o campo magnético total...

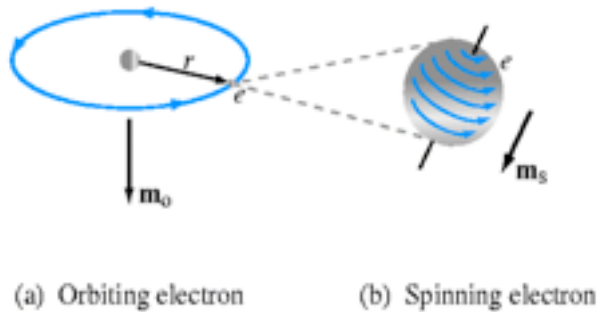
Material (p.ex., Fe) em presença de campo magnetostático aplicado...



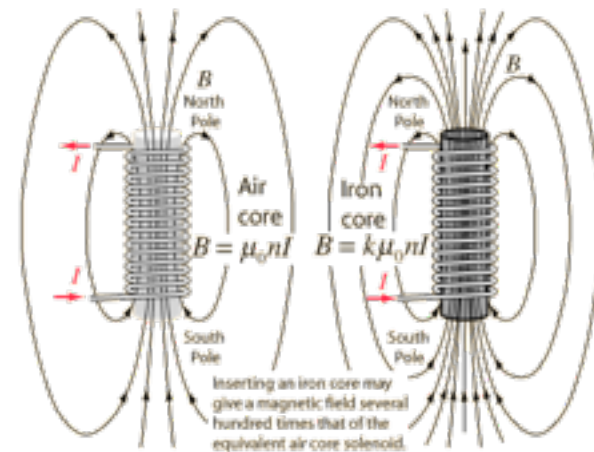
...tem seus dipolos magnéticos alinhados com o campo externo...

Interação com matéria

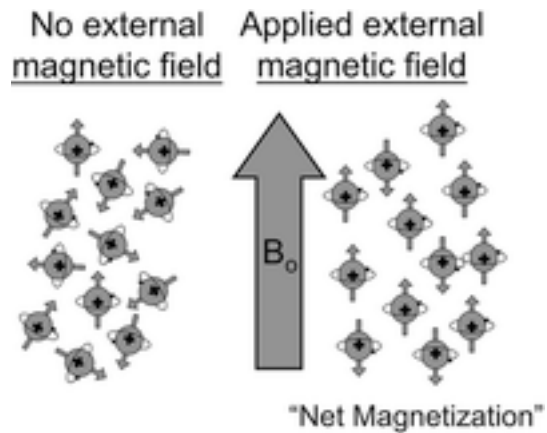
Alguns átomos têm momento de dipolo magnético ("corrente orbital" + spin)



...e podem reforçar o campo magnético total...



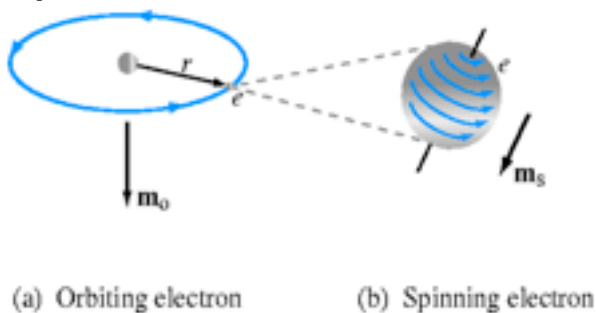
Material (p.ex., Fe) em presença de campo magnetostático aplicado...



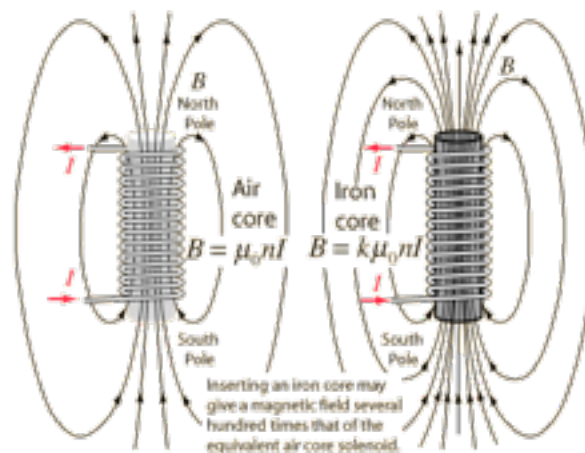
...tem seus dipolos magnéticos alinhados com o campo externo...

Interação com matéria

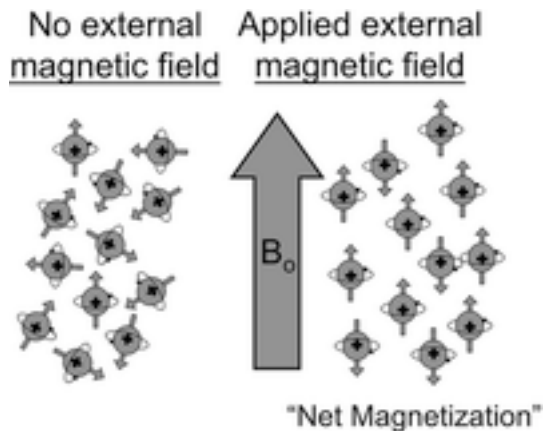
Alguns átomos têm momento de dipolo magnético ("corrente orbital" + spin)



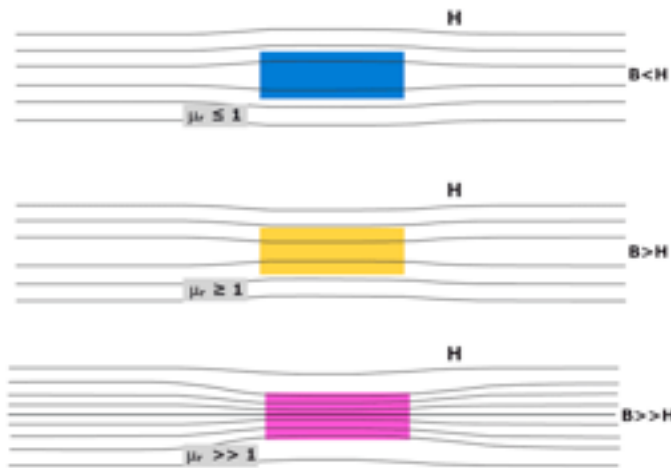
...e podem reforçar o campo magnético total...



Material (p.ex., Fe) em presença de campo magnetostático aplicado...

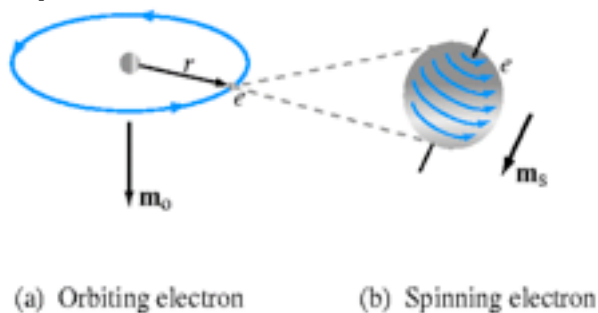


...tem seus dipolos magnéticos alinhados com o campo externo...

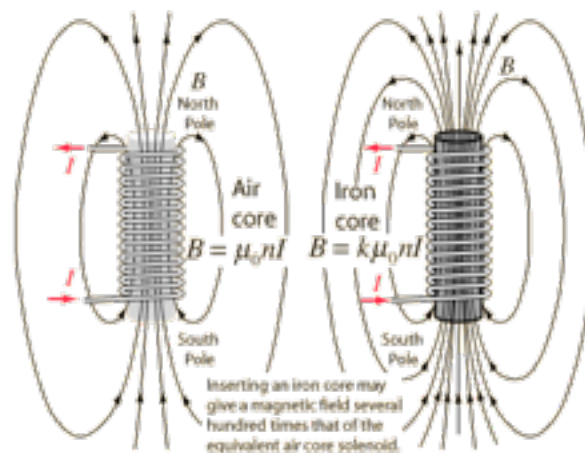


Interação com matéria

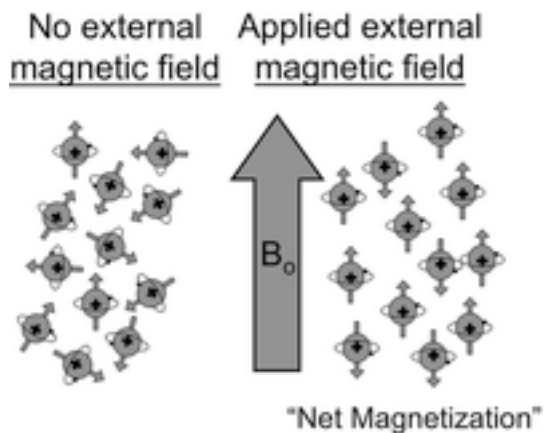
Alguns átomos têm momento de dipolo magnético ("corrente orbital" + spin)



...e podem reforçar o campo magnético total...

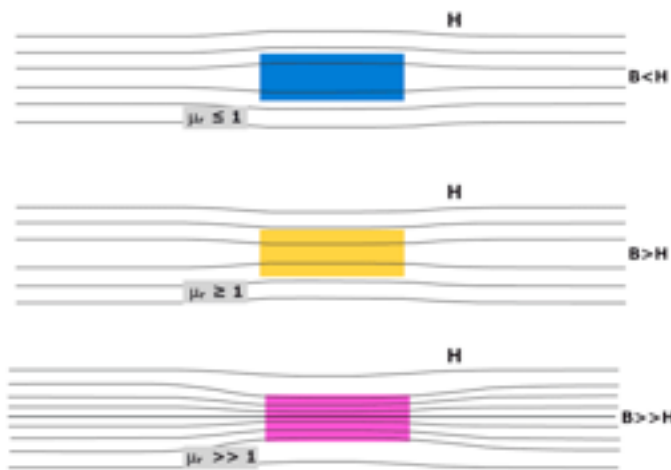


Material (p.ex., Fe) em presença de campo magnetostático aplicado...



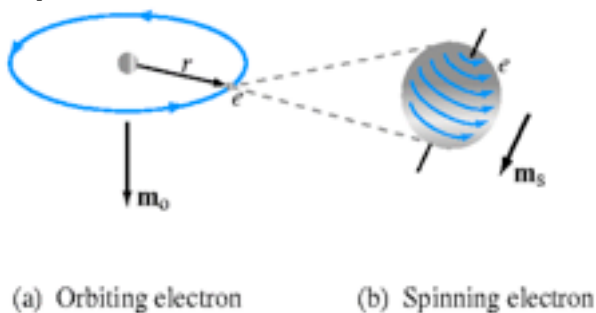
...tem seus dipolos magnéticos alinhados com o campo externo...

$$B = \mu B_0$$

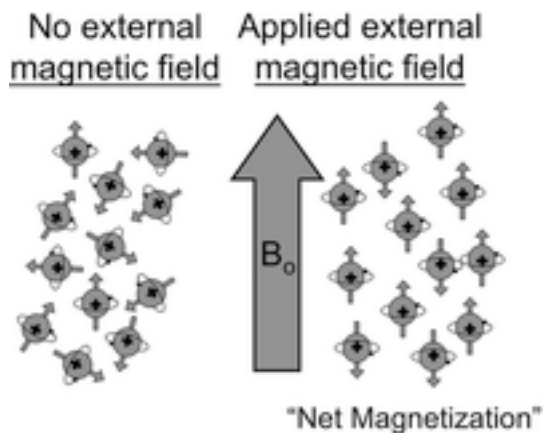


Interação com matéria

Alguns átomos têm momento de dipolo magnético ("corrente orbital" + spin)

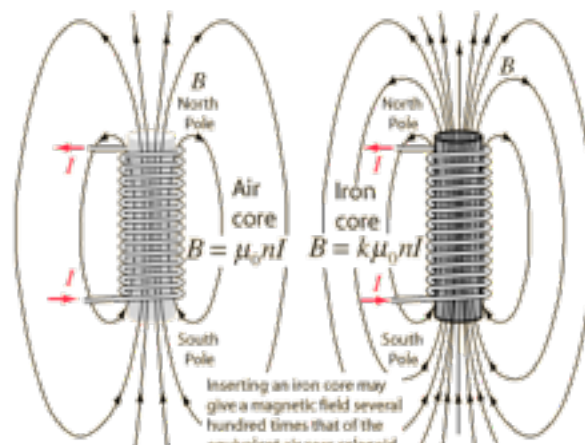


Material (p.ex., Fe) em presença de campo magnetostático aplicado...



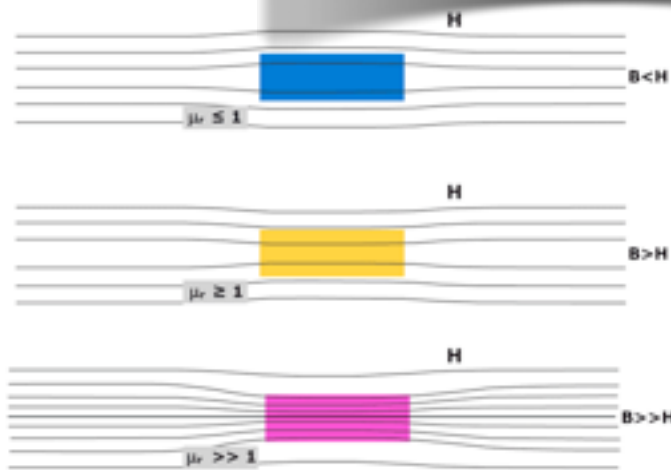
...tem seus dipolos magnéticos alinhados com o campo externo...

...e podem reforçar o campo magnético total...



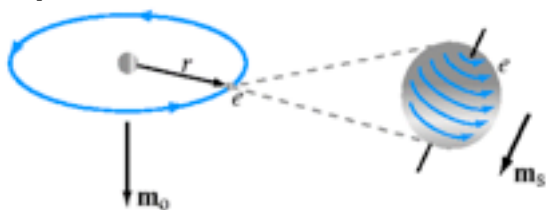
$$B = \mu B_0$$

μ é a permeabilidade magnética do meio



Interação com matéria

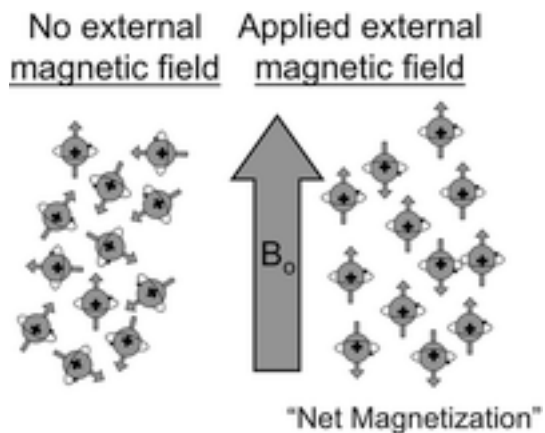
Alguns átomos têm momento de dipolo magnético ("corrente orbital" + spin)



(a) Orbiting electron (b) Spinning electron

<http://homepages.engineering.auckland.ac.nz/~kacprzak/notes.htm>

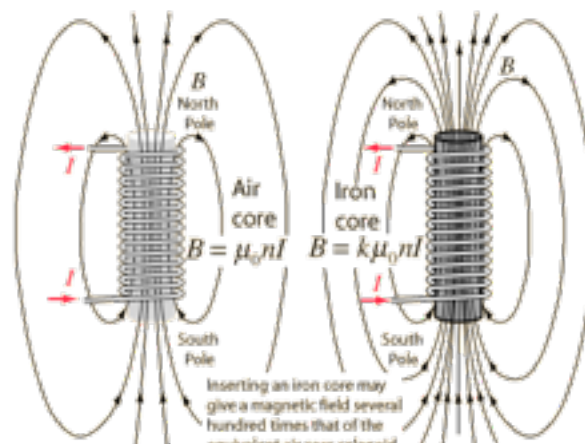
Material (p.ex., Fe) em presença de campo magnetostático aplicado...



<http://radiographics.rsna.org/content/25/4/1087/F4.small.gif>

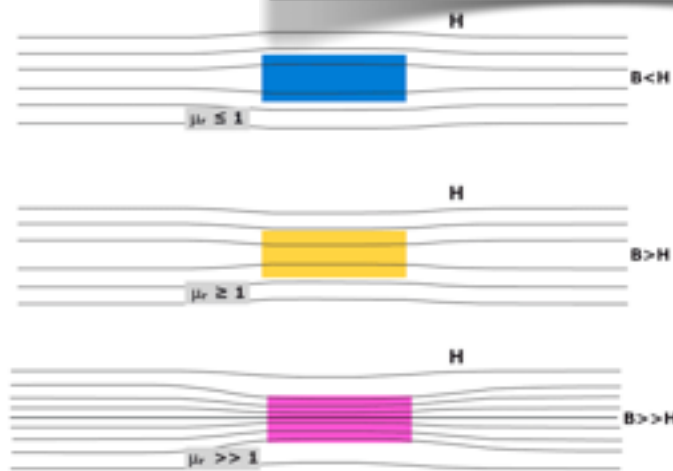
...tem seus dipolos magnéticos alinhados com o campo externo...

...e podem reforçar o campo magnético total...



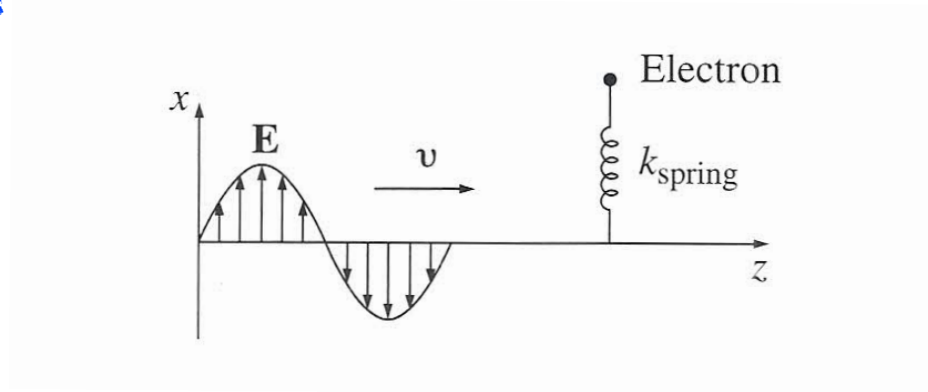
$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{B}_0$$

μ é a permeabilidade magnética do meio

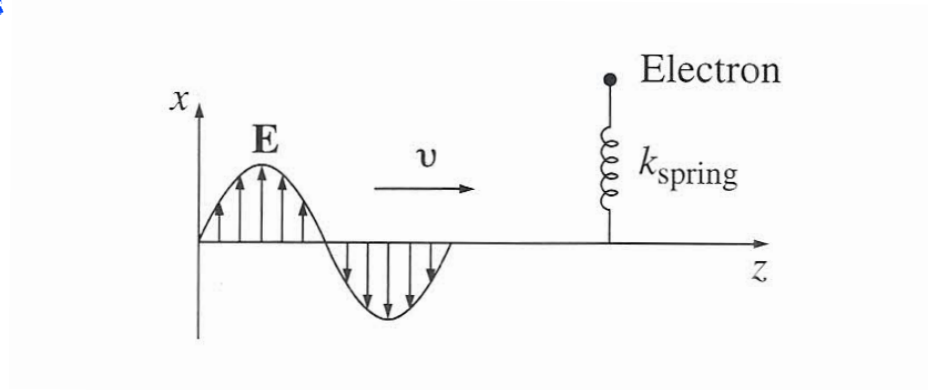


O que acontece quando uma onda eletromagnética passa em um meio material?

O que acontece quando uma onda eletromagnética passa em um meio material?



O que acontece quando uma onda eletromagnética passa em um meio material?

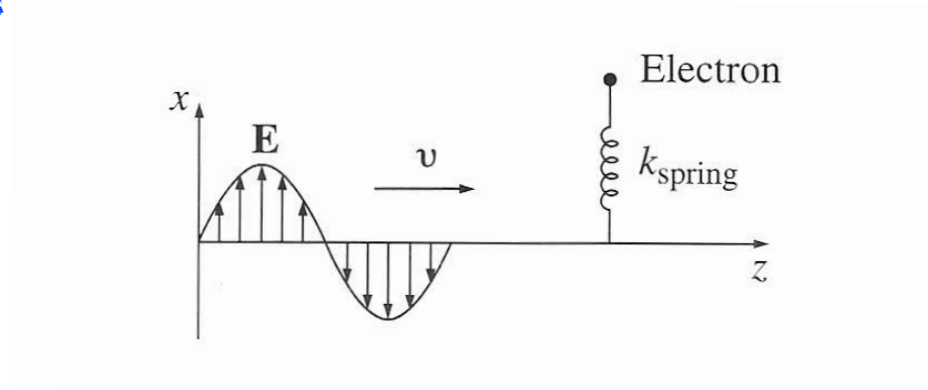


R: O campo elétrico "sacode" os átomos

Modelo clássico: oscilador forçado (freq. f) e amortecido

\Rightarrow comportamento dos átomos depende da frequência da onda

O que acontece quando uma onda eletromagnética passa em um meio material?



R: O campo elétrico "sacode" os átomos

Modelo clássico: oscilador forçado (freq. f) e amortecido

⇒ comportamento dos átomos depende da frequência da onda

Consequências: átomos também irradiam, defasados (atrasados)

⇒ velocidade de propagação da onda depende da frequência!

⇒ dispersão

Em meios não-dispersivos a velocidade de propagação independe da frequência da onda

$$\text{No vácuo: } c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

$$\text{Num meio material: } v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}}$$

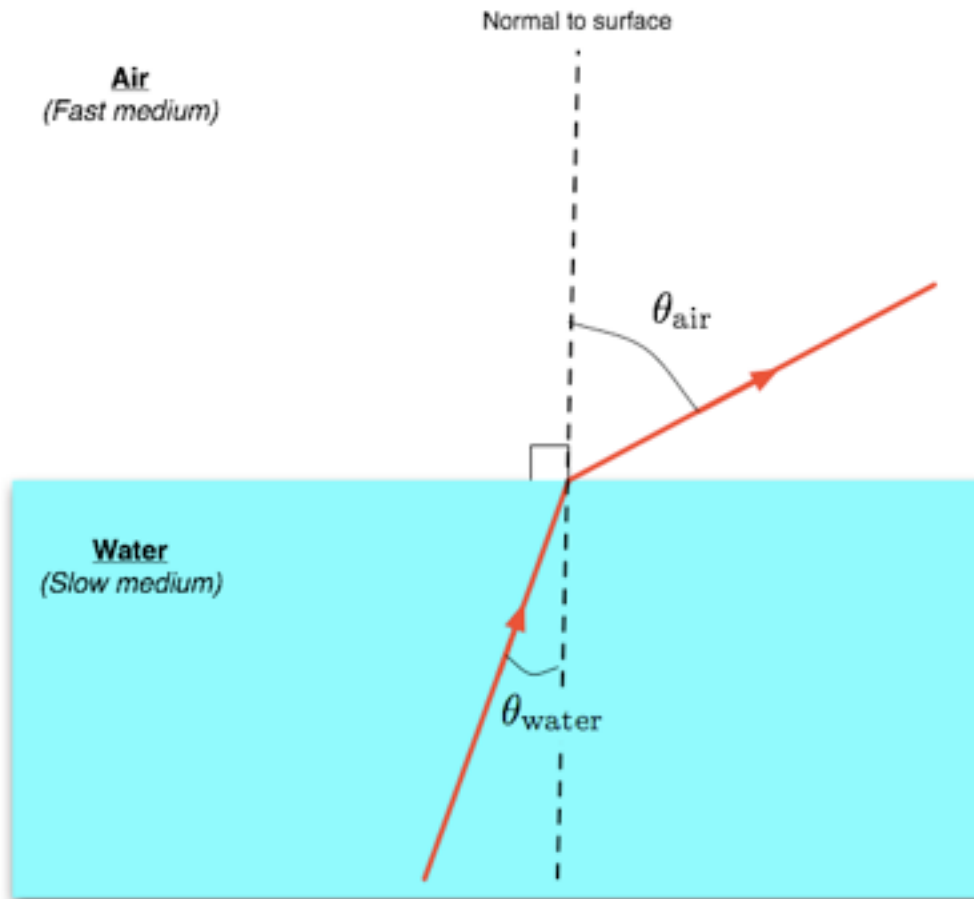
$$\text{Índice de refração: } n = \frac{c}{v}$$

e em meios **dispersivos** a velocidade de propagação depende da frequência da onda

$$v = v(f) = \frac{1}{\sqrt{\mu(f)\varepsilon(f)}}$$

Propagação por meios diferentes: Refração

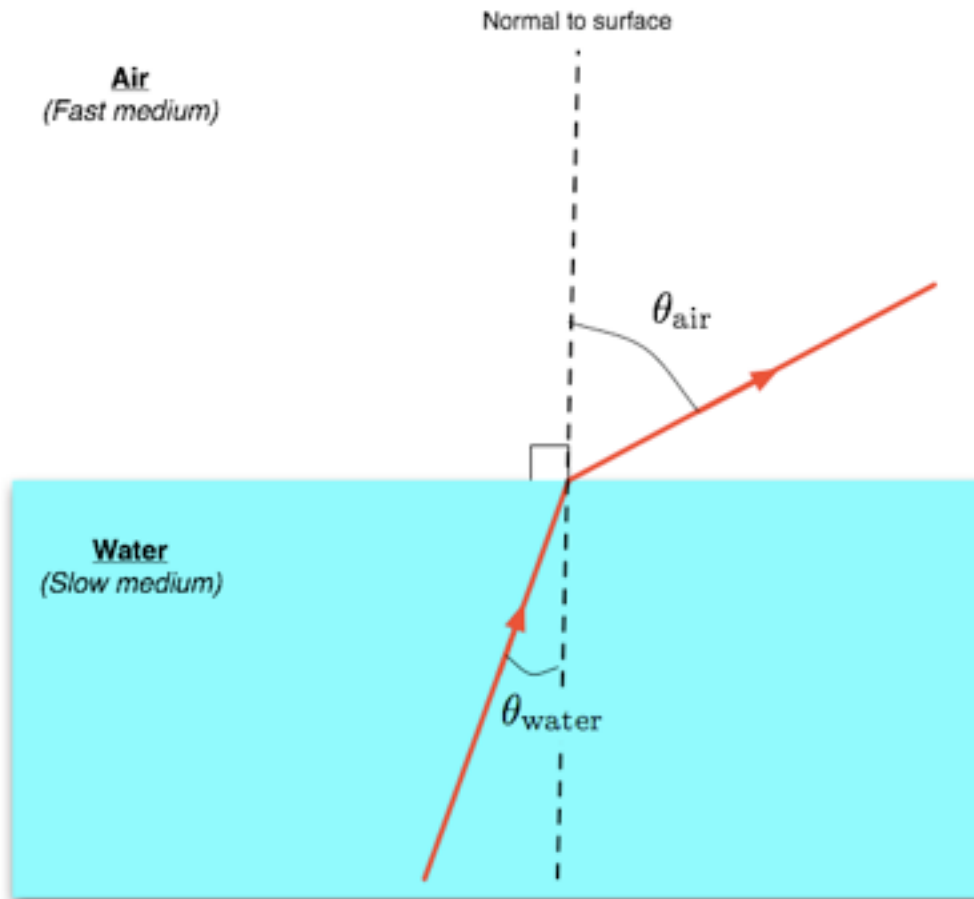
Propagação por meios diferentes: Refração



Lei de Snell

$$n_{\text{air}} \sin \theta_{\text{air}} = n_{\text{water}} \sin \theta_{\text{water}}$$

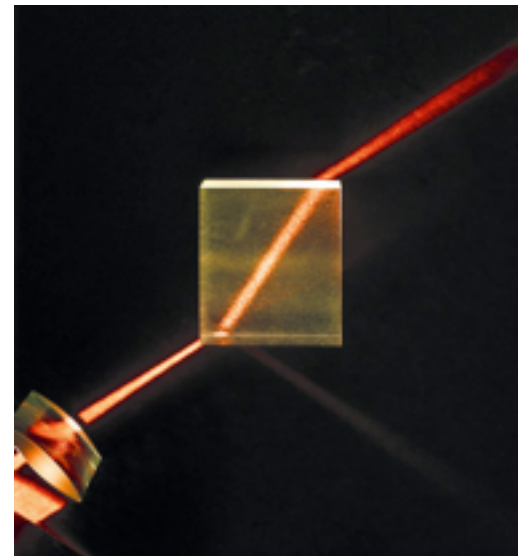
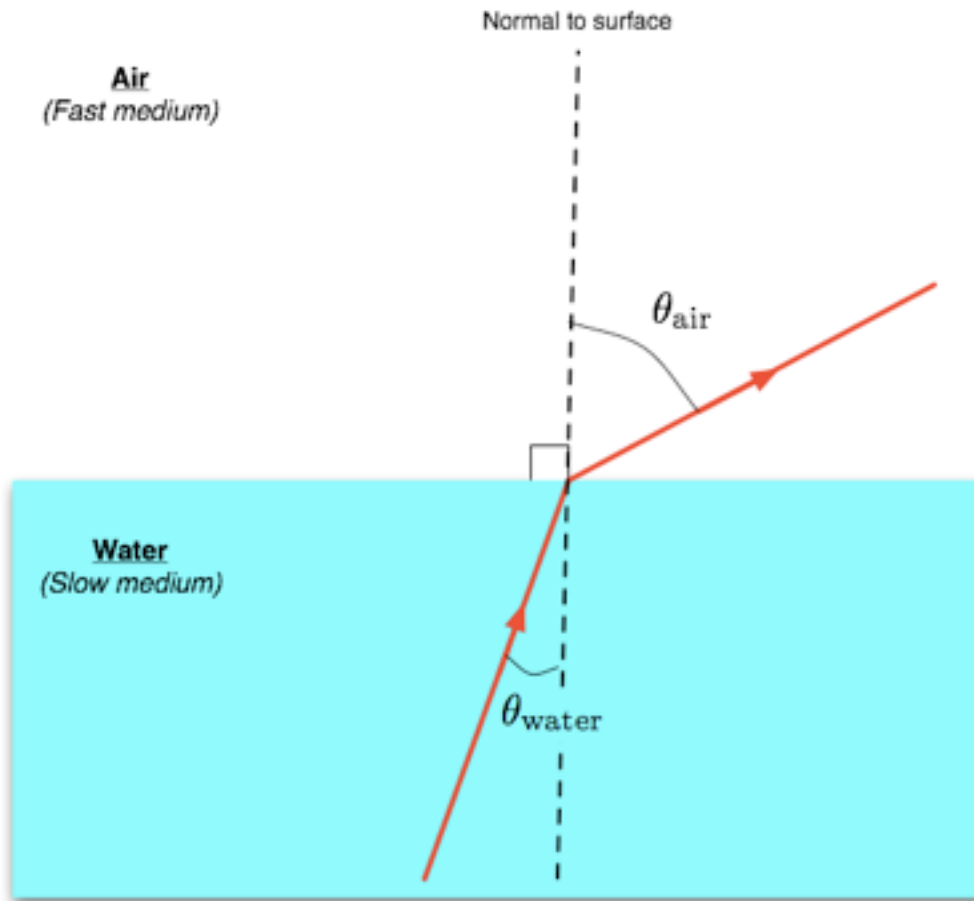
Propagação por meios diferentes: Refração



Lei de Snell

$$n_{\text{air}} \sin \theta_{\text{air}} = n_{\text{water}} \sin \theta_{\text{water}}$$

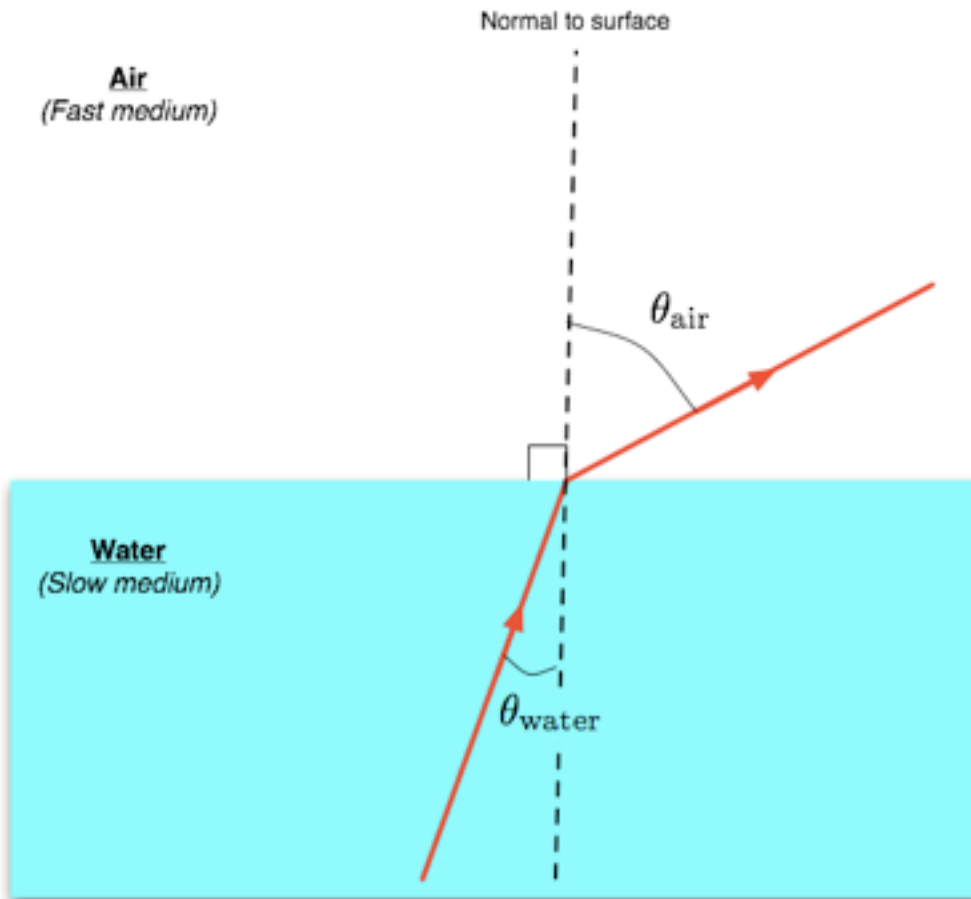
Propagação por meios diferentes: Refração



Lei de Snell

$$n_{\text{air}} \sin \theta_{\text{air}} = n_{\text{water}} \sin \theta_{\text{water}}$$

Propagação por meios diferentes: Refração



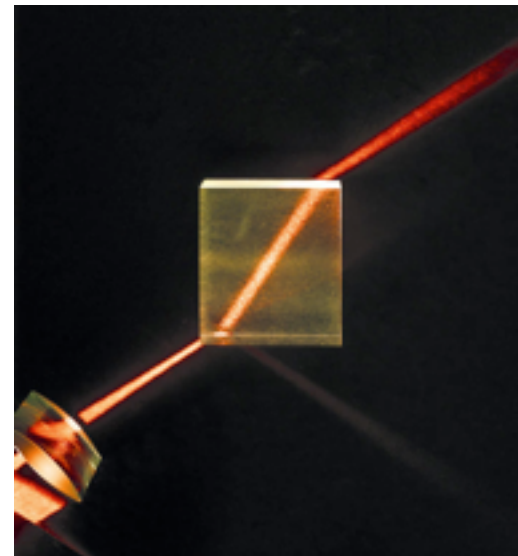
Lei de Snell

$$n_{\text{air}} \sin \theta_{\text{air}} = n_{\text{water}} \sin \theta_{\text{water}}$$

<http://lifshitz.ucdavis.edu/~dmartin/phy7/7C/Refraction/refraction.png>



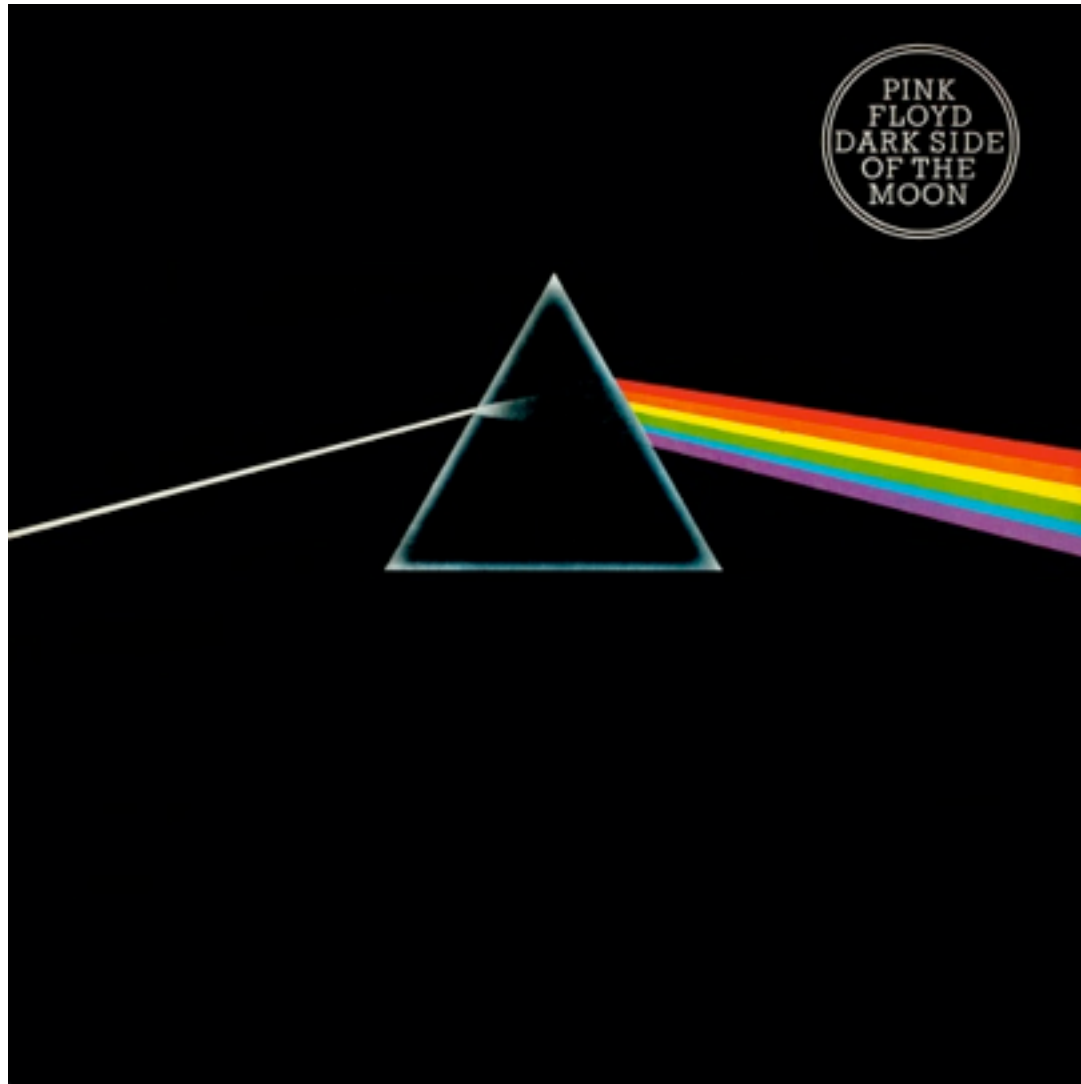
http://webphysics.davidson.edu/faculty/dmb/EdibleOpticalMaterials/glass_of_water.jpg



<http://www.dkimages.com/discover/Home/Science/Physics-and-Chemistry/Sound-and-Light/Light-Waves/Light-Waves-023.html>

Refração em meios dispersivos

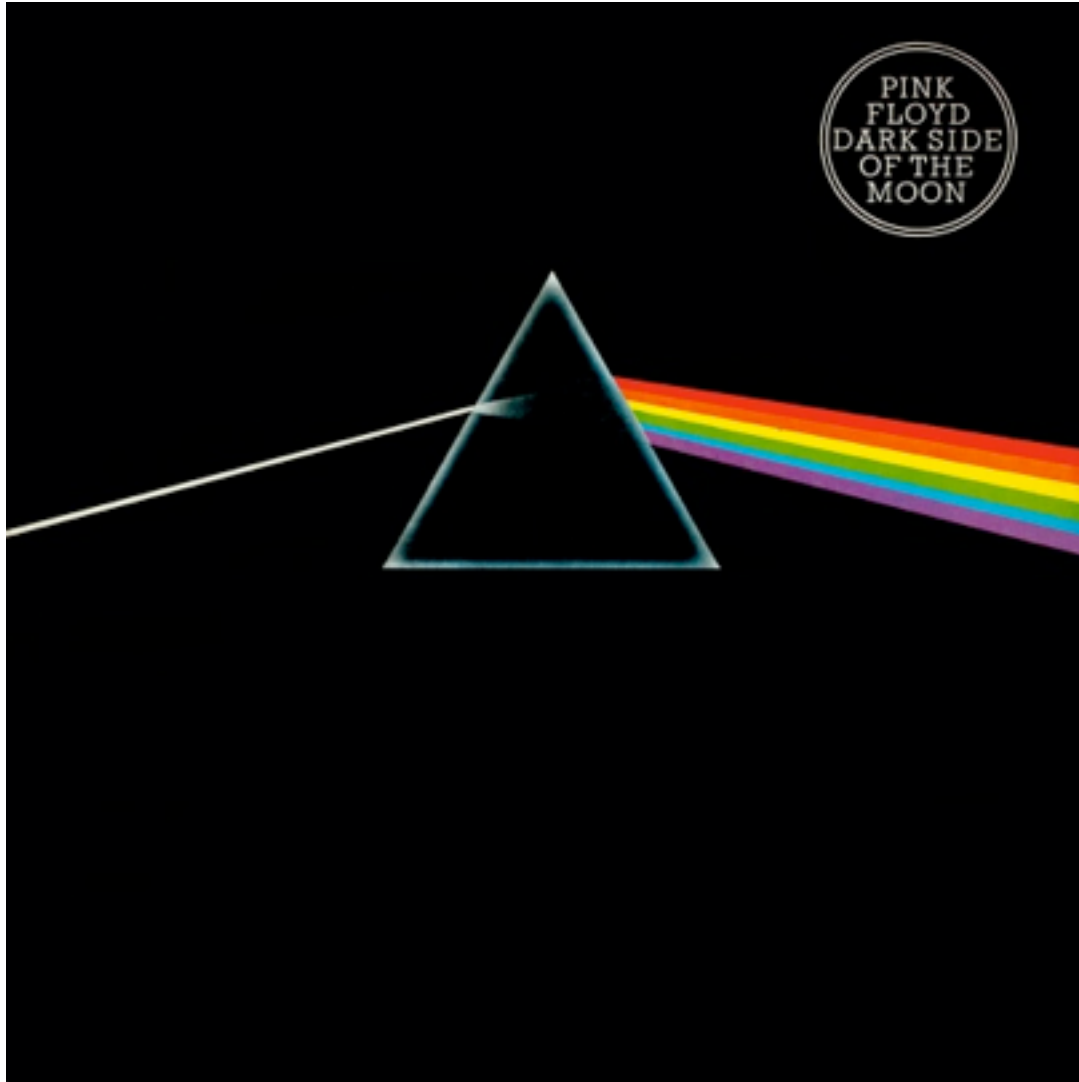
Refração em meios dispersivos



Refração em meios dispersivos



Refração em meios dispersivos



<http://www.hegel.net/en/gif/prism-and-refraction-of-light-into-rainbow-2-AJHD.jpg>

Luz branca: todas as cores (frequencias)

Luz branca: todas as cores (frequencias)
Cada cor tem um índice de refração

Luz branca: todas as cores (frequencias)

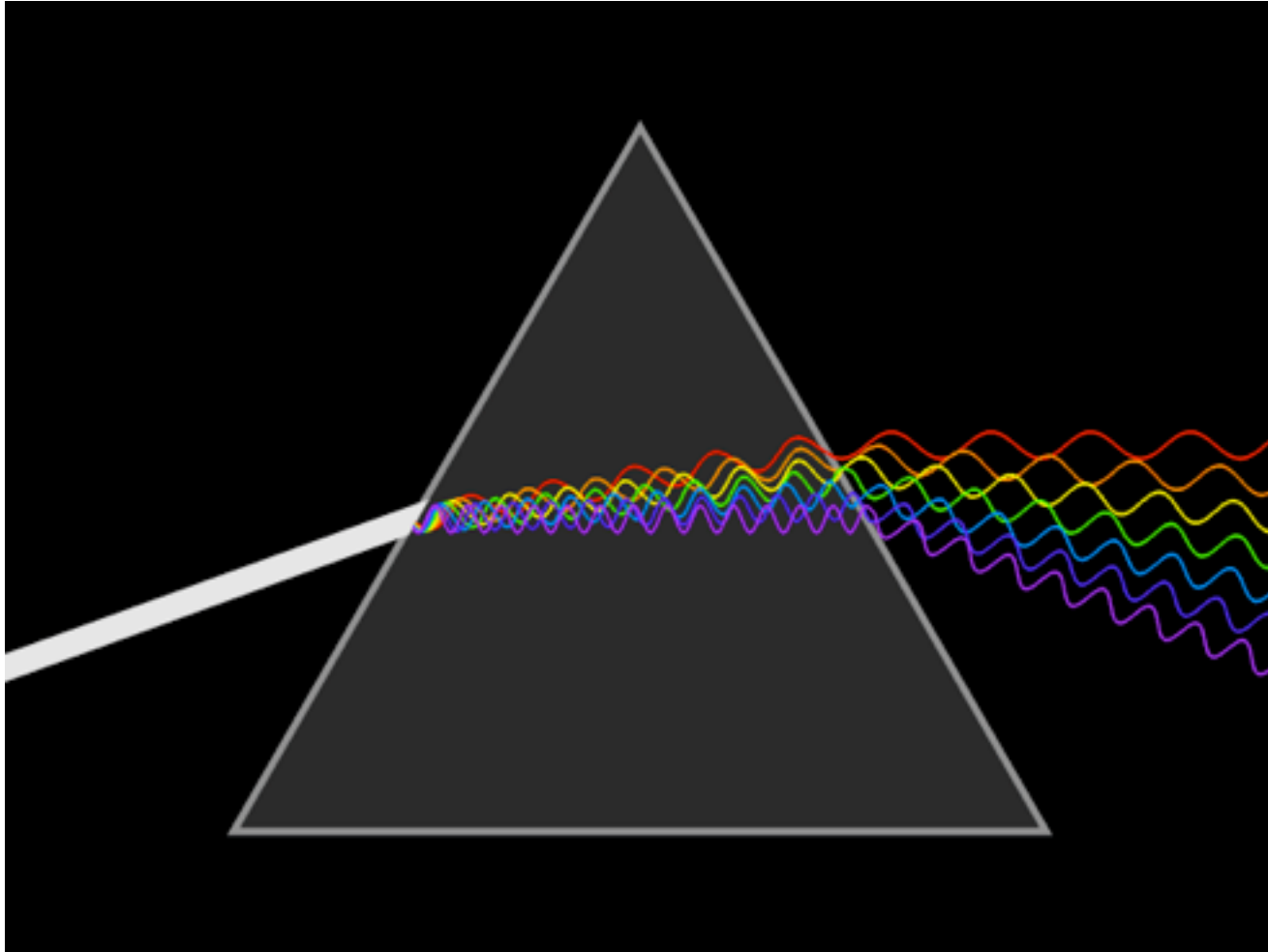
Cada cor tem um índice de refração

Lei de Snell: cada cor é refratada por um ângulo

Luz branca: todas as cores (frequencias)

Cada cor tem um índice de refração

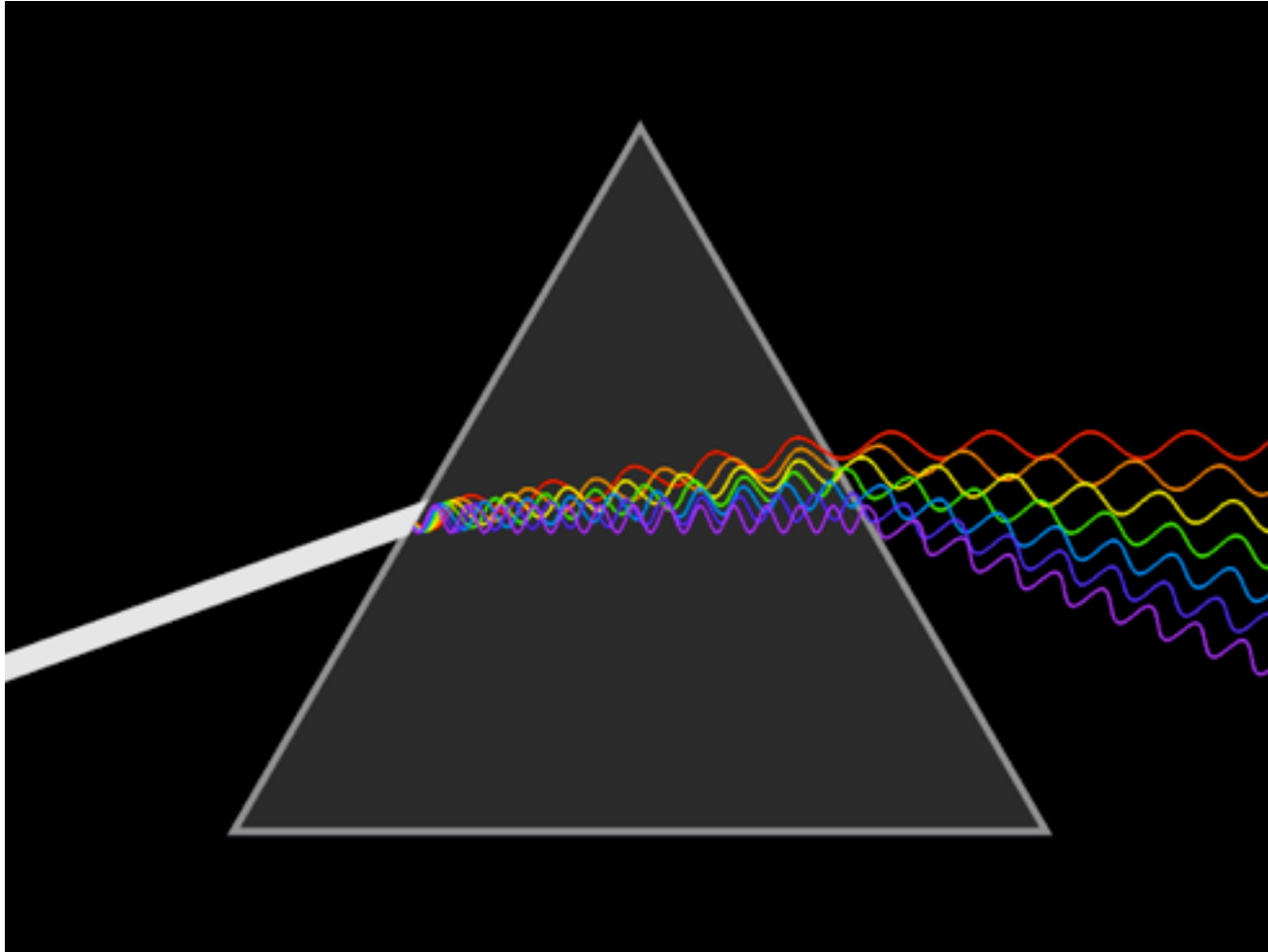
Lei de Snell: cada cor é refratada por um ângulo



Luz branca: todas as cores (frequencias)

Cada cor tem um índice de refração

Lei de Snell: cada cor é refratada por um ângulo



http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f5/Light_dispersion_conceptual_waves.gif

O que aconteceria se ε e μ pudessem ser simultaneamente negativos?

O que aconteceria se ϵ e μ pudessem ser simultaneamente negativos?

Veselago (1968): o índice de refração seria negativo

O que aconteceria se ϵ e μ pudessem ser simultaneamente negativos?

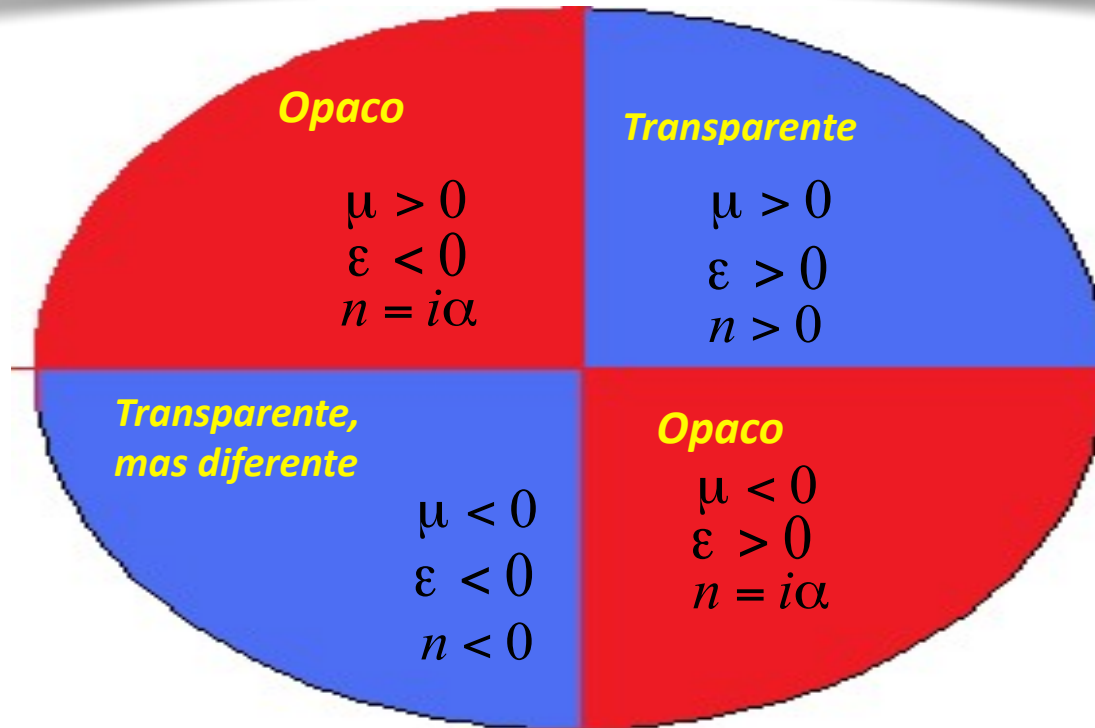
Veselago (1968): o índice de refração seria negativo

$$\epsilon < 0 \text{ e } \mu < 0 \Rightarrow n = -\sqrt{\epsilon\mu} < 0$$

O que aconteceria se ϵ e μ pudessem ser simultaneamente negativos?

Veselago (1968): o índice de refração seria negativo

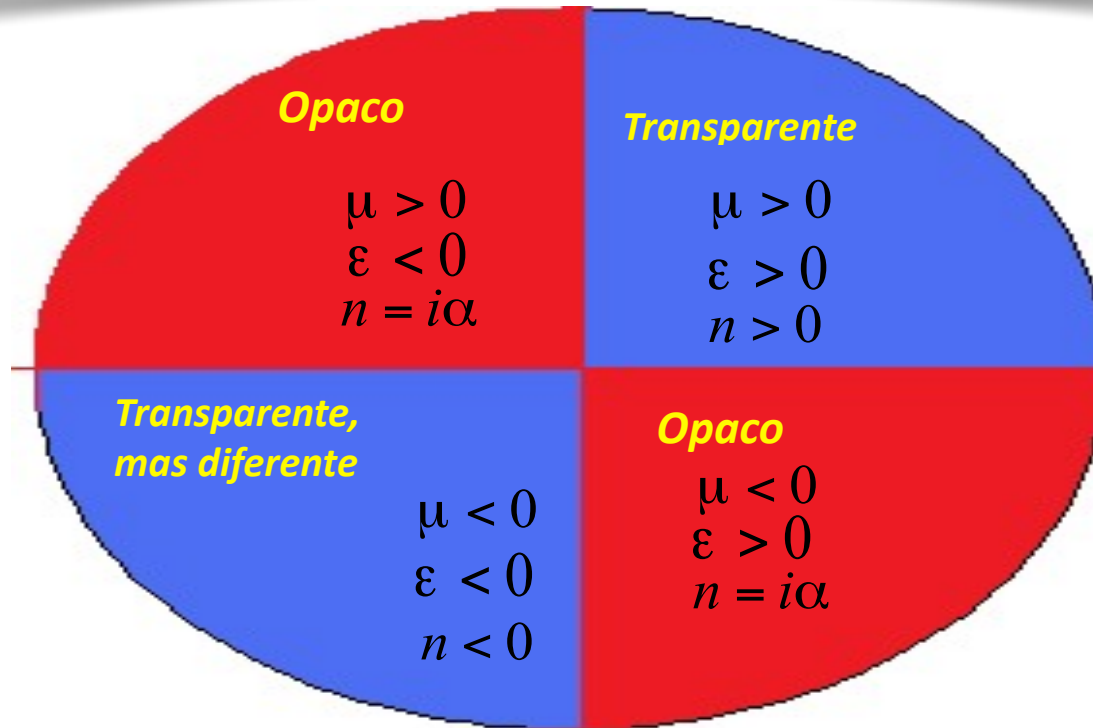
$$\epsilon < 0 \text{ e } \mu < 0 \Rightarrow n = -\sqrt{\epsilon\mu} < 0$$



O que aconteceria se ϵ e μ pudessem ser simultaneamente negativos?

Veselago (1968): o índice de refração seria negativo

$$\epsilon < 0 \text{ e } \mu < 0 \Rightarrow n = -\sqrt{\epsilon\mu} < 0$$



Como realizar isto no laboratório?

Com metamaterials !!!!

Com metamateriais !!!!

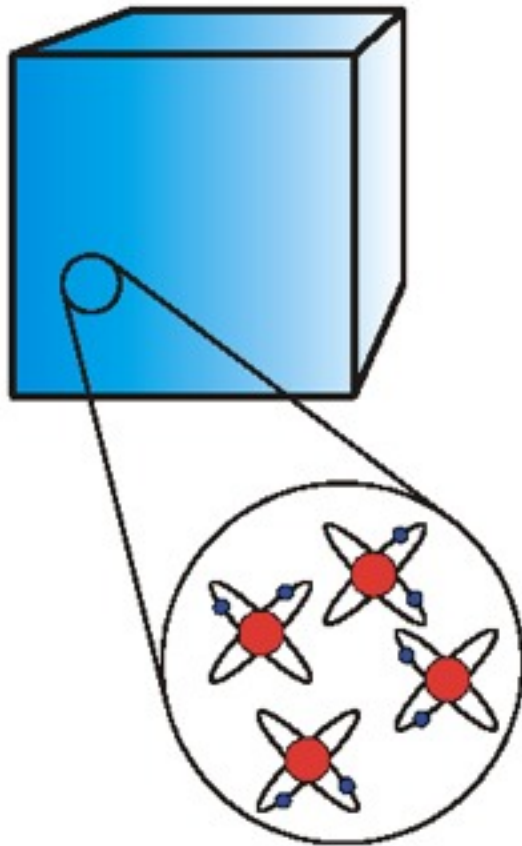
Materiais convencionais:

propriedades derivam de seus constituintes atômicos

Com metamateriais !!!!

Materiais convencionais:

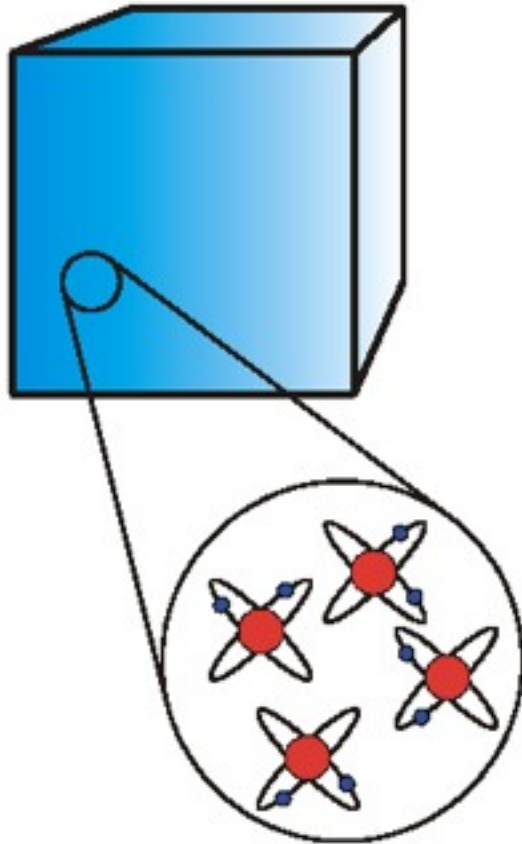
propriedades derivam de seus constituintes atômicos



Com metamateriais !!!!

Materiais convencionais:

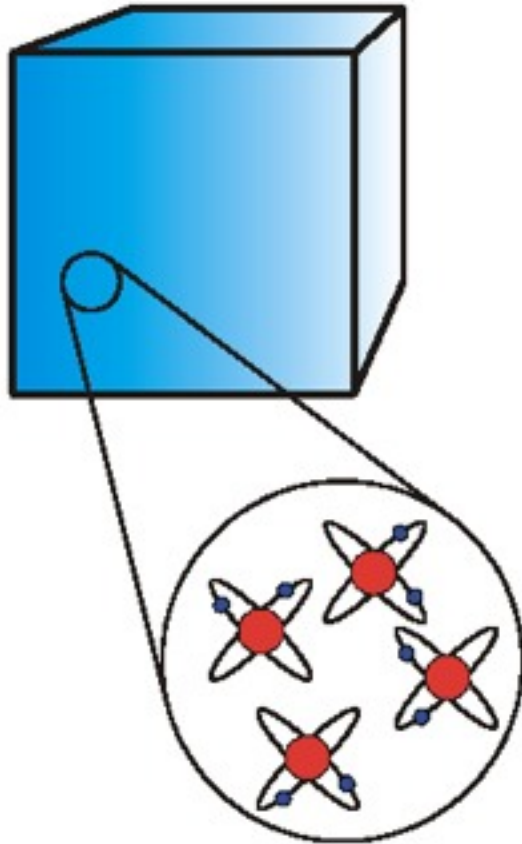
propriedades derivam de seus constituintes atômicos



Com metamateriais !!!!

Materiais convencionais:

propriedades derivam de seus constituintes atômicos



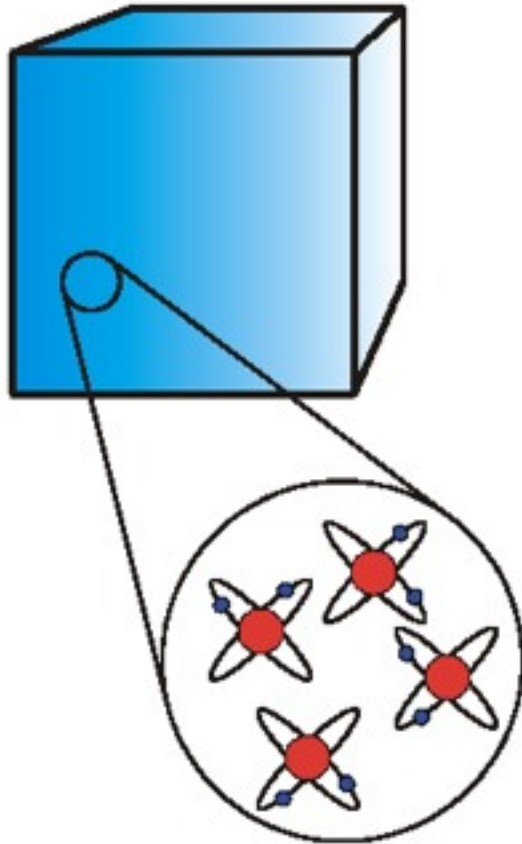
Metamateriais:

propriedades derivam de suas unidades constitutivas; as unidades podem ser fabricadas

Com metamateriais !!!!

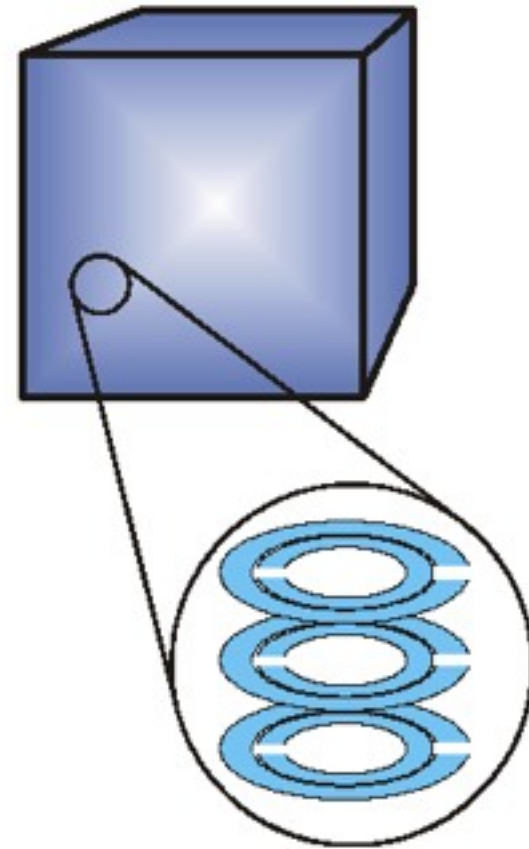
Materiais convencionais:

propriedades derivam de seus constituintes atômicos



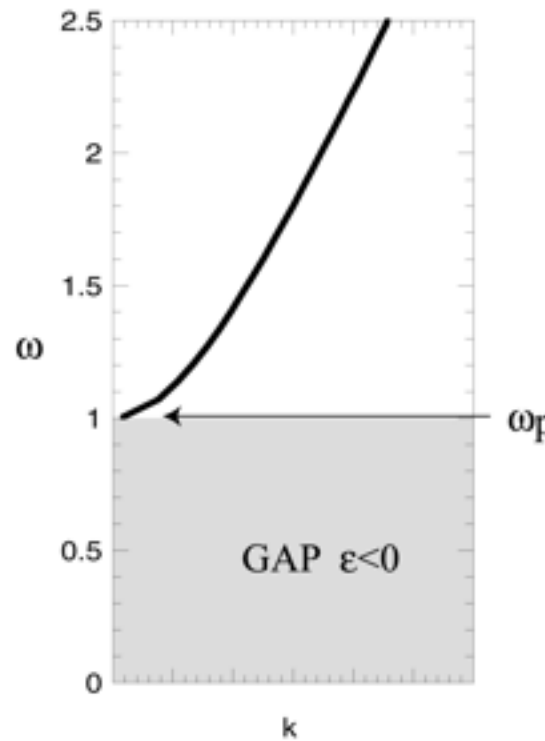
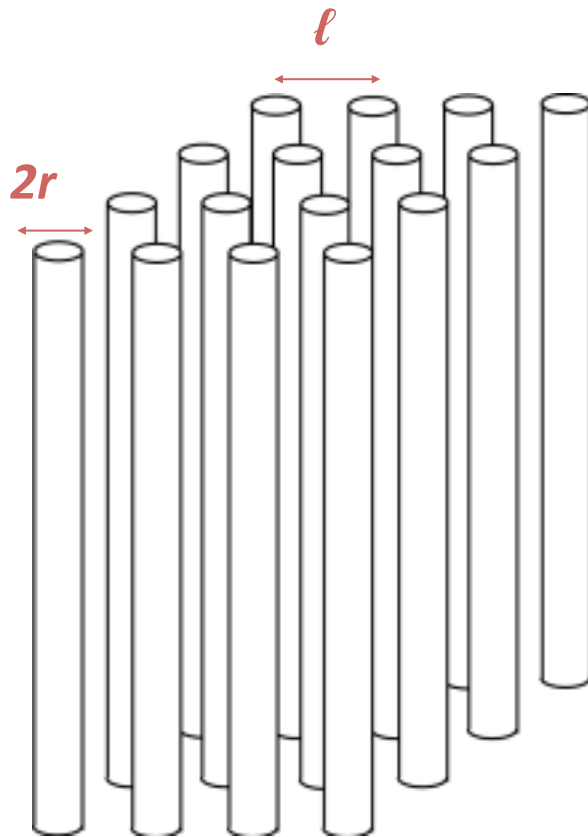
Metamateriais:

propriedades derivam de suas unidades constitutivas; as unidades podem ser fabricadas



Resposta elétrica negativa: arranjos de finos bastões metálicos podem fornecer $\epsilon < 0$

Parâmetros efetivos: $\lambda \gg l, r$



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

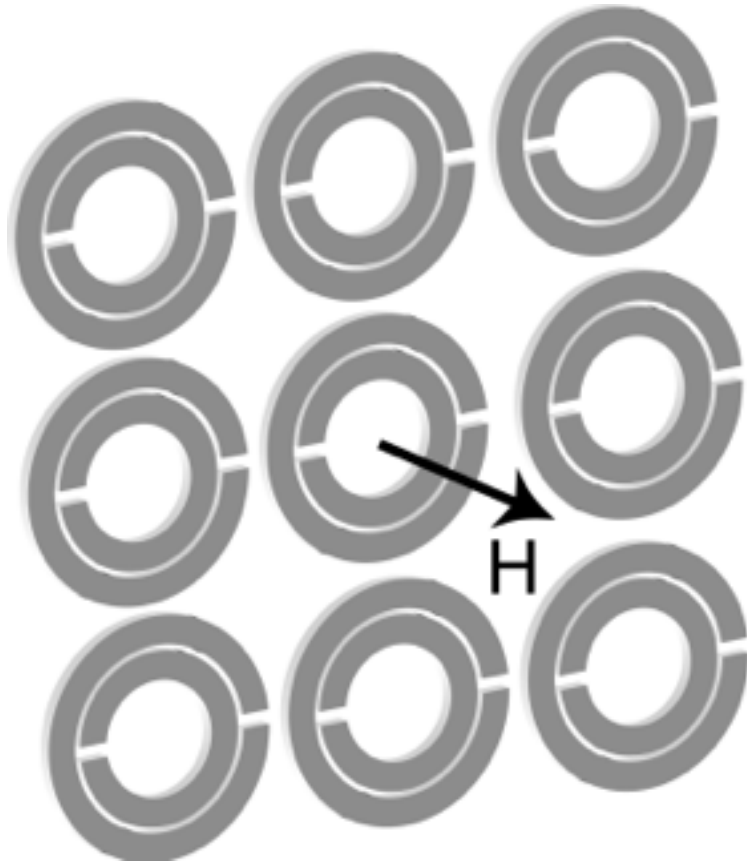
$$\omega_p = \frac{2\pi c}{l \sqrt{2\pi \ln(l/r)}}$$

$$l = 5\text{mm} \quad r = 0.003l$$

$$\omega_p \approx 66.6\text{GHz}$$

micro-ondas

Resposta magnética negativa: anéis interrompidos ressonantes (split-ring resonators) podem fornecer $\mu < 0$



$$\mu_{eff}(\omega) = 1 + \frac{F\omega^2}{\omega_{LC}^2 - \omega^2}$$

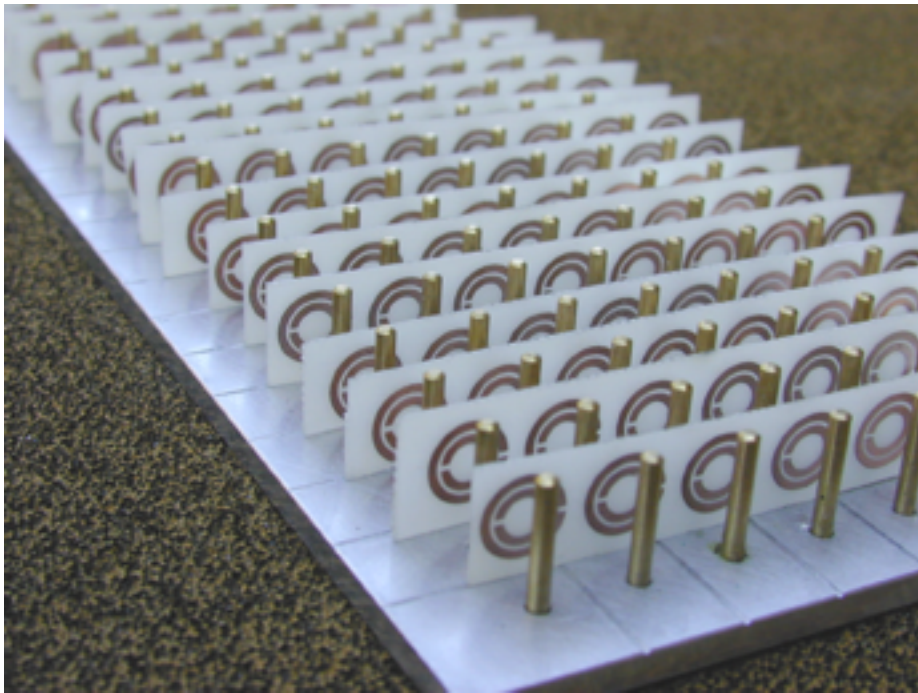
$$\omega_{LC} \approx GHz$$

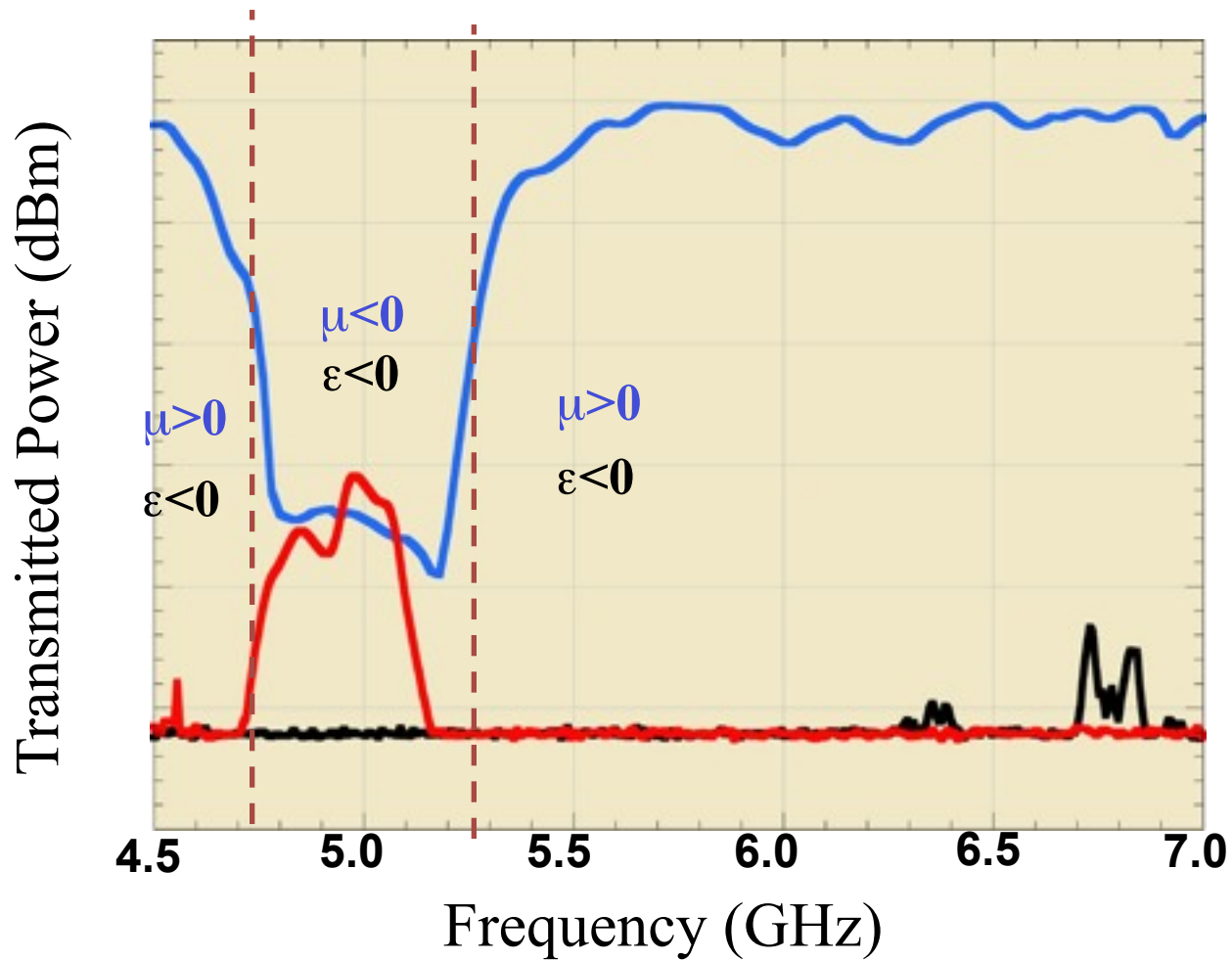
raio interno = 2.0mm

espessura do anel = 1.0mm

espaço entre anéis = 0.1mm

distância entre anéis = 10.0mm





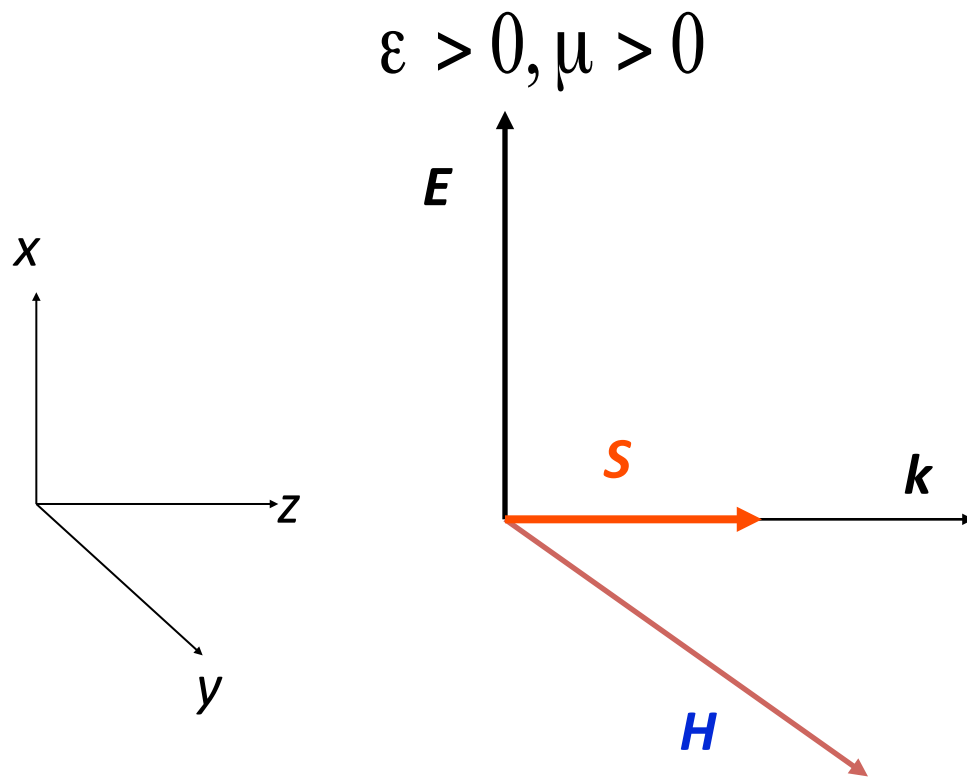
$n < 0$ na região de micro-ondas

Propagação de ondas EM em meios materiais

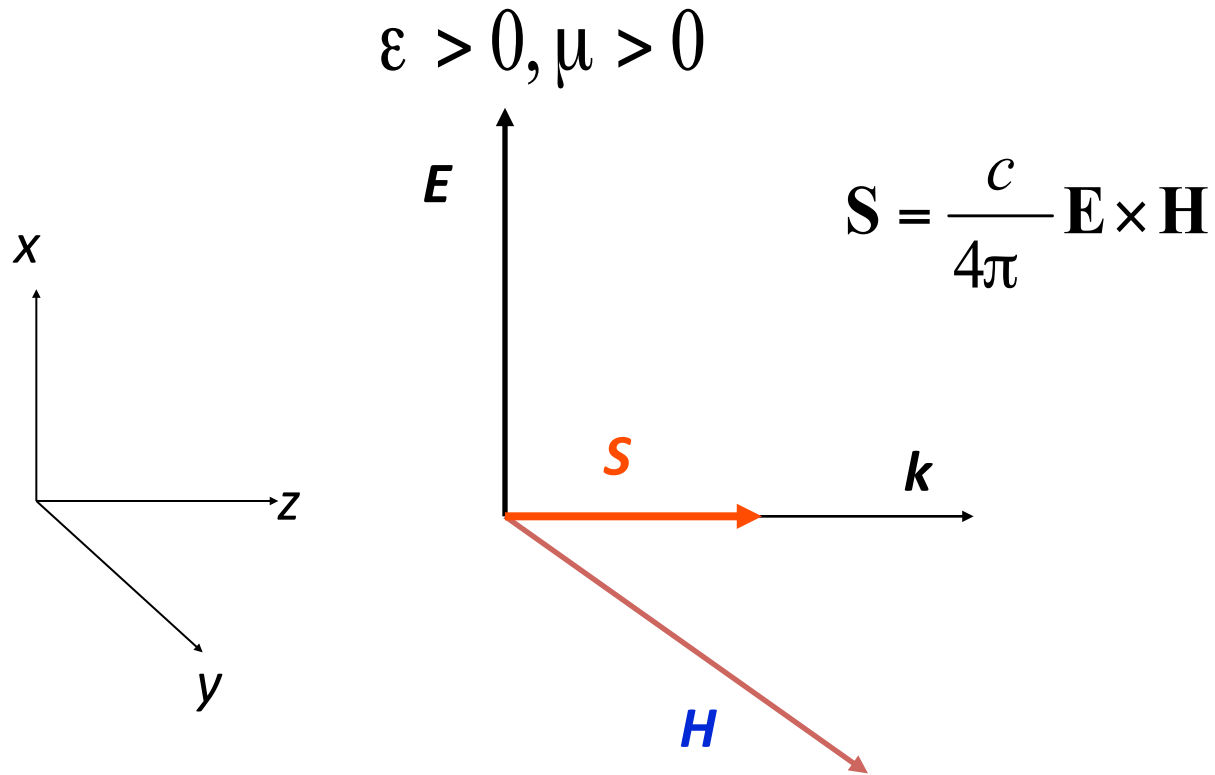
Propagação de ondas EM em meios materiais

$$\varepsilon > 0, \mu > 0$$

Propagação de ondas EM em meios materiais



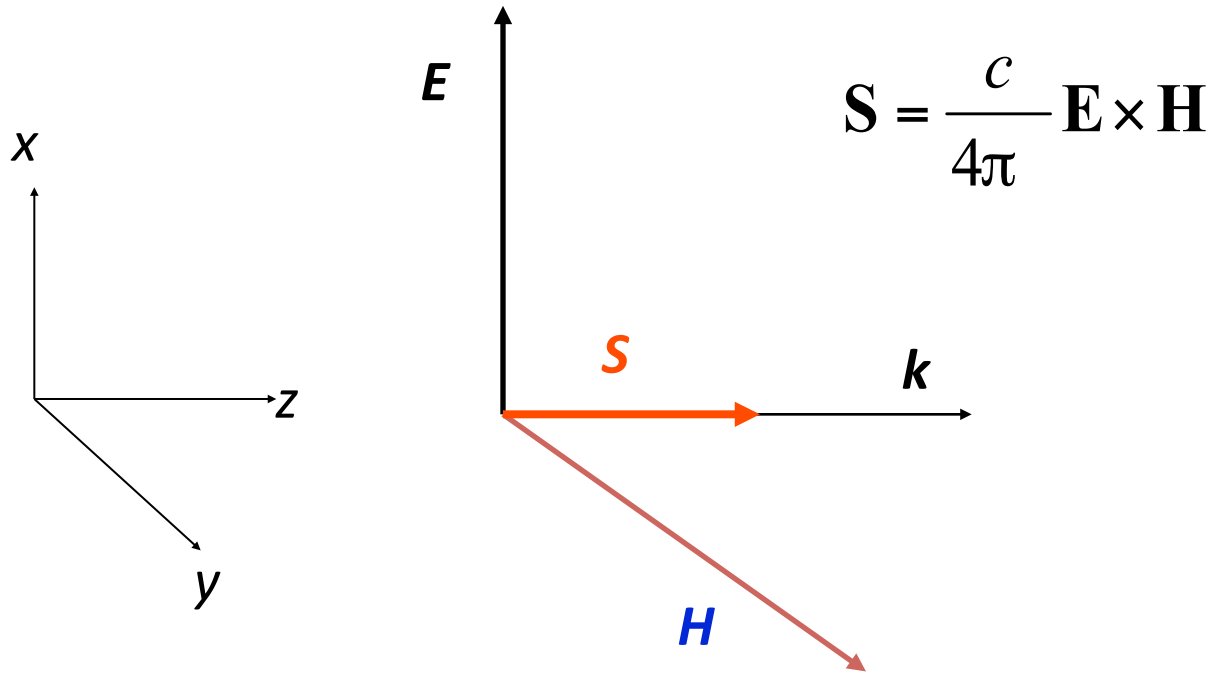
Propagação de ondas EM em meios materiais



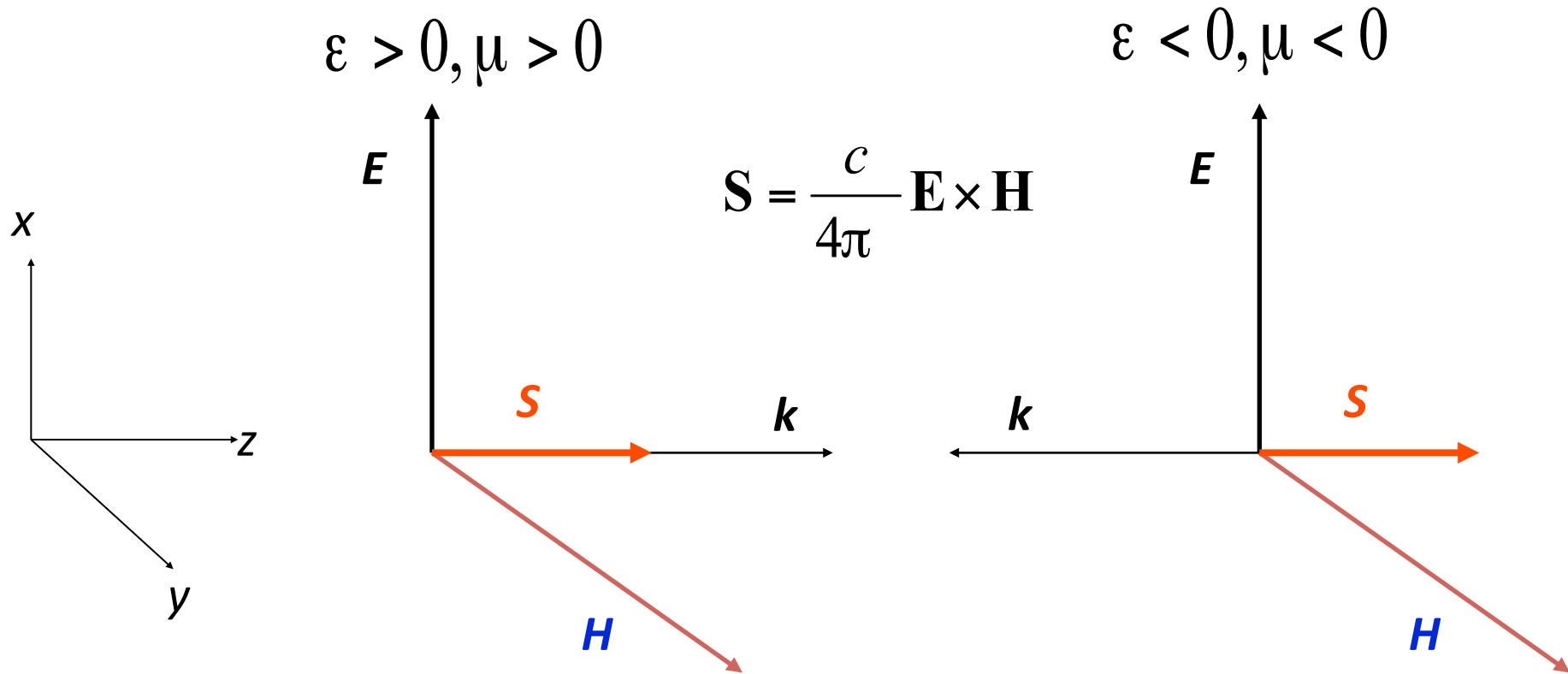
Propagação de ondas EM em meios materiais

$\epsilon > 0, \mu > 0$

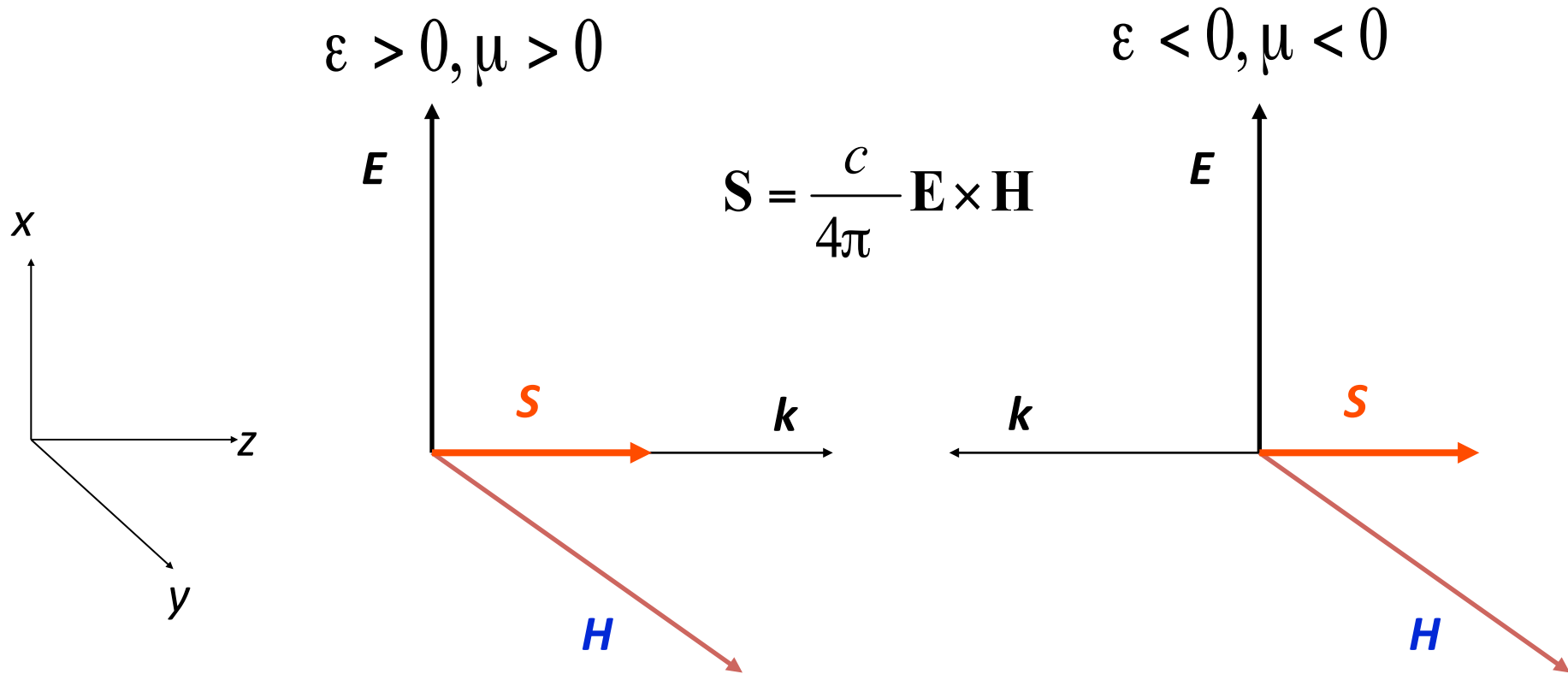
$\epsilon < 0, \mu < 0$



Propagação de ondas EM em meios materiais

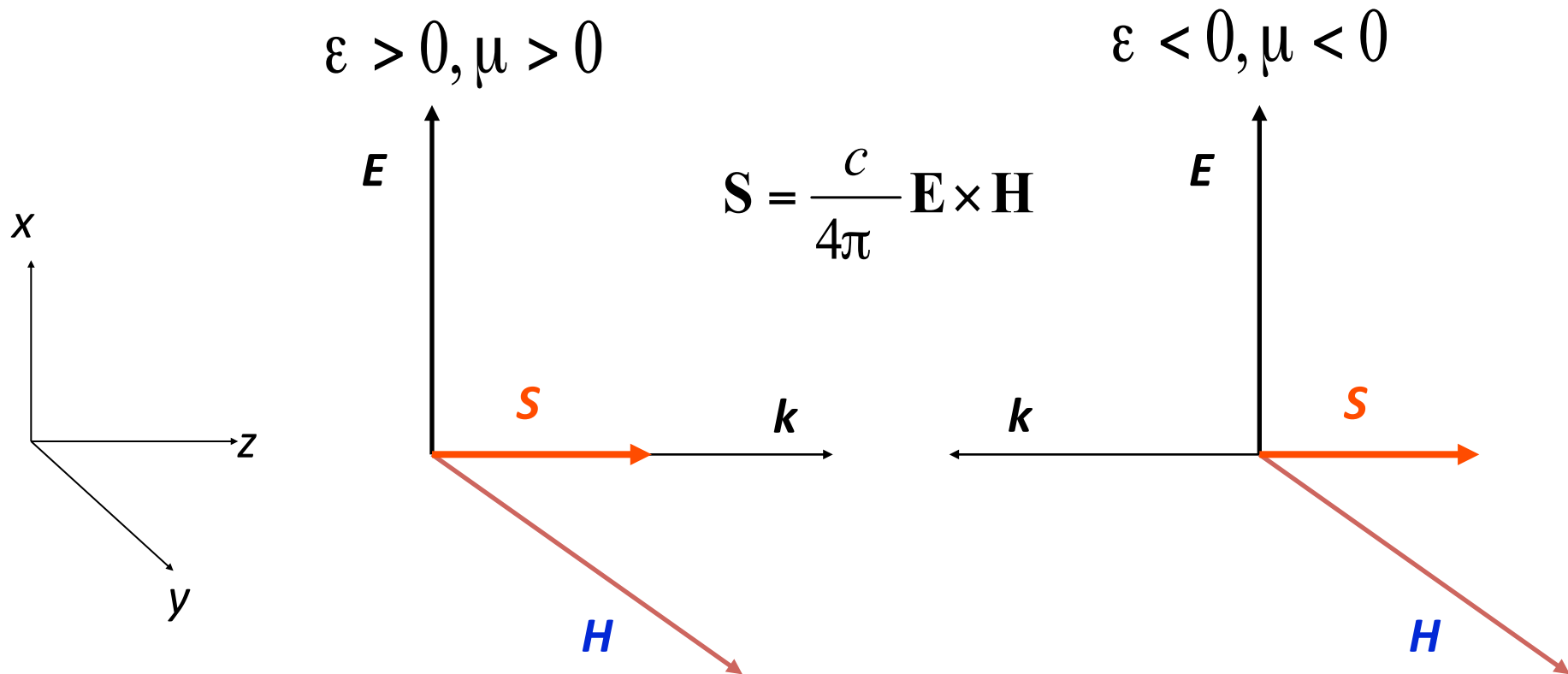


Propagação de ondas EM em meios materiais



materiais "esquerdos"

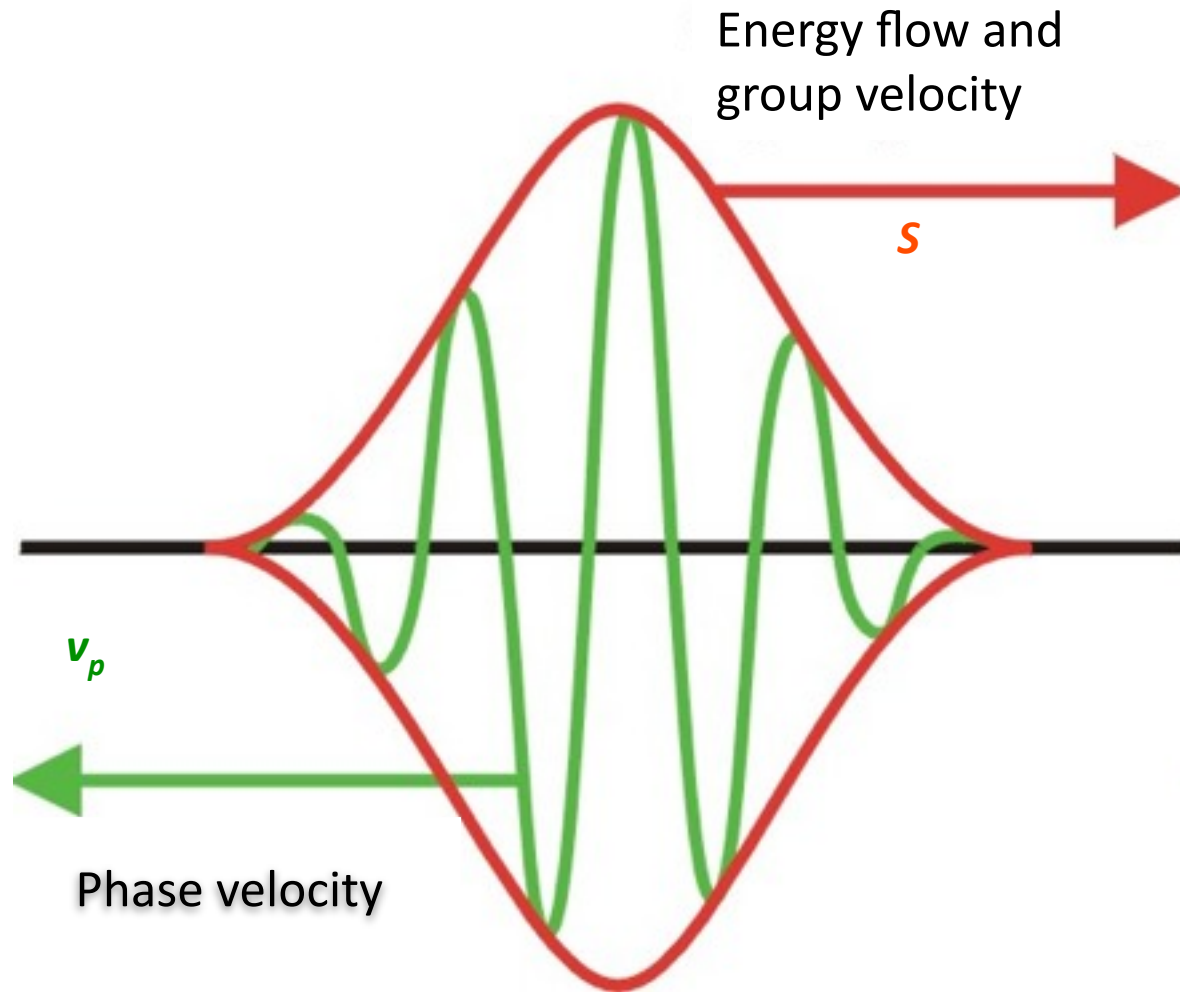
Propagação de ondas EM em meios materiais



materiais "esquerdos"

velocidade de fase $v_p = \omega/k$ oposta à direção de propagação da onda eletromagnética (velocidade de grupo)!

Propagation of EM waves in material media



Algumas
consequências da
Refração Negativa

Lei de Snell com refração negativa

Lei de Snell com refração negativa



Willebrord Snell van Roijen
(or Snellius) (1580- 1626)

Lei de Snell com refração negativa

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$$



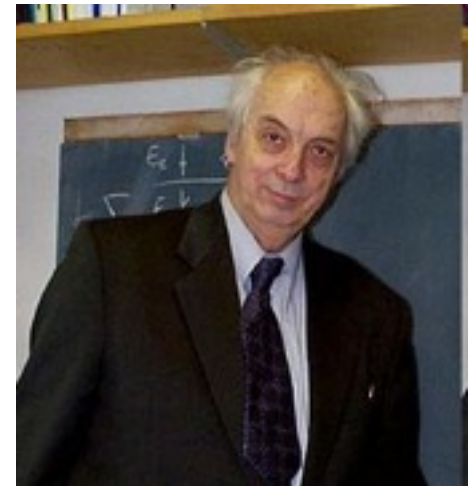
Willebrord Snell van Roijen
(or Snellius) (1580- 1626)

Lei de Snell com refração negativa

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$$



Willebrord Snell van Roijen
(or Snellius) (1580- 1626)



V. Veselago

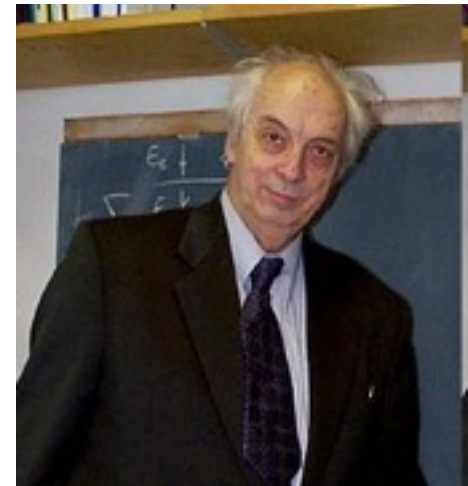
Lei de Snell com refração negativa

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$$

$$n_2 < 0 \Rightarrow \theta_2 < 0$$



Willebrord Snell van Roijen
(or Snellius) (1580- 1626)

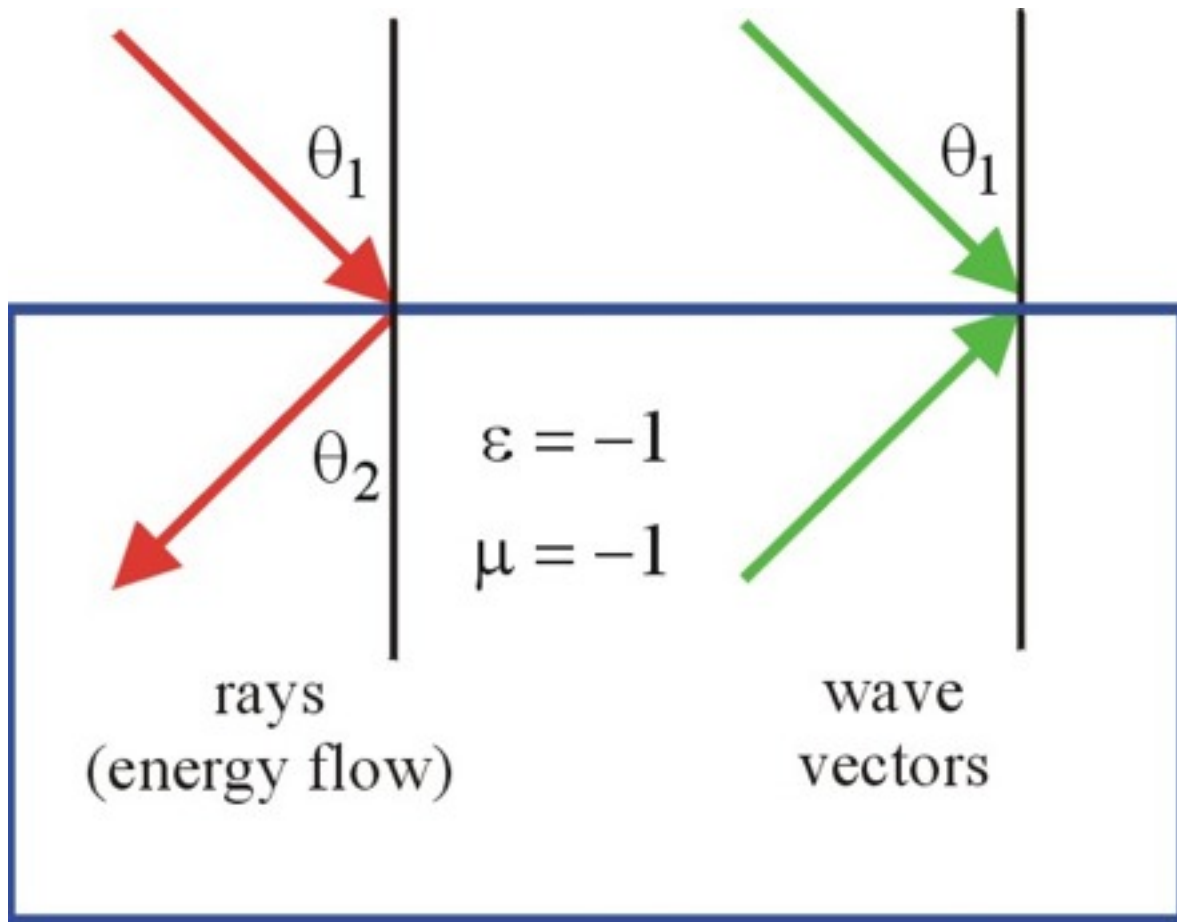


V. Veselago

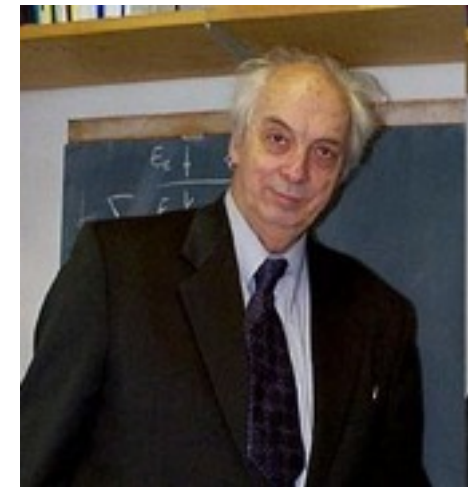
Lei de Snell com refração negativa

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

$$n_2 < 0 \Rightarrow \theta_2 < 0$$



Willebrord Snell van Roijen
(or Snellius) (1580- 1626)



V. Veselago

Refração usual

*Refração negativa
(imaginação)*



(a)

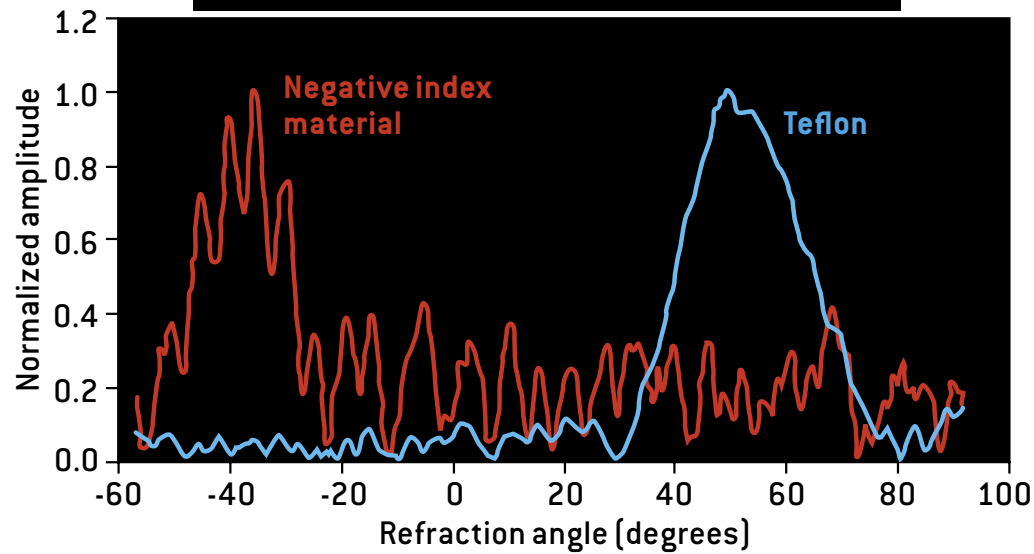
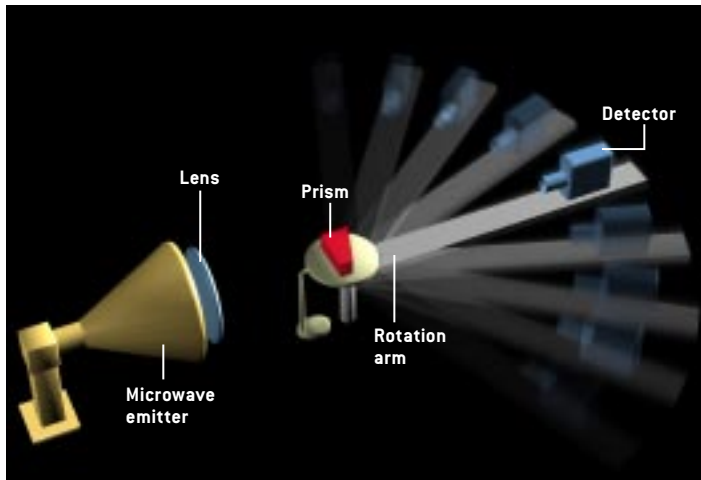


(b)

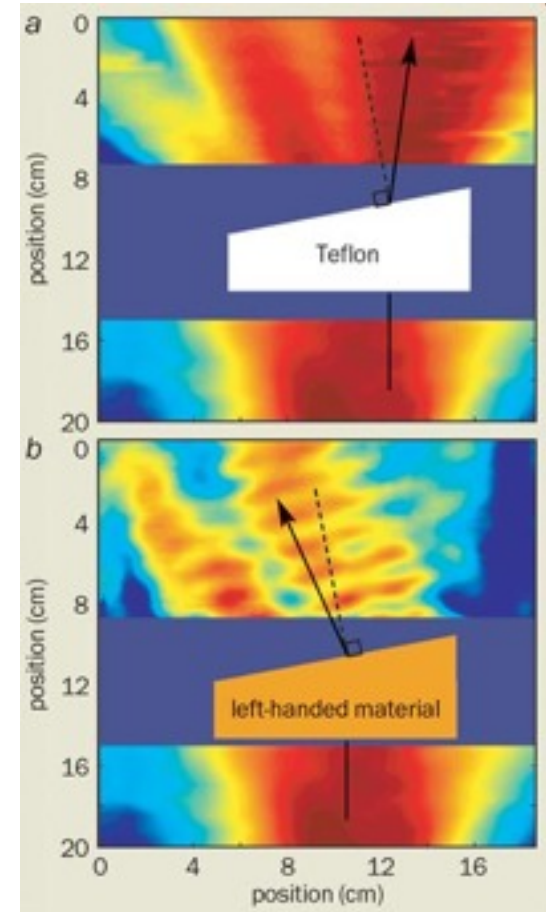


(c)

Verificação experimental



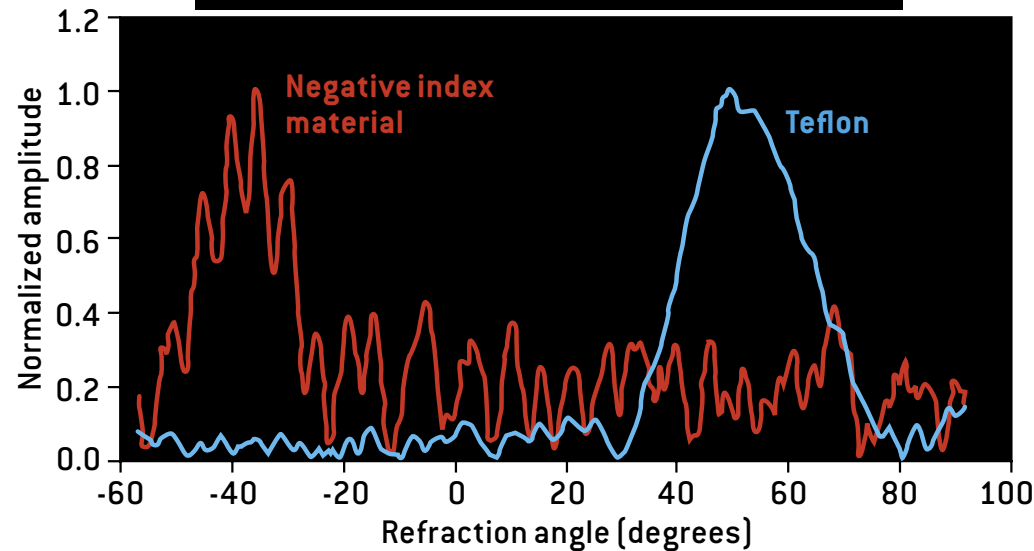
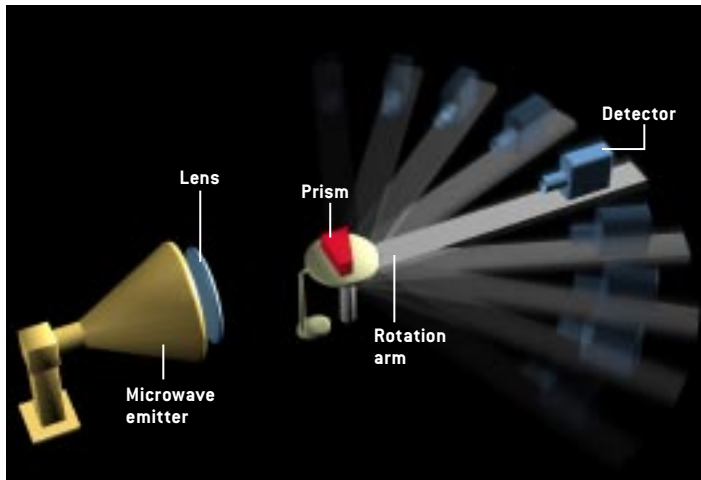
Parazzoli et al data plotted in JB Pendry and DR Smith, Sci Am (2006)



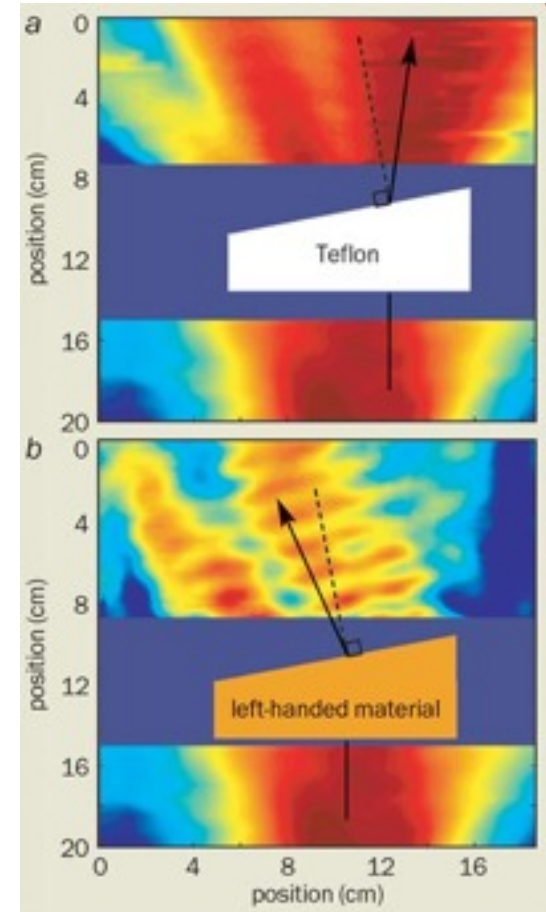
Verificação experimental

Observation of Snell's law for LHM (microwave regime)

AA Houck et al., PRL **90** 137401 (2003);
CG Parazzoli et al., PRL **90**, 107401(2003)



Parazzoli et al data plotted in JB Pendry and DR Smith, Sci Am (2006)



Ótica repensada: melhor resolução

Ótica repensada: melhor resolução

Lente perfeita

Ótica repensada: melhor resolução

Lente perfeita

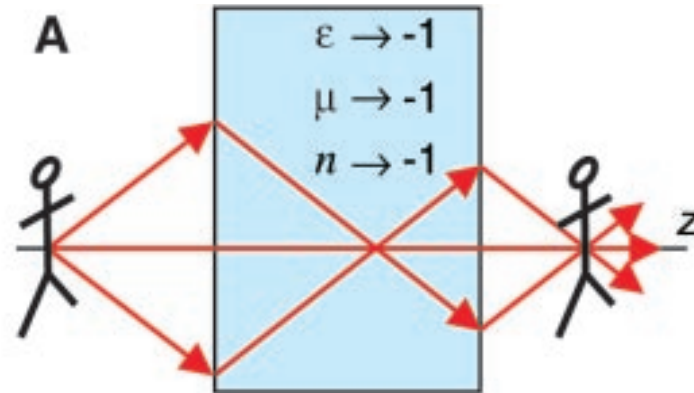


J. Pendry, PRL **85**, 3966 (2000)

Ótica repensada: melhor resolução

Lente perfeita

Efeito de focalização

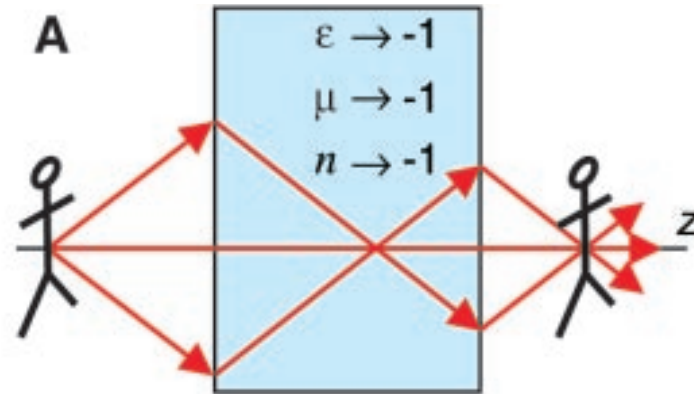


J. Pendry, PRL **85**, 3966 (2000)

Ótica repensada: melhor resolução

Lente perfeita

Efeito de focalização



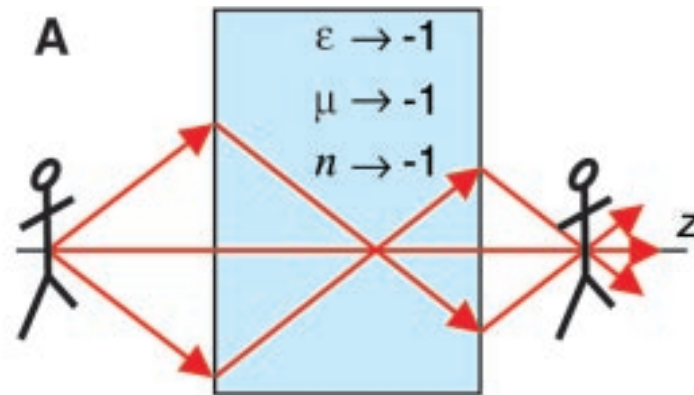
J. Pendry, PRL **85**, 3966 (2000)

$n < 0 \Rightarrow$ amplificação de ondas evanescentes

Ótica repensada: melhor resolução

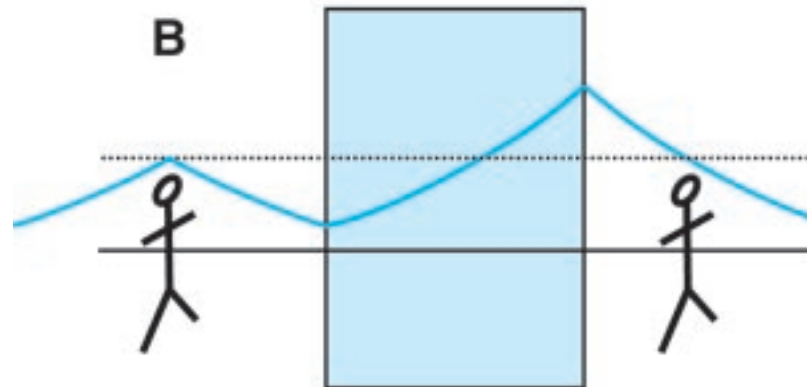
Lente perfeita

Efeito de focalização



J. Pendry, PRL **85**, 3966 (2000)

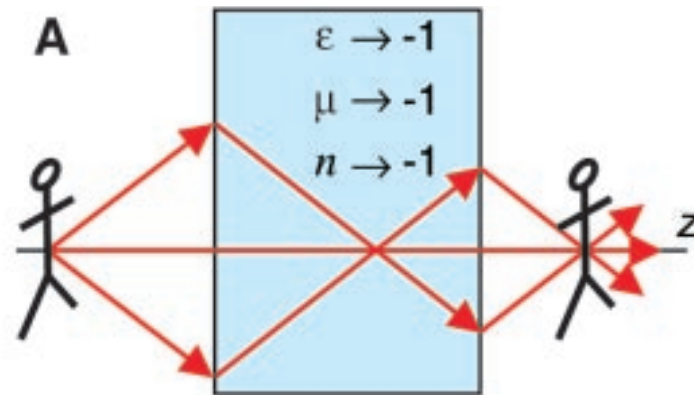
$n < 0 \Rightarrow$ amplificação de ondas evanescentes



Ótica repensada: melhor resolução

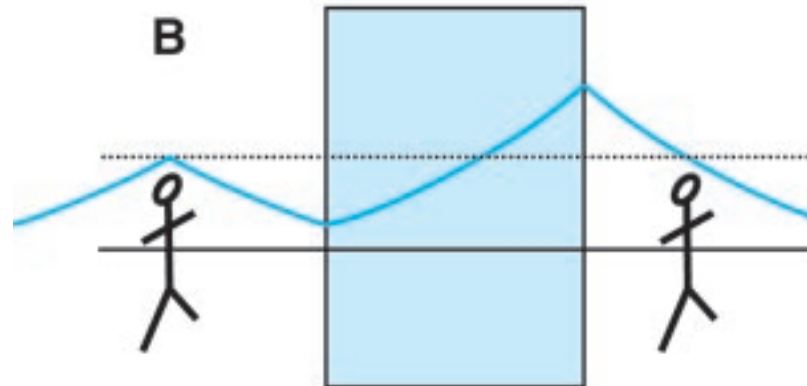
Lente perfeita

Efeito de focalização



J. Pendry, PRL **85**, 3966 (2000)

$n < 0 \Rightarrow$ amplificação de ondas evanescentes



Sob condições ideais ($n' = -n$): imagem é cópia perfeita do objeto

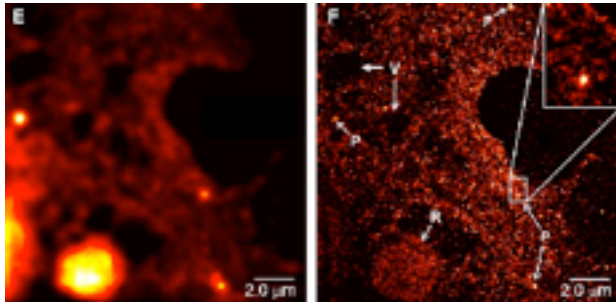
Ótica repensada: melhor resolução

Ótica repensada: melhor resolução

Lente Usual

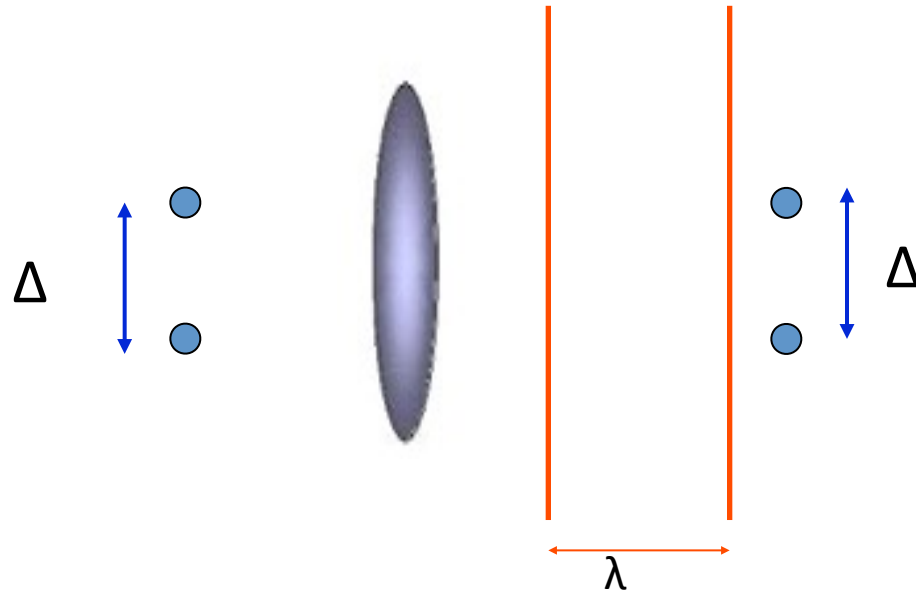
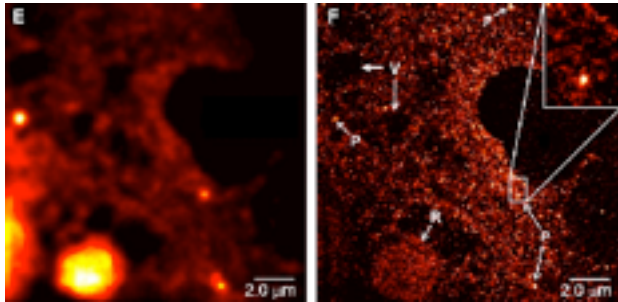
Ótica repensada: melhor resolução

Lente Usual



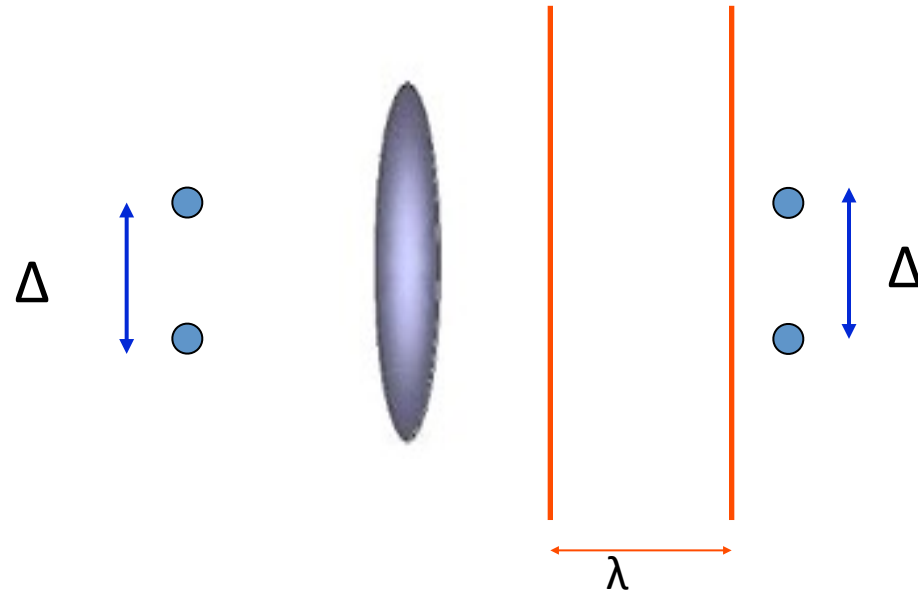
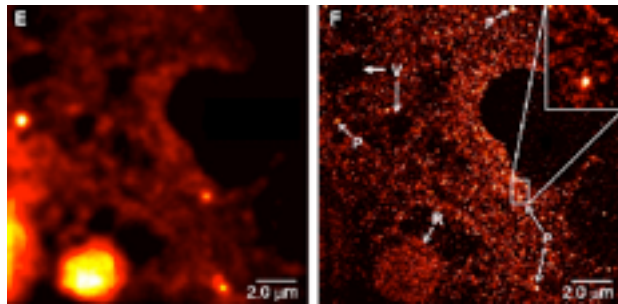
Ótica repensada: melhor resolução

Lente Usual



Ótica repensada: melhor resolução

Lente Usual

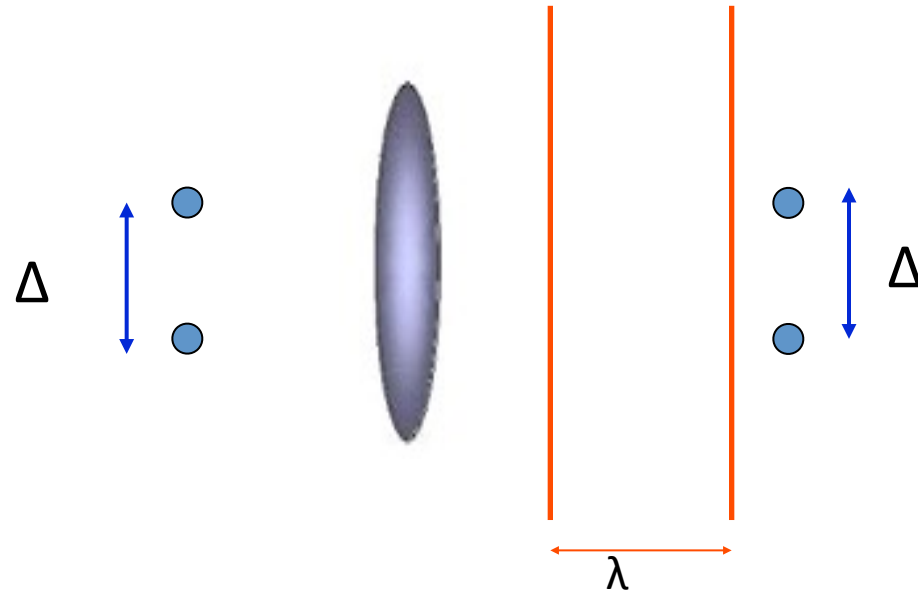
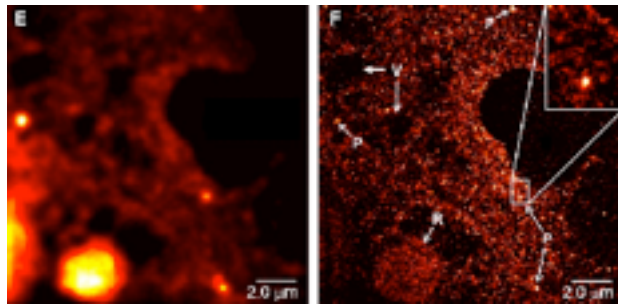


Para que dois pontos (distância Δ , na figura) não saiam borrados na imagem (“resolvidos”):

$$\Delta > \lambda \text{ (limite de resolução)}$$

Ótica repensada: melhor resolução

Lente Usual



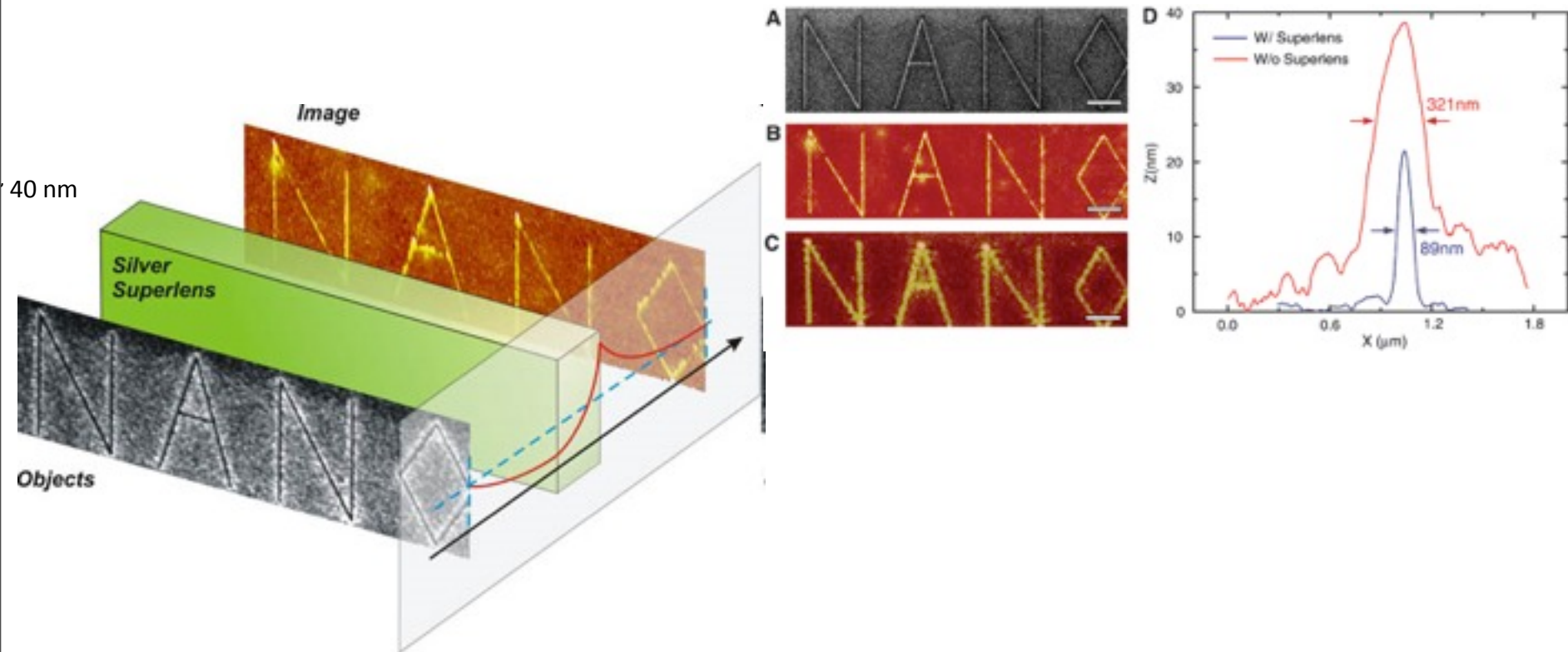
~~Para que dois pontos (distância Δ , na figura) não saiam borrados na imagem ("resolvidos"):~~

$$\Delta > \lambda \text{ (limite de resolução)}$$

Lentes perfeitas ($n < 0$) \Rightarrow imageamento sub- λ

Ótica repensada: melhor resolução

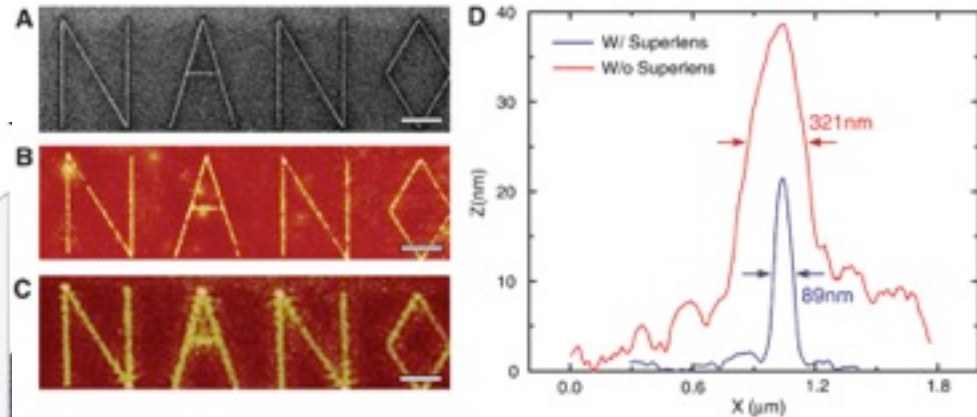
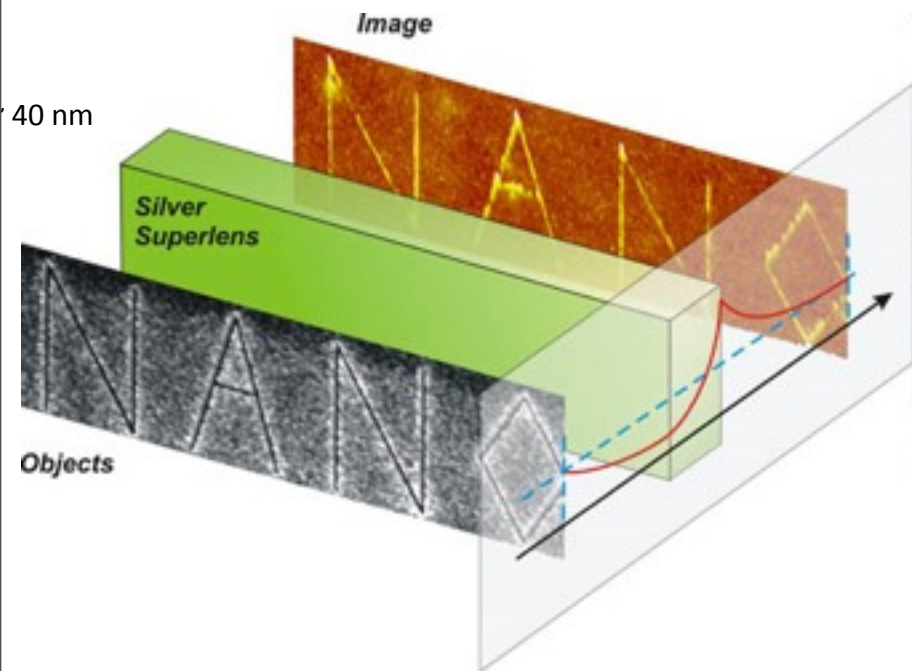
Recuperação de ondas evanescentes em imagem com superlente de prata



Fang, N., Lee, H., Sun, C., Zhang, X., "Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens", Science **308**, 534 (2005)

Ótica repensada: melhor resolução

Recuperação de ondas evanescentes em imagem com superlente de prata



Resolução de 60 nm: 1/6 do λ usado para iluminar o objeto!

Fang, N., Lee, H., Sun, C., Zhang, X., "Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens", Science **308**, 534 (2005)

Ótica repensada: ótica de transformação

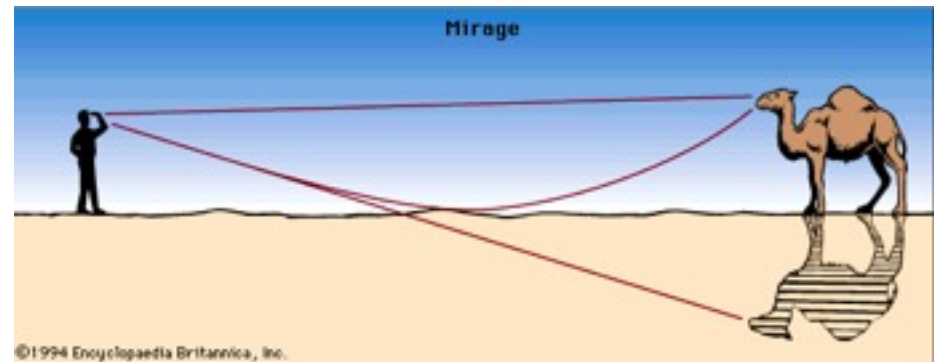
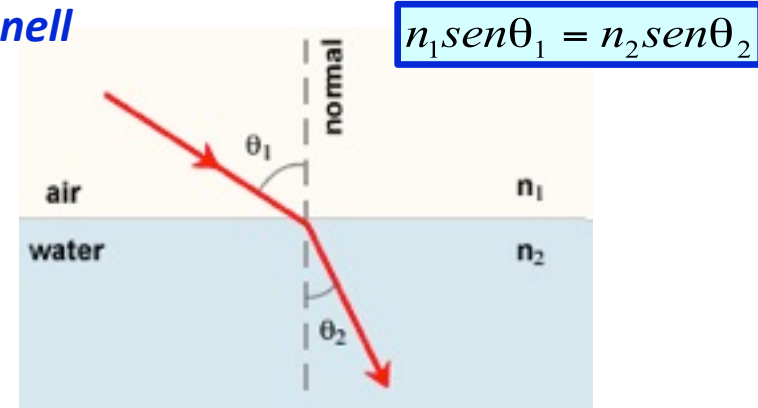
Como dobrar a luz?

Exemplo simples: miragem



Miragem ⇒ índice de refração varia continuamente próximo à superfície ($n \downarrow$ em direção ao asfalto mais quente)

Lei de Snell



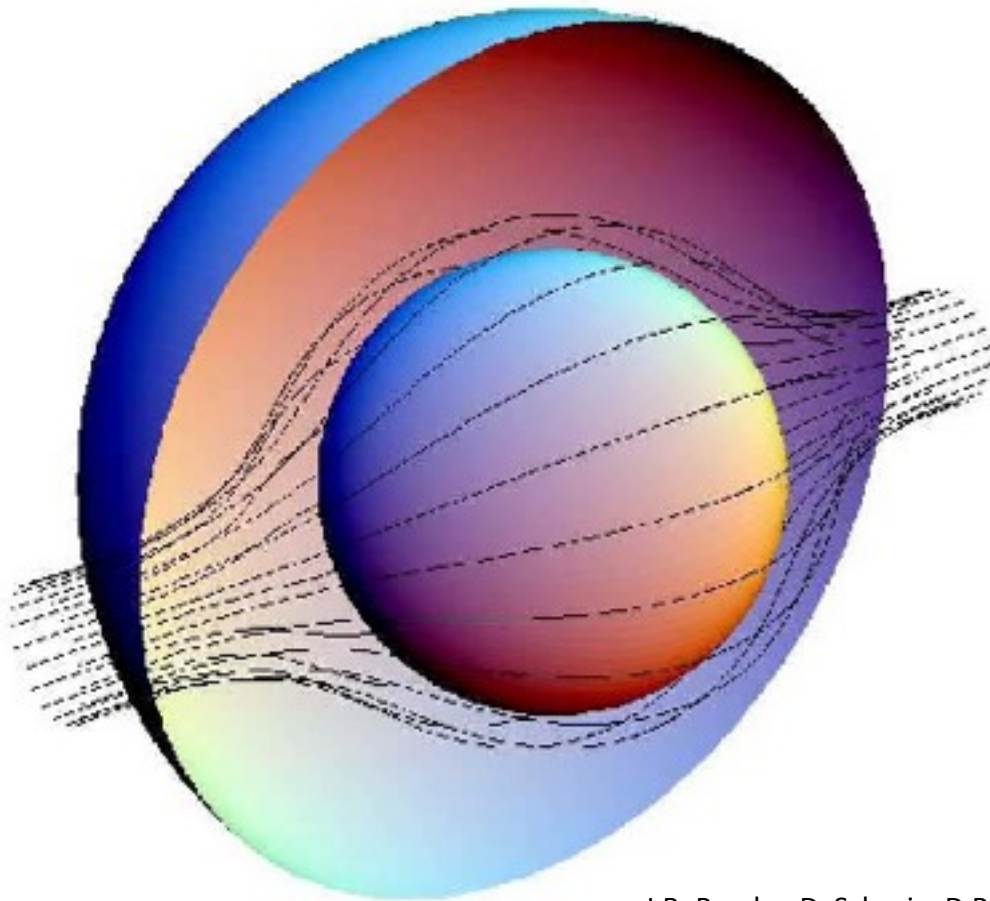
©1994 Encyclopaedia Britannica, Inc.

Como dobrar a luz?

Visão simplificada: o espaço-tempo das ondas eletromagnética (as Eqs de Maxwell) não mudam se ϵ e μ redefinirem as escalas

Manto eletromagnético

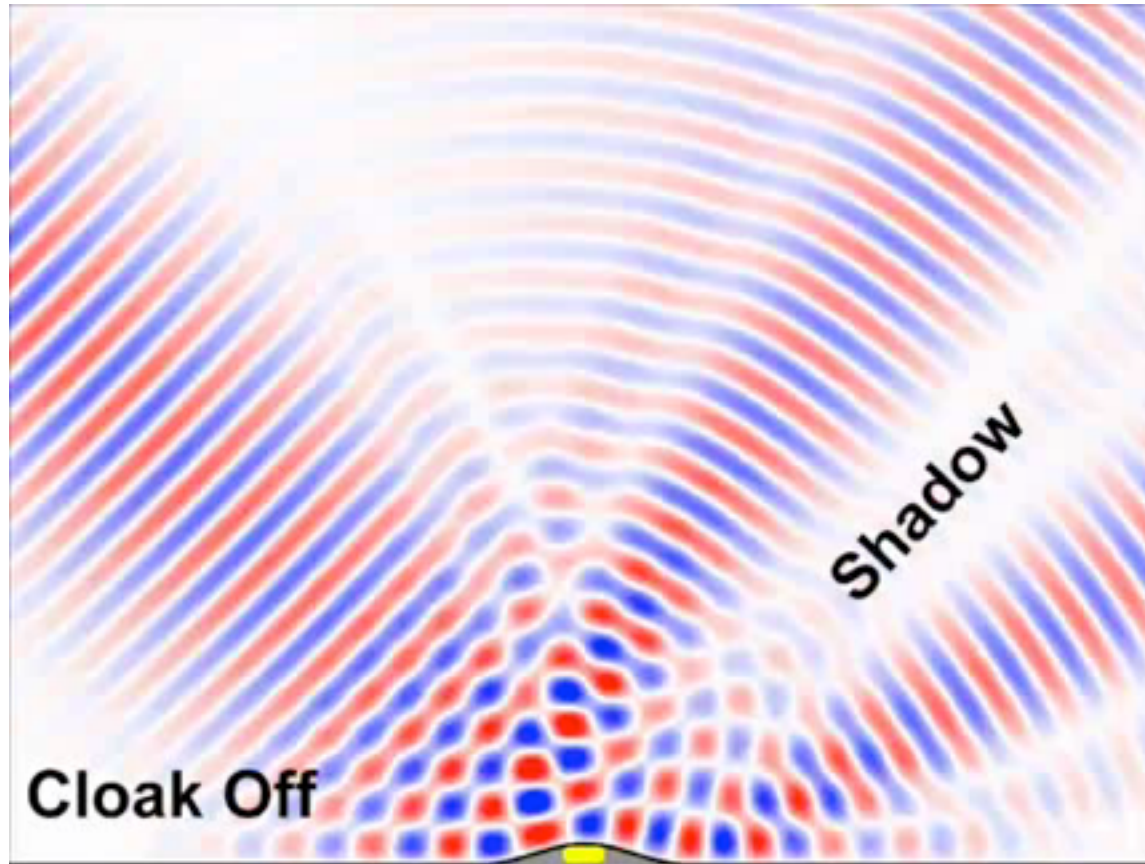
- Objeto pode ser escondido se a luz for dobrada à sua volta (efeito miragem).
- Varie continuamente o índice de refração no manto usando metamateriais.



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

Manto eletromagnético

U.C. Berkeley (2009)



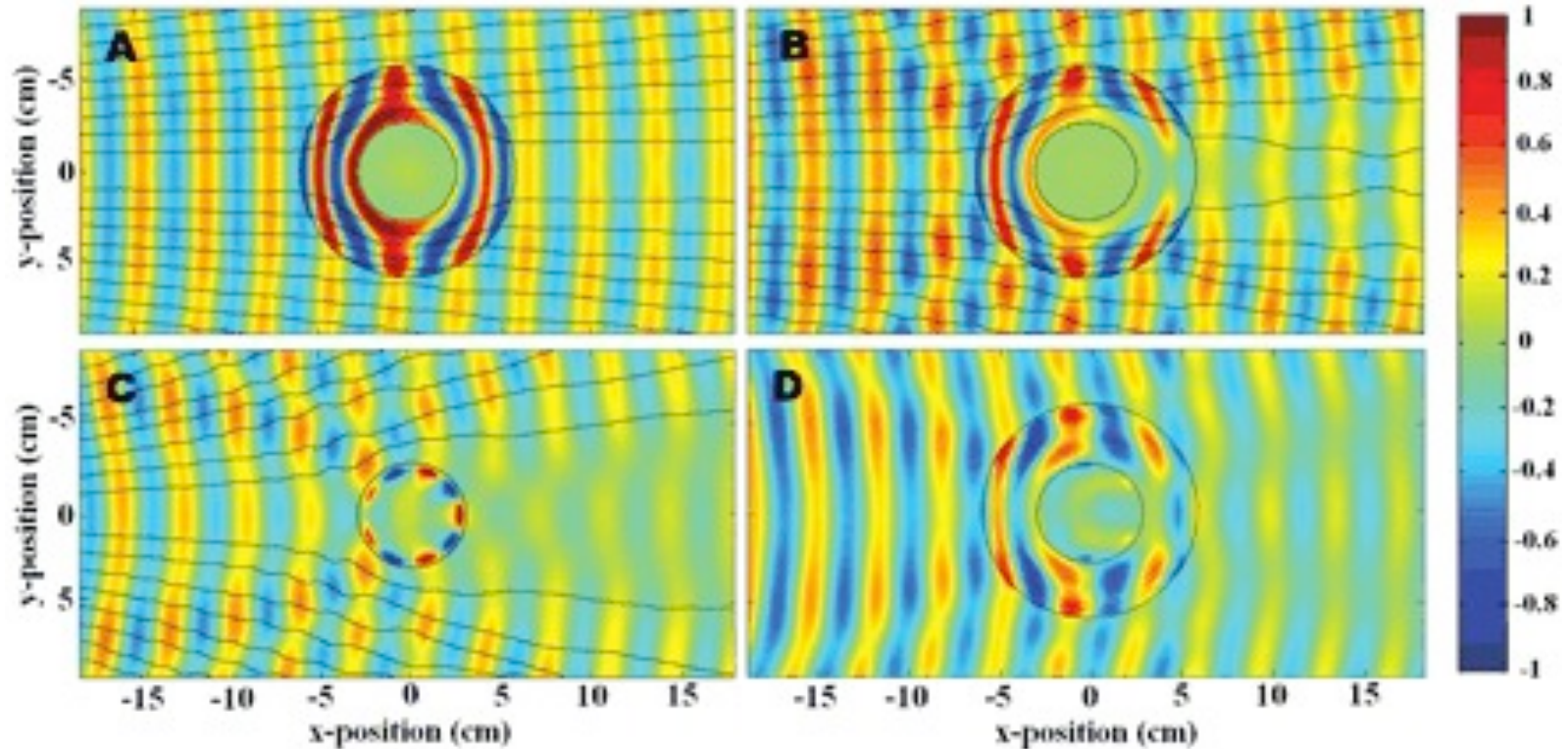
Manto eletromagnético

U.C. Berkeley (2009)

Manto eletromagnético

D. Schurig *et al.* Science **314**, 977 (2006)

Sim.



Exp.

cloaking at 8.5GHz (microwave; optimal): it reduces both backscattering (reflection) and forward scattering (shadow)

Manto eletromagnético

Near Infrared

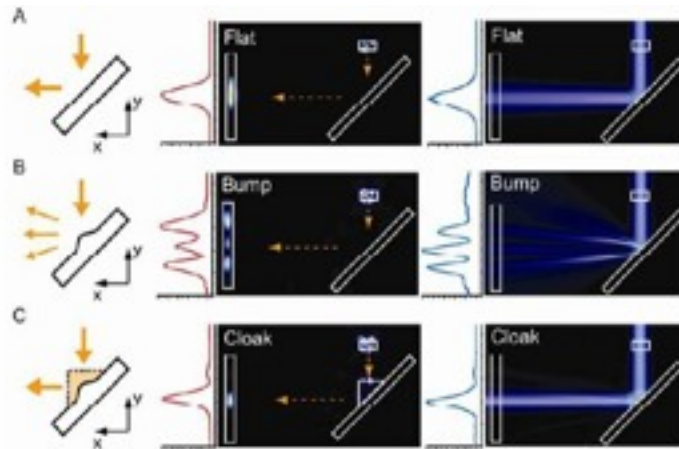
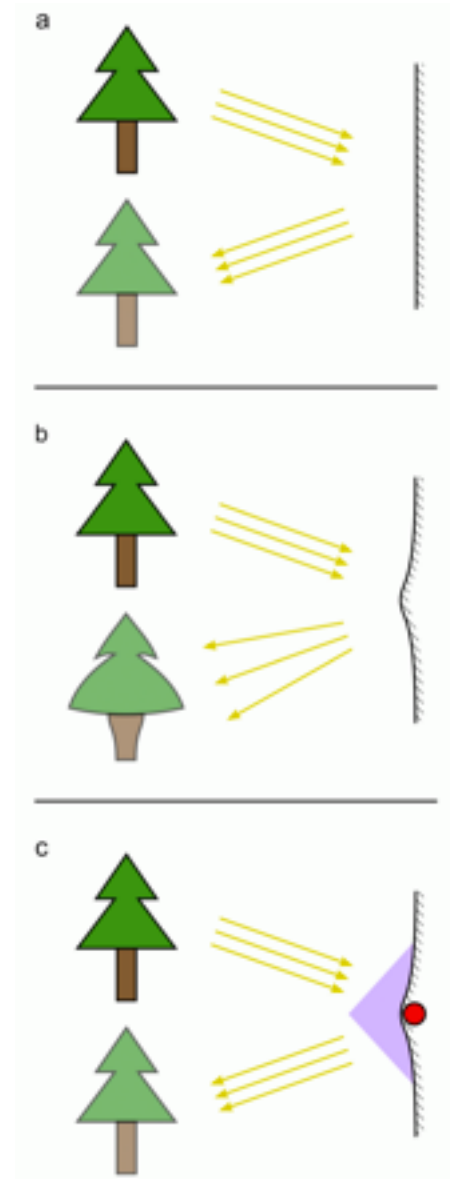


Fig. 3. Optical carpet cloaking at a wavelength of 1540 nm. The results for a Gaussian beam reflected from (A) a flat surface (B) a curved (without cloak) surface, and (C) the same curved reflecting surface with cloak. The left panel shows the schematics. The middle panel shows the optical microscope images and normalized intensity along the output grating position. The curved surface scatters the incident beam into three separate lobes while the cloaked curved surface maintains the original profile, similar to reflection from a flat surface. The experimental intensity profile agrees well with the intensity profile ($|E_z|^2$) from 2D simulations (right panel).

U.C. Berkeley (2009)



Natural Light Cloaking for Aquatic and Terrestrial Creatures

Hongsheng Chen^{1,2,3*}, Bin Zheng^{1,2,3}, Lian Shen^{1,2,3}, Huaping Wang⁴, Xianmin Zhang^{1,2}, Nikolay Zheludev^{5,6}, and Baile Zhang^{6,7*}

¹*The Electromagnetics Academy at Zhejiang University,
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China.*

²*Department of Information Science and Electronic Engineering,
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China.*

³*State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation,
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China.*

⁴*Marvell Technology Group Boston,
Marlborough, Massachusetts 01752, USA.*

⁵*Optoelectronics Research Centre and Centre for Photonic Metamaterials,
University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, United Kingdom.*

⁶*Centre for Disruptive Photonic Technologies,
Nanyang Technological University, Singapore 637371, Singapore.*

⁷*Division of Physics and Applied Physics,
School of Physical and Mathematical Sciences,
Nanyang Technological University, Singapore 637371, Singapore.*

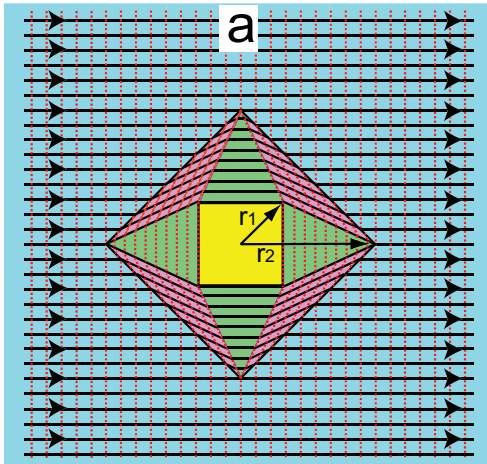
**To whom correspondence should be addressed;*

E-mail: hansomchen@zju.edu.cn (H.C.); blzhang@ntu.edu.sg (B.Z.)

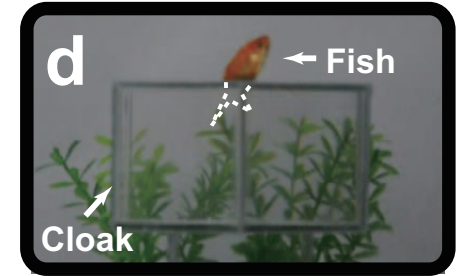
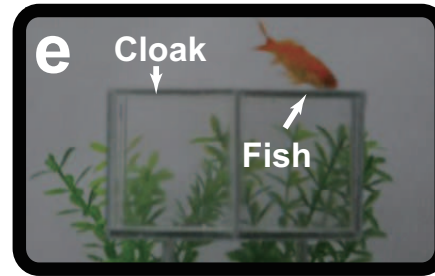
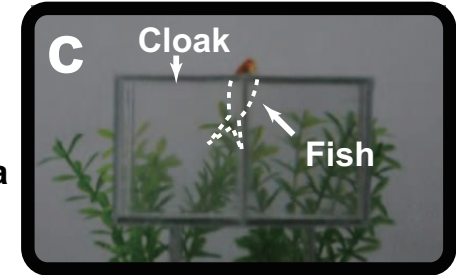
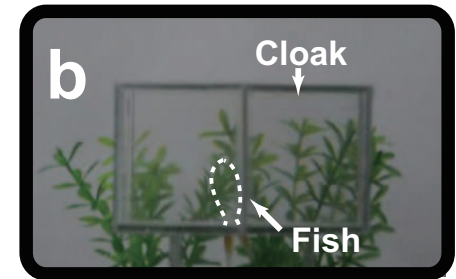
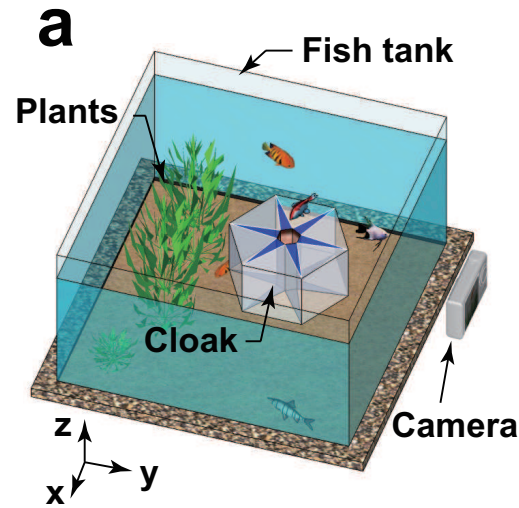
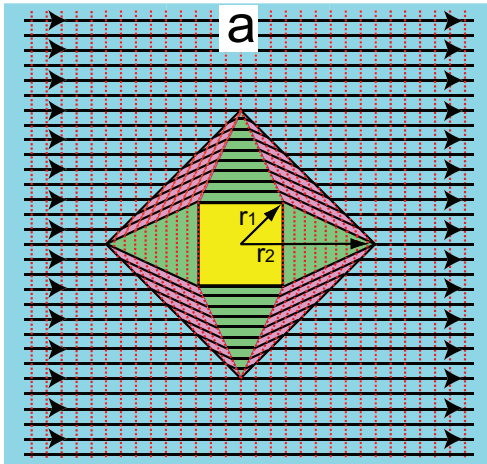
<http://arxiv.org/abs/1306.1780>

manto com vidros (não
há necessidade de $n < 0!$)

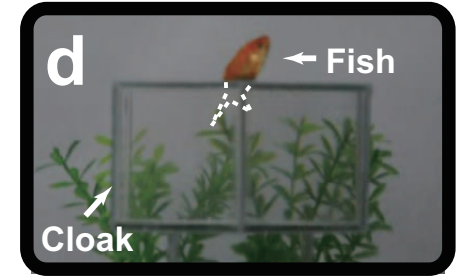
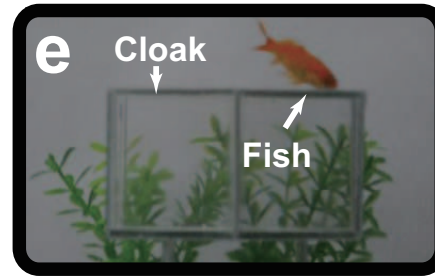
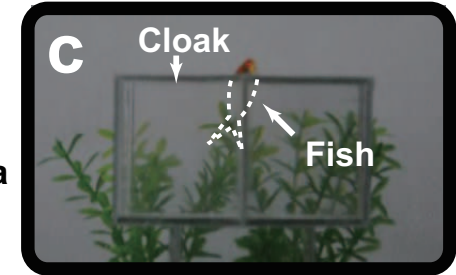
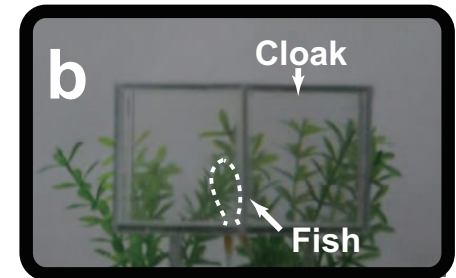
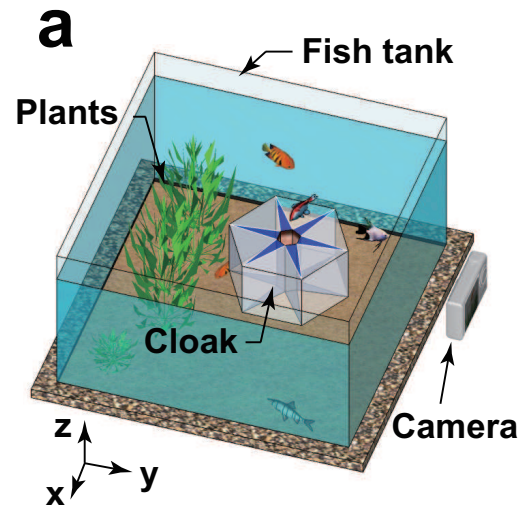
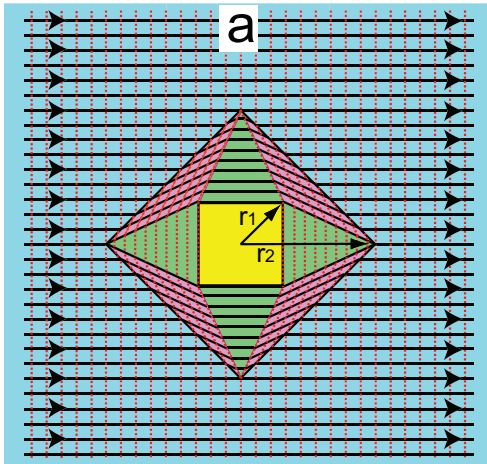
manto com vidros (não há necessidade de $n < 0$!)



manto com vidros (não há necessidade de $n < 0$!)



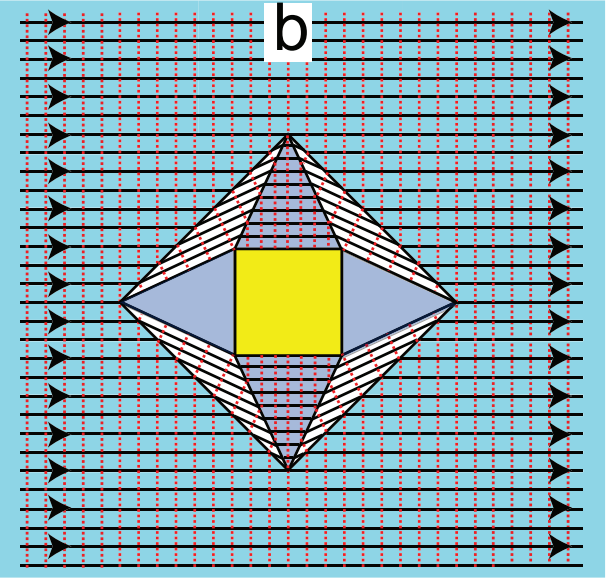
manto com vidros (não há necessidade de $n < 0$!)



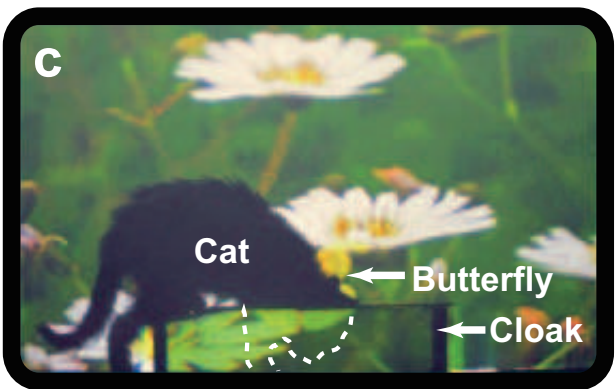
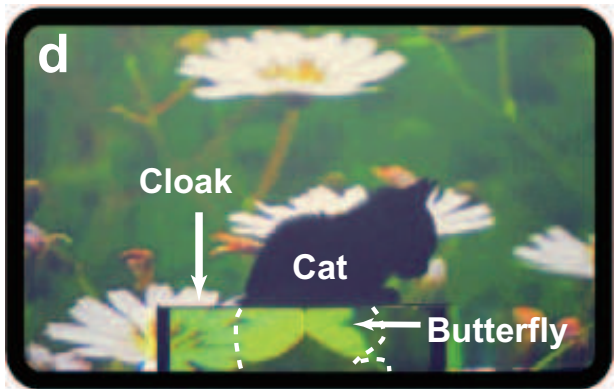
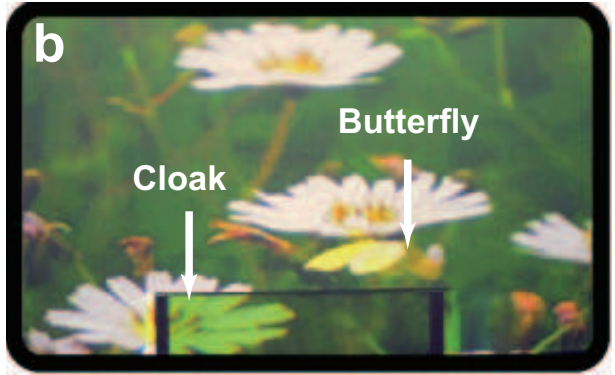
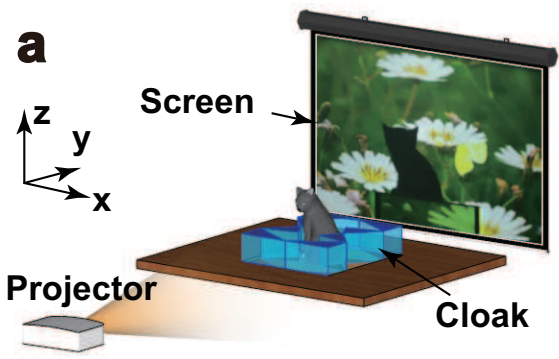
Filme: <https://www.dropbox.com/s/6kslerc5rpyek38/ChenS1.mov>



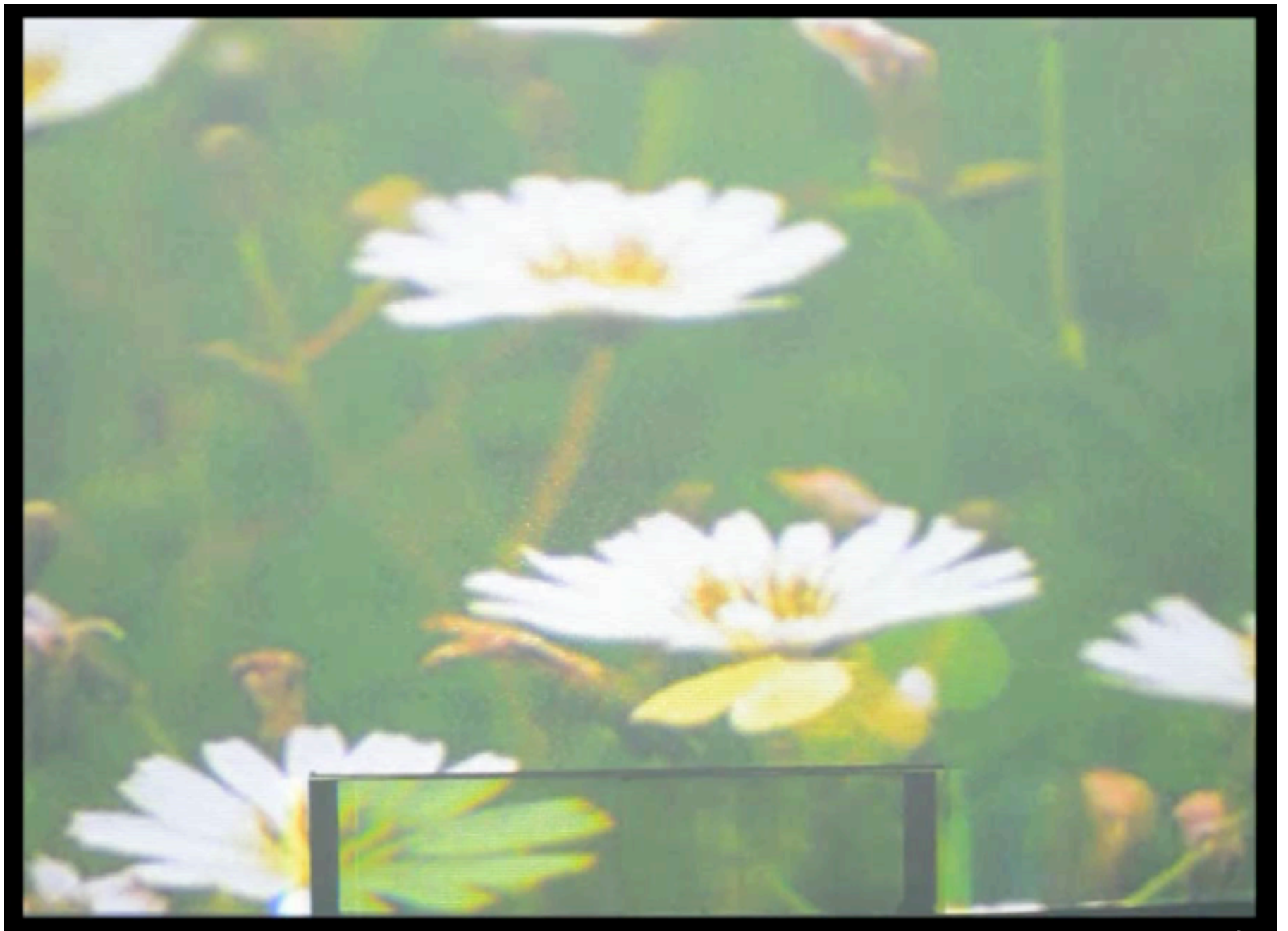
b



a



Filme: <https://www.dropbox.com/s/4tw4jg1hr9mh0zk/ChenS2.mov>

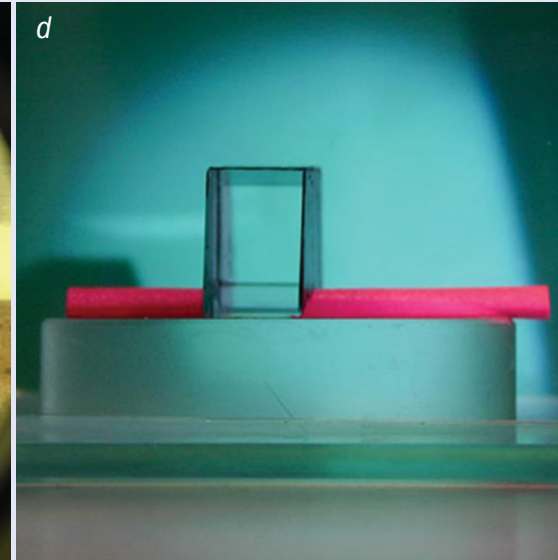
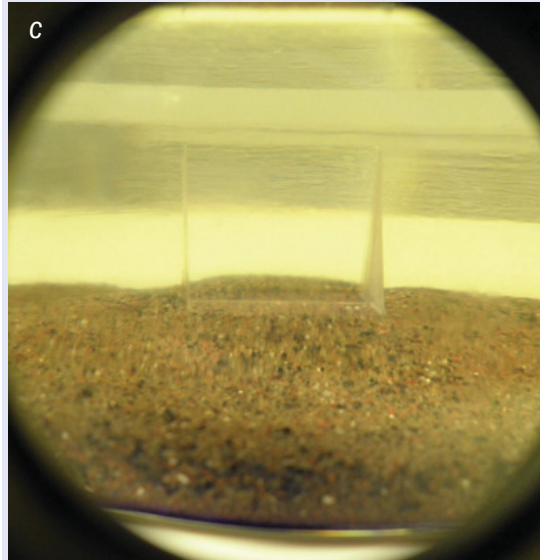
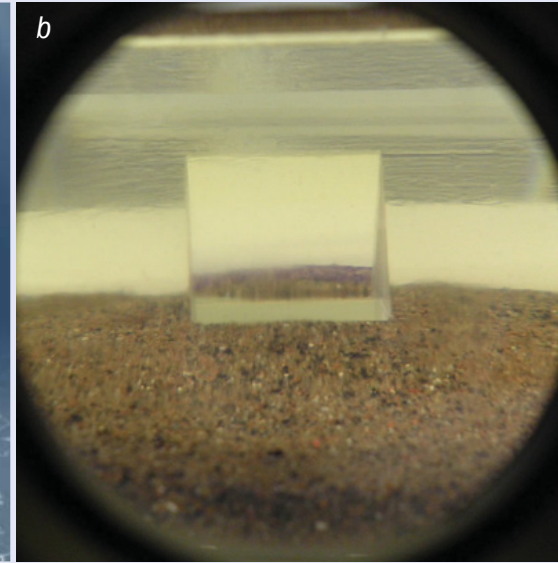
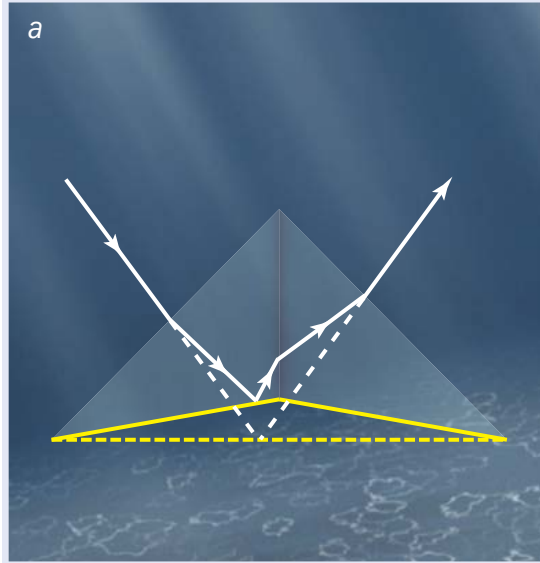


3 Macroscopic mirage

INVISIBILITY

Tricks and techniques for making things vanish from view

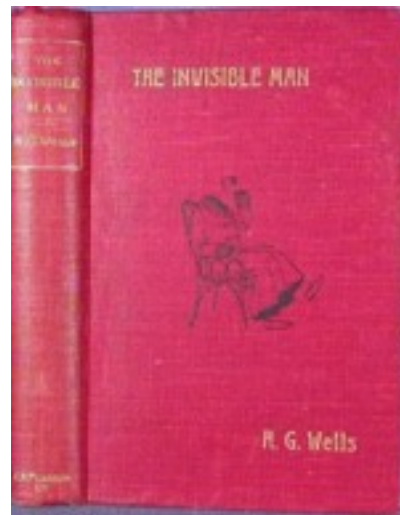
W Cai and V Shalaev,
Phys. World, Jun 2011, p. 30



Electromagnetic cloak

Perspectives for the future...

HG Wells (1897)



"I never want to see you again."





NI Zheludev, OPN, March 2011

Conclusões

Conclusões

- Estudos (teoria + experimentos) de metamateriais (MM) estão em franca evolução

Conclusões

- Estudos (teoria + experimentos) de metamateriais (MM) estão em franca evolução
- Melhor compreensão e controle da interação da radiação com a matéria

Conclusões

- Estudos (teoria + experimentos) de metamateriais (MM) estão em franca evolução
- Melhor compreensão e controle da interação da radiação com a matéria
- Aplicações potenciais de MM: resolução ilimitada, ótica de transformação

Conclusões

- Estudos (teoria + experimentos) de metamateriais (MM) estão em franca evolução
- Melhor compreensão e controle da interação da radiação com a matéria
- Aplicações potenciais de MM: resolução ilimitada, ótica de transformação
- Recentíssimos avanços em ótica de transformação sugerem que $n < 0$ não é necessário para concepção de "manto" da invisibilidade para luz visível

Conclusões

- Estudos (teoria + experimentos) de metamateriais (MM) estão em franca evolução
- Melhor compreensão e controle da interação da radiação com a matéria
- Aplicações potenciais de MM: resolução ilimitada, ótica de transformação
- Recentíssimos avanços em ótica de transformação sugerem que $n < 0$ não é necessário para concepção de "manto" da invisibilidade para luz visível

Observação final: considerem a carreira de cientista! Genialidade NÃO É pré-requisito, e sim muito estudo e dedicação!!! (Veja palestra "A Carreira do Físico Pesquisador")

Obrigado pela atenção!

rrds@if.ufrj.br

 raimundo fisicaufrj