
メタマテリアルの光応答

量子物性科学講座

富田知志

06/11/08

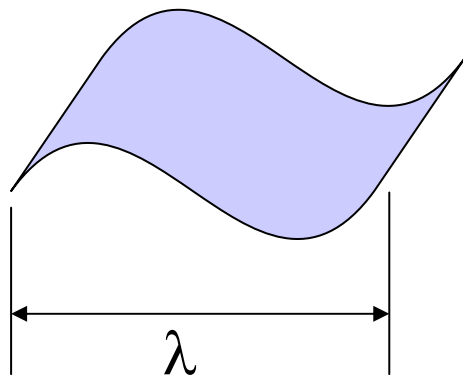


メタマテリアルとは

meta-: higher, beyond *Oxford ALD*

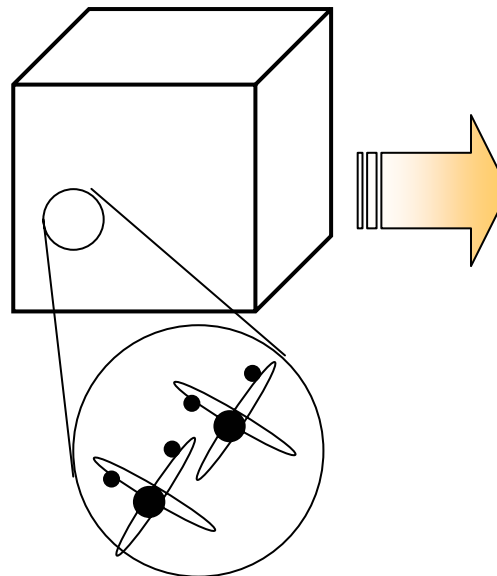
Pendry, Contemporary Phys. (2004)

メタマテリアル (meta-material) :
波長 λ に対して十分小さい要素を組み合わせて、
自然界には無い物性を実現した人工物質 (材料)

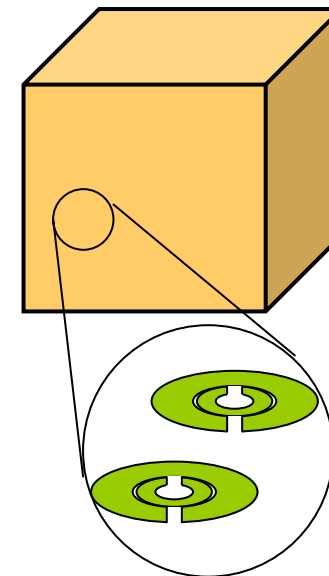


通常物質での ϵ, μ も
波長 λ より十分小さい構成原子の
応答を、系全体で平均化したもの

通常物質:
 ϵ, μ は構成原子に起因



メタ物質:
 $\epsilon_{\text{eff}}, \mu_{\text{eff}}$ は構成要素に起因
柔軟なデザイン性、望みの物性



物質の電磁気応答

物質の電磁気応答
Maxwellの方程式

$$\vec{k} \cdot \vec{D} = 0$$

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega \vec{B} = \omega \mu \vec{H}$$

$$\vec{k} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega \vec{D} = -\omega \epsilon \vec{E}$$

$$(k^2 - \epsilon \mu \omega^2) \vec{E} = 0$$

物質の二つのパラメータ

電場に対する巨視的応答: 誘電率 (ϵ)

磁場に対する巨視的応答: 透磁率 (μ)

屈折率

電場に対する巨視的応答 \Rightarrow 誘電率 (ϵ)

磁場に対する巨視的応答 \Rightarrow 透磁率 (μ)

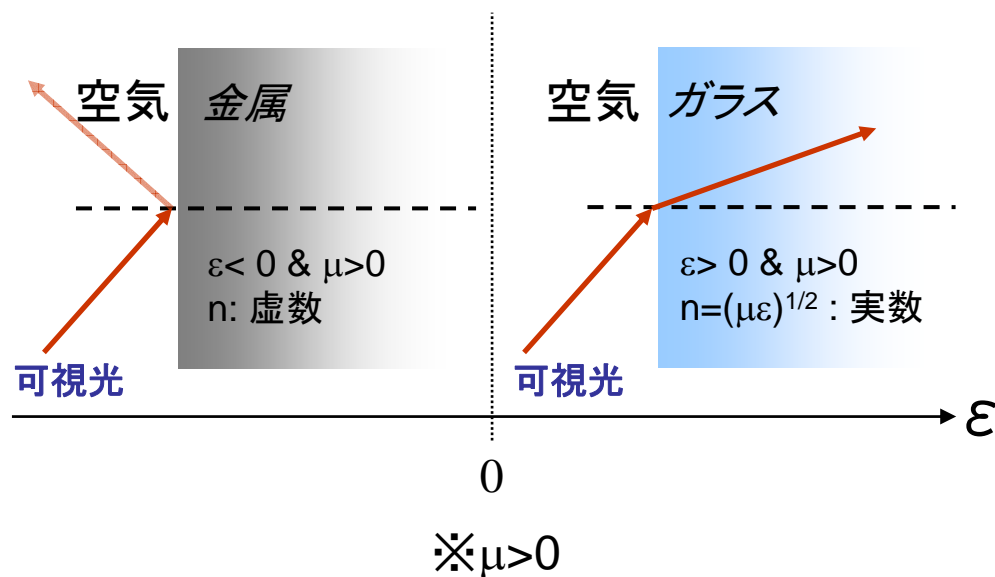
$$\sqrt{\epsilon\mu} = n$$

屈折率 (n):

nが実数 \Rightarrow 電磁波伝播(透過)

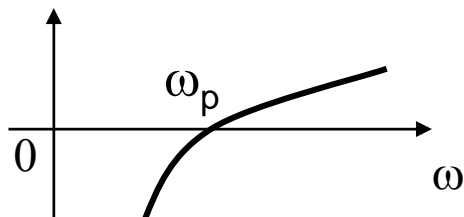
nが虚数 \Rightarrow 電磁波エヴァネッセント(減衰)

例: 可視光



負の誘電率

Drude型
誘電関数

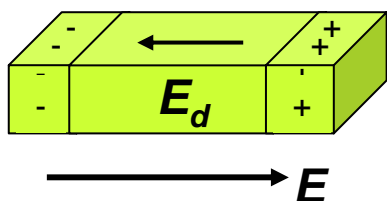


$$\omega_p^2 = \frac{n_{\text{eff}} e^2}{\epsilon_0 m_{\text{eff}}}$$

n_{eff} : 有効電子密度
 m_{eff} : 電子の有効質量

プラズマ周波数 (ω_p) 以下: $\epsilon_{\text{re}} < 0$

1. 金属の色 ($n_{\text{eff}} = 10^{22}/\text{cm}^3$)



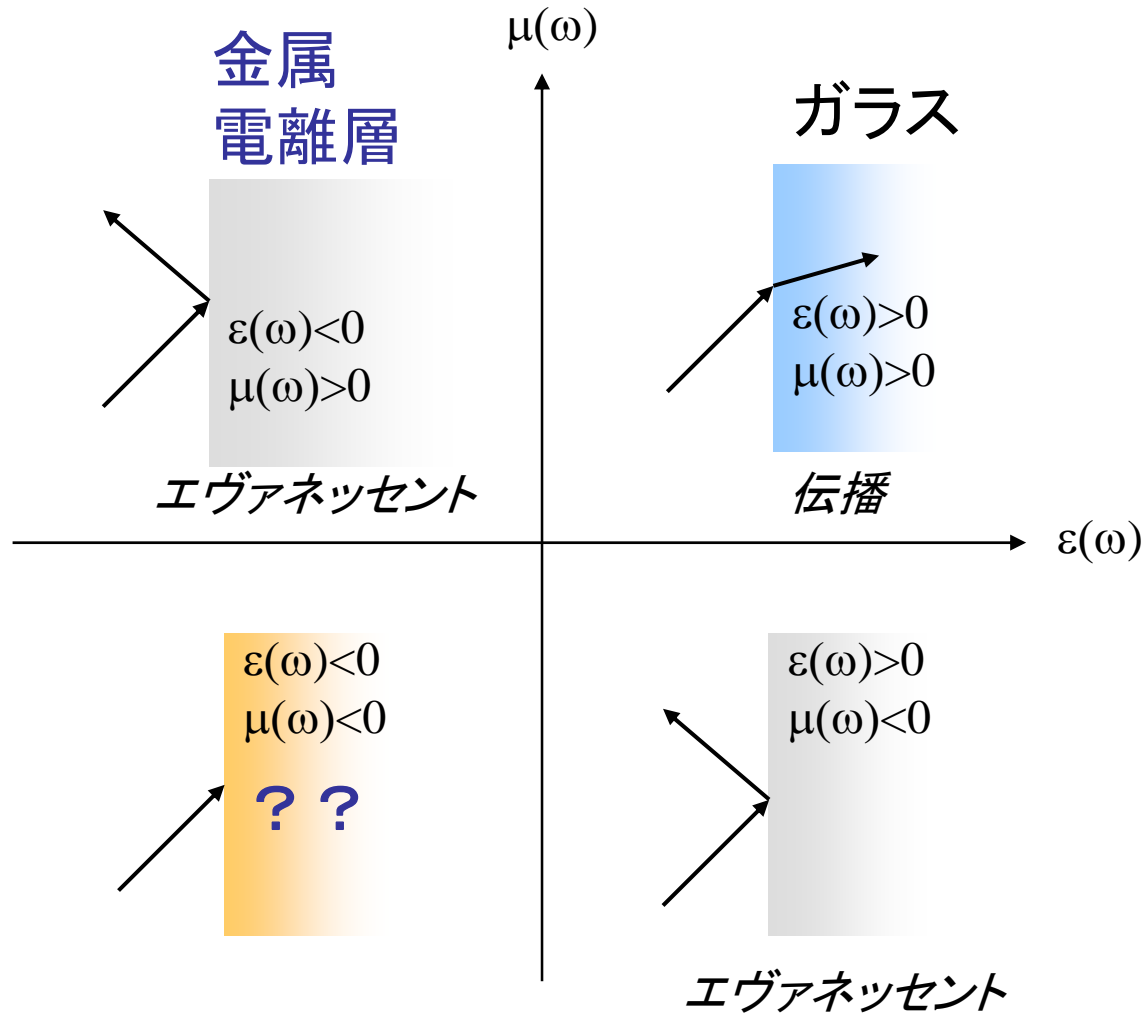
紫外 ($f \sim 1500\text{THz}$): $\epsilon_{\text{re}} > 0 \rightarrow n$: 実数 \rightarrow 透過
可視 ($f \sim 600\text{THz}$): $\epsilon_{\text{re}} < 0 \rightarrow n$: 虚数 \rightarrow 反射

2. 地球の電離層 ($n_{\text{eff}} = 10^6/\text{cm}^3$)



BS ($f < 12\text{GHz}$): $\epsilon_{\text{re}} > 0 \rightarrow n$: 実数 \rightarrow 透過
VHF ($f < 200\text{MHz}$): $\epsilon_{\text{re}} > 0 \rightarrow n$: 実数 \rightarrow 透過
短波 ($f < 10\text{MHz}$): $\epsilon_{\text{re}} < 0 \rightarrow n$: 虚数 \rightarrow 反射

4象限での分類



左手系

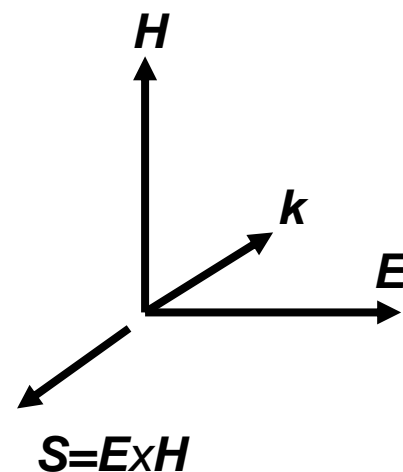
Veselago, *Usp.Fiz.Nauk.* (1964)

負の ϵ と負の μ を同時に持つ物質: 左手系物質 (LHMs)
※分子のカイラリティとは別の話

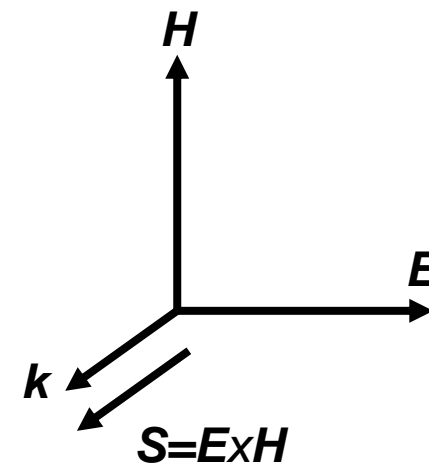
左手系物質で予想される現象

1. 屈折率 (n) は実数
電磁波伝播可能
2. E 、 H 、 k ベクトル間に左手の関係
反平行な k と S
逆ドップラー効果
3. 負の屈折率 ($n < 0$)
電磁波の負の屈折
パーフェクトレンズ

左手系



右手系



負の屈折率

ε 、 μ は複素数であるので、
Eulerの公式 ($\cos \theta + i \sin \theta = \exp i \theta$) より

$$\varepsilon = |\varepsilon| \cos \theta_1 + i |\varepsilon| \sin \theta_1 = |\varepsilon| \exp(i \theta_1) \quad \pi / 2 < \theta_1 < \pi$$

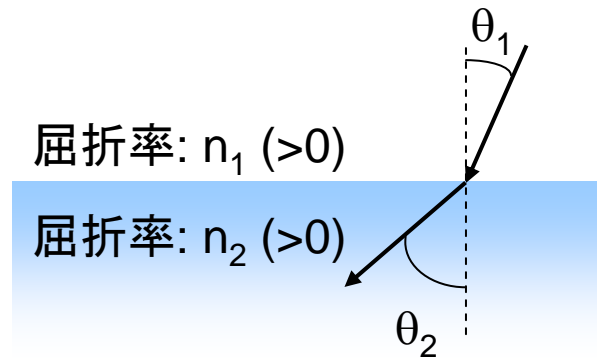
$$\mu = |\mu| \cos \theta_2 + i |\mu| \sin \theta_2 = |\mu| \exp(i \theta_2) \quad \pi / 2 < \theta_2 < \pi$$

$$\begin{aligned} n &= \sqrt{\varepsilon \mu} = [|\varepsilon| \exp(i \theta_1) |\mu| \exp(i \theta_2)]^{1/2} \\ &= \sqrt{|\varepsilon| |\mu|} [\exp i(\theta_1 + \theta_2)]^{1/2} \\ &= \sqrt{|\varepsilon| |\mu|} \exp i \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \\ &= \sqrt{|\varepsilon| |\mu|} \cos \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) + \sqrt{|\varepsilon| |\mu|} i \sin \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \end{aligned}$$

※因果律により
虚部は必ず正

必ず負

負の屈折

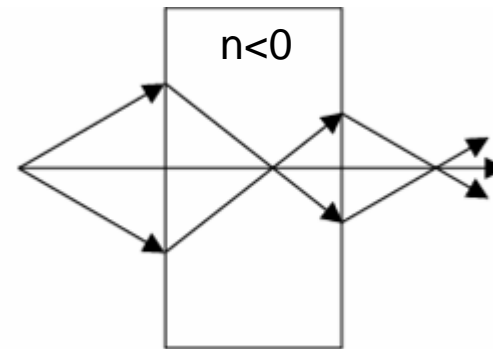
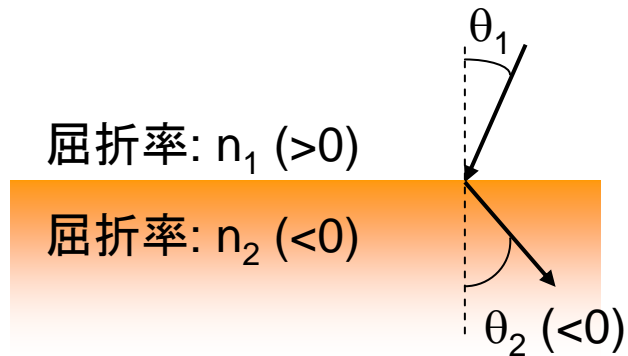


Snellの法則: $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$



$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1$$

$n_2 < 0$ → 負の屈折角: θ_2



Pendry, PRL (2000)

近接場成分集光
回折限界破り
波長以下の分解能
パーフェクトレンズ

左手系物質

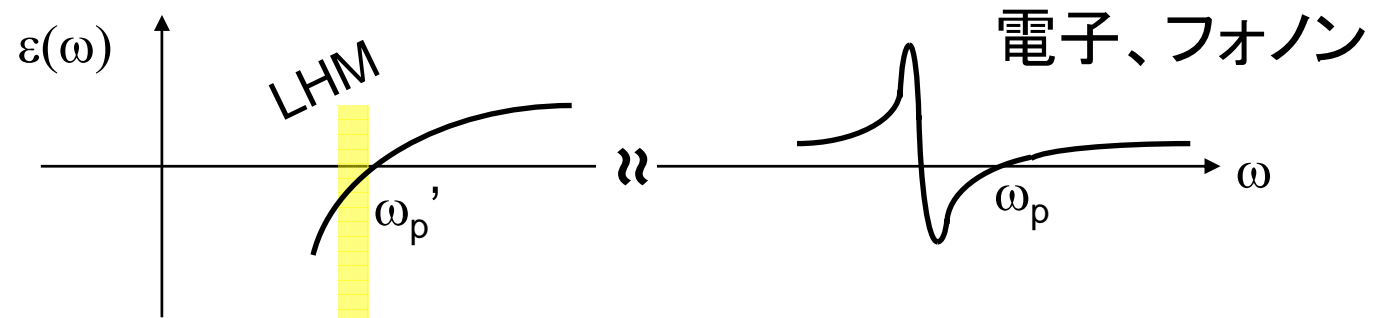
Q.自然界に左手系の物質は存在するか？

A.残念ながら、存在しない

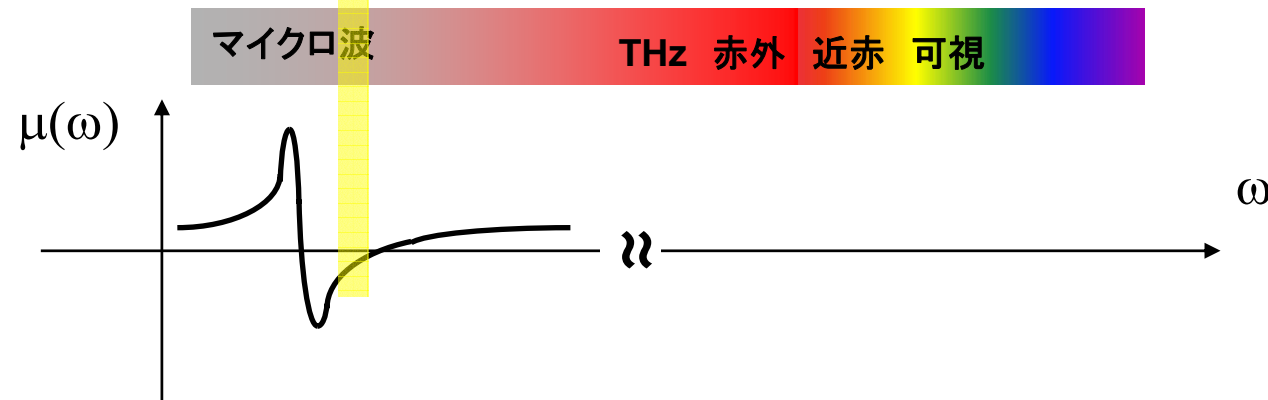
Q.なぜ？

電気応答と磁気応答

電気応答(ϵ)
電子
フォノン



磁気応答(μ)
環状電流
電子スピン

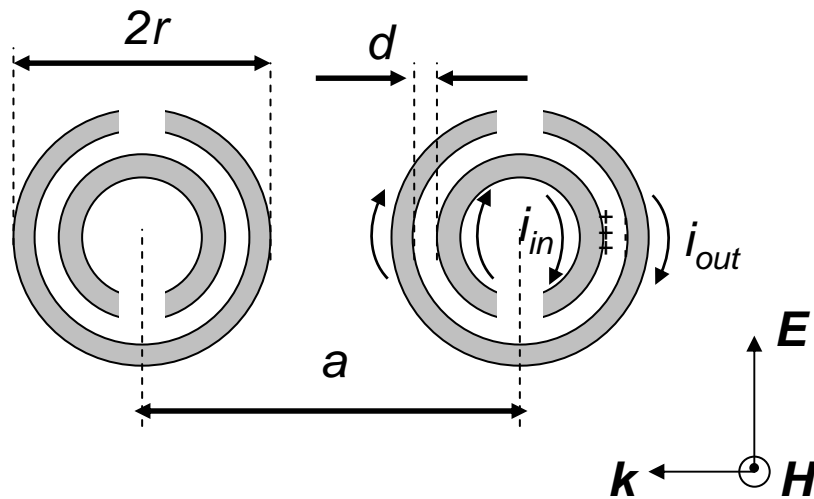


自然界では共存しない
共存は物理的に不可能ではない

マイクロ波領域での負の μ

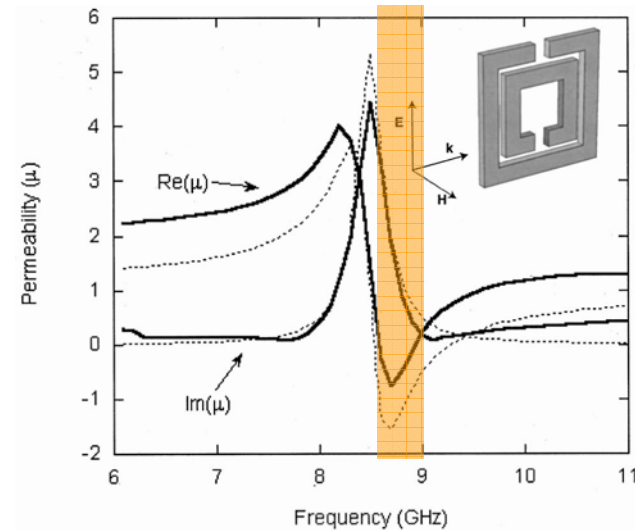
Pendry et al., IEEE Trans. MW. (1999).

スプリットリング共振器



$$\mu_{eff} = 1 - \frac{F}{1 + \frac{2\sigma i}{\omega r \mu_0} - \frac{3}{\pi^2 \mu_0 \omega^2 C r^3}}$$

$F = \pi r^2/a^2$: リングの体積充填率
 $C = \epsilon_0/d$: リング間のキャパシタンス



μ の周波数依存性 : 計算結果
 Smith et al., PRB (2001).

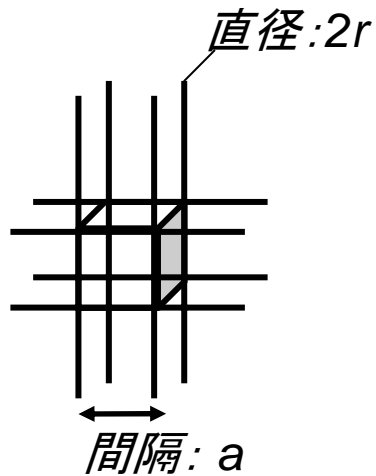
伝導電流の環状電流による
 マイクロ波領域での構造磁気共鳴
 ⇒ 負の μ_{eff}



マイクロ波領域での負の ϵ

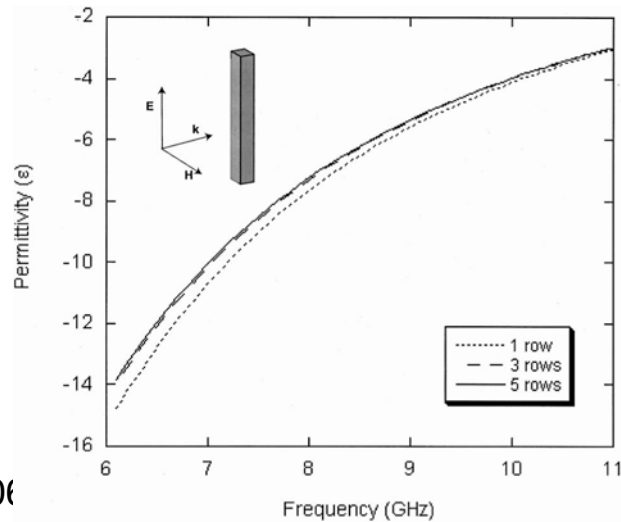
Pendry, et al., PRL (1996).

金属ワイヤグリッド



$$\omega_{ep}^2 = \frac{n_{eff} e^2}{\epsilon_0 m_{eff}} = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln(a/r)}$$

例: $2r = 50\mu\text{m}$, $a = 650\mu\text{m}$
 $\rightarrow \omega_{ep} = 102 \text{ GHz}$



低い有効電子密度 (n_{eff}) と
 大きな電子有効質量 (m_{eff})
 マイクロ波領域で擬電気プラズマ
 極低周波プラズマ振動数 (ω_{ep})
 \Rightarrow 負の ϵ_{eff}

ϵ の周波数依存性: 計算
Smith et al., PRB (2001).

左手系メタマテリアル

スプリットリング共振器 ($\mu_{\text{eff}} < 0$) サイズ数mm

+

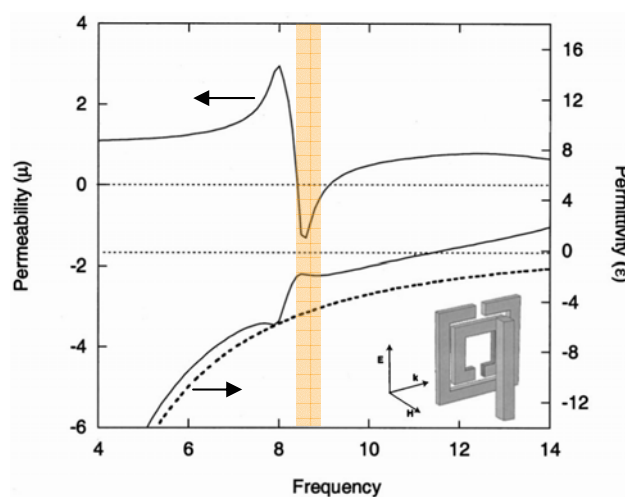
金属ワイヤグリッド ($\epsilon_{\text{eff}} < 0$)

↓ 周期数mm

左手系メタマテリアル @10GHz (~3cm)



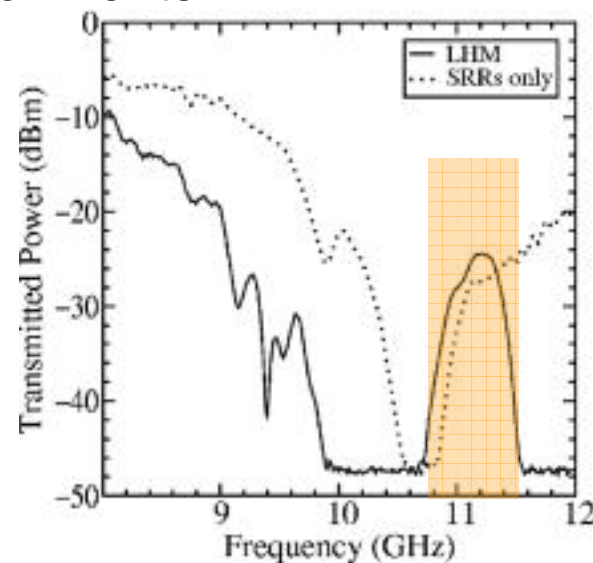
Calculation:



μ and ϵ of meta-materials

06/11/08 *Smith et al., PRB 2001.*

Experiments:



Microwave transmission experiment

Shelby et al., APL 2001



メタマテリアルの歴史

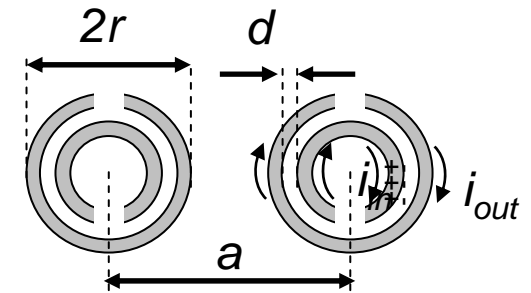
1964年: ソ連の理論家 Veselago による予言

Veselago, Usp. Fiz. Nauk. (1964).

自然界には存在しない

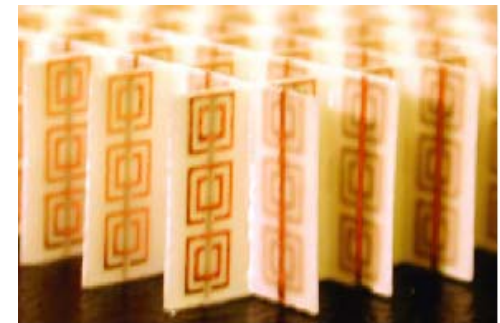
1999年: 英国の Pendry によるリング共振器の提案

Pendry et al., IEEE Trans. MW. (1999).



2000年: 米国の Smith らによるマイクロ波領域での左手系メタ物質報告

Smith et al., PRL (2001).

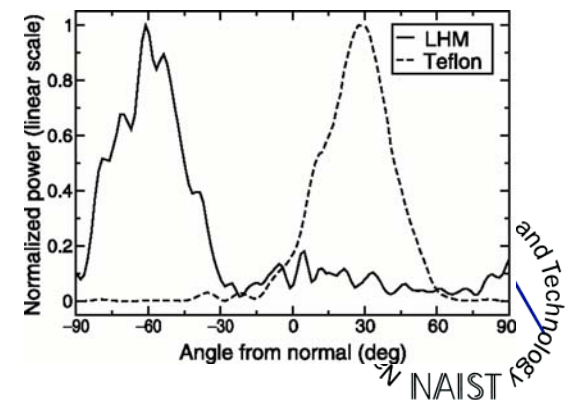


2001年: マイクロ波領域でのメタ物質による負の屈折率の報告

Shelby et al., Science (2001).

メタマテリアルで、自然界に存在しない左手系実現

06/11/08



フォトニック結晶との比較

メタマテリアル

波長より十分小さな構造 ($\lambda \gg a$)

有効媒質的取り扱い

連続的かつ一様な負の ϵ と負の μ とみなす

フォトニック結晶

波長程度の誘電率の周期性 ($\lambda \approx a$)

フォトニックバンド構造の分散

負の有効屈折率状態

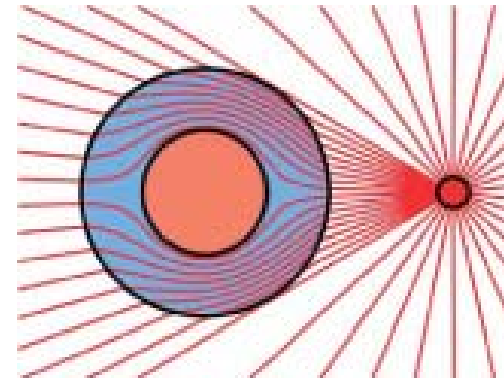
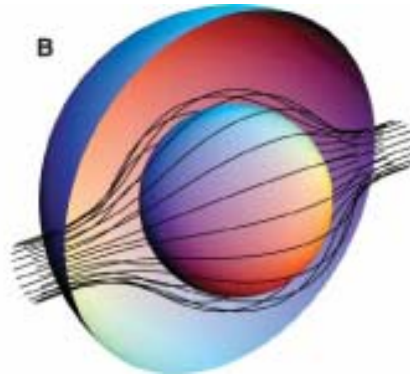
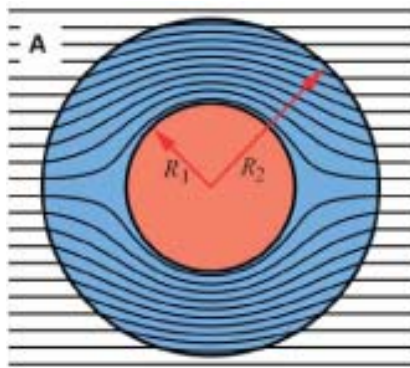
Notomi, PRB (2000).

電磁波の負の屈折

Cubukcu et al., Nature (2003).

Cloaking

Pendry, Schurig, Smith, Science 312, 1780 (2006).
Schurig, et al., ScienceXpress, Oct. 19, 2006.

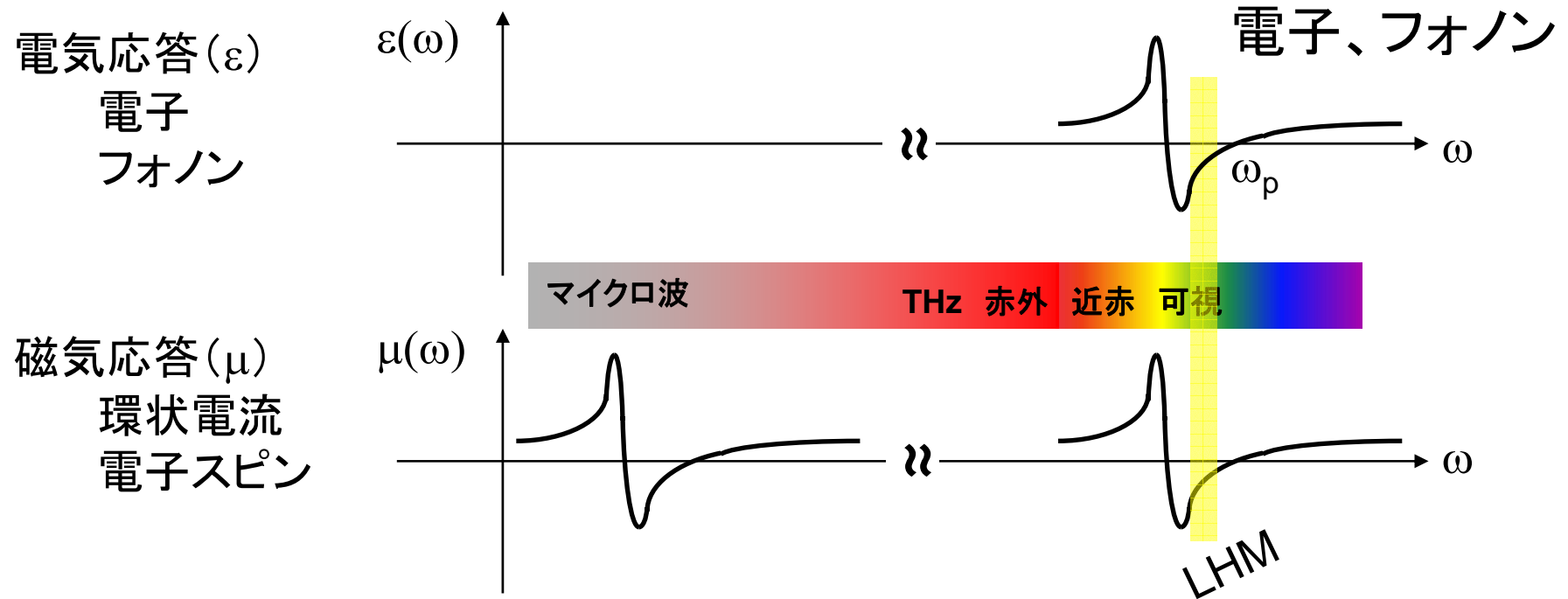


メタ材料のデザイン柔軟性
⇒ 電磁気学的に不均一な物質
(座標変換による電磁場の幾何学)
⇒ 反射、散乱をなくす
⇒ Concealment by cloaking the
object with metamaterials



GHz帯でのcloaking用
メタ材料

電気応答と磁気応答

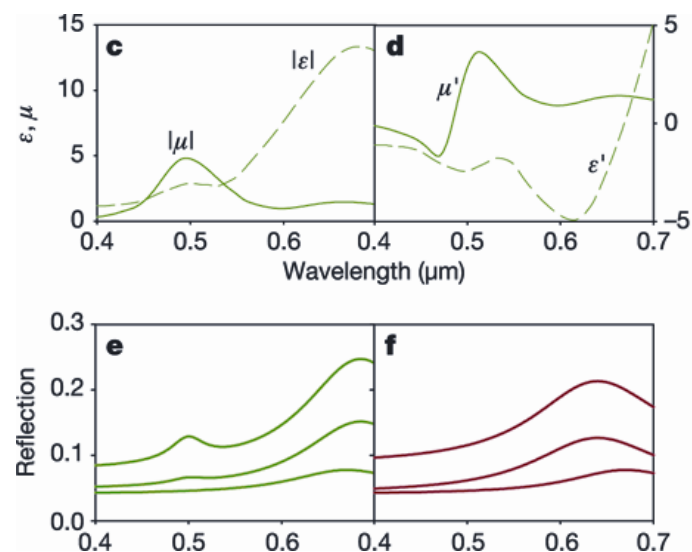
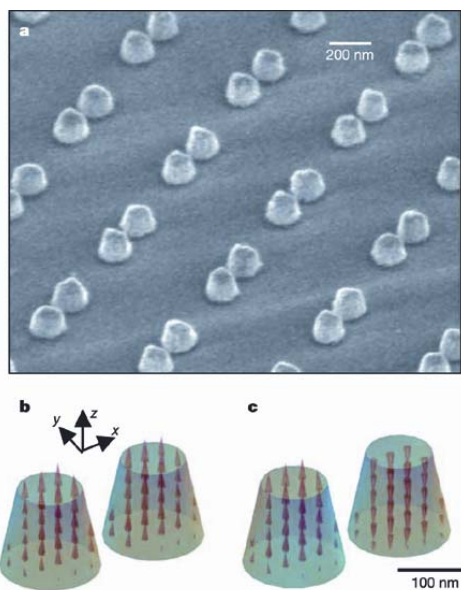


更なる展開、応用目指し光の領域へ：
基本的にはスケーリング則に基づくSRRの
ダウンサイジングが主流

光の領域への展開

Grigorenko et al., Nature (2005).

光の領域での左手系



直径100nmのAuナノピラーのペア

非対称な表面プラズモンモードの結合による環状電流

可視域で磁気応答、負の μ

しかし虚部が大きく、負の屈折率は持たない