

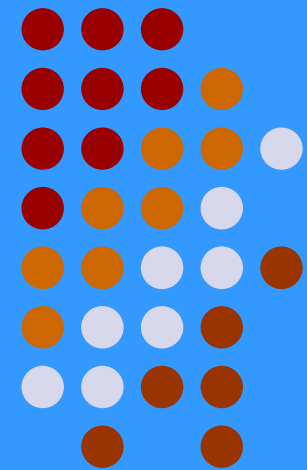
強磁性金属ナノコンポジット膜の 作製と磁気特性

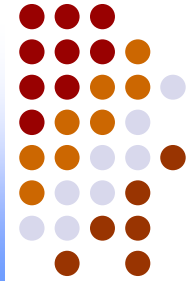
~ Left-Handed Materialsの実現を目指して ~

JST PRESTO
(理化学研究所 ナノ物質工学研究室)
富田 知志

s-tomita@riken.go.jp

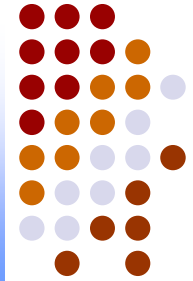
共同研究者:
赤松謙祐(甲南大)
八代晴彦、萩原政幸(理研・横浜市大)
三俣千春(日立金属)





目次

- 1 . 物質の電磁気応答
- 2 . Left-Handed Materials (LHMs)
- 3 . LHMsと強磁性金属ナノコンポジット膜
- 4 . Ni-ポリイミドナノコンポジット膜の作製
- 5 . Ni-ポリイミドナノコンポジット膜の強磁性共鳴
- 6 . まとめ



物質の電磁気応答

電磁波は情報の重要な担い手：光通信、衛星放送
“情報”である電磁波(例：光、電波)と
“媒体”である物質(例：光ファイバー、空気)との間の
相互作用に対する深い理解が必要

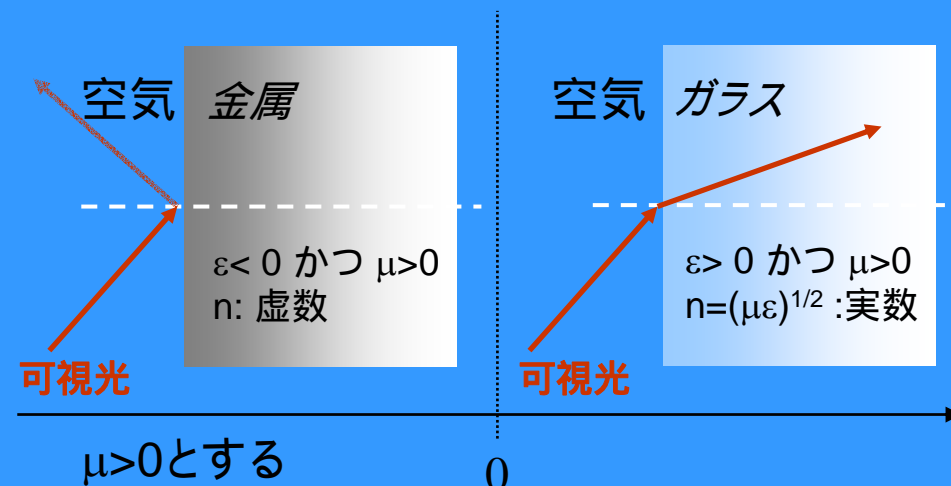
物質の電磁気応答

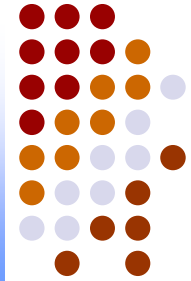
誘電率(ϵ)と透磁率(μ)で決定

$[\epsilon\mu]^{1/2}=n$ ：屈折率

n実数：伝播、透過

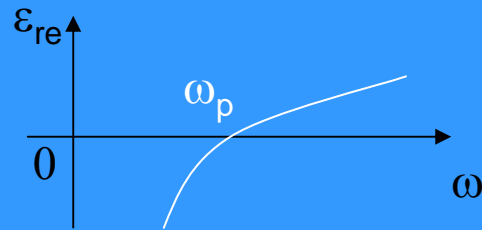
n虚数：減衰、反射





自由電子プラズマ -負の誘電率-

Drude型
誘電関数

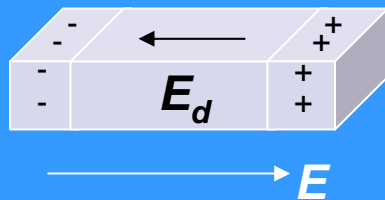


プラズマ周波数 (ω_p) 以下では $\epsilon < 0$

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

n_{eff} : 電子密度
 m_{eff} : 電子有効質量

1. 金属光沢 (電子密度 $n_{eff} = 10^{22}/\text{cm}^3$)



紫外 ($f \sim 1500\text{THz}$) $\epsilon > 0$

n : 実数 透過

可視 ($f \sim 600\text{THz}$) $\epsilon < 0$

n : 虚数 反射

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



衛星放送 ($f < 12\text{GHz}$) $\epsilon > 0$

n : 実数 透過

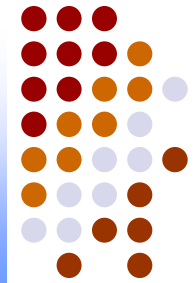
VHF ($f < 200\text{MHz}$) $\epsilon > 0$

n : 実数 透過

短波 ($f < 10\text{MHz}$) $\epsilon < 0$

n : 虚数 反射

負の誘電率は系の電磁気応答に多様性をもたらす

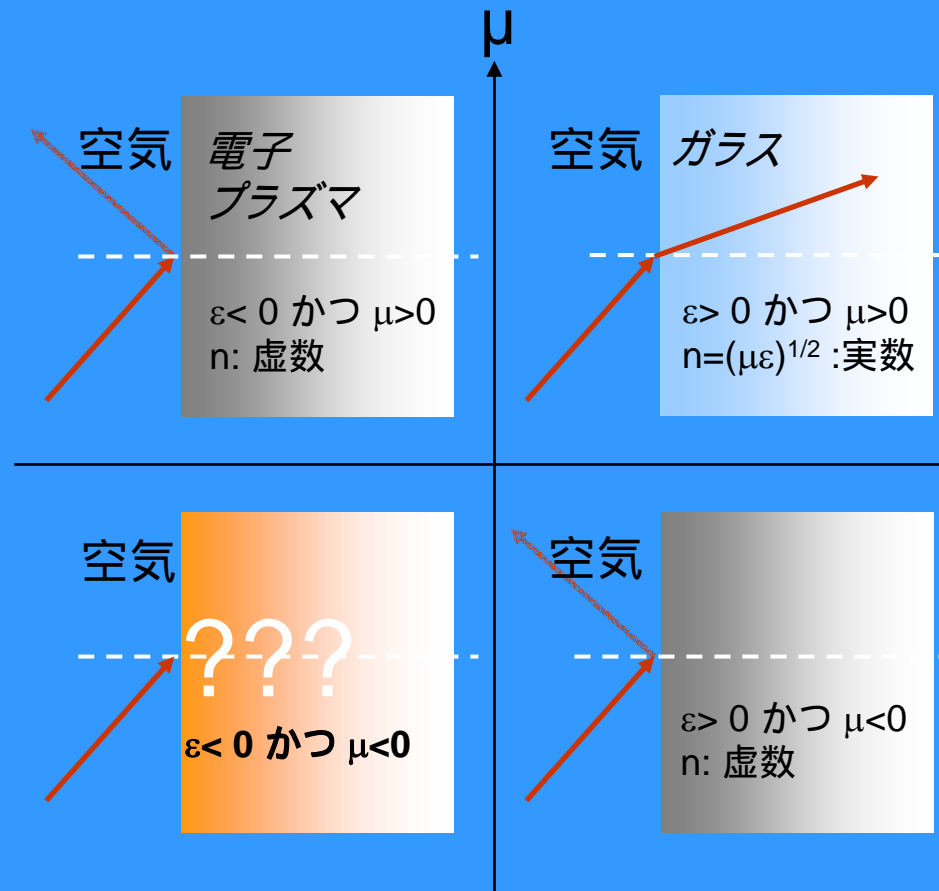


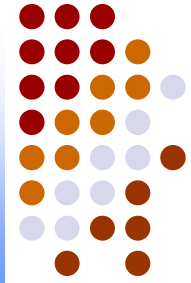
電磁気応答から見た物質の分類

$[\epsilon\mu]^{1/2}=n$: 屈折率

n実数: 伝播、透過

n虚数: 減衰、反射





Left-Handed Materials (LHMs)

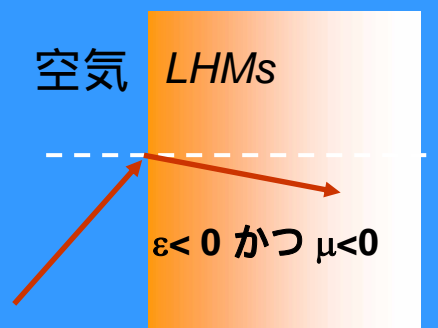
Veselago, Usp.Fiz.Nauk. 1967

ϵ 、 μ が共に負になったら、どうなるか？

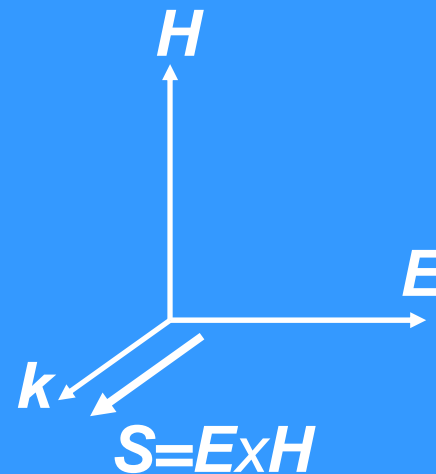
Left-Handed Materials (LHMs) [Double Negative Materials (DNMs)]

LHMsに予測される性質

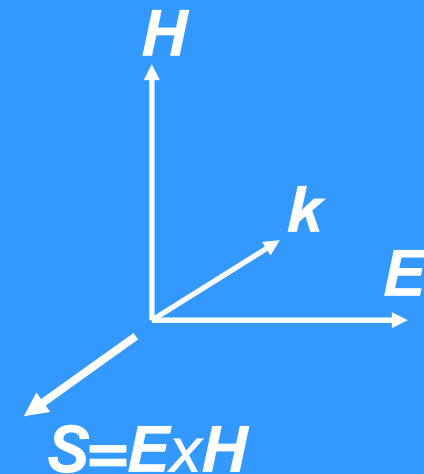
1. 屈折率 n は実数
電磁波は伝播
2. E 、 H 、 k は左手系配置
 k と S は反平行
3. 屈折率 n は負
電磁波の負の屈折

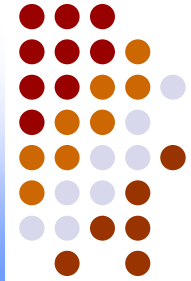


RHMs



LHMs

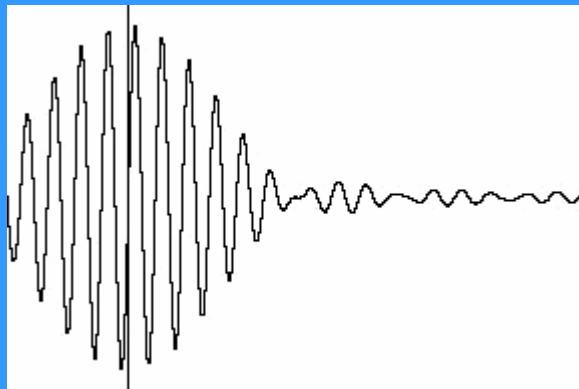




反平行の k と S

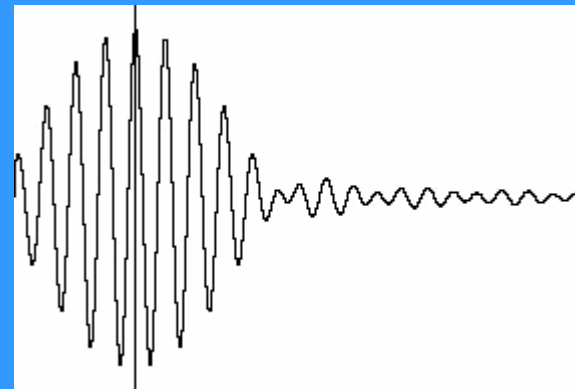
From UCSD web site
<http://physics.ucsd.edu/~drs/index.html>

RHMs



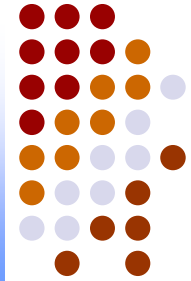
ポインティングベクトル S (群速度)
波数ベクトル k (位相速度)

LHMs

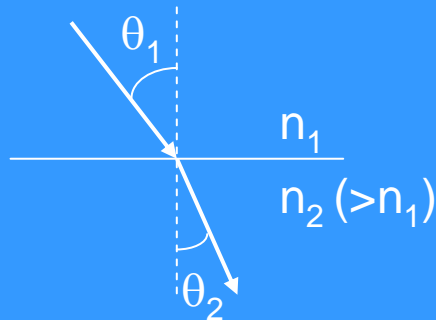


ポインティングベクトル S (群速度)
波数ベクトル k (位相速度)

反平行の k と S から予測される現象:
逆ドップラー効果、逆チェレンコフ放射 etc...



負の屈折



Snellの法則:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{\epsilon_2 \mu_2}{\epsilon_1 \mu_1}} = \frac{c_1}{c_2}$$

負の屈折を用いると
平板で電磁波を集束できるはず
レンズ効果

近接場光も集光できる
回折限界の突破
波長以下サイズの像形成
“パーフェクトレンズ”
Pendry, PRL 2000.

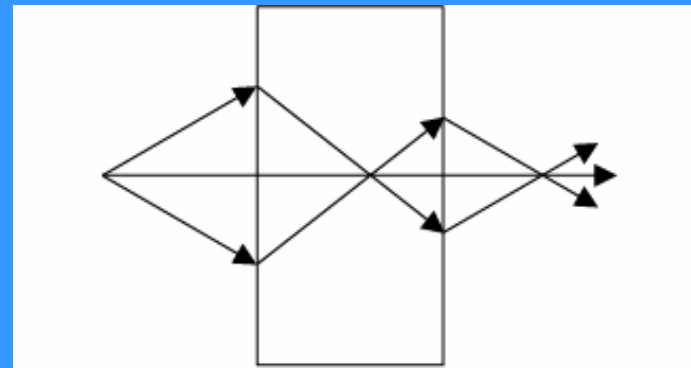
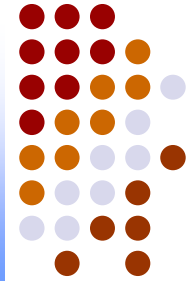


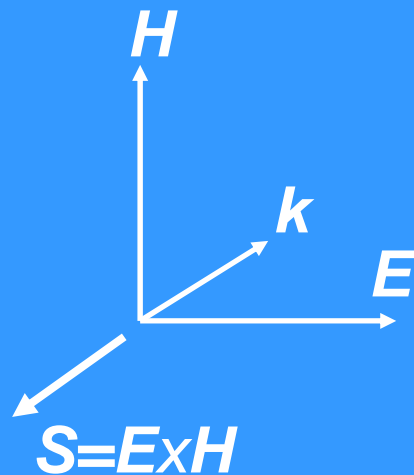
FIG. 1. A negative refractive index medium bends light to a negative angle with the surface normal. Light formerly diverging from a point source is set in reverse and converges back to a point. Released from the medium the light reaches a focus for a second time.



LHMsは存在するのか？

$\epsilon < 0$ かつ $\mu < 0$ の物質：
Left-Handed Materials (LHMs)

LHMs

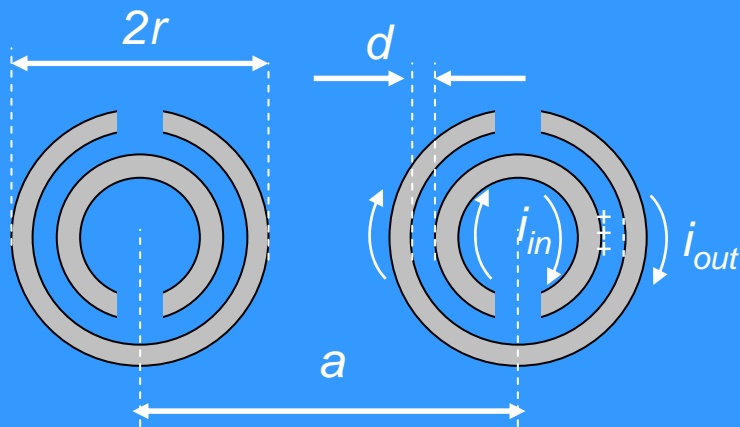
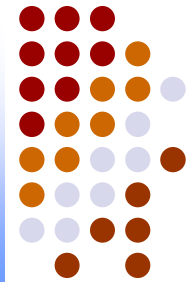


自然界には負の μ が存在しない
(磁気モノポールが存在しない)
LHMsは自然界には存在しない

Q.「どのようにしてLHMsを実現するか？」
=「どのようにして負の μ を作り出すか？」
=「どのように電磁波の目をごまかして、
負の μ を持っているように見せかけるか？」

スプリットリング共振器

- マイクロ波領域での負の μ -



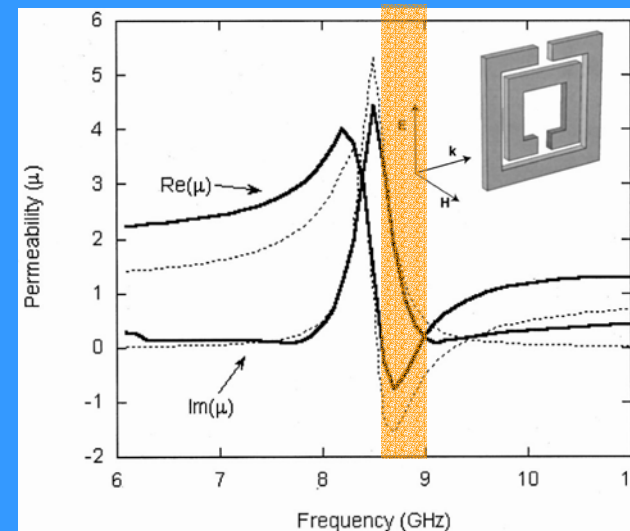
$$\mu_{eff} = 1 - \frac{F}{1 + \frac{2\sigma i}{\omega r \mu_0} - \frac{3}{\pi^2 \mu_0 \omega^2 C r^3}}$$

$F = \pi r^2 / a^2$: リングの体積充填率

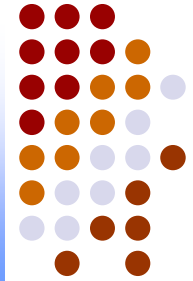
$C = \epsilon_0 / d$: リング間のキャパシタンス

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

マイクロ波領域で
正の有効質量を持つ
擬似的な磁気プラズマ
負の μ_{eff} の実現



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



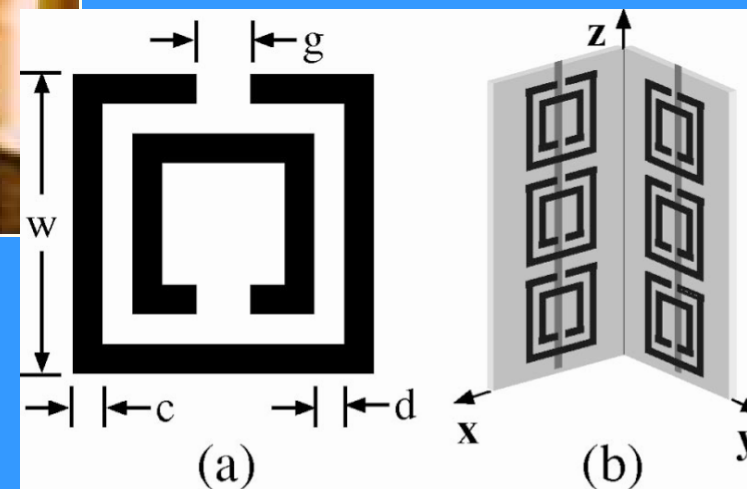
メタマテリアル

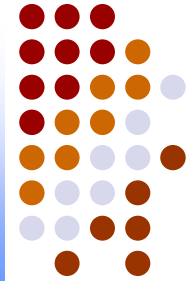
meta-: higher; beyond (Oxford ALDより)



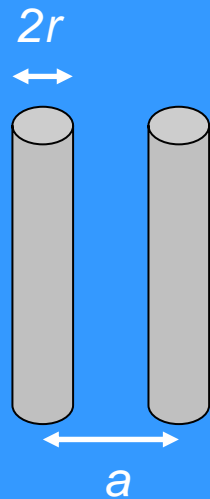
メタマテリアル
(カリフォルニア大サンディエゴ校)
Shelby, Smith, and Schultz, Science 2001.

リング共振器と金属ワイヤのアレイ
によるアセンブリ
Shelby et al., APL 2001.





金属ワイヤアレイ



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

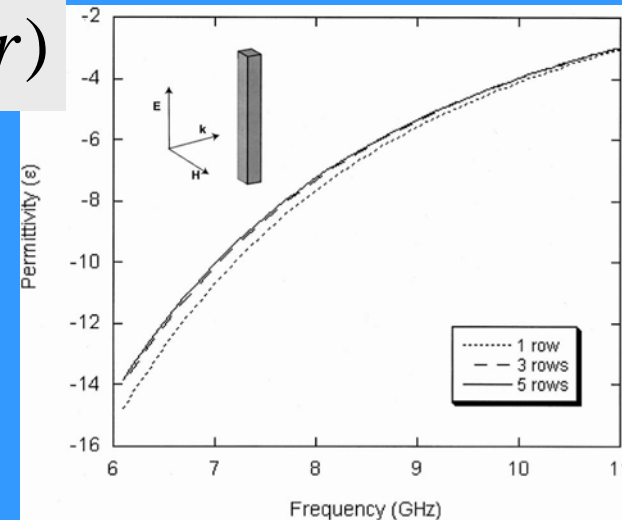
低い電子密度(n_{eff})かつ大きな有効質量(m_{eff})

マイクロ波領域での
擬似的な電子のプラズマ:

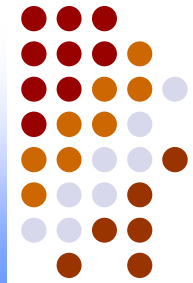
極めて低いプラズマ周波数 ω_{ep}

マイクロ波領域での負の ϵ_{eff}

Pendry, et al., PRL 1996.

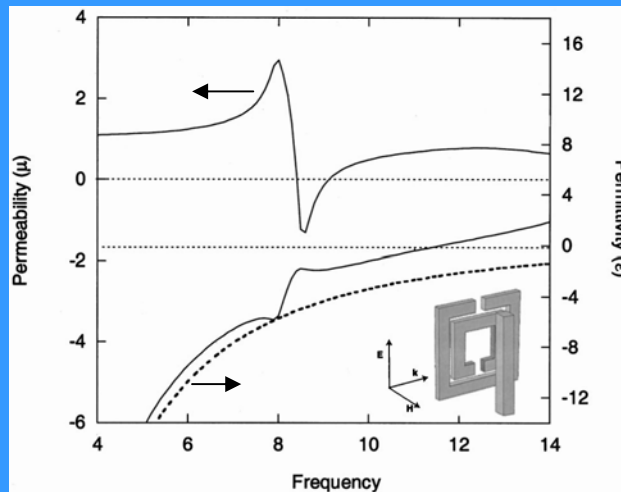


ϵ の周波数依存性: 計算結果
Smith et al., PRB 2001.



LHメタマテリアル

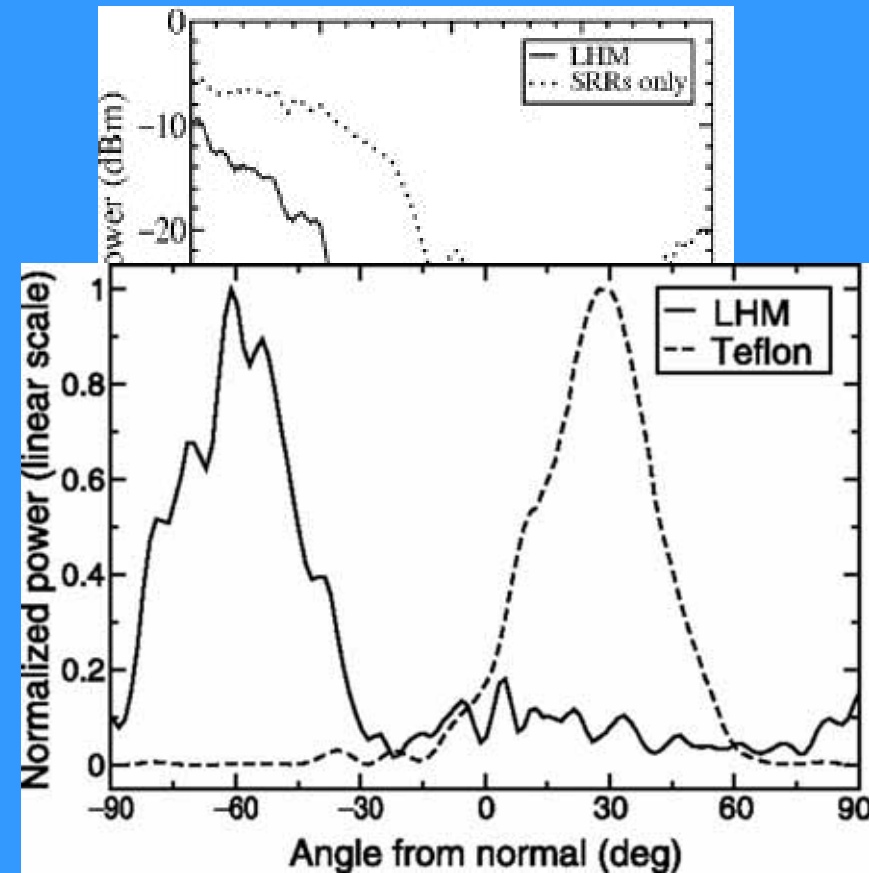
計算:

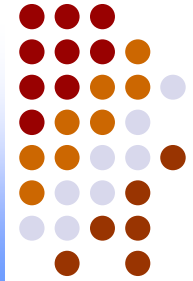


メタマテリアルの μ と ϵ
Smith et al., PRB 2001.

LHメタマテリアルによる
マイクロ波の負の屈折
Shelby et al., Science 2001.

実験:





LHメタマテリアルは物質か？



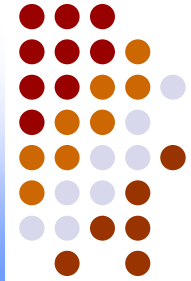
LHメタマテリアル

スプリットリング共振器と金属ワイヤ

- 物質とは言い難い
- むしろデバイスの

更なる研究、応用のためには
“より物質的”なLHMsが必要

新たな形態のLHMsの探索



強磁性金属ナノコンポジット膜

PHYSICAL REVIEW B, VOLUME 65, 144407

Theoretical investigation on the possibility of preparing left-handed materials in metallic magnetic granular composites

S. T. Chui* and Liangbin Hu

Bartol Research Institute, University of Delaware, Newark, Delaware 19716

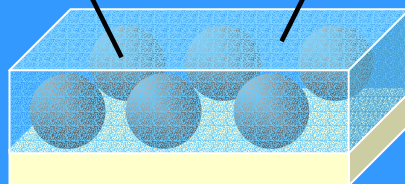
-Received 13 August 2001; revised manuscript received 12 November 2001; published 22 March 2002!

We investigate the possibility of preparing left-handed materials in metallic magnetic granular composites. Based on the effective medium approximation, we show that by incorporating metallic magnetic nanoparticles into an appropriate insulating matrix and controlling the directions of magnetization of metallic magnetic components and their volume fraction, it may be possible to prepare a composite medium of low eddy current loss that is left-handed for electromagnetic waves propagating in some special direction and polarization in a frequency region near the ferromagnetic resonance frequency. This composite may be easier to make on an industrial scale. In addition, its physical properties may be easily tuned by rotating the magnetization locally.

*Chui and Hu,
Phys. Rev. B 2002*

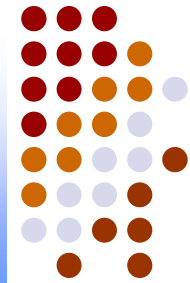
強磁性金属ナノ粒子

絶縁体マトリックス



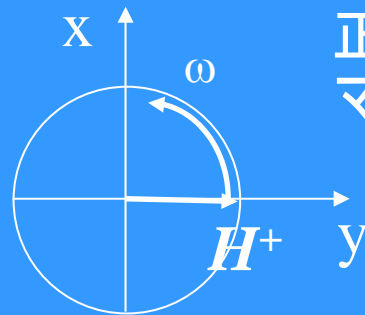
有効媒質理論計算

- ナノメートルサイズの粒子
- 比較的低い粒子体積充填率
- 粒子磁化を一方向にそろえる
- 正の円偏波マイクロ波に対する強磁性共鳴より物質らしいILHMフィルム

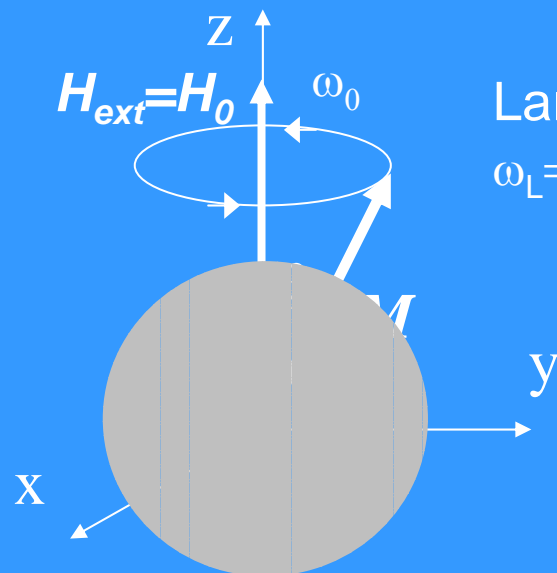


強磁性共鳴 (FMR)

阿部, マイクロ波技術



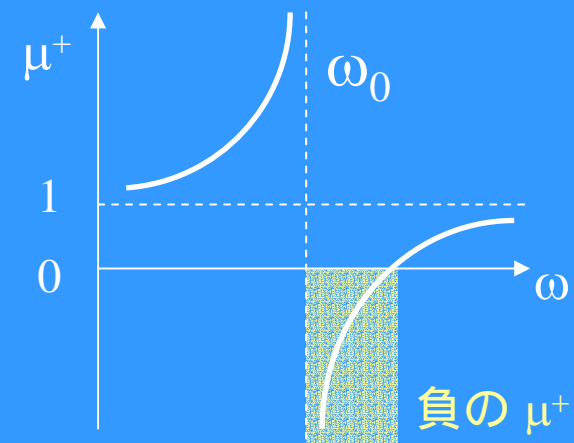
正の円偏波
マイクロ波 (ω)

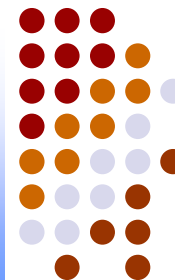


Larmor周波数
 $\omega_L = \omega_0$

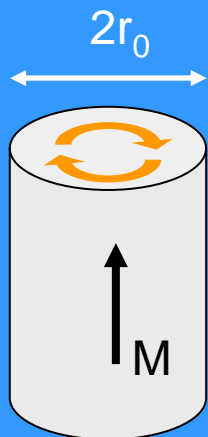
$\omega = \omega_0 = \gamma H_0$:
強磁性共鳴(FMR)

$$\mu^+ = 1 - \frac{\gamma M_0}{\omega - \gamma H_0}$$





渦電流損失



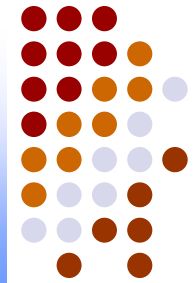
直径 $2r_0$ を持つ磁性体円柱に
沿った一様な磁化

渦電流損失 (P):

$$P = \frac{r_0^2}{8\rho} \left(\frac{dM}{dt} \right)^2$$

近角, 強磁性体の物理

小さな r_0
小さな渦電流損失P



LHMsとしてのナノコンポジット膜

強磁性金属ナノコンポジット膜

$$\epsilon < 0$$

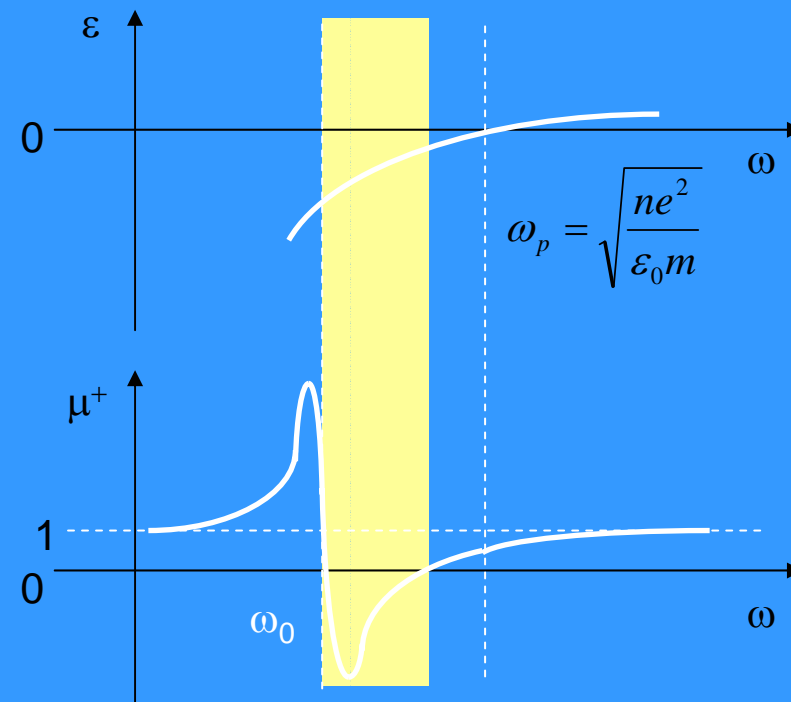
@ 金属のプラズマ周波数(ω_p)以下

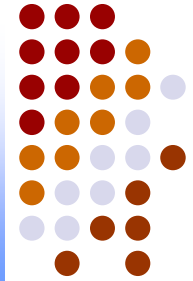
$$\mu^+ < 0$$

@ FMR周波数(ω_0)近傍

低渦電流損失

FMR周波数近傍(マイクロ波領域)
でLHMsの実現





本研究の目的

ミッション:

強磁性金属ナノコンポジット膜を用いたLeft-Handed Materialsの実現と応用

科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 PRESTO

「情報、バイオ、環境とナノテクノロジーの融合による革新的技術の創製」領域

(研究総括: 潮田資勝、H14年度11月~)

<http://www.nano-integ.jst.go.jp>

本日の講演内容:

1. 強磁性金属ナノコンポジット膜の作製
化学的作製手法、サイズ制御、体積充填率制御
2. 強磁性金属ナノコンポジット膜のFMR
Xバンド角度依存性、温度依存性、高周波測定