



Research on negative refraction and backward-wave media: A historical perspective

S.A. Tretyakov and many colleagues...

sergei.tretyakov@tkk.fi

Radio Laboratory / SMARAD
Helsinki University of Technology

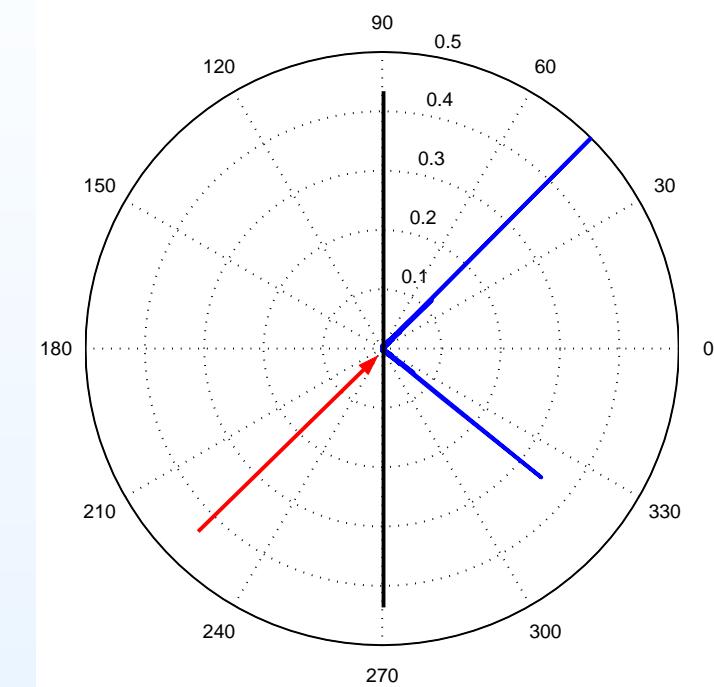
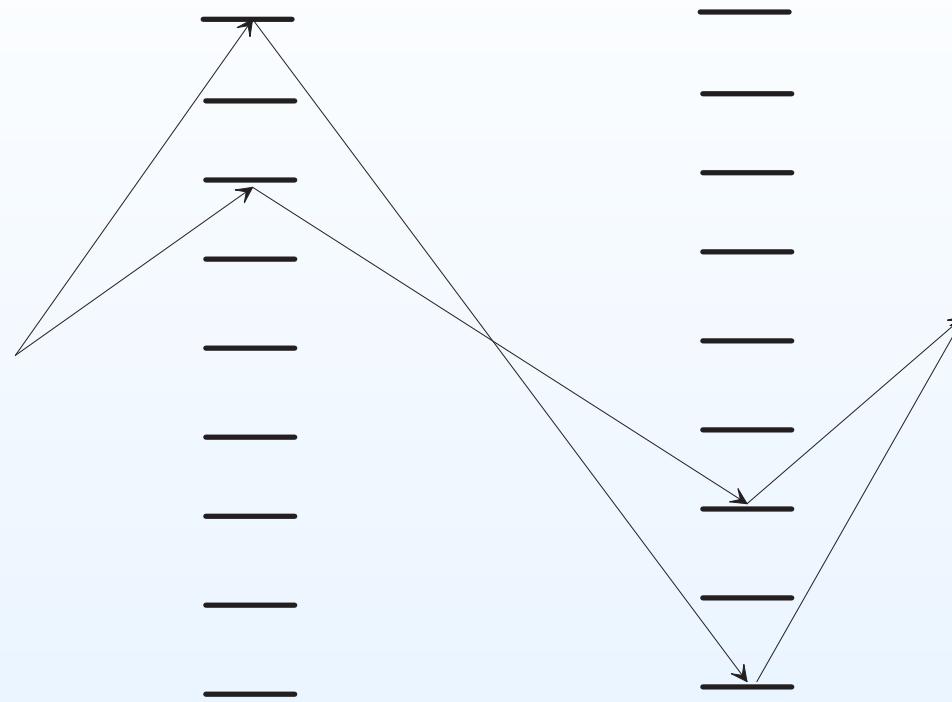


Outline

- Just some observations on the history of studies of negative refraction including some recent results



Known since...



Left: Mirror reflection (S. Maslovski, 2002? Ancient Greeks?)

Right: $F(\theta) = \frac{\sin(N(ka \sin \theta - \psi)/2)}{\sin(ka \sin \theta - \psi)/2}$, $ka = 3\pi/2$, The incidence angle is $\pi/4$ ($\psi = ka \cos(\pi/4)$), $N = 300$



Backward waves and negative refraction



Prof. L.I. Mandelshtam (1879-1944). Photo 1940



Negative refraction in 1940-1944

$$k \sin \phi = k_1 \sin \varphi_1.$$

Однако последнее равенство удовлетворяется как при угле φ_1 , так и при угле $\pi - \varphi_1$.

Требуя по-прежнему, чтобы энергия во второй среде *оттекала* от границы раздела, мы приходим тогда к тому, что фаза должна набегать на эту границу и, следовательно, направление распространения преломлённой волны будет составлять с нормалью угол

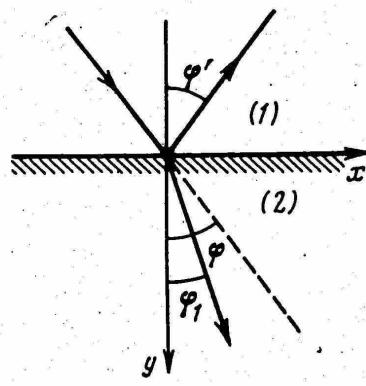


Рис. 12

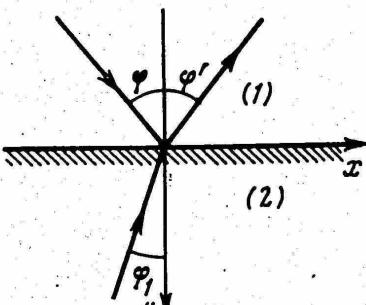


Рис. 13

$\pi - \varphi_1$. Как ни непривычно такое построение, но, конечно, ничего удивительного в нем нет, ибо фазовая скорость еще ничего не говорит о направлении потока энергии.

L.I. Mandelshtam (1879-1944)

ЧЕТВЕРТАЯ ЛЕКЦИЯ

(5.V 1944 г.)



"LH transmission line" in 1951

and the radiation condition

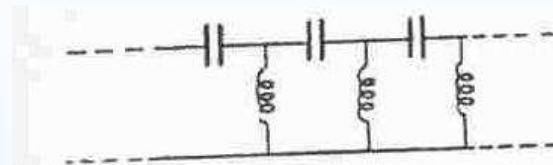


Рис. 1.

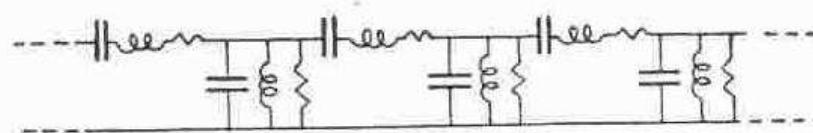


Рис. 2.

При формулировке условия излучения в задачах дифракции синусоидальных волн обычно подразумевается [иногда молчаливо, если отсутствует ссылка на уравнение (4)], что фазовая скорость положительна. Между тем, как показывает приведенный пример, возможен противоположный случай. В то же время направление распространения энергии всегда положительно, т. е. совпадает с направлением от источника.

G.D. Malyuzhinets, 1951; C. Caloz and T. Itoh, 2002; G. Eleftheriades, 2002



D.V. Sivukhin, 1957

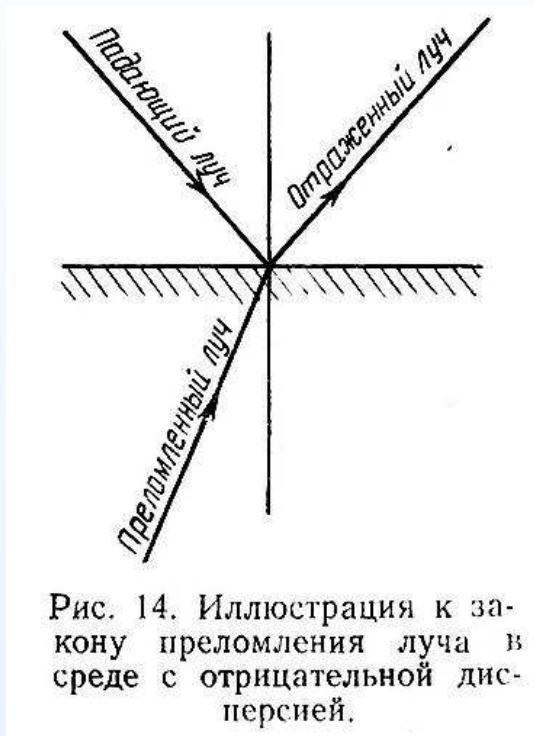
Если $\mu < 0$, а следовательно, $\epsilon < 0$, то $v_f v_r < 0$, т. е. фазовая и групповая скорости направлены противоположно. Если бы этот случай был возможен, то волновой вектор прошедшей волны \mathbf{k}_2 был бы направлен к границе раздела, т. е. в сторону первой среды. Среды с $\epsilon < 0$ и $\mu < 0$ неизвестны. Вопрос о принципиальной возможности существования таких сред не выяснен.

Media with $\epsilon < 0$ and $\mu < 0$ are not known. The question about the possibility of their existence has not been clarified.



R.A. Sulin, 1959

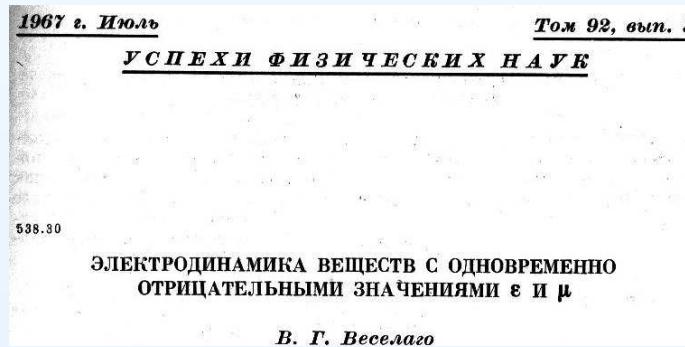
Negative refraction in periodical media



The text reads: “An illustration to the refraction law in a medium with negative dispersion.”



V.G. Veselago



II. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН В ВЕЩЕСТВЕ С $\epsilon < 0$ И $\mu < 0$. «ПРАВЫЕ» И «ЛЕВЫЕ» ВЕЩЕСТВА

Для того чтобы выявить электродинамические закономерности, существенно связанные со знаком ϵ и μ , следует обратиться к тем соотношениям, в которых ϵ и μ выступают раздельно, а не в виде произведения, как это имеет место в (1) — (3). Такими соотношениями являются прежде всего уравнения Максвелла и материальные уравнения

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H}, \\ \mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E}. \end{aligned} \right\} \quad (4')$$

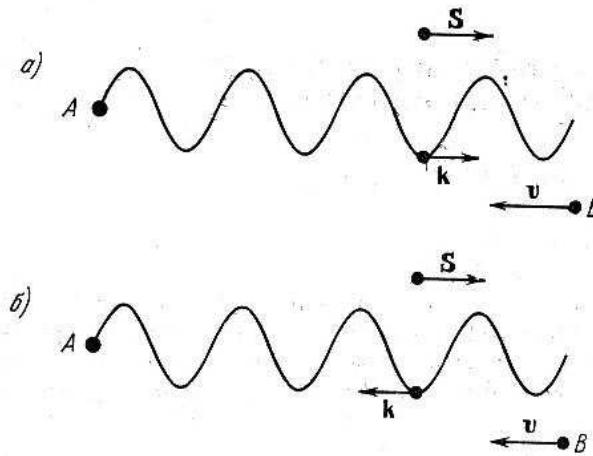


Рис. 1. а) Допплер-эффект в правом веществе.
б) Допплер-эффект в левом веществе.
Буквой А обозначен источник излучения, буквой В —

всего уравнения Максвелла и материальные уравнения

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H}, \\ \mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E}. \end{aligned} \right\} \quad (4')$$

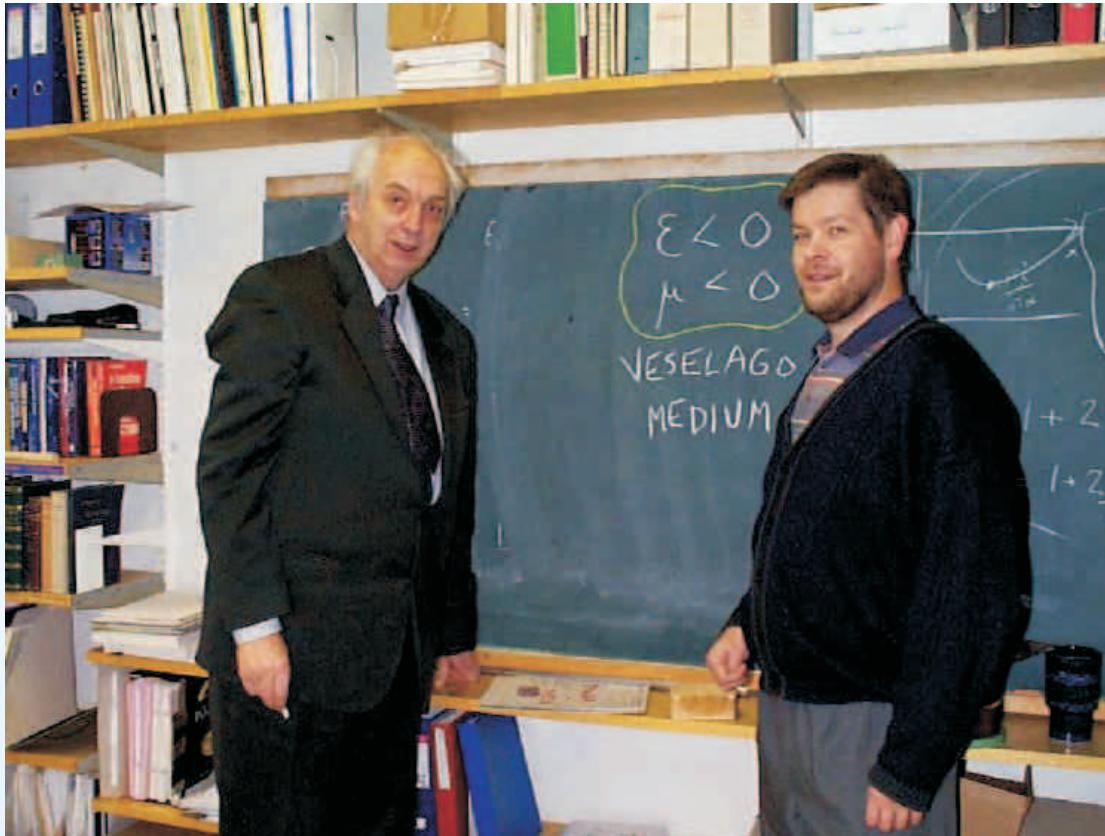
Для плоской монохроматической волны, у которой все величины пропорциональны $e^{i(kz-\omega t)}$, выражения (4) и (4') сводятся к

$$[\mathbf{kE}] = \frac{\omega}{c} \mu \mathbf{H},$$

$$[\mathbf{kH}] = -\frac{\omega}{c} \epsilon \mathbf{E}. \quad (5)$$



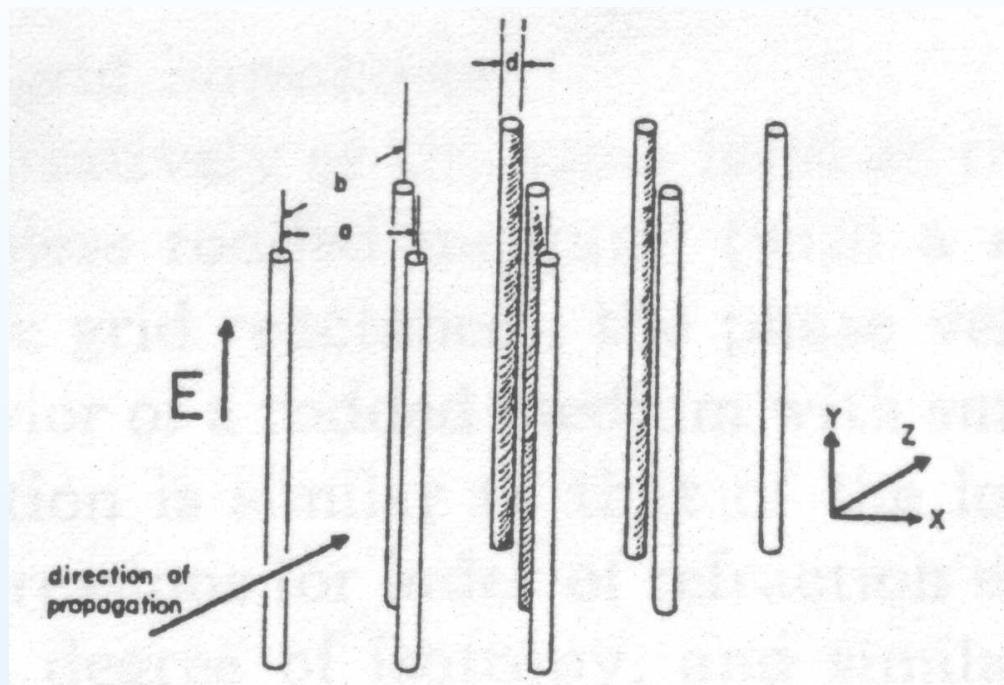
Backward-wave (Veselago) media



Prof. Victor G. Veselago on the left with Prof. Ari Sihvola on the right,
coining the name "Veselago medium" (Espoo, Finland, 2002)



Negative permittivity

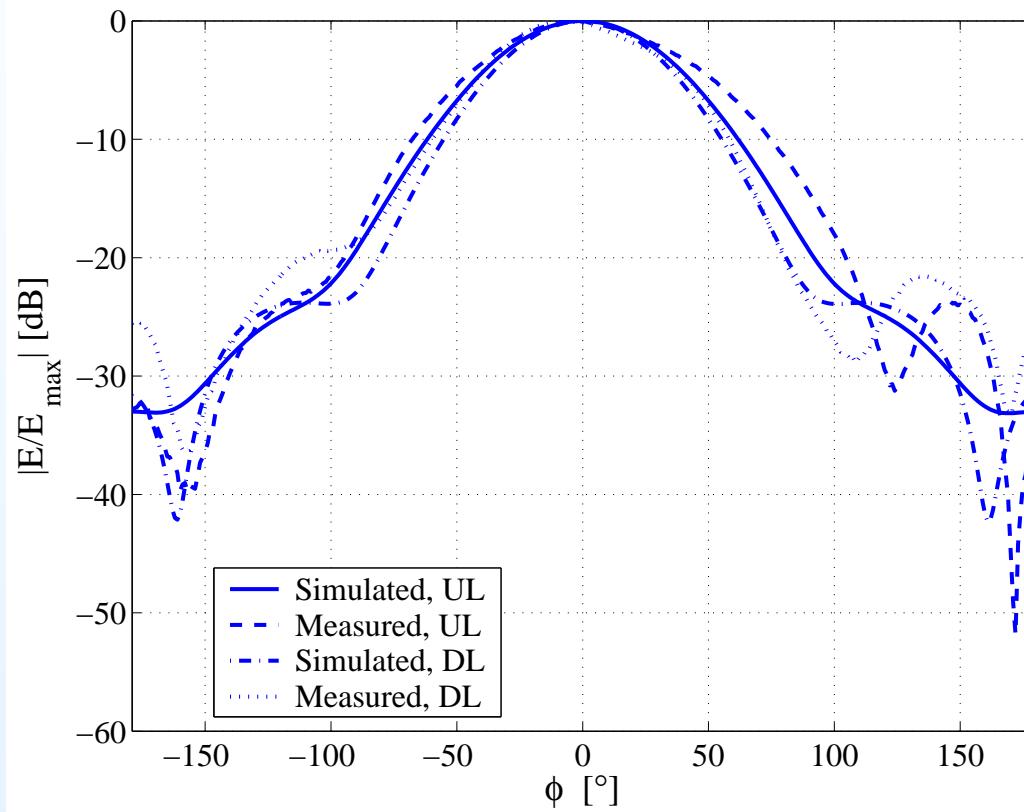
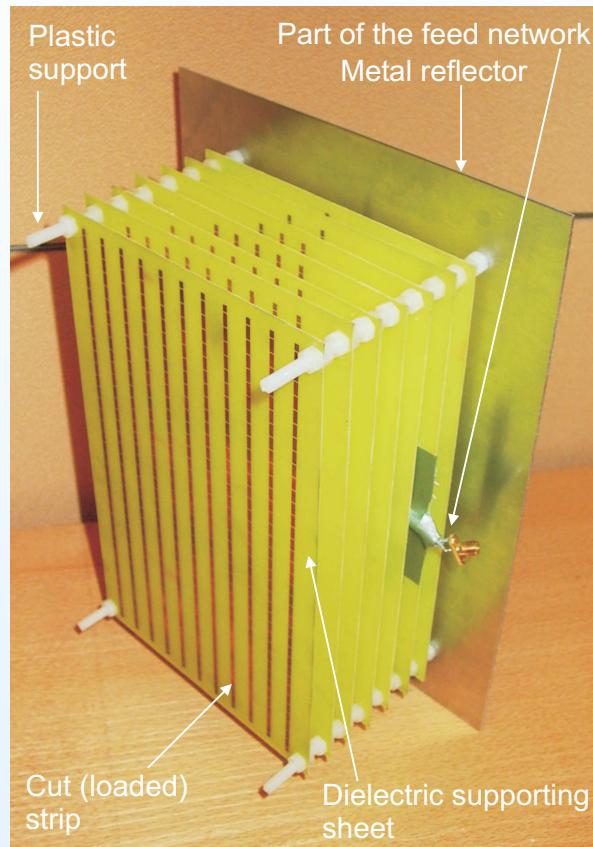


$$\epsilon_p = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\nu^2 + \omega^2} + j \frac{\omega_p^2 \nu / \omega}{\nu^2 + \omega^2} \right)$$

J. Brown, 1953; W. Rotman, 1961; J. Pendry, 1996



Wire media, applications



P. Ikonen et al., 2004



Plasma model

$$\epsilon_{zz} = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right) = \epsilon_0 \left(1 - \frac{k_p^2}{k^2} \right)$$

$k_p^2 = \frac{2\pi}{a^2 \log \frac{a}{2\pi r_0}}$ — J. Brown, 1953; W. Rotman, 1962

$k_p^2 = \frac{2\pi}{a^2 \log \frac{a}{r_0}}$ — J. Pendry et al., 1996

$k_p^2 = \frac{2\pi}{a^2 \log \frac{a}{\sqrt{2}r} + \frac{\pi}{2} - 3}$ — A. Sarychev and V. Shalaev, 2001

$k_p^2 = \frac{2\pi}{a^2 \log \frac{a}{2\pi r_0} + 0.5275}$ — P. Belov, S. Tretyakov, A. Viitanen, 2002

$k_p^2 = \frac{2\pi}{a^2 \log \frac{a^2}{4r_0(a-r_0)}}$ — S. Maslovski, S. Tretyakov, P. Belov, 2002



Plasma model fails

Very strong spatial dispersion even at very low frequencies:

$$\epsilon_{zz}(\omega, k_z) = \epsilon_0 \left(1 - \frac{k_p^2}{k^2 - \cancel{k_z^2}} \right)$$

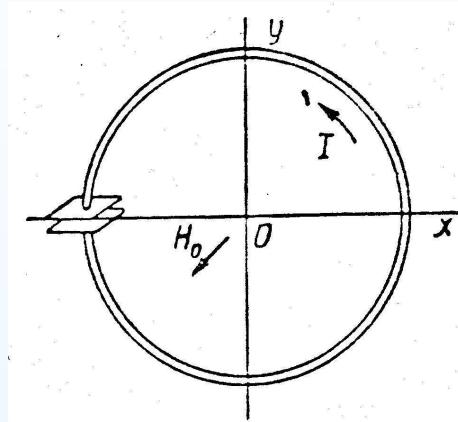
In space-time domain:

$$\mathbf{D}(x, y, z) = \epsilon_0 \mathbf{E}(x, y, z) + \frac{\epsilon_0 k_p^2 c}{4} \mathbf{z}_0 \int_{-\infty}^t \int_{z - c(t-t')}^{z + c(t-t')} E_z(x, y, z', t') dz' dt'$$

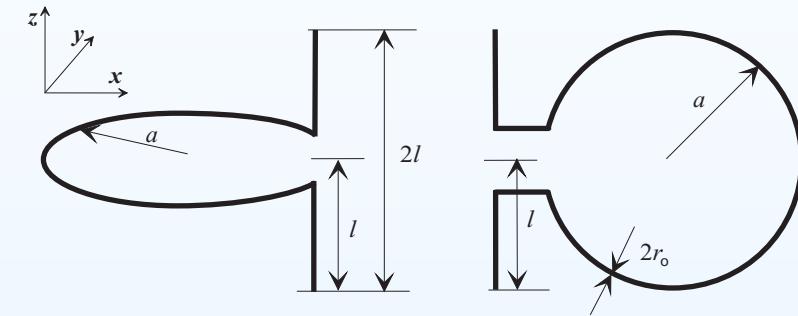
P. Belov et al., 2003



Negative permeability



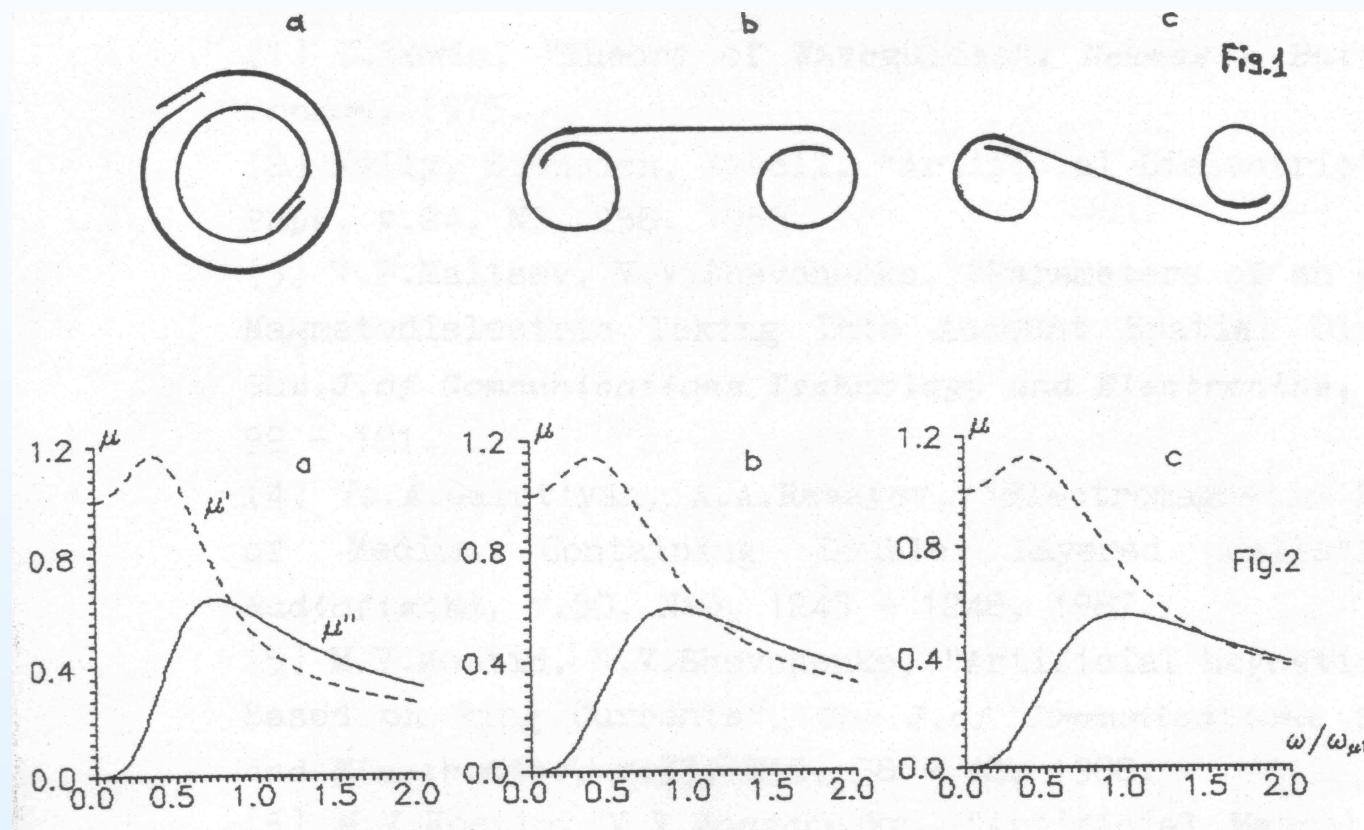
$$\chi_m^0 = \frac{\omega^2 \mu_0^2 C S^2}{1 - \omega^2 L C}$$



S.A. Schelkunoff, H.T. Friis, 1952; D. Jaggard, N. Engheta, and many other authors, 1980–1990

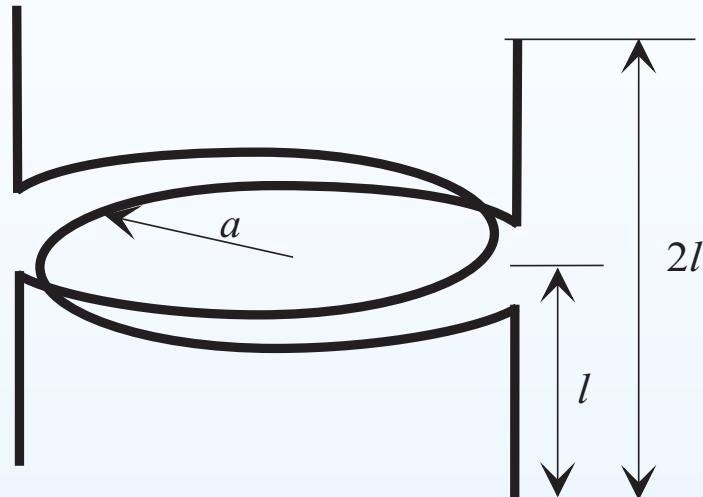


Negative permeability, cont.

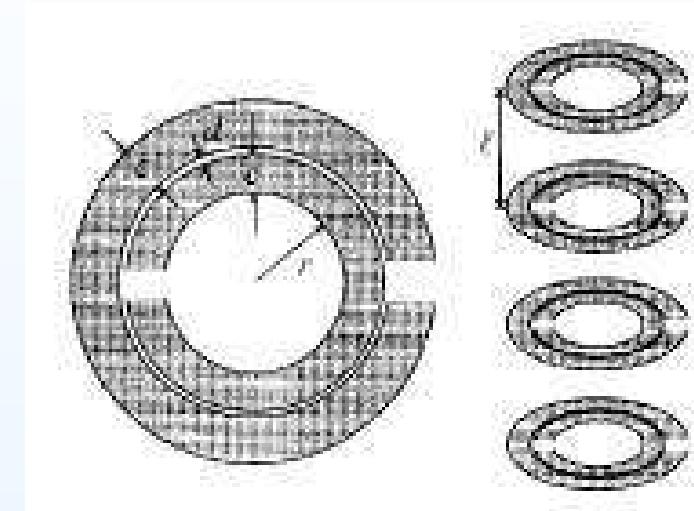


M.V. Kostin, V.V. Shevchenko, 1994

Negative permeability, cont.



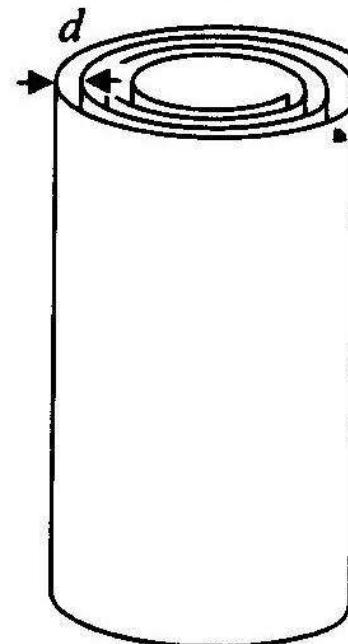
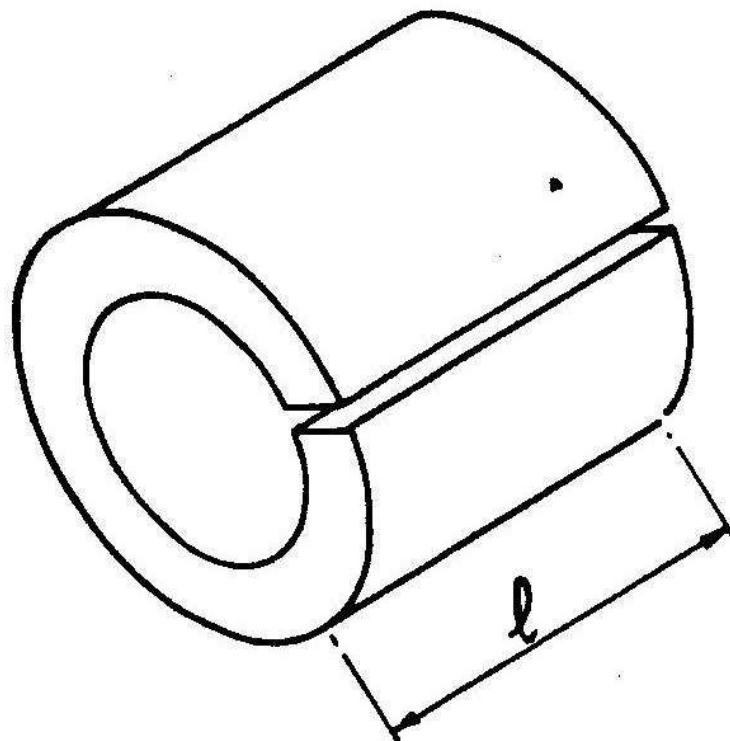
A.N. Lagarkov et al., 1997



J. Pendry et al., 1999



Swiss rolls

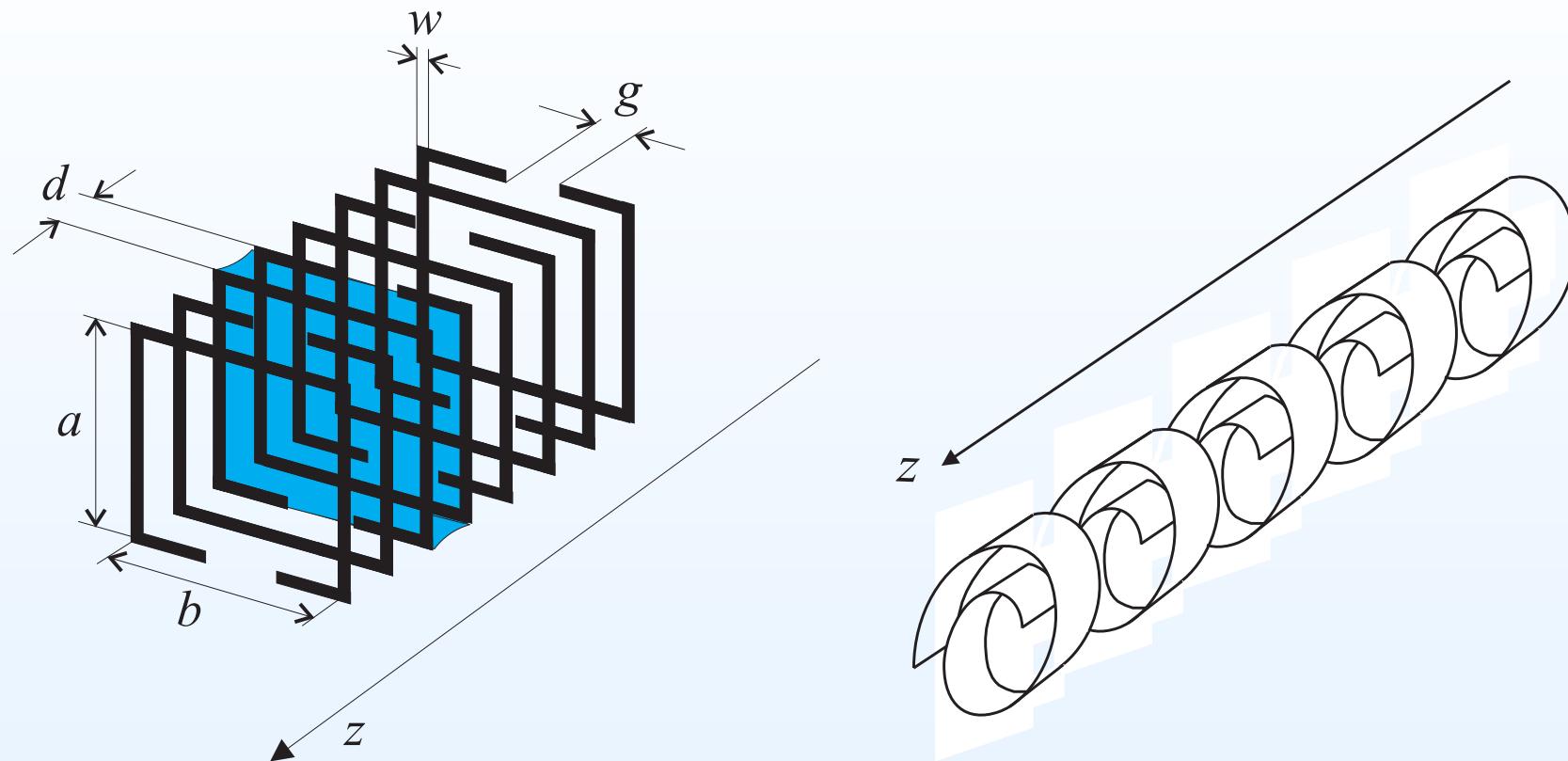


H. Schneider and P. Dullenkopf, 1977

J. Pendry et al., 1999



Metasolenoid

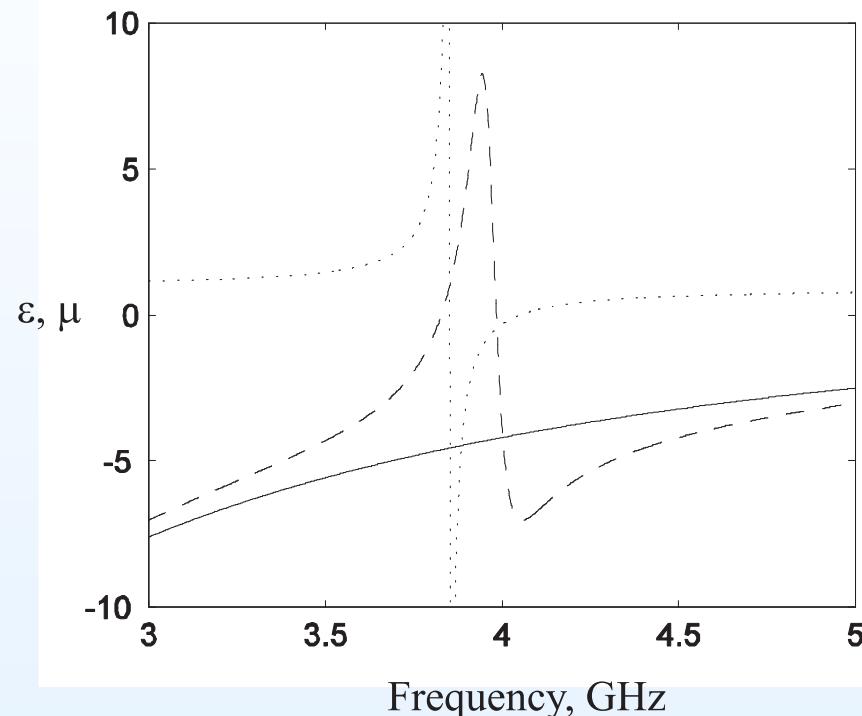


P. Ikonen, S.I. Maslovski, S.A. Tretyakov, I. Kolmakov, 2004



Wire medium + an artificial magnetic

Resonant magnetic particles are randomly distributed:

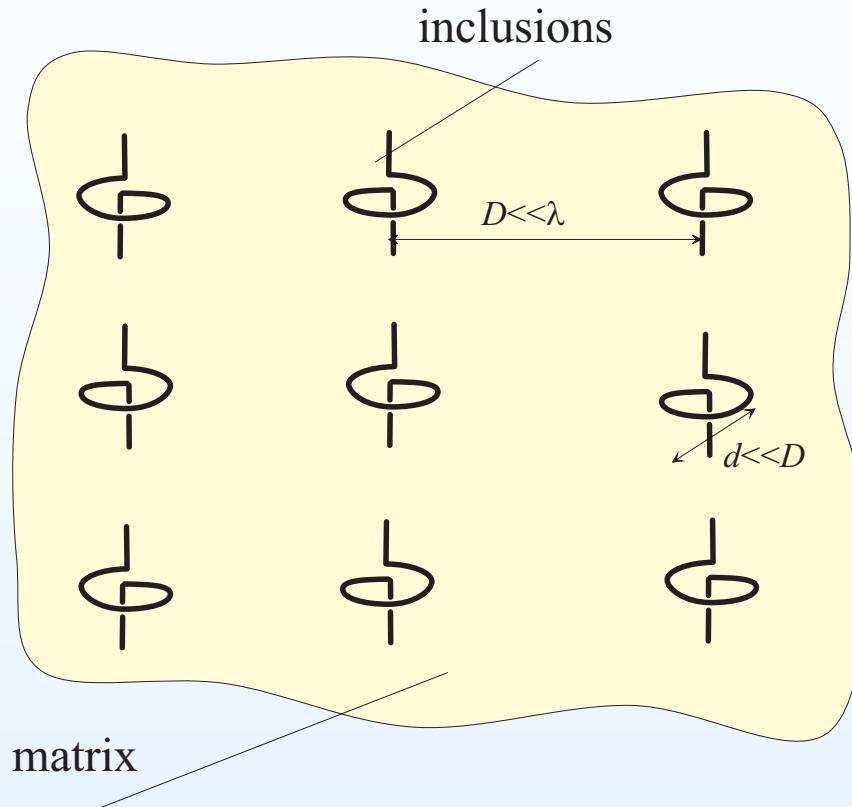


Negative permeability background of wire medium \Rightarrow positive(!) permittivity of wire medium

S.I. Maslovski, 2003

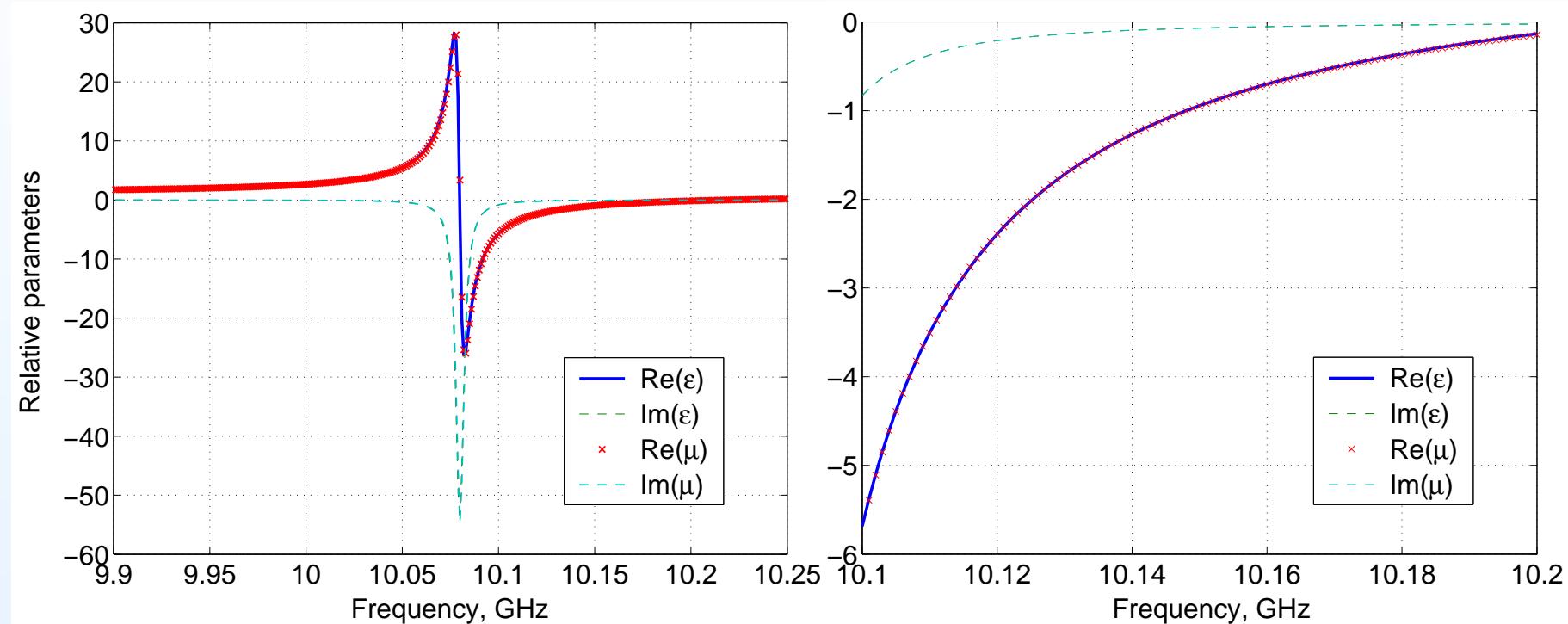


Bi-anisotropic particles



The geometry of a racemic composite. The number of right- and left-handed particles is the same in every unit volume.

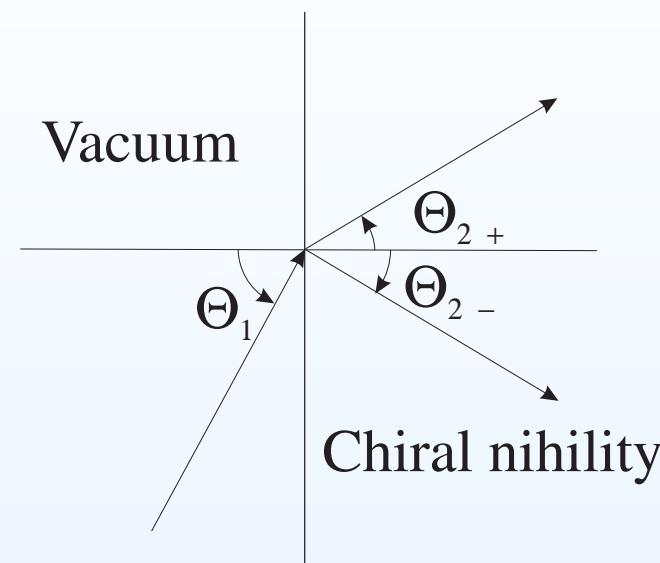
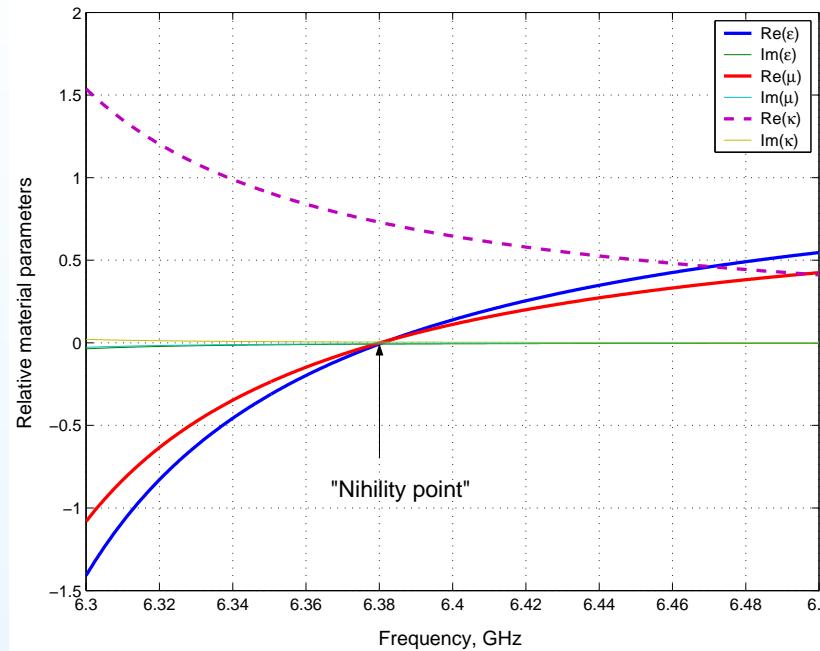
Expected effective parameters



S. Tretyakov, 2003



Chiral nihility materials

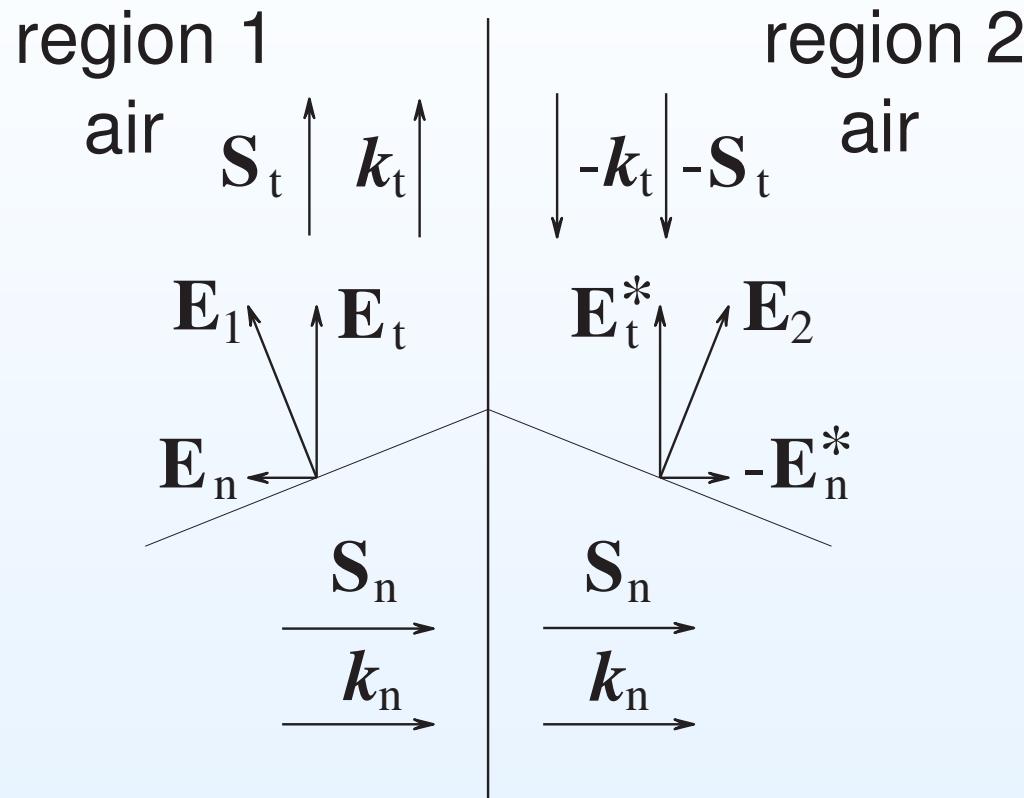


Two waves with positive group velocities. The phase constants $\beta = k_0(\sqrt{\epsilon\mu} \pm \kappa)$. One of the eigenwaves is a **backward wave**.

S. Tretyakov et al., 2003; J. Pendry, 2004



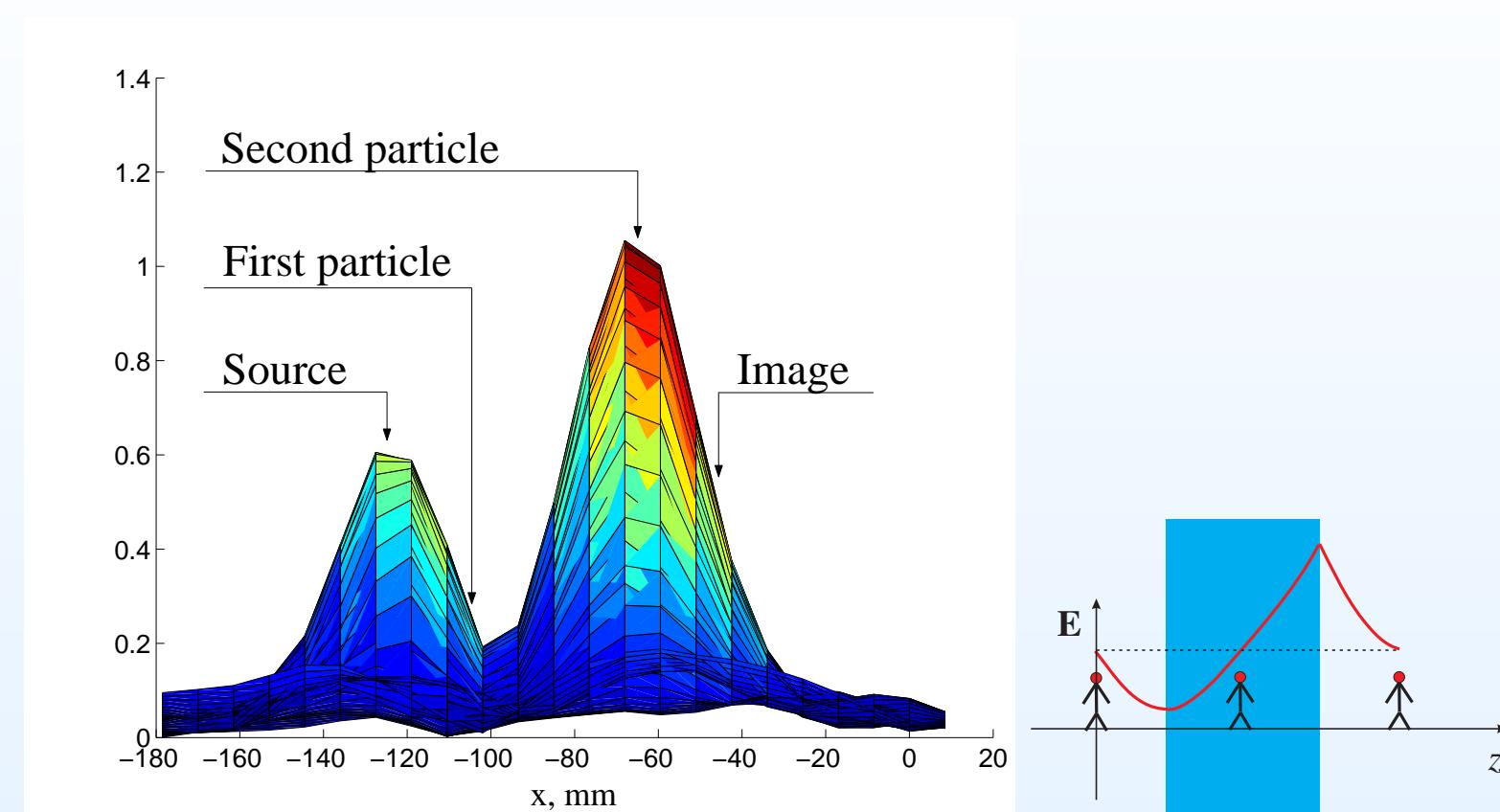
"Conjugating surface"



S. Maslovski and S. Tretyakov, 2003



Plasmon resonant grids



S. Maslovski, S. Tretyakov, P. Alitalo, 2004



That was the last slide

See also:

www.hut.fi/~sergei

European Network of Excellence "Metamorphose":

www.metamorphose-eu.org

Thank you!