



# Особенности поглощения электромагнитных волн редкоземельными металлами в ферромагнитной и антиферромагнитной фазе

Евгений Караштин



# Редкоземельные элементы

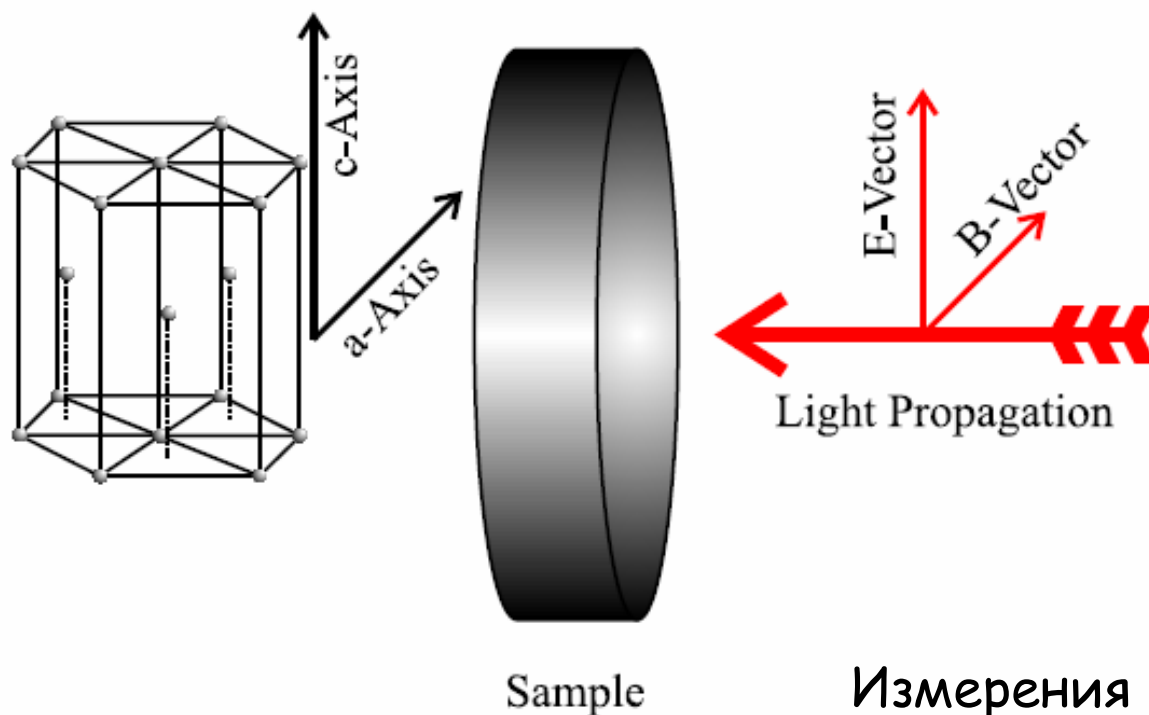
1 <b>H</b> Hydrogen 1.00794																	2 <b>He</b> Helium 4.003
3 <b>Li</b> Lithium 6.941	4 <b>Be</b> Beryllium 9.012182											5 <b>B</b> Boron 10.811	6 <b>C</b> Carbon 12.0107	7 <b>N</b> Nitrogen 14.00674	8 <b>O</b> Oxygen 15.9994	9 <b>F</b> Fluorine 18.9984032	10 <b>Ne</b> Neon 20.1797
11 <b>Na</b> Sodium 22.989770	12 <b>Mg</b> Magnesium 24.3050											13 <b>Al</b> Aluminum 26.981538	14 <b>Si</b> Silicon 28.0855	15 <b>P</b> Phosphorus 30.973761	16 <b>S</b> Sulfur 32.066	17 <b>Cl</b> Chlorine 35.4527	18 <b>Ar</b> Argon 39.948
19 <b>K</b> Potassium 39.0983	20 <b>Ca</b> Calcium 40.078	21 <b>Sc</b> Scandium 44.955910	22 <b>Ti</b> Titanium 47.867	23 <b>V</b> Vanadium 50.9415	24 <b>Cr</b> Chromium 51.9961	25 <b>Mn</b> Manganese 54.938049	26 <b>Fe</b> Iron 55.845	27 <b>Co</b> Cobalt 58.933200	28 <b>Ni</b> Nickel 58.6934	29 <b>Cu</b> Copper 63.546	30 <b>Zn</b> Zinc 65.39	31 <b>Ga</b> Gallium 69.723	32 <b>Ge</b> Germanium 72.61	33 <b>As</b> Arsenic 74.92160	34 <b>Se</b> Selenium 78.96	35 <b>Br</b> Bromine 79.904	36 <b>Kr</b> Krypton 83.80
37 <b>Rb</b> Rubidium 85.4678	38 <b>Sr</b> Strontium 87.62	39 <b>Y</b> Yttrium 88.90585	40 <b>Zr</b> Zirconium 91.224	41 <b>Nb</b> Niobium 92.90638	42 <b>Mo</b> Molybdenum 95.94	43 <b>Tc</b> Technetium (98)	44 <b>Ru</b> Ruthenium 101.07	45 <b>Rh</b> Rhodium 102.90550	46 <b>Pd</b> Palladium 106.42	47 <b>Ag</b> Silver 107.8682	48 <b>Cd</b> Cadmium 112.411	49 <b>In</b> Indium 114.818	50 <b>Sn</b> Tin 118.710	51 <b>Sb</b> Antimony 121.760	52 <b>Te</b> Tellurium 127.60	53 <b>I</b> Iodine 126.90447	54 <b>Xe</b> Xenon 131.29
55 <b>Cs</b> Cesium 132.90545	56 <b>Ba</b> Barium 137.327	57 <b>La</b> Lanthanum 138.9055	72 <b>Hf</b> Hafnium 178.49	73 <b>Ta</b> Tantalum 180.9479	74 <b>W</b> Tungsten 183.84	75 <b>Re</b> Rhenium 186.207	76 <b>Os</b> Osmium 190.23	77 <b>Ir</b> Iridium 192.217	78 <b>Pt</b> Platinum 195.078	79 <b>Au</b> Gold 196.96655	80 <b>Hg</b> Mercury 200.59	81 <b>Tl</b> Thallium 204.3833	82 <b>Pb</b> Lead 207.2	83 <b>Bi</b> Bismuth 208.98038	84 <b>Po</b> Polonium (209)	85 <b>At</b> Astatine (210)	86 <b>Rn</b> Radon (222)
87 <b>Fr</b> Francium (223)	88 <b>Ra</b> Radium (226)	89 <b>Ac</b> Actinium (227)	104 <b>Rf</b> Rutherfordium (261)	105 <b>Db</b> Dubnium (262)	106 <b>Sg</b> Seaborgium (263)	107 <b>Bh</b> Bohrium (262)	108 <b>Hs</b> Hassium (265)	109 <b>Mt</b> Meitnerium (266)	110 (269)	111 (272)	112 (277)	113	114				

58 <b>Ce</b> Cerium 140.116	59 <b>Pr</b> Praseodymium 140.90765	60 <b>Nd</b> Neodymium 144.24	61 <b>Pm</b> Promethium (145)	62 <b>Sm</b> Samarium 150.36	63 <b>Eu</b> Europium 151.964	64 <b>Gd</b> Gadolinium 157.25	65 <b>Tb</b> Terbium 158.92534	66 <b>Dy</b> Dysprosium 162.50	67 <b>Ho</b> Holmium 164.93032	68 <b>Er</b> Erbium 167.26	69 <b>Tm</b> Thulium 168.93421	70 <b>Yb</b> Ytterbium 173.04	71 <b>Lu</b> Lutetium 174.967
90 <b>Th</b> Thorium 232.0381	91 <b>Pa</b> Protactinium 231.03588	92 <b>U</b> Uranium 238.0289	93 <b>Np</b> Neptunium (237)	94 <b>Pu</b> Plutonium (244)	95 <b>Am</b> Americium (243)	96 <b>Cm</b> Curium (247)	97 <b>Bk</b> Berkelium (247)	98 <b>Cf</b> Californium (251)	99 <b>Es</b> Einsteinium (252)	100 <b>Fm</b> Fermium (257)	101 <b>Md</b> Mendelevium (258)	102 <b>No</b> Nobelium (259)	103 <b>Lr</b> Lawrencium (262)





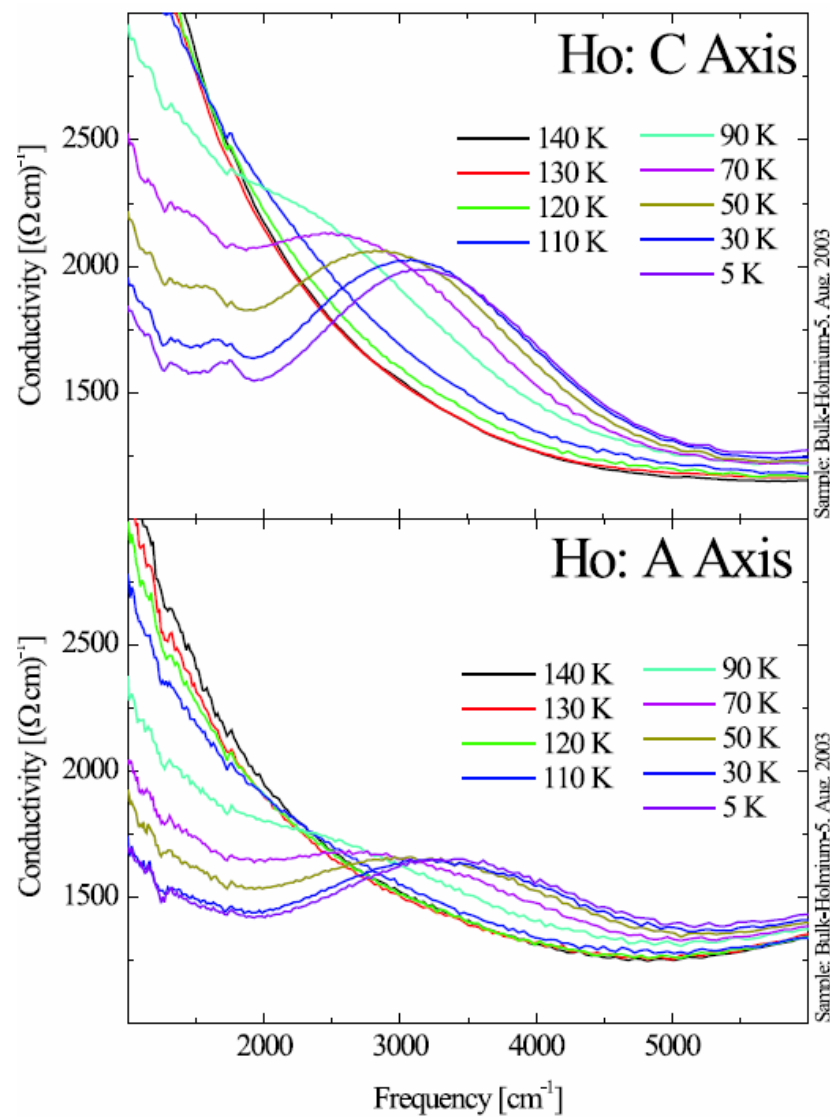
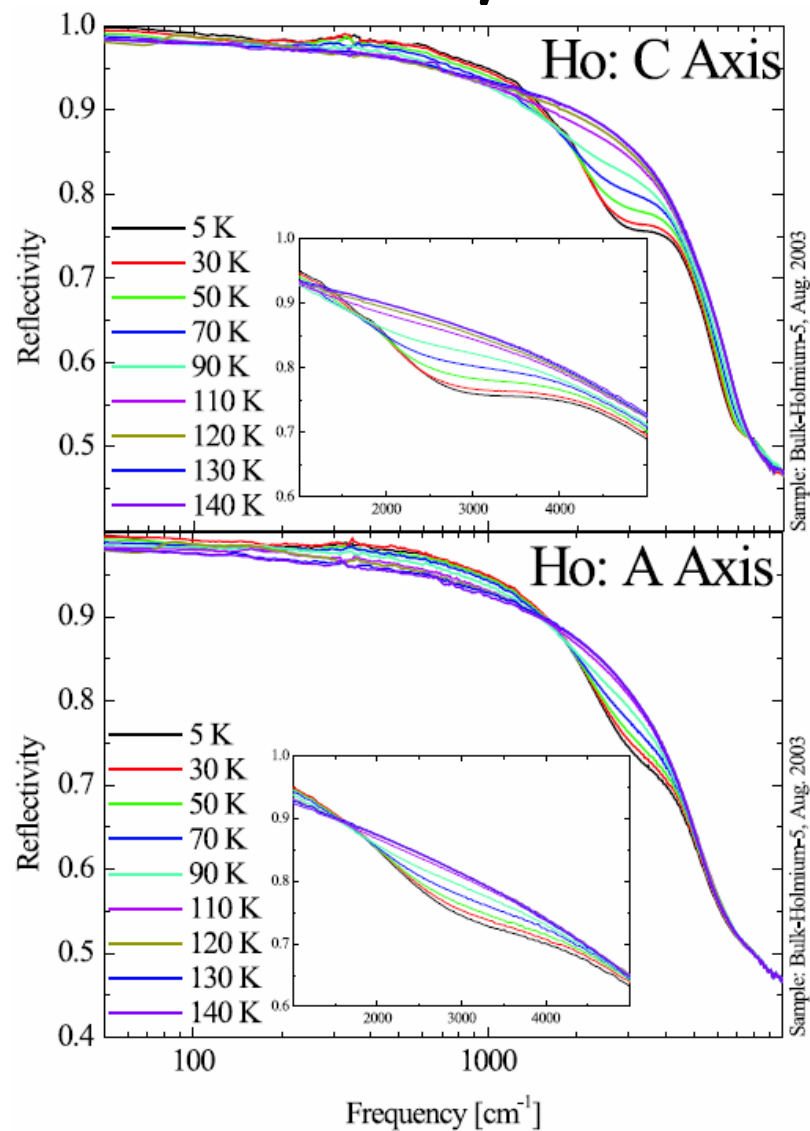
## Геометрия эксперимента



Измерения проводились для двух поляризаций (E вдоль кристаллографических осей c и a). При этом образец оставался неподвижным.

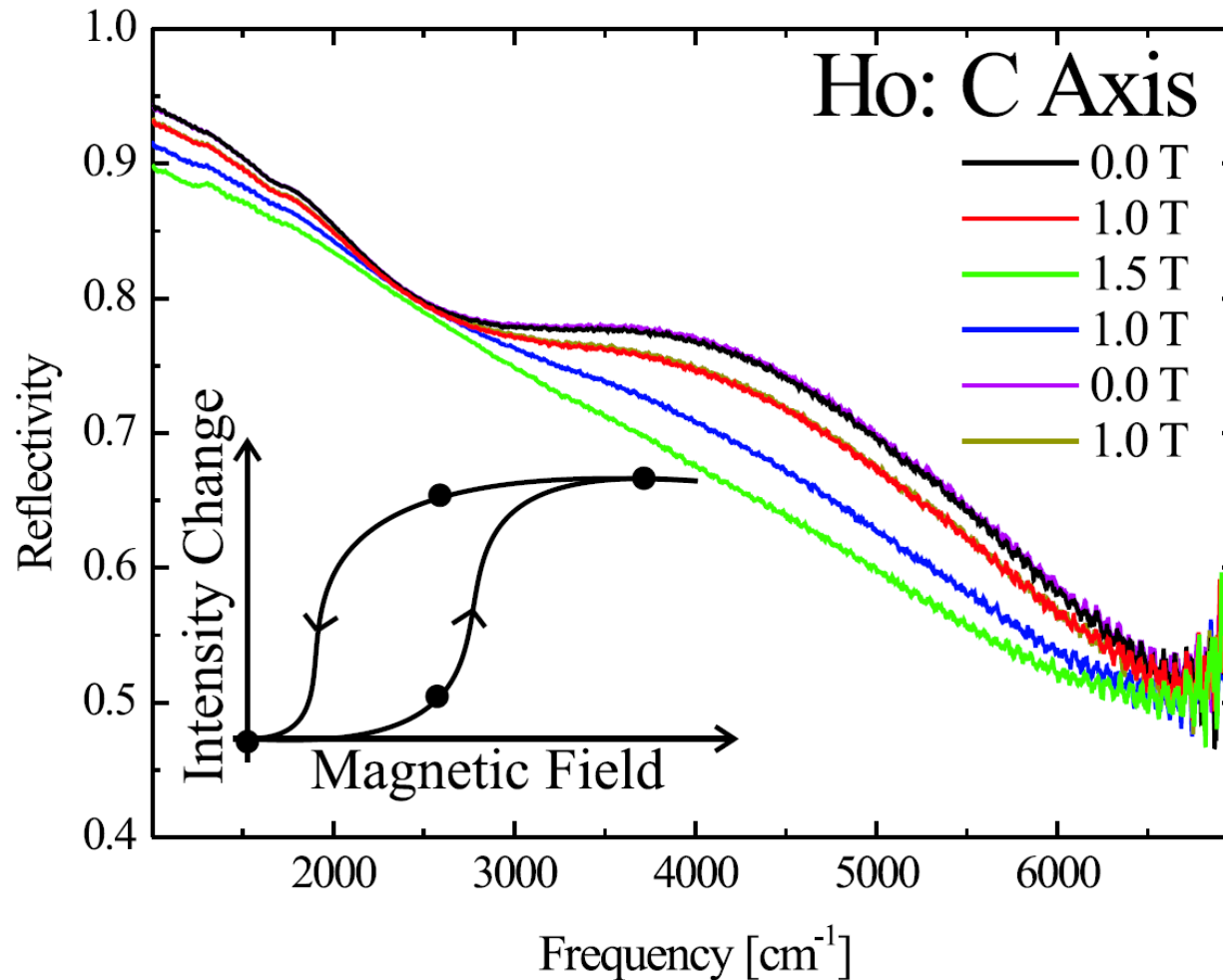


# Результаты эксперимента





# Измерения коэффициента отражения во внешнем магнитном поле





# Объяснение результатов эксперимента автором

- Сильная деформация Ферми-поверхности внешним магнитным полем может изменить спектр делокализованных электронов. Это, возможно, приводит к изменению величины обменного расщепления.

**Величина обменного расщепления одинакова в однородно намагниченном состоянии и компланарном геликоиде.**

- Ослабление спин-орбитального взаимодействия, предположительно, приводит к запрещению межподзонных переходов под действием ЭМВ.

**В среде с геликоидальной магнитной структурой без учёта спин-орбитального взаимодействия не запрещены переходы под действием ЭМВ.**



# Объяснение результатов эксперимента

$$\mathbf{M} = \left( \sqrt{1 - m^2} \cos qz, \sqrt{1 - m^2} \sin qz, m \right)$$

## Феноменологическая теория

- Распределение намагниченности  $\mathbf{M}(\mathbf{r})$  таково, что её амплитуда постоянна, а направление зависит от пространственных координат.
- Изменение намагниченности в пространстве происходит медленно.
- Обменная природа рассматриваемого эффекта: в выражении для коэффициента поглощения магнитные и координатные векторные индексы не сворачиваются друг с другом.
- Поглощение монохроматической волны с вектором поляризации  $\mathbf{e}$  и частотой  $\omega$  рассматривается в электродипольном приближении.

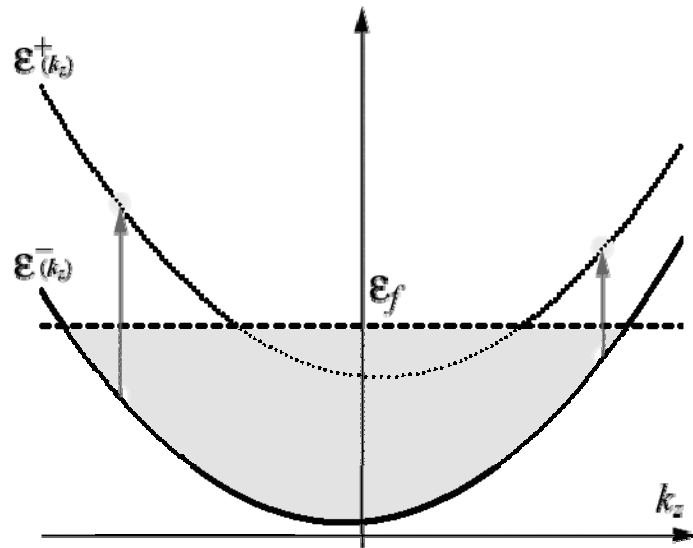
$$\alpha = \alpha_0(\omega) \left( \mathbf{M}, \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial x_i \partial x_j} \right) e_i e_j = -\alpha_0(\omega) (1 - m^2) q^2 e_z^2$$





# Объяснение результатов эксперимента

## Микроскопическая теория



$$\hat{H}_{s-d} = -\frac{\hbar^2}{2M} \Delta + J(\hat{\sigma}, \mathbf{M})$$

$$\hat{\Psi}^{\pm}(\mathbf{r}, \mathbf{k}) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\delta^{\pm}(k_z))^2}} \begin{pmatrix} \delta^{\pm}(k_z) e^{-i(q/2)z} \\ e^{i(q/2)z} \end{pmatrix} e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}},$$

$$\delta^{\pm}(k_z) = \frac{Jm - \frac{p_z \hbar q}{2m_e} \pm \sqrt{\left(\frac{p_z \hbar q}{2m_e} - Jm\right)^2 + J^2(1-m^2)}}{J\sqrt{1-m^2}}$$

$$\beta = \frac{\hbar q}{J} \sqrt{\frac{\varepsilon_F}{2m_e}}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_e^{\pm} &= \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2m_e} + \frac{(\hbar q)^2}{8m_e} \pm \sqrt{\left(\frac{p_z \hbar q}{2m_e} - Jm\right)^2 + J^2(1-m^2)} \approx \\ &\approx \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2m_e} + \frac{(\hbar q)^2}{8m_e} \pm J \left( 1 - m \frac{p_z}{p_F} \beta + \frac{1-m^2}{2} \frac{p_z^2}{p_F^2} \beta^2 + \frac{m(1-m^2)}{2} \frac{p_z^3}{p_F^3} \beta^3 \right) + \dots \end{aligned}$$



## Объяснение результатов эксперимента

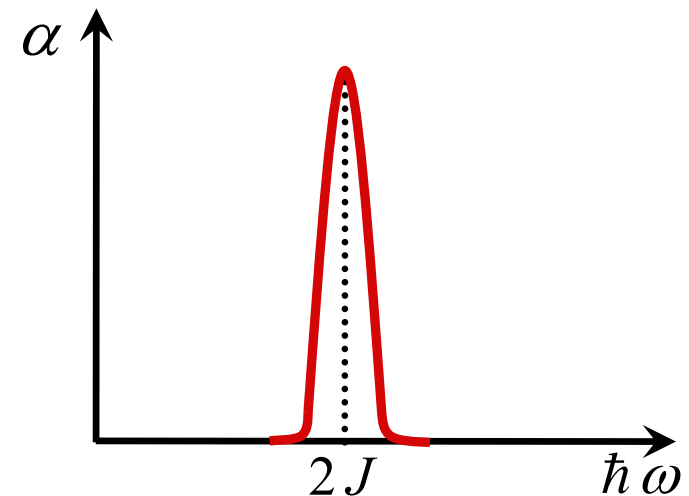
$$\hat{H}_{ed} = -\frac{e}{2m_e c} (\hat{\mathbf{p}}\mathbf{A} + \mathbf{A}\hat{\mathbf{p}}) \quad \varphi = 0; \quad \mathbf{A} = -\frac{ic}{2\omega} (\mathbf{E}_0 e^{i\mathbf{k}_e \mathbf{r} - i\omega t} - \text{K.C.})$$

$$W_{\mathbf{k}\mathbf{k}'}^{\pm} = \frac{2\pi}{\hbar} \left| \hat{\psi}^{-}(\mathbf{k}), \hat{H}_{ed} \hat{\psi}^{+}(\mathbf{k}') \right|^2 \delta(\Delta\varepsilon_z(k_z) - \hbar\omega)$$

$$W_{\mathbf{k}\mathbf{k}'}^{\pm} = \frac{2\pi}{\hbar} \left( \frac{e\hbar E}{2m_e \omega} \right)^2 (\mathbf{q}, \mathbf{e})^2 \frac{J^2(1-m^2)}{(\hbar\omega)^2} \delta(\mathbf{k} - \mathbf{k}') \delta(\Delta\varepsilon_z(k_z) - \hbar\omega)$$

$$\alpha = \frac{2\pi}{\hbar c} \left( \frac{e\hbar E}{2m_e \omega} \right)^2 (\mathbf{q}, \mathbf{e})^2 \frac{J^2(1-m^2)}{(\hbar\omega)^2} \times$$

$$\times \delta(\Delta\varepsilon_z(k_z) - \hbar\omega)$$





## Объяснение результатов эксперимента

- В средах с неколлинеарной магнитной структурой, таких, как компланарный и некопланарный геликоид, существует дополнительный вклад в поглощение ЭМВ, обусловленный наличием в них обменного взаимодействия.
- В среде с геликоидальным распределением намагниченности этот вклад анизотропен по отношению к поляризации волны и имеет ярко выраженный максимум на частоте, соответствующей величине обменного расщепления.



## Более ранние работы

J. Krizek, K.N.R. Taylor. Optical Properties of Rare Earth Films in Paramagnetic and Magnetically Ordered Phases / J. Phys. F: Metal Phys.- 1975.- V.5.- P.774

$$M_x = M \cos \mathbf{qr}$$

$$M_y = M \sin \mathbf{qr}$$

Теоретическое предсказание наличия дополнительного вклада в проводимость, связанного с неколлинеарной магнитной структурой среды и анизотропного по поляризации ЭМВ, было впервые опубликовано Hirosi Miwa в 1963 году. Krizek и Taylor проводили измерения коэффициента отражения от плёнок редкоземельных металлов с последующим расчётом их проводимости.



## Более ранние работы

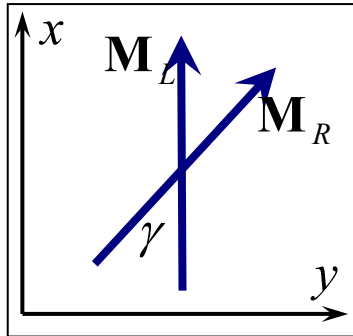
- Krizek и Taylor проводили измерения в диапазоне энергий от 0.35 eV до 2.5 eV. До Weber'a никто не проводил измерений в области частот, достаточно низких для того, чтобы полностью увидеть пик в гольмии.
- Зависимость пика от поляризации ЭМВ никогда не исследовалась экспериментально.

	$\Delta_{\text{ferro}}$ (eV)	$\Delta$
Gd	0.61	
Tb	0.52	
Dy	0.44	0.44
Ho	0.35	0.35
Er	0.26	
Tm	0.17	

R.E. Watson, A.J. Freeman,  
J.P. Dimmock. Magnetic  
Ordering and the Electronic  
Properties of the Heavy Rare-  
Earth Metals / Phys.Rev.-  
1968.- V.167.- P.497



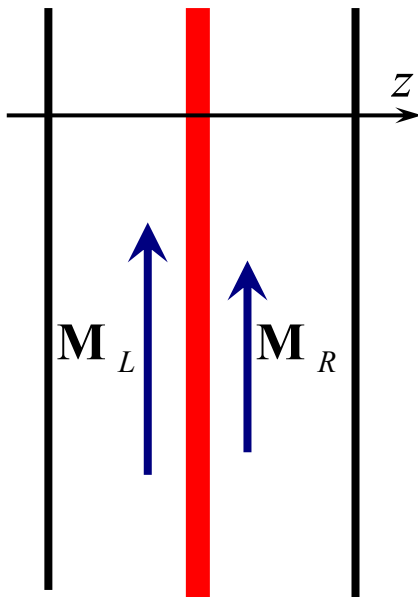
# Перспективы



$$z > 0: \mathbf{M} = \mathbf{M}_R = m \cos \gamma \mathbf{e}_x + m \sin \gamma \mathbf{e}_y$$

$$z < 0: \mathbf{M} = \mathbf{M}_L = m \mathbf{e}_x$$

$$\left( -\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m_e} + J(\hat{\sigma}, \mathbf{M}) + \frac{\lambda}{m_e} \delta(z) \right) \hat{\psi} = \varepsilon \hat{\psi}$$



В многослойных магнитных структурах с неколлинеарным распределением намагниченности возможно возникновение дополнительного вклада в поглощение ЭМВ (ВЧ проводимость), обладающего поляризационной анизотропией и имеющего резонансный характер в зависимости от частоты.

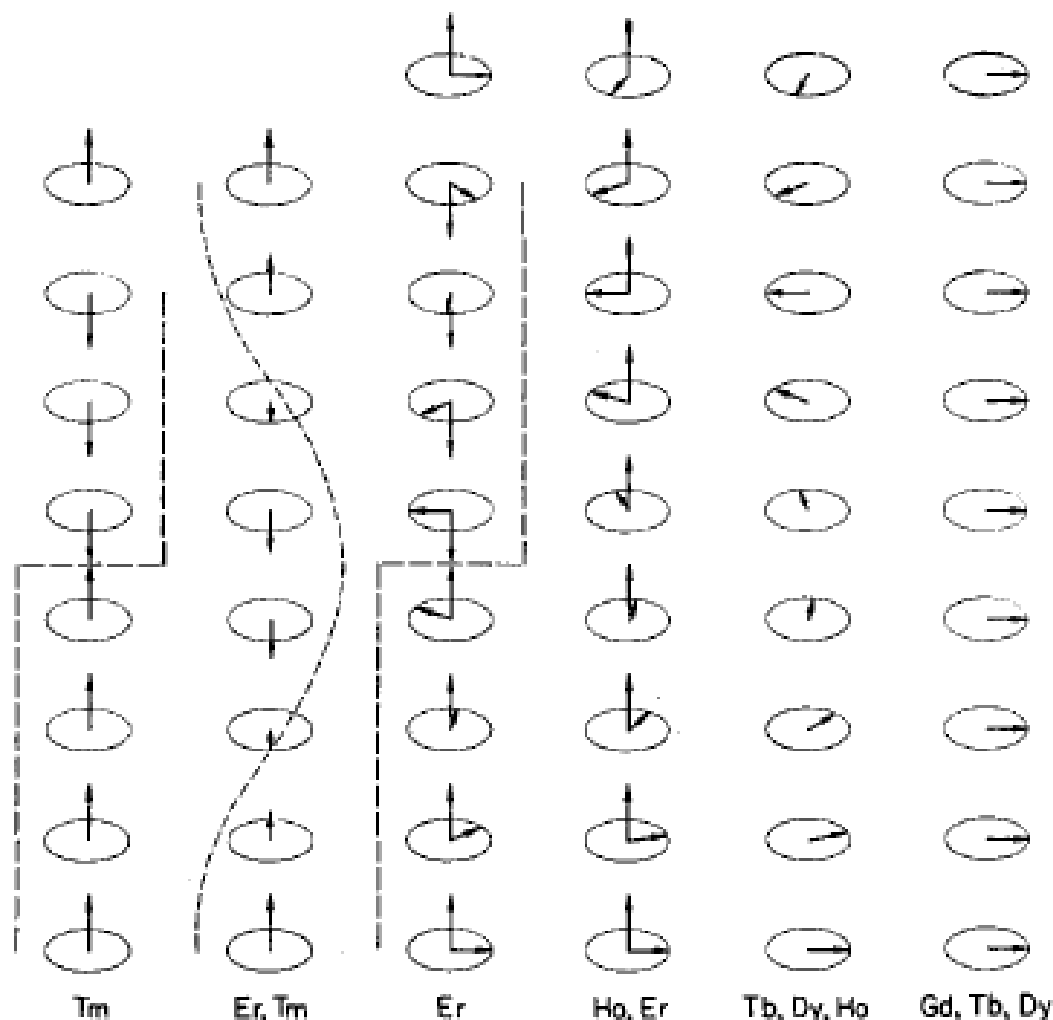


## Заключение

- Weber провёл измерения коэффициента отражения ЭМВ от гольмия в ИК-диапазоне и определил его высокочастотную проводимость. Магнитный пик наблюдался при температуре ниже температуры Нееля на частоте, соответствующей обменному расщеплению. Для волны, поляризованной вдоль кристаллографической оси  $c$ , этот пик значительно больше, чем для волны, поляризованной вдоль оси  $a$ . Особенность исчезает при помещении образца во внешнее магнитное поле. Weber не дал разумного теоретического обоснования обнаруженного явления.
- Теоретические предсказания наличия дополнительного вклада в высокочастотную проводимость были впервые опубликованы Н. Miwa в 1963 году. Позже несколькими группами проводились измерения высокочастотной проводимости редкоземельных металлов вблизи магнитного пика. Однако измерения не проводились в области частот, достаточно низких для того, чтобы наблюдать пик в гольмии целиком. Кроме того, экспериментальные исследования поляризационных свойств указанного явления не проводились.



# Магнитная структура лантанидов



W.C. Koehler.  
Magnetic Properties  
of Rare-Earth Metals  
and Alloys / J. Appl.  
Phys.- 1965.- V.36.-  
P.1078

Metal	$T_{\lambda}$ (°K)	$T_N$ (°K)	$T_C$ (°K)
Gd	291.8 <sup>a</sup>		293.2 <sup>e</sup>
Tb	227.7 <sup>b</sup> 221	229 <sup>b</sup>	221
Dy	174 <sup>e</sup> 83.5	178.5 <sup>i</sup>	85
Ho	131.6 <sup>d</sup> 19.4	132 <sup>j</sup>	20
Er	84 <sup>e</sup> 53.5 19.9	85 <sup>k</sup>	19.6
Tm	55 <sup>f</sup>	51-60 <sup>l</sup>	22(?)