



Электричество и магнетизм

Лекция 12-2

Ферромагнетики

24 ноября 2021 года

Лектор: доцент НИЯУ МИФИ,
Ольчак Андрей Станиславович



Магнетики



Магнетики: вещества, способные в той или иной степени намагничиваться во внешнем магнитном поле и менять величину этого поля. .

Внешнее поле B_0 может намагнитить вещество, заставить его создать собственное магнитное поле B'

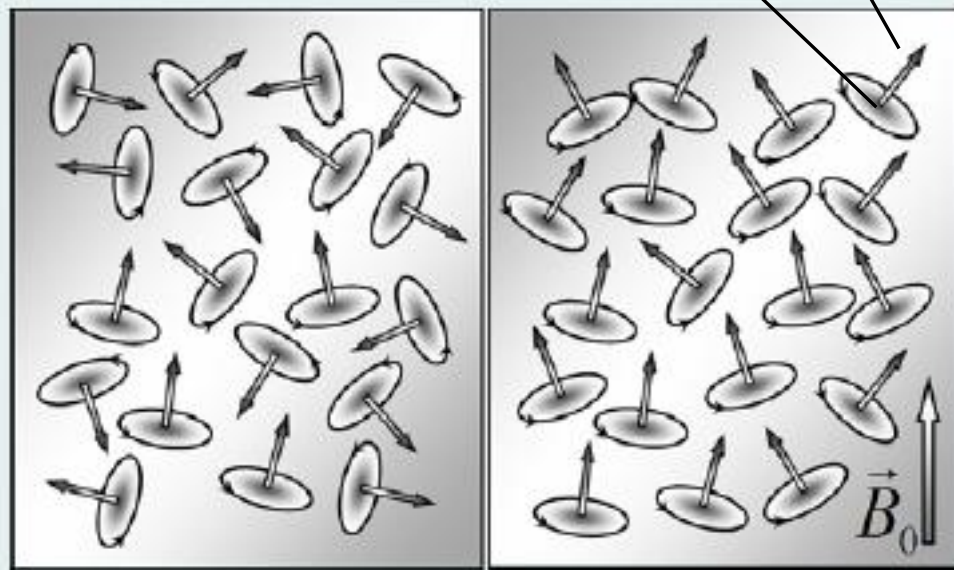
$$B' = \chi B ; B = B_0 + B' = \mu B_0 ;$$

χ - магнитная восприимчивость;

$\mu = 1 + \chi$ - магнитная проницаемость

Что именно внешнее поле B может делать с атомами среды, если каждый атом = точечный магнитный диполь (или сумма нескольких совмещенных диполей)?

Парамагнетики - вещества, у которых собственный магнитный момент атомов не равен нулю. Внешнее поле пытается повернуть моменты атомов в свою сторону.



$$\vec{B}_0 = 0$$

$$\vec{B}_0 \neq 0$$

Магнитная восприимчивость парамагнетиков зависит от температуры. Для газов (опыт Кюри):

$$\Rightarrow J = \chi H \quad \chi = \frac{np_m^2 \mu_0}{3kT}$$

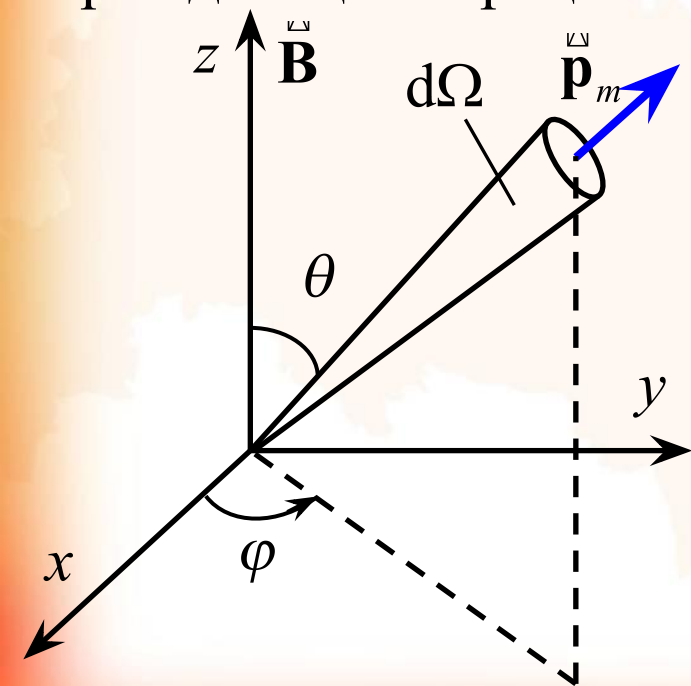
Для конденс. сред: $\chi \sim 10^{-4}$

Закон Кюри – Вайса :

$$\chi_{\text{пара}} = \frac{C}{T - T_0}$$



Диамагнетики - вещества, у которых собственный магнитный момент атомов равен нулю. Внешнее поле может заставить их прецессировать подобно «гироскопам» вокруг направления вектора \mathbf{B} . Поле прецессирующих волчков направлено против порождающего прецессию поля, которое в среде ослабнет)



Магнитная восприимчивость диамагнетиков не зависит от температуры (П. Кюри, 1895).

$$\mathbf{J} = \chi \mathbf{H}$$

$$\chi = -\frac{\mu_0 n e^2}{6 m_e} \sum_{i=1}^Z \langle R_i^2 \rangle$$



Классификация магнетиков



Парамагнетики – вещества, приобретающие магнитный момент, сонаправленный с внешним магнитным полем и усиливающий его
 $\mu_{\text{пара}} > 1$ ($\sim 1,000xxx$); $0 < \chi_{\text{пара}} \ll 1$ ($\sim 10^{-(4-5)}$)

Диамагнетики – вещества, приобретающие в поле магнитный момент, направленный против внешнего магнитного поля

$\mu_{\text{диа}} < 1$ ($\sim 0,999xxx$)
 $\chi_{\text{диа}} < 0$ $|\chi_{\text{диа}}| \ll 1$ ($\sim 10^{-(4-5)}$)

Особый случай - ферромагнетики
и антиферромагнетики



1 H 2 He

□ Ферромагнетик ■ Антиферромагнетик

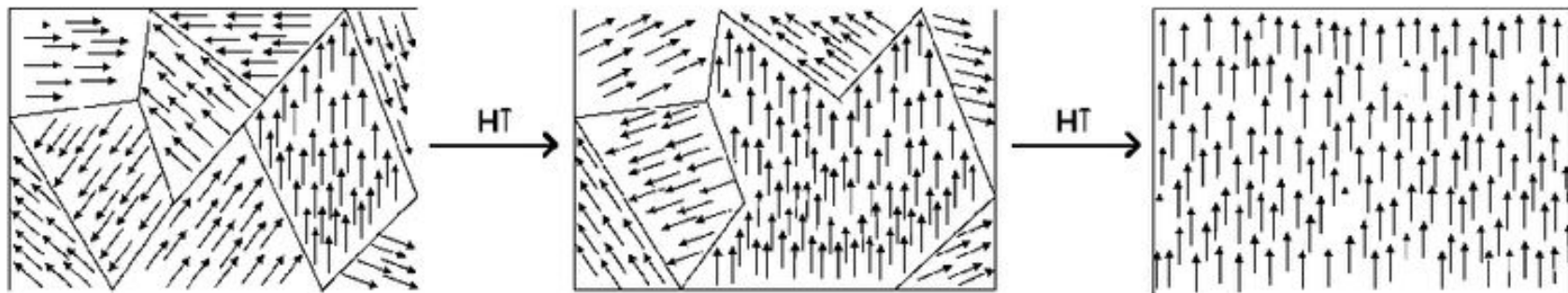
□ Парамагнетик ■ Диамагнетик

3	4											5	6	7	8	9	10	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
11	12											13	14	15	16	17	18	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
55	56	57		72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba	La		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	89																
Fr	Ra	Ac																

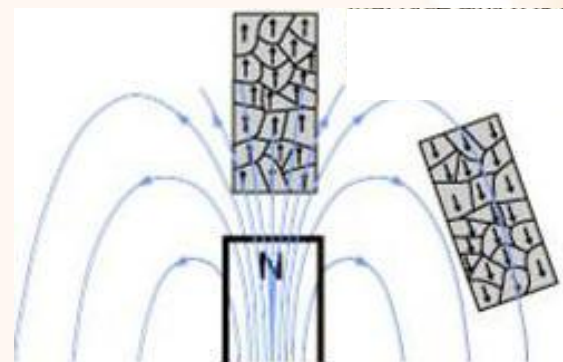
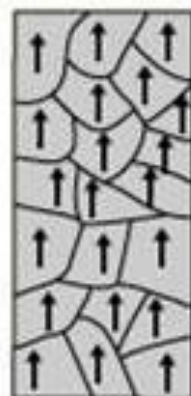
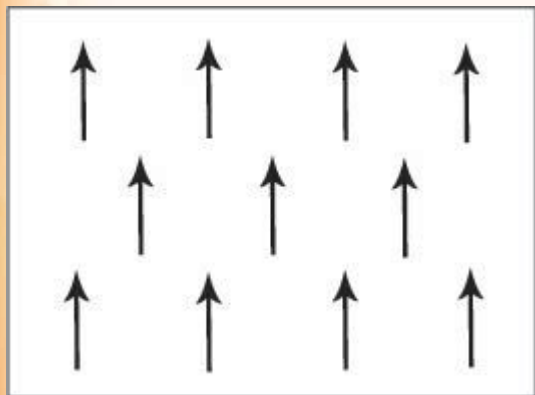
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

Периодическая таблица элементов и различные типы намагничивания при комнатной температуре.

Особый случай: ферромагнетики (Fe, Ni, Co) . При температуре ниже критической (т.н. температура Кюри) они могут обладать спонтанной намагниченностью даже в отсутствие внешнего магнитного поля. Намагничивание возникает благодаря взаимодействию магнитных моментов электронов из внутренних оболочек атомов (квантовый эффект – т.н. «обменное взаимодействие»). В результате спины и магнитные моменты соседних атомов (в пределах доменов $\sim 1-10$ мкм) ориентируются параллельно.



Во внешнем поле магнитные моменты доменов ориентируются по полю, создавая намагниченность, которая может превысить внешнее поле в тысячи раз (!). При температурах ниже $T_{\text{Кюри}}$ намагниченность сохраняется и после отключения внешнего поля.



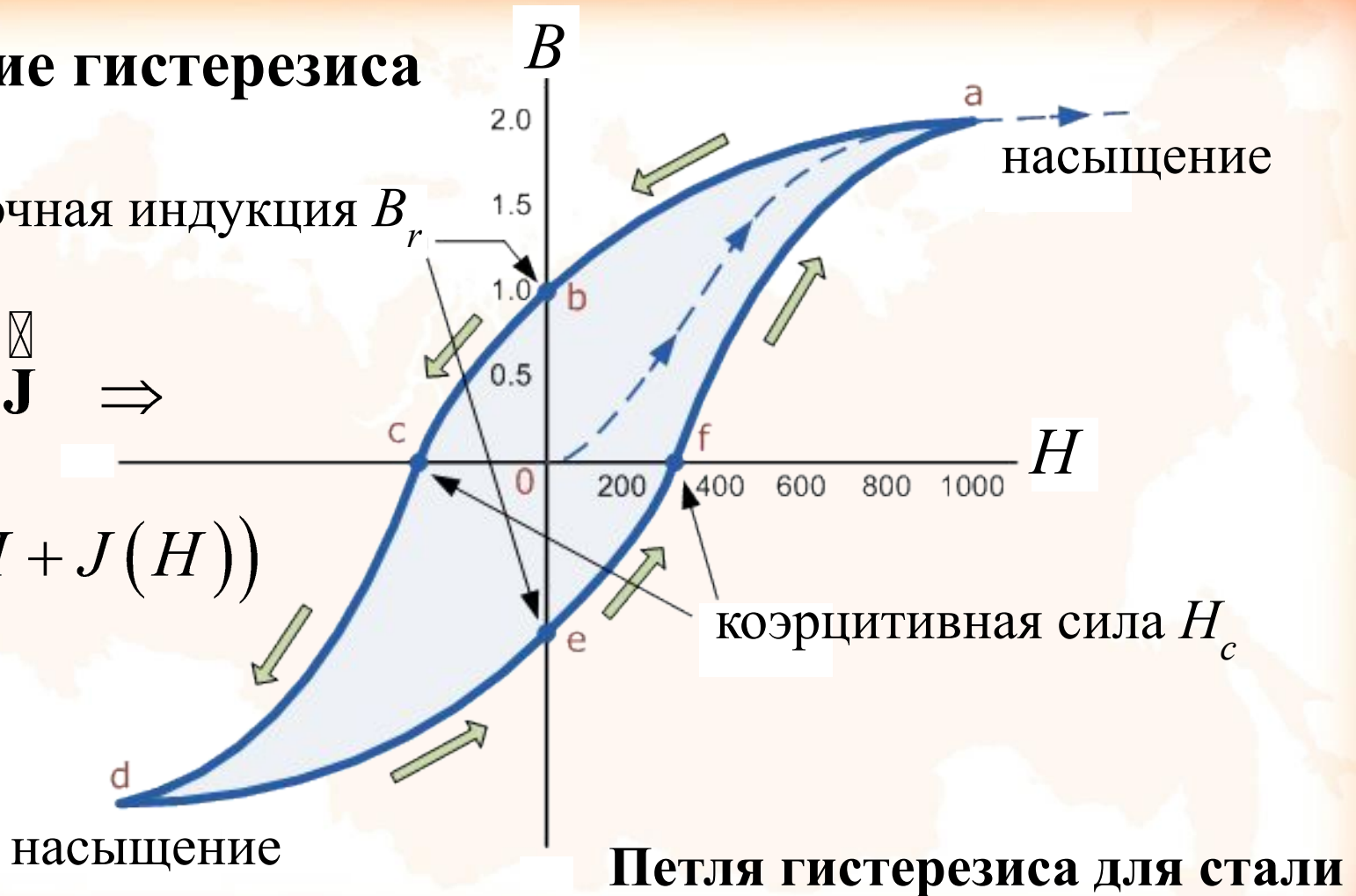


Явление гистерезиса

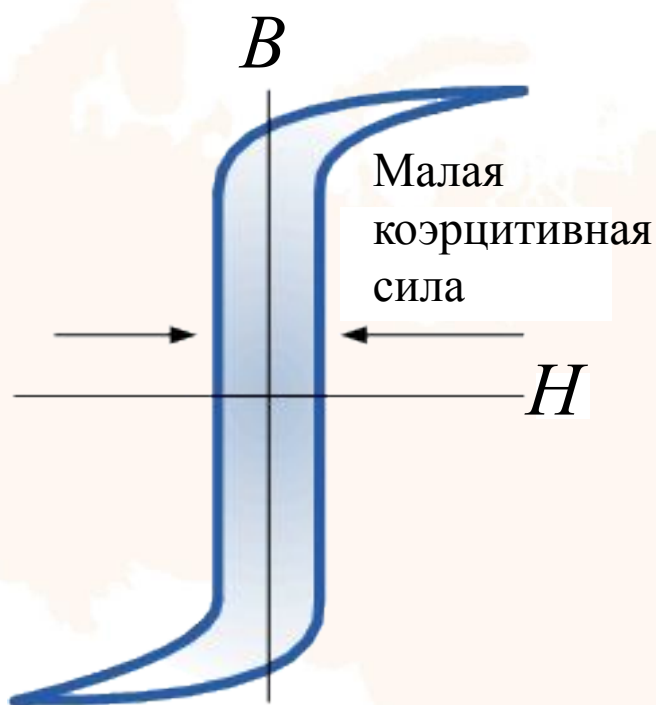
остаточная индукция B_r

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} \Rightarrow$$

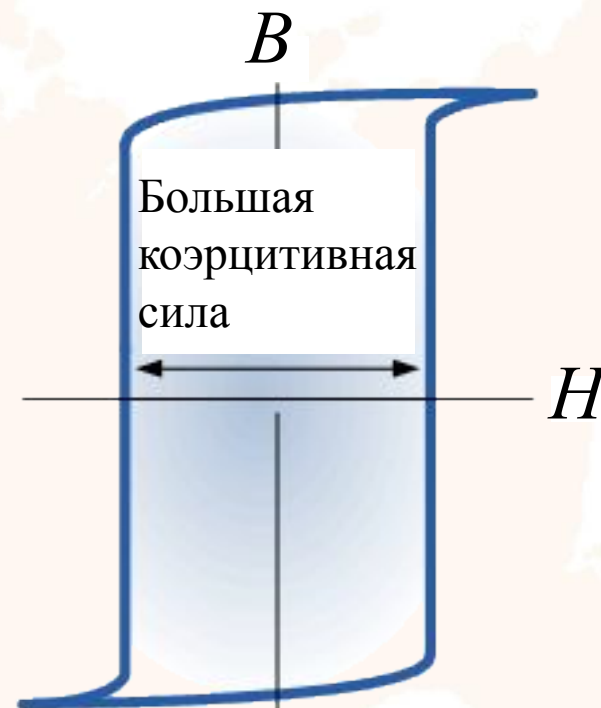
$$B = \mu_0 (H + J(H))$$



Классификация ферромагнитных материалов

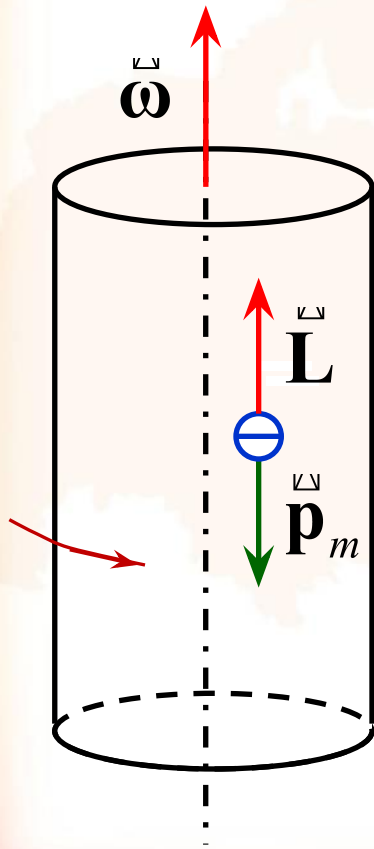


«Мягкие» магнитные материалы



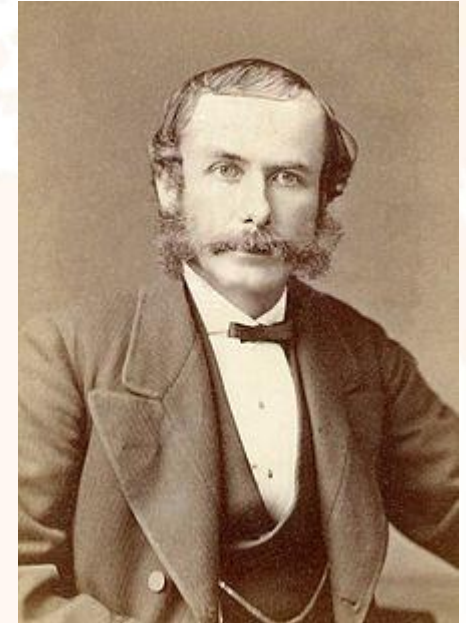
«Жёсткие» магнитные материалы

Опыт Барнетта

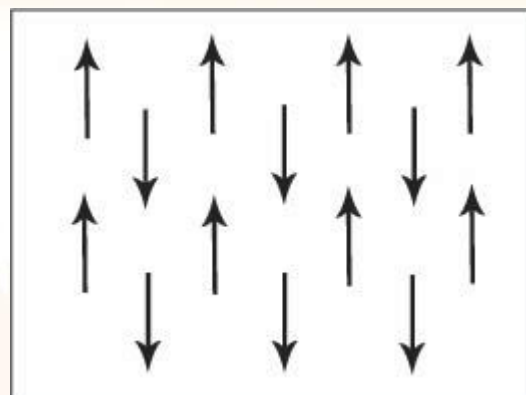
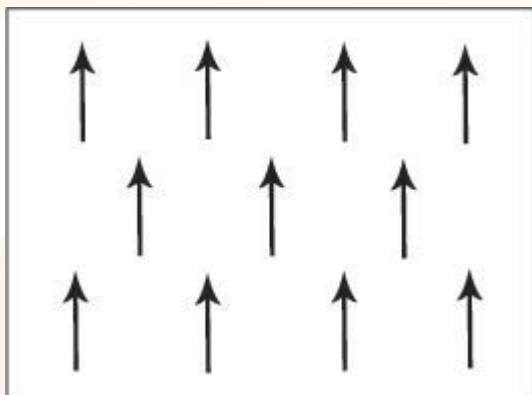


Механическое намагничивание – гироскопический эффект действия центробежной силы на атомарные электроны

Вращающийся ферромагнитный стержень намагничивается.



Сэмьюэл Джексон Барнетт
(1873–1956)



Ферромагнетизм и антиферромагнетизм

Магнитные моменты соседних ионов Cr имеют тенденцию в отсутствие приложенного магнитного поля строиться антипараллельно соседям. Если соседние магнитные моменты имеют одинаковые по модулю значения, то в среднем намагничивание отсутствует.



1 H 2 He

□ Ферромагнетик ■ Антиферромагнетик
□ Парамагнетик ■ Диамагнетик

3	4											5	6	7	8	9	10				
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne				
11	12											13	14	15	16	17	18				
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar				
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36				
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54				
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
55	56	57					72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84		
Cs	Ba	La					Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	89																			
Fr	Ra	Ac																			
			↓																		
			58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71					
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu					

Периодическая таблица элементов, показывающая различные типы намагничивания при комнатной температуре.



Спасибо за внимание!

**Следующая лекция
24 ноября**