

Магнетизм и свет

Т.Б. Шапаева

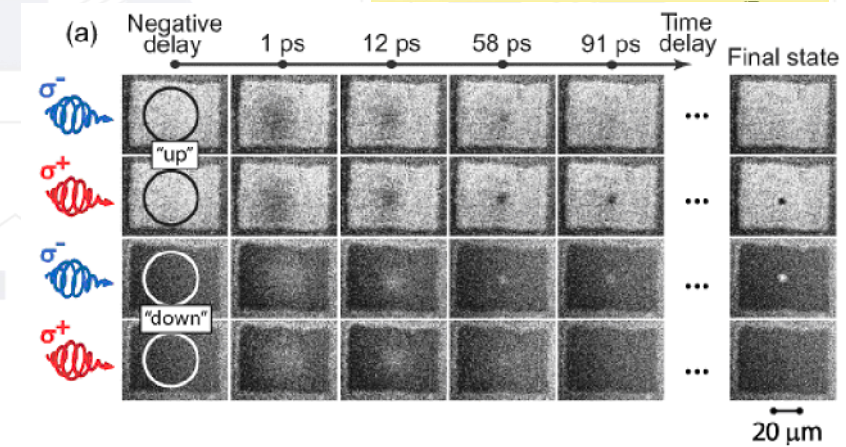
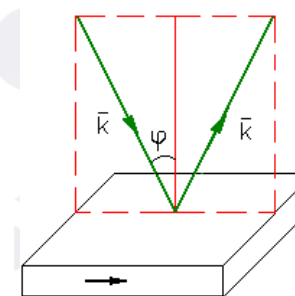
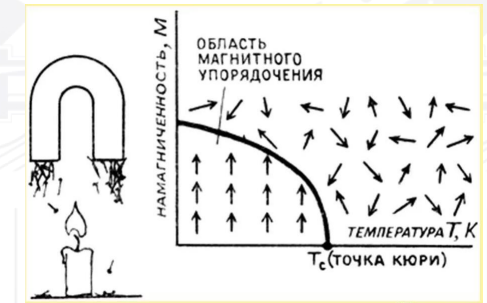
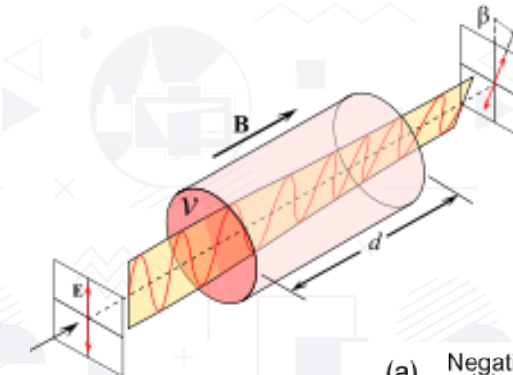
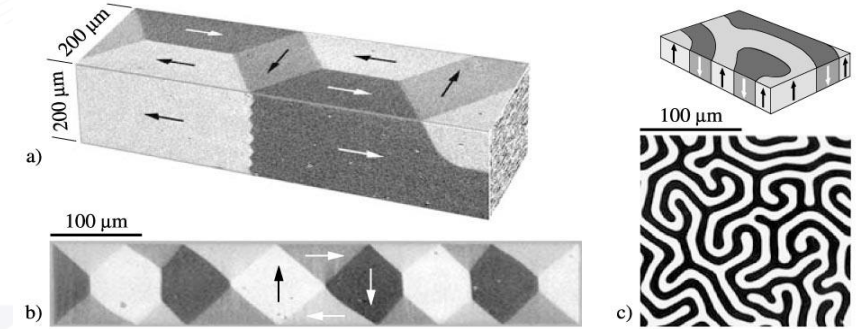
**Доцент кафедры магнетизма физического
факультета МГУ имени М.В. Ломоносова**



Физический факультет Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова

Магнетизм и свет

- Магнетизм
 - Виды магнитного порядка
 - Доменная структура ферромагнетиков и методы ее наблюдения
- Свет – электромагнитная волны
- Магнитооптика и оптомагнетизм
 - Основные магнитооптические эффекты
 - Высокоскоростная фотография
 - Магнетизм и время
 - Магнитооптика – единственный метод исследования динамики перемагничивания
 - Оптическое перемагничивание

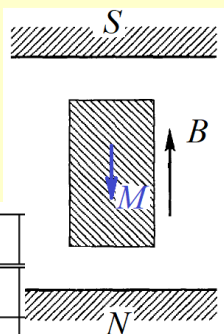


Классификация магнитных материалов

Магнитный момент атома=0

диамагнетики

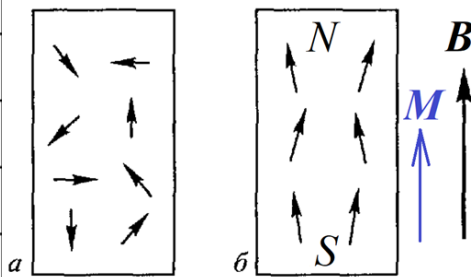
вещество	$\chi \cdot 10^6$
Гелий	-2,02
Медь	-5,41
Неон	-6,96
Бериллий	-9,02
Цинк	-11,4
Аргон	-19,23
Серебро	-21,5
Золото	-29,59
Висмут	-284,0



Магнитный момент атома $\neq 0$

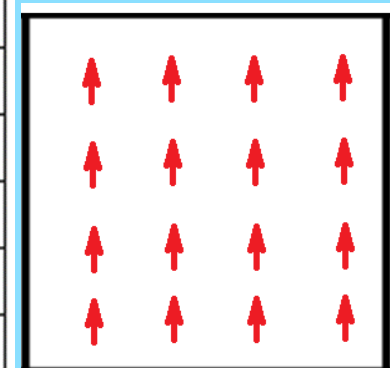
парамагнетики

вещество	$\chi \cdot 10^6$
Магний	13,25
Натрий	16,1
Платина	189,0
Барий	20,4
Калий	21,35
Литий	24,6
Цезий	29,9
Кальций	44,0
Вольфрам	55,0



ферромагнетики

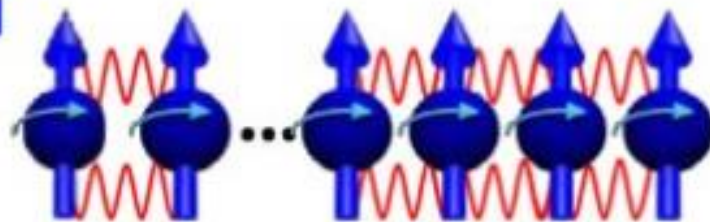
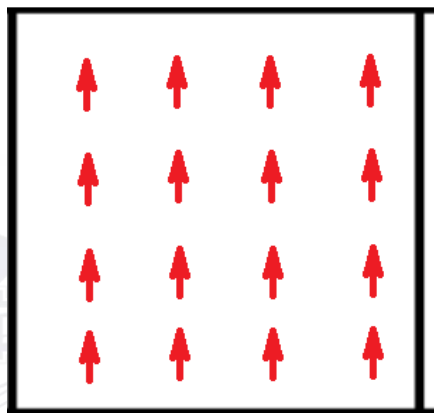
вещество	$\chi \cdot 10^6$
Тербий	115000
Диспрозий	100000
Гадолиний	75000
Гольмий	68200
Эрбий	44500
Тулий	25600



Классификация магнитных материалов

Обменное взаимодействие между ионами:

• Ферромагнетики

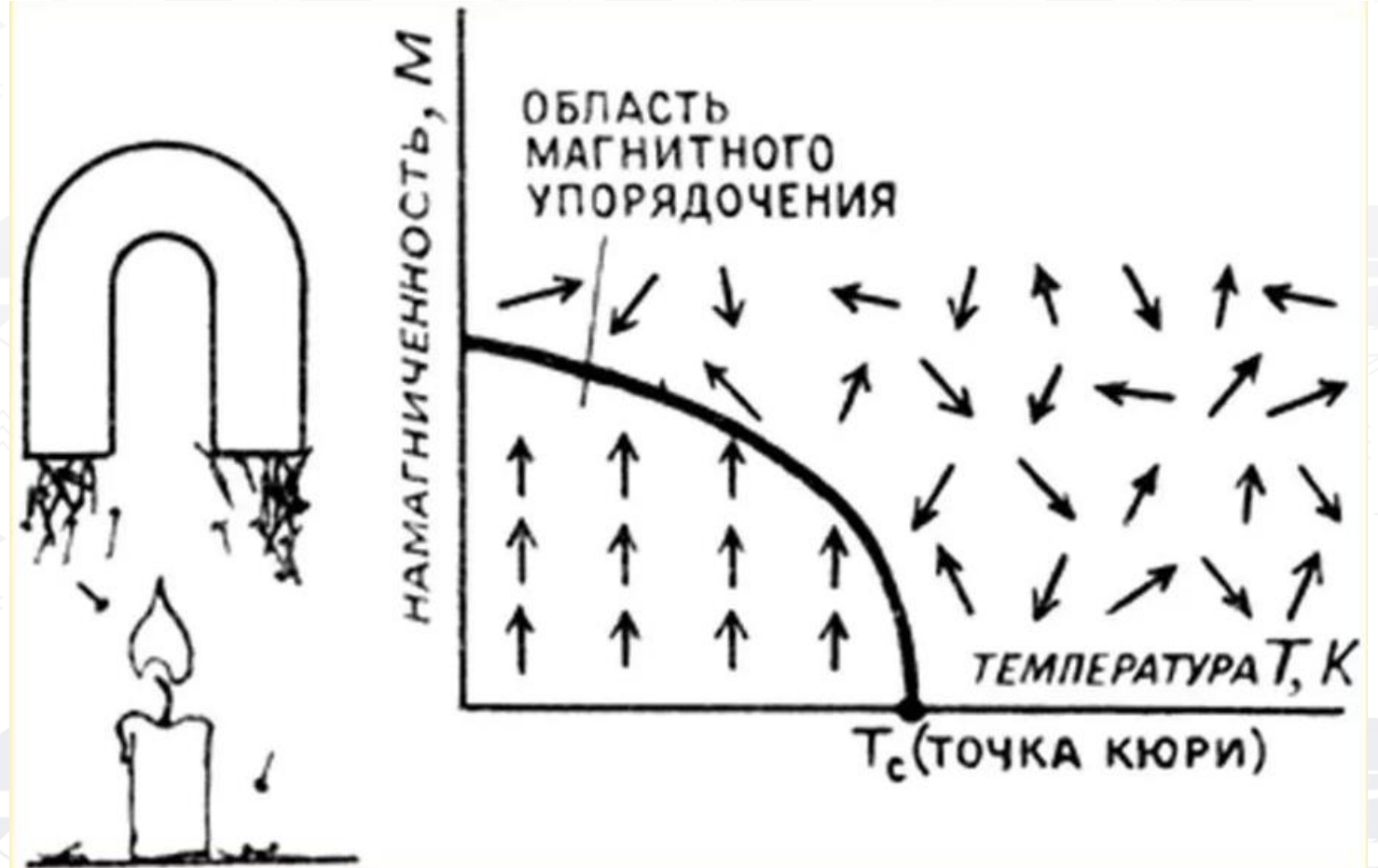


**У парамагнетиков
обменное
взаимодействие между
ионами равно нулю**

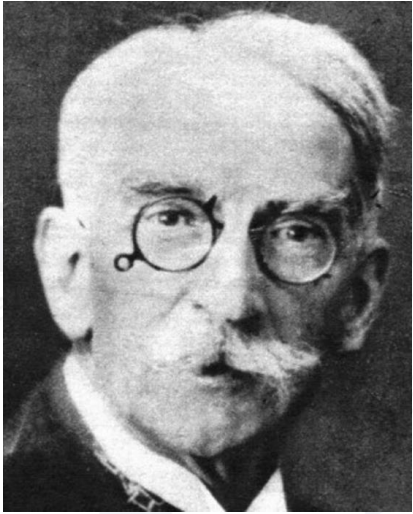


Классификация магнитных материалов

Температура
разрушает
магнитный
порядок!

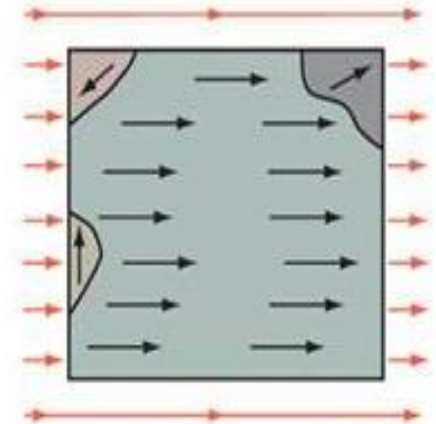
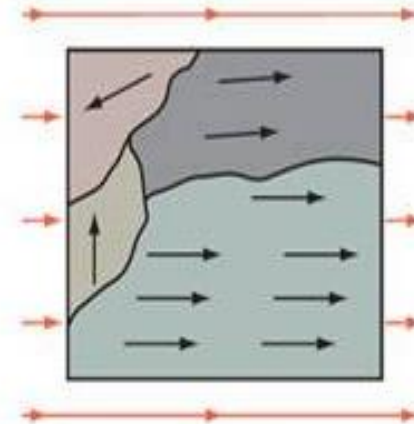
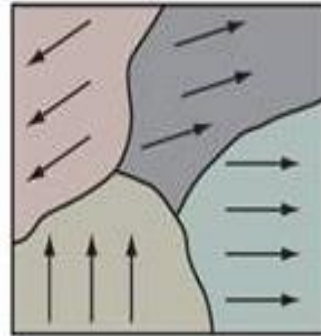


Объяснение ферромагнетизма. Гипотеза Вейса.

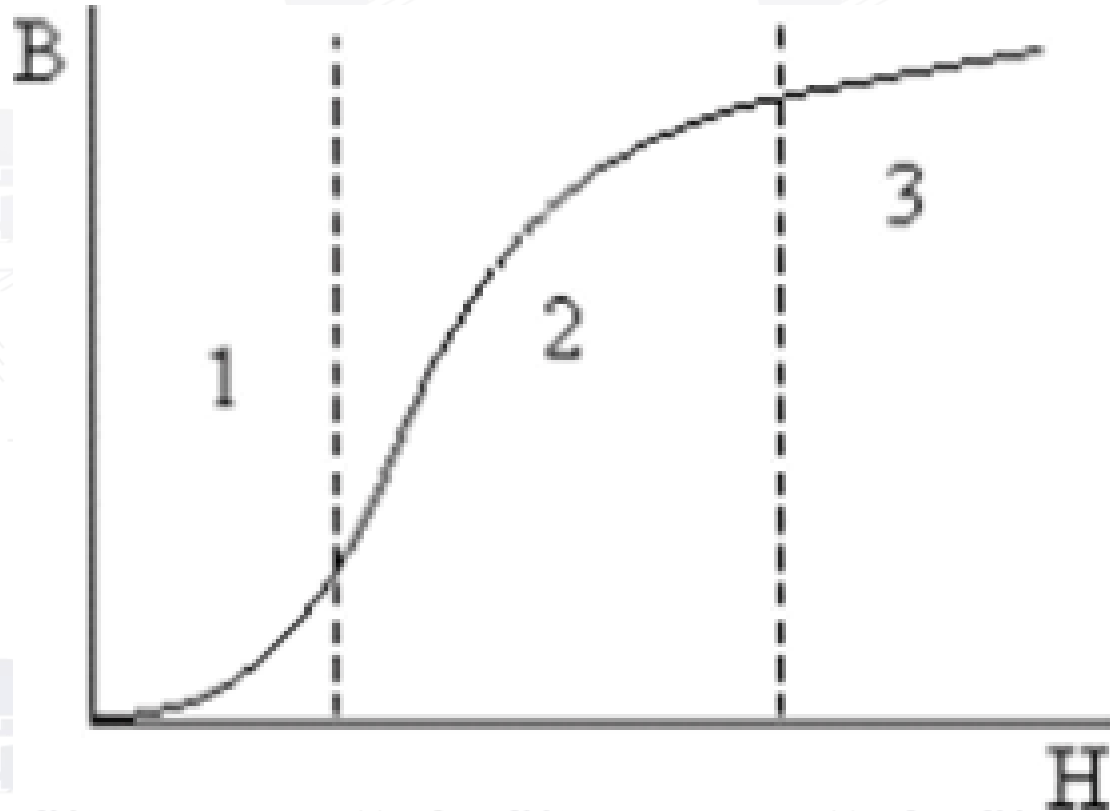


**Пьер-Эрнст Вейс
(1865 — 1940) —
французский физик, один
из основоположников
теории ферромагнетизма.**

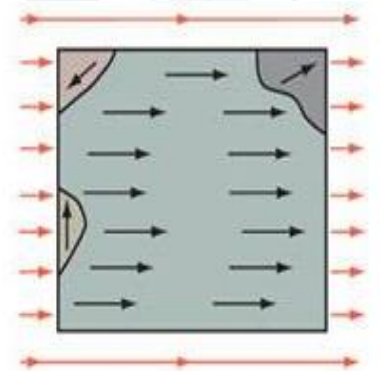
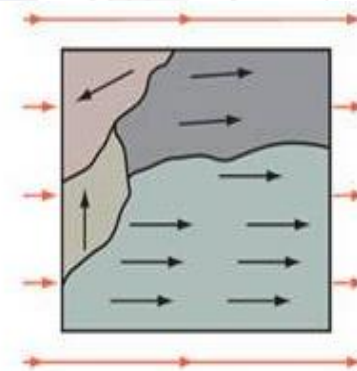
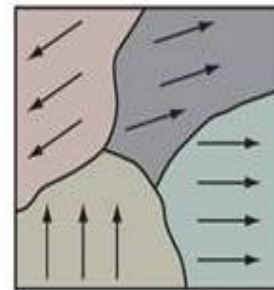
Гипотеза о существовании доменов – областей с однородной намагниченностью была предложена Вейсом в 1907 г. Поскольку опыт показывает, что ферромагнетики в отсутствие внешнего поля могут быть и ненамагничены, ориентация намагниченности в отдельных доменах произвольная.



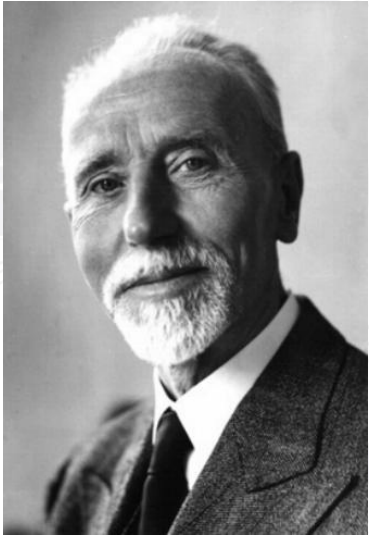
Объяснение ферромагнетизма. Гипотеза Вейса.



**1 – смещение
доменных границ**
2 – вращение
3 - парапроцесс



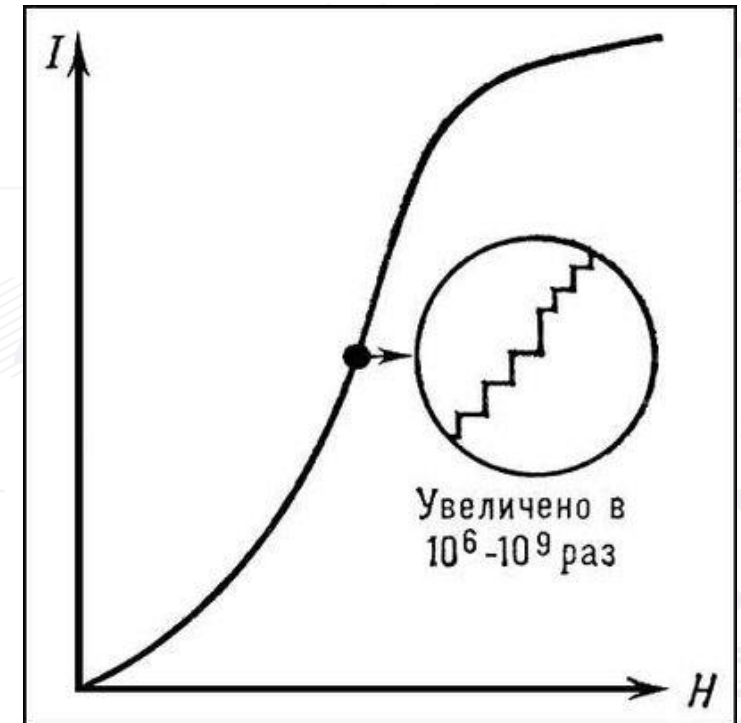
Объяснение ферромагнетизма. Экспериментальное подтверждение гипотезы о существовании доменов.



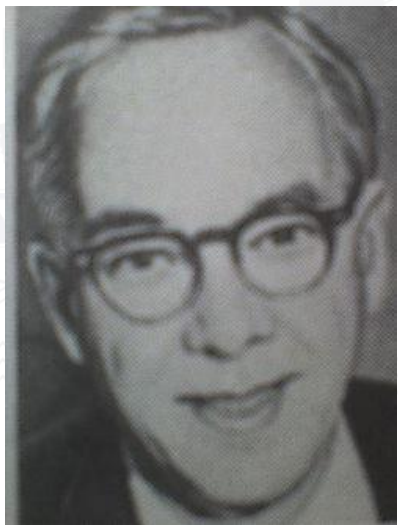
Генрих Георг Баркгаузен (1881 — 1956) — немецкий учёный в области электронной физики.

Гипотеза существования доменов в ферромагнетиках получила подтверждение в экспериментах Г. Баркгаузена в 1919 году.

Обнаружил, что намагниченность при намагничивании ферромагнетика изменяется скачками.

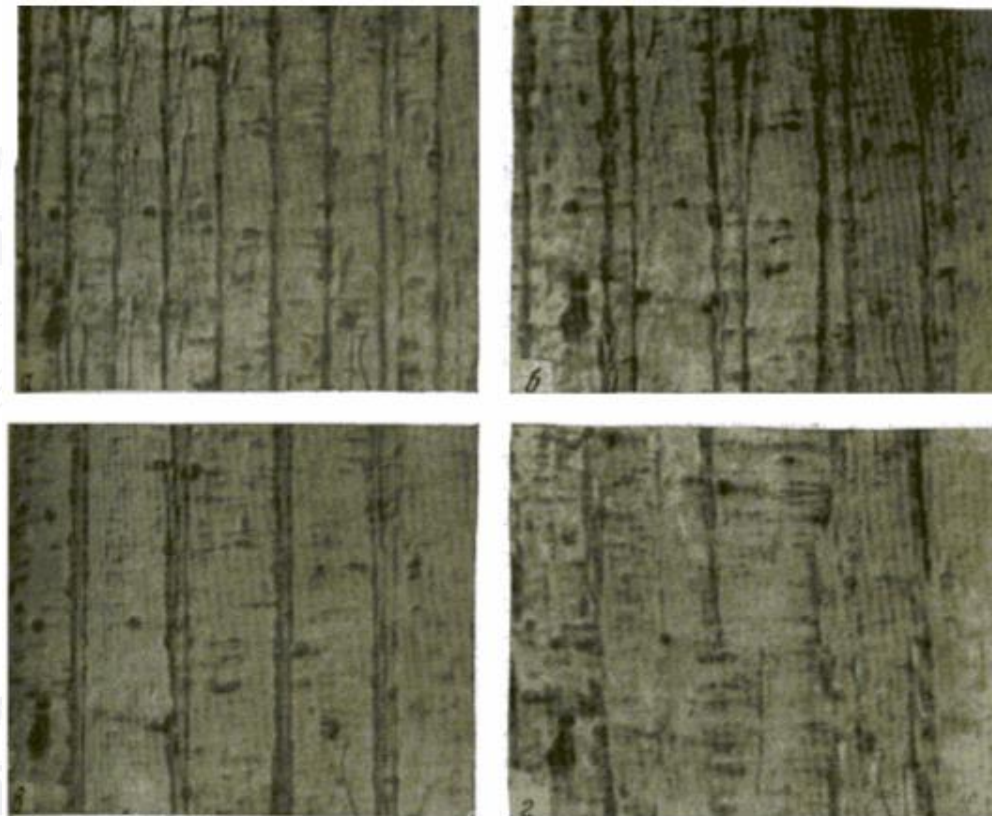


Наблюдение доменной структуры ферромагнетиков. Метод порошковых фигур.



Впервые магнитные домены непосредственно в микроскоп наблюдали в 1932 году Ф. Биттер, Л.В. Хамос и П.А. Тиссен.

Френсис Биттер (1902 — 1967) американский физик, член Американской академии искусств и науки.



Наблюдение доменной структуры ферромагнетиков. Метод порошковых фигур.



1934 год — независимо от Ф. Биттера экспериментально доказал существование доменов.

1926 – 1954 преподавал в МГУ (профессор с 1931 г.)

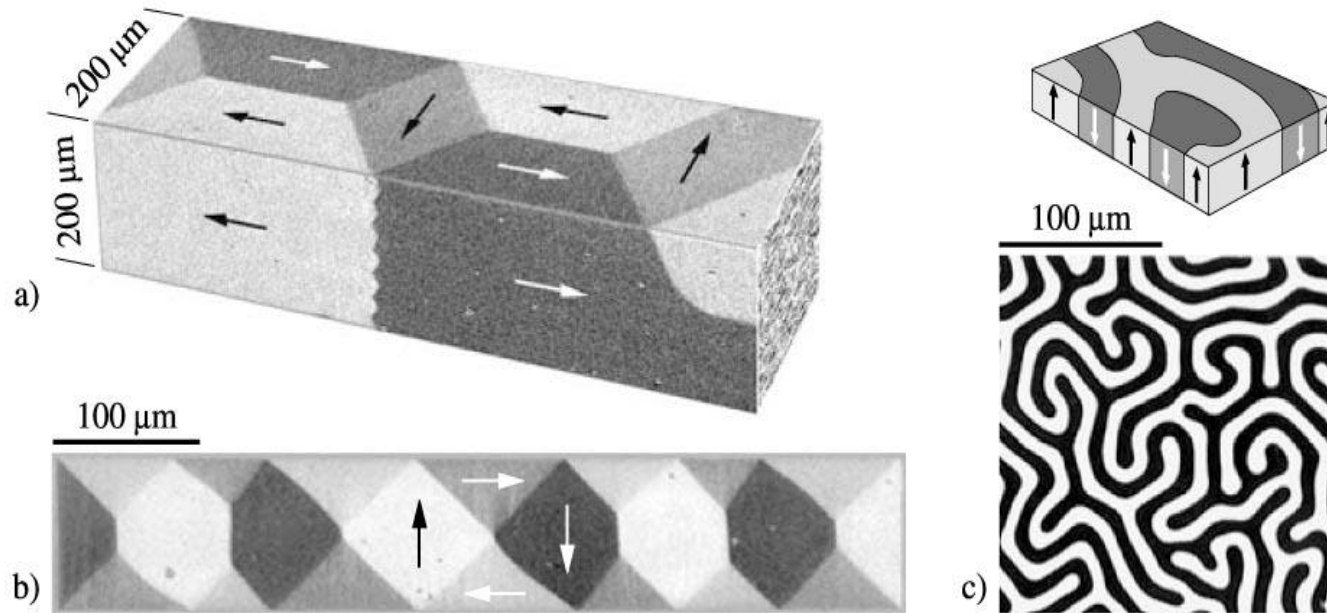
Акулов Николай Сергеевич (1900—1976) — советский физик, специалист в области ферромагнетизма.



Профессор Н.С. Акулов у магнетометра (<https://rgali.ru.seach>)



Наблюдение доменной структуры ферромагнетиков

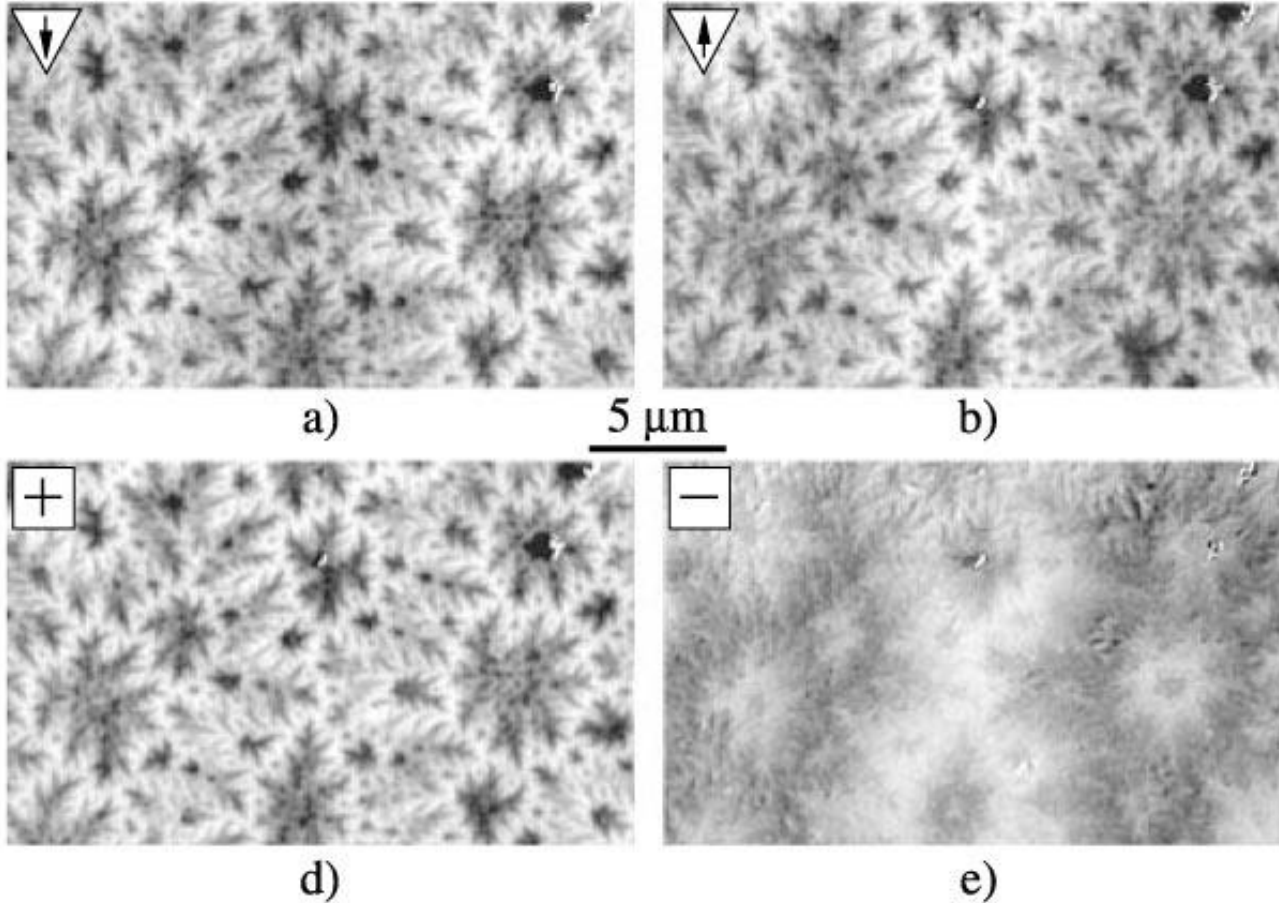


Доменная структура в однородных образцах. Изображения получены с помощью магнитооптических методов. (a) железный микропровод. (b) Доменная структура тонкопленочного элемента NiFe (толщина 130 нм) и направление намагниченности в доменах. (c) Доменная структура монокристаллической пленки феррита-граната с перпендикулярной анизотропией, полученная с помощью эффекта Фарадея

[Alex Hubert, Rudolf Schäfer. Magnetic Domains. The Analysis of Magnetic Microstructures. Springer 2008].



Наблюдение доменной структуры ферромагнетиков



Сравнение изображений доменной структуры кристалла кобальта, полученных разными методами. [Alex Hubert, Rudolf Schäfer. Magnetic Domains. The Analysis of Magnetic Microstructures. Springer 2008].



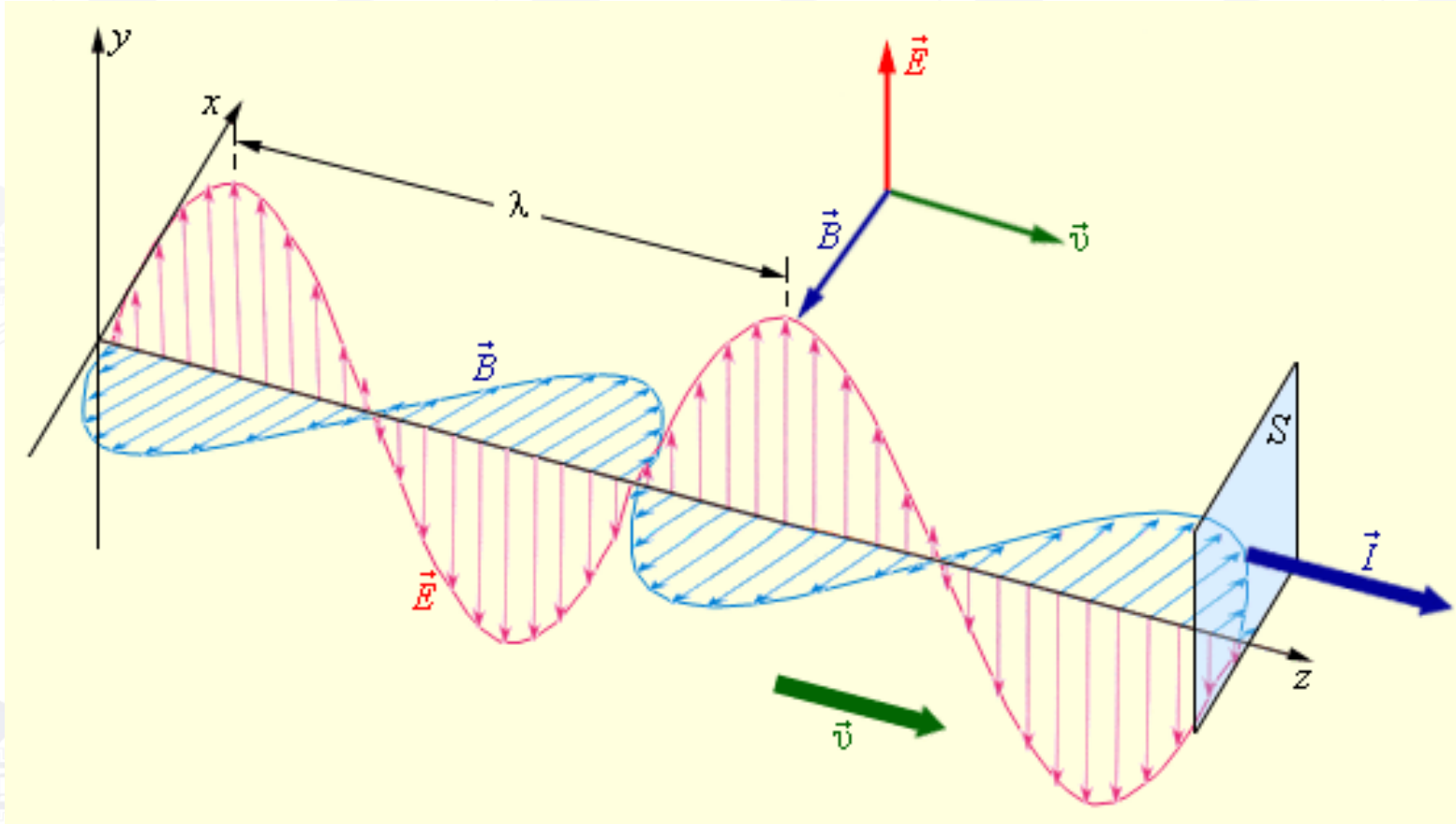
Магнитные и оптические явления сосуществуют, по-видимому, с момента рождения Вселенной (Большой взрыв). Однако их влияние друг на друга было обнаружено М. Фарадеем лишь в 1845 г.



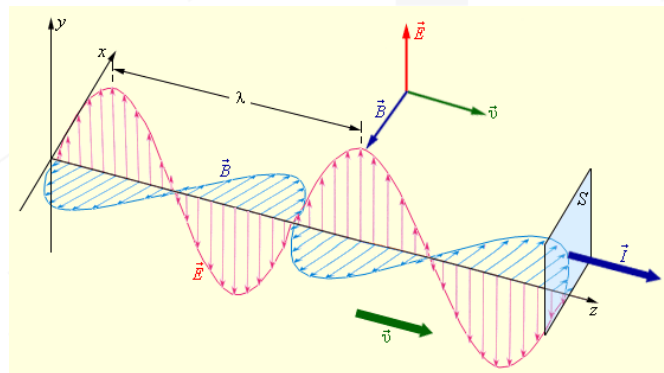
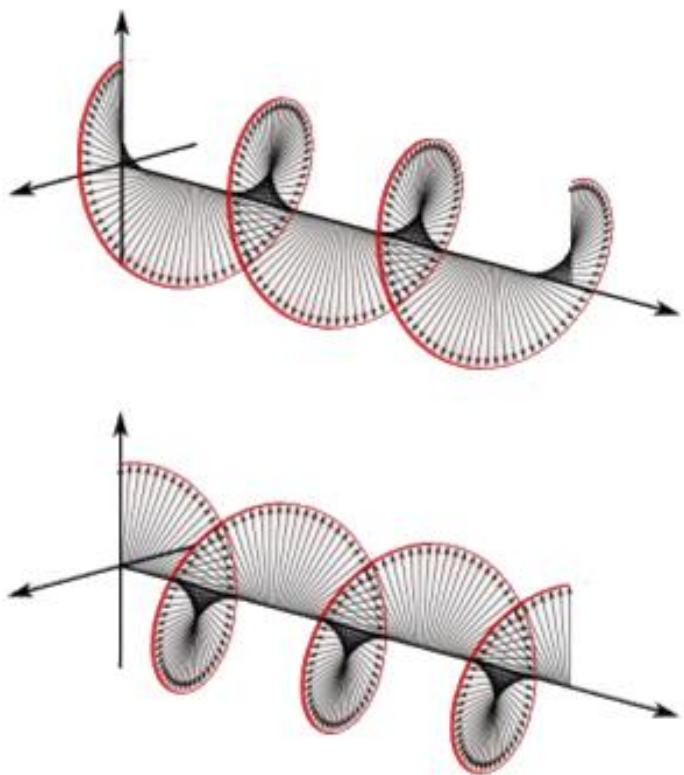
- **После этого был открыт большой ряд магнитооптических явлений.**
- **Новая жизнь магнитооптики началась после изобретения лазеров и синхротронов как источников интенсивного, когерентного и перестраиваемого по длине волны излучения**



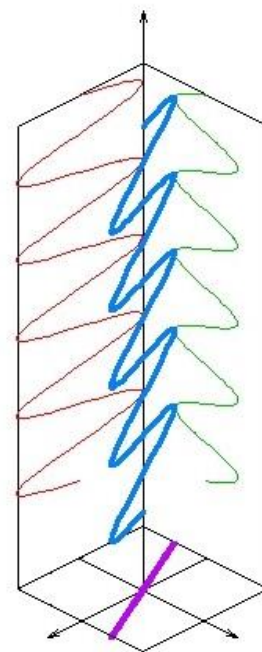
Свет – это электромагнитная волна.



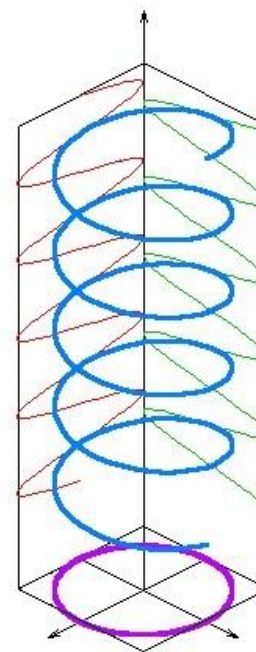
Поляризация электромагнитных волн.



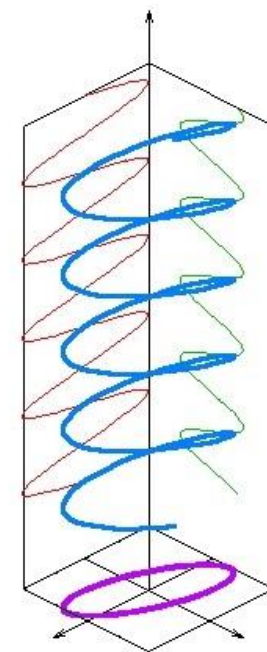
Правая и левая круговые поляризации



Линейная поляризация



Круговая поляризация



Эллиптическая поляризация



Основатели магнитооптики



Майкл Фарадей
1791-1867



John Kerr
(1824-1907)



Питер Зееман
1865 - 1943

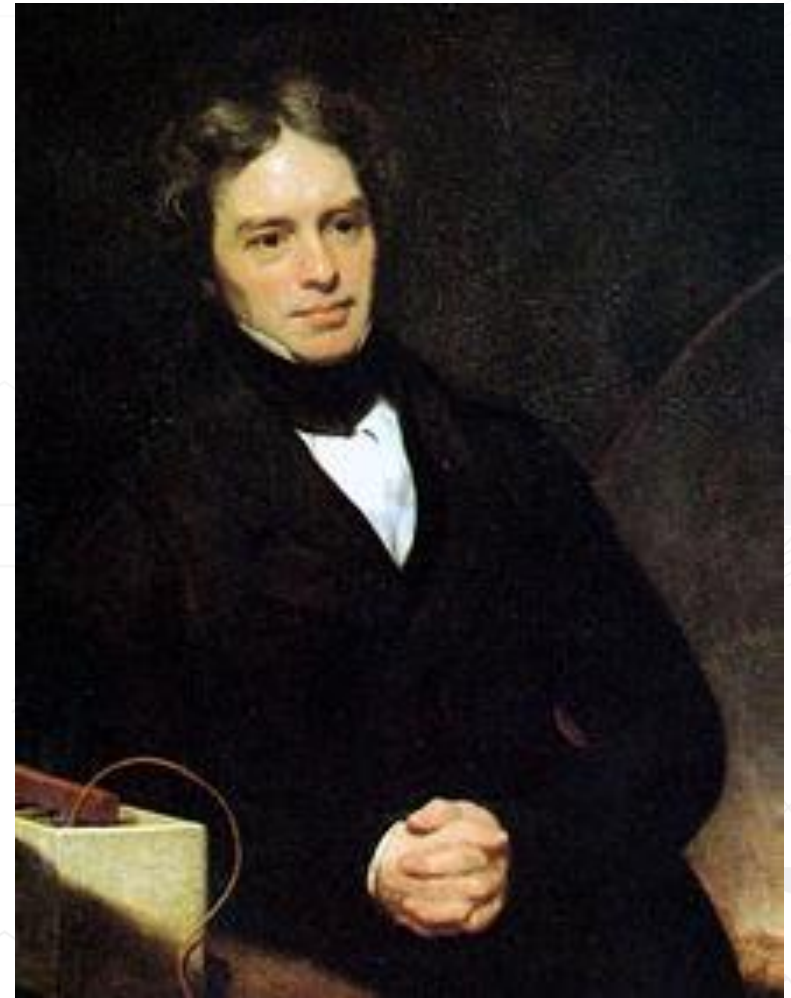
**А. Г. Столетов о М. Фарадее: "Никогда со времен Галилея свет не видал
стольких поразительных и разнообразных открытий, вышедших из одной
головы."**



Эффект Фарадея (1845 г.)

«Я давно придерживался мнения, что различные формы и силы материи настолько близки и родственны, что могут превращаться друг в друга. Это твердое убеждение побудило меня произвести много изысканий с целью открыть связь между светом и электричеством. Однако результаты оказались отрицательными... Эти безуспешные изыскания не могли поколебать моего твердого убеждения, основанного на научных соображениях. Поэтому я недавно возобновил исследования на очень тонких и строгих началах и, в конце концов, мне удалось:

- **намагнитить и наэлектризовать луч света и**
- **осветить магнитную силовую линию».**



PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS.

I. *Experimental Researches in Electricity.*—*Nineteenth Series.*

By MICHAEL FARADAY, Esq., D.C.L. F.R.S., Fullerian Prof. Chem. Royal Institution, Foreign Associate of the Acad. Sciences, Paris, Cor. Memb. Royal and Imp. Acadd. of Sciences, Petersburg, Florence, Copenhagen, Berlin, Göttingen, Modena, Stockholm, &c. &c.

Received November 6,—Read November 20, 1845.

§ 26. *On the magnetization of light and the illumination of magnetic lines of force*.*

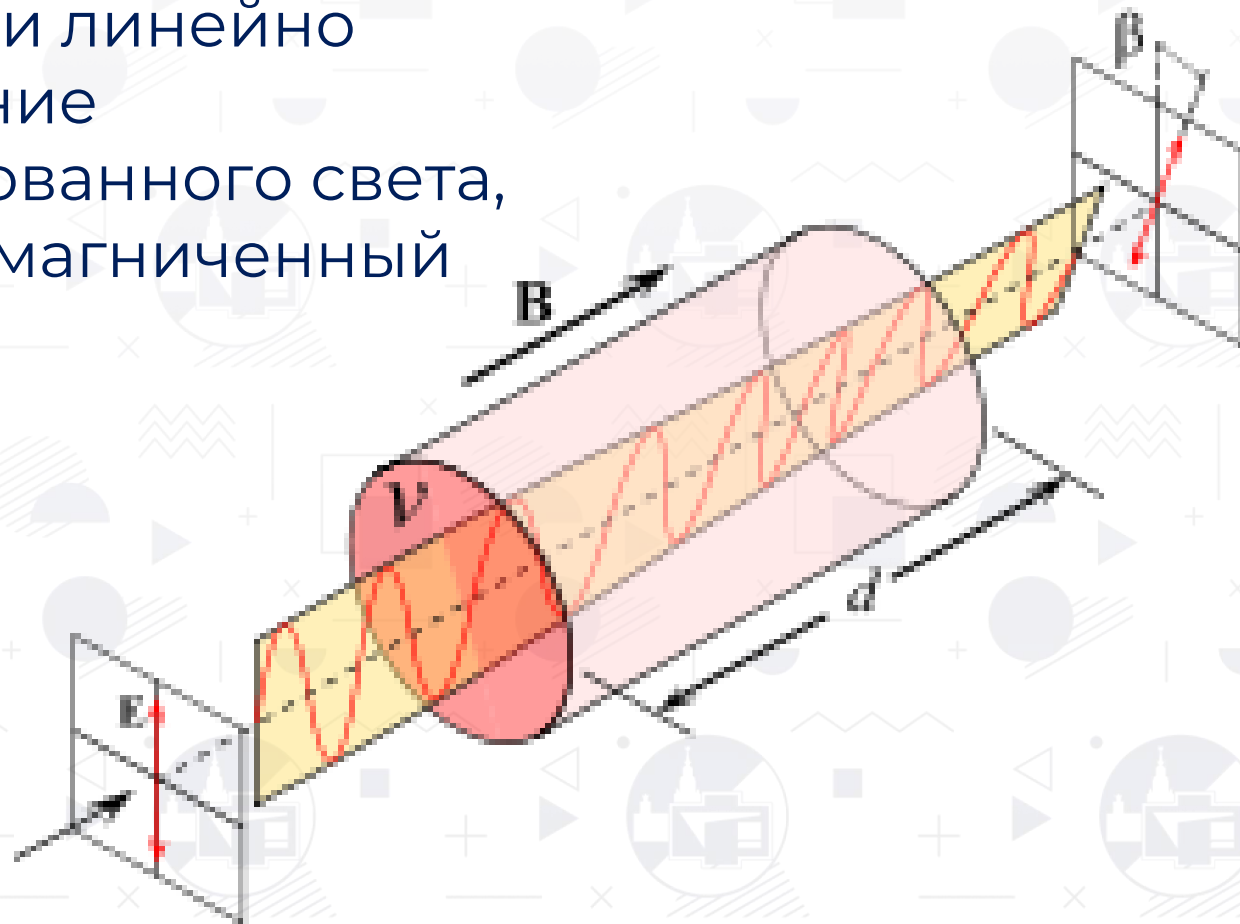
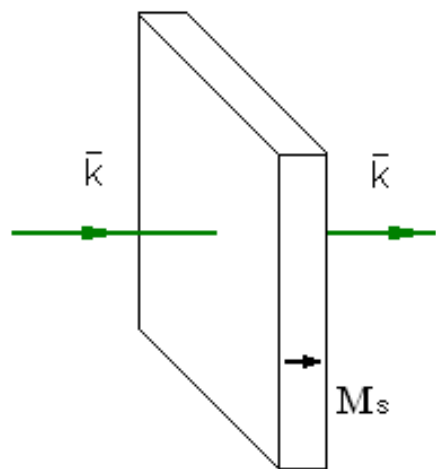
- ¶ i. *Action of magnets on light.* ¶ ii. *Action of electric currents on light.*
¶ iii. *General considerations.*

**Faraday M. I. Experimental researches in electricity. —Nineteenth series // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – 1846. Vol. 136, no. 1. – P. 1-20.
DOI: 10.1098/rstl.1846.0001**

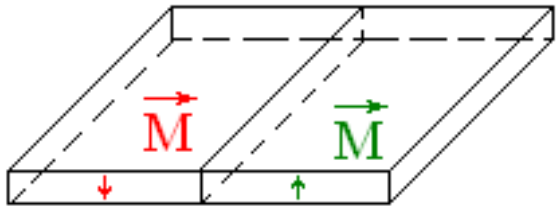


Эффект Фарадея (1845 г.)

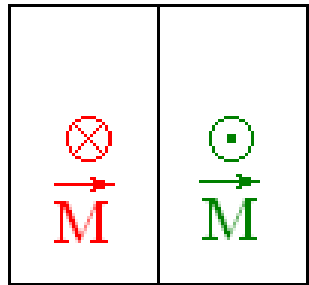
Вращение плоскости поляризации линейно поляризованного света и появление эллиптичности линейно поляризованного света, прошедшего через продольно намагниченный материал.



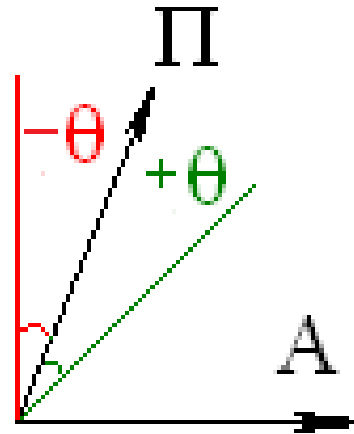
Эффект Фарадея.



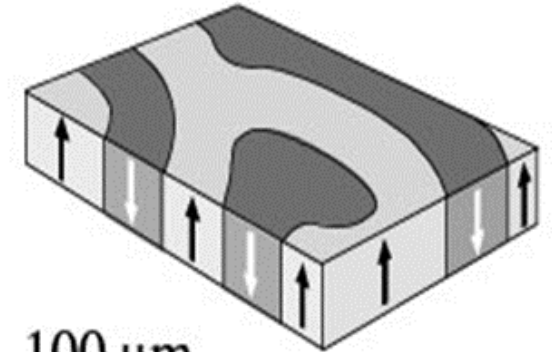
Направление намагниченности в соседних доменах.



Вид сверху.



Взаимное расположение главных осей поляризатора и анализатора и поворот плоскости поляризации света, прошедшего через домены с противоположной намагниченностью

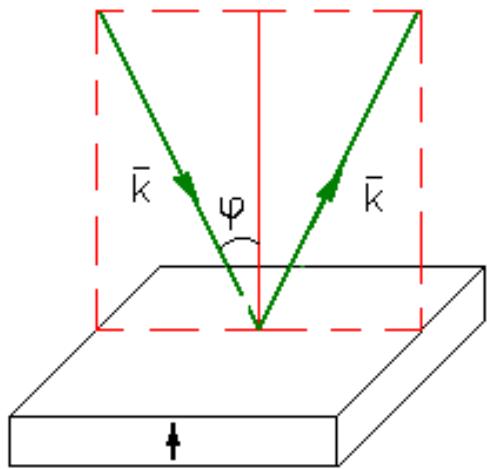


100 μm

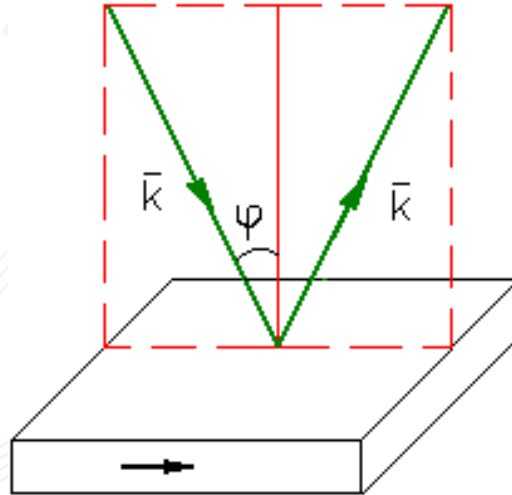


ЭФФЕКТЫ КЕРРА (1876 г.)

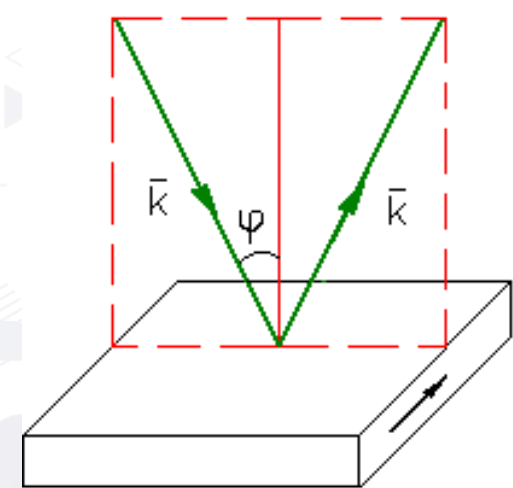
**Полярный
(продольный)**



**Меридиональный
(продольный)**



**Экваториальный
(поперечный)**



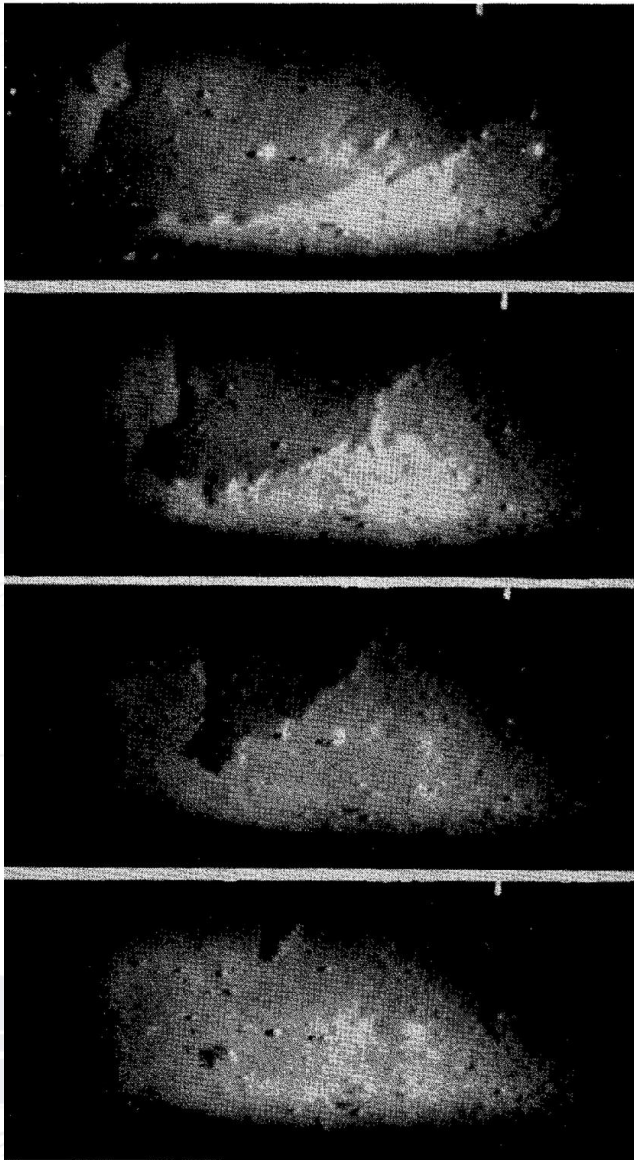
**Вращение плоскости поляризации и появление эллиптичности
отраженного от намагниченной среды линейно-поляризованного света.**



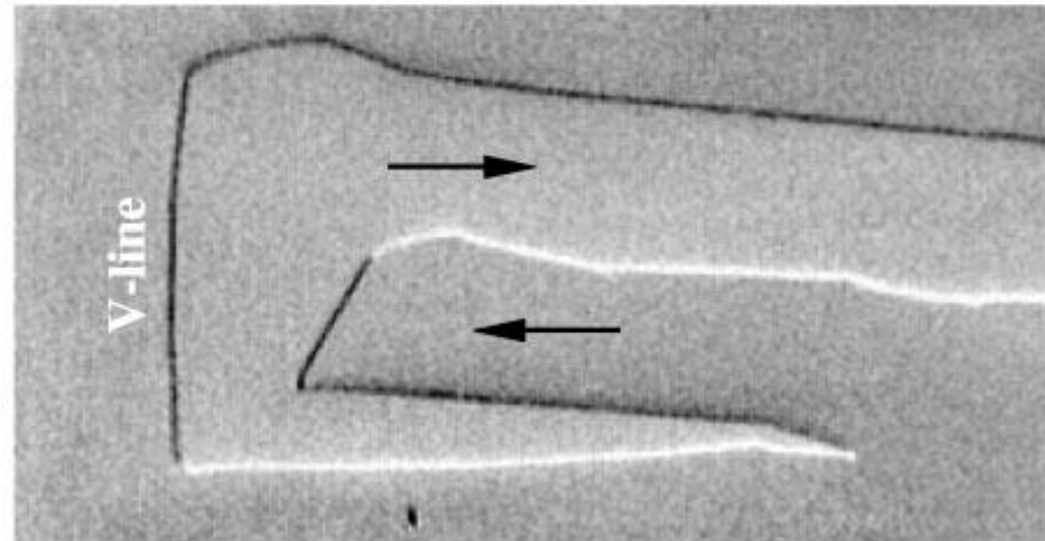
Первые фотографии доменной структуры, выполненные с помощью эффекта Керра.

Доменная структура пленки (Ni 80%, Fe 20%) толщиной 10 – 50 нм процессе перемагничивания. Copeland J.A., Humphrey F.B., Journ. Appl. Phys., 34, 1211 (1963)

Длительность экспозиции порядка нескольких секунд.



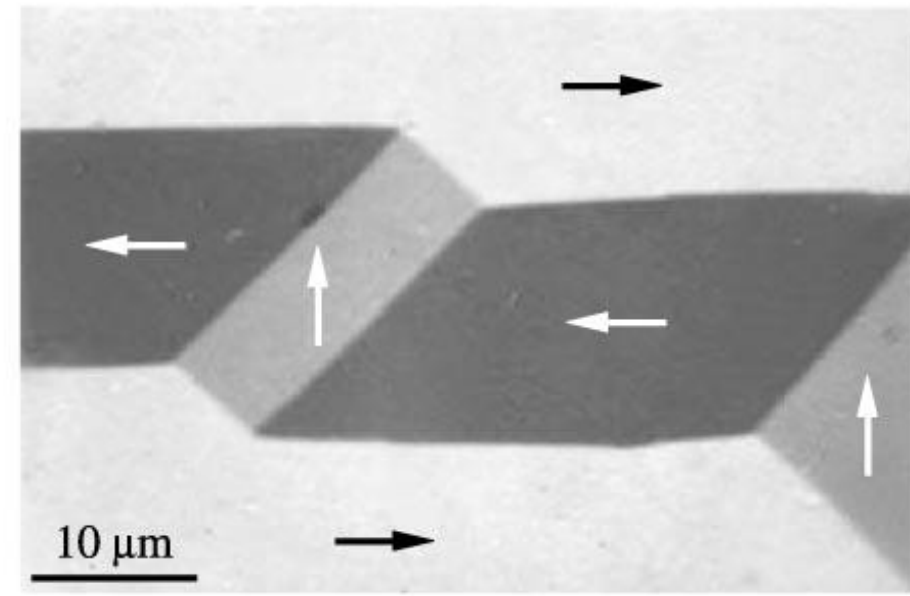
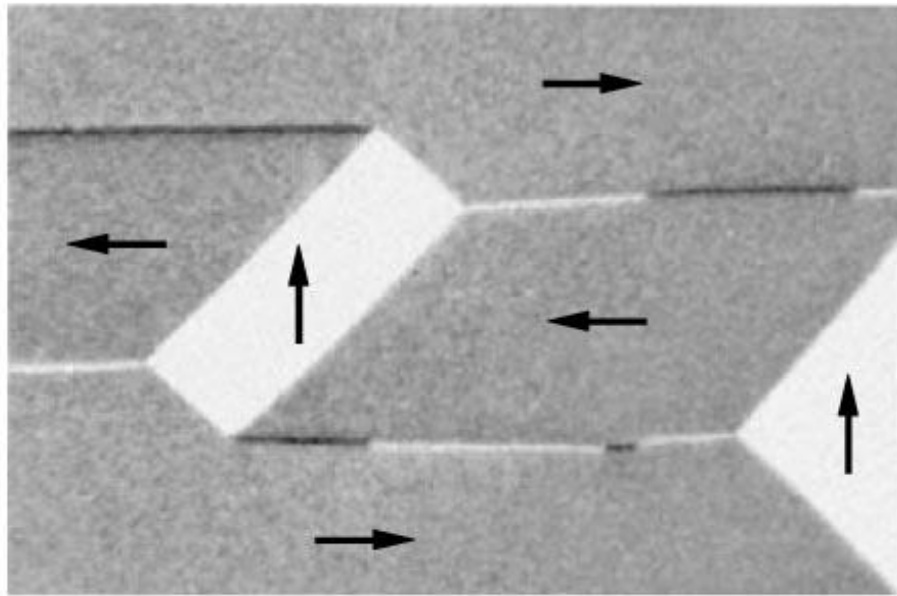
Наблюдение доменной структуры ферромагнетиков



Сравнение изображений доменной структуры на кристалле 3% Si-Fe, которые получены с помощью метода Биттера (а) и Керра (б). На рисунке (б) указано направление намагниченности в соседних доменах [Alex Hubert, Rudolf Schäfer. Magnetic Domains. The Analysis of Magnetic Microstructures. Springer 2008].



Наблюдение доменной структуры ферромагнетиков



Изображения доменов и доменных границ кристалла SiFe с ориентацией (100) полученные с помощью эффекта Керра. [Alex Hubert, Rudolf Schäfer. Magnetic Domains. The Analysis of Magnetic Microstructures. Springer 2008].



Обратный эффект Фарадея.

Предсказан Л.П. Питаевским в 1960 г.

Лев Петрович Питаевский

(1933 – 2022) — Академик АН СССР с 1990 года.

Зам. Главного редактора журнала «Успехи физических наук».

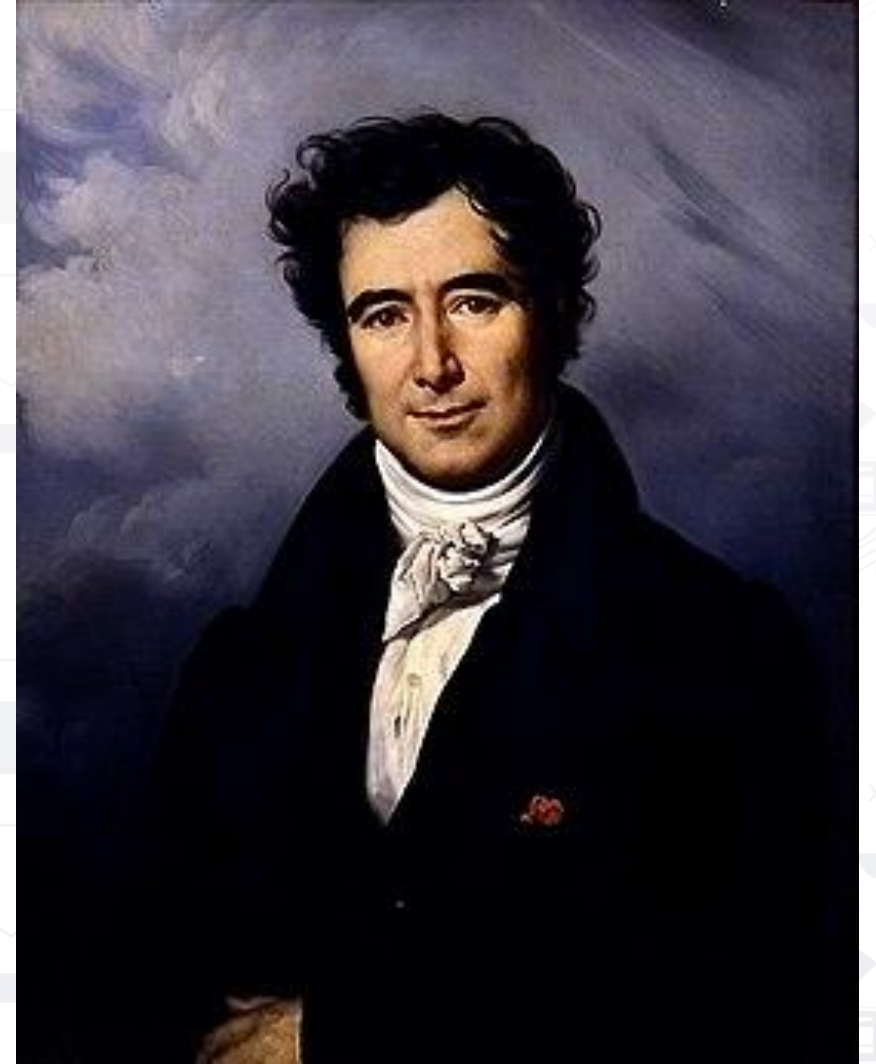


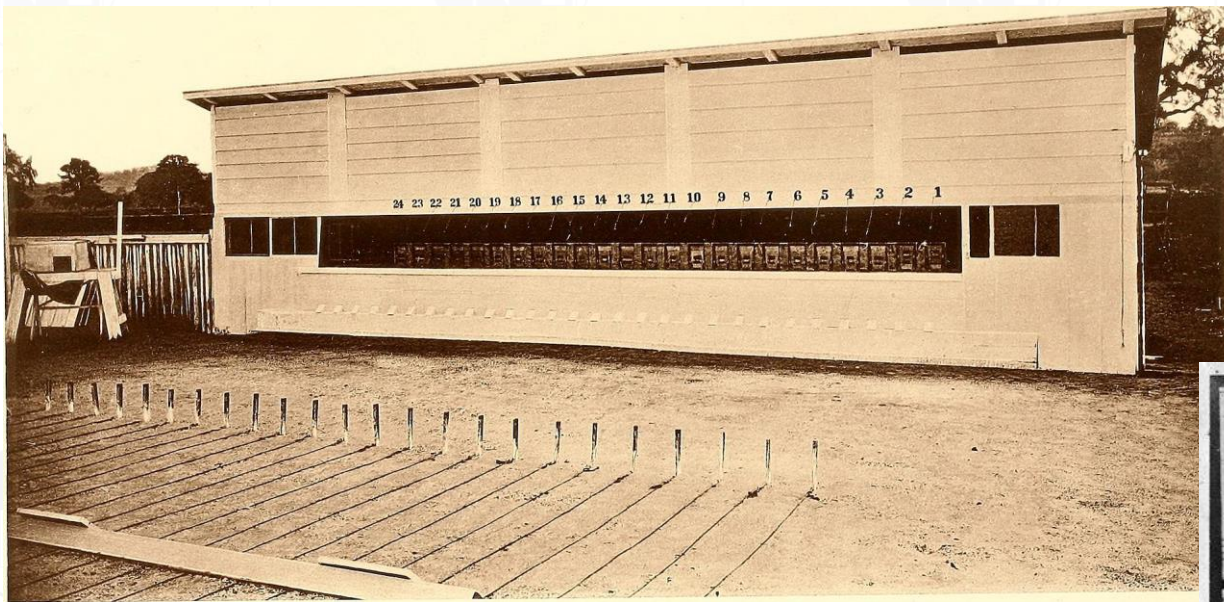
- Возникновение в среде магнитного поля под действием мощного циркулярно поляризованного света, вызывающего циркулярное движение электронов.
- Beaurepaire E., Merle J.-C., Daunois A. & Bigot J.-Y. Ultrafast spin dynamics in ferromagnetic nickel. Phys. Rev. Lett. 76, 4250 (1996).
- 2005–2009 г. Эксперименты по сверхбыстрому перемагничиванию.
- Р.В. Писарев, Th. Rasing, A. Kimel, A. Kirilyuk, A. Kalashnikova (PRL 103, 117201 (2009))



Датой изобретения технологии фотографии по решению IX Международного конгресса научной и прикладной фотографии считается 7 января 1839 года, когда Франсуа Араго сделал доклад о дагеротипии на заседании Французской академии наук

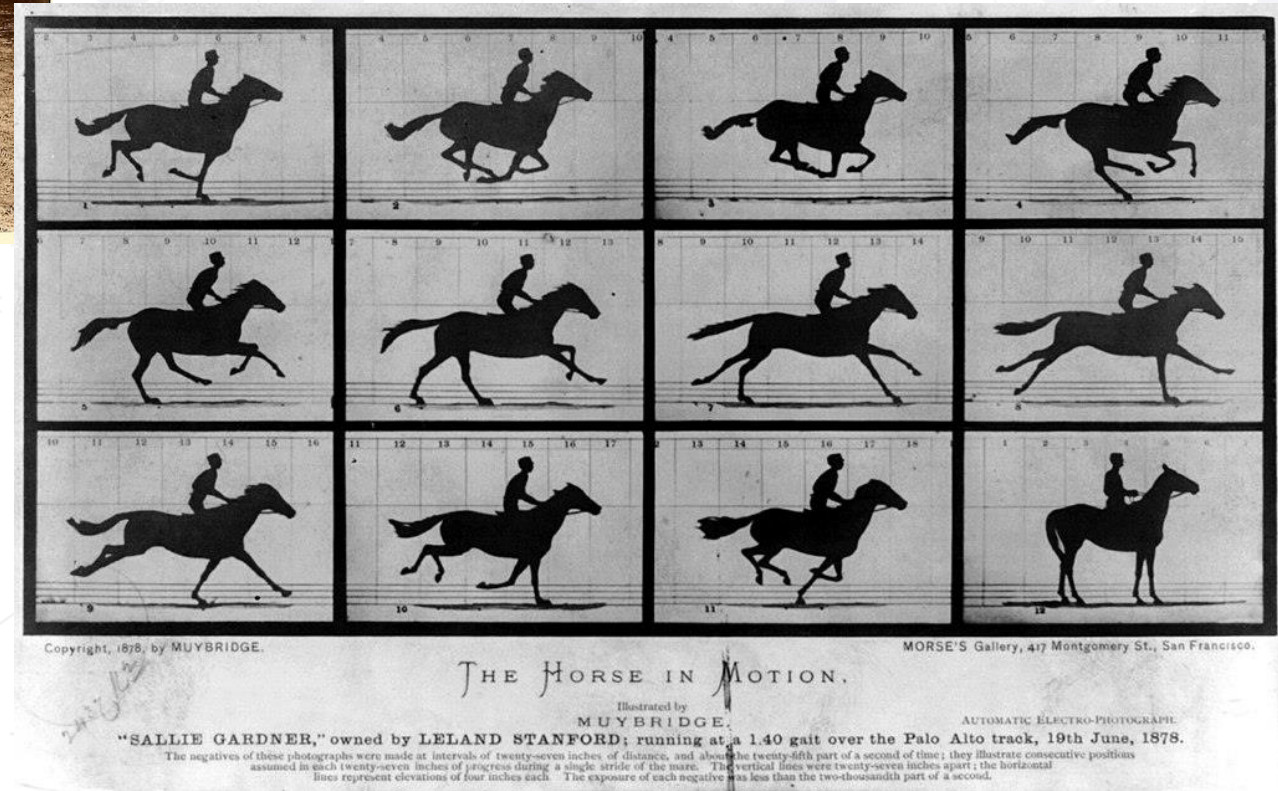
Доминик Франсуа Жан Араго
(1786 — 1853) — французский физик, астроном и политический деятель

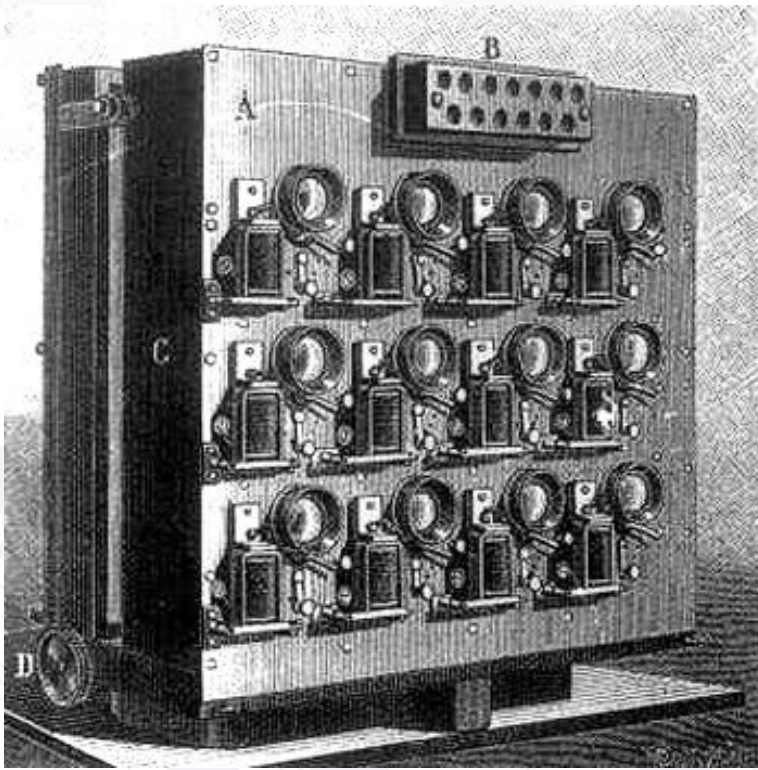




«Фотодром» Эдварда Мэйбриджа в Пало-Алто (1874 г.)

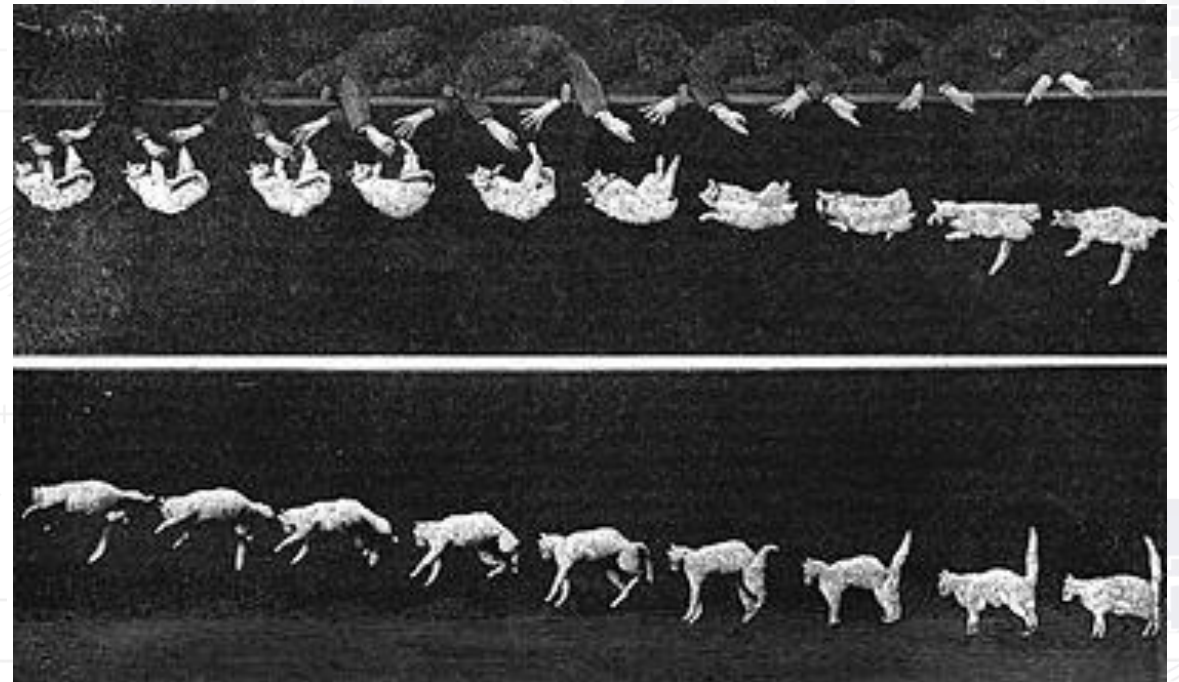
Пробегающая лошадь разрывала ногами нити, поочерёдно приводя в действие фотоаппараты, каждый из которых фиксировал отдельную фазу движения с выдержкой в $1/25$ секунды.





**Хронофотографический
аппарат Альберта Лонда с
12 объективами 1891 год**

**19 последовательных кадров,
демонстрирующих умение кошки
приземляться на четыре лапы с переворотом в
воздухе на 180° . Работа опубликована в 1894
году в журнале Nature, автор — Этьен-Жюль
Маре.**





Гарольд Эджертон Harold Edgerton (1903-1990)

**В 1931 г. изобрел
электрическую
вспышку для
фотоаппаратов.**



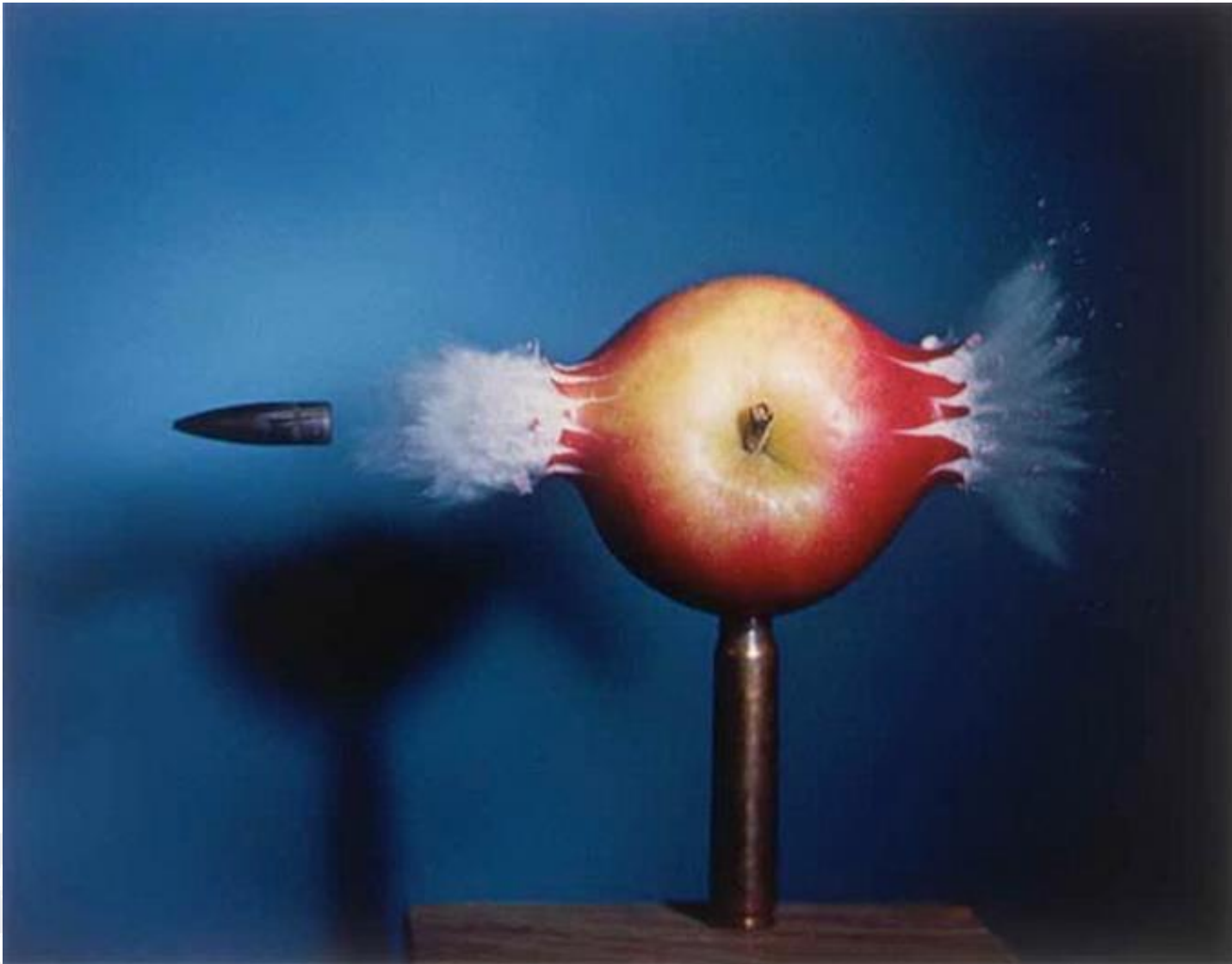


Фотографии Эджертона

«Корона» в молоке

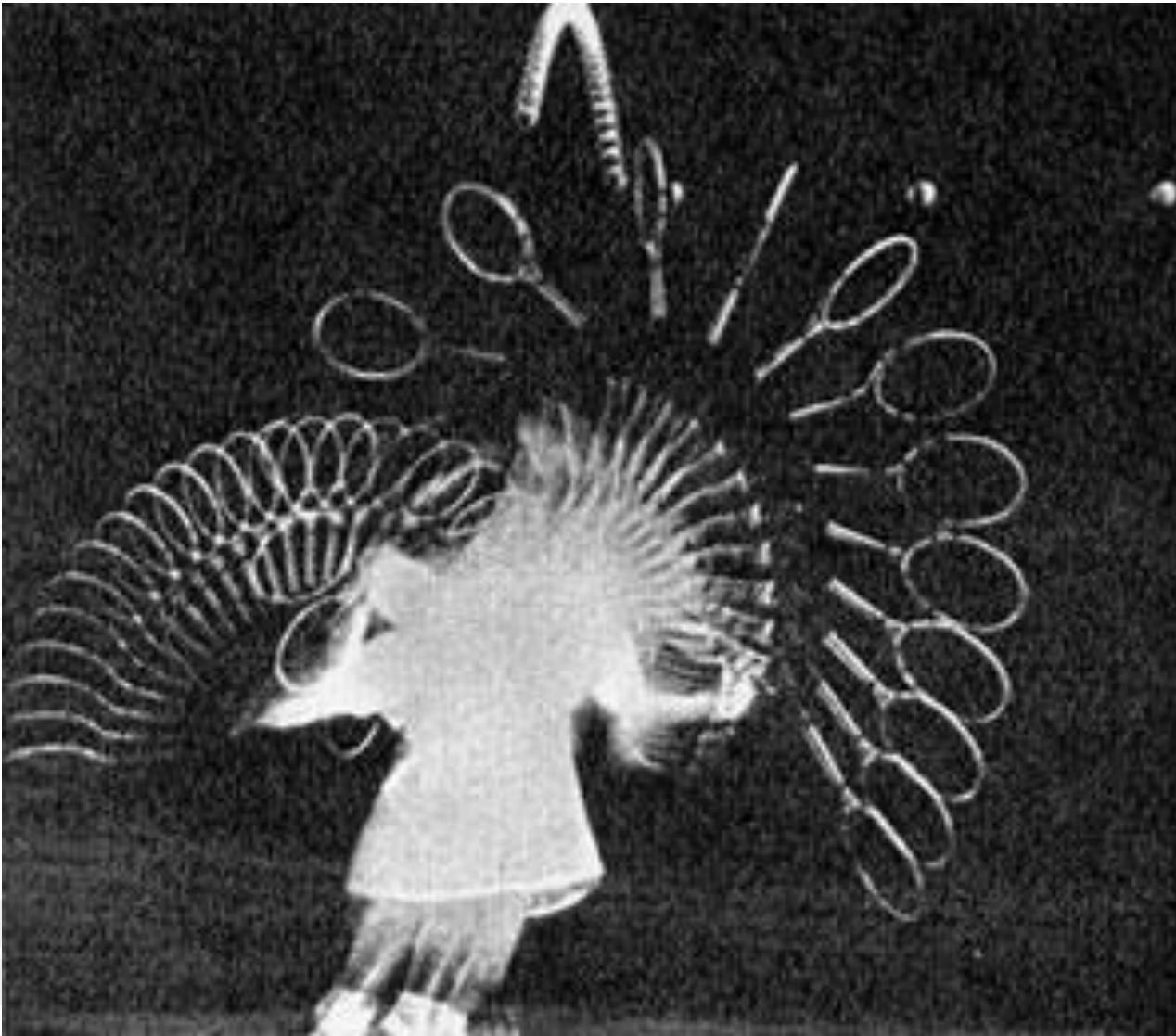


Фотографии Эджертона



**Пуля,
пробивающая
яблоко**





Хронофотография

Промежуточный метод между фото- и киносъемкой. Последовательные фазы процесса как бы накладываются друг на друга и совмещаются в одном снимке.

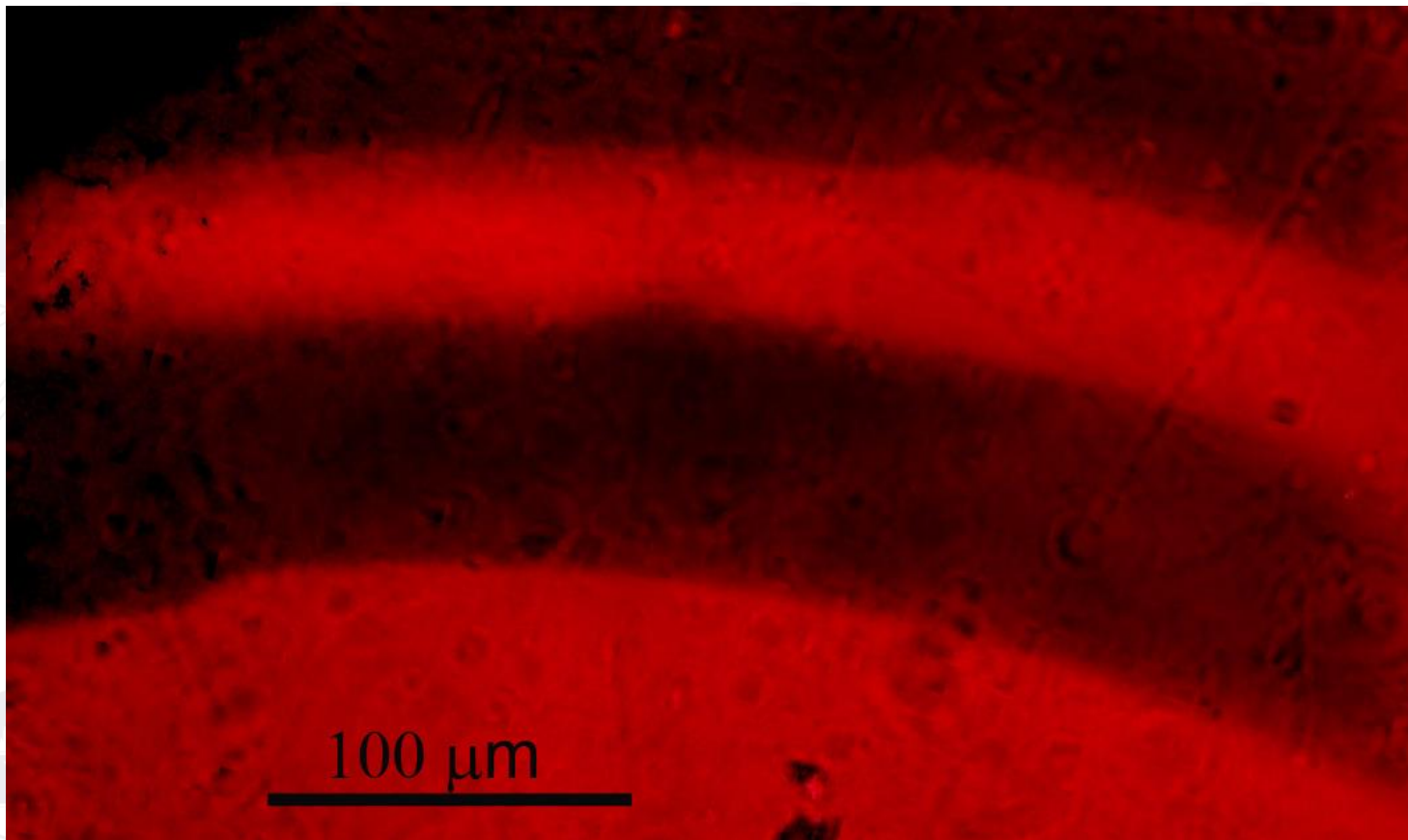
Теннисистка на подаче



Хронофотография



Трехкратная фотография динамической доменной границы в пластинке YFeO_3 .



Время задержки между 1 и 2 световыми импульсами 8 нс, время задержки между 2 и 3 световыми импульсами 6 нс. Длительность светового импульса $\frac{1}{4}$ нс. Доменная граница движется снизу вверх.

Максимальная скорость движения доменных границ 20 км/с.

ЖММ, в. 321, N 7, с. 800-802 (2009).

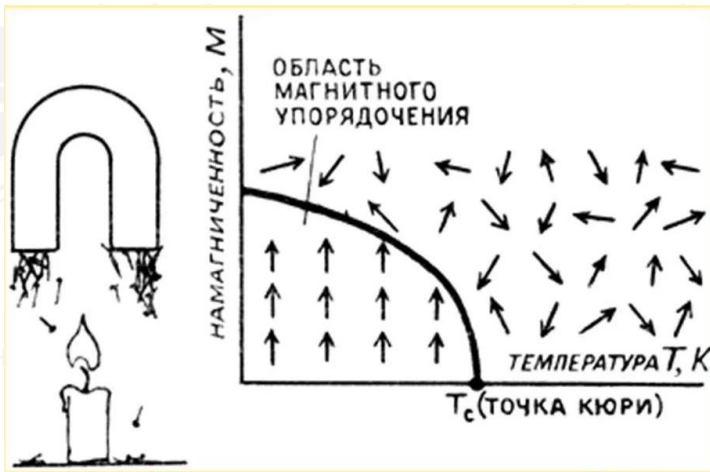


Различные величины энергий в магнетизме

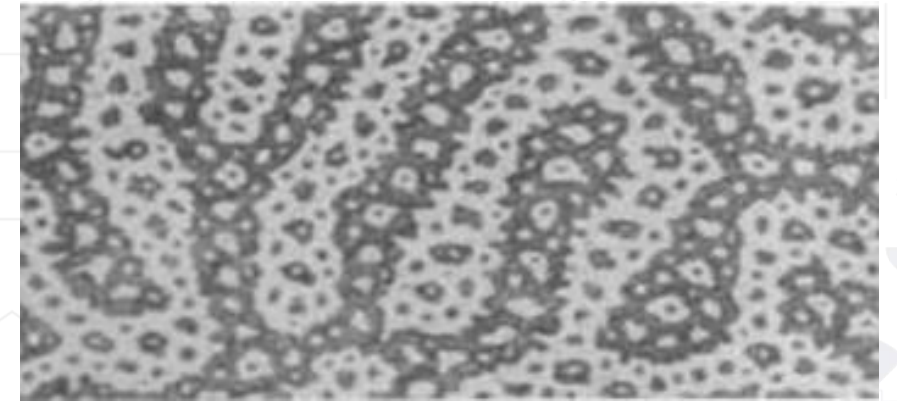
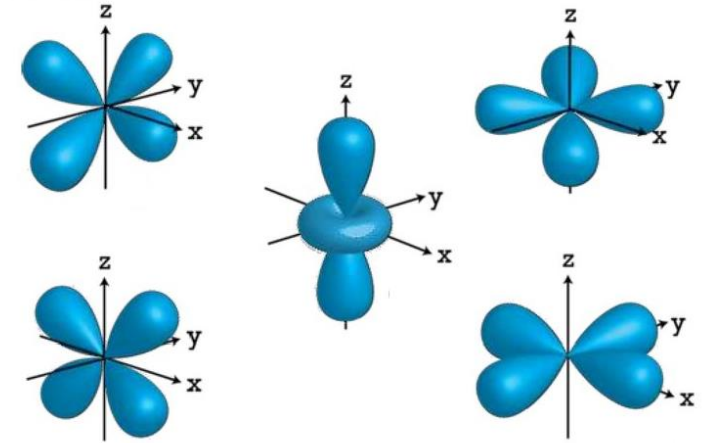
✓ **Взаимодействие электронов в 3d металлах происходит с энергией порядка 1эВ.**

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

✓ **Температура Кюри около 1000 К, что соответствует 100 мэВ.**



✓ **Энергия анизотропии, движения доменных границ и формирования доменов порядка 0,1 – 0,2 мэВ.**



4 порядка!



$$E = h\nu \quad \longrightarrow \quad E = \frac{h}{T}$$

$$T = \frac{h}{E} \quad \longleftarrow$$

Постоянная Планка

$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж/с}$$

Температура Кюри около 1000 К, что соответствует 100 мэВ, характерное время

Энергия анизотропии, движения ДГ и формирования доменов порядка 0,1 – 0,2 мэВ, характерное время

Энергия и время.

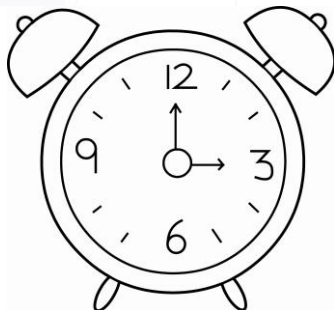
Взаимодействие электронов в 3d металлах происходит с энергией порядка 1эВ, характерное время

$$T = \frac{h}{E} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34}}{1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \approx 4,1 \cdot 10^{-15} \text{ с} = 4,1 \text{ фс}$$

$$T = \frac{6,6 \cdot 10^{-34}}{0,1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \approx 41 \cdot 10^{-15} \text{ с} = 41 \text{ фс}$$

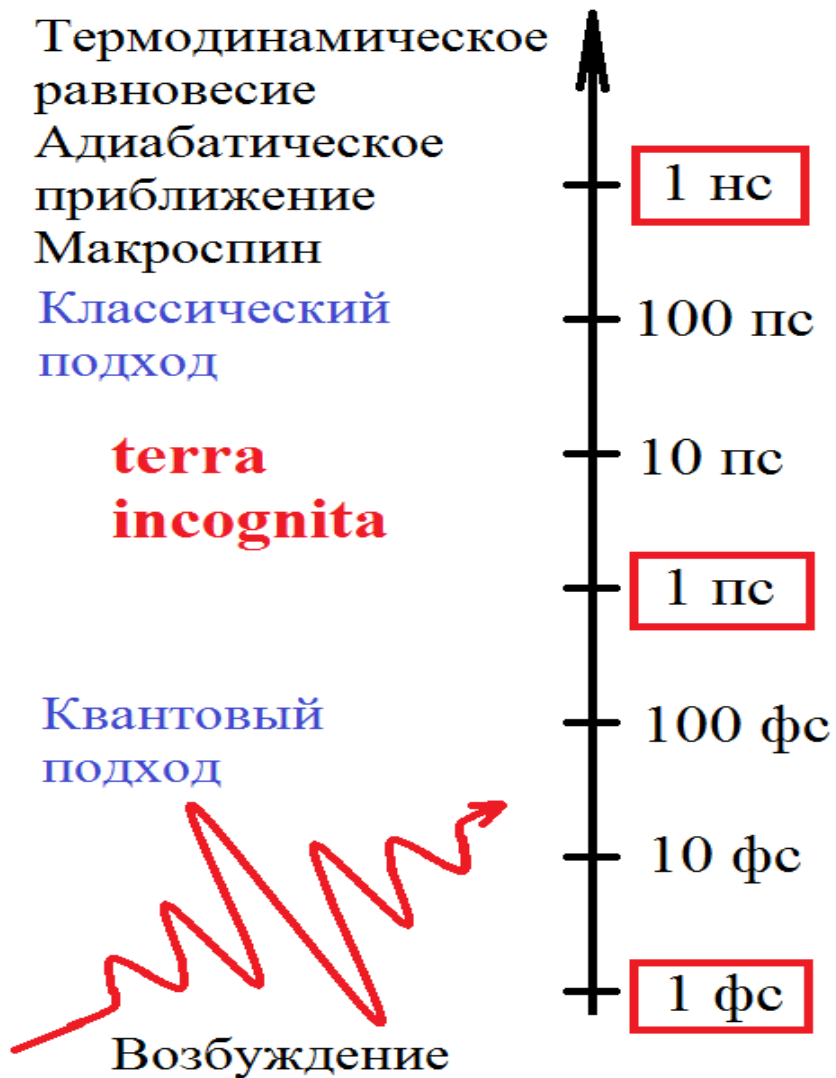
$$T = \frac{6,6 \cdot 10^{-34}}{0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \approx 41 \cdot 10^{-12} \text{ с} = 41 \text{ пс}$$

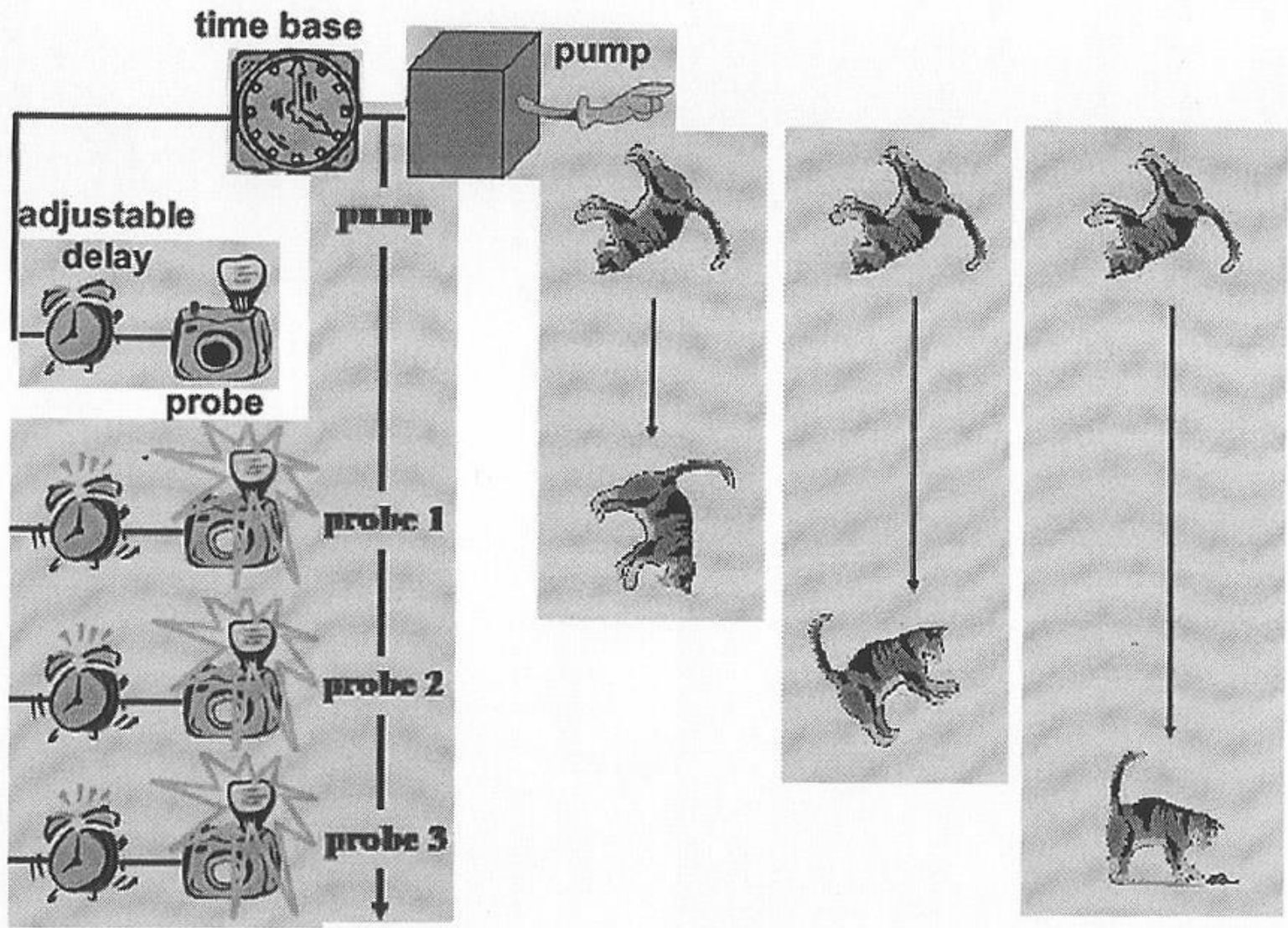




Магнетизм и время

**Фемтомагнетизм – terra
incognita современной
науки.**



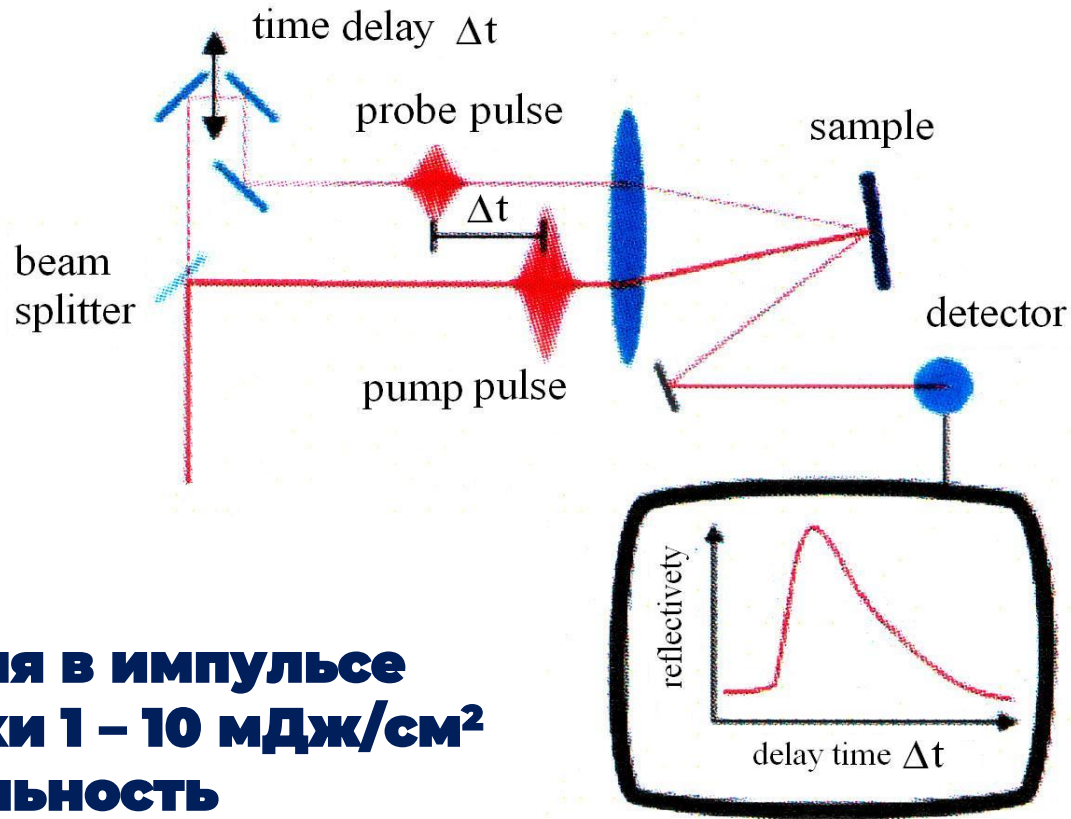


Идея метода накачки- зондирования

**Повторяемость
эксперимента –
надежная основа
магнитооптических
исследований.**



Сверхбыстрая магнитная динамика (Эффект Керра)



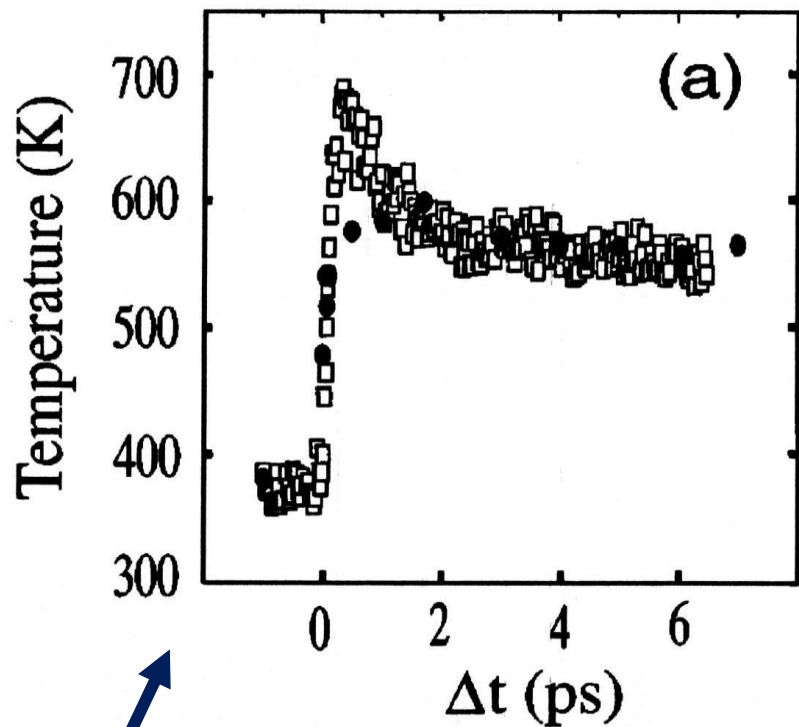
**Энергия в импульсе накачки 1 – 10 мДж/см²
длительность импульса около 100 фс.**

Идея эксперимента, параметры установки

- **Энергия в импульсе накачки в 10^{14} раз превышает норму освещенности помещений (10 – 20 Вт/м²)**
- **Воздействие импульса накачки соответствует действию магнитного поля с индукцией 1 Тл**
- **Электрическое поле импульса накачки может изменить скорость электрона на 10^6 м/с**

Phys. Rev. Lett. 76, 4250 (1996).



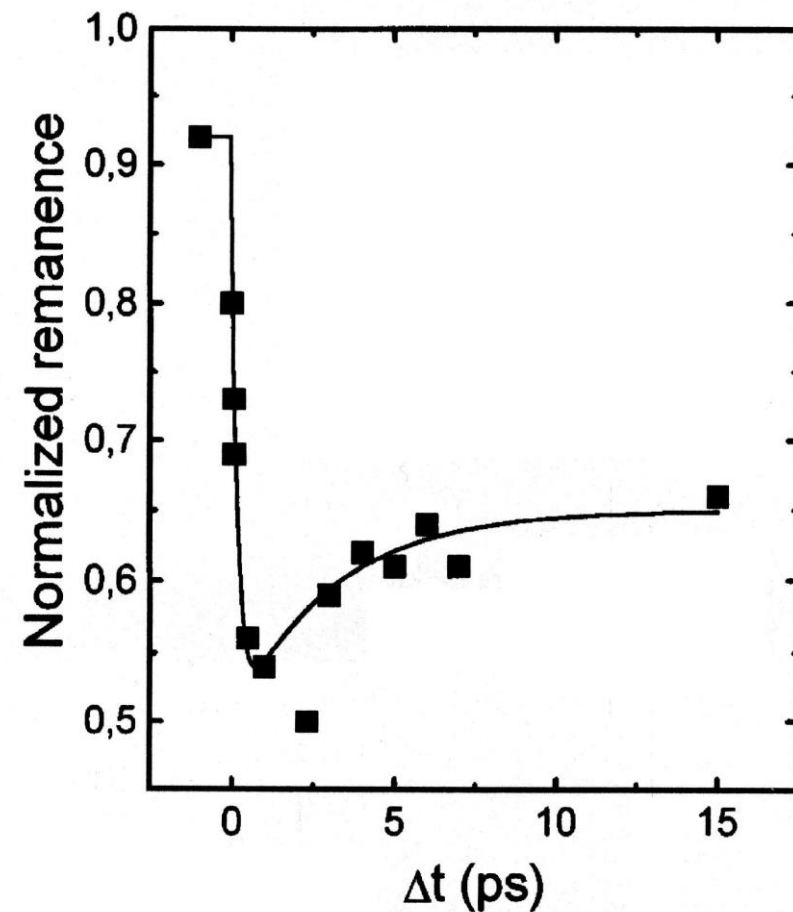


Метод накачки- зондирования

**Phys. Rev. Lett.
76, 4250 (1996).**

**Изменение
температуры со
временем,
прошедшим после
накачки**

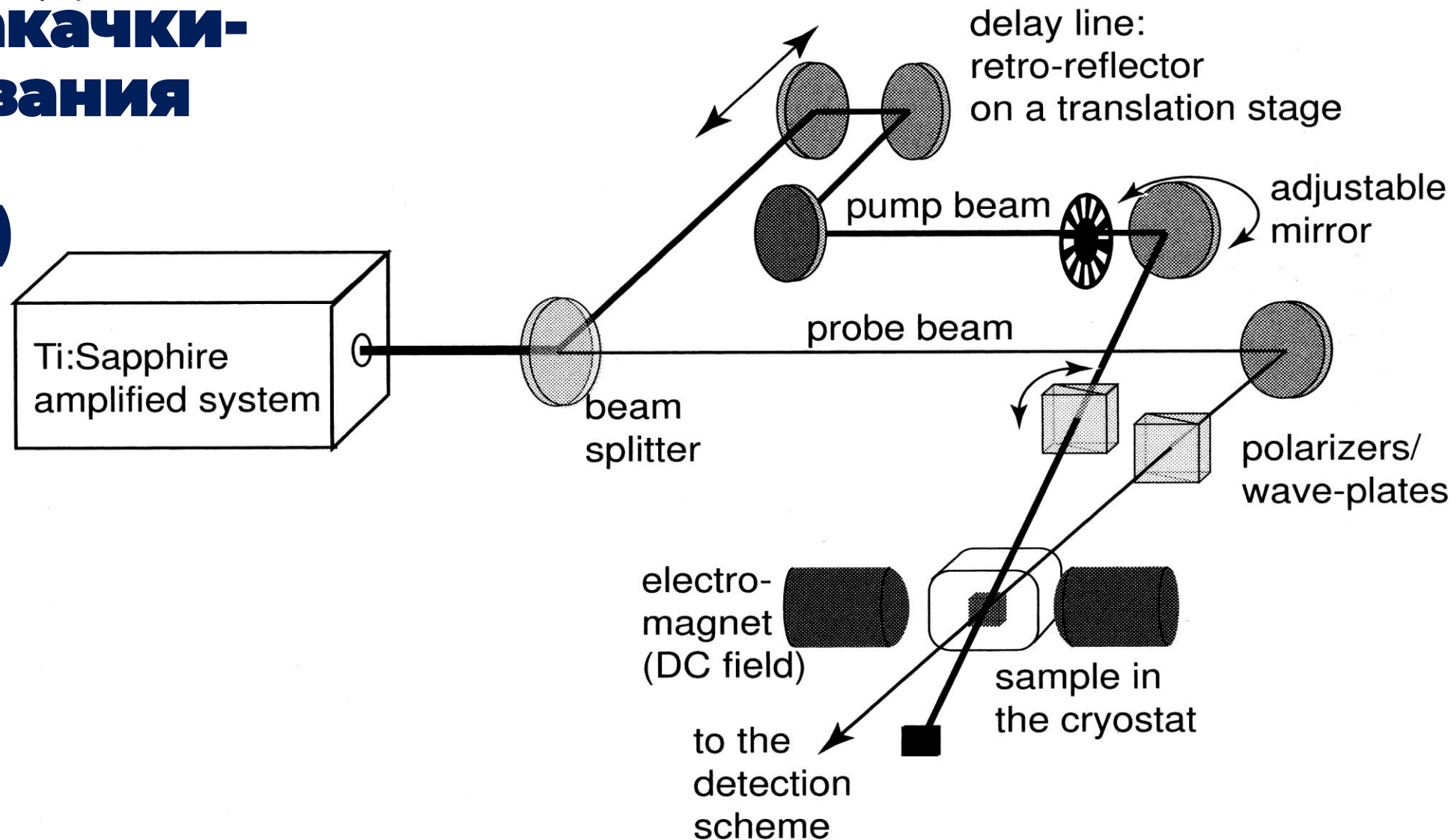
**Остаточная намагниченность
после воздействия импульса
с энергией 7 мДж/см² на
образец Ni толщиной 22 нм.
Сигнал нормирован на
сигнал в отсутствие
накачки.**



**Эффект не зависит от
поляризации света!**



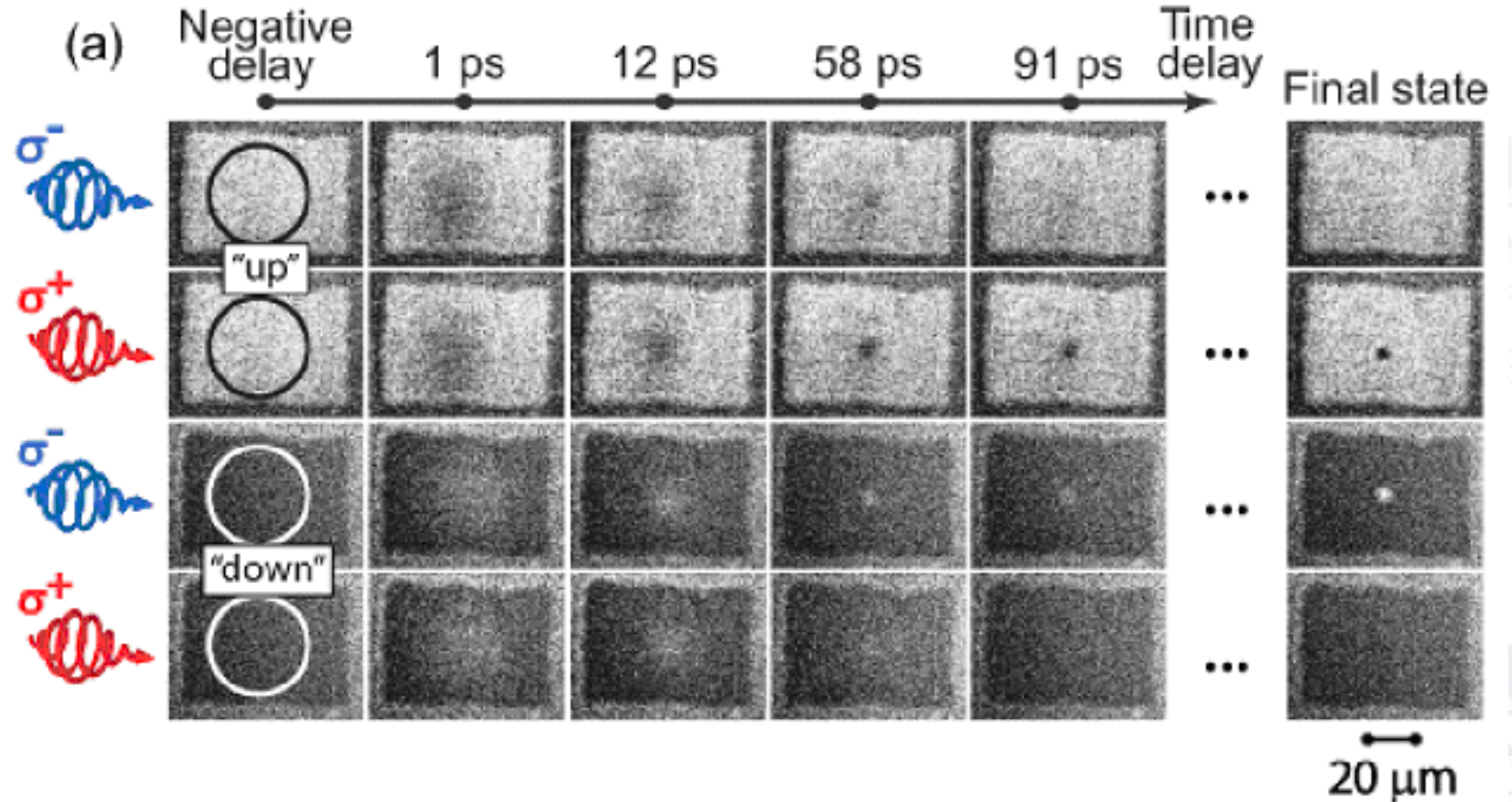
Метод накачки-зондирования (Эффект Фарадея)

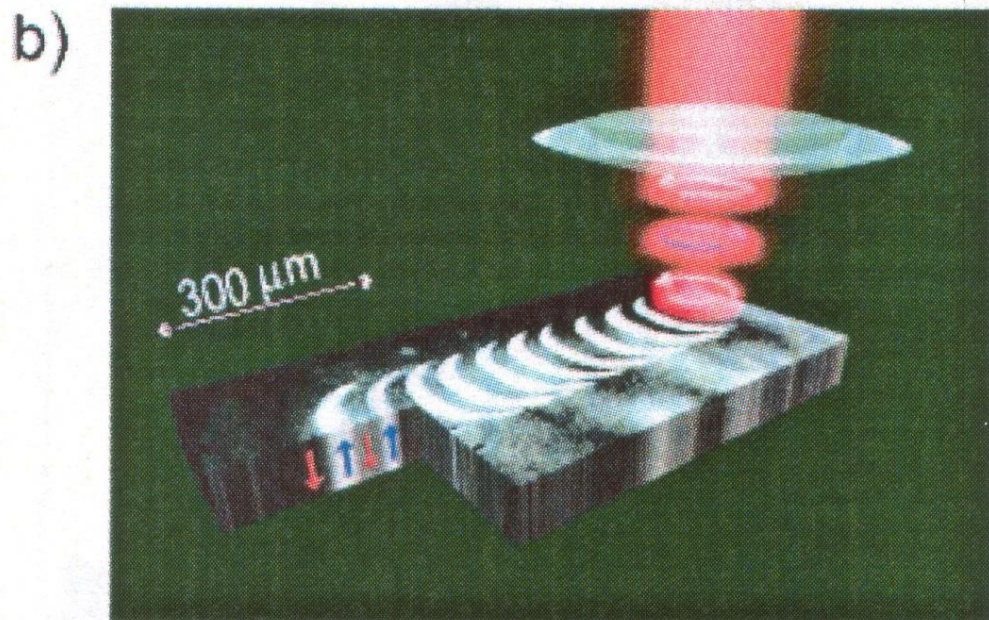


Эволюция намагниченности $\text{Gd}_{24}\text{Fe}_{66,5}\text{Co}_{9,5}$ после возбуждения циркулярно поляризованным светом противоположной киральности при комнатной температуре.

Перемагничивание светом

PHYS.REV.LET.103,
117201 (2009)



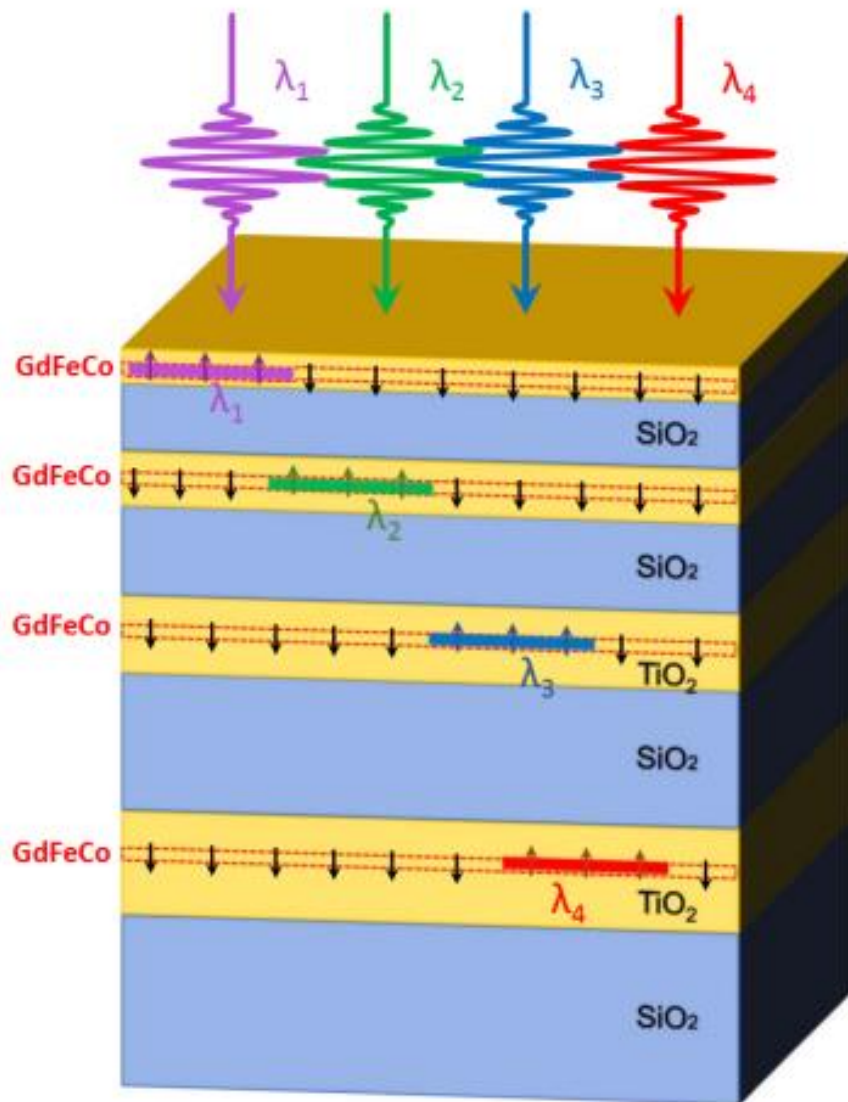


а. Доменная структура, полученная после прохождения со скоростью 50 мм/с циркулярно поляризованного света вдоль поверхности образца так, что каждый импульс создавал разное пятно. Энергия в импульсе 2,9 мДж/см².

•б. Демонстрация контраста полностью оптической записи магнитного бита. Это достигается сканированием циркулярно поляризованного лазерного луча с соответствующим направлением поляризации вдоль образца.

**IEEE Transaction on Magnetism,
v.44, N 7, 1905, 2008**





Чирпированный магнитофотонный кристалл для селективного послойного перемагничивания пленок GdFeCo.

- ✓ **Physics Letters A. 2011. T. 375, № 43. С. 3801–3803. 210.**
- ✓ **Optik. 2012. T. 123, № 2. С. 125–131.**



Магнетизм и свет

- Магнетизм
 - Виды магнитного порядка
 - Доменная структура ферромагнетиков и методы ее наблюдения
- Свет – электромагнитная волны
- Магнитооптика и оптомагнетизм
 - Основные магнитооптические эффекты
 - Высокоскоростная фотография
 - Магнетизм и время
 - Магнитооптика – единственный метод исследования динамики перемагничивания
 - Оптическое перемагничивание

