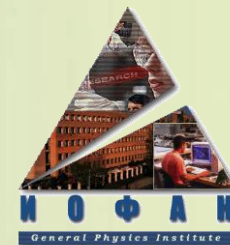




Магнитоэлектрические материалы: что это такое и как их можно использовать?

А.П. Пятаков

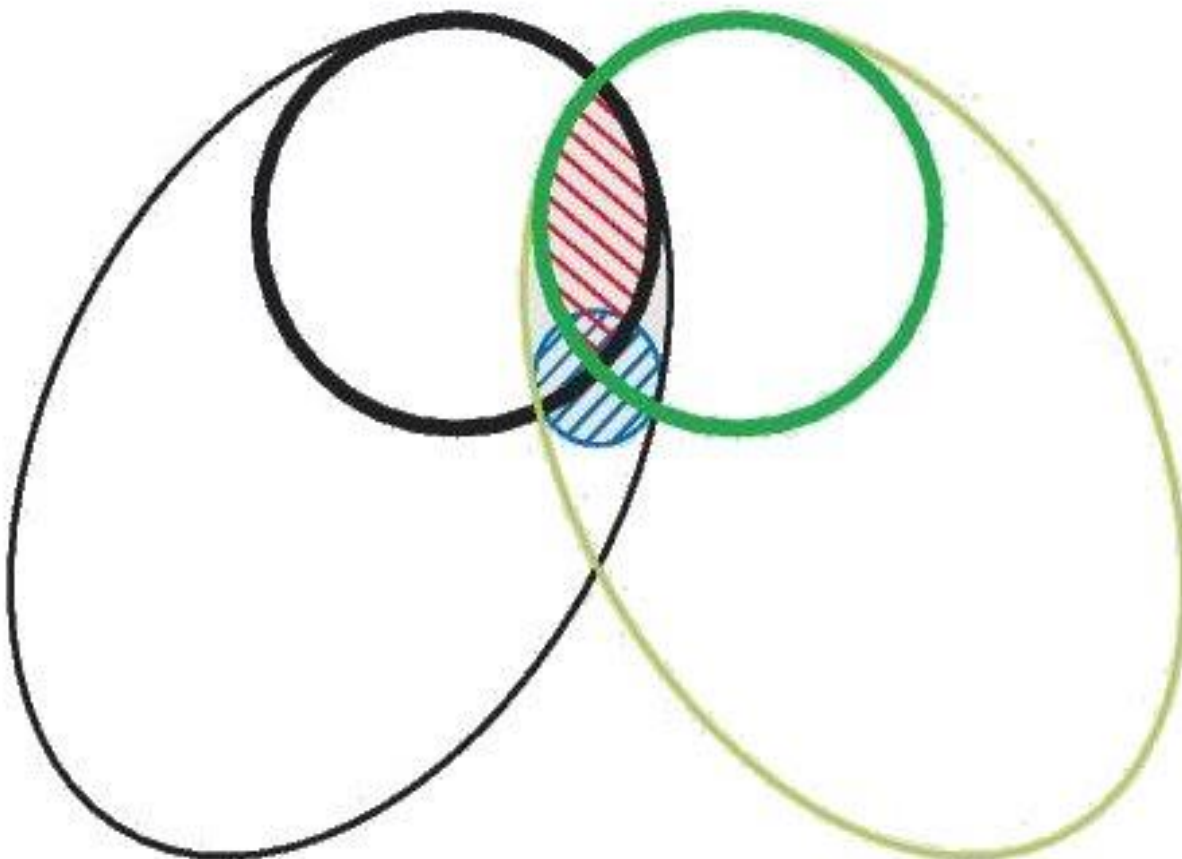
- 1) Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова
- 2) Институт Общей Физики им. А.М. Прохорова



Магнитоэлектрики и мультиферроики

Материалы

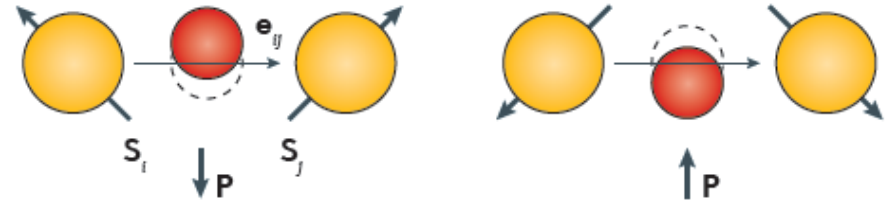
- Магнитно поляризуемые
- Ферромагнетики
- Электрически поляризуемые
- Сегнетоэлектрики
- ▨ Мультиферроики
- ▨ Магнитоэлектрики



Механизмы магнитоэлектричества

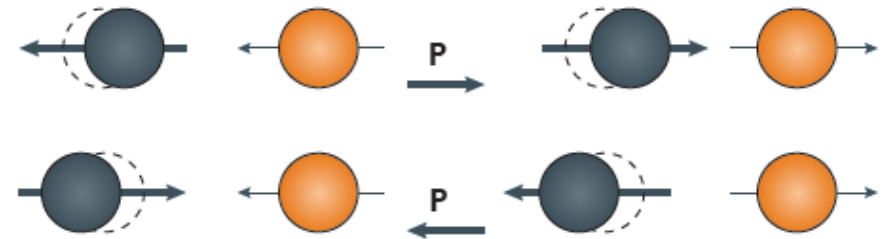
$$P \sim [S_i \times S_j]$$

Inverse Dzyaloshinskii–Moriya interaction



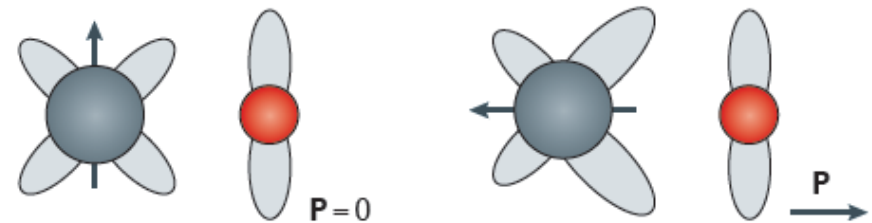
$$P \sim (S_i \cdot S_j)$$

Exchange striction



$$P \sim (S_i \cdot e_i)^2$$

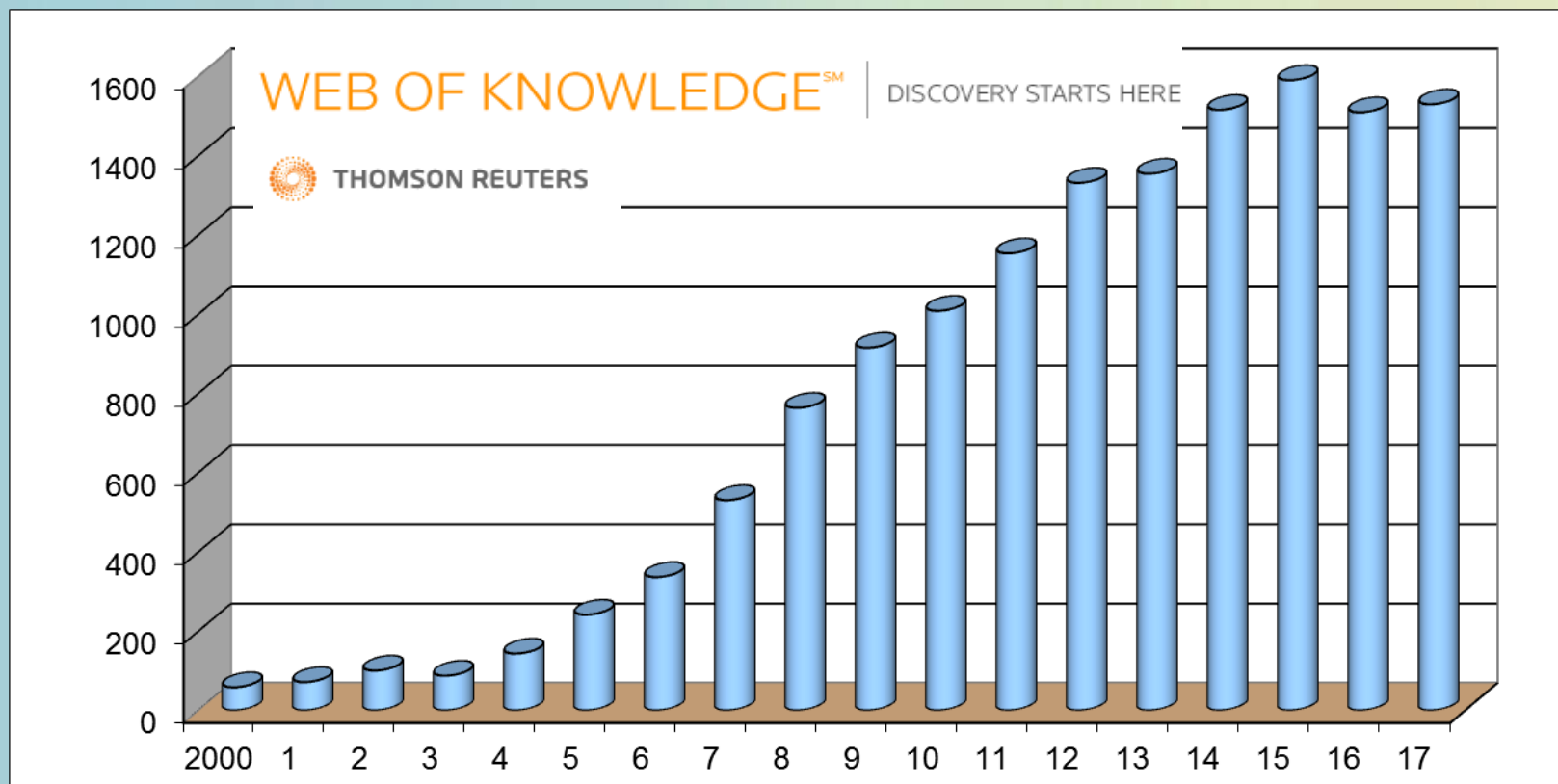
Spin-dependent p - d hybridization



O ²⁻	Fe ²⁺	Co ²⁺	Rare-earth ion
Bi ³⁺	Fe ³⁺	Mn ²⁺	Mn ³⁺

Магнитоэлектрики и мультиферроики

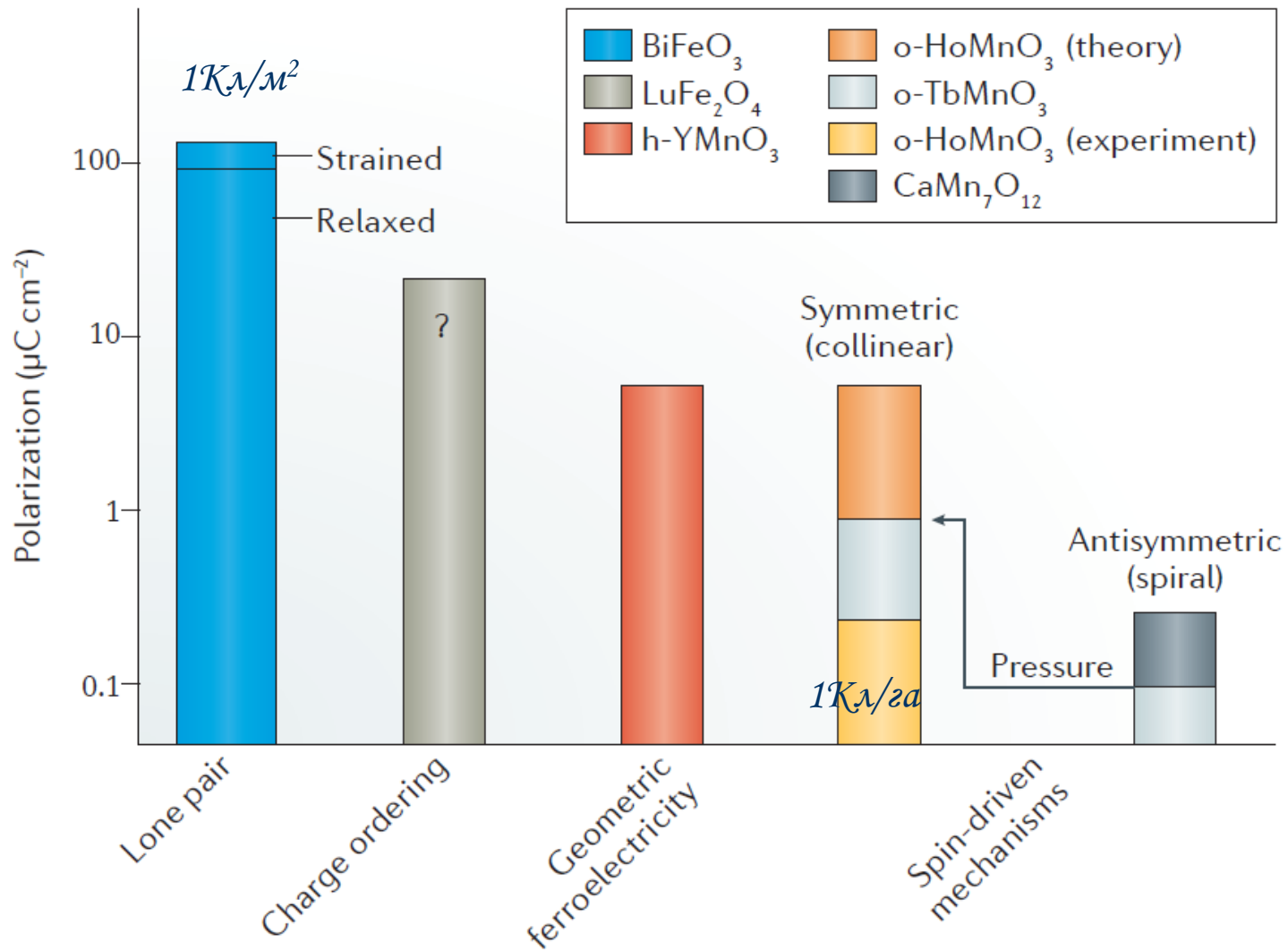
Публикационная активность



2000: Why there are so few magnetic ferroelectrics? (*N. Spaldin*)

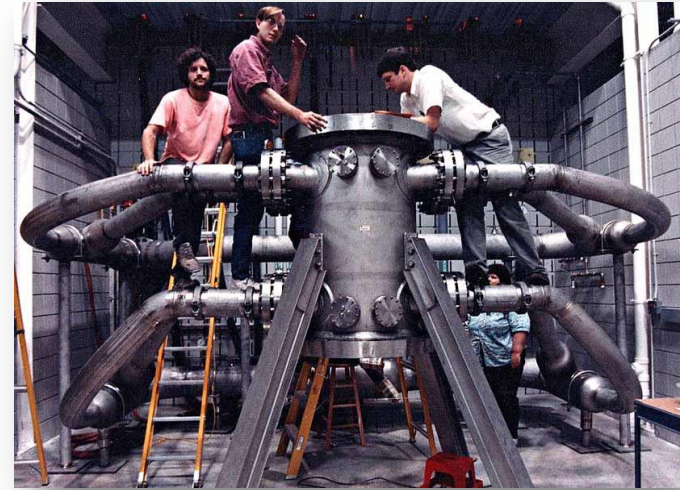
2011: Why there are so many? (*J.F. Scott, R. Blinc*).

Масштабы магнитоэлектричества



Проблемы

- Малые величины МЭ эффекта
=> большие поля



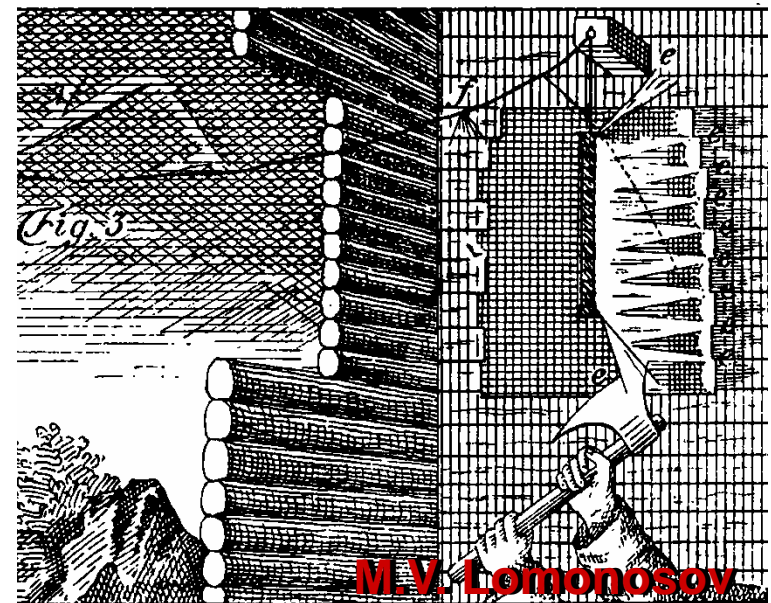
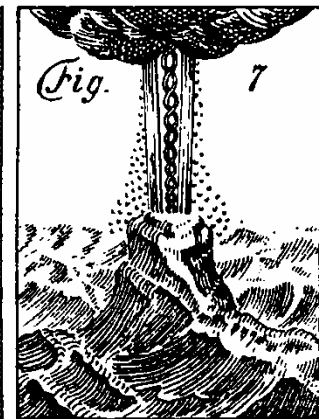
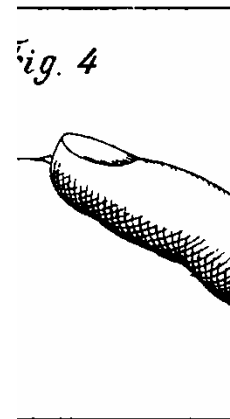
- Низкие температуры

О громоотводах



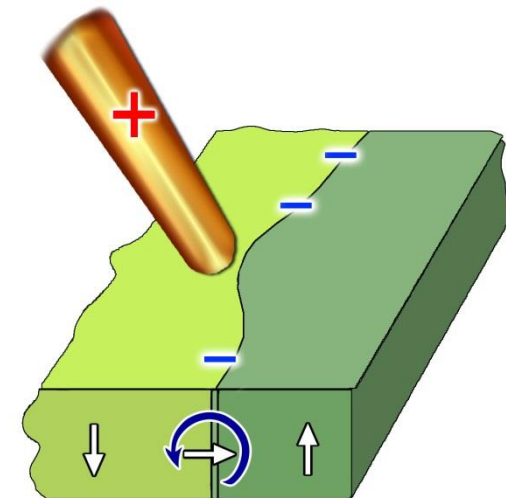
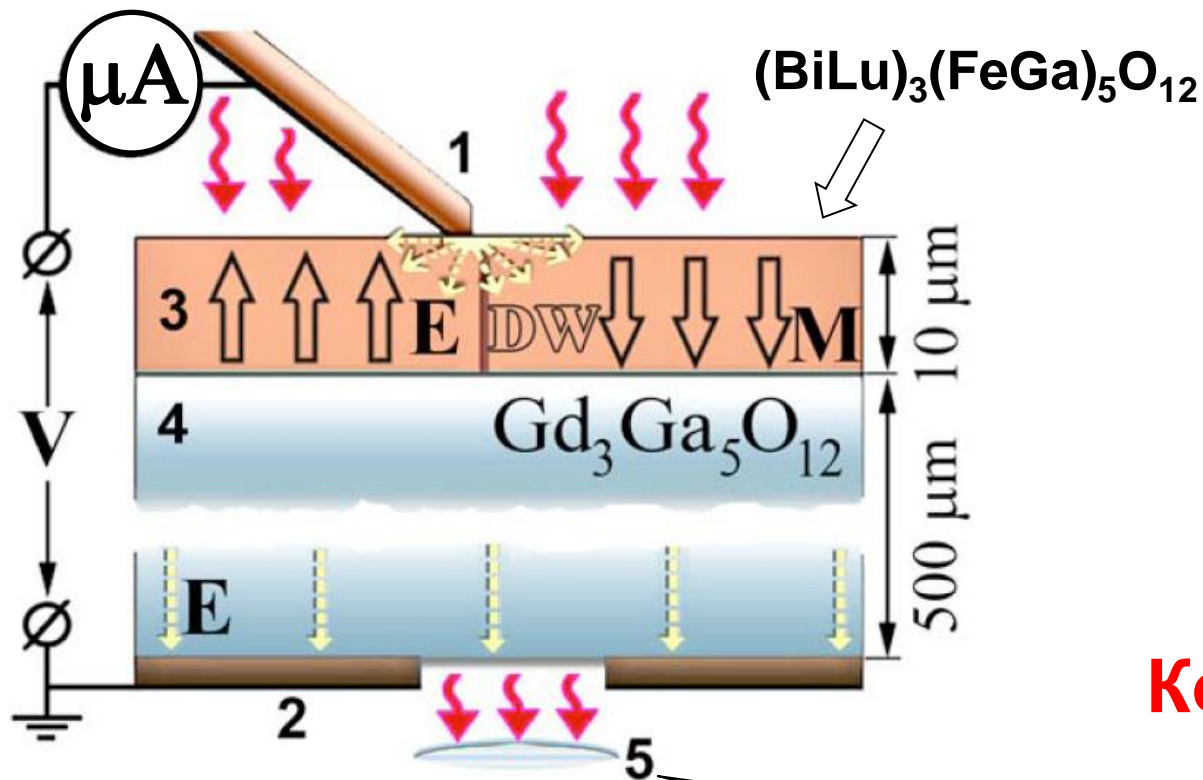
1752

B. Franklin



M.V. Lomonosov

«Электроakupунктура» магнитов



Комнатные T!

1. Медная (золотая) проволока

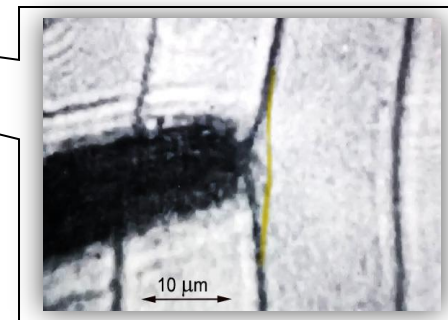
2. Заземляющий контакт

3. Пленка феррит-граната

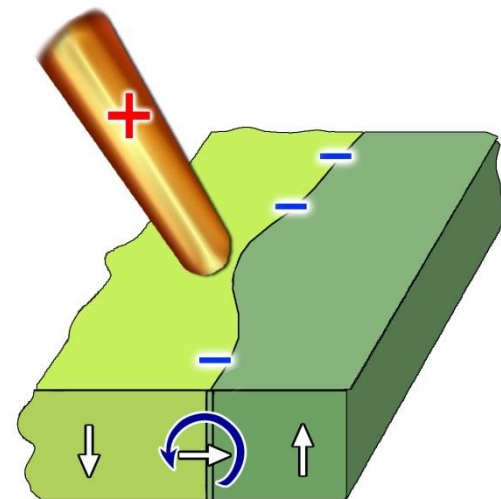
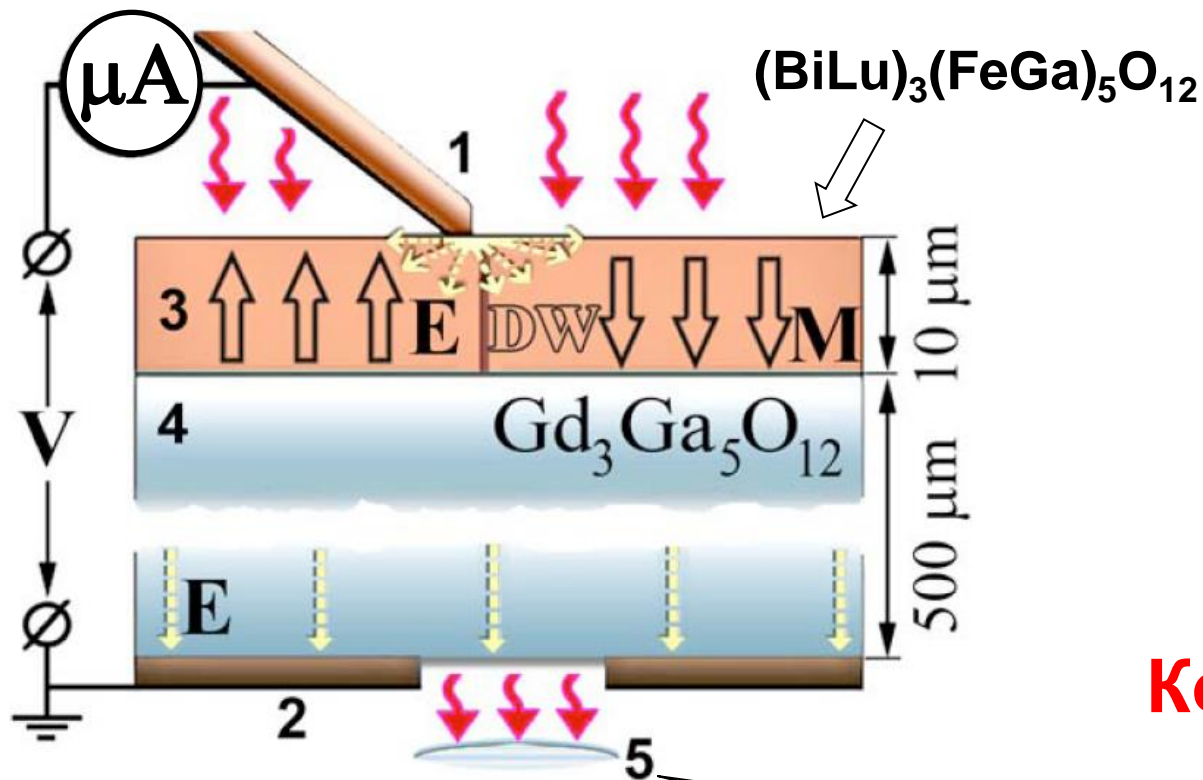
4. Подложка

5. Объектив

DW – доменная граница



«Электроакупунктура» магнитов



Комнатные T!

1. Медная (золотая) проволока

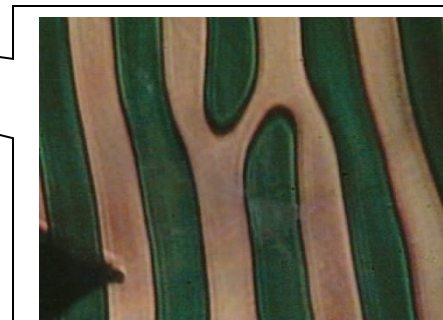
2. Заземляющий контакт

3. Пленка феррит-граната

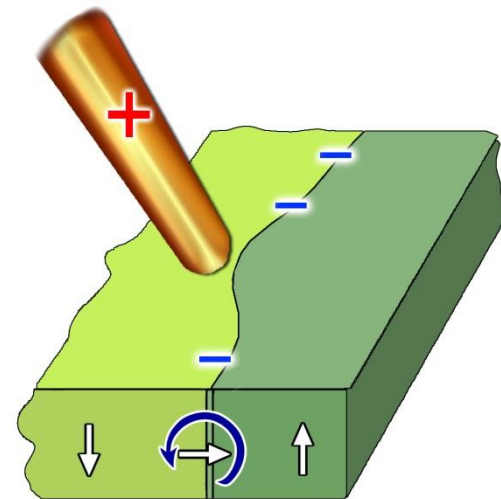
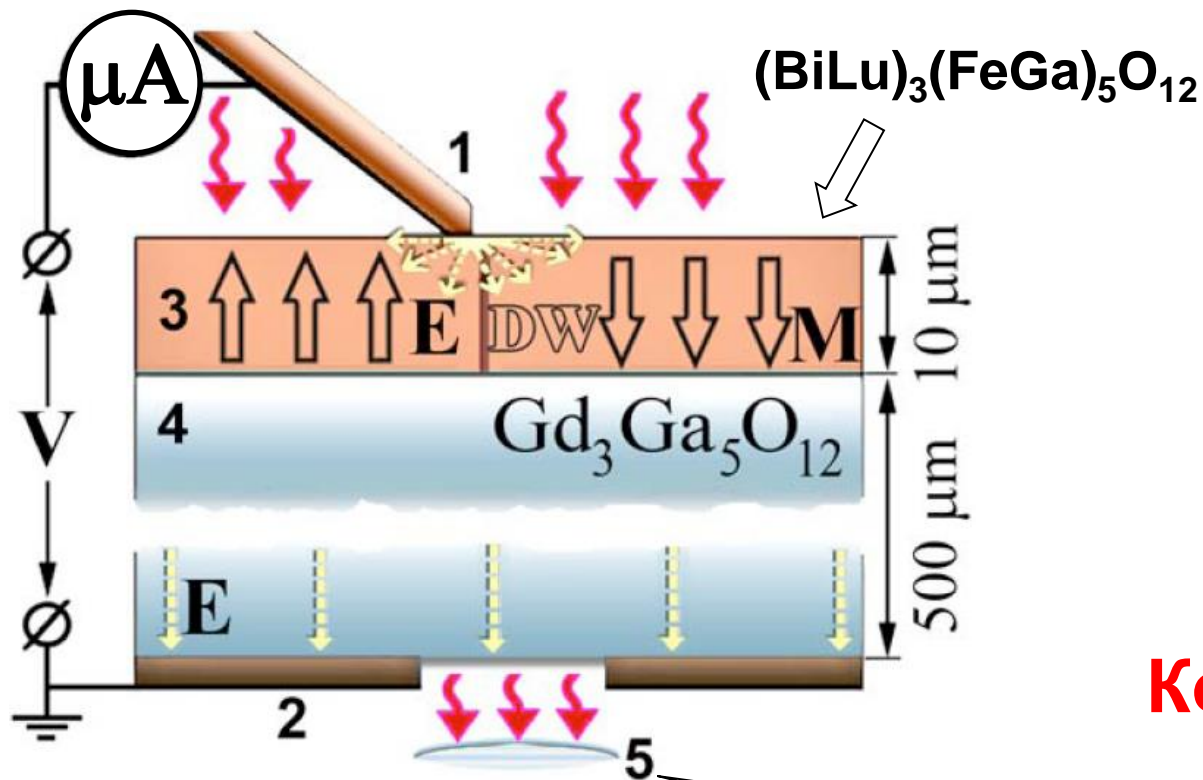
4. Подложка

5. Объектив

DW – доменная граница



«Электроакупунктура» магнитов



Комнатные T!

1. Медная (золотая) проволока

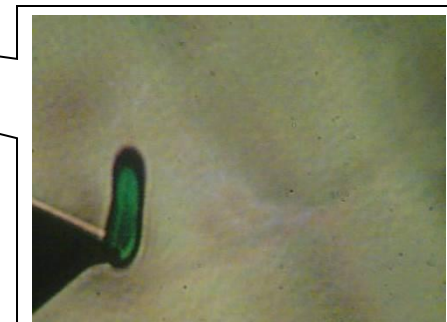
2. Заземляющий контакт

3. Пленка феррит-граната

4. Подложка

5. Объектив

DW – доменная граница



«Выдувание» ЦМД



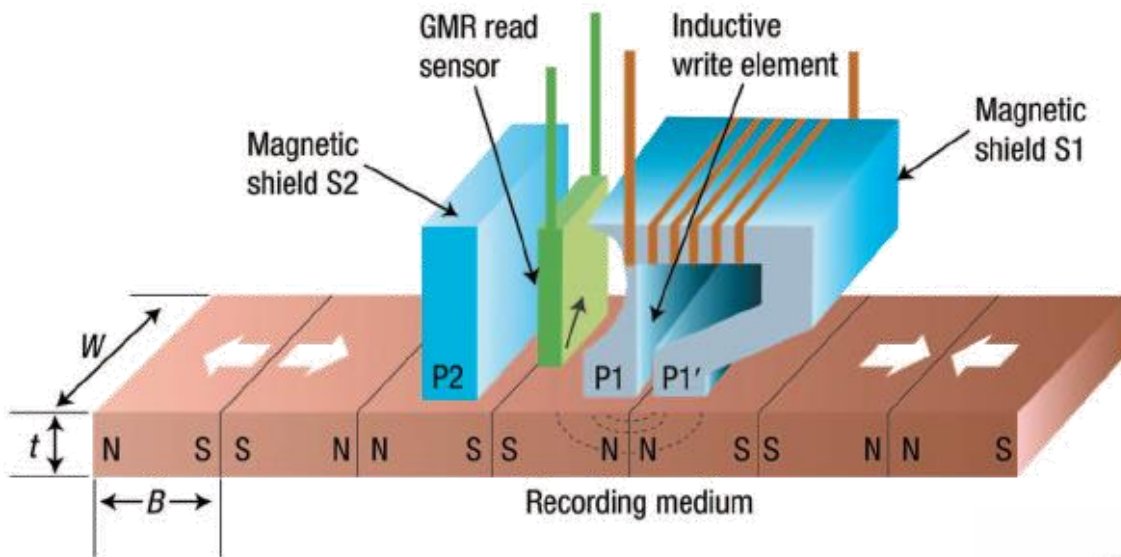
«Выдувание» ЦМД



«Выдувание» ЦМД



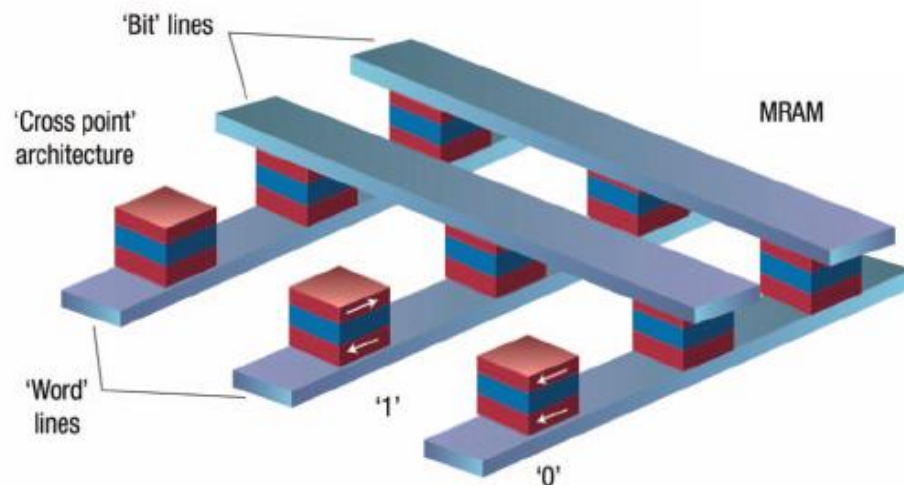
Магнитная электроника => спинтроника



A. Fert, Nobel Lecture:
Origin, development, and future of spintronics
Reviews of Modern Physics,
v. 80, 1517 (2008)

А. Ферт, Происхождение, развитие и перспективы спинтроники, Успехи Физических Наук, т. 178, с.1336

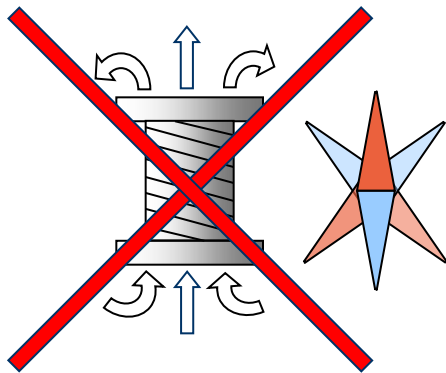
$$J_c = 10^6 - 10^7 \text{ A/cm}^2$$



Спинтроника без токов

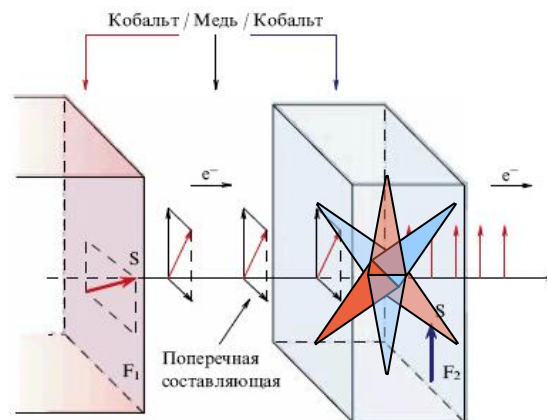
- нет омических потерь
- нет ограничений на быстродействие за счет времени пролета $t=L/V$

Миниатюризация



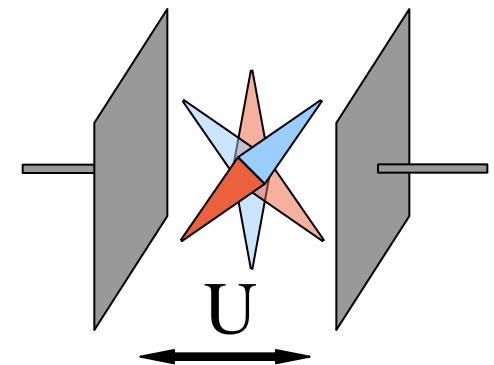
$$\Phi \sim I \cdot N / L = j S / L N$$

$$j \rightarrow \infty \text{ при } S \rightarrow 0$$



$$j = \text{const} = 10^7 \text{ А/см}^2$$

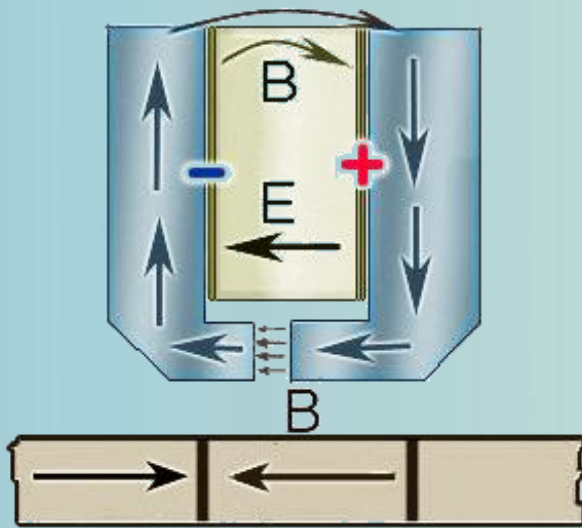
$$\text{при } S \rightarrow 0$$



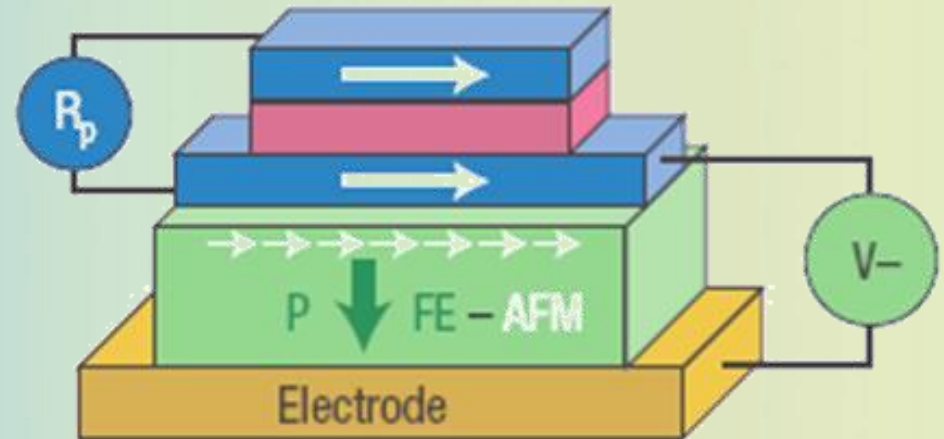
$$V \rightarrow 0 \text{ при } L \rightarrow 0$$

$$j \rightarrow 0 \text{ при } S \rightarrow 0$$

Приборы на МЭ эффектах



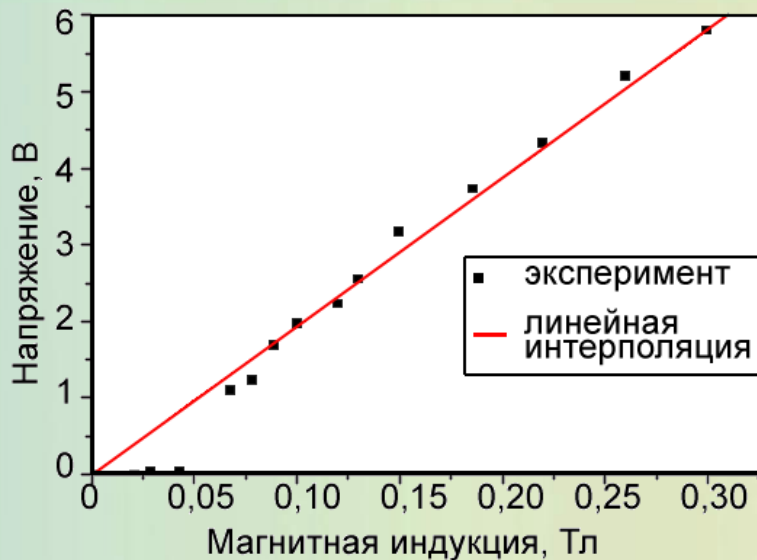
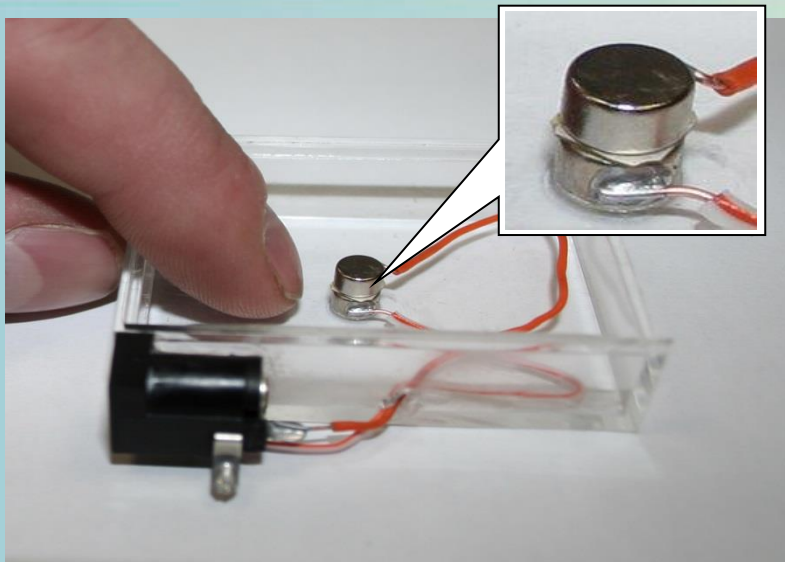
Ghoshal et al.
US patent 6,535,342



M. Bibes, A. Barthelemy
Nat. Mat. 7, 425 (2008)

- отсутствие ограничений по времени пролета $t=L/V$
- сниженные омические потери (“zero-current” gate controlled operation)

Магнитоэлектрический «сэндвич»



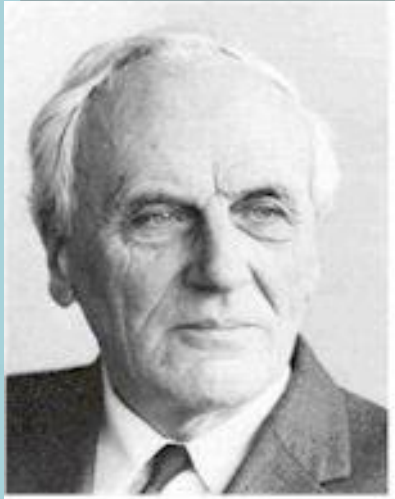
Intel ISEF: такие недетские детские проекты

Датчик магнитного поля на основе слоистой структуры «магнит/пьезоэлектрик/магнит» представляли в финале конкурсе Intel ISEF в Альбукерке пятнадцатилетний Коля Белиовский и шестнадцатилетний Ваня Щигрев из Физической исследовательской школы ...

«Компьютер Пресс» | Новости Интел



Магнитоэлектрическая электронная бумага

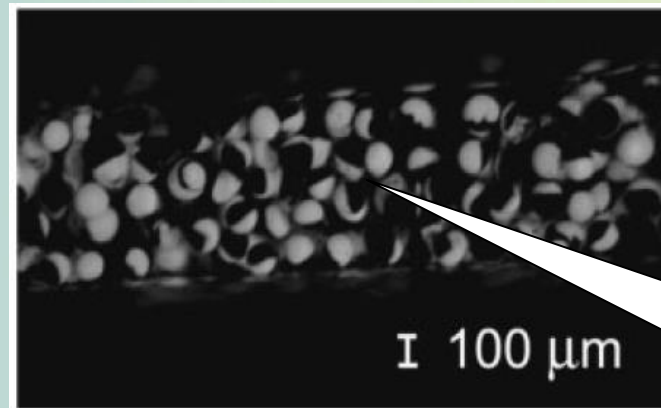


Бернард Теллеген, 1900-1990

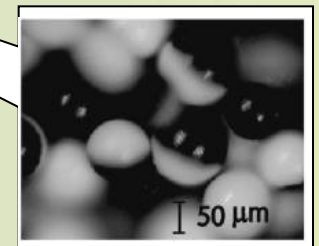
Magnetolectric media as a suspension of macroscopic particles that carry both electric and magnetic dipole moments.

B. D. H. Tellegen, Philips Res. Rep. 3 81 (1948)

$M \sim 1$ мГс, $\tau = 1$ с



A. Ghosh et al, Small, 20 Oct 2008



Композиты

1970-е Объемные композиты – «каша»

Проблемы:

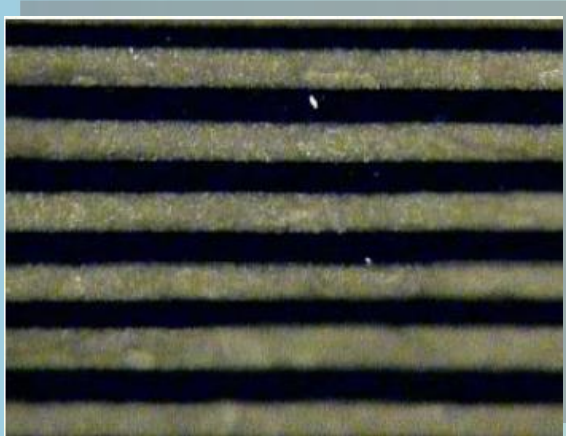
- Микротрещины
- Химическая реакция между компонентами при отжиге
- Образование проводящих каналов



2000-е МЭ ламинат – «слоеный пирог»

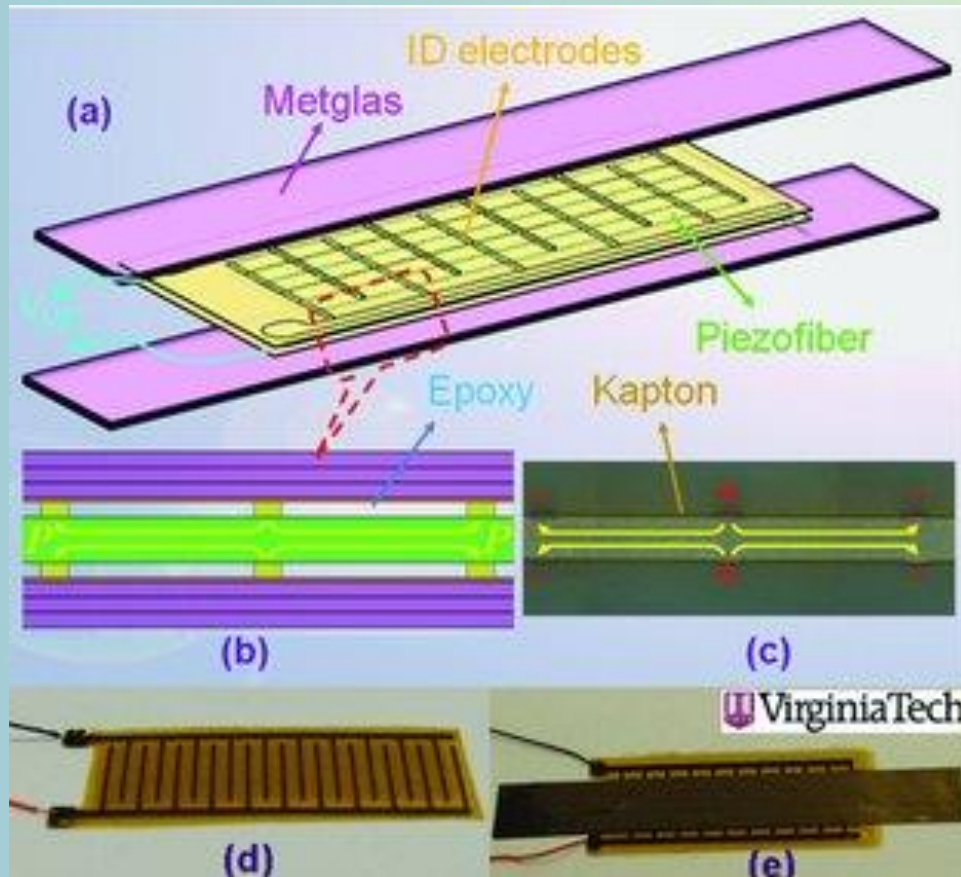
Решения:

- Компоненты упорядочены (в слои)
- Слои «выпекаются» отдельно
- Отсутствие проводимости поперек слоев



↑↓ 10-100 мкм

Магнитоэлектрические датчики



МЭ эффект

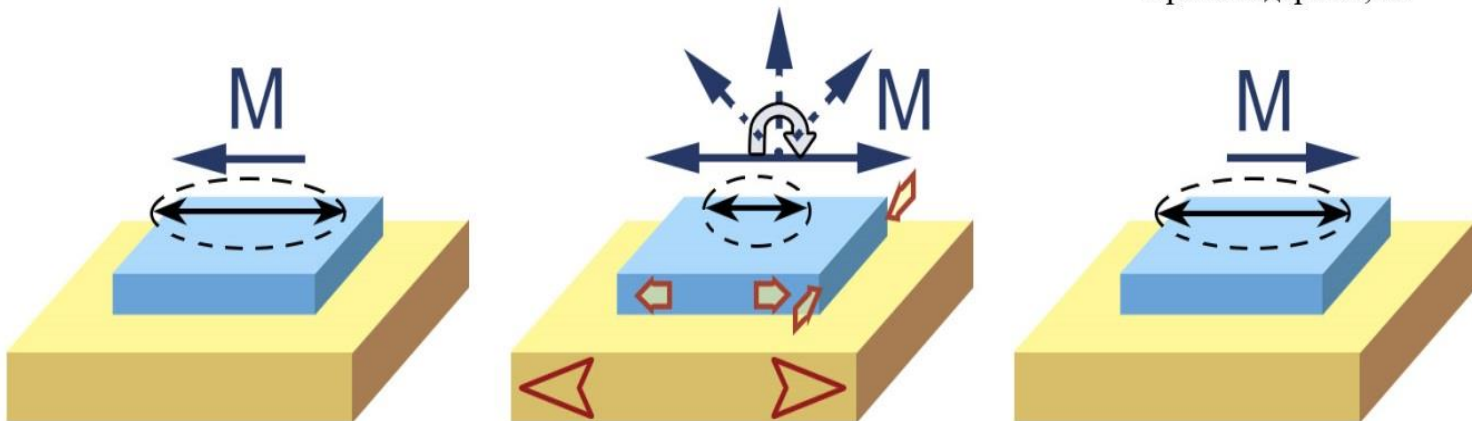
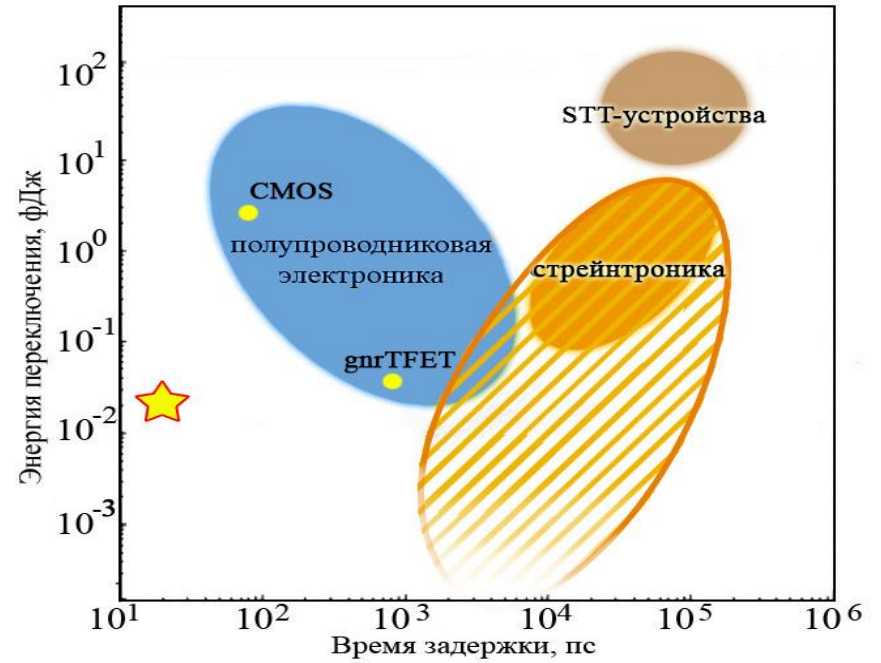
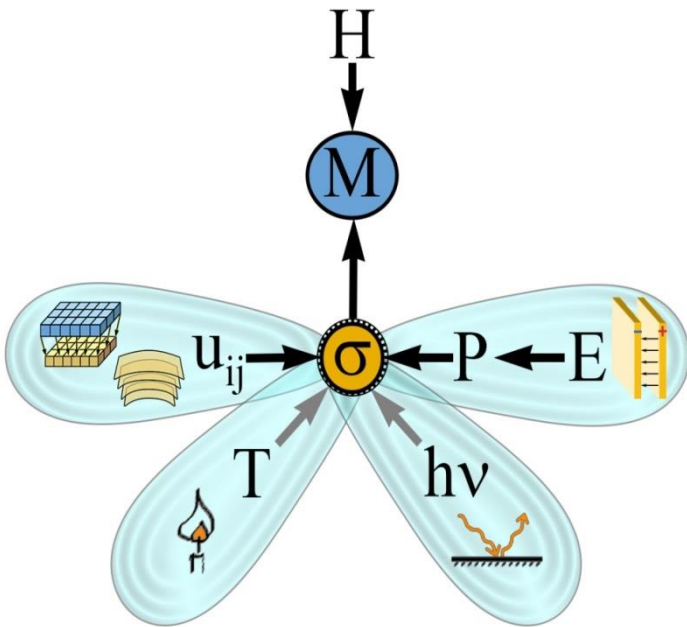
при поле смещения 8 Э
 $52 \text{ В}/(\text{см} \cdot \text{Э})$

Чувствительность $\sim 1 \text{ нТл}$
в диапазоне $1 \div 1000 \text{ Гц}$
Sh.Dong, et al
APL **85** 2307 (2004)

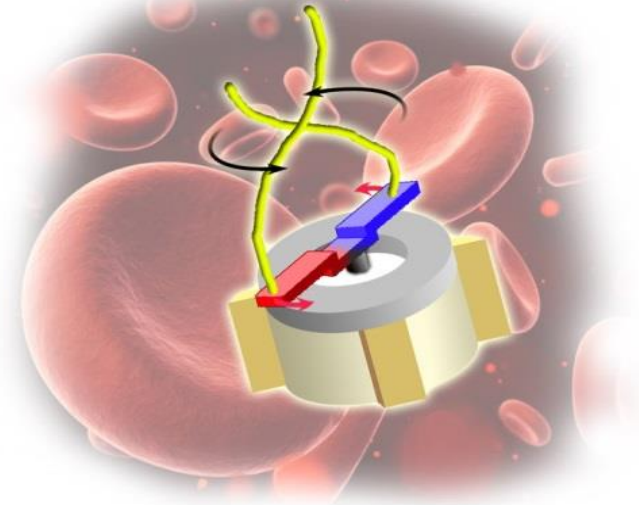
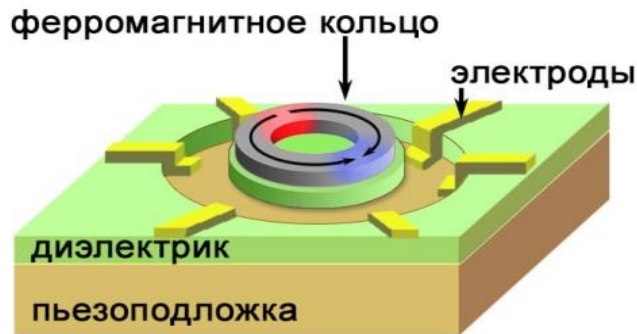
Уровень шума на $f=1 \text{ Гц}$
 $5.1 \text{ пТл} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$

Y. Wang, D. Gray, D. Berry, J. Gao, M. Li, J.-F. Li, and D. Viehland,
An Extremely Low Equivalent Magnetic Noise Magneto-electric Sensor, Adv. Mater. 2011, 23, 4111

Стрейтроника



Стрейнтронные микродвигатели



*J. L. Hockel, A. Bur, T. Wu, K. P. Wetzlar, and G. P. Carman, "Electric field induced magnetization rotation in patterned Ni ring/ $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ (1-0.32)- $[\text{PbTiO}_3]_{0.32}$ heterostructures," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, pp. 2012–2015, 2012.*

J. L. Hockel, "Deterministic Magnetization Control by Magnetoelastic Anisotropy and its Dependence on Geometry and Scale (PhD Theses)," University of California, Los Angeles, 2013.

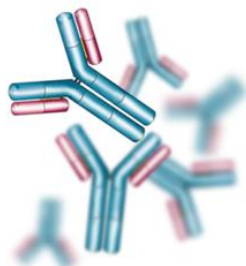
«Волшебная пуля»

Две теории иммунитета

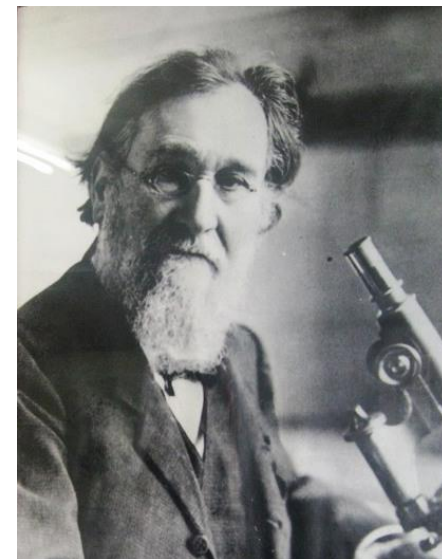


Пауль Эрлих
1854-1915

Гуморальный иммунитет
(молекулы белков-антител)



Клеточный иммунитет
(клетки-фагоциты,
«натуральные киллеры»)



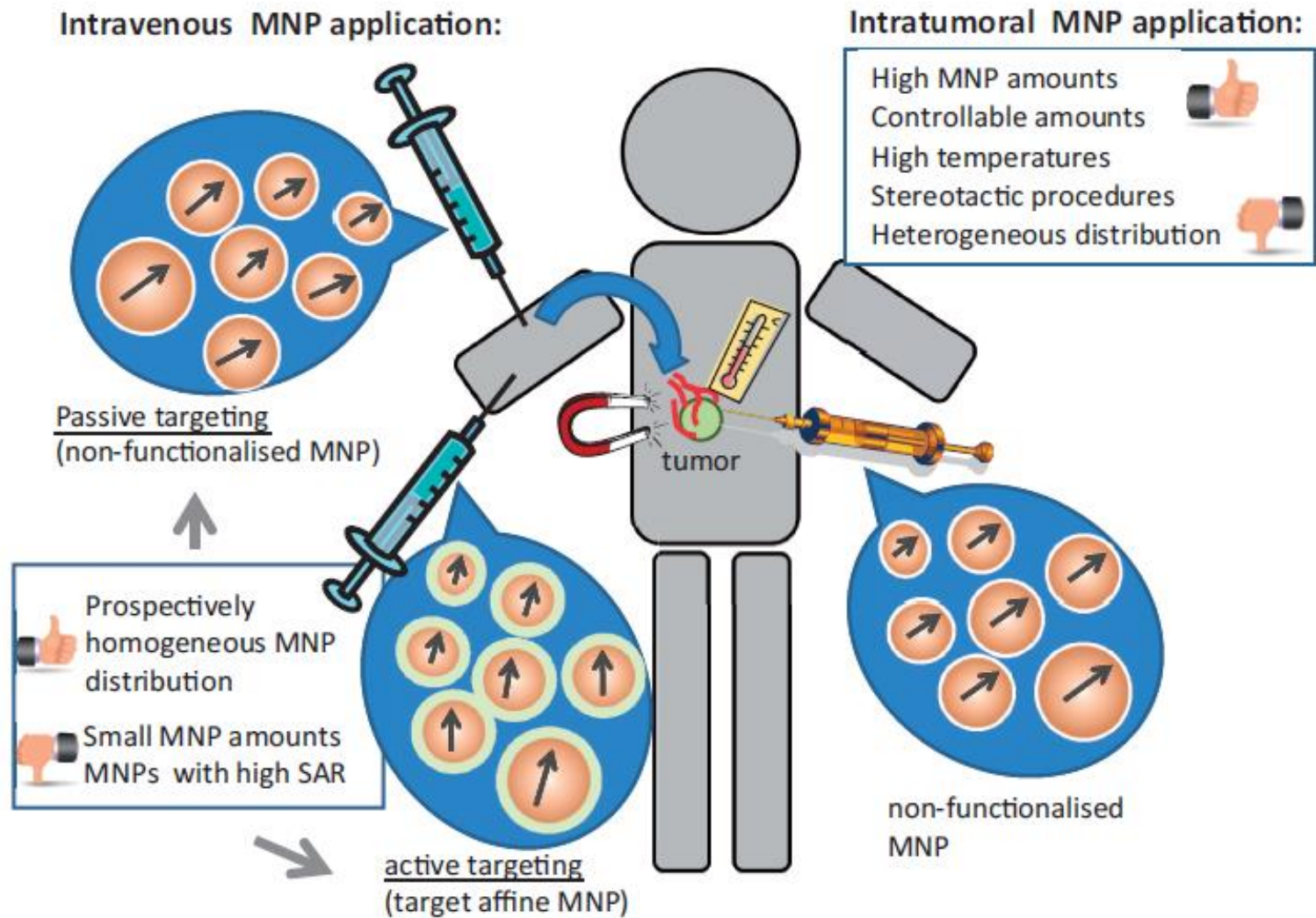
И.И. Мечников
1845-1916

Нобелевская премия по физиологии 1908

Волшебная пуля – лекарство, которое само найдет и уничтожит источник болезни, не затрагивая здоровые органы и ткани организма.



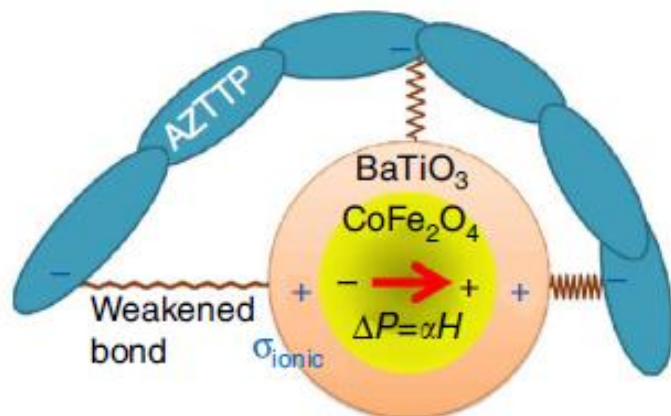
Магнитные наночастицы



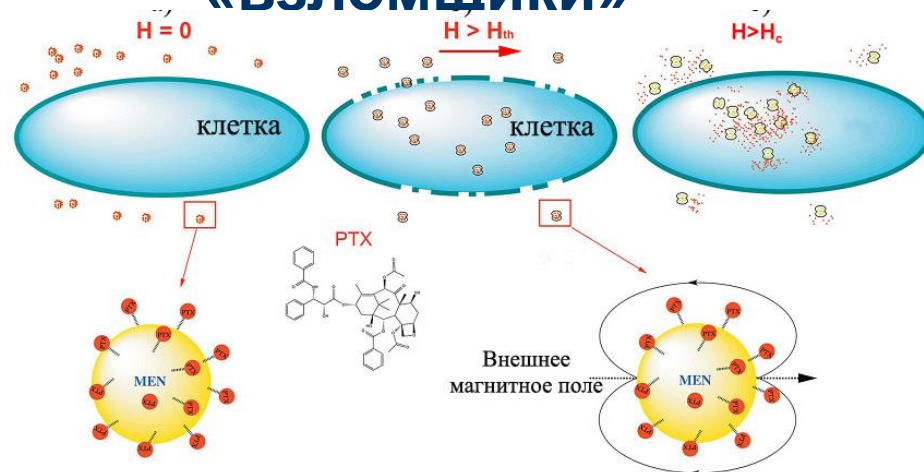
Магнитоэлектрическая доставка лекарств

Магнитоэлектрические частицы

- «ПОСТАВЩИКИ»



- «ВЗЛОМЩИКИ»



Nature Communication **4**, 1707 (2013).

Scientific Reports, **3**, 2953 (2013)



Заключение

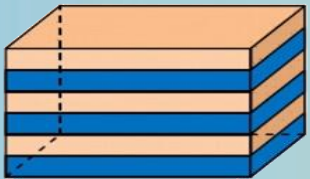
Проблемы:

- Малые величины МЭ эффекта
- Низкие температуры



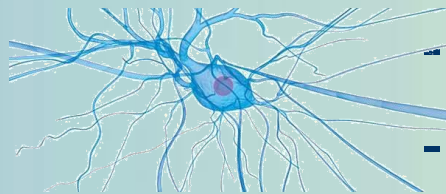
Решения:

- Миниатюризация
- Композиты



Перспективы:

- Энергосберегающая электроника
- Микродвигатели
- Биомедицинские приложения



Спасибо за внимание!