

НАУКА НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО
Научно-практическая конференция

15 мая 2025

**Спинтроника: как можно
обойтись без заряда электрона.**

Андрей Александрович СТАШКЕВИЧ

Professeur Emérite

à l'Université Sorbonne Paris Nord (Paris 13)

*Научный сотрудник кафедры ФЭТ, научно-исследовательской лаборатории
магноники и радиофотоники им. Б.А. Калиникова (ЛМРФ)*

План доклада

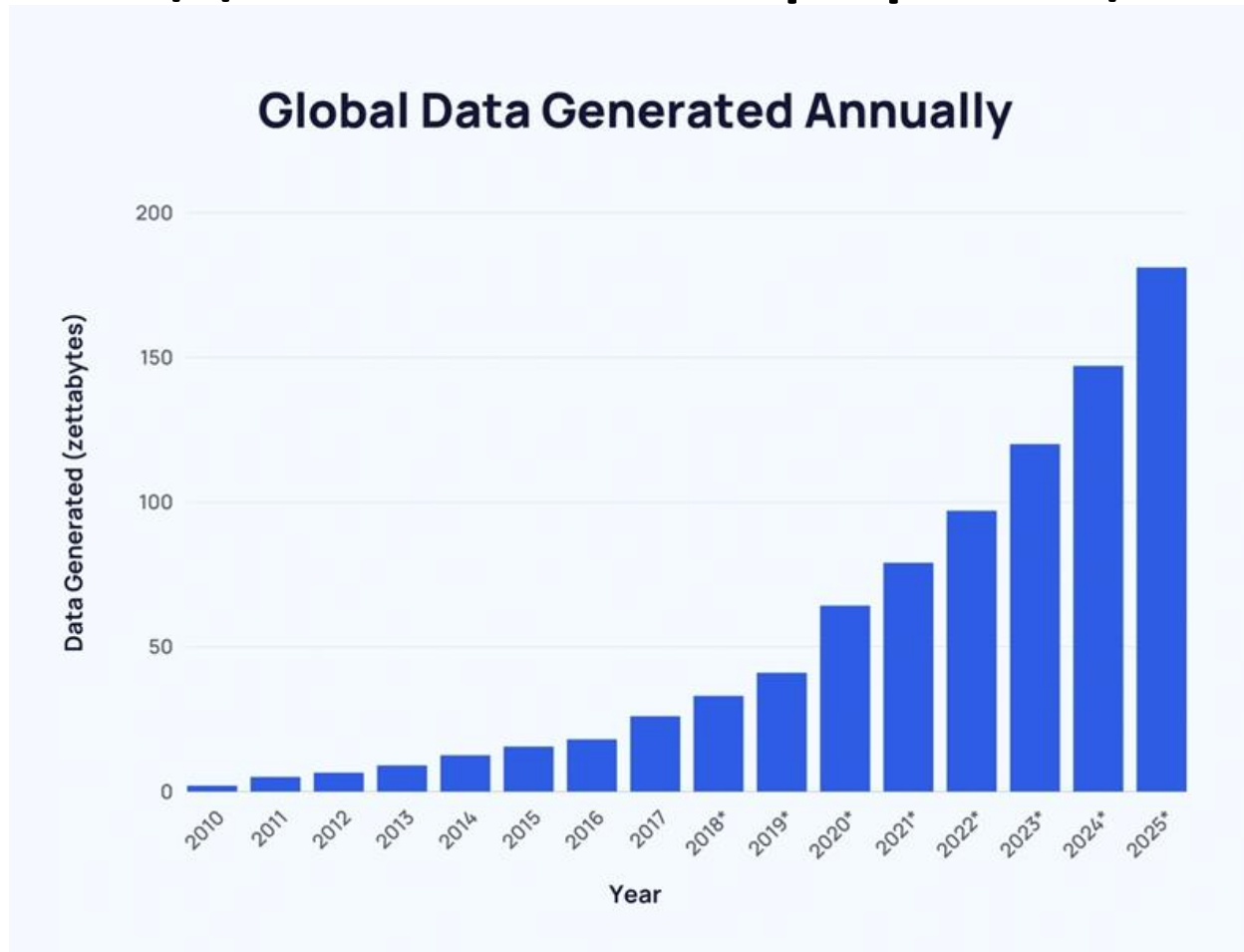
1. Вступление (истоки спинтроники)
2. Спиновая электроника ... немного физики
 - ❖ *Что такое спин?*
 - ❖ *Изотропное обменное взаимодействие (Гейзенберга)*
 - ❖ *Спин-орбитальное взаимодействие*
3. Механизмы переноса спина
4. Спинтроника: что реально она даёт?
 - ❖ *Гигантское магнитное сопротивление*
 - ❖ *Магноника (уравнение Ландау-Лифшица)*
 - ❖ *Спин-трансферные наноосцилляторы СВЧ*
 - ❖ *Спин-Орбитроника – новое перспективное направление*
 - ❖ *Терагерцовая спинтроника...*
5. Заключение

1. Вступление (истоки спинтроники)

Что не так с электроникой традиционной?

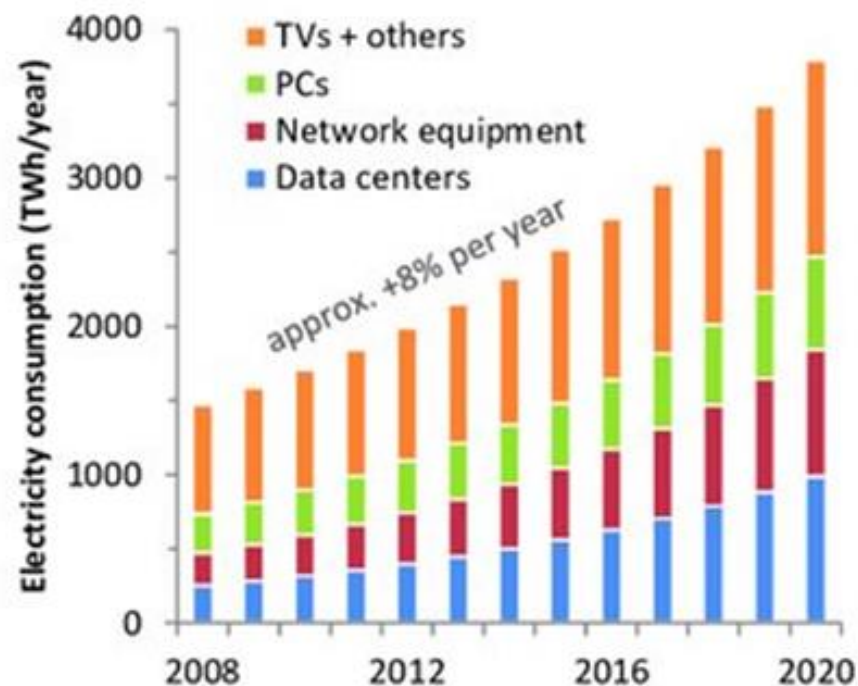
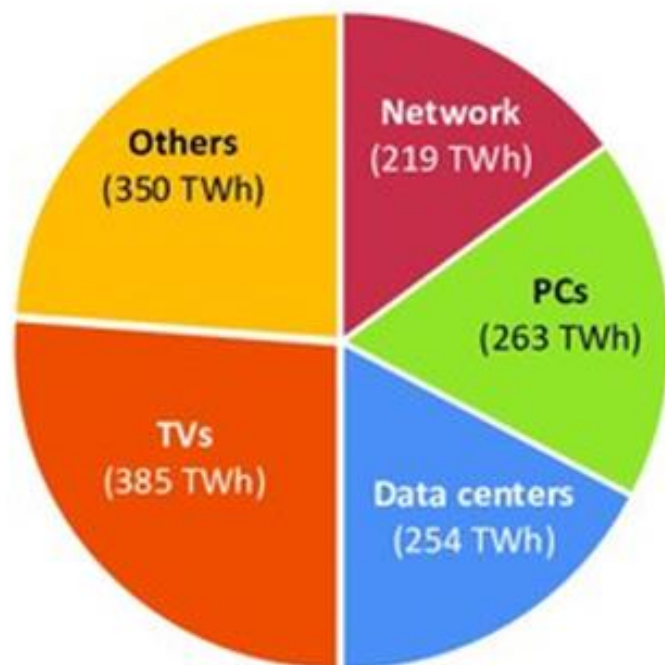
- Чудовищное
энергопотребление +
миниатюризация (прежде
всего...)
- *Выход на атомные масштабы*

Чудовищное количество создаваемой информации

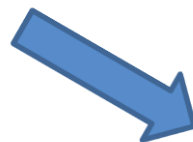


- Zettabyte (ZB) = 2^{70} = 1 180 591 620 717 411 303 424 = $1.18 \cdot 10^{21}$ Bytes.

Чудовищное энергопотребление



Магнетизм



Спинтроника

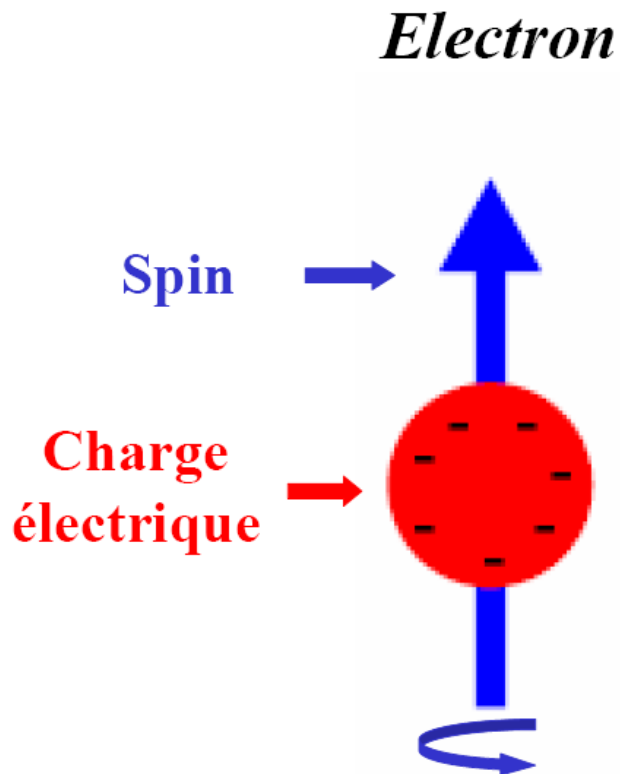
Электроника



2. Спиновая электроника... немного физики

❖ Что такое спин?

Спин (от англ. *Spin*, – «вращение, вращать(-ся)») – собственный момент импульса электрона



It is now the spin - internal angular momentum - of electrons, rather than their charge, that is opening up new perspectives in modern electronics

Сам термин «спин» в науку ввели [С. Гаудсмит](#) и [Д. Уленбек](#) в 1926 г

G. E. Uhlenbeck, S. Goudsmit. Spinning Electrons and the Structure of Spectra // Nature. — 1926. — Vol. 117. — P. 264—265.

Instituut voor Theoretische Natuurkunde,
Leyden, December 1925.

Letters to the Editor.

[The Editor does not hold himself responsible for opinions expressed by his correspondents. Neither can he undertake to return, nor to correspond with the writers of, rejected manuscripts intended for this or any other part of NATURE. No notice is taken of anonymous communications.]

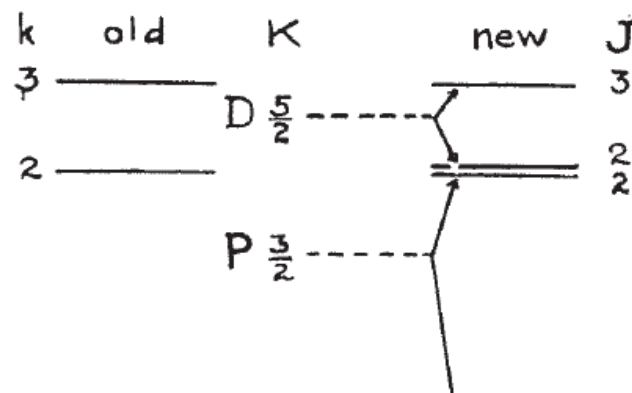
Spinning Electrons and the Structure of Spectra.

So far as we know, the idea of a quantised spinning of the electron was put forward for the first time by A. K. Compton (*Journ. Frankl. Inst.*, Aug. 1921, p. 145), who pointed out the possible bearing of this idea on the origin of the natural unit of magnetism. Without being aware of Compton's suggestion, we have directed attention in a recent note (*Naturwissenschaften*, Nov. 20, 1925) to the possibility of applying the spinning electron to interpret a number of features of the quantum theory of the Zeeman effect, which were brought to light by the work especially of van Lohuizen, Sommerfeld, Landé and Pauli, and also of the analysis of complex spectra in general. In this letter we shall try to show how our hypothesis enables us to overcome certain fundamental difficulties which have hitherto hindered the interpretation of the results arrived at by those authors.

To start with, we shall consider the effect of the spin on the manifold of stationary states which corresponds to motion of an electron round a nucleus. On account of its magnetic moment, the electron will be acted on by a couple just as if it were

this moment of momentum is given by $Kh/2\pi$, where $K = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}$. The total angular momentum of the atom is $Jh/2\pi$, where $J = 1, 2, 3$. The symbols K and J correspond to those used by Landé in his classification of the Zeeman effects of the optical multiplets. The letters S, P, D also relate to the analogy with the structure of optical spectra which we consider below. The dotted lines represent the position of the energy levels to be expected in the absence of the spin of the electron. As the arrows indicate, this spin now splits each level into two, with the exception of the level $K = \frac{1}{2}$, which is only displaced.

In order to account for the experimental facts, the resulting levels must fall in just the same places as the levels given by the older theory. Nevertheless, the two schemes differ fundamentally. In particular, the new theory explains at once the occurrence of certain components in the fine structure of the hydrogen spectrum and of the helium spark spectrum



HAVING had the opportunity of reading this interesting letter by Mr. Goudsmit and Mr. Uhlenbeck, I am glad to add a few words which may be regarded as an addition to my article on atomic theory and mechanics, which was published as a supplement to NATURE of December 5, 1925. As stated there, the attempts which have been made to account for the properties of the elements by applying the quantum theory to the nuclear atom have met with serious difficulties in the finer structure of spectra and the related problems. In my article expression was given to the view that these difficulties were inherently connected with the limited possibility of representing the stationary states of the atom by a mechanical model. The situation seems, however, to be somewhat altered by the introduction of the hypothesis of the spinning electron which, in spite of the incompleteness of the conclusions that can be derived from models, promises to be a very welcome supplement to our ideas of atomic structure. In fact, as Mr. Goudsmit and Mr. Uhlenbeck have described in their letter, this hypothesis throws new light on many of the difficulties which have puzzled the workers in this field during the last few years. Indeed, it opens up a very hopeful prospect of our being able to account more extensively for the properties of elements by means of mechanical models, at least in the qualitative way characteristic of applications of the correspondence principle. This possibility must be the more welcomed at the present time, when the prospect is held out of a quantitative treatment of atomic problems by the new quantum mechanics initiated by the work of Heisenberg, which aims at a precise formulation of the correspondence between classical mechanics and the quantum theory.

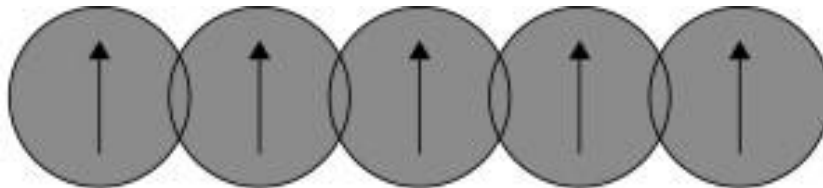
N. BOHR.

Copenhagen, January 1926.

❖ Изотропное обменное взаимодействие

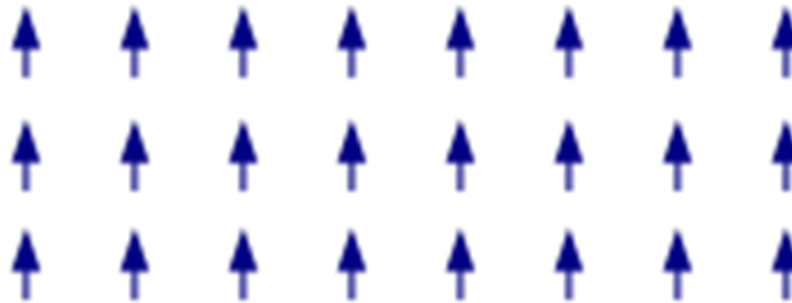
Модель Гейзенберга

$$E_H = \sum_{\langle i,j \rangle} J_{ij} (\vec{S}_i \cdot \vec{S}_j)$$



(а)

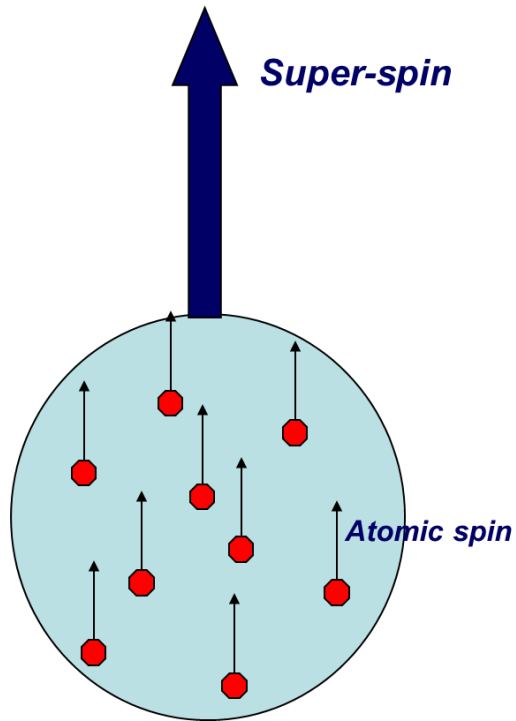
Перекрывание орбиталей



Ферромагнитное состояние

❖ Намагниченность $\vec{M}$

Это магнитный момент единицы объёма вещества:

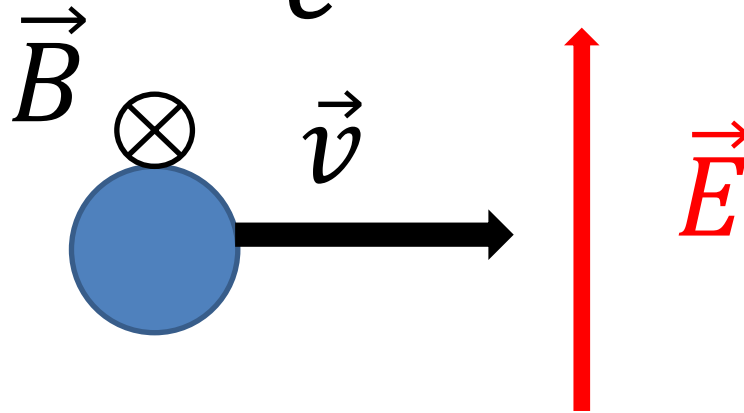


$$\vec{M} = \frac{\sum_i \vec{\mu}_i}{V}$$

❖ Спин-орбитальное взаимодействие (движение электрона в электрическом поле)

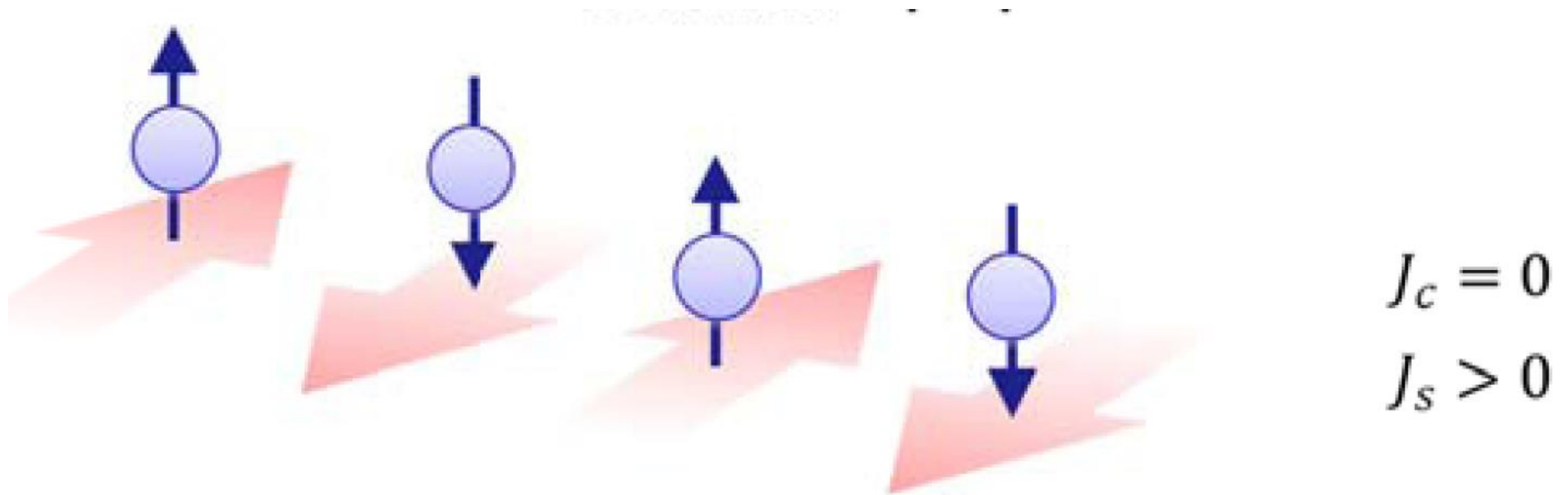
Преобразования Лоренца для
электрического поля

$$\vec{B} = -\frac{1}{c^2} (\vec{v} \times \vec{E})$$



3. Механизмы переноса спина

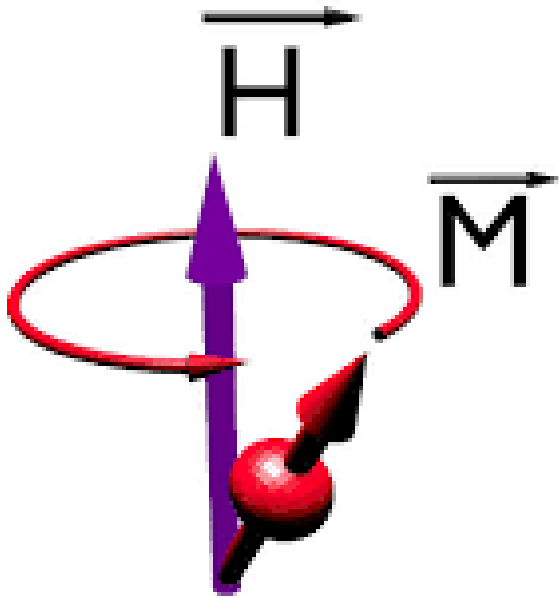
- **Спин-поляризованный ток**



Только в металлах (проводниках).

- ***Спиновые волны***

Уравнение Ландау — Лифшица (гармонический осциллятор)

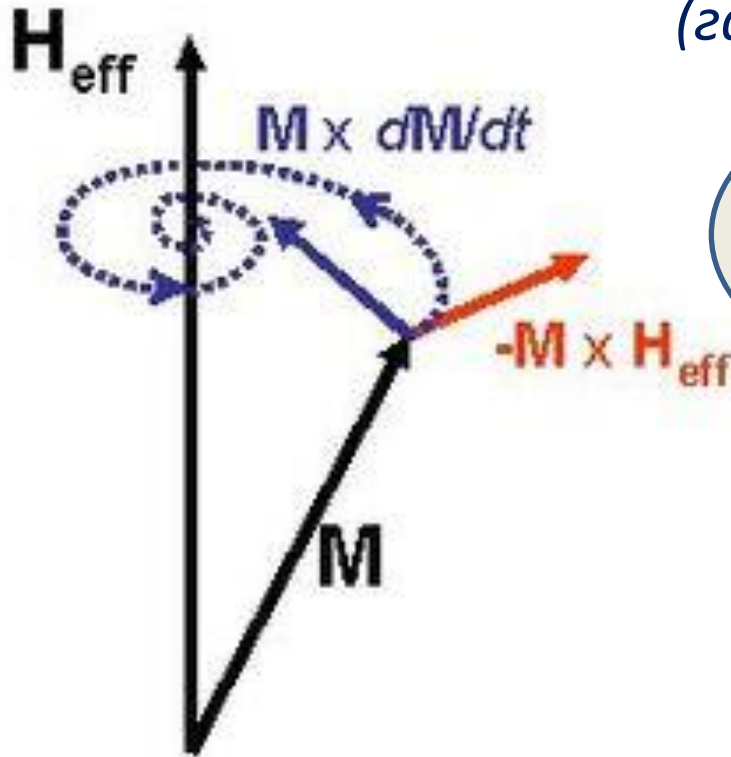


$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma(\vec{M} \times \vec{H}_{eff})$$

Гармоническая прецессия – Ферромагнитный резонанс (ФМР)

Уравнение Ландау — Лифшица — Гильберта

Гармоническая прецессия
(гармонический осциллятор)

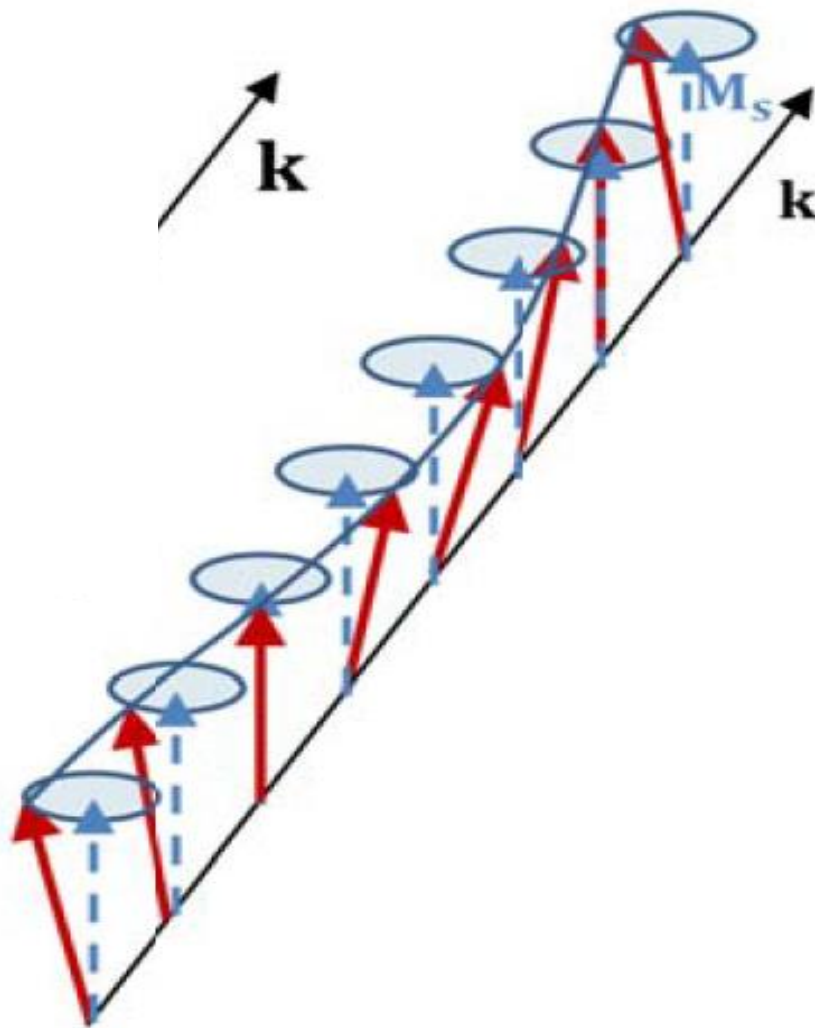


$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma(\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) +$$

$$+ \frac{\alpha}{M_0} \left(\vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt} \right)$$

Затухание (потери,
порождающие Джоулев нагрев)

Спиновые волны = Магноны (и в металлах и в изоляторах).

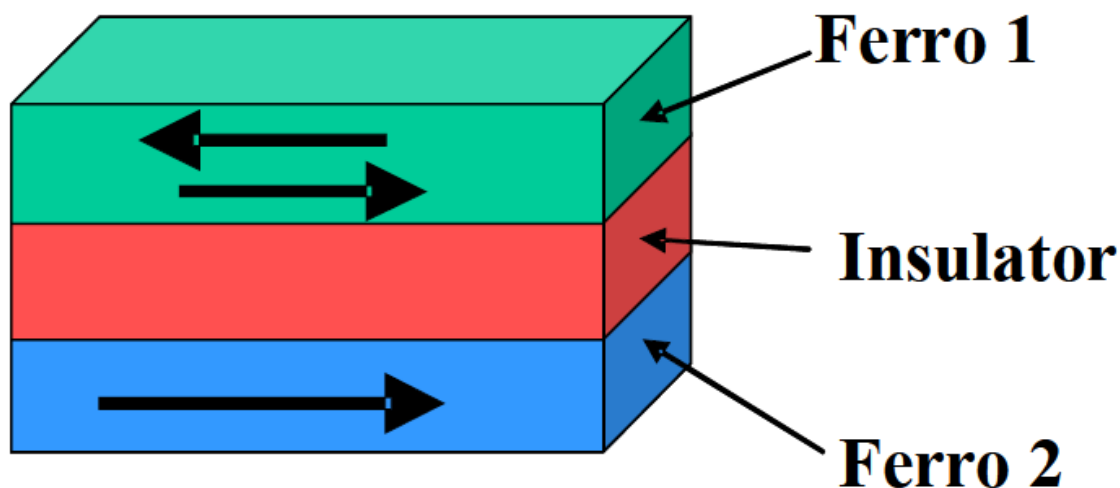


3. Спинтроника: что реально она даёт?

❖ Гигантское магнитное сопротивление

Спин-поляризованный ток

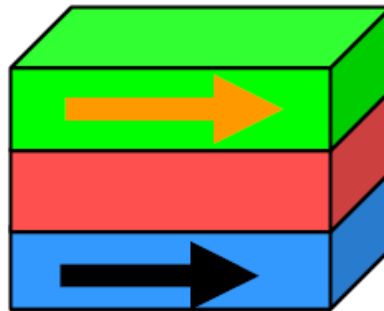
Туннельное магнитное сопротивление
Tunneling Magneto-Resistance (TMR)



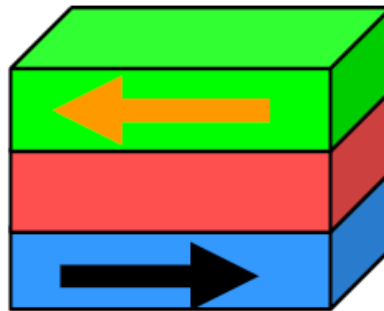
Mott two current model

Применения GMR/TMR

"0"



"1"



*Ячейка
памяти*

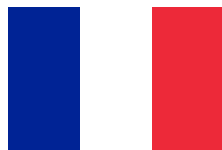
*Датчики
магнитного поля
типа Spin Valve
(спиновый клапан)*

Нобелевская премия по физике 2007 года за открытие явления гигантского магнитного сопротивления в 1988 году.



Albert Fert
1938 Carcasson-

Теоретик, специалист в области
физики твёрдого тела



Peter Grünberg
1939 Pilsen (Plzeň) – 2018 Jülich

Экспериментатор, специалист в
области BLS спектроскопии



The most impactful spintronic device to date is a highly sensitive magnetic field sensor, the spin-valve, that allowed for a **10,000-fold increase** in ***the storage capacity of hard disk drives*** since it was first introduced in a magnetic recording read head in 1997.

❖ Магноника
(спин-волновая электроника)



Борис Антонович Калиникос
(12.07.1945 — 07.11.2020)

**Научно-исследовательская
лаборатория магноники и
радиофотоники им. Б.А.
Калиникова (ЛМРФ)**



Руководитель:
Костылев Михаил Павлович
University of Western Australia



Ответственный исполнитель:
Устинов Алексей Борисович

Название проекта: Резервуарные компьютеры на принципах магноники как новое направление искусственных нейронных сетей

Project title: *Magnonic reservoir computing as a novel artificial-neural-network platform*

Рекуррентные нейронные сети



Spin-wave logical gates

M. P. Kostylev,^{a)} A. A. Serga, T. Schneider, B. Leven, and B. Hillebrands

Спин-волновой
интерферометр
Маха-Цендера

Волновые
вычисления
(wave
computing)

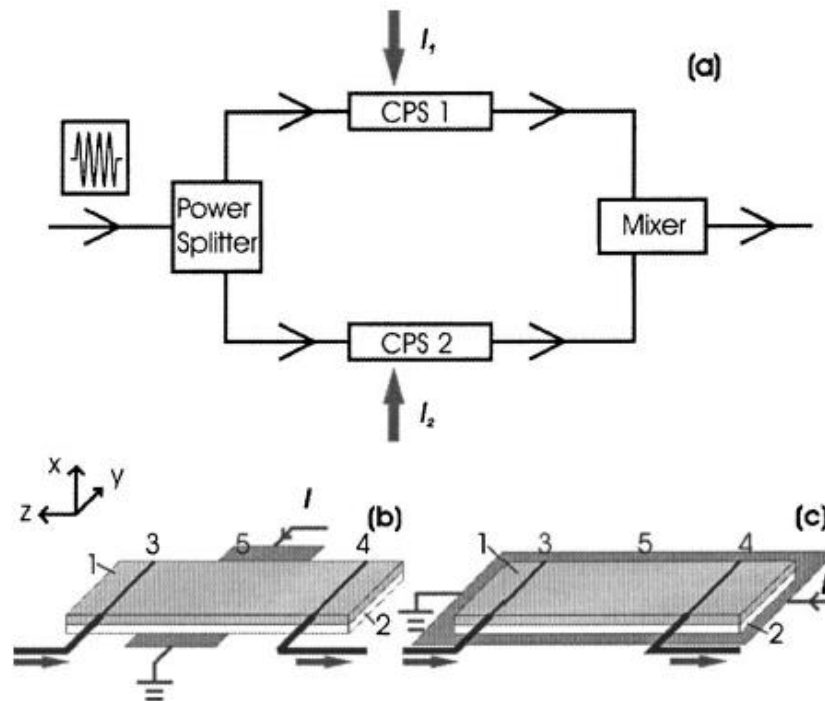


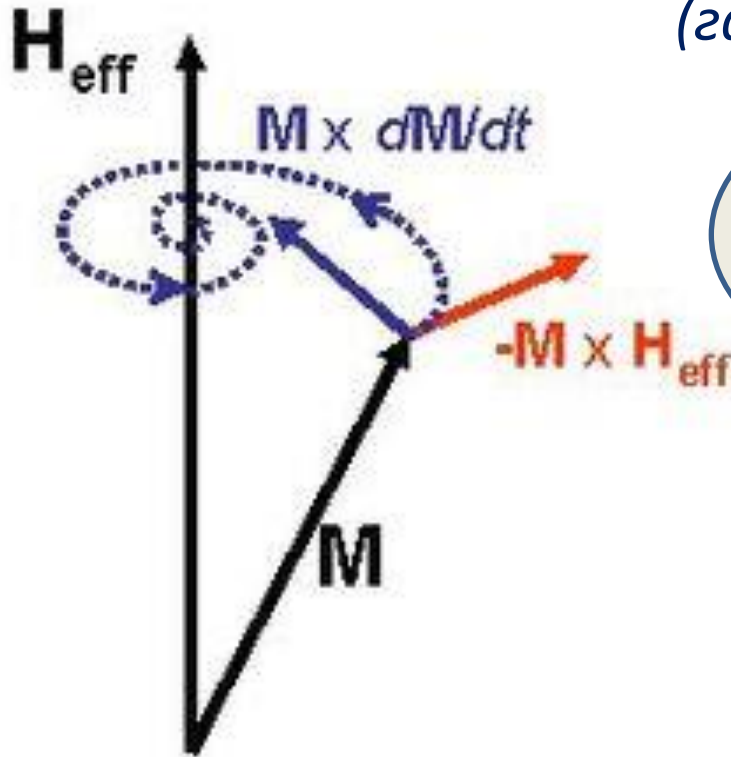
FIG. 1. (a) Schematic diagram of Mach-Zehnder interferometer. (b) Controlled phase shifter (CPS) based on backward volume magnetostatic spin wave (BVMSW) propagation. (c) CPS based on magnetostatic surface spin wave (MSSW) propagation. 1—ferromagnetic film, 2—nonmagnetic substrate, 3—input strip-line microwave transducer, 4—output microwave transducer, 5—control-current stripe conductor.

❖ Спин-трансферные нано-осцилляторы СВЧ

Спин-поляризованный ток + Спиновые волны

Уравнение Ландау — Лифшица — Гильберта

Гармоническая прецессия
(гармонический осциллятор)

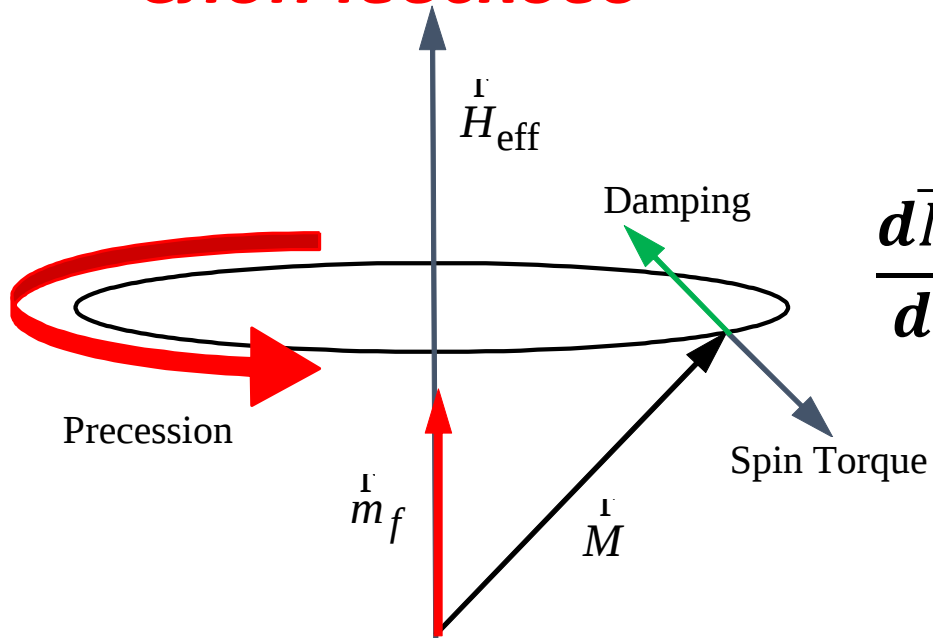


$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma(\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) +$$

$$+ \frac{\alpha}{M_0} \left(\vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt} \right)$$

Затухание (потери,
порождающие Джоулев нагрев)

Уравнение Ландау — Лифшица — Гильберта - Слончевского



$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma(\vec{M} \times \vec{H}) + \frac{\alpha}{M_0} \left(\vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt} \right) + \frac{\beta}{(M_0)^2} \left(\vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{s}) \right)$$

Fig. 2. Conventional Damping Torque
vs Slonczewski Spin Transfer Torque

Влияние спин-поляризованного тока

Эффект переноса спинового момента на обычный демпфирующий момент

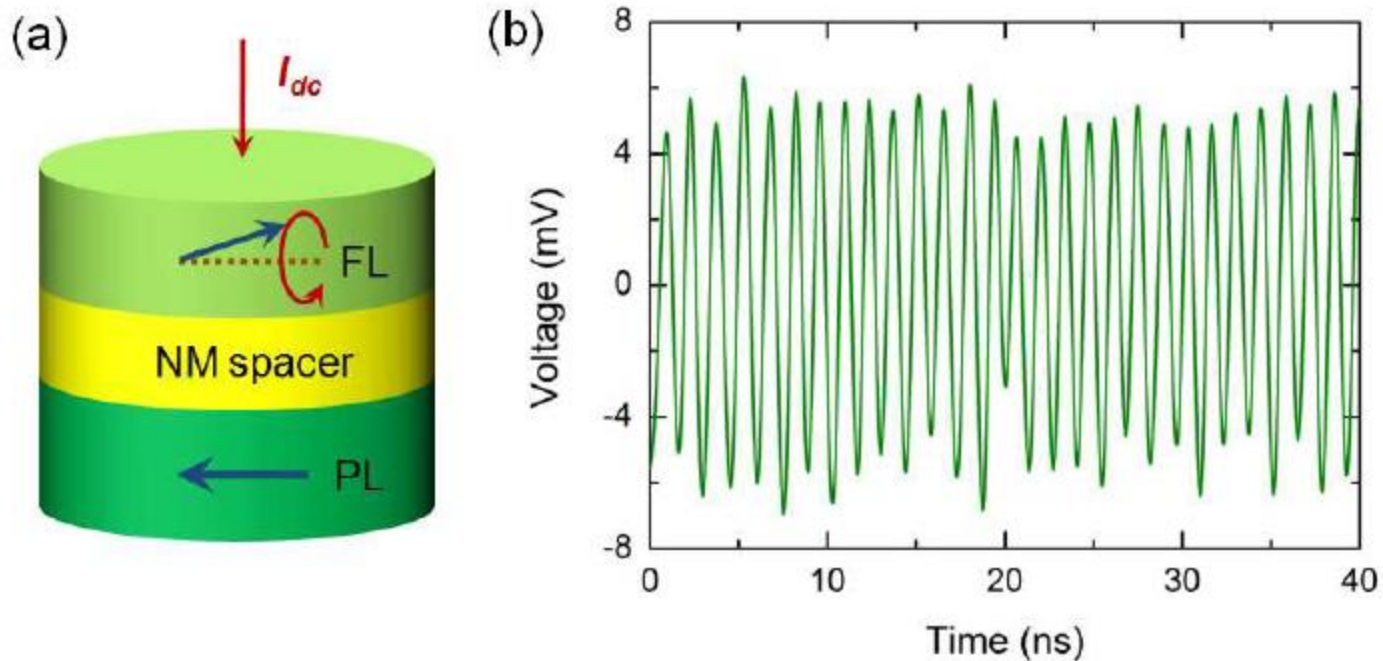
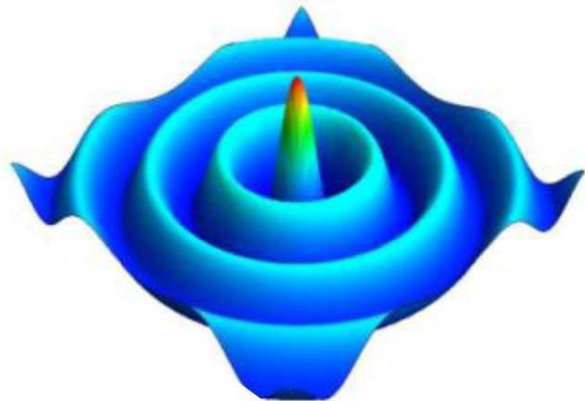
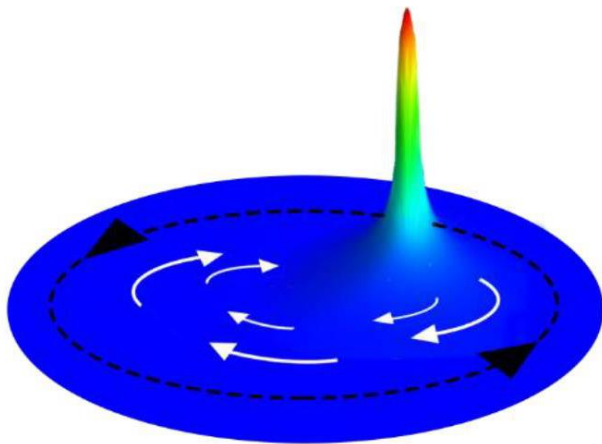


Fig.1 (a) A STNO device consists of a "fixed" layer that serves as polarizer (PL) and a "free" layer (FL) whose magnetization is excited into steady state oscillations, NM spacer denotes non-magnetic layer, *i.e.* insulator or non-magnetic metal. (b)

Propagating Waves



Vortex



Стыковка с магноникой

Size
250 nm circular
80 nm circular
240 nm circular
120 nm circular
$50 \times 150 \text{ nm}^2$
$50 \times 150 \text{ nm}^2$

Tuning range (GHz)	Linewidth (MHz)	Output power (dBm)
4–7*	21	-47
4–10**	26	-46**
3–12**	20**	-38.5
4–7**	47	-32.6
2–5*****	12	-26.2
2.5–15**	3.4	-42

❖ ***Спин-Орбитроника – новое
перспективное направление***

**Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22,
№ 6. С. 45–54**

Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 6, pp.
45–54

Spin-Orbitronics a Novel Trend in Spin Oriented Electronics

Quantum, Solid-State, Plasma and Vacuum Electronics

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-6-45-54> Review article

Andrey A. Stashkevich 

Reads 925

- ***Эффект Рашбы (Rashba Effect)***

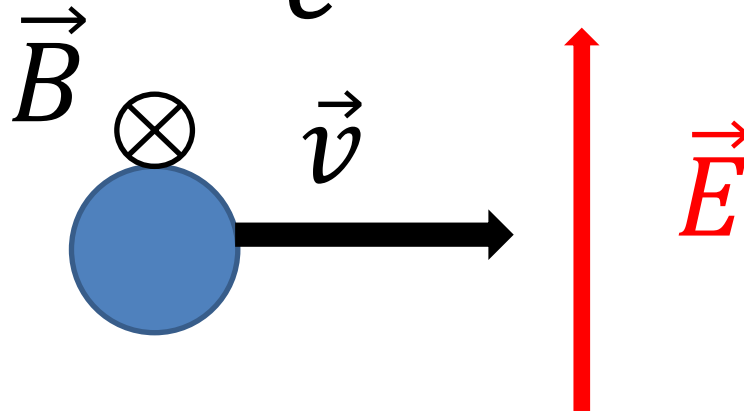


Эммануил Иосифович Рашба (р. 30 октября 1927, Киев) — советский физик-теоретик, доктор физико-математических наук (1964). Лауреат [Ленинской премии](#) 1966 года и [премии имени А. Ф. Иоффе](#) (1987).

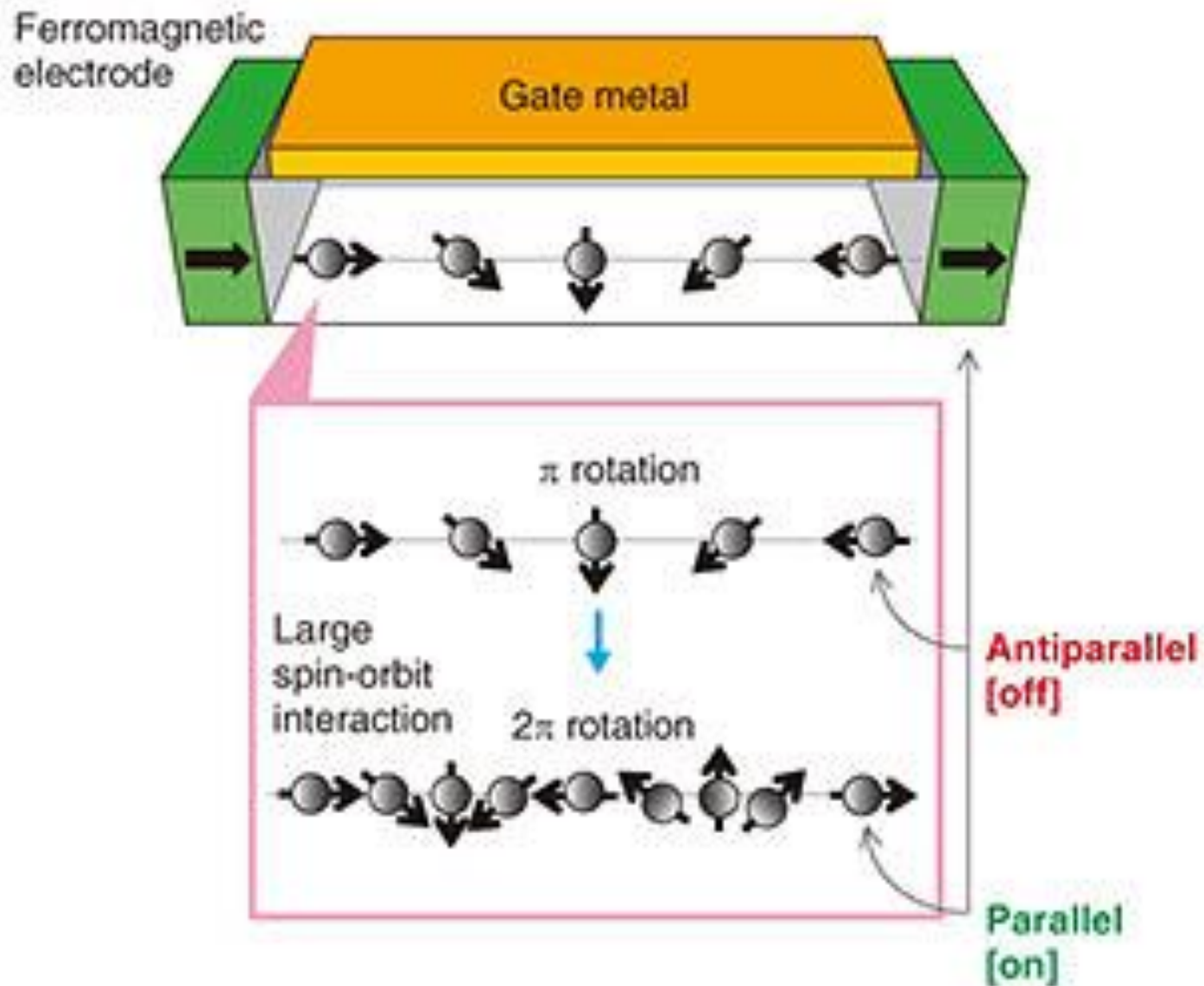
❖ Спин-орбитальное взаимодействие (движение электрона в электрическом поле)

Преобразования Лоренца для
электрического поля

$$\vec{B} = -\frac{1}{c^2} (\vec{v} \times \vec{E})$$



Транзистор на эффекте Рашбы. *Rashba transistor*



- ***Скирмионы и скирмионика
(Skyrmions)***

Тонкие ферромагнитные плёнки: порядки величин

Восьмидесятые: ≈ 5 микрон

Начало нанобума: ≈ 200 нанометров

Десять лет назад: ≈ 50 нанометров

Сейчас: $\approx$ несколько нанометров

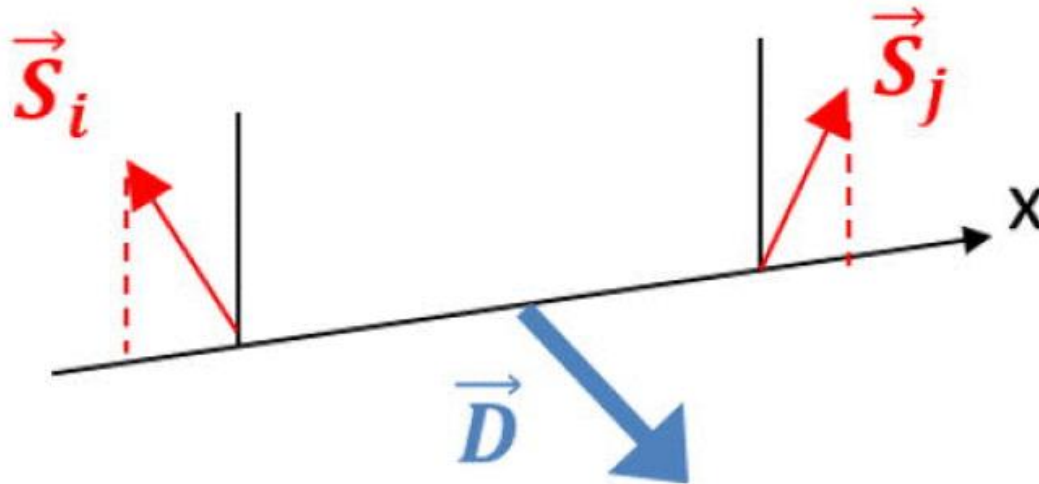
Сверхтонкие: 1 нанометр и менее

***Почему эффект Дзялошинского
стал для всего магнитного мира
столь интересным?***

Анизотропное взаимодействие (Дзялошинского-Мории) DMI

$$E_{\text{DM}} = \sum_{\langle i, j \rangle} \vec{d}_{ij} \cdot (\vec{S}_i \times \vec{S}_j)$$

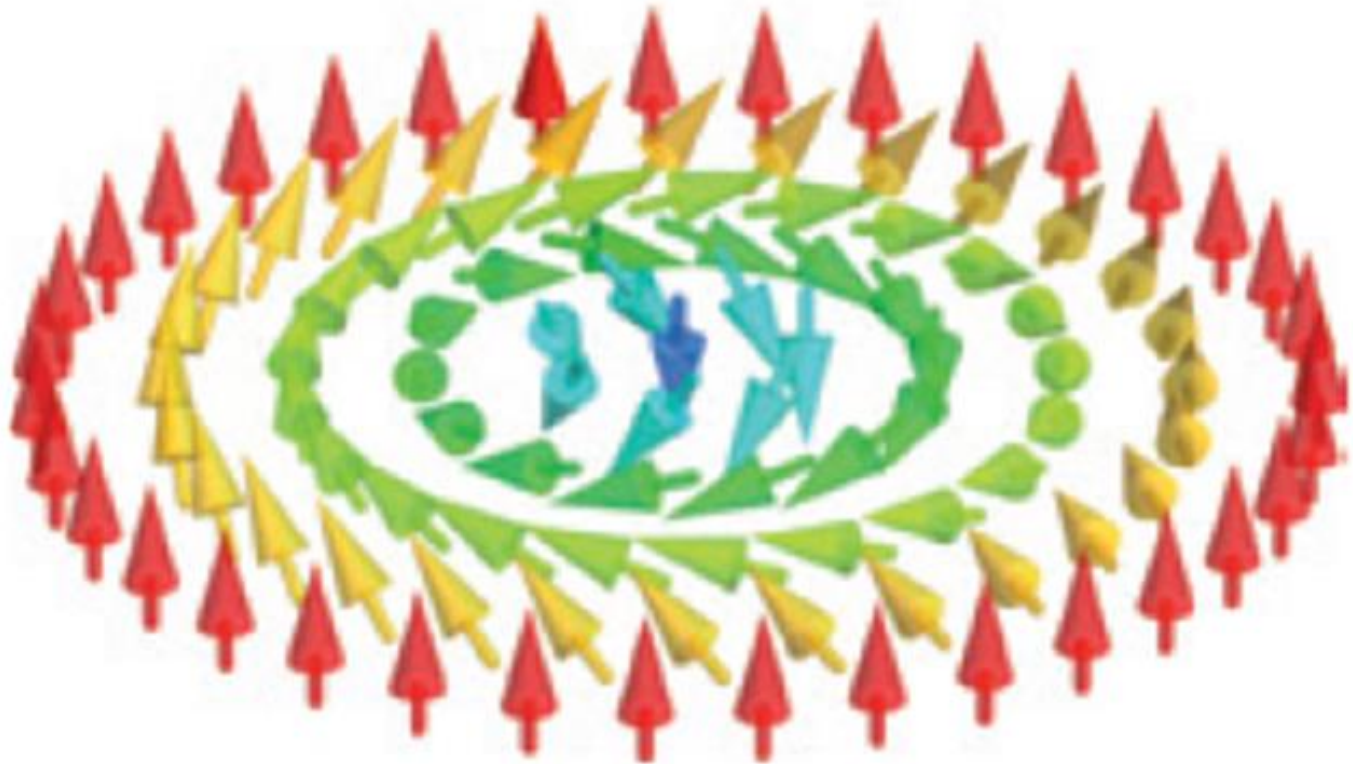
(b) DMI Form 2



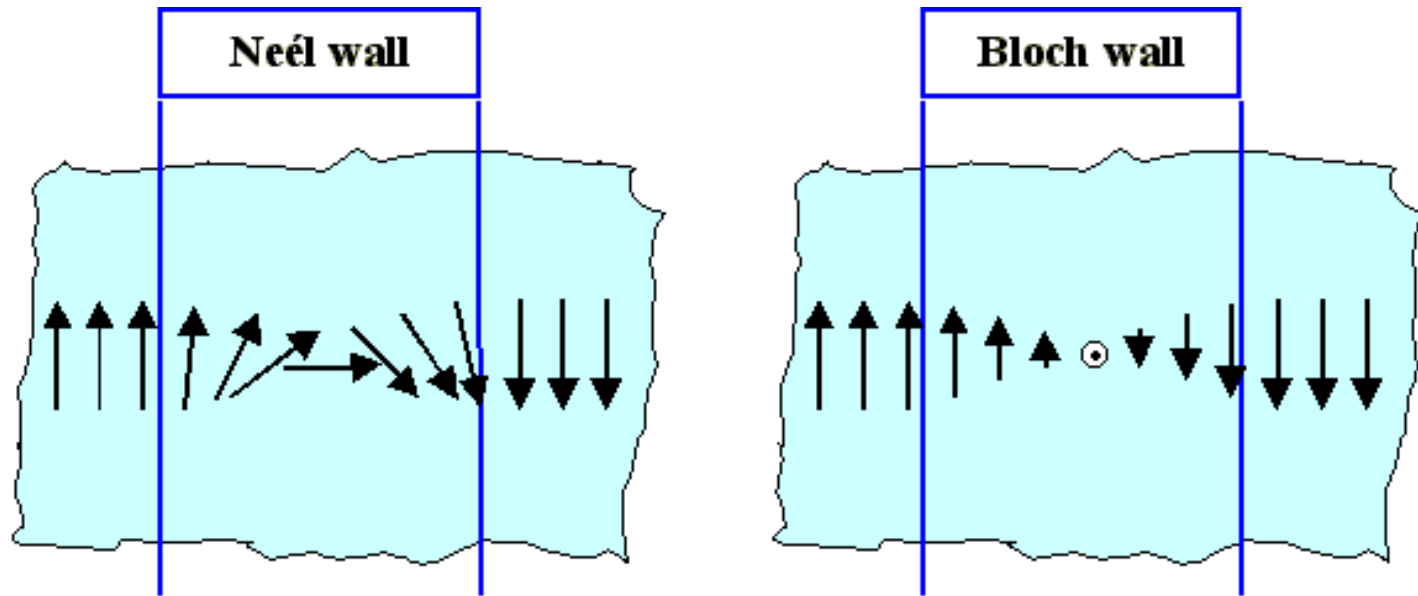


Pt (3 nm)
Co (1 nm)

b



Скирмион очень стабилен, потому что он топологически защищен (topologically protected).



Стенки *Блоха* некиральны, а *Нееля* киральны.
Киральные (*Нееля*) стенки движутся быстрее.

Menu | skirmions_nature_A... | + Créer | Se connecter

Tous les outils | Modifier | Convertir | Signer électroniquement | Rechercher du texte ou des o...





ARTICLES
PUBLISHED ONLINE: 25 JANUARY 2016 | DOI: 10.1038/NNANO.2015.315

Room-temperature chiral magnetic skyrmions in ultrathin magnetic nanostructures

Olivier Boulle^{1,2,3*}, Jan Vogel^{4,5}, Hongxin Yang^{1,2,3}, Stefania Pizzini^{4,5}, Dayane de Souza Chaves^{4,5}, Andrea Locatelli⁶, Tefvik Onur Menteş⁶, Alessandro Sala⁶, Liliana D. Buda-Prejbeanu^{1,2,3}, Olivier Klein^{1,2,3}, Mohamed Belmeguenai⁷, Yves Roussigné⁷, Andrey Stashkevich⁷, Salim Mourad Chérif⁷, Lucia Aballe⁸, Michael Foerster⁸, Mairbek Chshiev^{1,2,3}, Stéphane Auffret^{1,2,3}, Ioan Mihai Miron^{1,2,3} and Gilles Gaudin^{1,2,3}

Magnetic skyrmions are chiral spin structures with a whirling configuration. Their topological properties, nanometre size and the fact that they can be moved by small current densities have opened a new paradigm for the manipulation of

216,5 x 283,2 mm | 15:24 11/05/2024

Research Interest Score	493.8
Citations	1 123
Reads	655

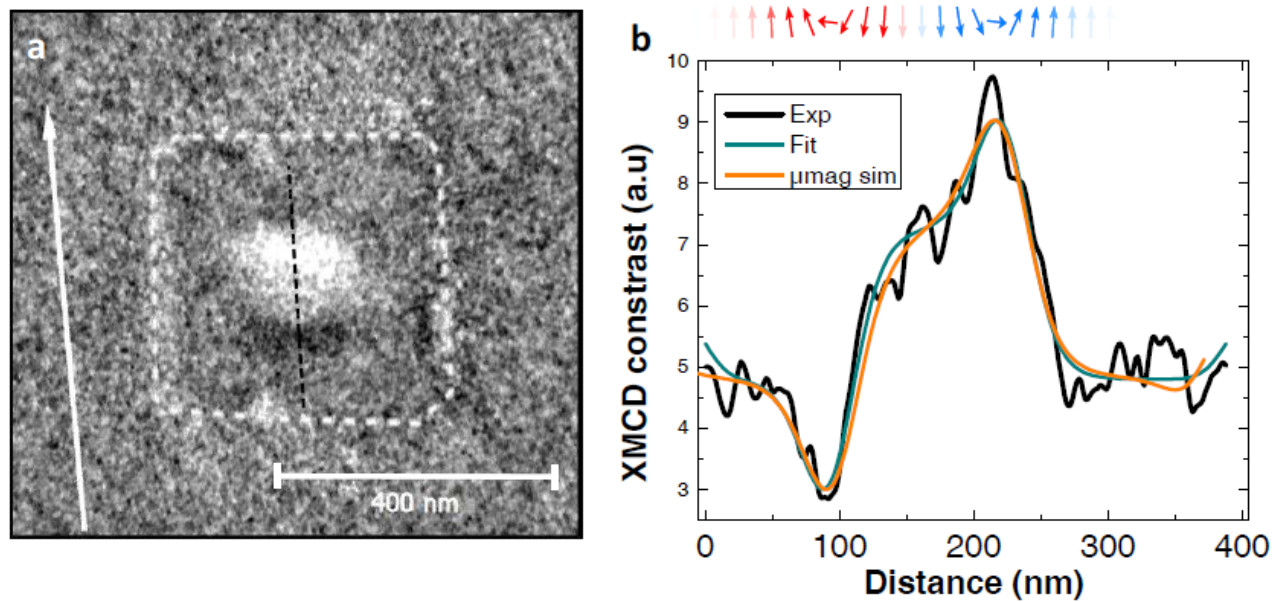
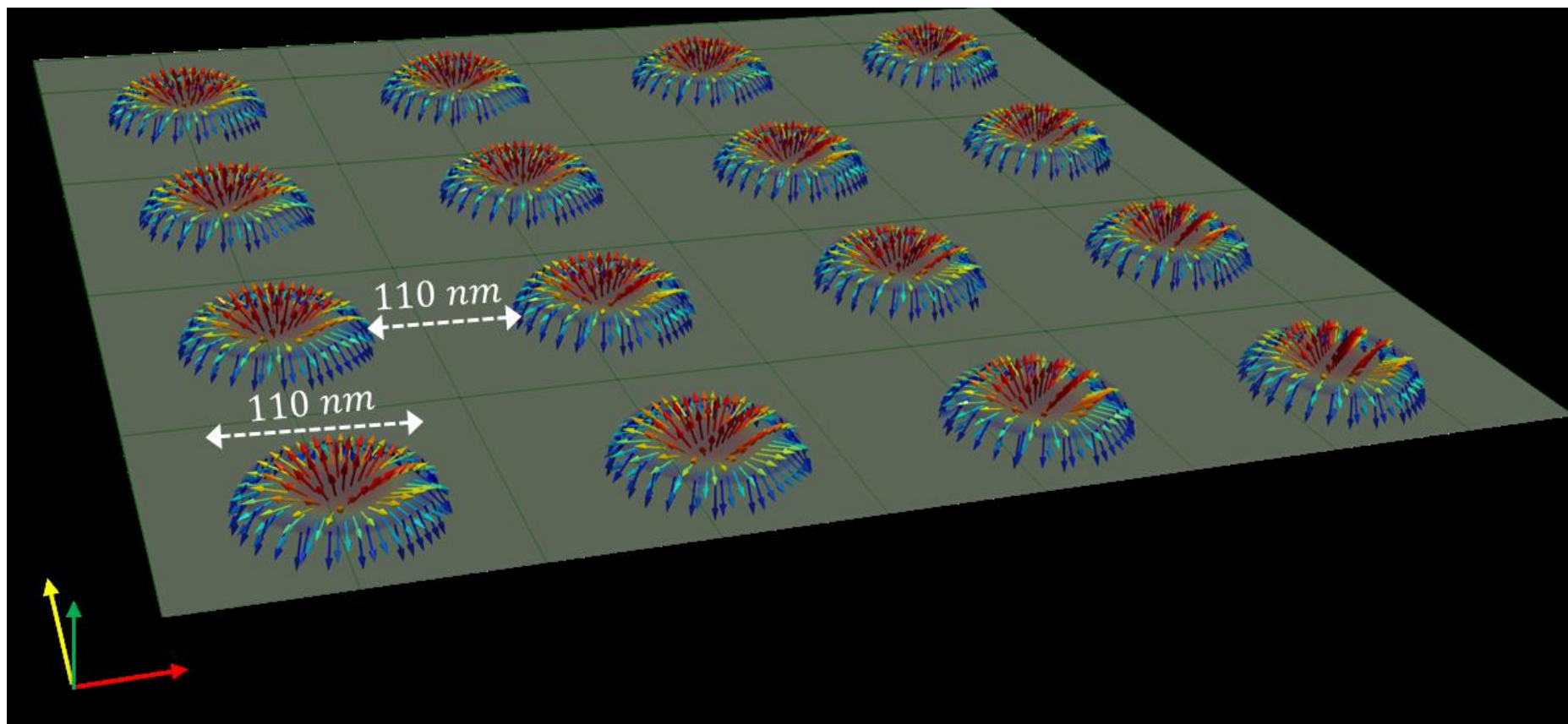


Figure 3: **Magnetic skyrmion observed at room temperature and zero applied external magnetic field** (a) XMCD-PEEM image of a 420 nm square dot (indicated by the dotted line) and (b) linescan along the dotted black line (black line). The linescan has been averaged perpendicularly to the linescan over 30 nm. The blue line is a fit to the data using a Gaussian convoluted 360° DW profile. The orange line is the contrast predicted by the micromagnetic simulations.

X-ray Magnetic Circular Dichroism (XMCD)
Photoemission Electron Microscopy (PEEM).



Потенциальная скорость передачи информации с помощью скирмионов

- Скорость перемещения скирмиона под воздействием спин-поляризованного тока порядка 500 м/с.
- Размер порядка 10 нм
- Длительность одного скирмиона (бита информации) порядка $2 \cdot 10^{-11}$ секунды
- Скорость передачи информации по одному каналу порядка ***$50 \cdot 10^9$ бит/сек.***



- ***Спиновый эффект Холла***
Spin Hall Effect (SHE)

Письма в ЖЭТФ, том 13, стр. 657,— 660

5 июня 1971 г.

О ВОЗМОЖНОСТИ ОРИЕНТАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СПИНОВ ТОКОМ

М. И. Дьяконов, В. И. Перель

**Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР,**

Михаил ДЪЯКОНОВ и Владимир ПЕРЕЛЬ

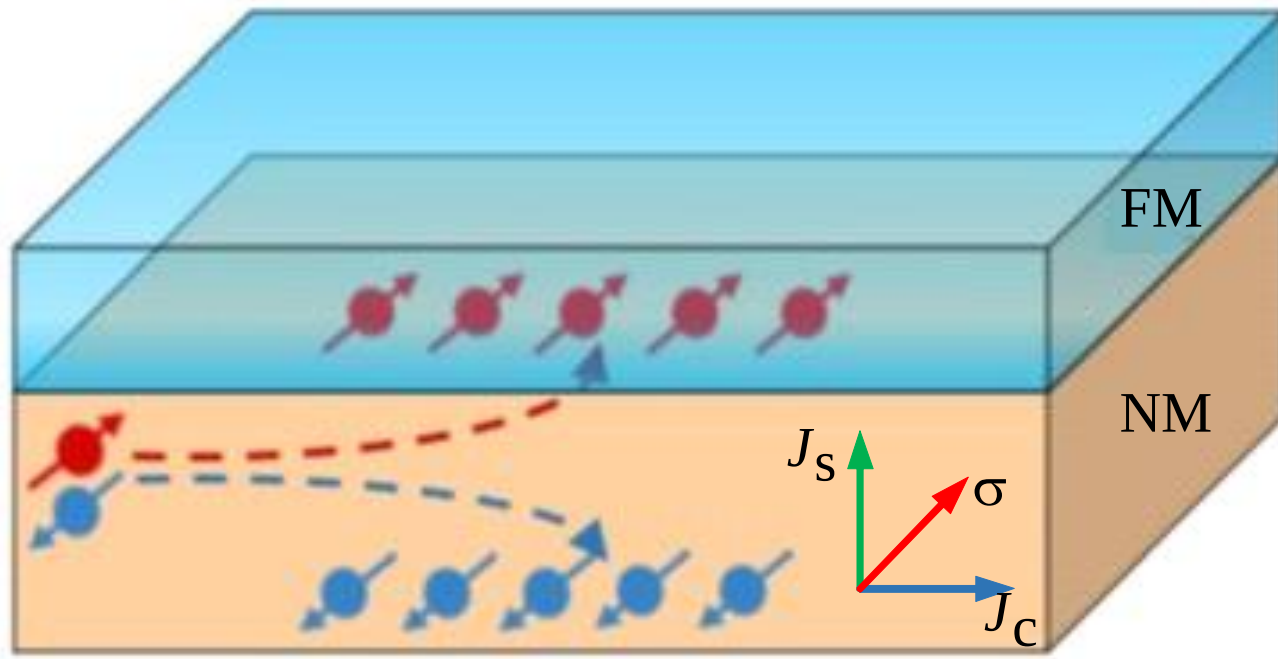


Fig. 4. Spin-Hall Effect

- **Трековая память (*Racetrack memory*)**

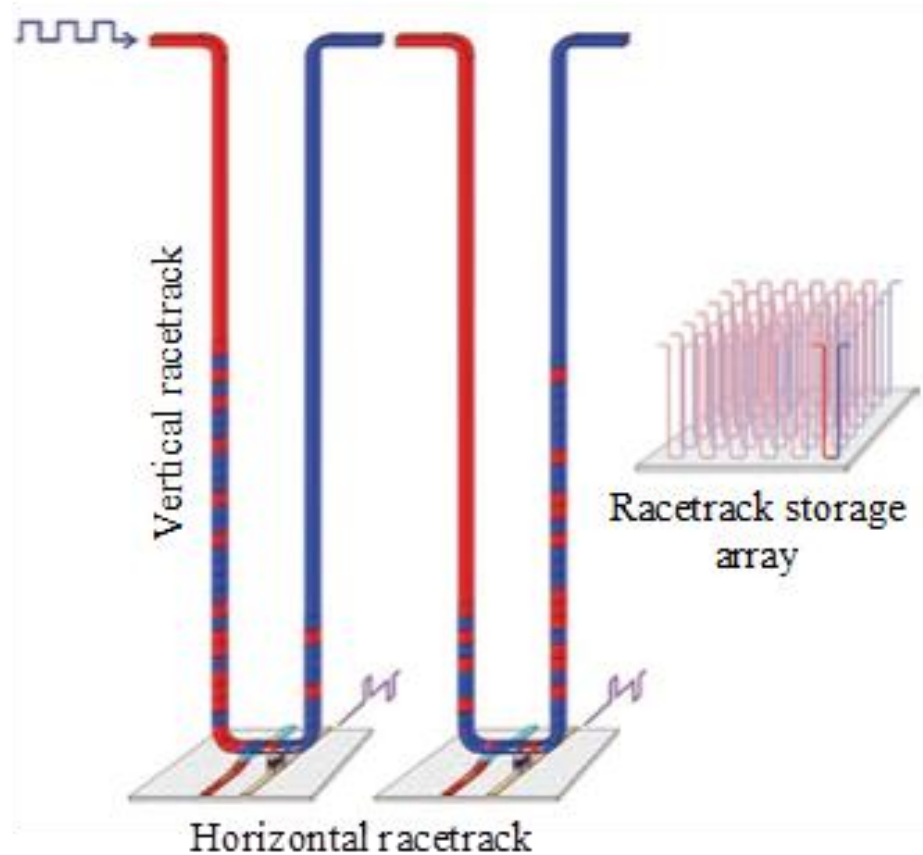


Fig. 3. Racetrack memory, a step toward three-dimensional microelectronic devices



Stuart Parkin

Citations 100 606

Прочие перспективные спинтронные эффекты

- *Терагерцовая спинтроника*

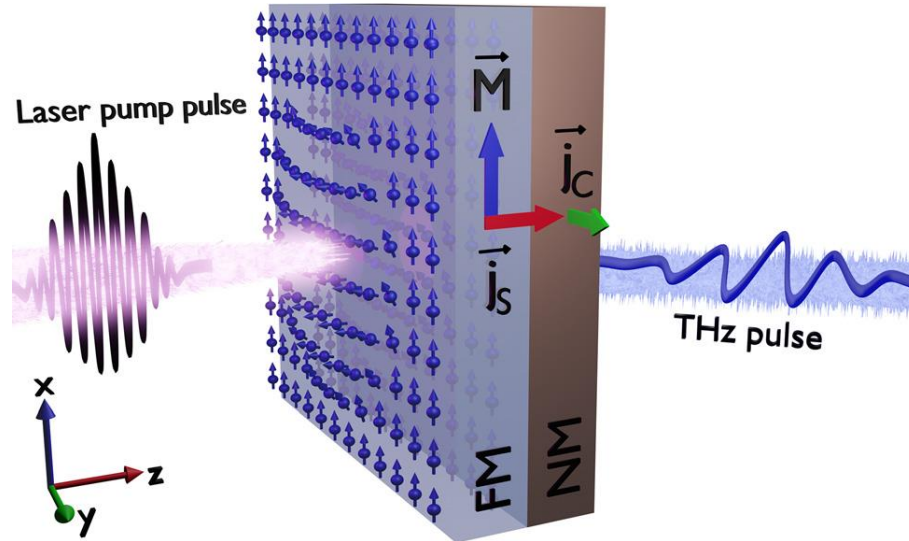
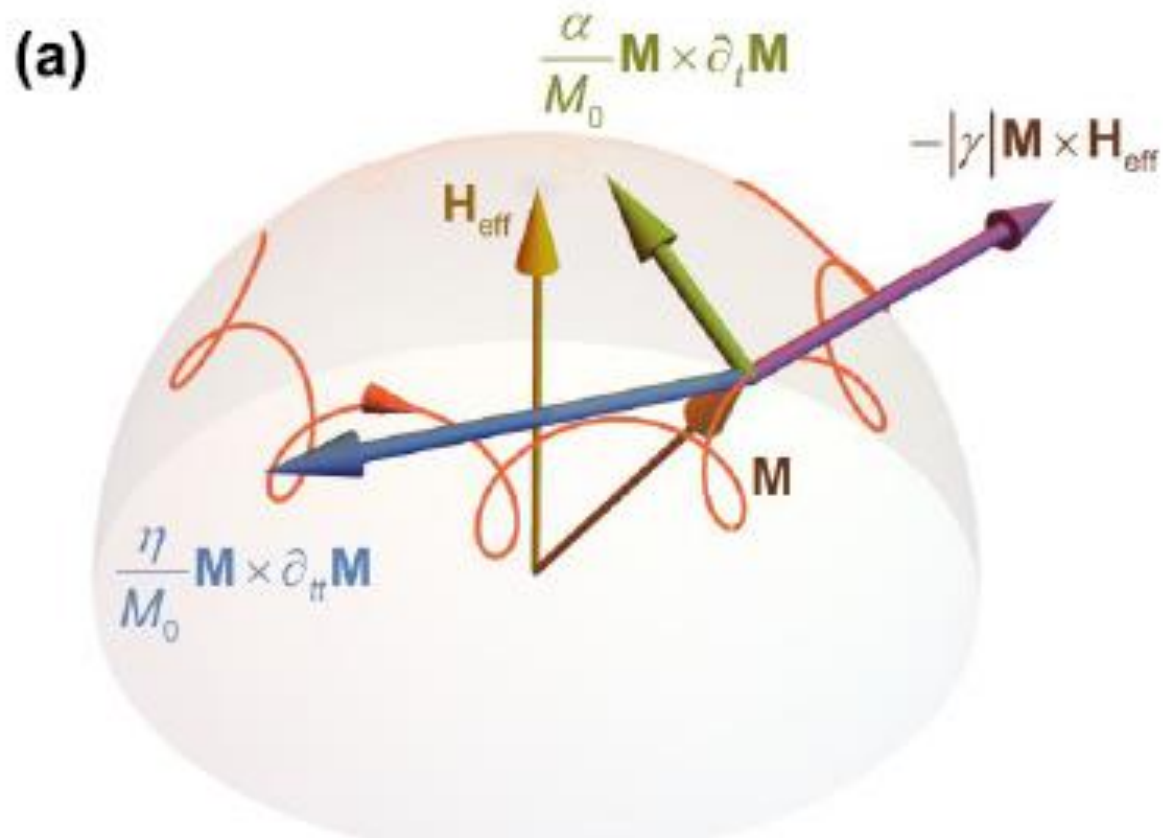


Figure 1: Graphical representation of the THz emission from FM/NM heterostructures after fs-laser excitation of the spin system. The magnetization points in positive x-direction, j_s is the spin current in z-direction, along the layer stacking and j_c is the charge current in y-direction. The inverse spin Hall effect leads to the THz radiation. The polarization of the THz field is perpendicular to the direction of the magnetic field.

- *Нутацуну (Nutations)* Beyond LLG



$$\frac{\eta}{M_0} \frac{\partial^2 \vec{M}}{\partial x^2}$$

- ***Топологические изоляторы
(Topological isolators)***

Спин-блокировка или спинлок (spinlock): особые проводящие электронные состояния (топологически защищённые).

5. Заключение

PEPR SPIN – Priority Programs and Equipment for Exploratory Research

France is investing more than 38M€ in Spintronics thanks to the PEPR-SPIN exploratory program!

Поисковый проект (Франция)

The SPIN program objectives

Harness the creativity of the world-leading French spintronic community & transform this research excellence into industrial development and economic gain

- > Trigger a new generation of devices
- > Strengthen the enabling platforms
- > Bolster the positioning of the French community
- > Expand the training for tomorrow's needs in spintronics
- > Stimulate an industrial revival in Digital, aligned with the national and European strategies

And in figures

38

Millions of euros in budget

8ans

The duration of the PEPR

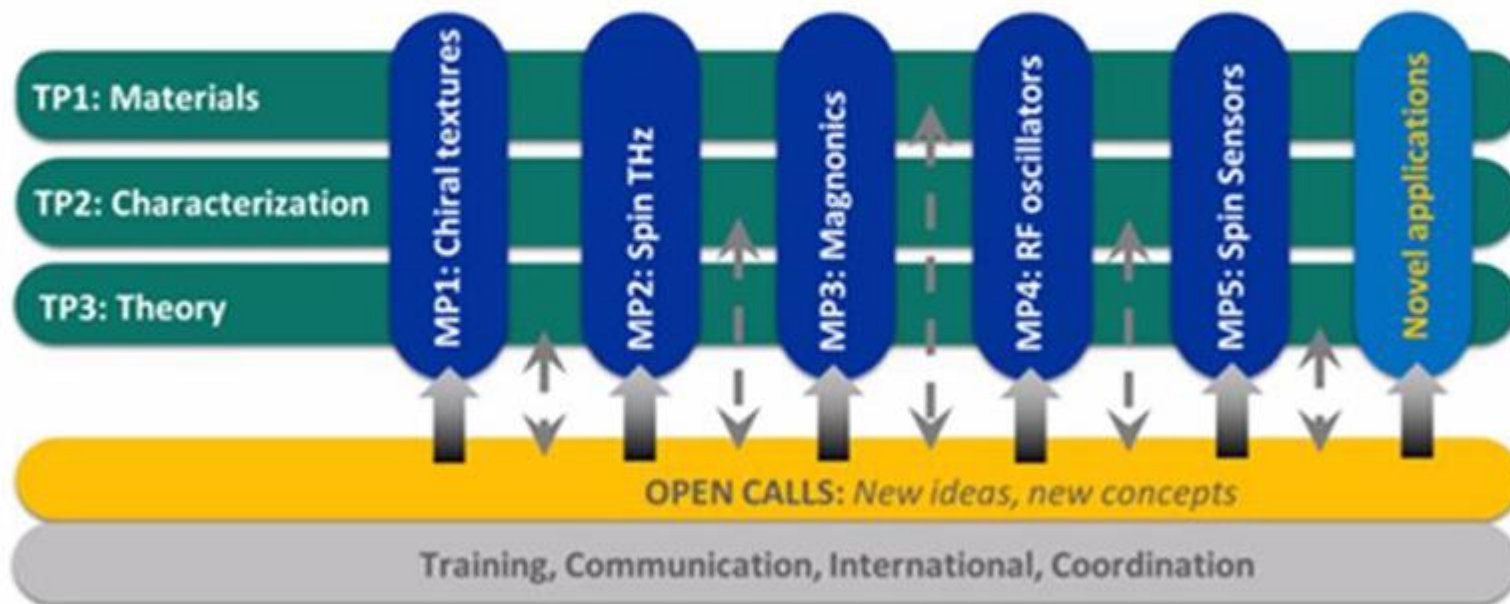
47

Laboratories within the program

30

Institutional partners

Structure thématique de l'action



Projet ciblé **SWING** ("Spin Waves for advanced signal processING"). Целевой проект «Спиновые волны для обработки сигналов»

THE FIRST WORKSHOP SWING (“SPIN WAVES FOR ADVANCED SIGNAL PROCESSING”) WILL TAKE PLACE IN STRASBOURG (FRANCE) ON MAY, 23RD AND 24TH, 2024.



FIRST SWING WORKSHOP
in Strasbourg - May 23rd and 24th, 2024

SWING: Spin waves for advanced signal processing



May 23 & 24 2024
Strasbourg

Российская спинтронике быть! Всё для этого есть...

Основные центры

- Москва ИРЭ РАН + МГУ Физфак + Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
- Санкт-Петербург (ЛЭТИ + ФТИ РАН им. А.Ф. Иоффе)
- Саратов (Саратовский Государственный Университет)
- Владивосток (Дальневосточный Государственный Университет + Сахалинский государственный университет)
- Нижний Новгород (ННГУ)
- Екатеринбург, Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН

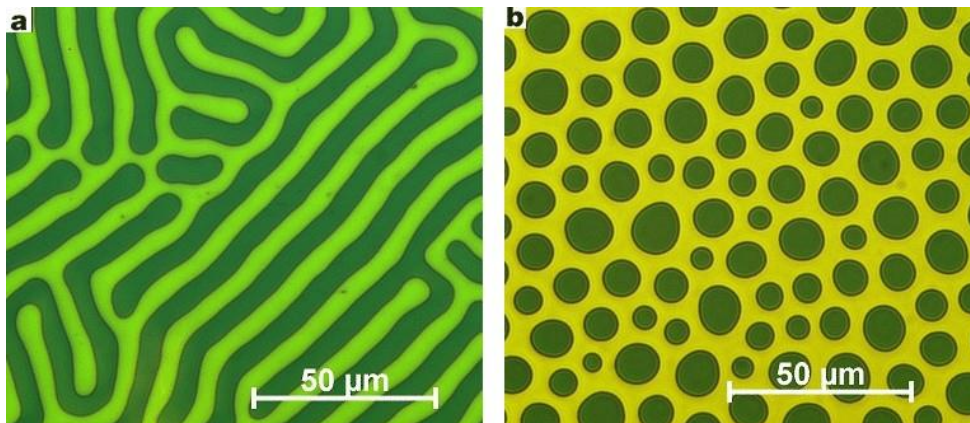
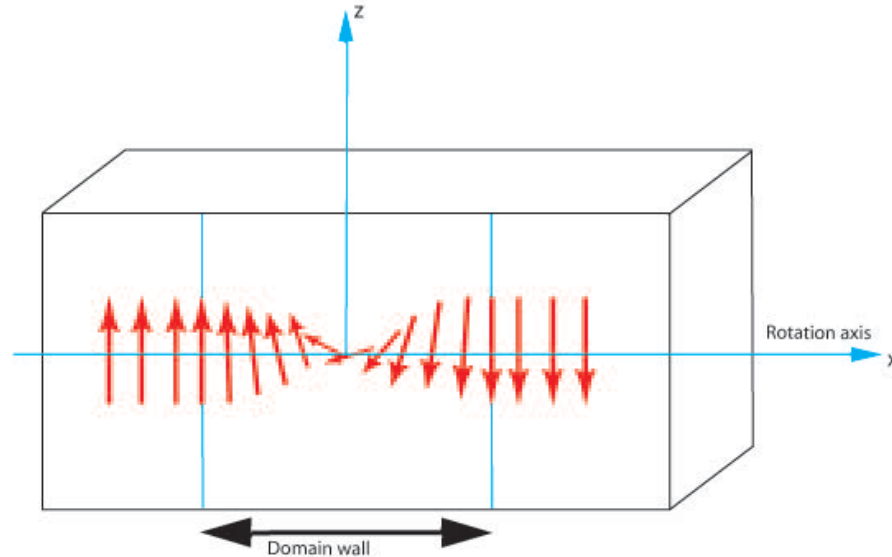
Еррur si muove !
(Она, спинтроника, движется!)



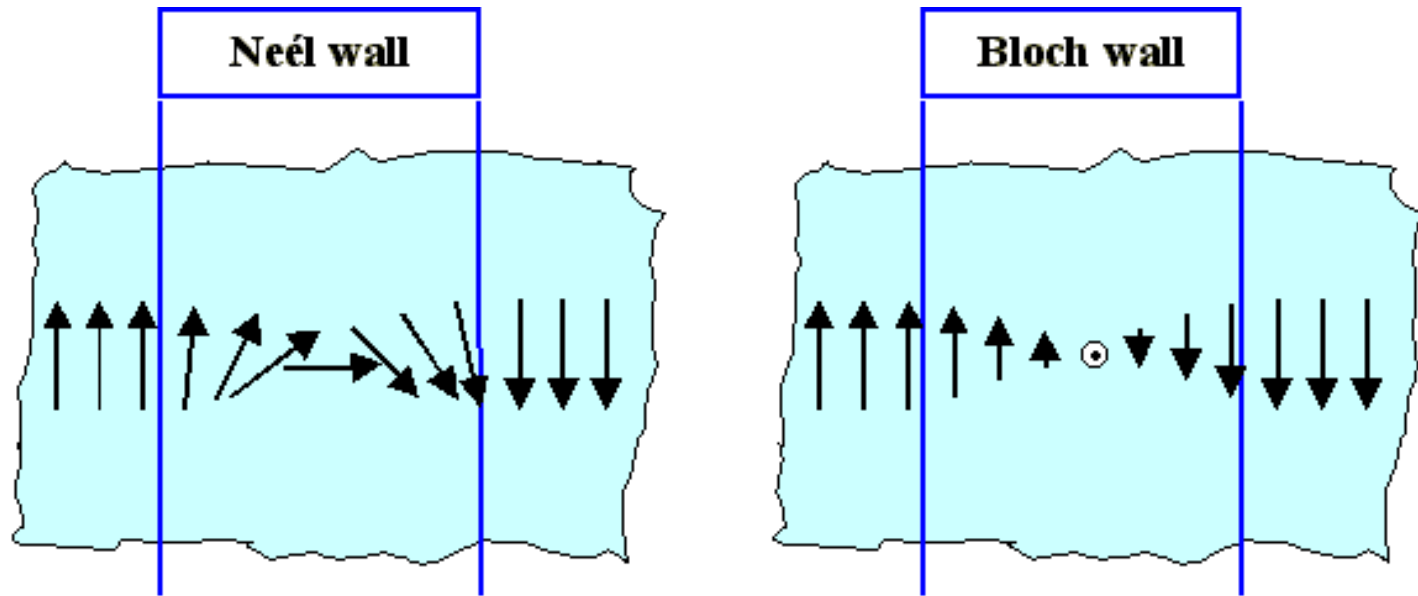


Спасибо за внимание...

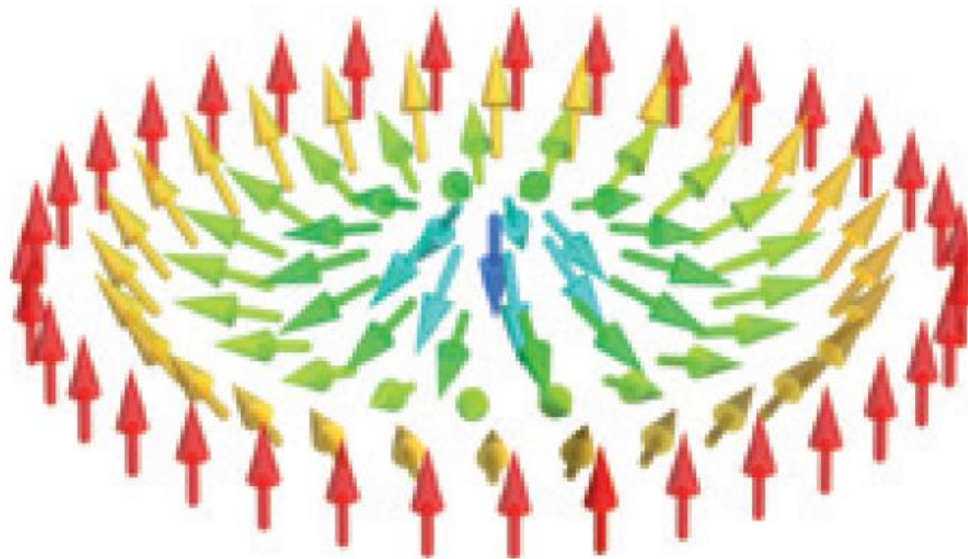
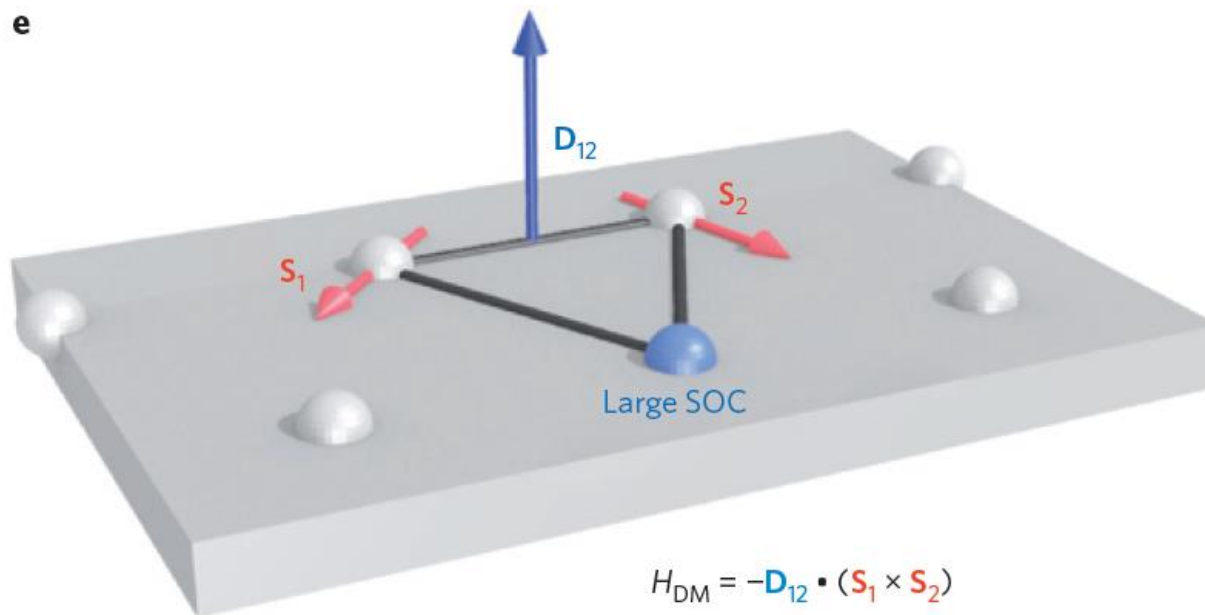
Цилиндрические магнитные домены (ЦМД) Bubble domains (Magnetic Bubble Memory 1970s)



Вид сверху



Стенки *Блоха* некиральны, а *Нееля* киральны.
Киральные (*Нееля*) стенки движутся быстрее.

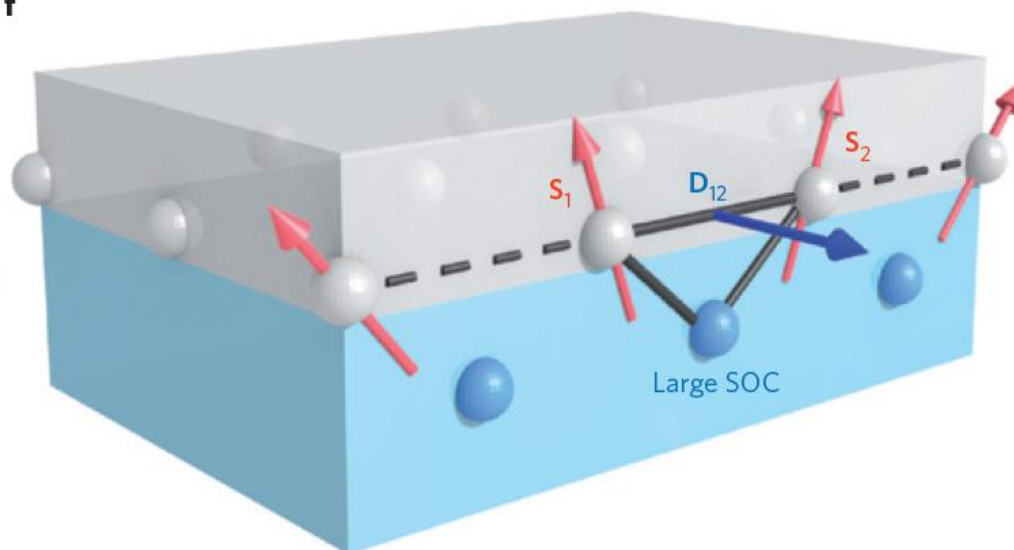
a**e**

$$H_{\text{DM}} = -\mathbf{D}_{12} \cdot (\mathbf{S}_1 \times \mathbf{S}_2)$$

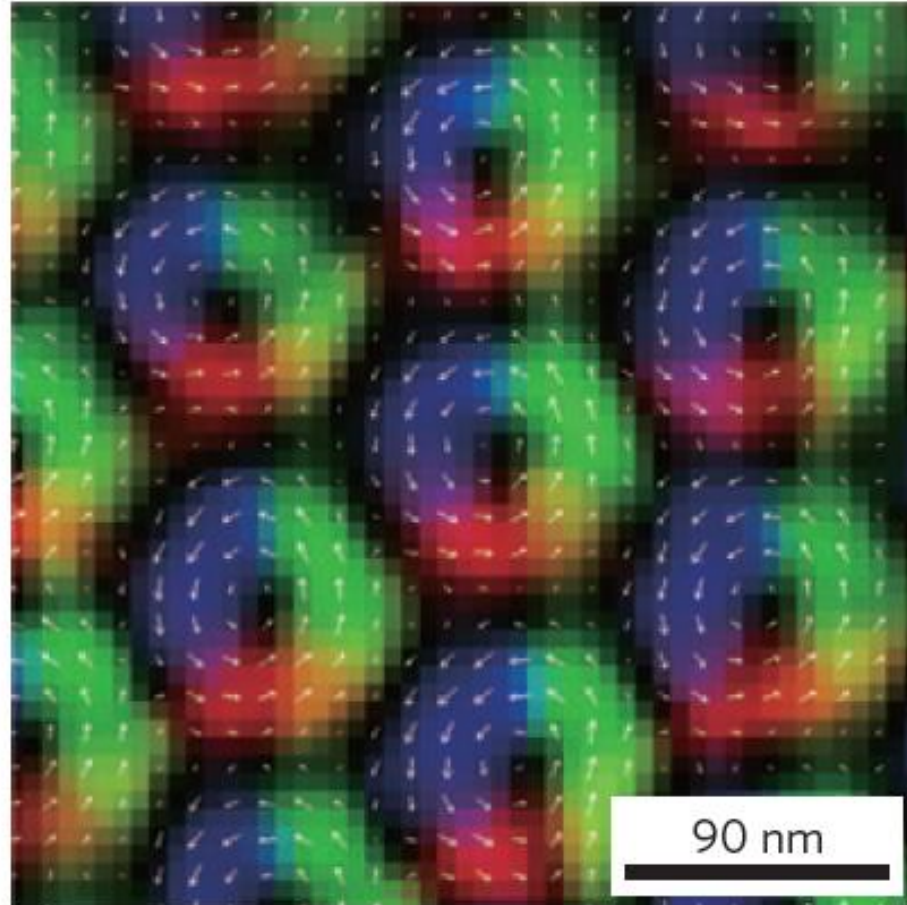
b

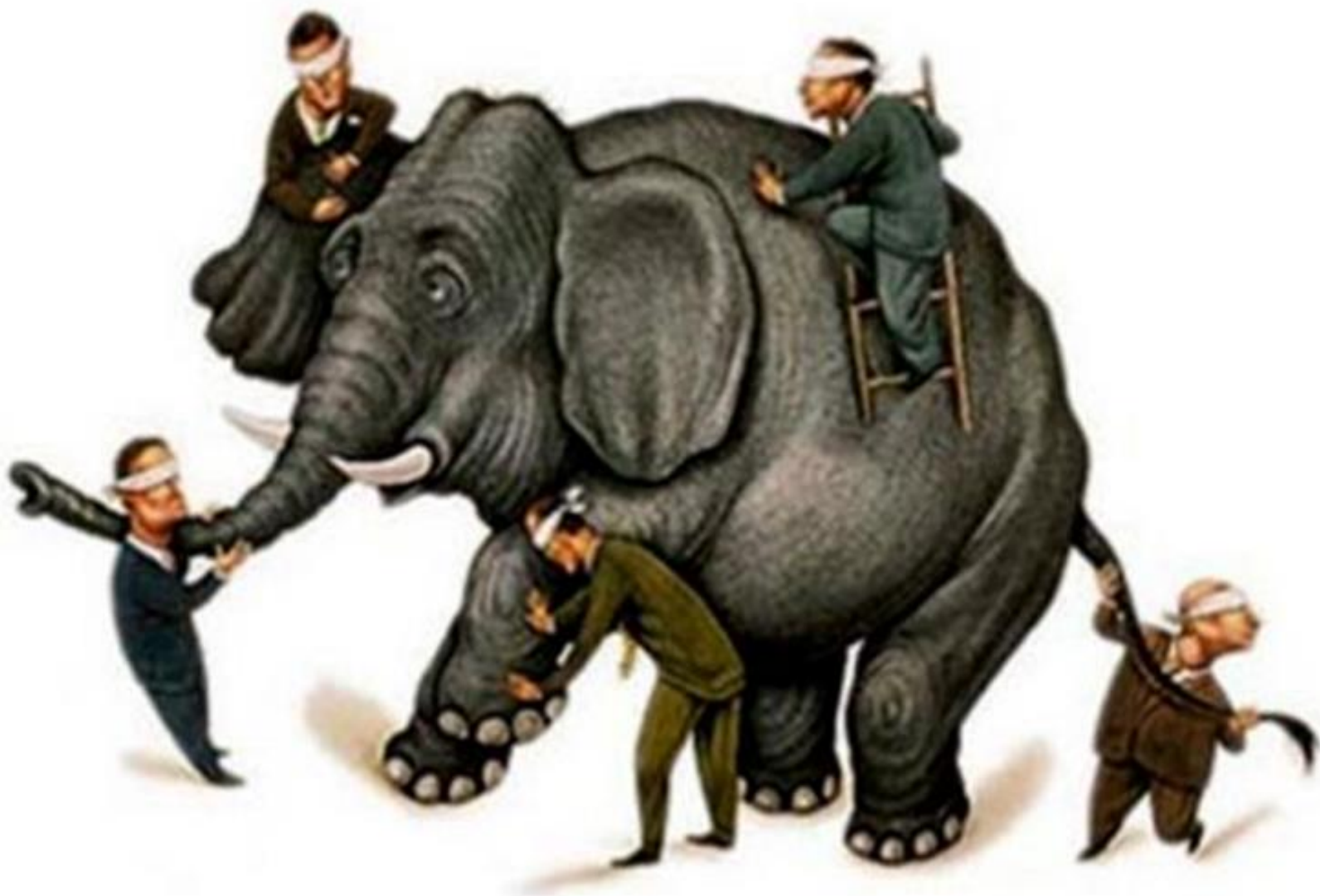


f



c





Richard Feynman: How wonderful it is in physics you can look at the same thing from several viewpoints.

as quoted by Michael V. Berry

Charles Frank: Physics is not just Concerning the Nature of Things, but Concerning the Interconnectedness of all Natures of Things

Michael V. Berry: Connections are not optional extras in Physics, they are essential part of what we do...