

НАУКА НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО
Научно-практическая конференция

16 мая 2024

Спинтроника - новое окно
возможностей в энергосберегающей
электронике

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?

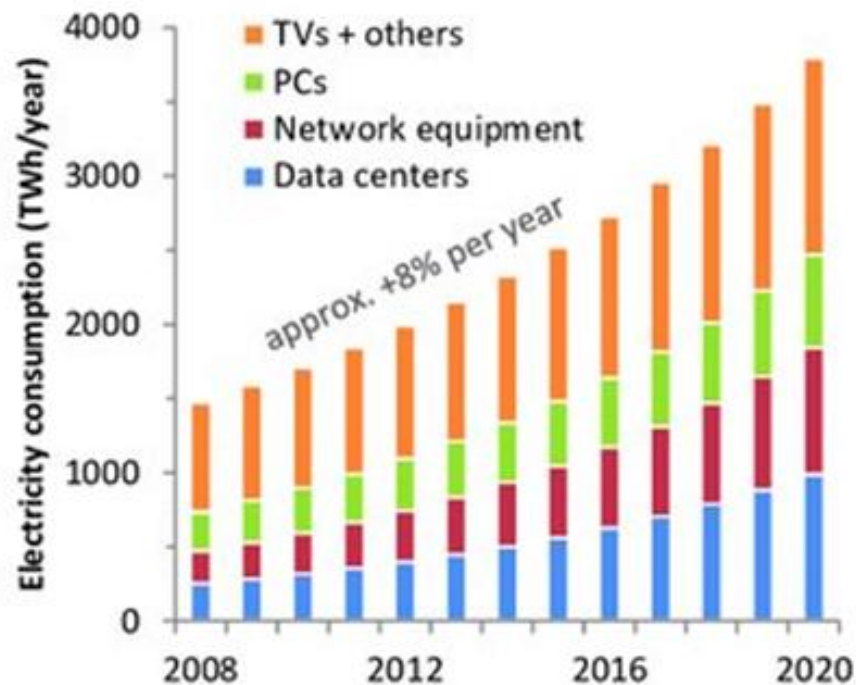
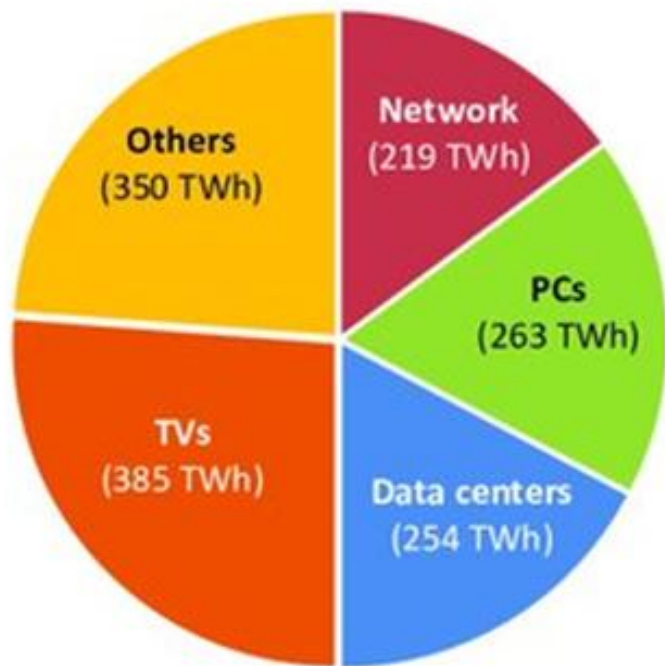
- **Чудовищное энергопотребление + миниатюризация (прежде всего...)**
- **Выход на атомные масштабы**

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

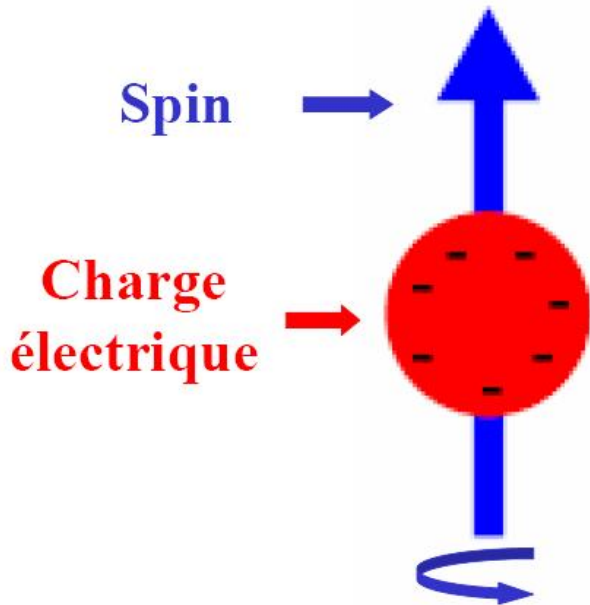


2. Спиновая электроника... немного физики

❖ Что такое спин?

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

Electron



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

Полный момент количества движения атома

\vec{L} орбитальный момент атома

\vec{S} спиновый момент атома

$$W_{LS} = \lambda (\vec{L} \cdot \vec{S})$$

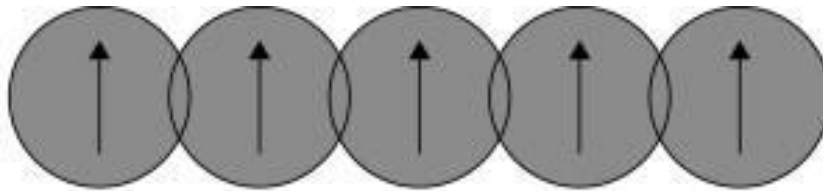
Первая половина оболочки $\lambda < 0$ $\vec{L} \uparrow \downarrow \vec{S}$

Вторая половина оболочки $\lambda > 0$ $\vec{L} \uparrow \uparrow \vec{S}$

❖ Изотропное обменное взаимодействие

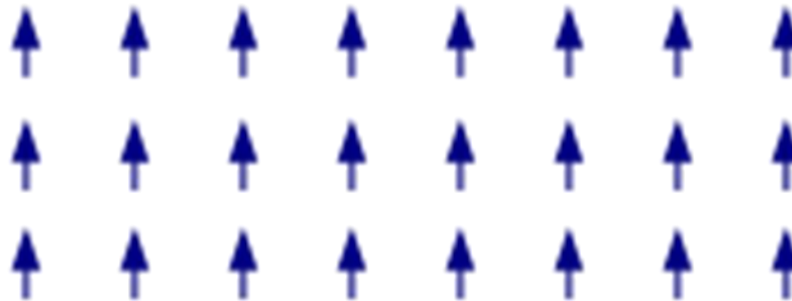
Модель Гейзенберга

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



(а)

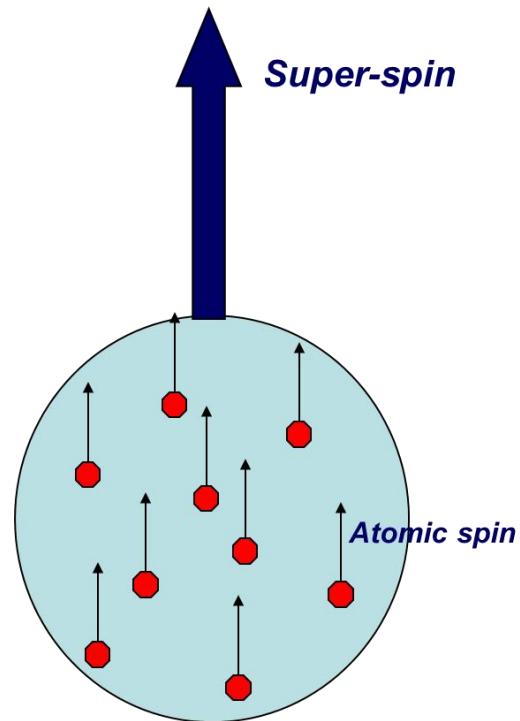
Перекрывание орбиталей



Ферромагнитное состояние

Намагниченность \vec{M} это магнитный момент единицы объёма вещества:

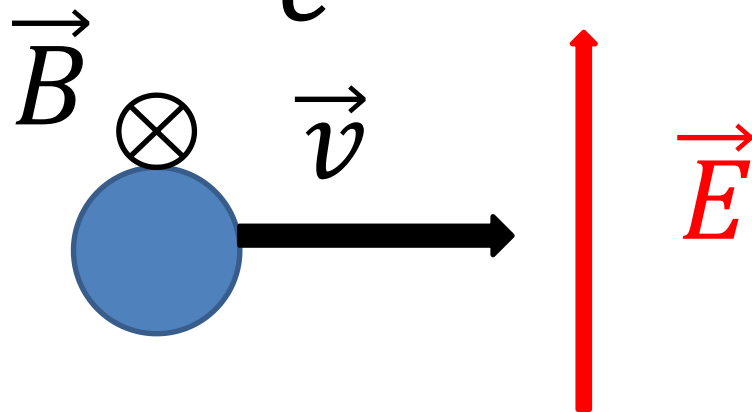
$$\vec{M} = \frac{\sum_i \vec{\mu}_i}{V}$$



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

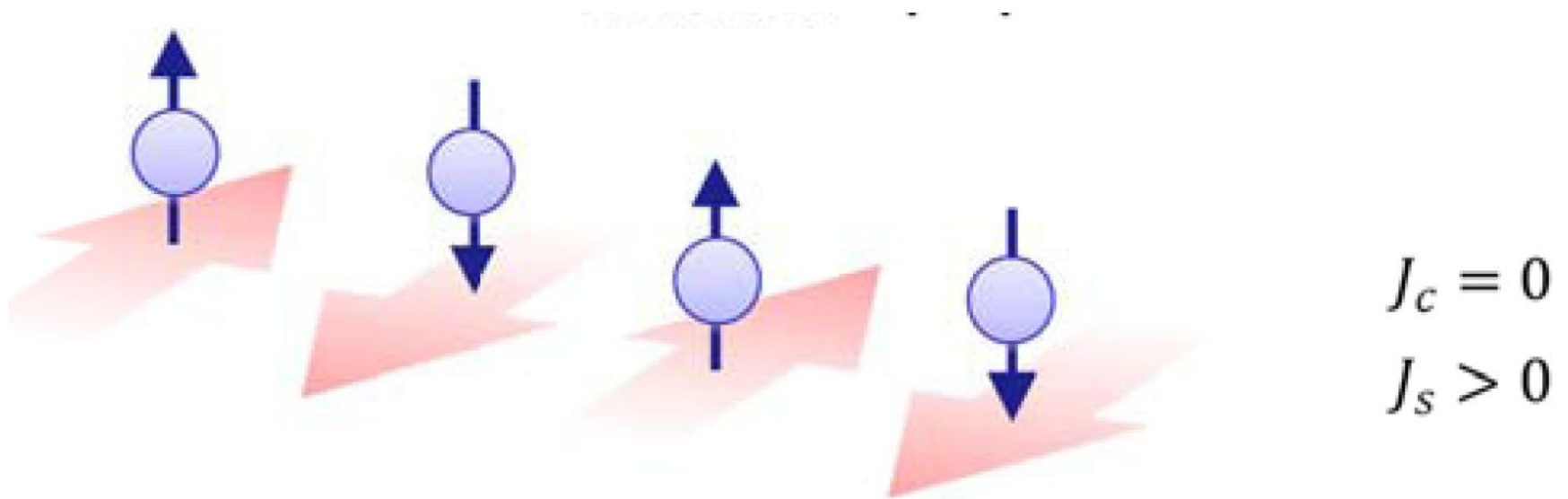
Преобразования Лоренца для
электрического поля

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



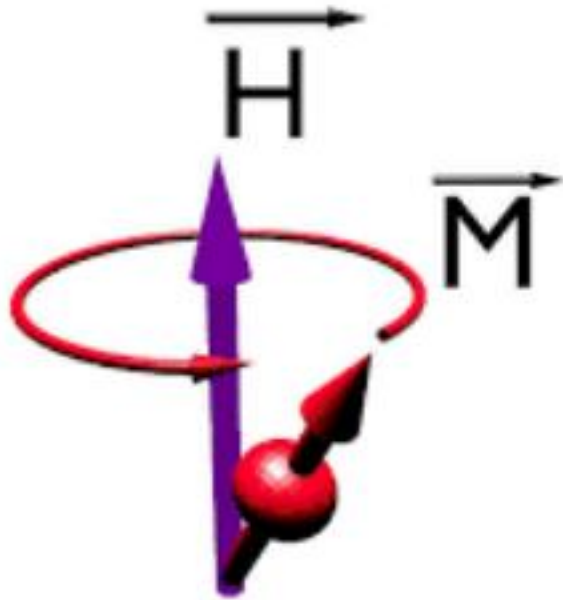
3. Механизмы переноса спина

1. Спин-поляризованный ток



2. Спиновые волны

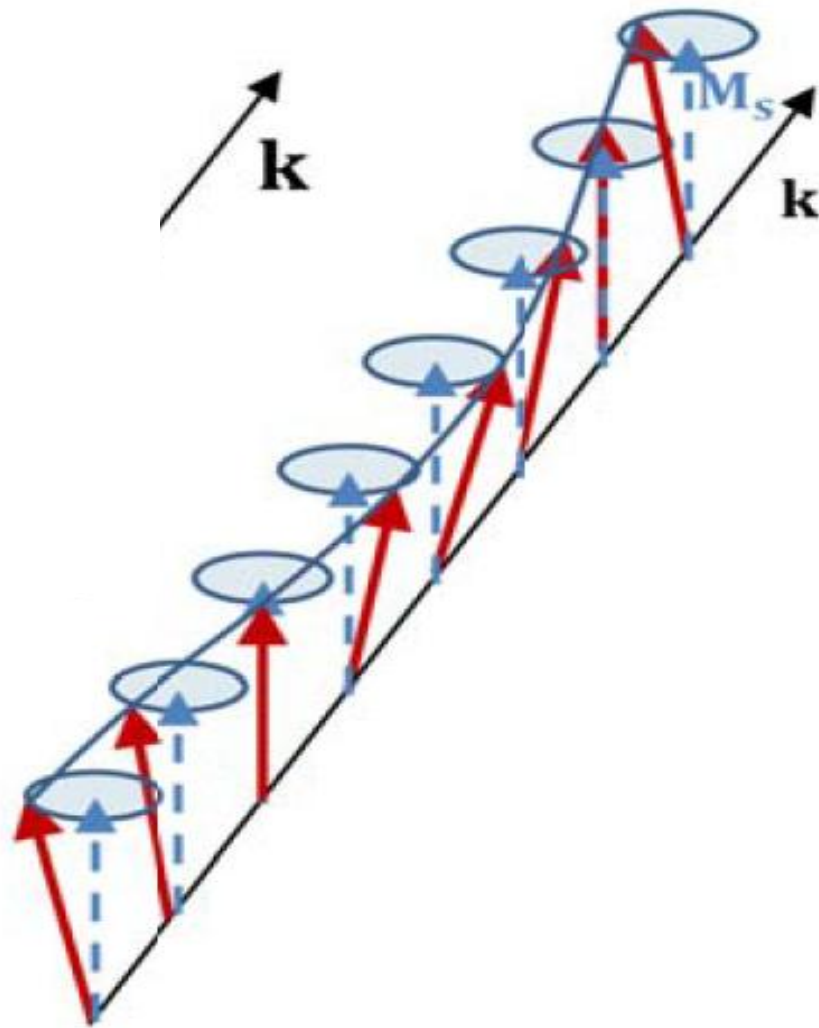
Уравнение Ландау — Лифшица (гармонический осциллятор)



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

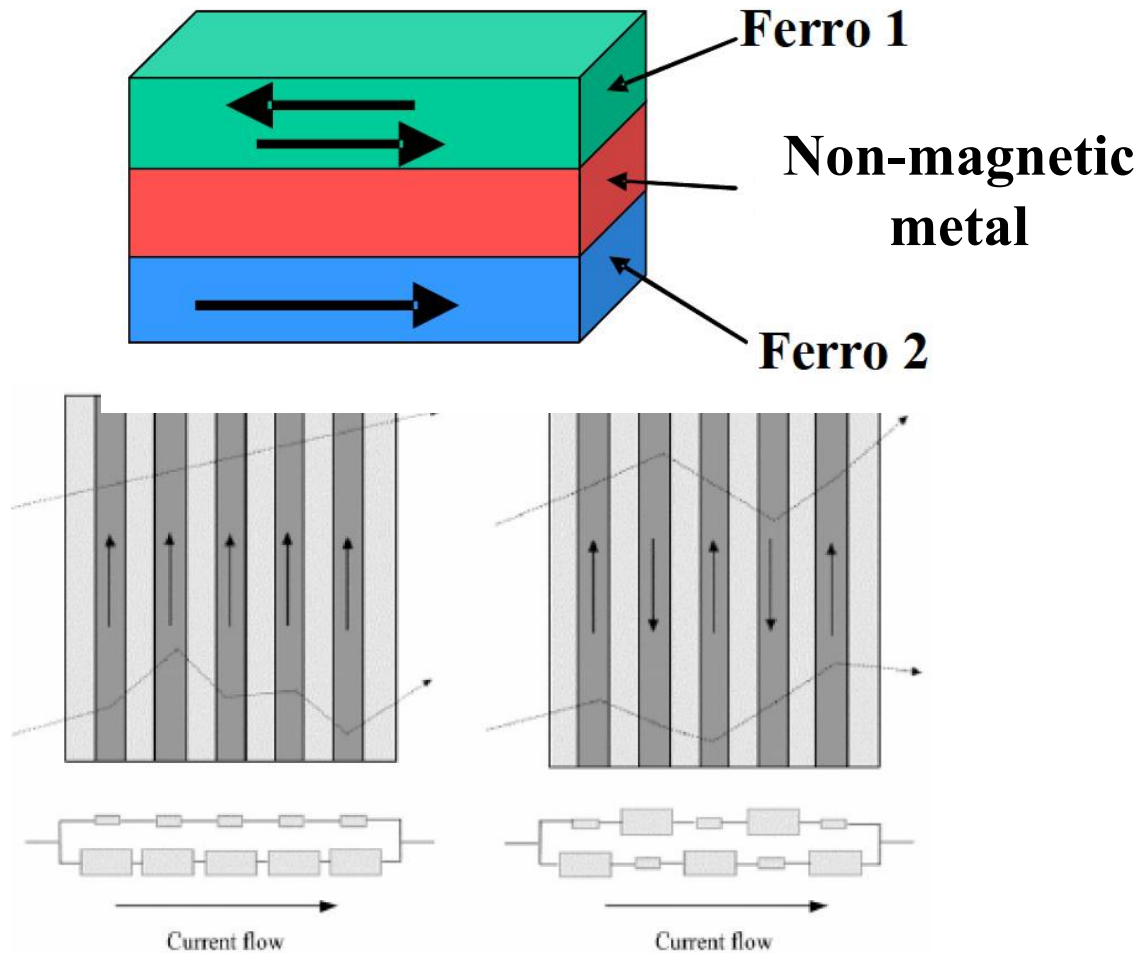
Гармоническая прецессия – Ферромагнитный резонанс (ФМР)

Спиновые волны = Магноны



3. Спинтроника: что реально она даёт?

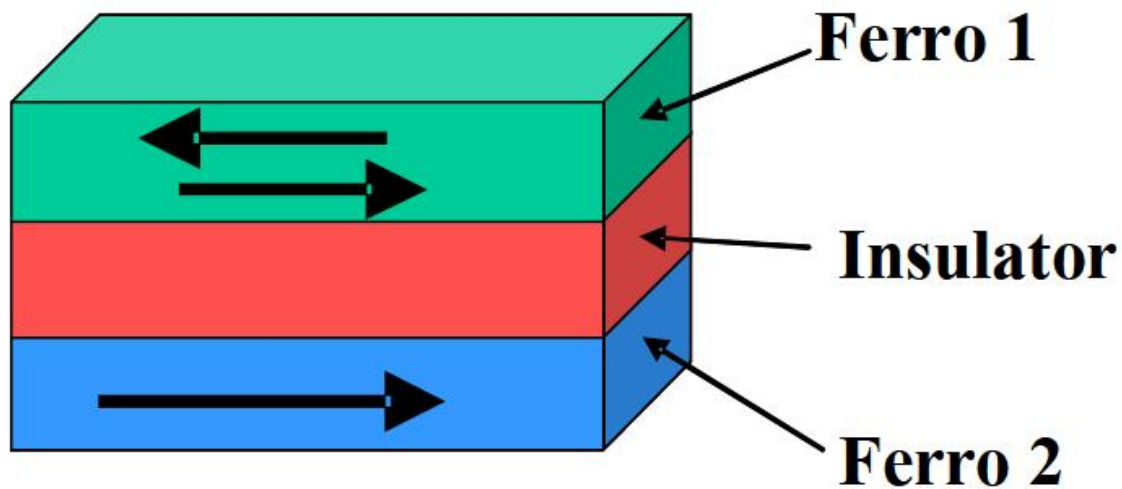
❖ Гигантское магнитное сопротивление



Mott two current model

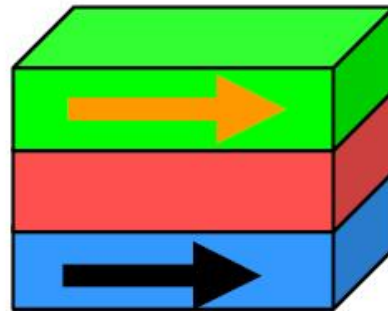
Туннельное магнитное сопротивление

Tunneling Magneto-Resistance (TMR)

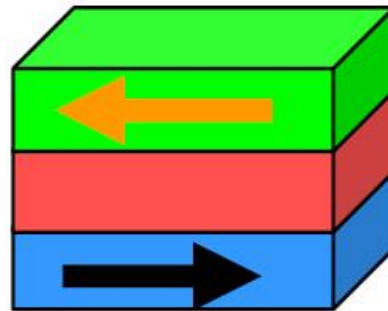


Применения GMR/TMR

"0"



"1"



*Ячейка
памяти*

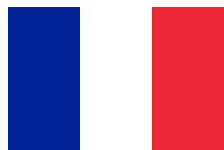
*Датчики
магнитного поля
типа Spin Valve
(спиновый клапан)*

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 Julich

Экспериментатор, специалист в
области BLS спектроскопии



❖ Магنونика
(спин-волновая электроника)



Борис Антонович Калинин
(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)

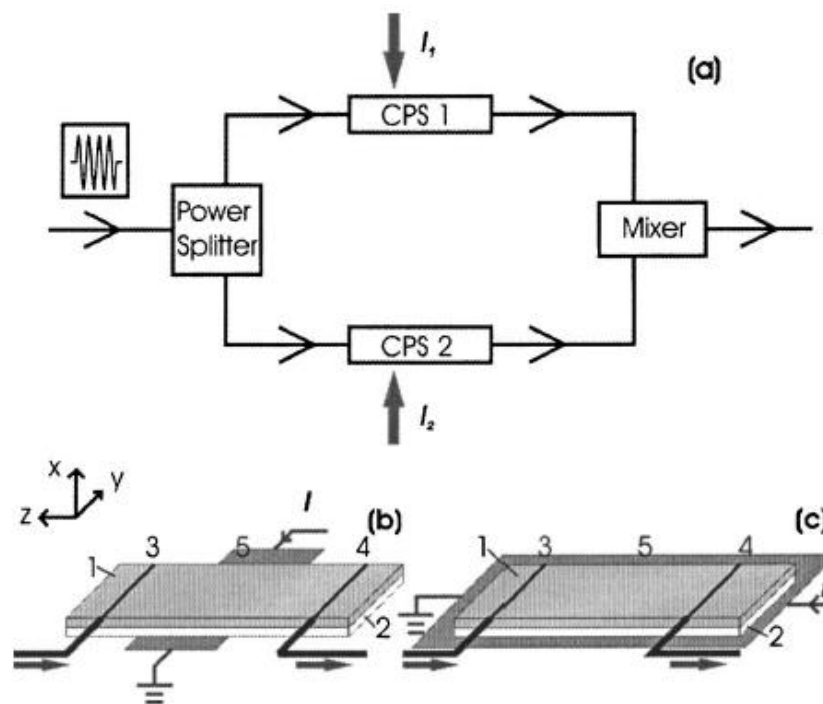
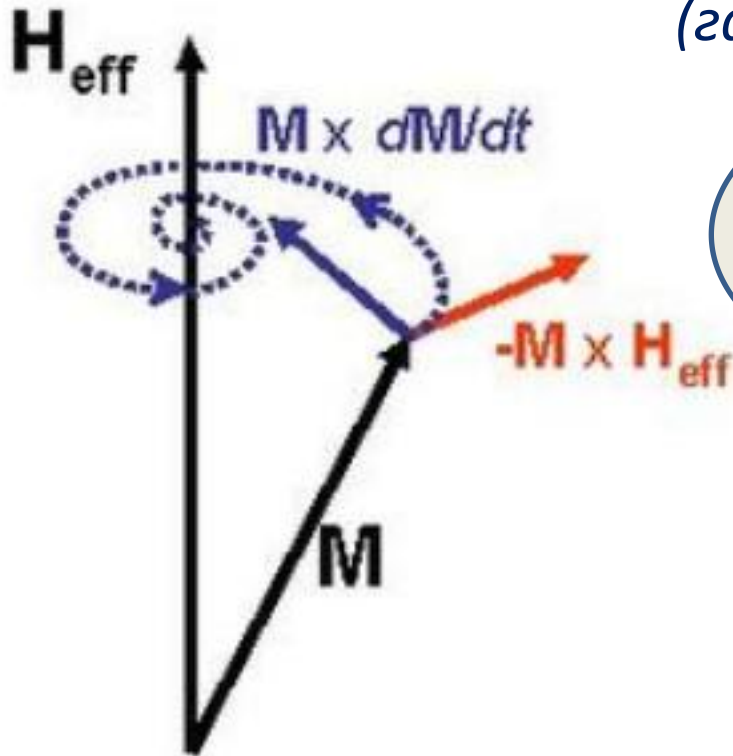


FIG. 1. (a) Schematic diagram of Mach-Zehnder interferometer. (b) Controlled phase shifter (CPS) based on backward volume magnetostatic spin wave (BVMSW) propagation. (c) CPS based on magnetostatic surface spin wave (MSSW) propagation. 1-ferromagnetic film, 2-nonmagnetic substrate, 3-input strip-line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

❖ *Спин-трансферные наноосцилляторы СВЧ*

Уравнение Ландау — Лифшица — Гильберта

Гармоническая прецессия
(гармонический осциллятор)



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

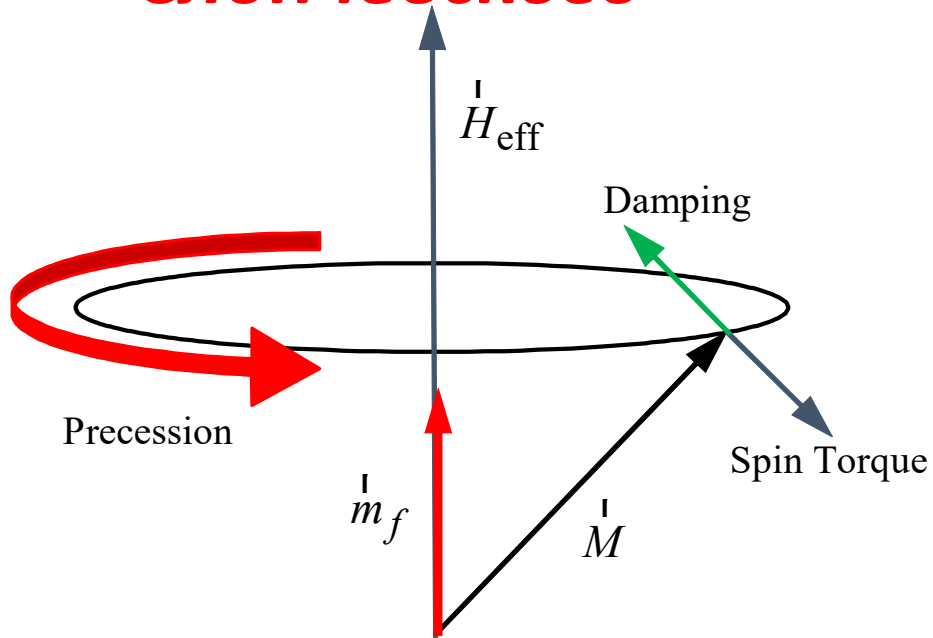
$$+ \frac{\alpha}{M_0} \left(\vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt} \right)$$

Затухание (потери,
порождающие Джоулев нагрев)

**СПИН-ТРАНСФЕРНЫЕ
НАНООСЦИЛЛЯТОРЫ СВЧ
(*Spin-Torque Nano-Oscillators*)**

**В основе лежит эффект переноса
крутильного момента (*spin torque*).**

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

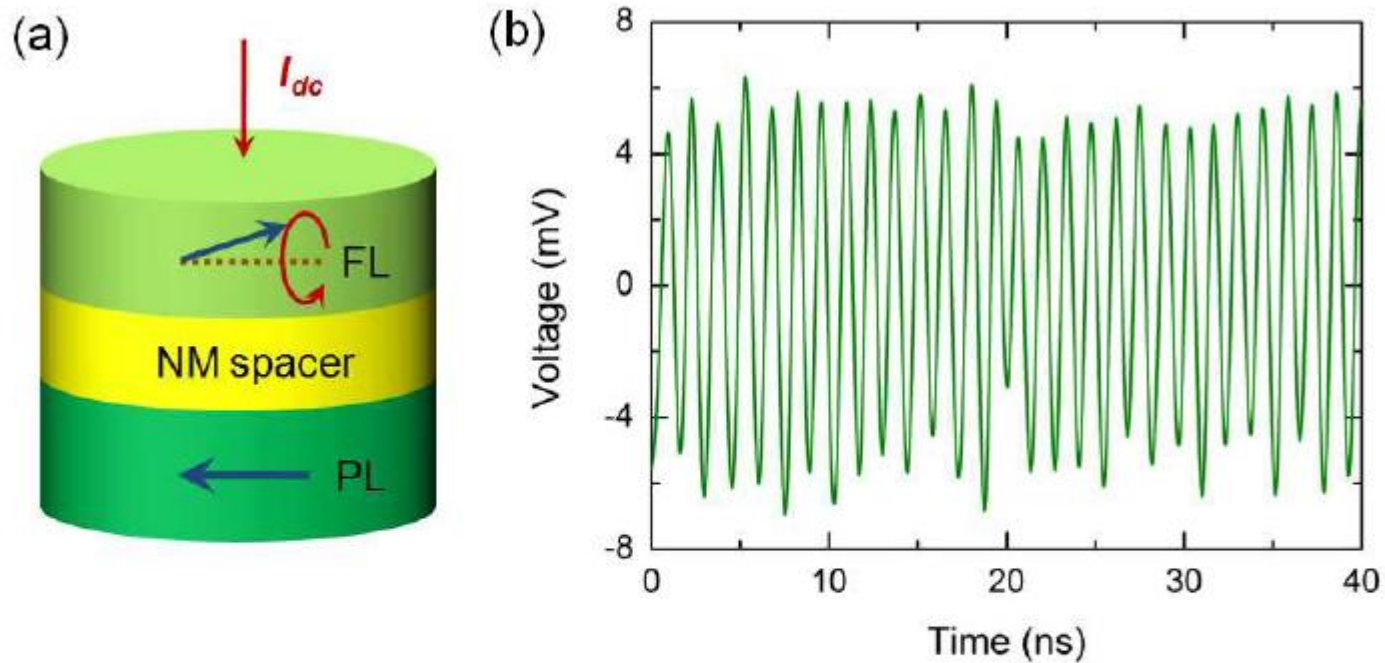
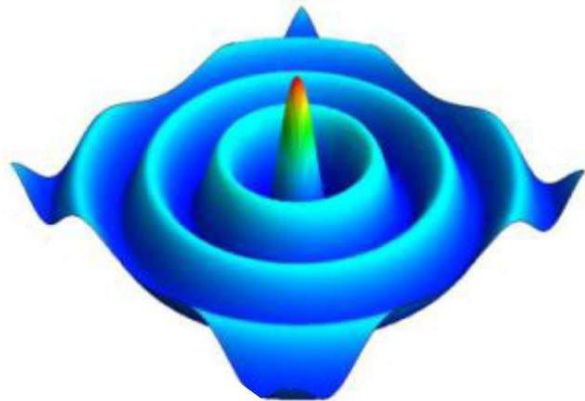
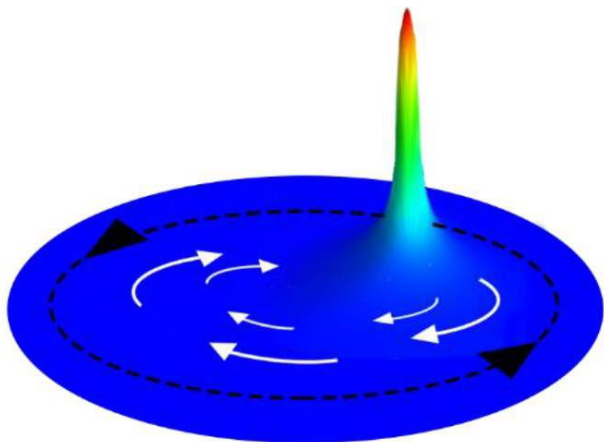


Fig.1 (a) A STNO device consists of a "fixed" layer that serves as polarizer (PL) and a "free" layer (FL) whose magnetization is excited into steady state oscillations, NM spacer denotes non-magnetic layer, *i.e.* insulator or non-magnetic metal. (b)

Propagating Waves



Vortex



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

1. Эффект Рашбы (*Rashba Effect*)

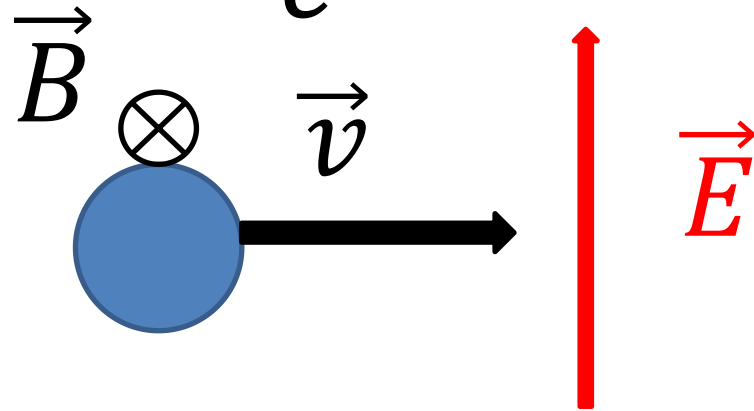


Эммануил Иосифович Рашба (р. 30 октября 1927, Киев) — советский физик-теоретик, доктор физико-математических наук (1964). Лауреат [Ленинской премии](#) 1966 года и [премии имени А. Ф. Иоффе](#) (1987).

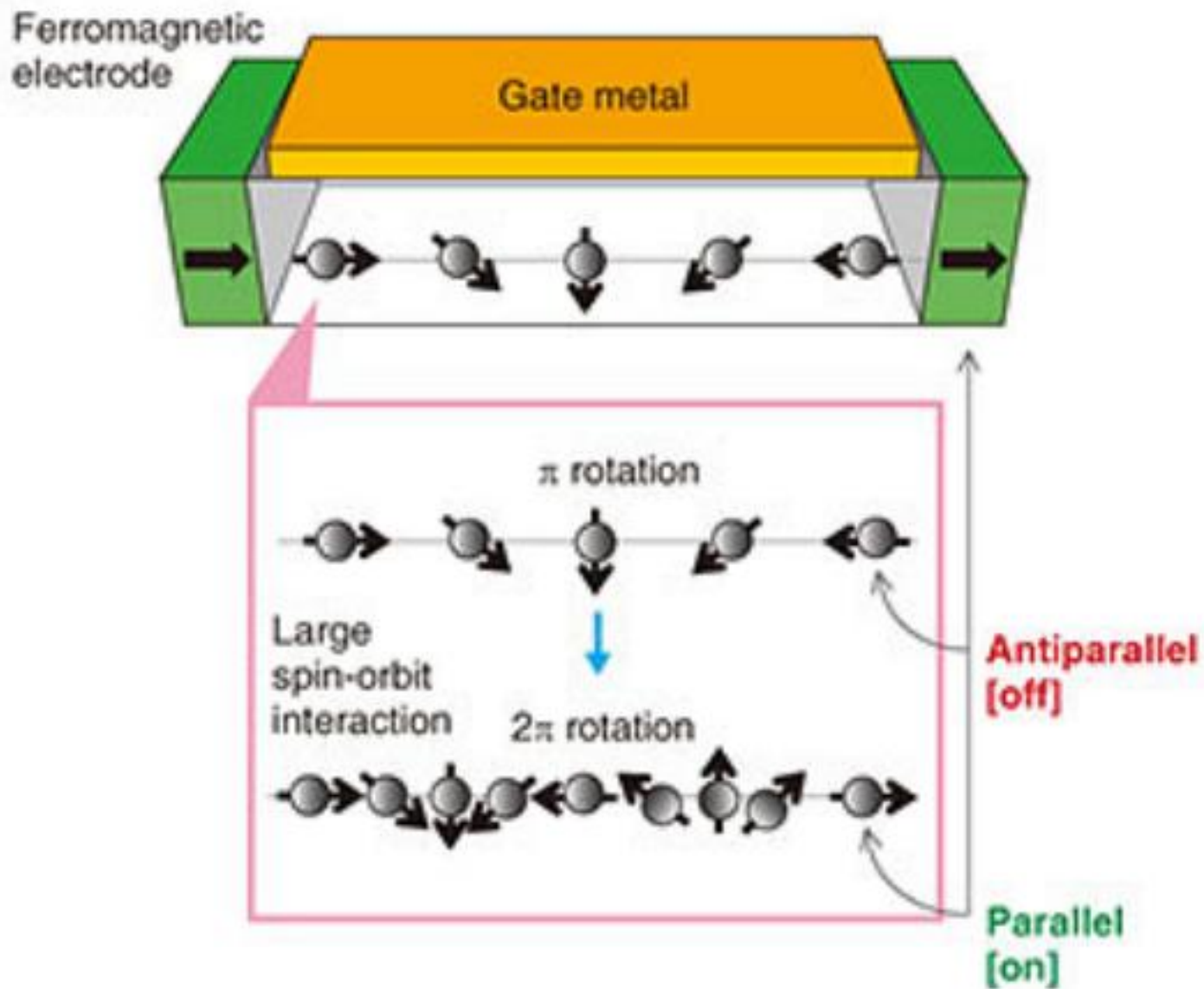
❖ Спин-орбитальное взаимодействие (движение электрона в электрическом поле)

Преобразования Лоренца для
электрического поля

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



Транзистор на эффекте Рашбы. *Rashba transistor*



2. 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
всем в магнитном мире столь
интересным?



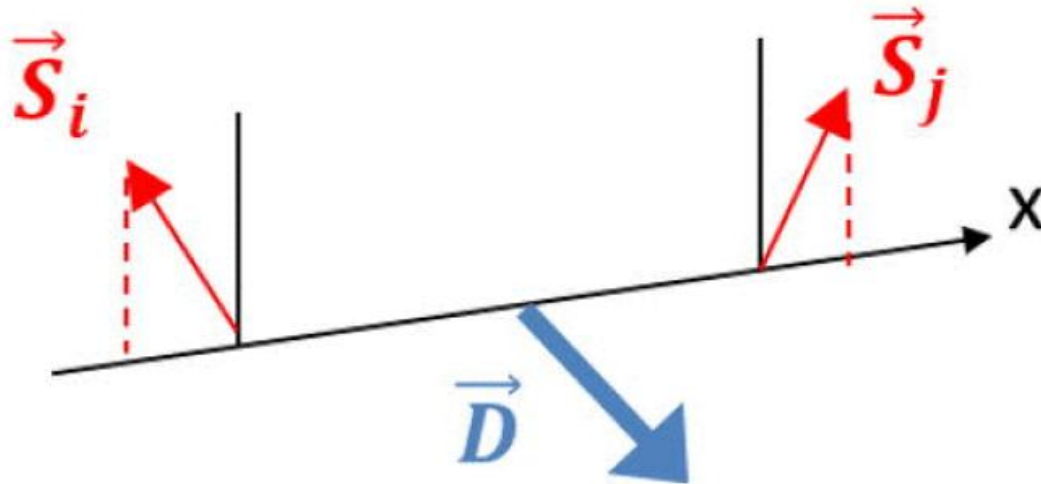
Pt (3 HM)

Co (1 HM)

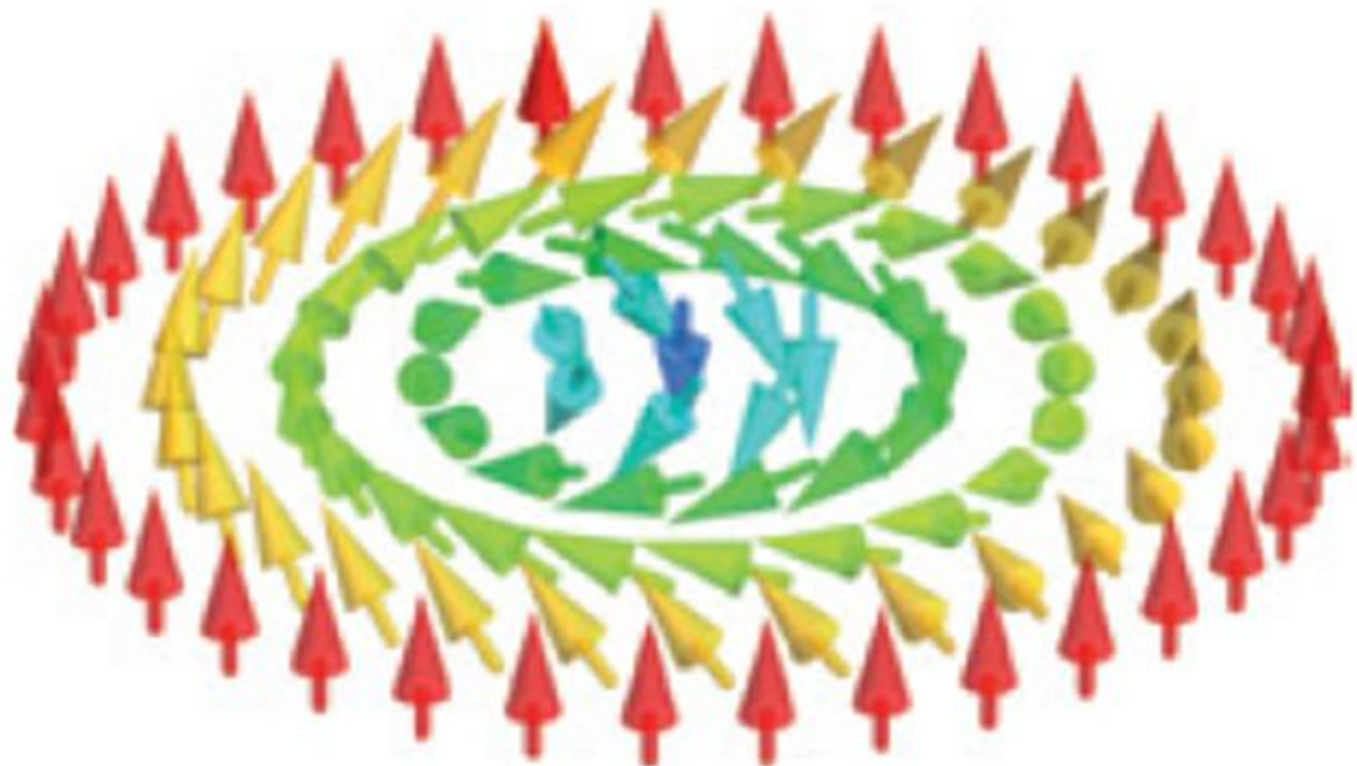
❖ Анизотропное взаимодействие
(Дзялошинского-Мории) **DMI**

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

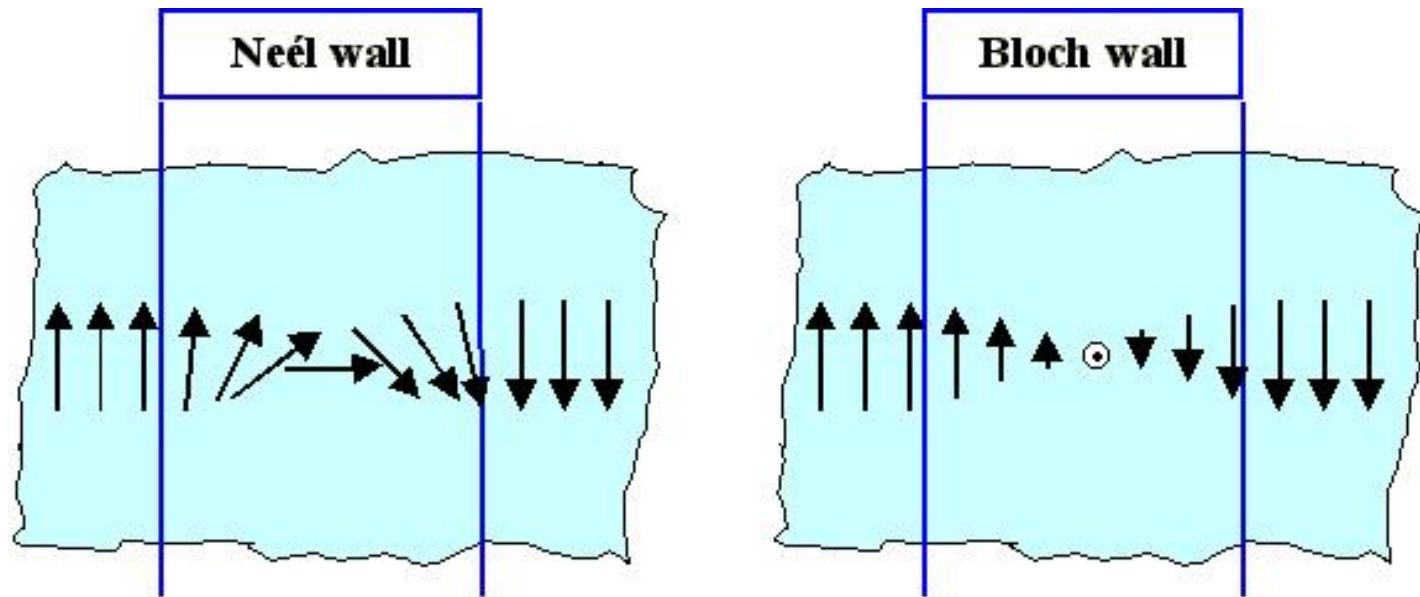
(b) DMI Form 2



б



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



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

Menu | Home | ☆ skirmions_nature_A... x | + Créer | Se connecter

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

nature nanotechnology | **ARTICLES**

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

Room-temperature chiral magnetic skyrmions in ultrathin magnetic nanostructures

Olivier Boule^{1,2,3*}, Jan Vogel^{4,5}, Hongxin Yang^{1,2,3}, Stefania Pizzini^{4,5}, Dayane de Souza Chaves^{4,5}, Andrea Locatelli⁶, Tefik 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 | FRA | 11/05/2024

Research Interest Score	493.8
Citations	1 043
Reads	655

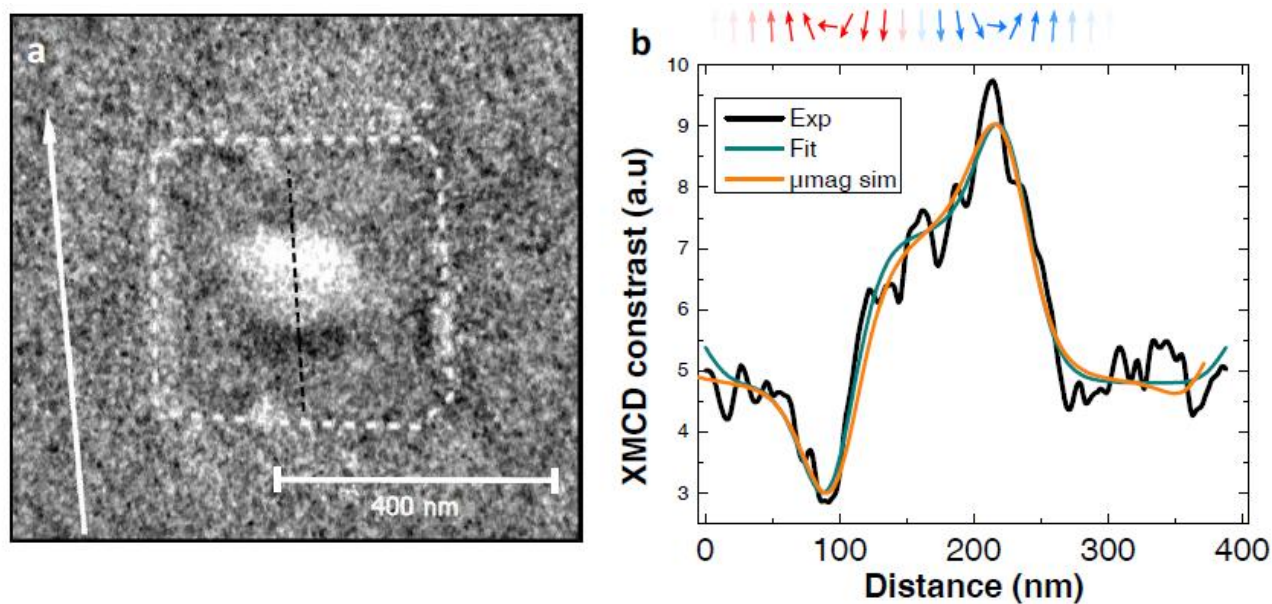
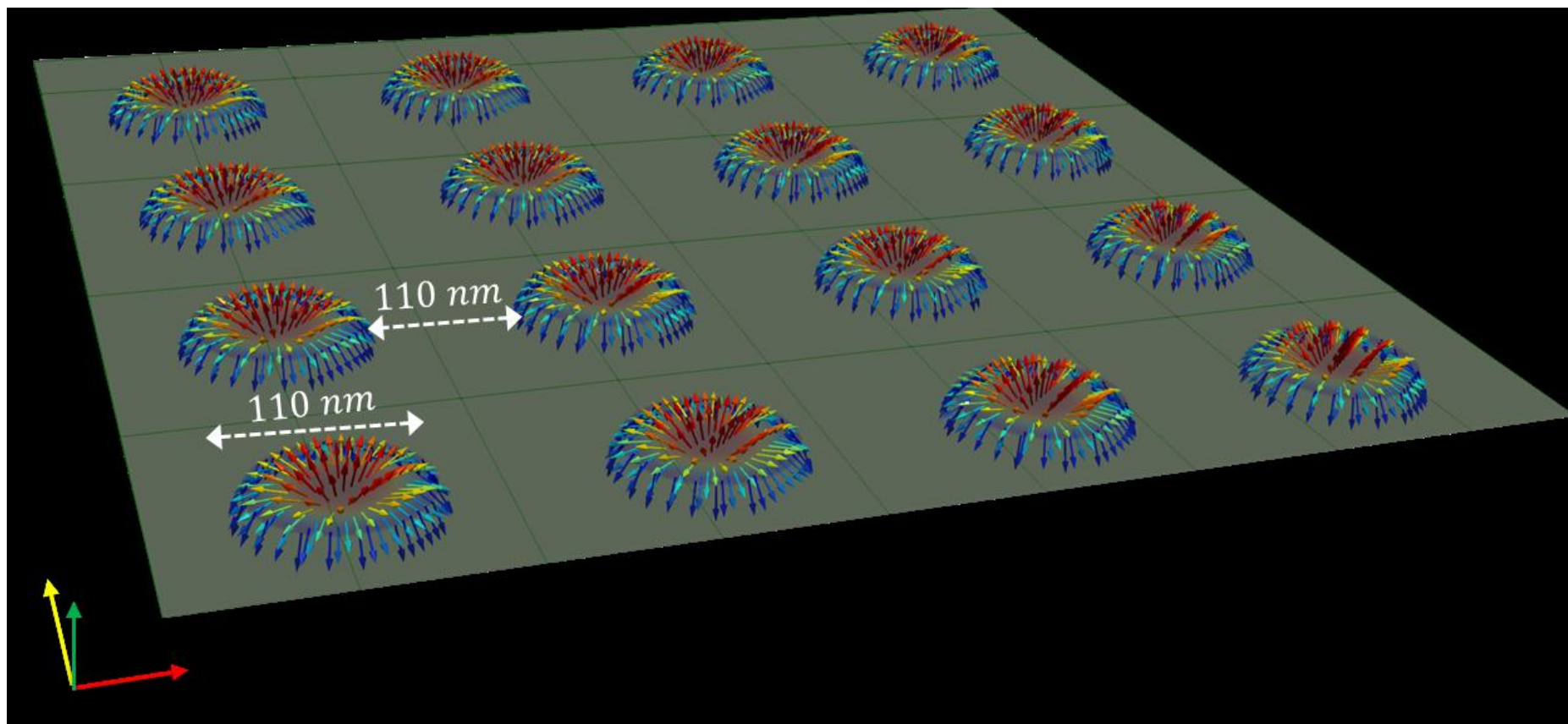


Figure 3: **Magnetic skyrmion observed at room temperature and zero applied external magnetic field** (a) XMCD-PEEM image of a 420 nm square dot (indicated by the dotted line) and (b) linescan along the dotted black line (black line). The linescan has been averaged perpendicularly to the linescan over 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 $2 \cdot 10^{11}$ секунды.
- Скорость передачи информации ***$50 \cdot 10^9$ бит/сек.***



3. 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

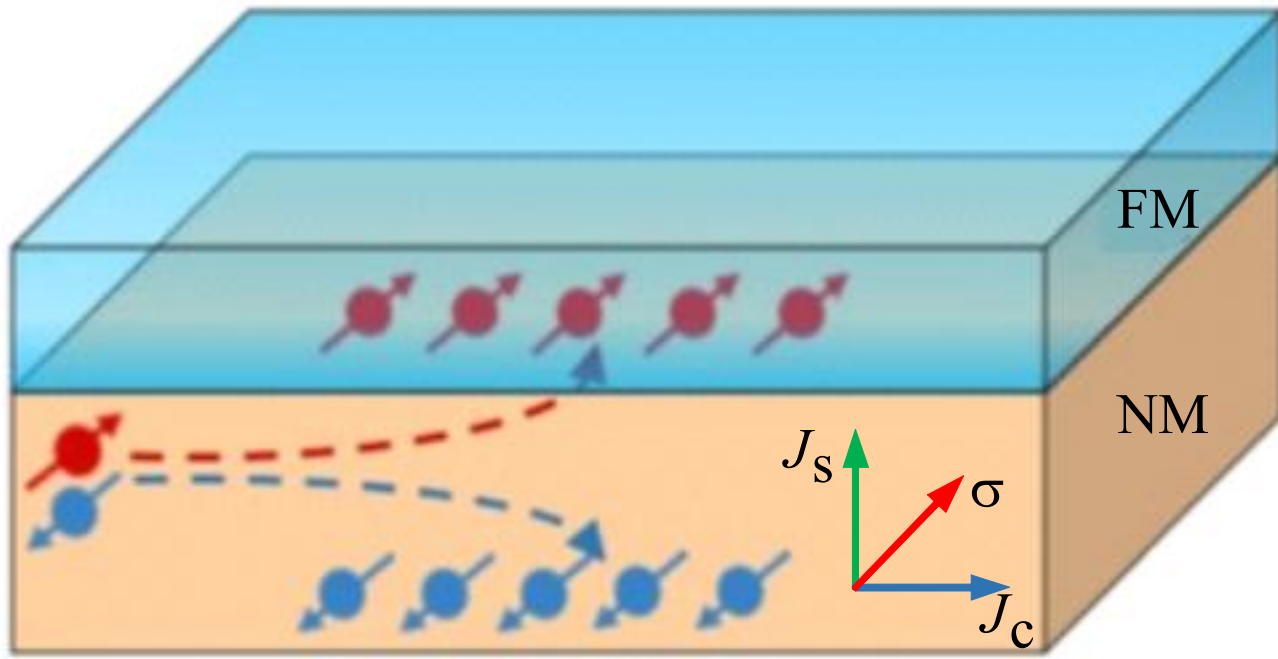
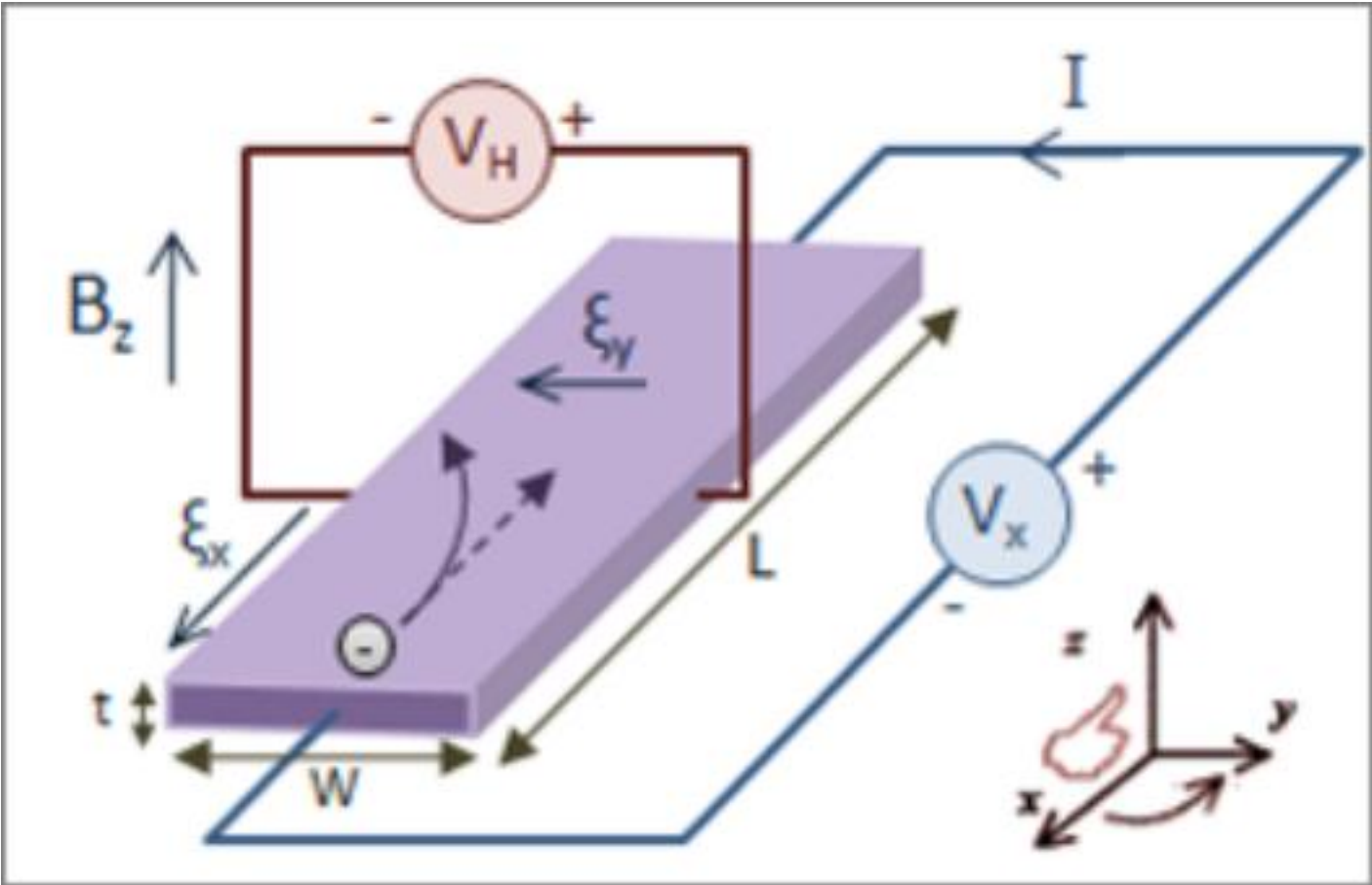


Fig. 4. Spin-Hall Effect



Трековая память (Racetrack memory)

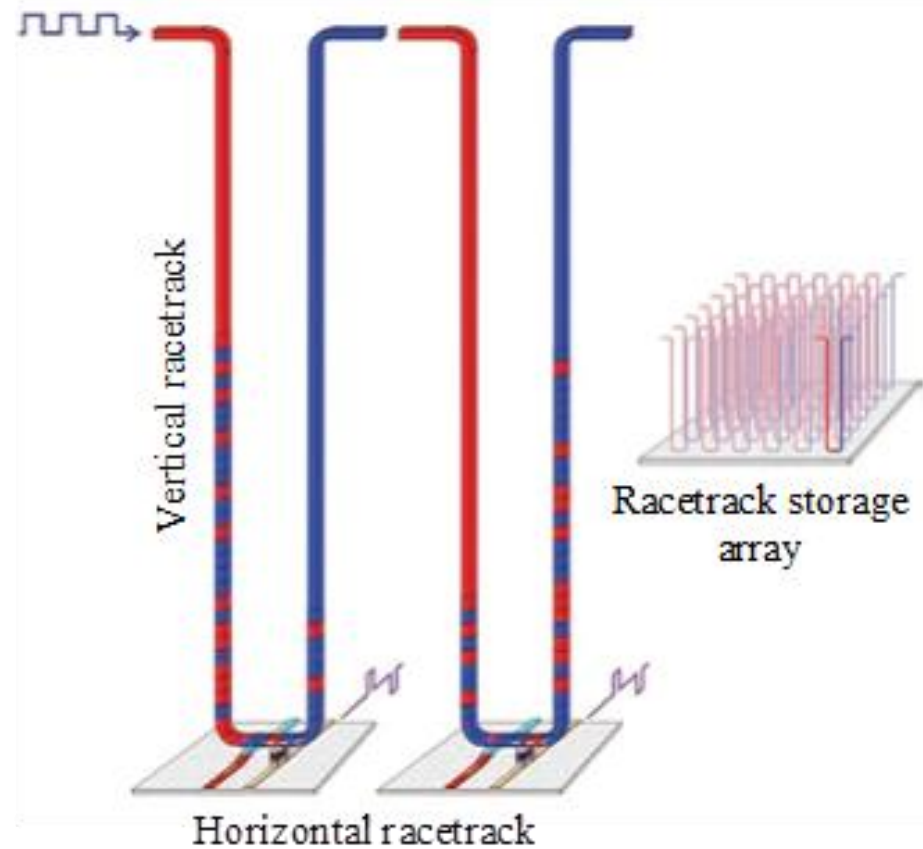


Fig. 3. Racetrack memory, a step toward three-dimensional microelectronic devices

❖ *Терагерцовая спинтроника*

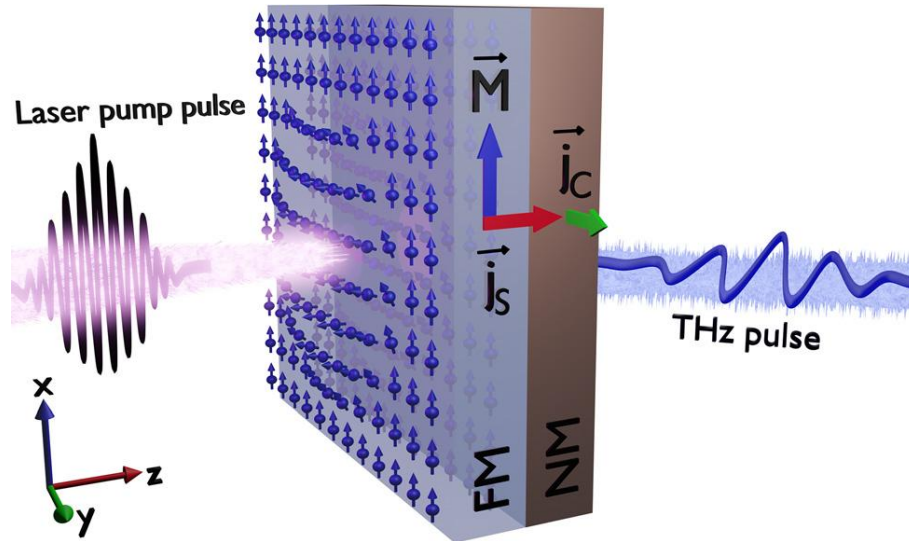
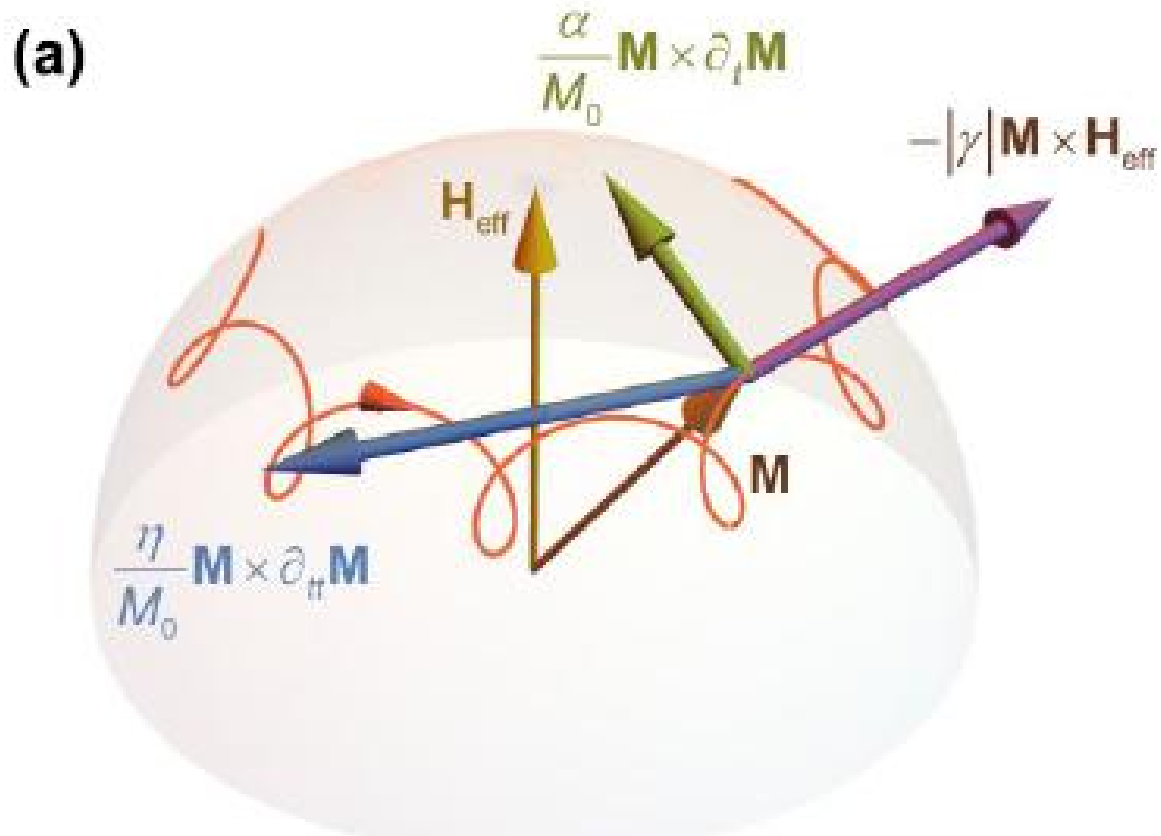


Figure 1: Graphical representation of the THz emission from FM/NM heterostructures after fs-laser excitation of the spin system. The magnetization points in positive x -direction, j_s is the spin current in z -direction, along the layer stacking and j_c is the charge current in y -direction. The inverse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

Нутацун (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)

Zoom Réunion Vous voyez actuellement l'écran de clientlap Options d'affichage

Afficher

Structure thématique de l'action

TP1: Materials

TP2: Characterization

TP3: Theory

MP1: Chiral textures

MP2: Spin THz

MP3: Magnonics

MP4: RF oscillators

MP5: Spin Sensors

Novel applications

OPEN CALLS: *New ideas, new concepts*

Training, Communication, International, Coordination

anr® FRANCE 2030

Réunion de lancement- 11

Réactiver le son Démarrer la vidéo Participants 21 Discussion Partager l'écran Réactions Applications Quitter

clientlap

astachkevitch

astachkevitch

Lucas GOUNET

Catherine Gour...

Catherine Gourdon

Lucian Prejbeanu

Lucian Prejbeanu

14:53 18/09/2023

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...

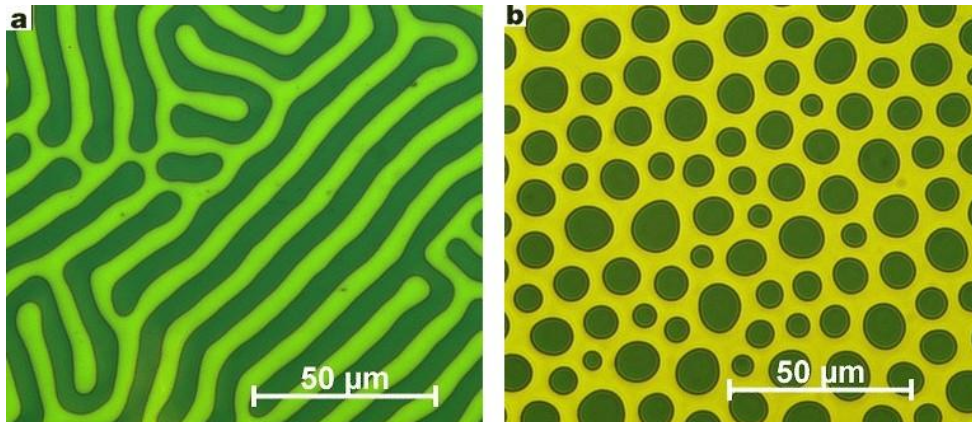
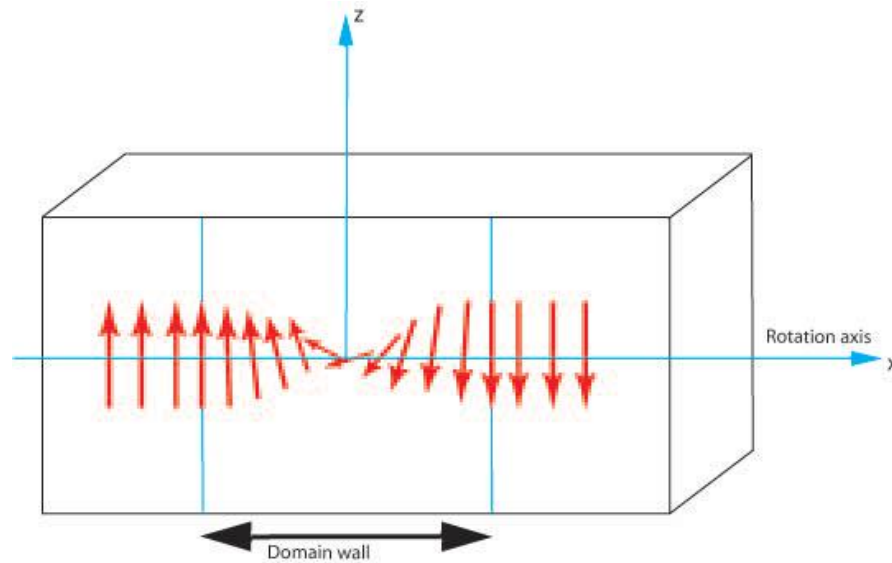
Основные центры

- 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

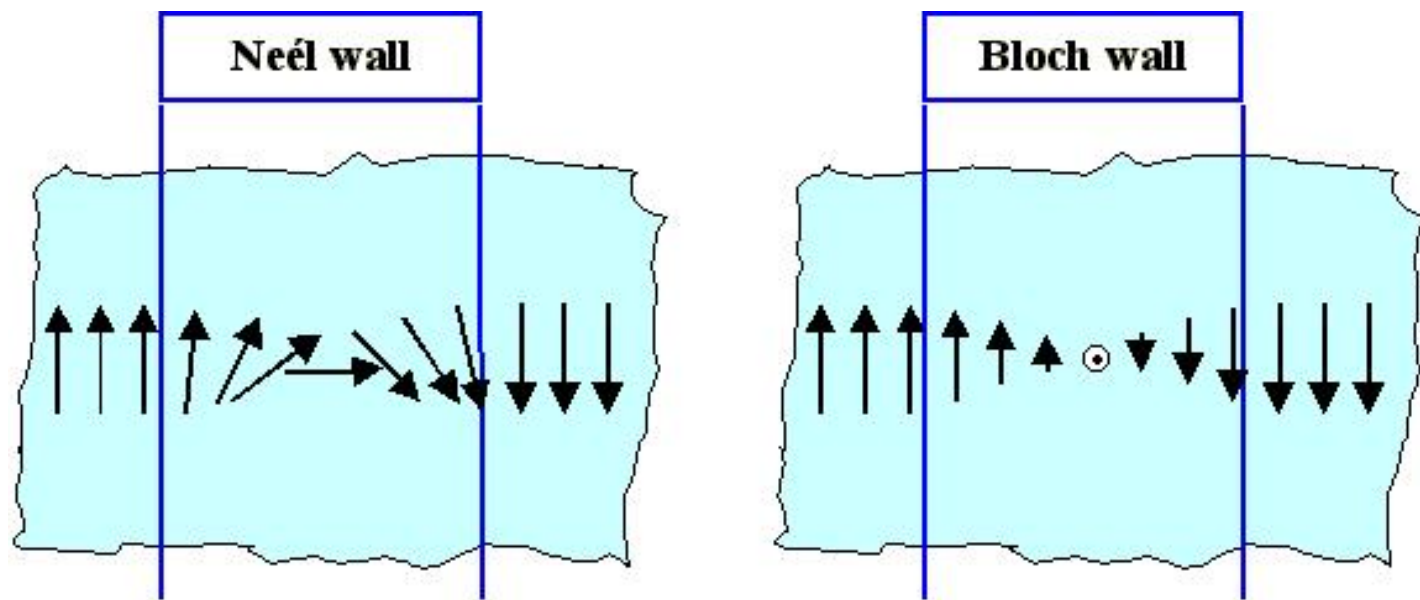
Еррur si тuove !
(Она, спинтроника, движется!)



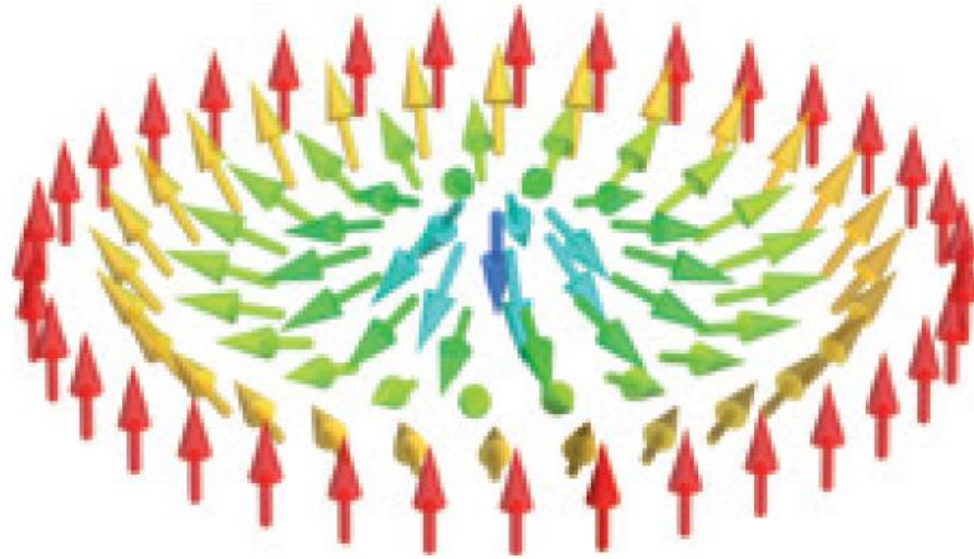
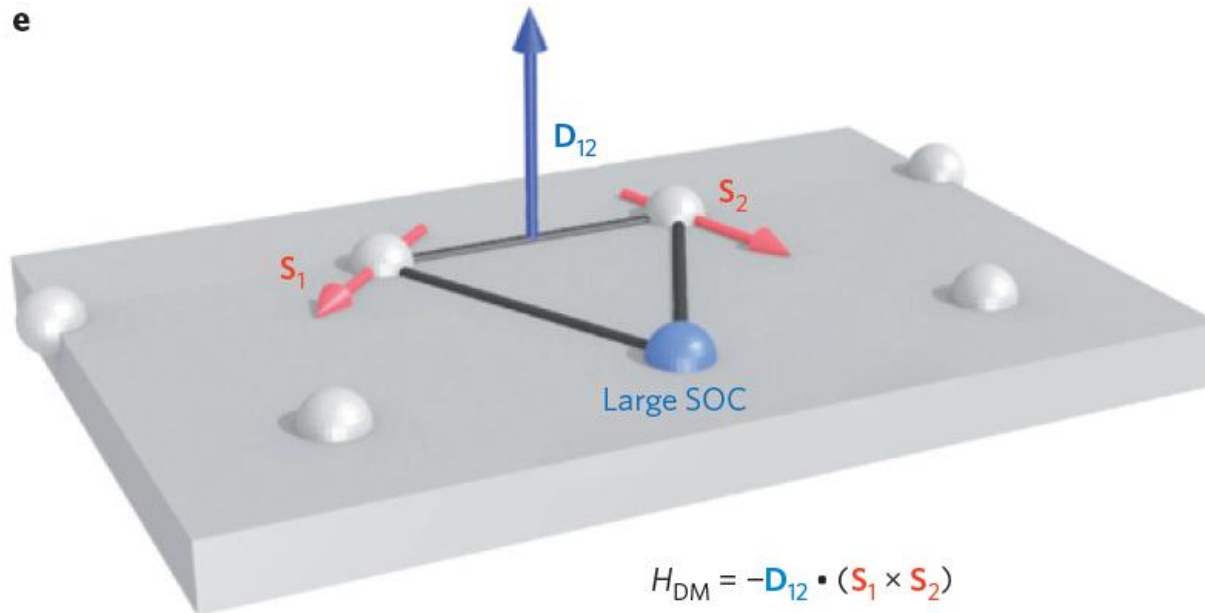
Цилиндрические магнитные домены (ЦМД) Bubble domains (Magnetic Bubble Memory 1970s)



Вид сверху



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

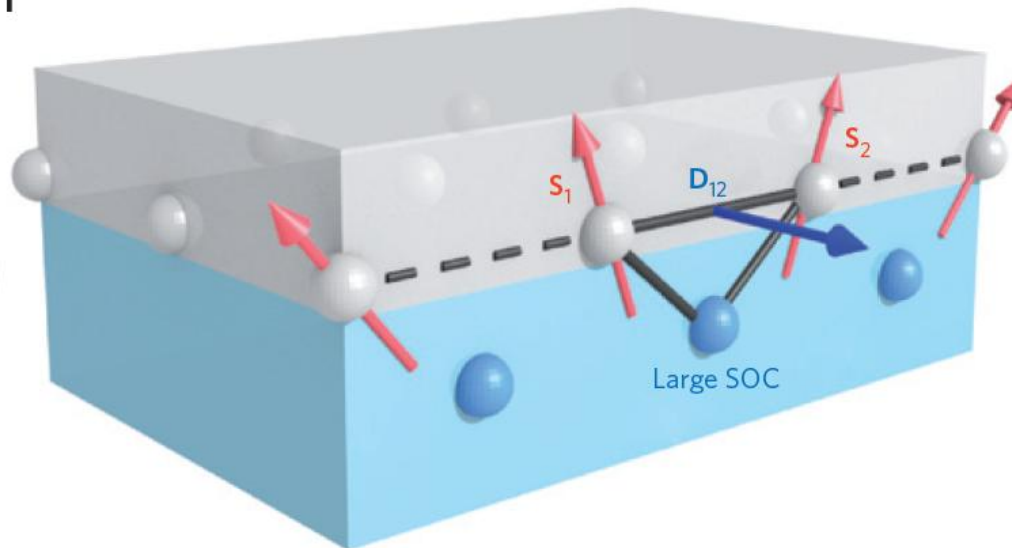
a**e**

$$H_{DM} = -D_{12} \cdot (S_1 \times S_2)$$

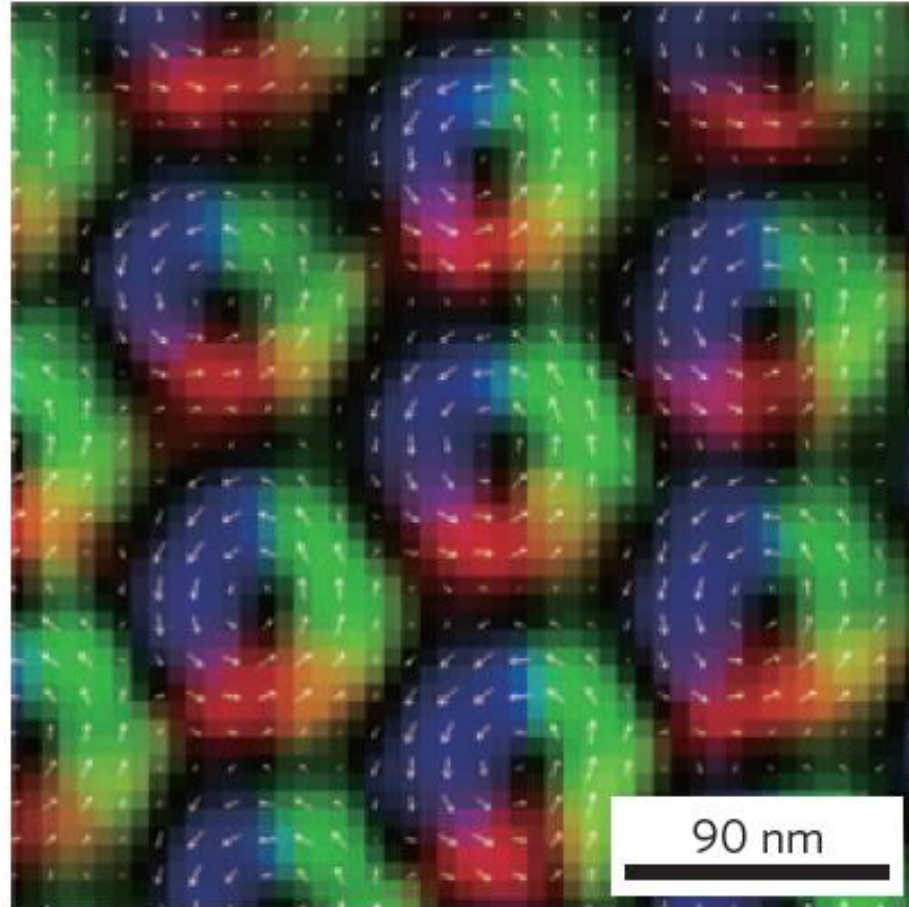
b

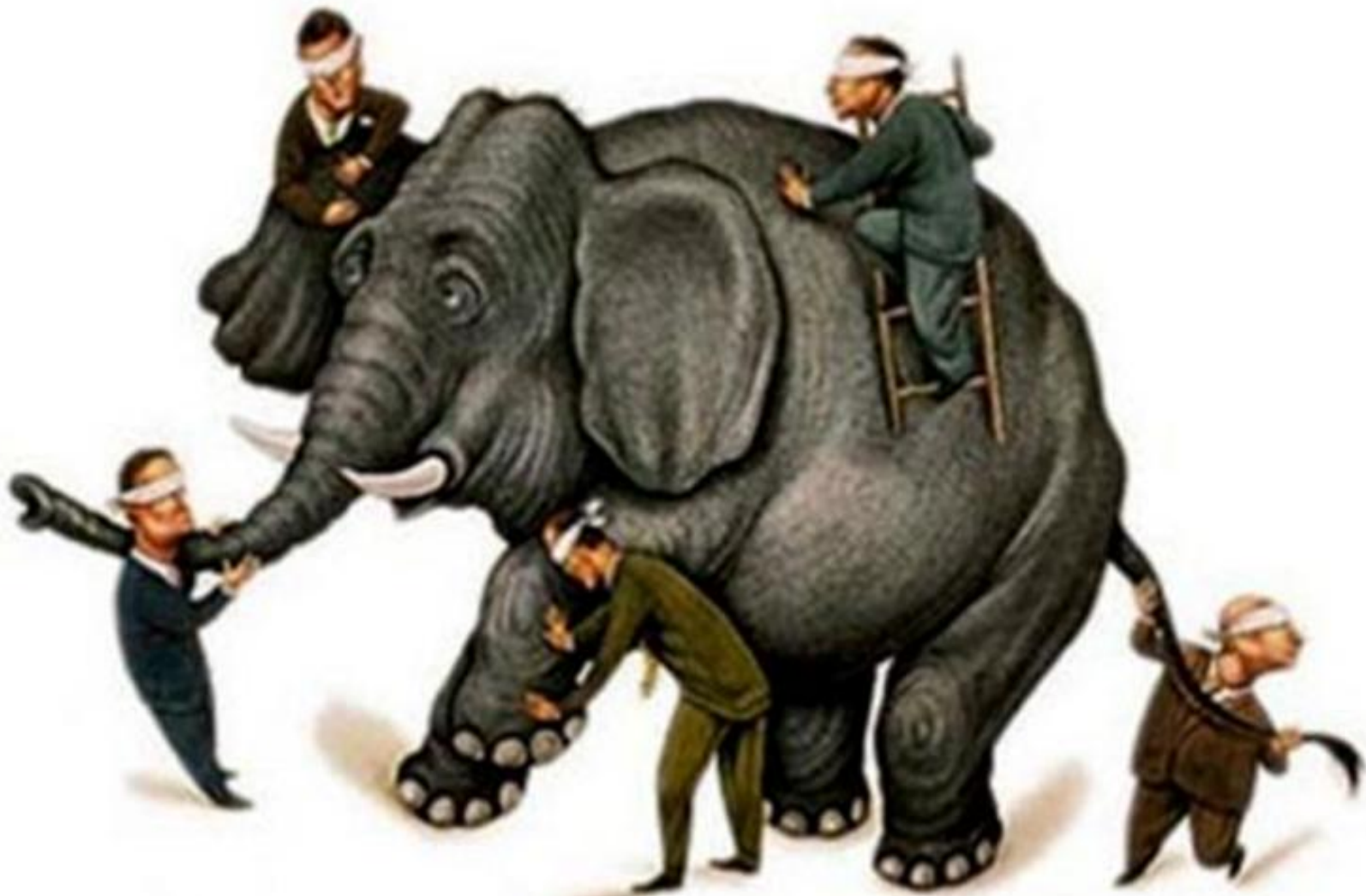


f



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...