



Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Ciências Exatas e da Natureza
Departamento de Física
sergio.rezende@ufpe.br

O que é Spintrônica

Sergio M. Rezende



Física ao Vivo (Virtual)

Recife  25 de novembro de 2020

Web-palestra em homenagem

às > 170 000 vítimas da Covid-19 no Brasil



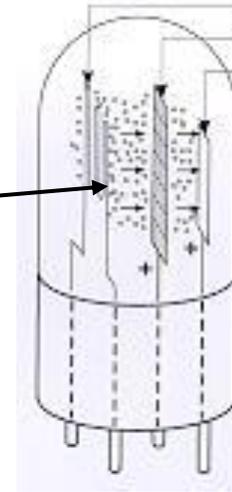
SUMÁRIO

- ❑ Eletrônica
- ❑ Magnetismo e materiais Magnéticos
- ❑ Spintrônica

1907- Nascimento da eletrônica

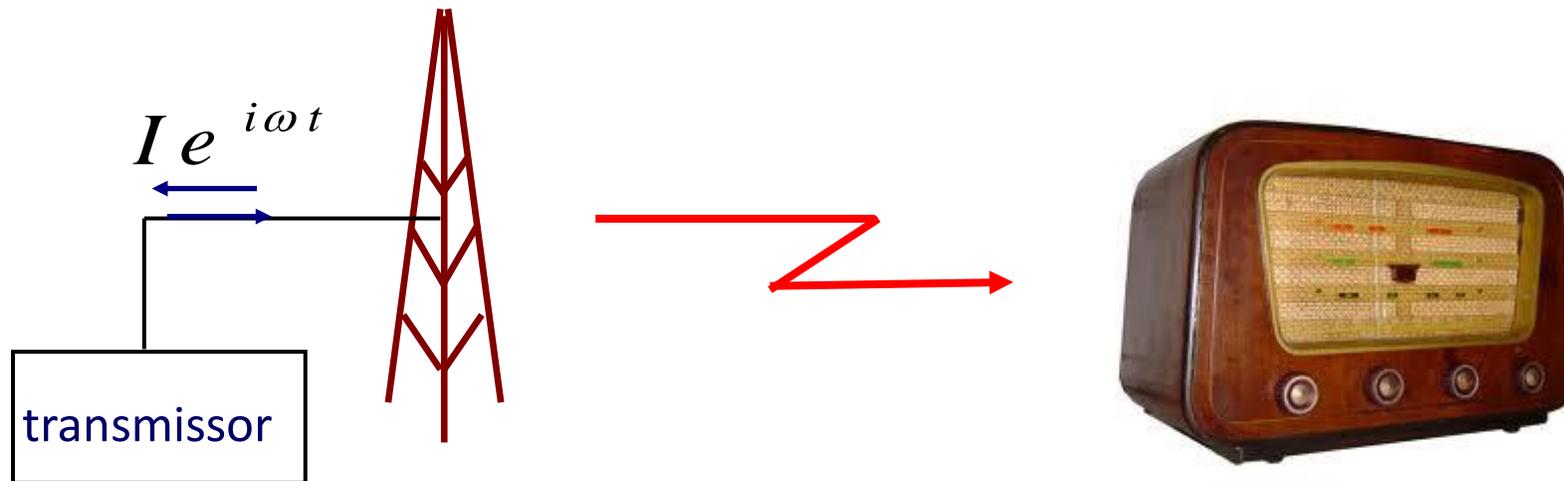
(1907) De Forest inventa a válvula triodo

elétrons emitidos pelo catodo são acelerados para a placa por um campo elétrico



(1905-1910) Marconi e Landel de Moura fazem transmissão de sinais a distância

(1913-1918) Armstrong desenvolve o rádio receptor



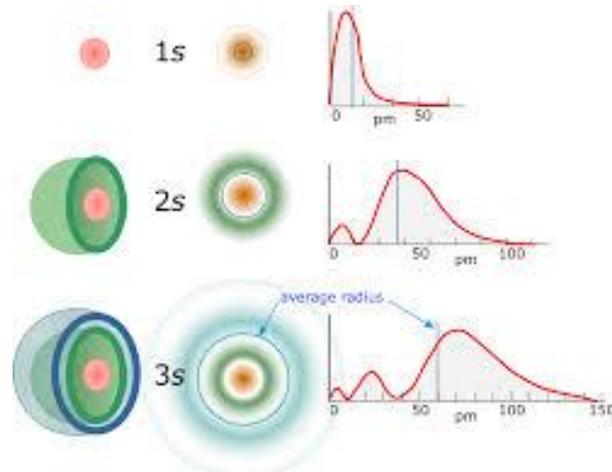
O rádio revolucionou as comunicações no Mundo e os costumes da Humanidade

1925- Mecânica Quântica entra em cena

"pela criação da mecânica quântica, cuja aplicação levou à descoberta das formas alotrópicas do hidrogênio"

Equação de Schrödinger

$$H\psi = i\hbar \frac{d\psi}{dt}$$



Werner
Heisenberg
(1901-1976)



1932



Erwin
Schrödinger
(1887-1961)

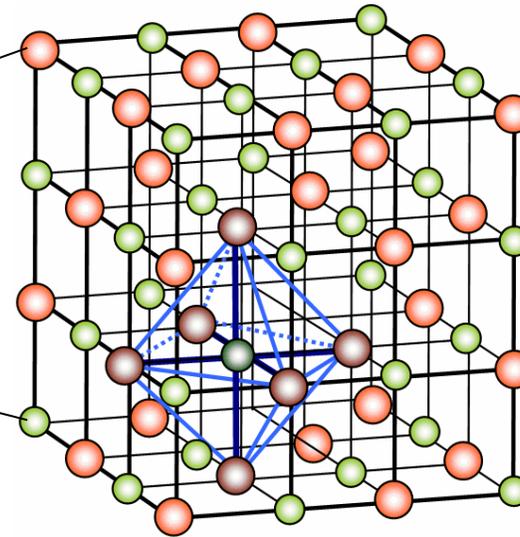


1933





k0297218 fotosearch.com.br



Materiais

- Isolantes
- Metais
- Semicondutores
- Orgânicos

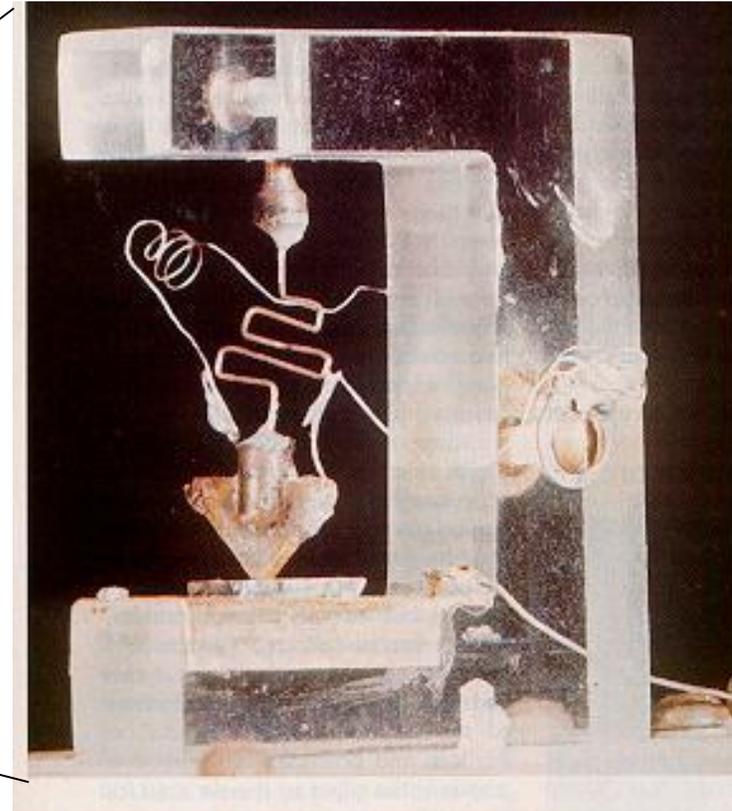
Propriedades

- Eletrônicas
- Ópticas
- Dielétricas
- Magnéticas
- Térmicas, etc

1947- A invenção do transistor



INVENTORS Shockley (seated), Bardeen (left) and Brattain (right) were the first to demonstrate a solid-state amplifier (opposite page).



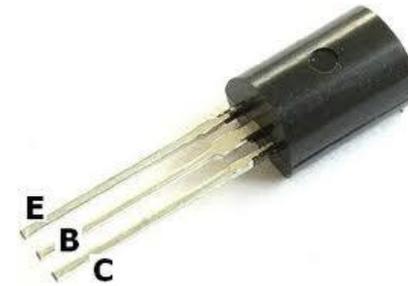
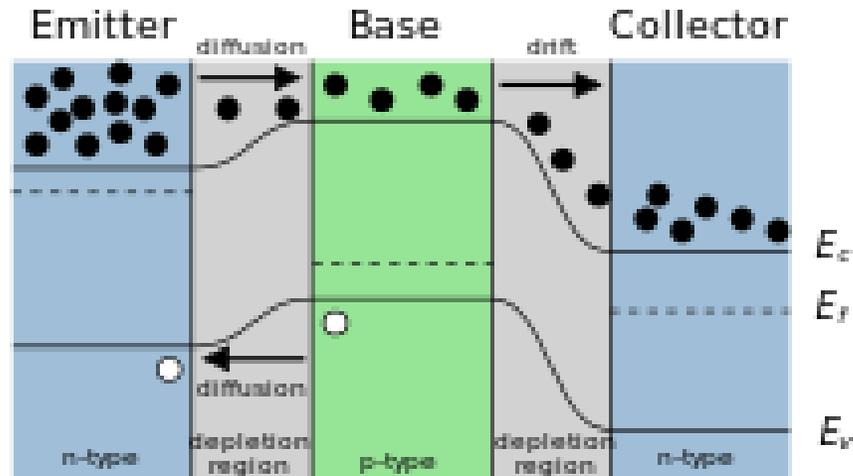
Em Dez/ 1947, Shockley, Bardeen e Bratain anunciaram no Bell Telephone Laboratory a invenção do **transistor** formado por junções de **semicondutores**



1956

A invenção do transistor

Transistor: Controle da corrente eletrônica



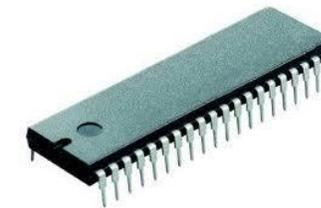
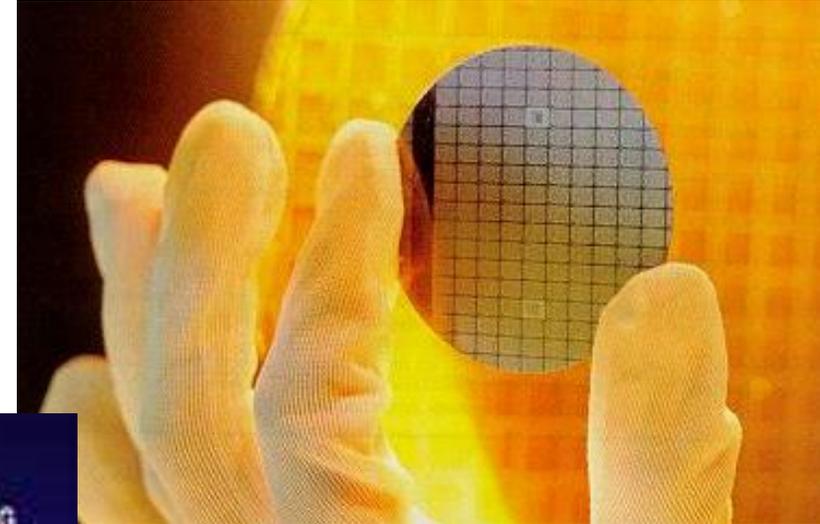
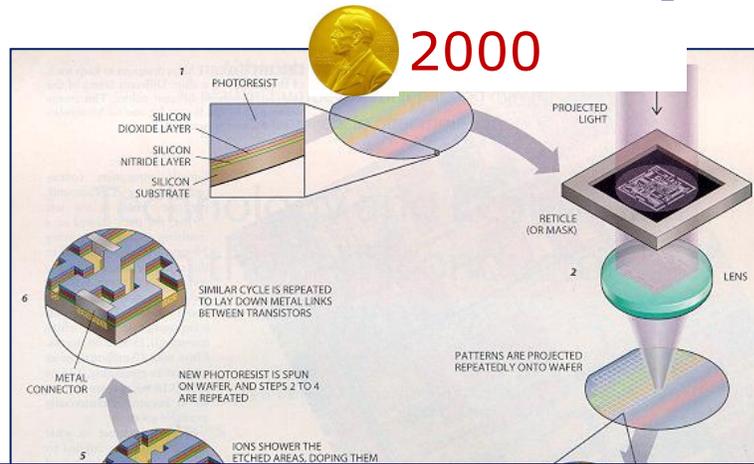
O transistor e outros dispositivos **semicondutores** substituíram as válvulas e revolucionaram a **eletrônica**

E a Ciência de Materiais ganhou grande impulso



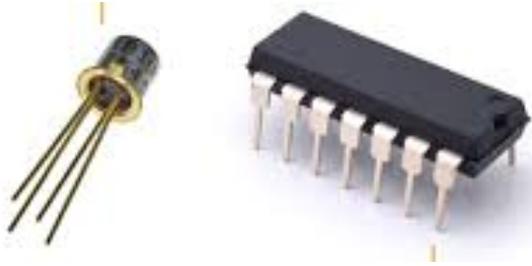
Evolução rápida e contínua da Eletrônica

Em 1958, Jack **Kilby** desenvolve o circuito integrado

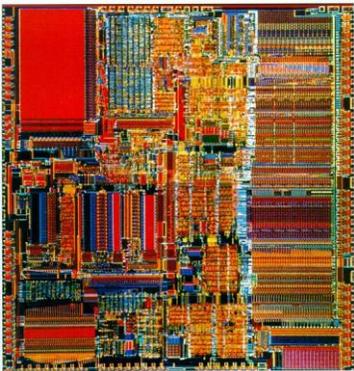


Os chips revolucionaram a eletrônica

Aplicações dos Chips na Eletrônica



Microprocessador



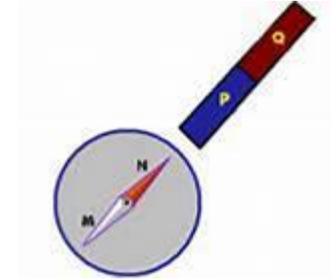
A **eletrônica** revolucionou os costumes da sociedade (comunicações, serviços, processos industriais, técnicas de diagnóstico médico, etc)

Magnetismo e Materiais Magnéticos

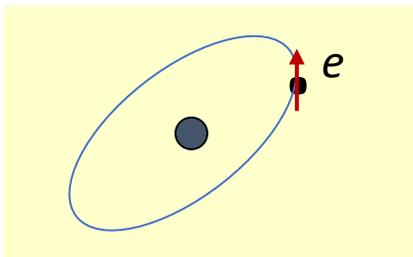
Além da carga elétrica, os elétrons têm spin



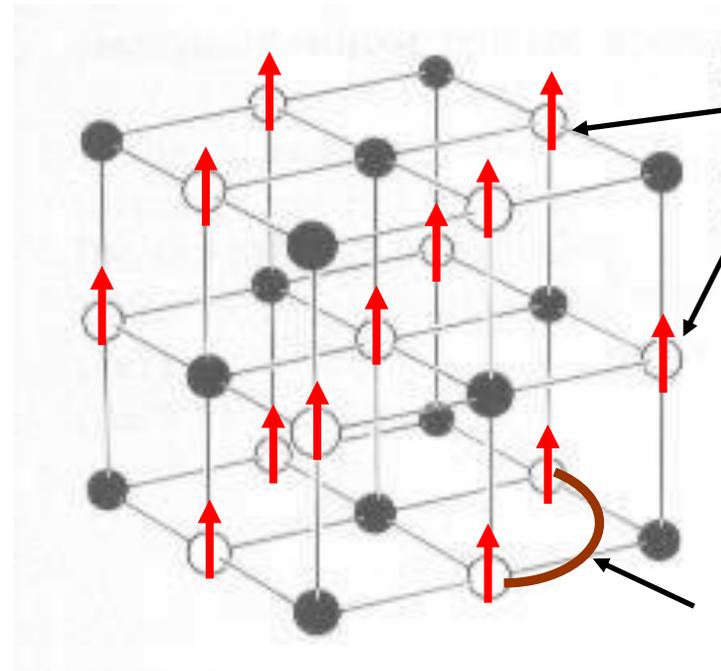
Ao spin está associado um momento magnético



Então os átomos também podem ter spin e momento magnético



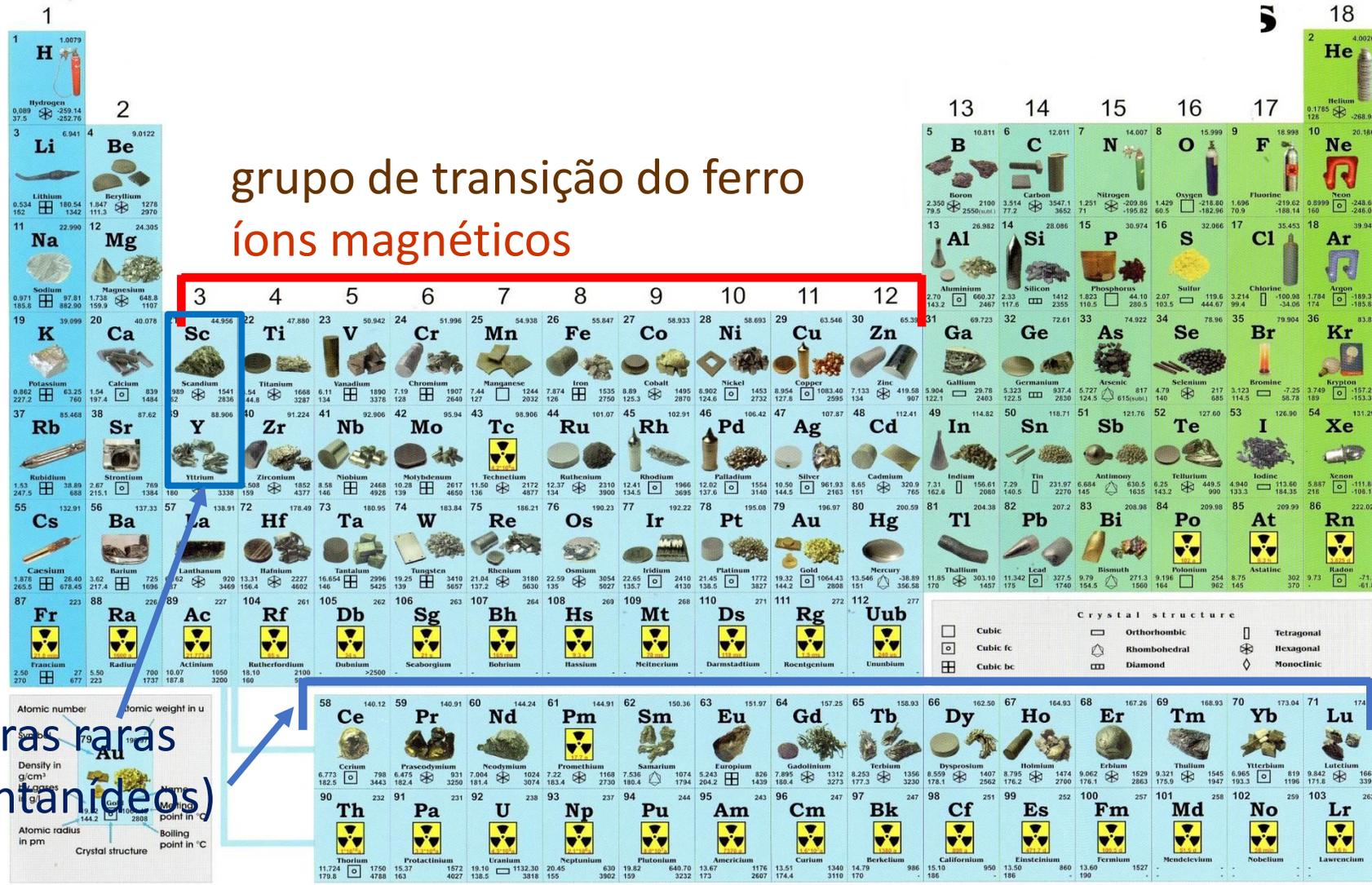
Material magnético



momentos magnéticos nos átomos

interação entre os spins

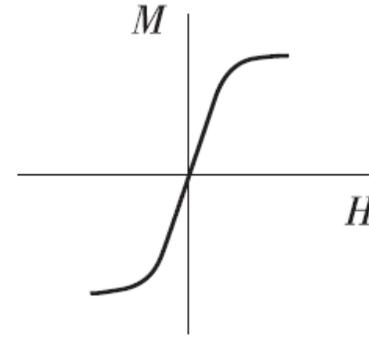
Origem do magnetismo dos materiais



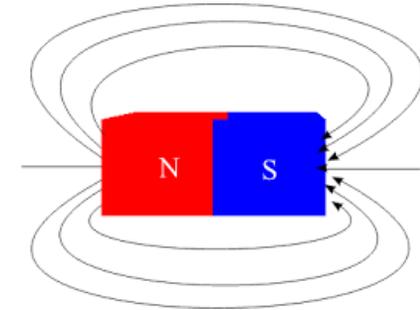
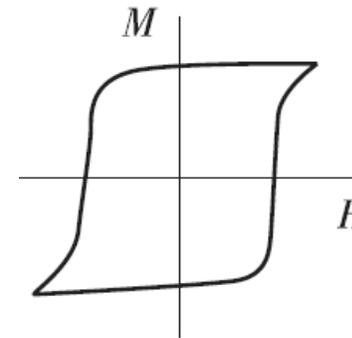
Íons do grupo de transição do ferro e de terras raras têm camadas eletrônicas incompletas, logo têm spin S e momento magnético μ

Aplicações tradicionais de Materiais magnéticos

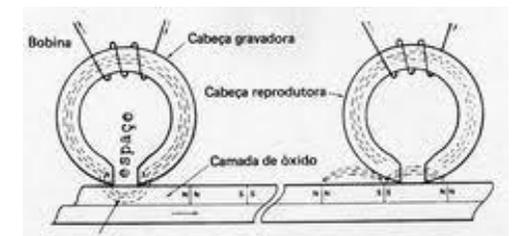
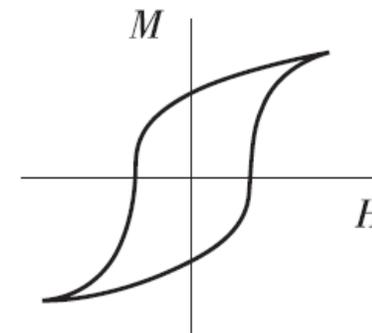
1- Materiais "moles" ou "doces"
Transformadores, geradores,
motores, cabeçotes de gravação



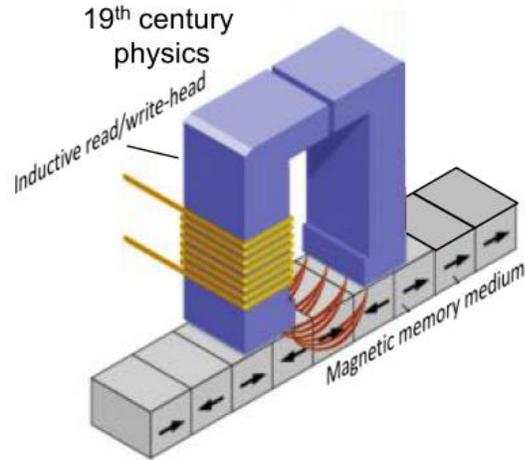
2- Materiais "duros"
(ímãs permanentes)
Motores, geradores, alto-
falantes, microfones



3- Materiais "intermediários"
Meios de gravação magnética



Gravação magnética: Tecnologias que evoluem



Magnetic wire recorder 1880's



Tape recorder 1930's

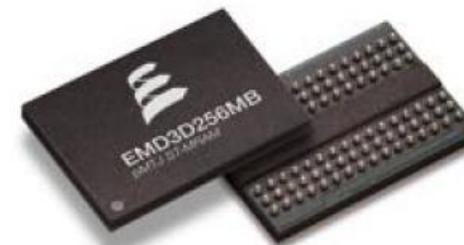
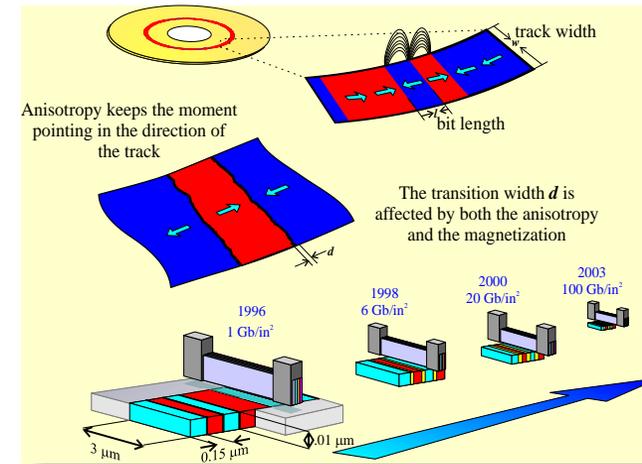


Hard disk drive 1960's



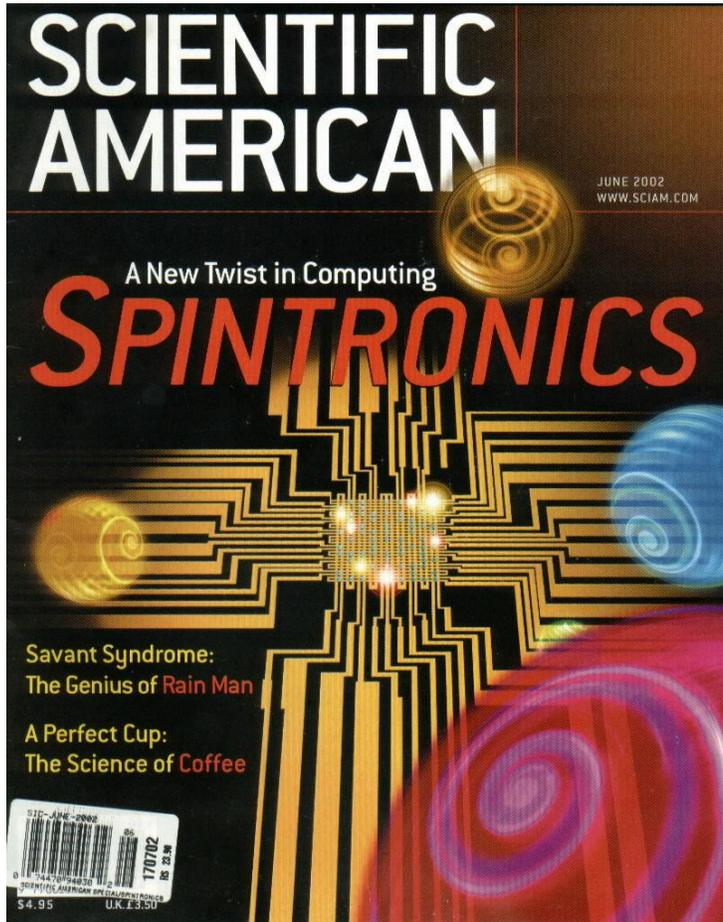
Disk drive with GMR head 2000's

SPINTRÔNICA Física Quântica



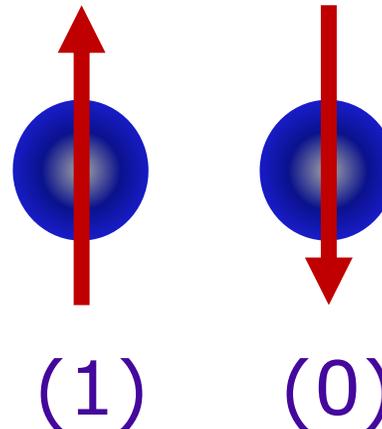
Magnetic RAM 2010's

Spintrônica



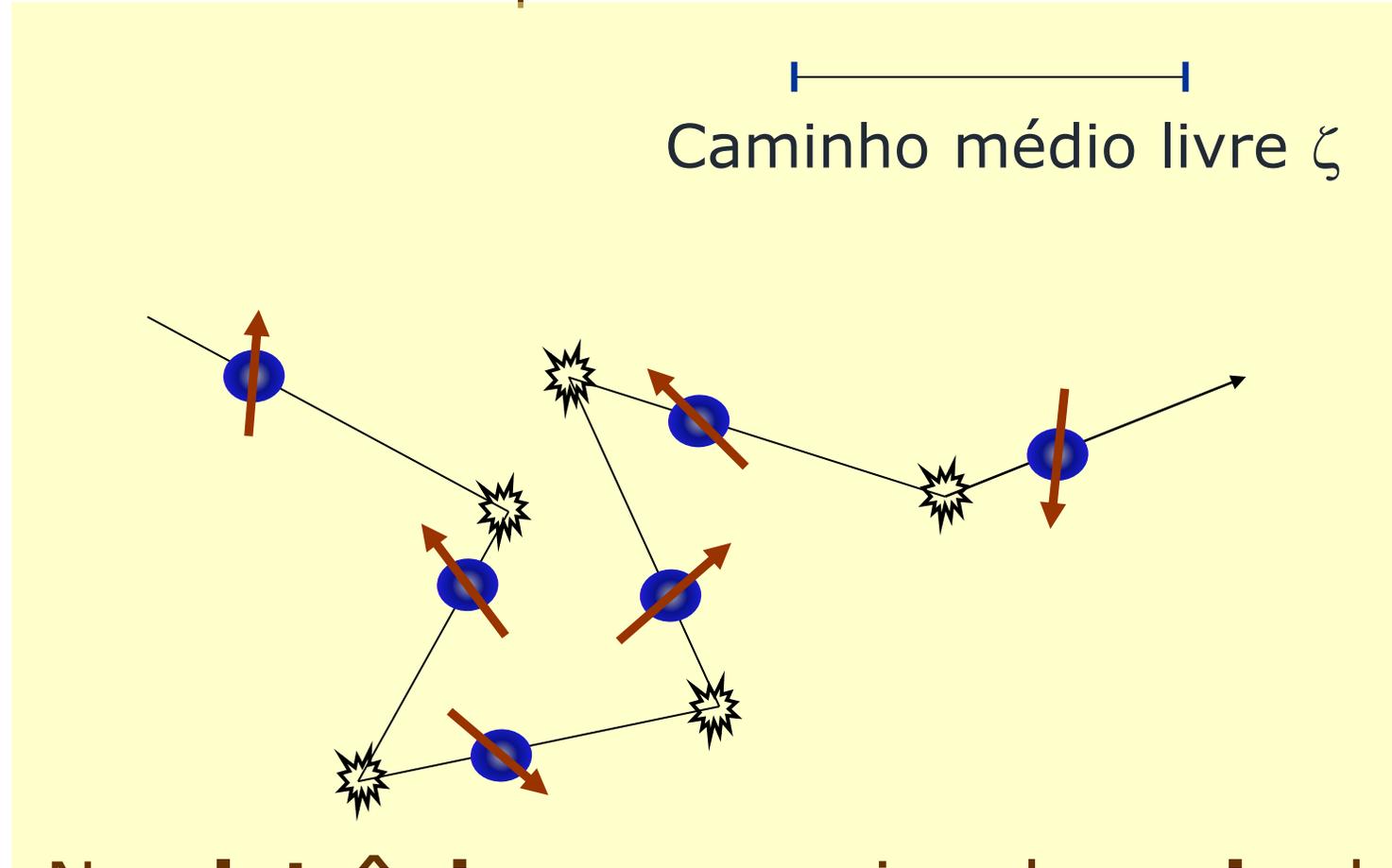
Física e tecnologia de fenômenos que fazem uso do **spin** do elétron para novas funcionalidades

SPIN é o portador natural de informação digital



Corrente elétrica em amostras macroscópicas

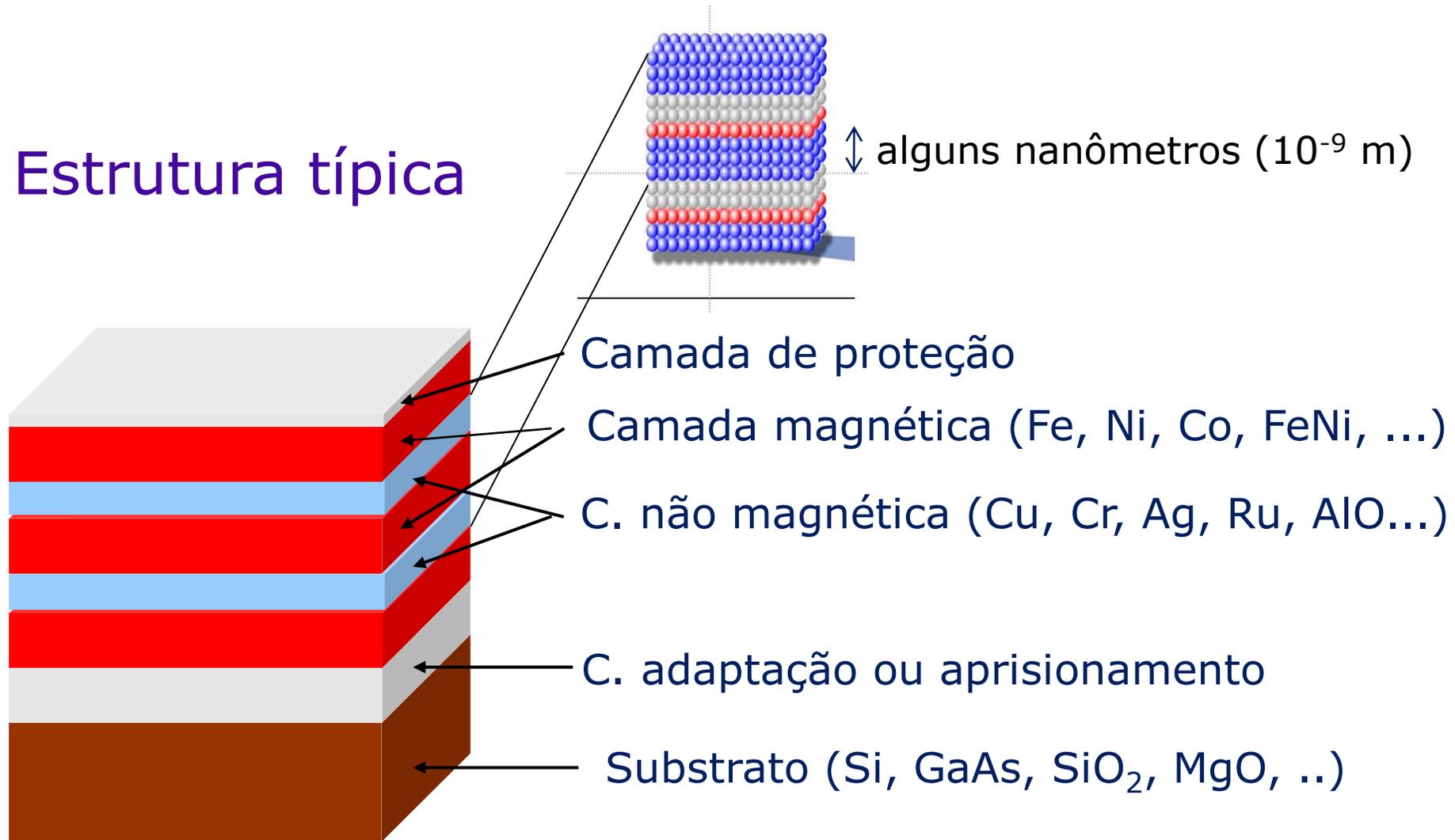
Em amostras massivas os **elétrons** “perdem” a memória de seus spins nas colisões



Na **eletrônica** convencional o **spin** dos **elétrons** é completamente desprezado

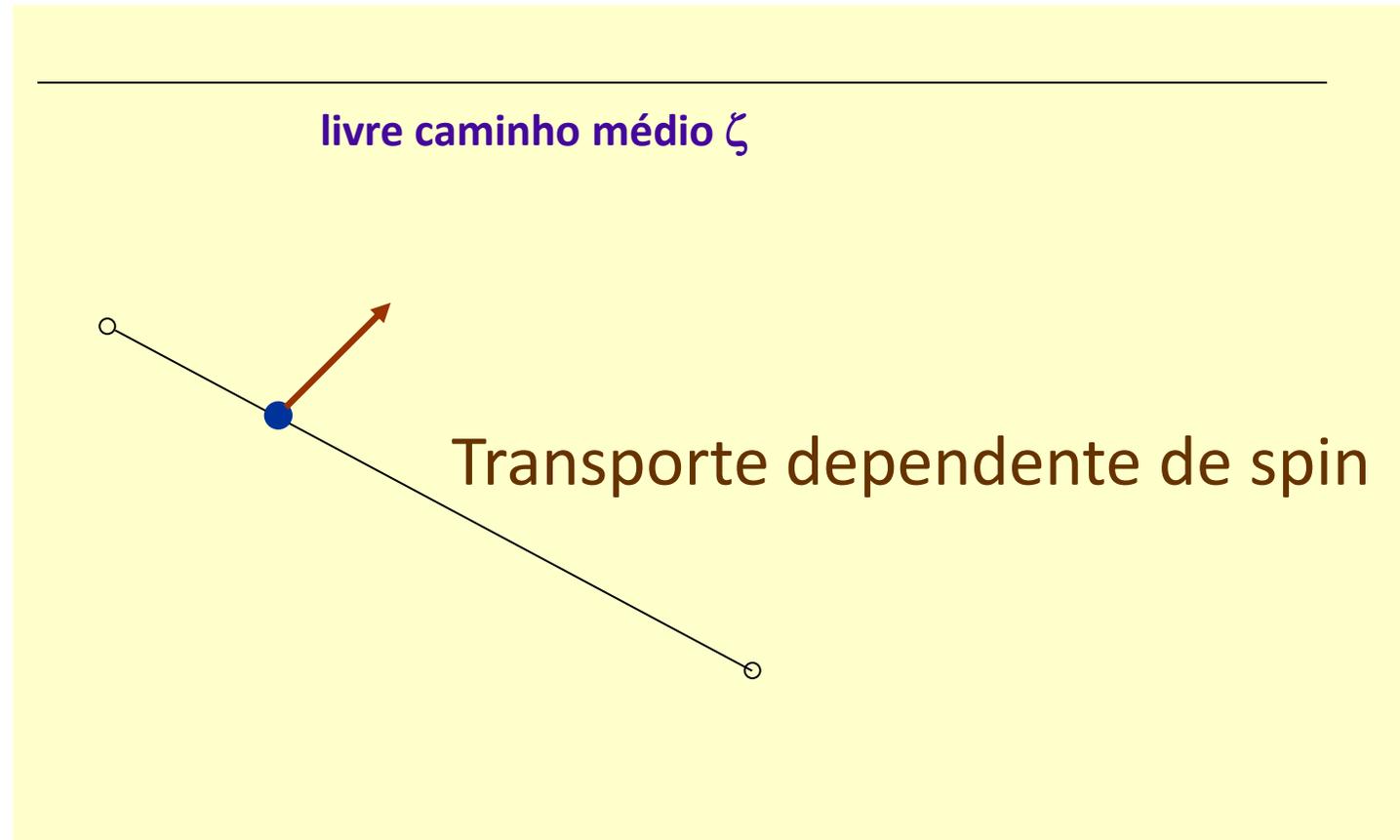
Nano-estruturas e multicamadas magnéticas

Estrutura típica



Transporte de elétrons dependente de spin

Nos filmes ultra-finos e nas estruturas nanométricas o **elétron** atinge seu destino antes de sofrer colisões, preservando seu *spin*



Descoberta da Magnetoresistência Gigante (GMR)

VOLUME 61, NUMBER 21

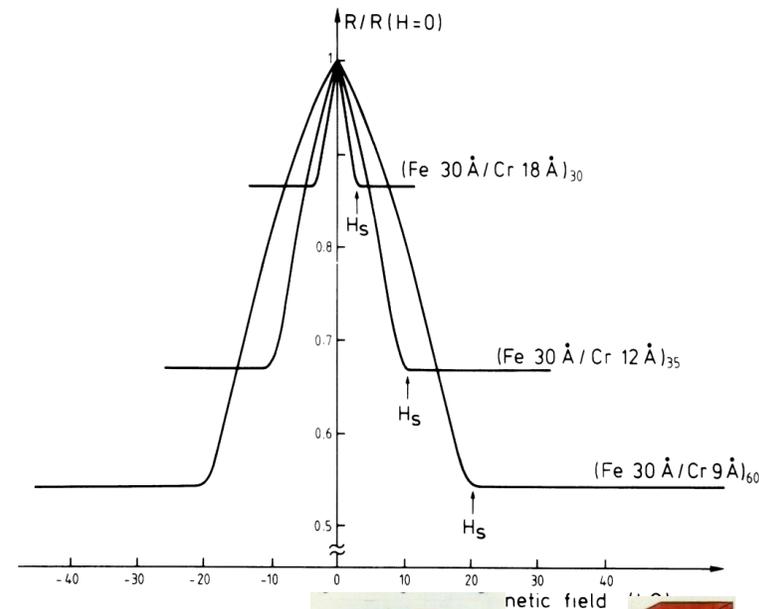
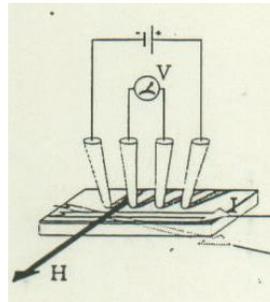
PHYSICAL REVIEW LETTERS

21 NOVEMBER 1988

Giant Magnetoresistance of (001) Fe/(001) Cr Magnetic Superlattices

M. N. Baibich,^(a) J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, and F. Petroff
Laboratoire de Physique des Solides, Université Paris-Sud, F-91405 Orsay, France

P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas
Laboratoire Central de Recherches, Thomson CSF, B.P. 10, F-91401 Orsay, France



Grande variação da resistência com o campo magnético

Dispositivo de spintrônica

Cabeça de leitura de GMR em HDD

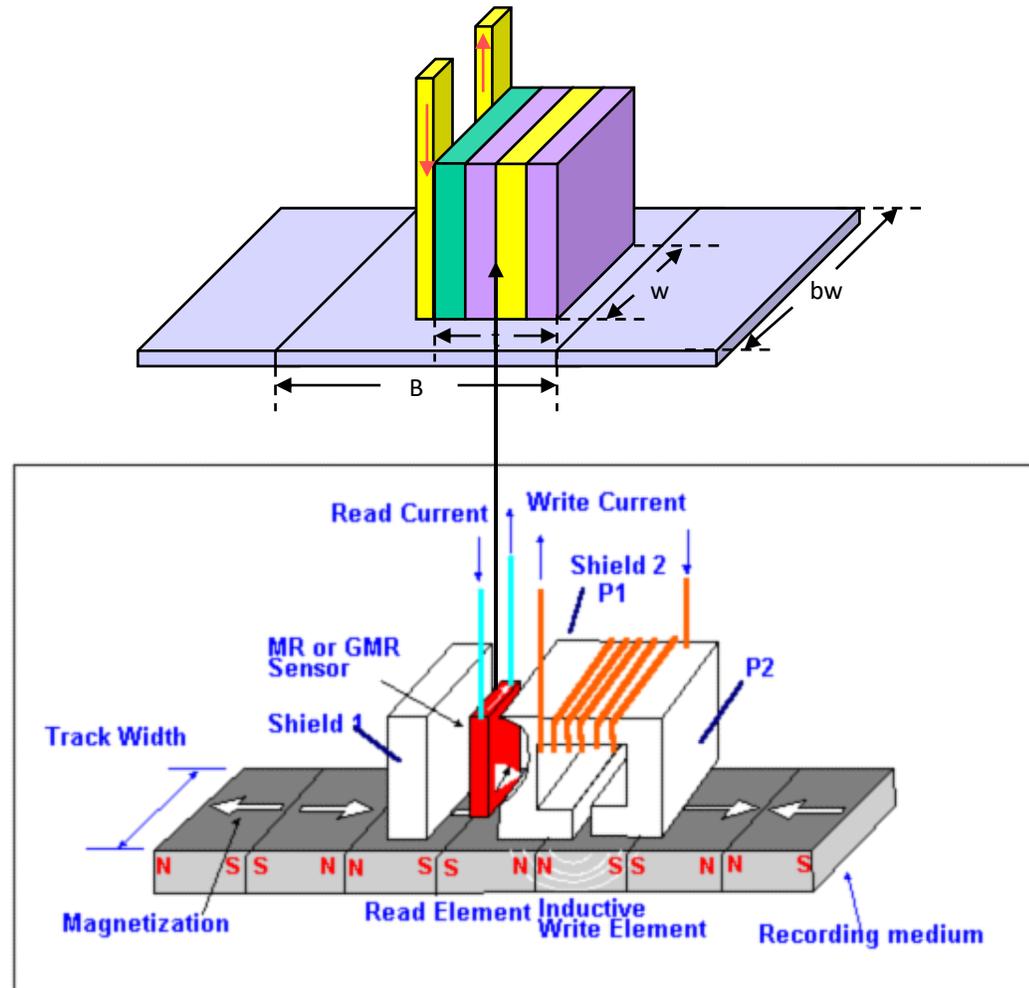
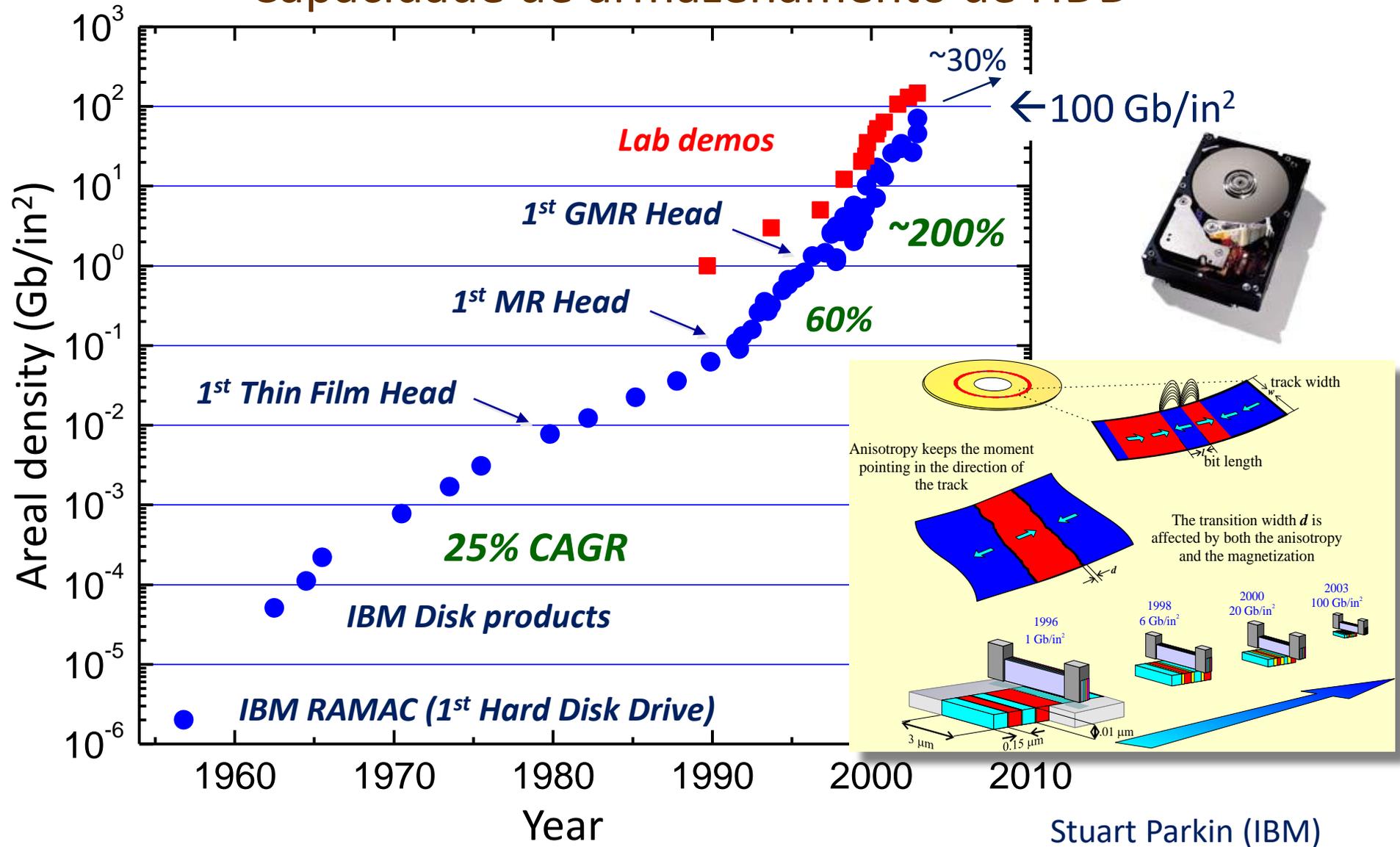


Figure 3. Magnetic recording process.

Aplicação da spintrônica

Capacidade de armazenamento de HDD



O Prêmio Nobel de Física de 2007

Physics of the iPod awarded Nobel Prize

The Associated Press

Published: October 9, 2007



Albert Fert, 69, is a professor at the Université Paris-Sud and scientific director of Unité Mixte de Physique CNRS/Thalès in Orsay, France.



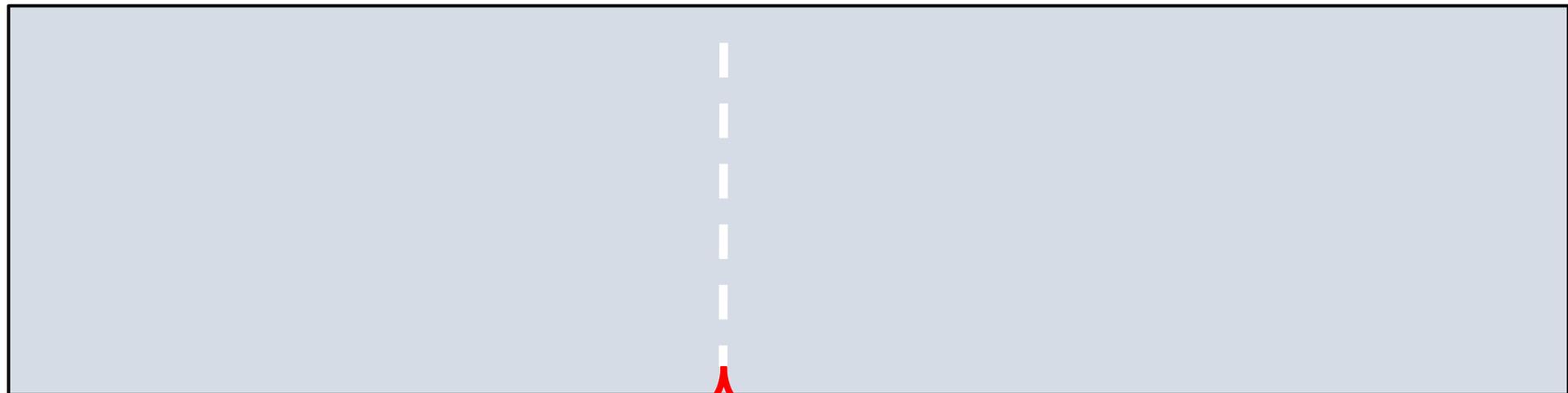
Peter Grünberg, 68, is a professor at the Institute of Solid State Research in Jülich, Germany.



Corrente elétrica em metais

Corrente de carga $I_C = I_{\uparrow} + I_{\downarrow} \neq 0$

Corrente de spin $I_S = I_{\uparrow} - I_{\downarrow} = 0$



Filme

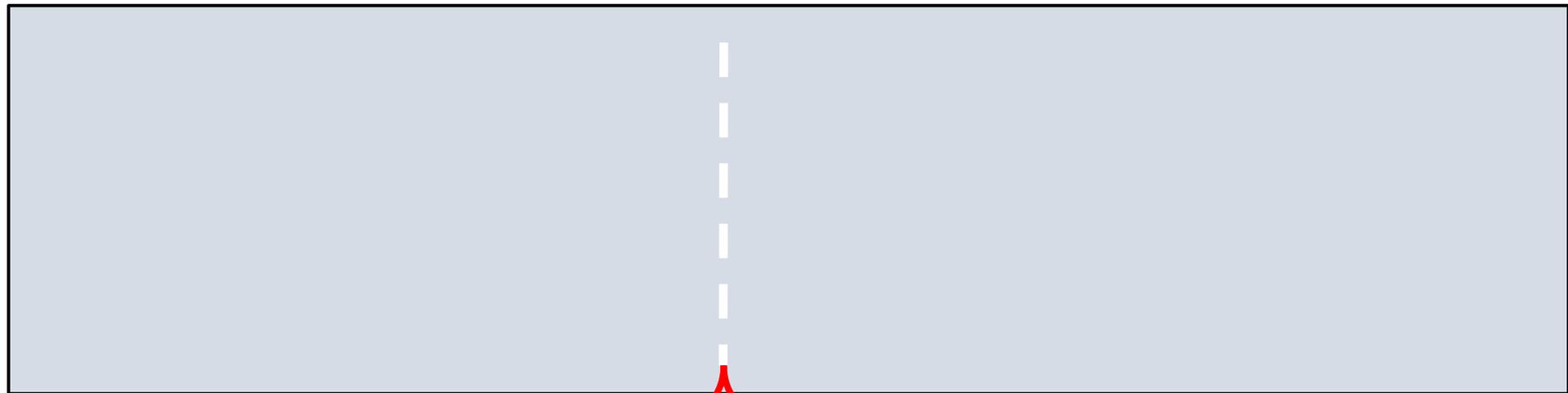
Seção transversal

Fluxo de cargas sem fluxo de spins!

Corrente de spin em metais

Corrente de carga $I_C = I_{\uparrow} + I_{\downarrow} = 0$

Corrente de spin $I_S = I_{\uparrow} - I_{\downarrow} \neq 0$

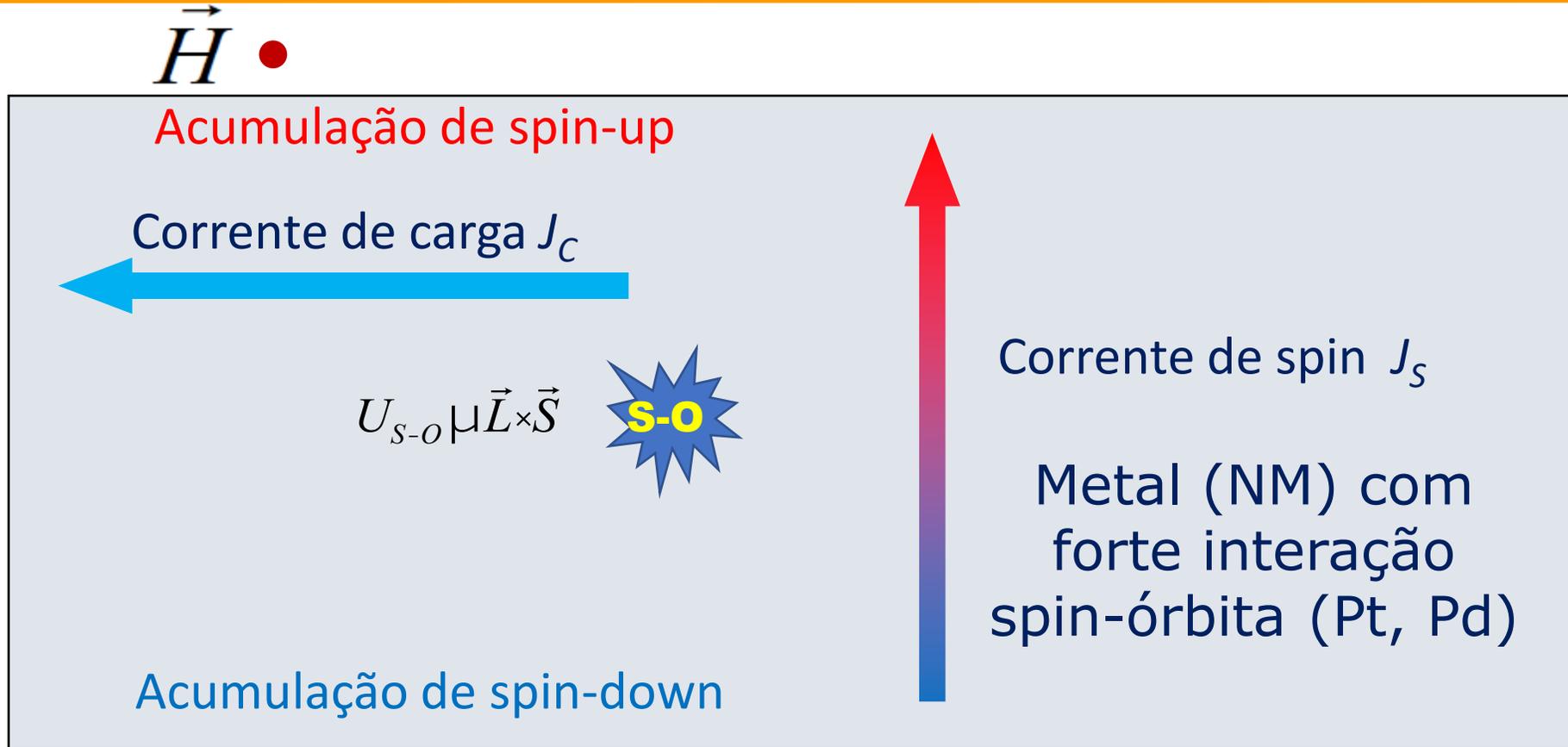


Filme

Seção transversal

Fluxo de spins sem fluxo de cargas!

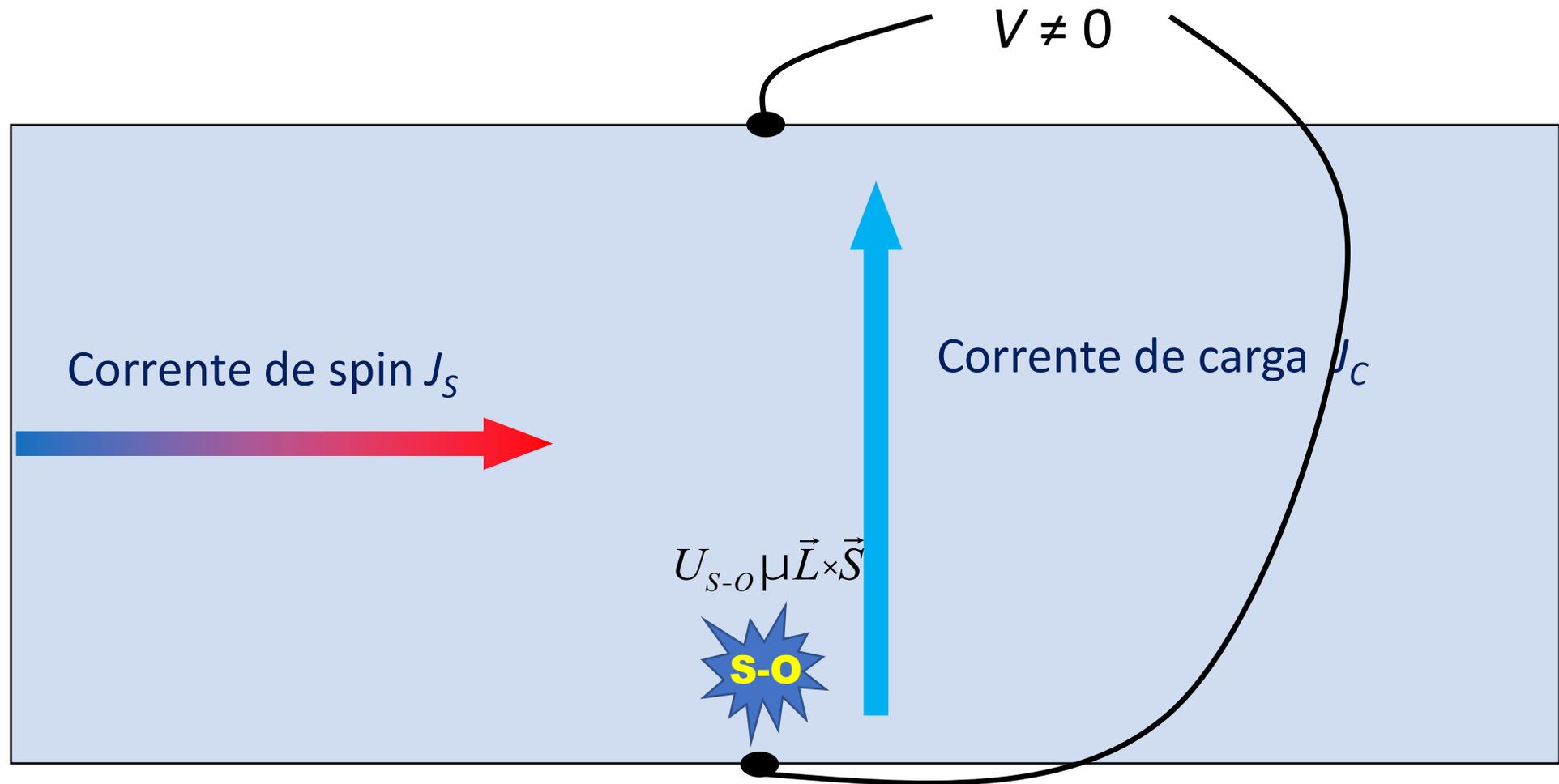
Efeito spin Hall (SHE) [Dyakonov & Perel 1971; Hirsch 1999]



Elétrons com spins opostos em J_C são defletidos para lados opostos do filme criando **corrente de spin**

Corrente de **carga** \Rightarrow corrente de **spin**

Efeito Spin Hall inverso (ISHE) [Hirsch 99, Saitoh 2006]

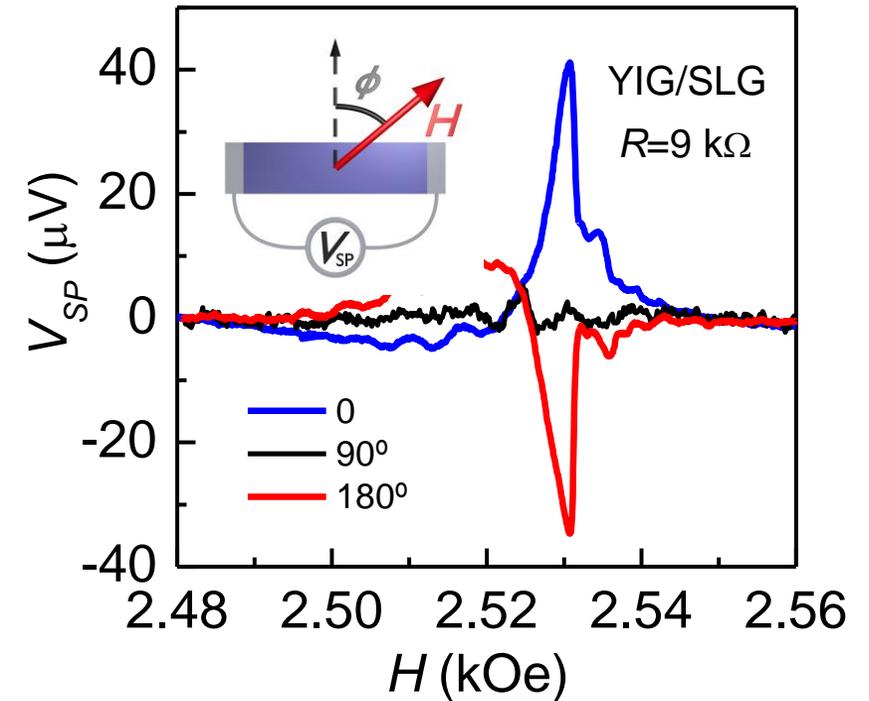
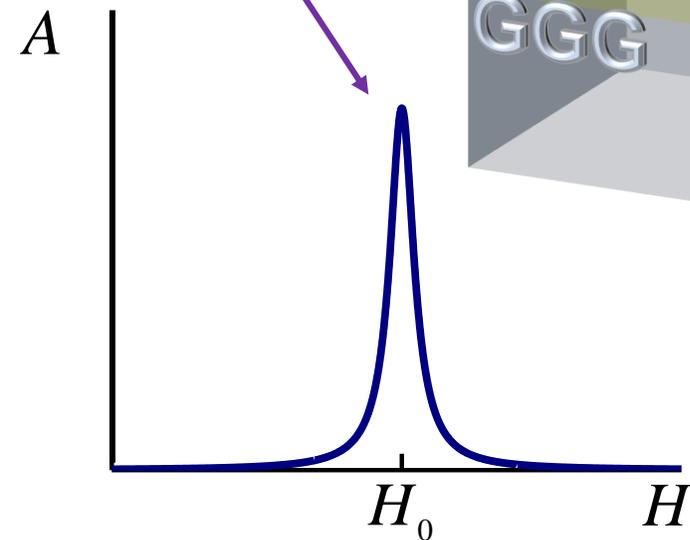
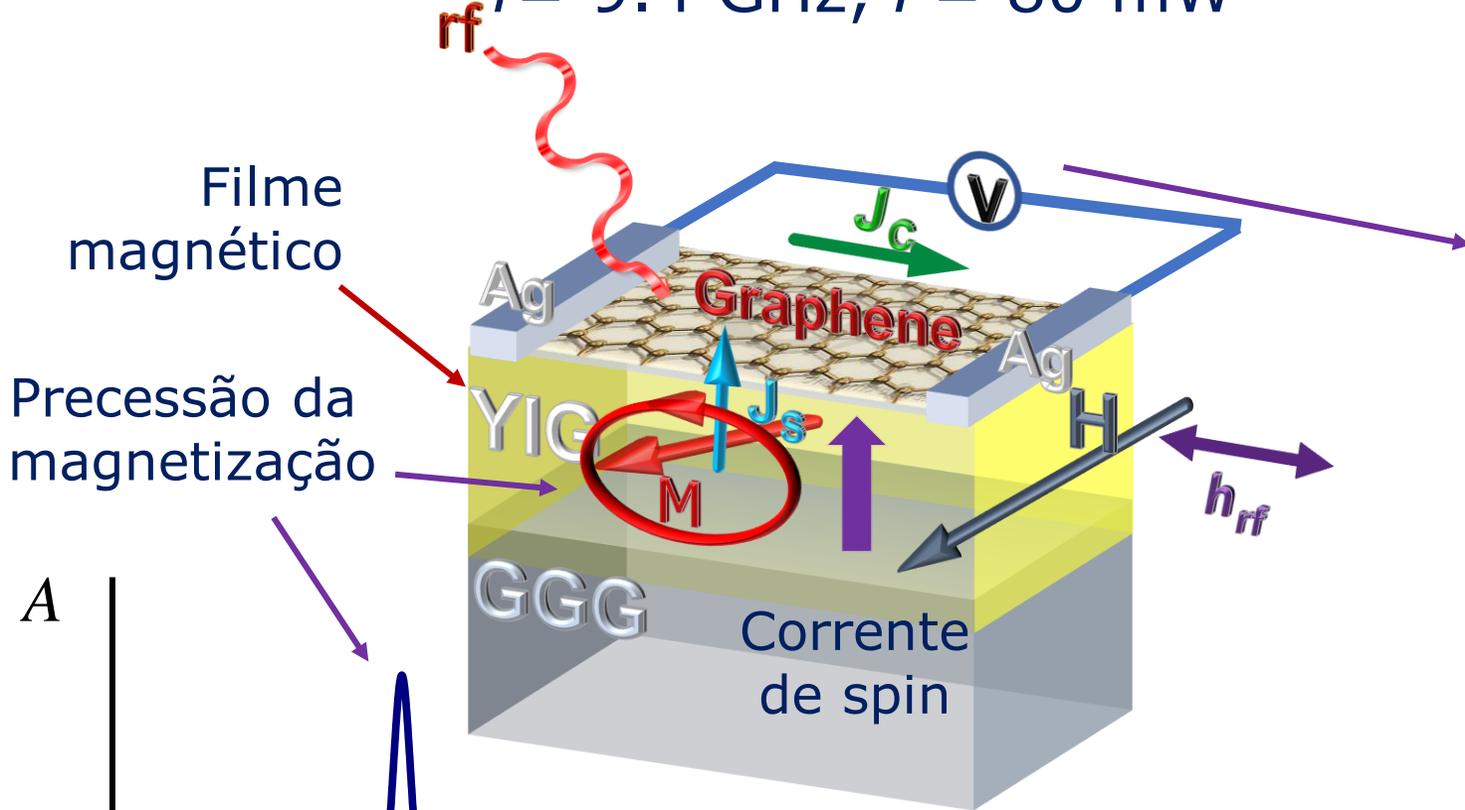


Corrente de **spin** \Rightarrow corrente de **carga**

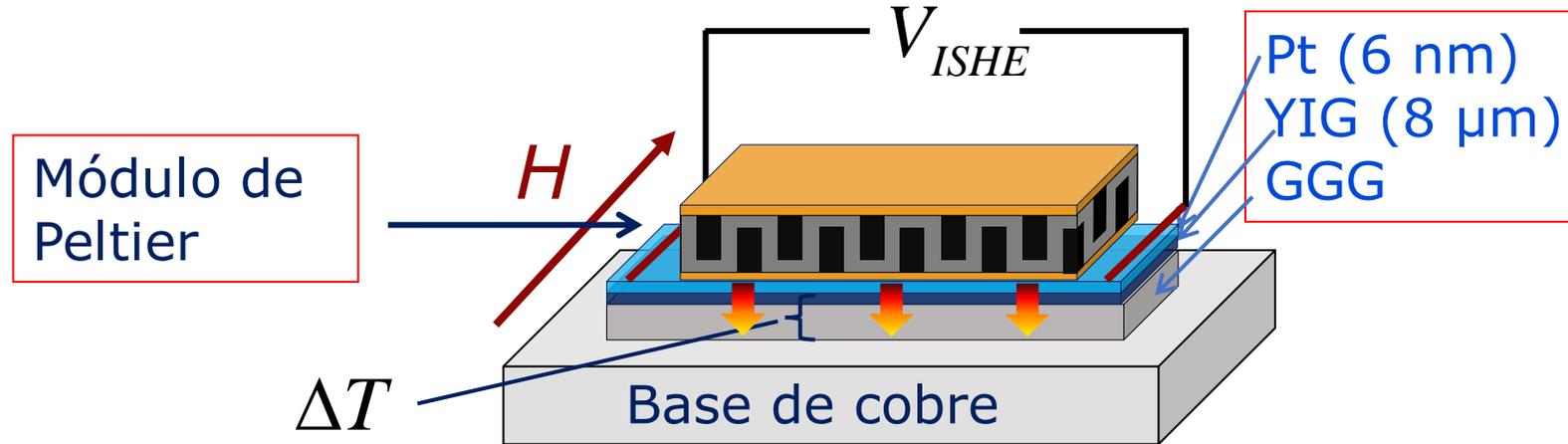
Efeito Spin Pumping em YIG/grafeno

Excitação com micro-ondas

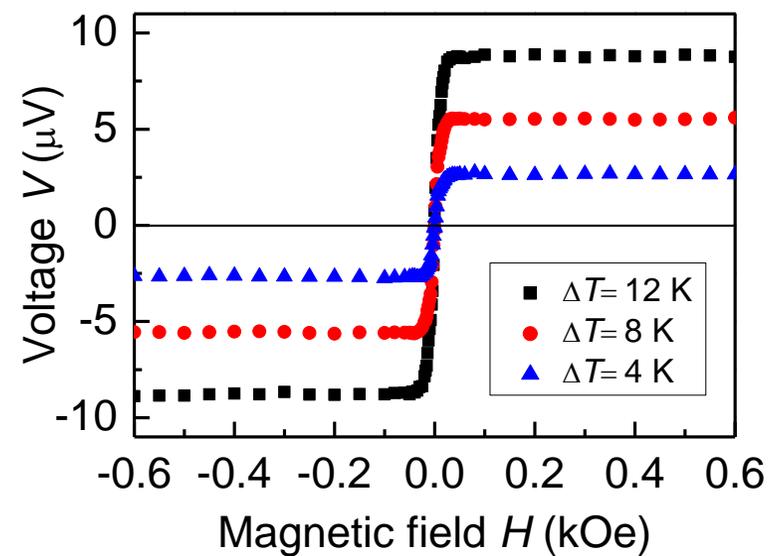
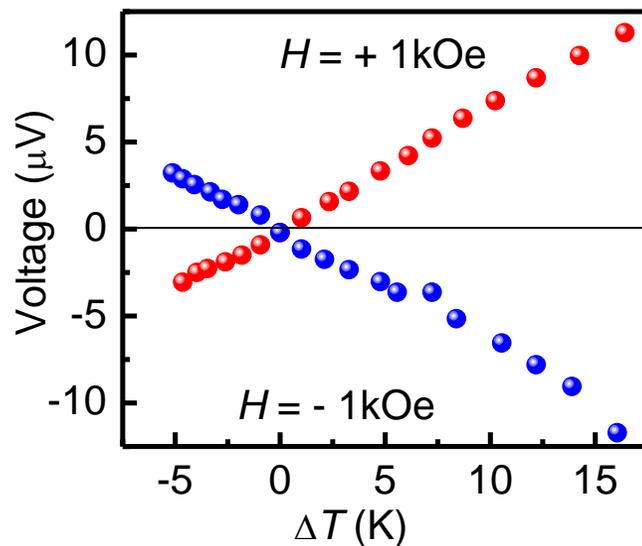
$f = 9.4 \text{ GHz}$, $P = 80 \text{ mW}$



Efeito Spin Seebeck



Corrente de calor \longrightarrow Corrente de spin \longrightarrow Corrente de carga



Perspectivas da Spintrônica

A **SPINTRÔNICA** está abrindo novas fronteiras com a descoberta de fenômenos inusitados envolvendo correntes de carga, spin e calor, oferecendo boas oportunidades para pesquisa básica e para aplicações tecnológicas integradas com a **Eletrônica**.

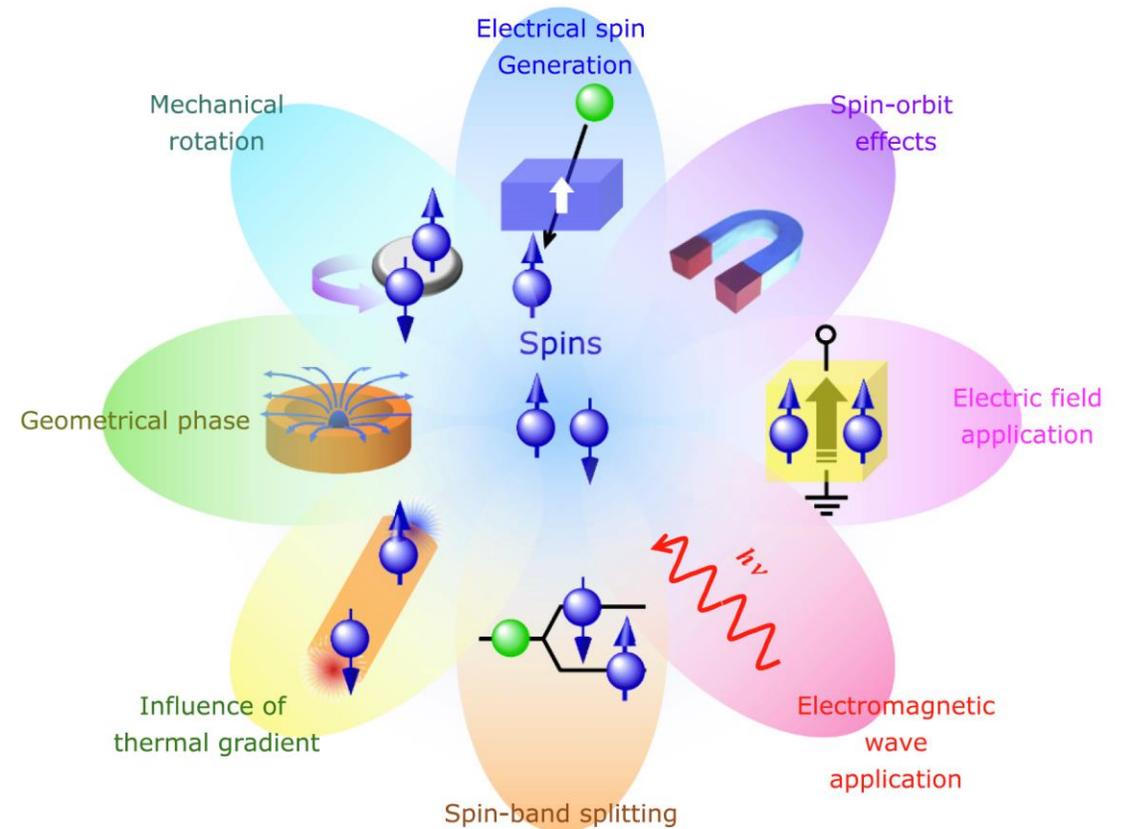


Fig. 3. Schematic diagram of major methods to generate a spin-polarised current. After Ref. [9].

Journal of Magnetism and Magnetic Materials 509 (2020) 166711

Atsufumi Hirohata^{a,*}, Keisuke Yamada^b, Yoshinobu Nakatani^c, Ioan-Lucian Prejbeanu^d, Bernard Diény^d, Philipp Pirro^e, Burkard Hillebrands^e

Possíveis aplicações da Spintrônica

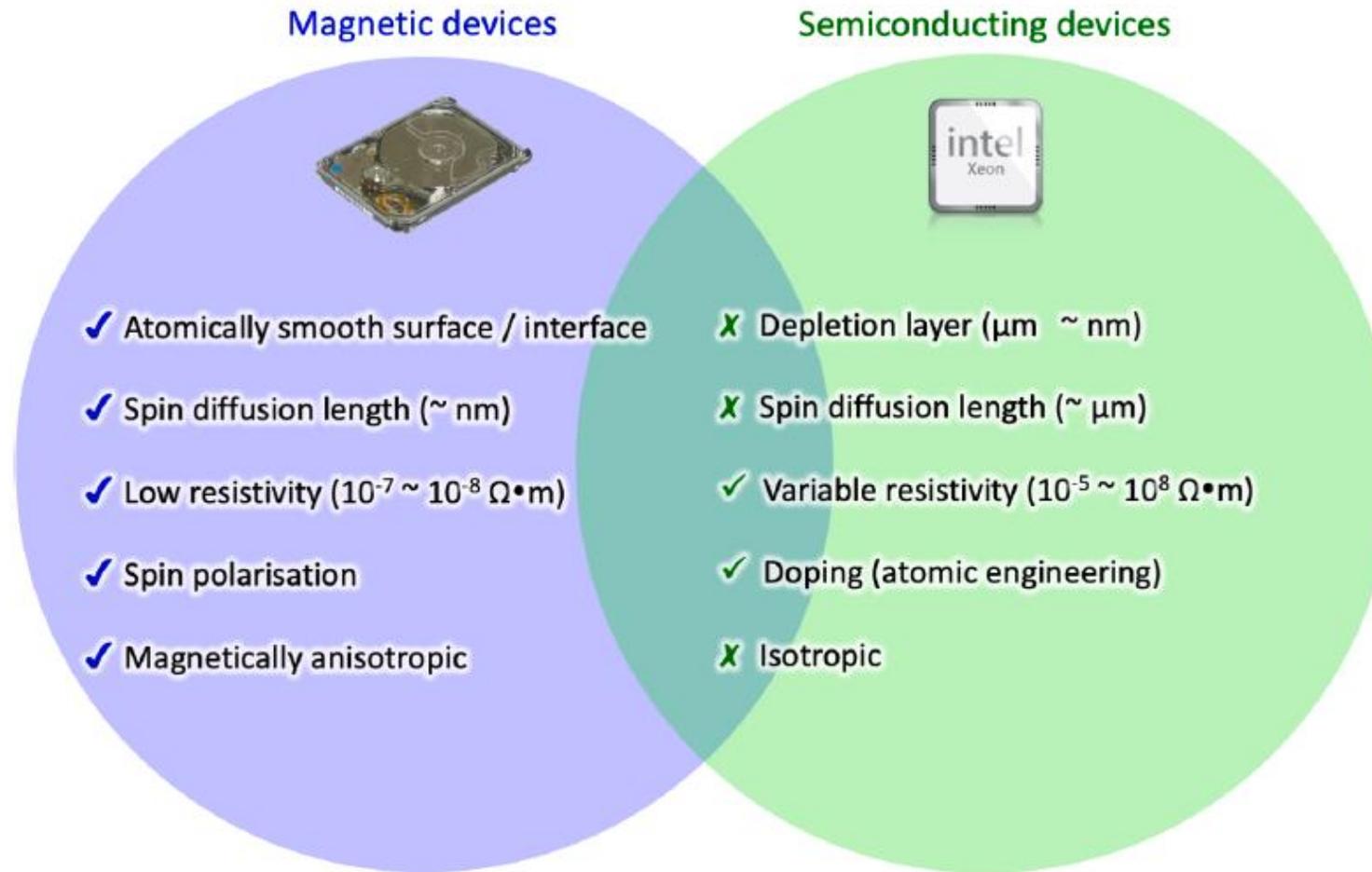


Fig. 1. Comparison between magnetic and semiconducting materials.

[Journal of Magnetism and Magnetic Materials 509 \(2020\) 166711](#)

Atsufumi Hirohata^{a,*}, Keisuke Yamada^b, Yoshinobu Nakatani^c, Ioan-Lucian Prejbeanu^d, Bernard Diény^d, Philipp Pirro^e, Burkard Hillebrands^e



Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Física
Recife, PE, Brazil
Sergio M. Rezende

sergio.rezende@ufpe.br

Roberto Rodríguez
Fernando Machado
Joaquim Mendes
Antonio Azevedo



RECIFE, Pernambuco



MUITO OBRIGADO PELA ATENÇÃO E BOA SORTE PARA TOD@S



APOIO

