朱 弘 物理楼703室

63600797， 15955185881， zhuh@ustc.edu.cn

林冠凯 18755102969

课件下载地址 http://staff.ustc.edu.cn/~zhuh/

课件下载 引言 第一章 1 2	电子书1 电子书2

电子书1：B. D. Cullity, Introduction to Magnetic Materials

电子书2：Soshin Chikazumi, Physics of Ferromagnetism

(R. M. Bozorth, Ferromagnetism)

《凝聚态物理基础》课程简介

“凝聚态物理基础”是专业基础课“固体物理”后向各研究方向的延展教学，主要内容是凝聚态物质原子之间的结构、电子态结构以及相关的各种物理性质，包括晶体物理、半导体物理、**磁性物理**、固体光学性质、**低温物理与超导电性**等内容。

其中磁性物理主要介绍凝聚态物质的各种宏观磁性表现及相应机理，磁有序的各种理论，外磁场作用下磁性物质内部的相互作用过程以及磁性应用的相关问题。

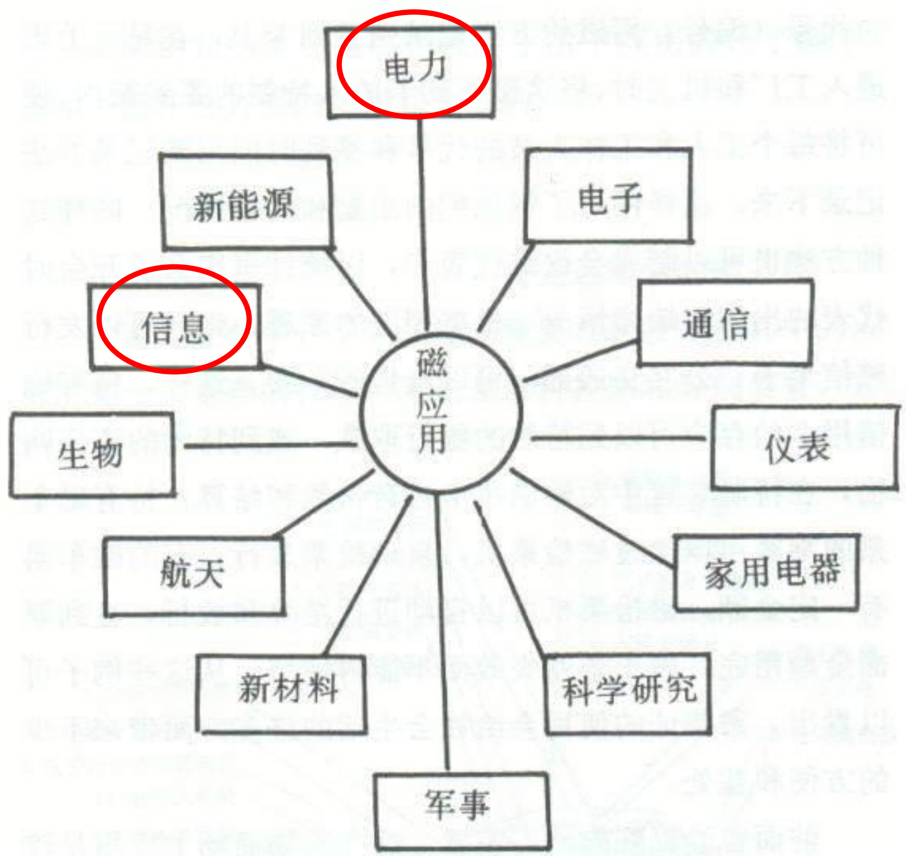
本课程为应用物理学专业方向课程，授课80学时，计4个学分。

什么是磁性？物质在非均匀磁场中受到作用。

磁性是物质的基本属性之一。独立的！

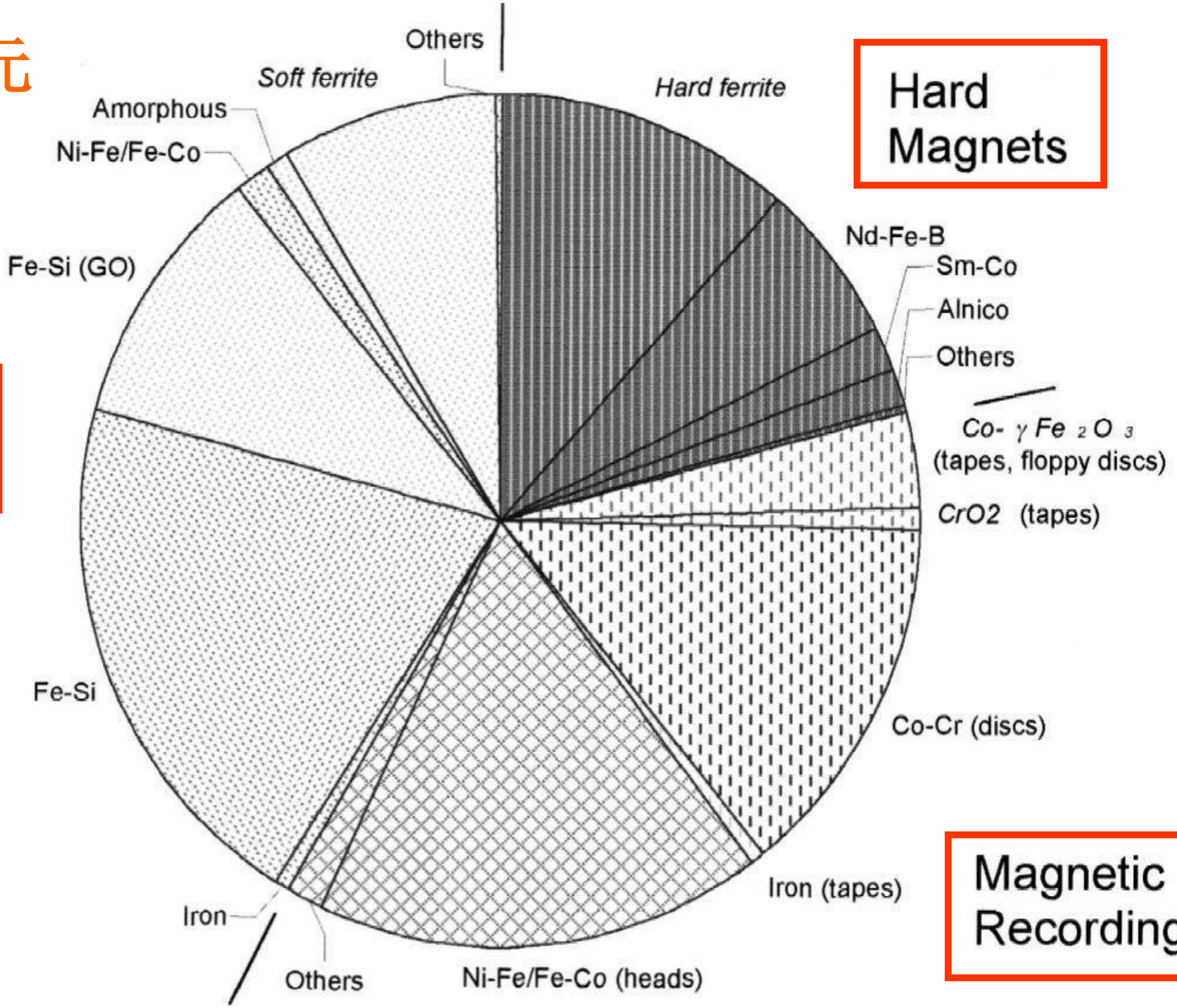
磁性的应用，特别在近一百多年中，已经深入到人类生活、生产等各个方面。

在科学研究中，磁性不仅作为内容，也作为手段。**自旋电子学**是二十一世纪初最为科技界关注和最有前途的研究方向之一。



全球市场：

300亿美元

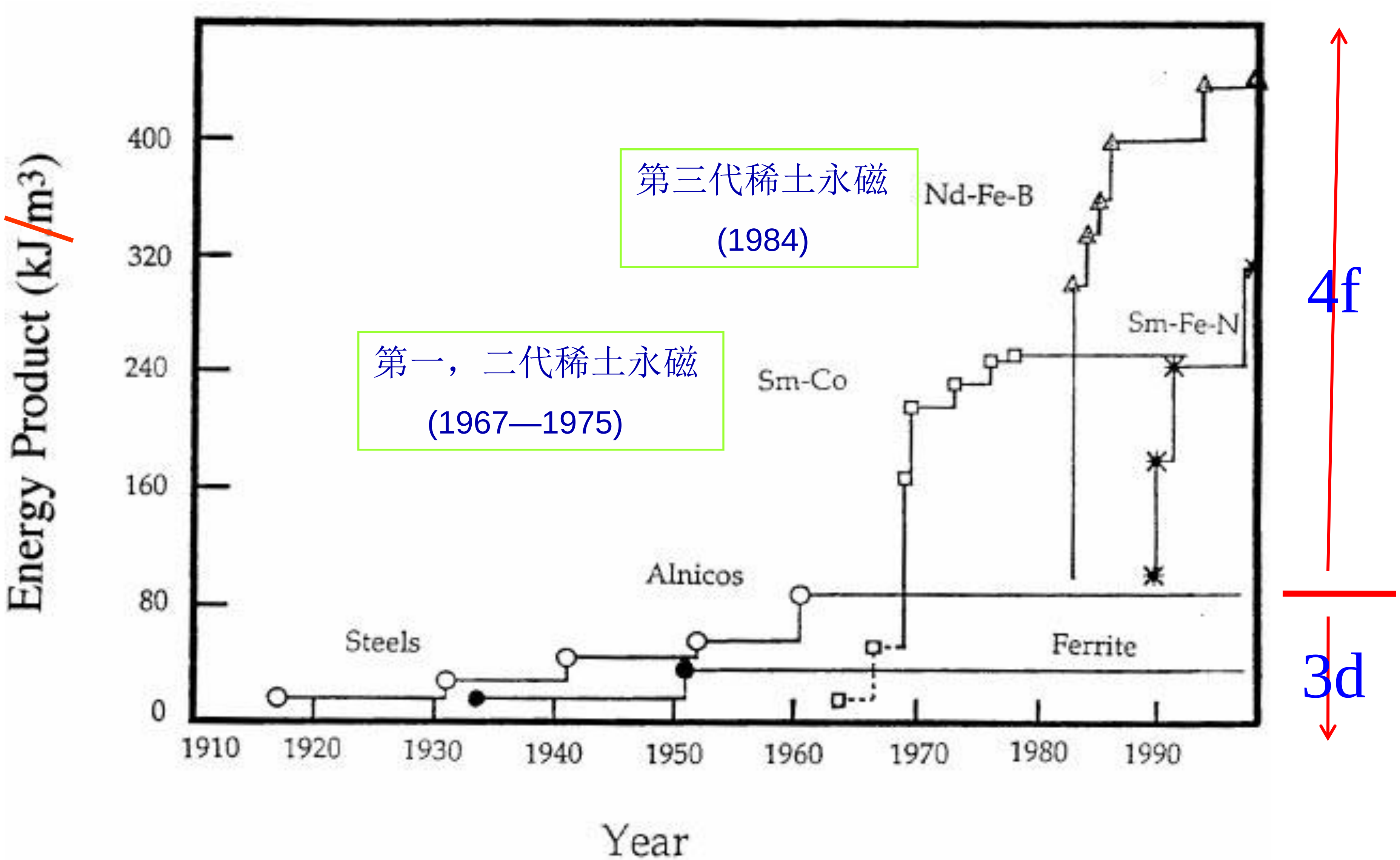


Hard Magnets

Soft Magnets

Magnetic Recording

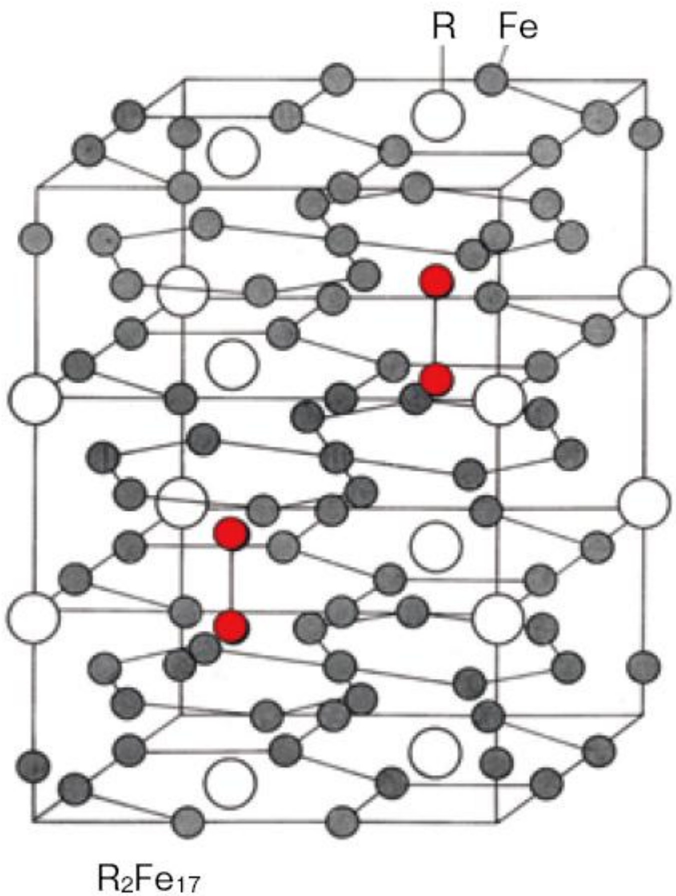
Global market for magnetic materials the total in 1999 was about 30 b$.



第一代$SmCo_5$ (60年代）；第二代Sm_2Co_{17} (70年代）；第三代 $Nd_2Fe_{14}B$(80年代）；**第四代稀土永磁?**

How the World's Strongest "Neodymium Magnet" Came to Exist

佐川真人 Masato Sagawa



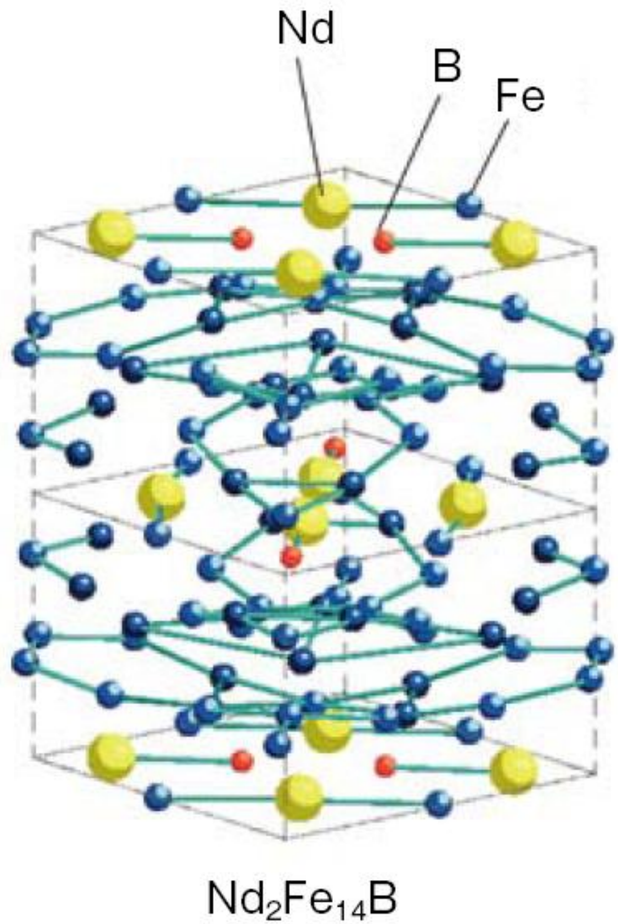
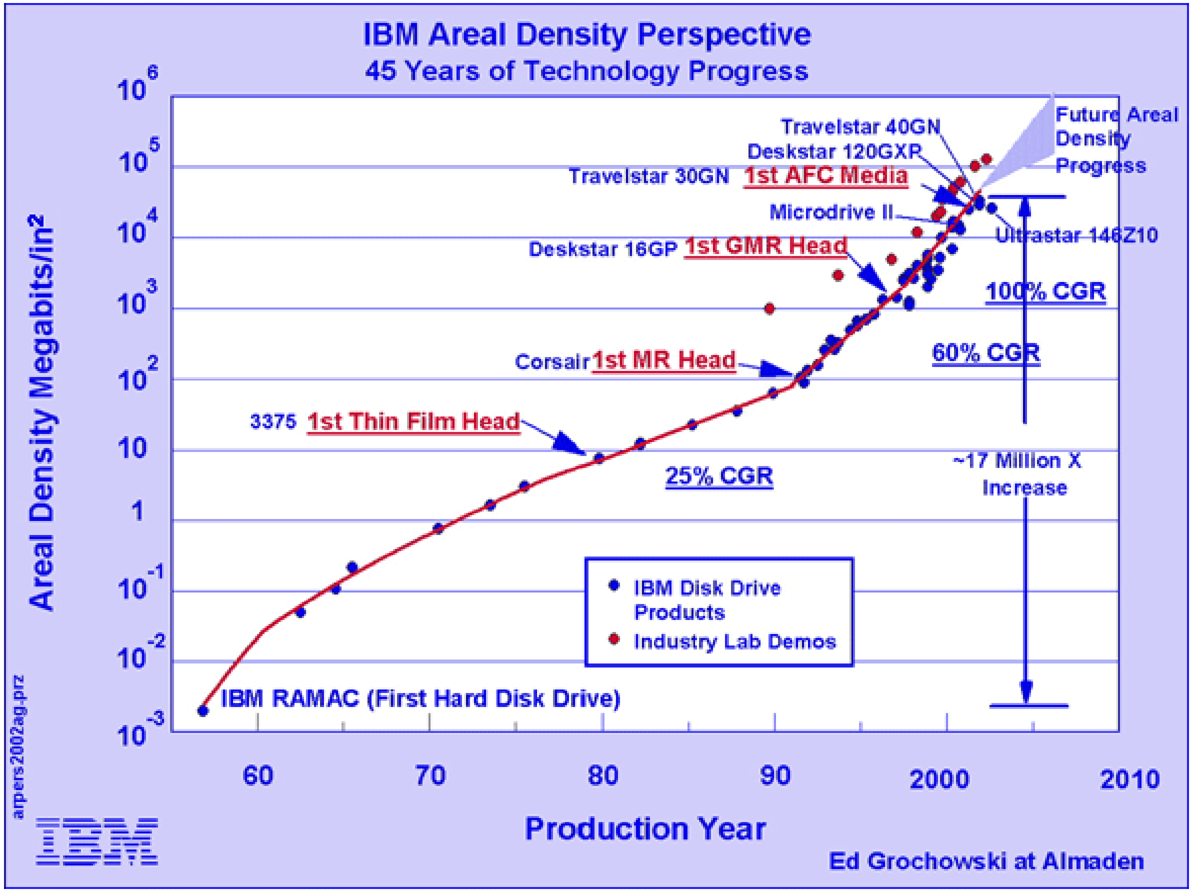


Diagram 1 The crystal structure of the R_2Fe_{17} compound

Diagram 2 The crystal structure of the $Nd_2Fe_{14}B$ compound constituting the Nd-Fe-B magnet

硬盘读出头的发展



➢ IBM91年研发，94年推出AMR读出头。在1998年推出采用自旋阀结构的GMR读出头，轻易突破10 Gbits/in^2。

➢ 日立宣布将采用CPP-GMR技术在2010年实现1 Tbits/in^2。？

ICM2018 SANFRANCISCO

TWENTY-FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON MAGNETISM

15-20 JULY 2018 SAN FRANCISCO MARRIOTT MARQUIS ICM2018SF.ORG

SYMPOSIA

Computing With Spintronic Devices

Paul Crowell
University of Minnesota
"Spin transport in Heusler alloy/III-V semiconductor valves"

Shusuke Fukami
Tohoku University, RIEC
"Analog spin-orbit torque devices with antiferromagnets for artificial neural networks"

Julie Grollier
Université Paris-Sud
"Neuromorphic computing with spin-torque nano-oscillators"

Emerging Phenomena in Van der Waals Magnets

Kenneth Burch
Boston College
"Exploring Topological Phases with Magnetic 2D Atomic Crystals"

Hyeonsik Cheong
Sogang University
"Antiferromagnetic ordering in the 2-dimensional limit"

Di Xiao
Carnegie Mellon University
"Tunable magnetic and magneto-optic properties in 2D magnets

New Routes and Materials Toward Quantum Criticality

Meigan Aronson
Texas A&M University
"Novel quantum critical phenomena in d- and f-electron systems"

Ian Fisher
Stanford University, Fisher Research Group
"Quantum criticality in iron pnictides and beyond"

Kai Grube
Karlsruhe Institute of Technology, Institute for Solid-State Physics
"Multidimensional entropy landscape of quantum criticalit

Spin Currents and Magnonic Condensates in Magnetic Insulators

Igor Barsukov
University of California, Riverside
"Condensation of magnons by spin Seebeck currents"

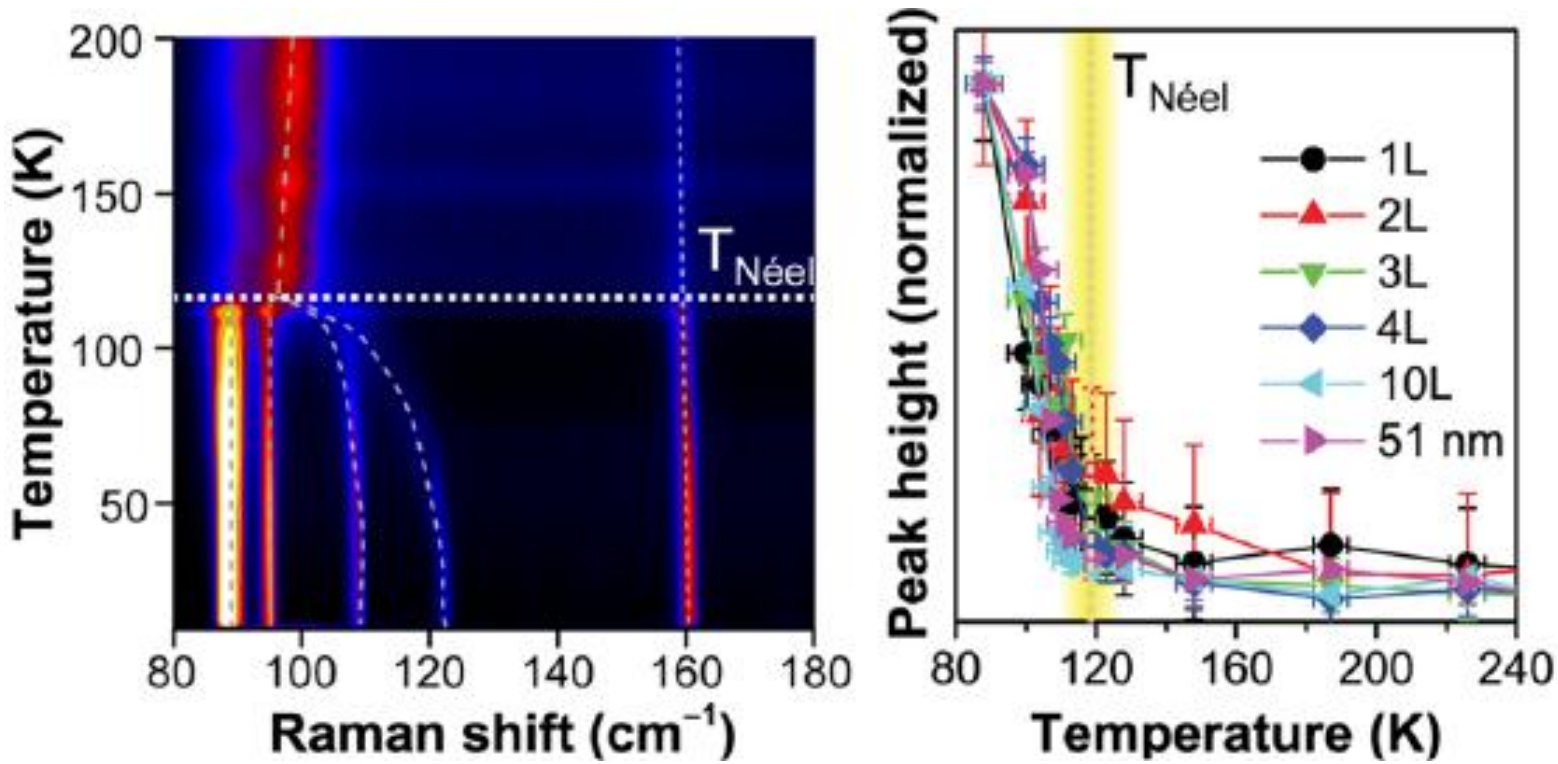
Burkard Hillebrands
TU Kaiserslautern
"Supercurrent in a room-temperature Bose–Einstein magnon condensate"

Se Kwon Kim
UCLA
"Magnonic condensates and superfluids

NANO LETTERS
Letter
pubs.acs.org/NanoLett

Ising-Type Magnetic Ordering in Atomically Thin $FePS_3$

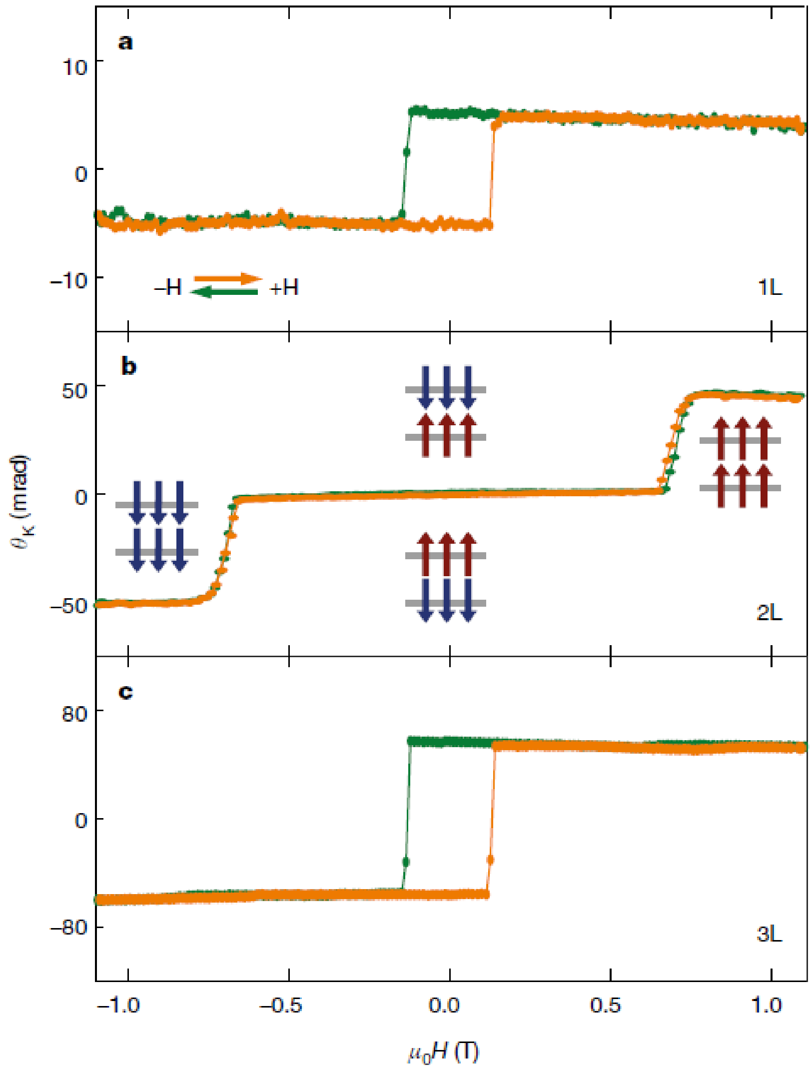
Jae-Ung Lee,[†] Sungmin Lee,[‡,§] Ji Hoon Ryoo,[§] Soonmin Kang,[‡,§] Tae Yun Kim,[§] Pilkwang Kim,[§] Cheol-Hwan Park,[*,§,∥] Je-Geun Park,[*,‡,§] and Hyeonsik Cheong[*,†]



DOI: 10.1021/acs.nanolett.6b03052
Nano Lett. 2016, 16, 7433−7438

Layer-dependent ferromagnetism in a van der Waals crystal down to the monolayer limit

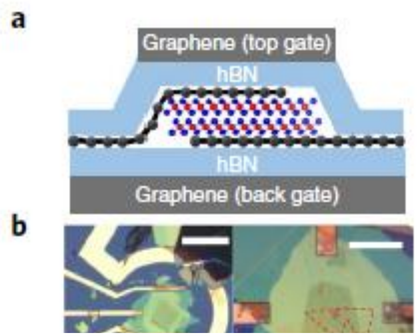
Bevin Huang[1]*, Genevieve Clark[2]*, Efrén Navarro-Moratalla[3]*, Dahlia R. Klein[3], Ran Cheng[4], Kyle L. Seyler[1], Ding Zhong[1], Emma Schmidgall[1], Michael A. McGuire[5], David H. Cobden[1], Wang Yao[6], Di Xiao[4], Pablo Jarillo-Herrero[3] & Xiaodong Xu[1,2]

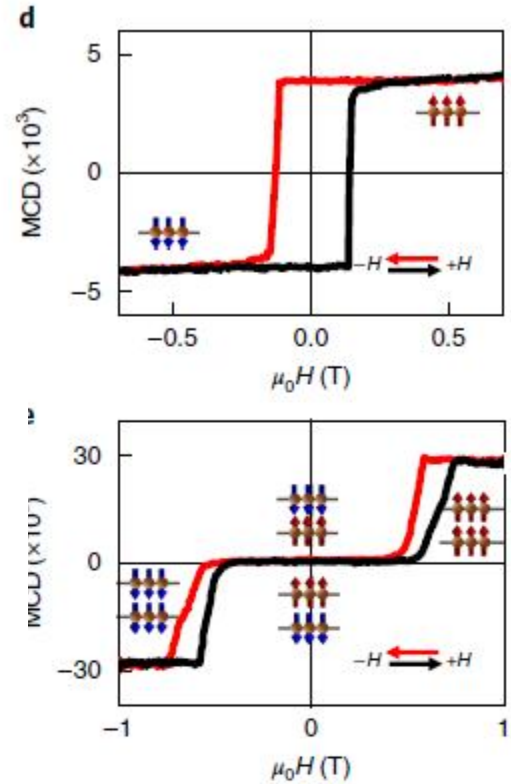


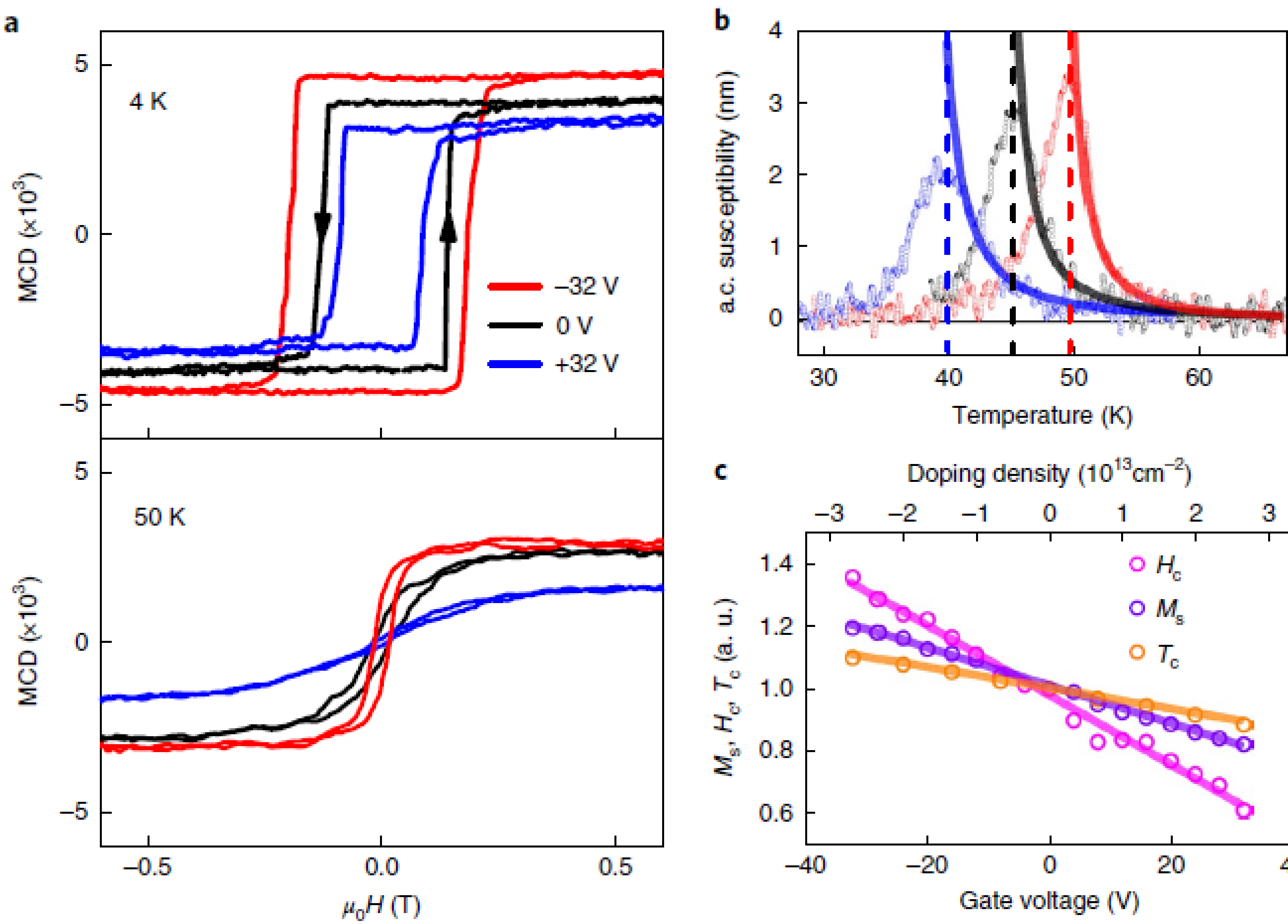
CrI_3 一二三层

Shengwei Jiang[1,2], Lizhong Li[1], Zefang Wang[1,3], Kin Fai Mak[1,2,4*] and Jie Shan[1,2,4*]

Controlling magnetism in 2D CrI_3 by electrostatic doping







斯格明子skyrmion：高密度信息存储材料

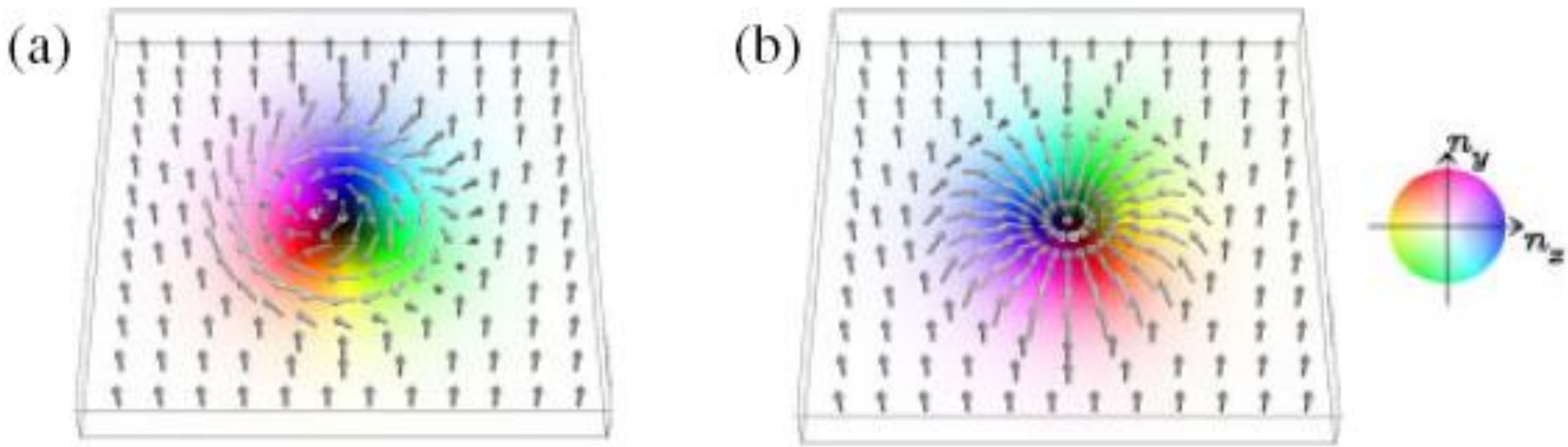
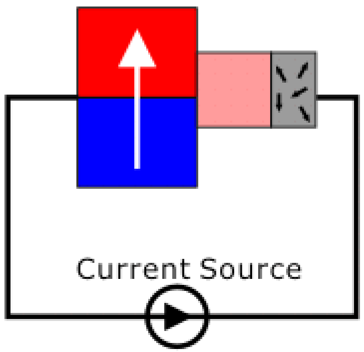
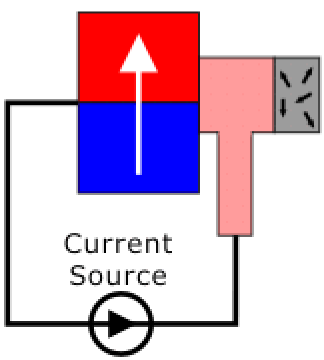


Fig. 1. (Color online) Schematic illustration of a skyrmion. (a) Bloch skyrmion. From the center to the rim, the rotating magnetic moments are always perpendicular to the radial vector. (b) Néel skyrmion. The rotating plane of magnetic moments is perpendicular to that of Bloch skyrmion. The color map (right) specifies the in-plane components of the magnetic moment and the brightness of the color represents the out-of plane component.

- 非中心对称磁性晶体或过渡金属超薄膜
- Dzyaloshinskii-Moriya interaction

自旋电子学：based on spin currents

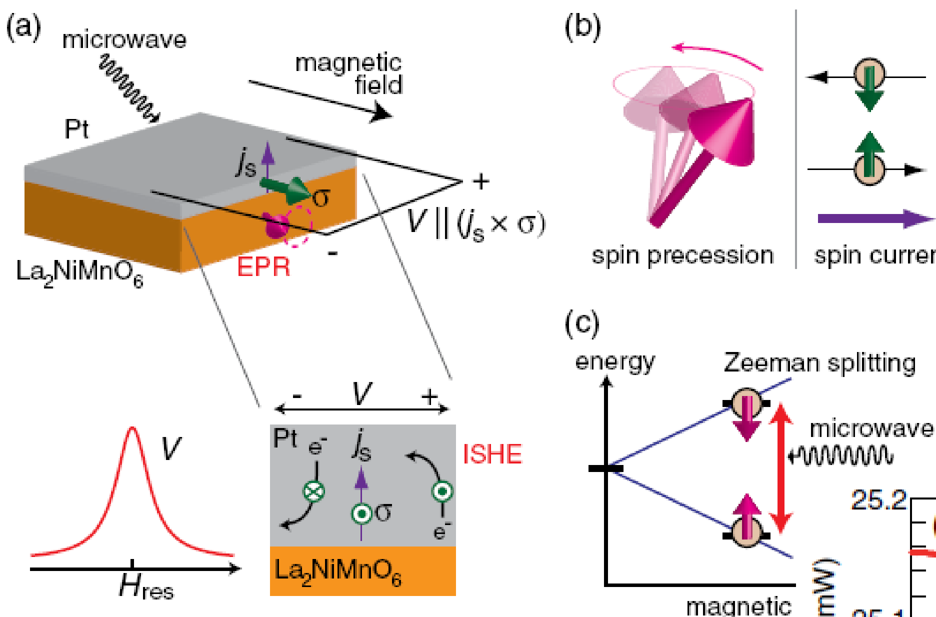


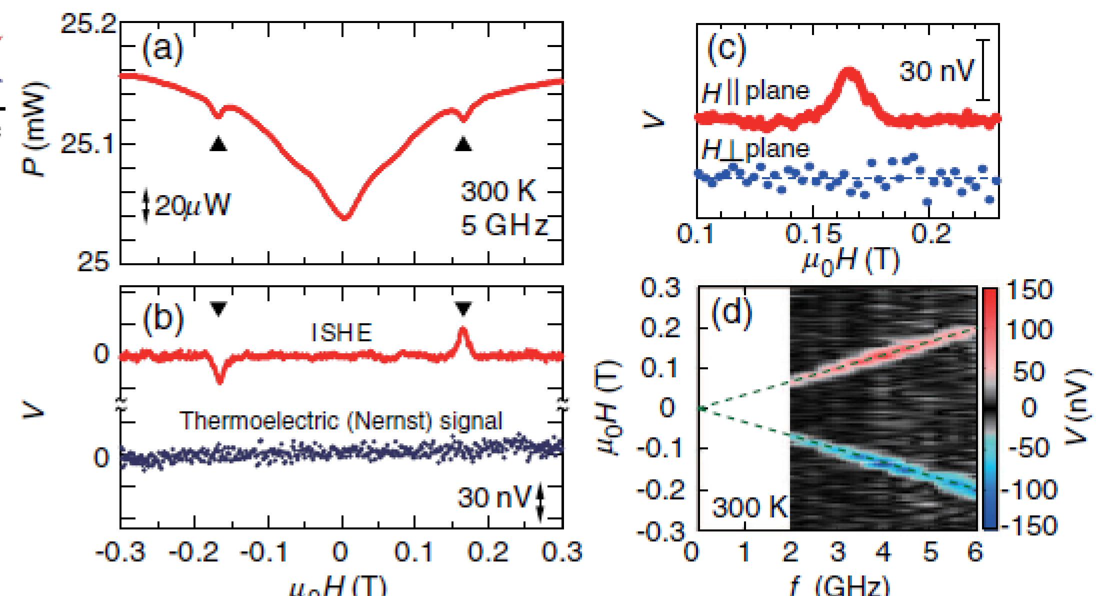


	Charge current	Spin current
Unpolarized current		0
Spin-polarized current		
Fully spin-polarized current		
Pure spincurrent	0	

Paramagnetic Spin Pumping

Y. Shiomi[1] and E. Saitoh[1,2,3,4]

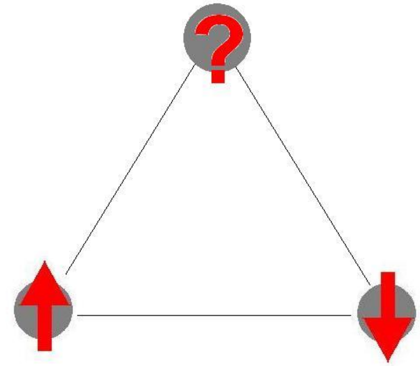


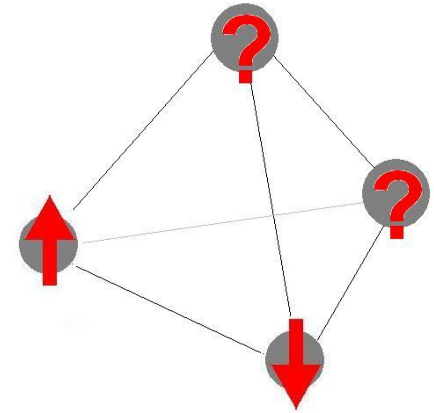


磁性物理中的大事件

1820	电流的磁效应 （Orested）	1948	亚铁磁性理论 (Neel)
1831	电磁感应 （Faraday）	1950	超交换作用模型 (Anderson)
1895	居里定律	1951	磁共振理论 (Kittle，永宫)
1905	顺磁性理论 （Langevin）	1954-1957	RKKY交换作用机制
1907	铁磁性的自发磁化理论 (Weiss)	1958	薄膜自旋波理论 (Kittle)
1919	Barkhausen效应	1962	生物体中磁性微粒的发现
1925	单晶体的磁化 （本多、茅）	1972	巨磁矩物质$Fe_{16}N_2$ (Jack，高桥)
1928	Heisenberg直接交换作用模型	1988	GMR效应 (Fert, Grunberg)
1929	过渡金属的铁磁性 (Bloch)	1994	CMR效应 (S. Jin, 十仓好纪)
1932	磁畴的观察(Bitter)、磁畴壁理论 (Bloch)		
1935	磁畴理论 (Landau-Lifshitz)		
1937	磁各向异性理论 (Van Vleck)		

磁阻挫　　自旋玻璃





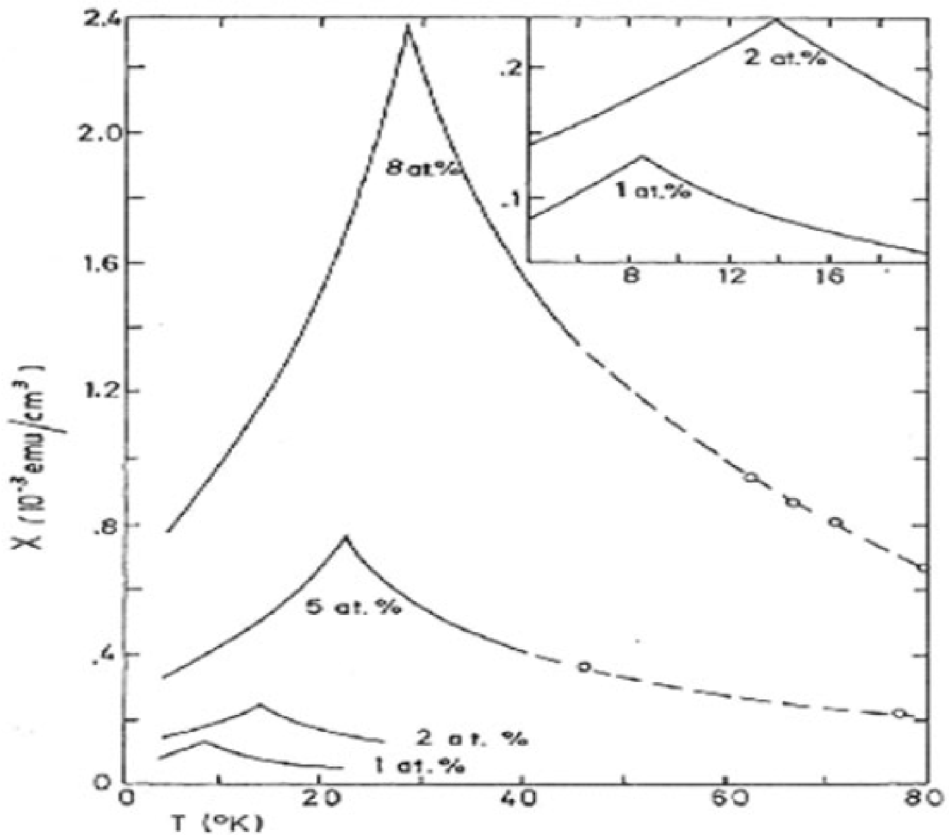


Figure 2. Low-field magnetic susceptibility $\chi(T)$ in AuFe alloys at varying concentrations of iron impurity (from [6]).

低维磁性系统

- spin chains

激发态——spinons;

Spin-Peierls transition

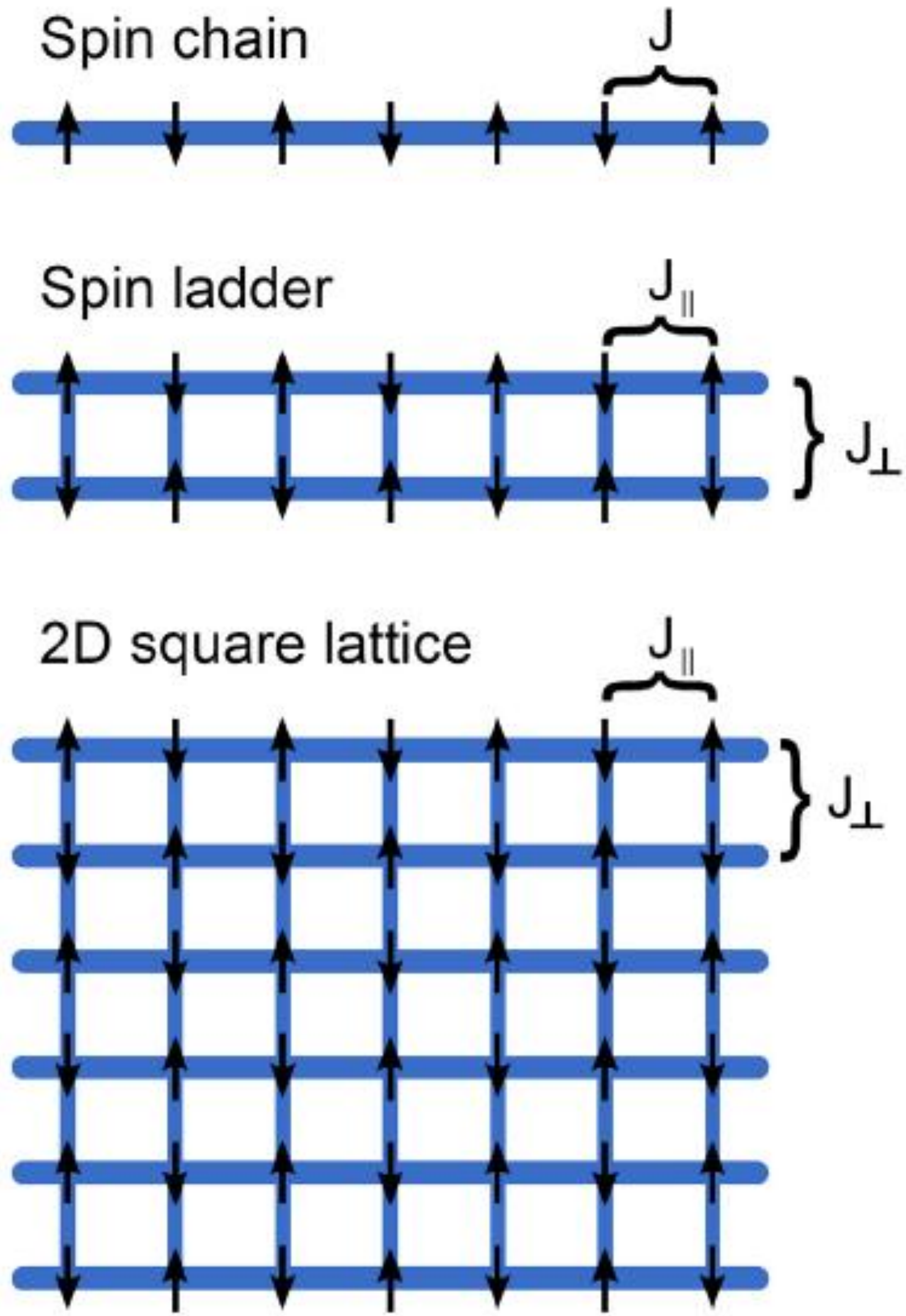
- spin ladders

偶（奇）数腿，有（无）能隙；

空穴掺杂→超导，$Sr_{14-x}Ca_xCu_{24}O_{21}$

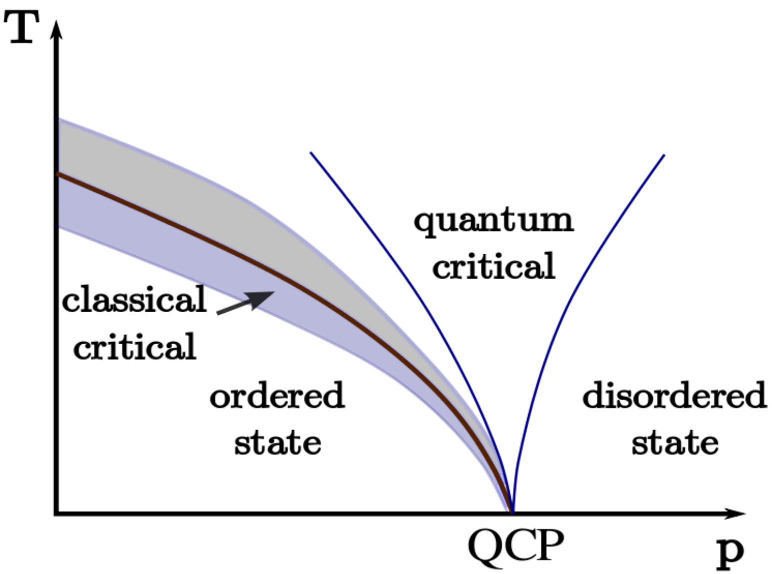
- 二维体系

$LaCuO_4$: 2d Heisenberg AFM，掺杂超导，spin在此的作用？



量子相变

- $LiHoF_4$, Ising FM



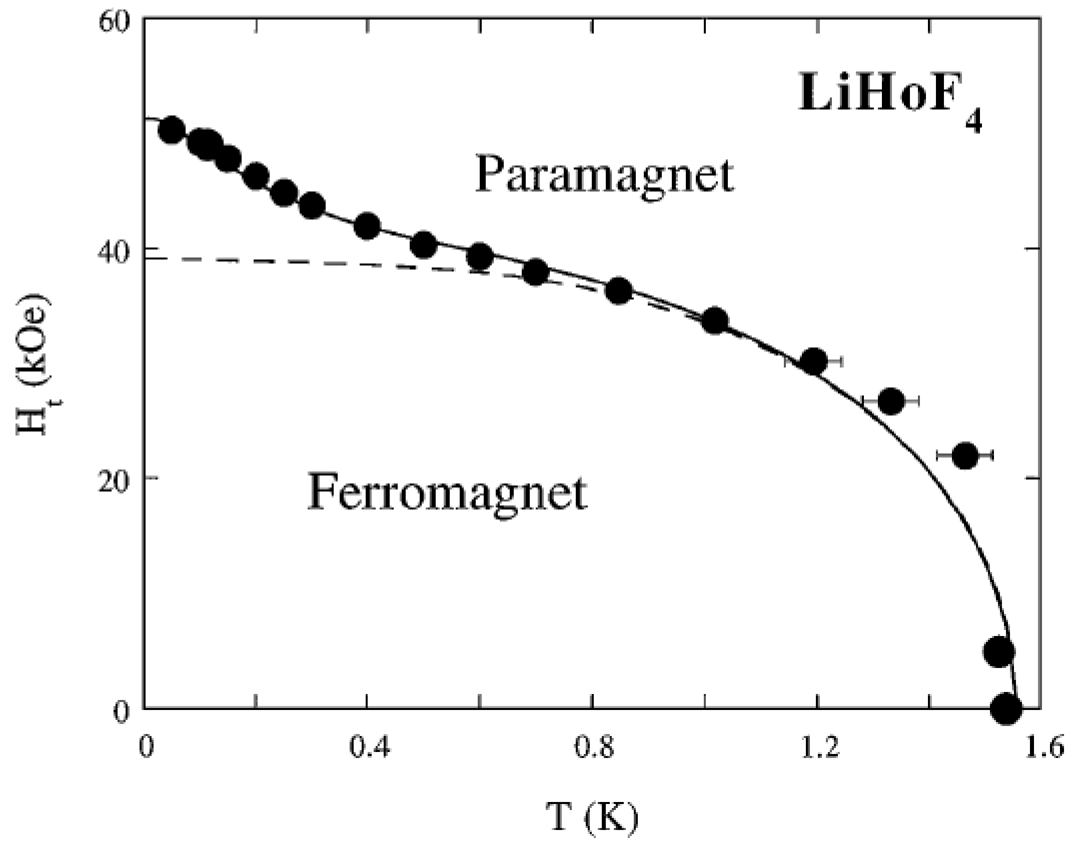


FIG. 3. Experimental phase boundary (filled circles) for the ferromagnetic transition in the transverse field-temperature plane. Dashed line is a mean-field theory including only the electronic spin degrees of freedom; solid line is a full mean-field theory incorporating the nuclear hyperfine interaction [Eq. (2)]. Both theories have the same two fitting parameters.

自旋电子学时代

- 电子时代的瓶颈

  尺度限制：原子极限？量子涨落：测不准原理。

  解决途径：利用电子的自旋属性

- 自旋电子学，其目标是利用电子的自旋属性，而不仅是电荷属性，带来电子技术领域的革命。

- 先决条件

  自旋极化：

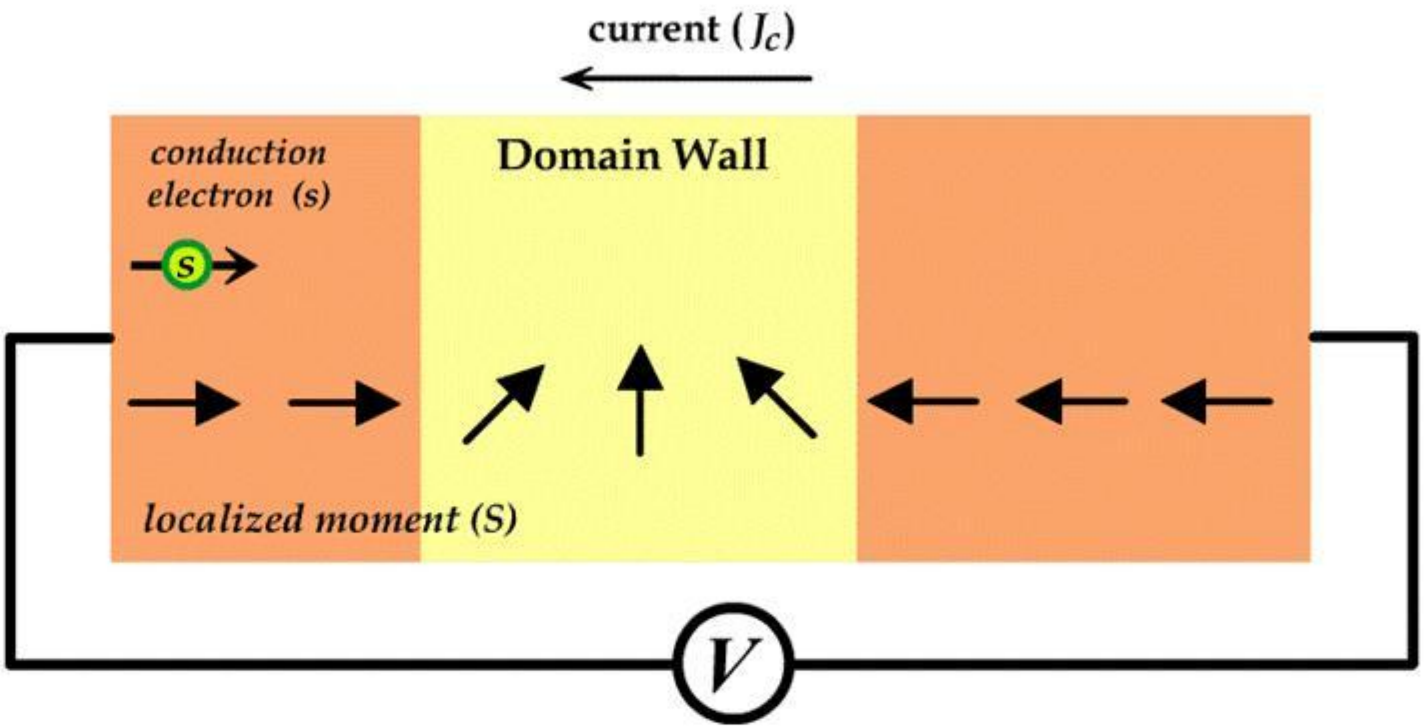
$$P = \frac{N_\uparrow - N_\downarrow}{N_\uparrow + N_\downarrow} \neq 0$$

  自旋相关散射：

	Co	$Ni_{80}Fe_{20}$	Fe
$\lambda_\uparrow$(nm)	5.5	4.6	1.5
$\lambda_\downarrow$(nm)	0.6	0.6	2.1

  自旋驰豫：达到微米级。作为对比，动量驰豫是纳米级。

Spin transfer torque



(after S. Maekawa Tohoku University, Sendai, Japan)

磁性物理教学计划

§1 磁学基础知识 （6学时）

§2 抗磁性和顺磁性 （6学时）

§3 自发磁化理论 （16学时）

§4 磁畴结构 （4学时）

§5 技术磁化理论 （6学时）

主要参考书

[1] 姜寿亭 李 卫 编著 凝聚态磁性物理 科学出版社 2003

[2] 近角聪信著，葛世慧译 铁磁性物理 兰州大学出版社 2002

[3] 戴道生等编著 铁磁学（上，中，下）科学出版社 1987

[4] S. Blundell **凝聚态物质中的磁性**（Magnetism in Condensed Matter） 科学出版社 2009

[5] 奥汉德利 著 **现代磁性材料原理和应用** (英文版2000) 化学工业出版社 2002

[6] 宛德福 马兴隆 编著 **磁性物理学** 电子工业出版社 1999

[7] 李国栋 编著 **当代磁学** 中国科学技术大学出版社 1999

[8] D.C. Mattis著，**磁性理论**（The Theory of Magnetism Made Simple）， 世界图书出版公司 2008

教学特点

在讲授具体知识的同时，更加注意介绍磁性物理的研究方法，特别是成功先驱者的思路。

和基础课相比，有些理论尚不够成熟，要以批判的态度接受，特别要注意每种理论的基本假定、适用范围和与实验结果的比较情况，发现存在问题，培育创新意识。

《凝聚态磁性物理》是主要参考教材，课件依据课程要求和大家的基础，做了内容上的选择和调整，但只是提纲，听课并阅读教材相关章节才能对本课程有较深的认识。

独立完成课外作业，写好读书报告是加深理解的重要步骤(~25%)。平时考察会在学习成绩评定上占有重要地位(~15%)。期末考试(~60%)。