



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

# 超导电性 ——过去、现在与未来

李晓光

中国科学技术大学物理系

Email / Tel: [lixg@ustc.edu.cn](mailto:lixg@ustc.edu.cn) / 0551-63603408

# 内容提要

- 一、廿世纪的伟大发现——超导电性
- 二、超导材料神奇的魅力
- 三、超导电性的基本特征
- 四、超导材料为什么会超导？
- 五、超导材料通往实用化的道路——强电应用
- 六、弱电应用的基础——崂山道士穿墙？
- 七、人类的梦想——高温超导材料
- 八、结束语

# 一、廿世纪的伟大发现——超导电性

## 超导输电

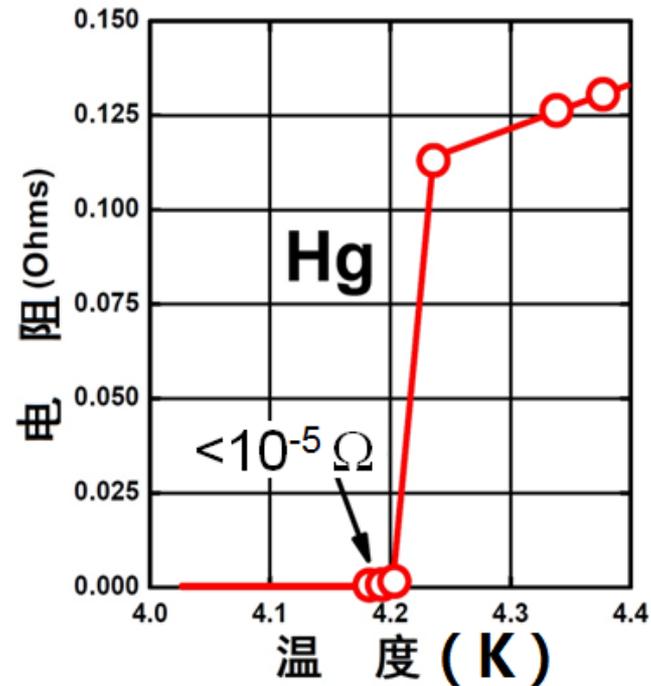
- 目前世界上的电能约有1/4损耗在输电线路路上，1/4损耗在变压器上
- 若使用无电阻的超导材料做输电线路路和变压器，再采用一些绝热技术，将实现“无损耗输电”。超导电缆的输电能力可达传统输电电缆的10倍以上，可保障电网的安全及运行成本。



# 一、廿世纪的伟大发现——超导电性



Heike Kamerlingh Onnes  
(1853-1926)



1913年获诺贝尔物理学奖（超导电性的发现）：H. K. Onnes (1853~1926) 荷兰物理学家。1908年成功地液化了氦气，1911年发现了某些金属，如Hg在液氦温度下电阻突然消失，即“超导电性”现象。

# 一、廿世纪的伟大发现——超导电性



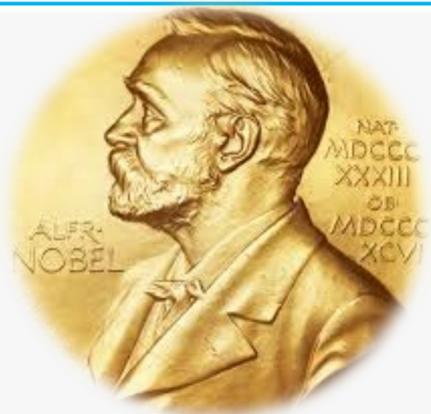
J. Bardeen  
(1908-1991)



L. N. Cooper  
(1930-)



J. R. Schrieffer  
(1931-)



**1972年诺贝尔物理学奖（超导机理的解决）：**  
1957年三名美国物理学家巴丁、库珀和施里弗合作创建了超导微观理论(BCS)。这一理论能对超导电性作出正确的解释，并极大地促进了超导电性的研究与应用。

# 一、廿世纪的伟大发现——超导电性



Vitaly Ginzburg  
(1916-2009)



Anthony Leggett  
(1938-)



Alexei Abrikosov  
(1928-)



**2003年诺贝尔物理学奖（强电应用的基础理论）**：授予美国阿尔贡国家实验室的Abrikosov、俄国莫斯科莱伯多夫物理研究所的Ginzburg和美国伊利诺大学教授Leggett，奖励他们在超导和超流理论方面的贡献。

# 一、廿世纪的伟大发现——超导电性

**B. D. Josephson**  
英国物理学家，1962年理论预言存在超导电子对隧道电流，第二年这一预言被实验证实。



Brian Josephson  
(1940-)



Ivar Giaever  
(1929-)

Ivar Giaever, 挪威人，移居加拿大。1957年完成了量子力学隧道效应实验，后来实现了超导隧道效应。

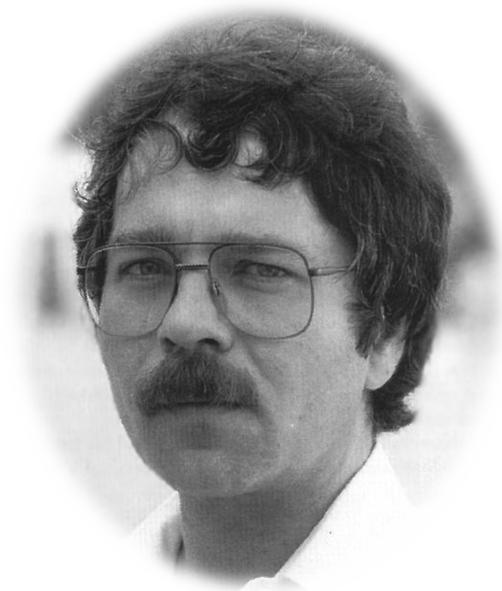


**1973年诺贝尔物理学奖（超导电性的弱电理论与应用）**：约瑟夫森和贾埃弗的发现，对于研制高性能的半导体和超导体元器件具有很高的应用价值，极大地提高了微弱电磁信号检测精度，并导致超导电学子的建立。

# 一、廿世纪的伟大发现——超导电性



K. Alexander Müller  
(1927-) 瑞士物理学家



J. Georg Bednorz  
(1950-) 德国物理学家



**1987年诺贝尔物理学奖（高温超导材料的发现）**：1986年缪勒和柏德诺兹发现了钡镧铜氧体系高温超导化合物。这一研究成果导致了多种液氮温区高温超导体材料的出现，并宣告了超导技术开发应用时代即将到来。

# 多种超导元素

## Periodic Table of Superconductivity

(dedicated to the memory of Bernd Matthias; compiled by James S. Schilling)

30 elements superconduct at ambient pressure, 23 more superconduct at high pressure.

H	ambient pressure superconductor																high pressure superconductor										He
	$T_c$ (K) $T_c^{\max}$ (K) P(GPa)																$T_c^{\max}$ (K) P(GPa)										
<b>Li</b> 0.0004 14 30	<b>Be</b> 0.026 3.7 30																<b>B</b> 11 250	C	N	<b>O</b> 0.6 100	F	Ne					
Na	Mg																<b>Al</b> 1.14	<b>Si</b> 8.2 15.2	<b>P</b> 13 30	<b>S</b> 17.3 190	Cl	Ar					
K	<b>Ca</b> 29 217	<b>Sc</b> 19.6 106	<b>Ti</b> 0.39 3.35 56.0	<b>V</b> 5.38 16.5 120	Cr	Mn	<b>Fe</b> 2.1 21	Co	Ni	Cu	<b>Zn</b> 0.875	<b>Ga</b> 1.091 7 1.4	<b>Ge</b> 5.35 11.5	<b>As</b> 2.4 32	<b>Se</b> 8 150	<b>Br</b> 1.4 100						Kr					
Rb	<b>Sr</b> 7 50	<b>Y</b> 19.5 115	<b>Zr</b> 0.546 11 30	<b>Nb</b> 9.50 9.9 10	<b>Mo</b> 0.92	<b>Tc</b> 7.77	<b>Ru</b> 0.51	<b>Rh</b> .00033	Pd	Ag	<b>Cd</b> 0.56	<b>In</b> 3.404	<b>Sn</b> 3.722 5.3 11.3	<b>Sb</b> 3.9 25	<b>Te</b> 7.5 35	<b>I</b> 1.2 25						Xe					
<b>Cs</b> 1.3 12	<b>Ba</b> 5 18	insert La-Lu	<b>Hf</b> 0.12 8.6 62	<b>Ta</b> 4.483 4.5 43	<b>W</b> 0.012	<b>Re</b> 1.4	<b>Os</b> 0.655	<b>Ir</b> 0.14	Pt	Au	<b>Hg-<math>\alpha</math></b> 4.153	<b>Tl</b> 2.39	<b>Pb</b> 7.193	<b>Bi</b> 8.5 9.1	Po	At						Rn					
Fr	Ra	insert Ac-Lr	<b>Rf</b>	<b>Ha</b>																							
		<b>La-fcc</b> 6.00 13 15	<b>Ce</b> 1.7 5	Pr	Nd	Pm	Sm	<b>Eu</b> 2.75 142	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	<b>Lu</b> 12.4 174											
		<b>Ac</b>	<b>Th</b> 1.368	<b>Pa</b> 1.4	<b>U</b> 0.8( $\beta$ ) 2.4( $\alpha$ ) 1.2	<b>Np</b>	<b>Pu</b>	<b>Am</b> 0.79 2.2 6	<b>Cm</b>	<b>Bk</b>	<b>Cf</b>	<b>Es</b>	<b>Fm</b>	<b>Md</b>	<b>No</b>	<b>Lr</b>											



## Evidence for Superconductivity above 260 K in Lanthanum Superhydride at Megabar Pressures

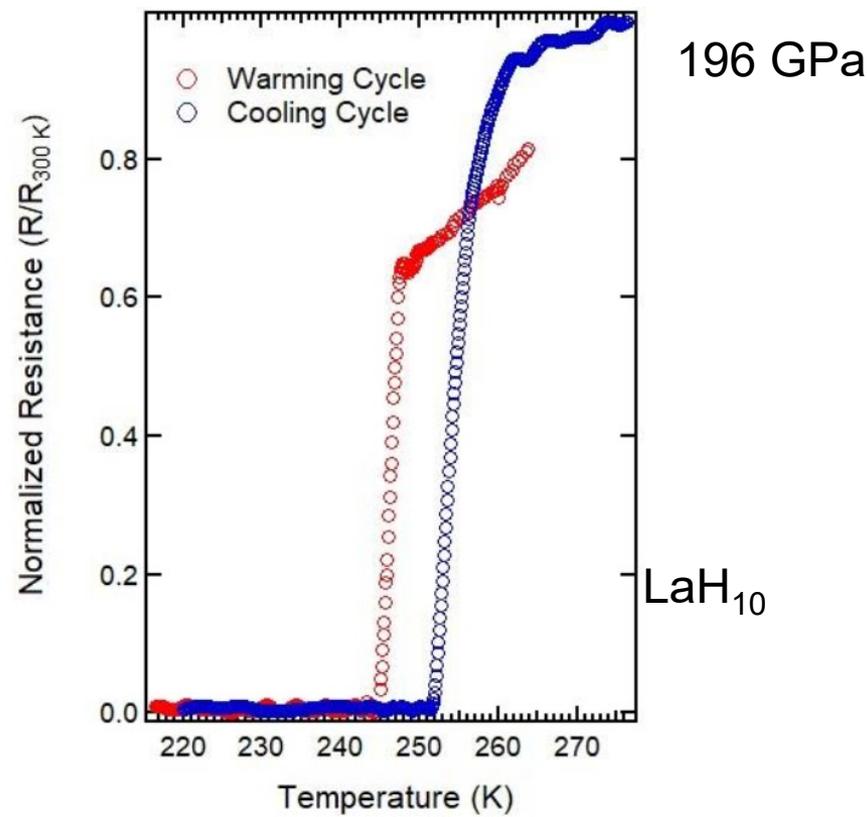
Maddury Somayazulu,<sup>1,\*</sup> Muhtar Ahart,<sup>1</sup> Ajay K. Mishra,<sup>2,‡</sup> Zachary M. Geballe,<sup>2</sup> Maria Baldini,<sup>2,§</sup> Yue Meng,<sup>3</sup> Viktor V. Struzhkin,<sup>2</sup> and Russell J. Hemley<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>*Institute for Materials Science and Department of Civil and Environmental Engineering, The George Washington University, Washington, DC 20052, USA*

<sup>2</sup>*Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington, Washington, DC 20015, USA*

<sup>3</sup>*HPCAT, X-ray Science Division, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois 60439, USA*

 (Received 23 August 2018; revised manuscript received 3 December 2018; published 14 January 2019)



# 内容提要

- 一、廿世纪的伟大发现——超导电性
- 二、超导材料神奇的魅力
- 三、超导电性的基本特征
- 四、超导材料为什么会超导？
- 五、超导材料通往实用化的道路——强电应用
- 六、弱电应用的基础——崂山道士穿墙？
- 七、人类的梦想——高温超导材料
- 八、结束语

## 二、超导材料——神奇的魅力

### 一) 超导输电

高温超导电缆的输电能力可达传统输电电缆的10倍以上，可保障电网的安全及运行成本。



美国的商业电网已经开始使用新型的高温超导输电电缆系统。美国纽约长岛能源局。600米138千伏。

# 高温超导输电电缆



北京云电英纳公司制成35kV/2kA 高温超导输电电缆在昆明普吉变电站正式挂网运行。我国因此成为继美国、丹麦之后世界第三个将超导电缆投入电网运行的国家。

## 630kVA三相高温超导变压器 电工所研制



The HTS transformer of 630 kVA is being constructed at IEE and will be tested at Xinjiang Tebian Elec. Co. Ltd. in this year.

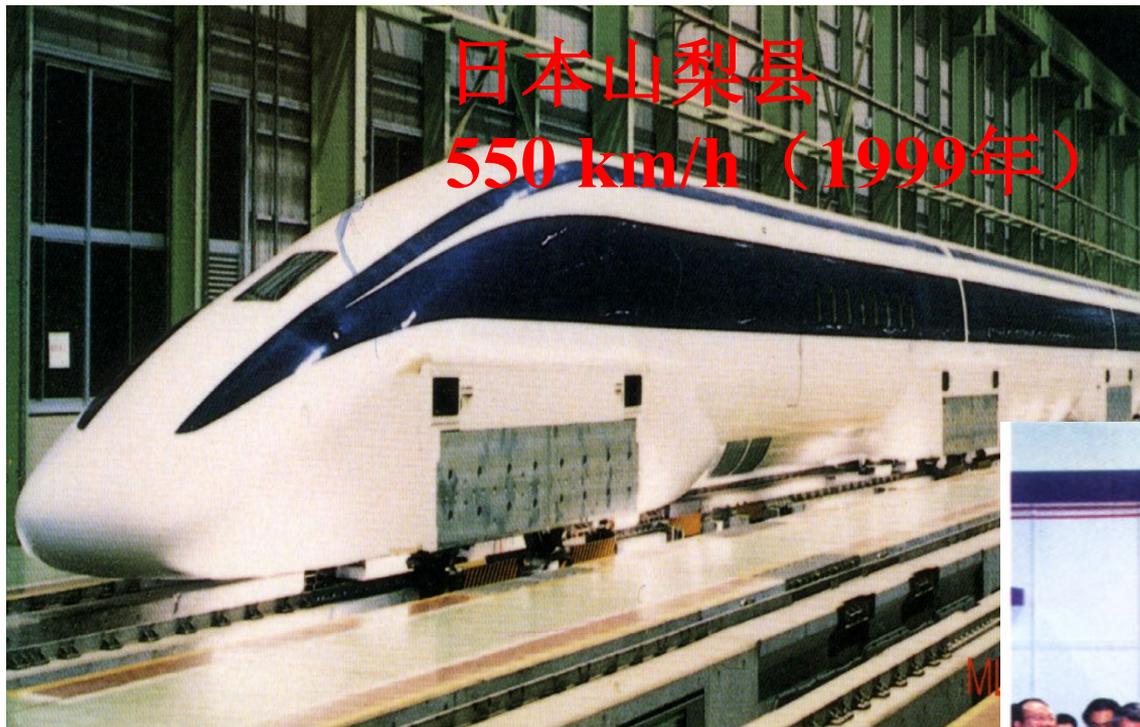
长达360米、载流能力达1万安培的高温超导直流输电电缆，是目前国际上传输电流最大的超导电缆。



中科院电工所和河南中孚实业股份有限公司等单位联合攻关，于2012年9月26日投入示范运行。节能65%以上。

## 二、超导材料——神奇的魅力

### 二) 交通运输：超导磁悬浮列车

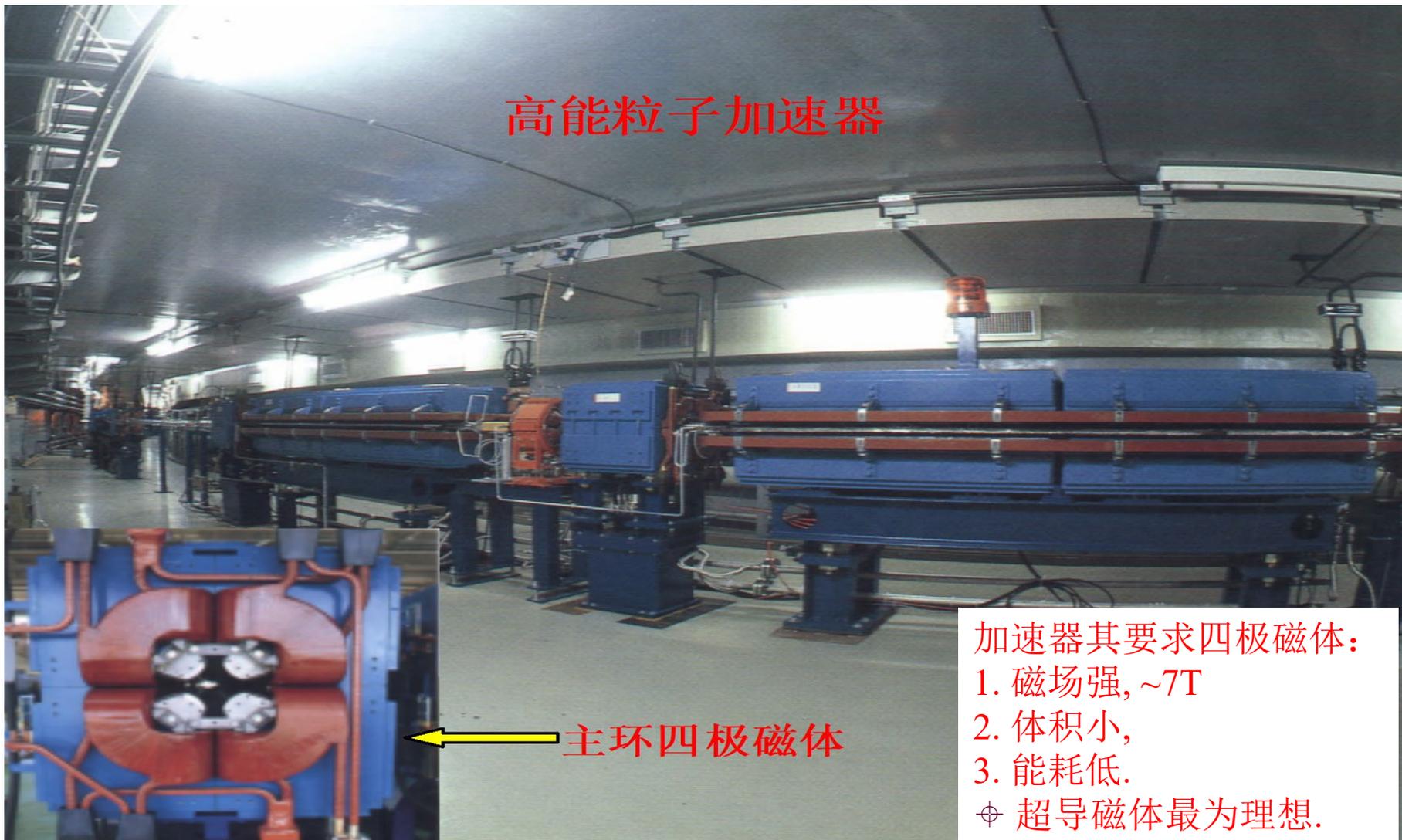


江泽民总书记乘坐“世纪号”世界首辆载人高温超导磁悬浮实验车

## 二、超导材料——神奇的魅力

### 三) 科学研究装置：高能粒子加速器

高能粒子加速器



加速器其要求四极磁体：

1. 磁场强,  $\sim 7\text{T}$
2. 体积小,
3. 能耗低.

⊕ 超导磁体最为理想.

## 二、超导材料——神奇的魅力

### 三) 科学研究装置：国际热核聚变反应堆 (ITER)

利用地球上海水中的重氢和超重氢，进行核聚变发电。  
危险小且无污染，是未来能源的希望！

参加国：加拿大，欧盟，日本、  
俄罗斯、美国和中国  
ITER 计划共需要：铌钛线材 240吨，  
Nb<sub>3</sub>Sn线材 480吨

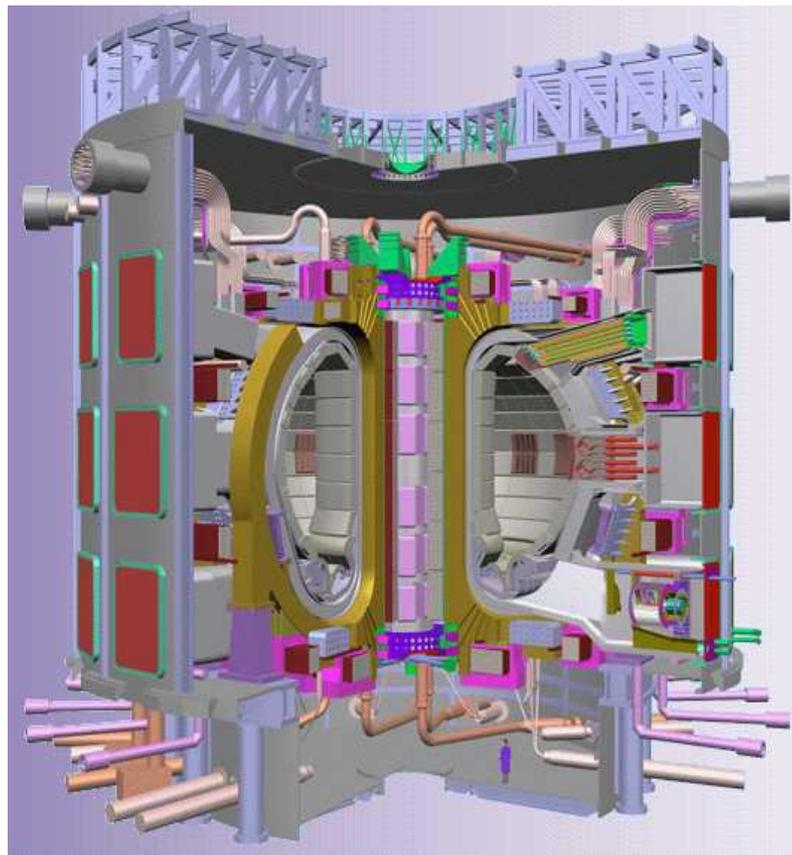
我国将出资4亿美元，超导线材  
作为首选

铌钛线材: 200吨

Nb<sub>3</sub>Sn线材: 100吨

价值：6亿元人民币

核聚变是在近亿度的高温下进行



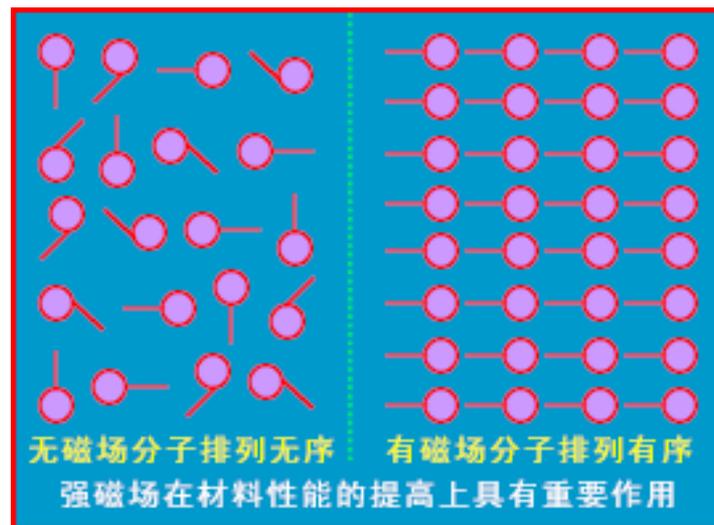
## 二、超导材料——神奇的魅力

### 晶体生长



在坩埚区加一横向磁场，则会抑制熔融单晶的表面波动，有效控制氧含量及减小由于杂质和涡旋条纹而产生的缺陷。

### 材料变性



强磁场对材料分子，特别是液晶高分子材料、功能材料和工程塑料的分子具有取向作用。

## 二、超导材料——神奇的魅力

### 生物体和植物磁悬浮



在 $\varnothing 32\text{mm}$  超导磁体产生 16T 磁场中的悬浮，动画来自于 Nijmegen High Field Magnet Laboratory.

$$\text{悬浮力 } F = M \nabla B, \quad M = \chi_0 V B$$

$$F = \chi_0 V \nabla B^2 / 2$$

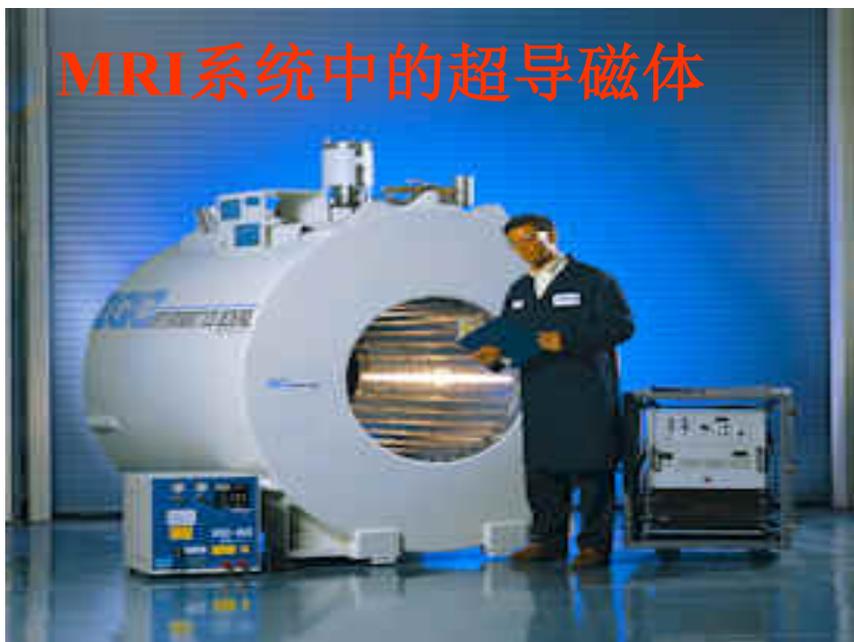
$$\text{重力 } mg = \rho V g$$

如果  $F > mg$ ，即  $\nabla B^2 > 2\rho g / \chi_0$ ，物体被悬浮。

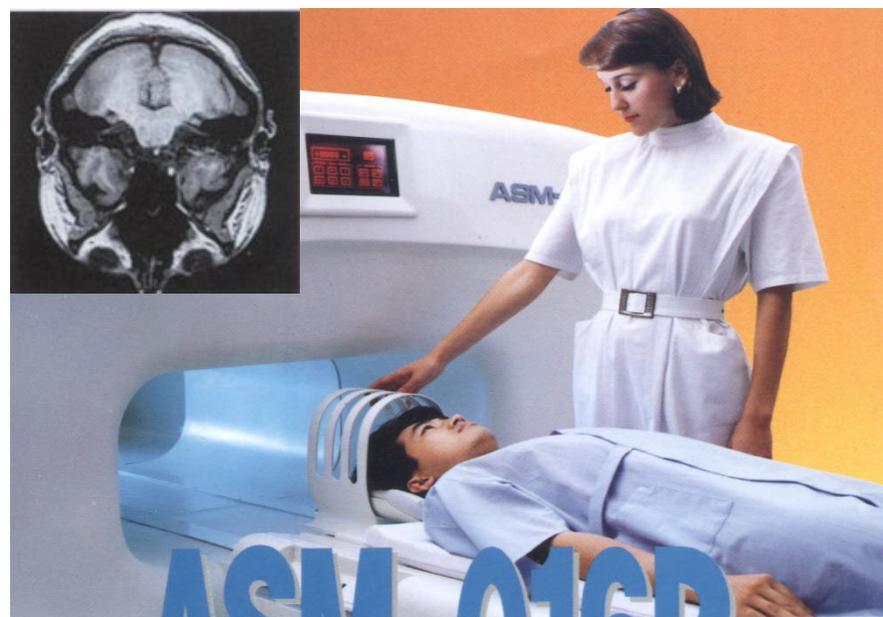
## 二、超导材料——神奇的魅力

### 四) 医疗设备：磁共振人体成像仪(MRI)

MRI系统中的超导磁体



**IGC** Magnet Business Group  
A Division of Intermagnetics General Corporation



**ASM-016P**  
磁共振成像系统

## 二、超导材料——神奇的魅力

### 五) 弱电应用

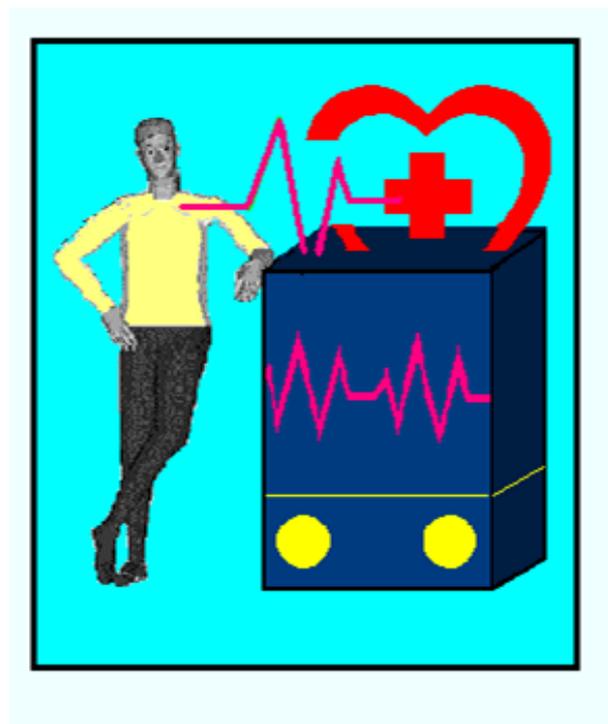
可测地球磁场的十亿分之一



超导量子干涉器(SQUID)

$$10^{-13} \text{Tesla/Hz}^{1/2}$$

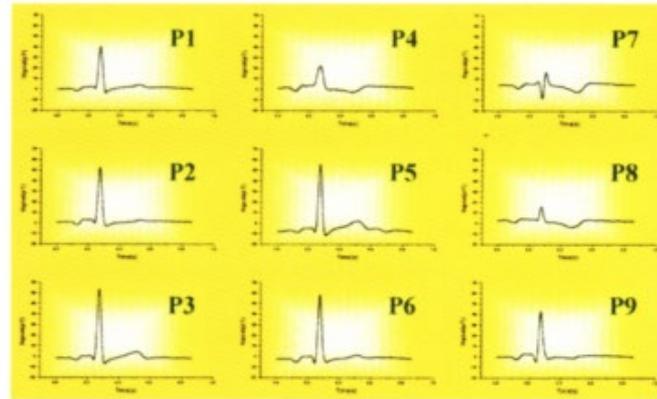
- 军事
- 勘探
- 医学
- .....



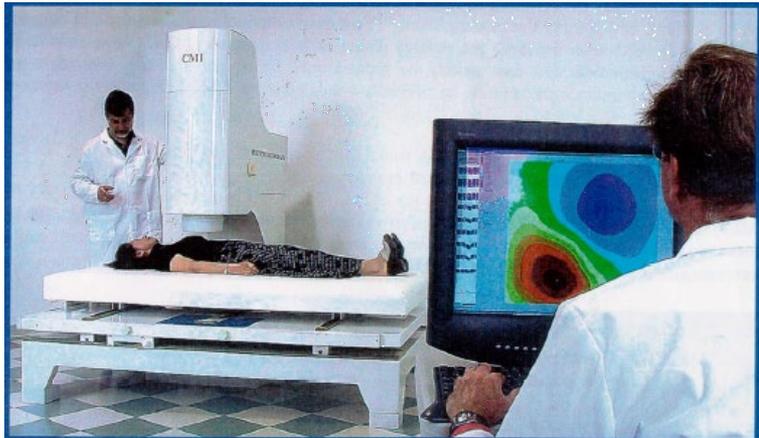
# 高温超导体的应用——薄膜的应用

材料：YBaCuO单晶薄膜

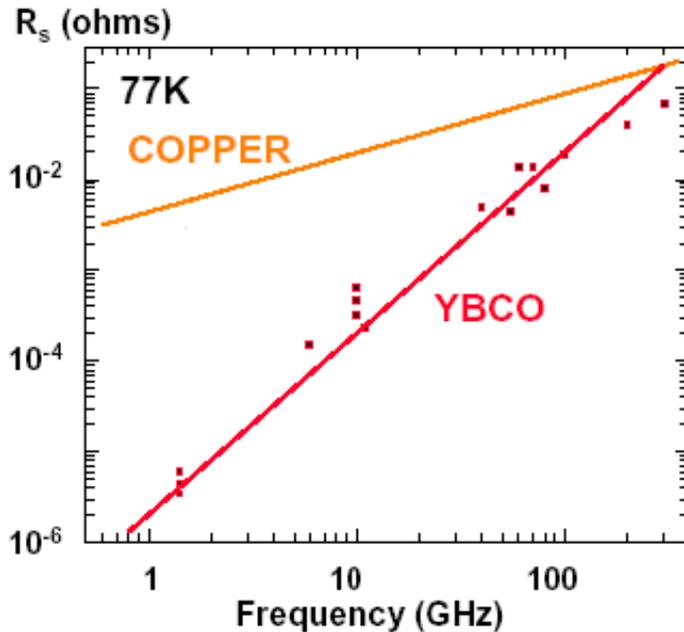
HTS-SQUID 心磁图仪



高温超导 rf-SQUID 系统及人体心磁信号



# 高温超导体的应用——微波器件



高温超导薄膜的微波表面电阻 $R_s$ 远远小于铜的 $R_s$ , 损耗小, 频率特性好。

HTS薄膜可以制备高性能的各种微波器件

清华、电子科大、南大、物理所、电子部16所等

# 高温超导滤波器系统

## 高温超导滤波器系统



清华大学研制的高温超导滤波器在唐山基站投入商业运行。这是中国高温超导首次实际应用。它使手机发射功率降低3dB

## 高温超导滤波器系统—— 包括6路滤波器+LNA



清华大学物理系在北京大钟寺地区建成中国首个高温超导移动通信应用示范基地。在五个基站中，使用30路超导滤波器，为十多万居民提供优质通信服务。

## 二、超导材料——神奇的魅力

### 六) 军事应用



## 二、超导材料——神奇的魅力

### 七) 超导计算机

- 高速计算机的散热是超大规模集成电路面临的难题。
- 而超导计算机中的超大规模集成电路，其元件间的互连线用接近零电阻的超导器件来制作，不存在散热问题，同时计算机的运算速度大大提高。



# 内容提要

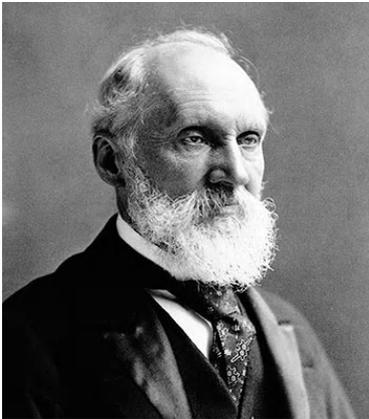
- 一、廿世纪的伟大发现——超导电性
- 二、超导材料神奇的魅力
- 三、超导电性的基本特征
- 四、超导材料为什么会超导？
- 五、超导材料通往实用化的道路——强电应用
- 六、弱电应用的基础——崂山道士穿墙？
- 七、人类的梦想——高温超导材料
- 八、结束语



# 一) 一个争论不休的论题——电阻的可能变化

Three different hypotheses existed on how resistance would respond as temperature approaches 0 K:

- Resistance would increase (Kelvin)
- Resistance would plateau (Matthiessen)
- Resistance would continue to drop gradually to 0  $\Omega$  around 0 K (Dewar).



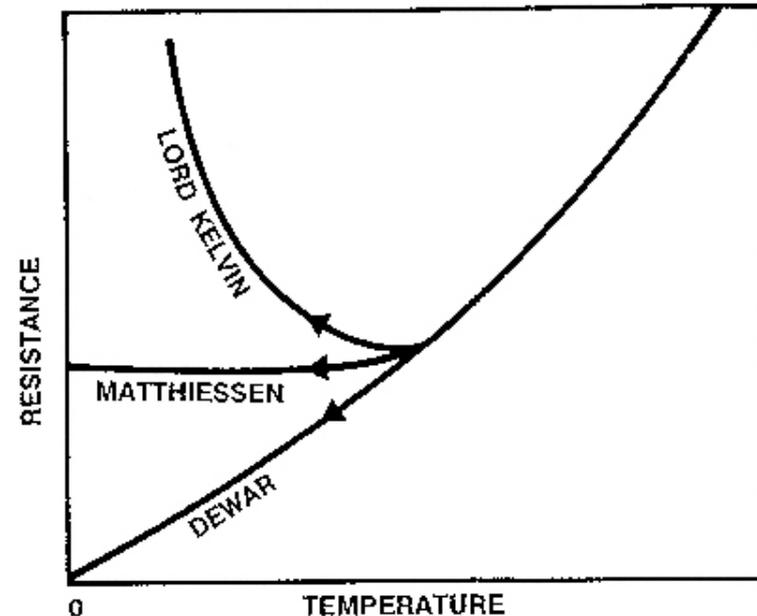
Lord Kelvin  
1824-1907



Augustus Matthiessen  
1831-1870



James Dewar  
1842-1923



# 一) 一个争论不休的论题——电阻的可能变化



K. Onnes教授(1853-1926年)

荷兰莱登实验室:

☺1913年获诺贝尔物理学奖 (60岁)

☺29岁: 莱登大学教授

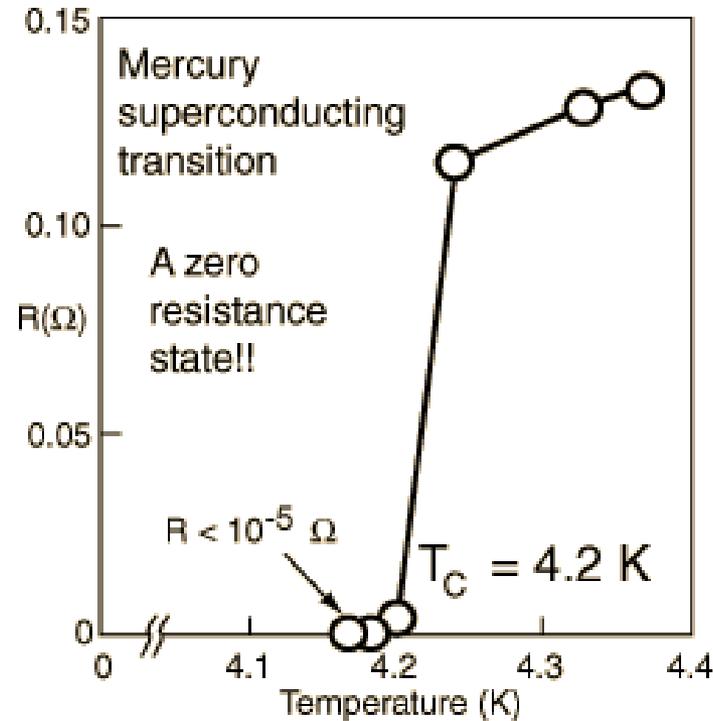
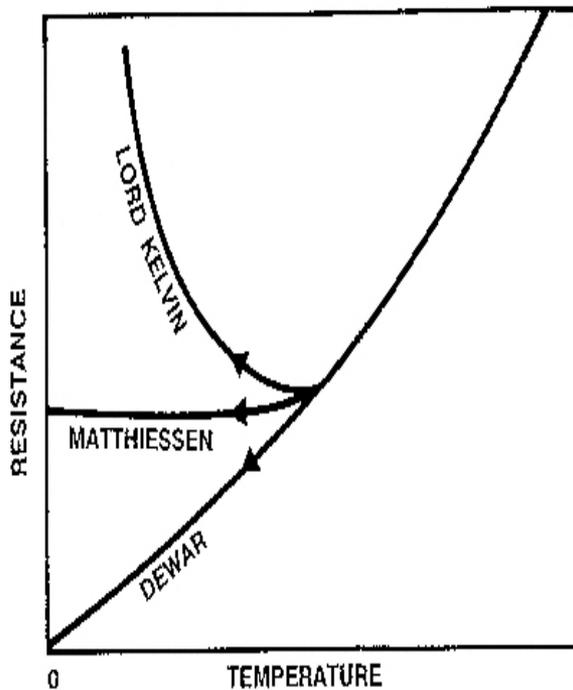
☺30岁: 阿姆斯特丹皇家科学院院士

☺ “绝对零度先生”

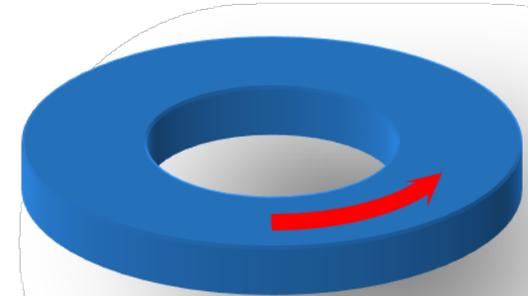
- 液 氮: LN<sub>2</sub>, 77K, 约4元/升
- 液 氦: LHe, 4.2K, 约200元/升
- 致冷机: 不同温区价格不同

## 二) 超导电性的基本特征

### 零电阻现象



### Perfect conductor



$$\rho = 0$$

$$\frac{I}{dI/dt} > 10^5 \text{ yrs}$$

K. Omnes, Commun. Phys. Lab. (1911).

1911年, Hg在4.2K下, 电阻率完全消失

## 二、超导电性的基本特征

在1933年以前，人们对超导基本特性的认识都是片面的。同时也存在着两种争论不休的观点：

- 一种认为材料发生超导的时候体系的电子自由程发生了突变，即电子的自由程变为无限大，电子在输运过程中被认为没有阻力，从而电阻为零；
- 而另一种人们一直比较普遍地接受的观点认为，零电阻是超导体的最本质的性质，基本上把超导体认为理想导体来看，但是对超导体磁性质的认识则很少。

## 二、超导电性的基本特征

### 理想导体的磁性

在超导体的抗磁性发现以前，人们一直认为在电阻为零时体系进入了理想导体状态。在理想的导体中，在稳恒情况下，由于电阻率 $\rho = 0$ ，则电导率 $\sigma = \infty$ ，根据欧姆定理，电流密度为：

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

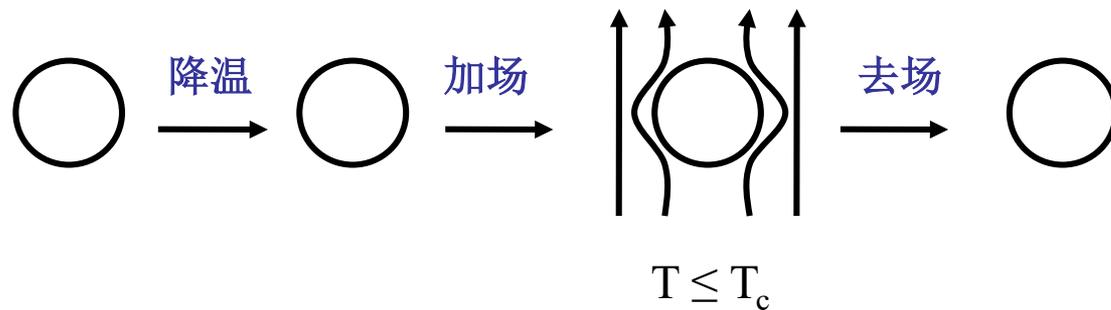
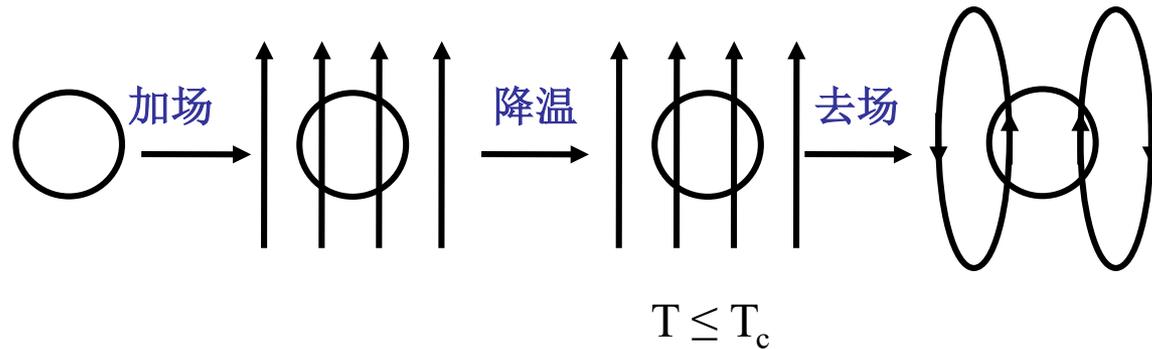
因此，要使得 $j$ 为有限值，只有 $E=0$ 。又：由Faraday感应定律知道，随时间变化的磁场在其周围产生了一种电场，（设磁导率 $\mu=1$ ），则：

$$\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} = -\nabla \times E \quad \longrightarrow \quad B = B_0$$

在完全理想的导体中不可能有随时间变化的磁场，即原有的磁通量不会消失也不会增加。

## 二、超导电性的基本特征

$$\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} = -\nabla \times E \quad \longrightarrow \quad B = B_0$$



理想导体中体内的磁通分布与加场的历史有关

如何理解理想导体无阻时体内的磁场保持不变？

## 二、超导电性的基本特征

如何理解理想导体无阻时体内的磁场保持不变？

- 外场改变时，根据楞次定律，在材料表面便感应出一个感生电流，感应电流的磁场总是要阻碍引起感应电流的磁通量的变化，即抵消外磁场的变化。

$$\nabla \times \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{J} + \frac{1}{c} \frac{\partial D}{\partial t}$$

- 稳恒情况下，体内的  $E = 0$ ，感生电流密度  $j$  不受到电场的作用，同时材料又是无阻的，所以这个电流不消失也不变化，永远能保持着材料内的磁场不变。
- 由于有持续电流的存在，在理想导体中，材料内部的磁场不随时间变化

## 二) 超导电性的基本特征

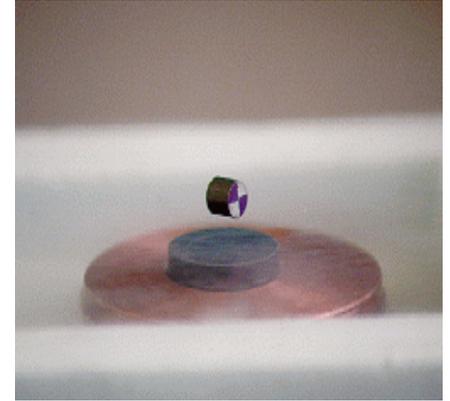
### 抗磁性——迟到的发现(1933年)



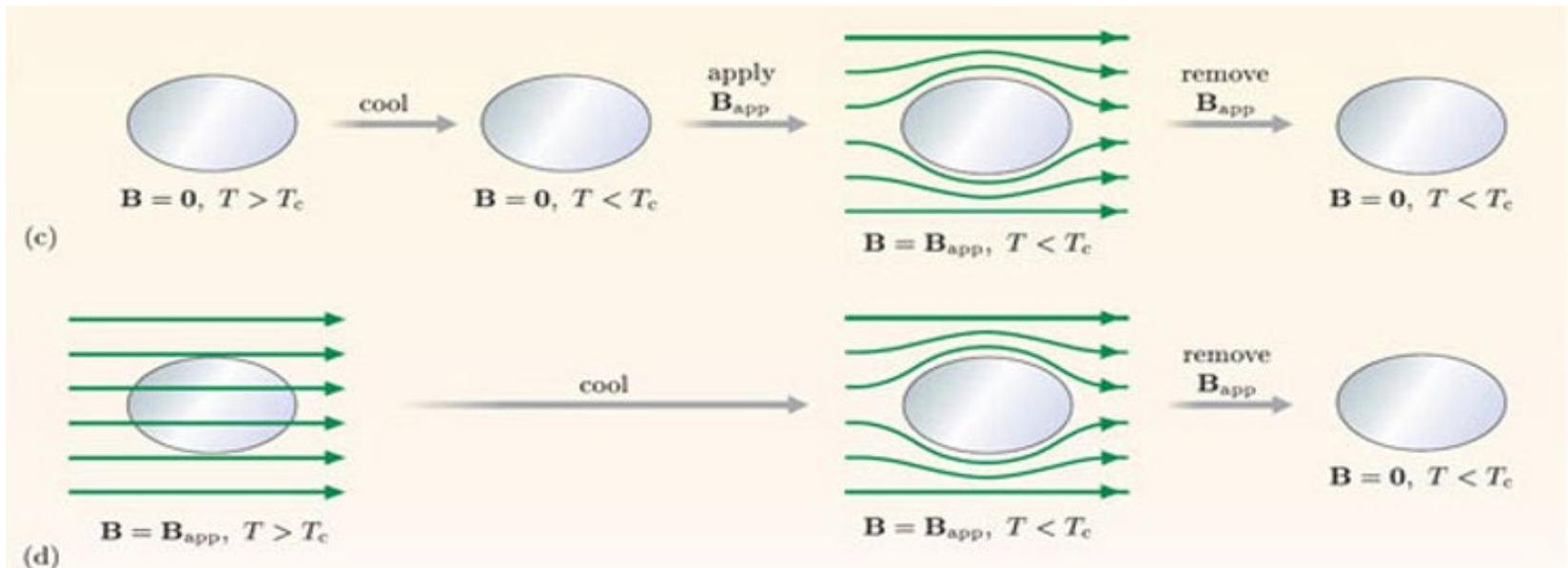
W. Meissner  
(1882-1974)



R. Ochsenfeld  
(1901-1993)



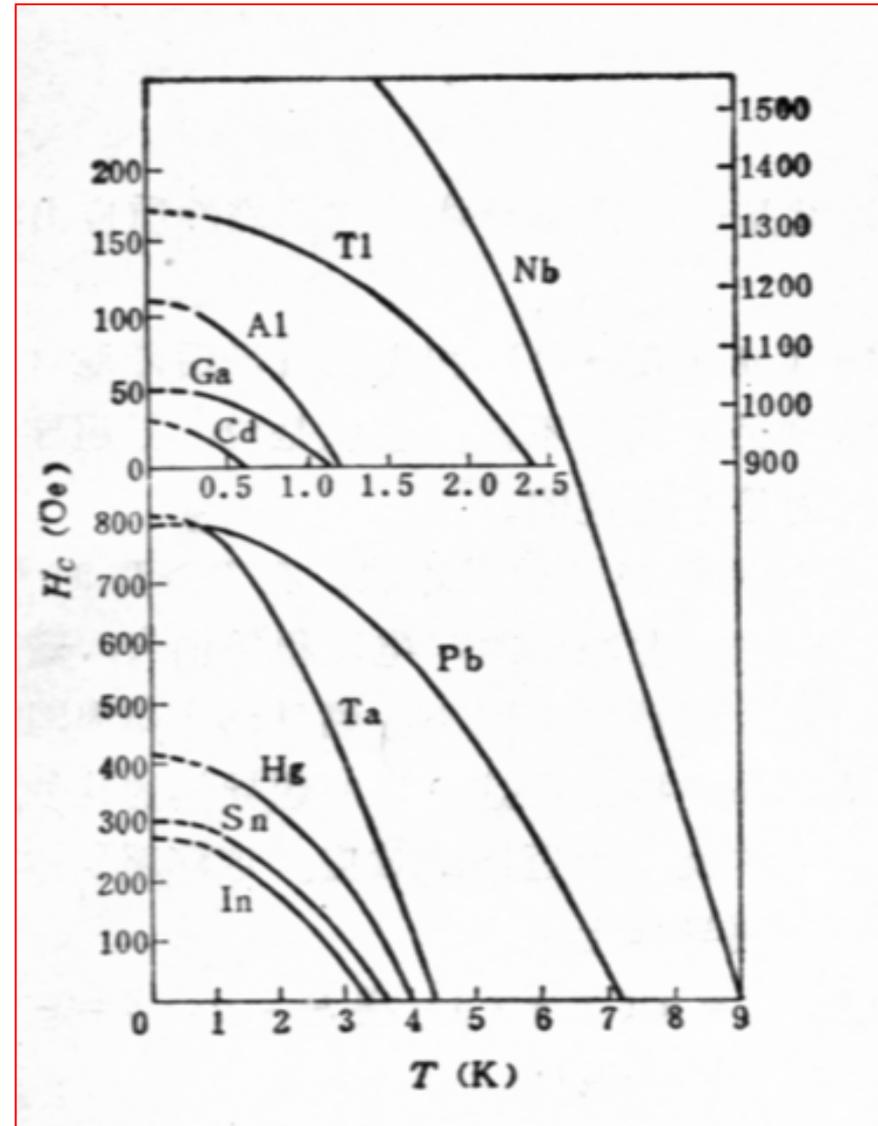
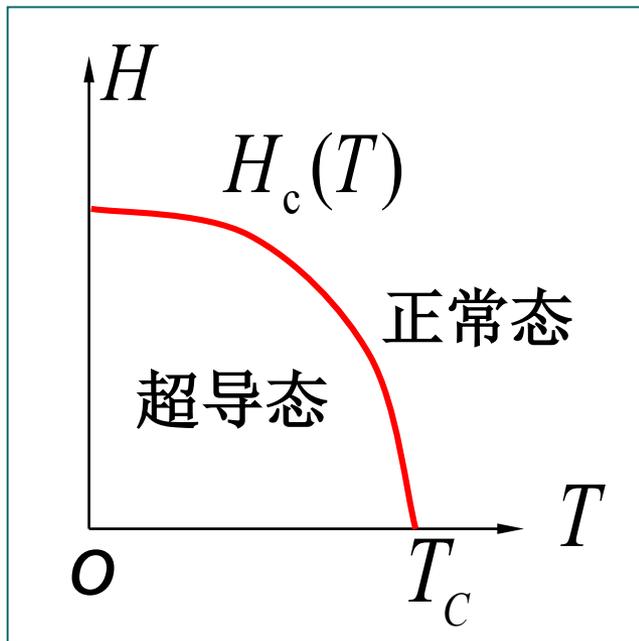
Meissner效应：超导材料的抗磁性（1933）



# 临界磁场（能破坏超导态的外磁场的临界值）

$$H_c = H_0 \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

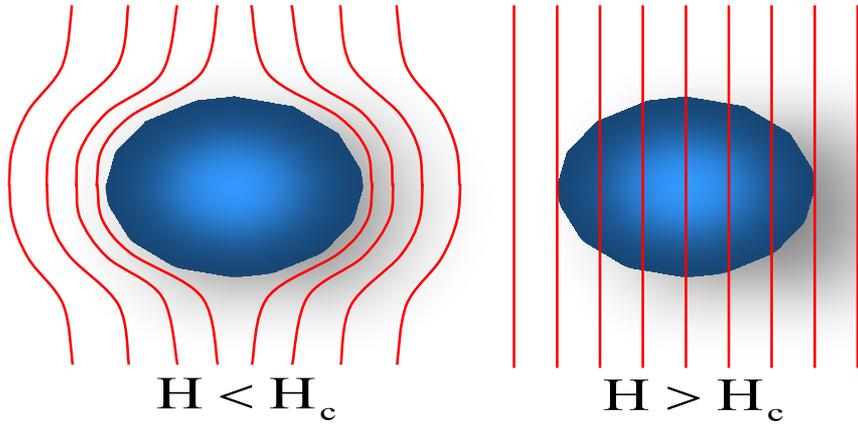
$$T = 0\text{K}, \quad H_c = H_0$$



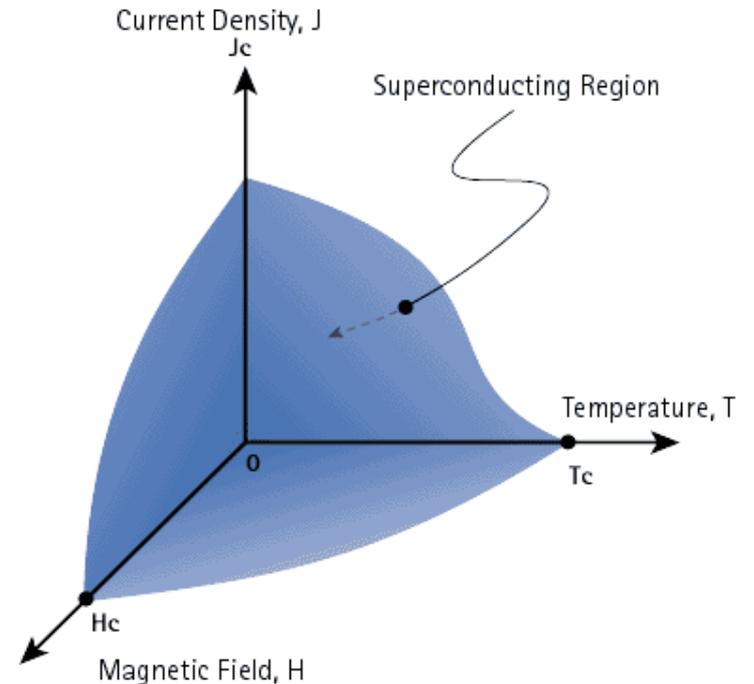
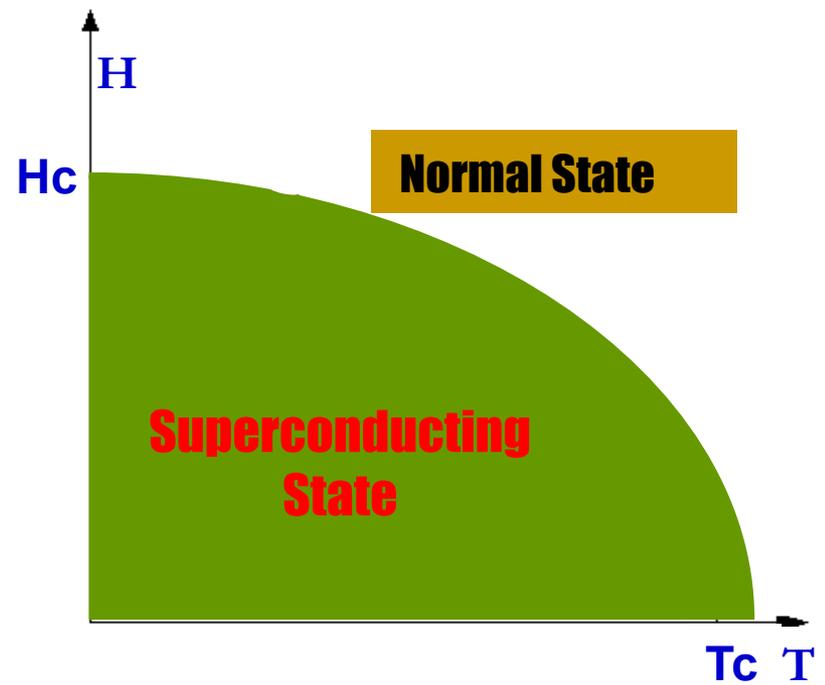
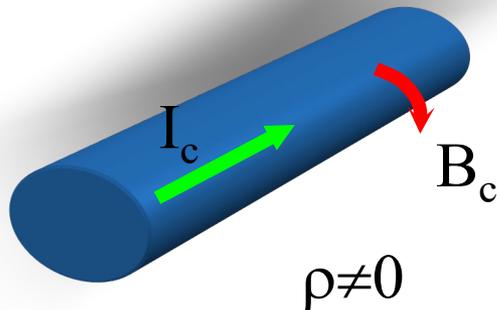
# 影响实用化的关键因素

临界磁场、临界电流密度、临界温度

**Magnetic field destroys s/c**



**Electric current destroys s/c**



# 内容提要

- 一、廿世纪的伟大发现——超导电性
- 二、超导材料神奇的魅力
- 三、超导电性的基本特征
- 四、超导材料为什么会超导？
- 五、超导材料通往实用化的道路——强电应用
- 六、弱电应用的基础——崂山道士穿墙？
- 七、人类的梦想——高温超导材料
- 八、结束语

# 四、超导材料为什么会超导？

## 唯像超导理论

### • London Equation

$$\nabla \cdot \vec{D} = 4\pi\rho$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t}$$

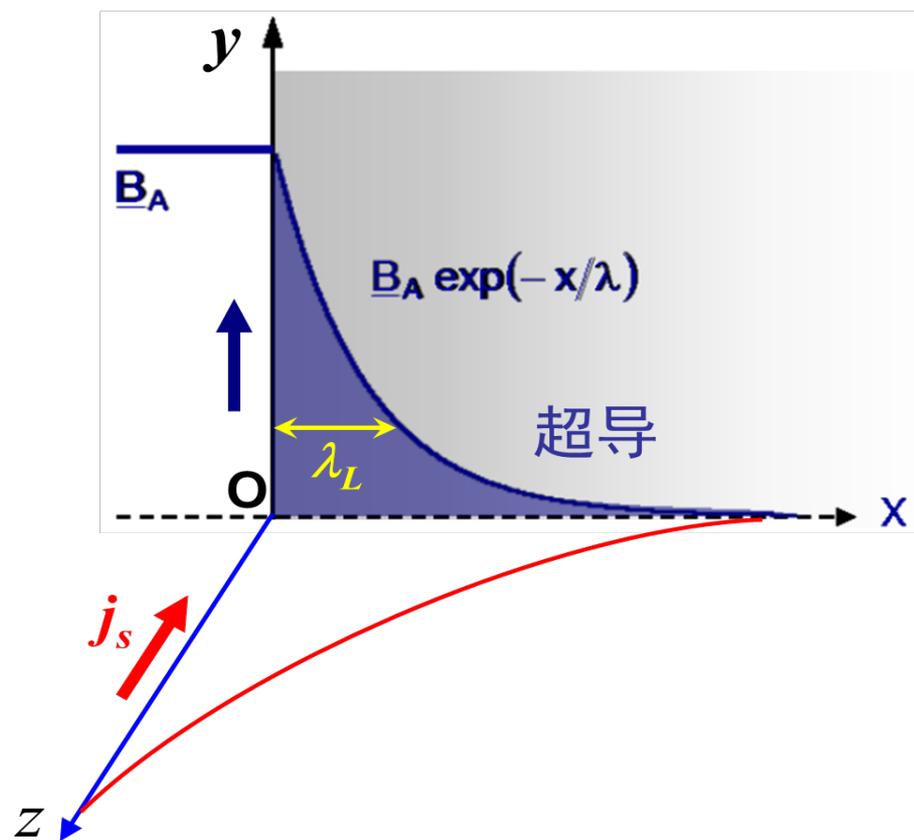
$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{J} + \frac{1}{c} \frac{\partial D}{\partial t}$$

$$\vec{J} = -\frac{c}{4\pi\lambda_L^2} \vec{A}$$

$$\nabla^2 B = B / \lambda_L^2$$

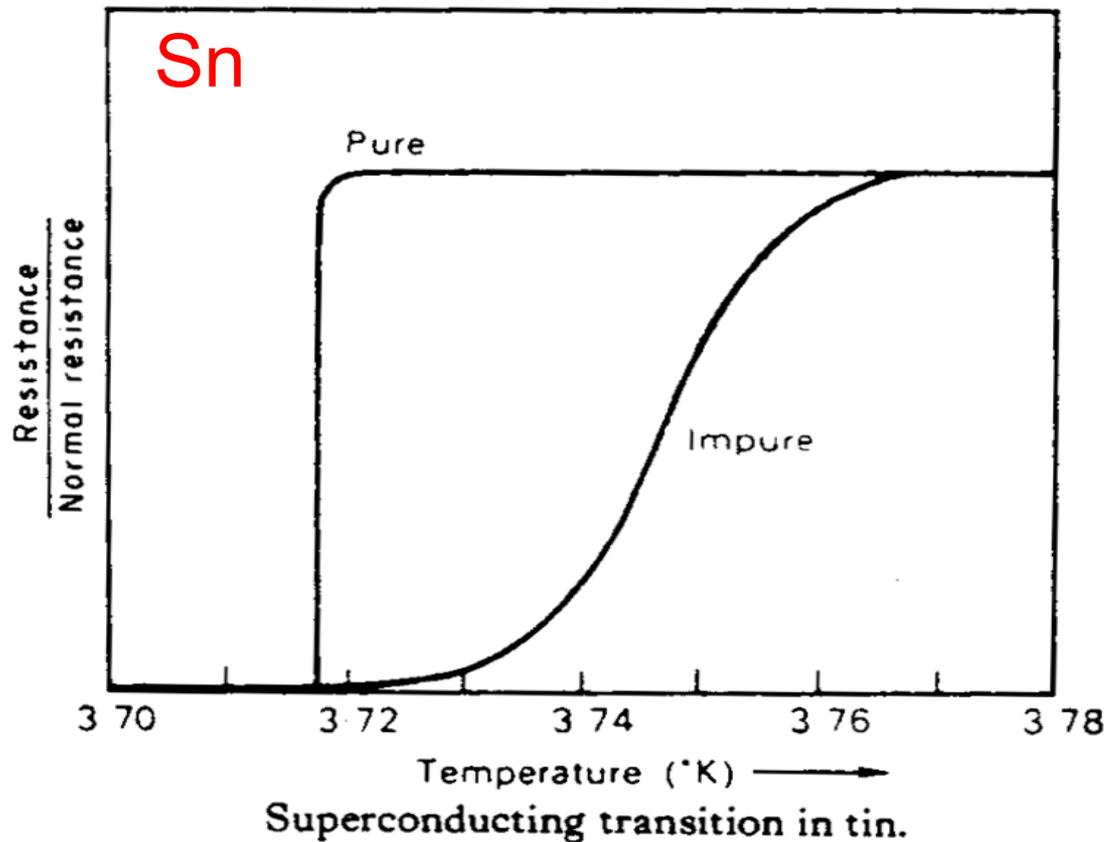
$$\lambda_L^2 = mc^2 / 4\pi n_s e^2$$



该理论的结果是有意义的，但其出发点是错误的

超导相干长度的存在有什么实验证据？

超导体的十分锐的转变宽度  $\Delta T < 10^{-3}$  K



# 四、超导材料为什么会超导？

- **Ginzburg-Landau Theory** 预言宏观量子现象、不能给出超导的起源

$$F = F_n + \alpha |\Psi|^2 + \frac{\beta}{2} |\Psi|^4 + \frac{1}{2m} \left| \left( -i\hbar \nabla + \frac{2e}{c} \vec{A} \right) \Psi \right|^2 + \frac{H^2}{8\pi}$$

$$\alpha(T) = \alpha_0 (T - T_c) / T_c, \quad |\Psi|^2 = \alpha(T) / \beta, \quad H_c = \left[ 4\pi |\alpha(T)|^2 / \beta \right]^{1/2}$$

$$\frac{\partial g_s(H)}{\partial \Psi} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{2m} \left( -i\hbar \nabla - \frac{e}{c} \vec{A} \right)^2 \psi + \alpha \psi + \beta |\psi|^2 \psi = 0 \quad \text{G-L I}$$

$$\vec{n} \cdot \left( -i\hbar \nabla - \frac{e}{c} \vec{A} \right)^2 \varphi = 0 \quad \text{边界条件}$$

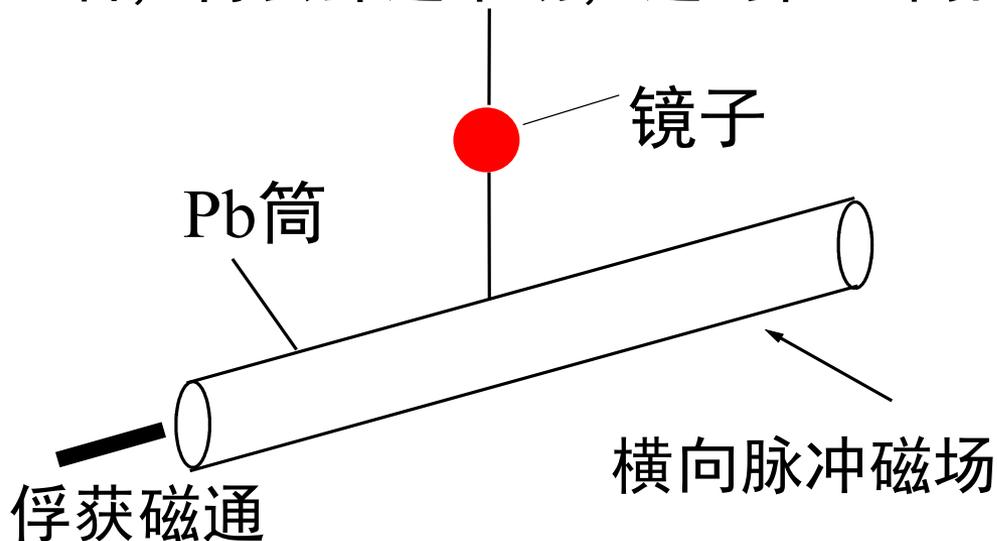
$$\frac{\partial g_s(H)}{\partial A} = 0 \quad \Rightarrow \quad j_s = -\frac{ie\hbar}{2m} (\psi^* \nabla \psi - \psi \nabla \psi^*) - \frac{e^2}{mc} |\psi|^2 \vec{A} \quad \text{G-L II}$$

$$\xi^2(T) = -\hbar^2 / 2m\alpha(T) \quad \lambda^2 = mc^2 / 4\pi |\psi|^2 e^2$$

# 宏观量子化

G-L第一和第二方程与Schrodinger方程形式上一样，预示了超导体具有类似于微观现象中的量子化现象，但Schrodinger方程描述单个微观粒子。G-L理论中的 $\psi$ 为描述超导电子的“有效波函数”， $n_s$ 是宏观量， $\rightarrow$ 宏观体系的波函数 $\rightarrow$ 宏观量子现象。

将镀上Pb膜的石英丝放置于平行于丝的轴的磁场中冷却，超导后，再去掉这个场，这时在Pb筒内就存在被俘获的磁通。



$$\phi = \frac{hc}{2e} n = \phi_0 n$$

$$\phi_0 = \frac{hc}{2e} = 2.07 \times 10^{-7} \text{ G} \cdot \text{cm}^2$$

# 磁通量量子化实验结果和理论分析

VOLUME 7, NUMBER 2

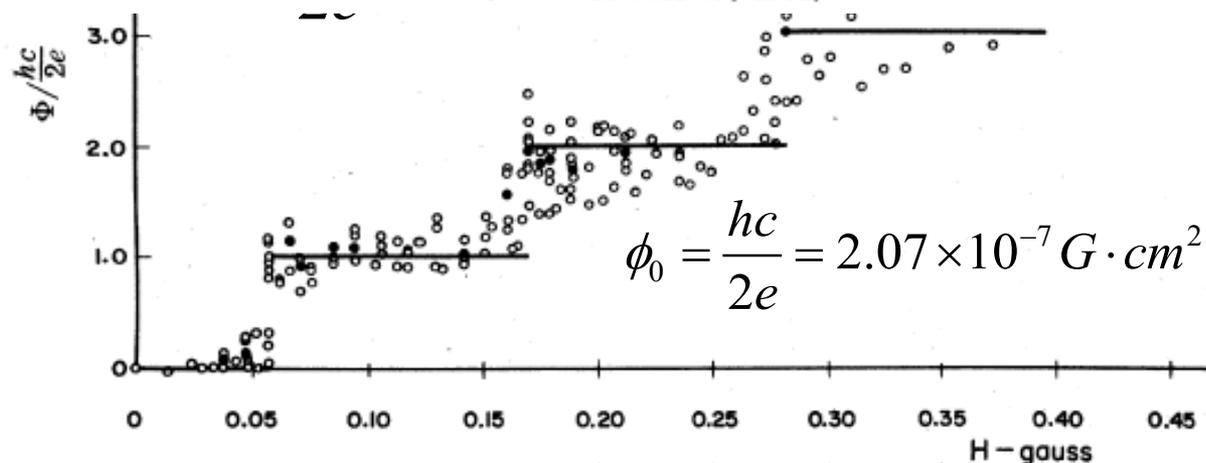
PHYSICAL REVIEW LETTERS 1961(7) 43 JULY 15, 1961

## EXPERIMENTAL EVIDENCE FOR QUANTIZED FLUX IN SUPERCONDUCTING CYLINDERS\*

Bascom S. Deaver, Jr., and William M. Fairbank  
Department of Physics, Stanford University, Stanford, California  
(Received June 16, 1961)

## THEORETICAL CONSIDERATIONS CONCERNING QUANTIZED MAGNETIC FLUX IN SUPERCONDUCTING CYLINDERS\*

N. Byers and C. N. Yang†  
Institute of Theoretical Physics, Department of Physics, Stanford University, Stanford, California  
(Received June 16, 1961)



图中，横轴为外加磁场磁感应场，纵轴为撤去磁场后超导环内仍维持的磁通。实心点为此外加磁场下所得剩余磁通量的平均值。

# 四、超导材料为什么会超导？

## BCS theory 超导微观理论，解决了超导机理

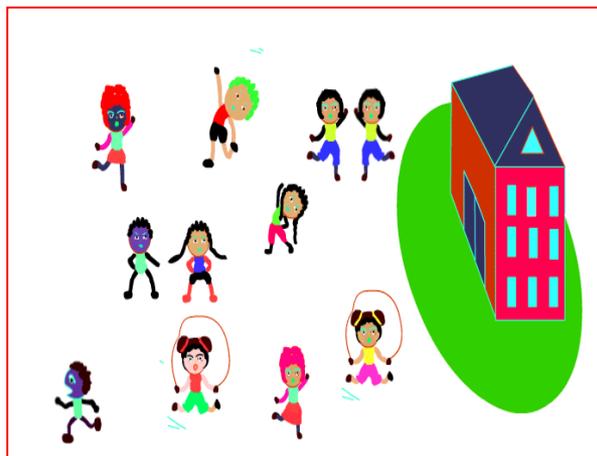
In 1957, William Bardeen, Leon Cooper, and Robert Schrieffer proposed a theory now known as BCS theory

1972年，诺贝尔物理学奖

巴丁（美国）64岁

库柏 42岁：27岁提出超导理论模型，36岁任教授

施里弗 41岁：26岁解决超导理论问题，33岁任教授



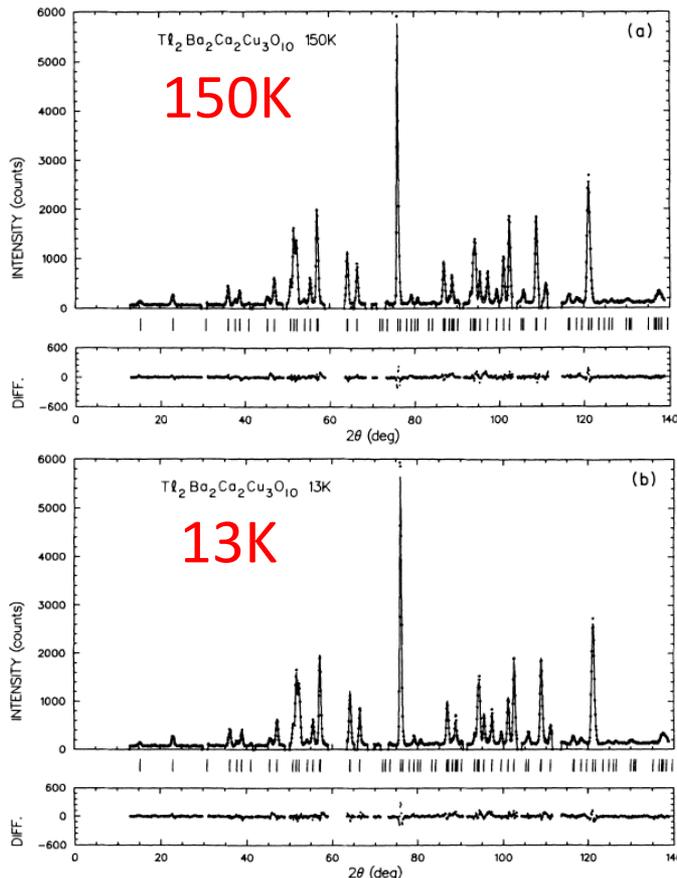
无序



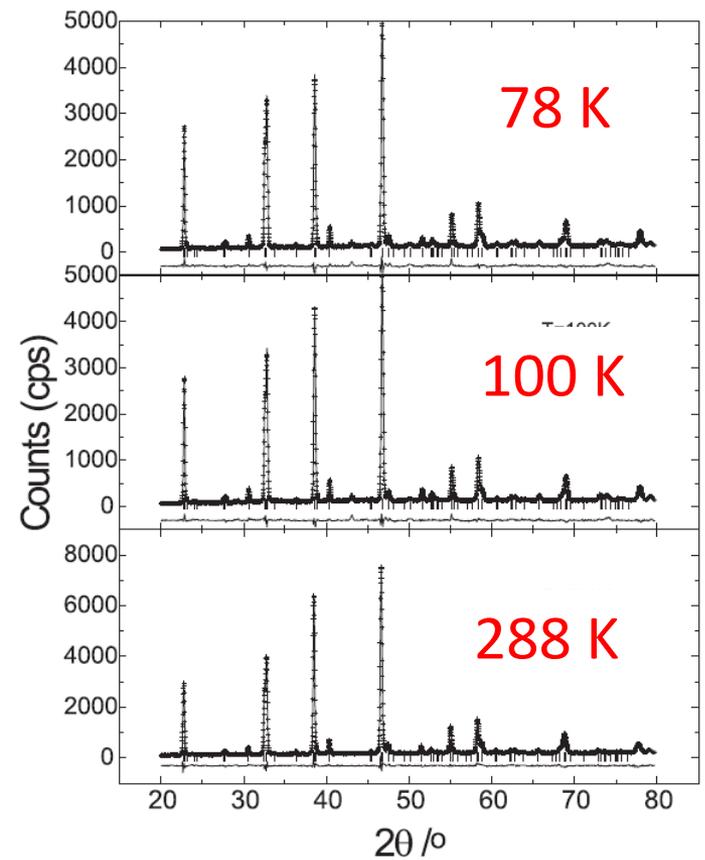
有序

# 一) 建立BCS理论的实验基础

## 1、超导相变前后材料的结构，点阵及振动谱不变



$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$  在 150 K、13 K 的中子粉末衍射谱， $T_c$  约为 125 K  
D. E. Cox, Phys. Rev. B 38, 6624 - 6630 (1988)



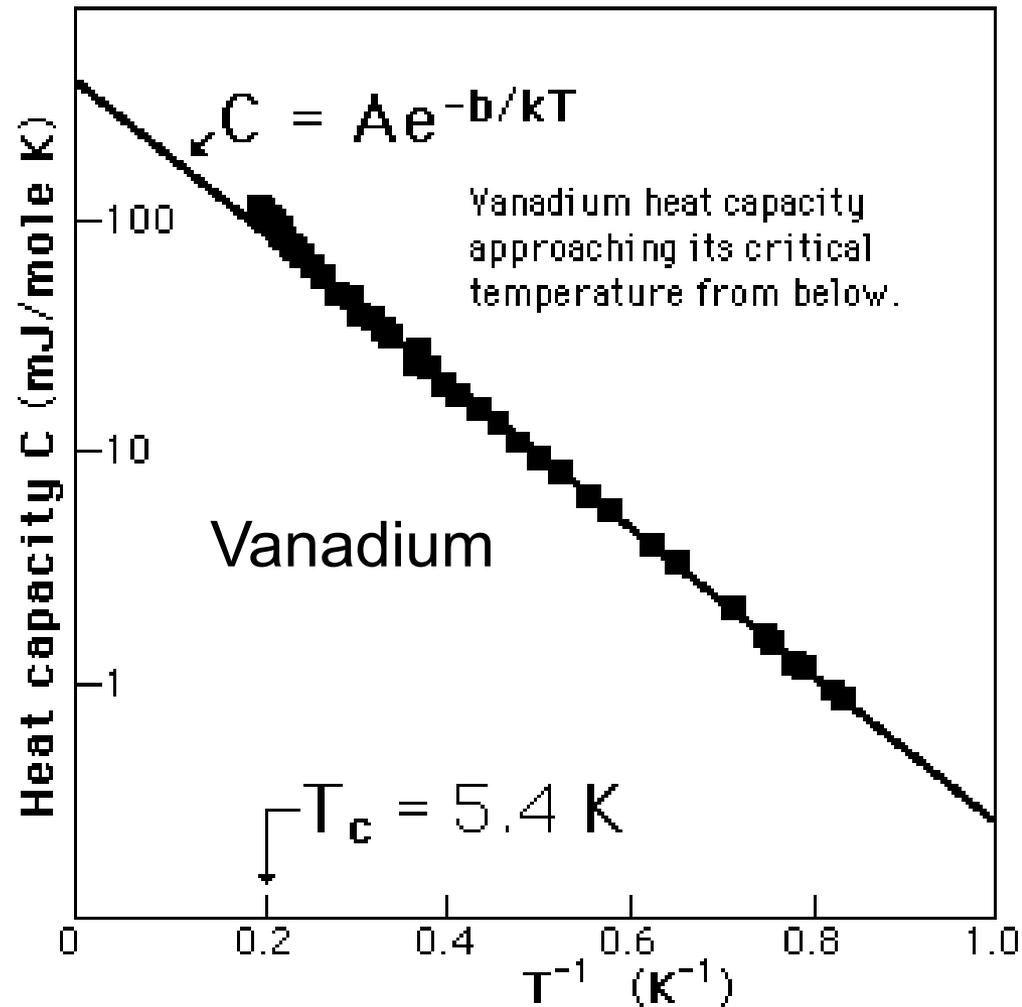
$Y_{0.8}Ca_{0.2}Ba_{1.8}La_{0.2}Cu_3O_y$  块材样品在 78 K、100 K、288 K 的 XRD 衍射谱， $T_c \sim 83$  K. X. S. Wu, Physica C, 340, 185-192 (2000).

# 一) 建立BCS理论的实验基础

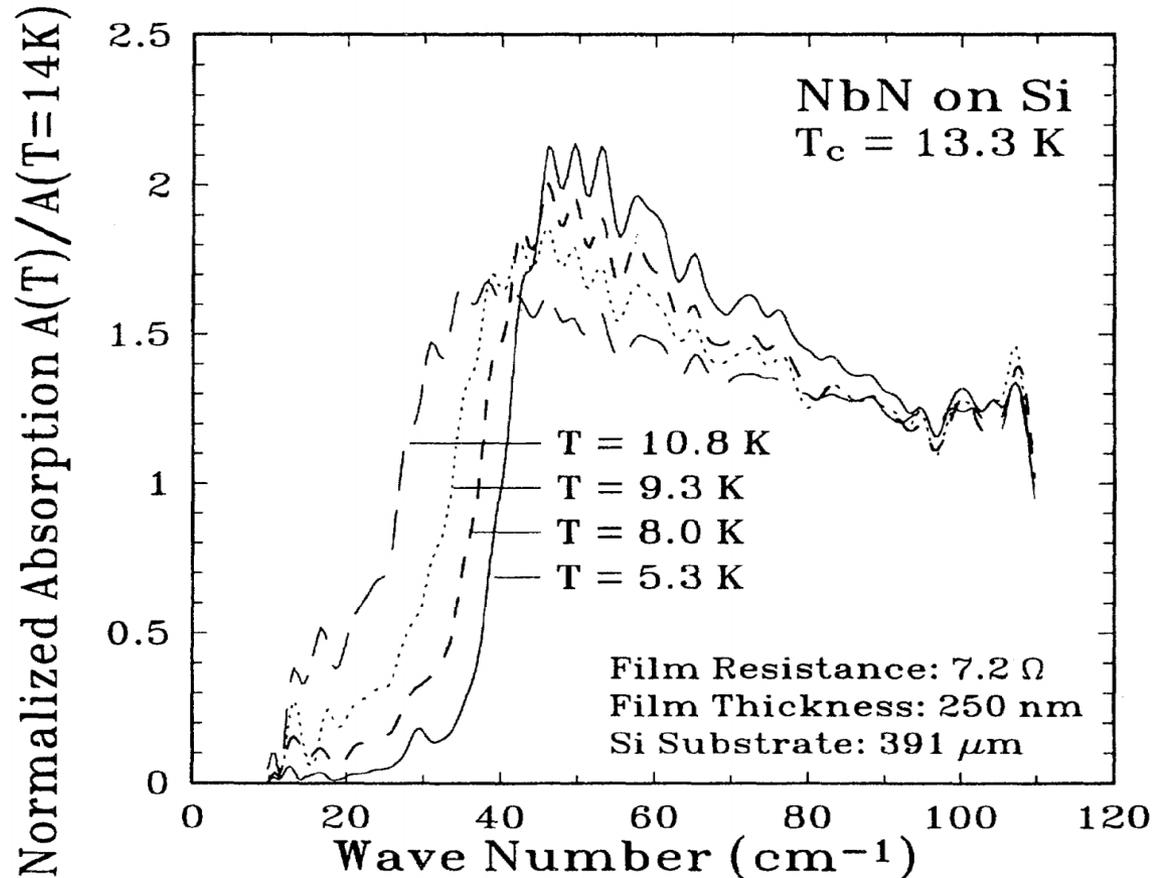
## 2、超导能隙:比热

材料超导时, 电子比热随温度的变化:

$$C_{es} = a \exp(-1.50T_c / T)$$



# Far-infrared optical absorption and reflectivity of a superconducting NbN film



The bolometric absorption spectra of a superconducting NbN film at four temperatures below  $T_c$ , ratioed with a 14 K spectrum above  $T_c$ . The curves have been scaled individually to agree at  $110 \text{ cm}^{-1}$  (for the purpose of comparison) and overall to give a 5.3 K spectrum, which equals 1.0 at large wave numbers. The resolution is  $2 \text{ cm}^{-1}$ .

# 一) 建立BCS理论的实验基础

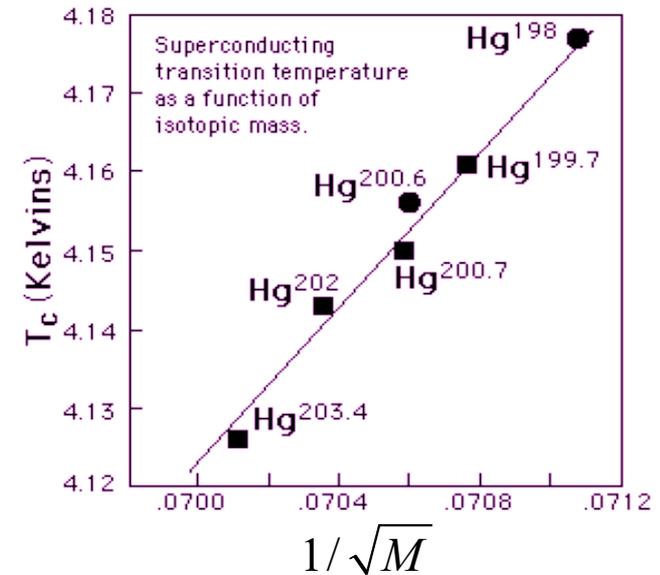
## 3、同位素效应——电—声子相互作用的判断性实验

实验发现，Hg等超导体的同位素的超导临界温度  $T_c$  与同位素质量  $M$  之间满足：

$$T_c M^\alpha = \text{常数}$$

同位素效应揭示了晶格点阵对于超导态到正常态的传导电子行为有重要影响。

### Smoking gun: Isotope effect



E. Maxwell, Phys. Rev. (1950)

C.A. Reynolds et al., Phys. Rev. 78 (1950).

## 电—声子相互作用的判断性实验结果

# 二) 电声子相互作用模型

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 79, NUMBER 5

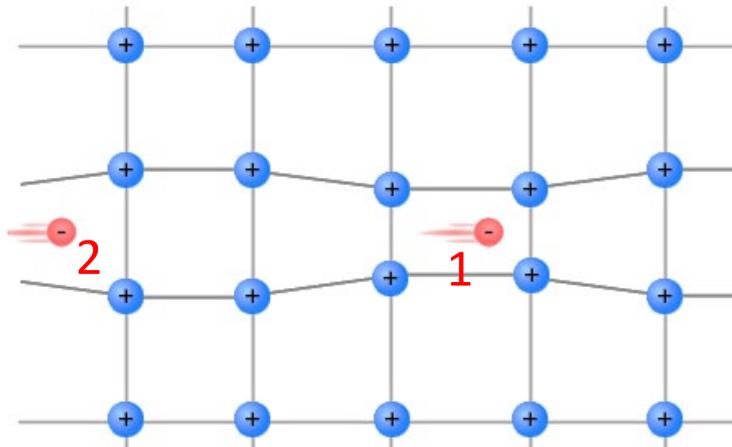
SEPTEMBER 1, 1950

## Theory of the Superconducting State. I. The Ground State at the Absolute Zero of Temperature

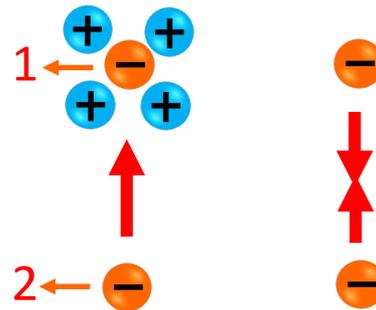
H. FRÖHLICH\*

*Department of Theoretical Physics, University of Liverpool, Liverpool, England*

(Received May 16, 1950)



### Fröhlich模型



电子—声子相互作用能把两个电子耦合在一起，这种耦合就好象两个电子之间有相互吸引作用一样。

H. Fröhlich, Theory of the Superconducting State. I. The Ground State at the Absolute Zero of Temperature, *Phys. Rev.*, 79(1950)845

# 三) Cooper对

PHYSICAL REVIEW

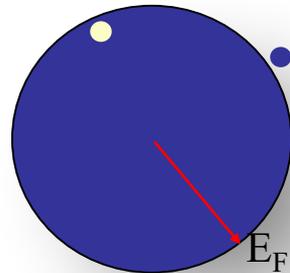
VOLUME 108, NUMBER 5

DECEMBER 1, 1957

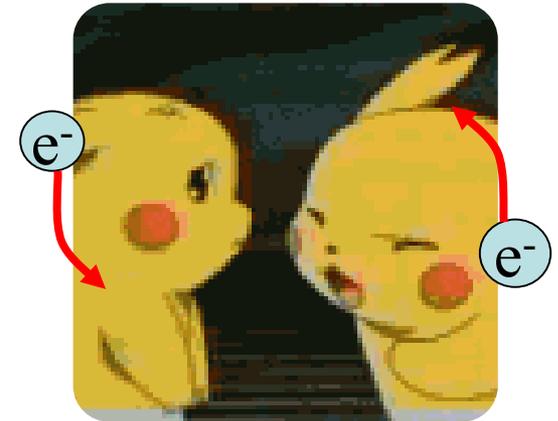
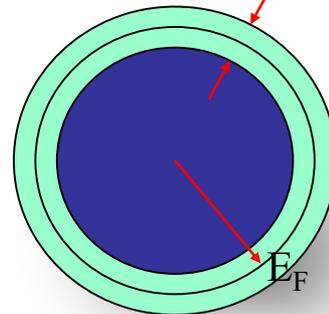
## Theory of Superconductivity\*

J. BARDEEN, L. N. COOPER,† AND J. R. SCHRIEFFER‡  
*Department of Physics, University of Illinois, Urbana, Illinois*  
(Received July 8, 1957)

Normal Metal



Superconductor  $2\Delta \sim \hbar\omega_D$

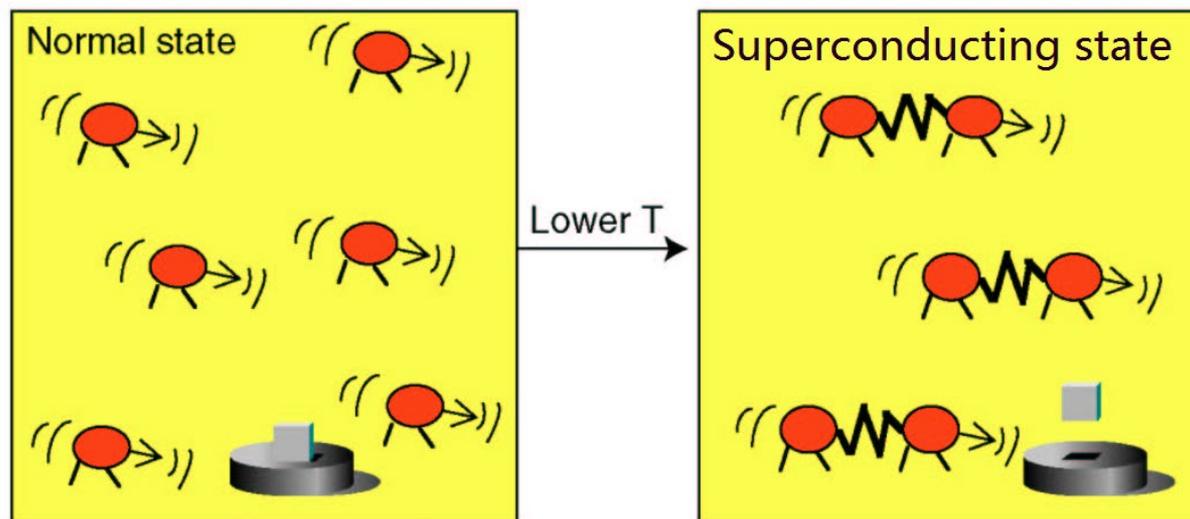


- Electrons can attract via phonons
- Attraction leads to energy gap  $\Delta \approx 1.76T_c$

在Fermi面附近,能量在  $\hbar\omega_D$  范围内的自旋和动量都相反的一对电子——Cooper对

能量守恒  
动量守恒  
电子—声子相互作用能  
泡利不相容原理

### 三) Cooper对



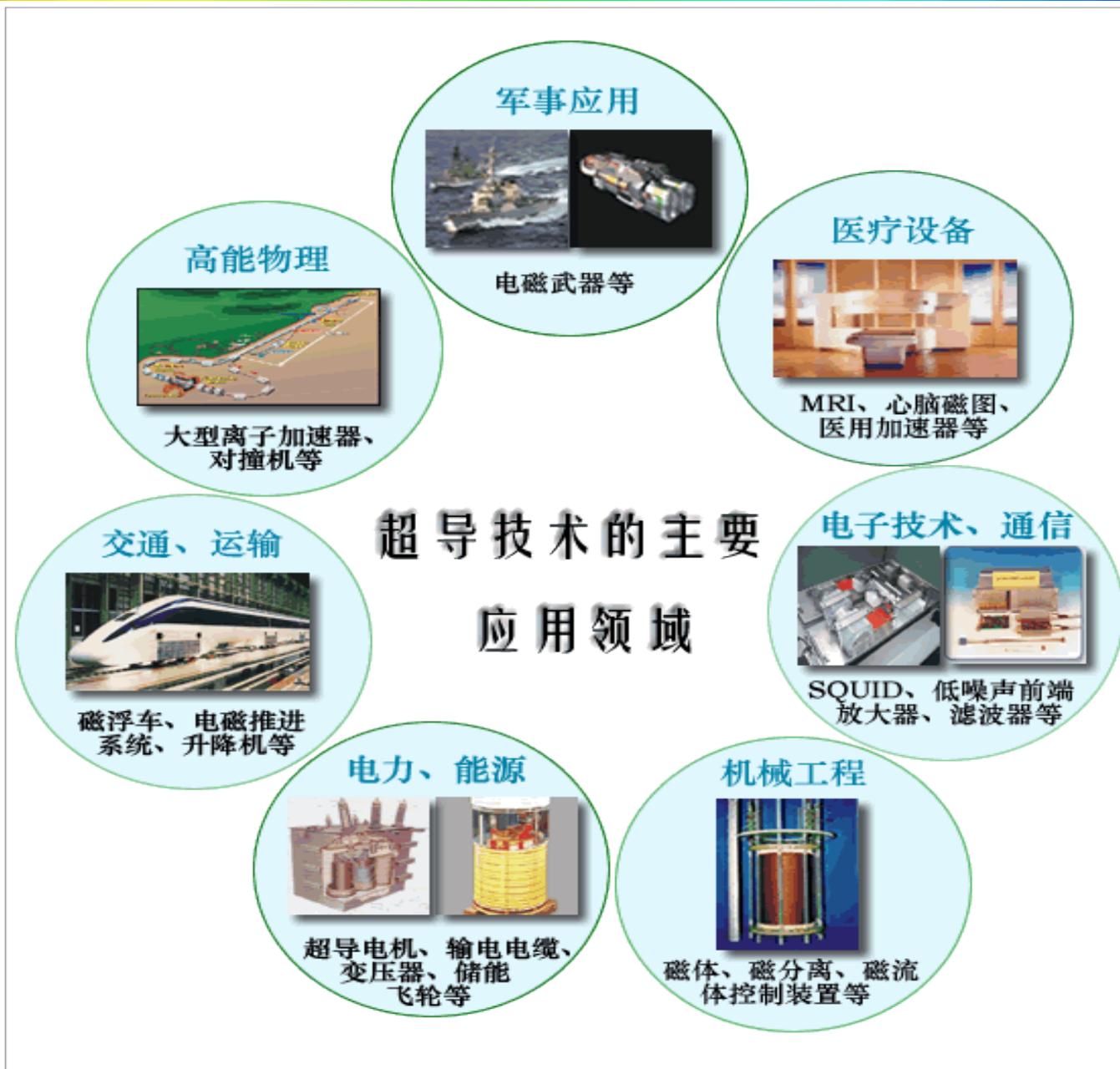
BCS三人组在1972年  
获得诺贝尔物理学奖  
的照片。



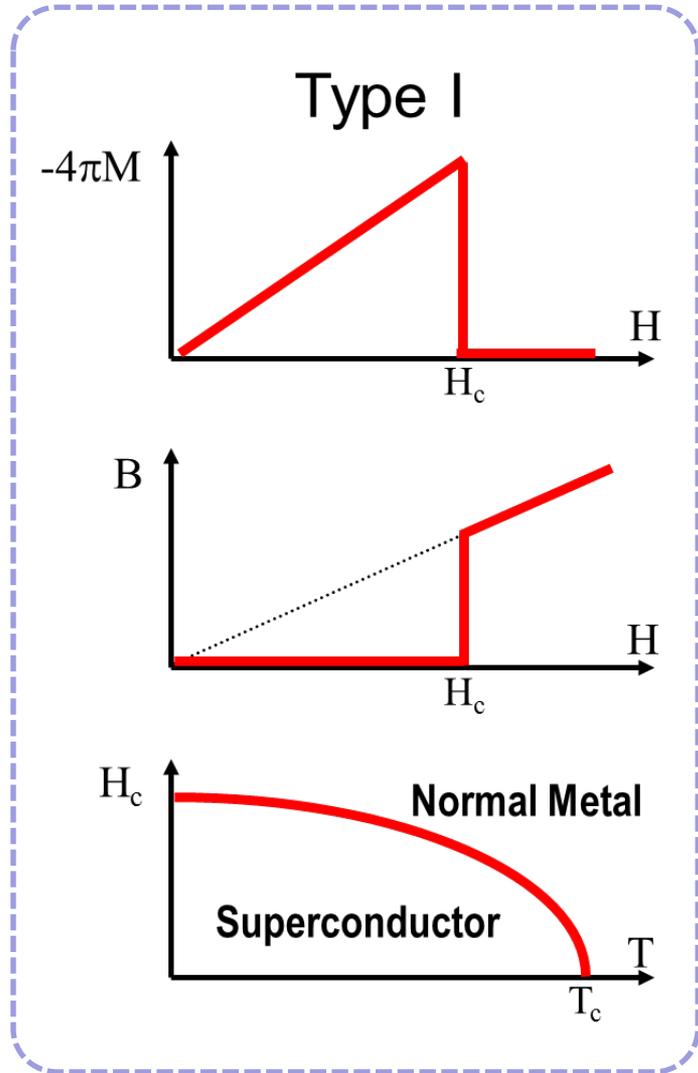
# 内容提要

- 一、廿世纪的伟大发现——超导电性
- 二、超导材料神奇的魅力
- 三、超导电性的基本特征
- 四、超导材料为什么会超导？
- 五、超导材料通往实用化的道路——强电应用
- 六、弱电应用的基础——崂山道士穿墙？
- 七、人类的梦想——高温超导材料
- 八、结束语

# 五、超导材料通往实用化的道路



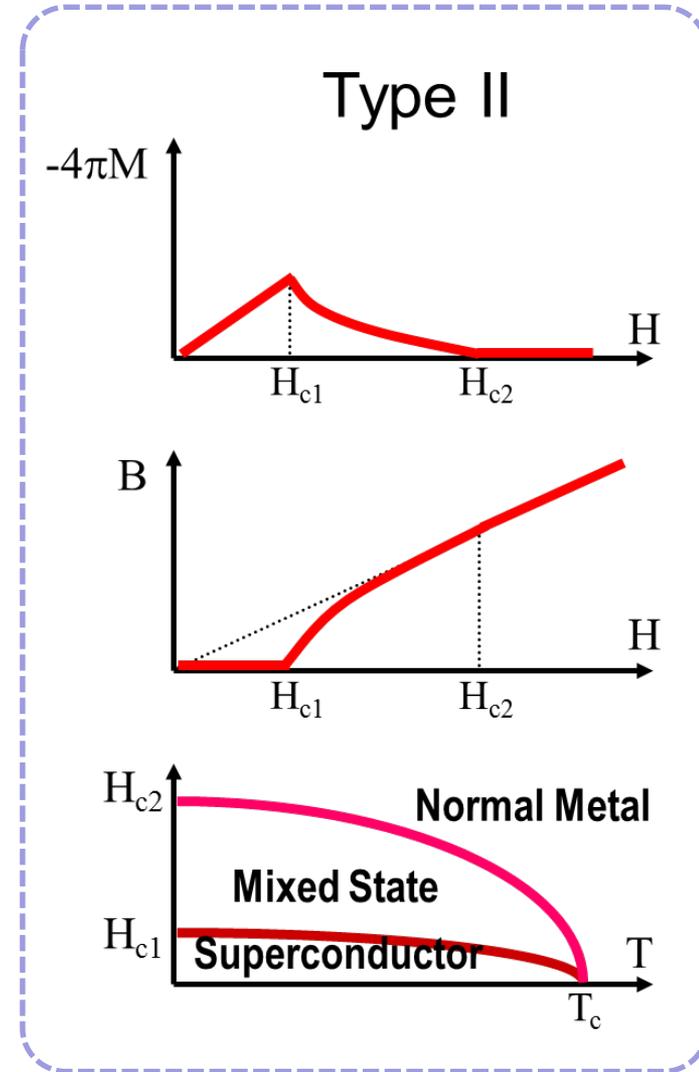
# 一) 两种类型的超导体



**Magnetization**

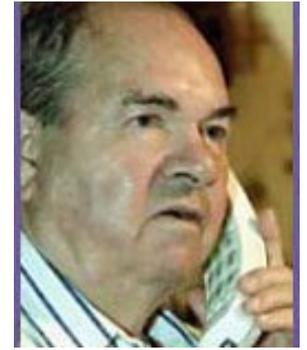
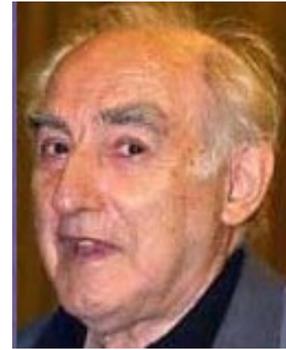
**Magnetic Field**

**Critical Field**



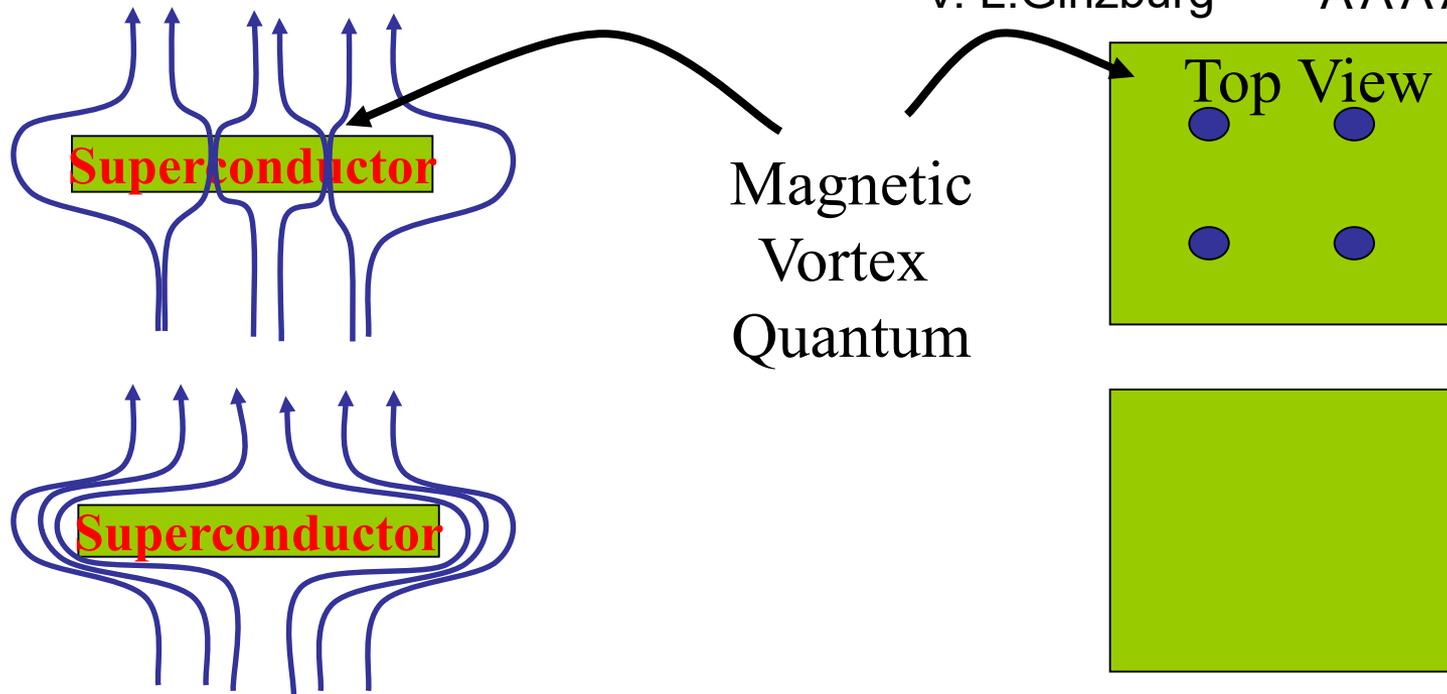
## 二) 实用超导体的磁通行为

1950年，当时只有34岁的京茨堡和朗道提出了一个描述超导体特性的理论。阿布里科索夫在1953年的研究表明，还存在第二类超导体，这种超导体允许磁场穿过。2003年诺贝尔物理学奖。



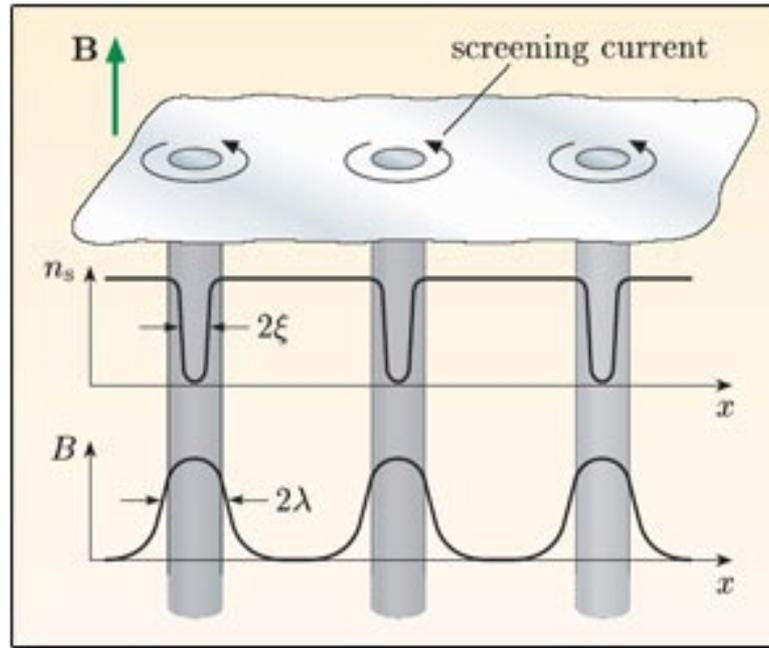
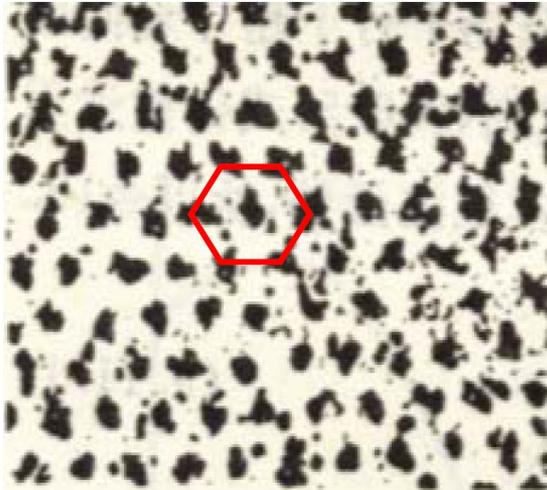
V. L. Ginzburg

A. A. Abrikosov



# 磁通涡旋线结构——宏观量子化

磁通点阵实验观察  
三角格子



正常芯子点阵  
及相关的涡旋  
电流

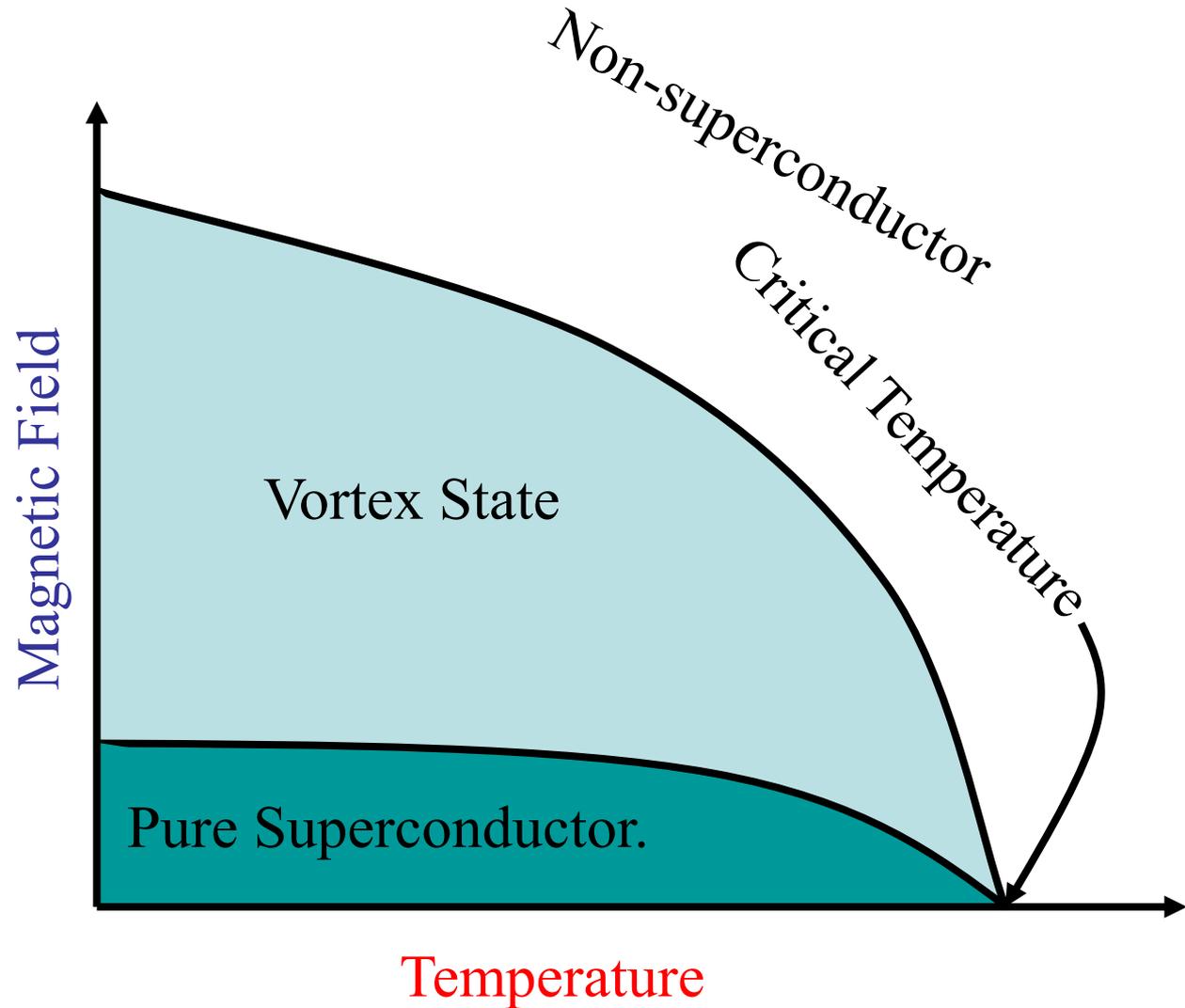
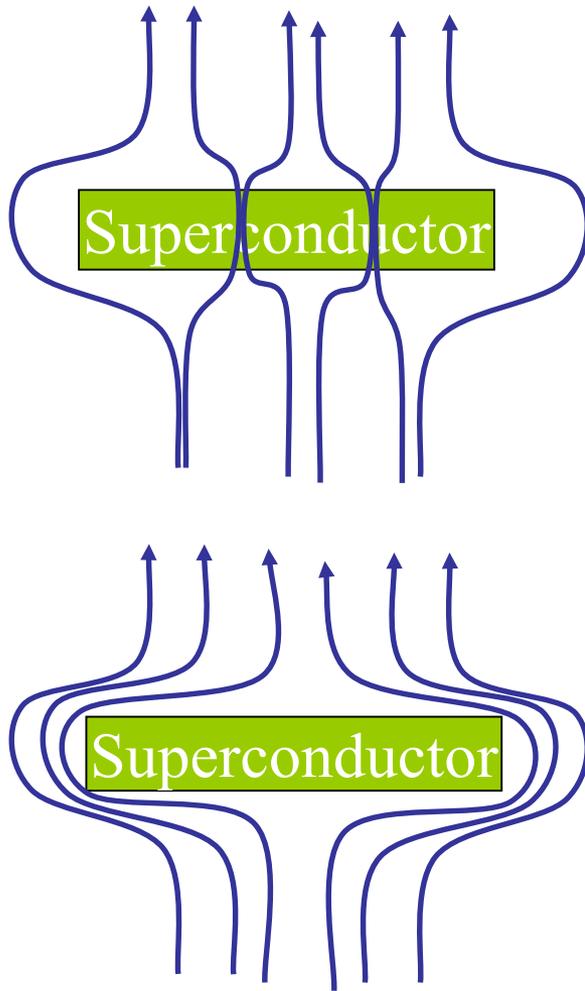
超流电子浓度  
随位置的变化

磁通量磁场分  
布的变化

Surface of a superconducting alloy that had a magnetic field applied perpendicular to the surface. The dark regions were normal and the light regions superconducting. In this case, small ferromagnetic particles were applied to the surface, and collected where the field strength was largest. The particles remained in position when the specimen warmed up to room temperature, and the surface was then imaged with an electron microscope.

Number density of superelectrons  $n_s$  and magnetic field strength  $B$  around normal cores in a type-II superconductor.

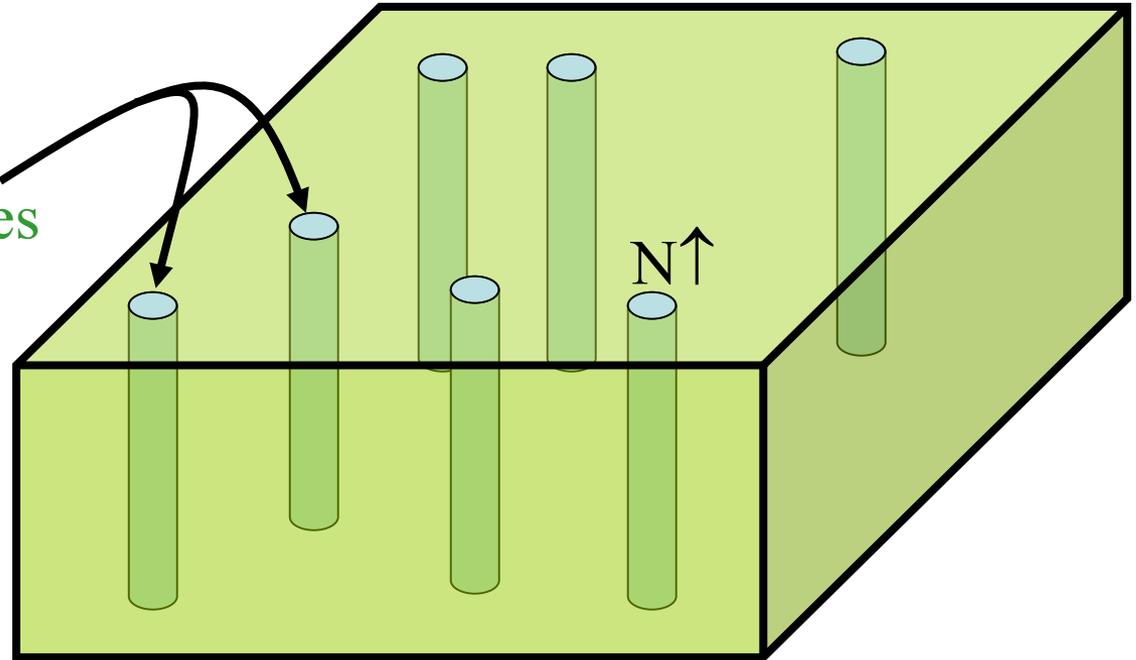
# When do superconductors have resistance?



# Superconductors Have No Resistance

Can

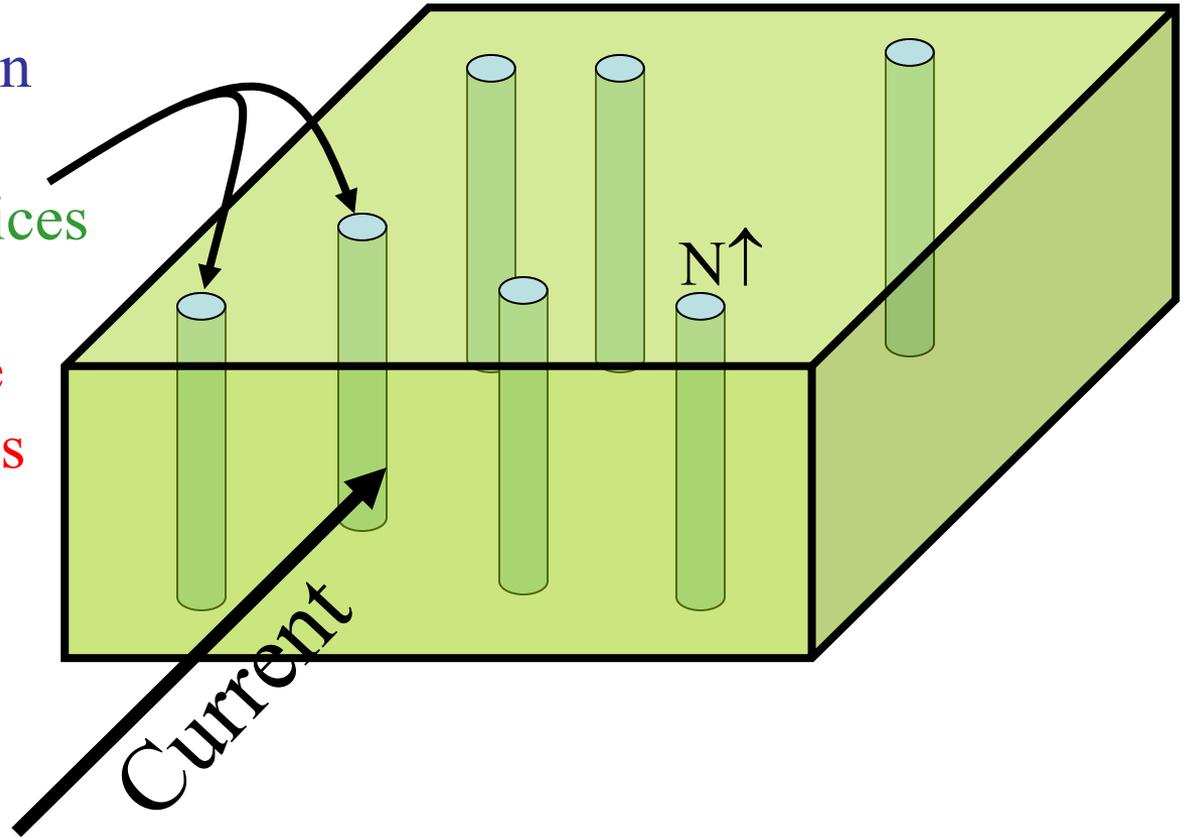
- Resistance is friction
- Magnetic field vortices



# Superconductors Have No Resistance

Can

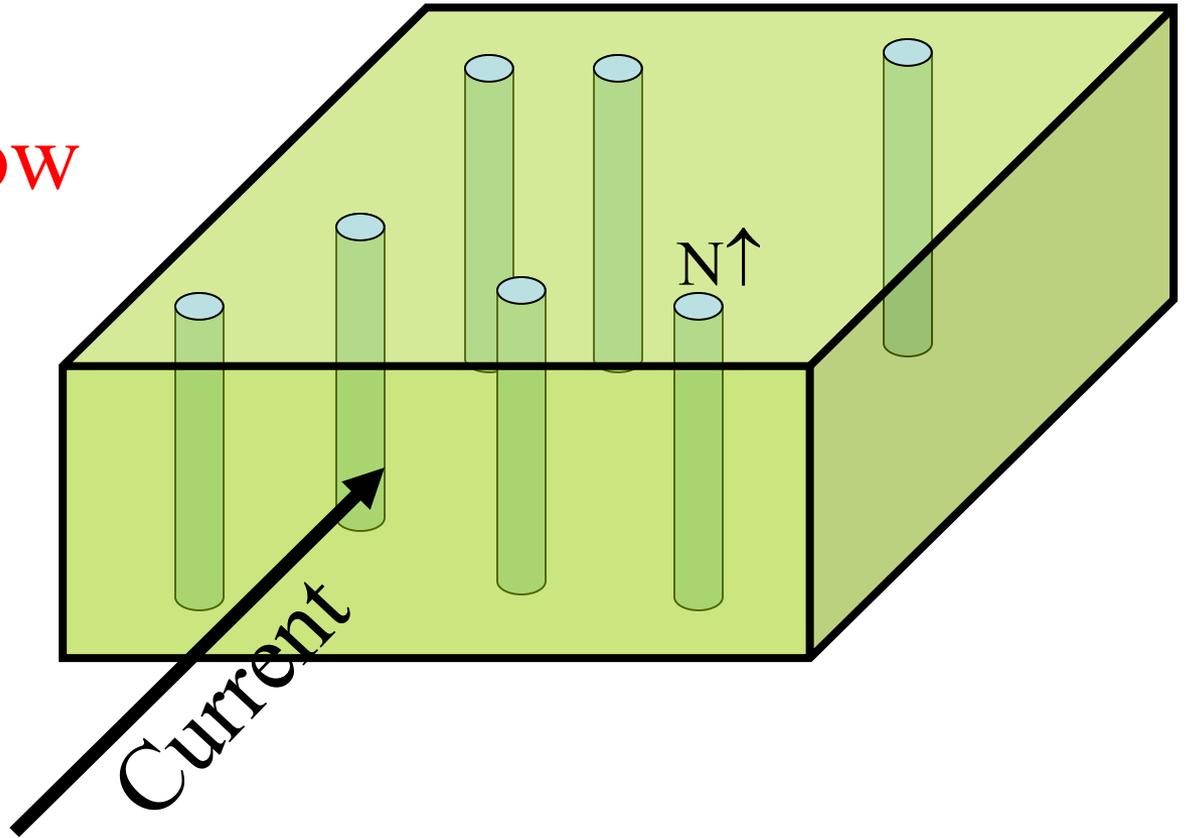
- Resistance is friction
- Magnetic field vortices
- Current puts a force on the vortices



# Superconductors Have No Resistance

Can

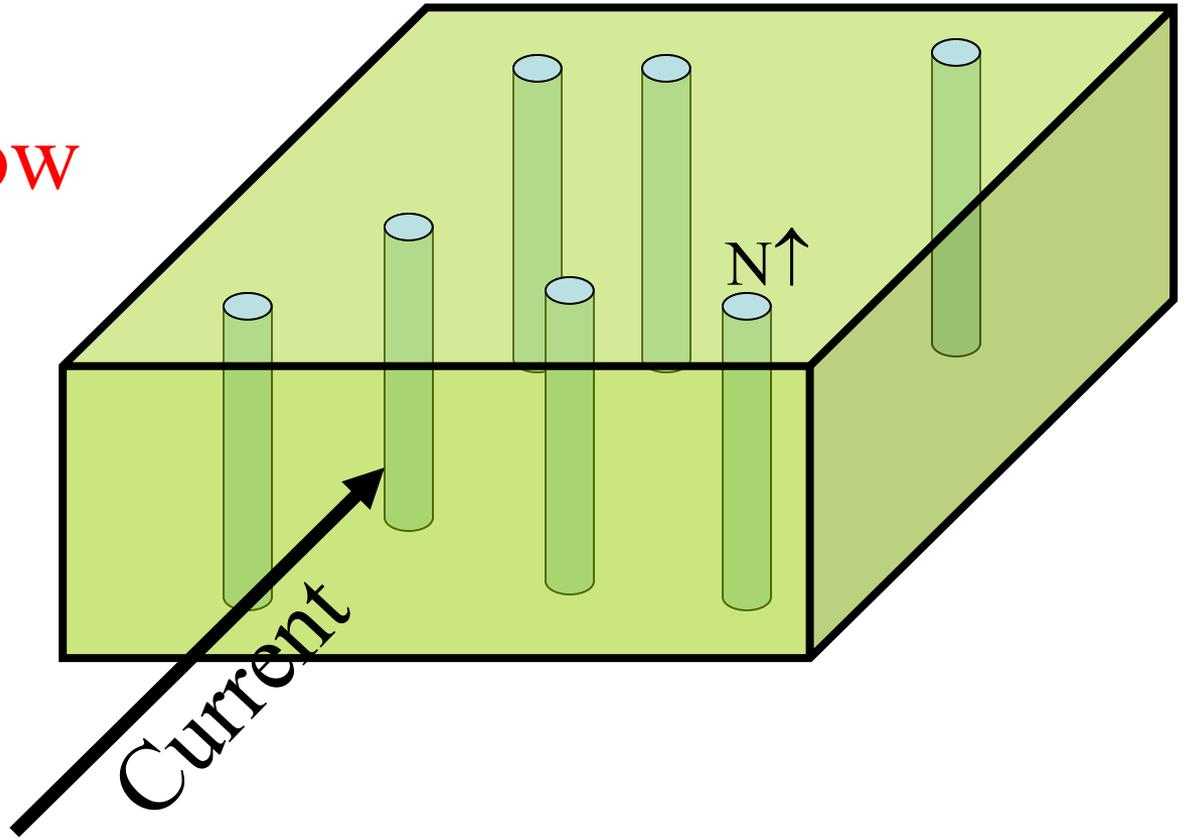
Vortices can flow



# Superconductors Have No Resistance

Can

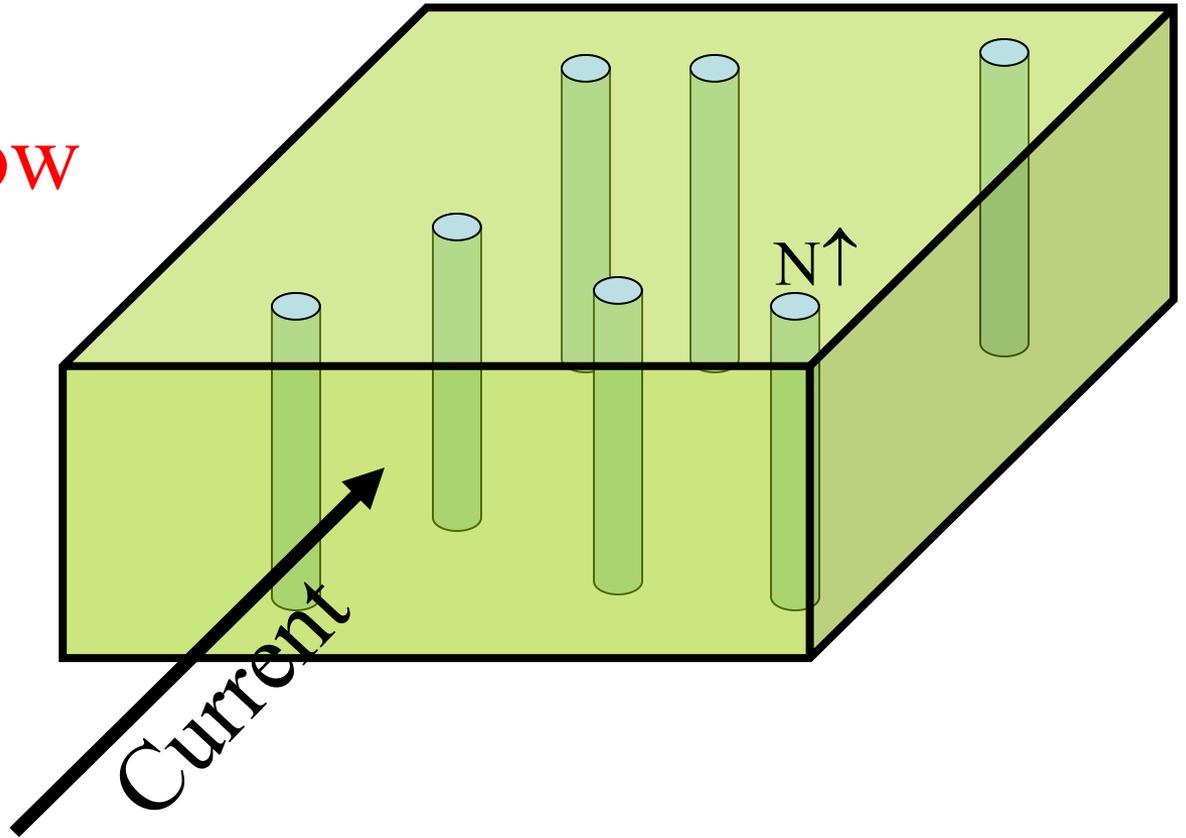
Vortices can flow



# Superconductors Have No Resistance

Can

Vortices can flow

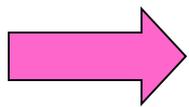


# Superconductors Have No Resistance

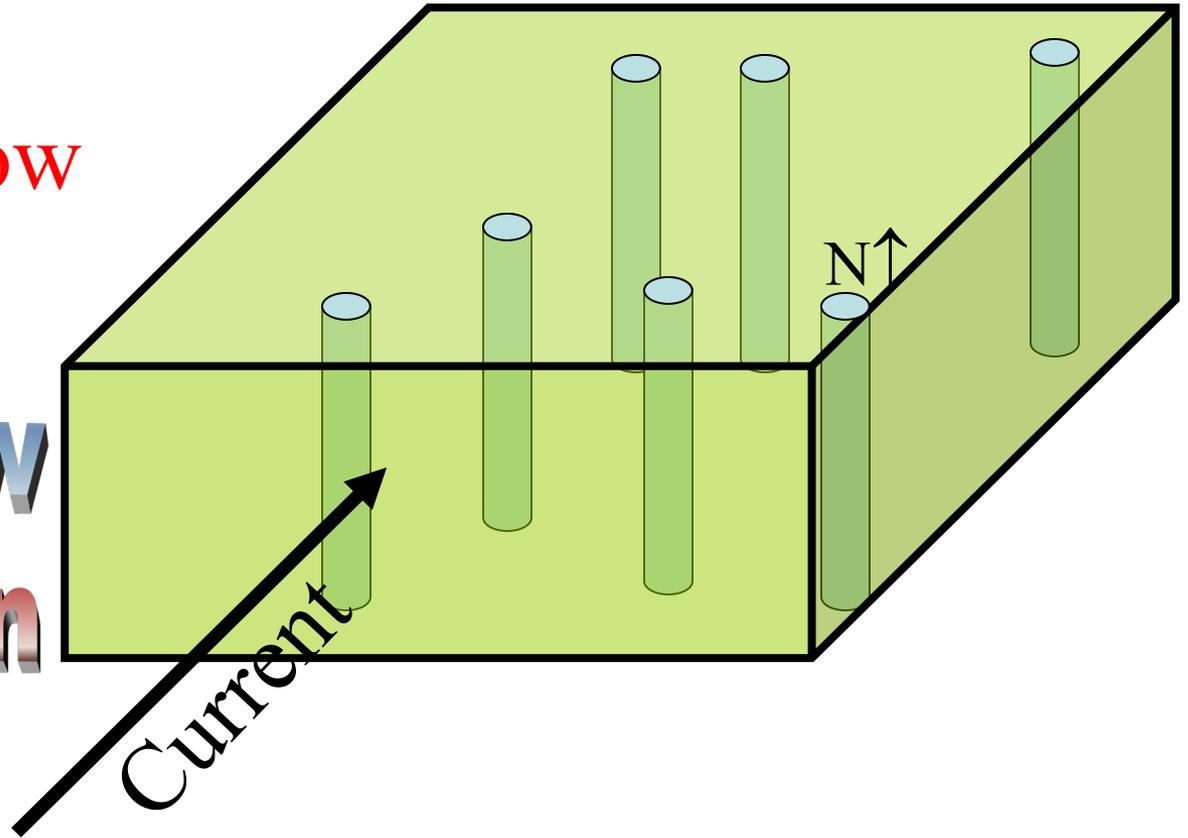
Can

Vortices can flow

Vortex Flow

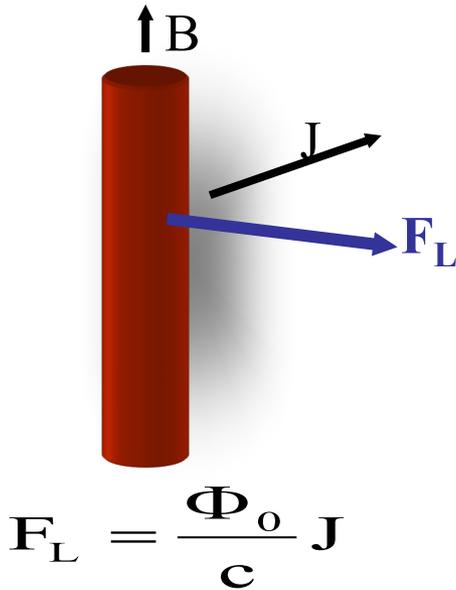


Friction

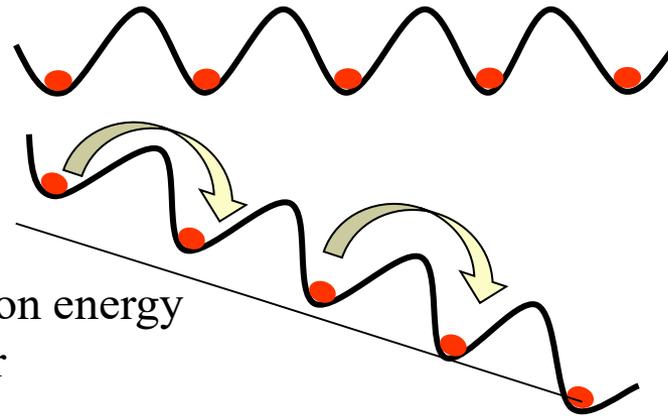


# 三) 磁通钉扎

## Interaction with Defects



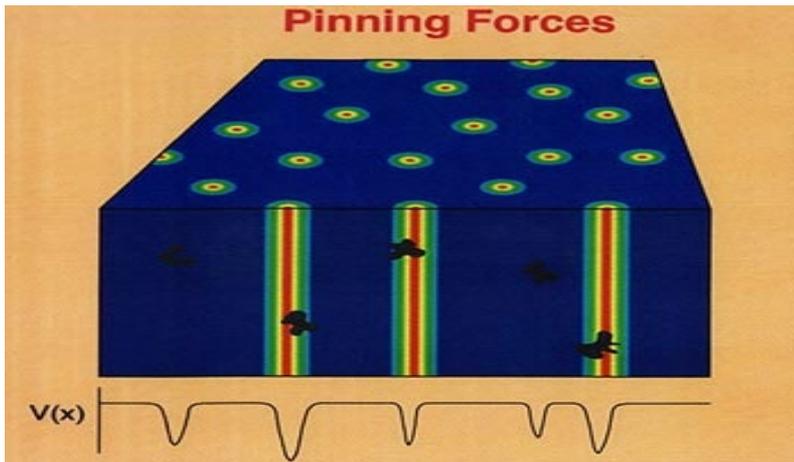
### Flux Creep



Activation energy behavior

### Pinning

- Vacancies, voids, inhomogeneities, where superconductivity is weak
- Pinning decreases energy losses caused by flux creep





# 内容提要

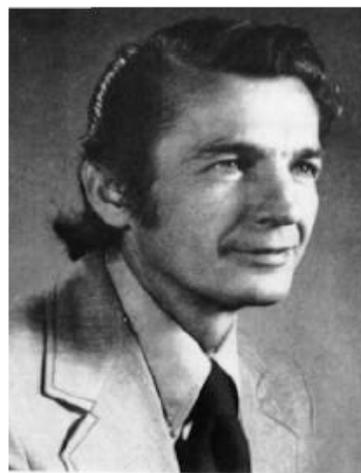
- 一、廿世纪的伟大发现——超导电性
- 二、超导材料神奇的魅力
- 三、超导电性的基本特征
- 四、超导材料为什么会超导？
- 五、超导材料通往强电应用的道路
- 六、弱电应用的基础——崂山道士穿墙？
- 七、人类的梦想——高温超导材料
- 八、结束语

# 六、弱电应用的基础——崂山道士穿墙？

崂山道士



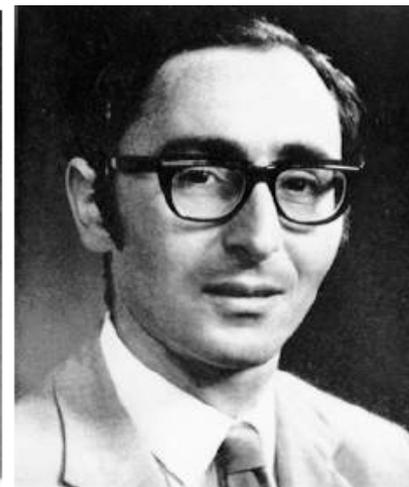
崂山道士穿墙本领



Ivar Giaever

贾埃沃像

Ivar Giaever  
挪威人  
移居加拿大



Brian Josephson

约瑟夫森像

B. D. Josephson  
英国物理学家

1973年，诺贝尔物理学奖。约瑟夫森（英国）33岁，贾埃佛 44岁（美国）

约瑟夫森（1962年）22岁时解决理论问题，34岁任教授  
贾埃佛 33岁解决实验问题。“物理学几乎不及格的台球和桥牌能手”

# 约瑟夫森效应 ( Josephson effect )

Volume 1, number 7

PHYSICS LETTERS

1 July 1962

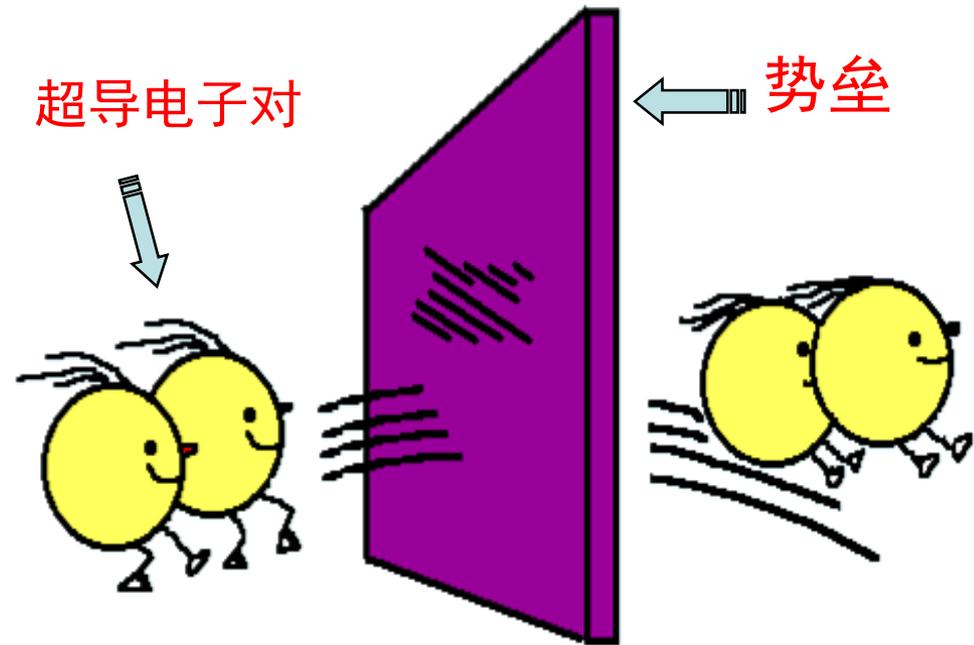
POSSIBLE NEW EFFECTS IN SUPERCONDUCTIVE TUNNELLING \*

B. D. JOSEPHSON

Cavendish Laboratory, Cambridge, England

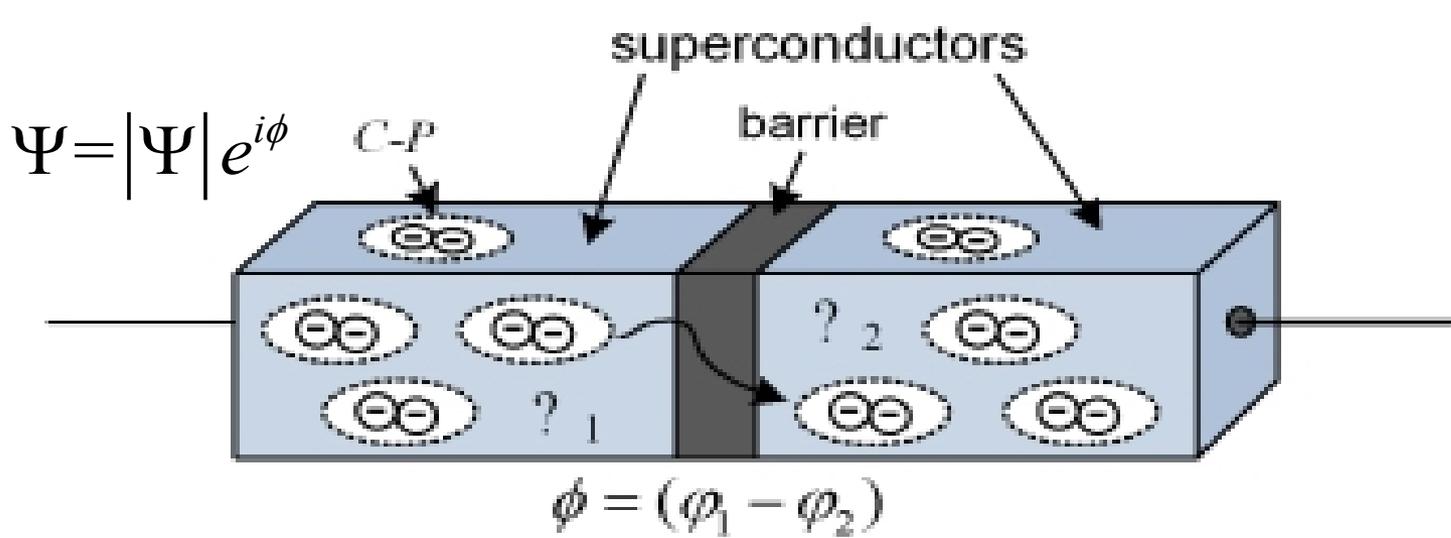
Received 8 June 1962

1962年，年轻的英国物理学家布赖恩·约瑟夫森 (Brian David Josephson, 1940 — ) 大显身手，从理论上对于超导体—势垒—超导体的情况进行了认真的计算。得出了一系列难以想象的结果。



# Josephson效应与弱电应用

单电子可隧穿势垒; 电子对是如何隧穿势垒的?



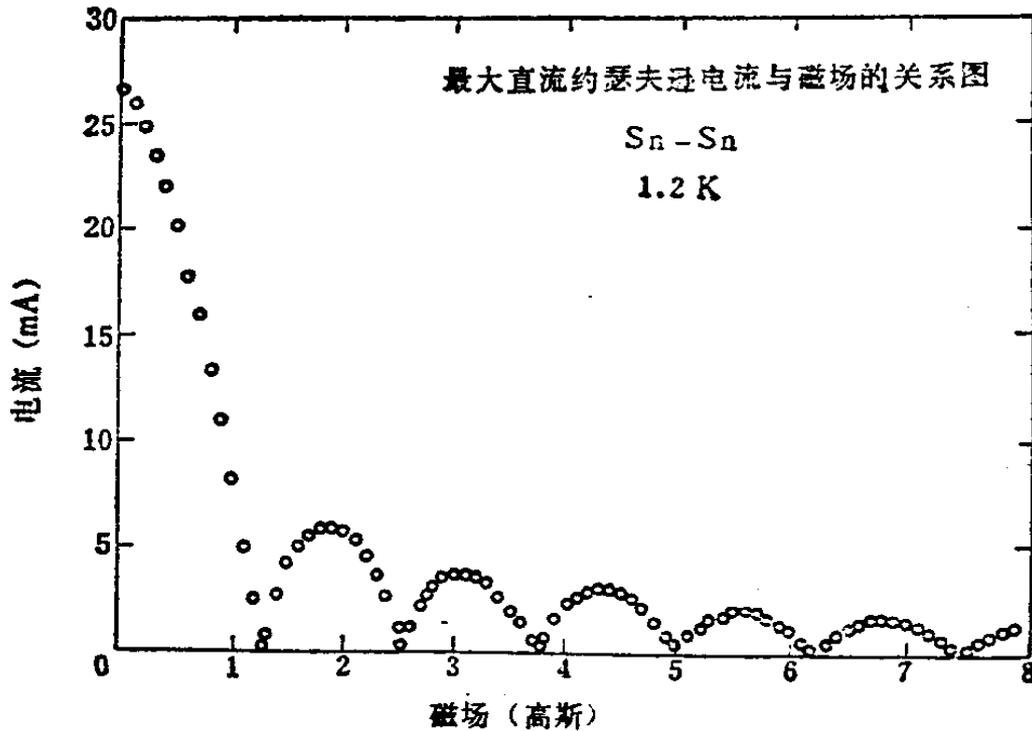
$$i\hbar \frac{\partial \Psi_1}{\partial t} = \mu_1 \Psi_1 + K \Psi_2 \quad i\hbar \frac{\partial \Psi_2}{\partial t} = \mu_2 \Psi_2 + K \Psi_1$$

K为耦合常数

Josephson结, 两边超导体的宏观波函数

# 超导电流与磁场的关系

加磁场，可以影响量子相位差

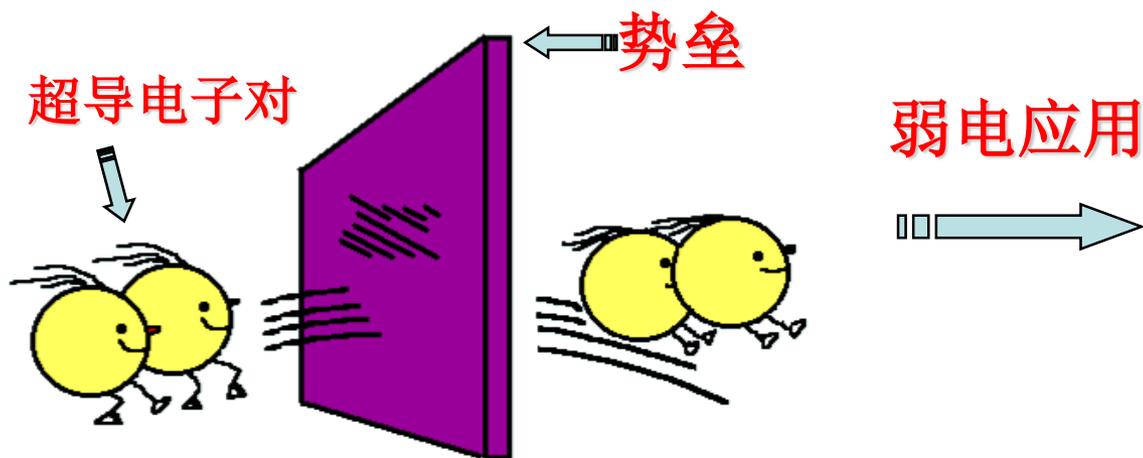


$$I_s(\Phi) = I_c(0) \left| \frac{\sin(\pi\Phi / \Phi_0)}{\pi\Phi / \Phi_0} \right|$$

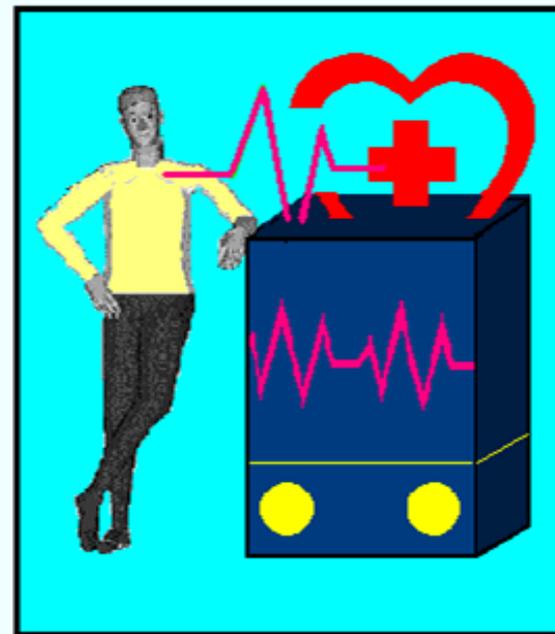
$$\phi_0 = \frac{hc}{2e} = 2.07 \times 10^{-7} G \cdot cm^2$$

$\Phi$ 为通过绝缘区的磁通量。

图13-3 Sn-SnO<sub>x</sub>-Sn结最大超导电流与磁场的关系



超导电子隧道效应



心脏磁图的测量



# 内容提要

- 一、廿世纪的伟大发现——超导电性
- 二、超导材料神奇的魅力
- 三、超导电性的基本特征
- 四、超导材料为什么会超导？
- 五、超导材料通往实用化的道路——强电应用
- 六、弱电应用的基础——崂山道士穿墙？
- 七、人类的梦想——高温超导材料
- 八、结束语

# 一) 铜氧化物高温超导体的发现

- 超导体从1911年发现以来至1986年的75年中，发现了数千种元素、合金、化合物是超导体。
- 最高的 $\text{Nb}_3\text{Ge}$ :  $T_c=23.2\text{K}$ ，是1973年发现的。
- 实用的超导体为 $\text{NbTi}$ 合金和化合物 $\text{Nb}_3\text{Sn}$ 。
- 由于超导体要用液氦冷却，技术复杂，费用高，阻碍了超导体的进一步应用，所以提高 $T_c$ ，使它能在液氮温度（77K）或室温使用是人们梦寐以求的。
  - 液 氮:  $\text{LN}_2$ , 77K, 约4元/升
  - 液 氦:  $\text{LHe}$ , 4.2K, 约200元/升

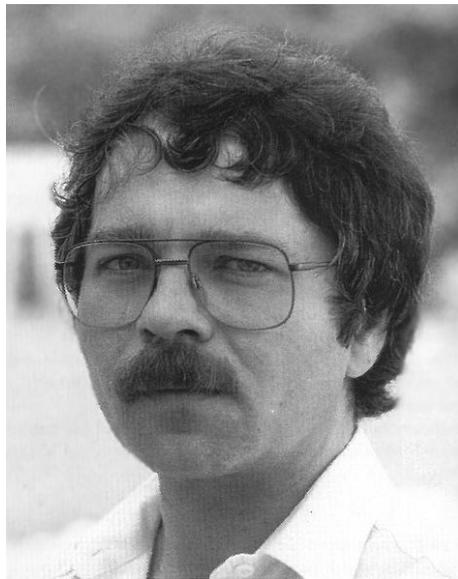
# 一) 铜氧化物高温超导体的发现

1983年开始，在瑞士苏黎世实验室研究氧化物超导电性。

- 1986年1月27日瑞士的 IBM's Zurich Research Laboratory 的 J.G.Bednorz and K.A.Muller 发现了  $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$  有超导电性。



K. A. Muller



J. G. Bednorz

1987年，诺贝尔物理学奖：氧化物高温超导体的发现

J.G.Bednorz, 1950—, 德国籍, 37岁。

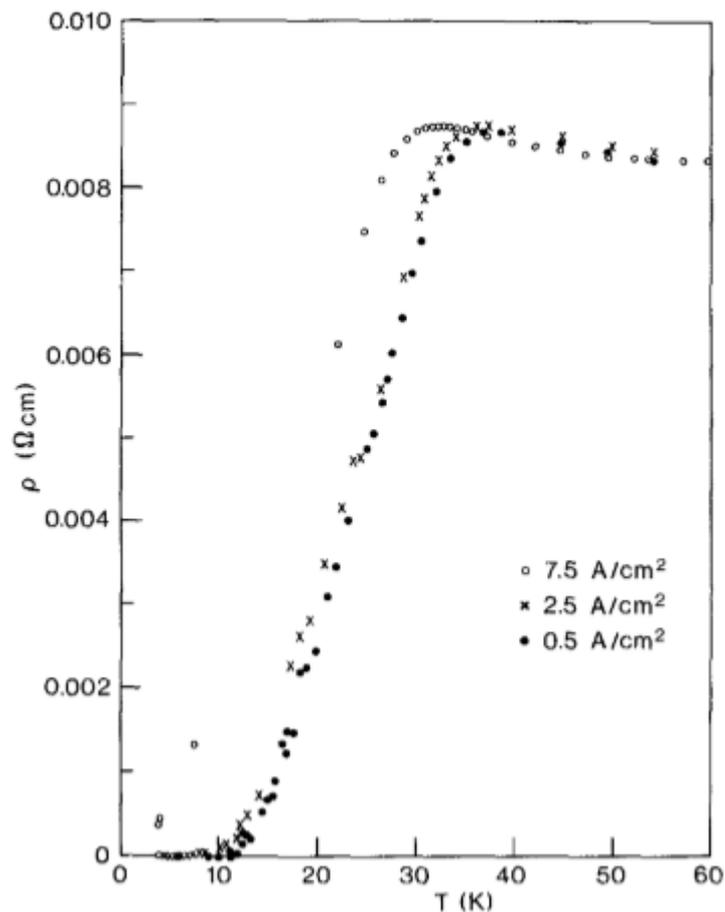
K.A.Muller, 1927—, 瑞士物理学家, 60岁。

## Possible High $T_c$ Superconductivity in the Ba–La–Cu–O System

J.G. Bednorz and K.A. Müller  
IBM Zürich Research Laboratory, Rüschlikon, Switzerland

Received April 17, 1986

1986年4月论文送至  
Zeitschrift für Physik B 发表，  
“ $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$  可能是  $T_c > 30\text{K}$  的超导体”。  
这个发现冲破了此前保持了  
了十多年的23K的超导临界  
温度记录，引起全世界  
震惊，揭开了席卷全球  
的高温超导热潮。



# 一) 铜氧化物高温超导体的发现

- 仅给出 $R=0$ , 响应的人少。
- 直至 Muller 和东京大学的田中昭二证实 $\text{LaBaCuO}$ 在 $R=0$ 时存在Meissner效应, 人们才相信是高 $T_c$  超导体。
- 1986.12.22. 东京大学田中昭二宣布发现  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  超导体,  $T_c=37\text{ K}$ .
- 在1986.1—1987.1的一年时间内, 做到:  $\text{LaSrCuO}$  超导体,  $T_c=48.6\text{ K}$ .  $\text{LaBaCuO}$  超导体,  $T_c=46.3\text{ K}$ .
- 1987.1.29. 朱经武等发现了Y-Ba-Cu-O超导体,  $T_c=90\text{ K}$ . 这以后才真正开始了研究高温超导体的热潮。

## Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure

M. K. Wu, J. R. Ashburn, and C. J. Torng

*Department of Physics, University of Alabama, Huntsville, Alabama 35899*

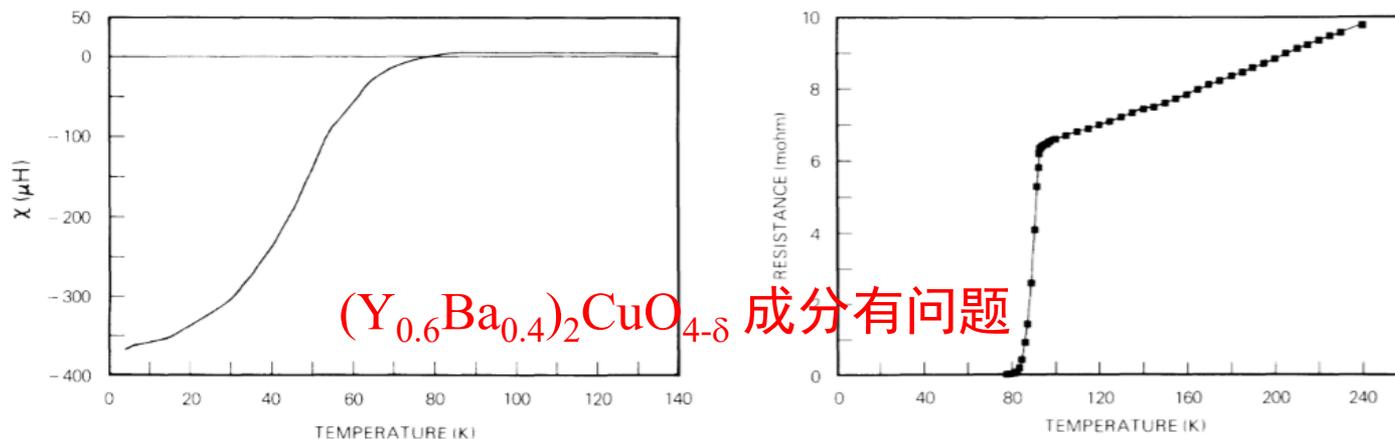
and

P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, and C. W. Chu<sup>(a)</sup>

*Department of Physics and Space Vacuum Epitaxy Center, University of Houston, Houston, Texas 77004*

(Received 6 February 1987; Revised manuscript received 18 February 1987)

A stable and reproducible superconductivity transition between 80 and 93 K has been unambiguously observed both resistively and magnetically in a new Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure. An estimated upper critical field  $H_{c2}(0)$  between 80 and 180 T was obtained.



The compounds investigated were prepared with nominal compositions represented by  $(\text{Y}_{1-x}\text{Ba}_x)_2\text{CuO}_{4-\delta}$  with  $x=0.4$  through solid-state reaction of appropriate amounts of  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$ , and  $\text{CuO}$  in a fashion similar to that previously described.<sup>8</sup>

# 一) 铜氧化物高温超导体的发现



赵忠贤



朱经武

本文 1987 年 2 月 21 日收到.

412

科学通报

1987 年

## Ba-Y-Cu 氧化物液氮温区的超导电性

赵忠贤 陈立泉 杨乾声 黄玉珍 陈贻华 唐汝明 刘贵荣

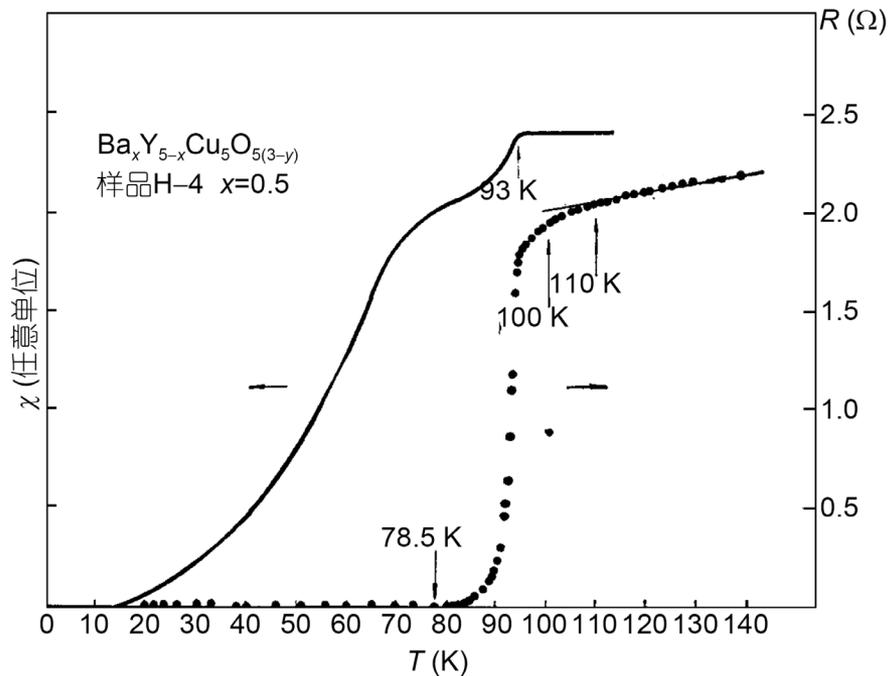
崔长庚 陈 烈 王连忠 郭树权 李山林 毕建清

(中国科学院物理研究所,北京)

1987年2月21日收到.

《人民日报》，1987年2月25日

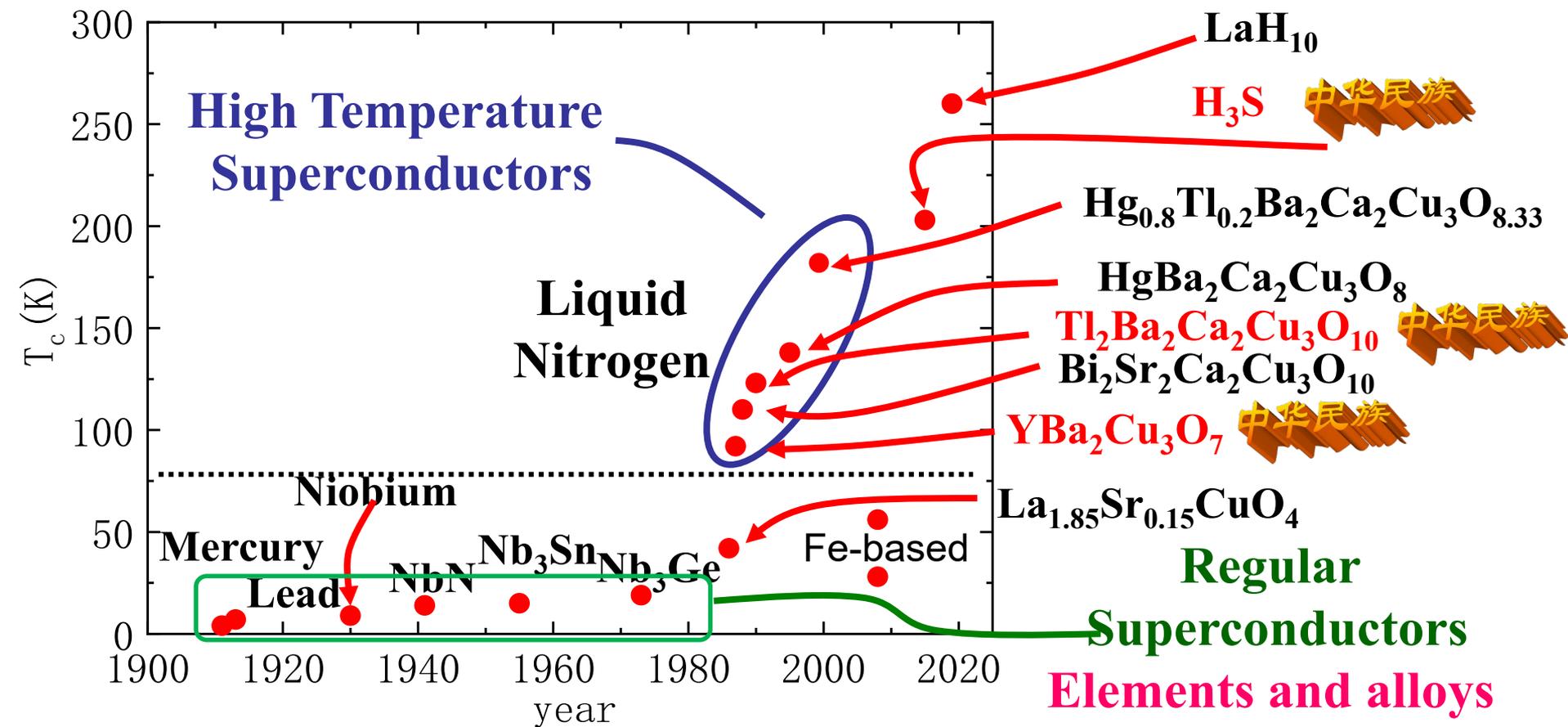
我国超导体研究又获重大突破，  
发现绝对温度百度以上超导体。



# 一) 铜氧化物高温超导体的发现

- 其后，相继发现了BiSrCuO中有超导电性，加Ca得：BiSrCaCuO超导体， $T_c > 100 \text{ K}$ ,
- 又发现了TlBaCaCuO超导体， $T_c = 120 \text{ K}$ .
- 还发现了电子型超导体：NbCeCuO， $T_c = 25 \text{ K}$ .
- 以后转入超导机理和应用的研究。
- 1993年S.N.Putilin等人发现HgBaCaCuO  $T_c = 135 \text{ K}$
- 在高压下，朱经武使此超导体的 $T_c$ 提高到 $164 \text{ K}$ ，这是目前的最高记录。

# 一) 铜氧化物高温超导体的发现



Two kinds of superconductors: Conventional and High  $T_c$  materials.

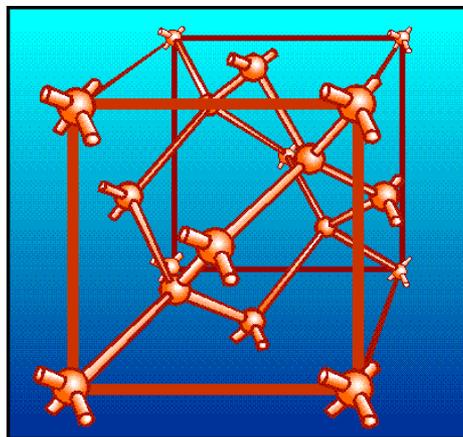
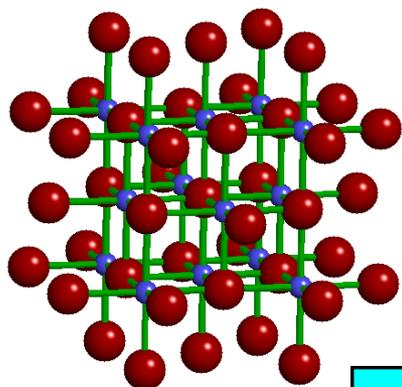
What is the next?

## 二) 铜氧化物高温超导体的结构特征

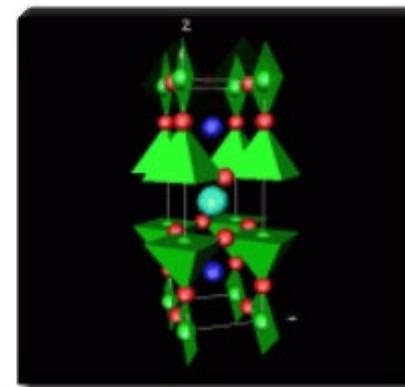
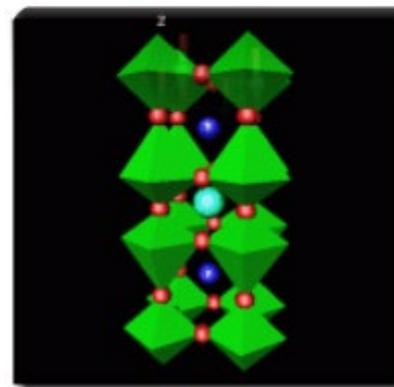
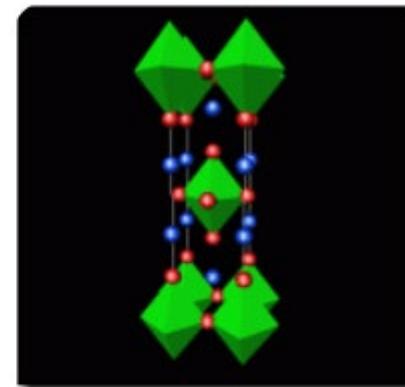
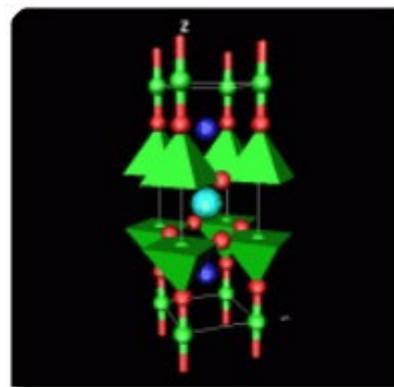
### Difference Between Conventional and High $T_c$

### Difference in Structure for Conventional and High $T_c$

Regular Materials  
3-Dimensional Structure



High-Temperature  
Superconductors:  
Layered structures



# High Temperature Superconductors: Construction

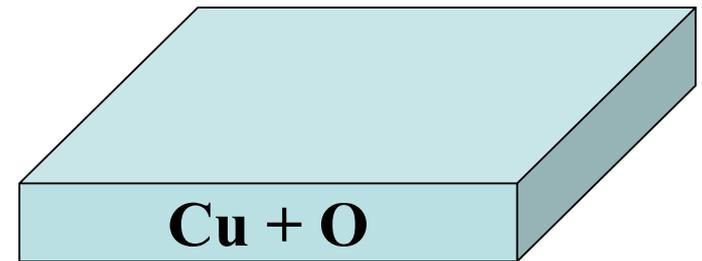
## High-Temperature Formulas



**Cu = Copper**

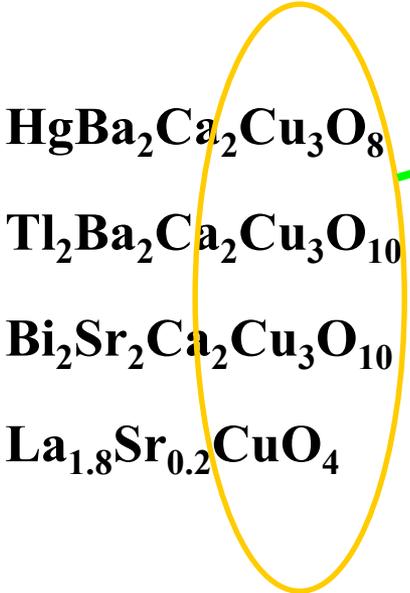
**O = Oxygen**

**CuO = CopperOxide**

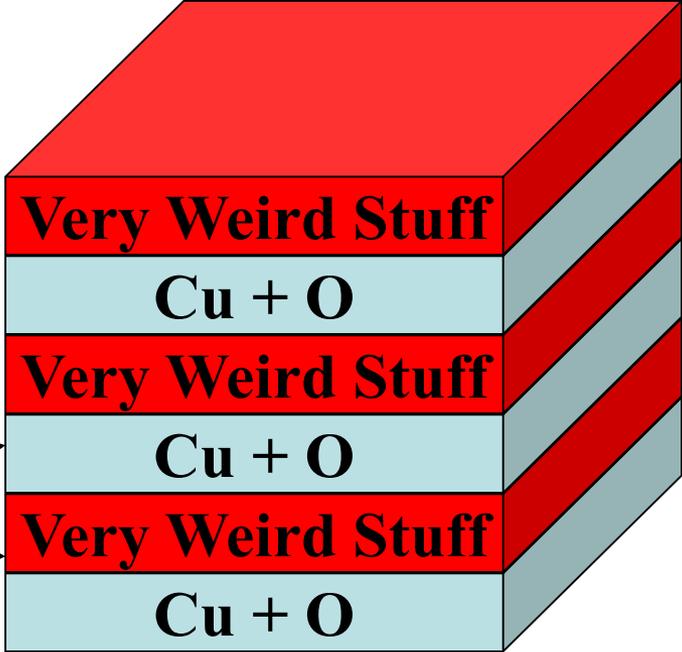


# High Temperature Superconductors: Construction

## High-Temperature Formulas



**Cu = Copper**  
**O = Oxygen**  
**CuO = CopperOxide**



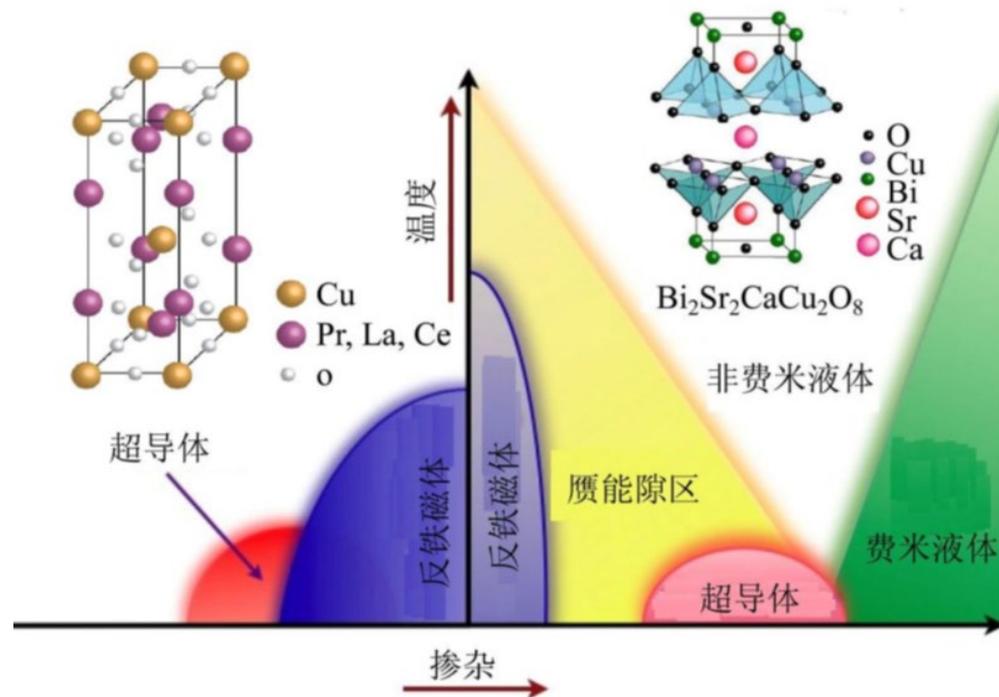
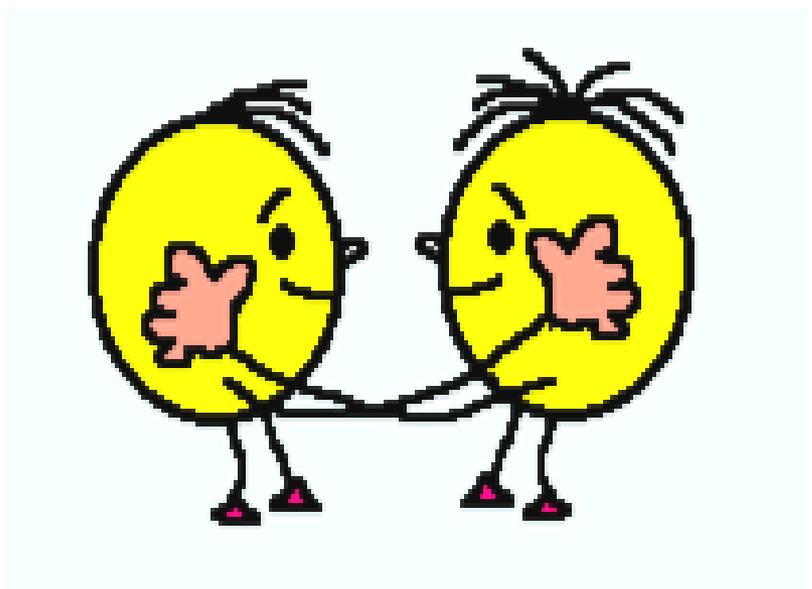
Superconductivity Here

Still Important!

### 三) 高温超导研究存在的问题

两个重大问题未从根本上解决

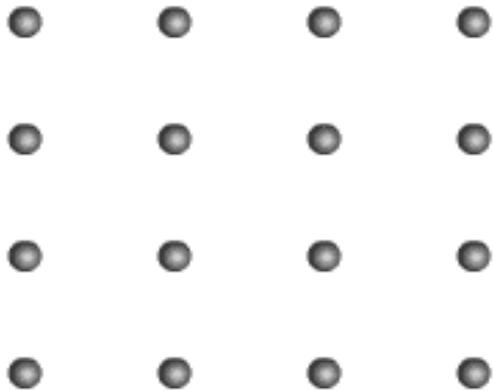
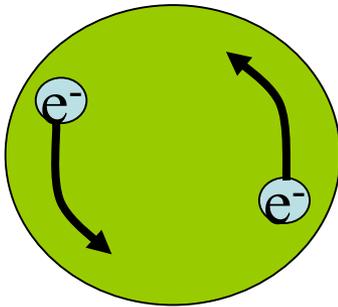
## 问题一：高温超导材料的超导机理悬而未决



探讨材料的导电机理——超导电子是如何配对的？

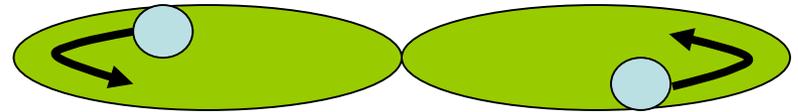
# Difference in Mechanism

## Regular Superconductors



Electron-Phonon interaction  
to form Cooper Pairs

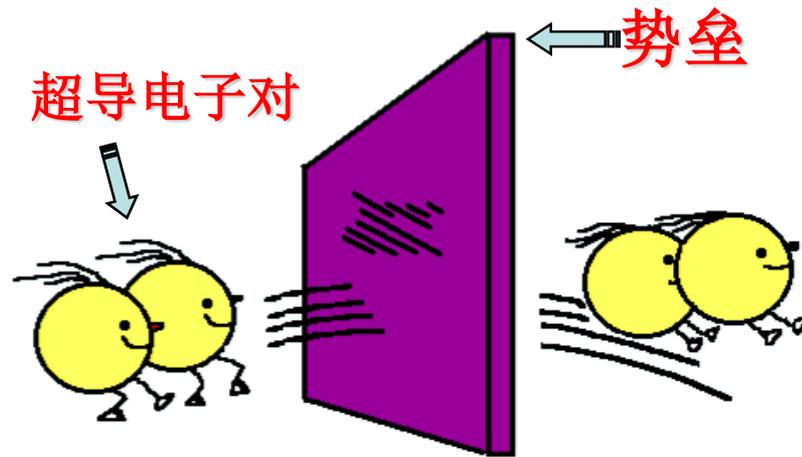
## High-Temperature Superconductors



- A Magnetic Attraction ?
- Spin attraction ?
- The lattice after all ?
- Something else ?

### 三) 高温超导研究存在的问题

## 问题二：高温超导实际应用问题未根本解决



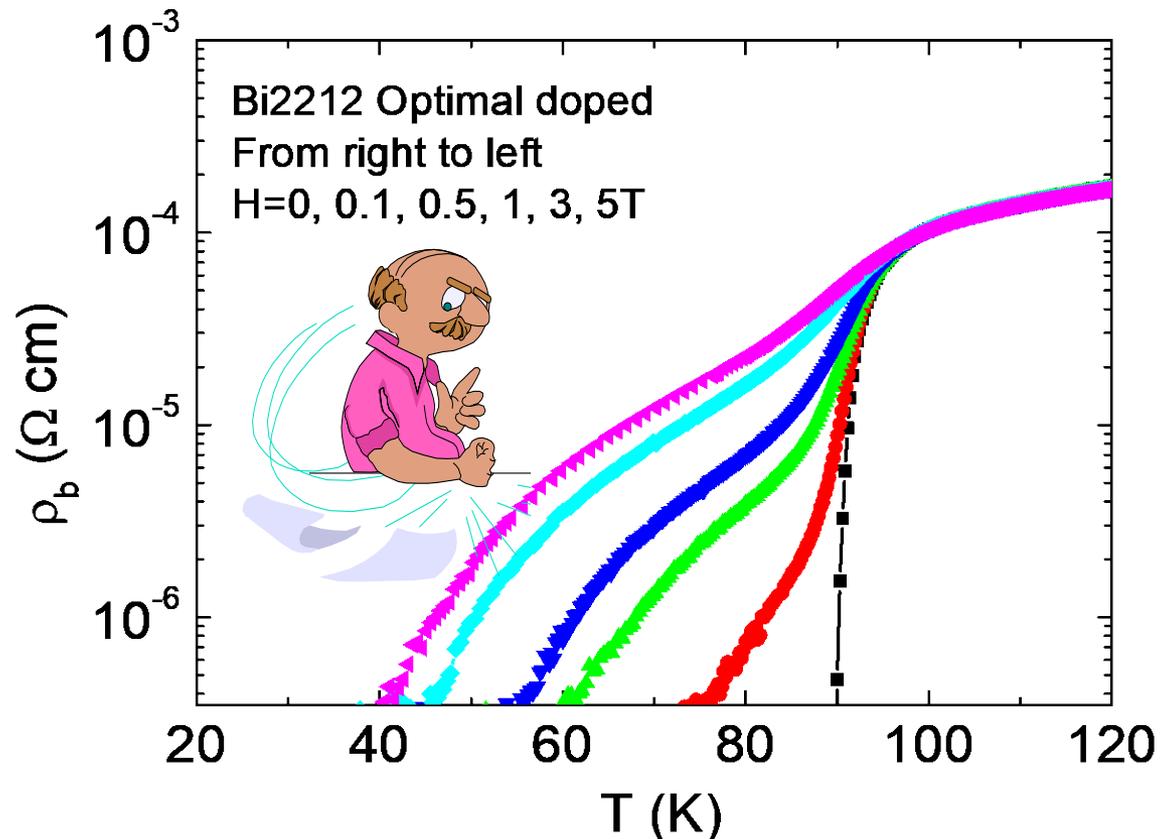
超导电子隧道效应

核心——如何控制和改善超导电子隧道效应？

# 三) 高温超导研究存在的问题

## 强电或强磁场下的应用

关键——如何提高磁场下的临界电流密度？



强电或强磁场下的应用遇到障碍

# 四) 铁基超导材料的发现

J|A|C|S  
COMMUNICATIONS

Published on Web 02/23/2008

Y. Kamihara et al.,

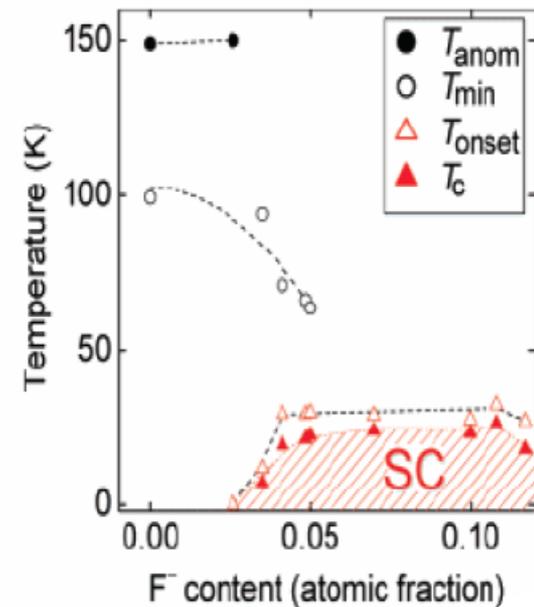
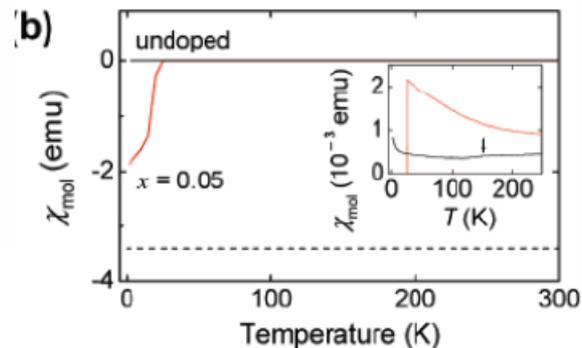
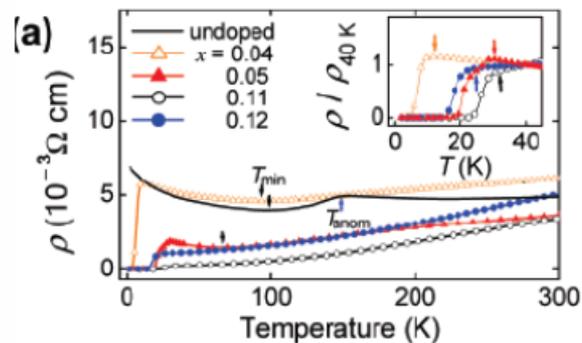
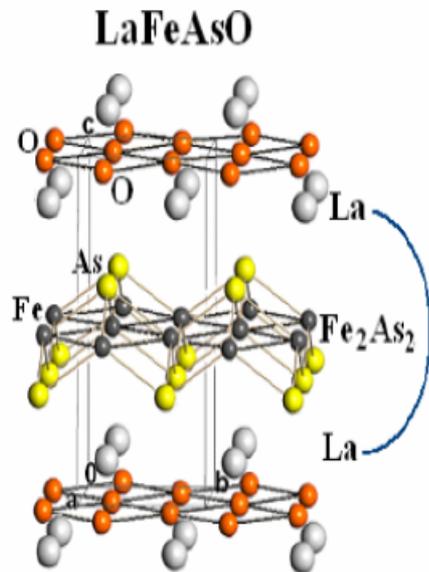
JACS 130, 3296(2008).

2008年2月23日 On Line

Iron-Based Layered Superconductor  $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$  ( $x = 0.05 - 0.12$ )  
with  $T_c = 26$  K

Yoichi Kamihara,<sup>\*,†</sup> Takumi Watanabe,<sup>‡</sup> Masahiro Hirano,<sup>†,§</sup> and Hideo Hosono<sup>†,‡,§</sup>

*ERATO-SORST, JST, Frontier Research Center, Tokyo Institute of Technology, Mail Box S2-13, Materials and Structures Laboratory, Tokyo Institute of Technology, Mail Box R3-1, and Frontier Research Center, Tokyo Institute of Technology, Mail Box S2-13, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226-8503, Japan*



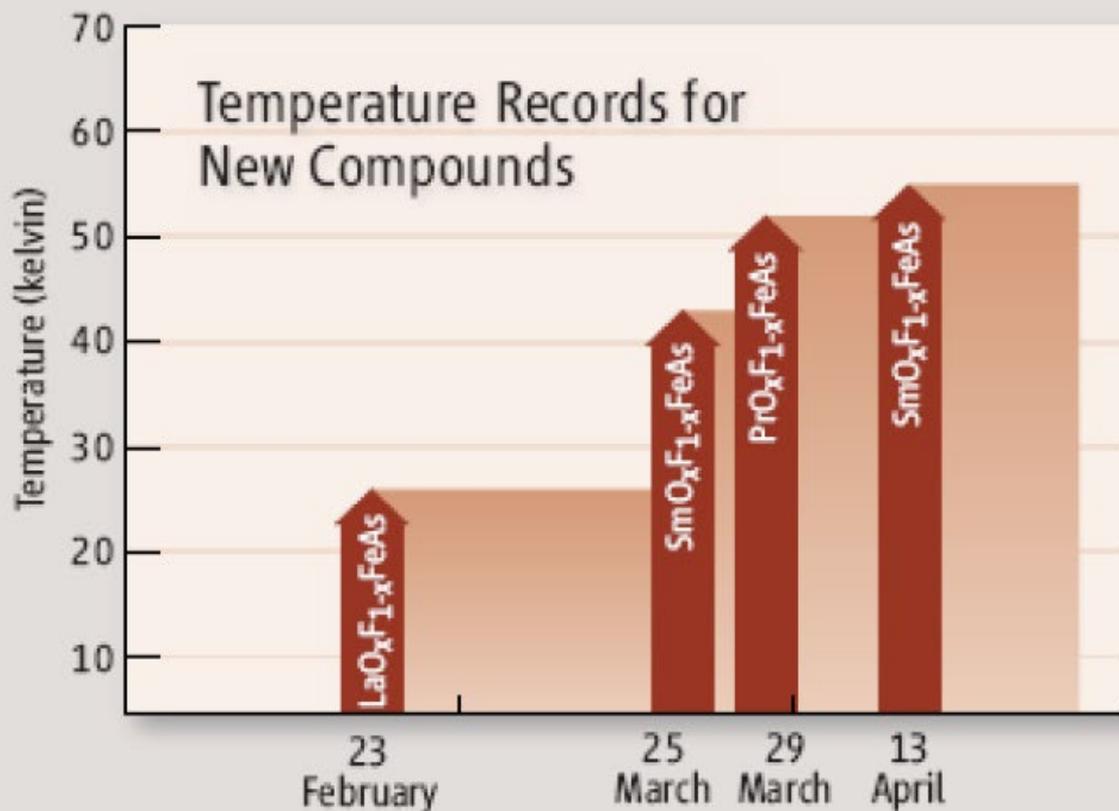
# New Superconductors Propel Chinese Physicists to Forefront

Hai-Hu Wen went to work as soon as he heard the news. In late February, the 44-year-old physicist at the Institute of Physics (IOP) at the Chinese Academy of Sciences in Beijing learned from a colleague that researchers in Japan had discovered

“What surprises me—probably it shouldn’t—is the number of good papers coming out of Beijing,” says Peter Hirschfeld, a theorist at the University of Florida, Gainesville. “They’ve really jumped on this.”



tor that without tively by 26 kelvin looked Google-work. “V als the s “Within the first: Wen’ eral in C by mate Tokyo li out a ne conduct without tempera hailing t



Science



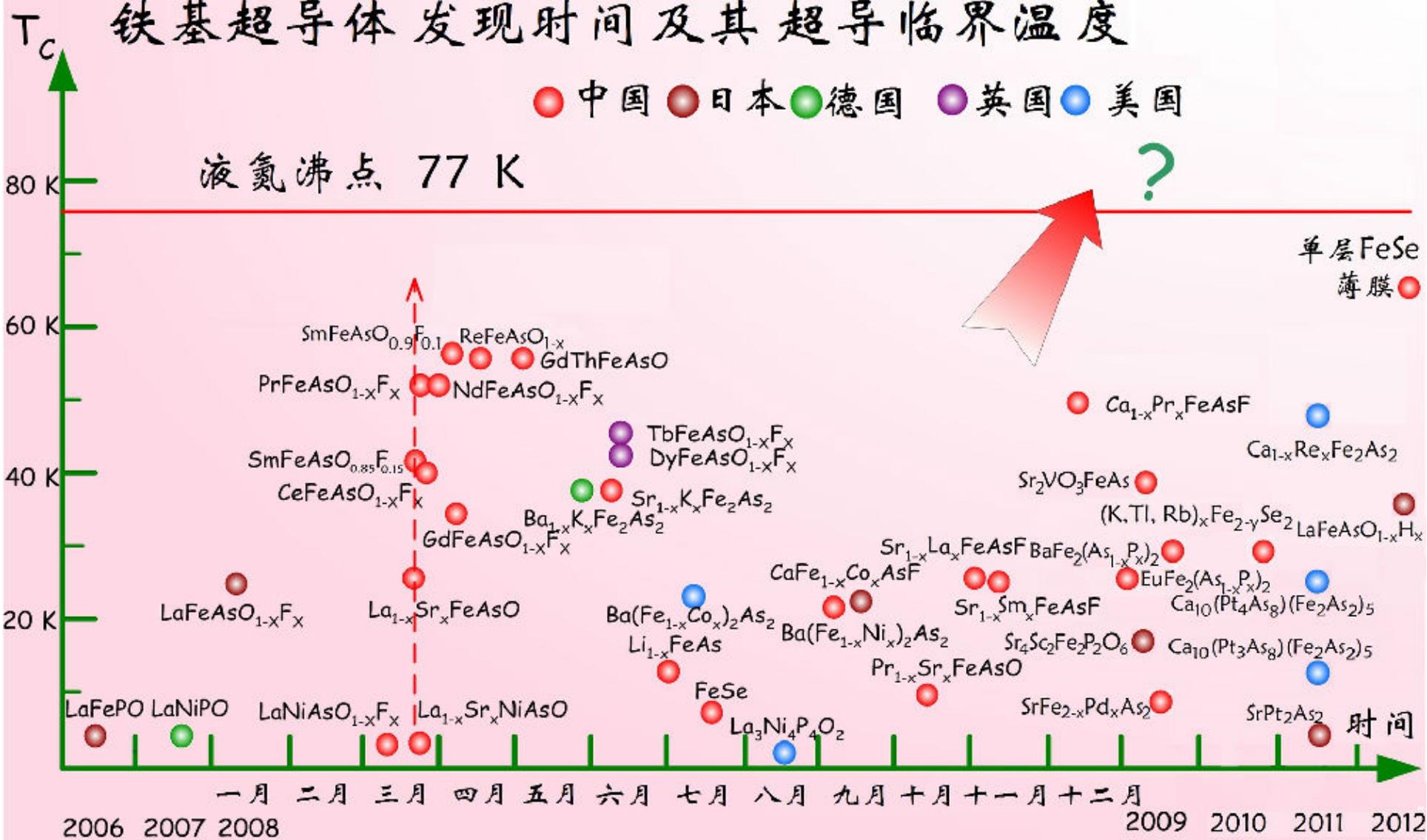
Vol 320, Issue 5875,  
Pages 432-433

Apr 2008

# 铁基超导体发现时间及其超导临界温度

● 中国 ● 日本 ● 德国 ● 英国 ● 美国

液氮沸点 77 K



## 五) 传统材料的能不能有更高的临界温度?



崔田



段德芳

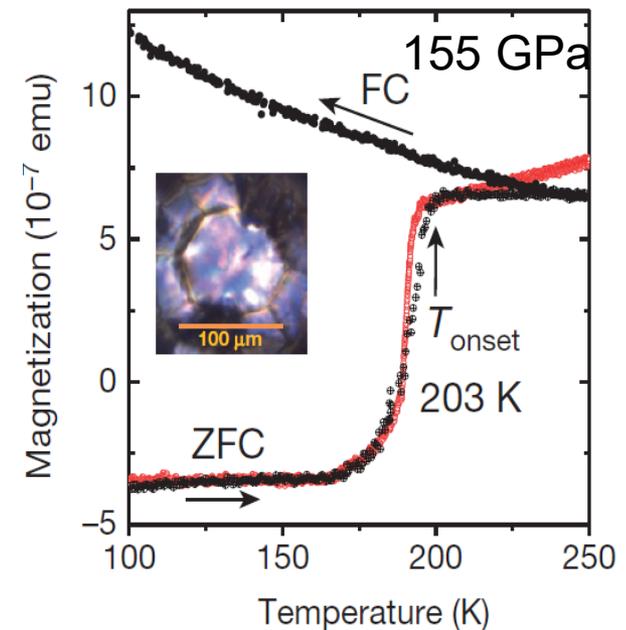
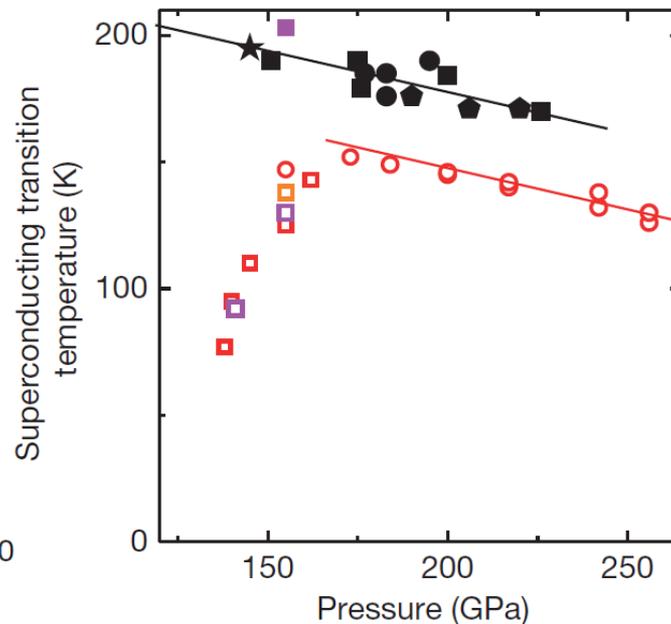
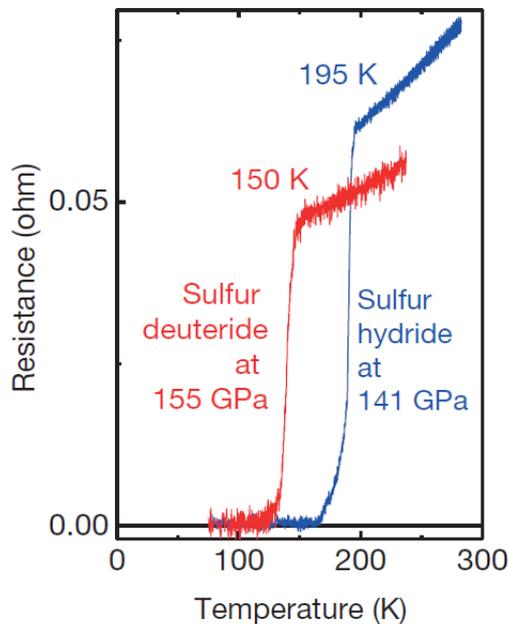
吉林大学



Mikhail Eremets ,  
Max-Planck-Institut  
für Chemie, Germany

# 五) 传统材料的能不能有更高的临界温度?

- 1968年: Ashcroft & Ginzburg 提出金属氢可能是超导体, 临界温度达到室温(290K)。 *Phys. Rev. Lett.* 21, 1748 (1968).
- 2014年: 吉林大学崔田研究组计算出 $H_3S$ 在200 GPa时将是 $T_c$ 约在190~200K的超导体。 *Sci. Rep.* 4, 6968 (2014)
- 2015年: Drozdov研究组报道了 $H_3S$ 在155GPa高压下 $T_c$ 高达203K。 *Nature* 525, 73–76 (2015).



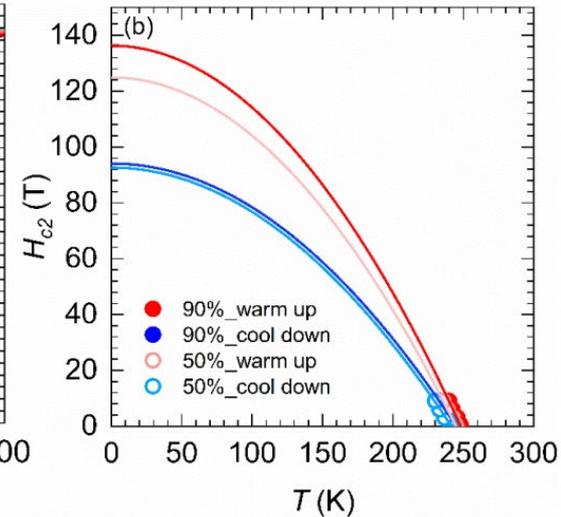
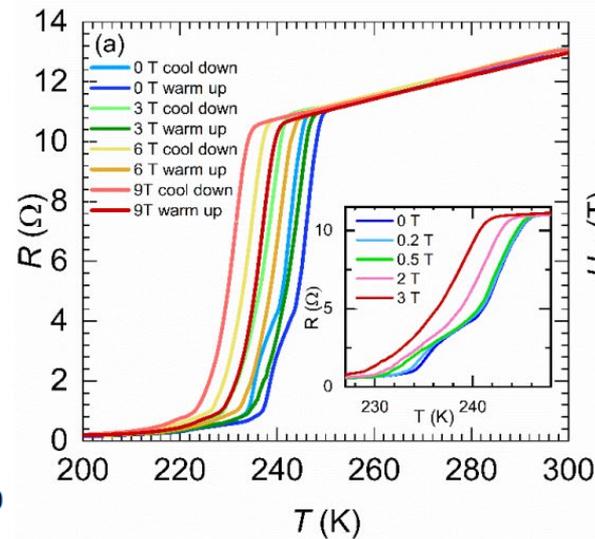
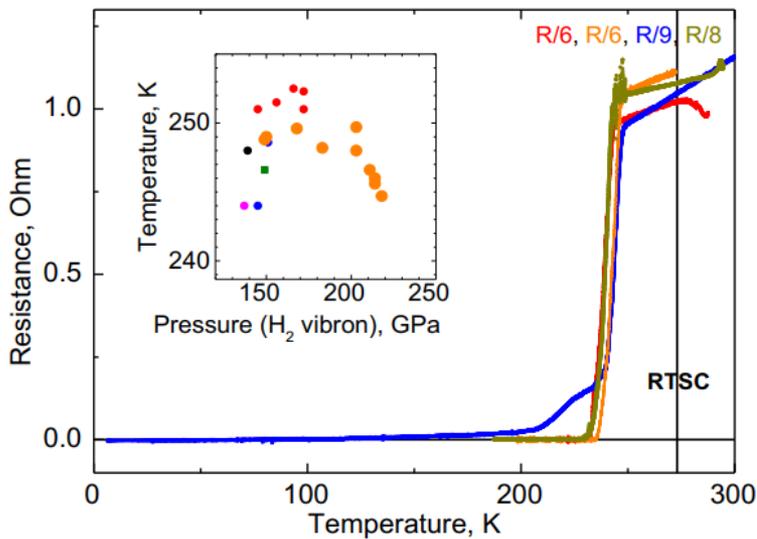
High pressure and isotope effects

Letter | Published: 22 May 2019

# Superconductivity at 250 K in lanthanum hydride under high pressures

A. P. Drozdov, P. P. Kong, V. S. Minkov, S. P. Besedin, M. A. Kuzovnikov, S. Mozaffari, L. Balicas, F. F. Balakirev, D. E. Graf, V. B. Prakapenka, E. Greenberg, D. A. Knyazev, M. Tkacz & M. I. Eremets 

*Nature* **569**, 528–531(2019) | [Cite this article](#)



LaH<sub>10</sub>

## Evidence for Superconductivity above 260 K in Lanthanum Superhydride at Megabar Pressures

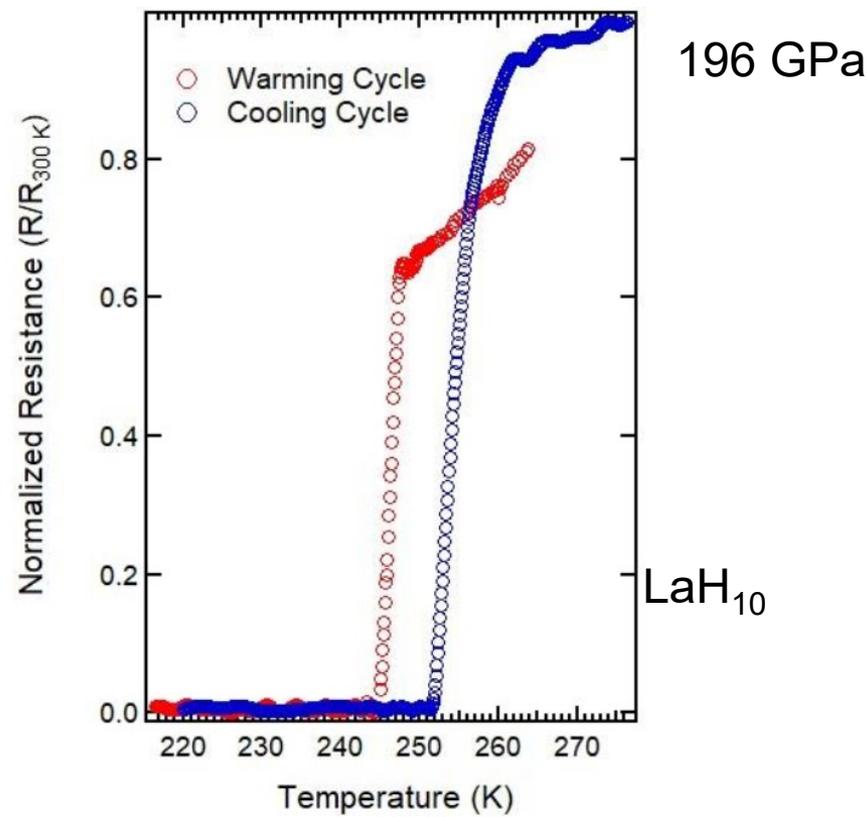
Maddury Somayazulu,<sup>1,\*</sup> Muhtar Ahart,<sup>1</sup> Ajay K. Mishra,<sup>2,‡</sup> Zachary M. Geballe,<sup>2</sup> Maria Baldini,<sup>2,§</sup>  
Yue Meng,<sup>3</sup> Viktor V. Struzhkin,<sup>2</sup> and Russell J. Hemley<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>*Institute for Materials Science and Department of Civil and Environmental Engineering,  
The George Washington University, Washington, DC 20052, USA*

<sup>2</sup>*Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington, Washington, DC 20015, USA*

<sup>3</sup>*HPCAT, X-ray Science Division, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois 60439, USA*

 (Received 23 August 2018; revised manuscript received 3 December 2018; published 14 January 2019)



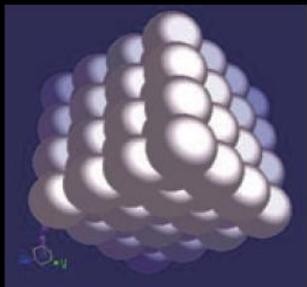
# 内容提要

- 一、廿世纪的伟大发现——超导电性
- 二、超导材料神奇的魅力
- 三、超导电性的基本特征
- 四、超导材料为什么会超导？
- 五、超导材料通往实用化的道路——强电应用
- 六、弱电应用的基础——崂山道士穿墙？
- 七、人类的梦想——高温超导材料
- 八、结束语

# 八、结束语

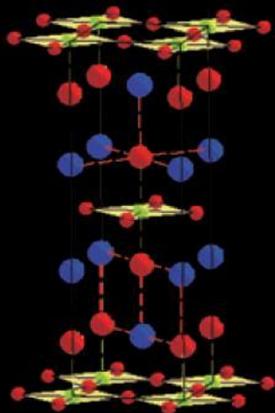
## 超导新材料：室温超导材料的梦想何时实现？

金属合金超导体



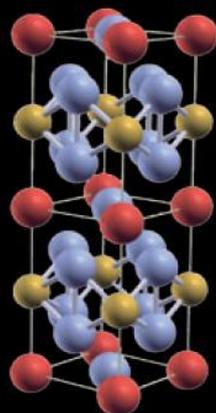
Hg

铜氧化物超导体



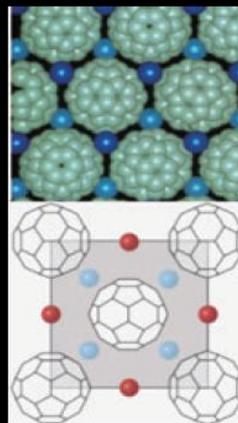
$\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$

重费米子超导体



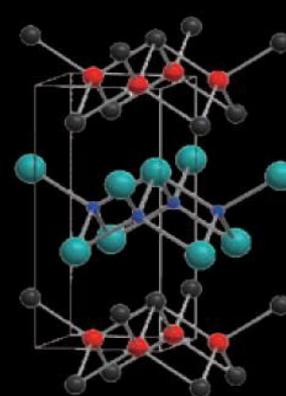
$\text{CeCoIn}_5$

有机超导体



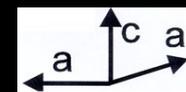
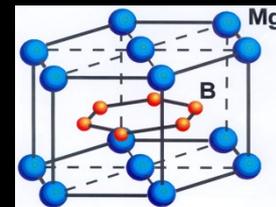
$\text{K}_3\text{C}_{60}$

铁基超导体

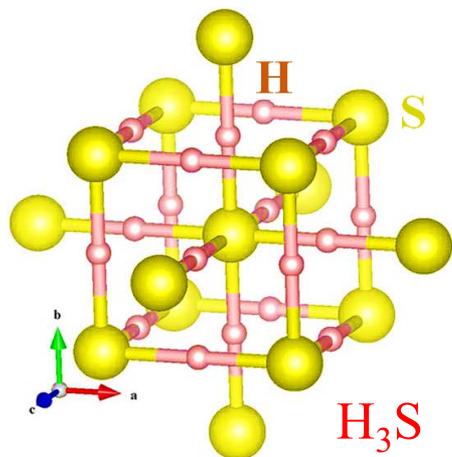


$\text{LaFeAsO}$

金属间化合物超导体



$\text{MgB}_2$



$\text{H}_3\text{S}$



新超导材料诺贝尔  
物理学奖等着你！

H. K. Onnes

J. Bardeen

L. N. Cooper

1913



1972

J. R. Schrieffer



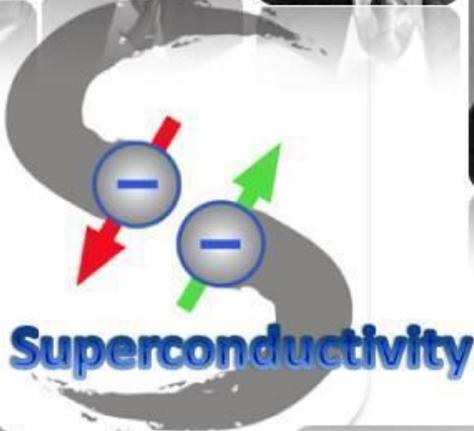
I. Giaever



1973



B.D. Josephson



V. L. Ginzburg

1987



J. G. Bednorz



K.A. Müller



A. A. Abrikosov

2003



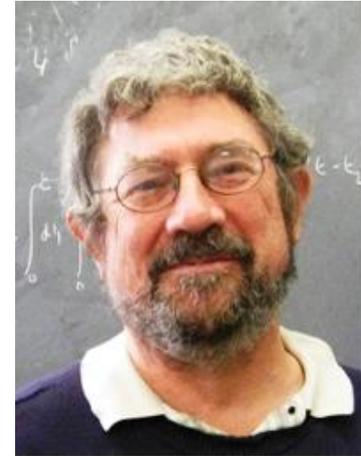
高温超导机理  
诺贝尔物理学  
奖等着你!



David J. Thouless



F. Duncan M. Haldane



J. Michael Kosterlitz

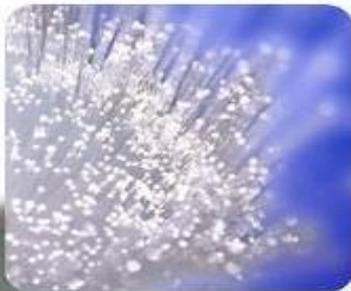
获奖理由：“理论发现拓扑相变和拓扑相物质”。



**2016年诺贝尔奖**：使用高等数学方法研究物质的不寻常阶段或状态，如超导体、超流体或薄磁膜。20世纪70年代早期，M. Kosterlitz和D. Thouless颠覆了当时的理论，提出超导和超流性质的新模型，揭示了超导态可以在低温下出现。

# 超导体的各种应用

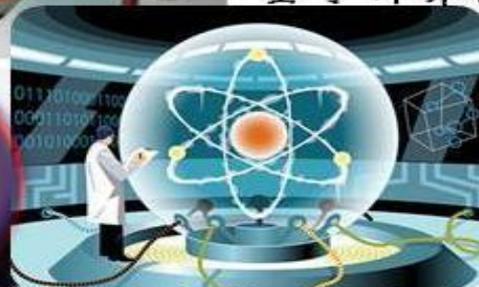
超导电缆



超导磁悬浮列车



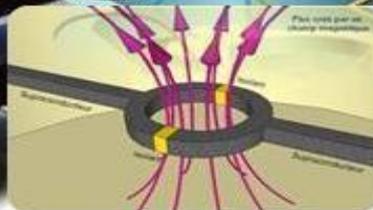
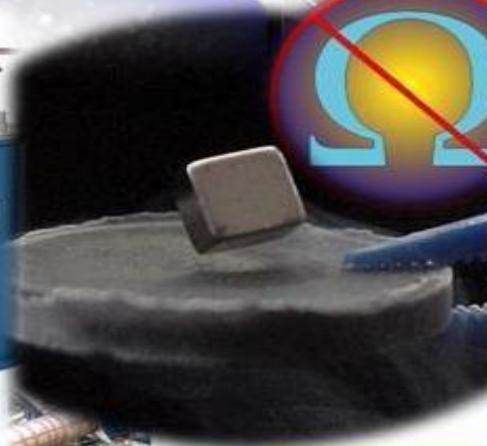
量子计算机



核磁共振成像仪



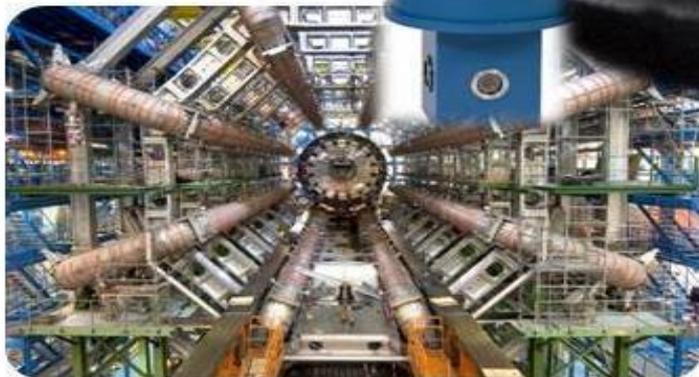
超导磁体



SQUID



超导量子比特



欧洲大型强子对撞机LHC上的ATLAS探测器与超导磁体



手机基站信号接收系统



超导滤波器

THANK YOU

