

神奇的超导及应用

吴 涛

合肥微尺度物质科学国家研究中心
中国科学技术大学

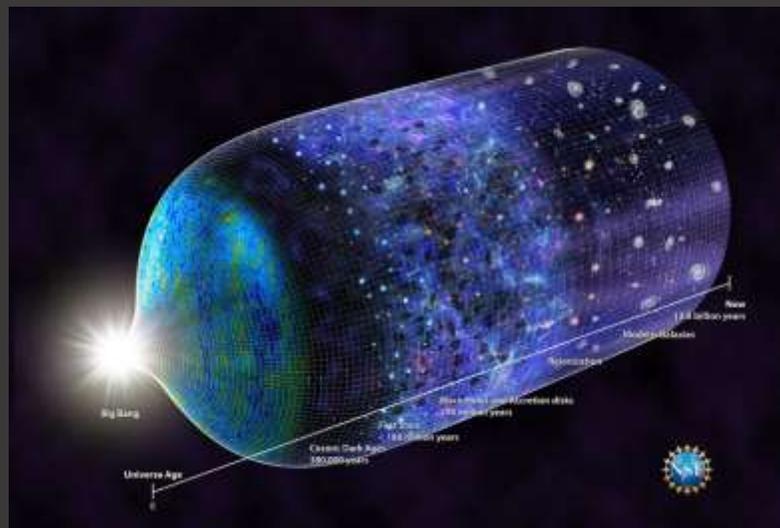
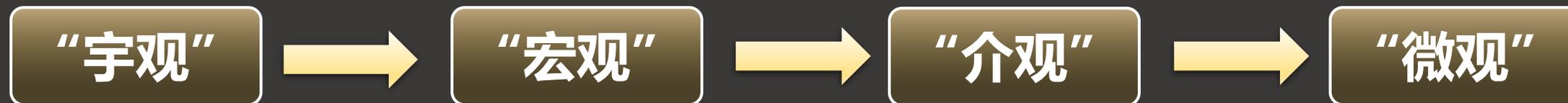
2023年11月28日

主要内容

- 超导的发现及其物理
- 高温超导材料的突破与发展
- 超导的应用现状和前景
- 超导的前沿与展望

超导的发现及其物理

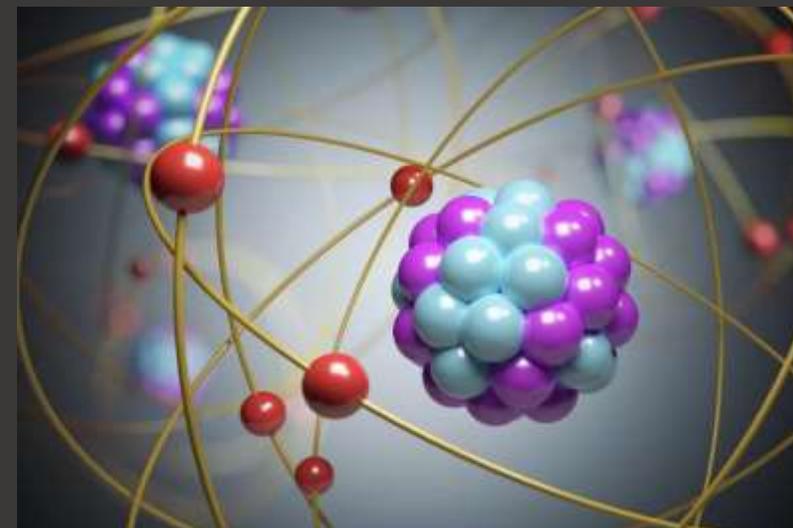
• 物理学研究的尺度



• 宇宙的起源

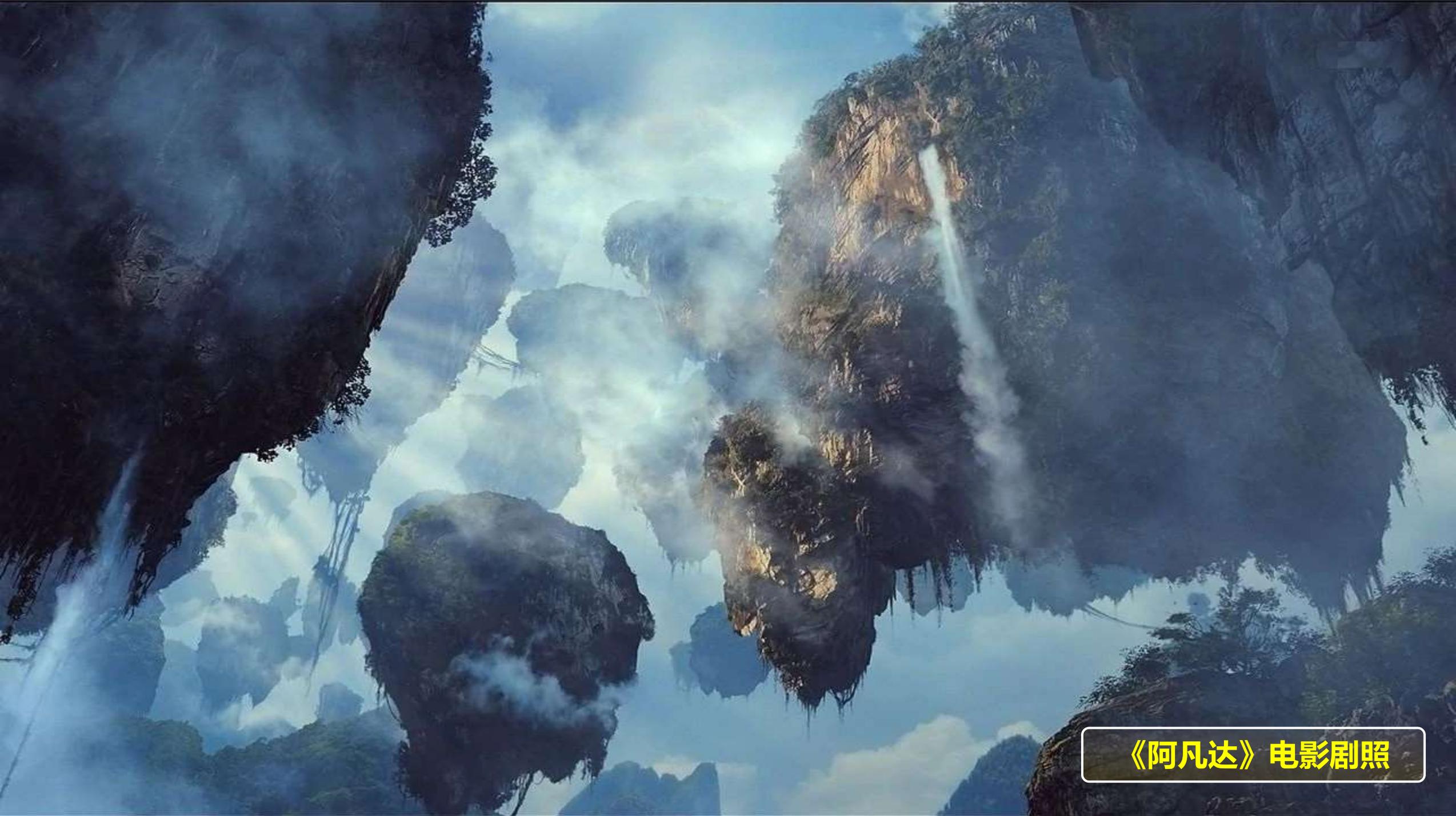


• 宏观物质中的物态和量子现象



• 物质的结构

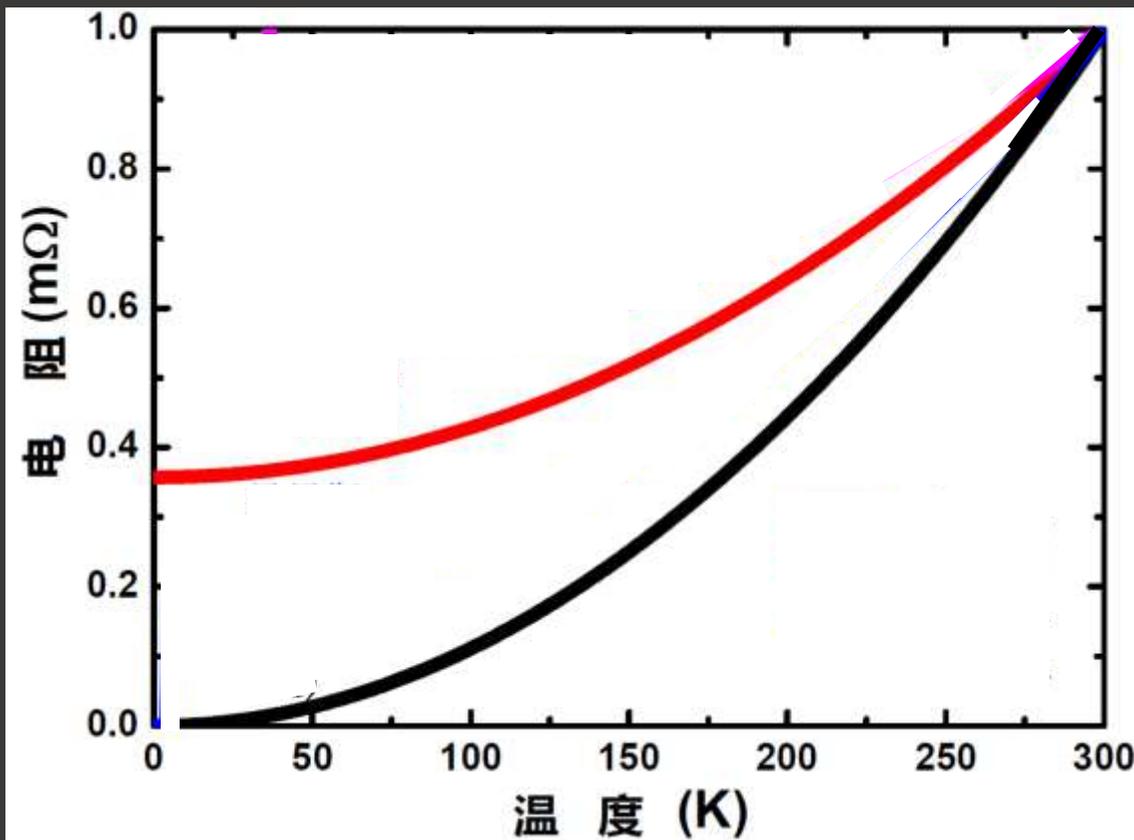
**在宏观尺度上，有没有我们能
看得见、觉察得到的量子现象？**



《阿凡达》电影剧照

• 低温的获得

在接近绝对零度时，纯金属的电阻如何变化？

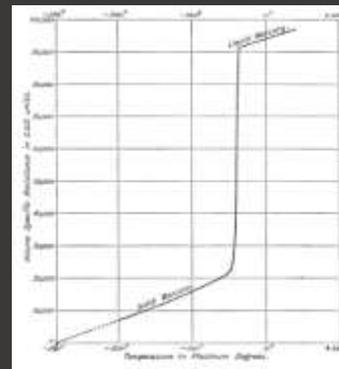


0 K = -273.15 °C

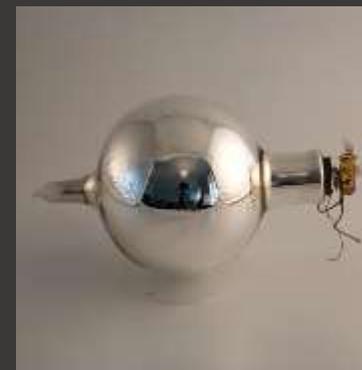
- 1823年，法拉第成功液化氯气 (~239K)。很快，除了O₂, N₂, H₂, He等“永恒气体”之外的已知气体都被液化。
- 1896年，杜瓦液化了空气 (~77K)。对水银电阻的线性外推，认为0K时电阻为零。
- 杜瓦与昂尼斯在液化氢气上展开了竞争。1898年，杜瓦成功液化了氢气 (~21K)。对大量金属的测量结果显示电阻的减小在低温下会变缓，零温下将出现有限值。



詹姆斯·杜瓦



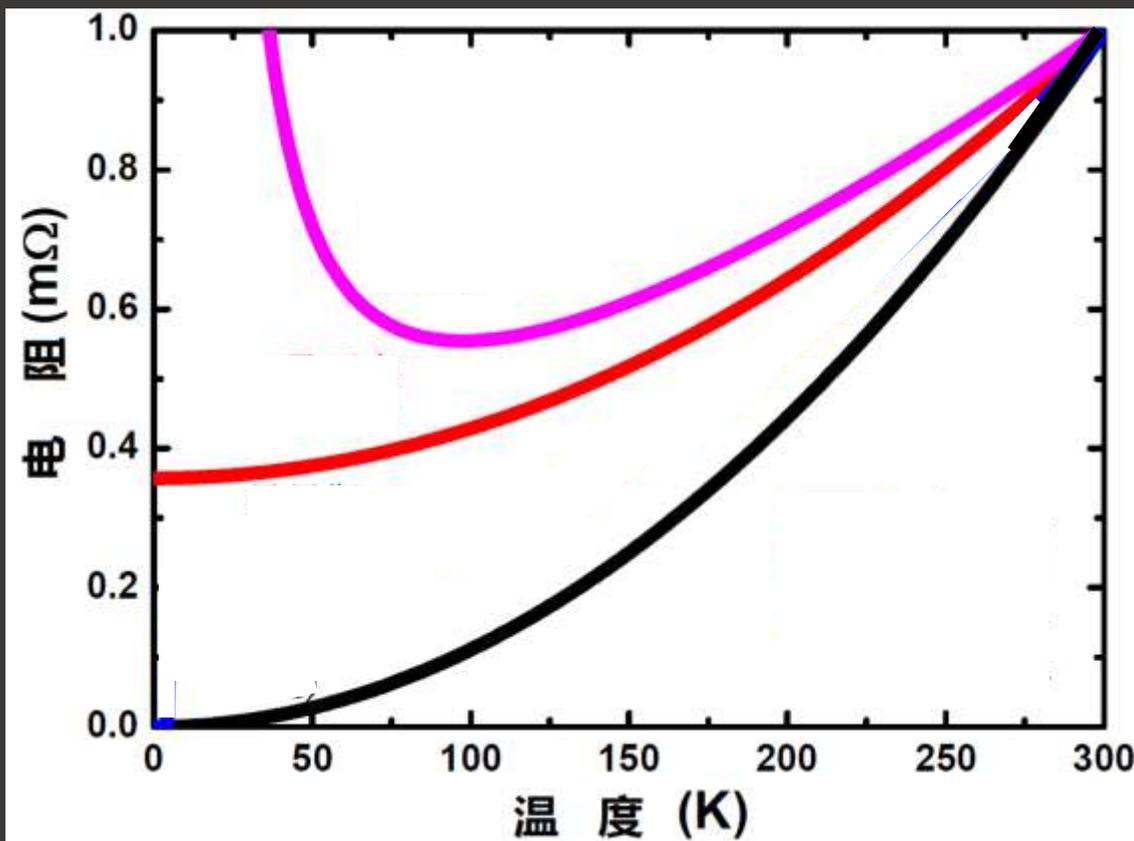
液态空气温度
水银的电阻测量



杜瓦瓶

• 氮的液化

在接近绝对零度时，纯金属的电阻如何变化？



0 K = -273.15 °C

- 1902年，开尔文提出接近绝对零度时，由于电子的运动性消失，电阻将上升，在有限温度出现一个极小值。
- 1908年，在获得氮气资源的13年后，昂尼斯成功液化了氮气 (~4.2K)。在接下来的15年时间内，昂尼斯的实验室是世界上唯一可以获得液氮的实验室。
- 1908-1910年，昂尼斯进行了大量液氮温区实验，并没看到电阻的极小值。为了测量最纯净的金属中的电阻行为，昂尼斯选择了水银。



卡默林·昂尼斯

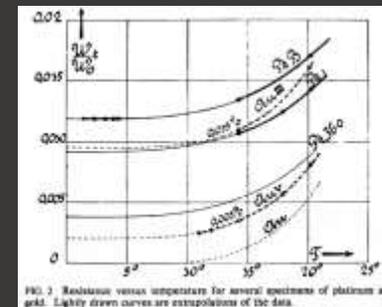
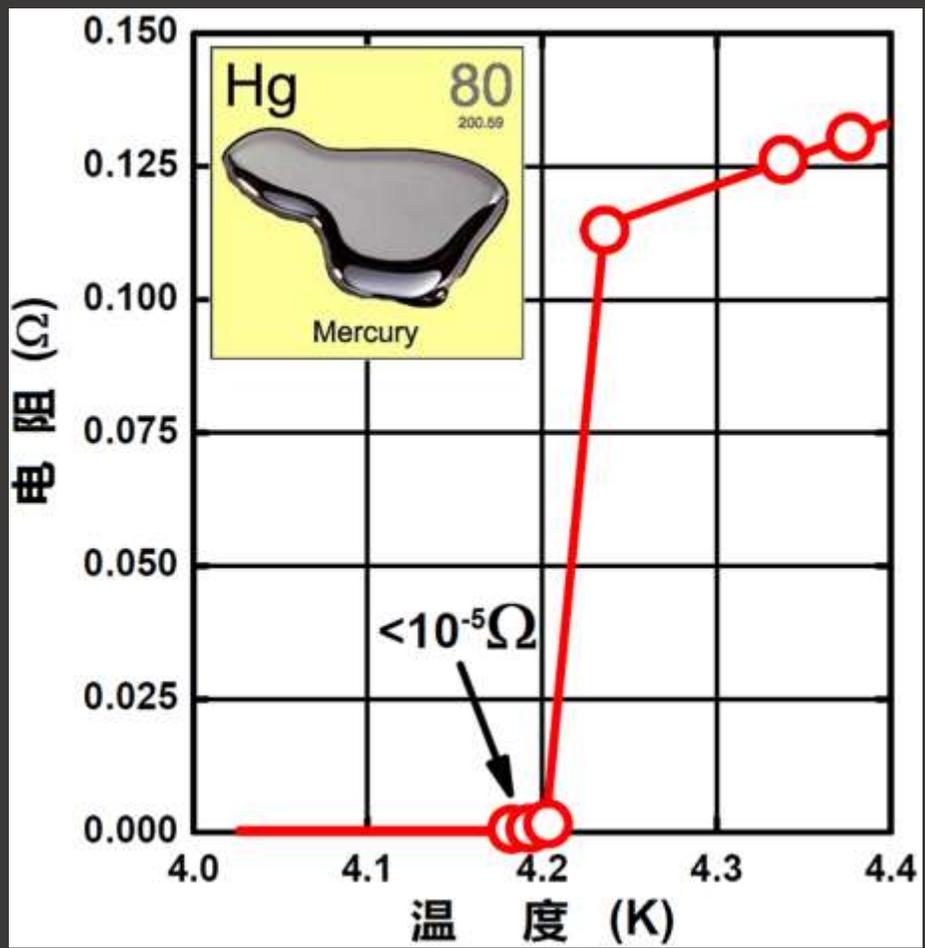


FIG. 2 Resistance versus temperature for several specimens of platinum and gold. Lightly drawn curves are extrapolations of the data.

液氮温区
金和铂的电阻

• 超导体的发现



0 K = -273.15 °C

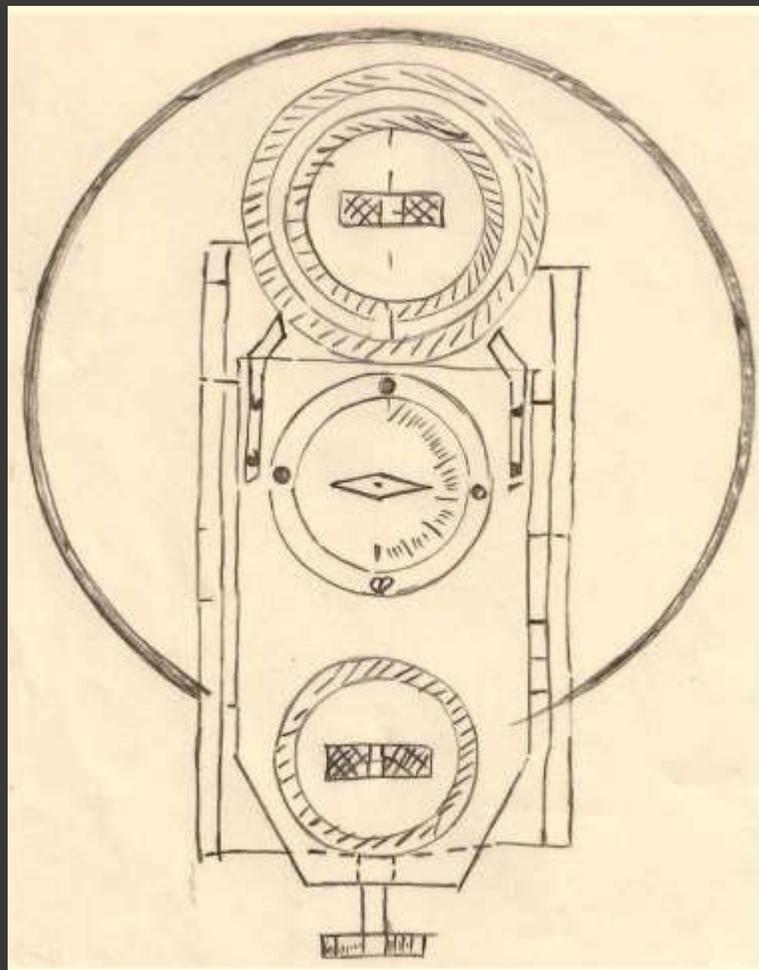
卡默林·昂尼斯

1913年
诺贝尔奖



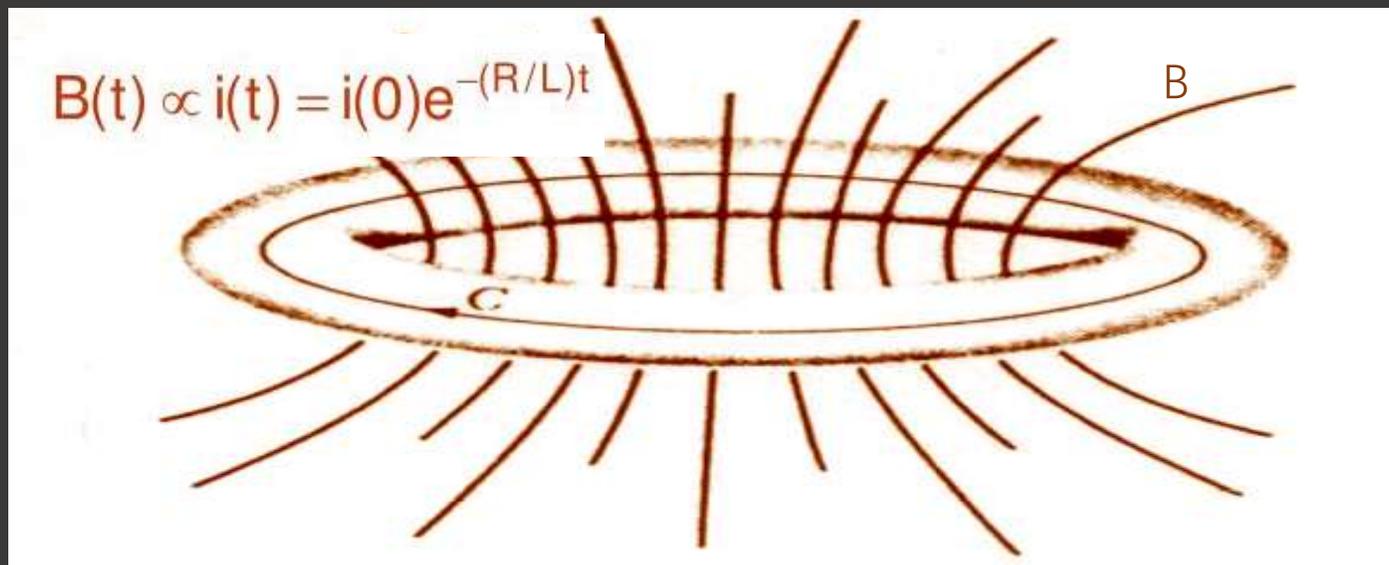
1911年，昂尼斯发现超导现象，正值首届索尔维会议召开，当时物理学正处于从经典物理学向现代物理学、特别是向量子力学的过渡时期。超导电性作为首个发现的宏观量子现象，对物理的发展起到极大促进作用。

• 超导体的神奇性质——零电阻



超导环的零电阻实验验证

Gerrit Flim 手稿绘图



超导的电阻是绝对的零。

1962年，人们用超导环进行实验，连续监测环外磁场的变化，以仪器灵敏度推测超导体电阻率小于 10^{-25} 欧姆·米，后来更精密实验证明小于 10^{-28} 欧姆·米。

这意味着超导体中电流数十万年甚至数亿年不衰减！

• 超导体的神奇性质——零电阻

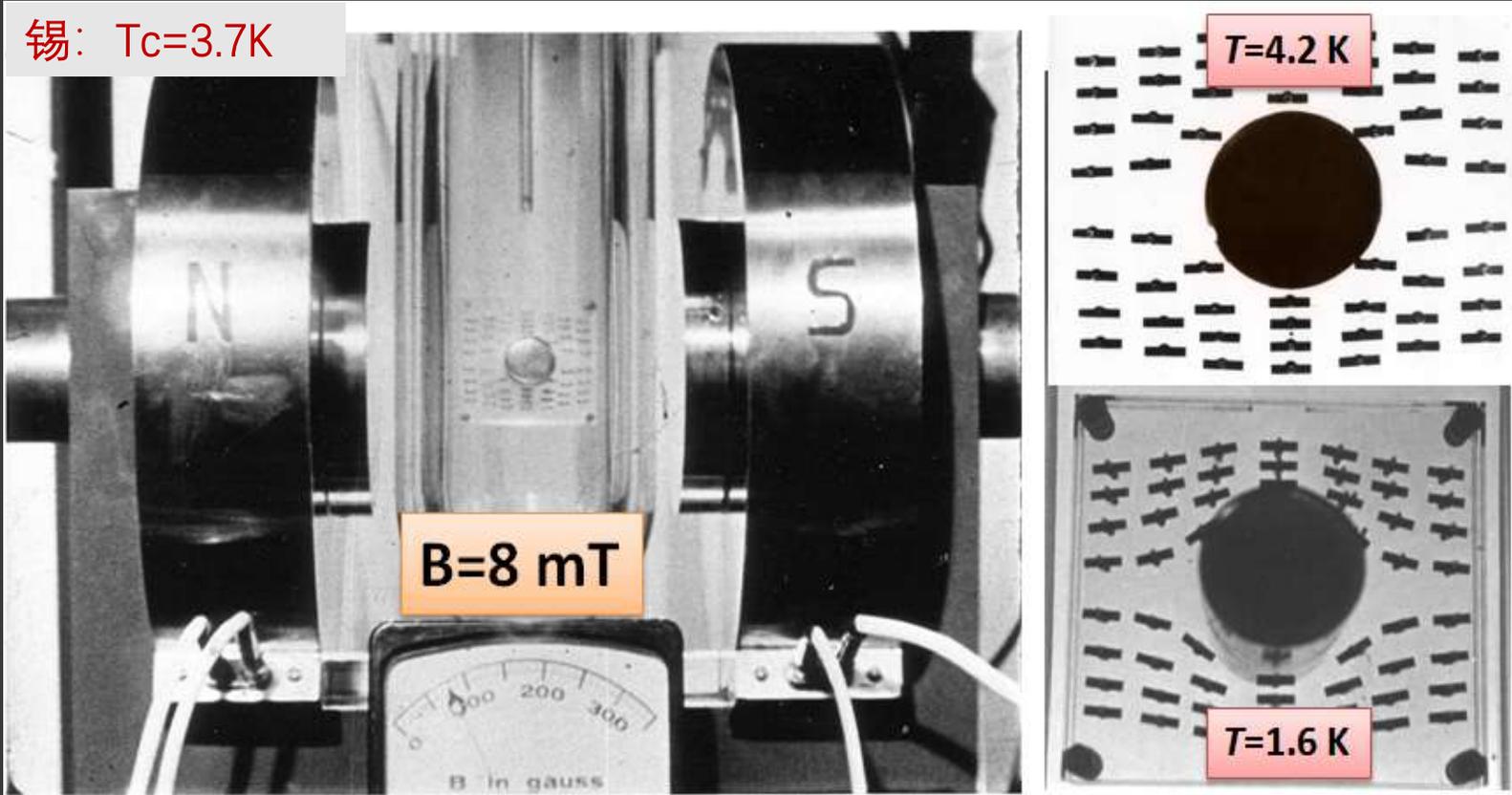


常规金属导体：有电阻 $\sim 10^{-8} \Omega \cdot m$



超导体：无电阻 $< 10^{-28} \Omega \cdot m$

• 超导体的神奇性质——完全抗磁性



1933 年
迈斯纳和奥切森菲尔德
发现超导的完全抗磁性

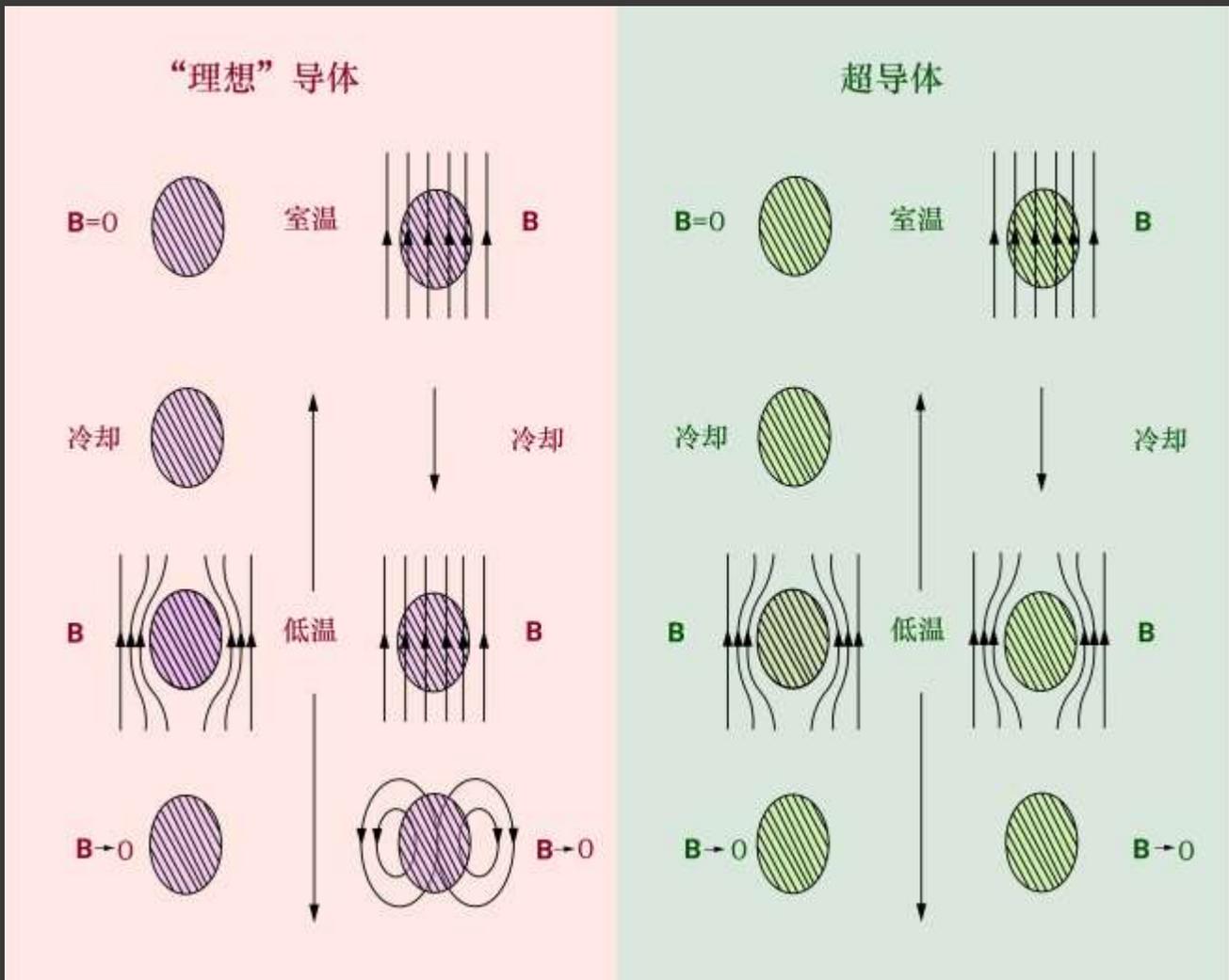
超导体的完全抗磁性又称“迈斯纳效应”，它不依赖于降温和加磁场的先后顺序。其本质原因是超导态属于“宏观量子现象”，与所谓“理想导体”有天壤之别。

超导体的神奇性质——完全抗磁性

冷却

加磁场

退磁场



“理想” 导体（零电阻）：

动态抗磁性！

1. 先降温从正常导体变为完美导体，再加磁场：**体内无磁场**
2. 先加磁场，再降温：**体内有磁场**

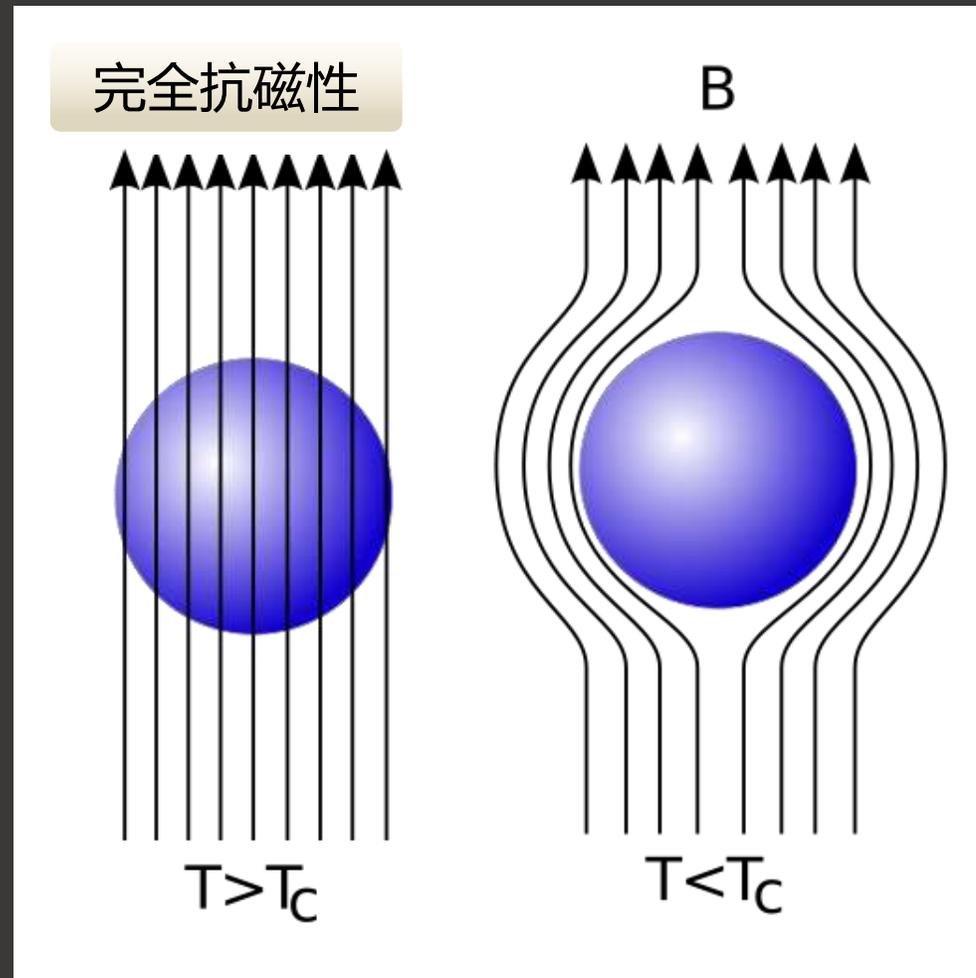
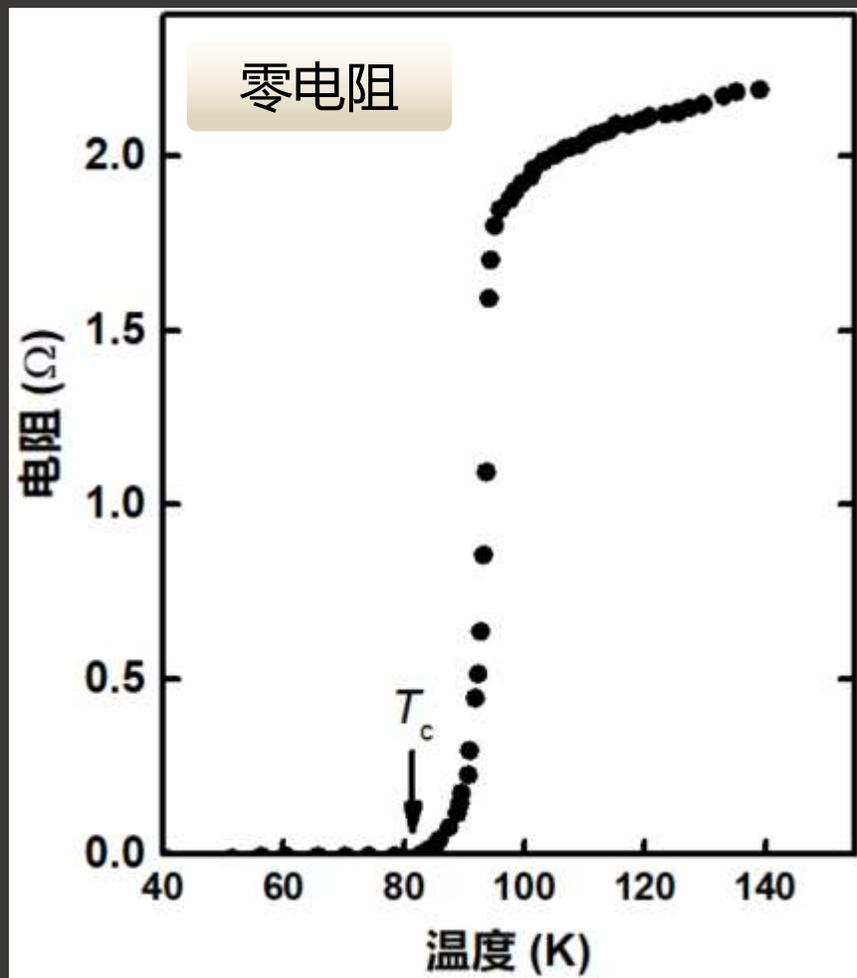
超导体（零电阻）：

完全抗磁性！

先降温后加磁场；先加磁场后降温
体内始终没有磁场

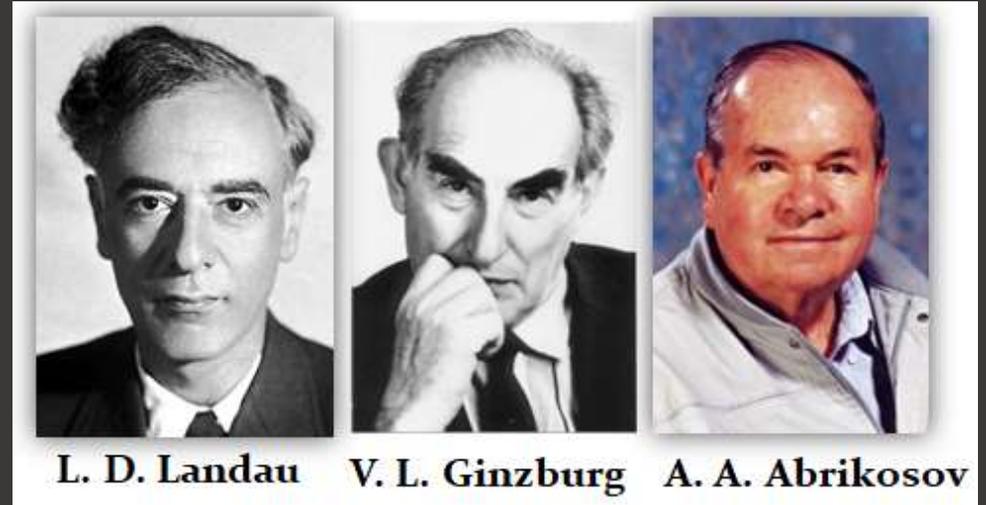
完全抗磁性是比零电阻
更为基本的超导特性！

- 超导体的两个基本特征



超导体必须具备两个“零”特征：零电阻 ($\rho=0$) 和 完全抗磁性 ($B=0$)

超导体的神奇性质——磁通量子化



1962年
诺贝尔奖



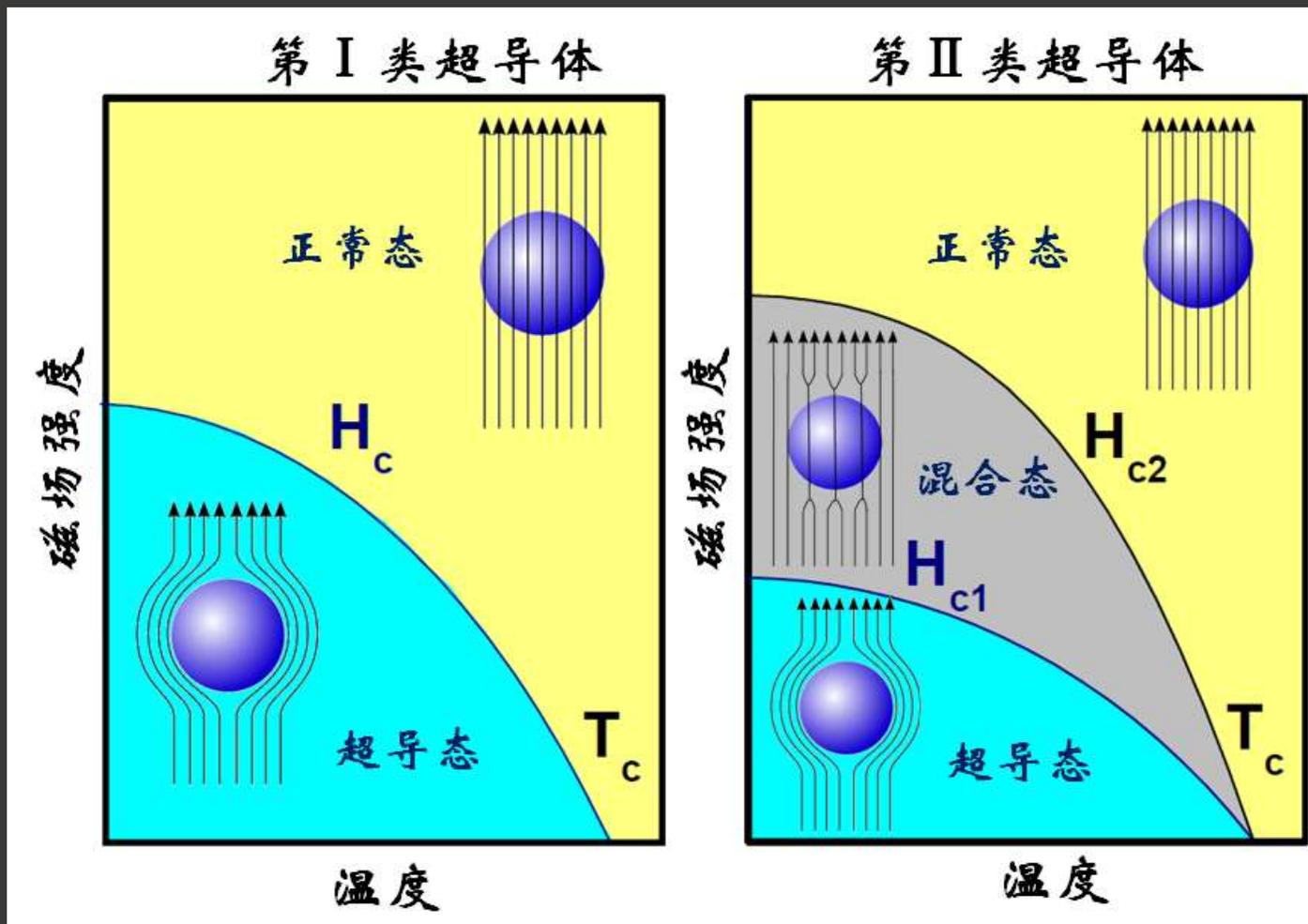
2003年
诺贝尔奖

1950-1957年，朗道和金兹堡建立超导唯象理论，从热力学相变出发理解了超导现象；此后阿布里科索夫解此方程，提出磁通量子化的概念，奠定了超导强电应用基础。

超导体的神奇性质——磁通量子化

超导体可分为：

第二类超导体

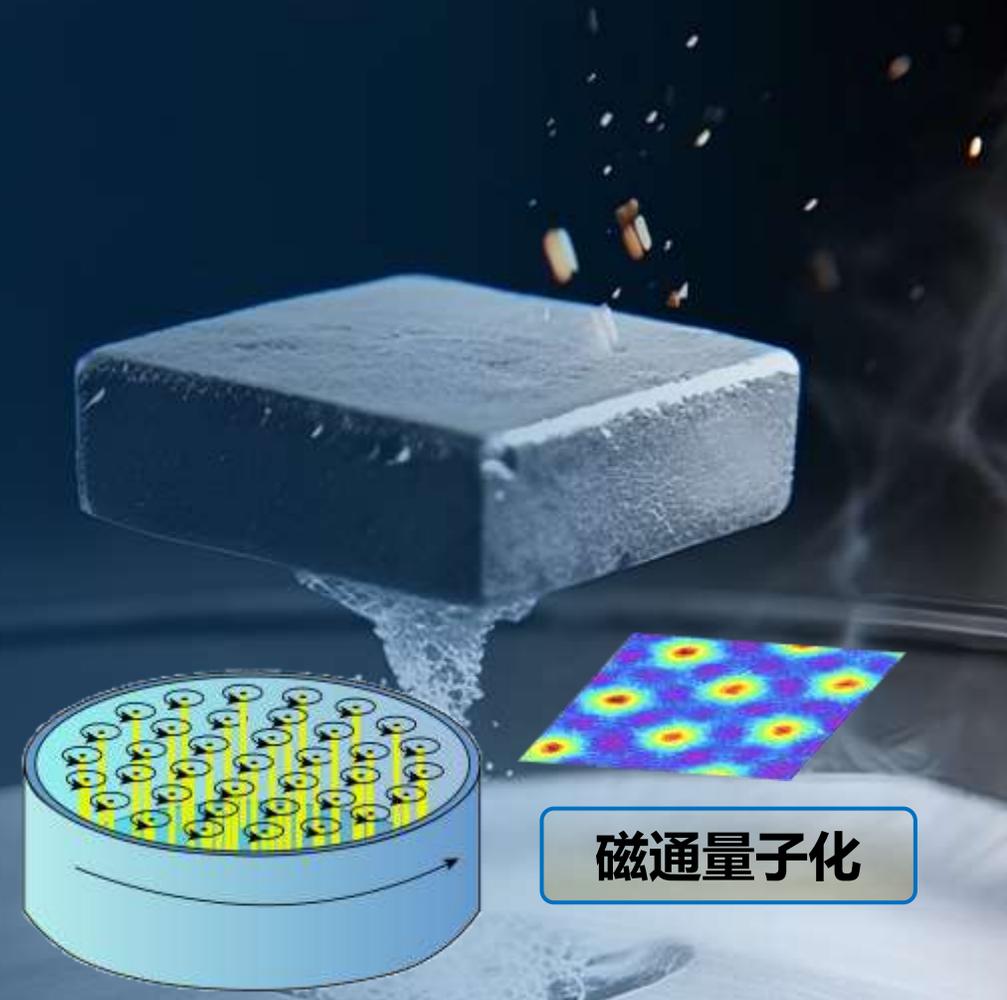


有电流通过时，自由空间中的磁力线被推动，磁力线移动会消耗能量，产生热；

有缺陷的时候，磁力线会被固定在缺陷附近不能移动，保持零电阻 → 高临界电流、临界磁场和稳定的磁悬浮

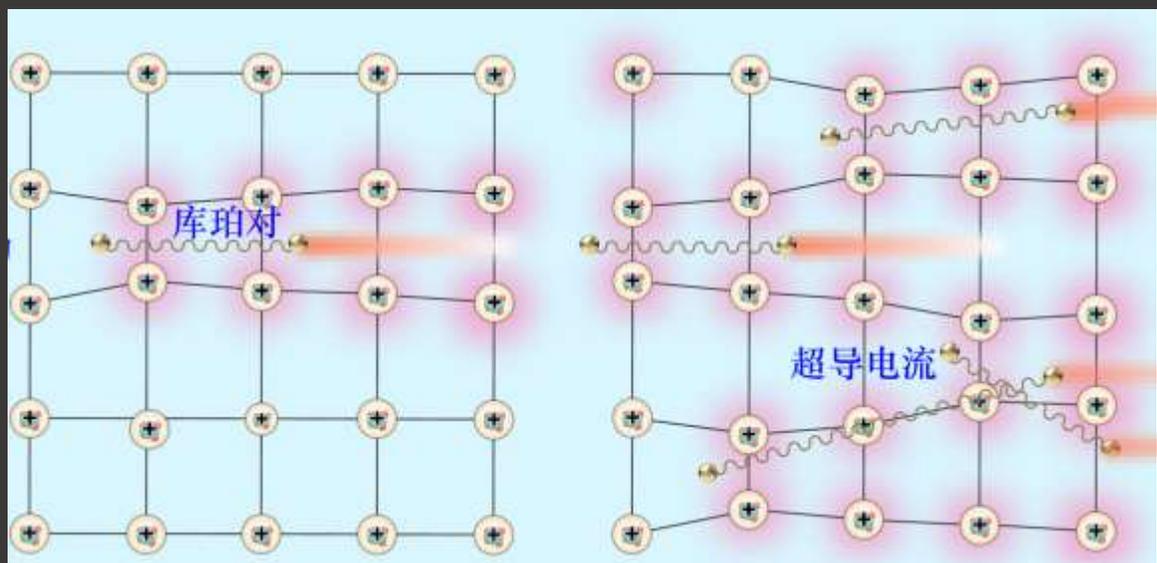
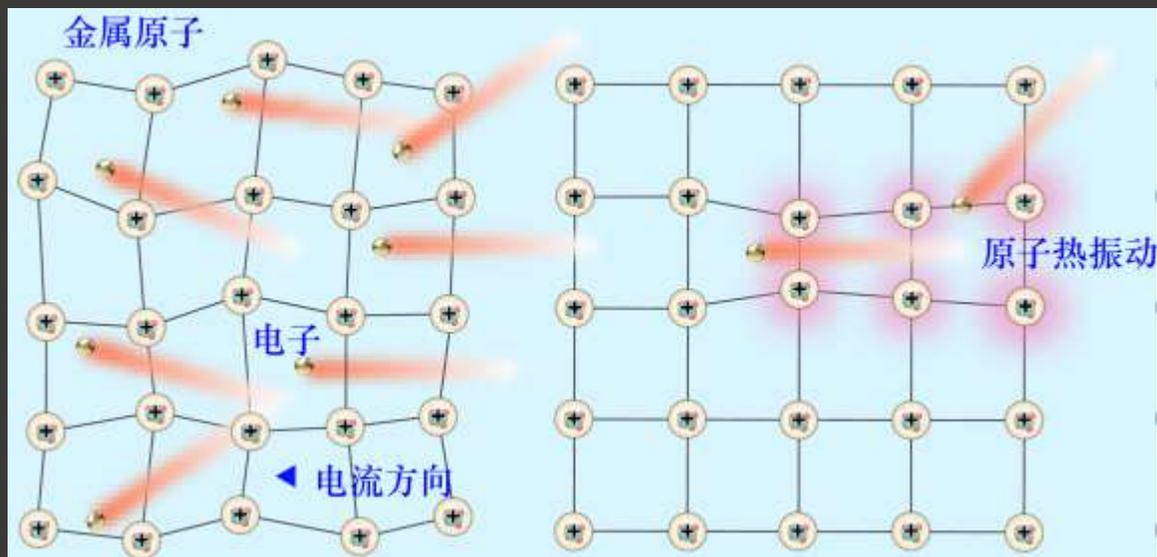
磁通钉扎是超导强电应用的基础，超导体是能源材料！

- 超导体的神奇性质——磁通量子化



在特定温度/磁场下，磁力线进入超导体内部形成“磁通量子化”现象，以磁通的量子单元 ($\Phi = h/2e$) 形式存在，会出现磁通钉扎行为，磁通钉扎是超导磁悬浮的物理本质。

• 超导电性的微观理论



John Bardeen
1908-1991



Leon Cooper
1930-



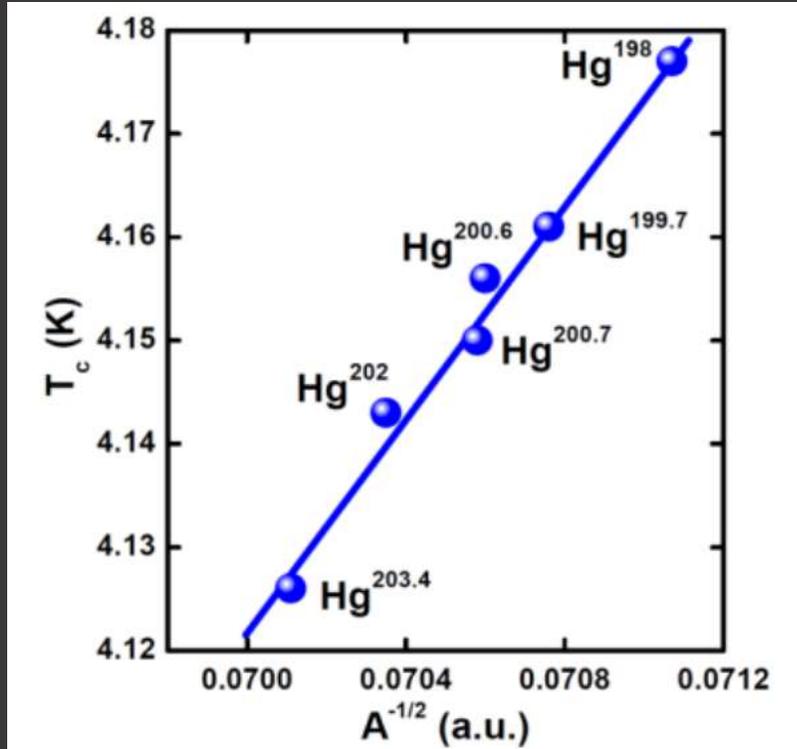
John Schrieffer
1931-2019

1957年，巴丁、库伯和施里弗建立超导微观理论——BCS理论，利用电子配对的思想给出了超导形成的微观图像。相关概念被粒子物理和宇宙学理论借用，催生了希格斯机制等。



1972年
诺贝尔奖

昂尼斯的物理直觉

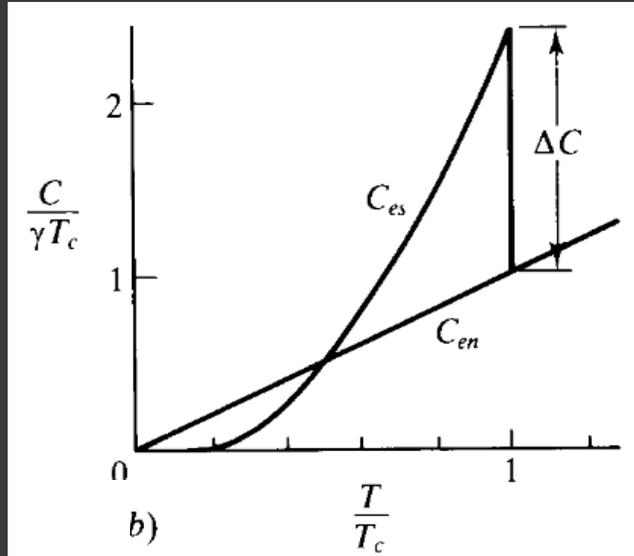


"to trace a possible difference in the vanishing point (of resistivity) of Pb and Uranium Pb (Pb-206 isotope). Regarding a difference of vanishing point temperature for isotopes, it seemed not impossible that the occurrence of the superconductivity might be influenced the mass of the nucleus"

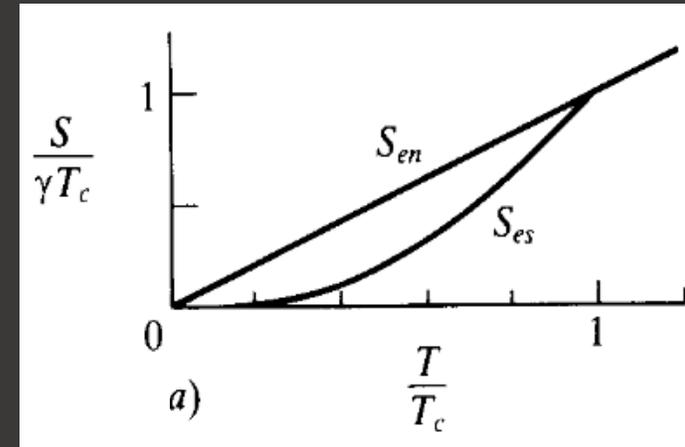
H. Kamerlingh Onnes and W. Tuyn, Comm. Leiden 160a (1922)

同位素效应

超导能隙



Schematic of the electronic specific heat of a superconductor



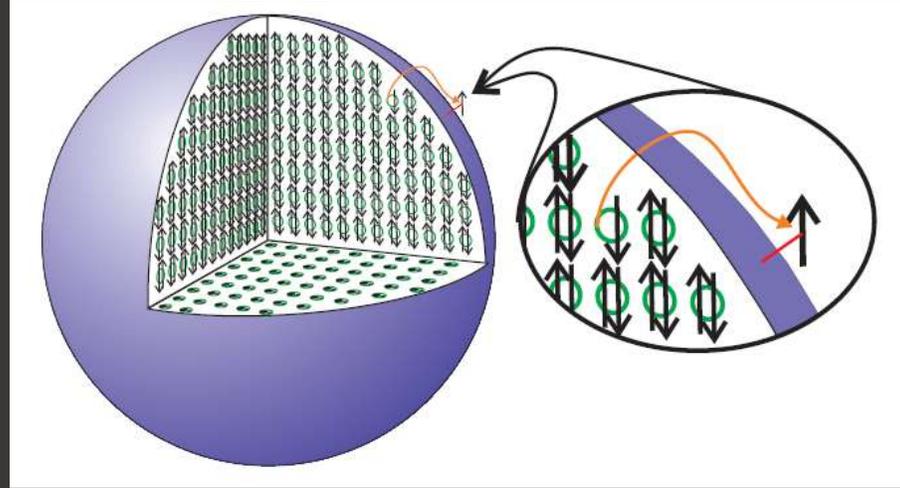
Schematic of the electronic entropy of a superconductor

- A sharp jump at T_C from the linear behavior of normal quasi-particle C_{en}
- Below T_C it has an exponential behavior $C_{es} \sim e^{-1.5T_c/T}$, so the system condenses into an ordered state with an energy gap per particle $\sim 1.5 k_B T_C$

Landau's Fermi Liquid theory (1957)

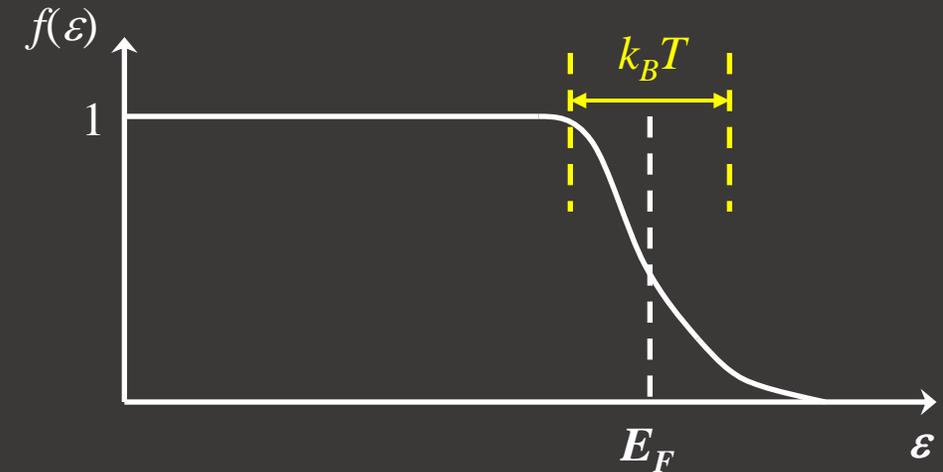


Lev D. Landau (1908-1968)



A particle-hole excitation:
an electron jumps from a
state below E_F to an empty
one above it

$$f(\epsilon) = \frac{1}{e^{(\epsilon - \mu)/kT} + 1}$$



electronic states spill over E_F

合作与坚持：超导微观机理的诞生



John Bardeen

1940年巴丁就开始研究超导，但因1941年巴丁参加了战时军事研究工作而中断。1950年超导体同位素效应的发现让巴丁再次注意到超导问题，他**意识到电-声子相互作用的重要性**。



Leon N. Cooper

巴丁急需一名理论家处理复杂的多体问题，便打电话给当时在普林斯顿的杨振宁，推荐了正在那里作博士后的库珀，1955年9月库珀来到UIUC，并最终提出**“库珀对”**的概念。



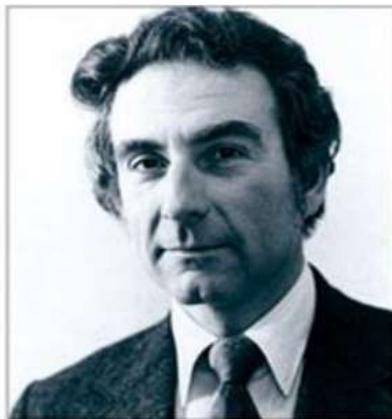
John R. Schrieffer

巴丁的研究生施里弗负责研究超导体的基态波函数，但进展并不顺利，希望换一个博士论文题目。巴丁力劝施里弗再坚持工作一个月，并终于在1957年1月底，凭借直觉和灵感，**顿悟出库珀对的超导基态波函数的可能形式**。

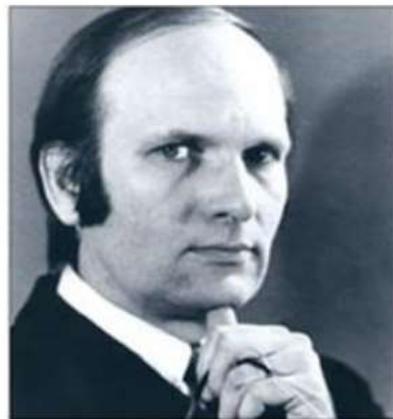
合作与坚持：超导微观机理的诞生



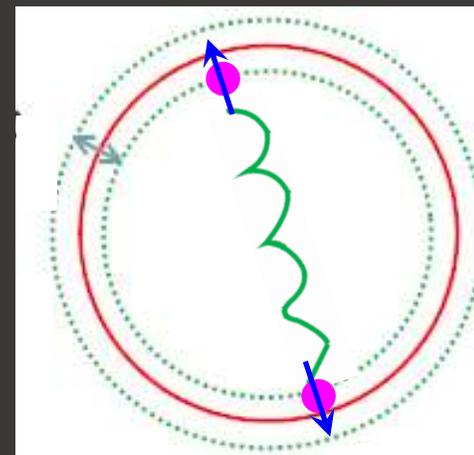
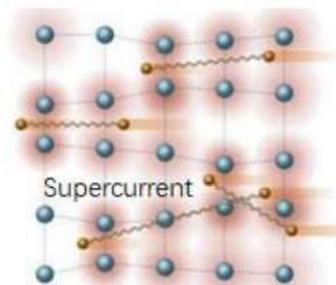
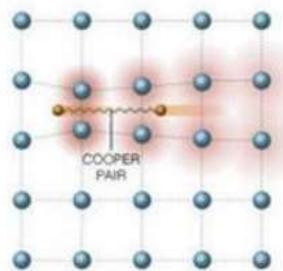
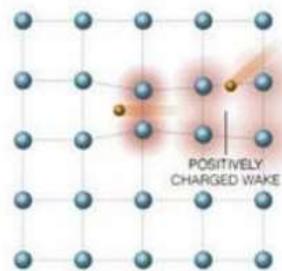
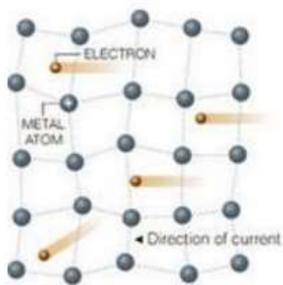
John Bardeen
1908-1991



Leon Cooper
1930-

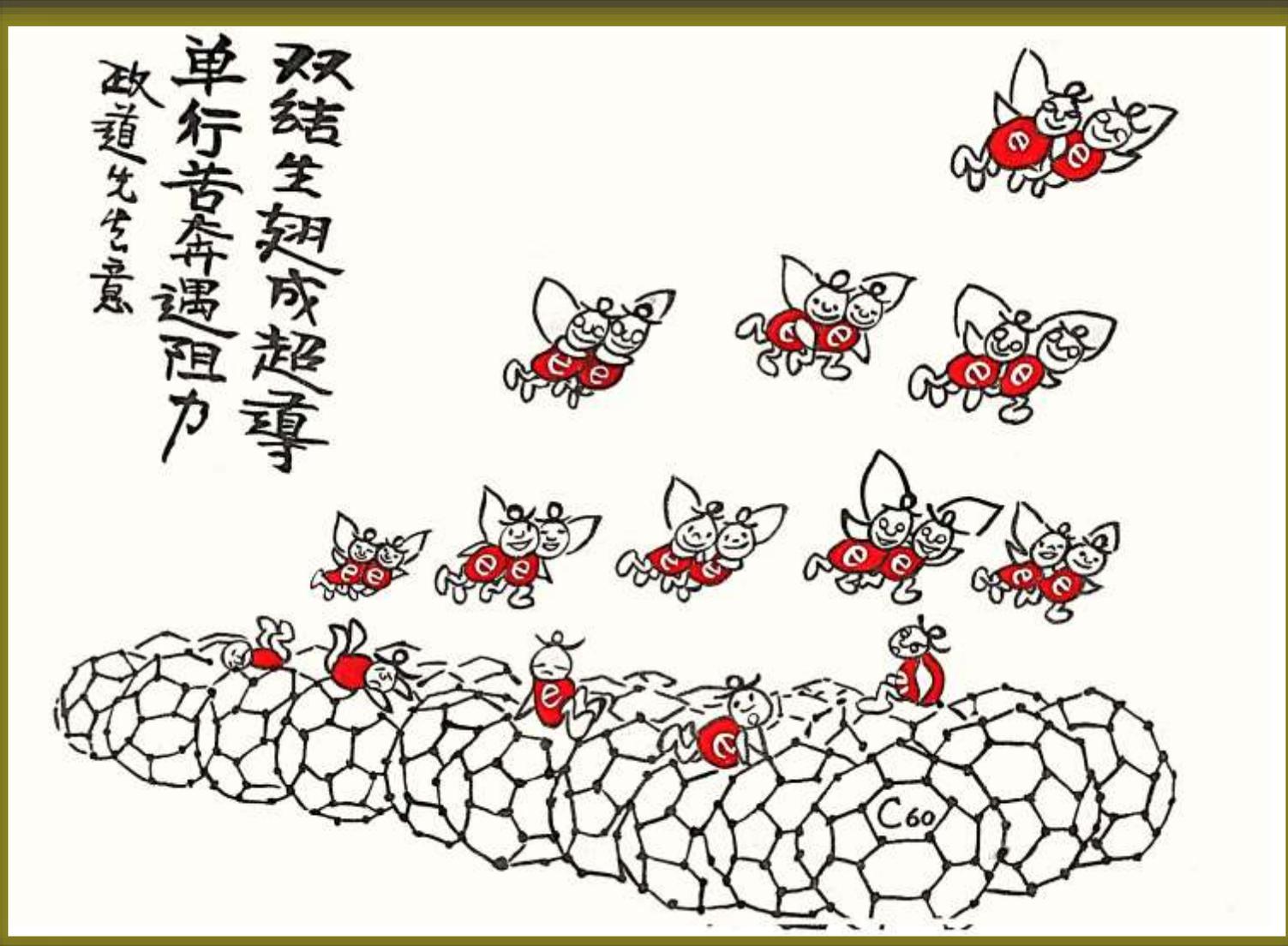


John Schrieffer
1931-2019



1957年12月，第一篇完整概述他们理论的文章发表在了《物理评论》上，这一理论即为 **Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 理论**。

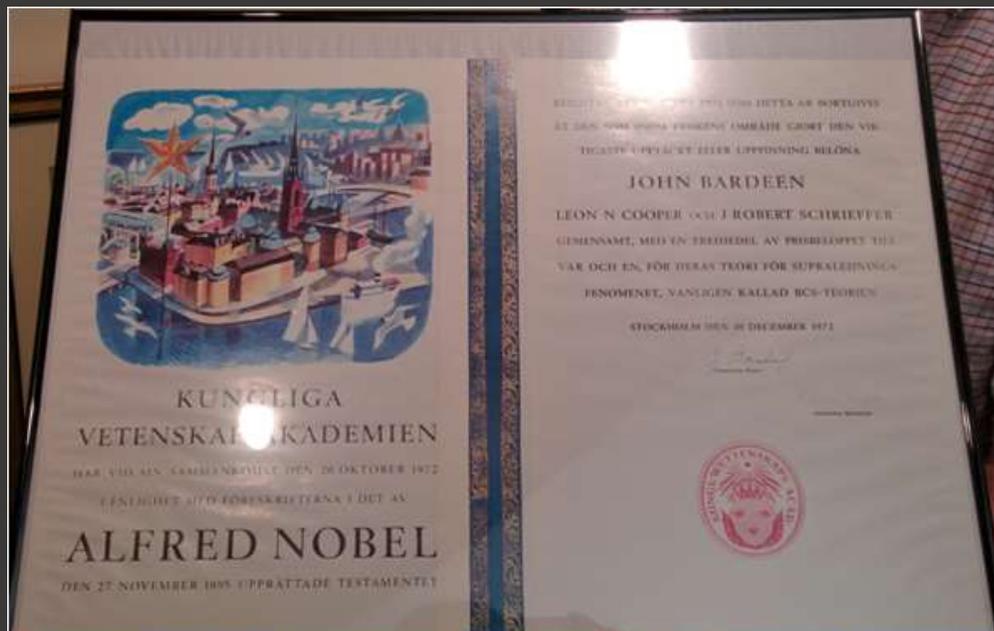
• 超导的微观机制



超导形成的 两个关键因素

1. 电子配对——超导能隙
2. 相位相干——超流密度

• 超导的微观解释



巴丁、布拉顿、肖克利



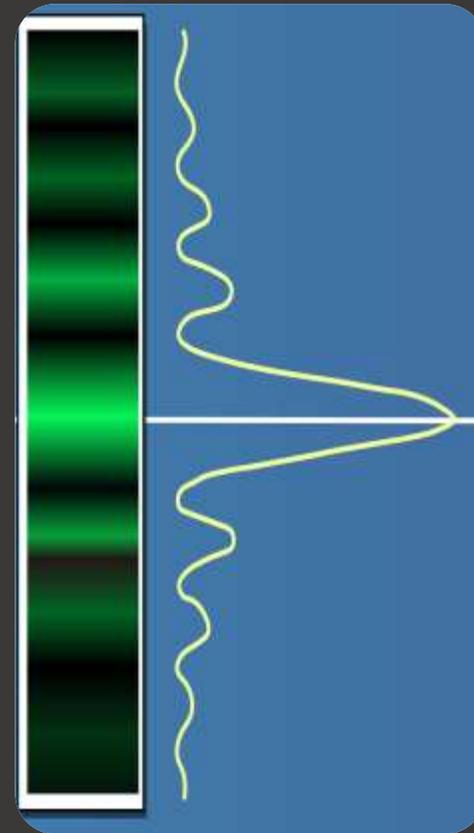
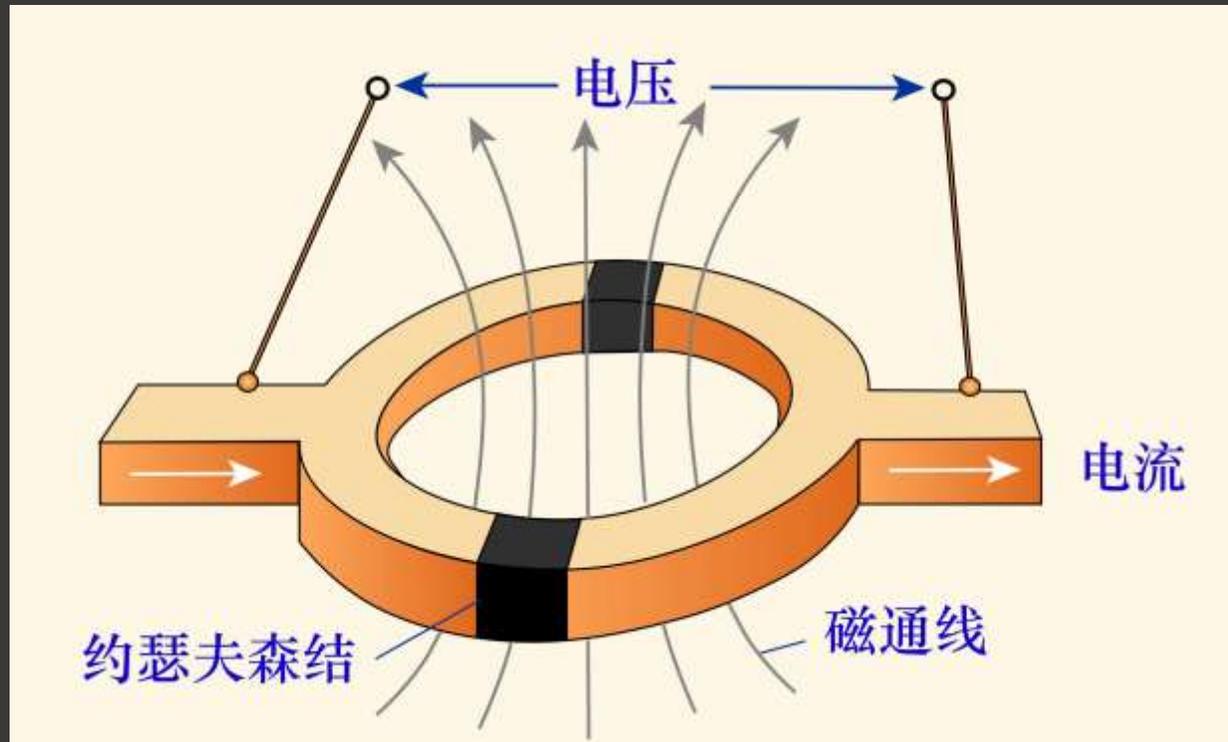
第一个晶体管

巴丁：世界上唯一获两次物理诺奖的人



1956年
诺贝尔奖

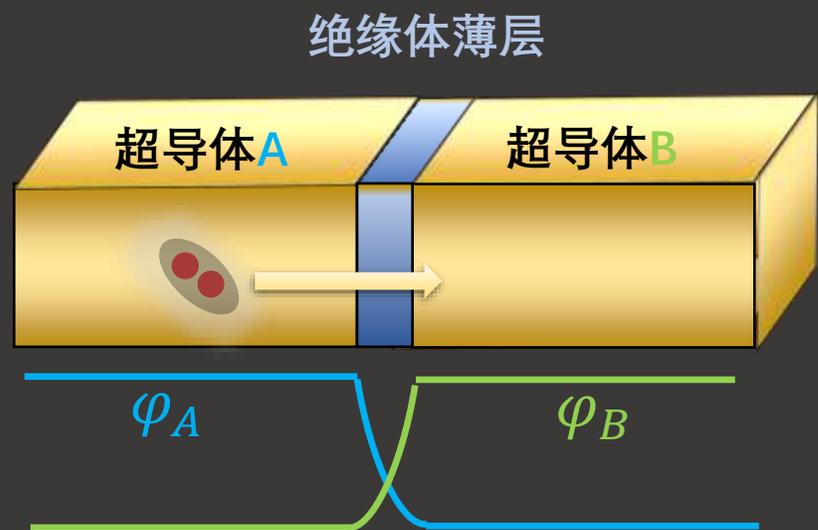
- 超导的约瑟夫森效应



超导是一种“宏观量子现象”：超导内部电子具有一个整体的相位，当两个不同超导体库珀对隧穿时，会发生量子干涉现象，是超导量子应用的基础。

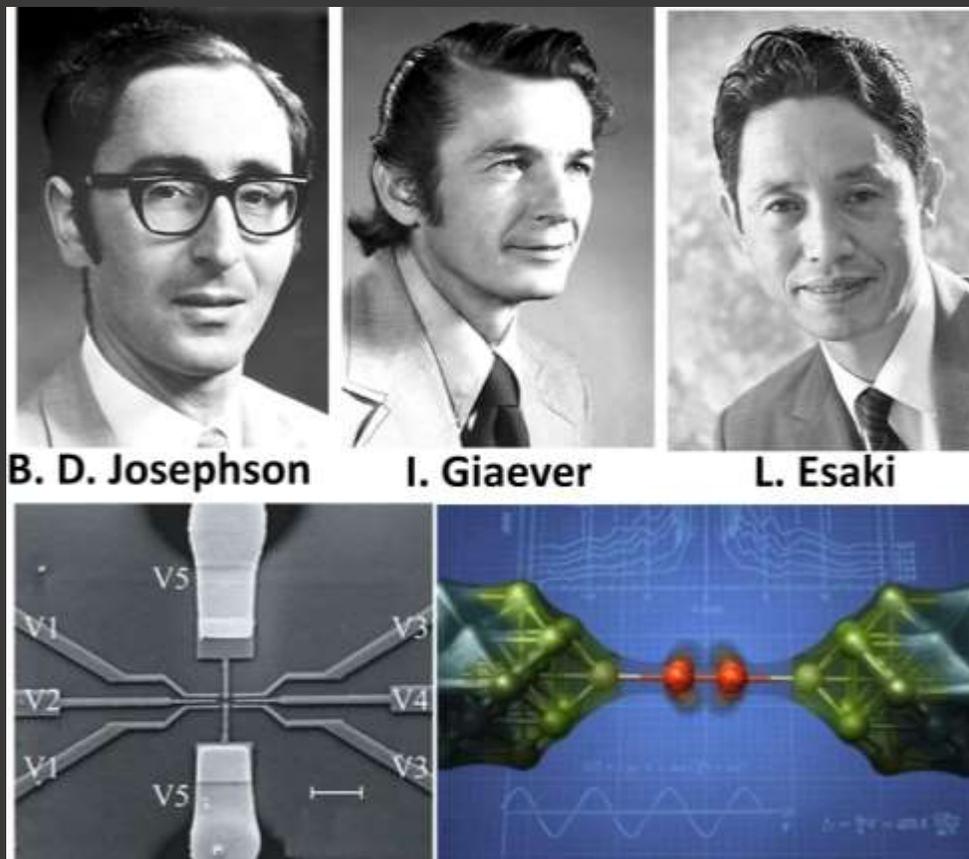
(超导电子学, 信息材料)

• 超导的约瑟夫森效应



1962年，约瑟夫森预言，当两个超导体之间设置一个绝缘薄层时，电子对可以穿过绝缘体从一个超导体到达另一个超导体：当结两端电压为零时，存在一股很小的直流超导电流；当电压不为零时，存在一个交变的超导电流。

1963年，安德森和罗厄尔在实验中观察到了零电压超电流，即直流约瑟夫森效应。



1960-1962 年
超导隧道效应的理论与实验



1973年
诺贝尔奖

• 百年经久不衰的超导研究，乃充满活力！

1913



H. K. Onnes



J. Bardeen

1972



L. N. Cooper



J. R. Schrieffer

1973



B.D. Josephson



I. Giaever

1987



K.A. Müller



J. G. Bednorz

2003



V. L. Ginzburg



A. A. Abrikosov



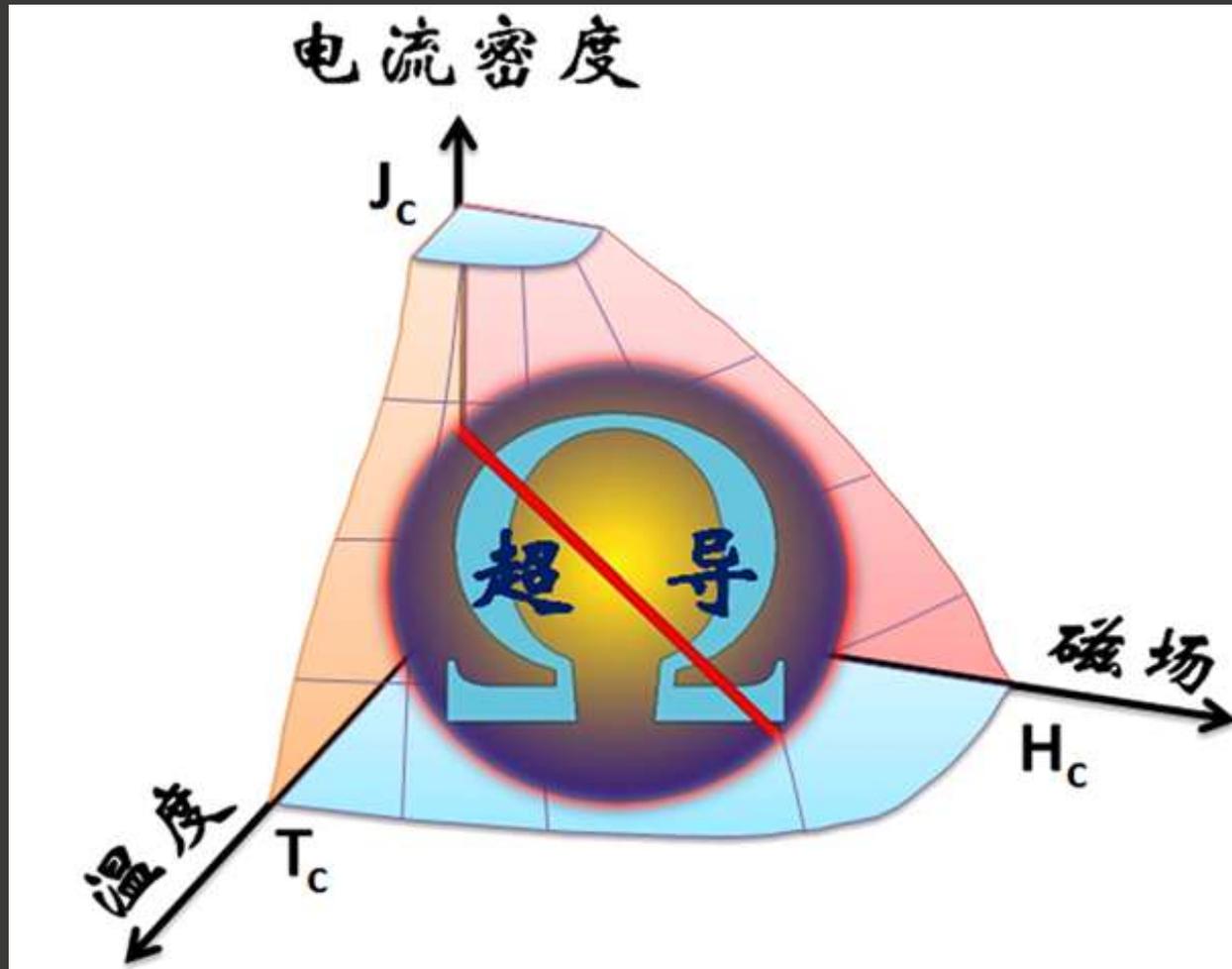
从1913-2003年，超导研究一共有

10人 5次

获诺贝尔物理学奖

高温超导材料的突破与发展

- 超导材料应用的关键要素



超导材料的应用受限于它的“临界曲面”，由三个临界参数决定：

临界温度 T_c

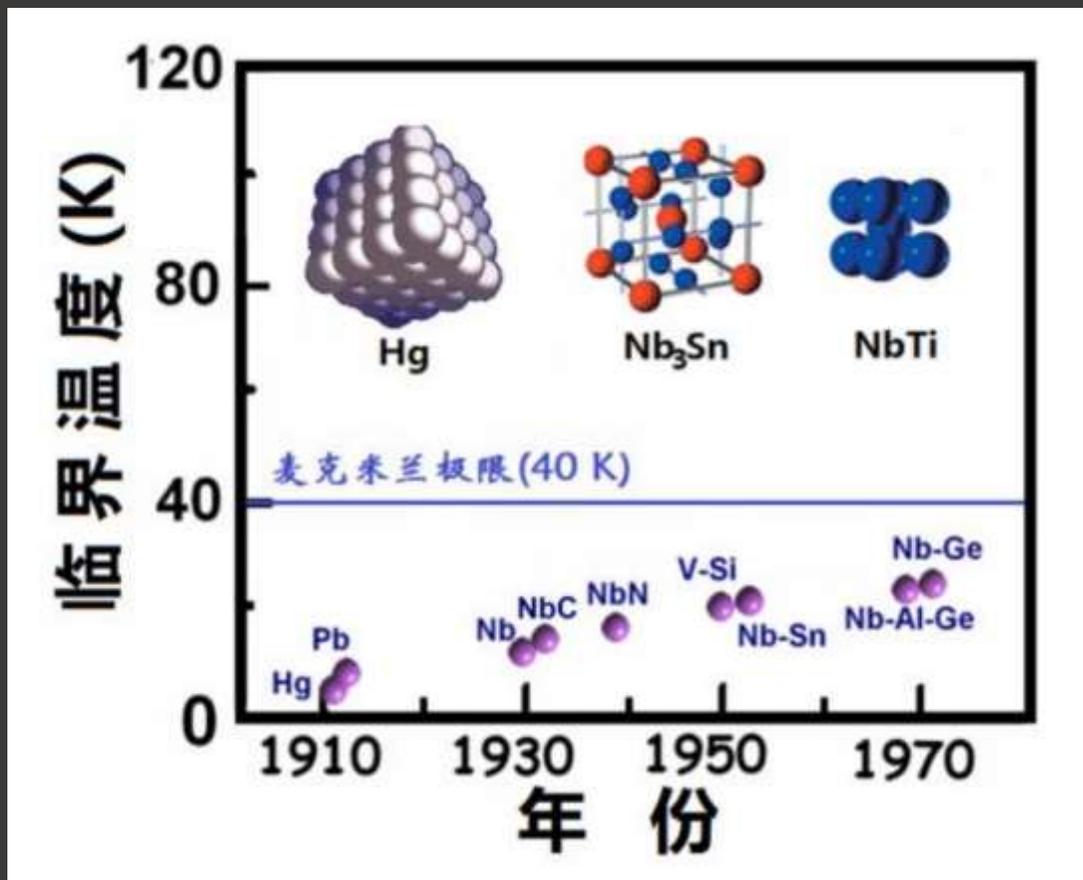
临界磁场 H_c

临界电流密度 J_c

即使电阻为零，电流和磁场也不能无穷大，而是存在上限！

“好用的”超导材料必须“三高” (T_c , H_{c2} , J_c)

• 超导温度的“天花板”



麦克-米兰极限 (40 K)



$$T_c \sim (\theta_D/1.2) \exp\left[-\frac{1.04(1 + \lambda)}{\lambda - \mu^*(1 + 0.62\lambda)}\right]$$

θ_D : 德拜温度 - 晶格振动最高频率

λ : 耦合强度 - 电子和晶格相互作用

μ^* : 库仑赝势 - 屏蔽作用库仑势

• 超导材料探索的经验规律

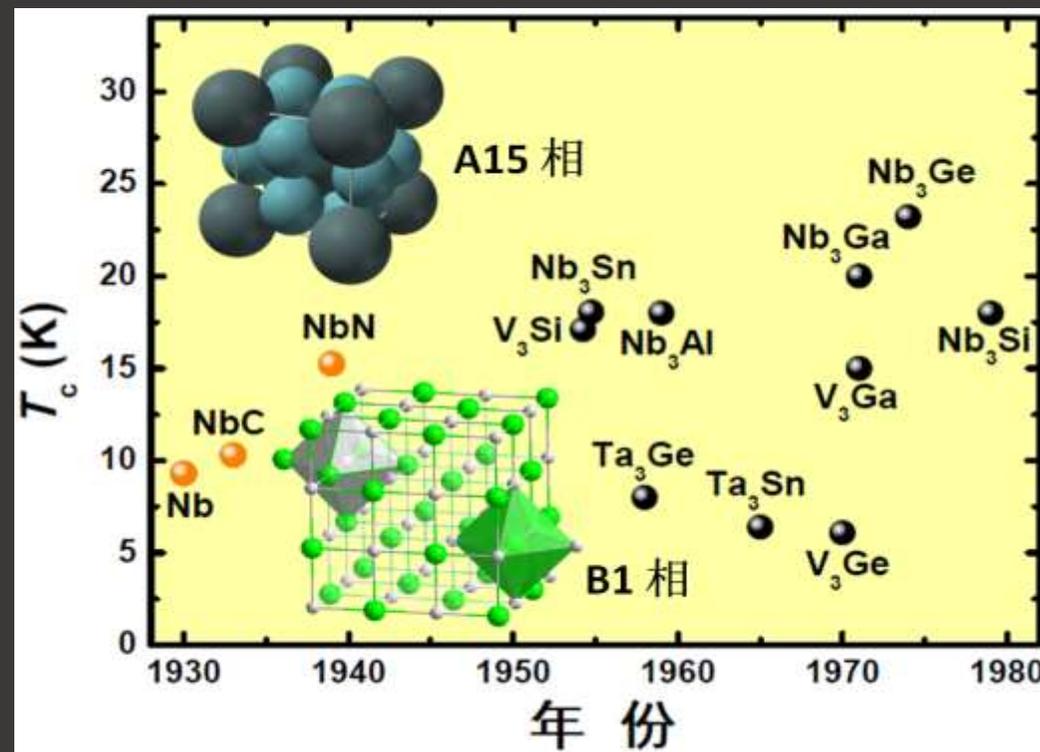


Bernd Matthias

探索新超导体黄金六则：

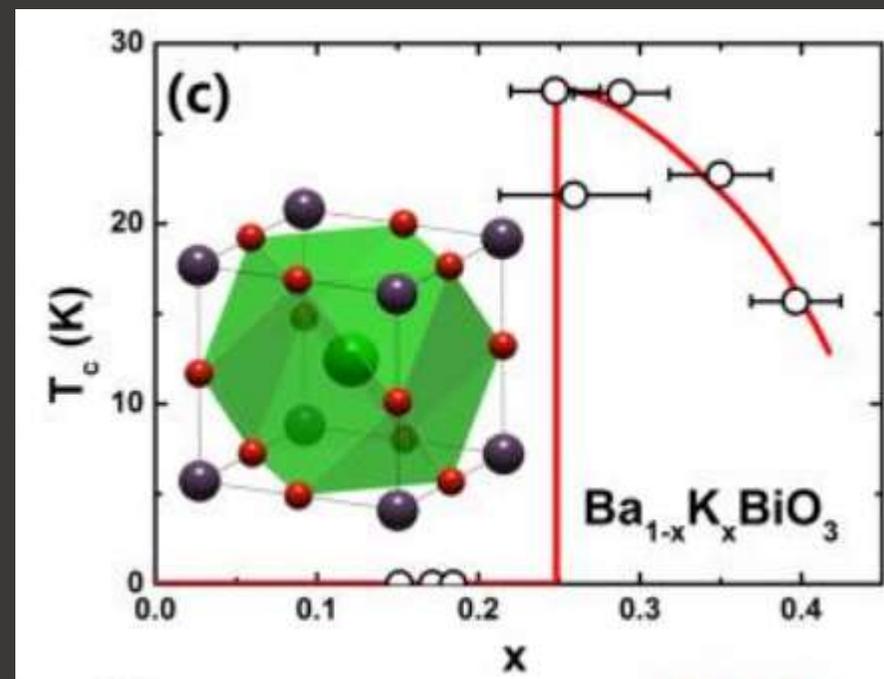
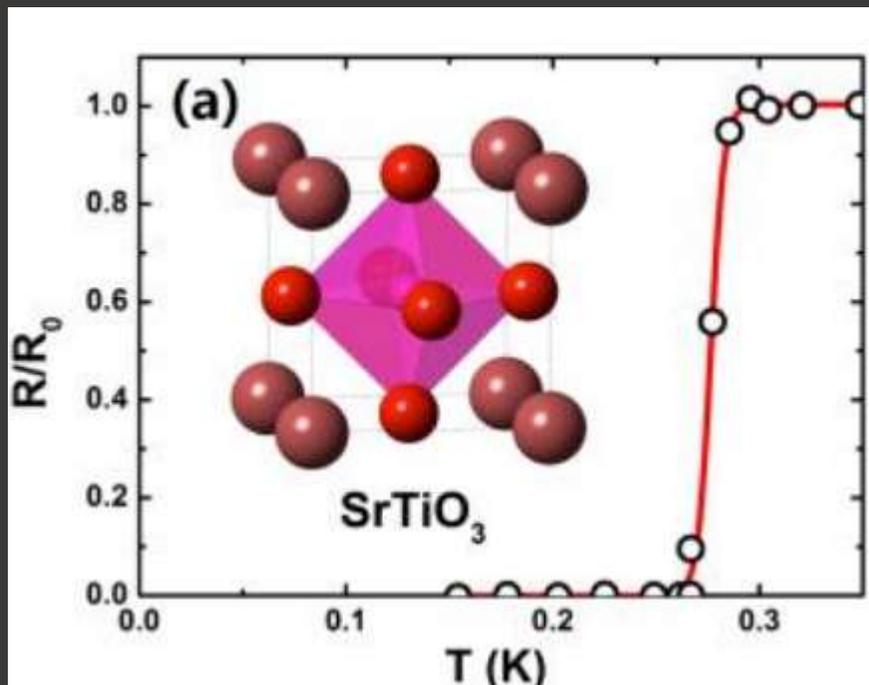
1. 高对称性、最好立方结构；
2. 高电子态密度(浓度)；
3. 不含氧元素；
4. 没有磁性；
5. 非绝缘体；
6. 不要信理论学家；

马蒂亚斯定律



超导强电应用的关键材料

- “离经叛道”的超导材料

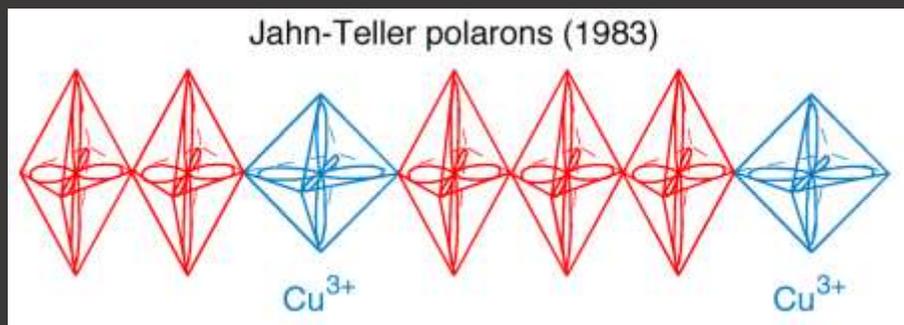


从绝缘体和氧化物中寻找超导电性打开了一个探索超导体的新大门

突破传统，解放思想

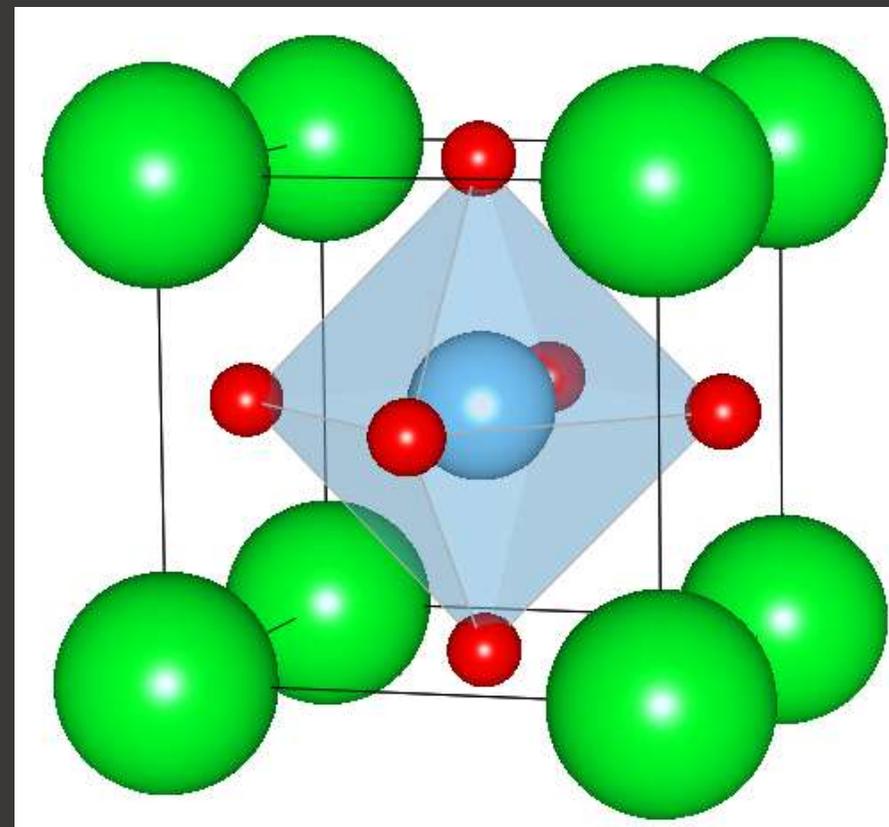


K. Alex Müller

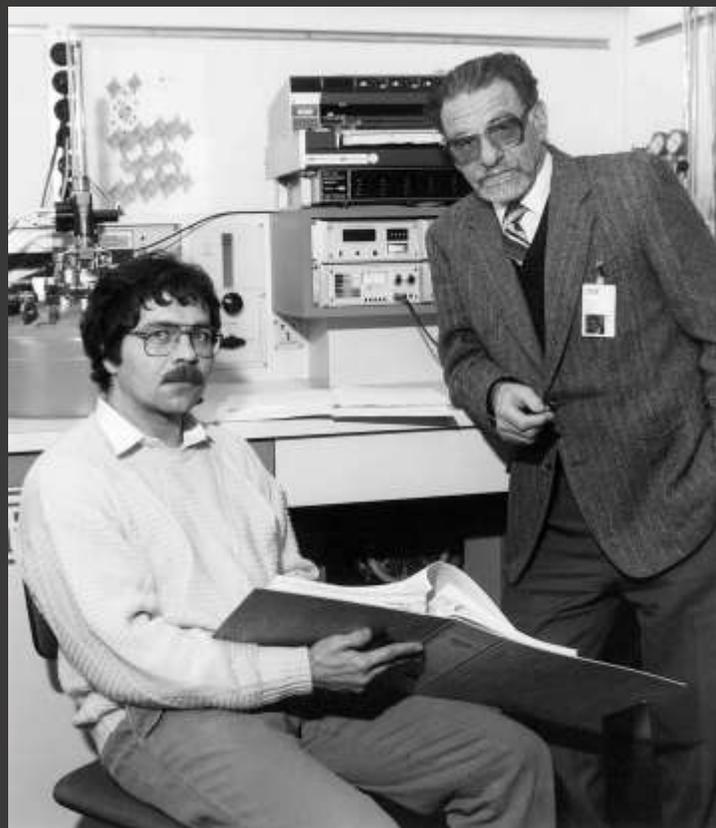


极化子

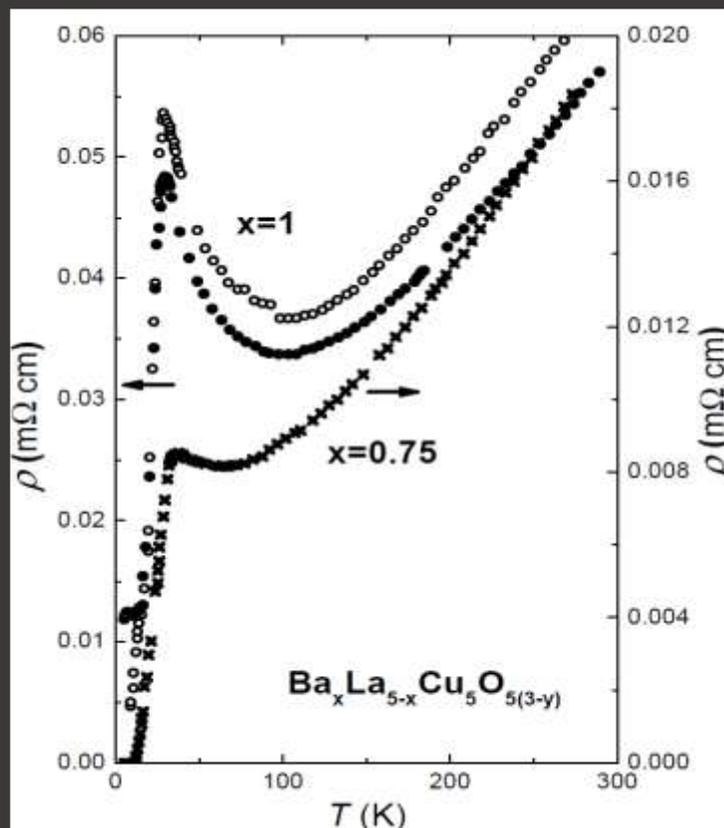
钙钛矿结构



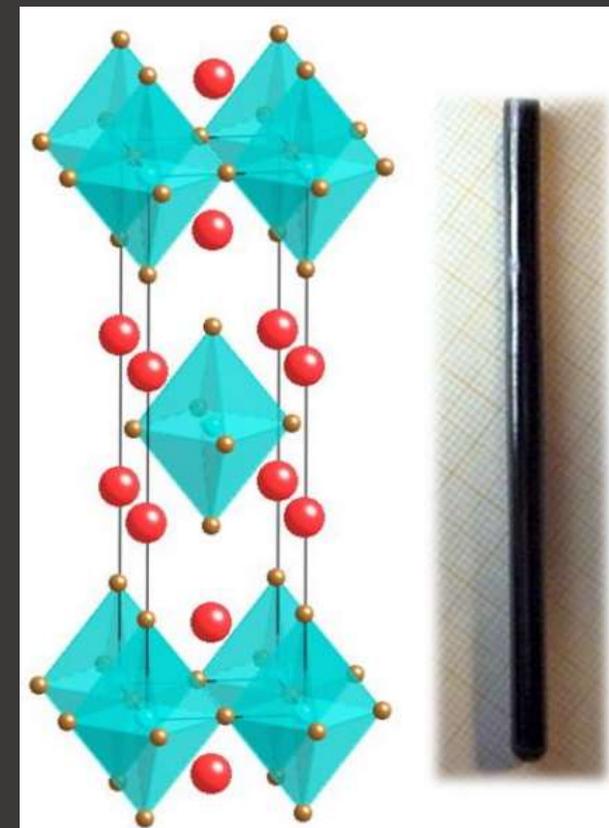
• 高温超导材料的发现



1986年
柏诺兹和缪勒
发现Ba-La-Cu-O高温超导
 $T_c = 35\text{ K}$

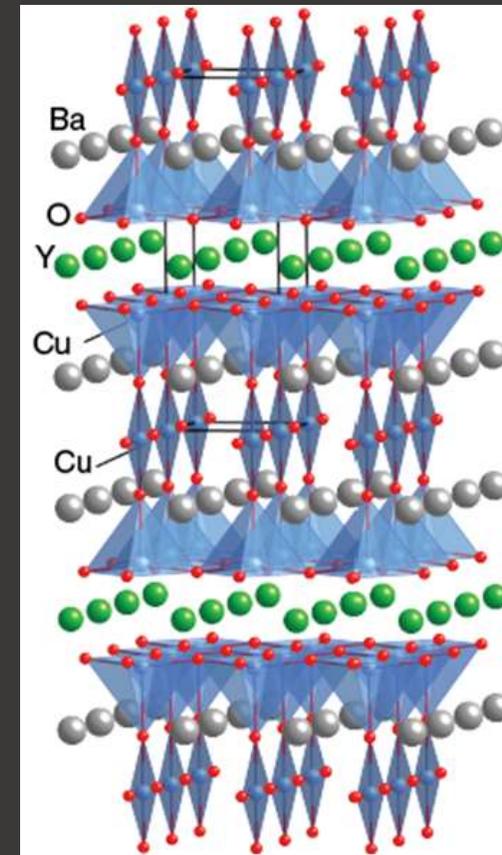
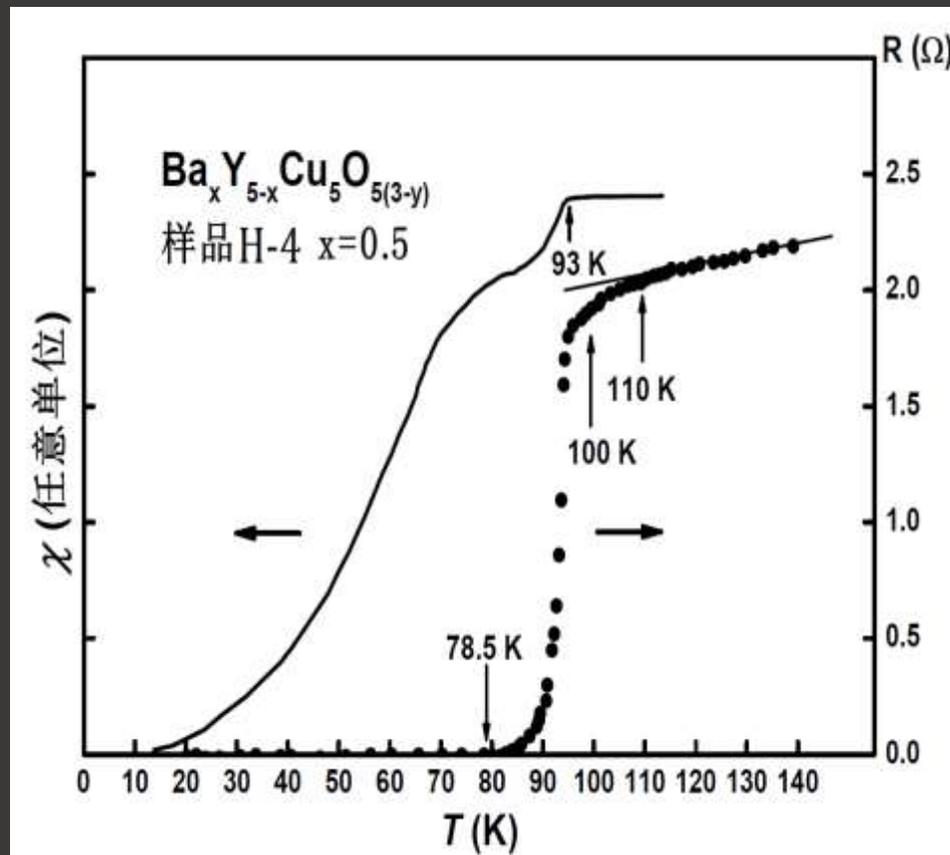


1987年
诺贝尔奖



铜氧化物高温超
导体晶体结构

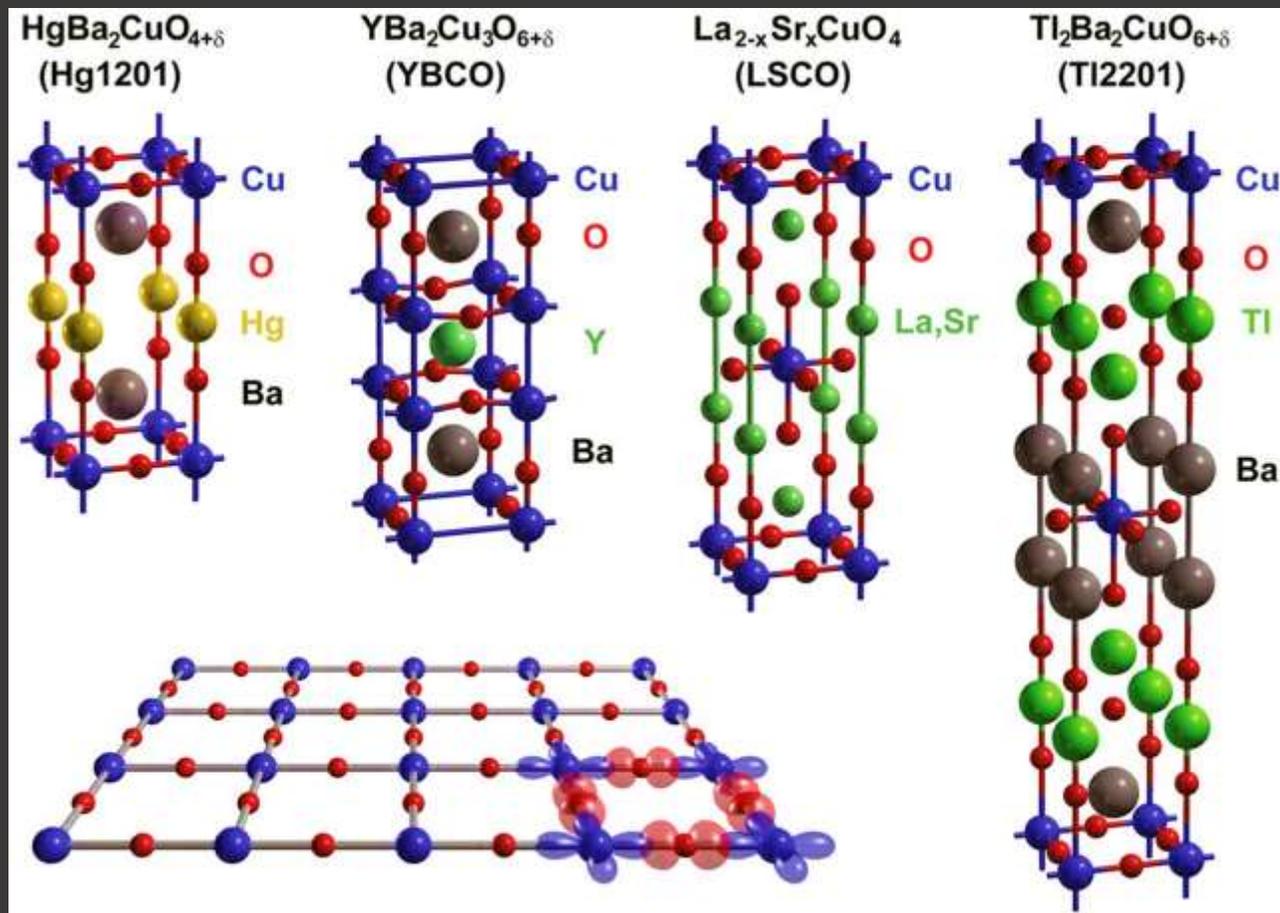
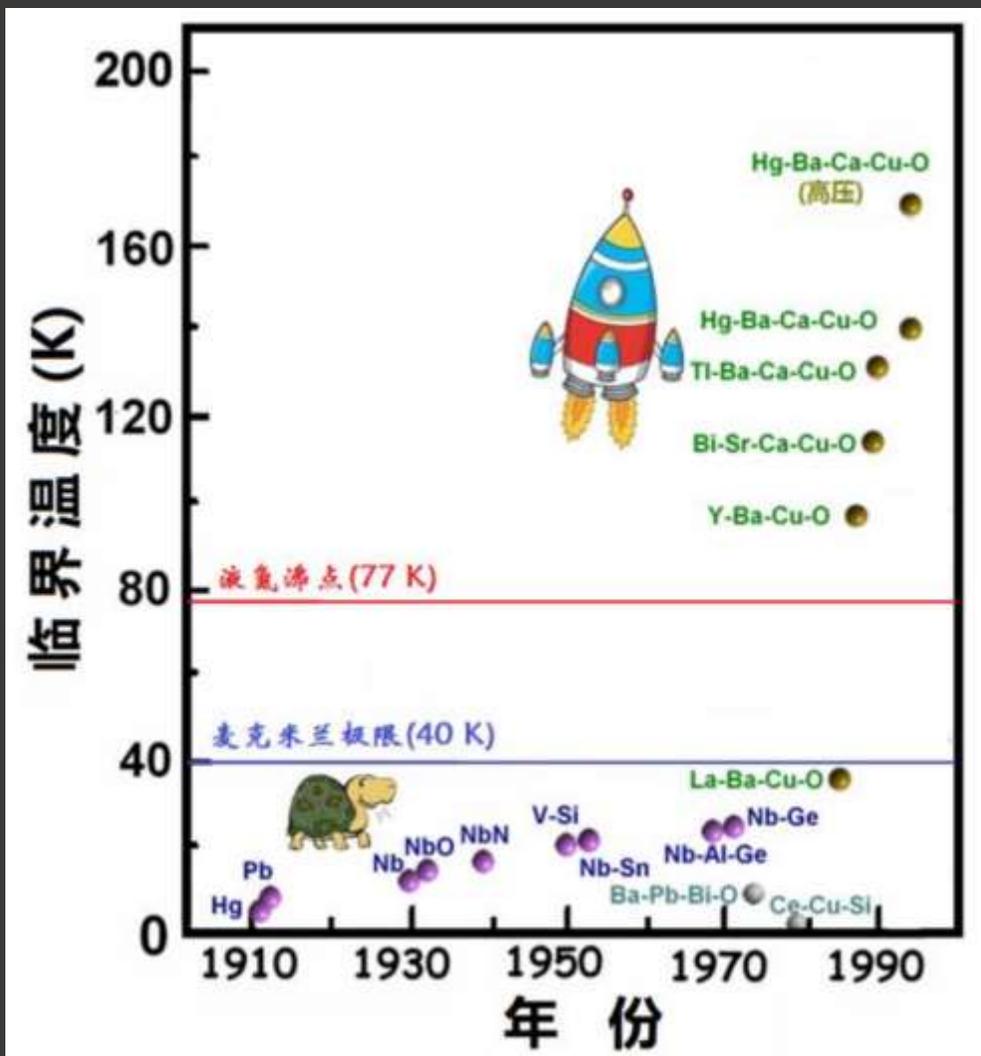
突破液氮温区的超导材料



超导临界温度突破液氮温度

液氮温区超导体晶体结构

铜氧化物高温超导家族



铜氧化物高温超导：都具有铜氧二维平面结构
最高超导转变温度 (常压)：135K (-138 °C)

“Woodstock of Physics”



“Woodstock of Physics”

1987, APS March Meeting in NYC

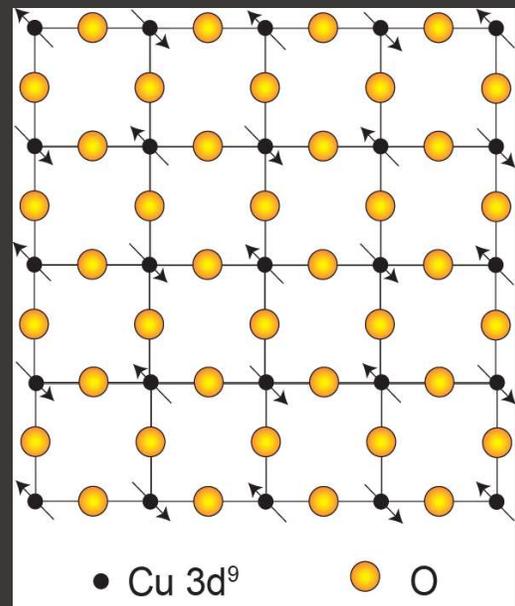
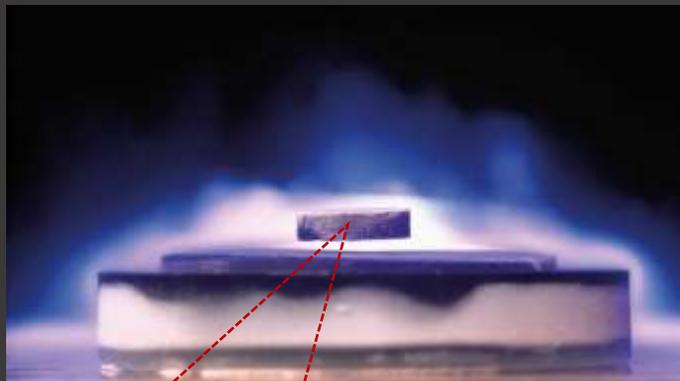


“Woodstock Festival of Rock&Roll”

1969, Woodstock, New York

The Society added a last-minute session to their annual meeting to discuss the new research in superconductors. The session was scheduled to start at 7:30 PM in the Sutton ballroom of the New York Hilton hotel, but excited scientists started lining up at 5:30. Nearly 2,000 scientists tried to squeeze into the ballroom. Those who could not find a seat filled the aisles or watched outside the room on television monitors. The session ended at 3:15 AM, but many lingered until dawn to discuss the presentations.

• 高温超导的机理研究



- P. W. Anderson:
It is pretty much a solved problem by his RVB theory.



- R. B. Laughlin:
It is such a complicated problem that we will never be able to solve it.



- Shou-Cheng Zhang:
Is there really any big problem to be solved?

- Others:

Yes, there are big questions (such as the super high T_C values). They remain to be the most mysterious phenomena in modern physics. We believe that they will be eventually solved beautifully, just like what we have done for conventional BCS superconductivity.

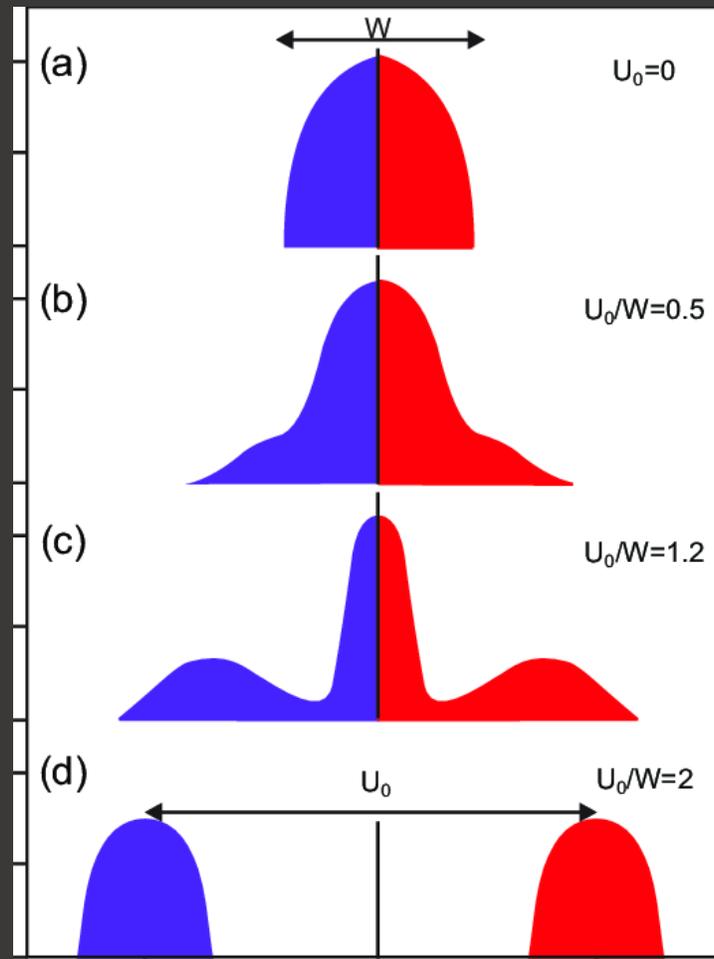
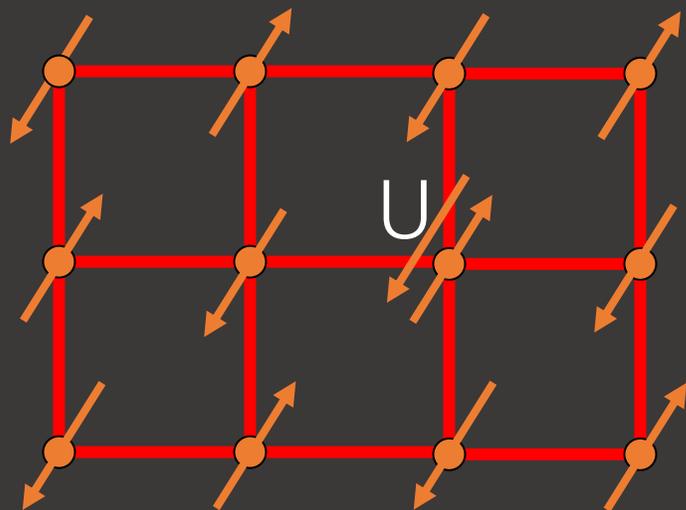


12th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors

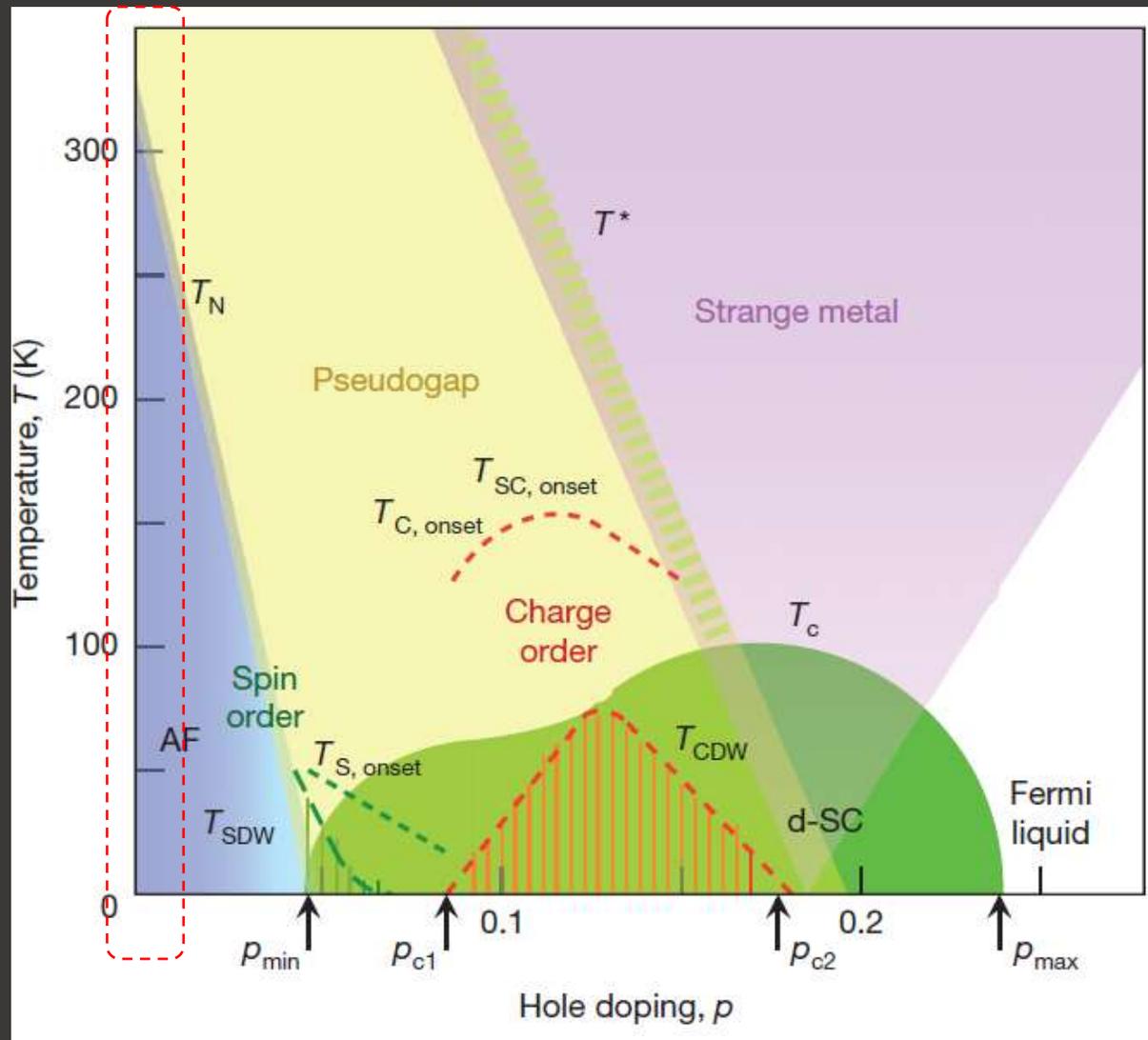
August 19-24, 2018 Beijing · China



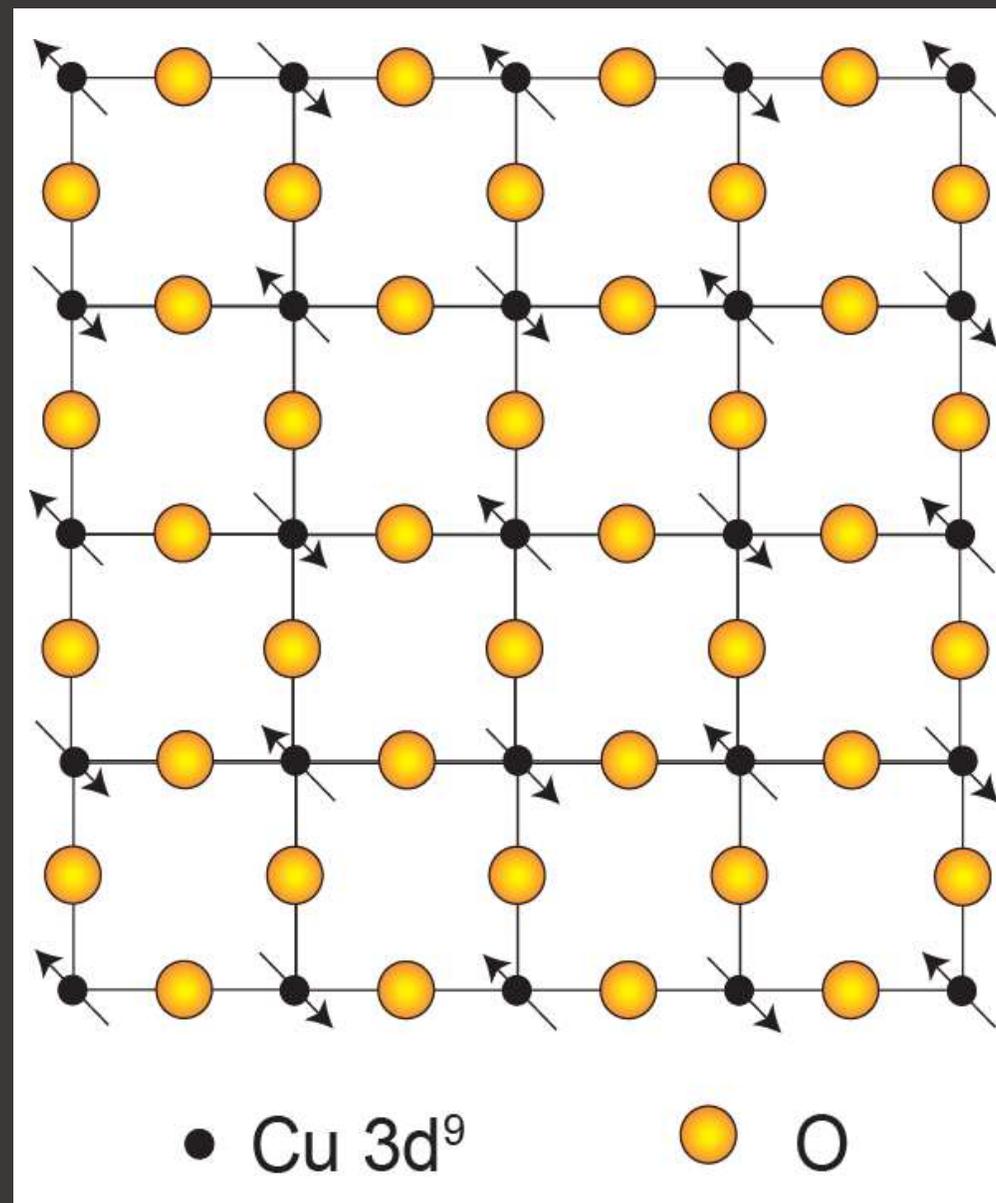
- 高温超导的机理研究



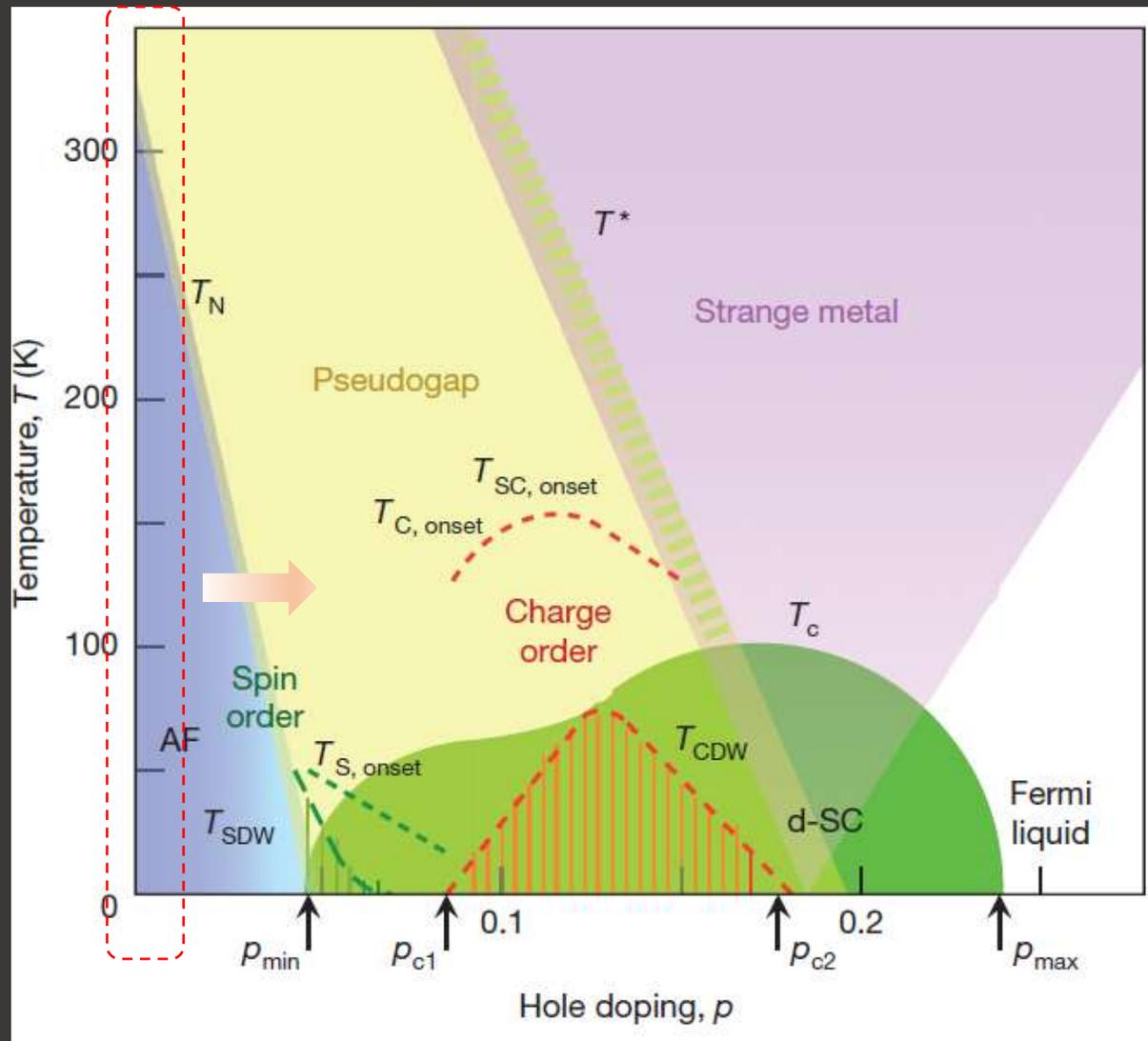
• 高温超导的机理研究



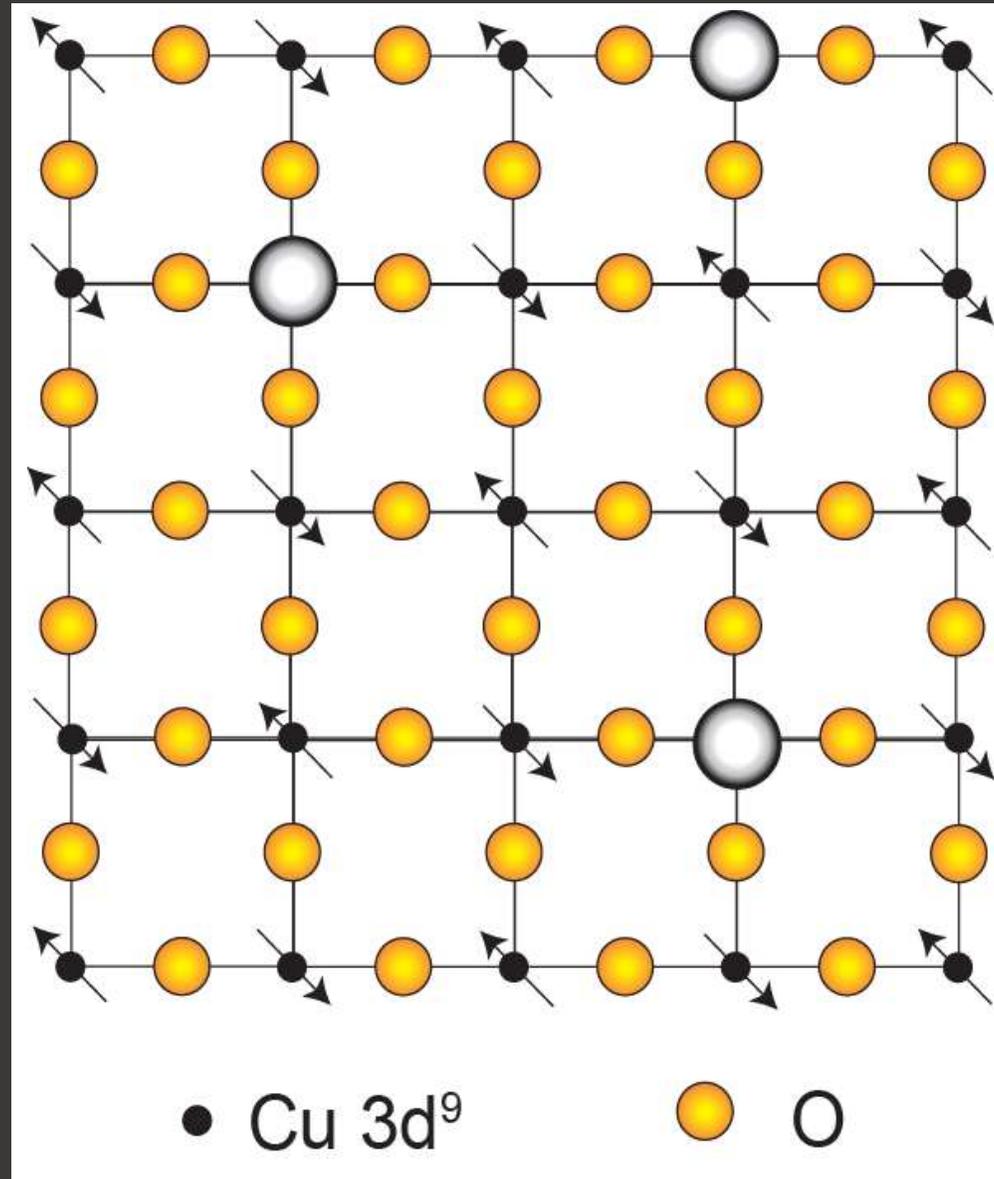
B. Keimer *et al.*, Nature **518**, 179(2015)



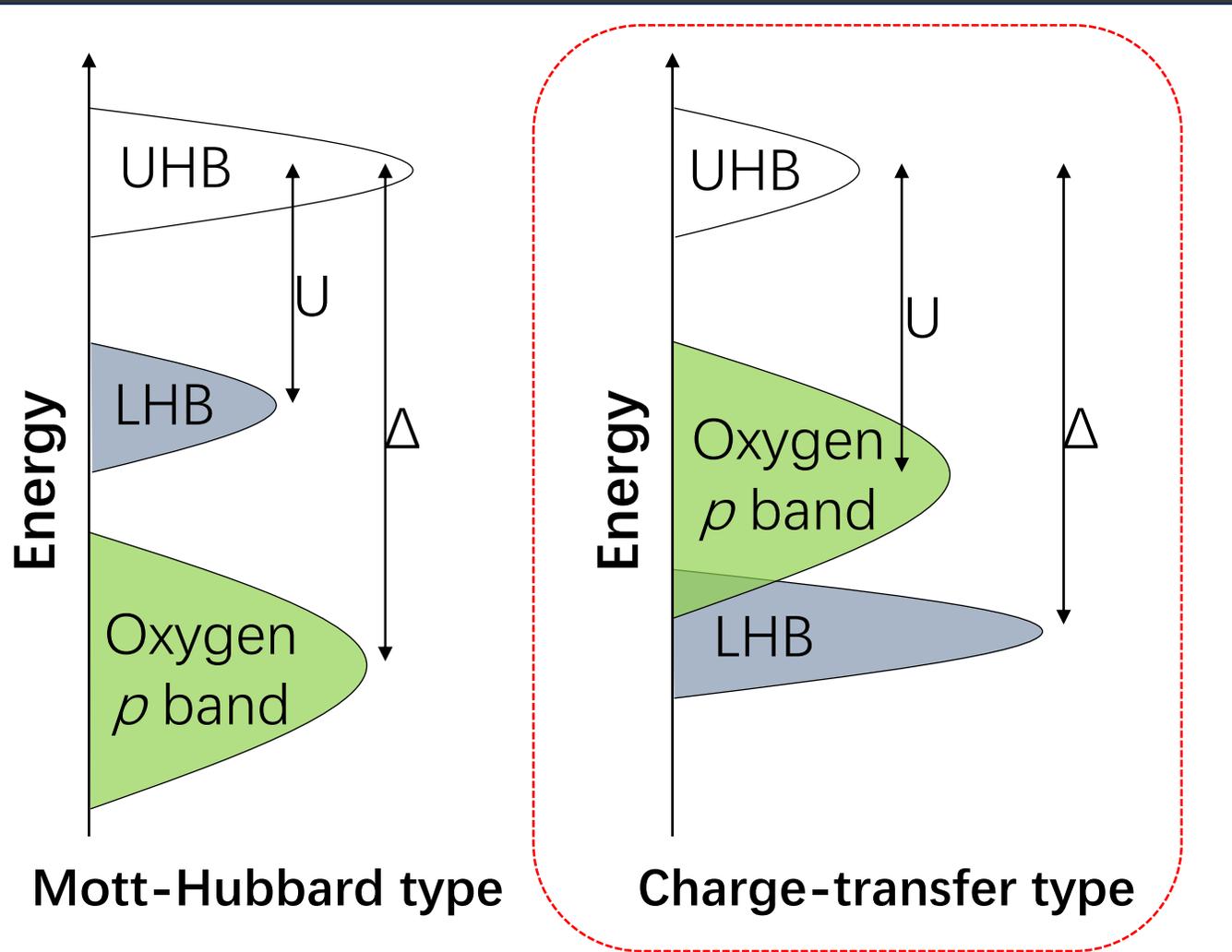
• 高温超导的机理研究



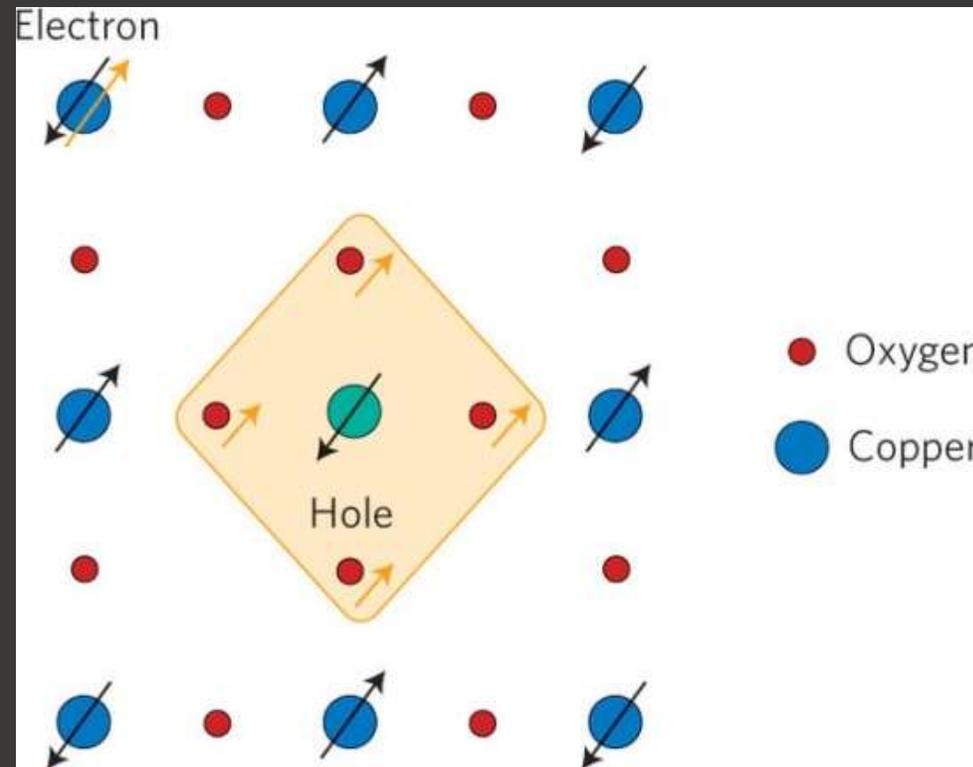
B. Keimer *et al.*, Nature **518**, 179(2015)



• 高温超导的机理研究



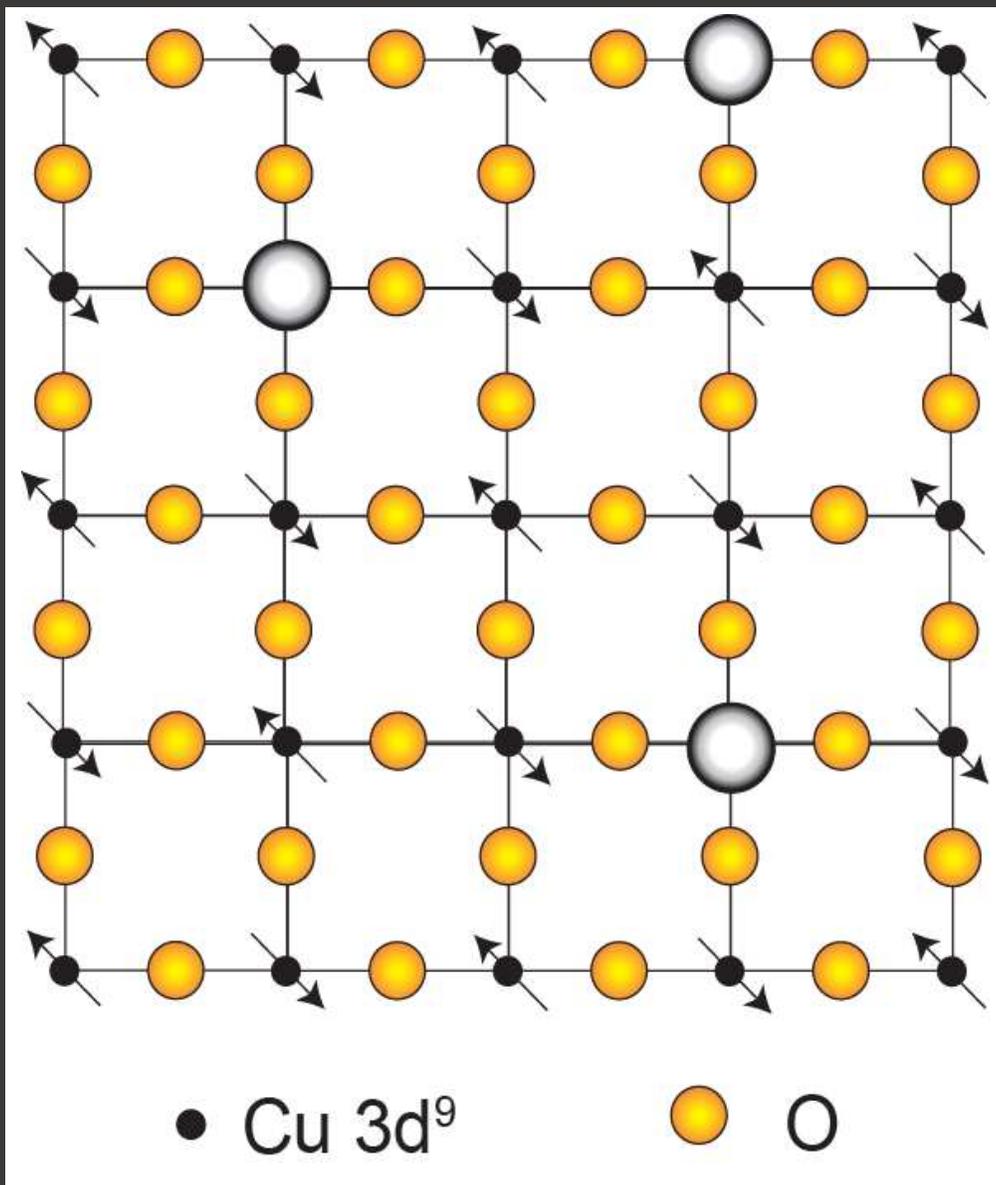
Hole doping at oxygen sites



Zhang-Rice singlet

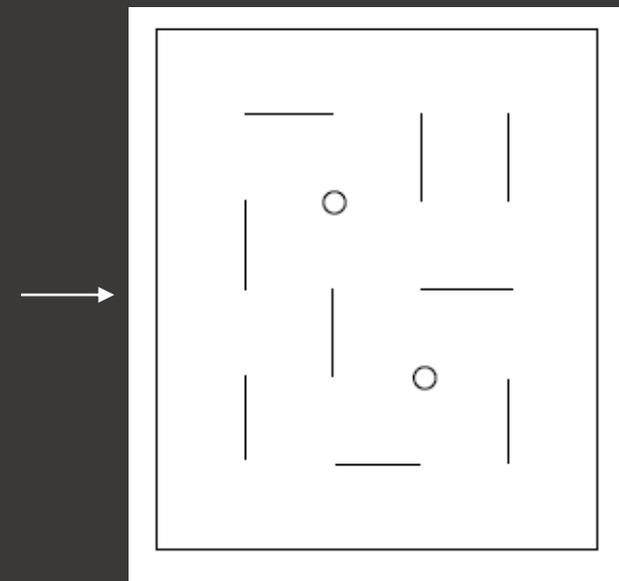
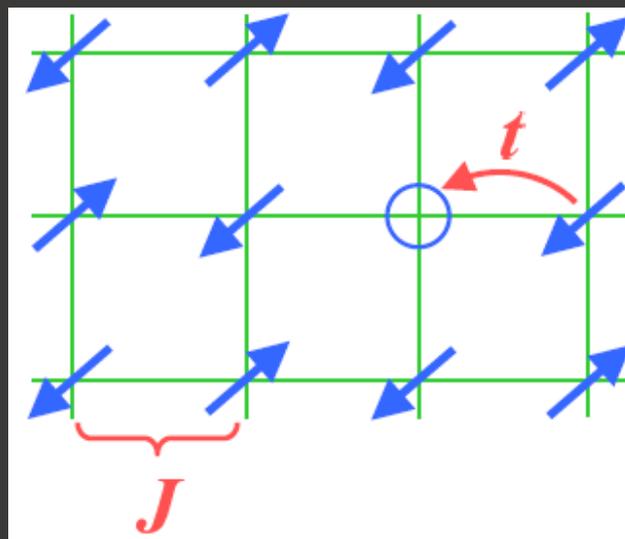
F. C. Zhang and T. M. Rice,
Phys. Rev. B 37, 3759 (1988)

• 高温超导的机理研究



“Doping a Mott Insulator: Physics of High Temperature Superconductivity”

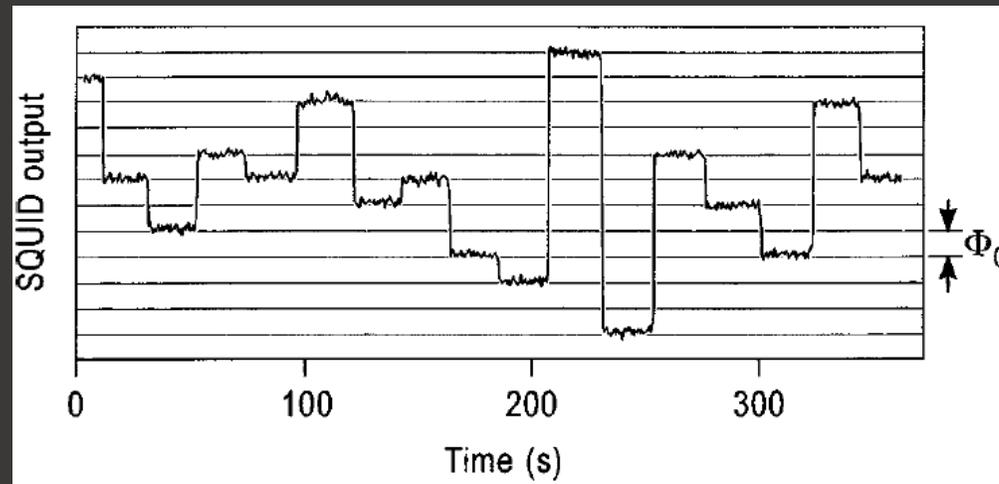
P. A. Lee *et al.*, Rev. Mod. Phys. 78, 17 (2004)



Short-range RVB state

The superconducting state

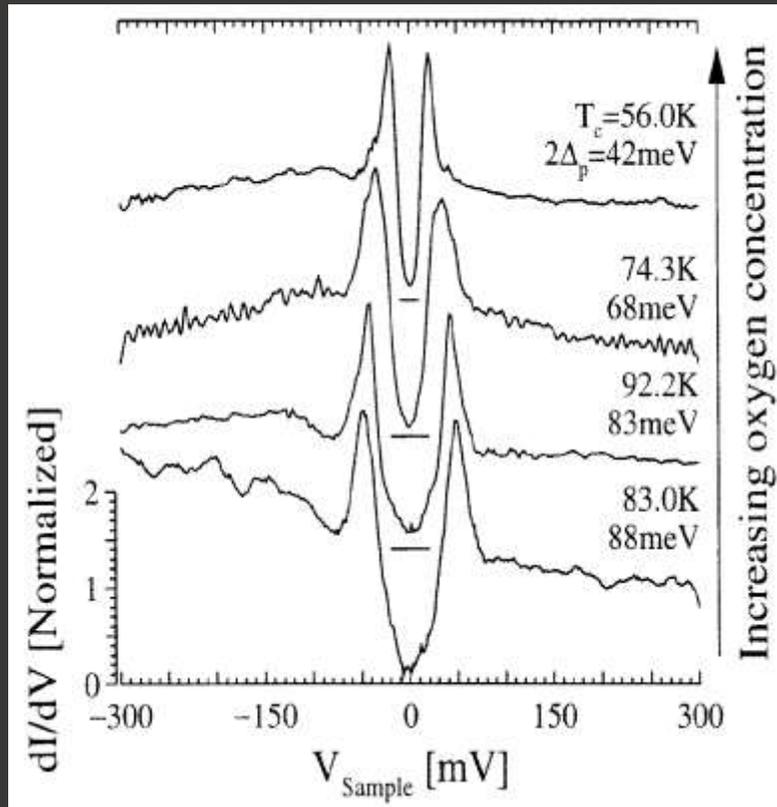
- Is the superconducting state similar to the conventional superconductors?
- Do electrons form Cooper pairs in the superconducting state?
- How to test this experimentally?



- SQUID measurements show that magnetic flux threading through YBCO ring is quantized into flux quantum $\Phi_0 = h/2e$, implying that the charge carriers of high T_C superconductors are electron pairs (Gough et al., Nature 1987).

The energy gap

- Does the superconducting state have an energy gap? How big is it? What is its relation to the transition temperature T_C ?
- How to measure this experimentally?



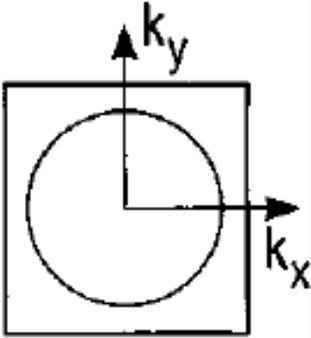
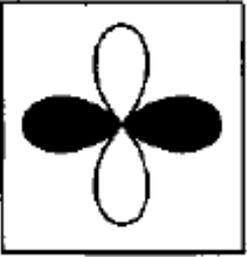
- Scanning tunneling spectroscopy at 4.2K on cleaved Bi-2212 crystals with different dopings (Renner et al.)
- “V”-shaped energy gap $2\Delta \sim 40 - 88$ meV defined by the two sharp peaks
- The amplitude of the gap increases with decreasing hole density
- The ratio $2\Delta / k_B T_C \sim 10$, much larger than the BCS ratio

The pairing symmetry

- One of the most remarkable discoveries in high T_C superconductivity so far is its d -wave pairing symmetry.
- Pairing symmetry refers to the symmetry of the Cooper pair wavefunction, which can be roughly identified as the complex superconducting order parameter $\Psi(\mathbf{r}) = |\Psi(\mathbf{r})| e^{i\theta}$ introduced by Ginzburg and Landau (1950).
- As far as pairing symmetry is concerned, the energy gap $\Delta(\mathbf{r})$ can be regarded as the microscopic identity and measurable quantity of the order parameter.
- Pairing symmetry has important implications to the low energy excitations and the mechanism of high T_C superconductivity.
- Therefore it was one of the most crucial issues to be clarified, and it was resolved by a series of beautiful experiments.

s-wave vs. d-wave

- It was known quite early on that Cooper pairs in cuprates form spin singlet, so the spatial symmetry of Cooper pairs can only be *s* wave or *d* wave. WHY?

Order parameter basis function	constant	x^2-y^2
Wave function name	s-wave	$d_{x^2-y^2}$
Schematic representation of $\Delta(k)$ in B.Z.		

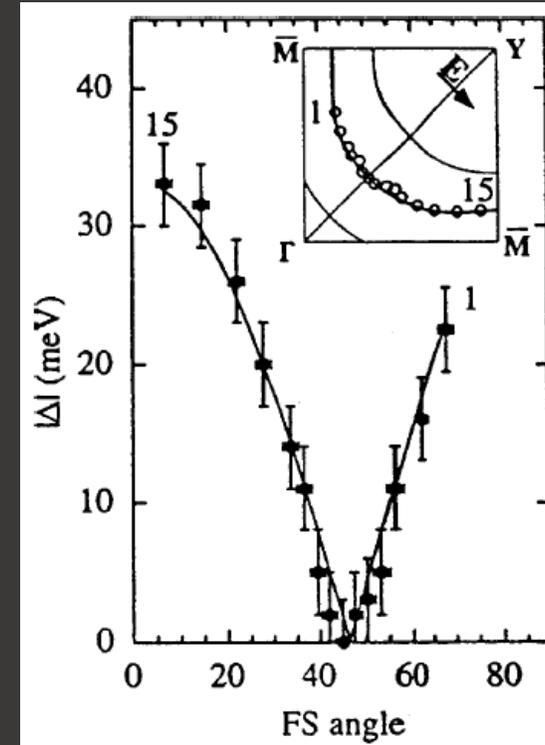
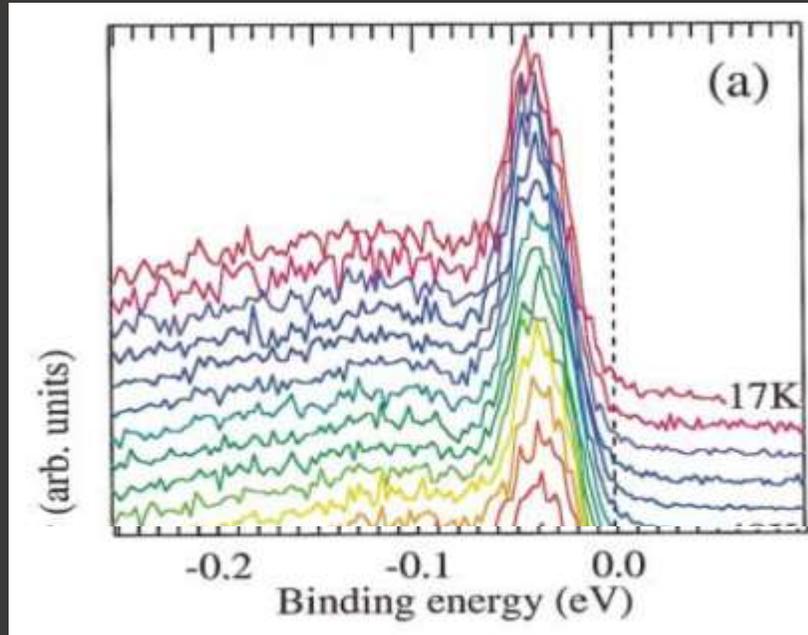
Comparison between *s* wave or *d* wave

- *s* wave: $\Delta(k) = \text{constant}$.
The gap function is totally isotropic.
- $d_{x^2-y^2}$ wave:
 $\Delta d_{x^2-y^2} = \Delta_0 (\cos k_x - \cos k_y)$
- $\Delta(k)$ is anisotropic.
- There are directions with zero gap (line nodes).
- The phase of $\Delta(k)$ changes.

How to detect *d*-wave pairing symmetry?

- The line nodes in *d*-wave symmetry have signatures in many experiments because it means there are abundant low-energy excitations along the nodal direction due to zero gap.
- In the fully gapped *s*-wave, on the other hand, low energy excitations are suppressed exponentially at low T .
- The existence of line nodes can be deduced from many experiments:
 - Tunneling spectroscopy, HOW?
 - Specific heat, HOW?
 - Thermal conductivity, HOW?

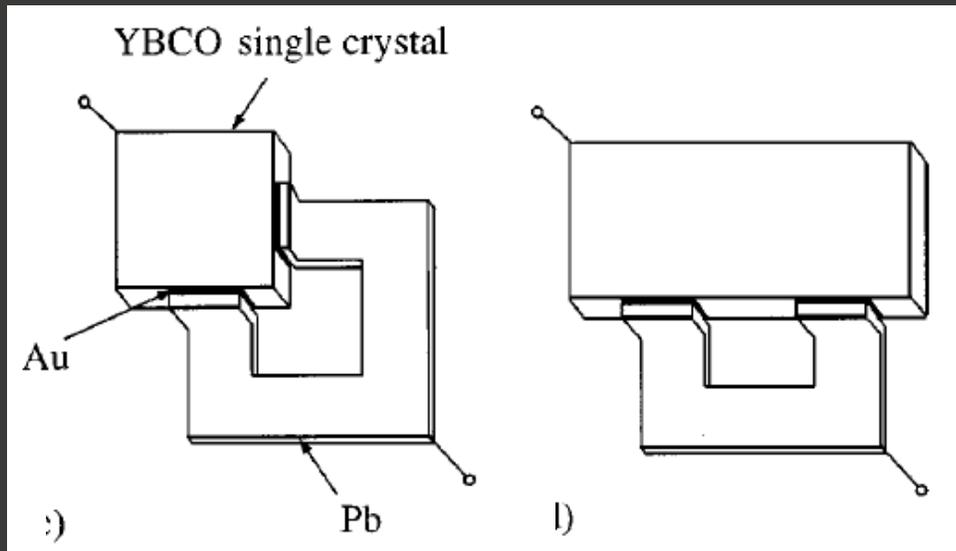
ARPES measurements of *d*-wave gap



- ARPES can directly measure the size of the gap along different k -directions (Z.X.Shen et al., and H. Ding et al.)
- It clearly shows a node along (π, π) direction and largest gap along $(\pi, 0)$ direction.
- The angle dependence of gap amplitude can be fit nicely using the $\Delta d_{x^2-y^2}$ formula.

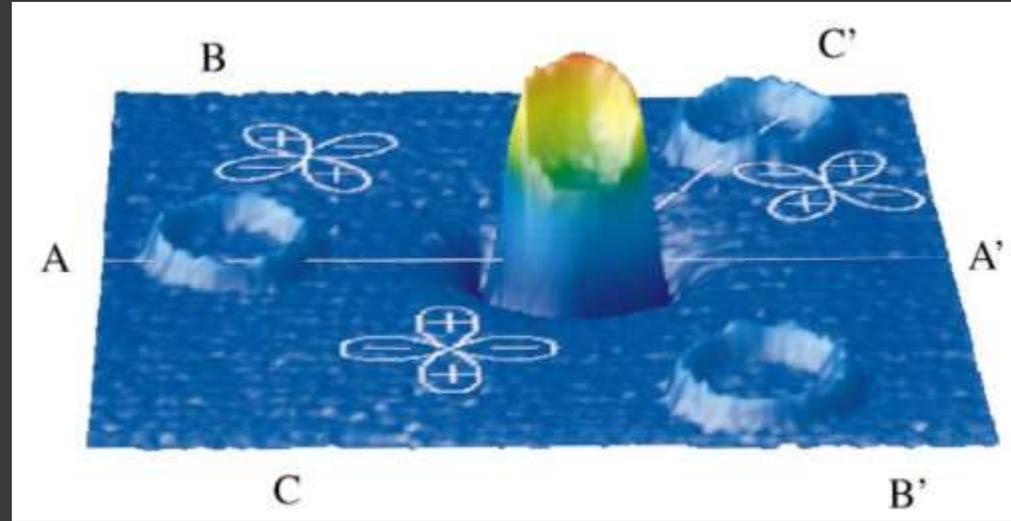
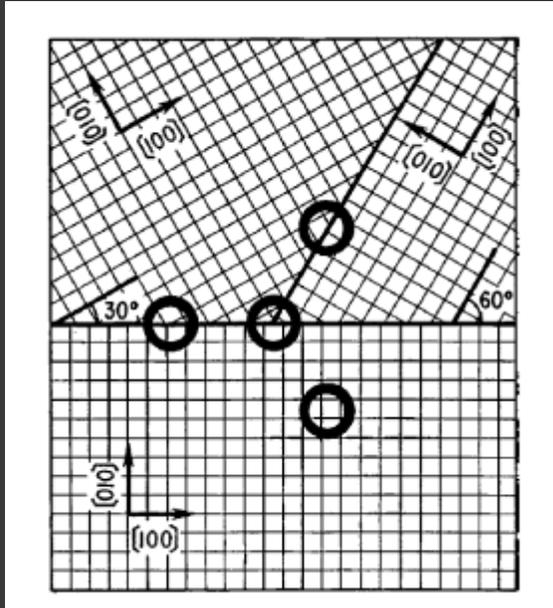
Phase-sensitive experiments

- ARPES can only map out the symmetry of the gap amplitude.
- It contains no phase information, thus can not distinguish a d -wave from an extremely anisotropic s -wave.
- The final determination of d -wave pairing symmetry were provided by the “phase-sensitive” experiments which contains the phase information.



- A beautiful set of experiments is the “Corner SQUID” by Wollman et al., (PRL 1993).
- Due to the π phase shift of the $d_{x^2-y^2}$ symmetry, the corner SQUID will have different behavior from the edge SQUID.

Phase-sensitive experiments



- Another beautiful phase-sensitive experiment is the tri-crystal experiment by Tsuei and Kirtley (for a review, Tsuei and Kirtley, Rev. Mod. Phys. 2000).
- Using an thin film grown on patterned SrTiO₃ substrate, they can form a tri-crystal junction with frustrated phase geometry.
- Using scanning SQUID, they found a spontaneous $\frac{1}{2}$ flux at the junction and $h/2e$ fluxes everywhere else, consistent with the $d_{x^2-y^2}$ pairing symmetry.

- 高温超导的机理研究

BCS superconductors

State above T_c :

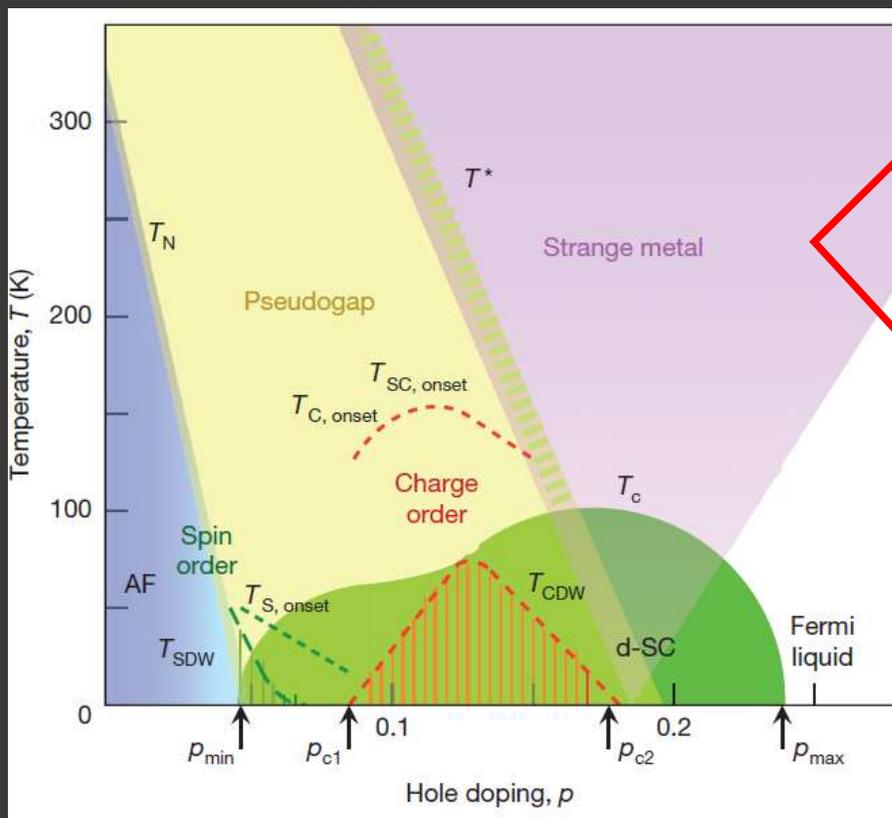
Fermi liquid state \longrightarrow Low- T_c superconducting state

High- T_c superconductors

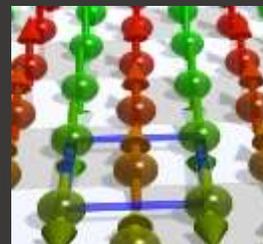
State above T_c :

??? \longrightarrow High- T_c superconducting state

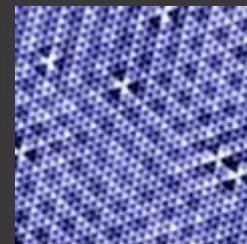
• 高温超导的机理研究



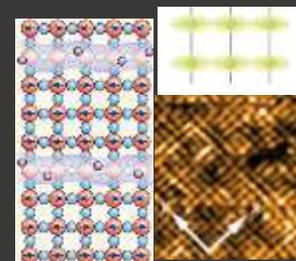
超导序



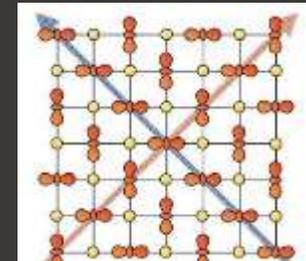
自旋序



电荷序



向列序

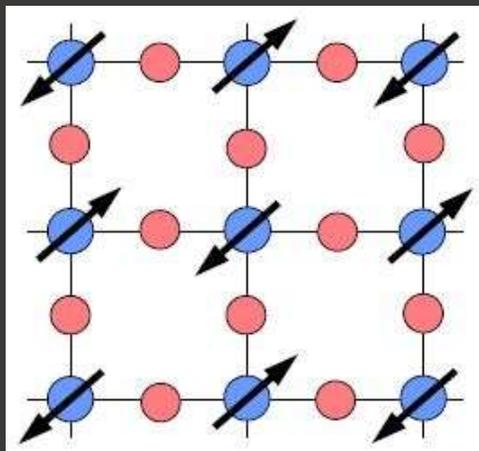


轨道序

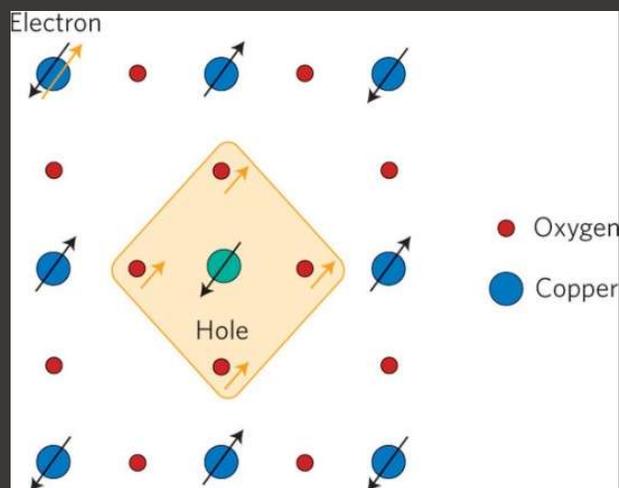
高温超导的正常态不正常!

• 高温超导的机理研究

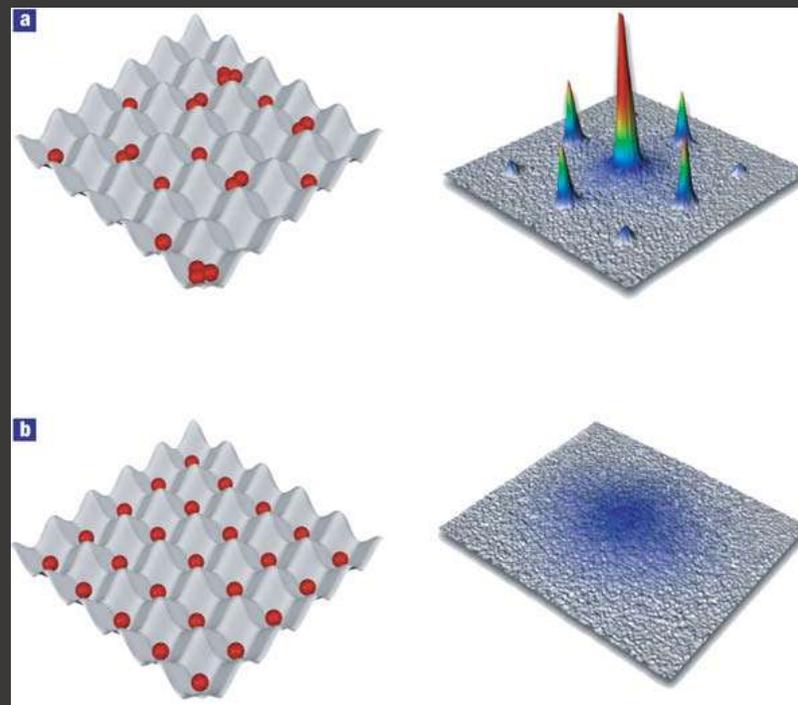
Mott
绝缘体



超导

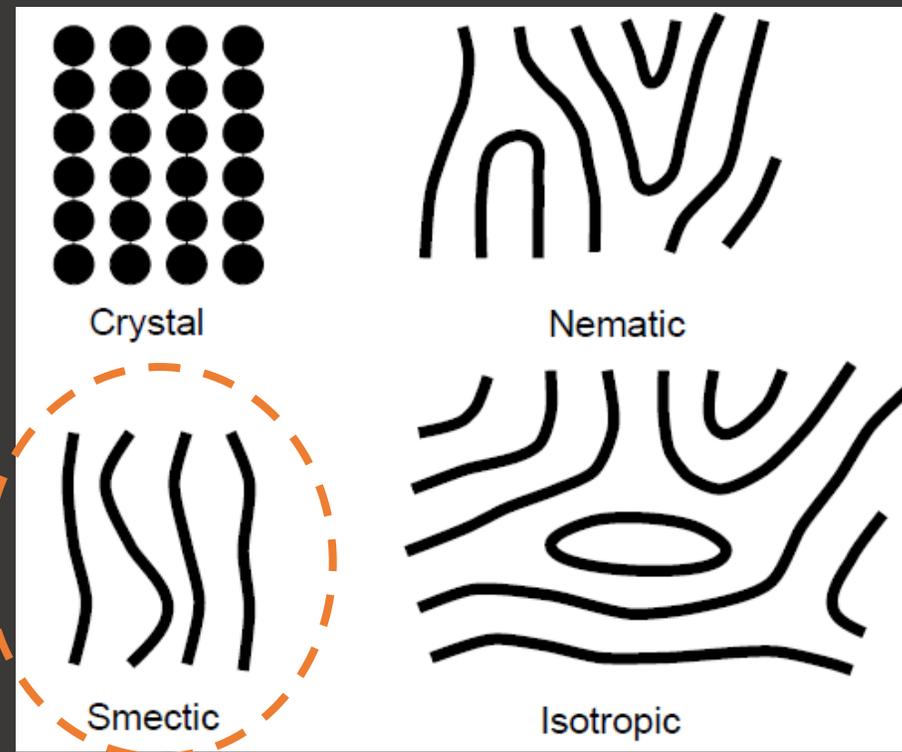
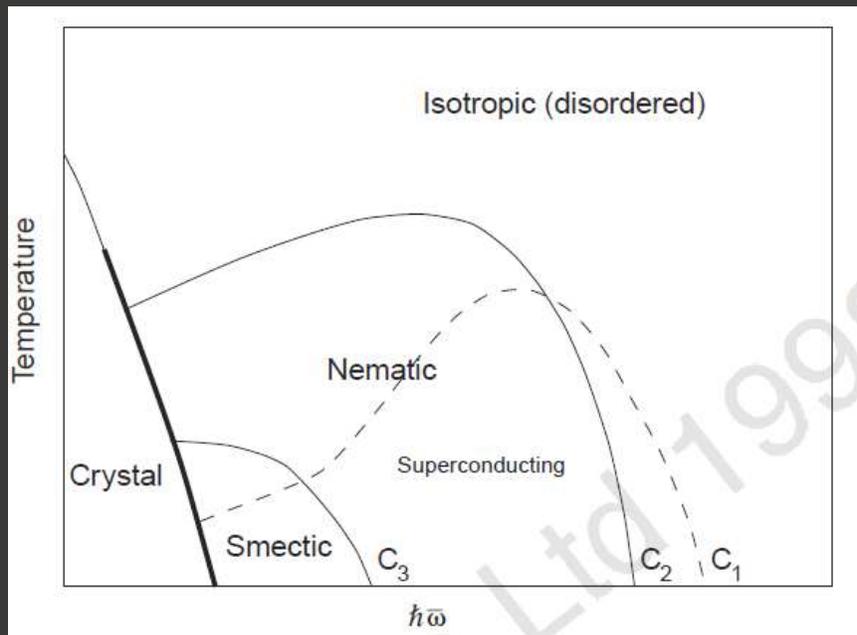


光子晶格中的超流-莫特绝缘体转变



I. Bloch, Nat. Phys. **1**, 23-30 (2005)

• 高温超导的机理研究



“条纹”相

“电子液晶”相

Electronic liquid-crystal phase

S. A. Kivelson et al.,
Nature **393**, 550 (1998)

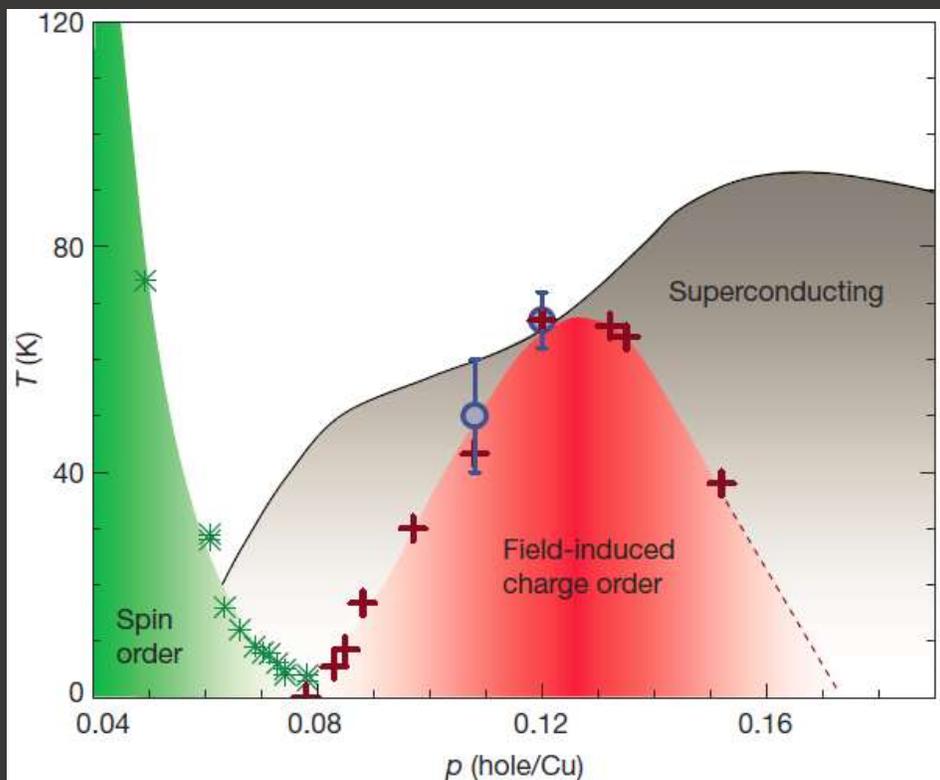
• 高温超导的机理研究

LETTER

doi:10.1038/nature10345

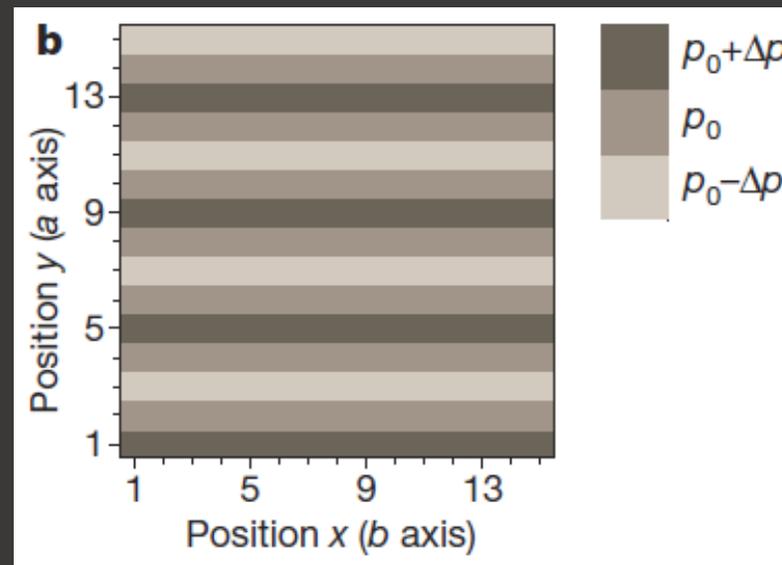
Magnetic-field-induced charge-stripe order in the high-temperature superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$

Tao Wu¹, Hadrien Mayaffre¹, Steffen Krämer¹, Mladen Horvatić¹, Claude Berthier¹, W. N. Hardy^{2,3}, Ruixing Liang^{2,3}, D. A. Bonn^{2,3} & Marc-Henri Julien¹



高温超导中的“电子液晶”

电荷“条纹”相



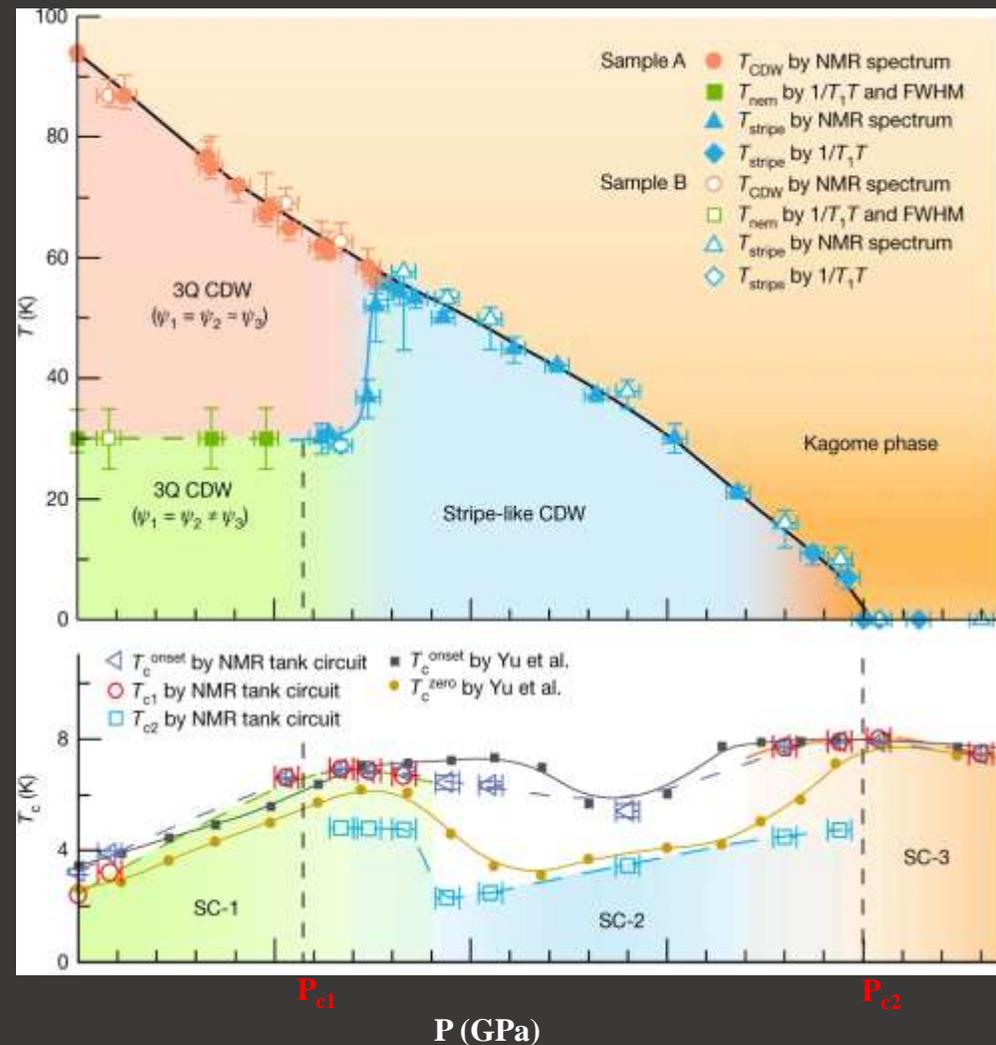
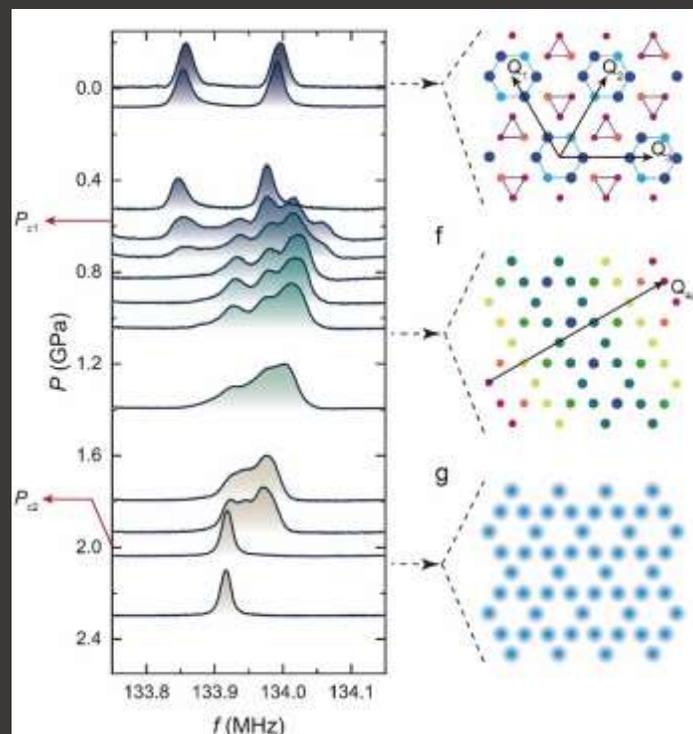
Emergent charge order in pressurized kagome superconductor CsV_3Sb_5

<https://doi.org/10.1038/s41586-022-05351-3>

Received: 19 April 2022

Accepted: 15 September 2022

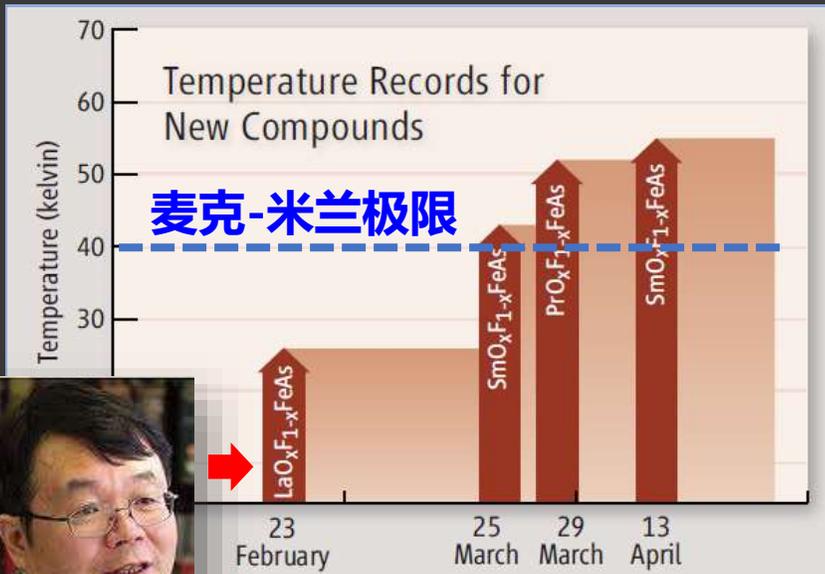
Lixuan Zheng¹, Zhimian Wu¹, Ye Yang¹, Linpeng Nie¹, Min Shan¹, Kuanglv Sun¹, Dianwu Song¹, Fanghang Yu¹, Jian Li¹, Dan Zhao¹, Shunjiao Li¹, Baolei Kang¹, Yanbing Zhou¹, Kai Liu¹, Ziji Xiang^{1,2}, Jianjun Ying², Zhenyu Wang^{1,2}, Tao Wu^{1,2,3,4,5,6} & Xianhui Chen^{1,2,3,4,5,6}



笼目超导体中发现压力诱导的电荷条纹相

Nature 611, 682-687 (2022)

高温超导体的新大陆：铁基超导体

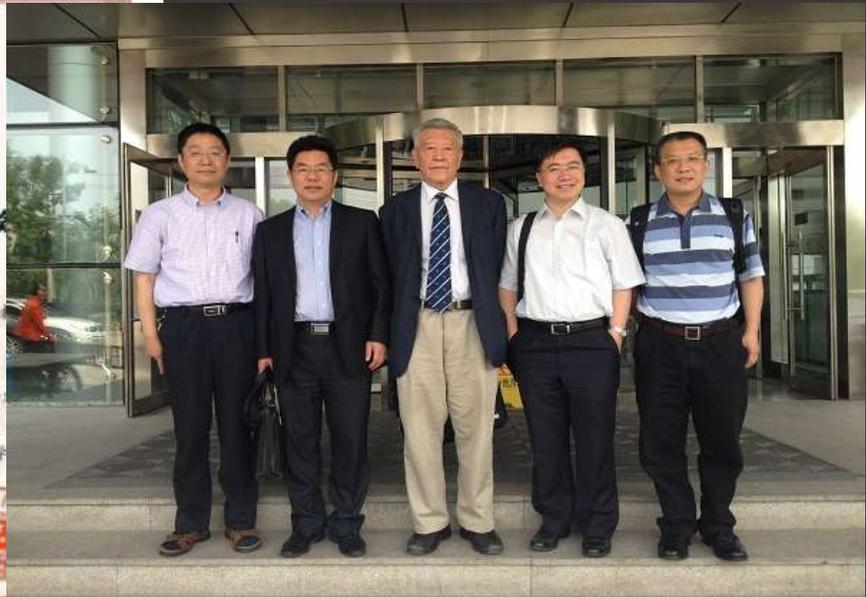


H. Hosono 教授
(日本, 东京工业大学)

超导转变温度突破麦克-米兰极限

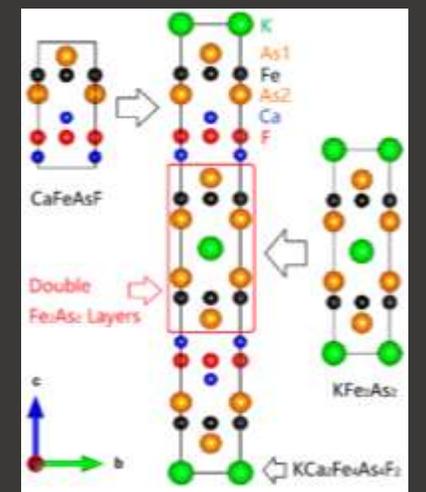
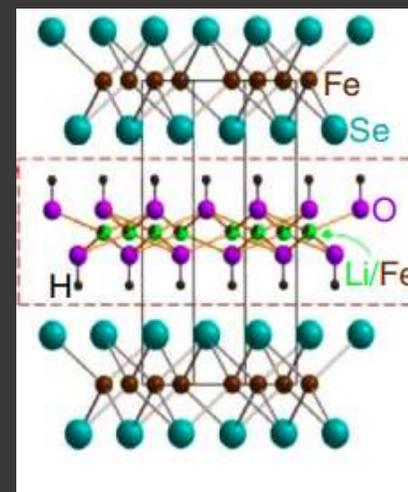
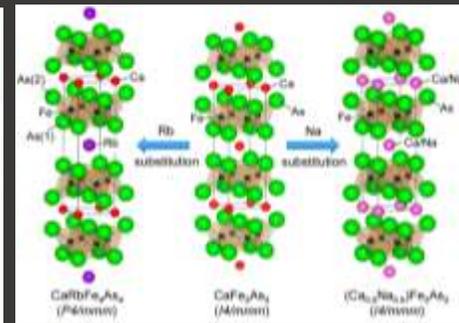
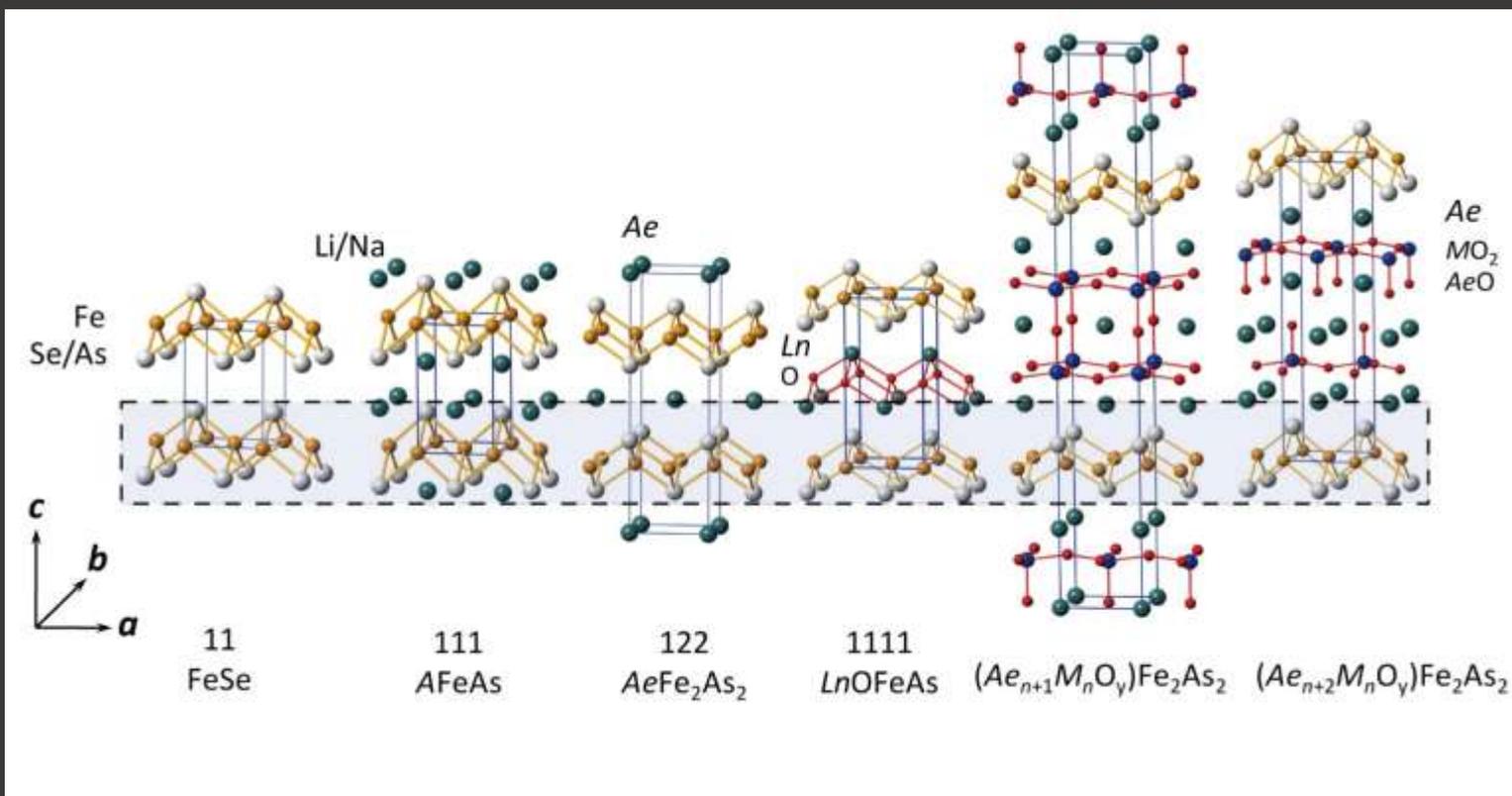
CONDENSED MATTER PHYSICS

New Superconductors Propel Chinese Physicists to Forefront



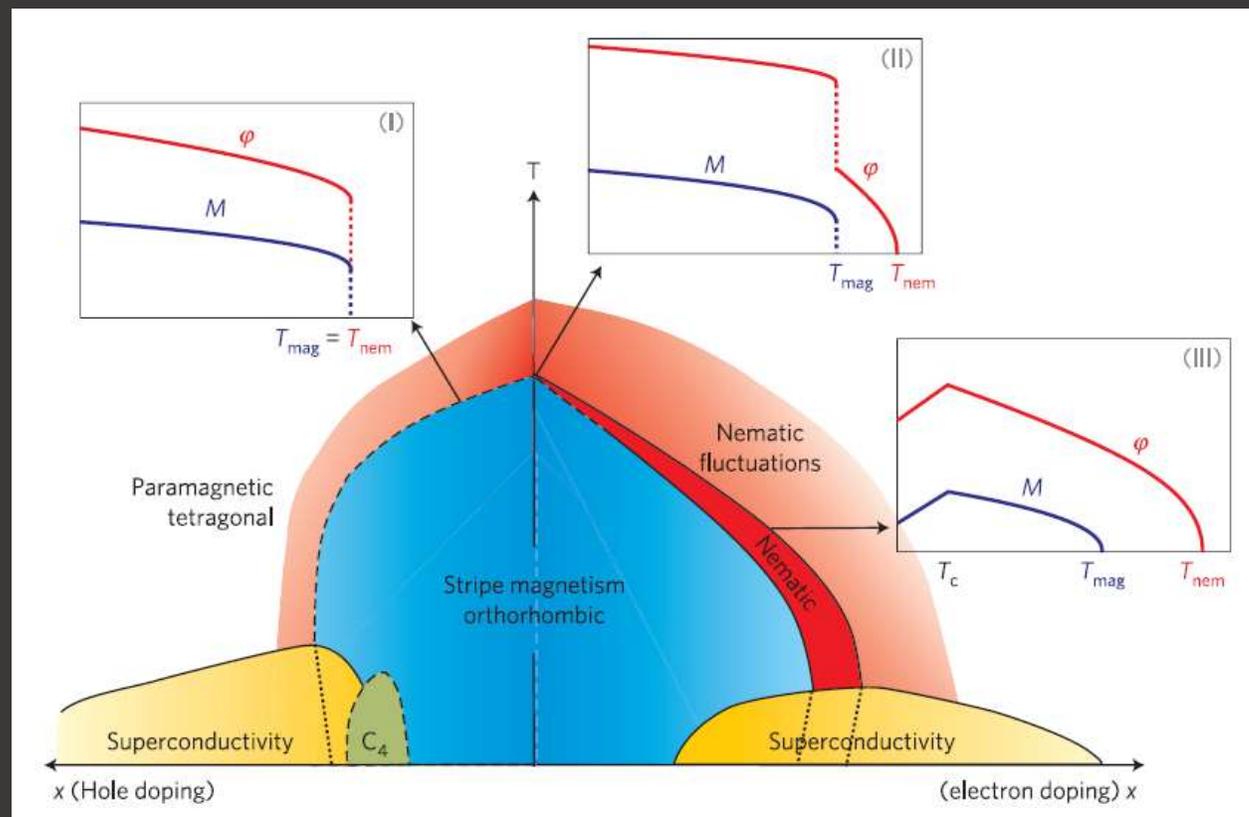
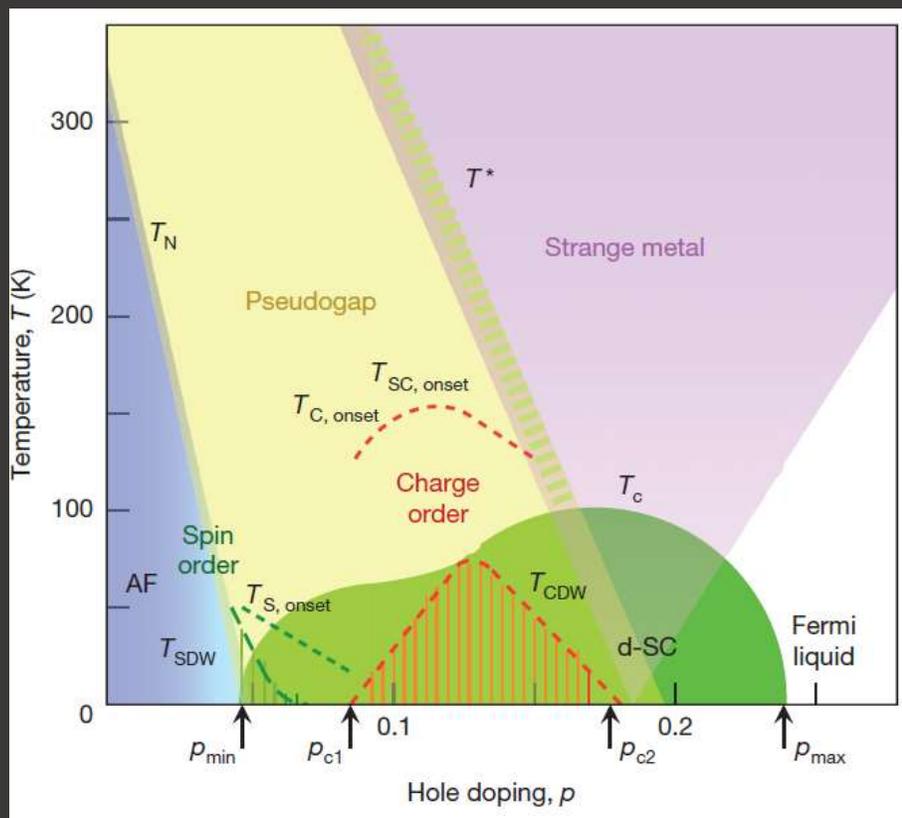
中科院物理所和中科大团队在铁基高温超导体的工作获2013年国家自然科学一等奖

铁基高温超导体家族



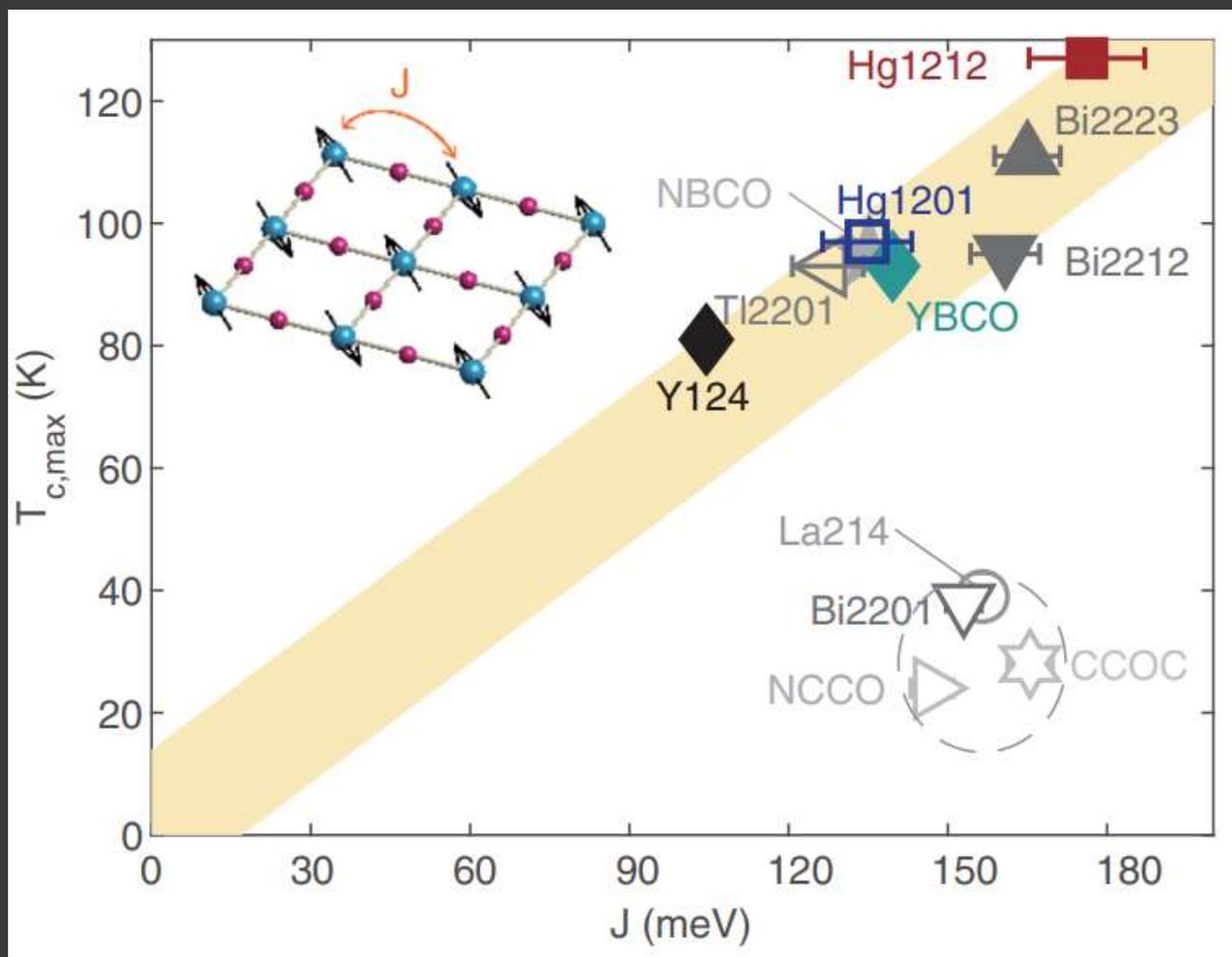
铁基高温超导材料家族：都具有铁砷/硒二维结构单元
最高超导转变温度（常压）：~ 56 K (-217°C)

• 高温超导的机理研究



铁基高温超导体家族的发现为高温理论的建立提供了重要依据，表明磁性交换作用是高温超导形成的关键因素。

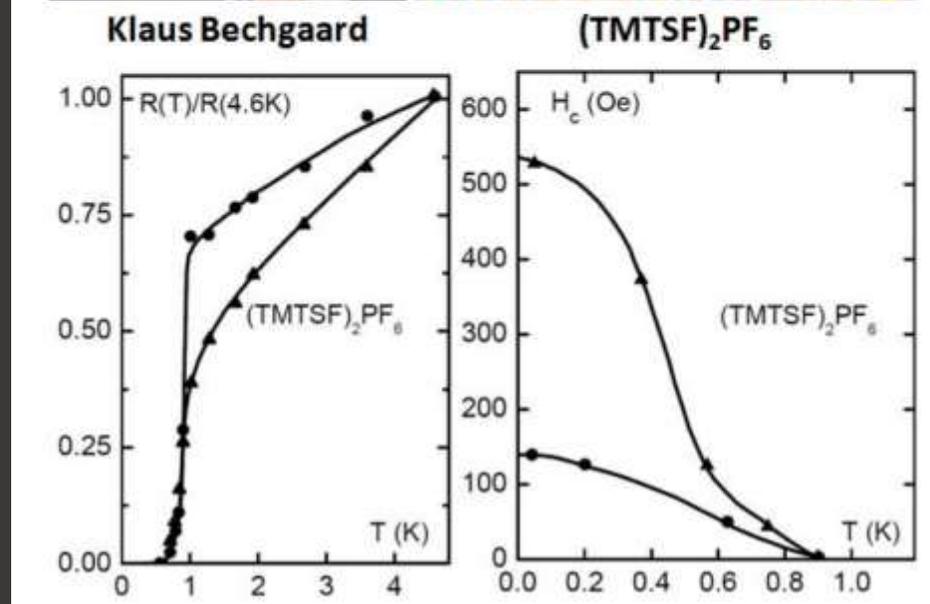
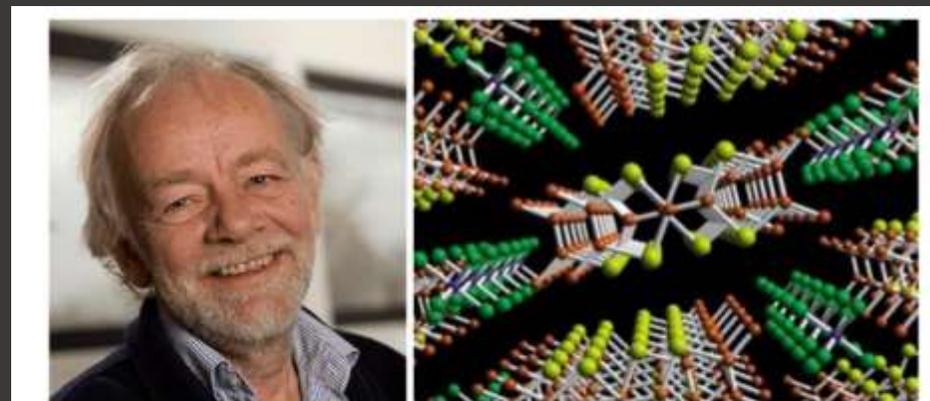
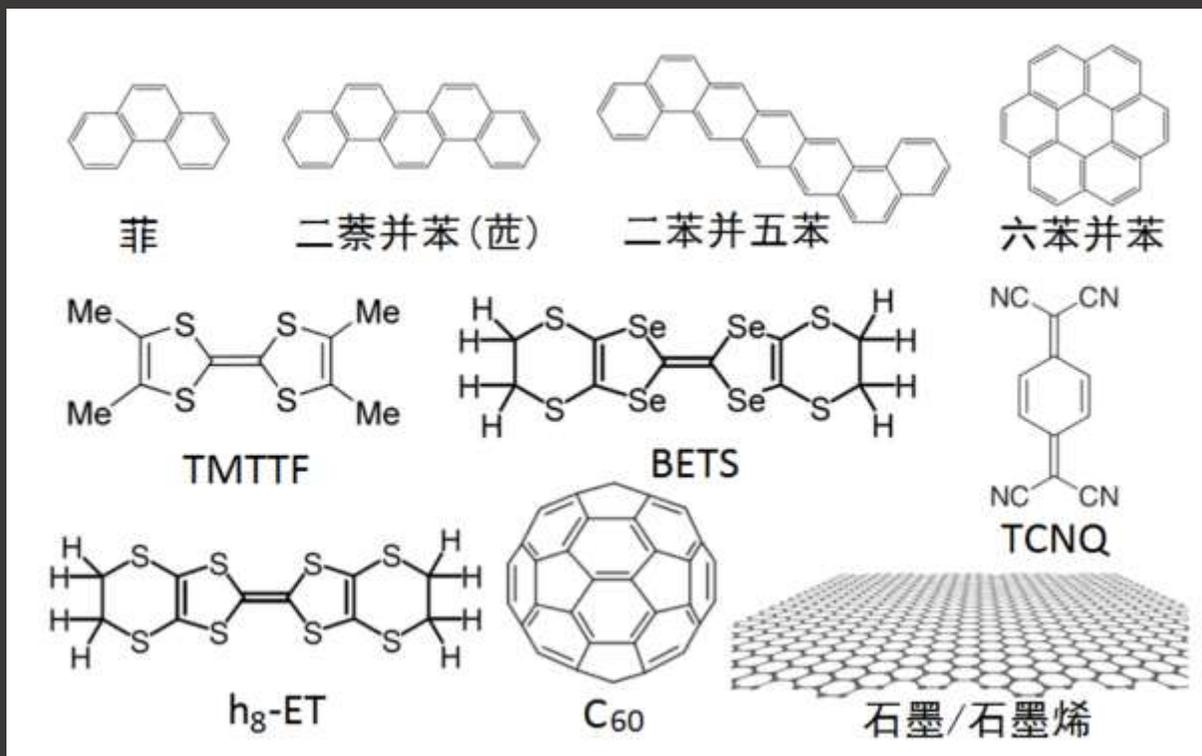
• 高温超导的机理研究



Compound	Reference	$T_{c,max}$ (K)	J (meV)	$\omega_{p,max}$ (meV)
La214	[23]	39	157(1)	311(4)
CCOC	[24]	28	166(4)	313(5)
YBCO	[25]	93	140(2)	272(5)
Y124	[26]	81	105(2)	205(9)
NBCO	[26, 27]	95	135(2)	269(6)
Tl2201	[25]	93	127(7)	247(11)
Bi2201	[28]	38	153(3)	309(15)
Bi2212	[29, 30]	95	161(7)	313(11)
Bi2223	[29]	111	165(6)	324(15)
NCCO	[31]	24	147(4)	290(2)
Hg1201	this work	97	135(8)	265(10)
Hg1212	this work	127	176(11)	347(8)

• 有机超导体探索

1964 年，物理学家 Little 基于 BCS 理论预言，在某些具有高度极化悬挂链的导电聚合物中可能存在 1000 K 以上的超导电性。

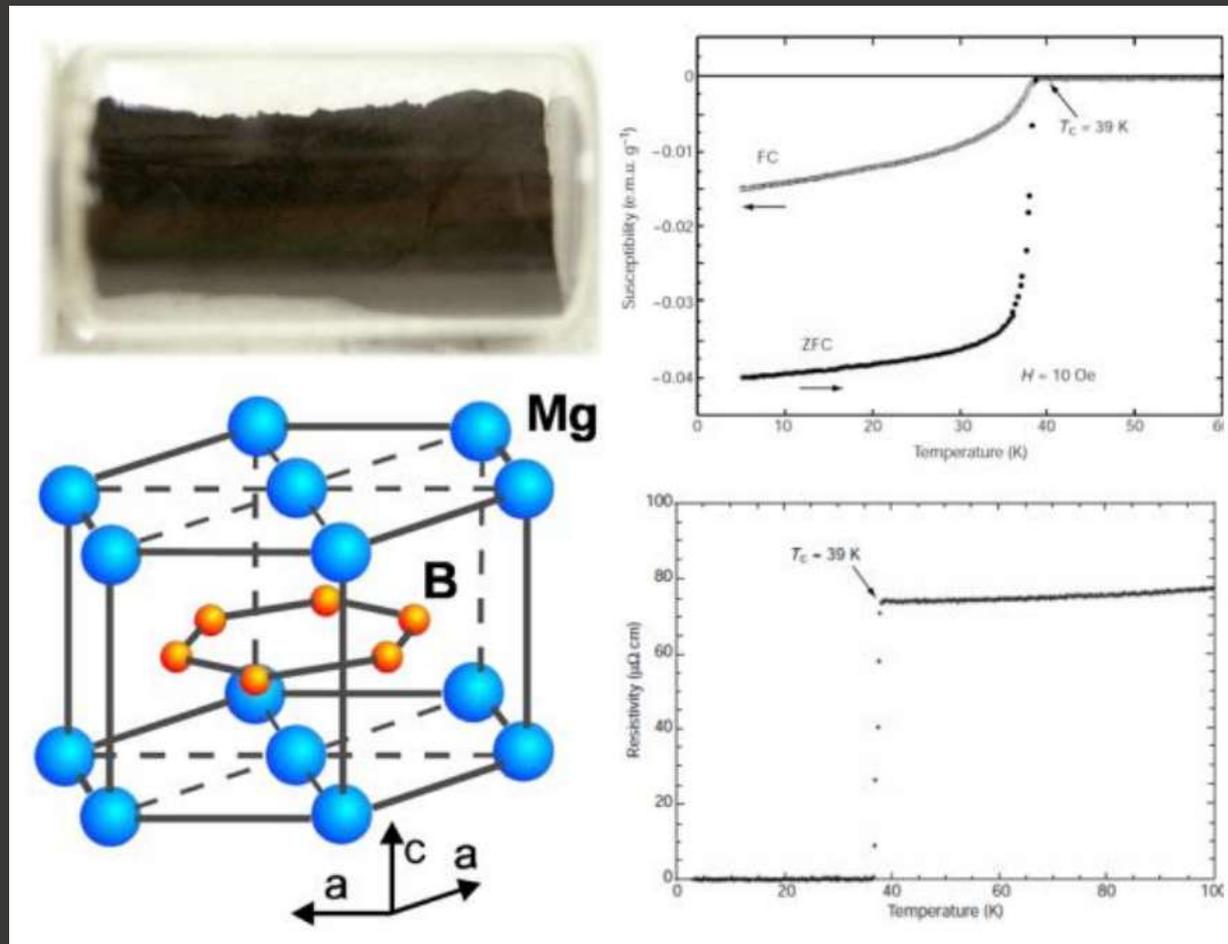


1979 年丹麦科学家 Klaus Bechgaard 与法国合作者在有机盐 (TMTSF)₂PF₆ 中发现了 0.9 K 的超导电性。

• 轻元素超导体探索

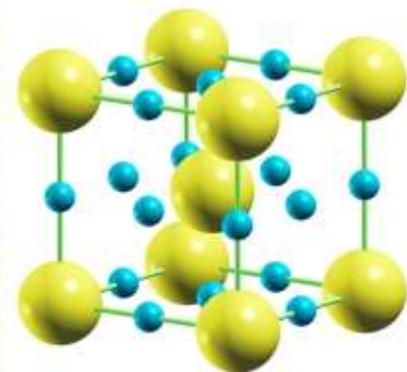
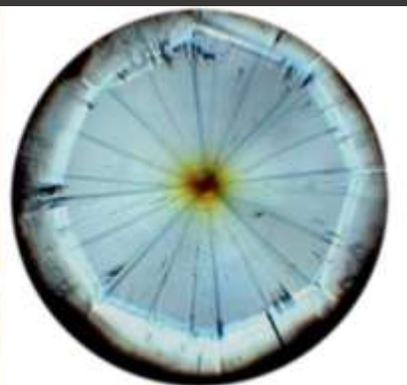
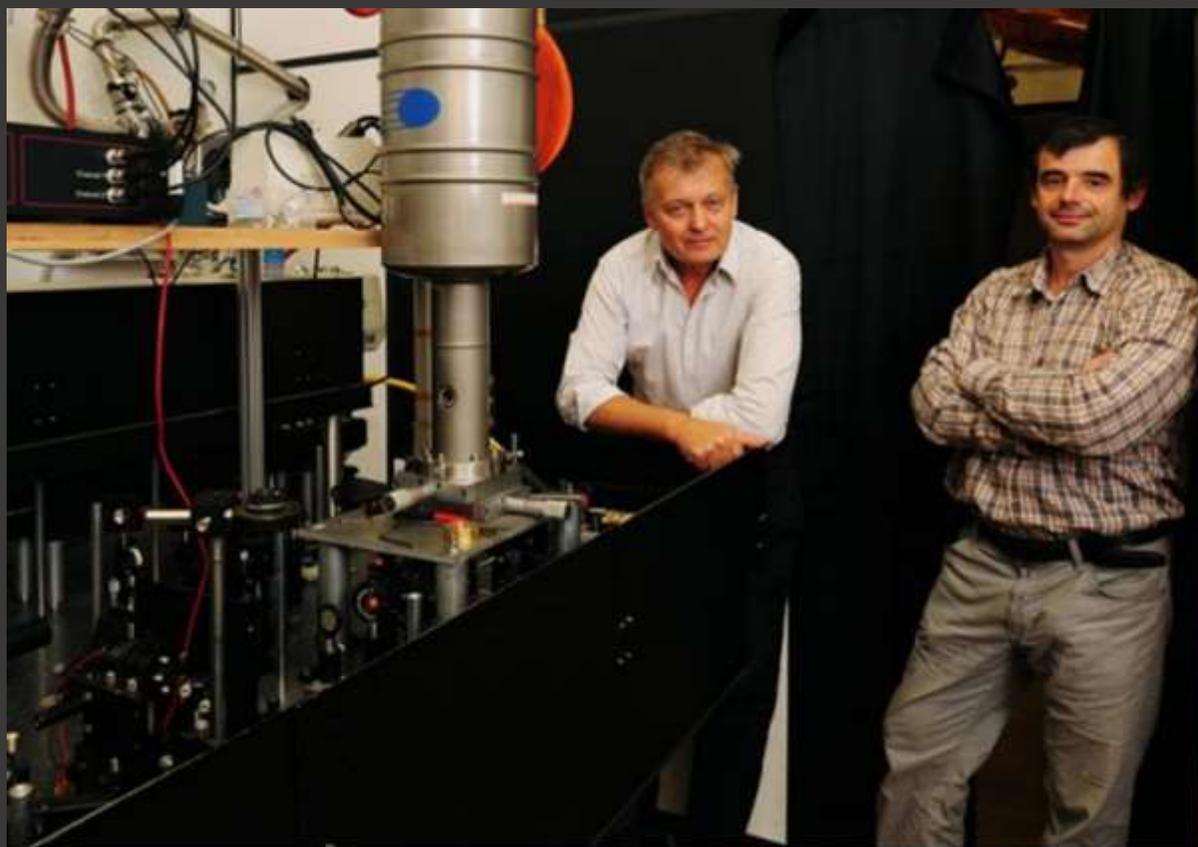


二硼化镁发现者：
秋光纯



MgB₂ T_c = 39 K

- 高压下的高温超导体

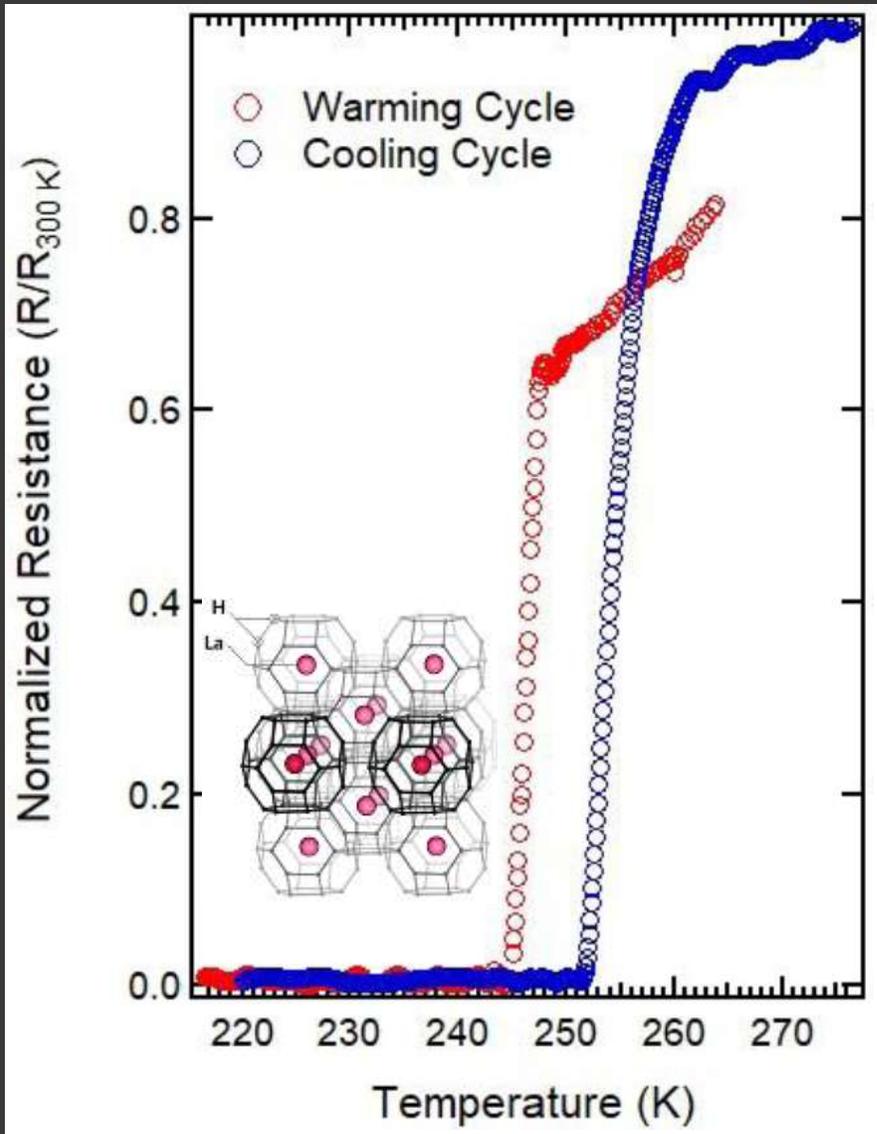


H₃S

2015年
德国Drozdov和Eremets
发现H₃S超导

$T_c = 202 \text{ K}$
(-71 °C)
220 万个大气压!

- 高压下的高温超导体



M. Somayazulu



R. J. Hemley

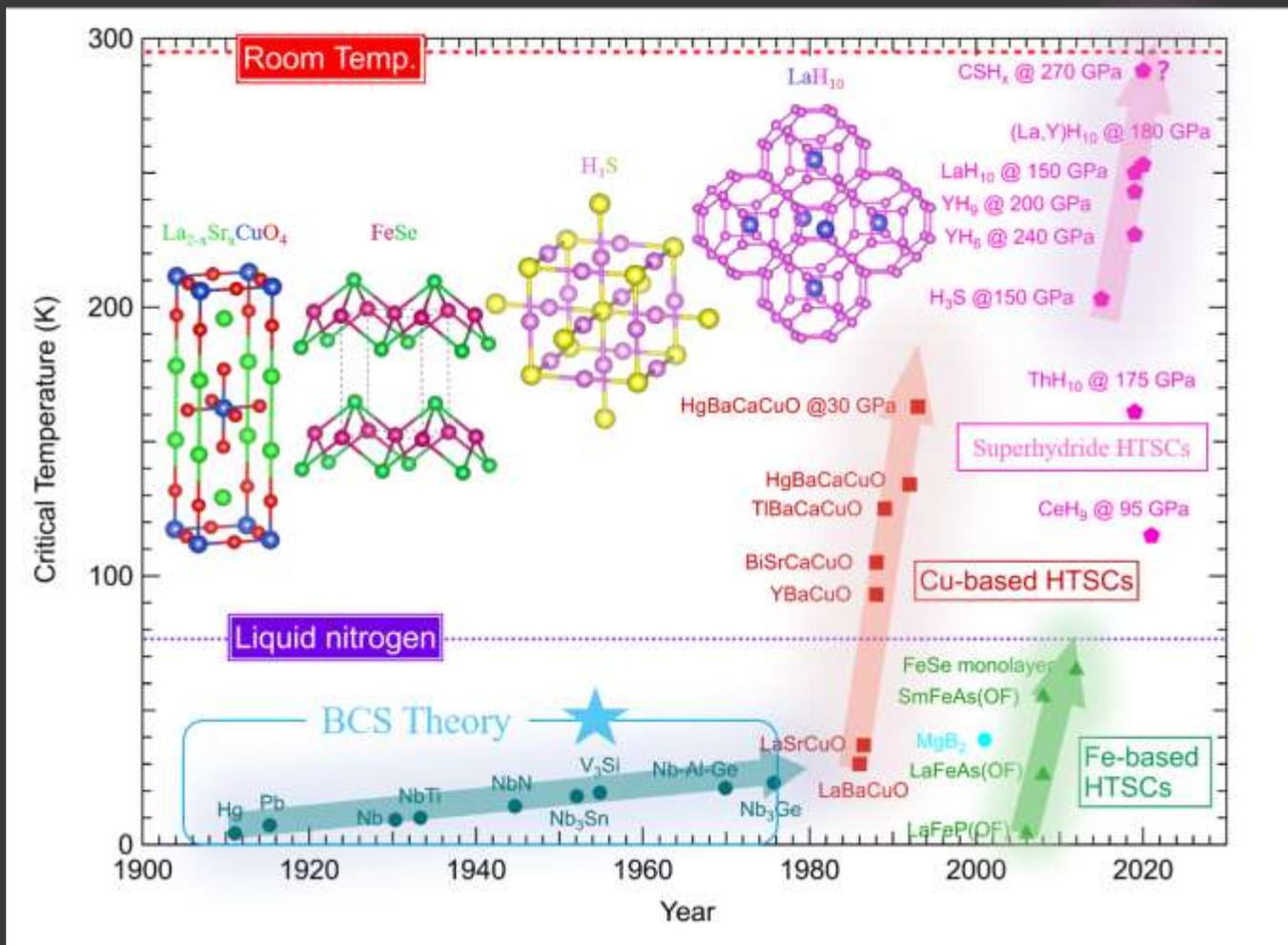


M. Eremets

2019年 美德科学家
发现 LaH_{10} 超导

$T_c = 260\text{ K } (-13\text{ }^\circ\text{C})$
188 万个大气压!

超导材料探索是超导研究的主旋律

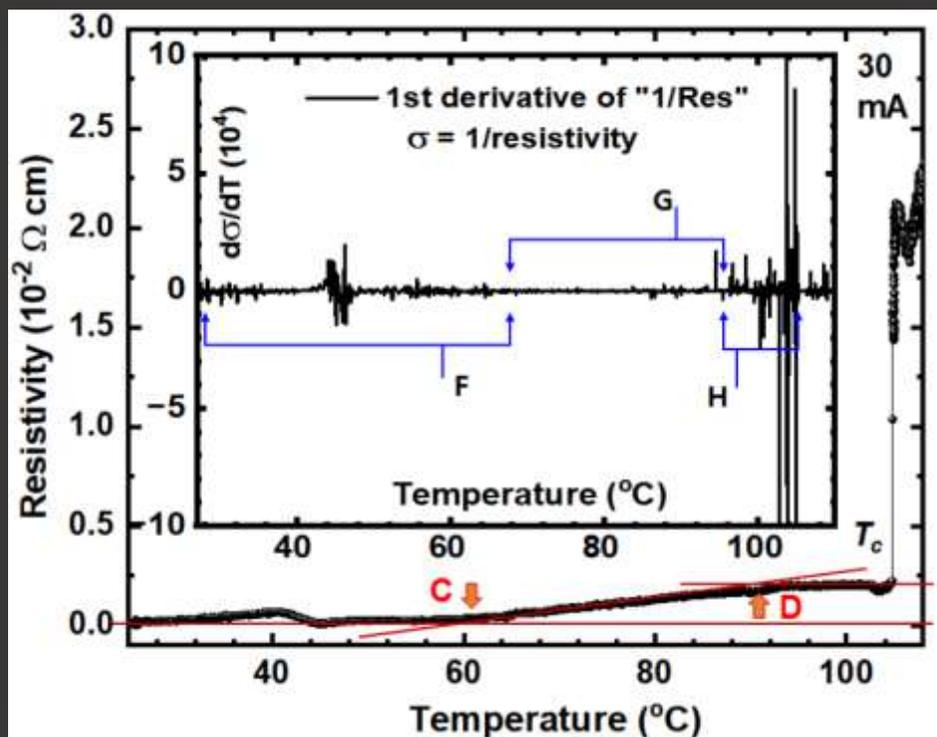


超导至今已有112年历史，百余年来，超导研究的魅力始终不减，充满活力，不断有新超导体被发现，并揭示了许多新的物理现象。

超导是凝聚态物理前沿领域的“常青树”！

超导材料探索和机理研究蕴含着大量的机遇！

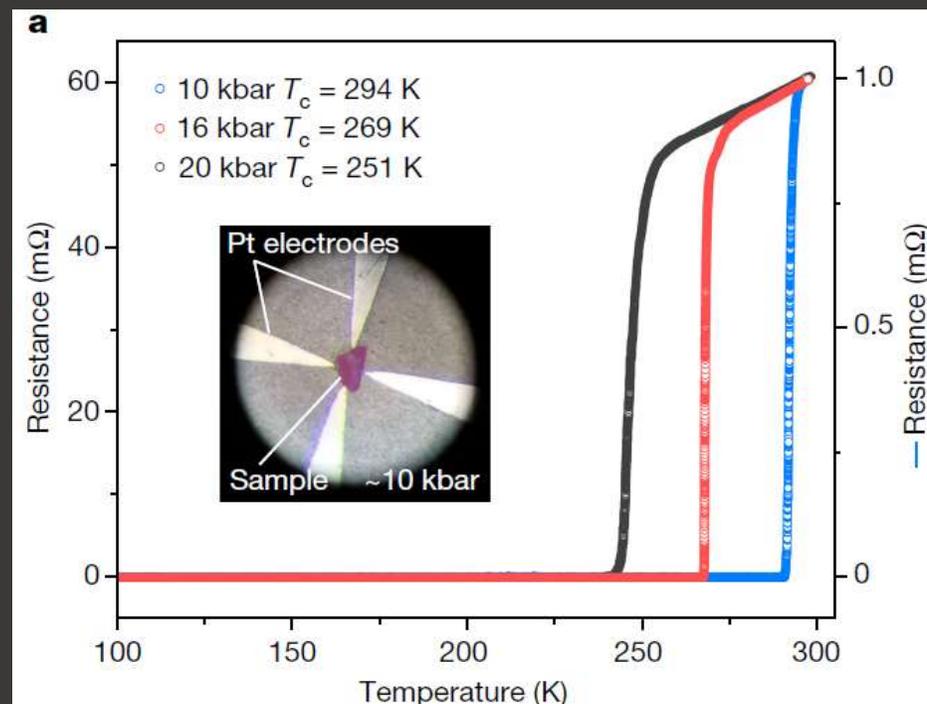
最近的两个关于“室温超导”的事件



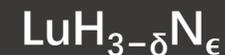
LK99



arXiv:2307.12037

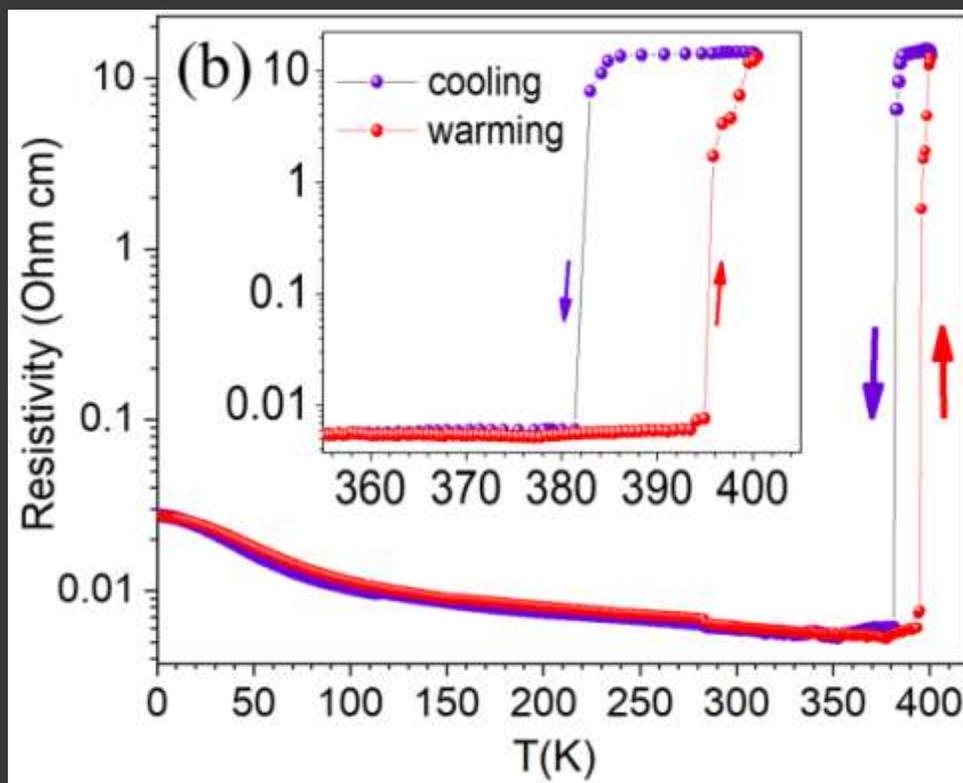


N-doped lutetium hydride



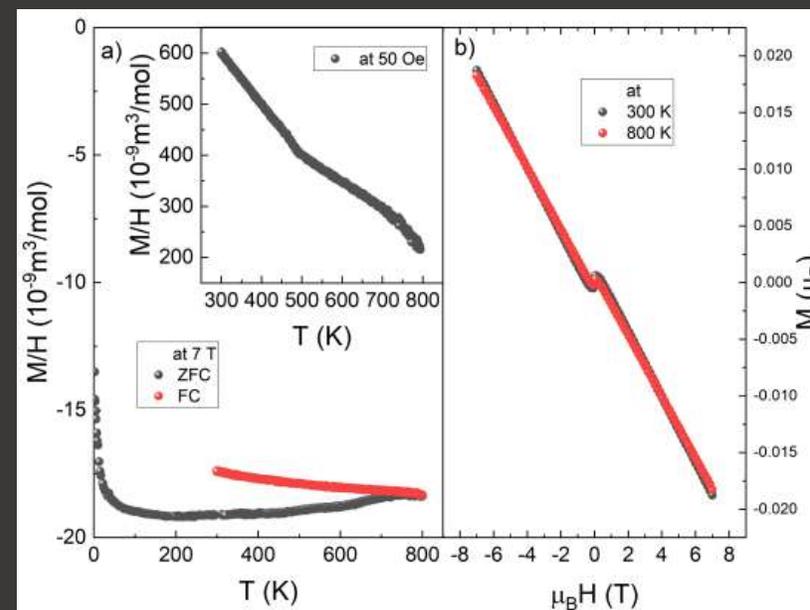
Nature 615, 244–250 (2023)

最近的两个关于“室温超导”的事件



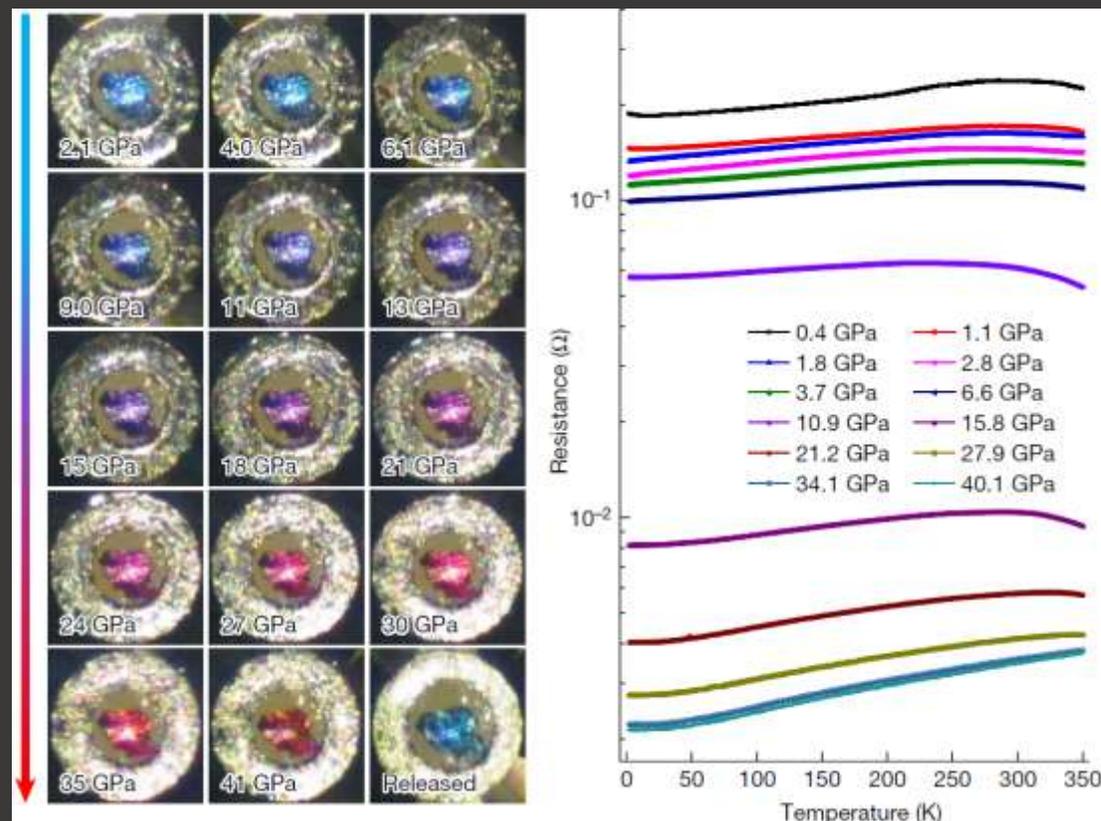
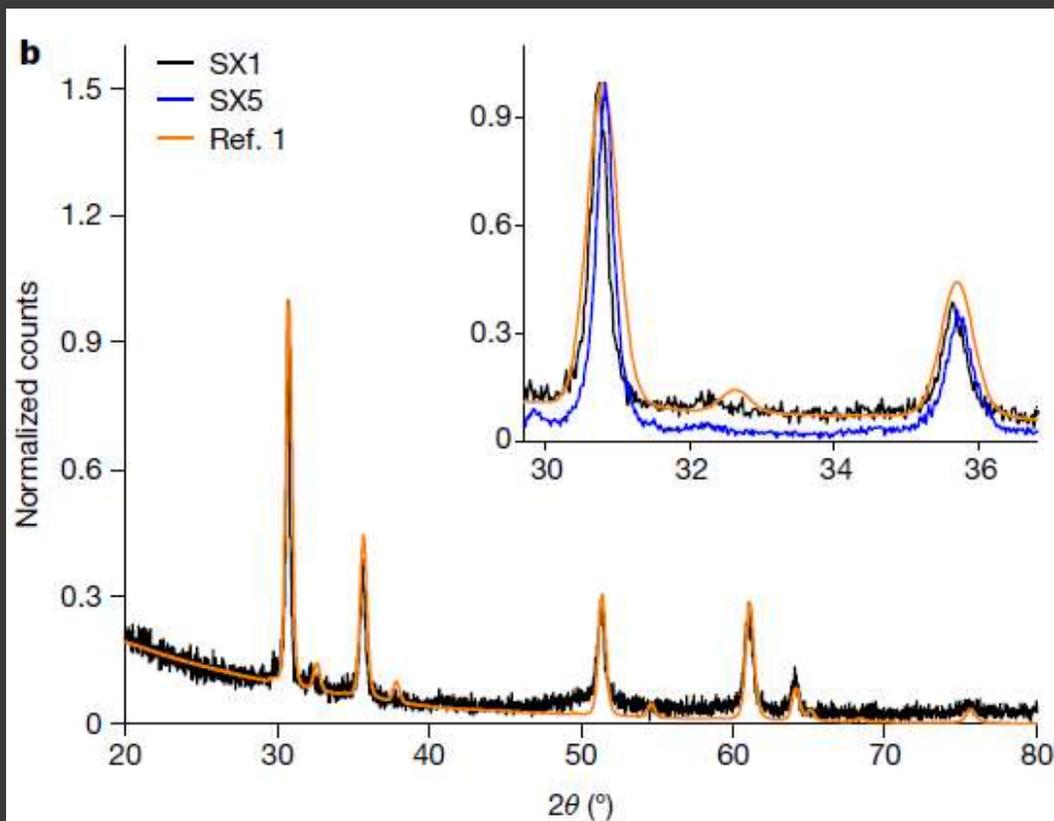
Cu_2S

arXiv:2308.04353

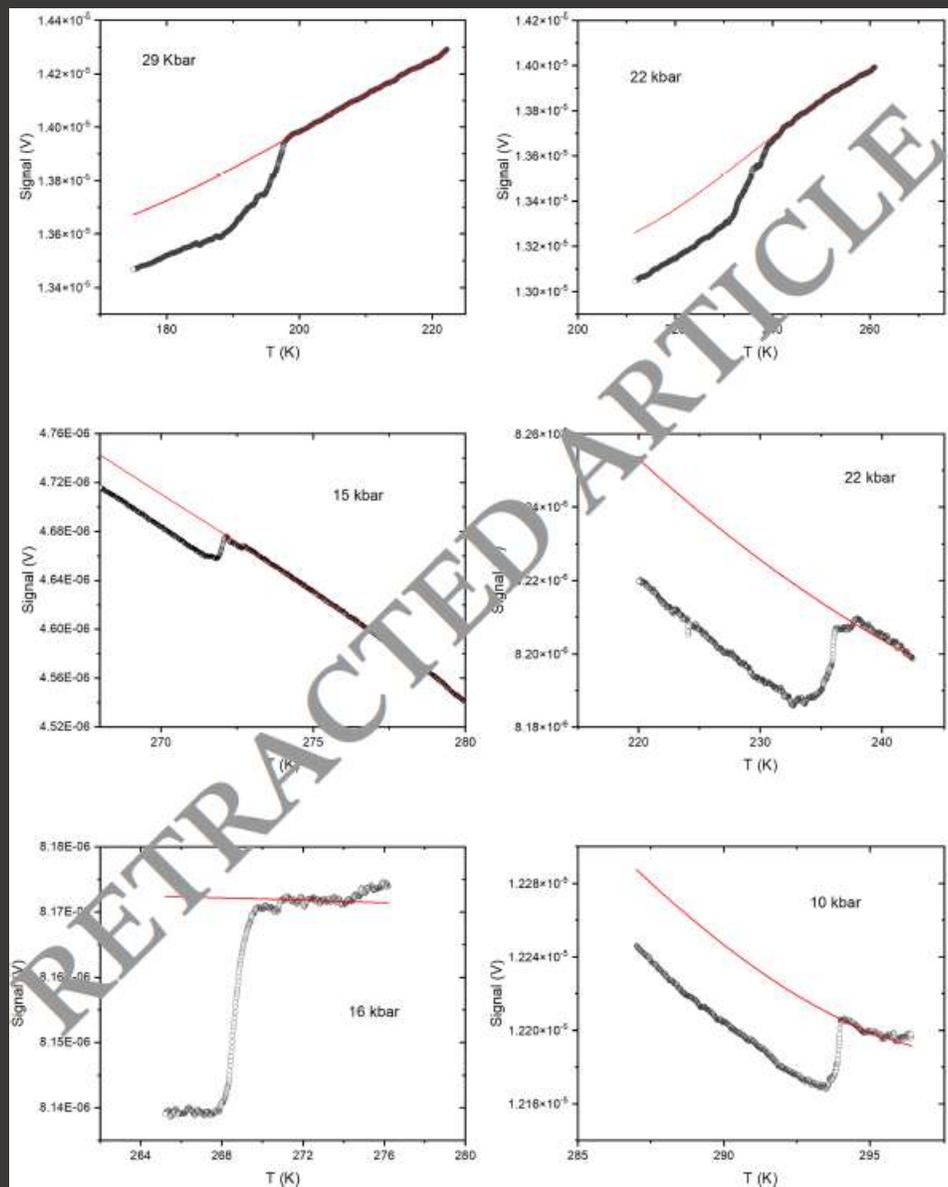


arXiv:2308.06256

最近的两个关于“室温超导”的事件



最近的两个关于“室温超导”的事件



nature

Explore content About the journal Publish with us

nature > retractions > article

Retraction Note | Published: 07 November 2023

Retraction Note: Evidence of near-ambient superconductivity in a N-doped lutetium hydride

Nathan Dasenbrock-Gammon, Elliot Snider, Raymond McBride, Hiranya Pasan, Dylan Durkee, Nugzari Khalvashi-Sutter, Sasanka Munasinghe, Sachith E. Dissanayake, Keith V. Lawler, Ashkan Salamat & Ranga P. Dias

Nature (2023) | Cite this article

Retraction to: Nature <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05742-0>

This article has been retracted at the request of the authors Nathan Dasenbrock-Gammon, Elliot Snider, Raymond McBride, Hiranya Pasan, Dylan Durkee, Sachith E. Dissanayake, Keith V. Lawler and Ashkan Salamat. They have expressed the view as researchers who contributed to the work that the published paper does not accurately reflect the provenance of the investigated materials, the experimental measurements undertaken and the data-processing protocols applied. The above-named authors have concluded that these issues undermine the integrity of the published paper.

In addition, and separately, concerns have been independently raised with the journal regarding the reliability of the electrical resistance data presented in the paper. An investigation by the journal and post-publication review have concluded that these concerns are credible, substantial and remain unresolved.

Nugzari Khalvashi-Sutter, Sasanka Munasinghe and Ranga P. Dias have not stated whether they agree or disagree with this retraction.

超导的应用现状和前景

• 超导体用武之地

强电应用

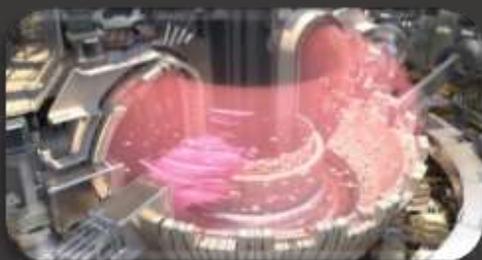
核磁共振成像仪



大型强子对撞机上的超导磁体

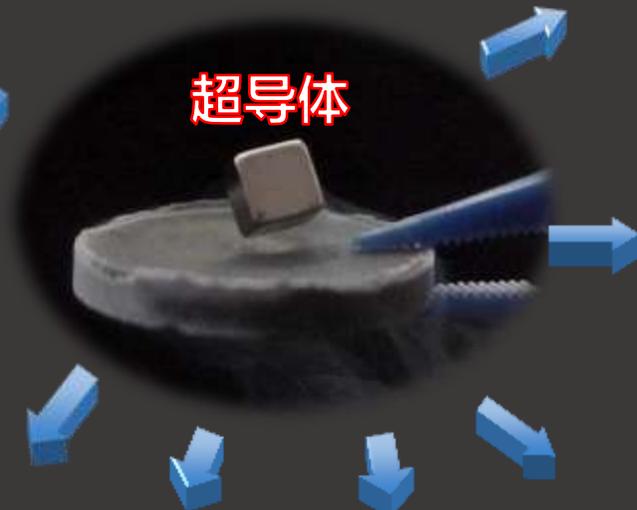


可控核聚变

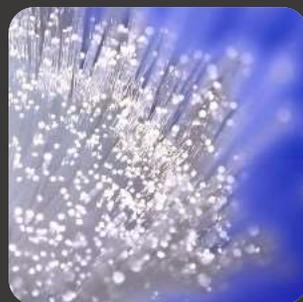


在能源、信息等领域带来深刻变革的战略级科技

超导体



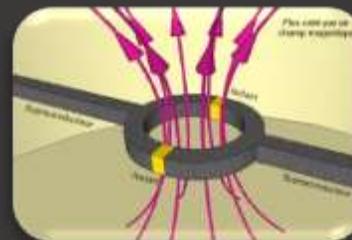
超导电缆



超导磁悬浮列车



SQUID



超导量子比特



超导量子计算机



弱电应用

• 强电应用

与能源有关方面

- 电力工业的一个革命性的技术储备
- 磁约束受控核聚变不可替代的制备强磁体的材料
-

交通

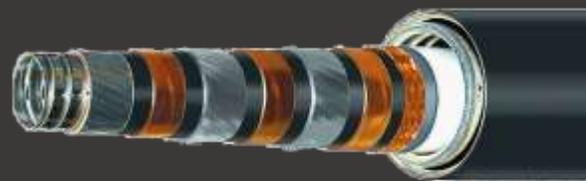
- 新一代的舰船推动系统的基础
- 超导磁悬浮列车
-

生物医学

- 医用核磁共振成像系统
- 高分辨率核磁共振超导磁体
-



深圳平安大厦



超导无损耗输电



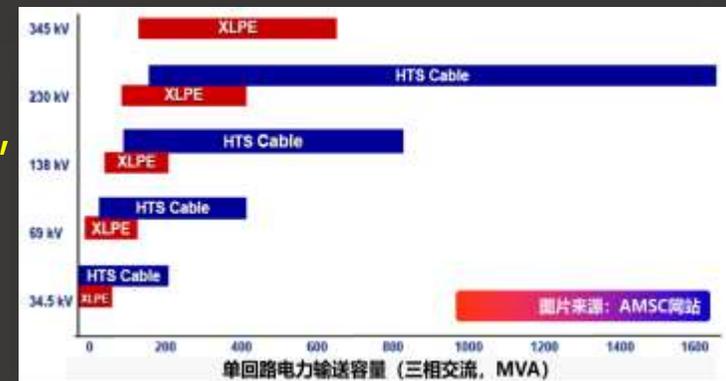
高温超导电缆战略布局

低损耗电力传输

- 中国的新能源主要分布在西部、北部和西北部，远距离输电损耗巨大
- 2022年我国用电量86369亿度电，输电损耗4145亿度电（线损率4.82%），经济损失高达~2000亿元（数据来源：中国电力企业联合会数据）
- 超导电缆的输送容量与高2-3个电压等级常规电力电缆输送容量相当

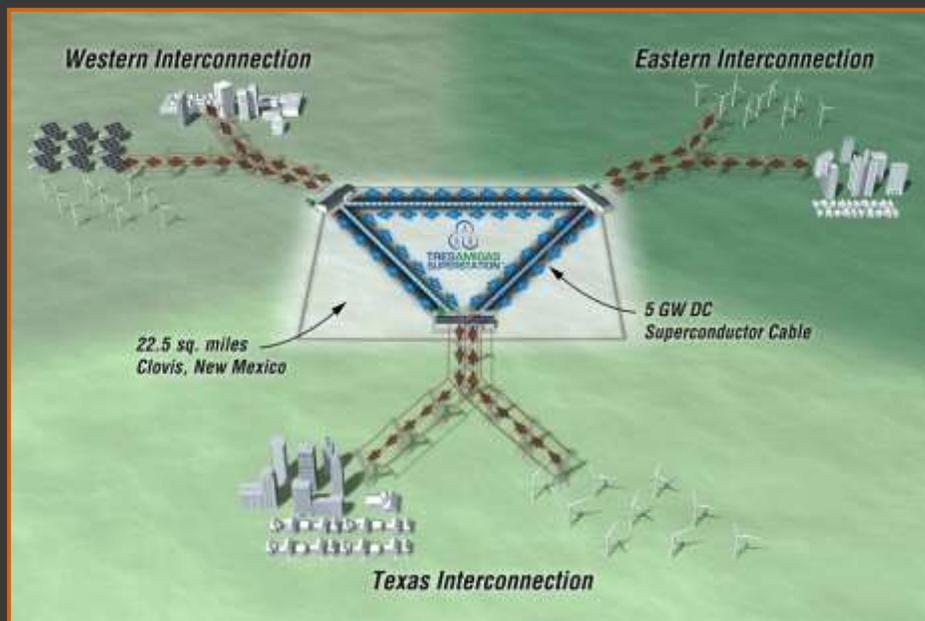
高温超导电缆是
低损耗、大容量、
长距离电力输送
的变革性技术

- ✓ 2021年9月，我国首条自主研发的三相同轴超导电缆在深圳投入使用，是全球首个应用于超大型城市中心区的超导电缆（400m-10kV/2.8kA）
- ✓ 2021年12月，国际首条35千伏公里级高温超导电缆示范工程在上海投入运行，是目前世界上输送容量最大、线路最长、全商业化运行的35千伏高温超导电缆。（1.2km-35kV）



短距离、大容量、特殊应用场景

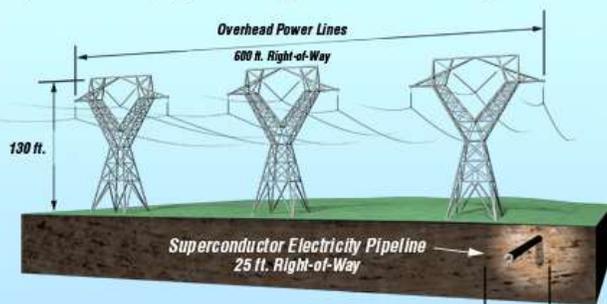
• 高温超导电缆战略布局



Source: <http://www.amsc.com/>



1,000 mile, 5,000 Megawatt Power Equivalents



Out of Sight, Out of Harm's Way

美国：规划res Amigas超级变电站

➔ 驱动力：

美国现有三大电网（美国东部电网、西部电网、德克萨斯电网）之间基本未实现有效互联；
可再生能源利用快速发展；
超导体具有零电阻效应和高电流传输密度等不可比拟的巨大优势。

➔ 如何实现：

通过Tres Amigas超级变电站实现任何两个电网互联（直流传输）；
AC/DC电能变换；
超导直流电缆（Superconductor Electricity Pipelines）。

➔ 关于超级变电站：

地点：Clovis, New Mexico；
占地：22.5平方英里；
超导直流电缆：单根5GW/几英里；
模式：三角形互联/2014年投运。

○ 可再生能源市场枢纽

○ 三大电网完全一体化

• 超导输电技术：超导体高载流低损耗传输

超导输电技术：典型项目（里程碑的工程）

上海国际超导科技公司

深圳超导电缆：

- 三相同轴结构，10kV/2.5kA
- 为深圳第一高楼平安大厦供电，解决大容量供电可靠性问题；
- 国际首条面向城市高负荷密度供电超导电缆；
- 高低起伏弯曲敷设（最大落差15米）；
- 预计2021年投运。

上海超导电缆：

- 三芯一体结构，35kV/2.2kA
- 连接上海徐家汇漕溪站和长春站；
- 用于替换220 kV线路；
- 国内首条公里级超导电缆，长度为1.2 km；
- 已于2021年11月30日成功运行。



超导通电导体生产线



低温管道连续成型生产线



• 超导限流技术

超导限流技术：典型项目

220kV电阻型超导交流限流器：

- 结构型式：电阻型超导限流器；
- 实施：江苏中天科技、北京交通大学
- 额定电压/电流：220kV/1.5kA；
- 地位：世界最大容量电阻型超导限流；
- 测试时间：2018年1月。



江苏中天科技有限公司

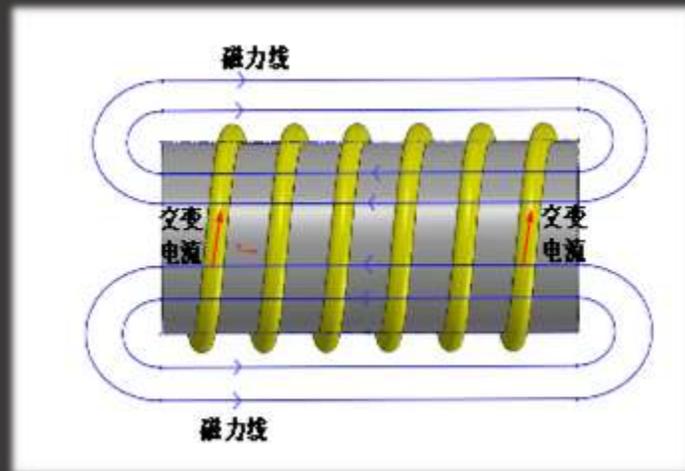


160kV超导直流限流器：

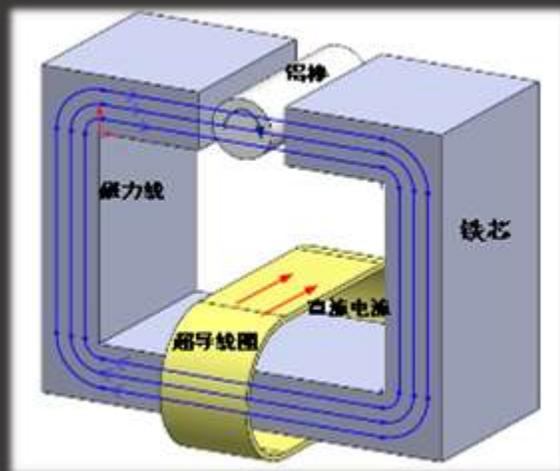
- 结构型式：电阻型超导限流器；
- 实施：广东电网、北京交通大学、西部超导等；
- 额定电压/电流：直流160kV/1.0kA；
- 地位：世界首台输电级超导直流限流器、首次开展人工短路试验；
- 并网时间：2020年8月。

大容量超导感应加热技术

常规感应加热

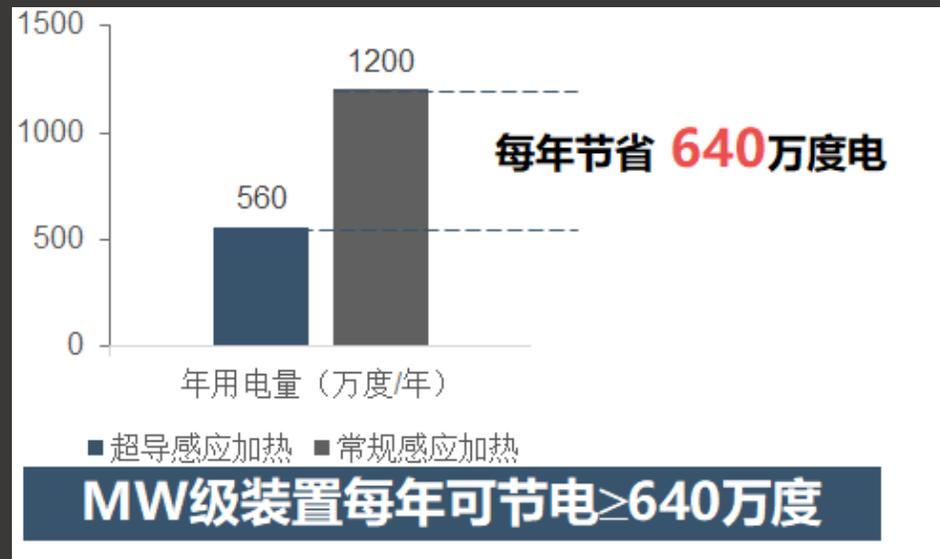


超导直流感应加热



超导感应加热工业样机

	常规交流感应加热	超导直流感应加热
加热频率	≥50 Hz (≥3000 rpm)	4-10 Hz (240-600 rpm)
电流穿透深度	≤15 mm	≥100 mm (可通体加热)
加热效率	40%-45% 铜线圈损耗约50% 电气损耗约10%	80%-85% 电机损耗约为10% 制冷损耗约为5%



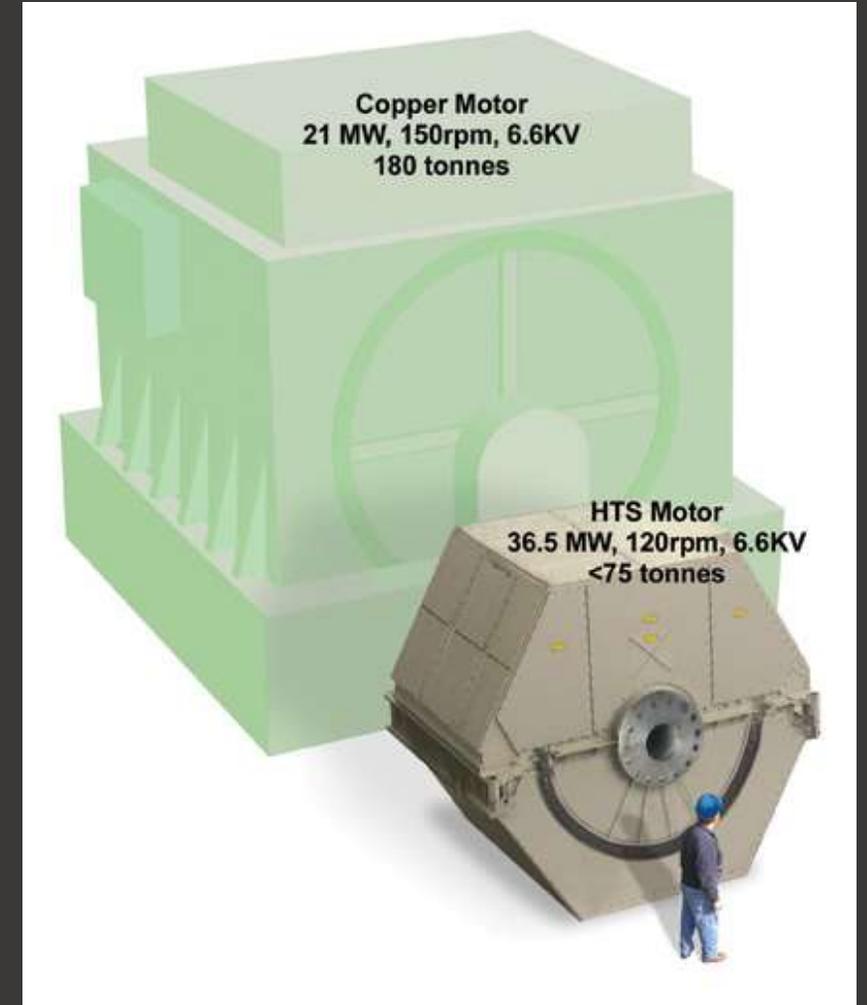
• 超导船舶推进电机

电推进是目前舰船推进的主要方式

超导电机的优点：

- 更高效率
- 体积小
- 重量轻
- 噪声小

36.5MW舰船推进实验电机



铜线圈和超导线圈电机的尺寸的比较

• 超导磁体应用于高速磁悬浮列车

高温超导是实现高速磁悬浮交通的主要途径之一

- 2023年中国高铁运营里程~4.5万公里，最高时速达~350公里，世界领先
- 2019年国务院印发《交通强国建设纲要》，明确提到合理统筹安排**时速600公里级高速磁悬浮系统...等技术储备研发。**
- **超导磁悬浮列车时速可达600公里**，欧美日加速研发，正向技术实用化、低成本方向发展



日本正研制高温超导磁浮列车

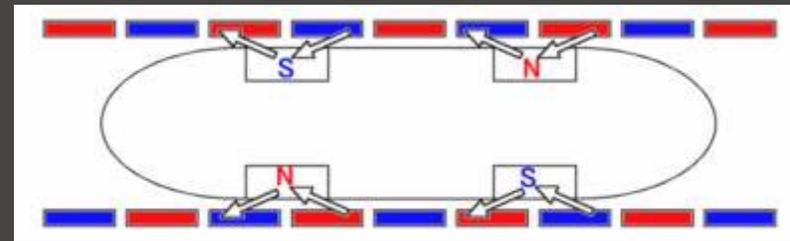
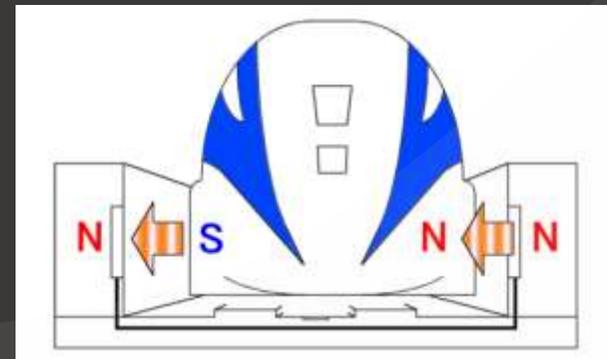
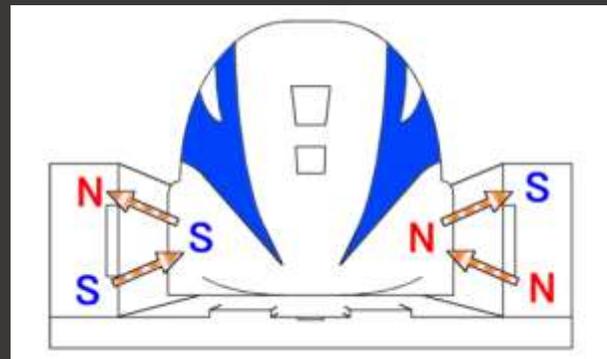
• 超导磁体应用于高速磁悬浮列车



西南交通大学：高温超导磁悬浮样车

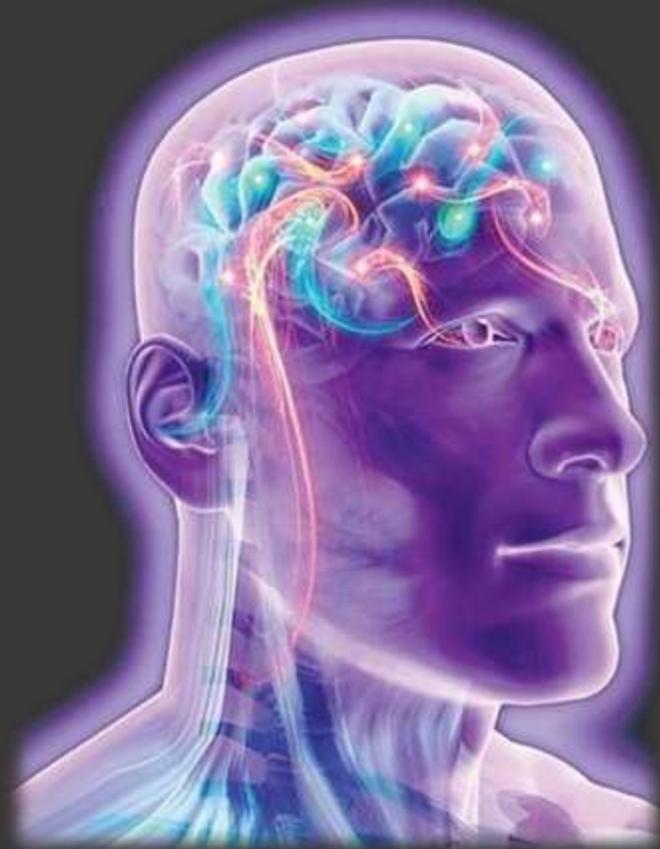


超导磁悬浮列车的磁悬浮原理



高场磁共振成像磁体

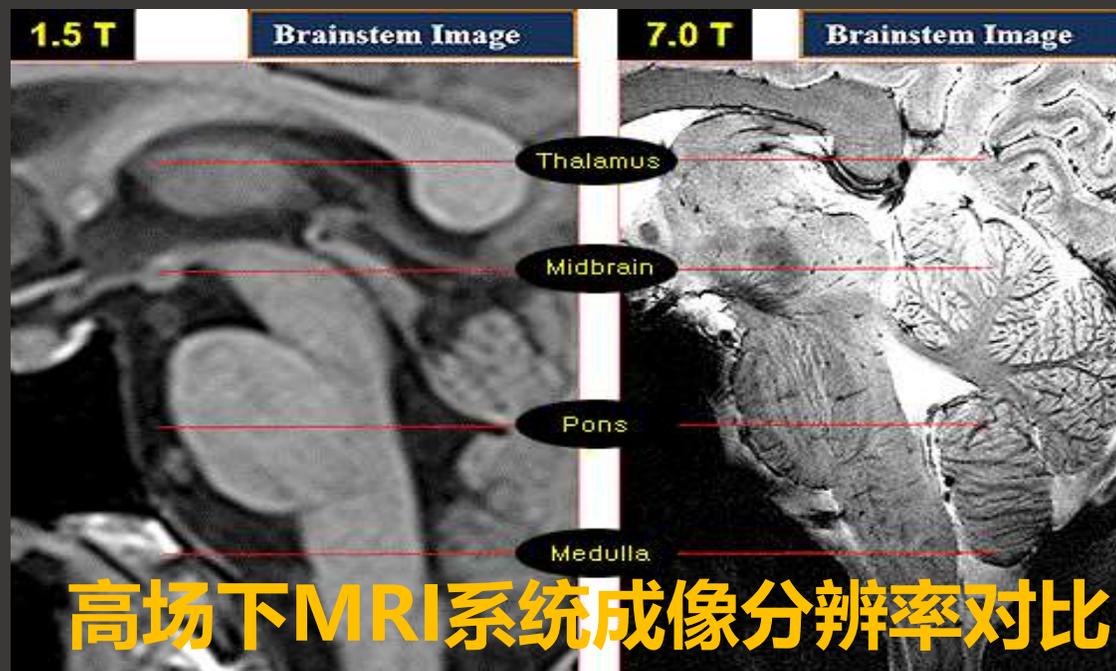
脑科学研究及疾病诊断



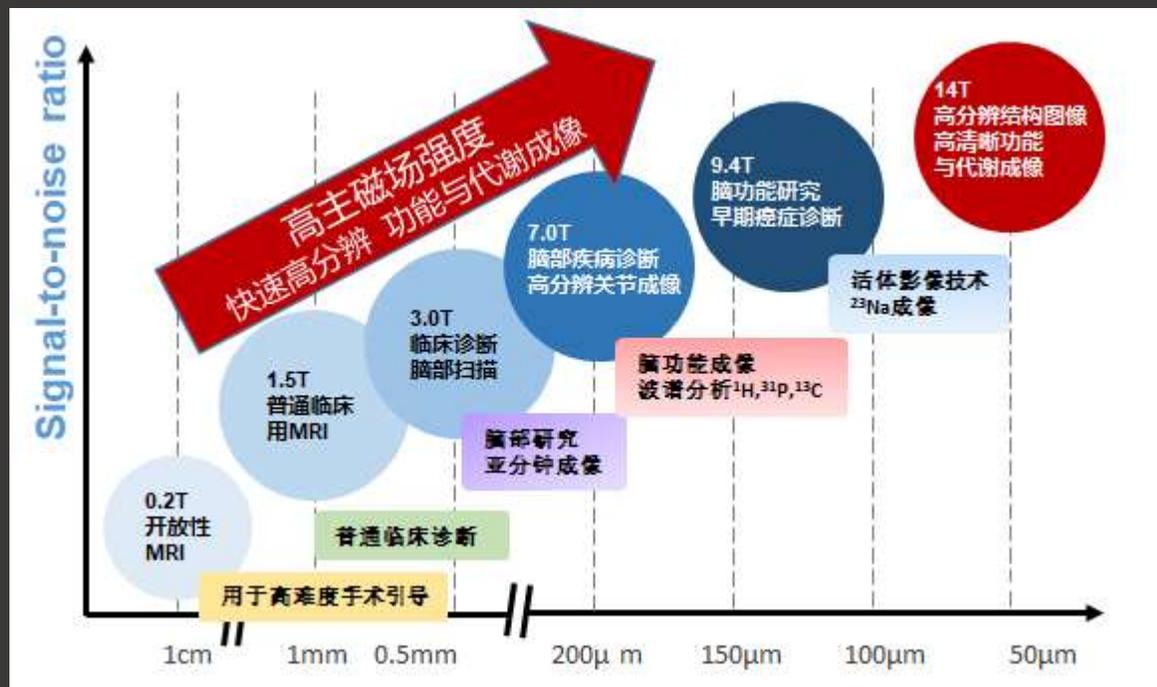
超导核磁共振功能成像

- 超高场MRI系统分辨率高，在脑科学研究、早期脑部疾病、早期心脏疾病、早期癌症诊断方面，有着十分重要的应用。
- 国内在高场MRI研究领域处于起步阶段。

高场强 → 高信噪 (SNR) → 高分辨率



高场磁共振成像磁体



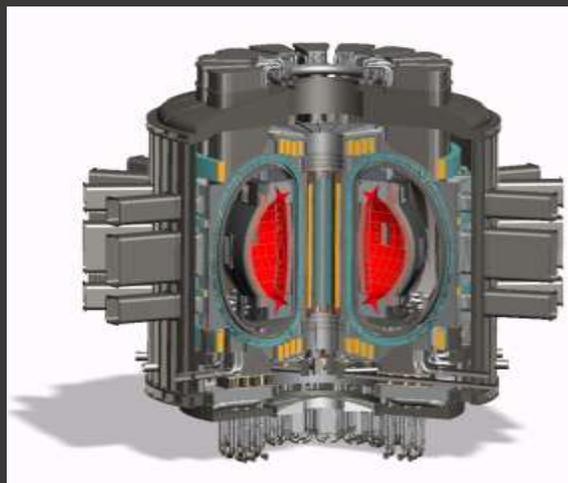
设计目标

- 中心场: 14 Tesla
- 室温孔径: 65 cm
- 中心球形成像区域磁场不均匀度: $< 10^{-6}$
- 高场磁体关键技术突破

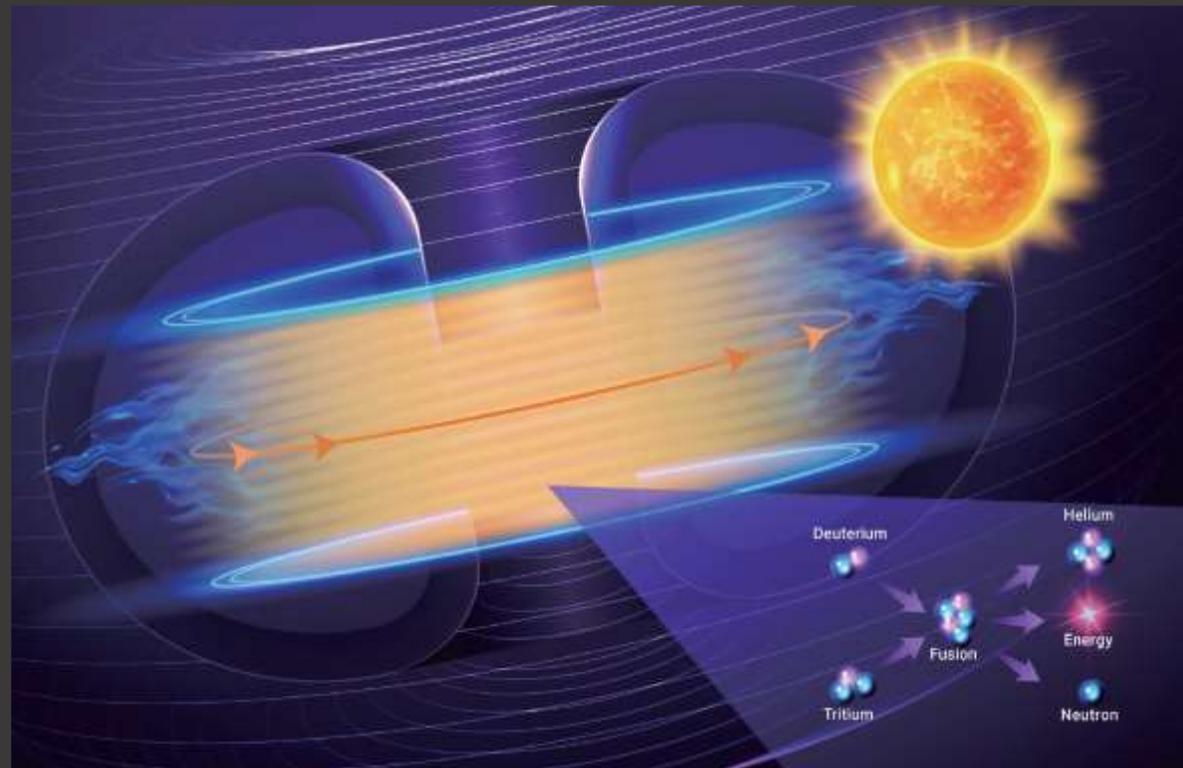


美国、法国、韩国等国家计划装备10.5 T, 11.7 T和14 T的更高的场系统, 处于规划阶段。我国相关计划正在开展中。

全超导可控核聚变



磁体系统是聚变堆的核心，超导占成本37%



受控热核聚变是解决能源的最有效手段之一

- 温度>1亿度；磁约束是最有效的手段之一
- 需要强磁场 (11 T)；超导磁体不可缺少

• 未来聚变堆运行环境：

高磁场：15 T；大电流：100 kA；大尺寸：10 m

高场优势：

- 提高聚变功率($\propto B^4$)
- 增强等离子体约束能力
- 减小规模，提高经济性

磁场升高 \uparrow 发电成本 \downarrow

装置名称	ITER	EU-DEMO	CFETR
国家	国际	欧盟	中国
最高场 (T)	10.8	~13.5	~15

- 超导磁体是高能量粒子加速器的关键



- 欧洲核子研究中心（CERN）建造的大型强子对撞机(LHC)采用了**1734**个大型超导磁体；超导谐振腔（电子加速）
- LHC使用了**1200**吨超导线；**130**吨液氦提供磁体低温环境。
- 2012年上帝粒子发现后，
 - ❖ 中国提出CEPC-SPPC
 - ❖ 欧洲提出FCC



急需解决高场技术问题

• 超导粒子加速器

SPPC或FCC需数千个高场超导磁体

2017
首选

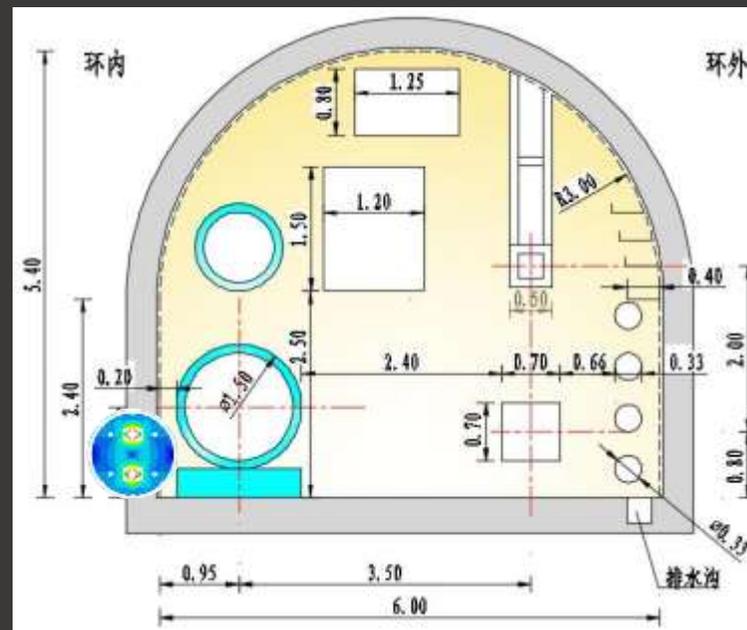
铁基
超导

2018
备选



CEPC/SPPC

FCC



SPPC隧道截面布局

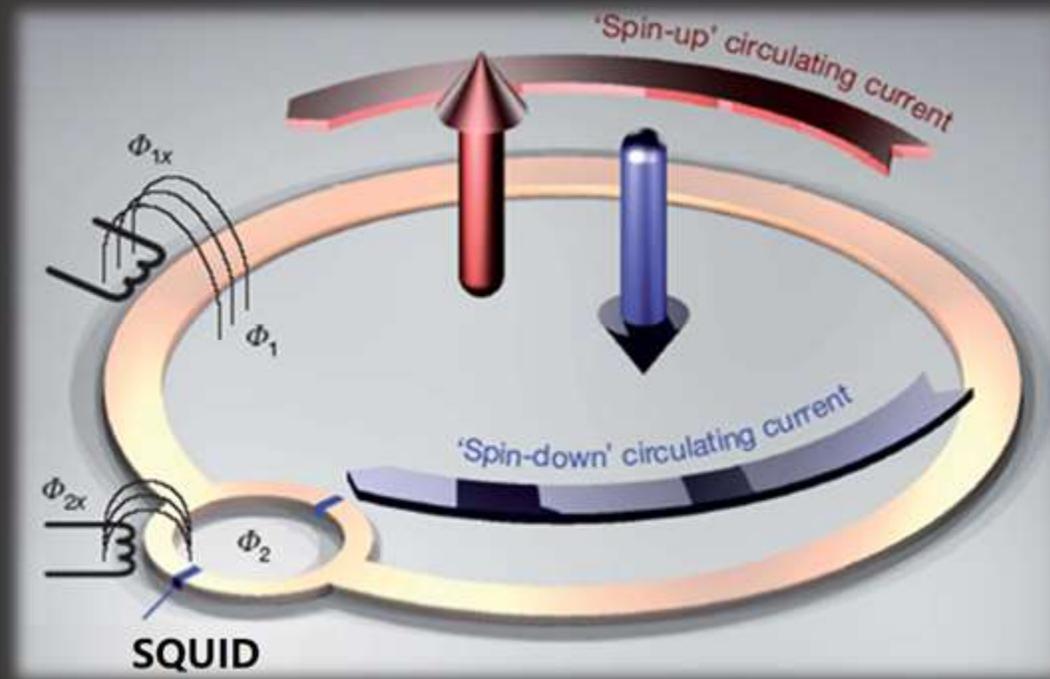
• 超导弱电应用

精密仪器

- 超导量子干涉仪 (SQUID)
- 超导隧道结电压基准
- 超导单光子探测器
- 超导太赫兹探测
- 超导谐振腔
-

信息科学

- 超导滤波器
- 超导量子计算
-



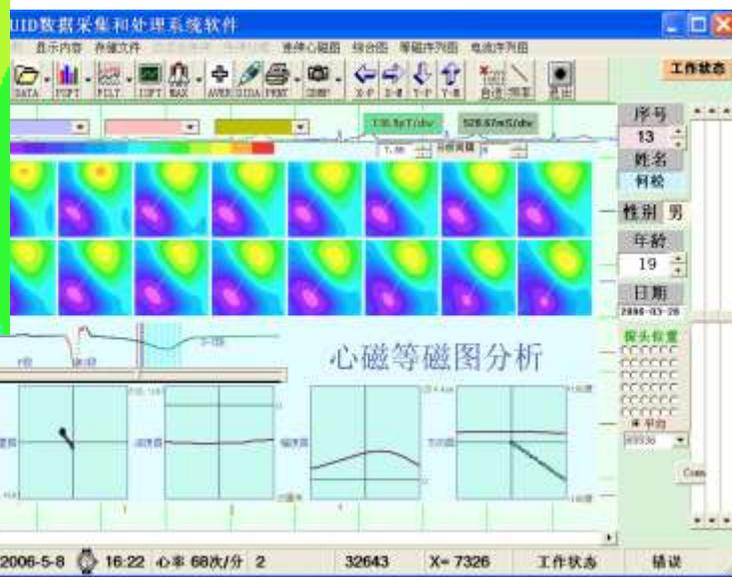
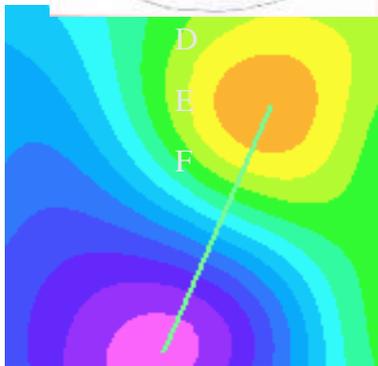
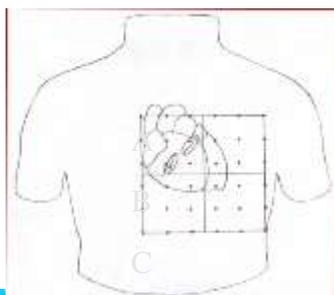
能够检测出相当于地球磁场的几十亿分之一的变化，其灵敏度理论上只受量子力学测不准原理的限制。

• 超导量子干涉仪 (SQUID)

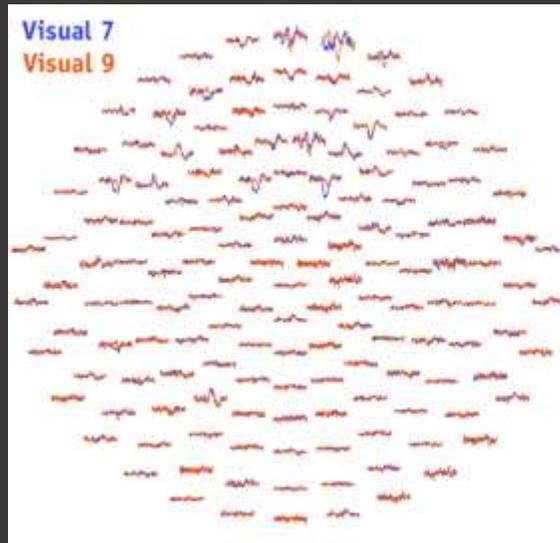
SQUID测量心磁图、脑磁图

无创、无接触、快速
比电测量信息多

心磁、脑磁信号非常微弱，
SQUID必不可少！



中科院物理
所与中日友
好医院心磁
图实验结果



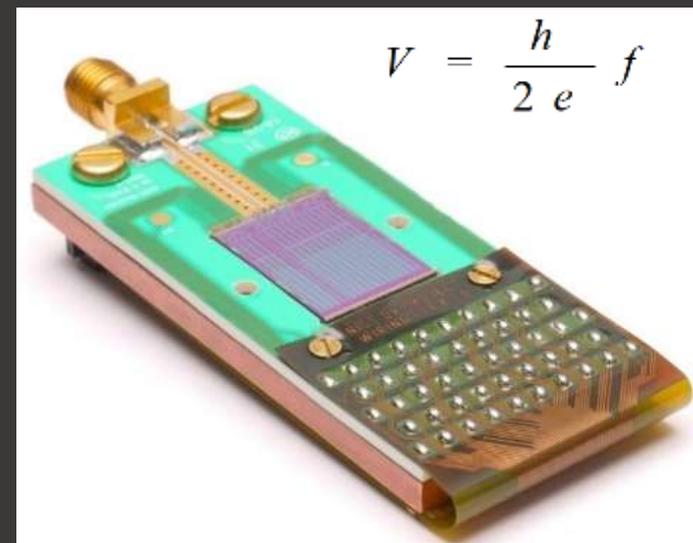
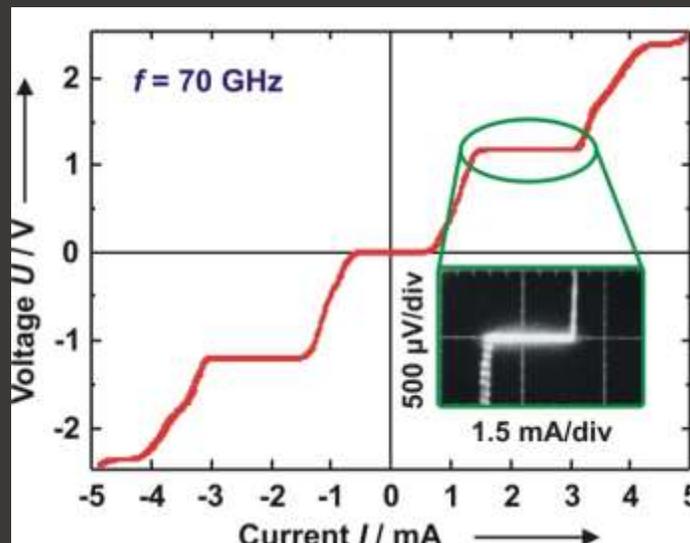
约瑟夫森超导隧道结电压基准

约瑟夫森超导隧道结电压基准
已经代替了化学电池电压基准

电压标准

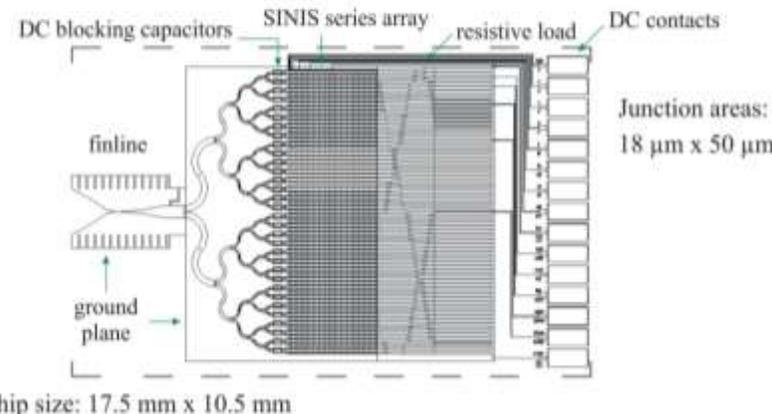
$$V = \frac{h}{2e} f$$

- 与材料性质无关
- 环境条件(如温度, 磁场)无关
- 与结的类型无关
- 高精度 $< 10^{-9}$ (3×10^{-19})



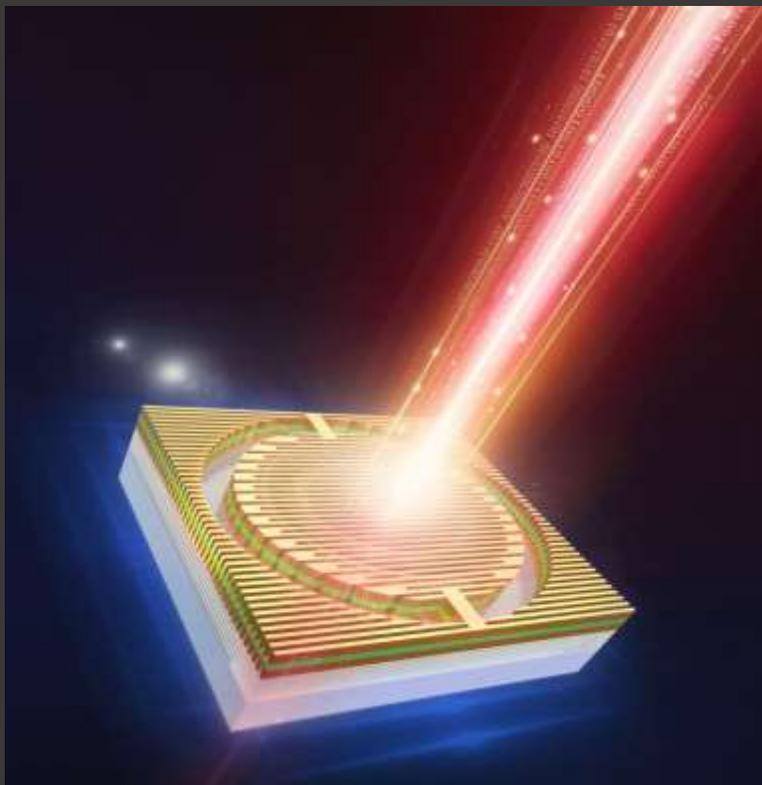
交流电压标准

- ▶ 8192 SINIS junctions divided into binary segments
- ▶ 64 microwave branches
- ▶ Reduced length of the microwave load



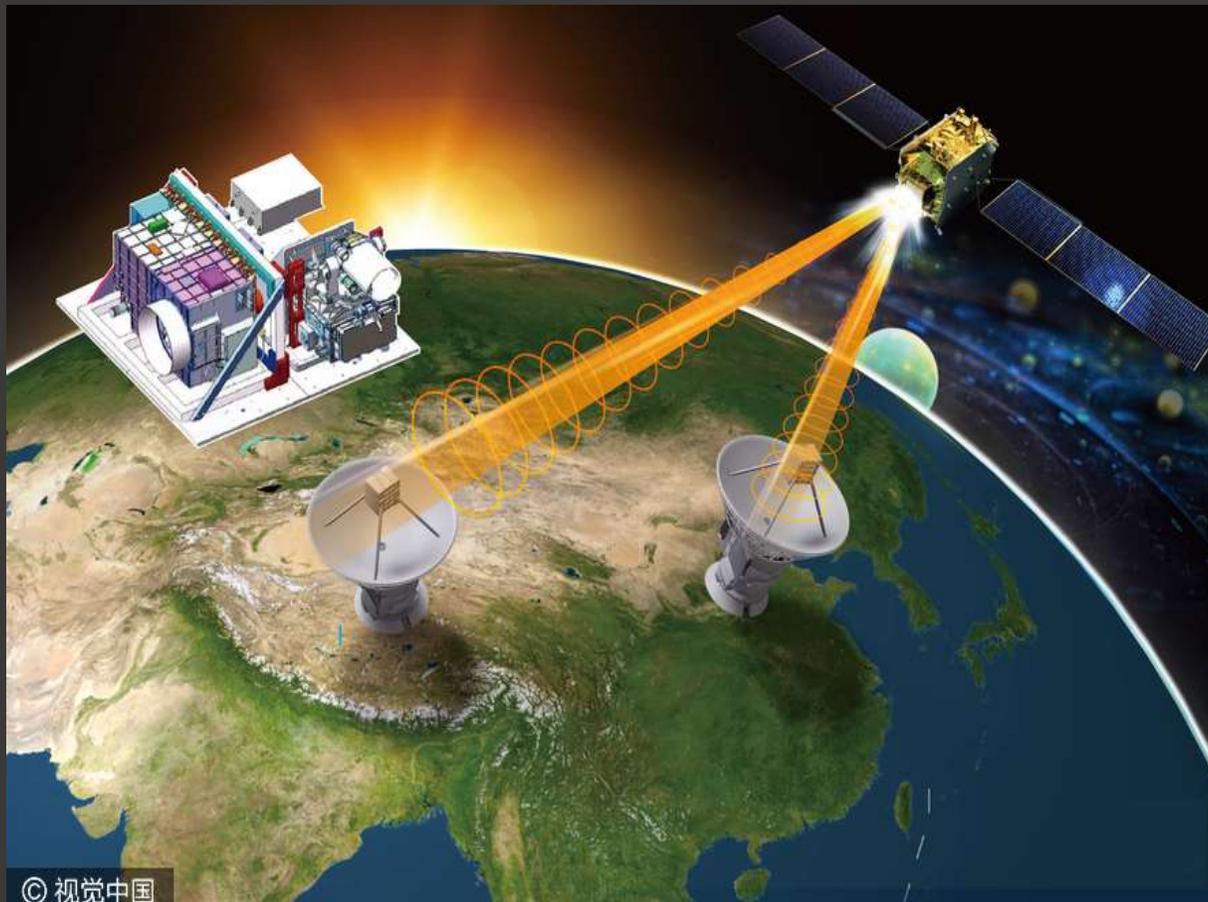
- **超导单光子探测器**

超导纳米线单光子探测器



实现量子极限灵敏度探测
高探测效率、低暗计数等优异性能

超导单光子探测与量子通讯

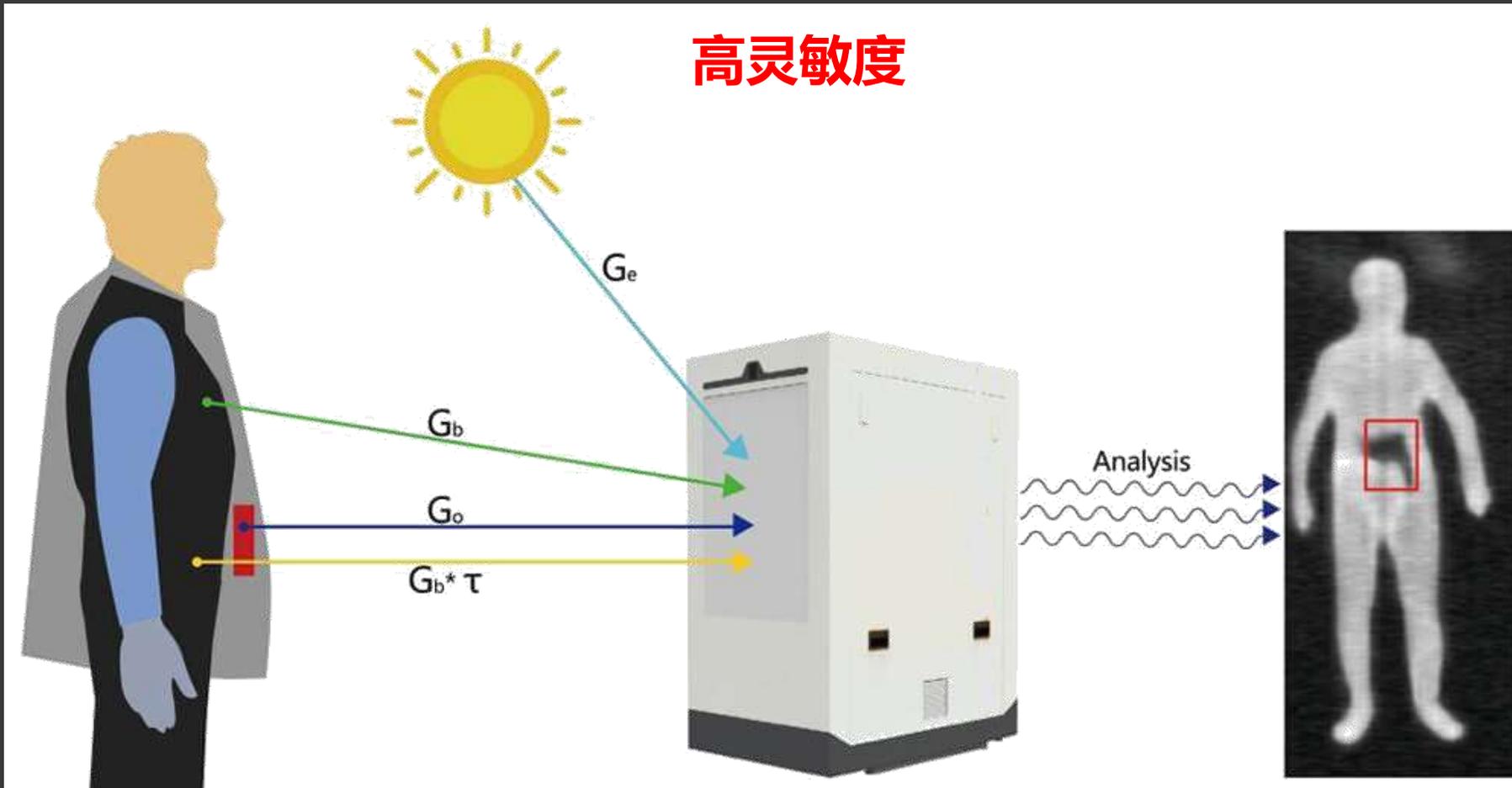


© 视觉中国

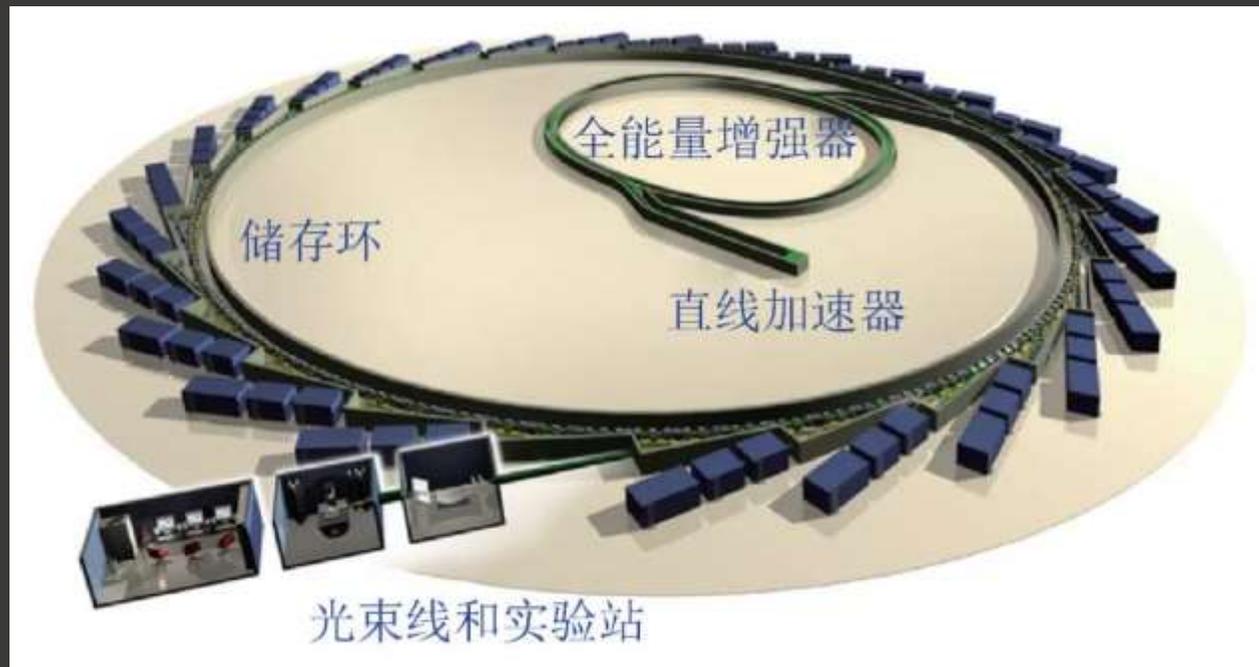
超导单光子探测器是实现远距离量子通讯的“秘密武器”

- 超导太赫兹探测

太赫兹探测技术的核心是“超导探测器”

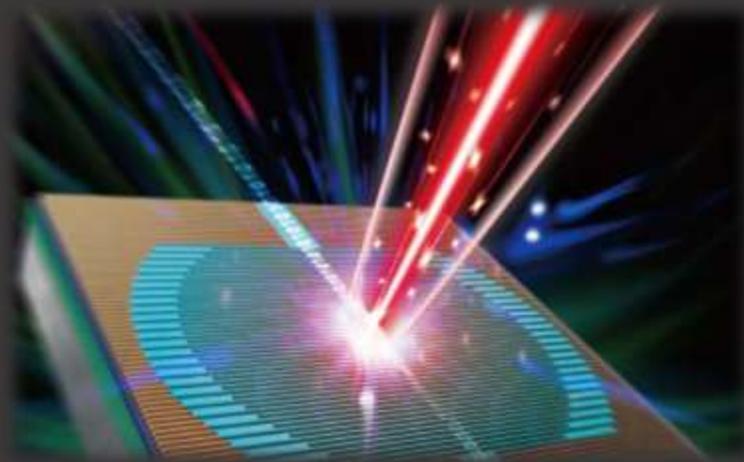
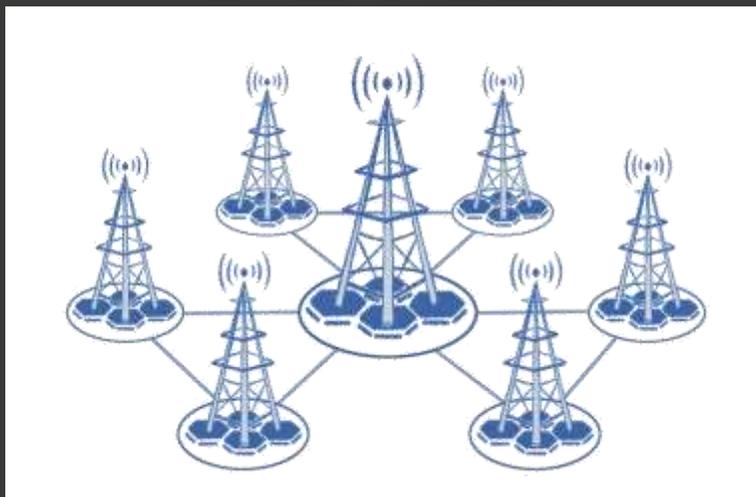
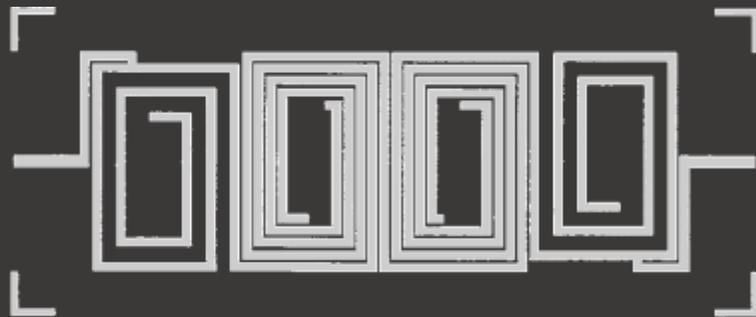


- 超导谐振腔



超导谐振腔可以在很小的微波功率下产生很强的加速电场，可用来构建同步辐射光源的超导直线加速器，通过不断加速电子产生同步辐射光源

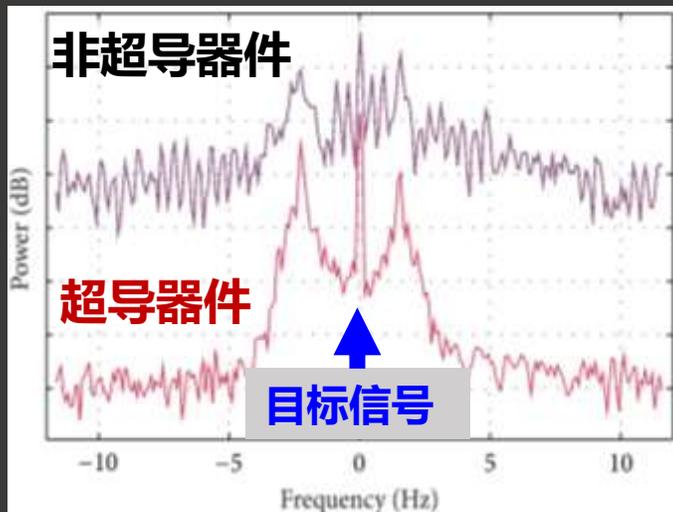
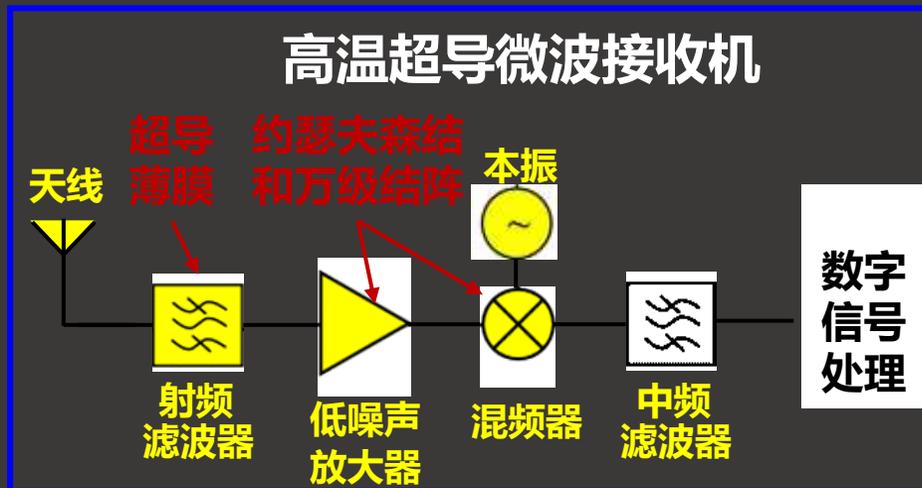
- **超导滤波器**



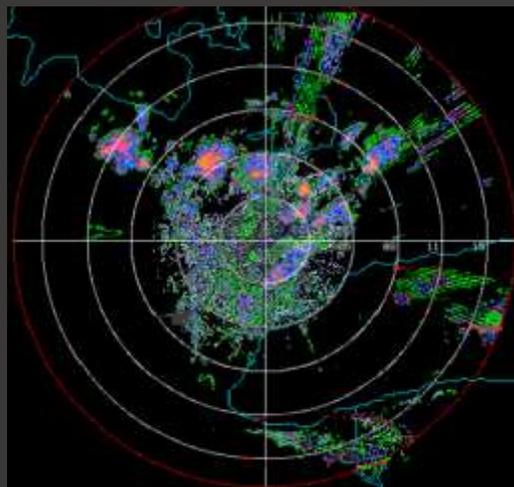
超导滤波器在移动信号基站的使用，大大提高了移动信号的品质。

• 超导雷达

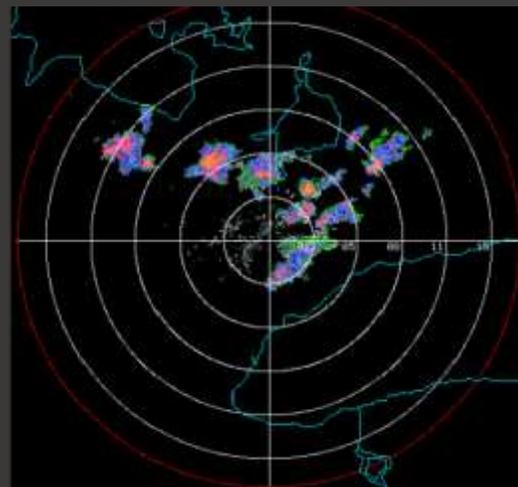
雷达：超高分辨、抗干扰、便携



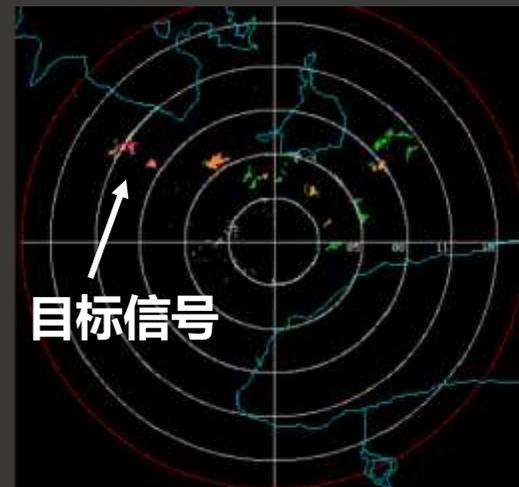
非超导：看不见



部分超导(滤波)：看得见

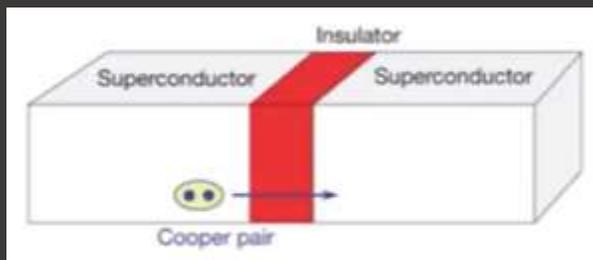


全高温超导：看得清/远

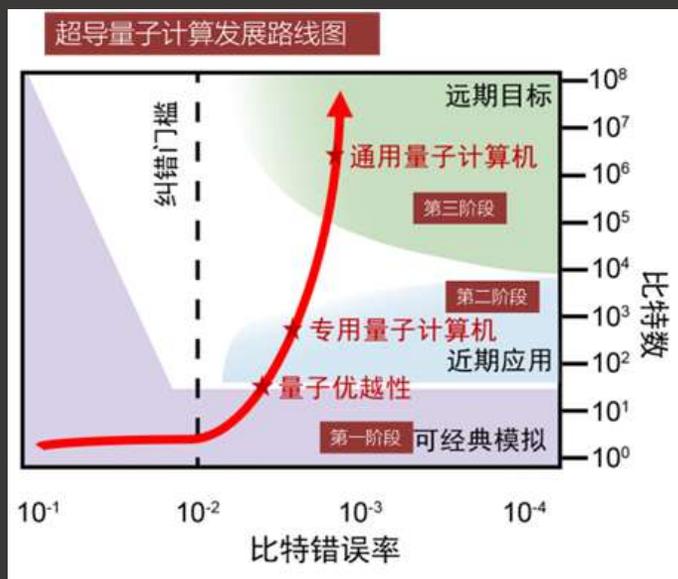
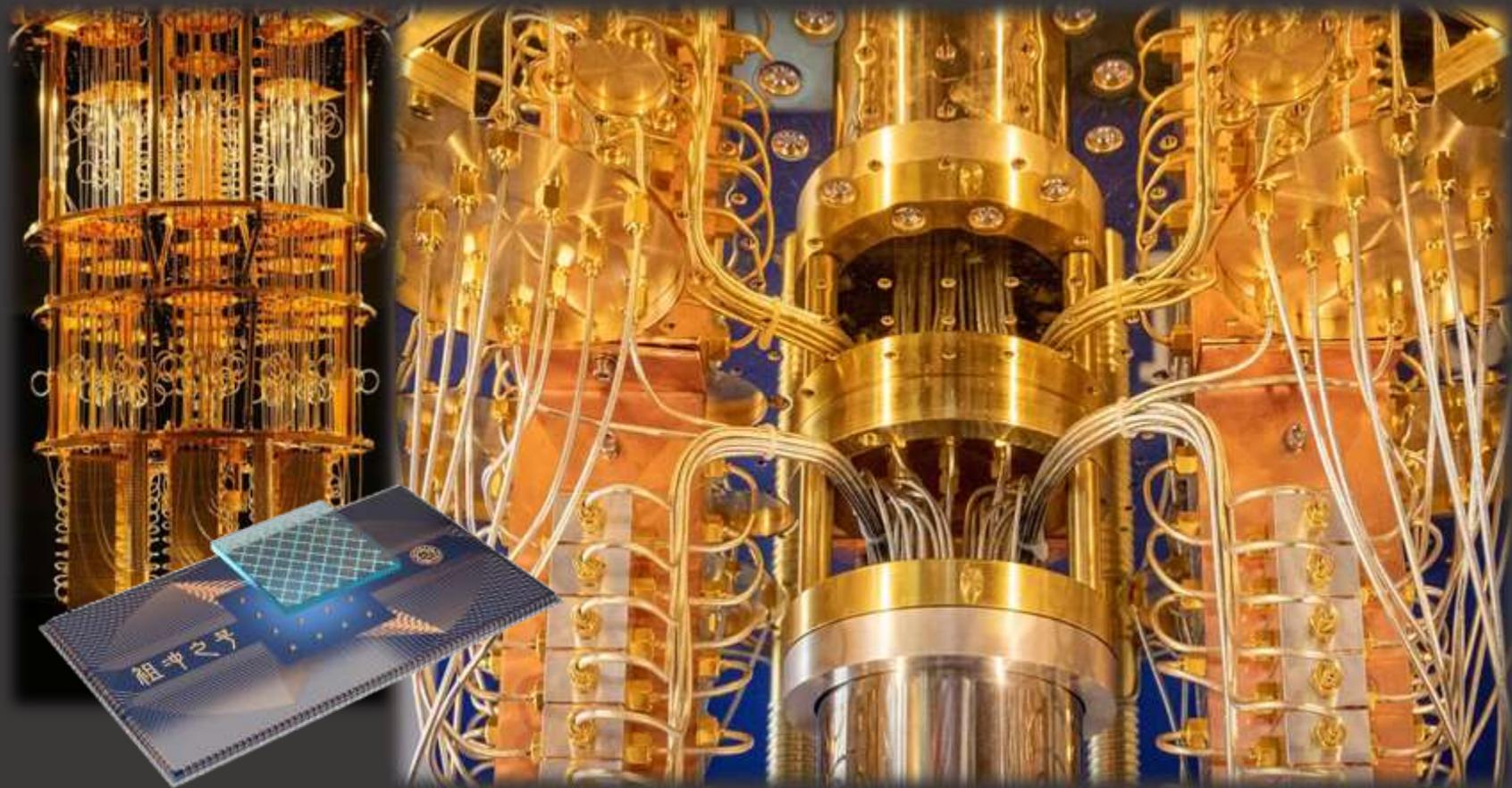


• 超导量子计算

超导量子计算处理器“祖冲之号”



超导约瑟夫森结



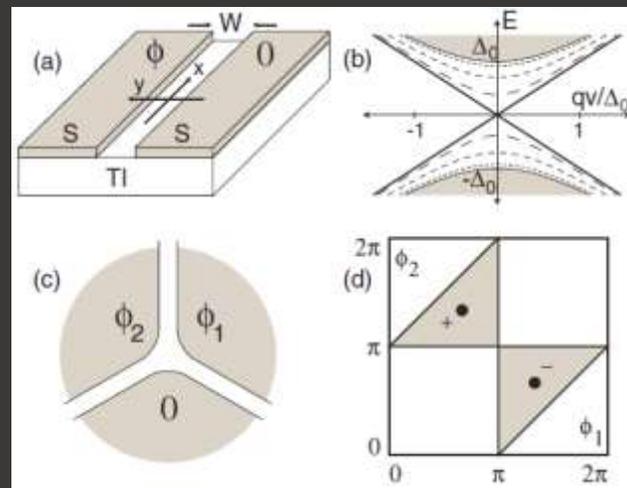
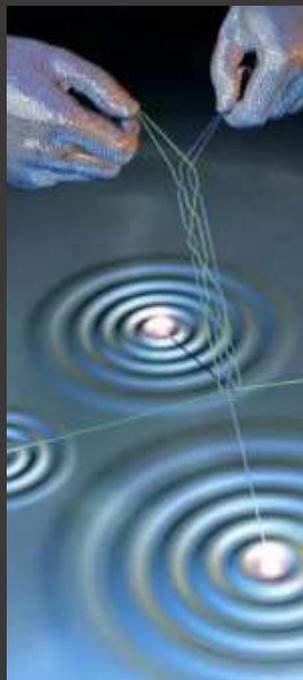
• 拓扑量子计算



A. Kitaev, Ann. Phys. (2003).

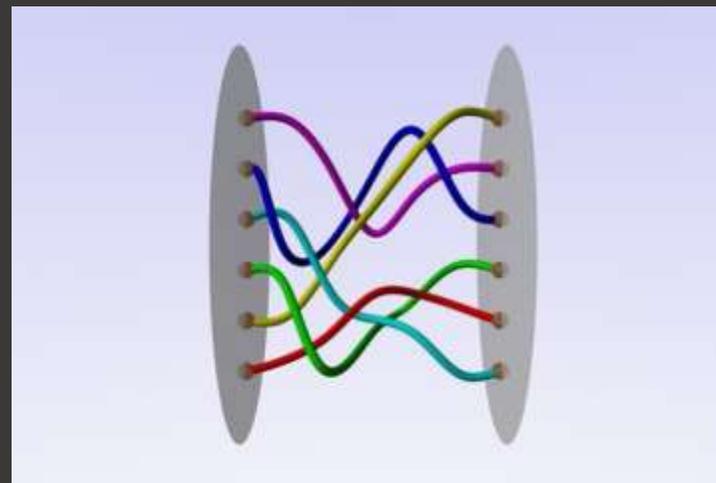
Anyon/任意子:

可以用来将量子态编译到物质的拓扑性质中 (braiding), 其广域性使得量子计算具有容错性。



理论提出利用“拓扑超导体”来实现满足非阿贝尔统计的任意子

拓扑量子计算



- 低维拓扑超导体中产生的任意子激发能用于拓扑量子计算。
- 量子信息的存储受到拓扑保护, 抗噪声能力强。

- 军事应用



超导电磁弹射

大幅提升载荷能力和任务执行效率

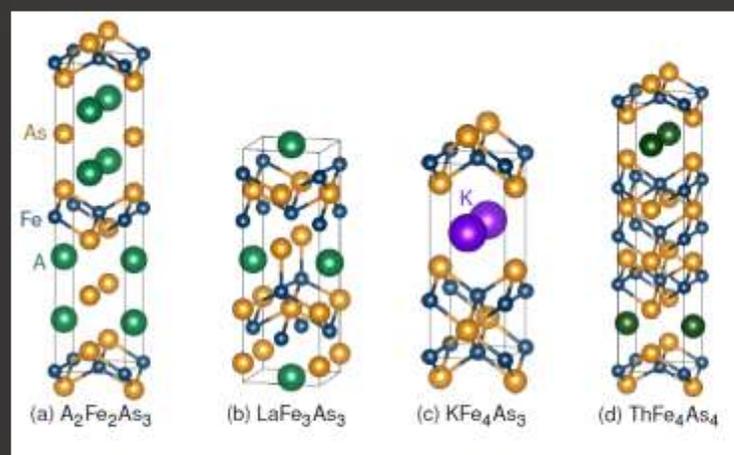
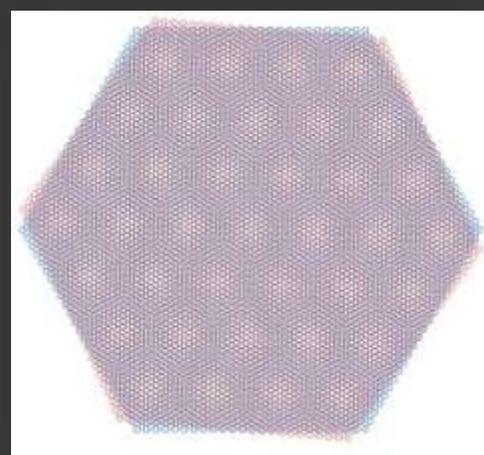
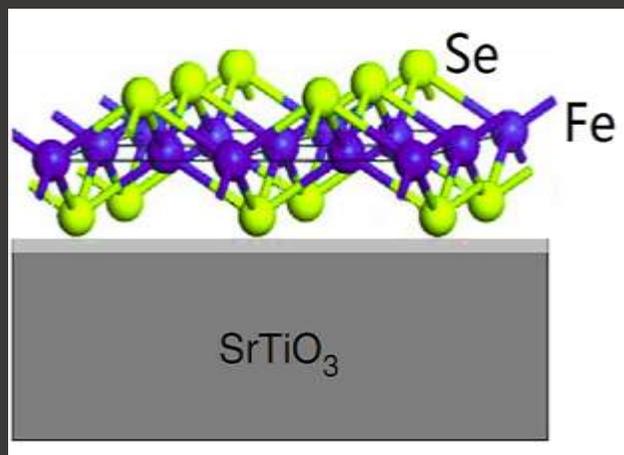
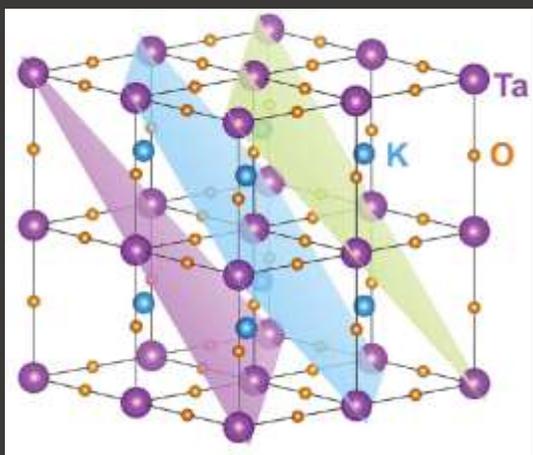
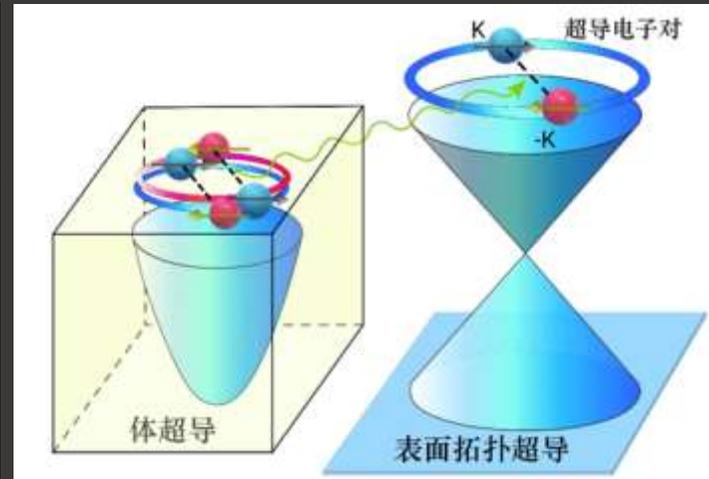
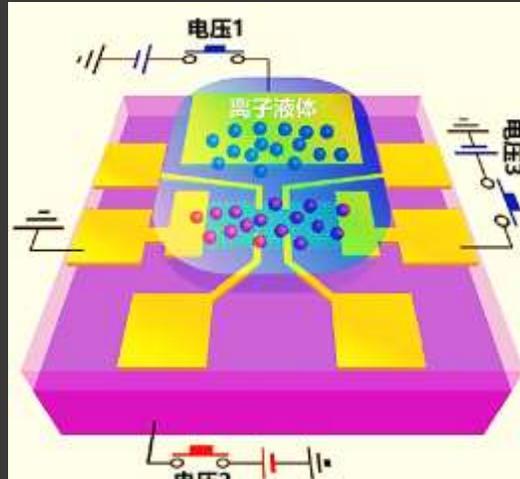
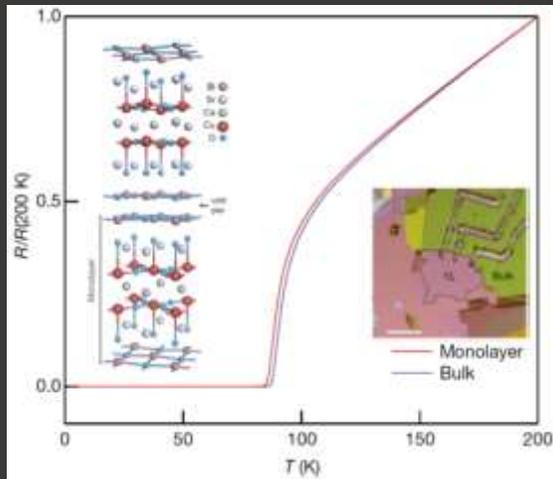
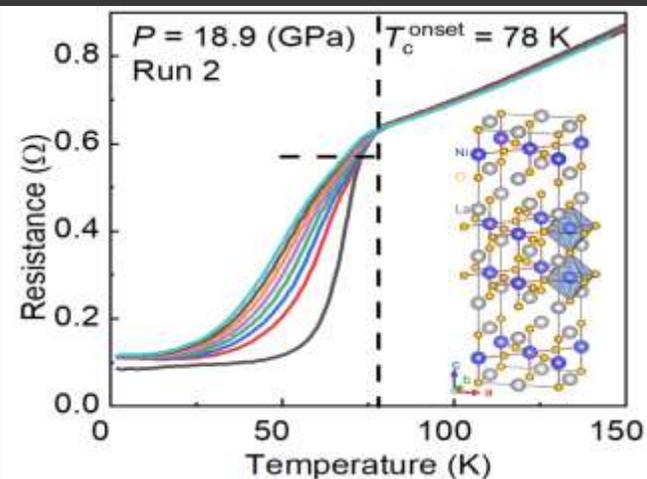
超导核潜艇

利用超导推进电机
低噪音、高效、体积小、重量轻



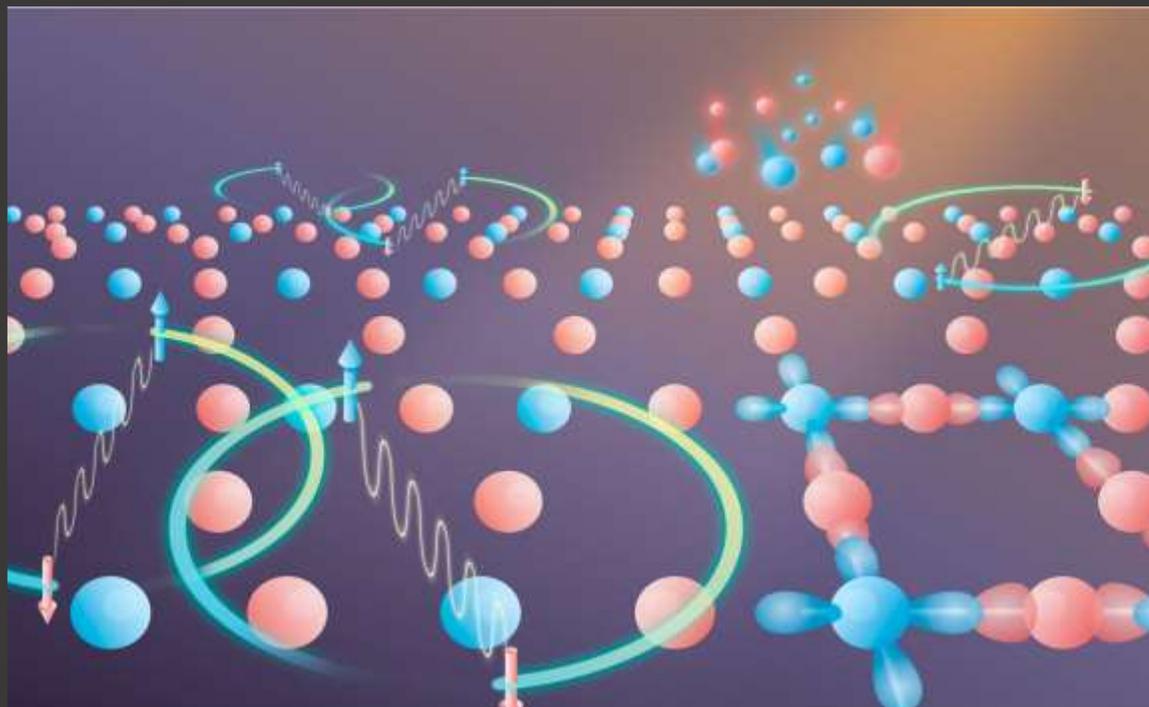
超导的前沿与展望

超导研究展望——材料科学重要前沿方向

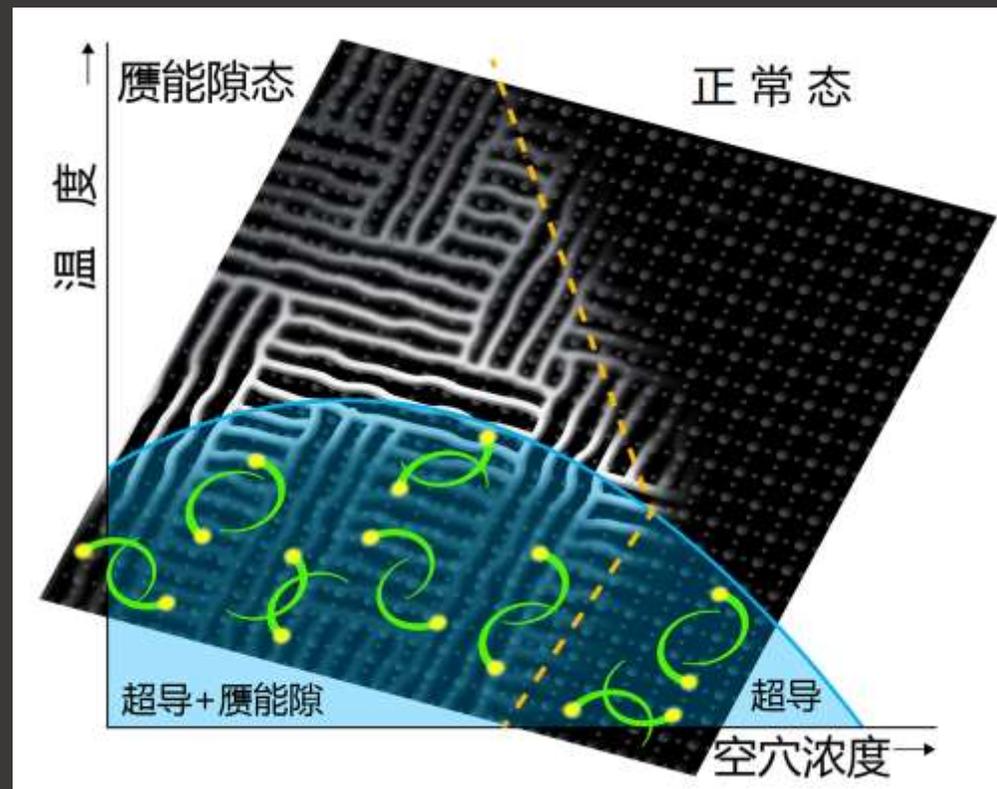


超导材料和物理的基础研究，已经出现“全面开花、静待结果”，各种新形式、新技术帮助我们找到许多新材料、新物性，未来超导研究一定充满惊喜。

• 超导研究展望——高温超导机理



量子力学在固体物理的应用建立了“能带论”，实现半导体的规模应用，改变了世界。

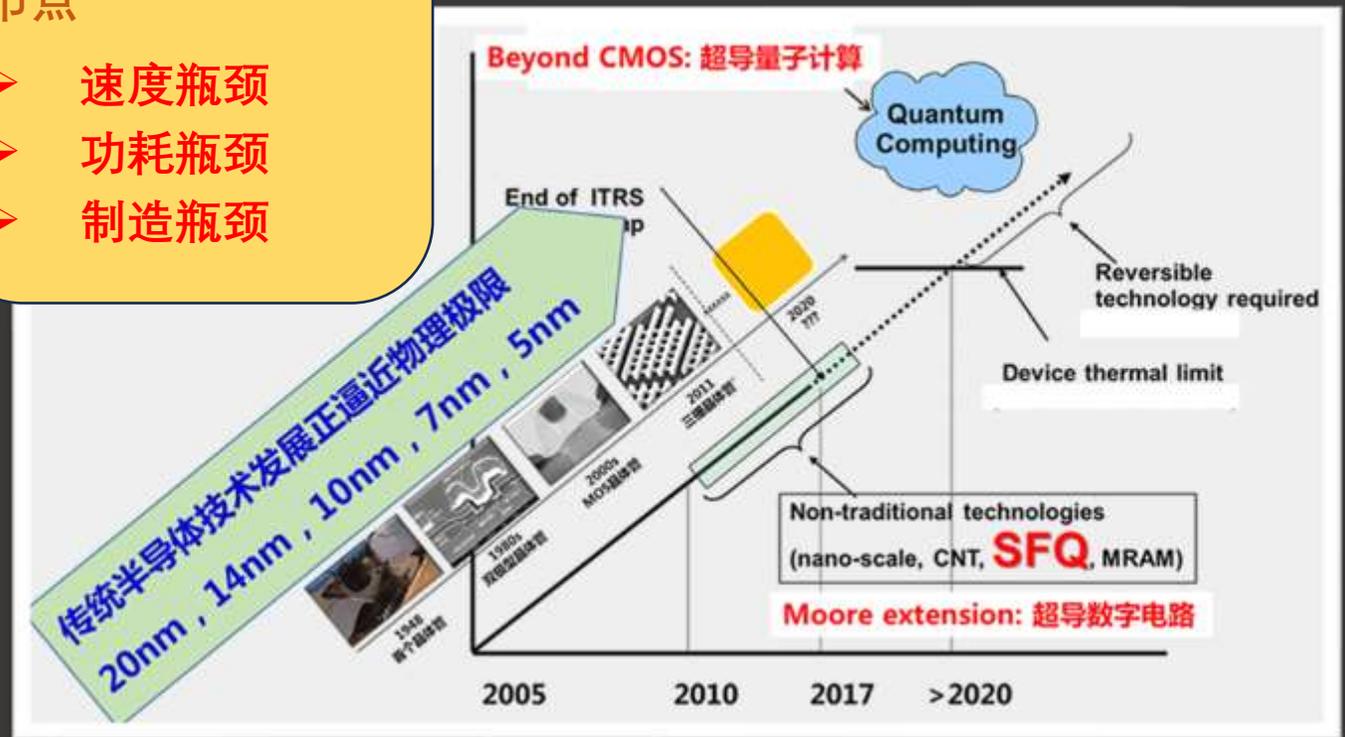
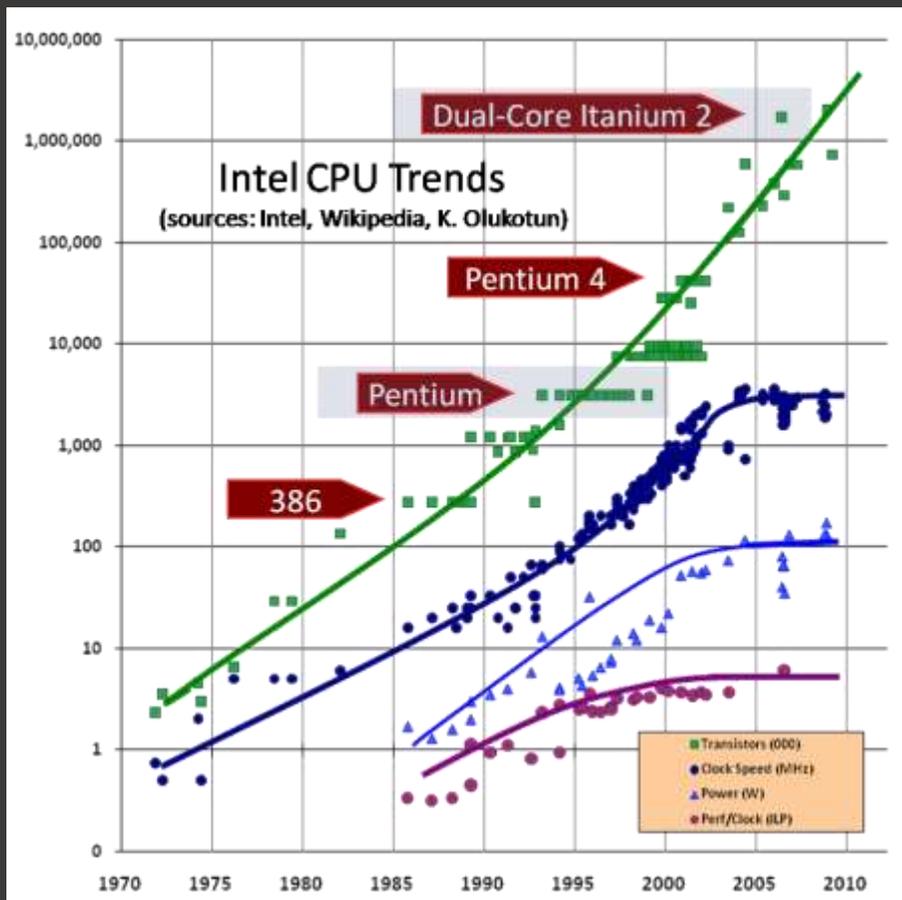


高温超导机理的解决将建立“多体物理微观理论”：将奠定未来社会变革性技术的基石！

• 超导研究展望——突破半导体技术瓶颈

半导体集成电路已进入亚十纳米技术节点

- 速度瓶颈
- 功耗瓶颈
- 制造瓶颈



超导集成电路是后摩尔信息技术的重要方向。

• 超导研究展望——超导计算机解决高性能计算问题

半导体计算机

在速度和功耗墙下演进
极限制造 (5nm...)
人工智能芯片
新型构架
.....

量子计算机 原理性颠覆方案

只能解决特定问题
发展迅速，挑战巨大
需要构架全新生态系统

超导计算机 器件级颠覆方案

经典比特，冯诺依曼架构
技术相对成熟，时间表相对清晰
工艺以及发展生态环境和半导体技术兼容

器件: JJ vs PN; SFQ vs CMOS;

- 速度: 百GHz vs GHz;
- 功耗: $10^{-19} \text{ w} \sim 10^{-14} \text{ w}$;
- 设计: 和半导体EDA原则兼容;
- 工艺: 和半导体工艺完全兼容;
- 节点: 微米工艺已经可以和半导体竞争;
- 环境: 可以复用半导体集成电路建立的生态环境。

根本性解决能耗、空间和冷却问题!

- **超导研究展望——室温超导将推动下一次技术革命**

人类文明的进展可按材料来划分：石器、青铜器、铁器和当代的硅器时期

下一个文明时期代表材料的有力候选是：**室温超导体（信息材料和能源材料）**



科学家的终极理想，
将永久性解决能源问题

• 超导研究展望——筑梦未来



未来能源工业、电力传输、交通、医疗都会因超导技术的应用发生翻天覆地变化!

谢谢大家！