

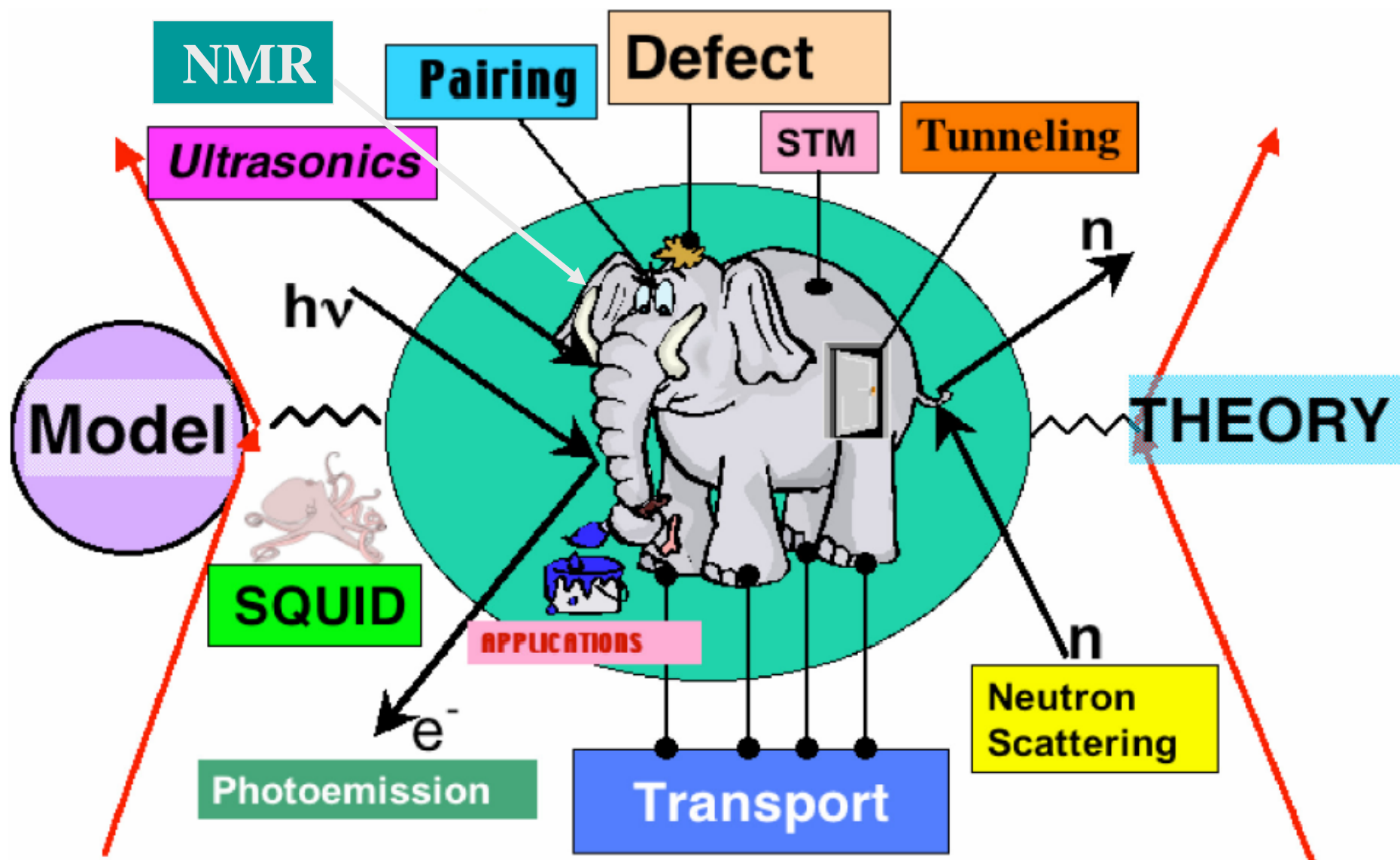
# Long March of High-Tc Superconductivity

## 高温超导现状与存在的问题

向 涛

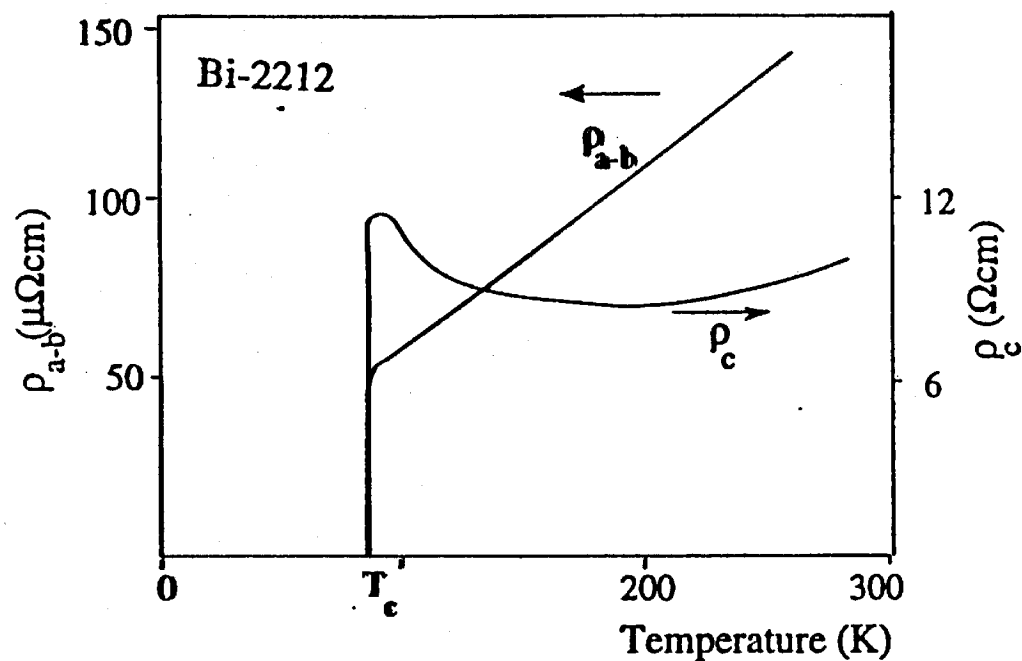
2007年1月8日

## 高温超导是我们研究的最清楚,但也是最不清楚的材料



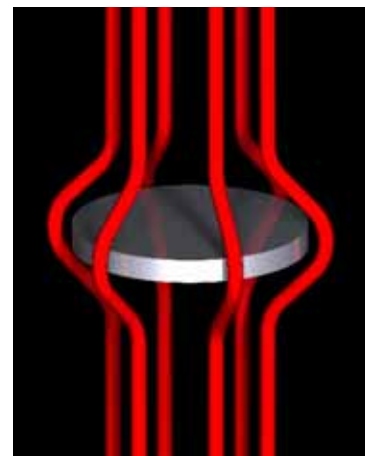
# 超导的特征性质

## 1. 理想导体



# 超导的特征性质

## 2. 理想抗磁体



# Long March of High-Tc



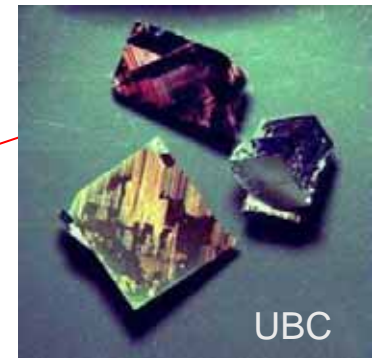
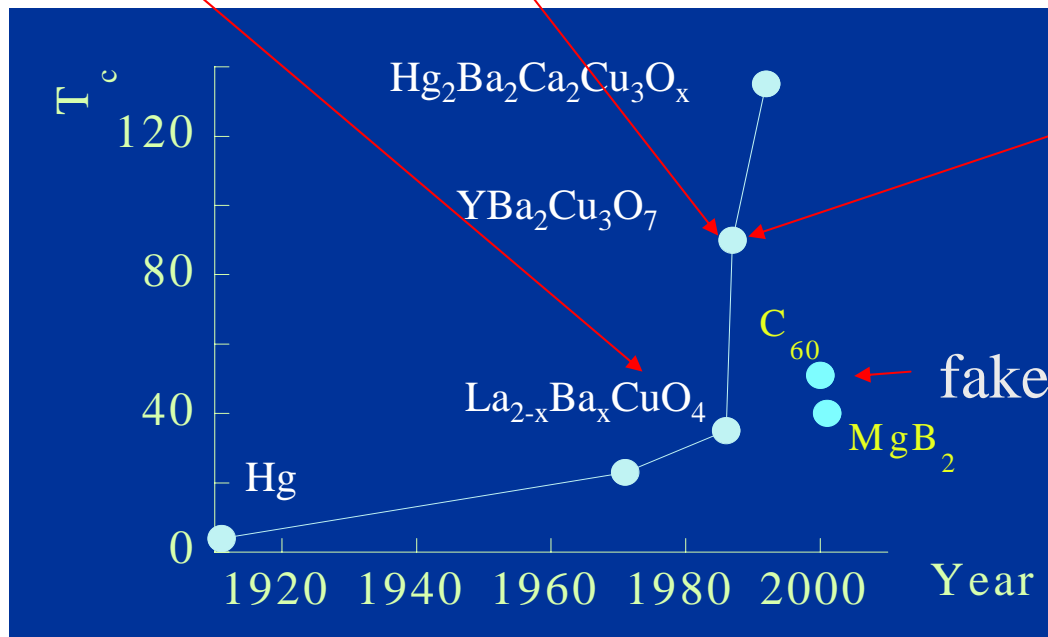
Bednorz & Muller 1986



朱经武 1986  
Yb is typo



Anderson 1987  
RVB



# 华人在高温超导研究中有不凡的表现



赵忠贤  
国家自然科学  
学一等奖



朱经武



崔章琪 1998  
Buckley Prize



李雅达  
Buckley 1991



Z X Shen  
Onnes Prize 2000

# Pre-High-Tc History of Superconductivity



Onnes 1913  
Father of  
superconductivity



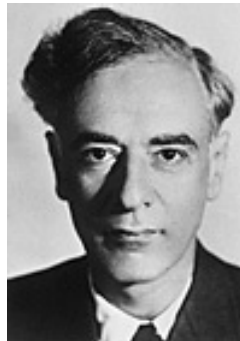
Messner 1930s'  
Messner Effect



Bardeen Cooper Schrieffer 1972  
BCS theory



Abrikosov & Ginzburg 2003  
Type-II superconductivity



Landau 1962  
G-L theory



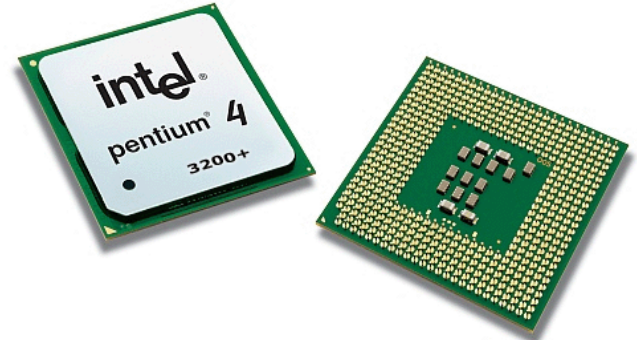
Josephson & Giaever 1973  
Josephson tunneling



# 高温超导到底有什么用？

潜在的工业应用价值（目前大约是10亿美元的市场价值）

更重要的是提供了研究复杂量子关联系统的一个典型物理系统，促进了实验手段的提高（角分辨光电子谱、扫描电子显微谱等），呼唤超越能带论或Landau费米理论的新的电子论（关联电子论）的诞生



能带论：简单金属和半导体物理的理论基石

器件的进一步小型化，不可避免要面对电子的关联效应，可能也只有充分利用关联效应才能真正克服超小型化器件的发热效应



# 高温超导研究为什么有挑战性

传统的场论工具和计算方法不够用

新的物理思想和概念积累不足

孤立原子或绝缘体



岩盐NaCl

自由电子或碱金属



金属钠

关联

高温超导

局域电子

延展电子：Bloch波

固体中的波粒二象性

# What is clear ?

几十种不同的实验技术，成千上万次实验  
各种流派理论专家的认真思考

- 晶体结构（26种基本结构，成百上千的不同化学成分）
- 基本的电子结构和相图
- 高温超导电子配对的对称性：d-波超导体
- 发现并积累了大量关于高温超导的各种反常物理行为（线性电阻，赭能隙，条纹相，谱权重失踪等）的实验数据
- 建立了研究高温超导的一些基本模型，也淘汰了一些与实验不符的理论

# High-Tc is a seeding-machine

- 催生实验手段的提高

ARPES (角分辨光电子谱)

STM(扫描电子显微谱)

单晶样品质量大幅提高

... ..

- 呼唤新电子论的诞生

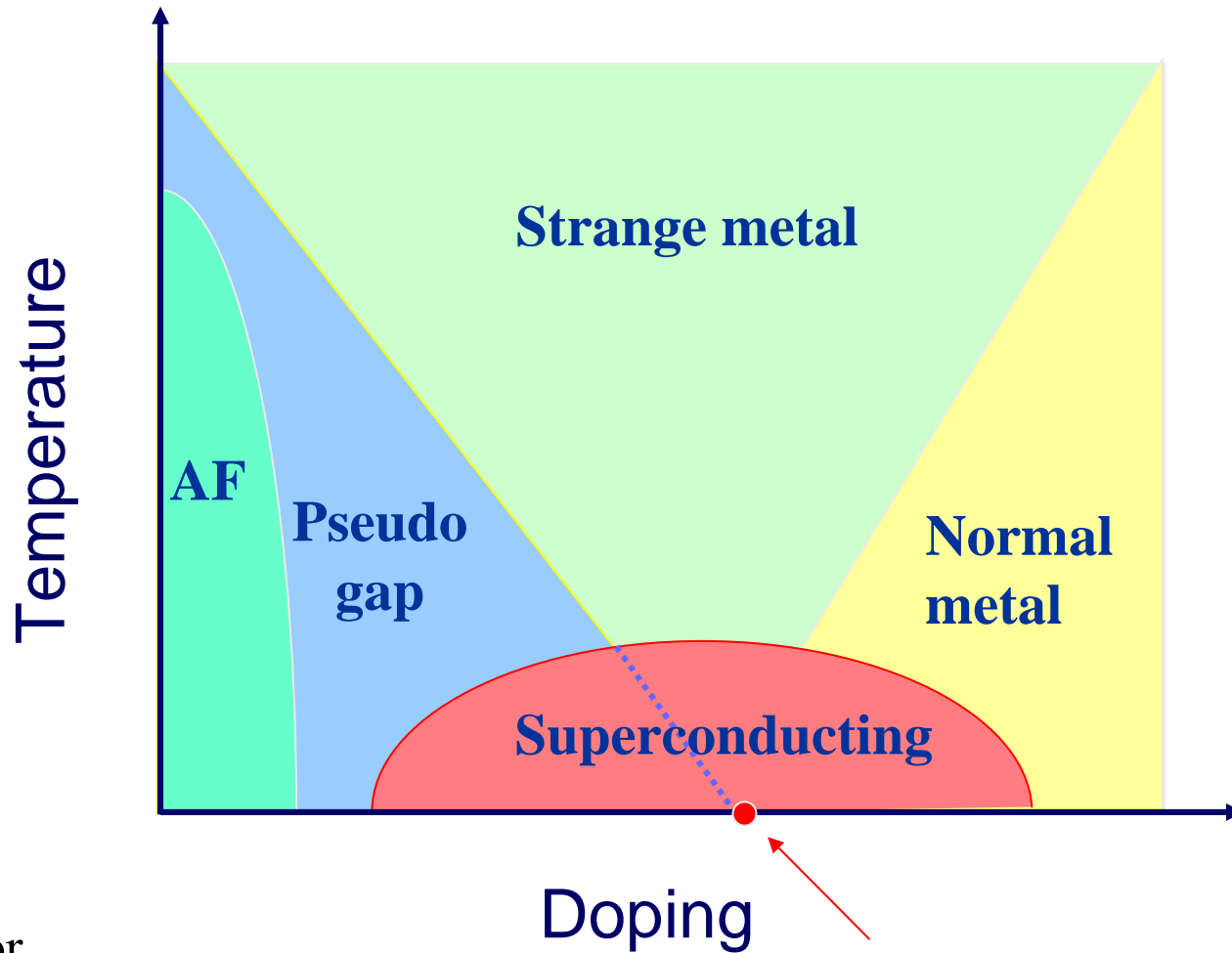
层出不穷的新概念

诱发了非费米液体和量子相变的理论研究

# Goal of High-Tc Theory

- Power of parameter-free predictions
- Unified understanding of experimental data
  - Energy scales ---- “Rulers”
  - Control parameters ---- “Golden Fingers”
  - Universality ---- “Model independent indicators”

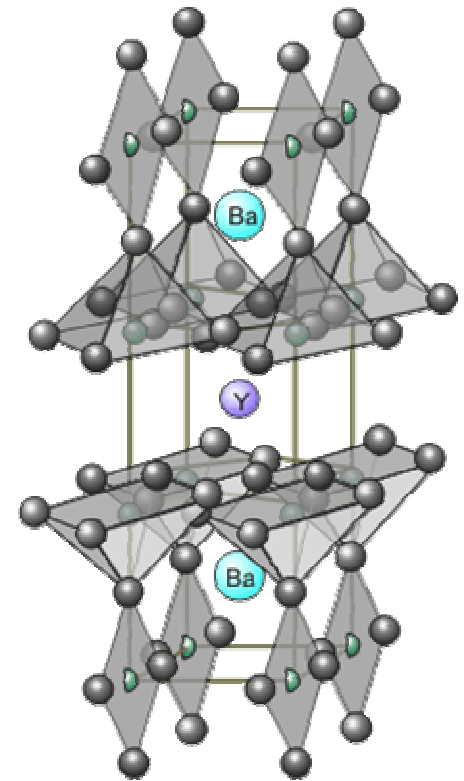
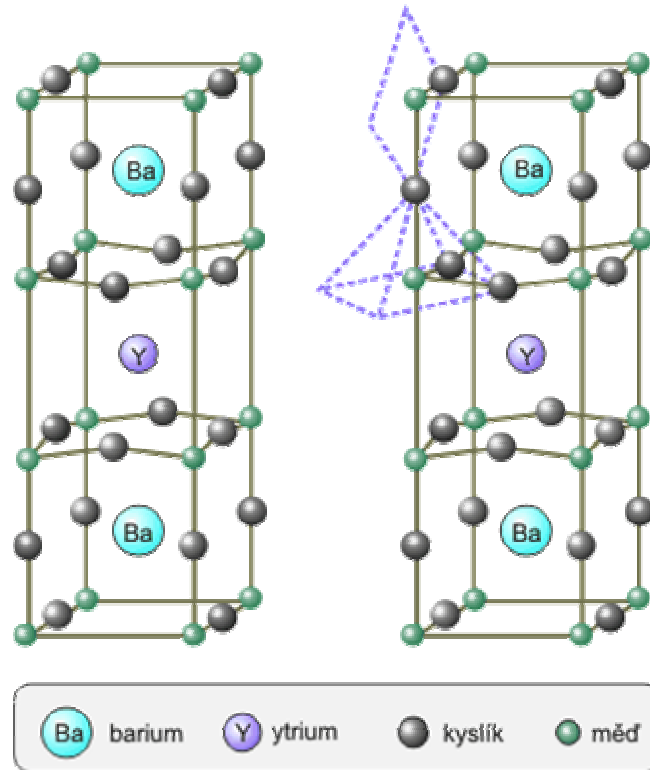
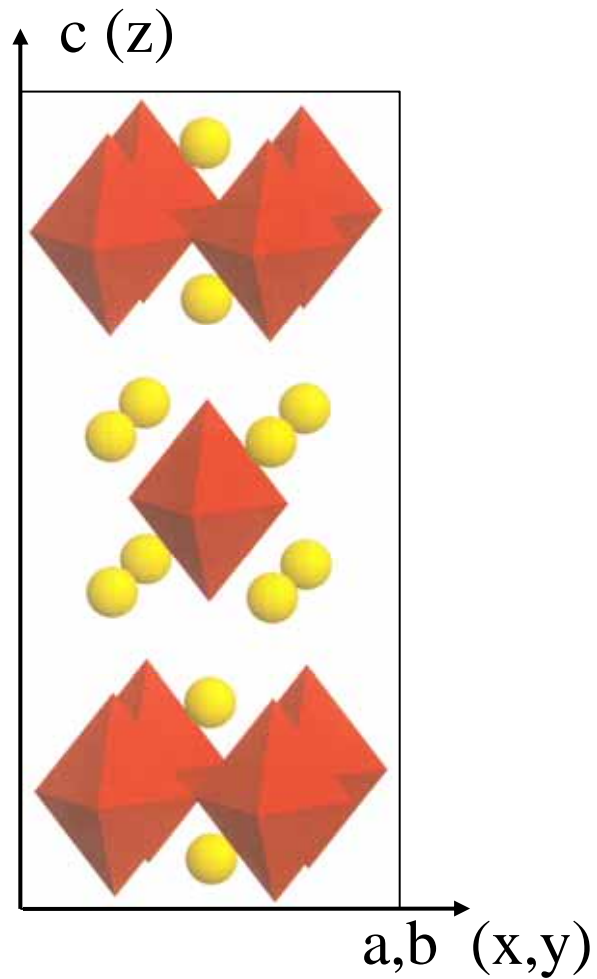
# Phase Diagram



Mott 1977  
Mott insulator

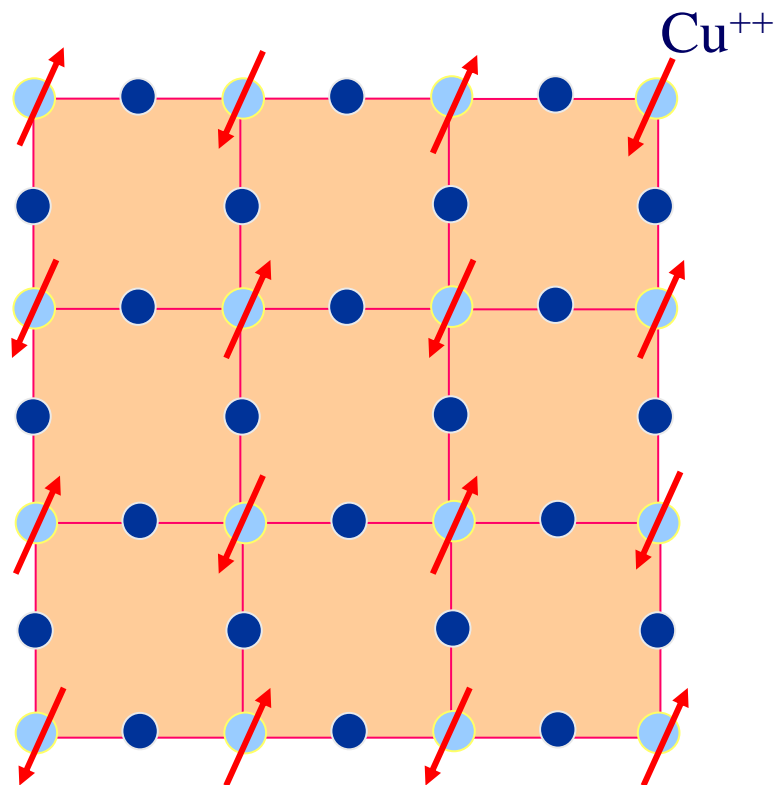
Quantum Critical Point?

# Crystal Structure

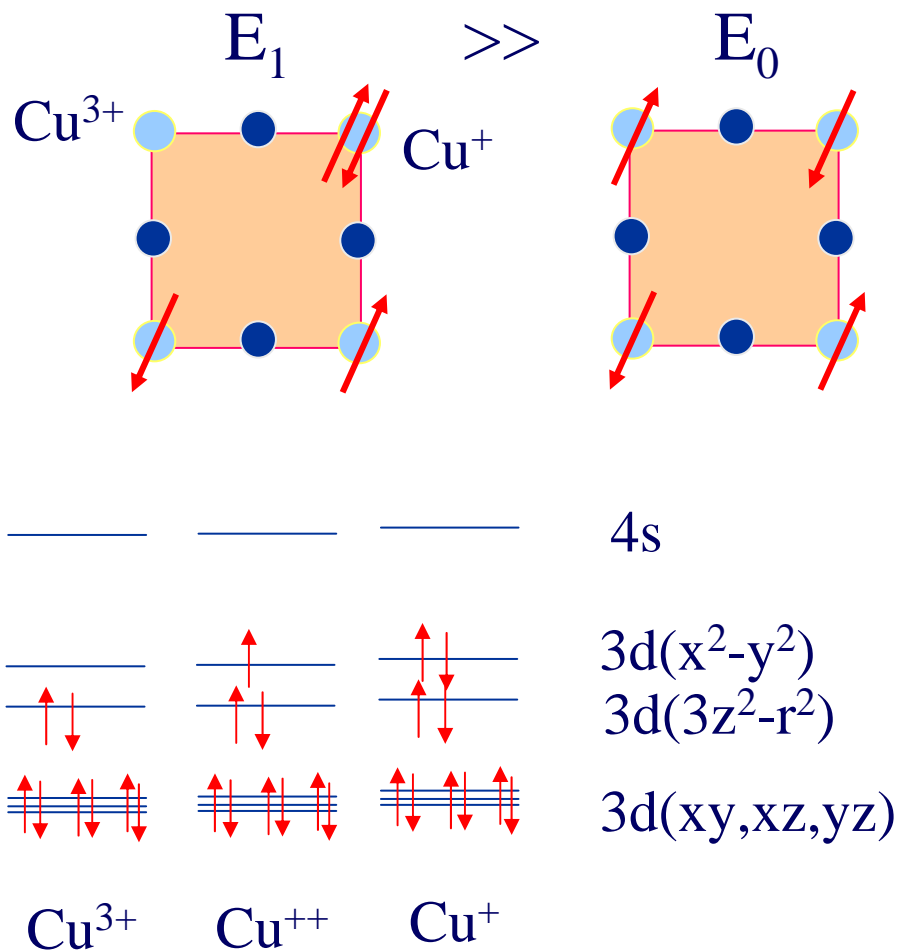


母体：Mott反铁磁绝缘体？

$$H = J \sum_{\langle ij \rangle} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j$$

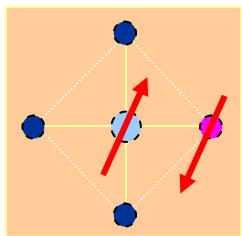


$T_N \sim 500K$

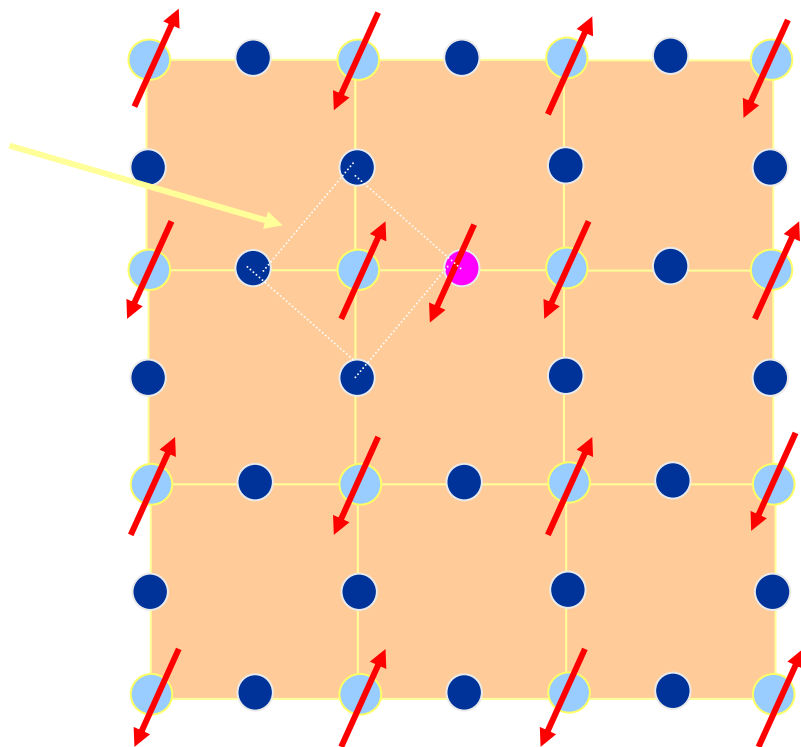




# 高温超导是对母体掺杂后产生的



Zhang-Rice  
Singlet



对能带宽度的修正：

紧束缚模型  $\sim 8t$

t-J 模型  $\sim 2J$

$$H = -t \sum_{\langle ij \rangle} (\tilde{c}_{i\sigma}^+ \tilde{c}_{j\sigma} + \text{h.c.}) + J \sum_{\langle ij \rangle} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j$$

动能

势能

# 高温超导机理研究要解决的基本问题

- d波超导配对的机理（如何配对、凝聚）
- 赝能隙：状态数的缺失（暗熵）
- 低能与高能量尺度的相关性（不可重正性）
- 线性电阻与电荷-自旋分离（电磁分离）
- 层间耦合相干与非相干性（电荷禁闭）

# Pairing Symmetry

$$\Psi(r_1\sigma_1, r_2\sigma_2) \propto \chi(\sigma_1, \sigma_2)\psi(r_1 - r_2)$$

Spin singlet: antisymmetric

$$\chi(\sigma_1 - \sigma_2) = \sigma_1 \delta_{\sigma_1, -\sigma_2}$$

Orbital wavefunction: symmetric

$$L = 0, \quad 2, \quad 4 \dots$$

s      d      g

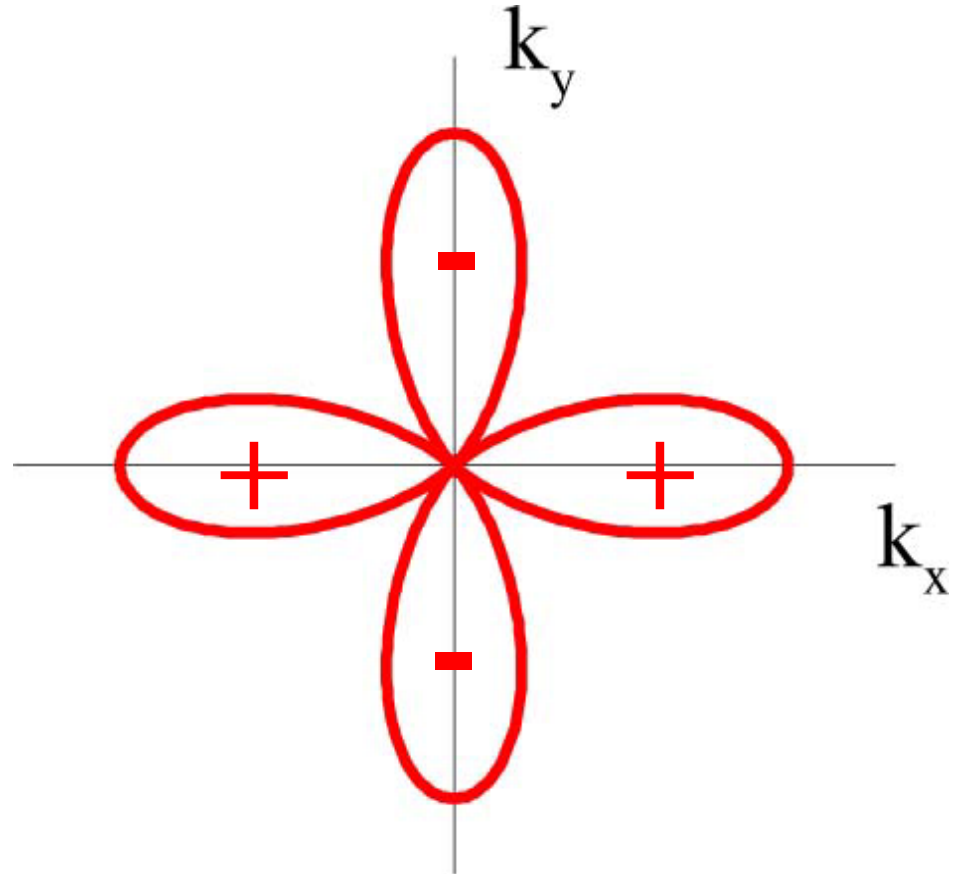
# High-Tc Pairing Symmetry

D-wave pairing gap

$$\Delta_{\mathbf{k}} = \Delta(\cos k_x - \cos k_y)$$

Theory:

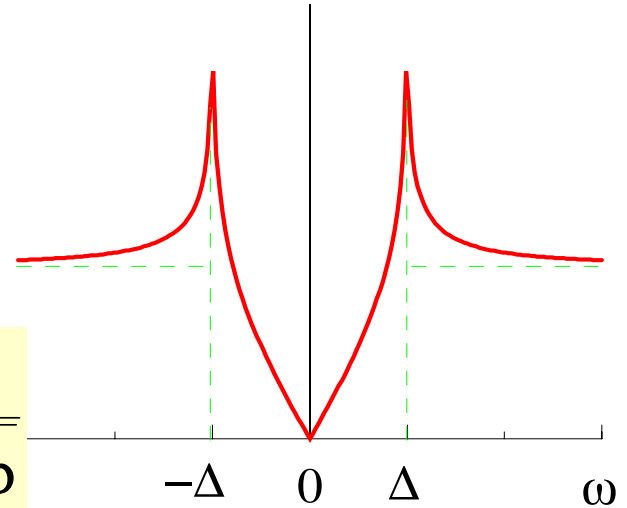
Kotliar & Liu, PRB 38,  
5142 (1988)



# Density of states

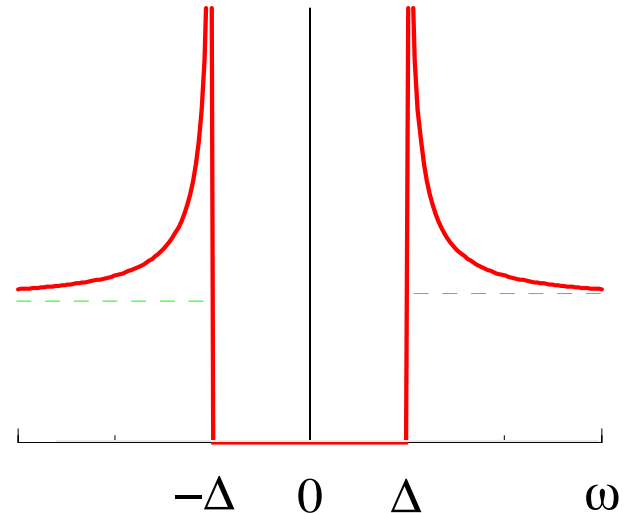
## $d(x^2y^2)$ -wave

$$D(\omega) = N(0) \int_0^{2\pi} \frac{d\varphi}{2\pi} \operatorname{Re} \frac{|\omega|}{\sqrt{\omega^2 - \Delta^2 \cos^2 2\varphi}}$$

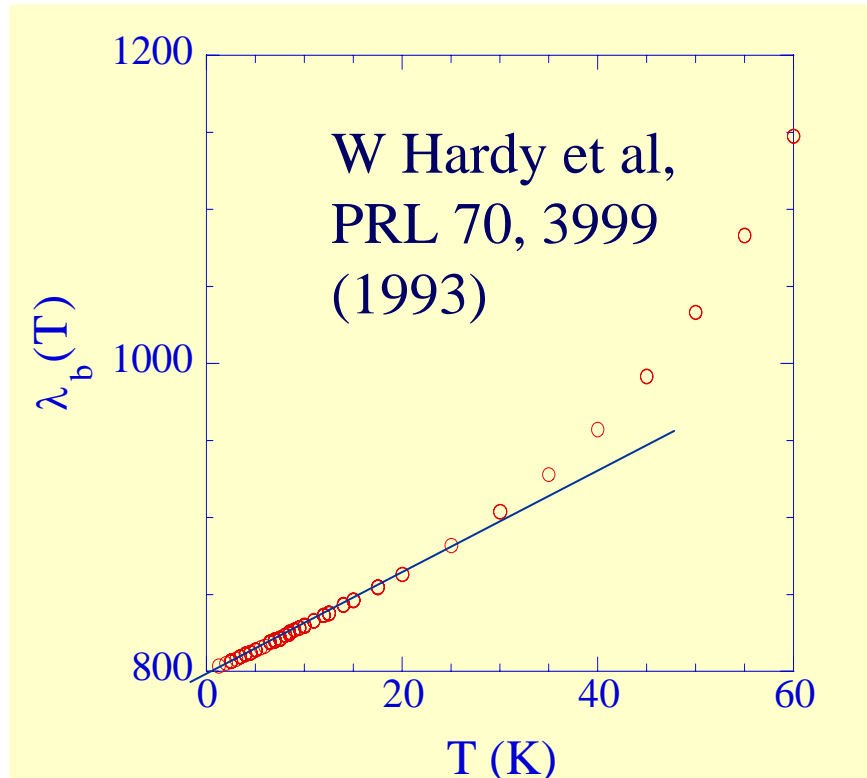


## Isotropic s-wave

$$D(\omega) = \frac{N(0)\omega}{\sqrt{\omega^2 - \Delta^2}} \theta(|\omega| - \Delta)$$



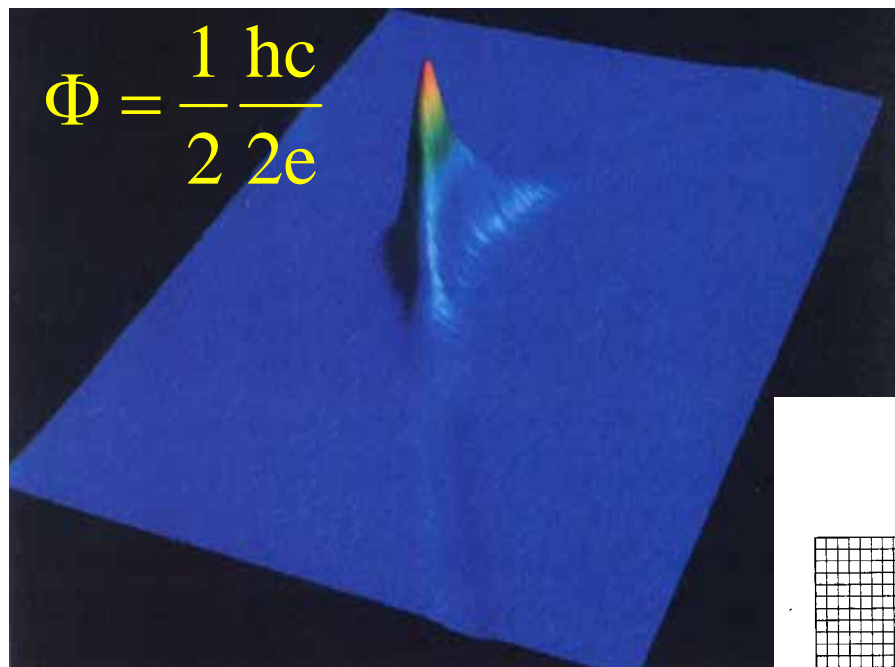
# D-wave Pairing of Superconductivity



W. Hardy  
London Prize 2002

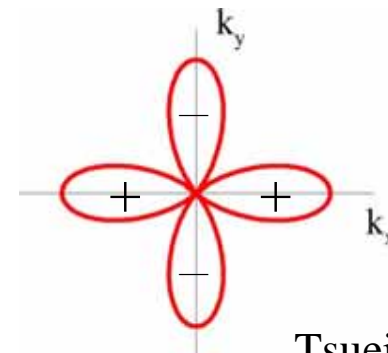
$$\lambda(T) \sim \begin{cases} e^{-\alpha T} & \text{s-wave} \\ T & \text{d-wave} \end{cases}$$

# Direct Detection of Pairing Phase Factor

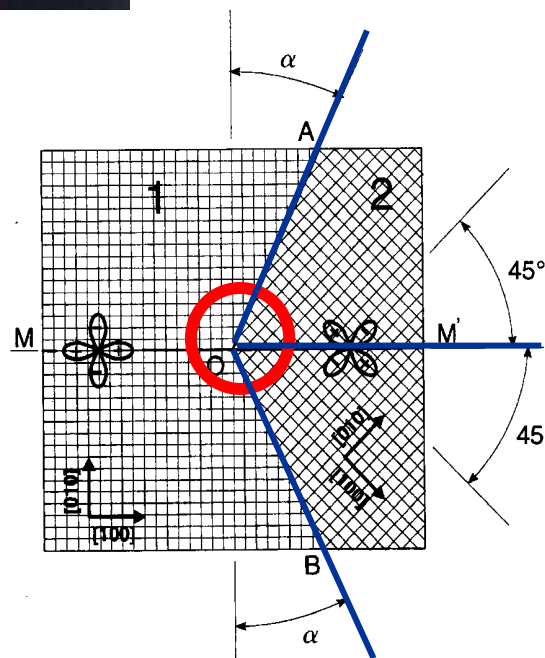


$$\Phi = \frac{1}{2} \frac{hc}{2e}$$

Half-flux trapped  
tri-crystal



Tsuei et al,  
Nature **387**,  
481 (97)



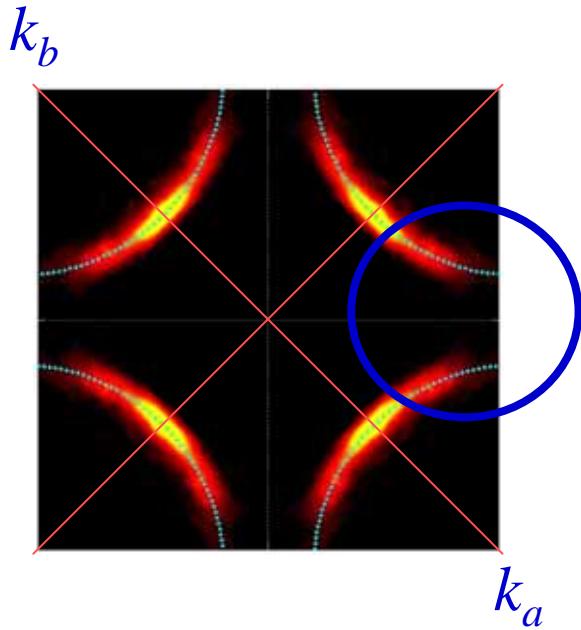
C C Tsui 1998  
Burkley Prize



# 高温超导机理研究要解决的基本问题

- d波超导配对的机理（如何配对、凝聚）
- 赝能隙：状态数的缺失（暗熵）
- 低能与高能量尺度的相关性（不可重正性）
- 线性电阻与电荷-自旋分离（电磁分离）
- 层间耦合相干与非相干性（电荷禁闭）

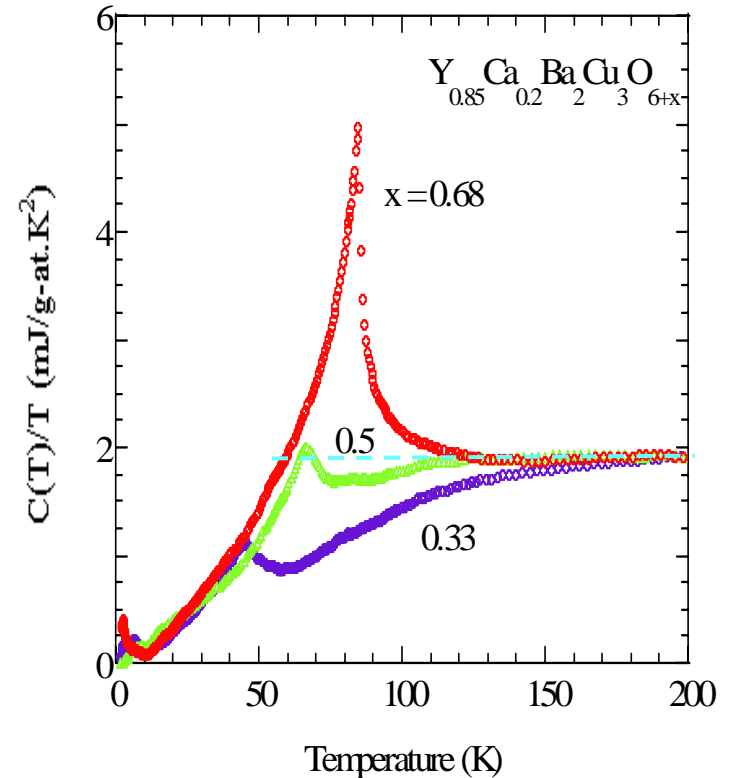
# Pseudogap: Root of Anomalies



费米面不  
封闭，存  
在能隙

赝能隙现象：

- 正常相中出现的类似于超导能隙的现象
- 超导电子配对好像在相变之前就存在，但没有形成宏观相干



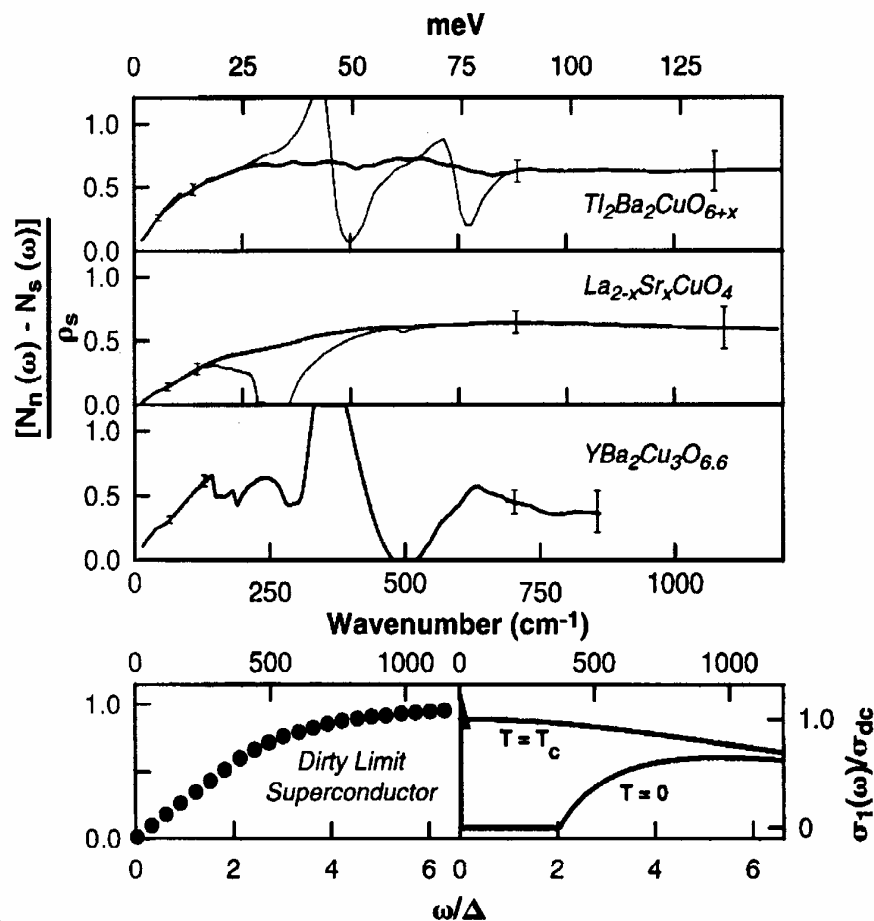
低能熵缺失，  
状态数不守恒

# Dark Entropy: Missing Low Energy Entropy

Ferrel-Glover-Tinkham  
sum rule:

$$\rho_s = \lim_{\omega \rightarrow \infty} N_n(\omega) - N_s(\omega)$$

光导实验揭示光学  
求和规则的破坏：



# Preformed Pairs

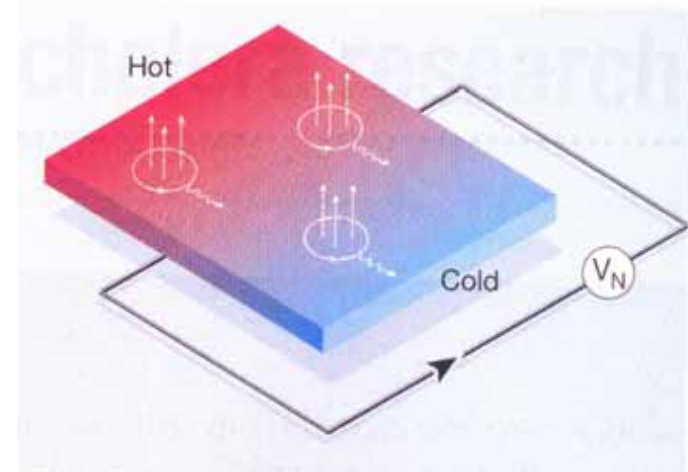


Emery



Kivelson

Buckley 2000



破坏超导的两种方式：

拆对：所需能量  $\propto$  能隙  $\Delta$

破坏位相相干：所需能量  $\propto$  超流密度  $\rho_s$

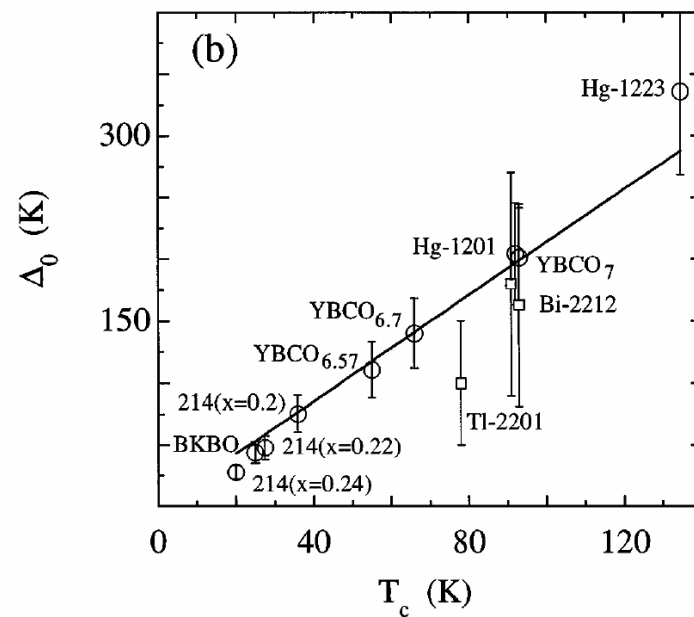
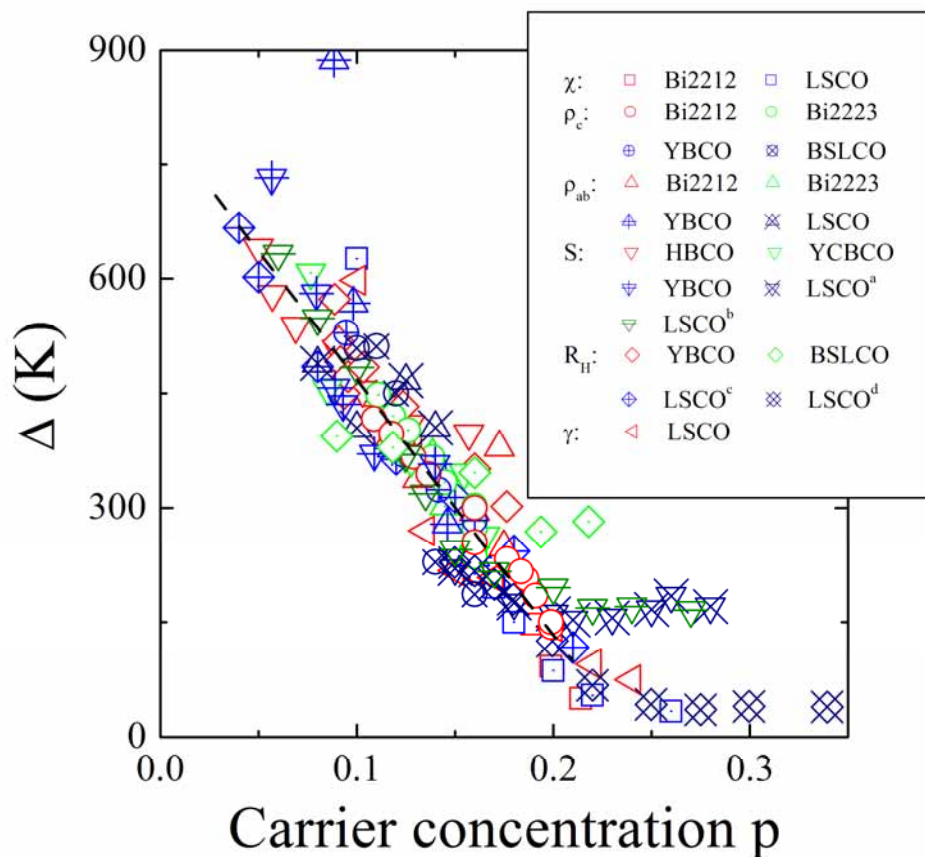
常规超导体：  $\Delta \ll \rho_s$   $T_c \sim \Delta$

配对与位相相干几乎同时发生

预配对超导体：  $\Delta \gg \rho_s$   $T_c \sim \rho_s$

配对到相干的物理过程是一个难题

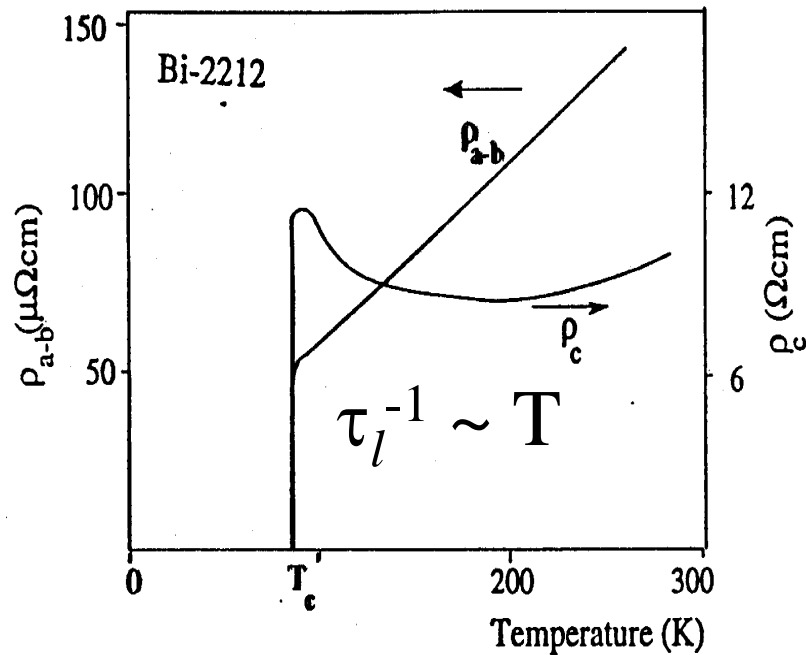
# Two Energy Scales: Pseudogap vs Superconducting Gap



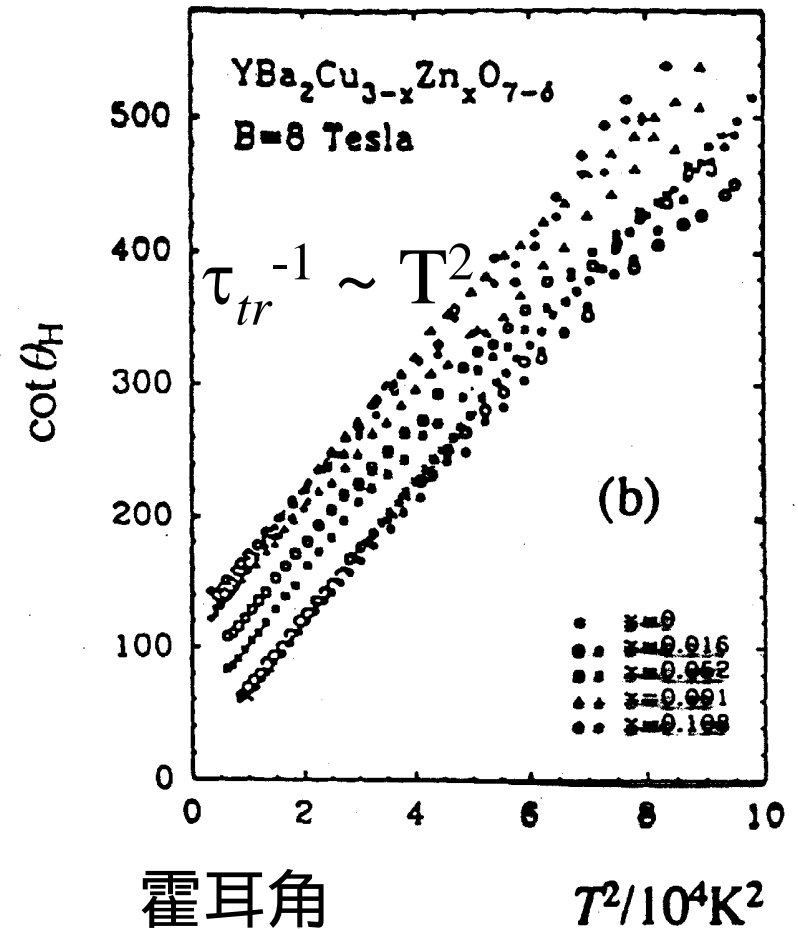
# 高温超导机理研究要解决的基本问题

- d波超导配对的机理（如何配对、凝聚）
- 赝能隙：状态数的缺失（暗熵）
- 低能与高能量尺度的相关性（不可重正性）
- 线性电阻与电荷-自旋分离（电磁分离）
- 层间耦合相干与非相干性（电荷禁闭）

# Linear Resistivity and Charge-Spin Separation



电阻



霍尔角

$T^2/10^4 \text{K}^2$



# Linear Resistivity: Challenger to Transport Theory

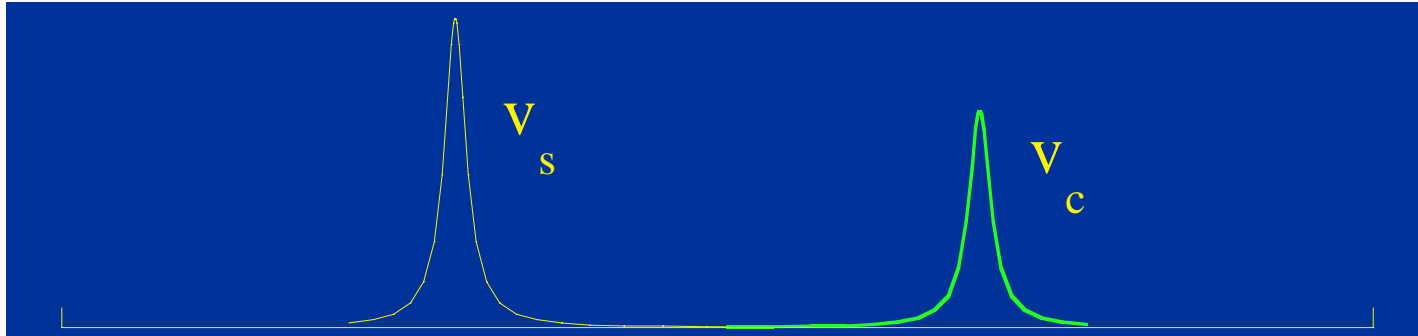
- Electron-electron scattering

$$\rho \propto T^2$$

- Electron-phonon scattering

$$\rho \propto \begin{cases} T^5 & T < \theta_D / 4 \\ T & T \gg \theta_D / 4 \end{cases}$$

# Charge-spin Separation



- 电荷-自旋自由度的分离在一维相互作用电子系统的Luttinger液体理论有比较完整的理论描述
- 但在二维系统我们尚不理解它的物理根源

# 高温超导机理研究要解决的基本问题

- d波超导配对的机理（如何配对、凝聚）
- 赝能隙：状态数的缺失（暗熵）
- 低能与高能量尺度的相关性（不可重正性）
- 线性电阻与电荷-自旋分离（电磁分离）
- 层间耦合相干与非相干性（电荷禁闭）