量子多体物理：挑战与机遇

报告人： 李 伟

理论物理研究所

提 纲

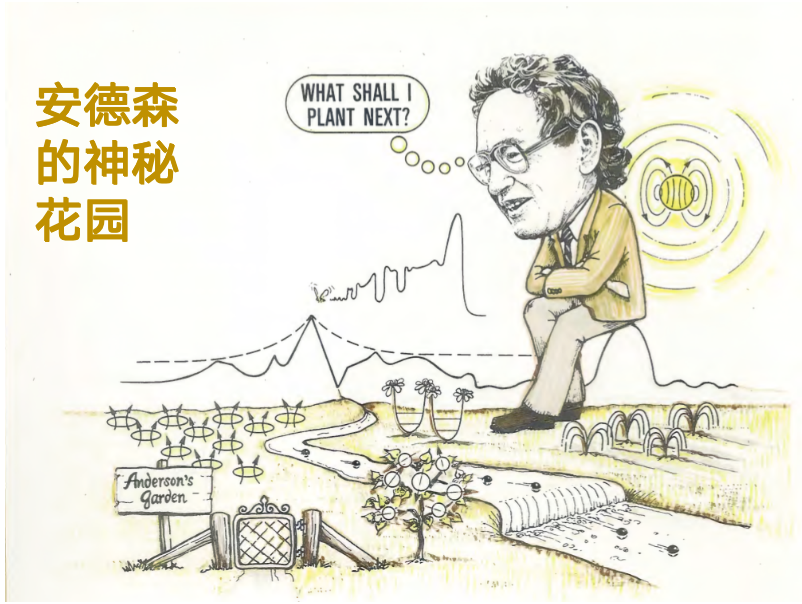
一、理论物理所凝聚态物理与量子物理情况介绍

二、量子多体物理：自旋超固态与涌现量子现象

凝聚态物理

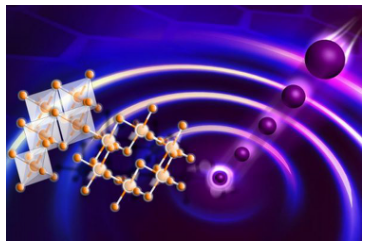
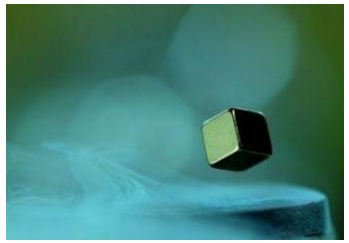
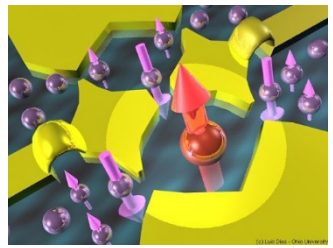
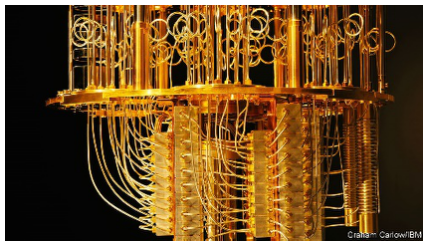
❑ 多元的研究领域

- ➢ 半导体物理
- ➢ 金属物理
- ➢ 磁学与磁性材料
- ➢ 表面与低维物理
- ➢ 强关联与超导
- ➢ 电介质物理
- ➢ …



❑ 充满活力和创新思想

- **非简单外推：**复杂系统的行为无法通过少数基本粒子的性质简单外推来理解。
- **层次涌现性：**每一级复杂系统层次都会涌现全新的规律和特性。
- **基础性等同：**理解这些新行为所需的研究，其基础性与任何其他基础研究同等重要。
- More is Different – P. W. Anderson

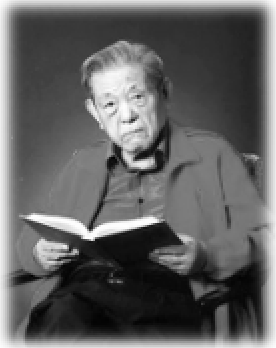





关注纷繁复杂的凝聚态物质世界中涌现的新奇现象和简洁规律

凝聚态理论 @ 理论物理研究所（ITP）

❑ 研究底蕴深厚

• 国内最早倡导开展凝聚态物理研究的单位之一



彭桓武 先生

苏肇冰 先生

- ❖ **推动全国的统计物理和凝聚态理论研究**，促成了每两年一次的**全国凝聚态理论和统计物理**的系列会议（目前到22届）
- ❖ 要鼓励一切风格的理论工作，**从具体实验数据的拟合到抽象的数学形式理论**，只要有人得心应手、有所创新，就应当鼓励
- ❖ 要兼收并蓄而不排它，无论是**理论物理中的固体**还是**固体物理中的理论**，都要积极支持。
- ❖ **研究生不是学生，而是研究人员**，硕士生是初级研究人员，博士生是中级研究人员
- ❖ 从理论物理研究所走出了**众多国际顶尖的凝聚态理论学者**
- ❖ “微风吹动下的运河水正荡漾着夕阳的反光，投射在河岸杂草坡上，人和车的身影在变得越来越长，我又回到了运河边上。”

凝聚态物理+量子物理 @ 理论物理研究所 (ITP-CAS)

苏刚 研究员

凝聚态物理、统计物理、计算物理

覃绍京 研究员

强关联模型的数值计算与分析

周森 研究员

强关联电子系统

李伟 研究员

强关联计算、量子磁性

吴贤新 研究员

非常规超导、关联物理理论

宋昊 副研究员

拓扑物态理论、量子纠错理论

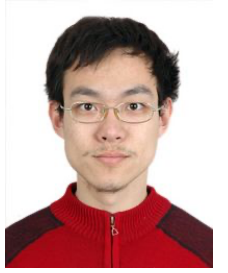
张田田 副研究员

拓扑物态与材料计算

陈锟 副研究员

凝聚态场论与数值方法

西宁 助理研究员 强关联多体计算



石骏 研究员

量子物理、量子信息和

光与物质的相互作用

王颖丹 研究员

固态量子体系

量子态操控

邓富林 助理研究员

苏刚 研究员 sugang@itp.ac.cn

- 首次发现自旋超固态及其巨磁卡效应 [中国科学十大进展]
  [Nature 625, 270 (2024)]

苏刚 理论物理研究所
研究员，副所长

主要从事**凝聚态理论物理、统计物理及计算材料物理**等方面的研究。承担**国家杰出青年科学基金、院先导项目**（首席科学家），国家自然科学基金重大项目、国家重点研发项目等多项国家级研究项目

在包括Nature、Phys. Rev. Lett. 、J. Am. Chem. Soc. 、Angew. Chem. Int. Ed.等重要学术期刊上发表了**300余篇**SCI研究论文，在国外出版的英文专著中应邀撰写了有关章节，代表工作先后入选“**两院院士评选的2024年中国科技十大进展新闻**”和“**2024年度中国科学十大进展**”。

曾获中国分析测试协会科学技术奖（CAIA奖）一等奖、教育部自然科学奖一等奖、国家自然科学奖二等奖、中国科学院优秀研究生指导教师奖等。现任**中国物理学会学术交流委员会委员、低温物理专业委员会委员，意大利国际理论物理中心**Regular Associate。

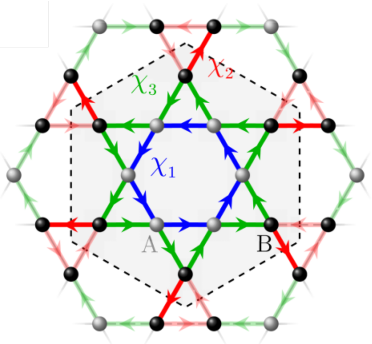
周森 研究员 zhousen@itp.ac.cn

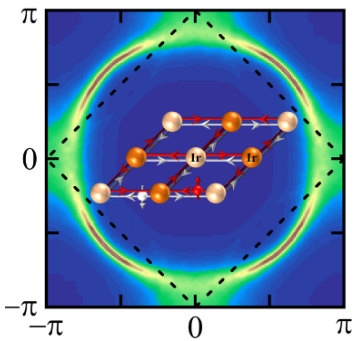
强关联电子系统、非常规超导电性、凝聚态系统中的拓扑物态

现有1名硕士生、2名博士生；已毕业1名硕士生、4名博士生

❑ 关联材料中的新奇物态

- ✓ 笼目金属中的电荷密度波和配对密度波。
- ✓ 铱氧化物中的d 波赝自旋流。

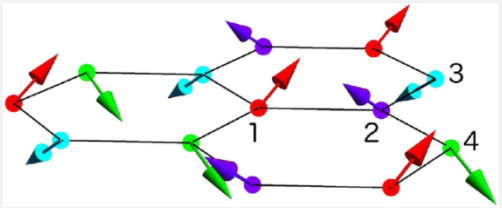


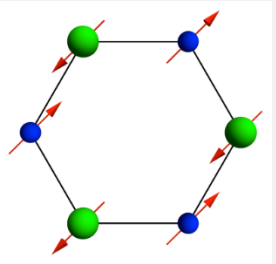


PRB **109**, 045121 (2024)
PRB **107**, 045127 (2023)
NC **13**, 7288 (2022)
PRB **104**, 165145 (2021)
PRX **7**, 041018 (2017)

❑ 理论模型中的新奇物态

- ✓ 手征自旋密度波。
- ✓ 非中心对称体系中的陈绝缘体。

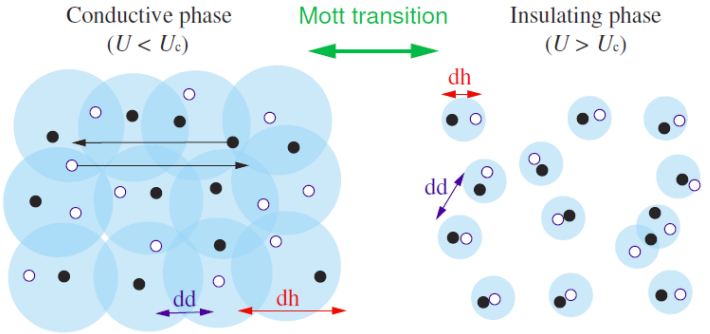




PRB **102**, 195120 (2020)
PRL **120**, 157205 (2018)
PRL **114**, 216402 (2015)

❑ 强关联理论

- ✓ 动态奴隶玻色子理论，doublon-holon binding



PRB **101**,035106 (2020)
PRB **89**, 195119 (2014)

李伟 研究员 w.li@itp.ac.cn

提出和发展了国际先进的有限温度张量重正化群方法，开展关联量子物质与材料前沿研究

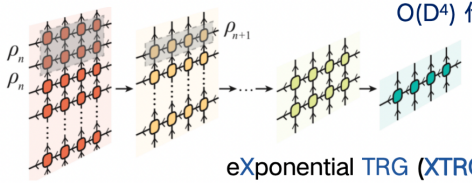
共发表 90 余篇学术论文，以第一/通讯作者（含共同）发表 Nature 2 篇，Nature Phys. 1 篇，PRL/PRX 8 篇，Nature Commun. 6 篇，PRB/E/Research 40 余篇等，总引用 3500 余次（Google Scholar）。

■ 发展多体计算新方法，实现对量子体系和相关材料的精确计算，预言量子自旋液体、自旋超固态、关联拓扑态、新型超导态等关联导致的新奇量子物态，与实验密切合作揭示新效应。

发展有限温度张量重正化群方法

❑ 指数张量重正化群：指数缩并、高效计算

O(D⁴) 代价



eXponential TRG (XTRG)

❖ 两维量子磁性体系高精度方法

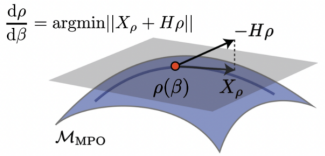
（例：正方晶格海森堡模型）

方法	尺寸	温度	文献
METTS	宽度6	T/J=0.5	arXiv: 1705.05578
XTRG	宽度10	T/J<0.05	我们的工作

Phys. Rev. X 8, 031082 (2018)

❑ 切空间张量重正化群：大幅提升精度效率

O(D³) 代价!



tangent space TRG (tanTRG)

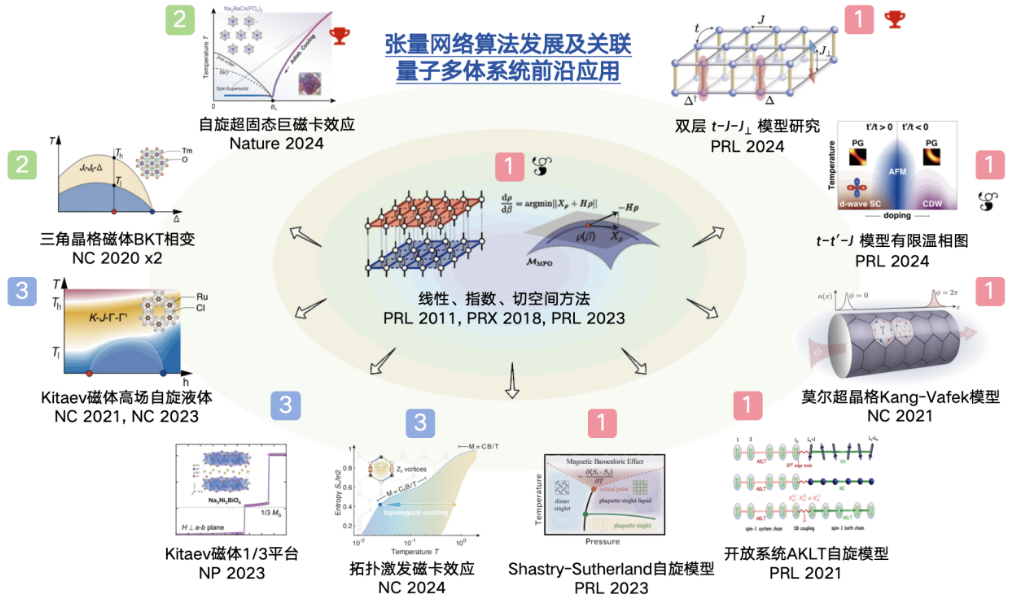
❖ 两维磁性与关联电子系统高精度方法

（例：正方晶格哈伯德模型）

方法	尺寸	温度	文献
METTS	宽度4	T/t=0.05	PRX 11, 031007 (2021)
tanTRG	宽度8	T/t<0.05	我们的工作

Phys. Rev. Lett. 130, 226502 (2023) 编辑推荐

代表成果



吴贤新 研究员 xxwu@itp.ac.cn

❑ 从事非常规超导与关联电子体系理论研究，发展研究关联量子关联体系的系统方法。

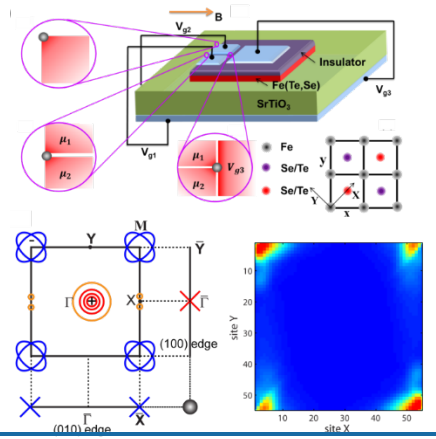
共发表90余篇学术论文，以第一/通讯作者（含共同）发表 **Nature 2篇，Nature Physics 1篇，PRX/PRL 8篇，NC/SA/PNAS 5篇**，总引用6000余次（Google Scholar）。

- 非常规超导机理、关联电子体系（铁基、镍基高温超导体，笼目与莫尔超晶格体系等）
- 拓扑超导、新奇拓扑物态（马约拉纳态的实现与操作）
- 发展研究关联电子体系的系统方法（随机相位近似、泛函重整化群等）

❑铁基高温超导体拓扑物态理论

✓ 预言铁基高温超导体拓扑性质

✓ 基于铁基超导平台提出实现高阶拓扑超导和马约拉纳态的新方案



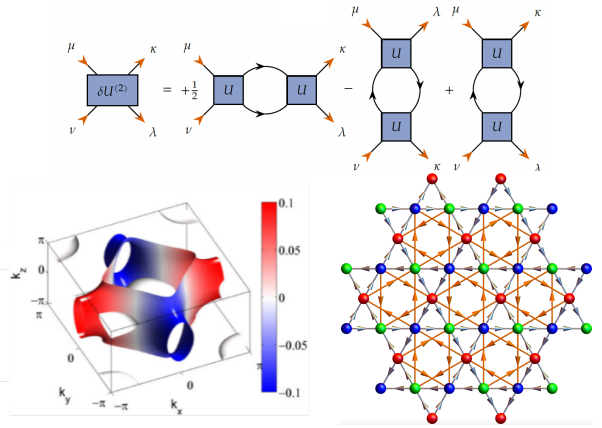
- PRB 93,115129 (2016)
- Nature Phys. 15, 41 (2019)
- NSR 9, nwab087 (2021)
- PRX 10, 041014 (2020)
- PRL 129, 277001 (2022)

❑非常规超导微观机理与关联物理

✓ 单层铜氧、无限层镍基、双层镍基超导配对

✓ 笼目金属超导配对、电荷密度波态与配对密度波态

✓ 转角石墨烯多重平带和关联物理



- PRL 121,227002 (2018)
- PRL 127,177001(2021)
- Nat. Commun. 13, 2220 (2022)
- Nature 617, 488 (2023)
- Nature. Phys. 19, 1827 (2023)
- PRL 130, 256001(2023)
- PRL 132, 246401(2024)
- Nature 632, 775 (2024)
- PRL 134, 136002 (2025)

张田田 副研究员 ttzhang@itp.ac.cn

我是90后

主要研究方向为：拓扑能带理论、第一性原理计算、拓扑材料、拓扑及手性声子、高通量计算。共发表 **50余** 篇学术论文，以第一/通讯作者（含共同）发表 **Nature 2** 篇，**PRX/PRL 6** 篇，**Sci. Adv. 2** 篇，**Adv. Mat. 1** 篇等，总引用 **3000+** 次（Google Scholar）。

- 建立「拓扑词典」理论并据此开发了高通量计算方法，对已知晶体材料进行了拓扑分类
- 建立了国际上首个拓扑材料数据库Materiae，揭示了自然界中约24%的材料都是拓扑的
- 预言首个拓扑声子材料、并得到实验验证（PRL封面）
- 与实验密切合作揭示新效应、理论可以走在实验前面。

证 书

"最新研究表明自然界中约24%的材料可能具有拓扑结构"入选"两院院士评选2019年中国十大科技进展新闻"

中国科学院 学部工作局　中国工程院 办公厅　中国科学报社 二〇二〇年一月

- 成果入选2019年中国十大科技进展新闻。

T. T. Zhang *et al.*, *Nature* 566, 475 (2019)

- 2023年阿里巴巴达摩院“青橙奖”最具潜力奖
- 2024年亚太物理学会凝聚态青年奖
- 2025年Advanced Materials Innovation Award

宋昊 副研究员 songhao@itp.ac.cn

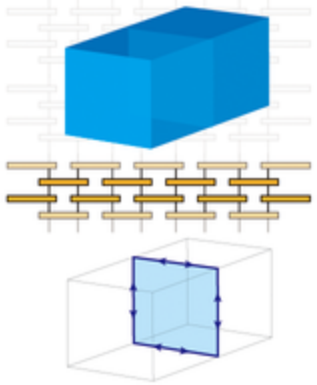
研究方向：**量子多体**与**量子计算**的基础理论/交叉研究

融合可解模型、拓扑场论与现代数学，探究**拓扑物态**与**量子纠错**理论的深层结构与潜在应用。

- 2005.09 – 2009.06　南京大学，物理，学士
- 2009.09 – 2015.12　美国科罗拉多大学博尔德分校，物理，博士
- 2016.02 – 2022.09　西班牙马德里大学 / 加拿大麦克马斯特大学，博士后
- 2022.11 –　中国科学院理论物理研究所，副研究员

代表成果

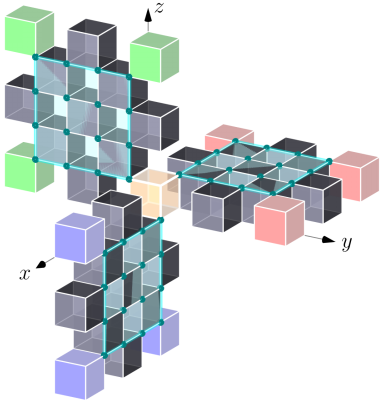
拓扑物态与晶格对称性



- 建立晶格对称性保护拓扑态统一图像(PRX)
- 揭示超出能带论的拓扑晶体绝缘体(PRX)

PRX 7, 011020 (2017); **PRB** 96, 205106 (2017); **PRB** 101, 165129 (2020).

分形子拓扑序（新型准粒子）



- 构造原创模型，发现非阿贝尔分形子态(PRX)
- 引入分形子自统计概念(PRL 编辑推荐)

PRL 132, 016604 (2024) ; **PRX** 9, 021010 (2019); **PRB** 99, 155118 (2019).

新型量子纠错码基本性质

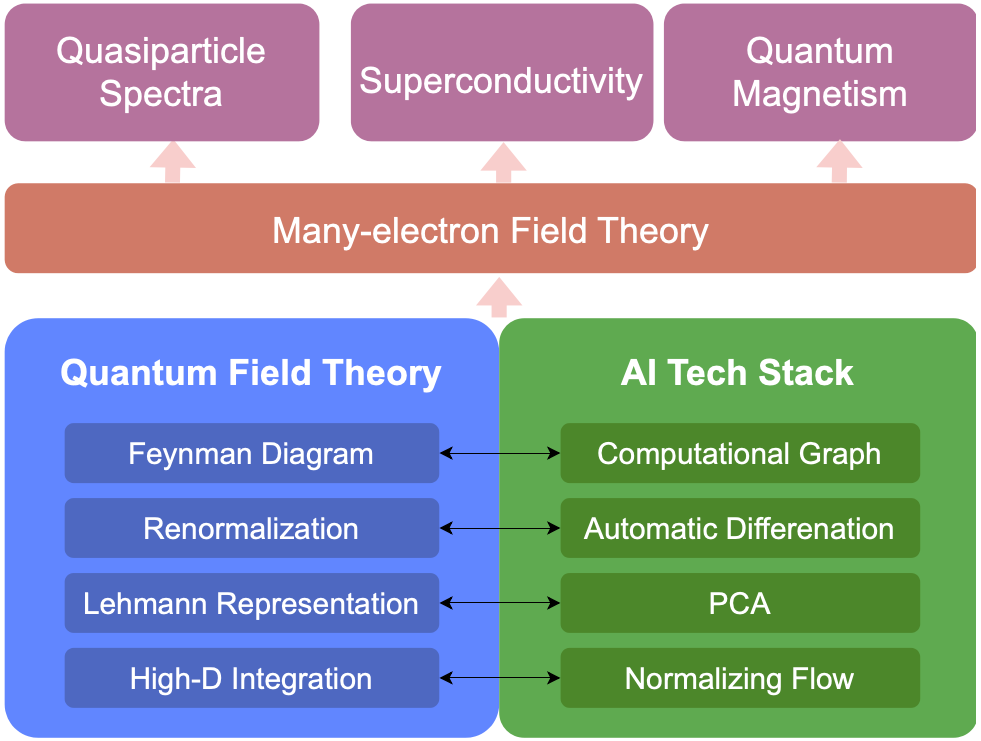
- 确立分形子纠错码容错极限(PRL封面)
- 构建量子低密度奇偶校验码的拓扑理论

PRL 129, 230502 (2022) ; **PRR** 6, 013304 (2024); arXiv: 2503.04699, 2503.03827.

陈锟 副研究员 chenkun@itp.ac.cn

主要研究方向为：交叉领域中的多体问题的基础理论与涌现现象，探索通用人工智能在理论物理中的应用。共发表 40余 篇学术论文，发表 PRX/PRL/Nat. Comm. 7 篇，总引用近 1000 次（Google Scholar）。

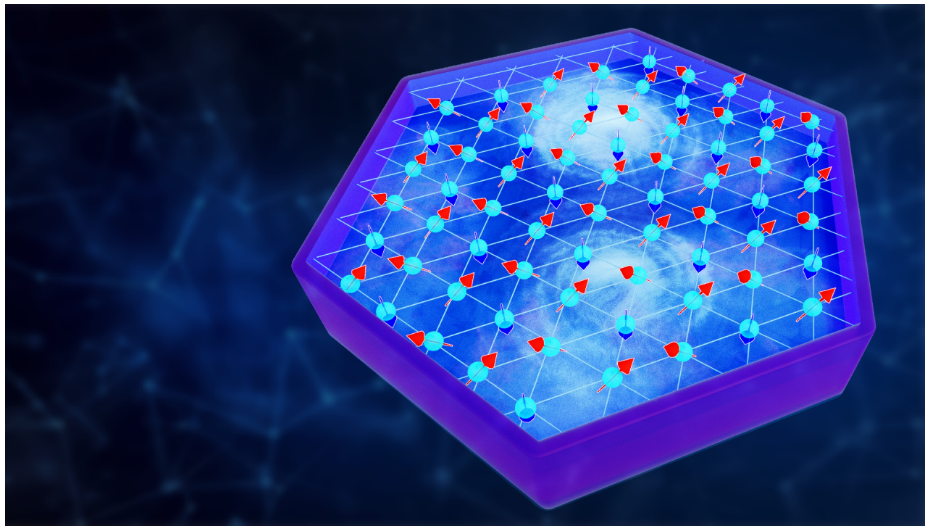
- **建立多电子问题的新一代有效场论**，首次精确计算电声超导基本参数库仑赝势。
- 发现量子磁性、大型量子比特线路、大推理语言模型等交叉领域**多体问题的中的新奇相变现象**。
- 构建（通用）**人工智能解决材料科学中的基础问题**的新思路。



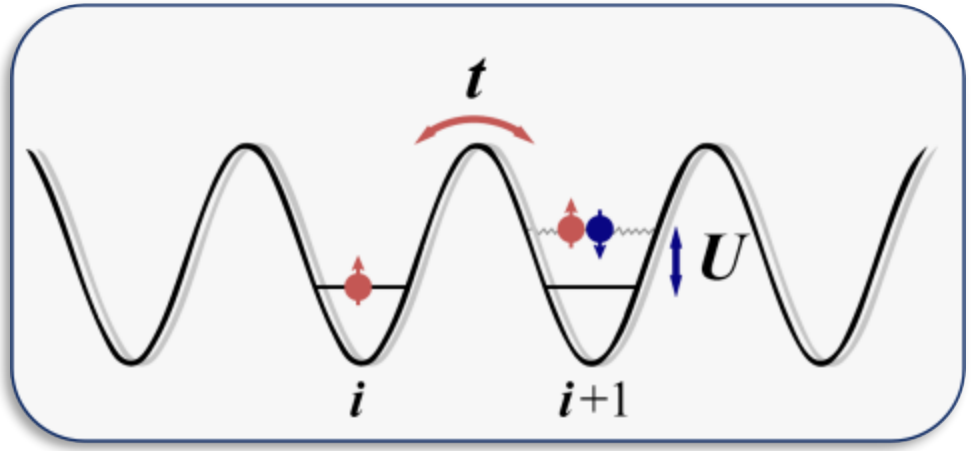
提 纲

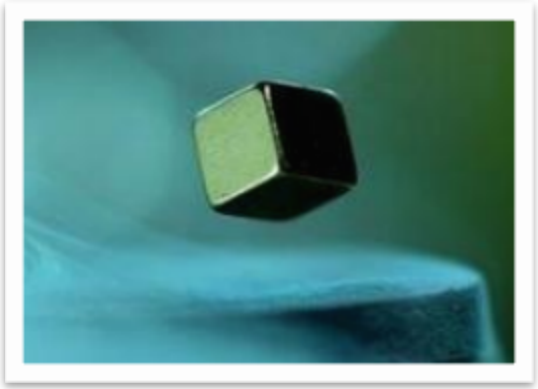
一、理论物理所凝聚态物理与量子物理情况介绍

二、关联量子多体物理：自旋超固态与涌现量子现象

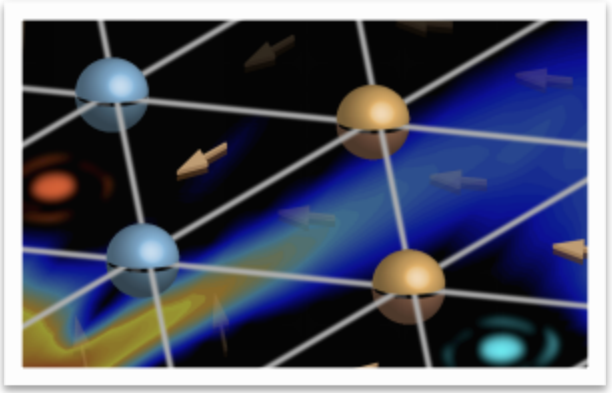


研究背景：关联物理与量子材料





高温超导



阻挫磁性

❖ **超越能带理论的多体效应**

- 电子之间存在很强的关联作用
- 单电子图像和传统微扰论失效

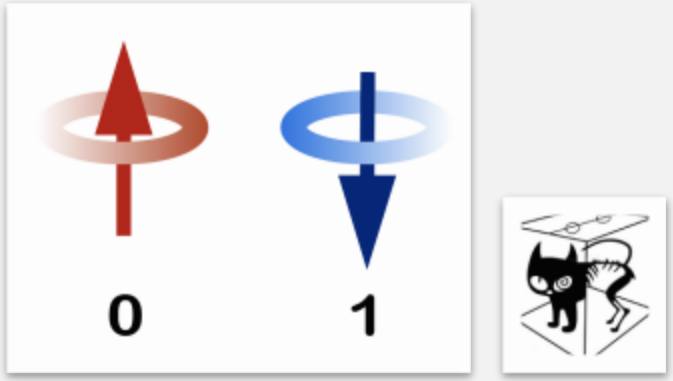
❖ **凝聚态物理的挑战与机遇**

- 新颖量子序与非常规元激发
- 新型量子技术的物质基础

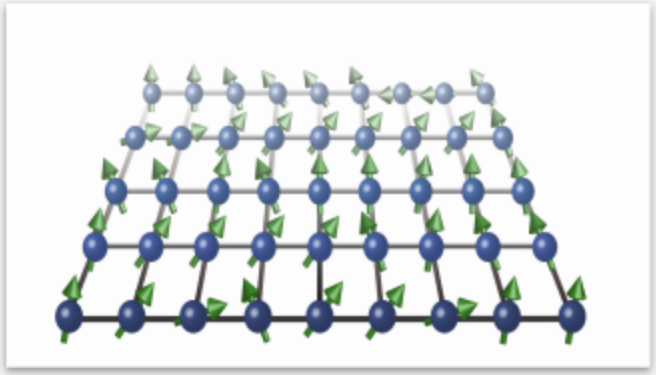
关联量子物质与材料蕴含着丰富的凝聚态物理新现象与新理论

❑ 具有挑战性的量子多体问题

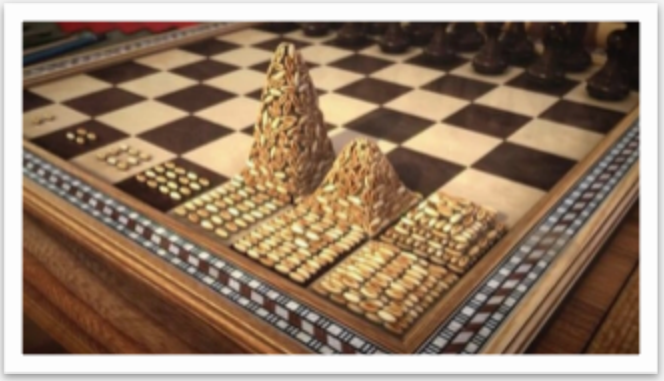
量子自旋

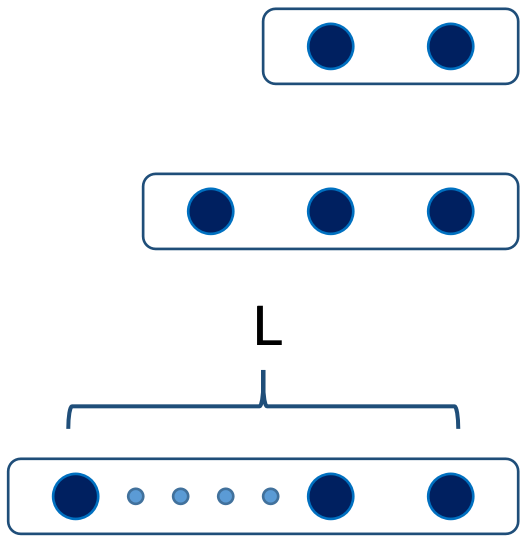


量子多体问题



精确对角化“指数墙”困难





$D = d^2$

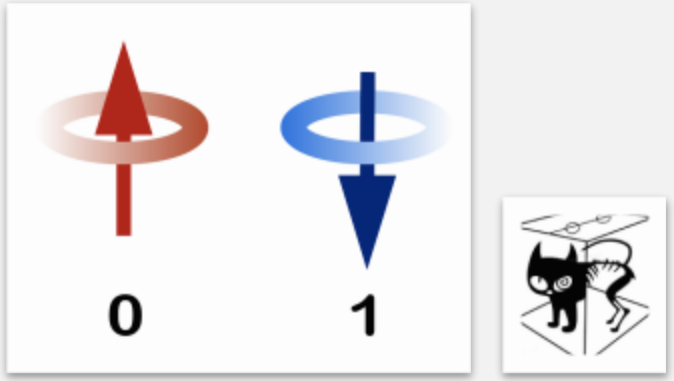
$D = d^3$

$D = d^L$

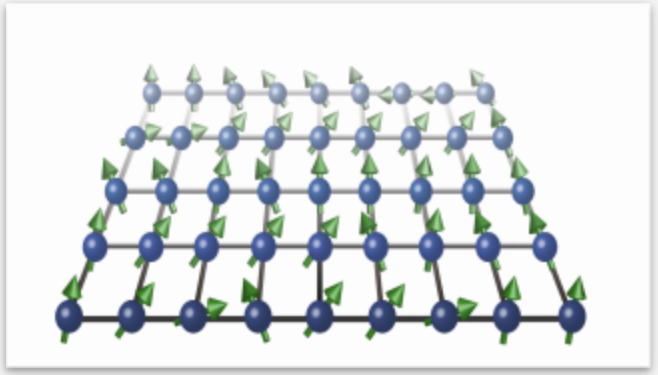
- 难于严格解析求解
- 超越平均场理论
- 数值方法发挥日益重要的作用
- 量子模拟蓬勃发展

❑ 具有挑战性的量子多体问题

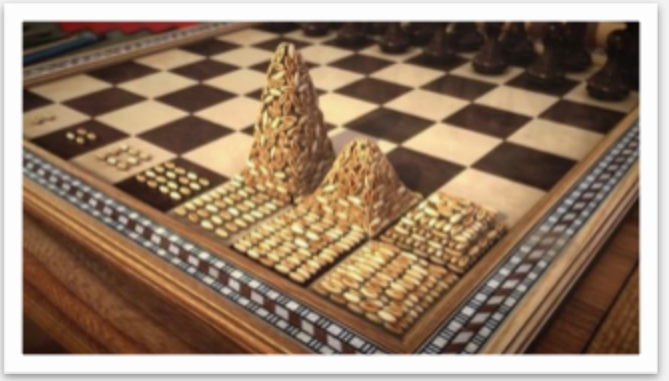
量子自旋



量子多体问题

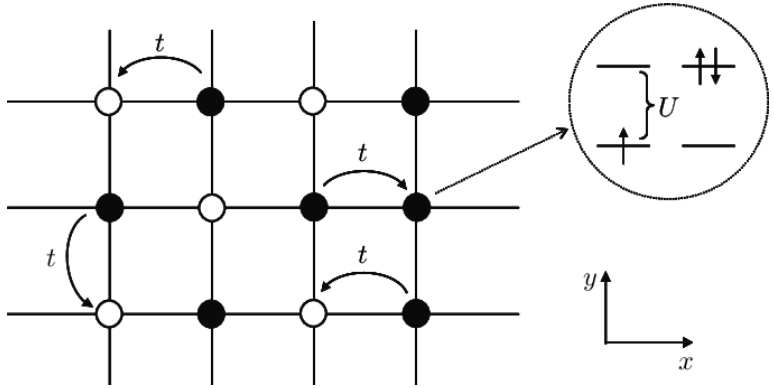


精确对角化“指数墙”困难



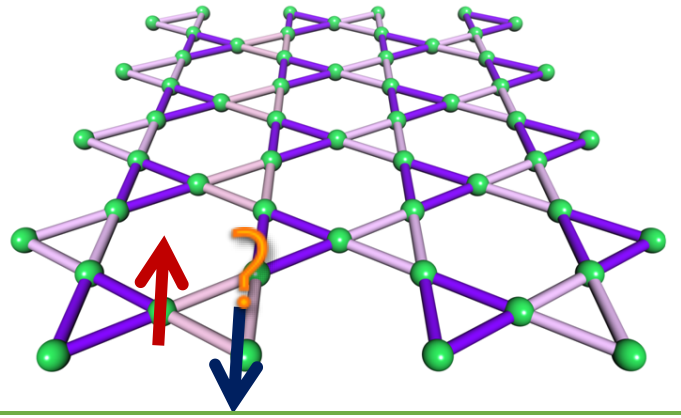
❖ 关联电子：Hubbard 模型

$$H = -t \sum_{\langle i,j\rangle \sigma} (c^{\dagger}_{i\sigma} c_{j\sigma} + h.c.) + U \sum_{i} n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}$$



❖ 量子磁性：Heisenberg 模型

$$H = \sum_{\langle i,j\rangle} J\, \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j$$



- 难于严格解析求解
- 超越平均场理论
- 数值方法发挥日益重要的作用
- 量子模拟蓬勃发展

❑ 翻越指数墙的精确数值方法

❖ 量子蒙特卡罗 Quantum Monte Carlo

stochastic series expansion

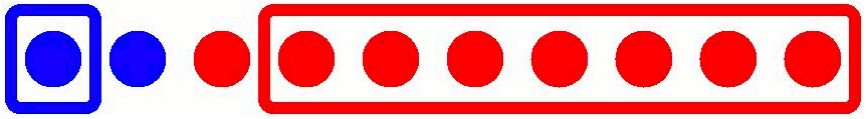
worm algorithm

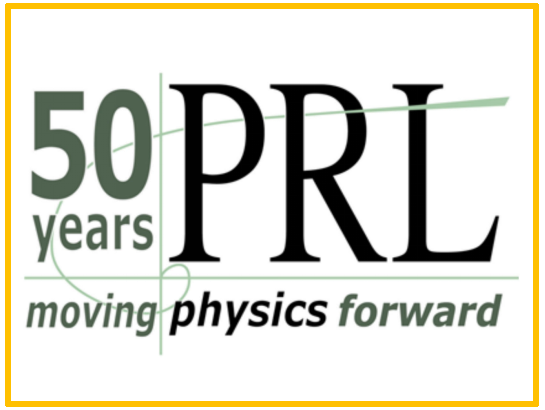
diagrammatic method, etc

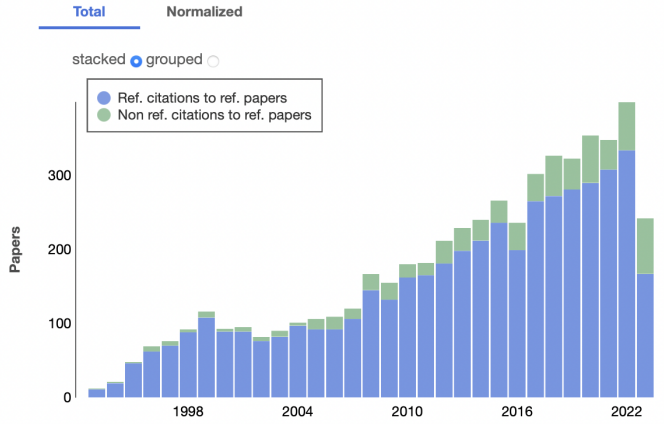
Negative Sign Problem!

❖ 密度矩阵重正化群 Density Matrix Renormalization Group

S. White, PRL 1992; PRB 1993.



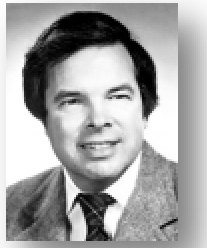




研究背景：张量网络态及其重正化群

精确计算关联量子系统的高效方法

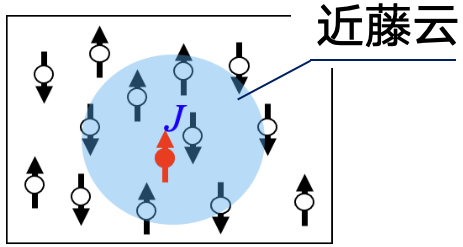
❑ 零维系统



K. Wilson
1982
诺贝尔奖

- **数值重正化群**
  (NRG 零温+有限温度)

  K. Wilson, 1975



量子杂质问题

❑ 一维量子系统

50 years PRL moving physics forward

里程碑工作

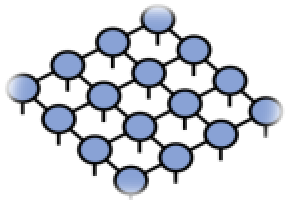
- **密度矩阵重正化群**
  (DMRG 零温)

  S. White, 1992

- **转移矩阵重正化群**
  (TMRG 有限温度)

  Xiang & Wang, 1996

❑ 两维量子系统



张量网络态

- **张量重正化群**
  (TRG 零温)

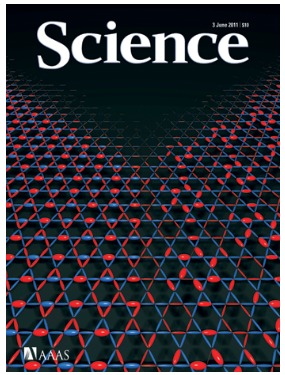
  Cirac, Verstraete, Levin & Nave, Vidal, Xiang, Su, Wen, 2000-

➢ **(2+1) 维有限温度精确计算？**

我们聚焦的方向 2010-

发展有限温度张量网络方法

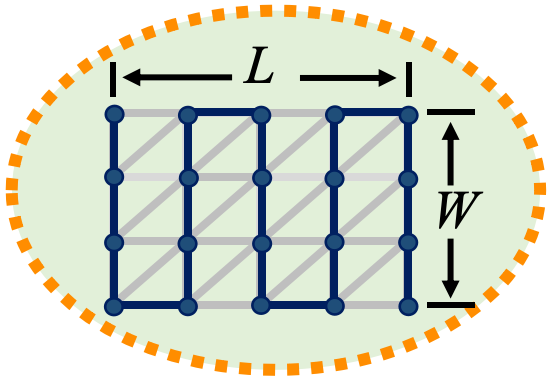
❑ 挑战：两维阻挫系统有限温度计算



➢ **零温：** 两维DMRG发现
笼目晶格自旋液体态

S. R. White
美国科学院院士

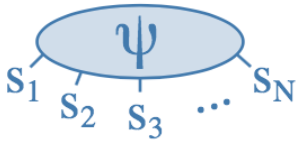
❖ 如何从零温推广到有限温度？



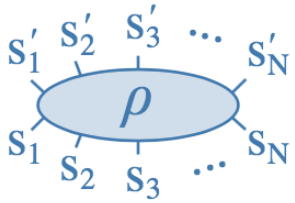
➢ **问题挑战多：**

- 无纠缠熵面积律
- 长程相互作用
- 低温计算效率低

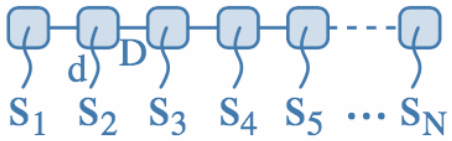
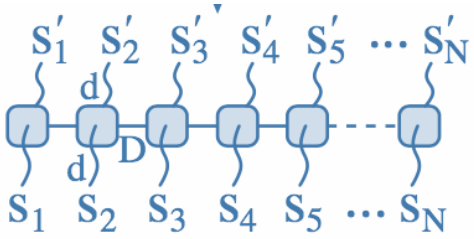
➢ **多体系统**



多体波函数



多体密度矩阵

	参数		张量网络表示	约化参数规模	
多体波函数	d^N	→		$N \times (dD^2)$	矩阵乘积态
多体密度矩阵	d^{2N}	→		$N \times (d^2D^2)$	矩阵乘积算符

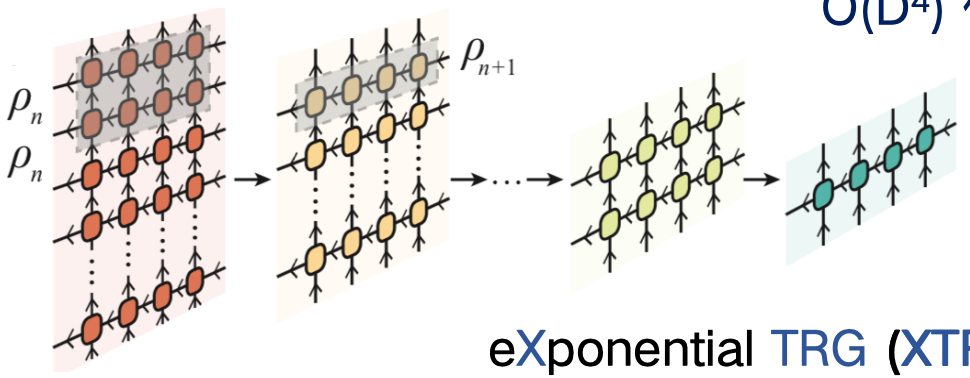
S. White, PRL 1992

*李伟，苏刚*等，PRL 2011*

发展有限温度张量网络方法

❑ 指数张量重正化群：指数缩并、高效计算

O(D⁴) 代价



eXponential TRG (XTRG)

❖ 两维阻挫磁性体系高精度方法

（正方晶格海森堡模型）

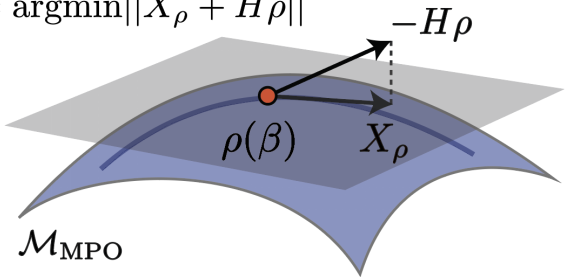
方法	尺寸	温度	文献
METTS	宽度6	T/J=0.5	arXiv: 1705.05578
XTRG	宽度10	T/J<0.05	我们的工作

陈斌斌，李伟*等，PRX 8, 031082 (2018)

❑ 切空间张量重正化群：大幅提升精度效率

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}\beta} = \mathrm{argmin}||X_\rho + H\rho||$$

O(D³) 代价！



tangent space TRG (tanTRG)

❖ 两维磁性与关联电子系统高精度方法

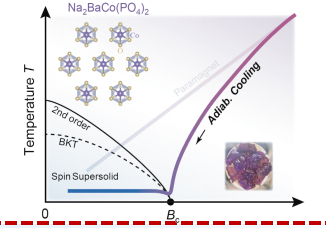
（正方晶格哈伯德模型）

方法	尺寸	温度	文献
METTS	宽度4	T/t=0.05	PRX 11, 031007 (2021)
tanTRG	宽度8	T/t<0.05	我们的工作

李乔依，李伟*等，PRL 130, 226502 (2023) 编辑推荐

❑ 有限温度张量网络态方法是关联量子材料的有力研究手段

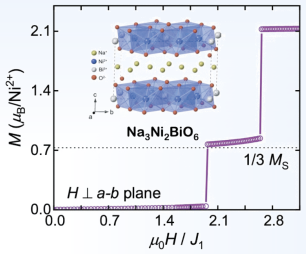
中国科学十大进展

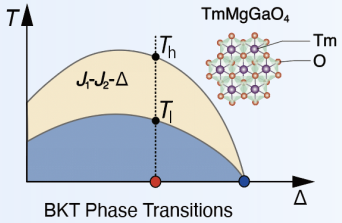


🏆 自旋超固态巨磁卡效应

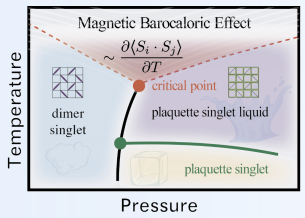
Nature 2024
Nature 2026
PRL 2025

Kitaev磁体1/3平台
NP 2023

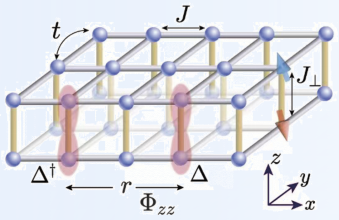




三角晶格磁体BKT相变
NC 2020 x2

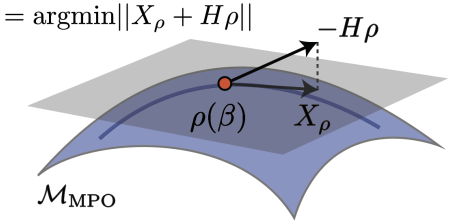


Shastry-Sutherland
阻挫自旋模型相图
PRL 2023



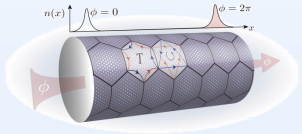
🏆 镍基超导有效模型
PRL 2024

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}\beta} = \mathrm{argmin}||X_\rho + H\rho||$$

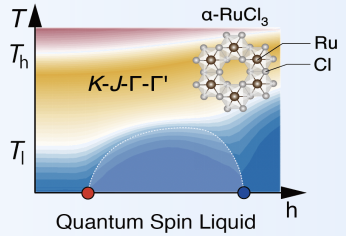


有限温度张量网络方
PRL 2023
PRX 2018
PRL 2011

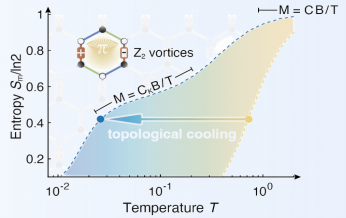
魔转角石墨烯反常量子霍尔态
NC 2021, PRL 2022



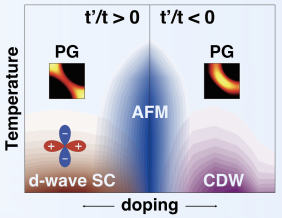
Kitaev磁体高场自旋液体
NC 2021, NC 2023



Kitaev磁体
拓扑激发磁卡效应
NC 2024, NC 2025



铜基超导模型有限温相图
PRL 2024



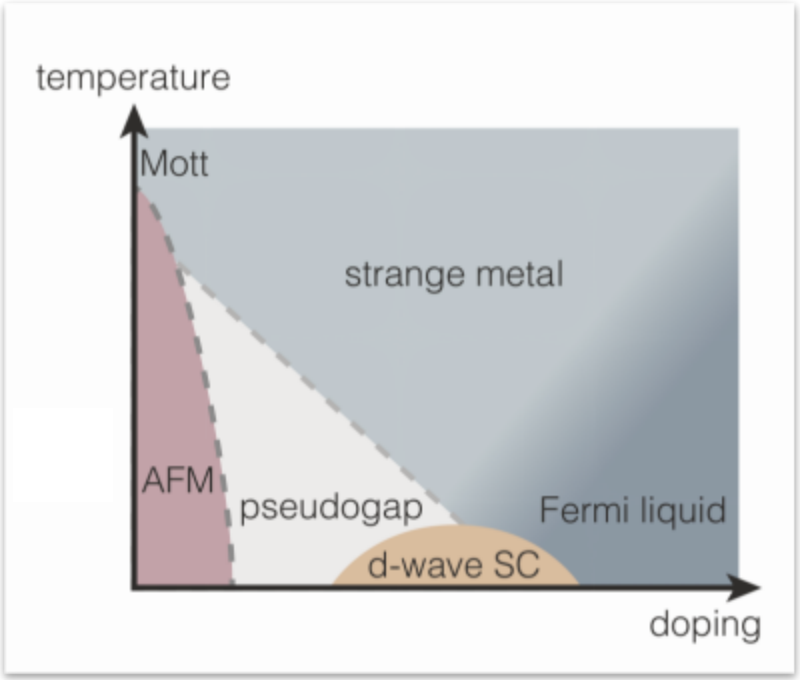
🏆 ESI高被引论文

PRL 编辑推荐

关联量子多体系统的前沿应用

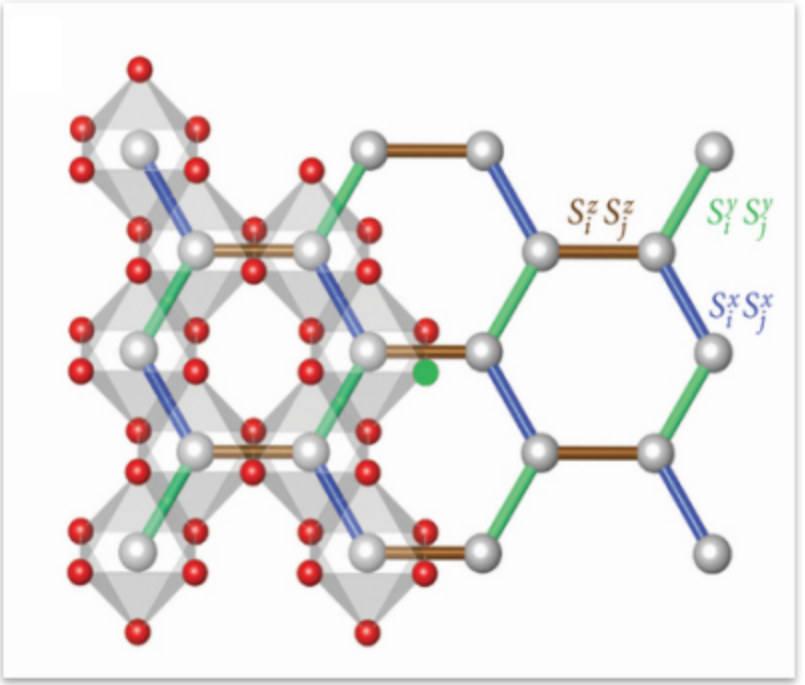
张量网络方法在量子材料研究中可发挥重要作用

高温超导体相图



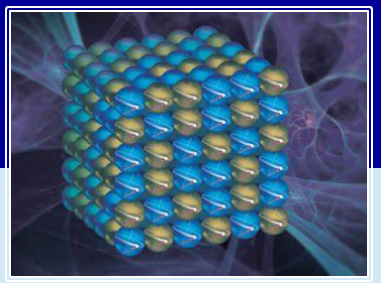
➢ 理解高温超导配对机制的重要途径

两维阻挫量子磁性材料

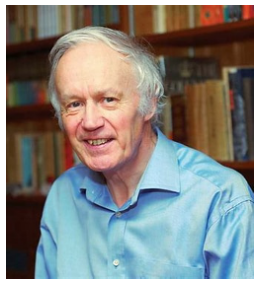


➢ 微观理论与实验测量的重要桥梁

自旋超固态及其巨磁卡效应



超固态之问——固体可以同时超流吗？



A. J. Leggett

诺贝尔物理奖 2003

Can a Solid Be "Superfluid"?

A. J. Leggett
School of Mathematical and Physical Sciences, University of Sussex, Falmer, Brighton, Sussex, England
(Received 15 September 1970)

It is suggested that the property of nonclassical rotational inertia possessed by superfluid liquid helium may be shared by some solids. In particular, nonclassical rotational inertia very probably occurs if the solid is Bose-condensed as recently proposed by Chester. Anomalous macroscopic effects are then predicted. However, the associated superfluid fraction is shown to be very small (probably $\lesssim 10^{-4}$) even at $T=0$, so that these effects could well have been missed. Direct tests are proposed.

A. J. Leggett, PRL. 25, 1543 (1970)

固体中是否可能存在超流现象？如果可能，如何实现？

Is superfluidity possible in a solid? If so, how?

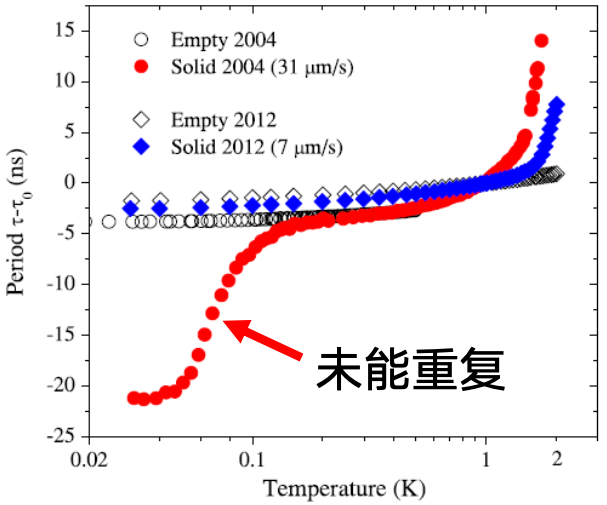
- 超固态实现最初提议——固态氦-4

of "exchange" of particles between sites. The most favorable case would therefore seem to be solid helium. Unfortunately, although the in-

最可能情况看起来是固态氦

- 最初关于固态氦中存在超固体的"证据"，随后被证实系实验假象

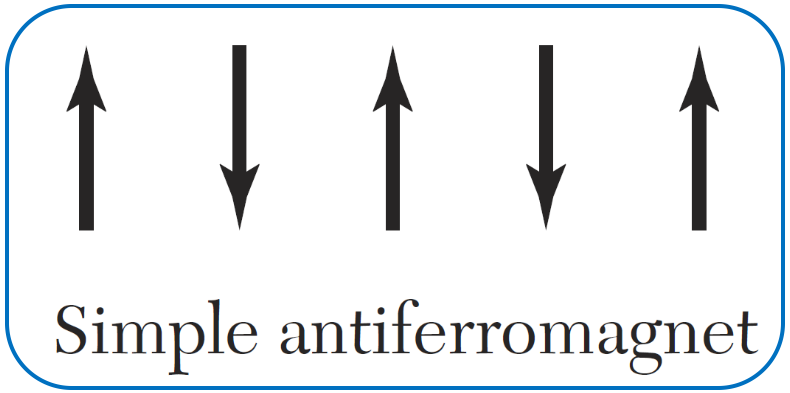
Kim & Chan, Nature 427, 225 (2004) ; Kim & Chan, PRL 109, 155301 (2012)



反铁磁？经典与量子之争

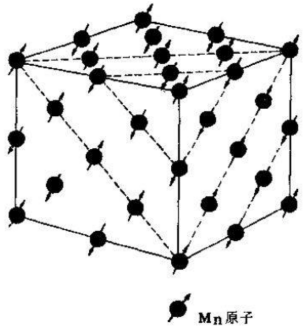
1970

量子反铁磁体是什么样的？

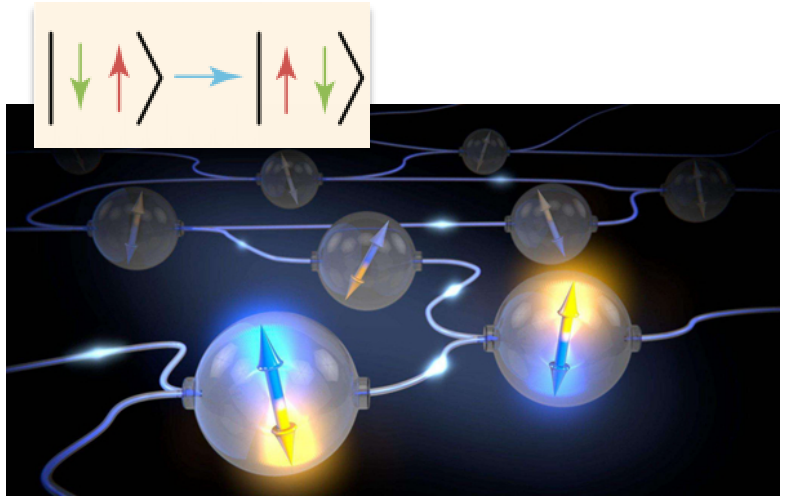


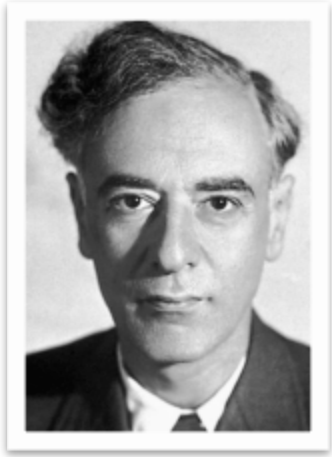
路易斯·奈尔

存在 ✓



Shull等，中子散射实验 1949

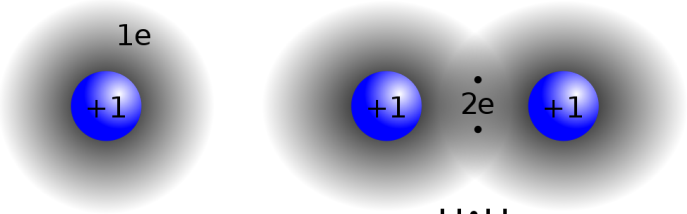




列夫·朗道

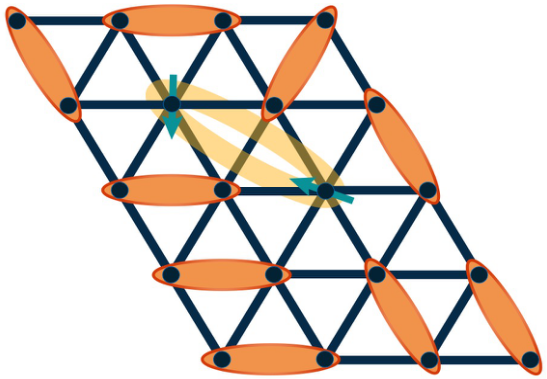
质疑 ？

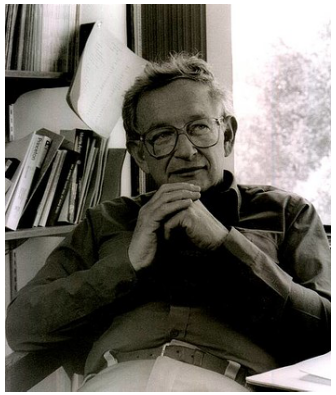
量子力学 —— 纠缠态



共价键

自旋 “液体” 还是 “固体”

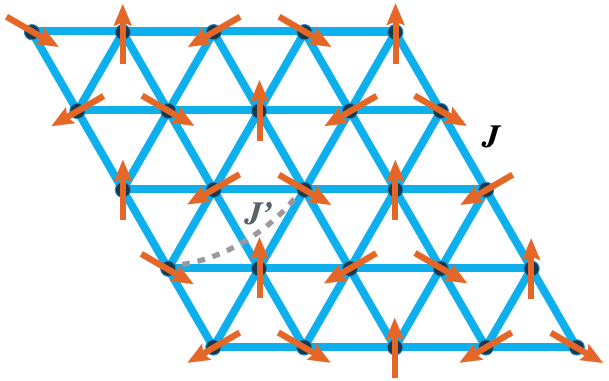




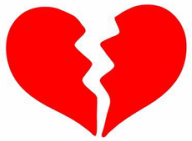
P. W. Anderson

Materials Research Bulletin 8, 153 – 160 (1973).

L. Néel



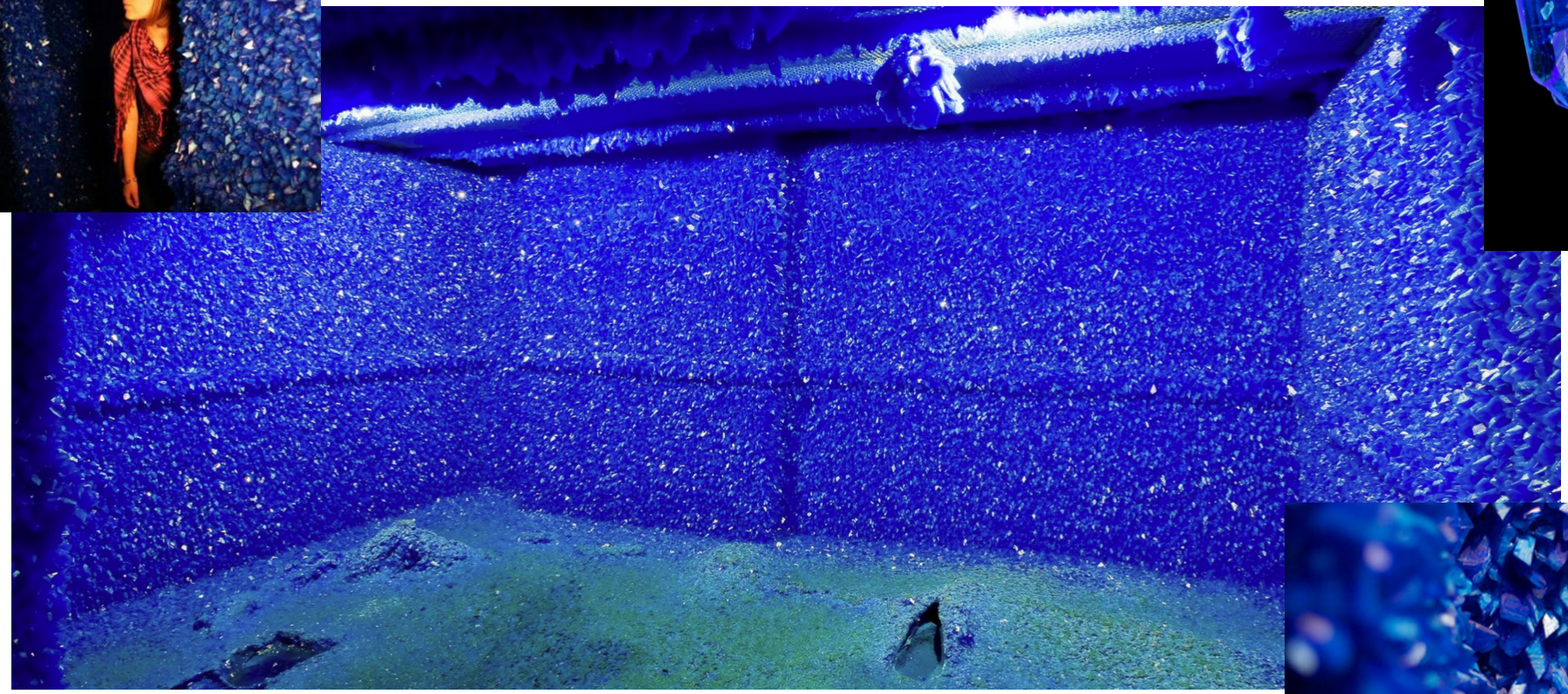
(non-collinear) Néel order

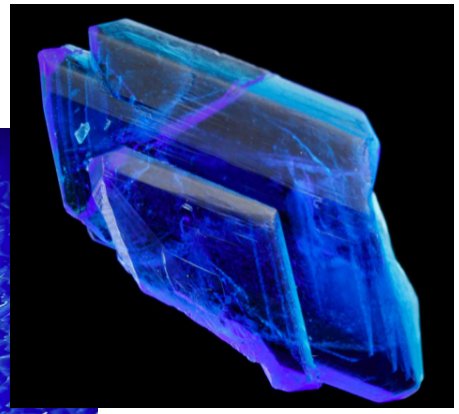


❖ 数值计算结果不支持共振价键假说

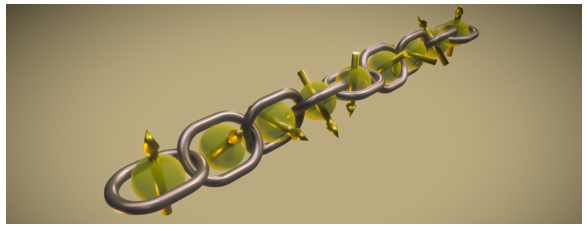
✓ $e_s = -0.5458$ & $m \cong 0.205(1)$ [*Capriotti et al.*, 1999; White & *Chernyshev* 2007]

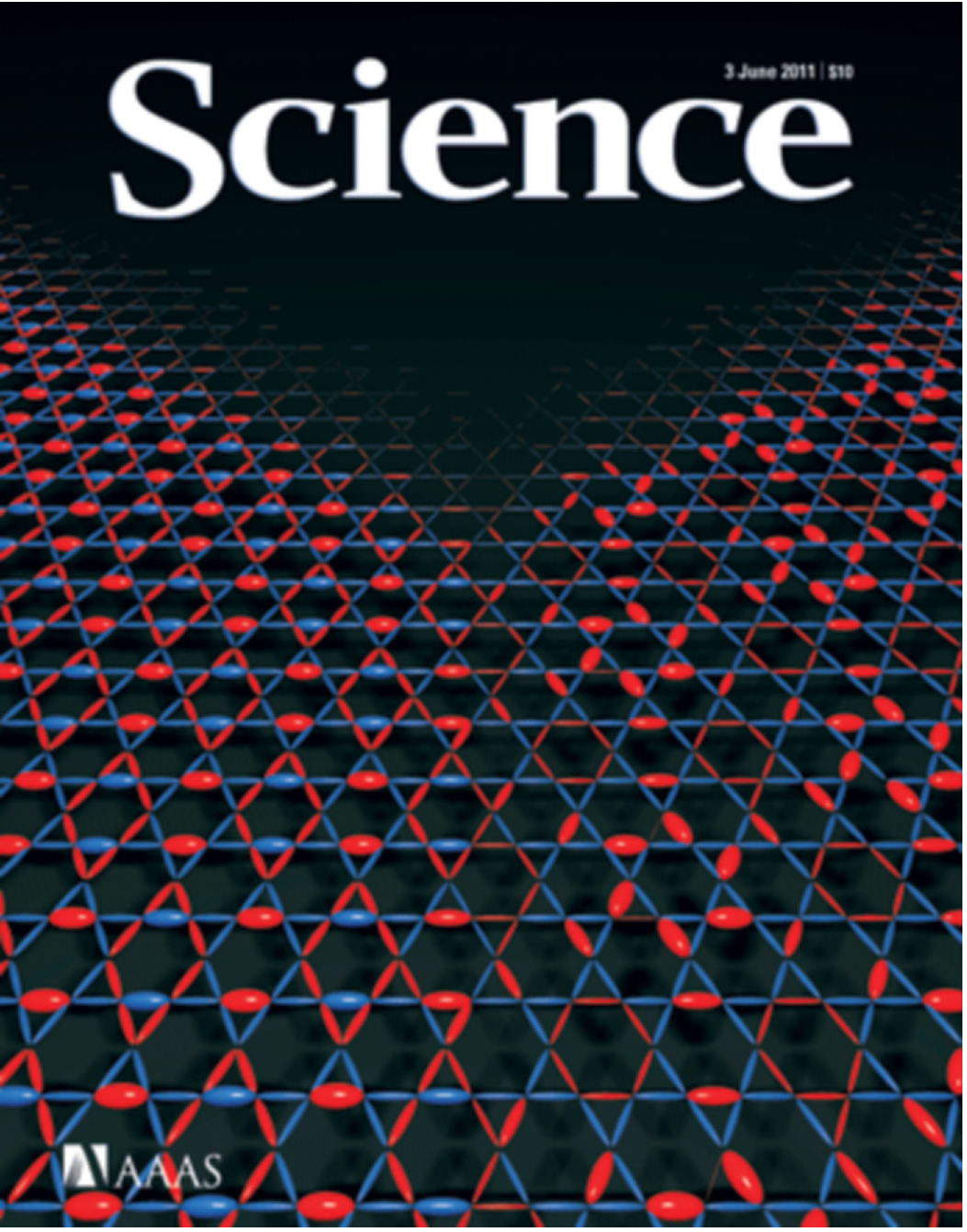
降维的艺术：硫酸铜晶体



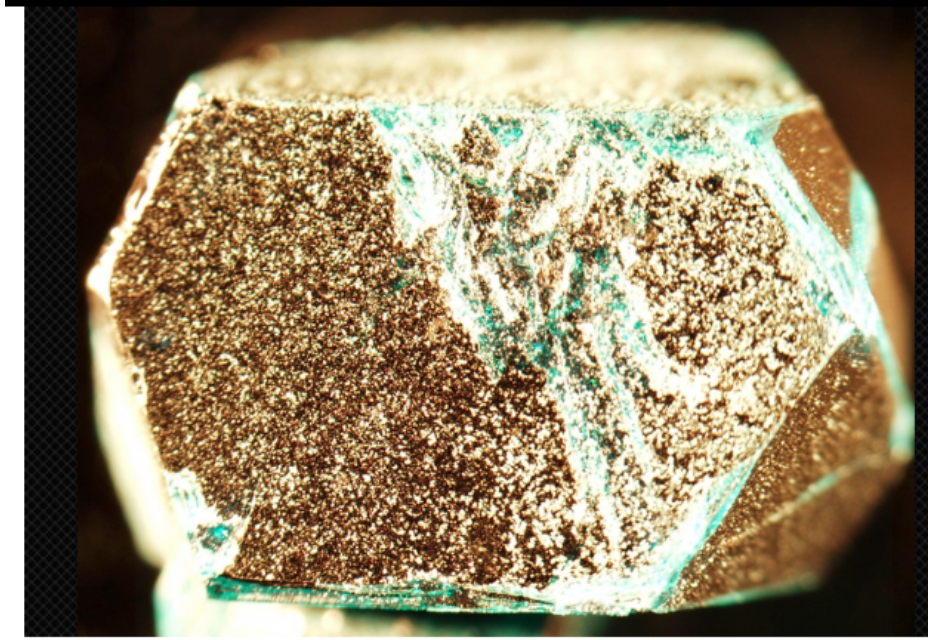


- 硫酸铜晶体是量子磁性材料？
- ✓ 一维量子反铁磁体！





理论计算提出笼目晶格上存在自旋液体!



FULL SCREEN

MIT physicists grew this pure crystal of herbertsmithite in their laboratory. This sample, which took 10 months to grow, is 7 mm long (just over a quarter-inch) and weighs 0.2 grams.

Image: Tianheng Han

MIT researchers discover a new kind of magnetism

Experiments demonstrate 'quantum spin liquid,' which could have applications in new computer memory storage.

David L. Chandler, MIT News Office
December 19, 2012

Following up on earlier theoretical predictions, MIT researchers have now demonstrated experimentally the existence of a fundamentally new kind of magnetic behavior, adding to the two previously known states of magnetism.

Ferromagnetism — the simple magnetism of a bar magnet or compass needle — has been known for centuries. In a second type of magnetism, antiferromagnetism, the magnetic fields of the ions within a metal or alloy cancel each other out. In both cases, the materials become

RELATED

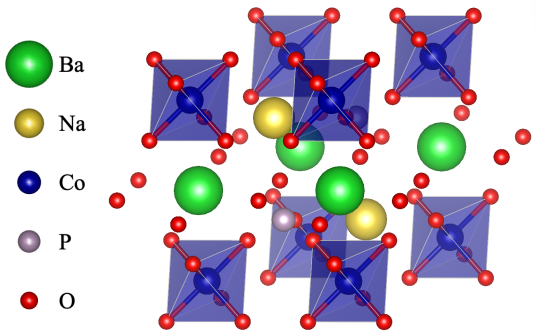
Young Lee

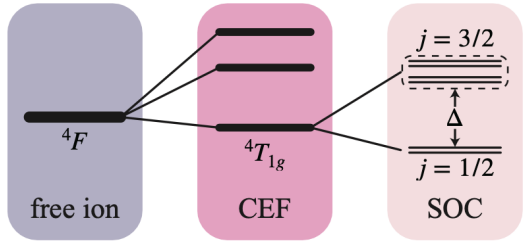
Center for Materials Science and Engineering

Department of Physics

自旋超固态及其巨磁卡效应

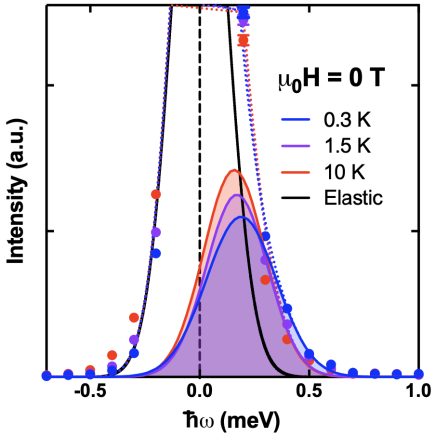
➢ 三角晶格反铁磁体$Na_2BaCo(PO_4)_2$

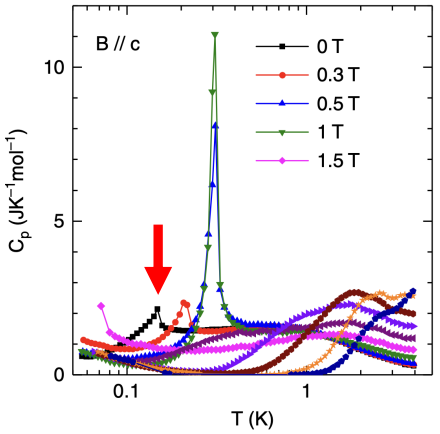




低能自由度：有效自旋-1/2

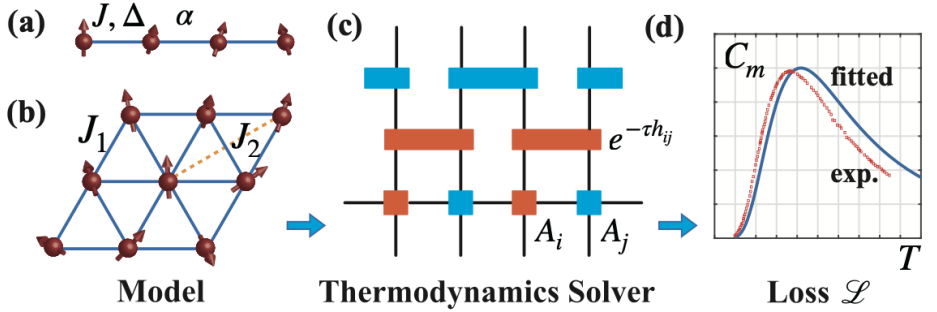
中子散射：强烈自旋涨落　　比热数据：磁相变

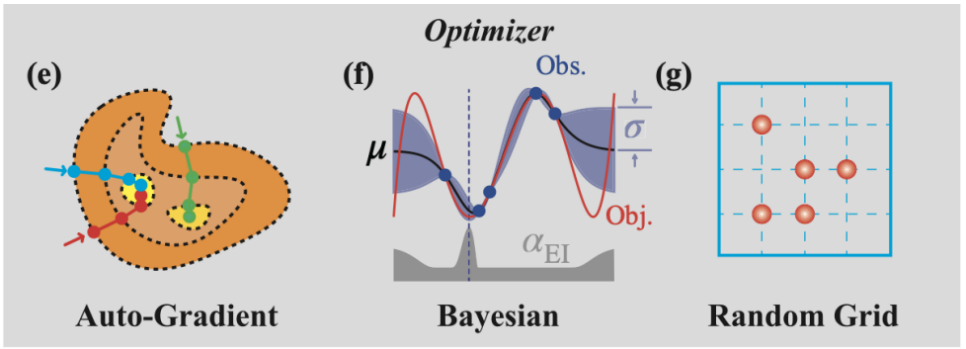




不同实验数据指向不同结论，存在“矛盾”

➢ 多体计算+自动寻参研究量子磁体





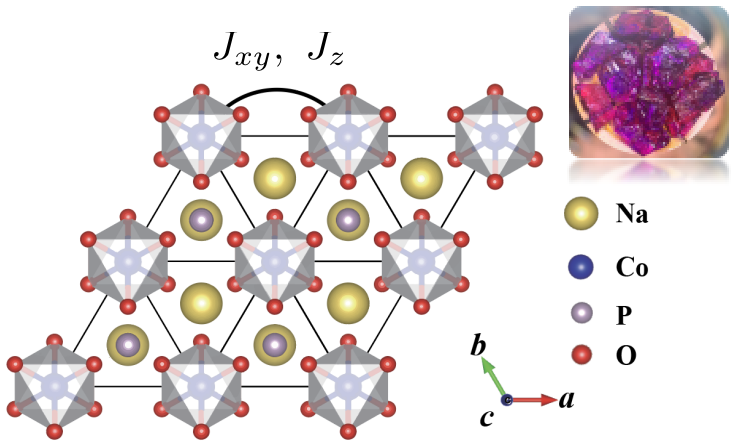
- 自动拟合实验数据确定微观有效模型

➢ 从理论角度提供解决实验争议的新角度？

自旋超固态及其巨磁卡效应

微观模型分析：易轴三角晶格反铁磁体$Na_2BaCo(PO_4)_2$

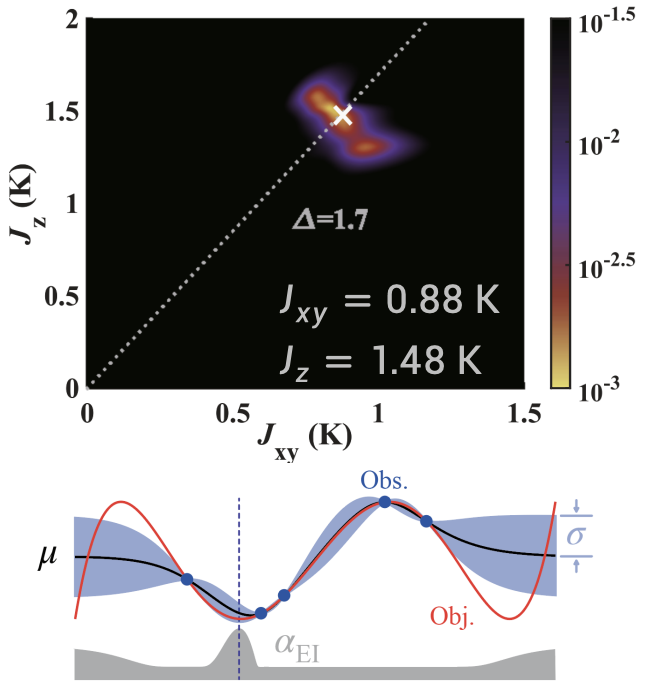
三角晶格反铁磁模型



$$H = \sum_{\langle i,j \rangle} J_{xy}(S_i^x S_j^x + S_i^y S_j^y) + J_z S_i^z S_j^z$$

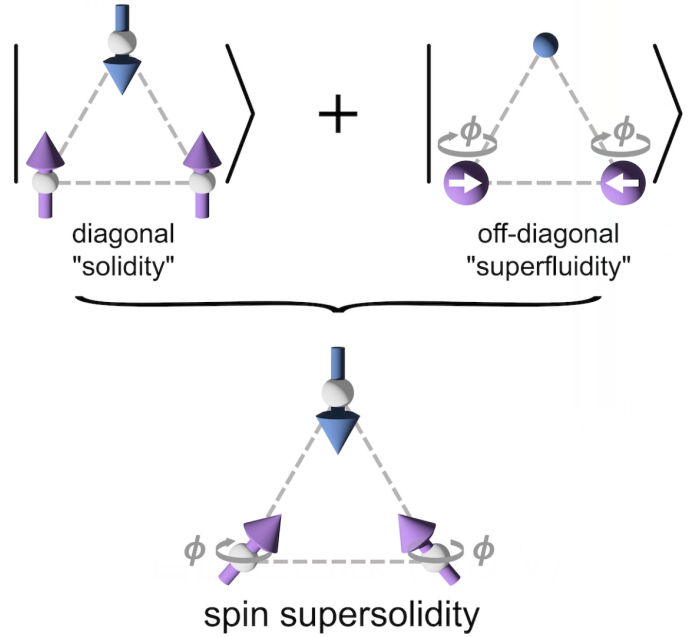
对称性分析
确定有效哈密顿量形式

多体计算+贝叶斯优化



基于实验数据自动寻参
获取微观有效模型

理论预言：有限温度相图



计算体系相图
预言自旋超固态

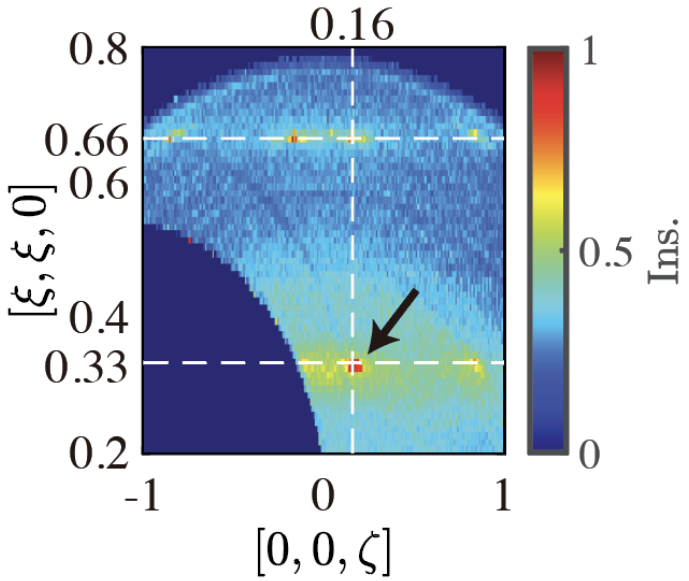
高源，万源*，李伟*等 npj Quantum Mater. (2022)

自旋超固态及其巨磁卡效应

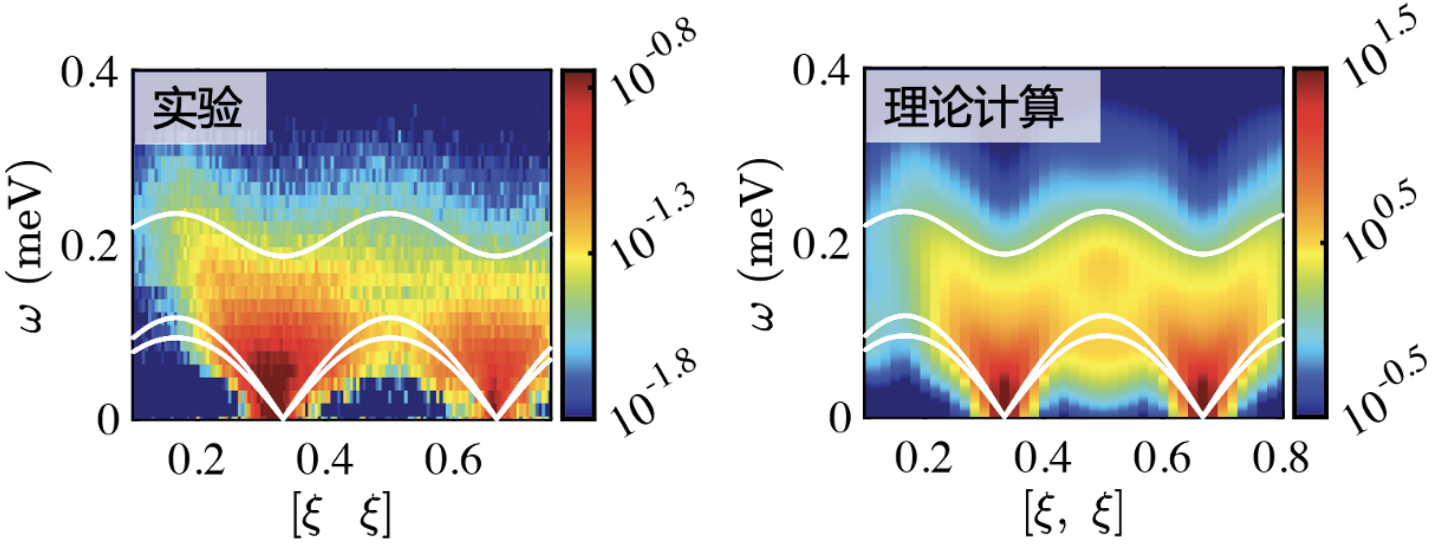
自旋超固态：动力学计算+谱学实验证据

中子散射合作者：
金文涛（北航）

➢ **弹性中子散射**确定自旋结构



➢ **非弹性中子散射**揭示自旋激发动力学



分立对称性破缺： 固态序衍射峰

无能隙Goldstone模式： 超流序涨落

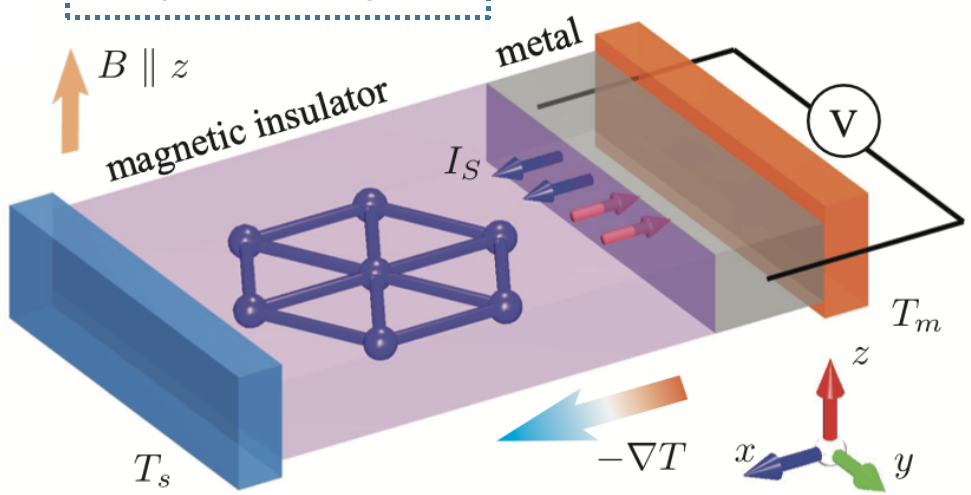
❖ **超固态**：兼具**固态**和**超流序**

李伟*, 苏刚*等, Nature 625, 270 (2024)
（ESI 高被引论文，约70次）

高源，苏刚*，李伟*等 PRB 110, 214408 (2004)

Linear Response Theory of Spin Seebeck Effect

$\langle I_S \rangle = -A\tilde{I}_S \delta T$



➢ **Original formula for spin current:**

$$\tilde{I}_S = \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \ \mathrm{Im}[\chi^{-+}_{\mathrm{loc}}(\omega)]\, k(\beta\omega)$$

$$\chi^{-+}_{\mathrm{loc}}(\omega) = \frac{-i}{N}\sum_j \int_0^\infty dt\, e^{i\omega t}\langle [S_j^-(t), S_j^+]\rangle_\beta$$

$$k(x \equiv \beta\omega) = \frac{x}{\sinh x/2}$$

Real-time at finite temperaure is CHALLENGING!

➢ **Experimental setup:**

- T_s: temperature of the magnet (spin)
- T_m: temperature of the metal
- B: magnetic field along S^z direction

$$T = \frac{T_s + T_m}{2}, \delta T = T_s - T_m, \beta = 1/T$$

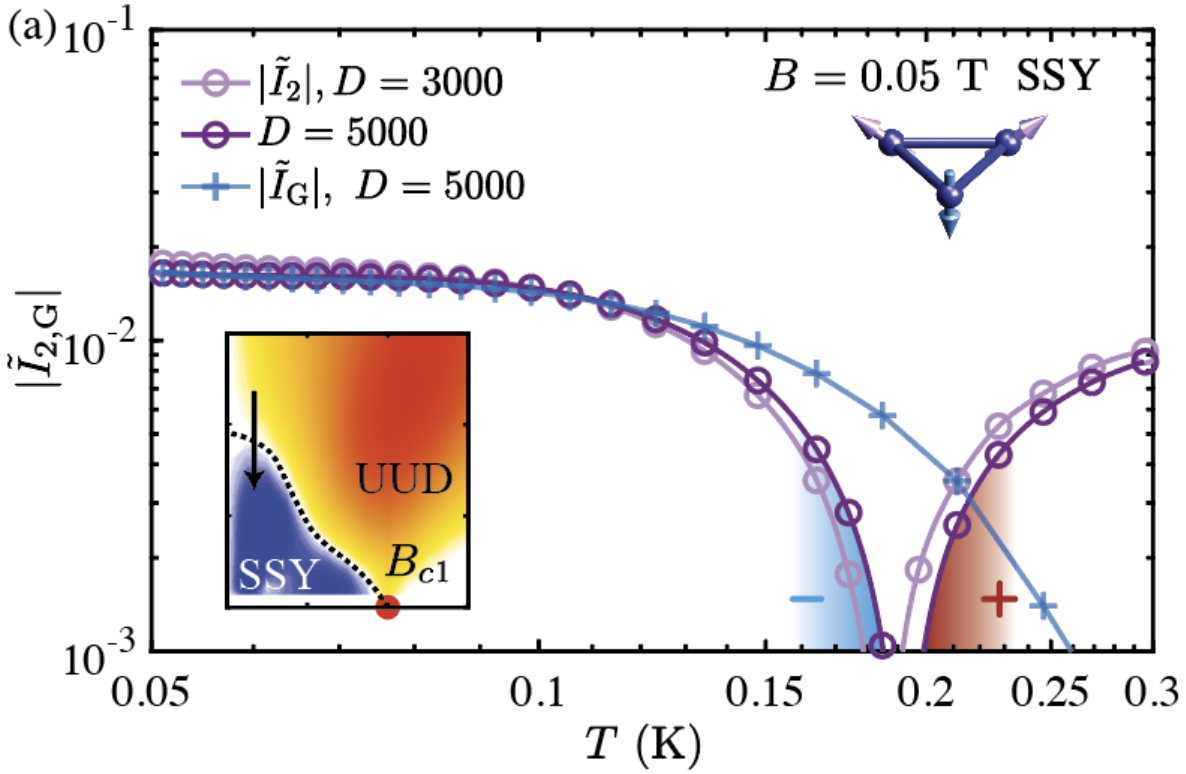
➢ **Efficient approach via computing the imaginary-time correlation:**

$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{N}\sum_j \beta \langle O_j\,(\frac{\beta}{2}) \cdot S_j^+\rangle$$

with $O_j = [H, S_j^-]$.

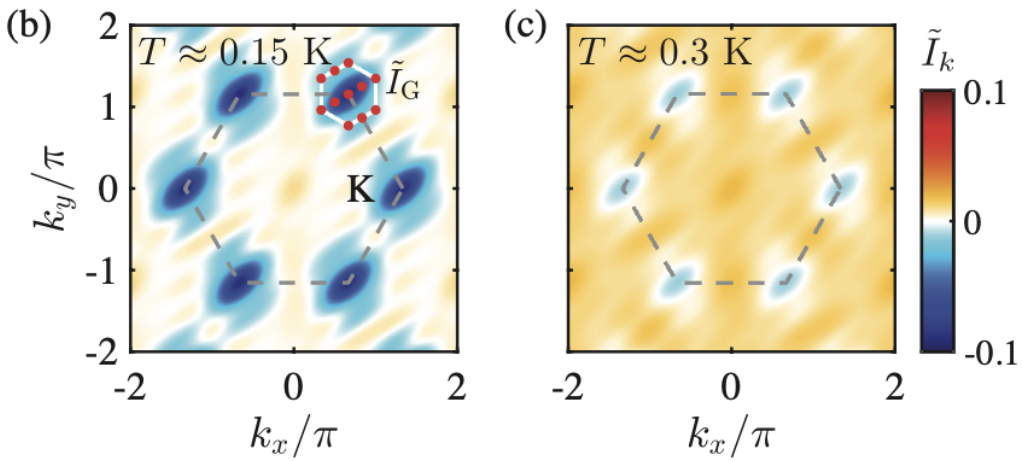
Spin Supercurrent in Spin Supersolid

■ **Persistent spin supercurrent**



➢ Momentum resolved spin current

$$\tilde{I}_k \equiv \beta\langle \mathcal{O}_{-k}(\beta/2) S_k^+ \rangle \qquad S_k^+ = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_n e^{ikn} S_n^+$$

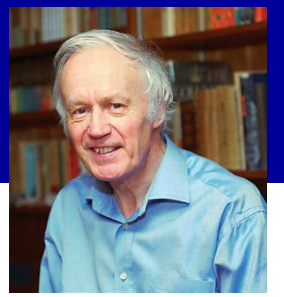


Goldstone-mode-mediated spin transport

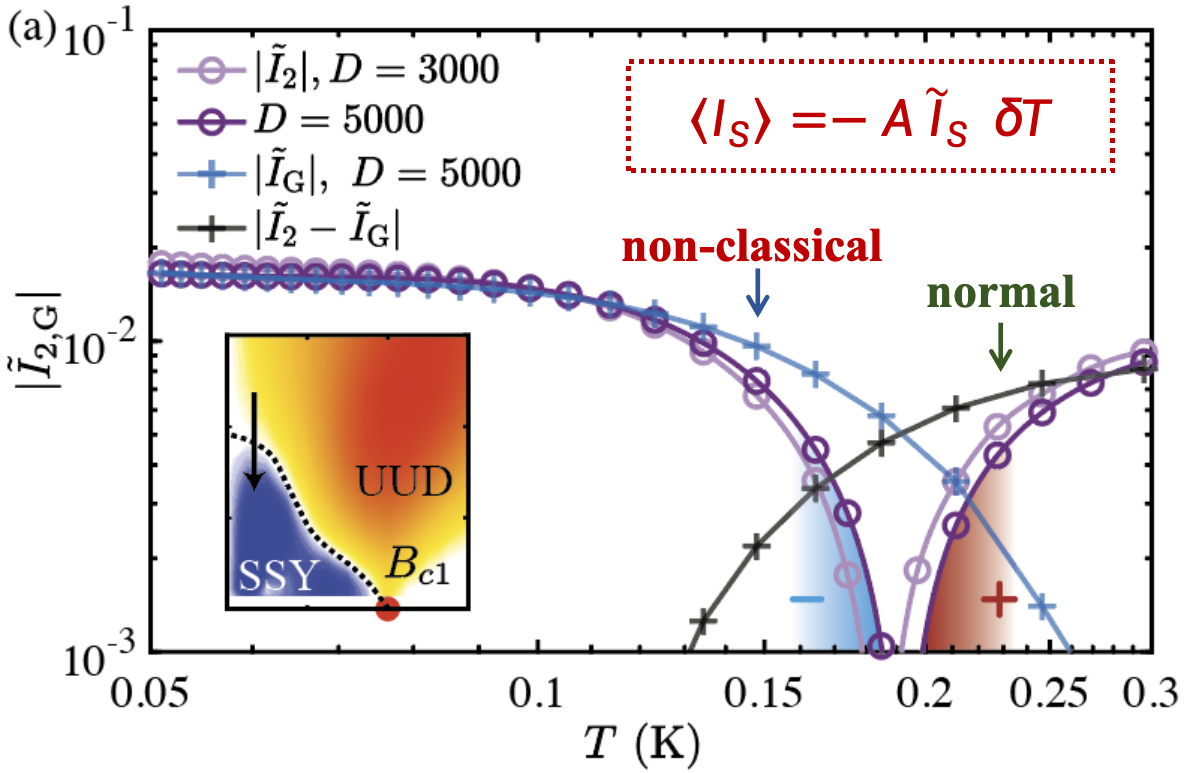
$$\tilde{I}_G = \frac{2}{N} \sum_{k \in k_G} \tilde{I}_k$$

➢ Non-zero spin current survives even at the zero-temperature limit.

Spin Supercurrent in Spin Supersolid



■ **Persistent spin supercurrent**



➢ **Recall Leggett's renowned proposal**

non-classical rotational inertia (NCRI)

$$F(\omega) = F(0) + \frac{1}{2} I_0 \omega^2 - \frac{1}{2} (\rho_S/\rho_0) I_0 \omega^2$$

1) NCRI behavior below Tc

$$I_{\text{eff}} < I_0$$

2) Persistent angular momentum:

$$(\rho_S/\rho) I_0 \omega_c$$

➢ **Two key predictions:** (I) Sign Reversal (II) Persistent spin supercurrent

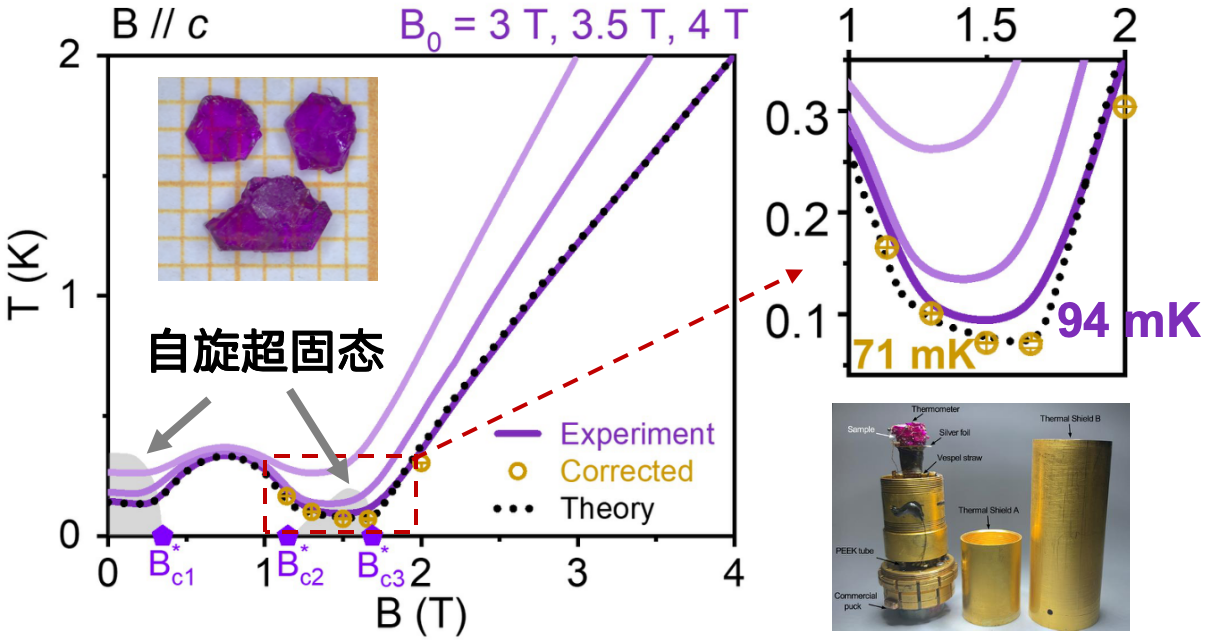
awaiting experiments ...

自旋超固态及其巨磁卡效应

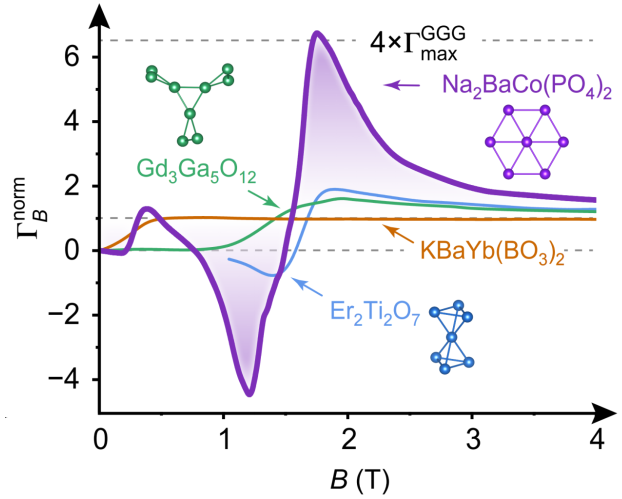
理论计算结合极低温实验，揭示巨磁卡效应，无氦-3实现94mK极低温

极端条件测量：
项俊森、孙培杰
（物理所）

❑ 发现自旋超固态致冷



❑ 极低温巨磁卡效应



磁致冷系数 Γ^{norm}_B 超过通用材料4倍！

量子材料制冷新机理：强涨落、低有序温度、大熵变等

Nature评论：有望开辟极限制冷新途径

- ✓ 受央视、新华社等重要媒体和国际科技媒体关注
- ✓ 两院院士评选的2024年中国科技十大进展新闻
- ✓ 国家自然科学基金委“2024年度中国科学十大进展”

国家自然科学基金委员会 NSFC

METALLIC COOLING

Extreme-Cold Meets Ultra-Conductivity in Spin Supersolid

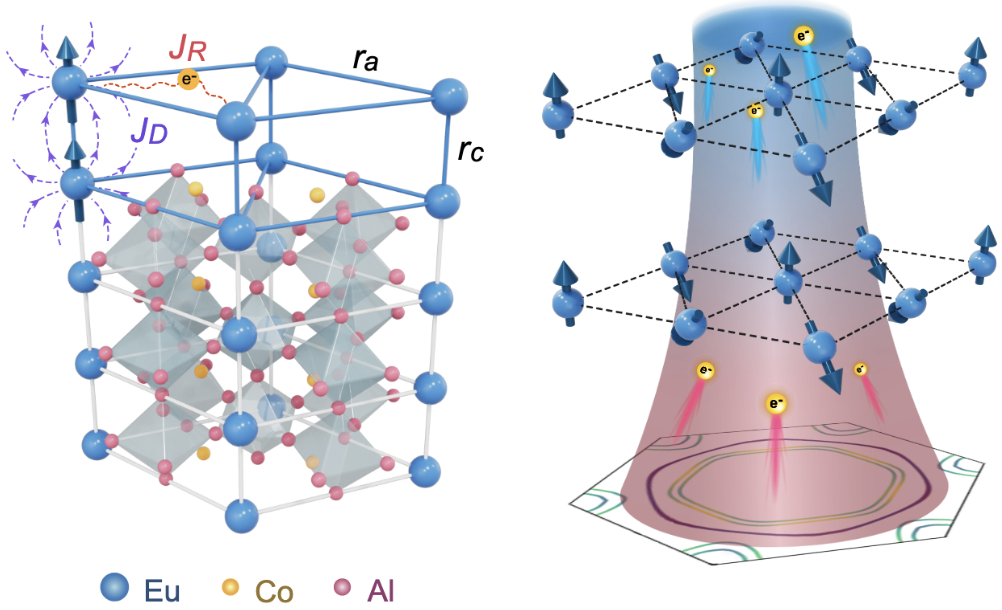
Zhe Qu, CAS

Jie Ma, SJTU

Shu, Xu, Xi, [...], WL, Ma, Qu, Nature 651, 61 (2026)

Giant MCE & Ultrahigh Thermal Conductivity

Theory: Metallic Spin Supersolid



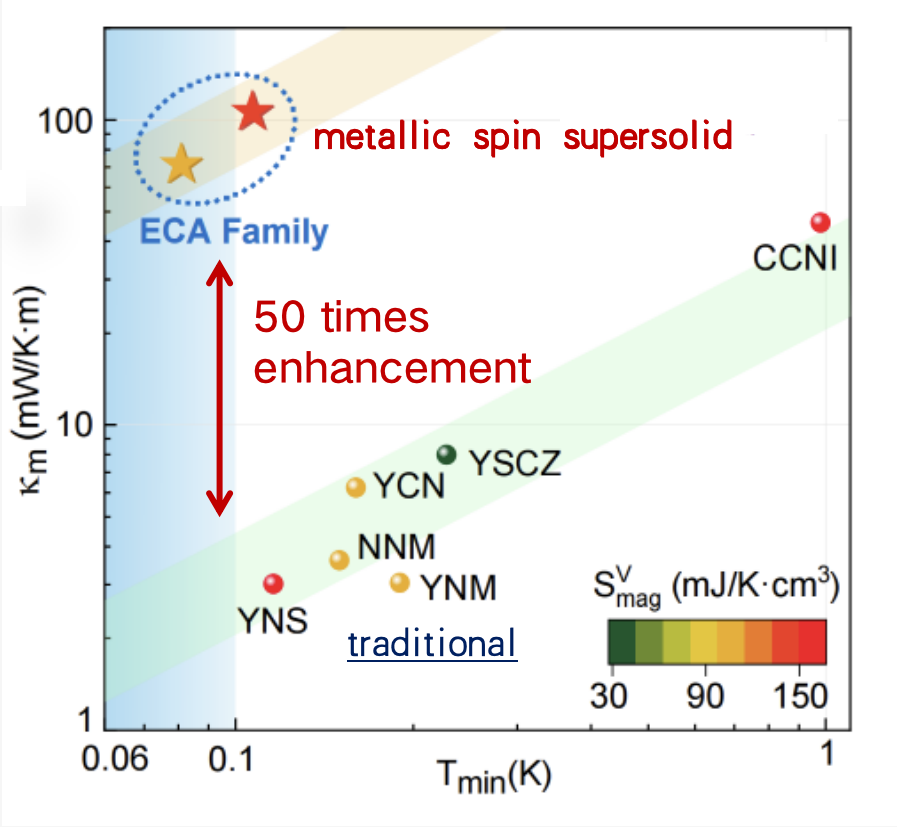
- **Stacked triangular lattice + itinerant electrons**

$$H = H_{\text{dipolar}} + H_{\text{RKKY}}$$

$$H_{\text{dipolar}} = \sum_{i<j} \frac{g^2 \mu_0 \mu_B^2}{4\pi r_{ij}^3} [S_i \cdot S_j - 3(S_i \cdot \hat{r}_{ij})(S_j \cdot \hat{r}_{ij})]$$

$$H_{\text{RKKY}} = \sum_{i<j} J_{\text{RKKY}}(r) S_i \cdot S_j$$

Ultrahigh Thermal Conductivity

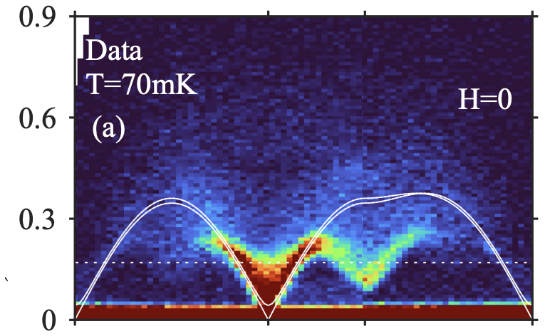


- **Large Entropy: supersolid of local momemts (4f)**
- **Thermal conductivity: itinerant electrons (100mW/Km@100mK)**

自旋超固态及其巨磁卡效应

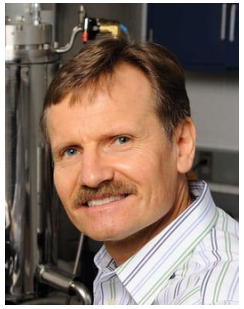
自旋超固态进展：引起凝聚态物理与冷原子物理领域国际同行关注与跟进研究

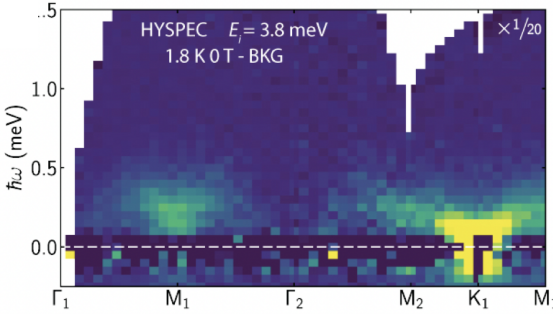
➢ 发现另一种钴基自旋超固态材料



A. Zheludev, ETH Zürich

Phys. Rev. Lett.133.186704 (2024)





C. Broholm, Johns Hopkins U.

arXiv:2402.15869 (2024)

➢ 三角晶格自旋超固态新方向

Journal Club for Condensed Matter Physics
A Monthly Selection of Interesting Papers by Distinguished Correspondents

Frédéric Mila

EPFL Lausanne 凝聚态理论讲席教授

DOI:10.36471/JCCM_June_2024_03

✓ 从RVB到超固态：三角晶格伊辛-海森堡模型的传奇篇章

"It could be the trace of the BKT transition into the 'Y' shaped supersolid predicted by Gao et al [9]. "

它可能是高等人预测[9]的过渡到Y形超固体的BKT转变的迹象。

➢ 冷原子超固态的研究

nature

Article | Open access | Published: 08 May 2024

Measurement of the superfluid fraction of a supersolid by Josephson effect

interactions[7–9,21]; the pair-density-wave phase of ^{3}He under confinement[3,4]; and pair-density-wave phases in various types of superconductor[10–12]. Related phases have been observed in frustrated magnetic systems[22] or proposed to exist in the crust of neutron stars[23] and for excitons in semiconductor heterostructures[24]. The periodic structure

在阻挫磁性系统已观察到相关超固相

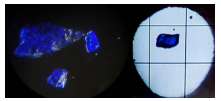
➢ 量子模拟三角晶格超固态

dberg dressing [31], and polar molecules [27], testing these predictions will soon become reality, and offer an alternative to the spin supersolids concurrently sought in frustrated magnets with *anti*-ferromagnetic spin exchange [32–37].

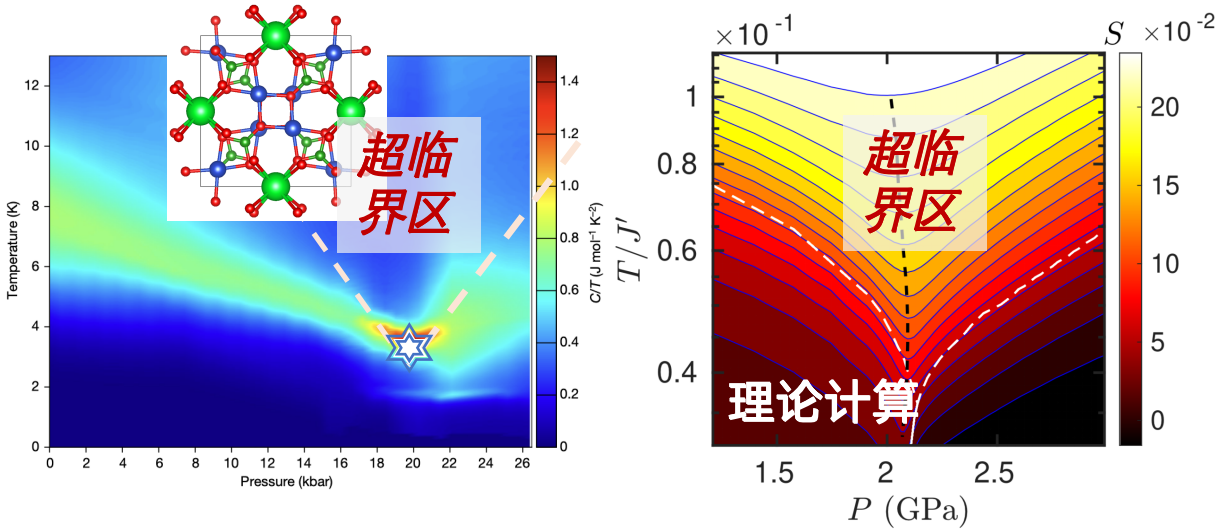
…，目前在有反铁磁自旋交换的阻挫磁体中发现的自旋超固态

arXiv:2407.12752 (2024)

阻挫量子磁性与新型磁卡效应

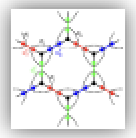


提出超临界磁压卡新效应

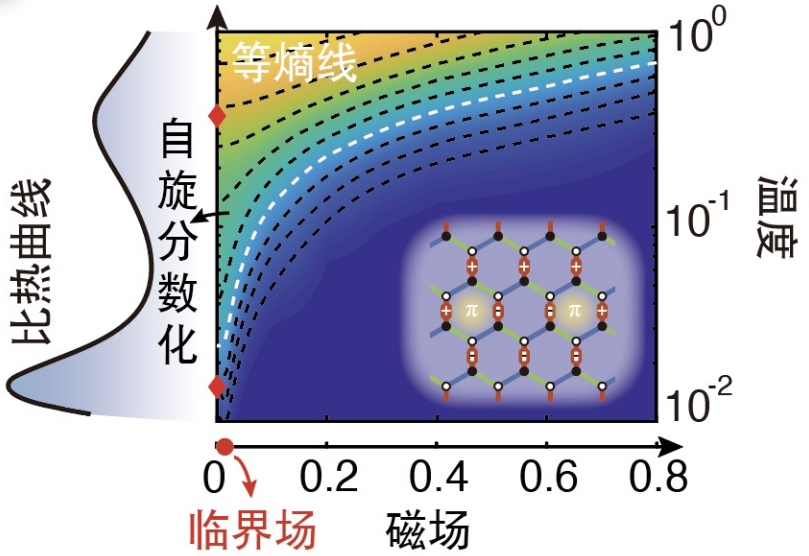


- 荷兰、瑞士等联合团队在$SrCu_2(BO_3)_2$中发现演生临界点 [Nature 2021]，类比水相图
- 我们研究理论模型的有限温度性质：
  - ✓ 得到完整压强-温度相图，存在超临界区
  - ✓ 揭示关联致冷的超临界磁压卡效应！

李伟*，苏刚*等，Phys. Rev. Lett. 131, 116702 (2023)



提出拓扑激发致冷新机制



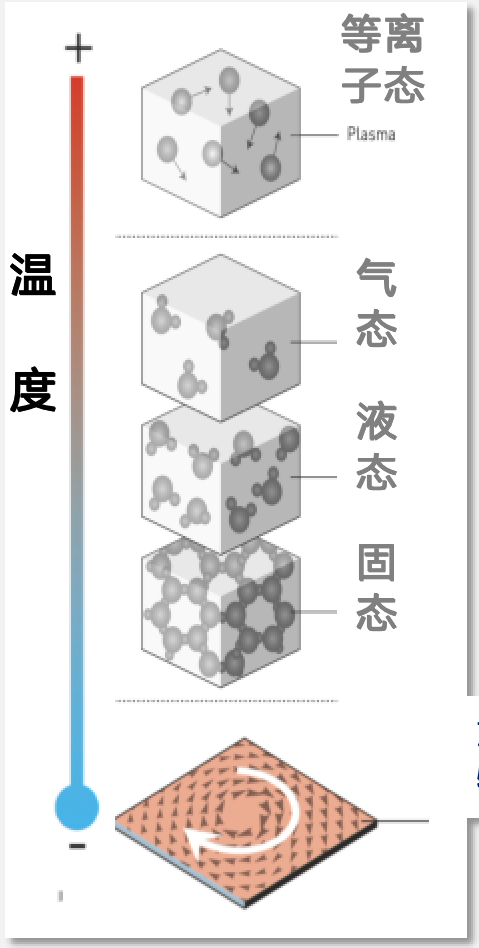
- Kitaev量子自旋液体存在自旋分数化：Z_2拓扑涡旋激发和Majorana费米子
- α–$RuCl_3$探测到自旋分数化 [Nature 2018]
- 我们提出：Z_2拓扑激发携带大量低温熵，调控产生新型磁卡致冷！

李伟*，苏刚*等 Nature Commun. 15, 7011 (2024)

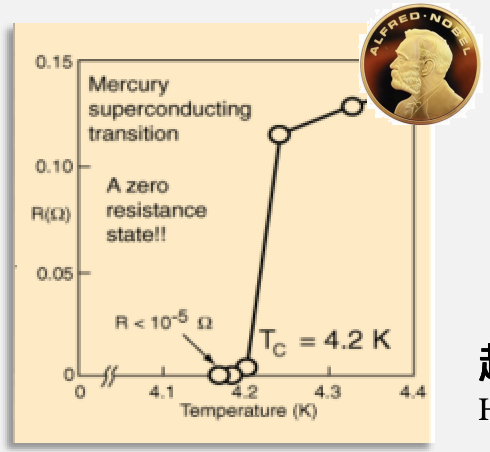
极低温与物理学新发现

❑ 极低温是众多基础和前沿科学突破的关键

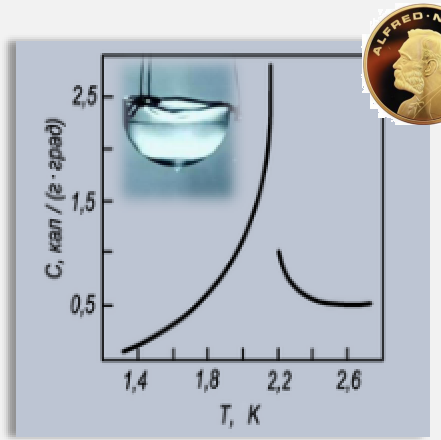
➢“无低温不量子！”



量子物态

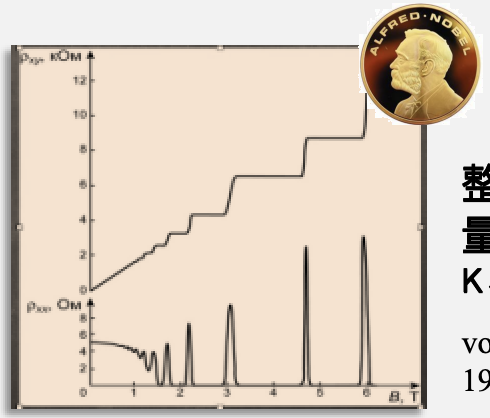


超导（4.2 K）
H. K. Onnes 1911



He⁴超流（2.17 K）
Kapitza 1938

He³超流（2.5 mK）
D. Lee、D. Osheroff、R. Richardson 1972



整数、分数、反常量子霍尔效应（1.5 K、40 mK、30 mK）

von Klitzing 1980; Tsui 1982; Xue 2013

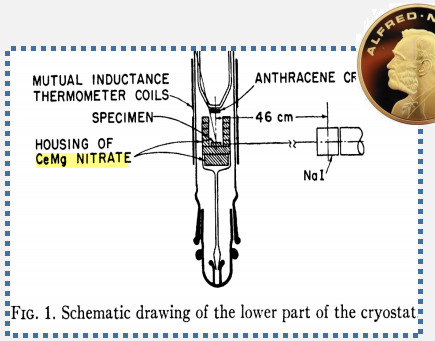
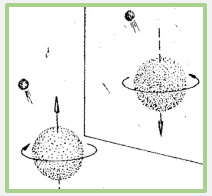


FIG. 1. Schematic drawing of the lower part of the cryostat

宇称不守恒（<10 mK）
C. S. Wu 1957

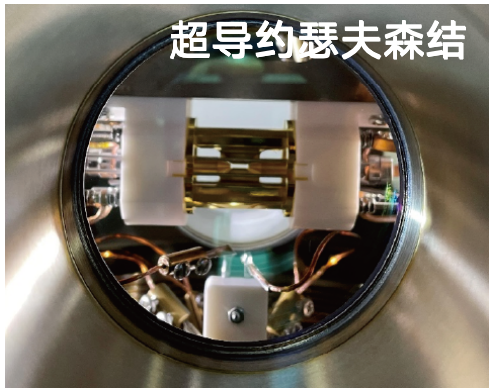
The inspiring discussions held with Professor T. D. Lee and Professor C. N. Yang by one of us (C. S. Wu) are gratefully acknowledged.

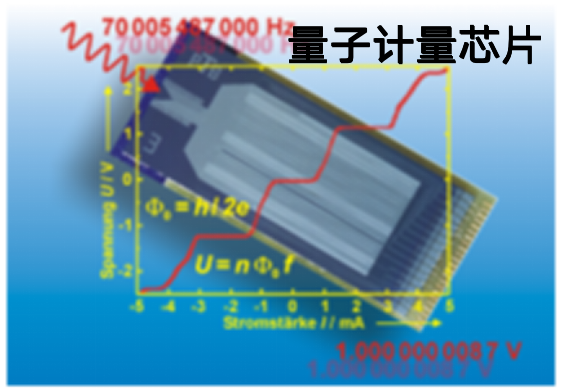


量子材料固态制冷应用前景

❑ 中科院战略先导专项支持：有效克服传统工质的固有限制，获得极低温的新途径

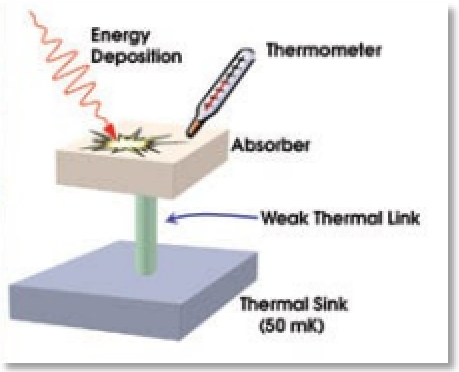
◘ 低温量子芯片





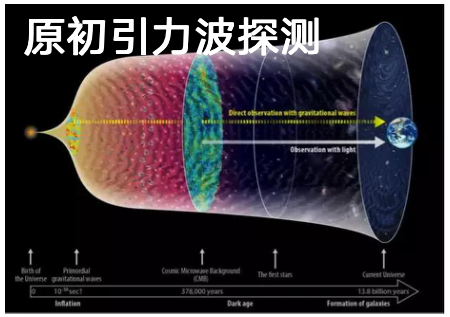
- 量子技术发展中的关键科研领域
  - 量子计算和量子信息处理的核心
    - **极低温条件（＜30mK）：**
      增加量子比特数量的同时，
      保持高保真度和长相干时间

◘ 高分辨超导探测器



- 单光子、高分辨、响应快
- 降低**临界温度T_C**（＜300 mK）提高能量分辨率

$$\Delta E_{\mathrm{FWHM}} = 2\sqrt{2\ln 2}\sqrt{4k_{\mathrm{B}}T_{\mathrm{C}}^{2}\frac{C}{\alpha}\sqrt{\frac{n}{2}}}$$



- 宇宙微波背景辐射——原初B模式偏振

- 基于TES的新型高分辨X射线能谱仪

多体量子态理论与精确计算：面向基础研究前沿和国家重大需求

➢ 发展新的理论框架

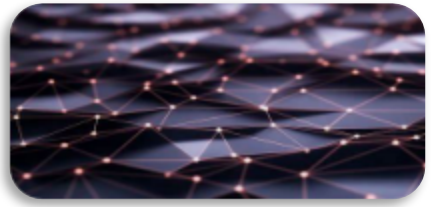
❑ 平均场理论的修正

- 非高斯态理论
- 动力学奴隶玻色子平均场理论

❑ 超越平均场理论

➢ 基于张量网络、神经网络

➢ 多体量子态精确描述与理论框架



➢ 发展新的数值方法

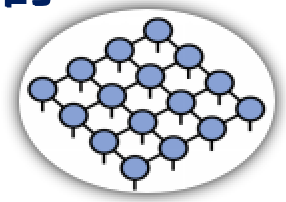
❑ 多体计算方法

- 密度矩阵重正化群
- 张量重正化群
- 量子蒙特卡洛
- 动力学平均场
- 精确对角化

➢ 有限温度和动力学性质

➢ 克服符号问题的新计算框架？

- 结合机器学习的新计算方法



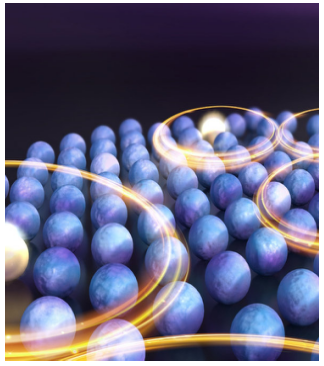
➢ 结合新兴量子技术

❑ 量子材料及其应用

- 高温超导与能源技术
- 量子磁性与极限制冷

❑ 量子模拟与量子计算

- 超冷原子光晶格
- 超导量子比特
- 里德堡原子



“从理性认识发展到变革的实践，这是科学精神的要求。”

—— 周光召

thanks