“高压”出奇迹：高温超导材料探索和物性调控

孔盼盼

中国科学院物理研究所

极端条件重点实验室

2026年05月31日

报告内容

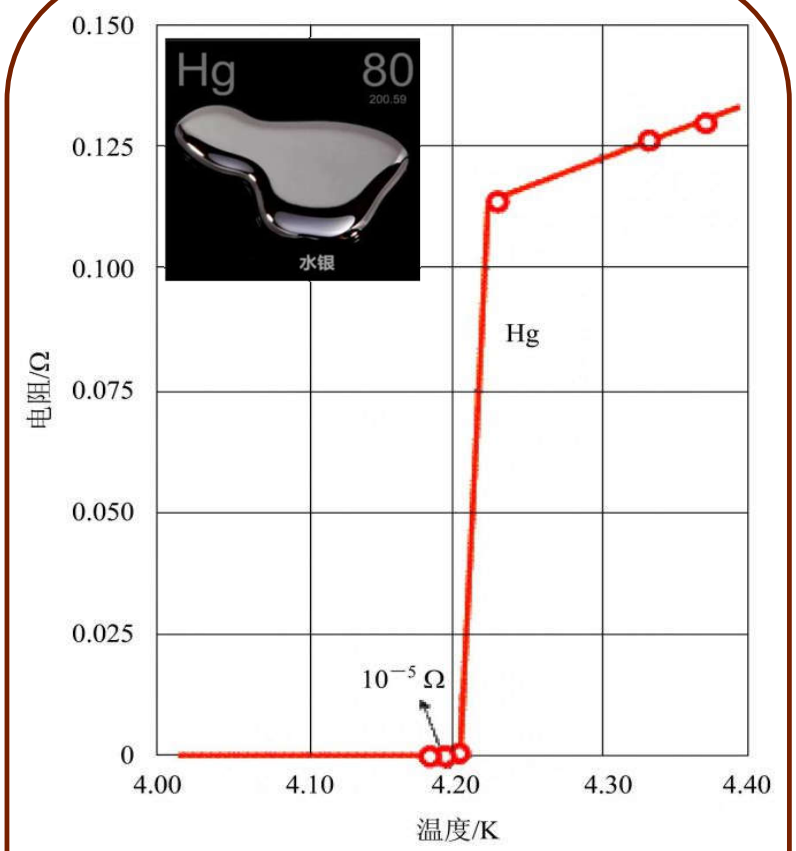
一 超导研究简介

二 高压实验技术简介

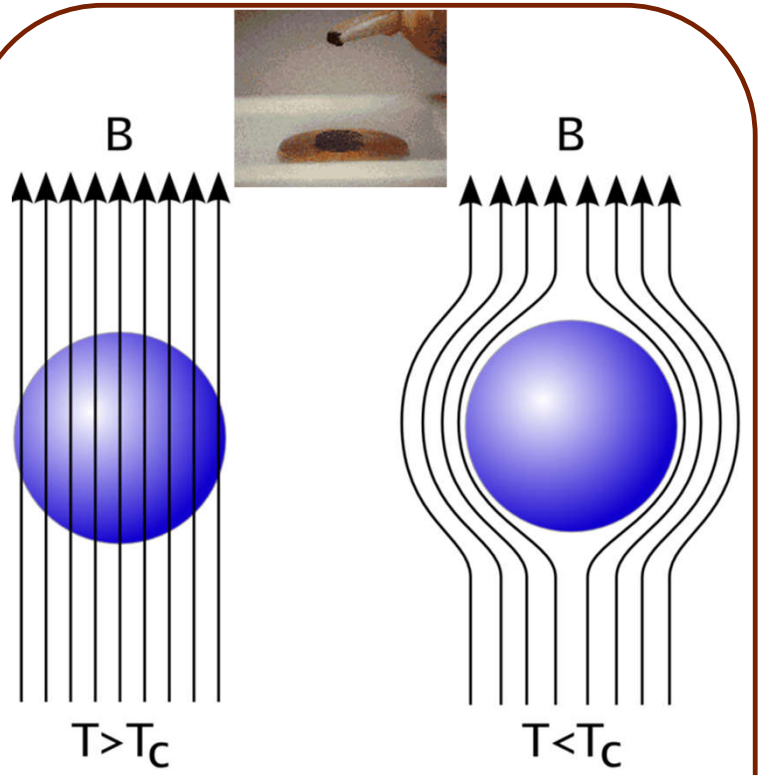
三 超高压下富氢高温超导材料的探索

四 课题组简介:高温超导和量子演生材料

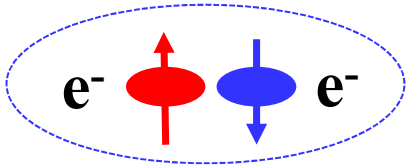
超导简介



零电阻效应



迈斯纳效应

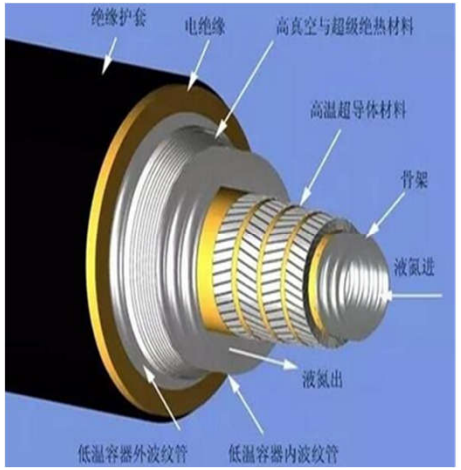


1972诺奖

*BCS*理论：库珀对

超导材料的巨大应用前景

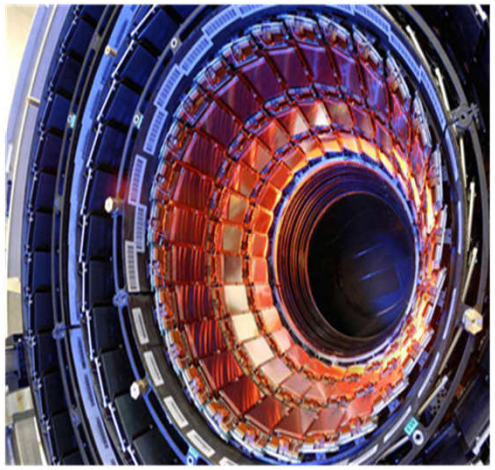
超导是20世纪物质科学最重要的发现之一。其**零电阻效应**和**完全抗磁**具有巨大的应用价值，为材料、信息和能源技术的颠覆性跨越提供了的可能。



超导电缆

超导磁悬浮列车

核磁共振



核聚变

超导材料：21世纪战略高新技术材料

瓶颈：现有超导材料绝大部分只能在液氦温区应用

液氦：战略稀缺物资、极昂贵、外购(卡脖子)

挑战：设计制备液氮温区“高温”超导新材料

液氮：普及、来源丰富、矿泉水价格

高温超导发展史

汞
4.2 K

常规超导体
*BCS*理论

铜基超导体
133 K
164 K/30 GPa

铁基超导体
65 K

氢基超导体
298K/250 GPa

镍基超导体
96K/20 GPa

1911 1957 1986 2008 2015 2019 2023

Heike Onnes

1913诺奖

John Bardeen 1908-1991 | Leon Cooper 1930- | John Schrieffer 1931-

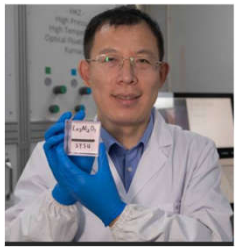
1972诺奖

J. Bednorz | K. Muller

1987诺奖

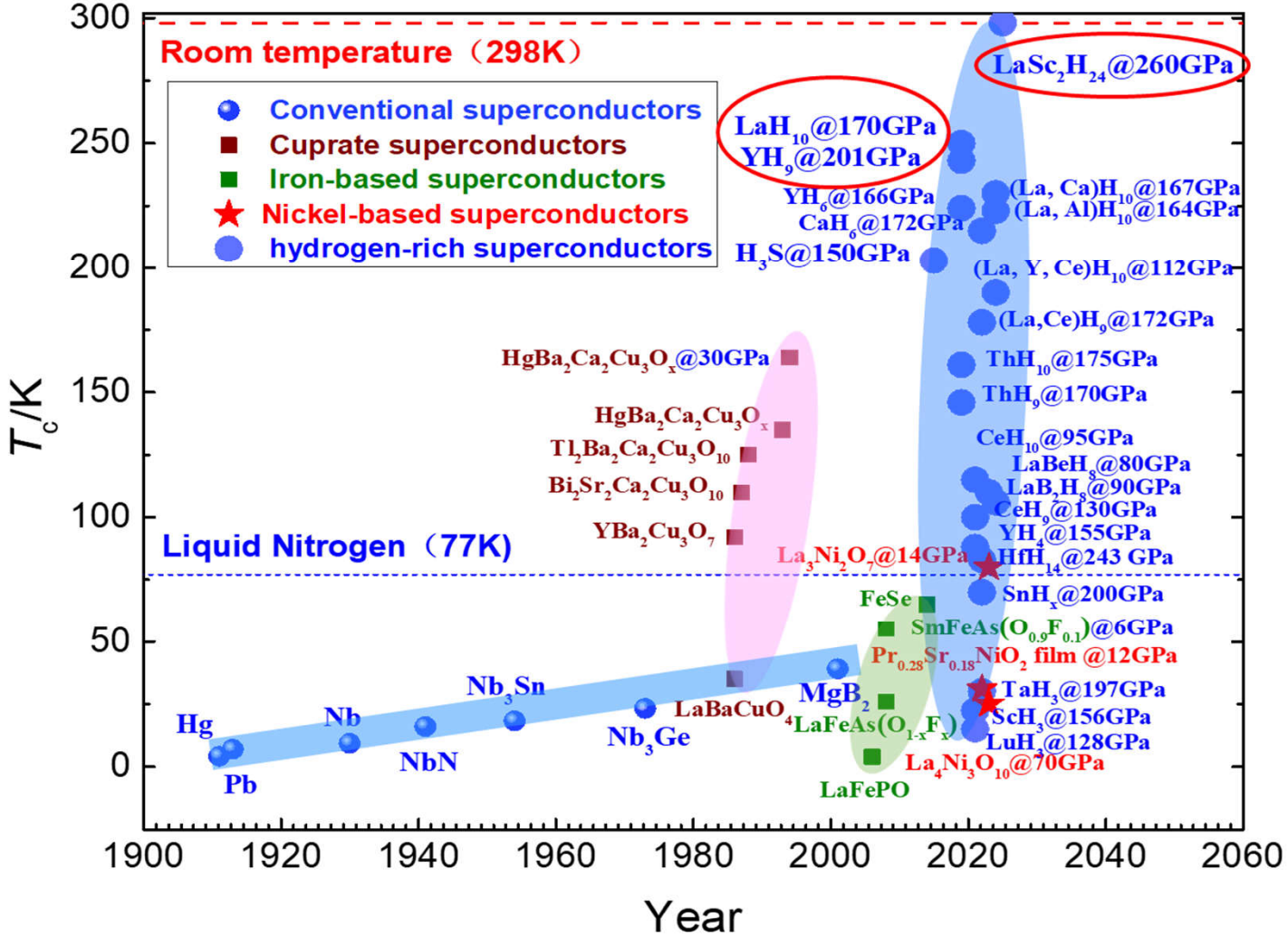
Hideo Hosono

Mikhail Eremets

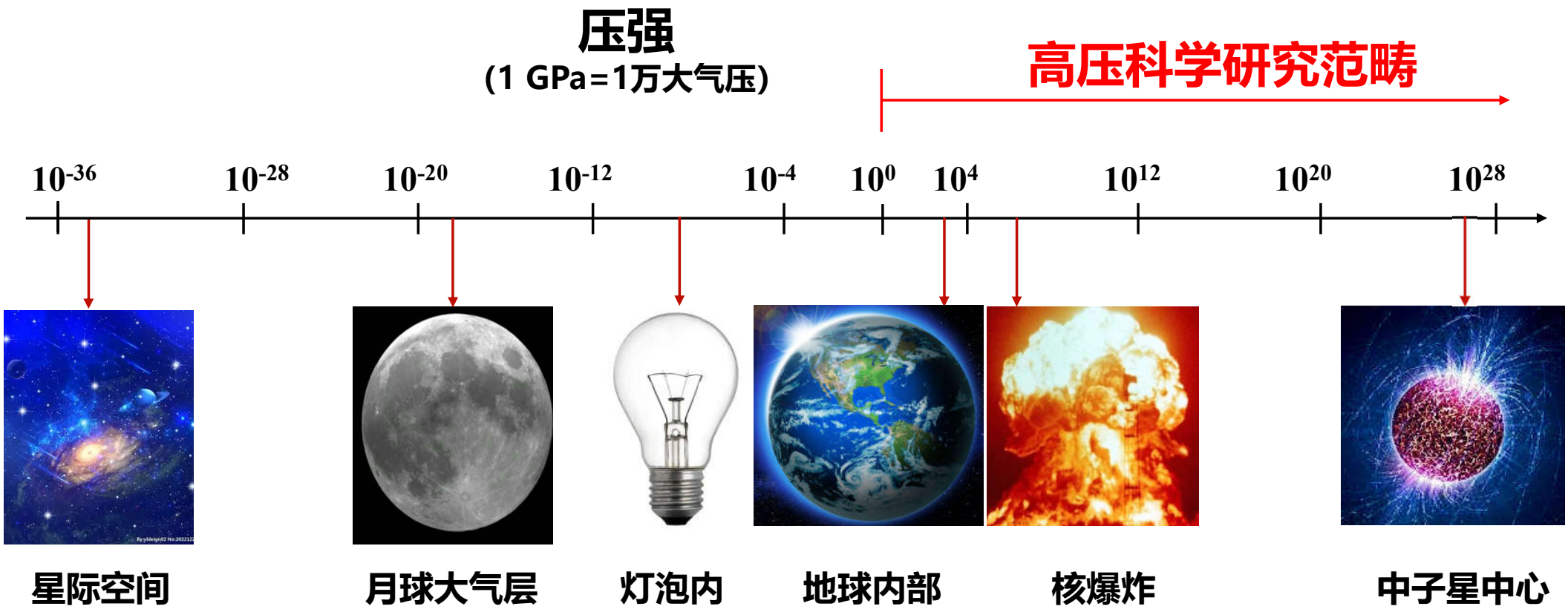


王猛

T_c时间轴


Room temperature（298K）
Conventional superconductors
Cuprate superconductors
Iron-based superconductors
Nickel-based superconductors
hydrogen-rich superconductors
Liquid Nitrogen（77K）
LaSc2H24@260GPa
LaH10@170GPa
YH9@201GPa
YH6@166GPa
CaH6@172GPa
H3S@150GPa
(La, Ca)H10@167GPa
(La, Al)H10@164GPa
(La, Y, Ce)H10@112GPa
(La,Ce)H9@172GPa
ThH10@175GPa
ThH9@170GPa
CeH10@95GPa
LaBeH8@80GPa
LaB2H8@90GPa
CeH9@130GPa
YH4@155GPa
HfH14@243 GPa
SnHx@200GPa
HgBa2Ca2Cu3Ox@30GPa
HgBa2Ca2Cu3Ox
Tl2Ba2Ca2Cu3O10
Bi2Sr2Ca2Cu3O10
YBa2Cu3O7
La3Ni2O7@14GPa
FeSe
SmFeAs(O0.9F0.1)@6GPa
Pr0.28Sr0.18NiO2 film @12GPa
TaH3@197GPa
ScH3@156GPa
LuH3@128GPa
La4Ni3O10@70GPa
LaBaCuO4
LaFeAs(O1-xFx)
LaFePO
MgB2
Nb3Sn
Nb3Ge
Hg
Pb
Nb
NbN
Tc/K
Year
300
250
200
150
100
50
0
1900
1920
1940
1960
1980
2000
2020
2040
2060

高压下的物质世界



压强可调范围超过60个数量级，是具有最大可变范围的物理量之一，是探索地球等行星内部奥秘的利器

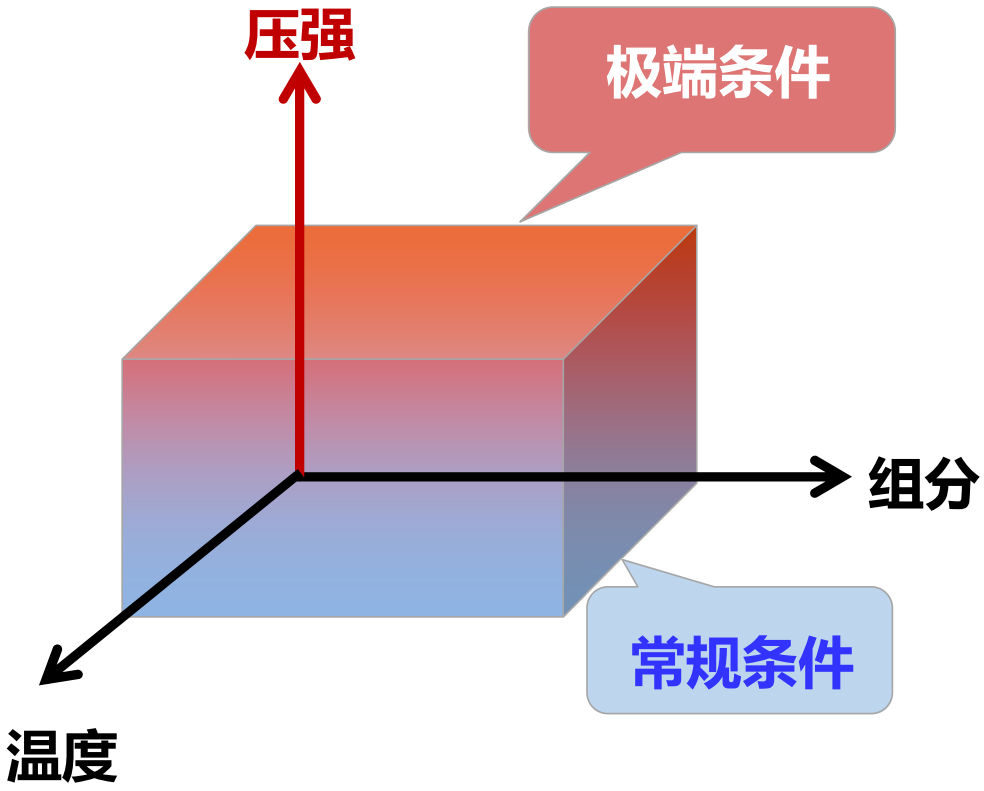
决定物质结构和物性的基本物理学参量

吉布斯自由能　　温度　　压强　　组分i的粒子数

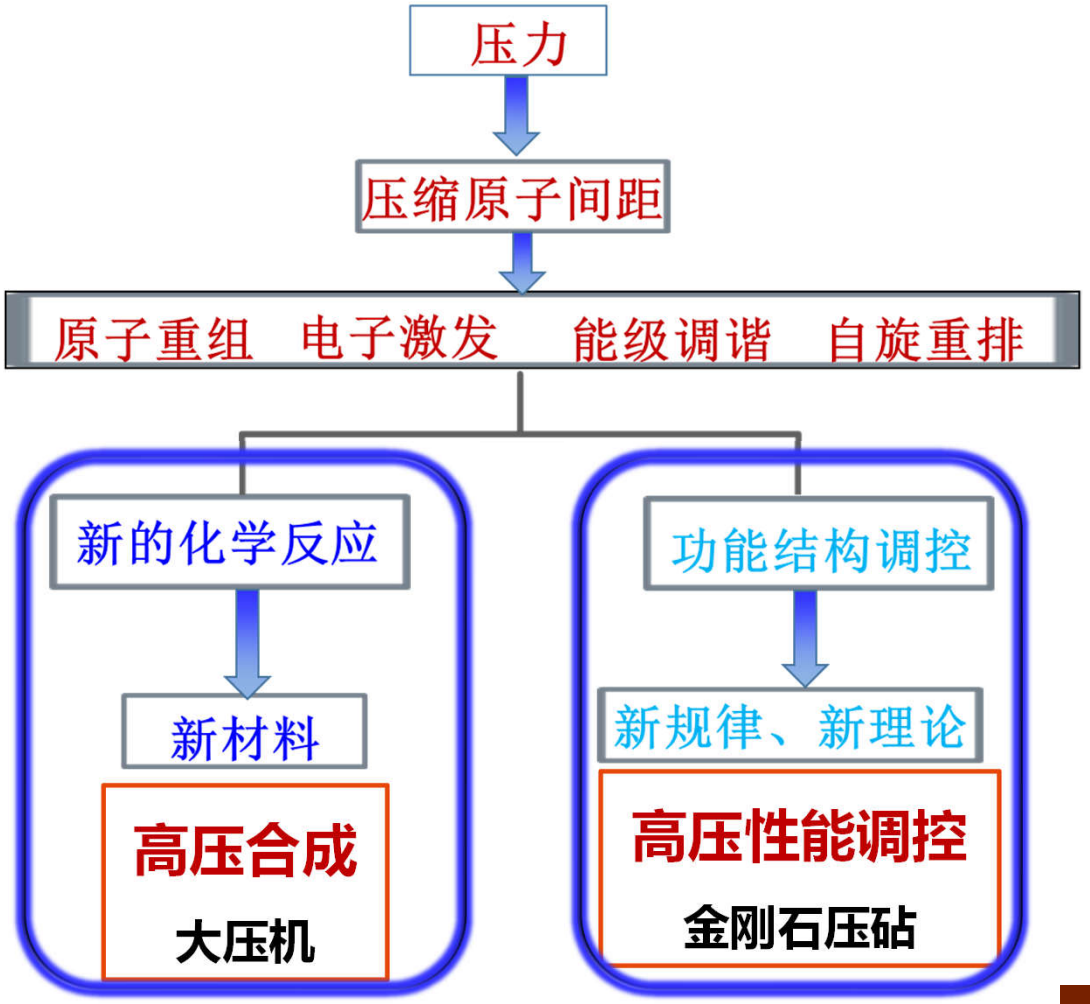
$$dG = -SdT + VdP + \sum_i \mu_i dN_i$$

熵　　体积　　组分i的化学势

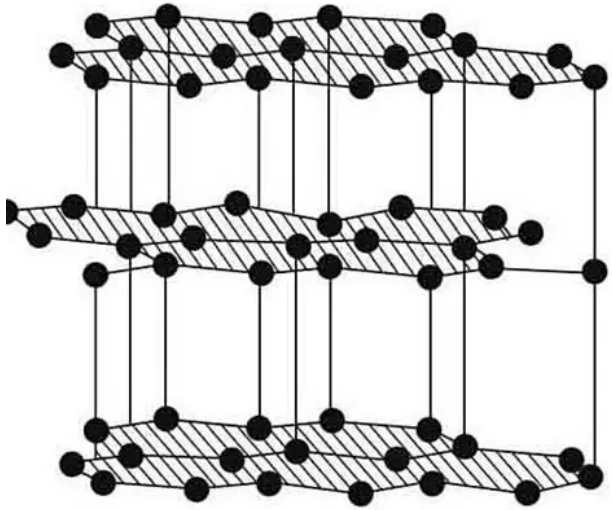
高压作用



压力（压强）：$P = \frac{F}{S}$



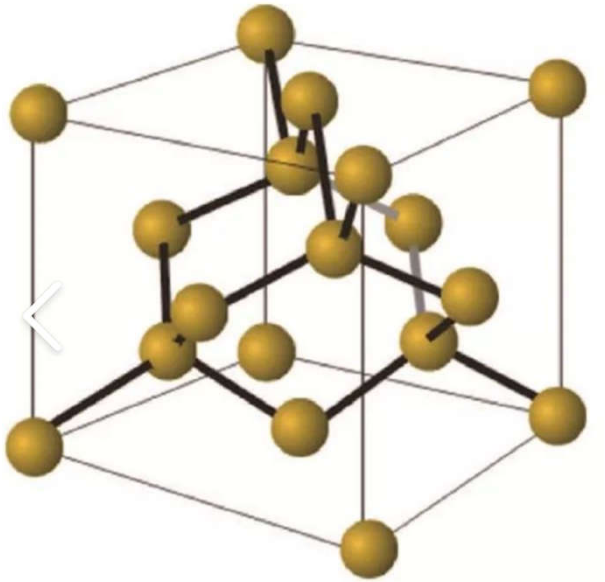
高压作用：研制新材料



石墨，六方结构

高压

高温

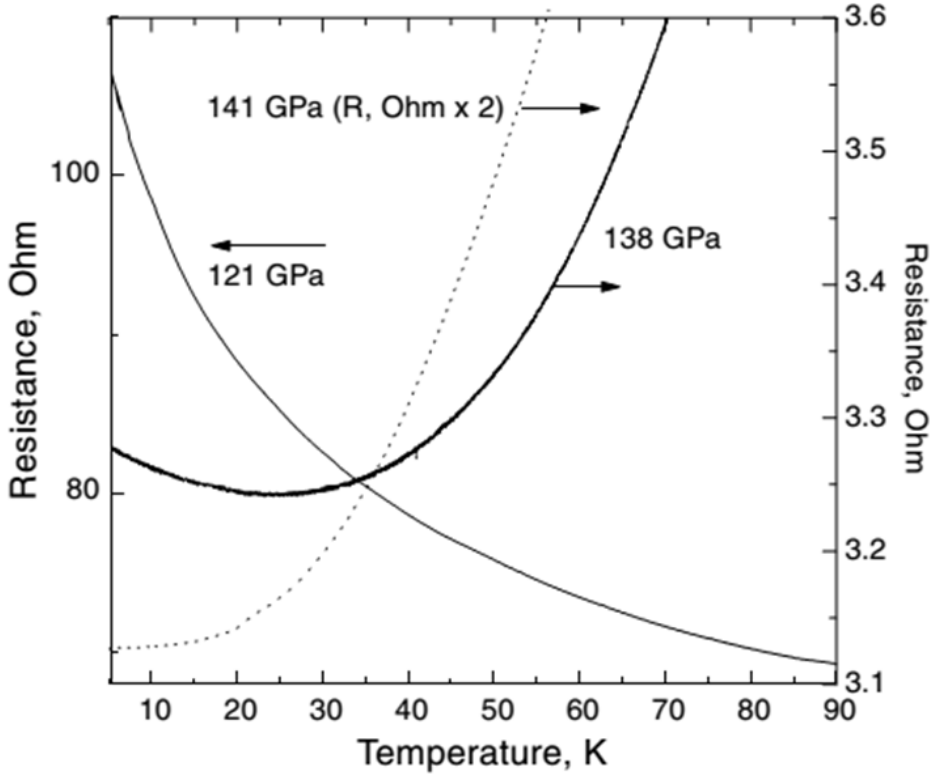


金刚石，立方结构

常压：$G_{石墨} < G_{金刚石}$

高压：$G_{石墨} > G_{金刚石}$

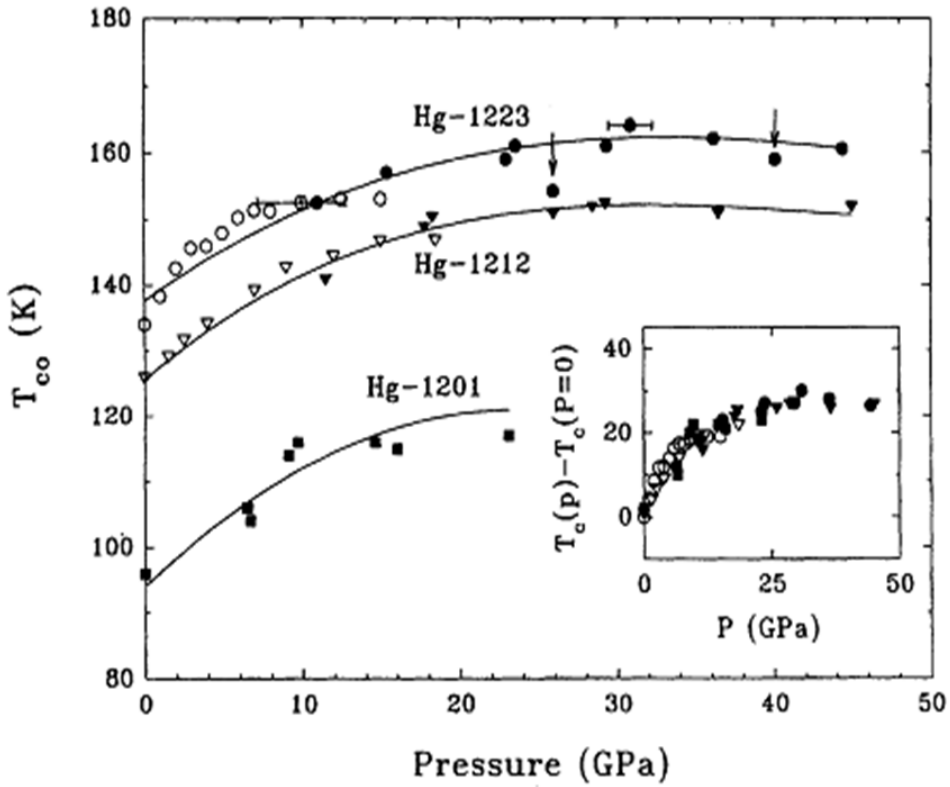
高压作用：调控新性质



高压下惰性气体氙

绝缘-金属转变

Physical Review Letters 85, 2797 (2000)



Hg-1223 (30 GPa)

提高超导转变温度

Physical Review B 50, 4260 (1994)

高压作用：调控新性质

元素超导体

Tc_{max}(K)
P(GPa)
Tc (K)
常压超导元素

Tc_{max}(K)
P(GPa)
高压超导元素

H																	He
Li 20K 48GPa 0.4mK	Be 26mK											B 11.5K 250GPa	C	N	O 0.6K 100GPa	F	Ne
Na	Mg											Al 1.14K	Si 8.2K 15GPa	P 13K 30GPa	S 17K 190GPa	Cl	Ar
K	Ca 29K 216GPa	Sc 32K 283GPa	Ti 26.2K 248GPa 0.39K	V 16.5K 120GPa 5.38K	Cr	Mn	Fe 2.1K 21GPa	Co	Ni	Cu	Zn 0.875K	Ga 7K 1.4GPa 1.091K	Ge 5.35K 11.5GPa	As 2.4K 32.4GPa	Se 8K 150GPa	Br 1.4K 100GPa	Kr
Rb	Sr 7K 150GPa	Y 19.5K 115GPa	Zr 11K 30GPa 0.546K	Nb 9.9K 10GPa 9.2K	Mo 0.92K	Tc 7.77K	Ru 0.51K	Rh 0.33mK	Pd	Ag	Cd 0.52K	In 3.4K	Sn 5.3K 11.3GPa 3.722K	Sb 3.9K 25GPa	Te 7.5K 35GPa	I 1.2K 25GPa	Xe
Cs 1.3K 12GPa	Ba 5K 18GPa	La 13K 15GPa 6K	Hf 8.6K 67.8GPa 1.2K	Ta 4.5K 43GPa 4.483K	W 12mK	Re 1.4K	Os 0.66K	Ir 0.14K	Pt	Au	Hg 4.15K	Tl 2.39K	Pb 7.19K	Bi 8.5K 9.1GPa 0.53mK	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac															

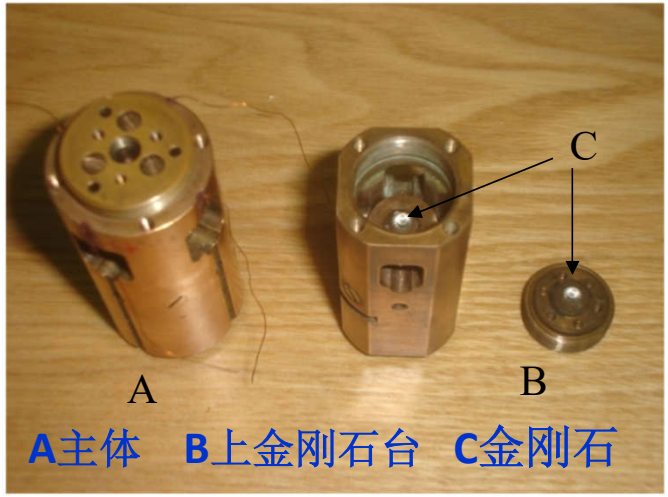
Ce 1.7K 5GPa	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu 2.75K 142GPa	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb 4.8K 180GPa	Lu 12.4K 174GPa
Th 1.37K	Pa 1.4K	U 2.4K 1.2GPa 0.8K	Np	Pu	Am 2.2K 6GPa 0.79K	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

31种常压超导元素

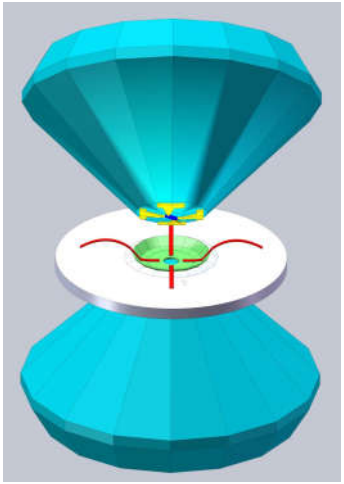
23种高压超导元素

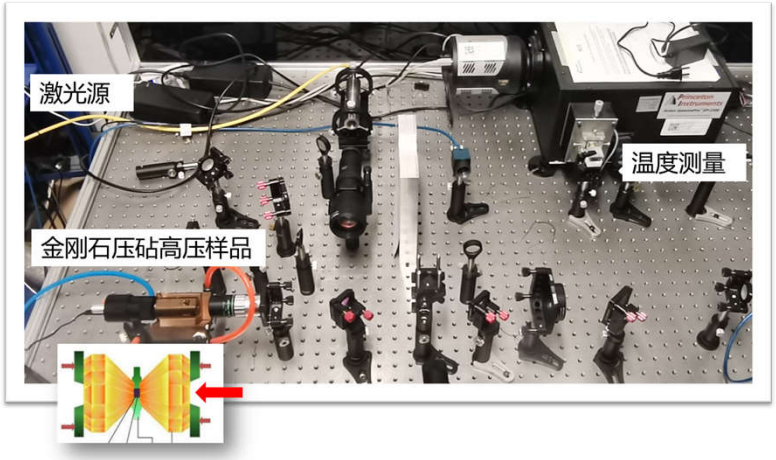
高压合成和性能调控装置

高压、低温、强磁场等综合极端实验条件下电磁物性表征



A主体　B上金刚石台　C金刚石

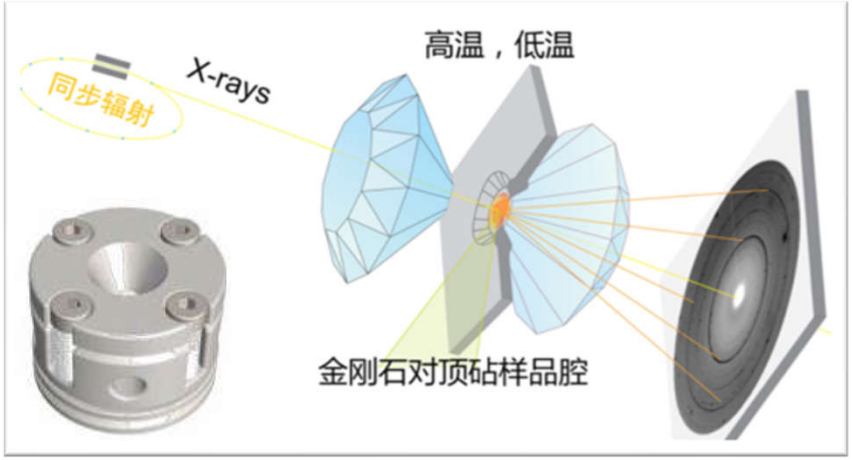


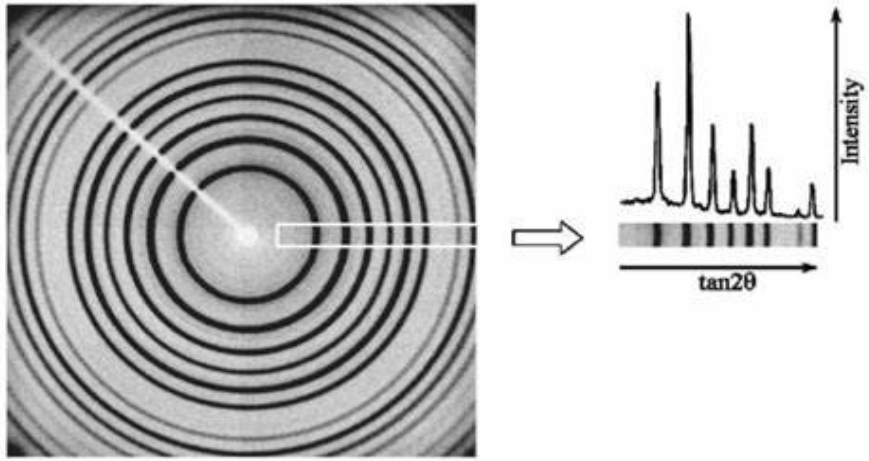


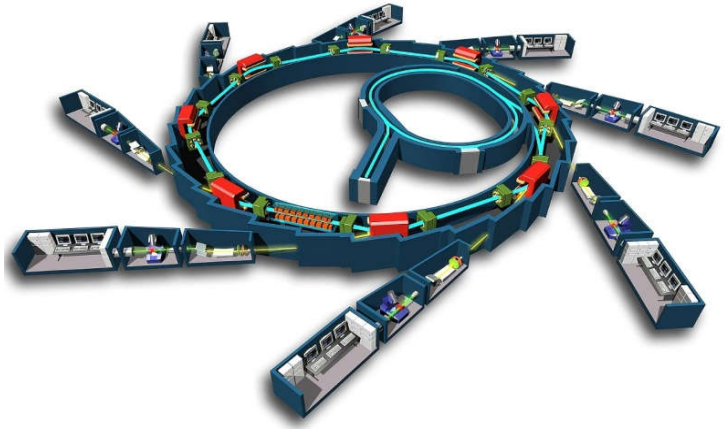
金刚石压砧高压原位激光加热系统

300 GPa　2000℃

结构表征：同步辐射X射线衍射（XRD）





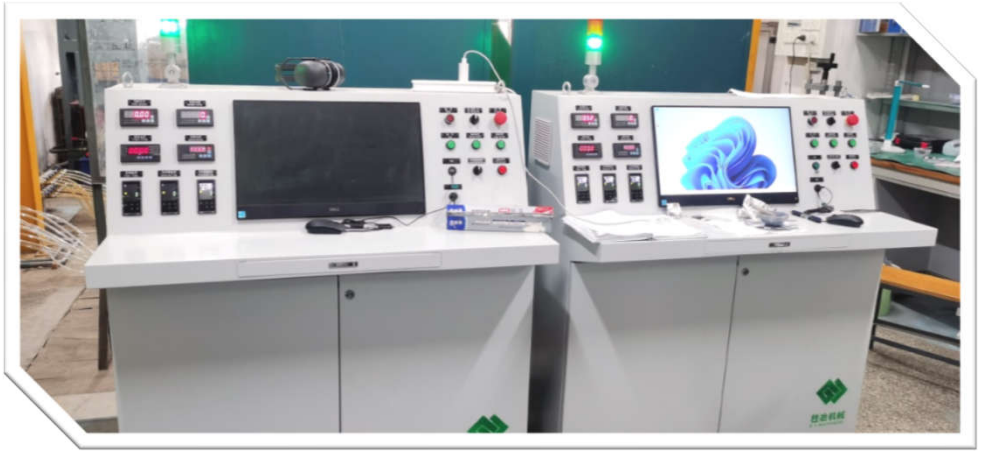


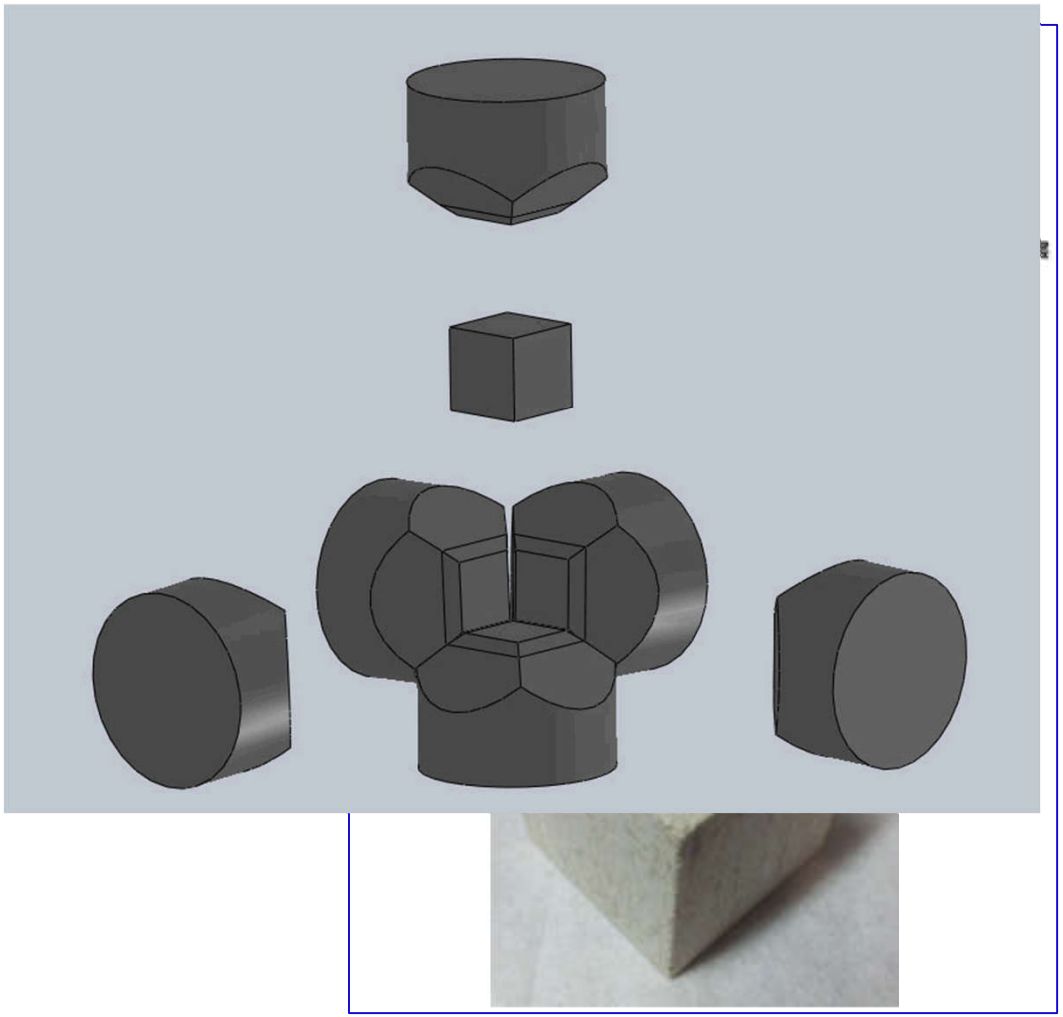
同步辐射光源

- 高强度
- 高准直
- 光斑小

同步辐射光源：中国、美国、法国、德国、日本和巴西等

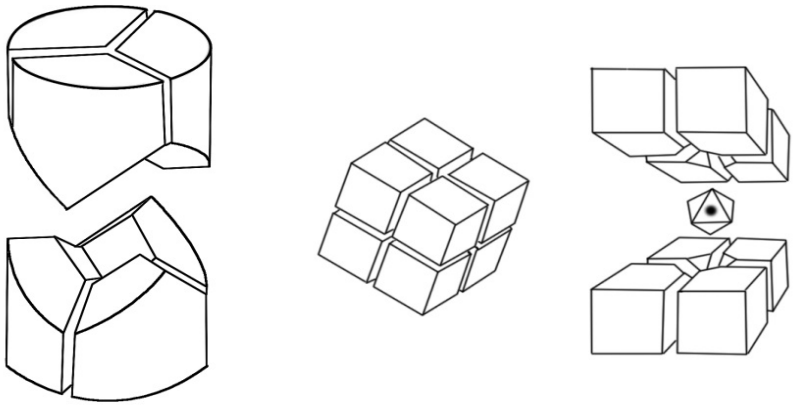
高压合成装置：大压机





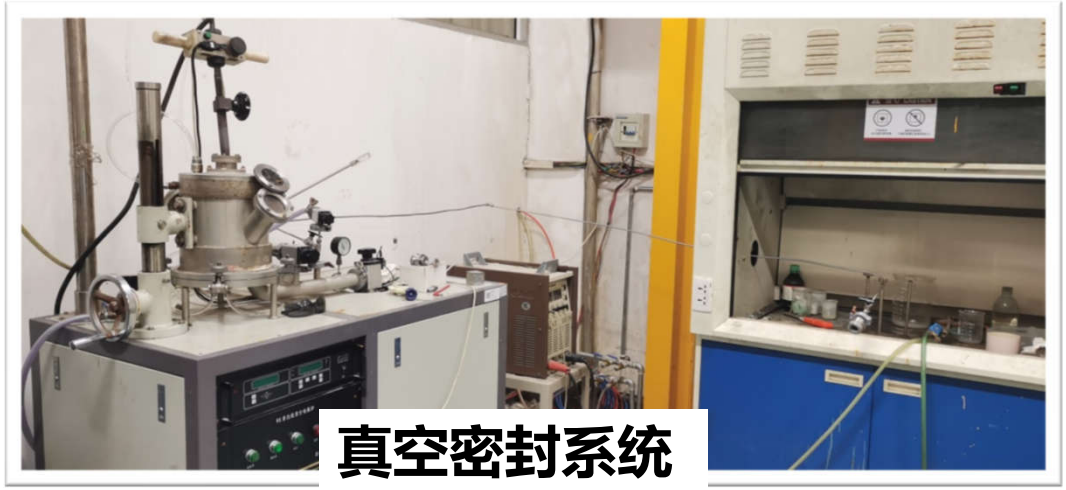
铰链式六面顶压机（ 6 GPa、1500℃ ）

高压合成装置：大压机



两台6-8二级推进压机（20 GPa、1500℃）

常压单晶生长



真空密封系统

石英管、陶瓷管、金属钽管

高温烧结炉

生长单晶样品

金属氢:”圣杯“和挑战

金属氢 **1935 E. Wigner等**

DECEMBER, 1935 JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS VOLUME 3

On the Possibility of a Metallic Modification of Hydrogen

E. WIGNER AND H. B. HUNTINGTON, *Princeton University*

(Received October 14, 1935)

金属氢超导和超流 **1968 和2004 N. W. Ashcroft**

VOLUME 21, NUMBER 26 PHYSICAL REVIEW LETTERS 23 DECEMBER 1968

METALLIC HYDROGEN: A HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR?

N. W. Ashcroft
Laboratory of Atomic and Solid State Physics, Cornell University, Ithaca, New York 14850

(Received 3 May 1968)

$$T_c = 0.85\Theta_D \exp[-1/(N_0 V)]$$

$$\Theta_D \propto \frac{1}{\sqrt{M}}$$

A superconductor to superfluid phase transition in liquid metallic hydrogen

Egor Babaev, Asle Sudbø & N. W. Ashcroft

Nature **431**, 666–668 (2004) | Cite this article

金属氢：“圣杯”和挑战

分子金属氢
T_c = 242 K
450 GPa

PRL **100,** 257001 (2008) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 27 JUNE 2008

***Ab Initio* Description of High-Temperature Superconductivity in Dense Molecular Hydrogen**

P. Cudazzo,[1] G. Profeta,[1] A. Sanna,[2,3] A. Floris,[3] A. Continenza,[1] S. Massidda,[2] and E. K. U. Gross[3]

原子金属氢
T_c = 370-760 K
>500 GPa

PHYSICAL REVIEW B **84**, 144515 (2011)

High-temperature superconductivity in atomic metallic hydrogen

Jeffrey M. McMahon[1,*] and David M. Ceperley[1,2,†]

毛和光院士和吉诚

纳米探针
同步辐射
单晶XRD

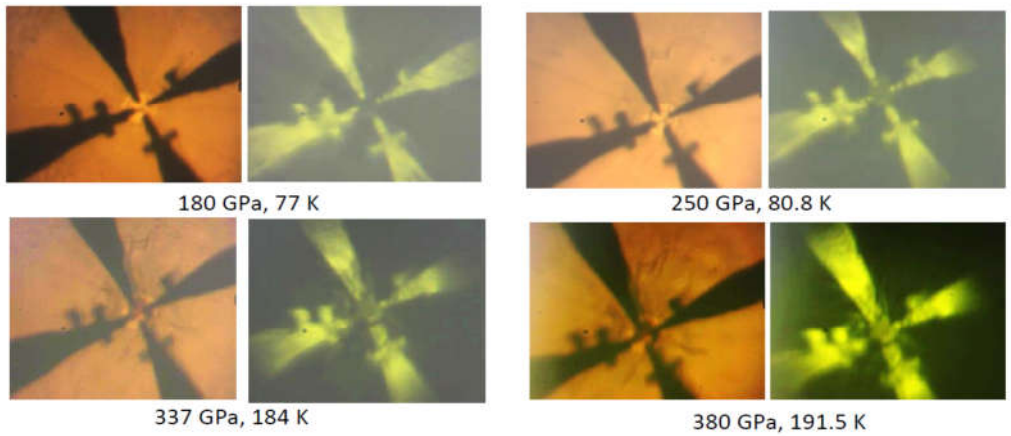
分子缔合
发生聚合

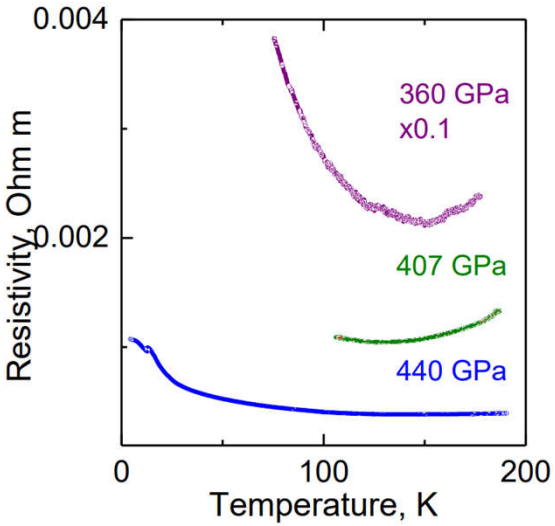
Ultrahigh-pressure crystallographic passage towards metallic hydrogen

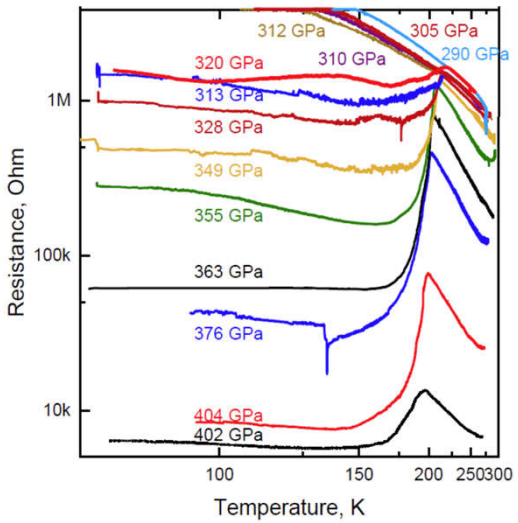
Cheng Ji, Bing Li, Jie Luo, Yongsheng Zhao, Yuan Liu, Konstantin Glazyrin, Alexander Björling, Lucas A. B. Marçal, Maik Kahnt, Sebastian Kalbfleisch, Wenjun Liu, Yang Gao, Junyue Wang, Wendy L. Mao, Hanyu Liu, Yanming Ma, Yang Ding, Wenge Yang & Ho-Kwang Mao

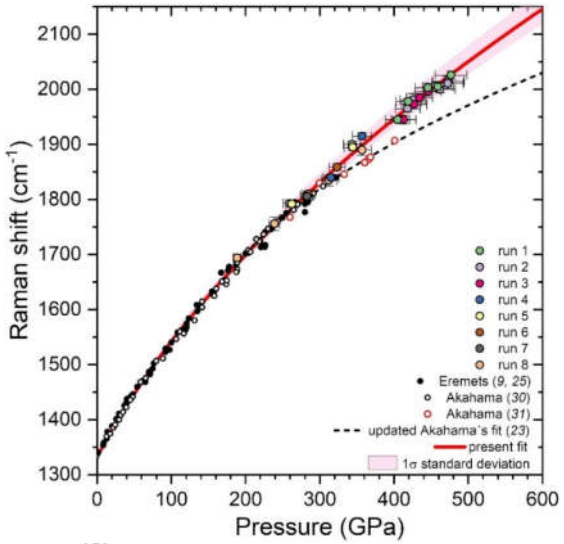
Nature **641**, 904–909 (2025) | Cite this article

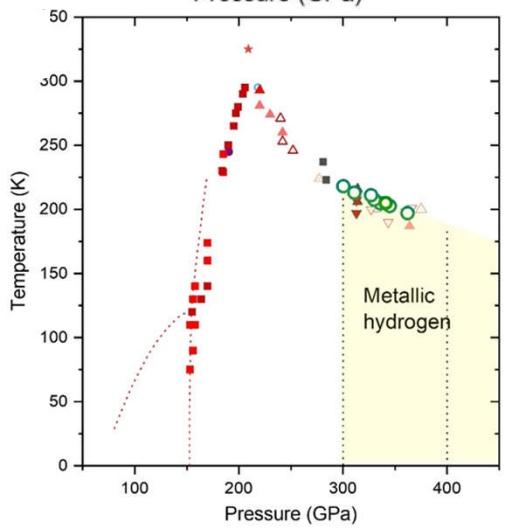
金属氢研究











Nat. Phys. 15, 1246-1249 (2019)

https://arxiv.org/abs/2109.11104

Nat. Commun. 14, 907 (2023)

富氢高温超导材料

提出“化学预压”观点

金　属　氢

物理 6, 296(1977)

徐济安　朱宰万
（中国科学院物理研究所）

从而大大降低转变压强的情况，我们曾经设想，通过一些氢的化合物来制备金属氢有可能不需要那么高的压强，同时，也可能在常压下把金属氢稳定下来。虽然，初步的估计表明，金属氢不可能从钯-氢系中在压力作用下分解出来。

VOLUME 92, NUMBER 18　PHYSICAL REVIEW LETTERS　week ending 7 MAY 2004

Hydrogen Dominant Metallic Alloys: High Temperature Superconductors?

N.W. Ashcroft
Laboratory of Atomic and Solid State Physics, Cornell University, Ithaca, New York 14853-2501, USA
Donostia International Physics Center, San Sebastian, Spain
(Received 29 December 2003; published 6 May 2004)

IVA族富氢材料：潜在的高温超导体

共价型富氢高温超导材料

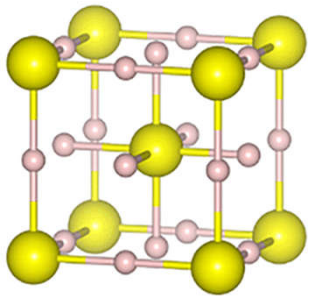
理论计算

H_2S: T_c=80 K, 160 GPa

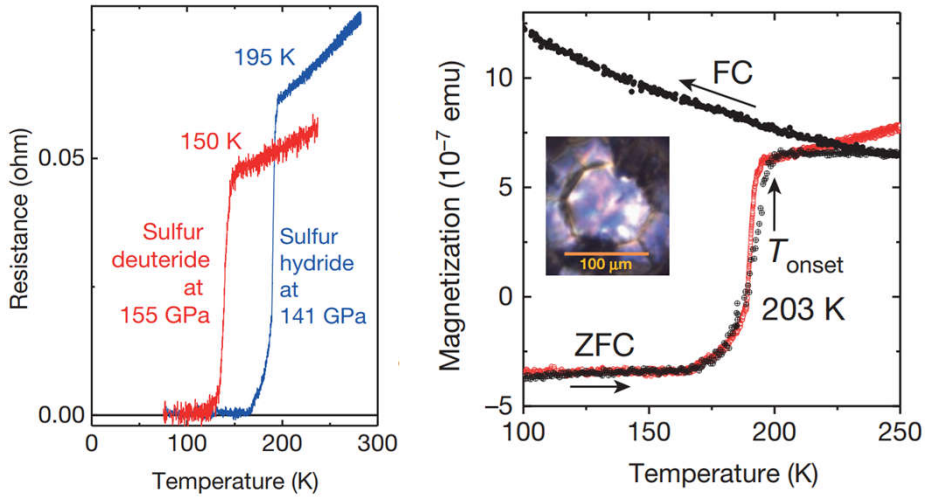
J. Chem. Phys. 140, 174712 (2014)

H_3S: T_c=191-200 K, 200 GPa

Sci. Rep. 4, 6968 (2014)



实验观测



H_3S: T_c=203 K, 150 GPa

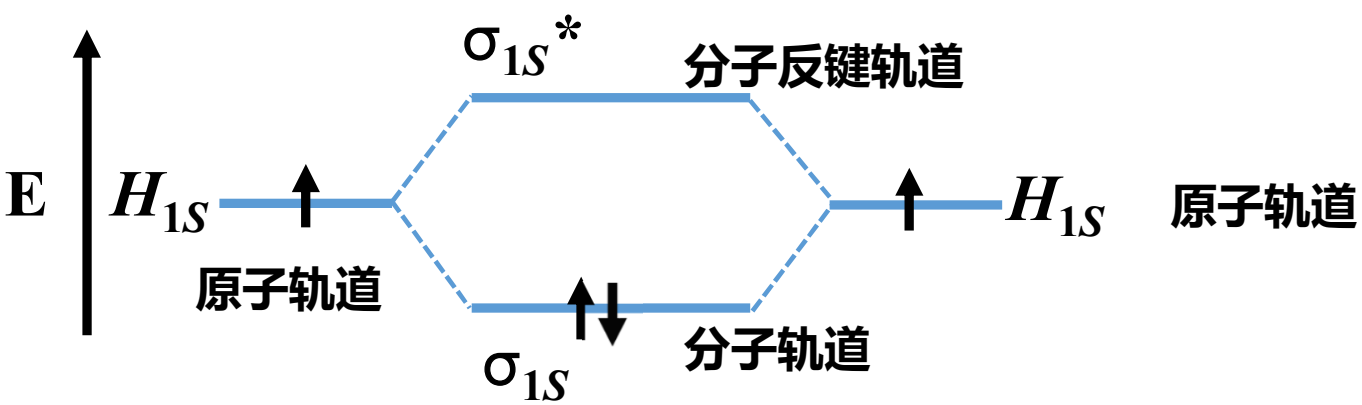
Nature 525, 73 (2015)

离子型富氢高温超导材料

稀土元素

电负性小、氧化态高

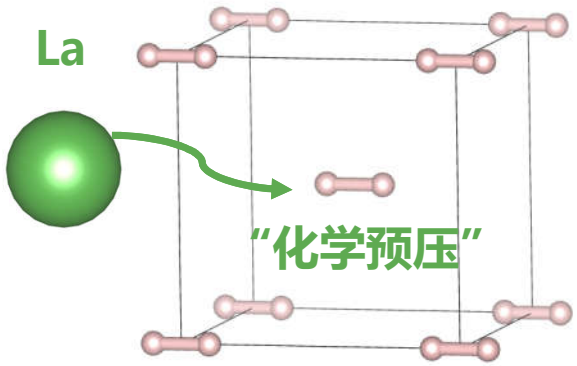
提供更多电子



PNAS 109, 6463 (2012)

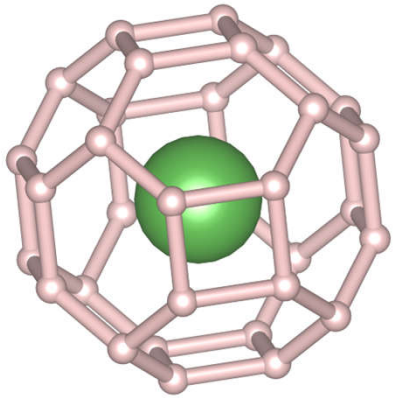
实验发现最高 T_c近室温超导体LaH_{10}

引入La元素，使其电子占据氢分子反键轨道，提高费米面附近电子态密度

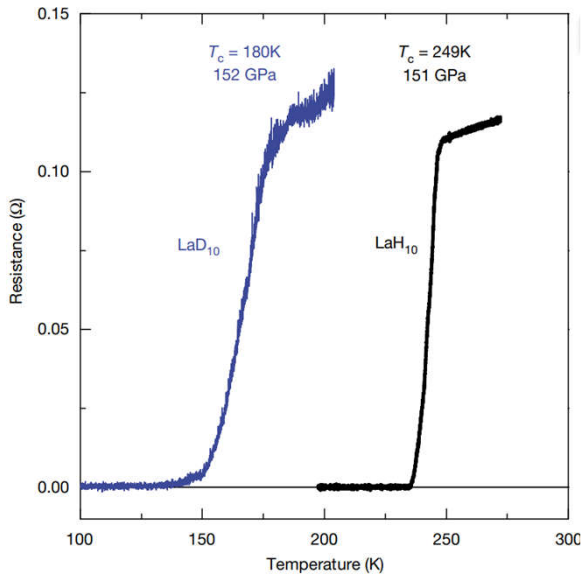


氢分子

高压



LaH_{10} 全氢原子

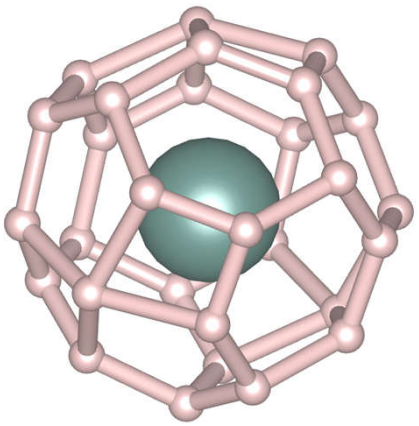


Nature 569, 528 (2019)，ESI高被引，入选2019年Nature十大科学进展

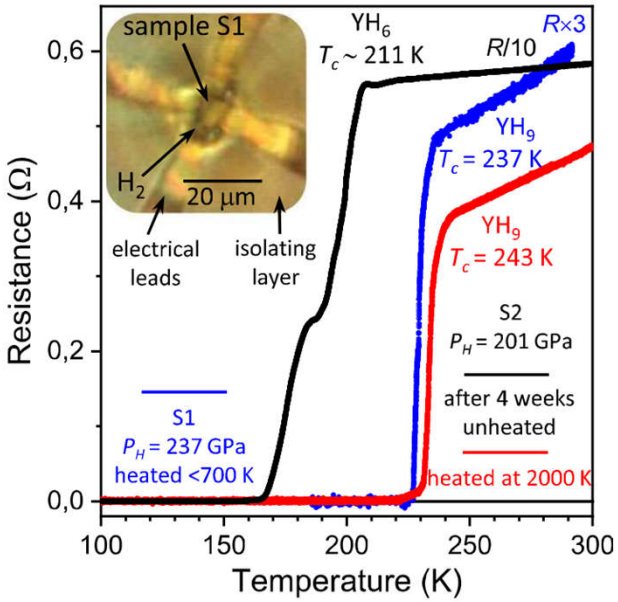
首次在高压下发现 T_c为250 K的近室温超导体LaH_{10}，刷新了世界最高 T_c记录

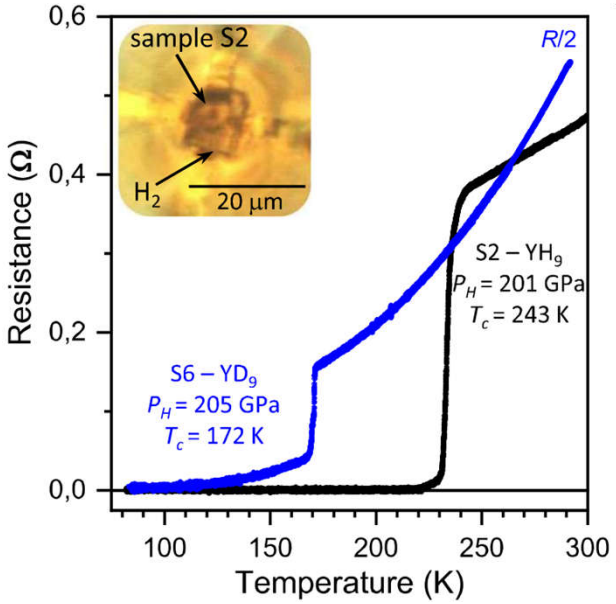
实验发现最高 T_c近室温超导体YH_9

在高压下设计引入德拜温度高的Y元素，增强电声耦合，研制新超导体



YH_9

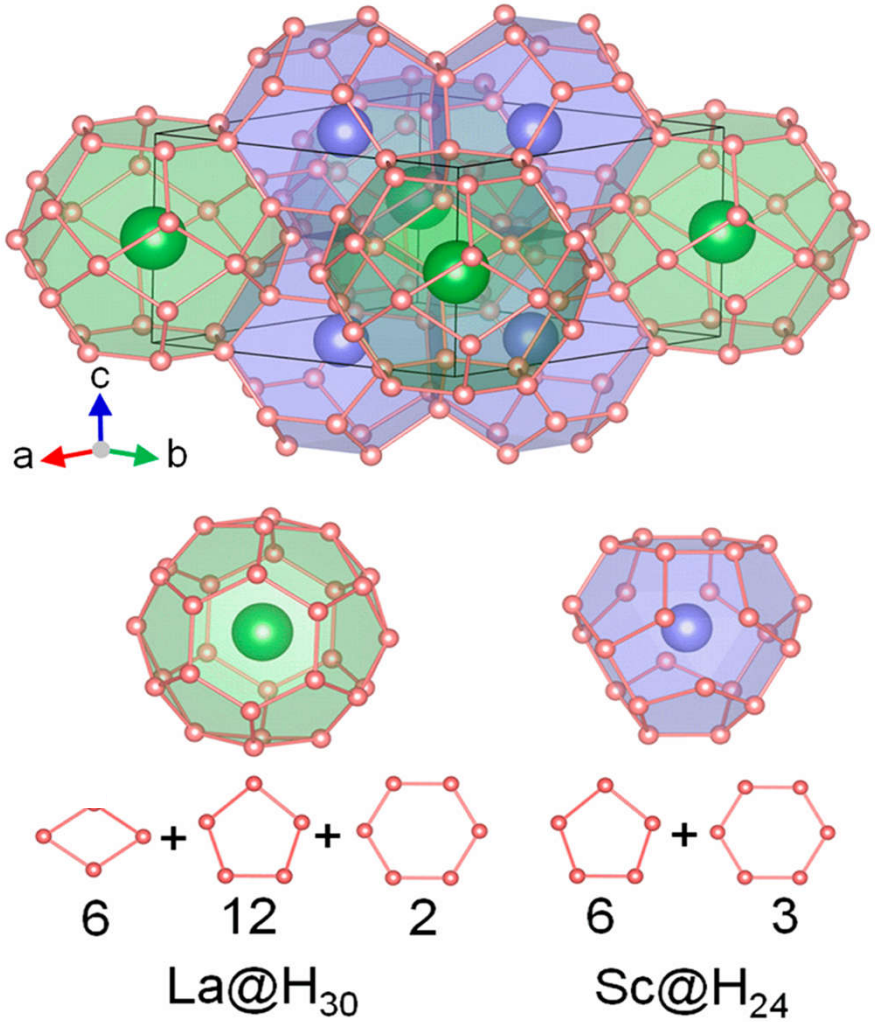




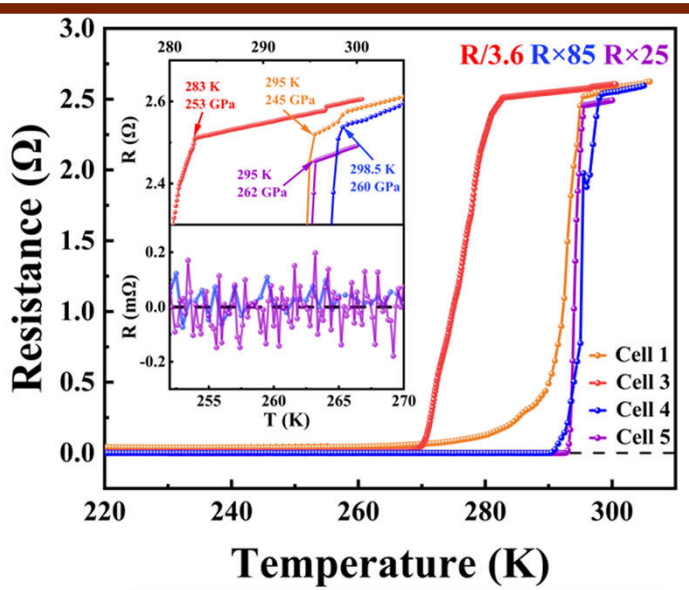
Nat. Commun. 12, 5075 (2021)，ESI高被引

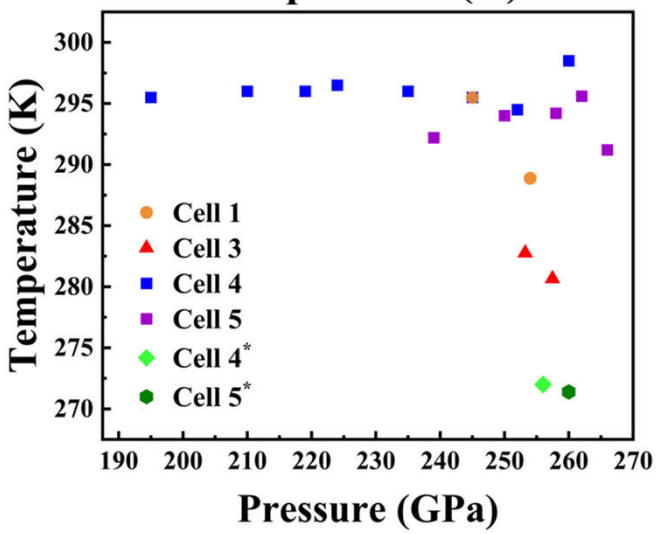
首次发现 T_c为243 K的富氢化物YH_9，是迄今被证实的第二高 T_c近室温超导体

室温超导$LaSc_2H_{24}$理论和实验发现



PNAS 121, e2401840121 (2024)





https://arxiv.org/abs/2510.01273

主要研究方向

研究方向

- 500 GPa超高压集成表征技术
  - 超高压电磁表征技术
  - 超高压能隙探测技术
- 超高压极端条件室温超导体
  - 超高压下金属氢的实验攻关
  - 超高压下富氢室温超导研究
- 高压新物态和量子演生现象
  - 低压或常压富氢超导体探索
  - 关联电子材料压力效应研究

靳常青研究员 博士生导师、团队负责人

国家杰出青年科学基金获得者
欧洲科学院外籍院士、欧洲科学和艺术学院院士
国家基金委创新群体负责人
美国物理学会会士、英国物理学会会士
国际晶体学联合会(IUCr)材料晶体学委员会主席
第26届国际高压科学技术大会主席
中国晶体学会副理事长兼极端条件晶态委员会创会主任

“超导材料界最高荣誉”的国际奖项马蒂亚斯奖
国家自然科学2等奖(排名1)
中国材料研究学会科技1等奖(排名1)
中国物理学会叶企孙物理奖（个人）
中科院杰出科研成就集体奖（主要贡献者）

Tel:82649163
Email: Jin@iphy.ac.cn

合作发现了近百个高压新相和新体系
授权发明38项（含3项国际专利）
发表学术文章300余篇 （含*Nature* 1 篇、*Nat. Phys.* 1篇、PNAS 8 篇 、 *Nat. Commun.* 15 篇、*JACS* 6篇、 *PRL（X)* 16篇等）。2016年起连续入选中国高引用学者榜单

课题组主要研究领域

1、综合极端高压技术 — 高压技术

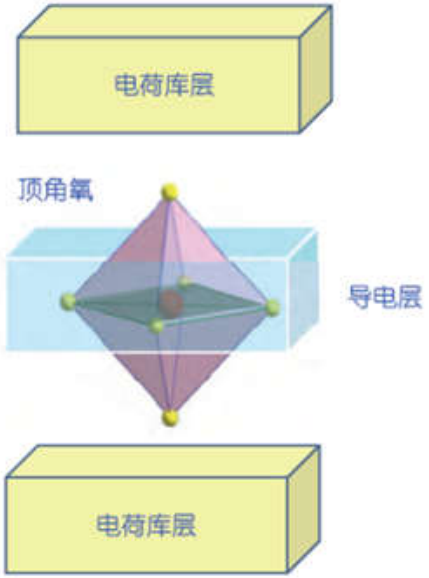
2、高压研制新材料 — 高压材料

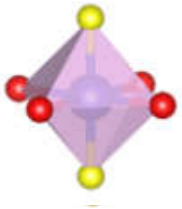
3、高压调控新性质 — 高压物理

4、设计制备面向常压应用新材料 — 常压材料

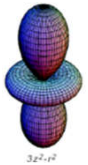
研究体系：超导材料、磁电功能材料、重费米子材料等关联量子体系

代表性成果1：发现轨道序反转的铜基超导体



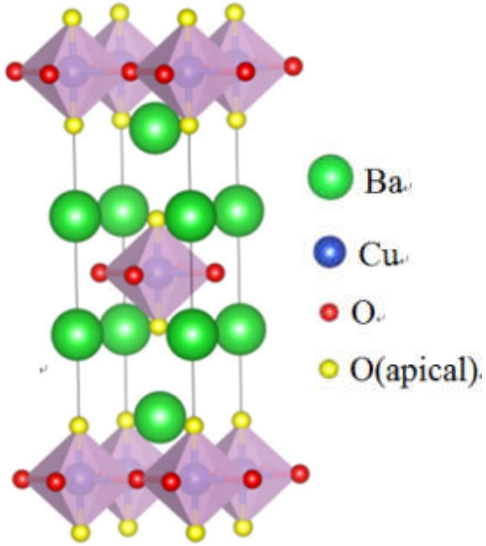


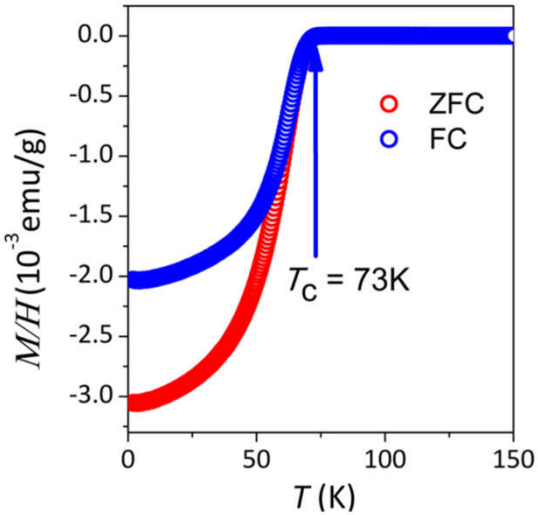
Fermi level



$3dz^2$-r^2

$3d^9(Cu^{2+})$

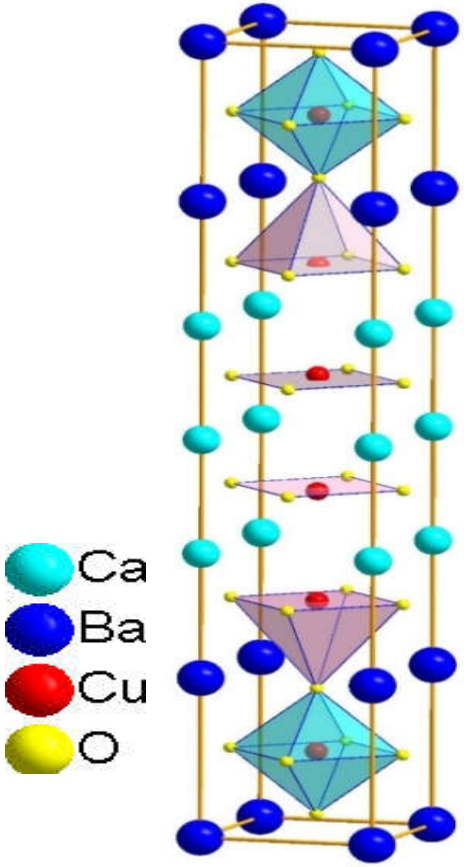


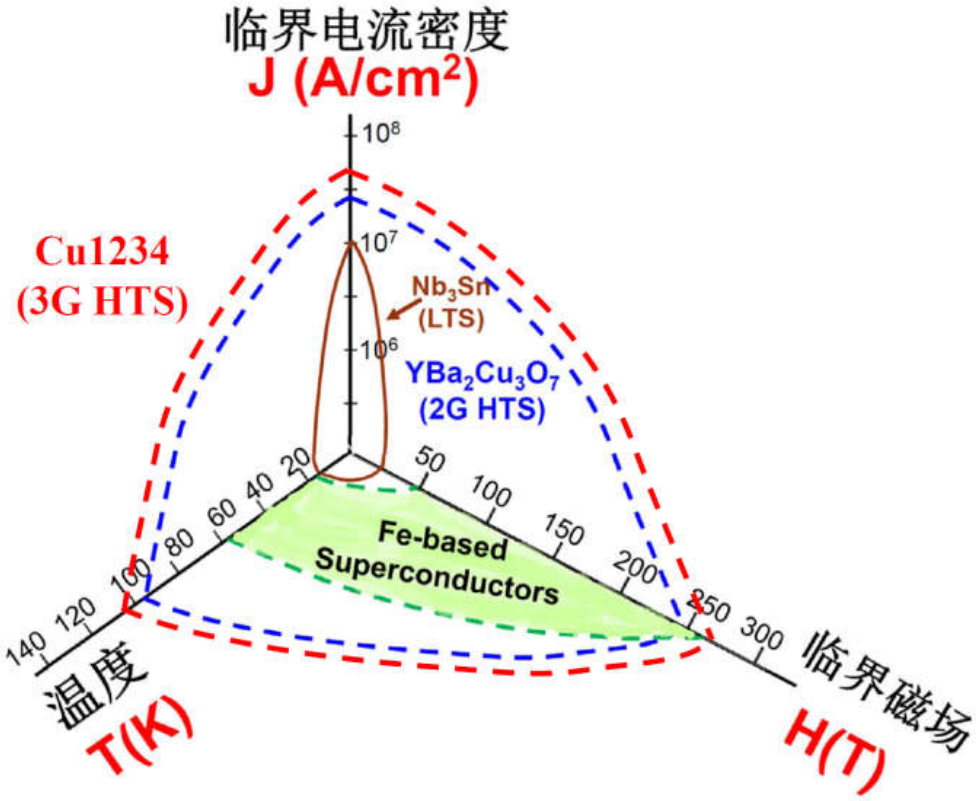


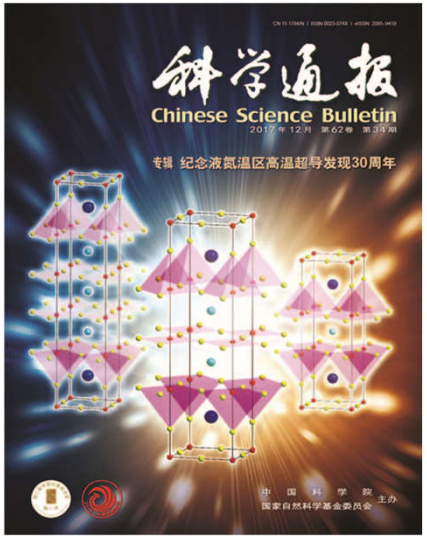
目前“唯一”轨道反转型的铜基超导体Ba_2CuO_{4-y}

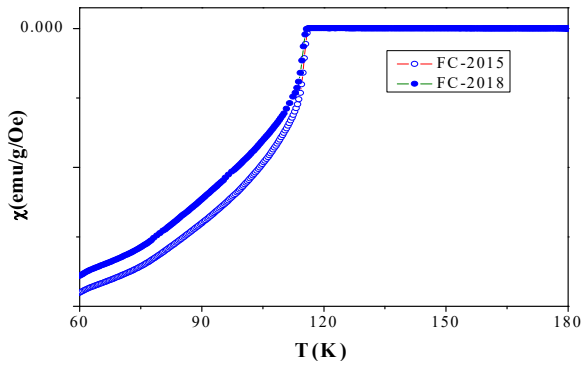
PNAS 116, 12156–12160 (2019)

代表性成果2：液氮温区三高(T_c、J_c、H_c)超导材料Cu1234





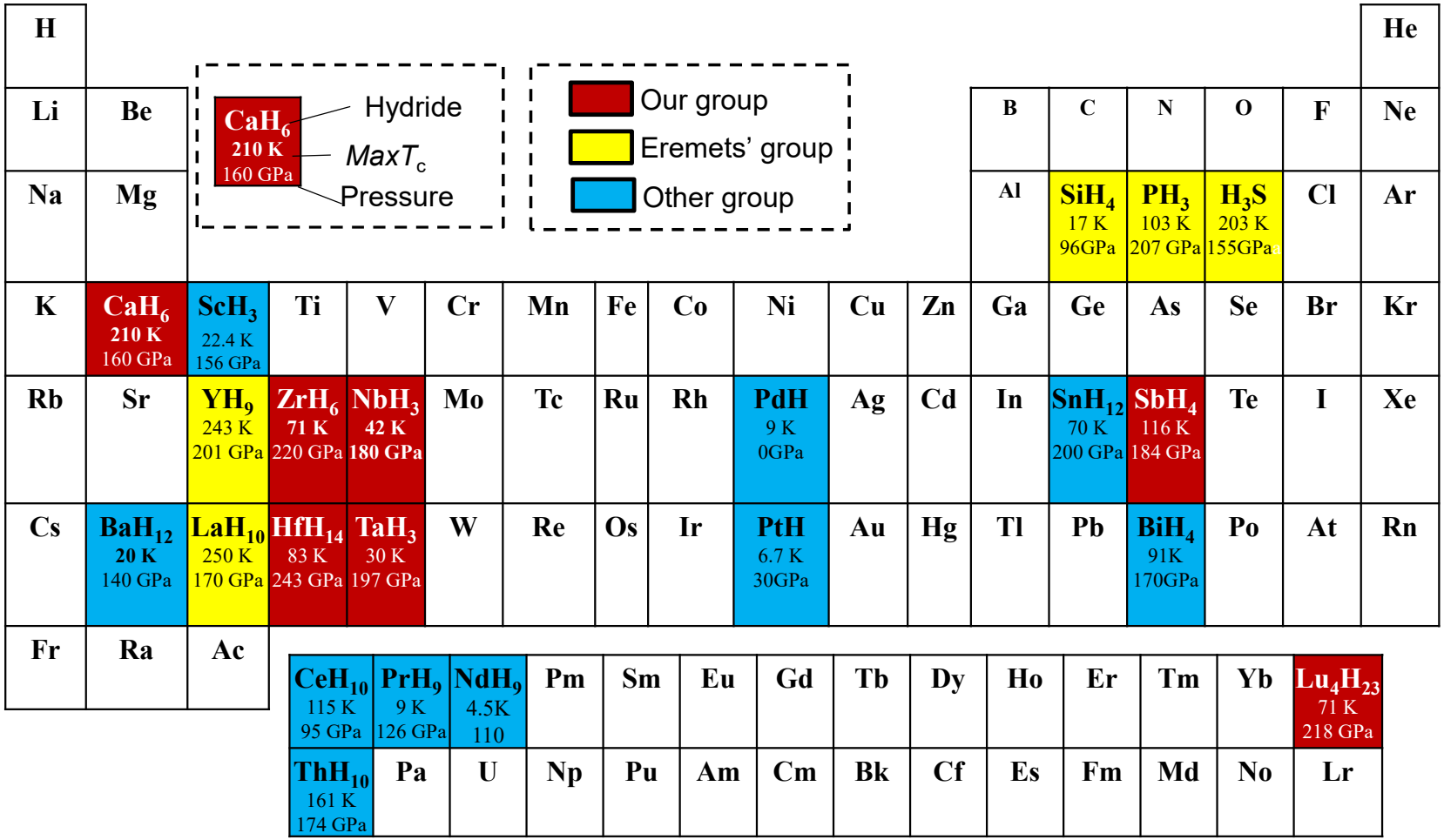




$Cu_1Ba_2Ca_3Cu_4O_{10+y}$
(简称Cu1234)

Physica C 223, 238(1994)；*Nature* 375, 301(1995)；科学通报 62, 3947(2017)

代表性成果3：高压金属氢键超导



Nat. Commun. 13, 2863(2022); *Sci. Bull.* 67, 907(2022); *Mater. Today Phys.* 27, 100826(2022); *Natl. Sci. Rev.* nwad241(2023); *Sci. China Phys. Mech.* 66, 267411(2023); *Mater. Today Phys.* 40, 101298 (2024); *Chin. Phys. Lett.* 40, 057404 (2023)

代表性成果4：设计发现新型稀磁半导体

瓶颈

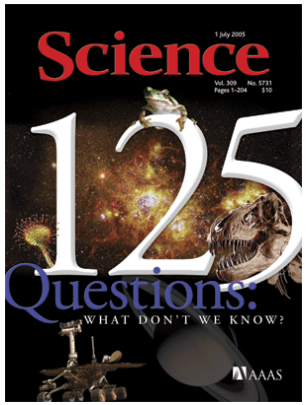
居里温度太低

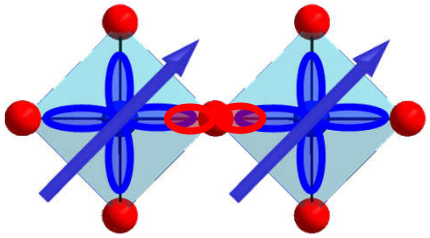
科学问题

增加磁性交换作用

解决思路

轨道基元密排

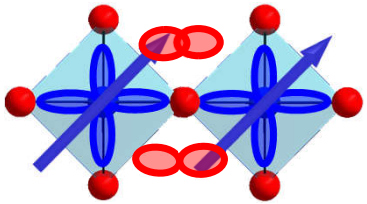




3.89 Å

标准轨道基元

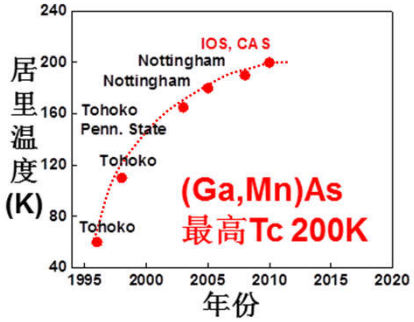
高压

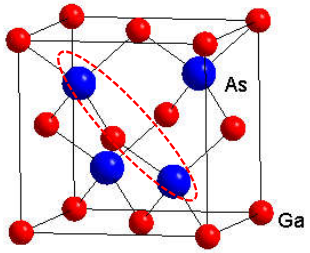


2.91Å

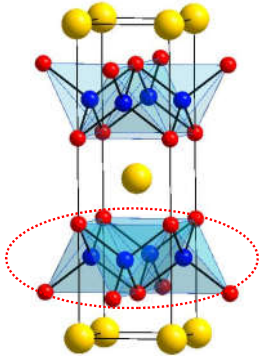
压缩密排轨道基元

拓展了面向应用的近室温稀磁半导体新材料设计和调控



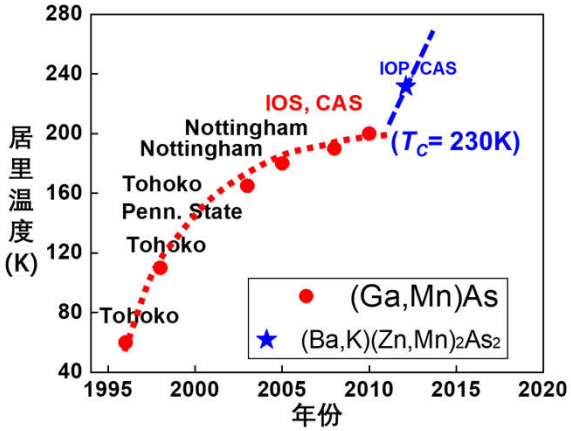


(Ga,Mn)As



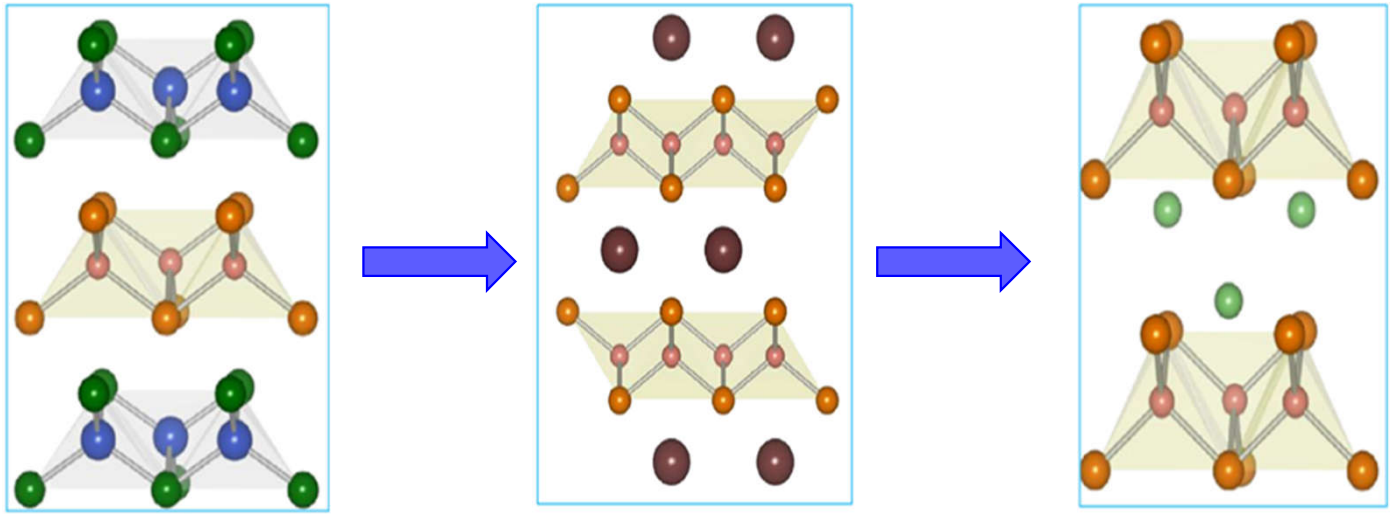
基元
层状序构

$BaZn_2As_2$(简称BZA)



Nat. Commun. 4, 1442(2013)；*Chin. Sci. Bull.*59, 2524(2014)编辑推荐文章

代表性成果5：“111”铁基超导体



“1111”
(2008,2)

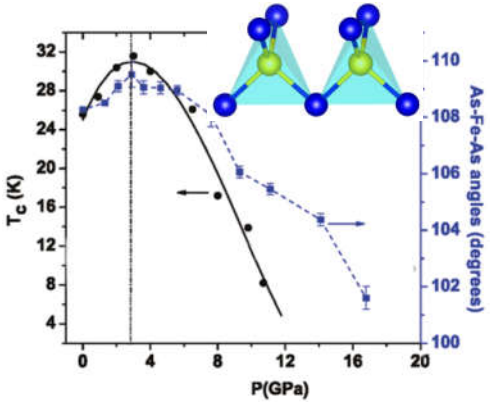
“122”
(2008,4)

“111”
(2008,6 本课题组）

开辟了铁基“111”超导体系研究领域，国内外已有250多个研究机构开展了对“111”体系的跟踪拓展研究，“111”体系业已成为铁基超导家族主要体系之一

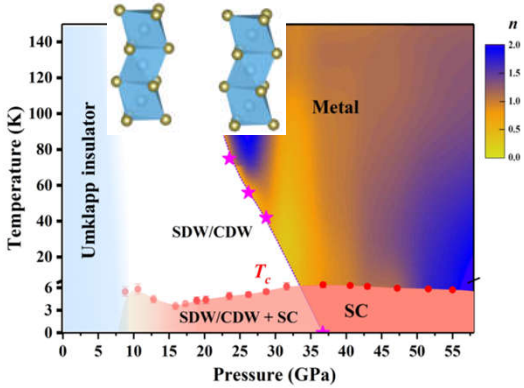
代表性成果6：新奇量子物性及高压调控

➢ 高压调控铁基超导性质及结构起源



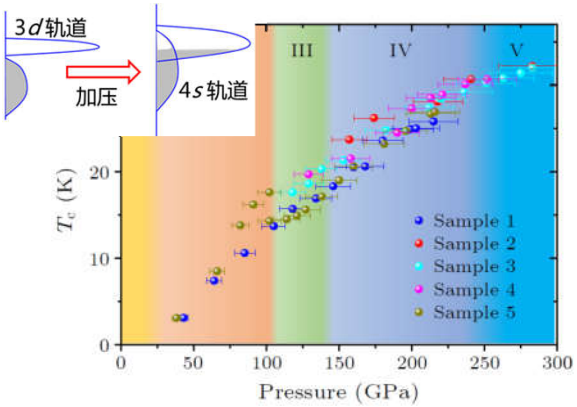
JACS 133, 7892 (2011)

➢ 高压调控一维导电链向三维金属渡越



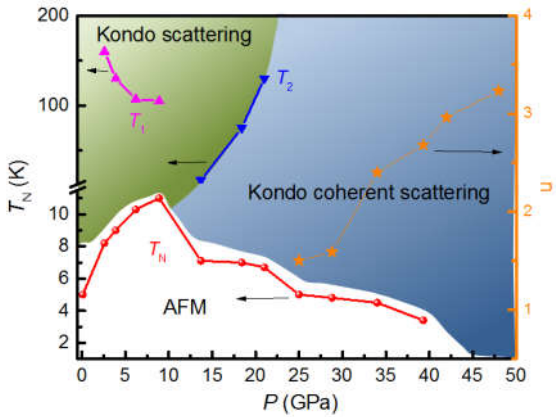
NPG Asia Materials 11, 60 (2019)

➢ 高压调控轨道电子跃迁诱导高 T_c 超导



Nat. Commun. 13, 5411 (2022)
CPL 40, 107403 (2023)

➢ 高压调控重费米子体系电子强关联



CPL 43,010705(2026)

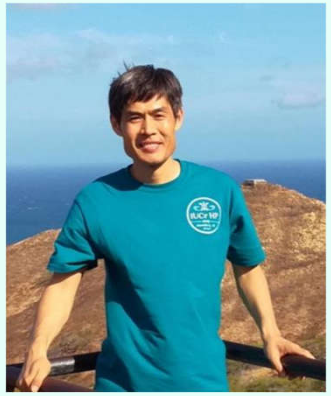
望贤成研究员 博士生导师

国家自然科学2等奖 (排名2)

北京市科学技术2等奖(排名2)

中国材料研究学会科技一等奖(排名2)

- 发现首个“111” 型 LiFeAs铁基高温超导体；(SCI 引用>900)
- 发现CaH_6具有T_c=210 K的高温超导性质；(*Nature Communications*)
- 发现元素 Ti 和 Sc 在高压下相继刷新元素超导最高 T_c 记录；(*Nat. Commun.*; *CPL* Express letters)
- 发现首个一维铁涡模型材料$Ba_6Cr_2S_{10}$（*Advanced Materials*）



- 发表包括*Nature*、*Nat. Commun.*、*PRL/PRX*等SCI论文150余篇；第一作者和通讯作者文章含 *Nat. Commun.*, *Adv. Mater.*等40余 篇
- 获授权发明专利6项
- 作为项目负责人主持基金委项目4项，骨干参加科技部重点研发项目3项
- 获包括国家自然科学二等奖、北京市科技一等奖等国家和省部级奖共5项

联系电话：82648041
Email：wangxiancheng@iphy.ac.cn

孔盼盼特聘研究员 博士生导师，中科院百人，HY

- 发展了世界高水平的超高压原位电学表征技术；[***Nat. Phys.*** 15, 1246 (2019)]
- 建立了国际公认的300-500GPa压力标定曲线；[***Nat. Commun.*** 14, 907 (2023)]
- 首次利用超高压电阻测量观测到氢的半金属化 [***Nat. Phys.*** 15, 1246, (2019)]
- 首次实验发现LaH_{10}近室温富氢超导体[***Nature*** 569, 528, (2019)，ESI高被引，Nature十大科学进展]
- 首次实验发现YH_9近室温富氢超导体 [***Nat. Commun.*** 12, 5075 (2021)，ESI高被引]

以第一或共同第一作者身份发表*Nature*（入选2019年Nature十大科学进展，ESI高被引）、*Nat. Phys.*和*Nat. Commun.*（ESI高被引）各1篇，以重要实验贡献者身份合作发表*Nature* 2篇、*Nat. Mater.* 1篇、*Nat. Commun.* 2篇、*PNAS* 1篇和 *Phys. Rev. Lett.* 3篇等。

联系电话：13810910105
Email：panpankong@iphy.ac.cn
主页：https://iop.cas.cn/rcjy/tpyjy/?id=1286

国际合作

联合培养学生、短期访问实验、参加国际会议

国际合作研究

美国：

Brookhaven实验室同步辐射光源

Colombia大学 mSR

Argonne 实验室先进光源

Los Alamos实验室中子

Stony brook

Stanford 大学

Cornell 大学

德州奥斯汀大学...

日本:

东京大学

东北大学

京都大学

...

欧洲:

瑞典Uppsala大学

Grenoble 欧洲光源

英国Edinburg大学

德国马普所

芬兰Alto大学

法国巴黎六大

...

谢谢！

欢迎加入高压团队！

课题组主页：https://uhp.iphy.ac.cn/