低维量子材料中的奇特物理现象

报告人：冯宝杰

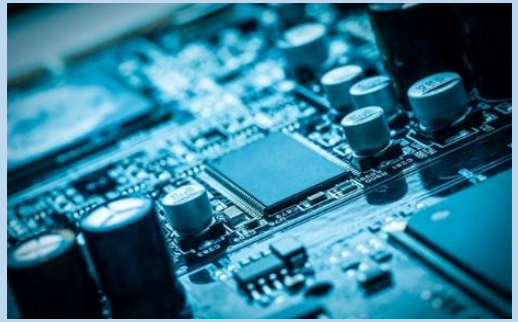
中国科学院物理研究所

中国科学院大学物理科学学院

2025年4月27日

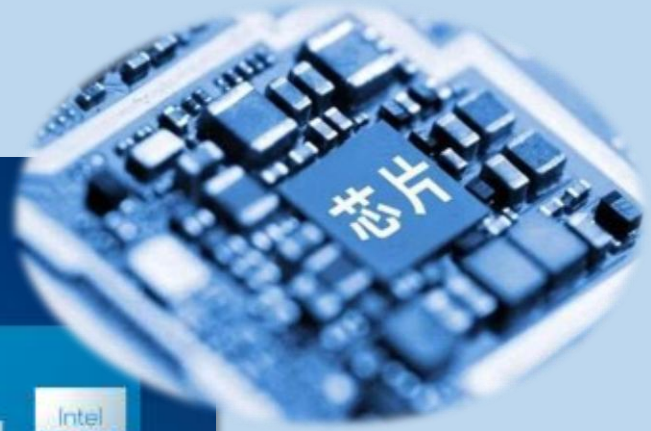
研究背景

半导体微电子工业：深入到了我们的生活



研究背景

芯片的制程：接近材料的极限



背景介绍

iPhone 12，2020

芯片：A14，5 nm

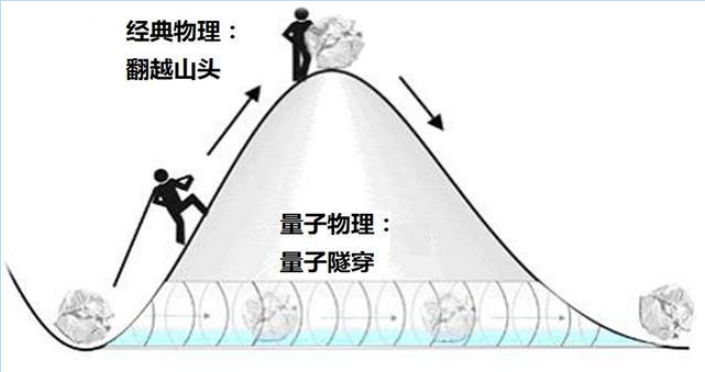
iPhone 16，2024

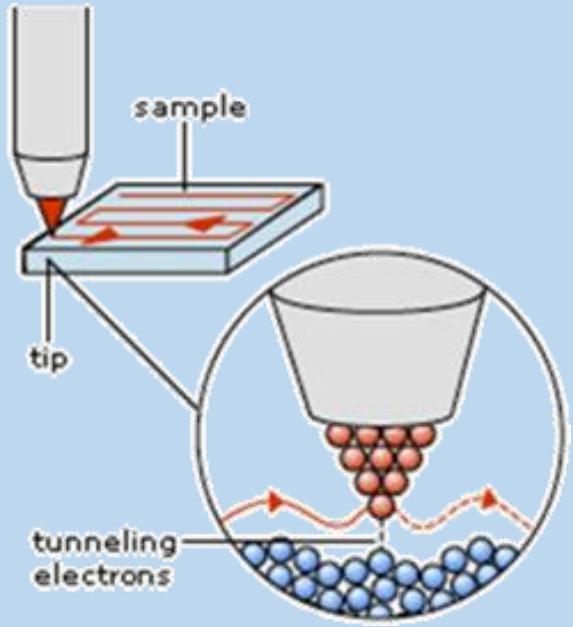
芯片：A18Pro，3 nm

背景介绍

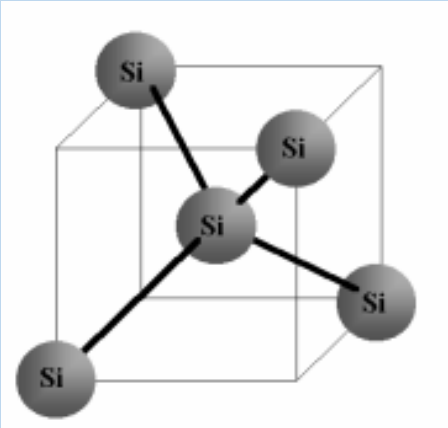
1. 特征尺寸已经接近晶体的原子间距。
2. 材料合成、器件制备的困难。
3. 量子效应的出现。

由于**量子隧穿**效应，漏电现象严重。





单晶硅的原子结构：



Si-Si 键长~0.22纳米。

探索低维材料中奇特的物性：比如零维的量子点、一维纳米线、二维薄膜。

报告内容

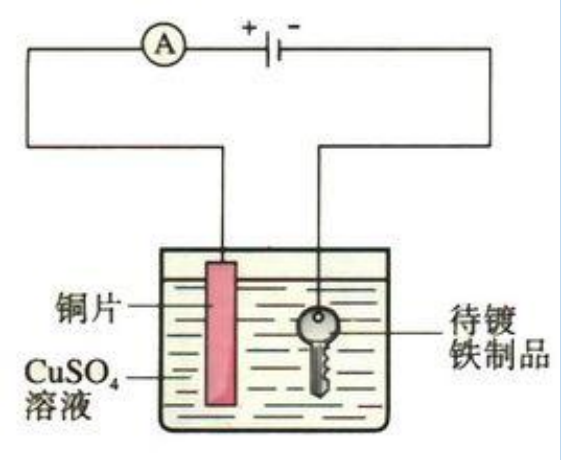
1. 研究手段

2. 研究实例：硅烯、硼烯、笼目晶格、二维多铁材料

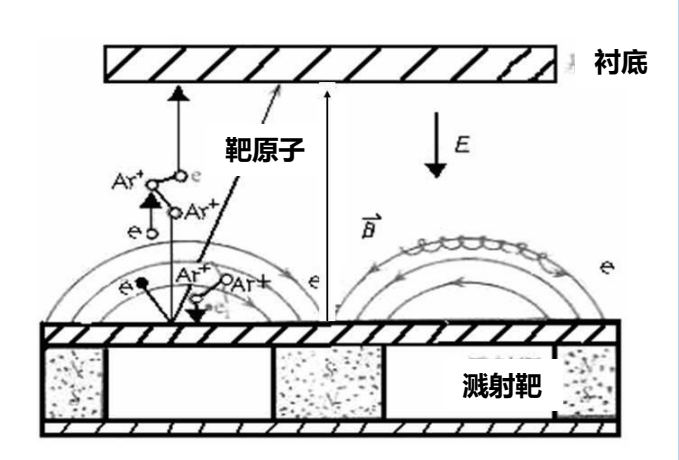
3. 新型实验技术研发

我们的研究手段

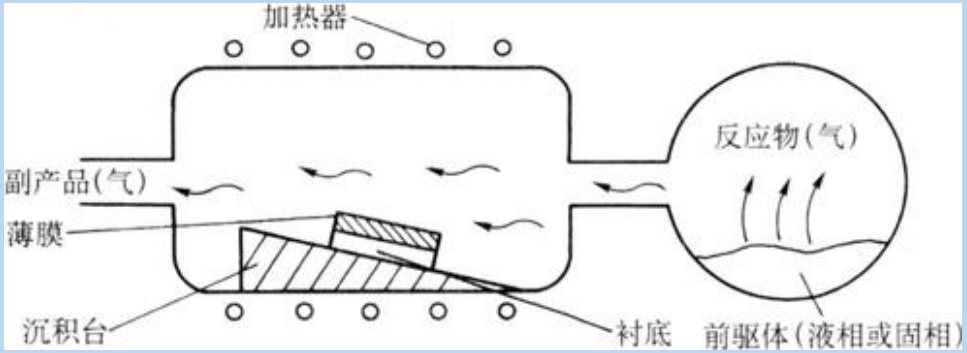
材料（二维薄膜）的制备：



电镀：利用电化学反应



溅射镀膜



化学气相沉积

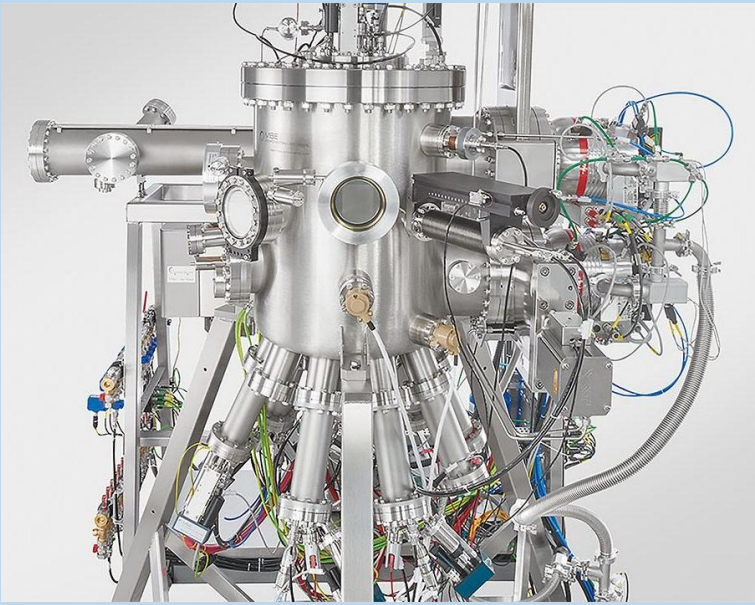
这些方法的缺点

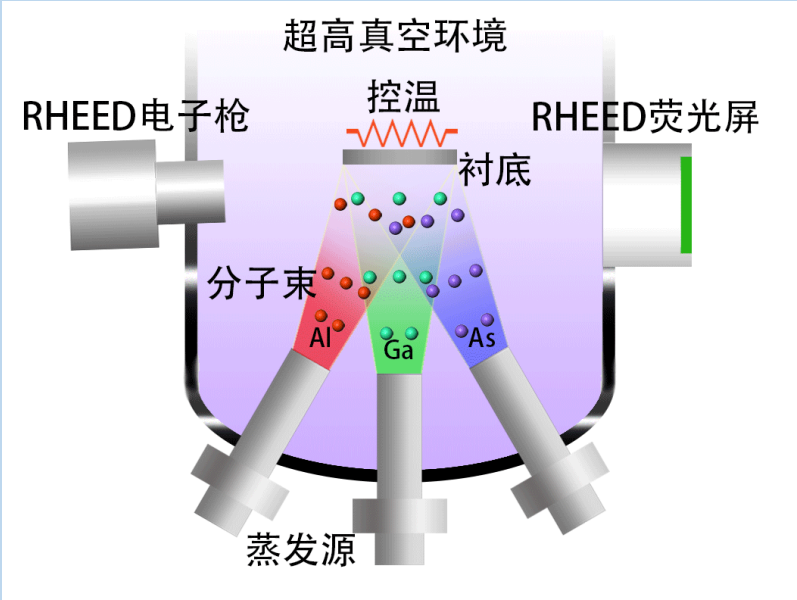
- ◆ 精度不高，很难可控地（原子级）生长超薄的二维薄膜。
- ◆ 样品质量不高，存在很多杂质（环境非超高真空）。

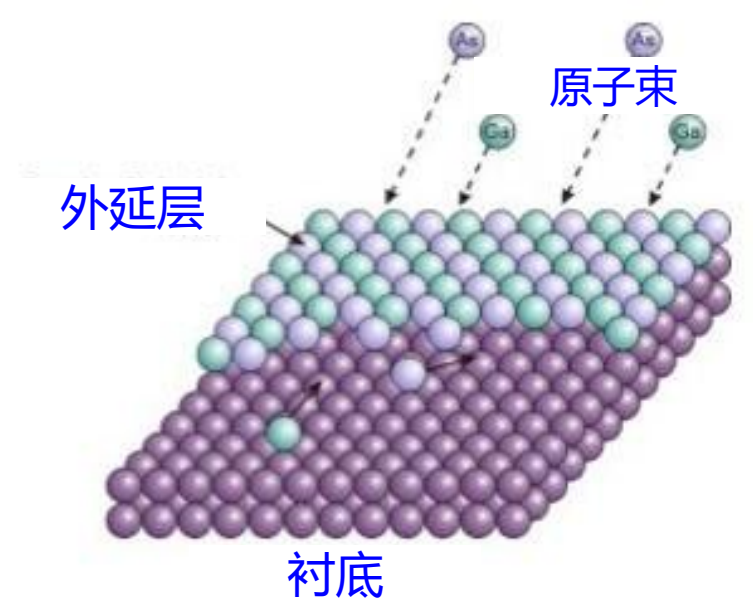
我们的研究手段

分子束外延(MBE)：原子尺度上精准构筑二维材料

Molecular Beam Epitaxy







在超高真空（<1×10^{-8} Pa）中，沉积不同的元素。

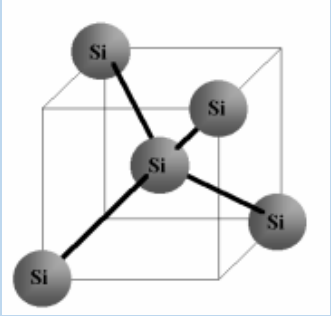
目前精度最高的二维材料生长方式

我们的研究手段

材料的微观结构

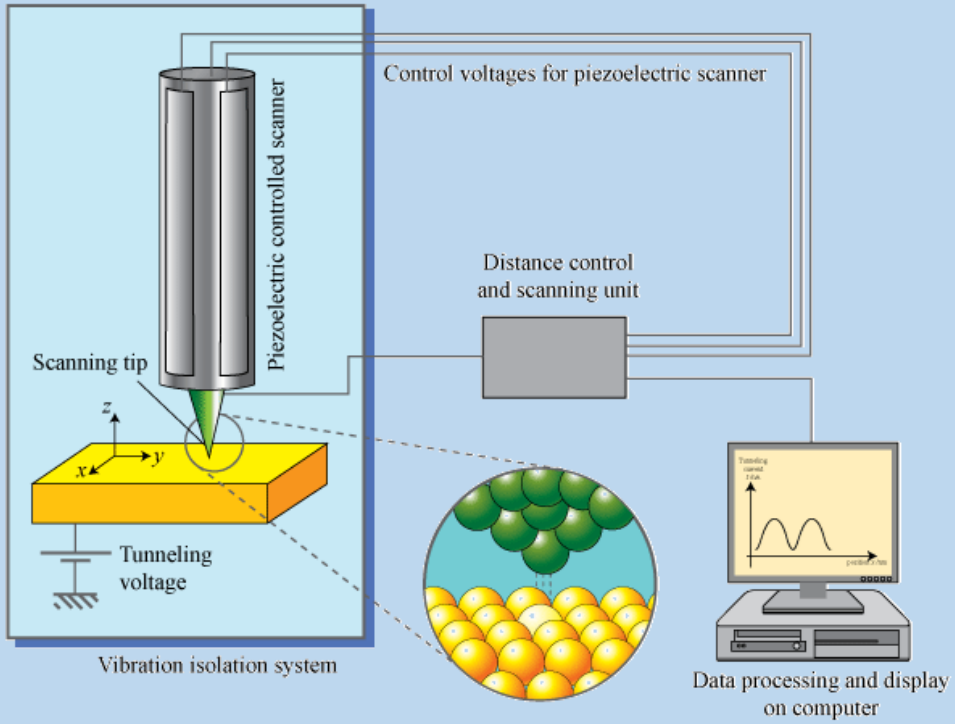
光学显微镜

放大镜



Si-Si 键长0.22 nm

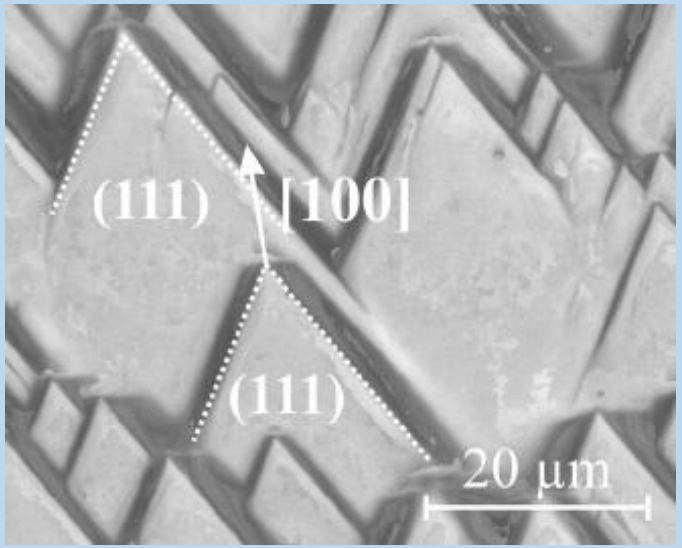
扫描隧道显微镜



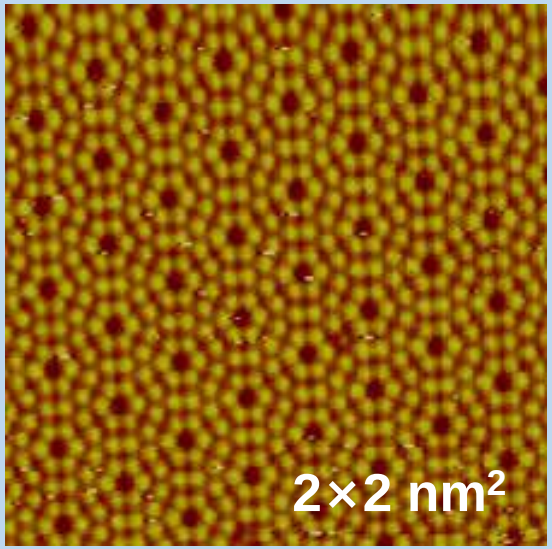
- 空间分辨率：几百纳米。
- 无法研究究材料的原子结构。

- 空间分辨率：亚原子量级，可以直接观测原子排列。
- 探测材料的局域态密度。

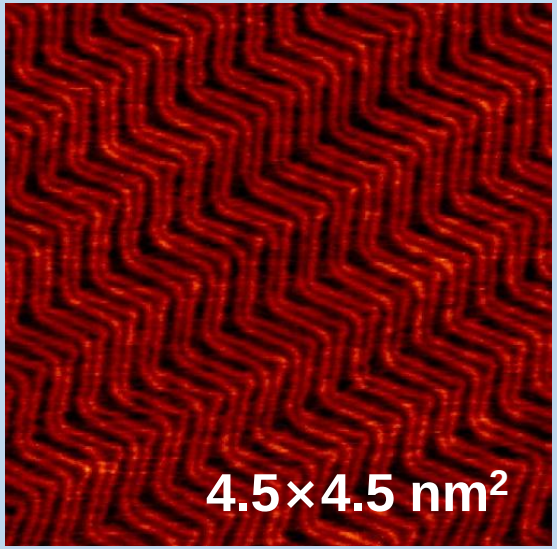
我们的研究手段



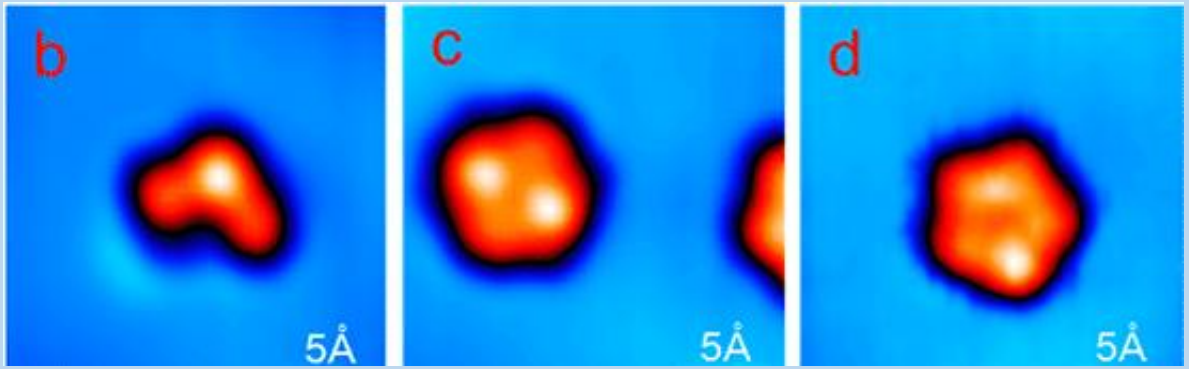
光学显微镜下的表面相貌



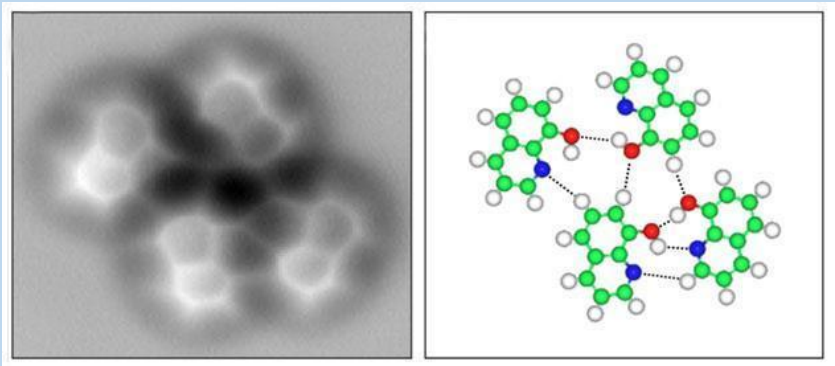
Si(111)扫描隧道显微镜图



Au(111)扫描隧道显微镜图



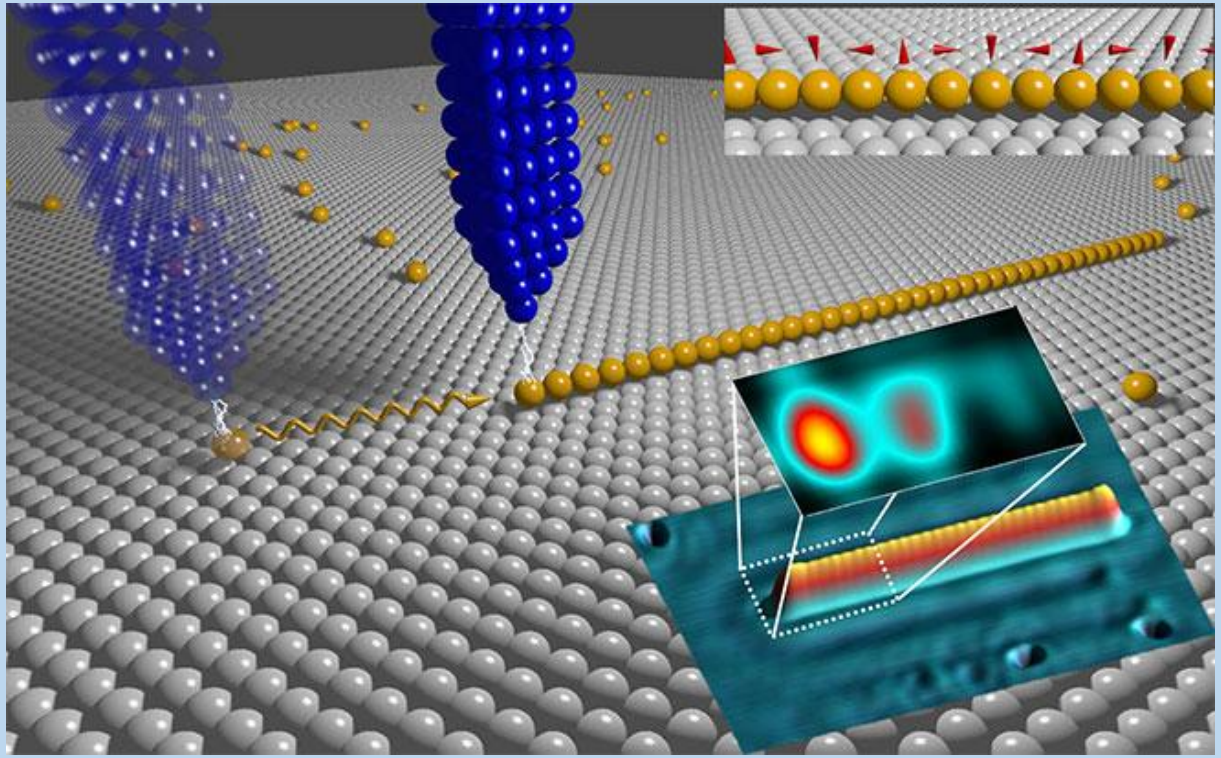
扫描隧道显微镜研究水分子在固体表面的吸附



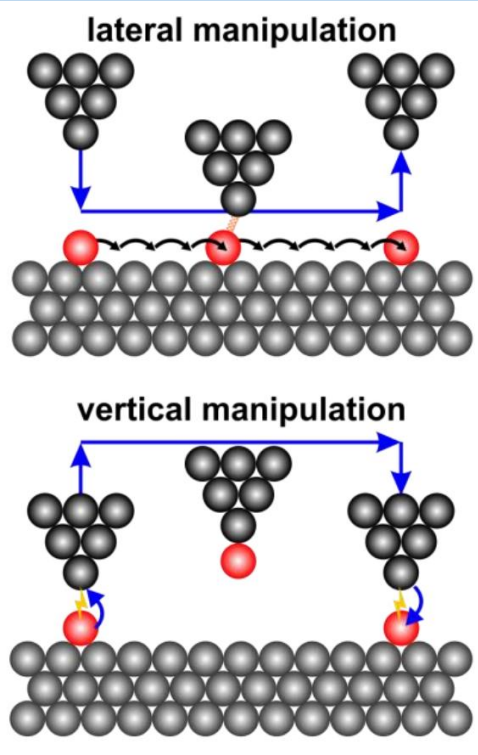
扫描隧道显微镜直接观测分子间的氢键

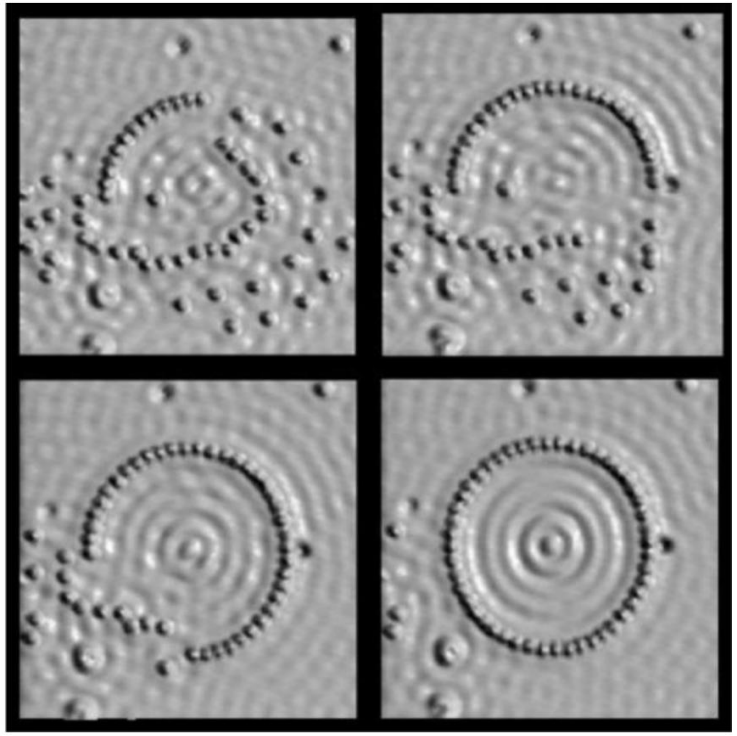
我们的研究手段

扫描隧道显微镜：单原子操纵、量子模拟、量子计算



超导体表面的一维铁链（马约拉纳费米子）



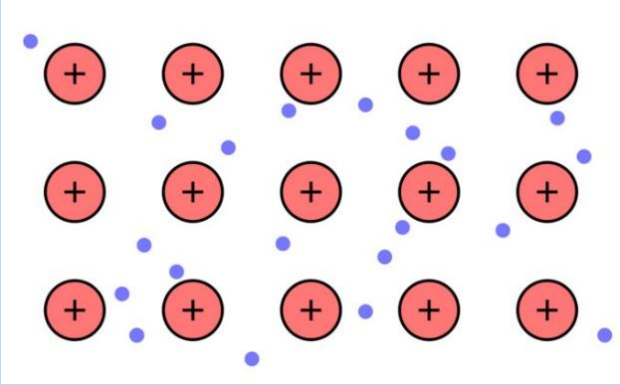


金属量子围栏

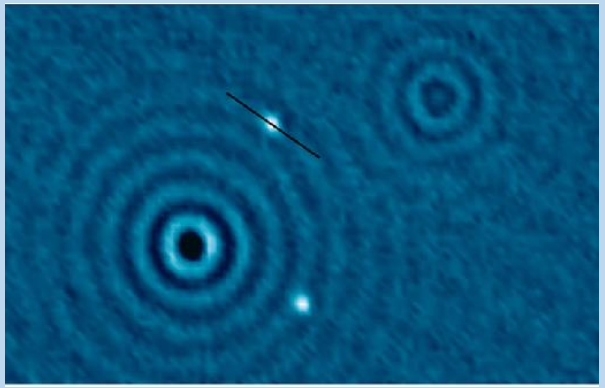
我们的研究手段

扫描隧道显微镜：电子局域态密度

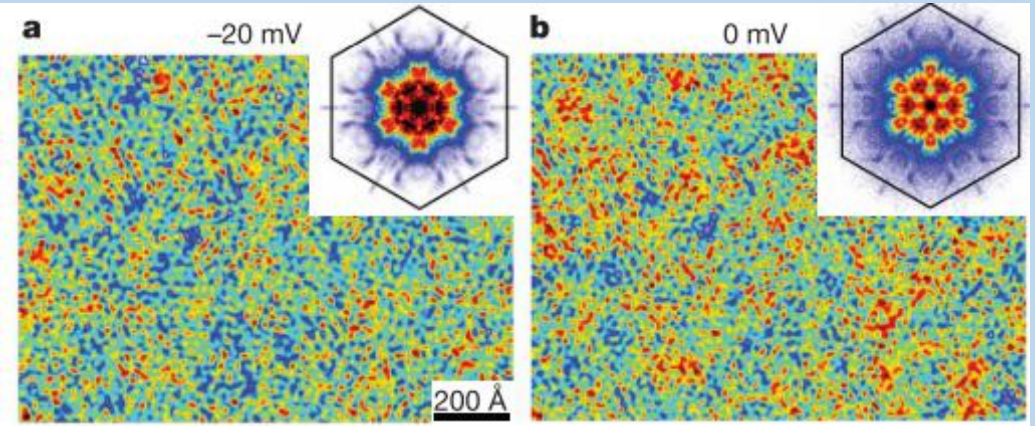
自然界中的水波



晶体材料中的原子

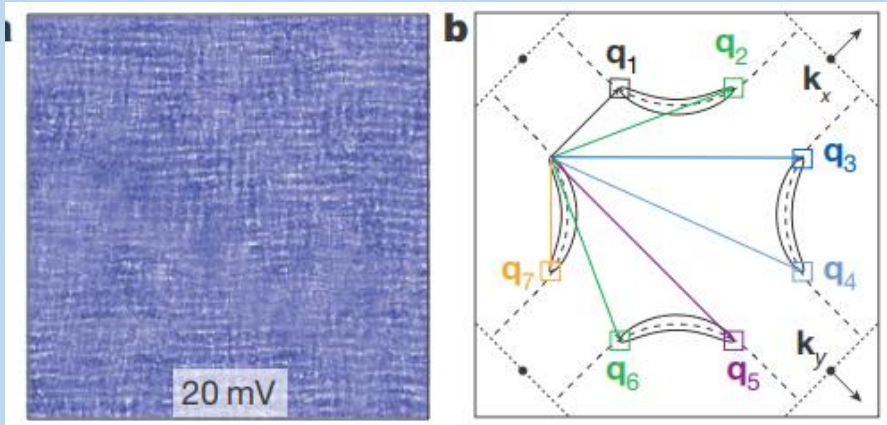


Cu(111)表面的电子驻波条纹



电子驻波：研究拓扑绝缘体背散射被抑制

Nature 460, 1106 (2009)

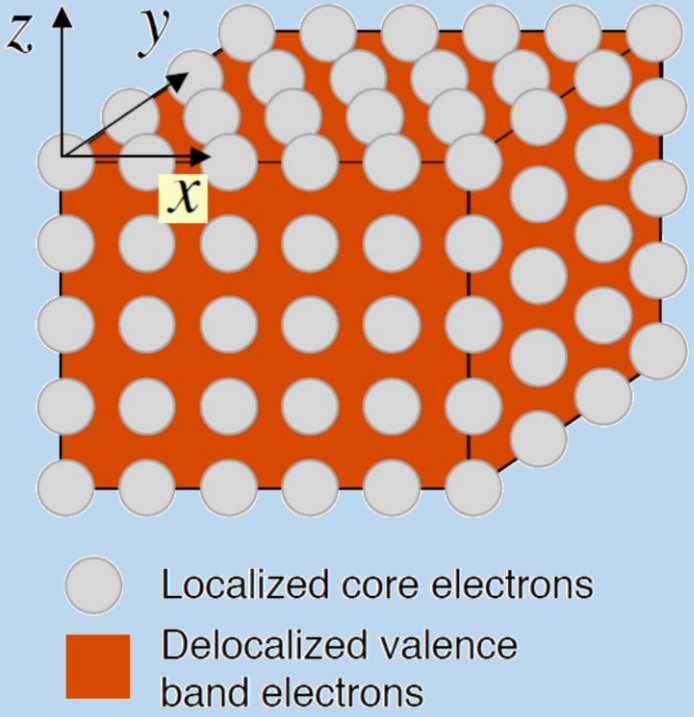


电子驻波：研究超导能隙的对称性

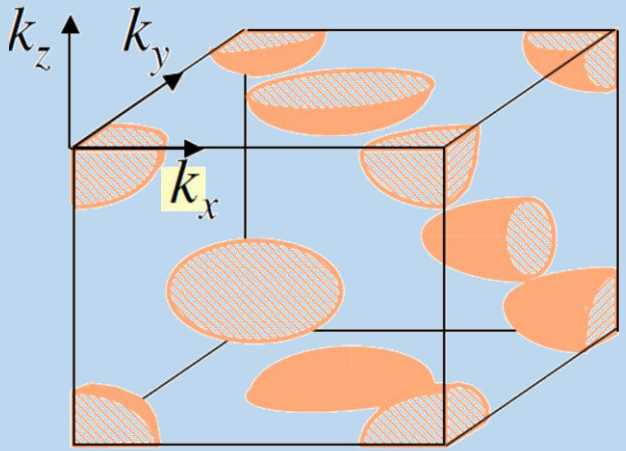
Nature 575, 156 (2019)

我们的研究手段

实空间：结构、电子态密度…



倒空间/动量空间：能带结构



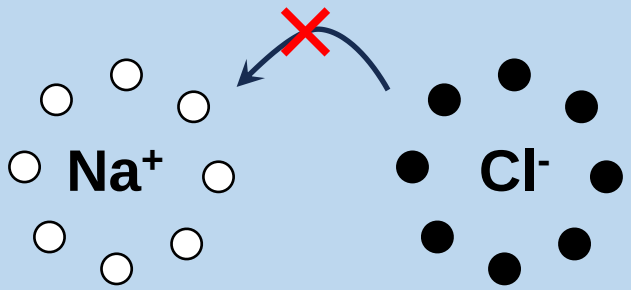
等能面

能带结构：有助于理解材料大部分的物性，包括电输运性质、光学性质等。

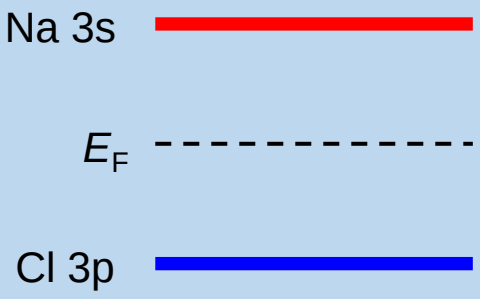
我们的研究手段

强局域化情况（绝缘体）：

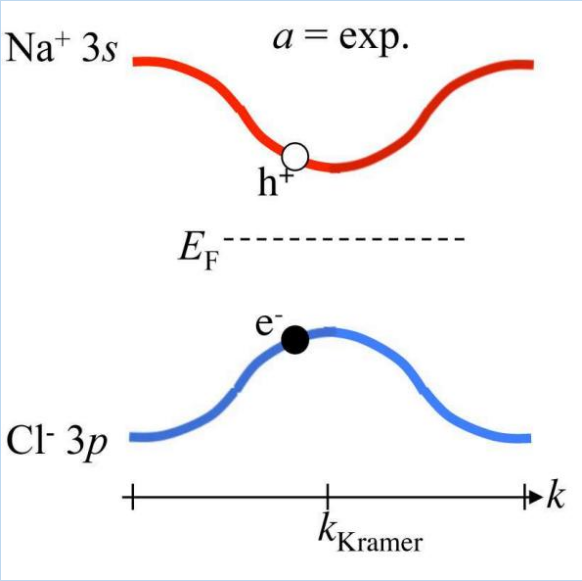
NaCl晶体



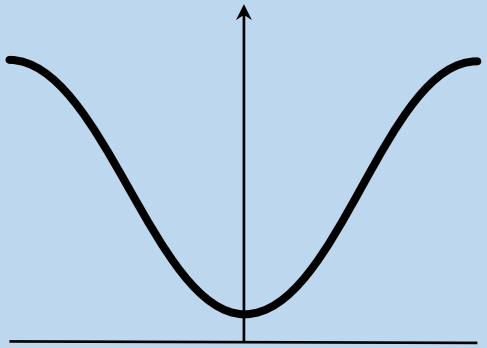
原子间距无穷大的时候

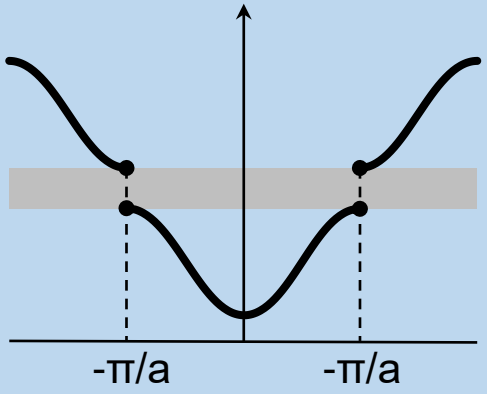


原子间距逐渐变小



近自由电子情况（金属）：



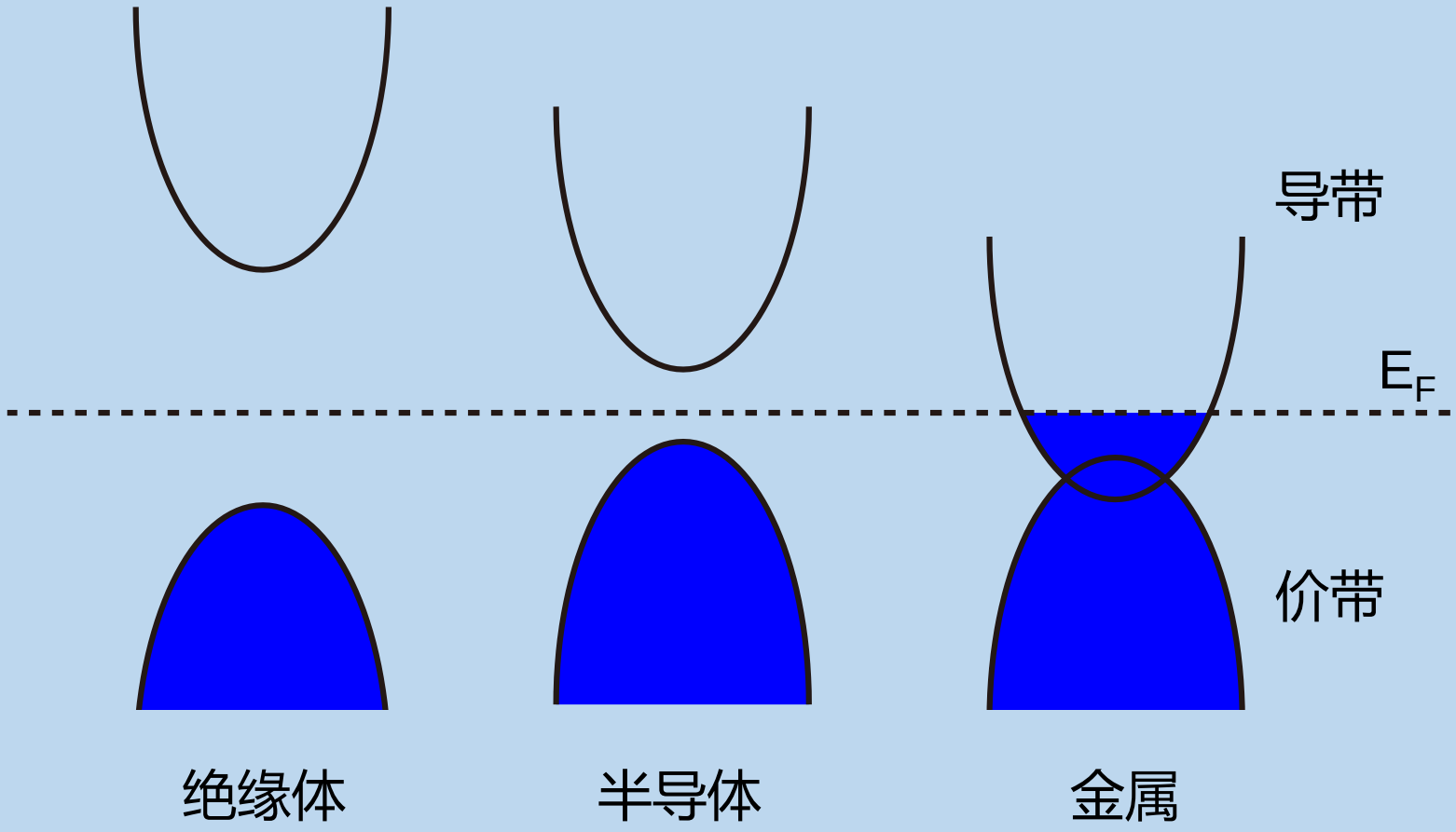


自由电子在周期势中的运动：
布洛赫波

我们的研究手段

能带结构的重要性：

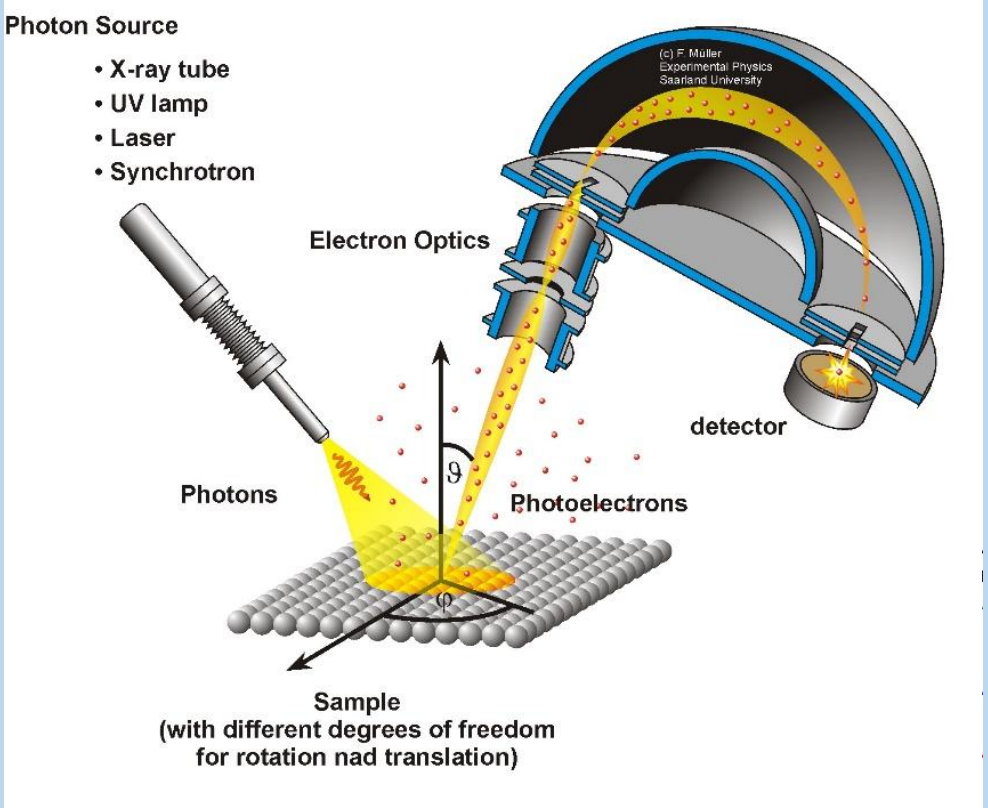
材料导电性按照能带的分类

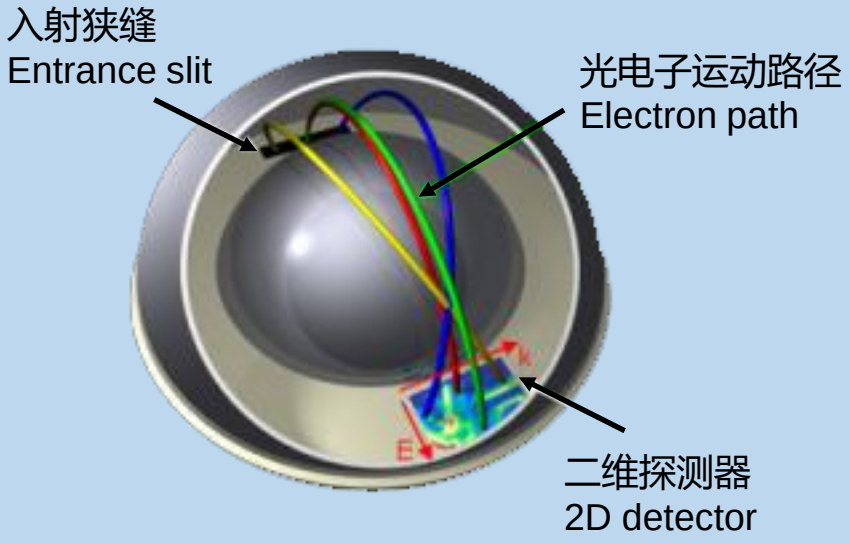


我们的研究手段

角分辨光电子能谱 (ARPES)：研究能带结构最为直接的方法。

Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy



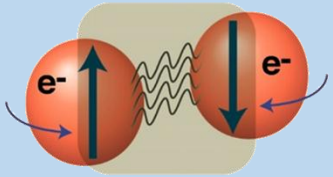


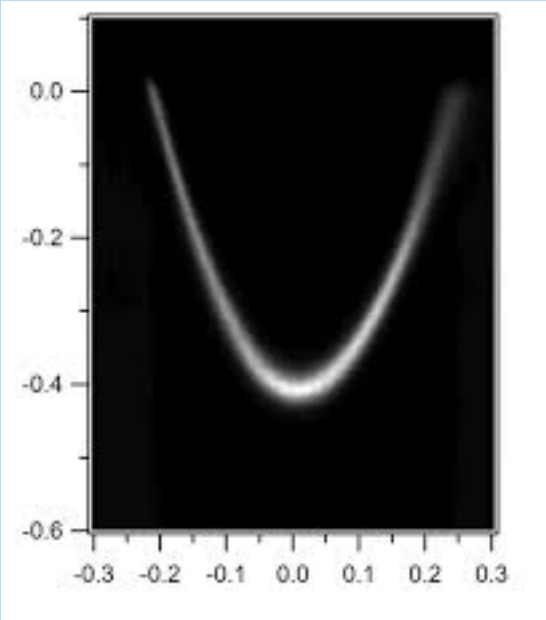
基本原理：光电效应

电子能量分析器

我们的研究手段

角分辨光电子能谱 (ARPES)：数据实例

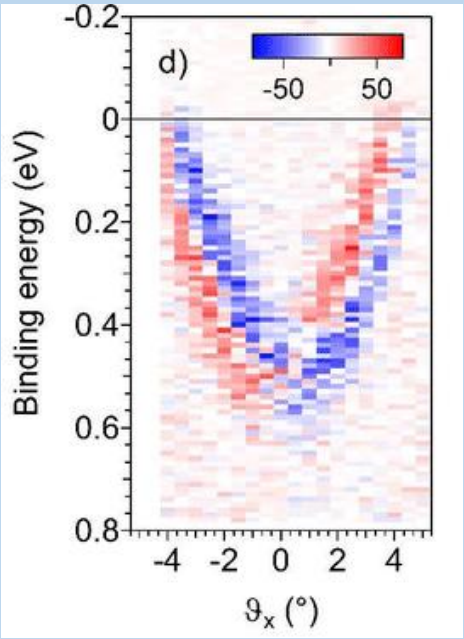




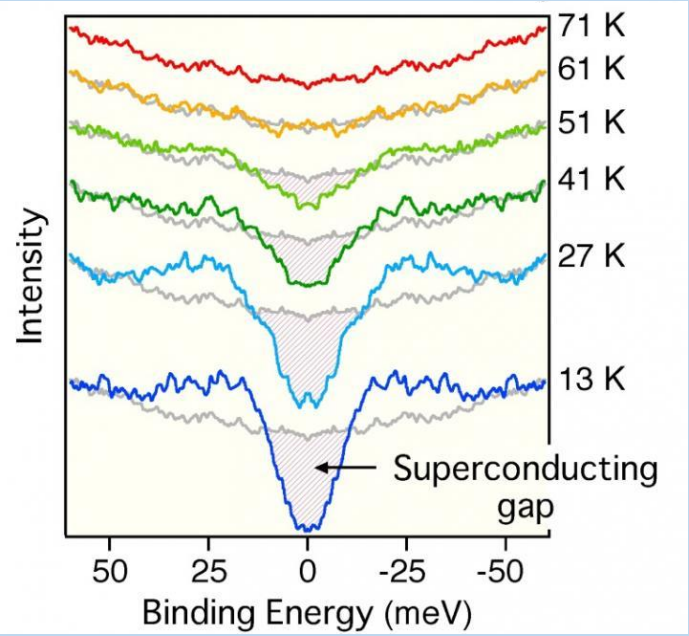
Cu(111)的表面态

$E=P^2/2m$

Au(111)的表面态
(Rashba自旋劈裂)



Au(111)的表面态
(自旋信号)



ARPES测得的超导能隙

我们团队组成

物理所SF09团队职工

陈岚

冯宝杰

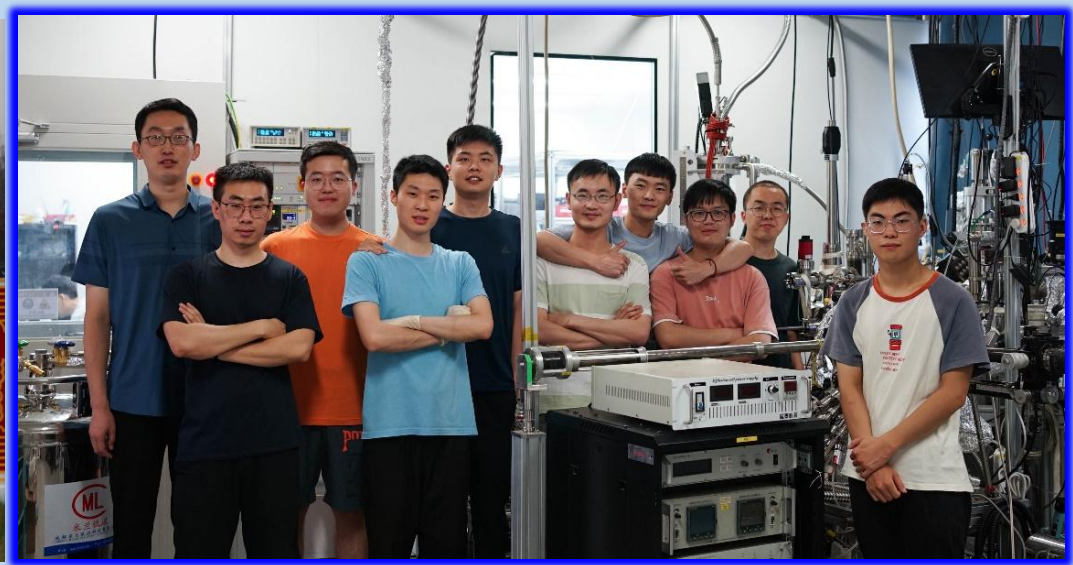
程鹏

Collaborators

孟胜	中科院物理所
石友国	中科院物理所
姚裕贵	北京理工大学
赵智刚	山东大学
陈伟	新加坡国立大学
岛田贤也	日本广岛大学

SF09全部成员

我的小分队



报告内容

1. 研究手段

2. 研究实例：硅烯、硼烯、笼目晶格、二维多铁材料

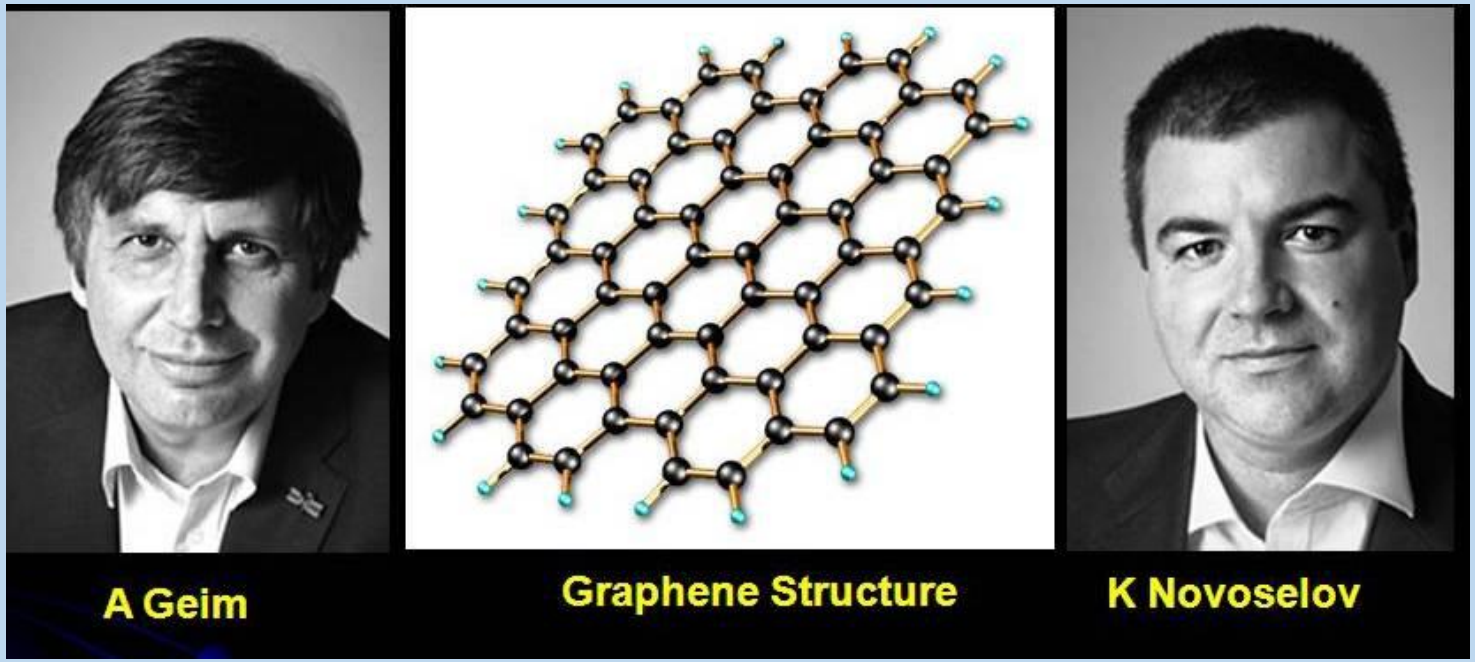
3. 新型实验技术研发

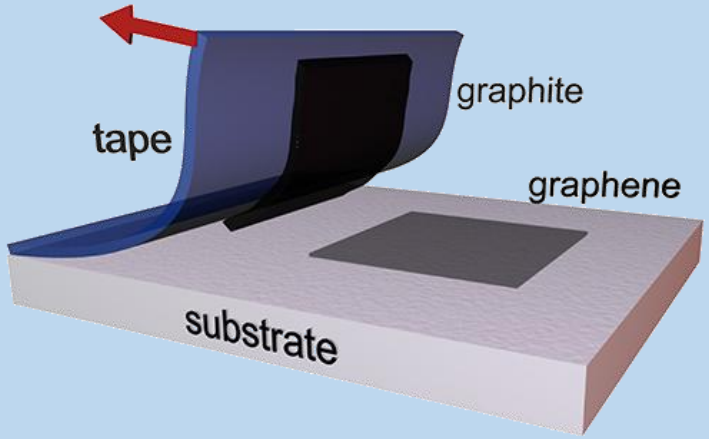
硅烯和硼烯

2010年诺贝尔物理学奖：石墨烯

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics for 2010 to Andre Geim and Konstantin Novoselov, both at University of Manchester, UK

“for groundbreaking experiments regarding the two-dimensional material graphene”

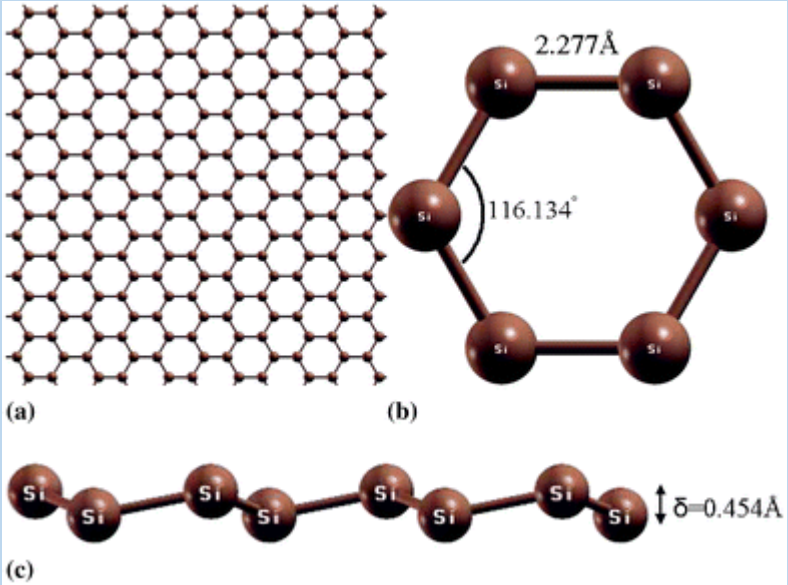


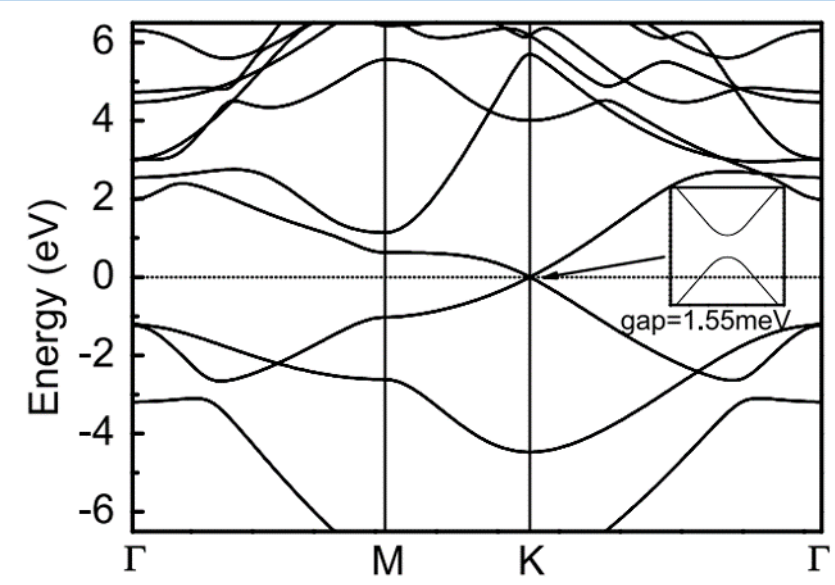


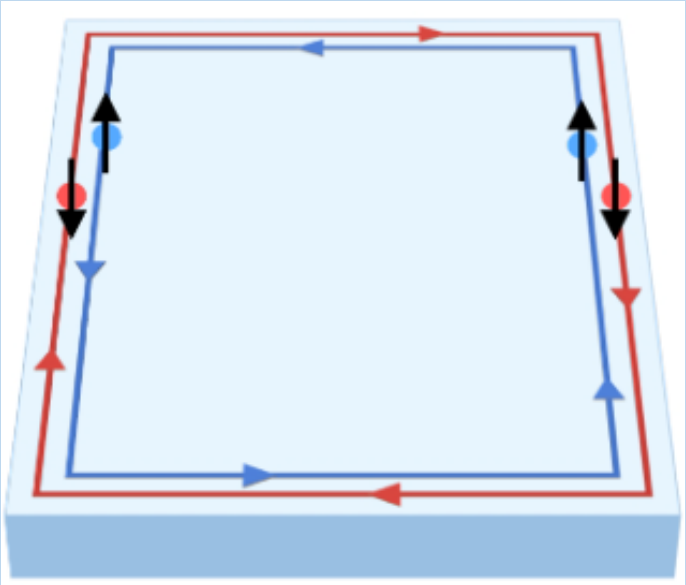
在石墨中用胶带撕出单原子层石墨烯

硅烯和硼烯

硅烯的理论预言







硅烯：硅版石墨烯。

翘曲的蜂窝状结构。

狄拉克点处存在能隙：存在拓扑边缘态。

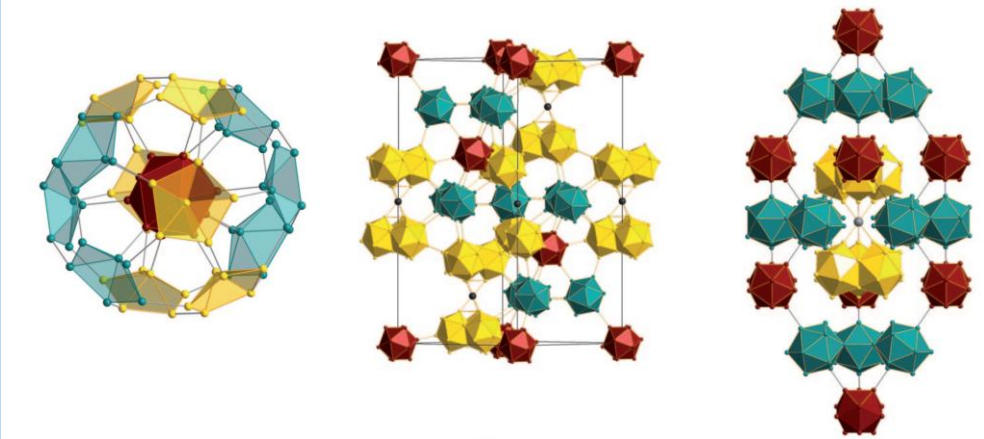
量子自旋霍尔效应

C.-C. Liu, *et al.* Phys. Rev. Lett. **107**, 076802 (2011).

相对于石墨烯，硅烯具有独特的优势：

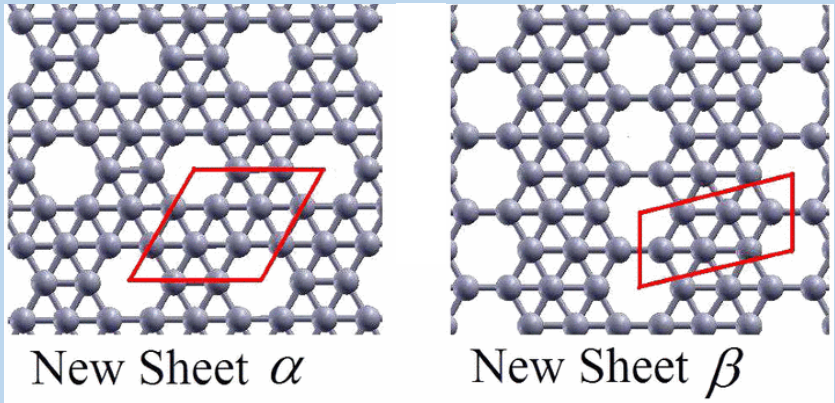
1. **跟现代半导体工业兼容。**
2. **可能实现量子自旋霍尔效应。**

硅烯和硼烯

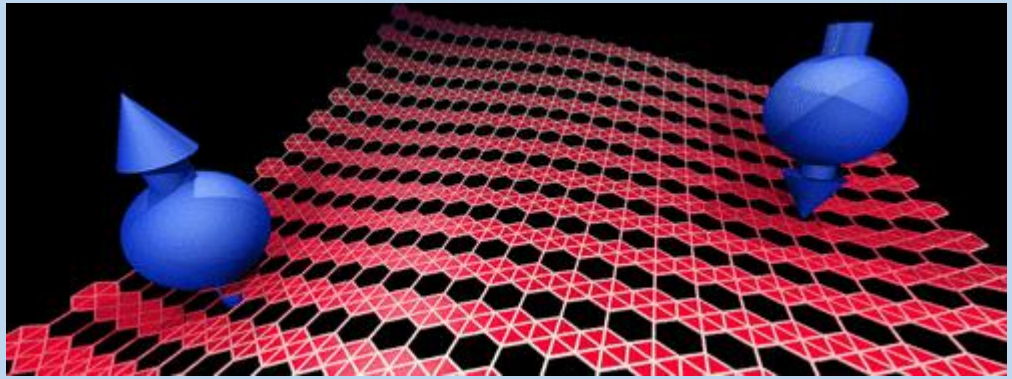


体相硼：笼状结构 绝缘体

硼→铟



H. Tang *et al.*, PRL 99, 115501 (2007).



二维硼（硼烯）：金属

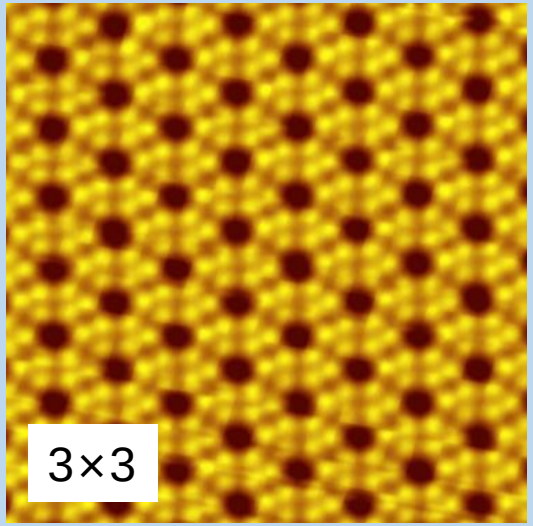
- 超导、强关联
- 无质量的狄拉克费米子

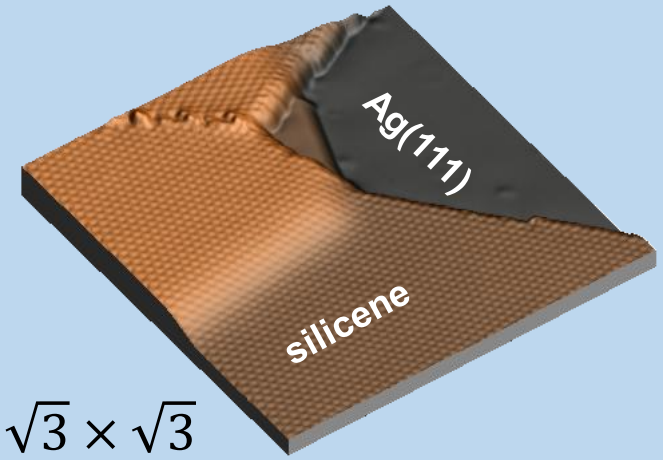
硅烯和硼烯

B 5	**C** 6	**N** 7	**O** 8	**F** 9
Al 13	**Si** 14	**P** 15	**S** 16	**Cl** 17
Ga 31	**Ge** 32	**As** 33	**Se** 34	**Br** 35
In 49	**Sn** 50	**Sb** 51	**Te** 52	**I** 53

- B和Si：没有层状母体材料
- 分子束外延（MBE）
- 衬底选择：贵金属金、银、铜

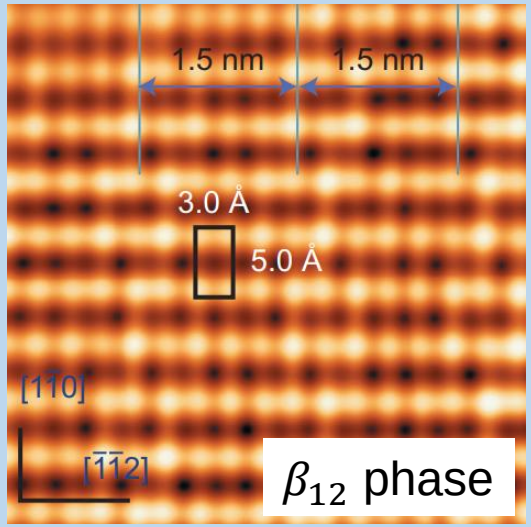
硅烯的合成

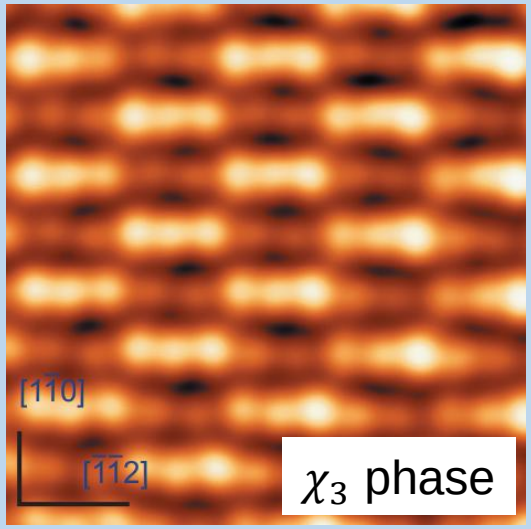




B. Feng, *et al.* Nano Lett. **12**, 3507 (2012).

硼烯的合成

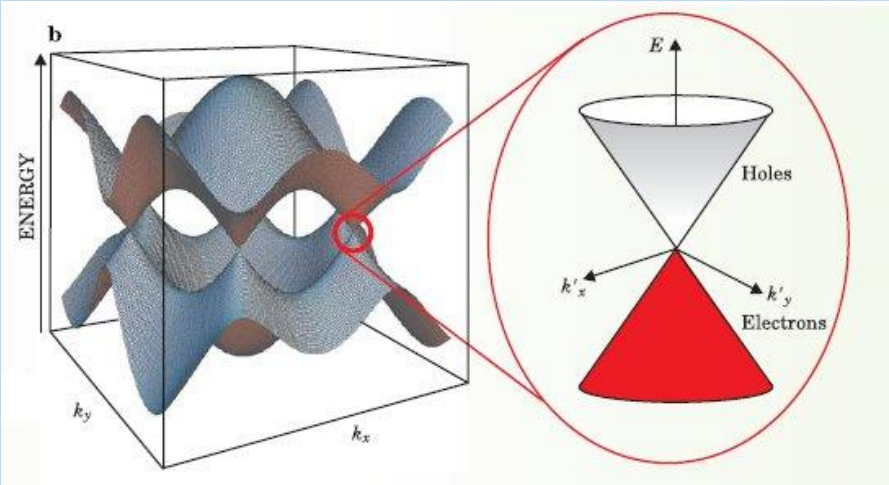




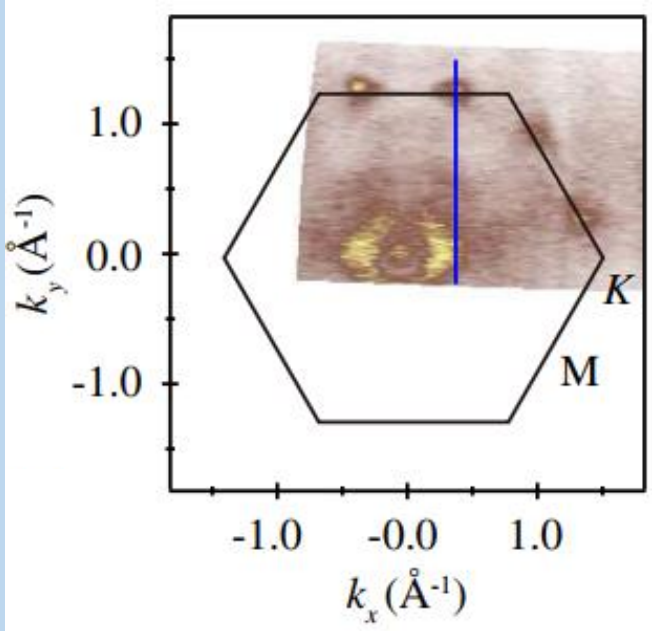
B. Feng, *et al.*, Nat. Chem. 8, 563 (2016).

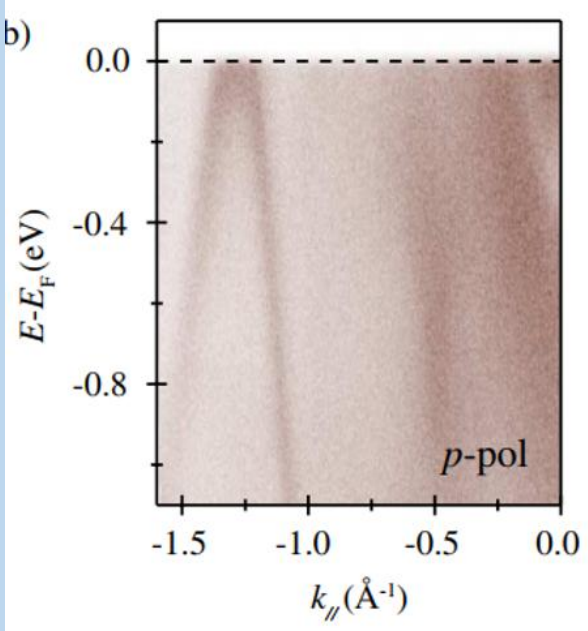
硅烯和硼烯

硅烯中的狄拉克电子态：



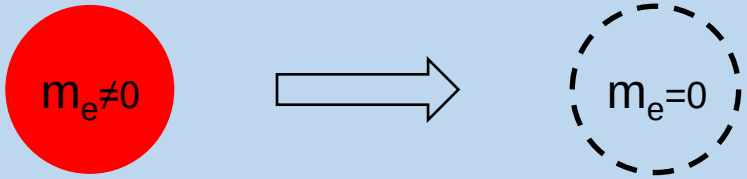
石墨烯在K点存在线性色散的狄拉克锥；
准粒子表现为无质量的狄拉克费米子。





利用ARPES，直接观测到线性色散的狄拉克锥。

自由电子　　无质量的狄拉克费米子

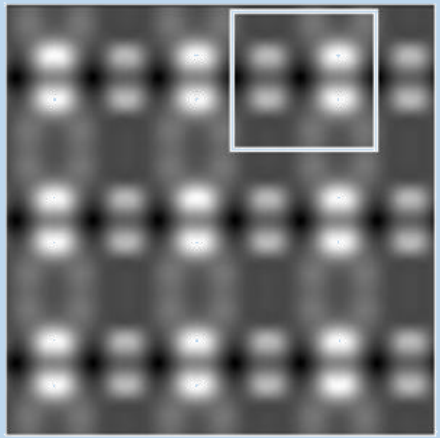


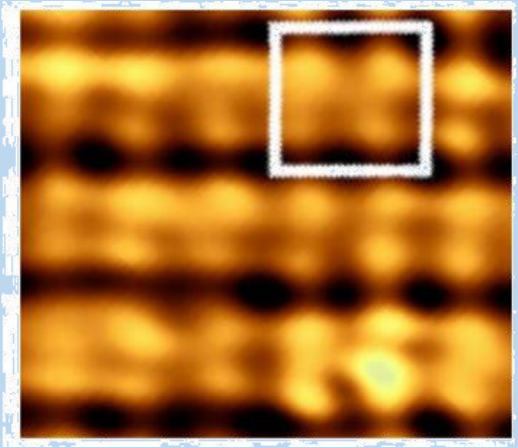
有质量　　无质量！

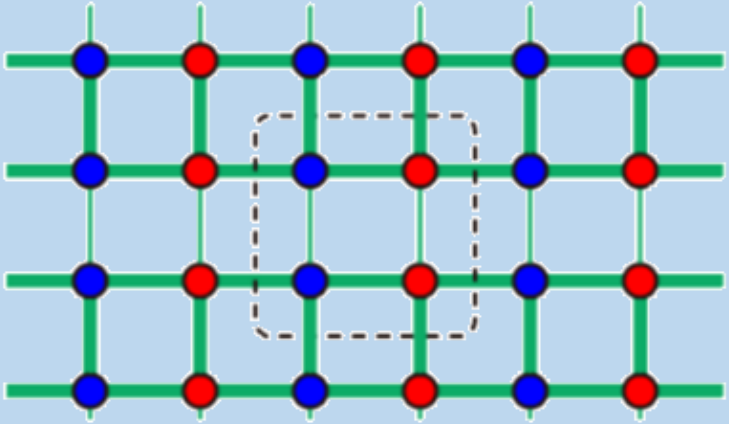
存在的问题：

- 未观测到明显能隙；
- 量子自旋霍尔效应？

硅烯和硼烯

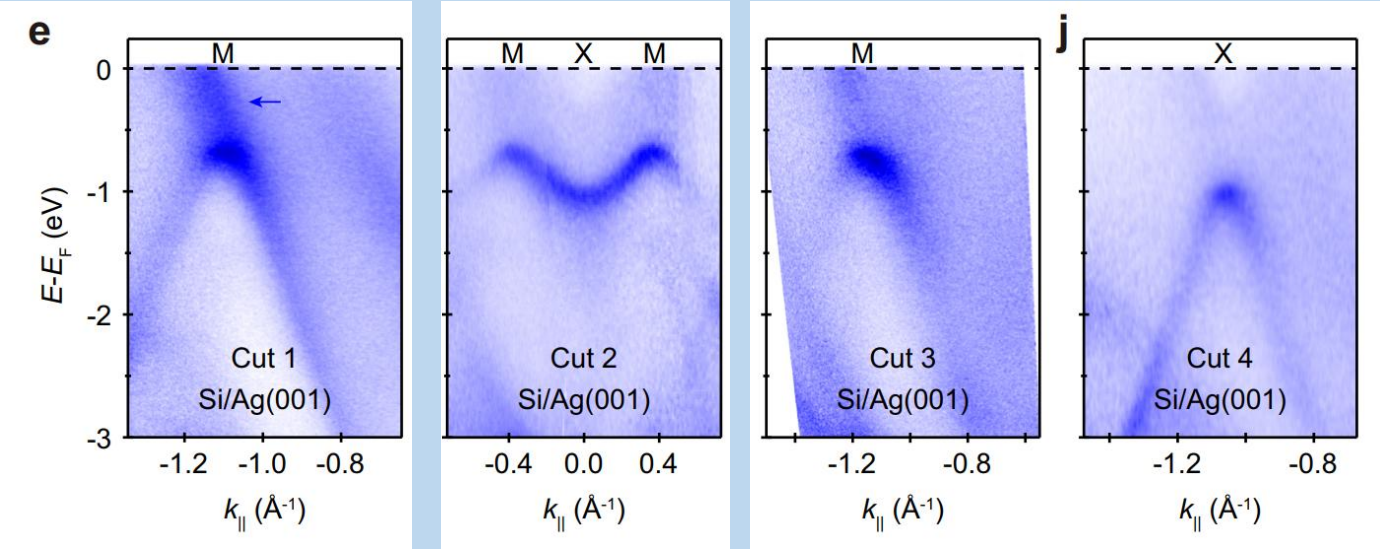






Ag(100)表面生长的矩形硅晶格

耿岱玉（2022年毕业）
本科：华北电力大学
去向：德国马普所博士后



利用ARPES直接观测到了超过0.6 eV的能隙

D. Geng, … **B. Feng***, Nat. Commun. 13, 7000 (2022).

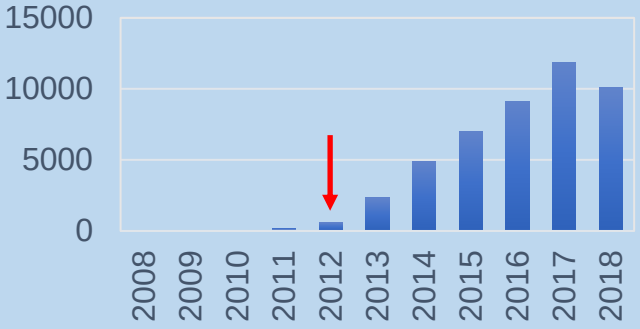
硅烯工作的国际影响

推动硅烯成为研究热点

在Web of Science中搜索关键词：silicene

SCI文章数量

SCI引文数量



汤姆森路透社发布的2014年物理学领域10个最前沿的研究热点

From a Thomson-Reuters citation-based study covering years 2011 to 2014. See also PHYSICS TODAY, The Dayside : Hot physics C. Day 25 September 2015

Rank	Research Fronts (changed)	Core Papers	Citations	Mean Year of Core Papers
1	Observation of Higgs boson	2		
2	Global neutrino data analysis	12		
3	Nonlinear massive gravity	32		
4	The growth and properties of silicene	25		
5	MoS2 and transistors	20	3147	2011.5
6	Spin-orbit coupled Fermi gases	43	3246	2011.4
7	Alkali-doped iron selenide superconductors AxFe2-ySe2	35	2995	2011.2
8	Graphene plasmonics	15	1711	2011.1
9	Topological Mott insulators	33	2326	2011
10	Hydrodynamics of relativistic heavy ion collisions	29	2020	2011

上帝粒子的发现

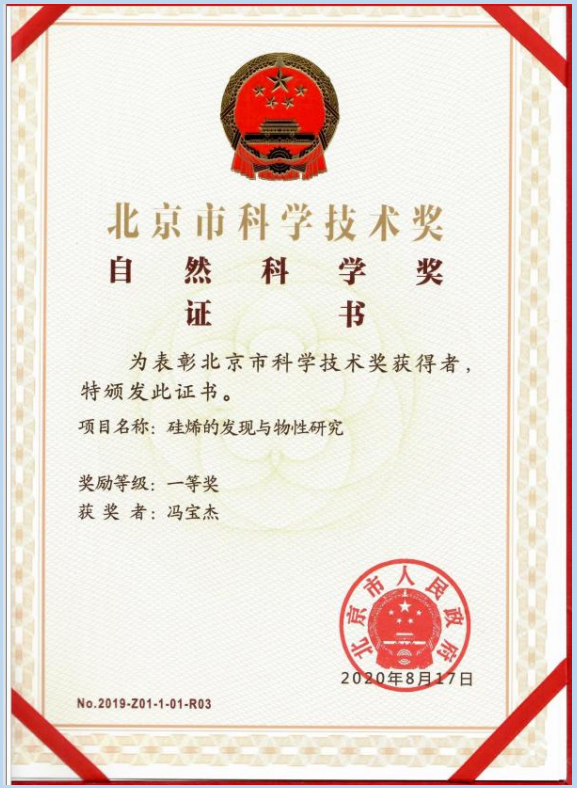
全球中微子数据分析

非线性大引力

硅烯的生长和性质

Nano Lett. 12, 3507 (2012)
Phys. Rev. Lett. 109, 056804 (2012)

北京市自然科学一等奖（2020）


北京市科学技术奖
自然科学奖
证书

为表彰北京市科学技术奖获得者，特颁发此证书。

项目名称：硅烯的发现与物性研究

奖励等级：一等奖

获奖者：冯宝杰

北京市人民政府

2020年8月17日

No.2019-Z01-1-01-R03

硼烯工作的国际影响

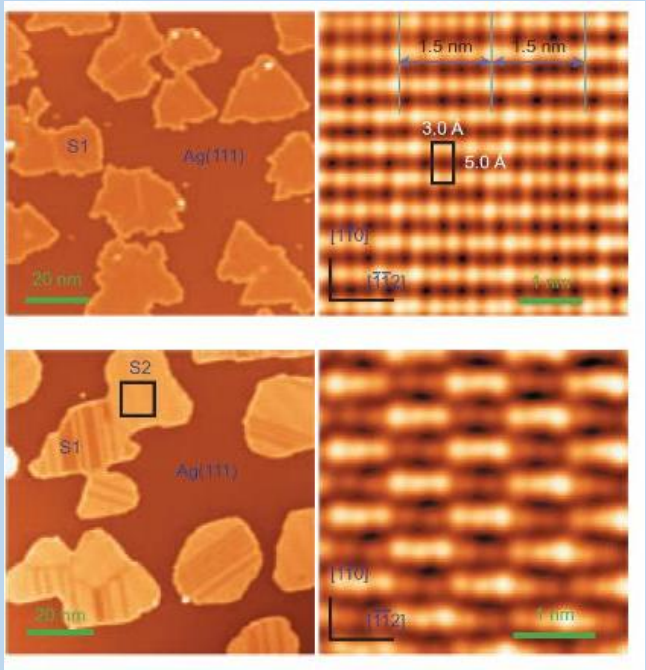
最近，中科院等单位发布了《2018研究前沿》

硼烯入选化学与材料科学十大前沿热点。

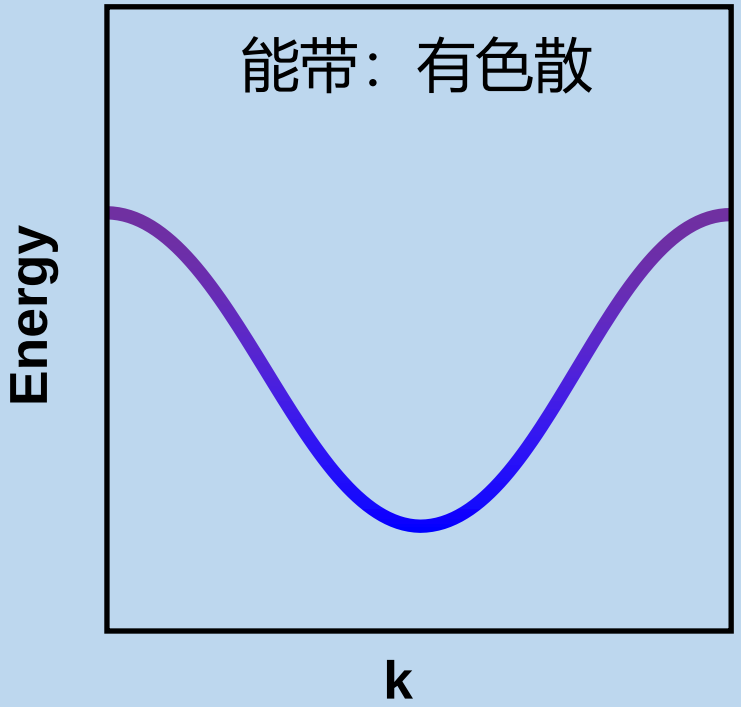
B. Feng, J. Zhang, *et al*., Nat. Chem. 8, 563 (2016).
B. Feng, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 118, 096401 (2017).

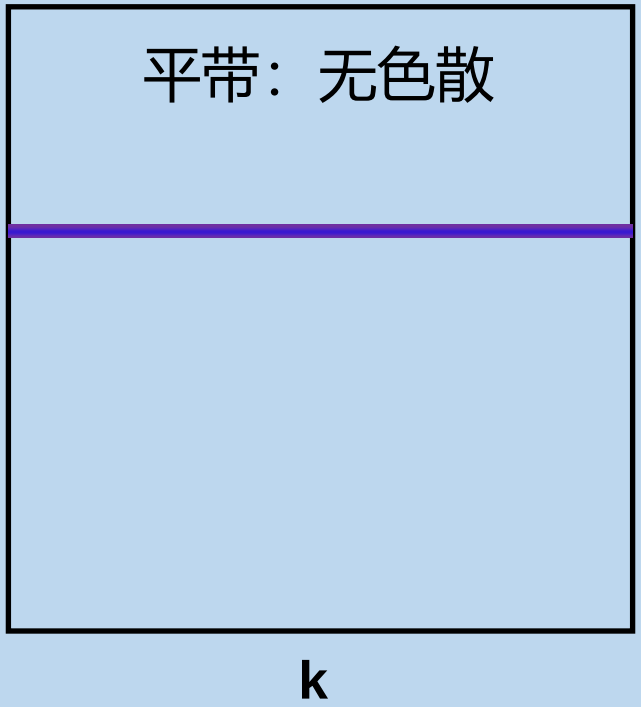
表 30 化学与材料科学 Top10 热点前沿

排名	热点前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	金属锂负极枝晶抑制研究	34	2941	2015.9
2	间位选择性碳氢键活化	34	2599	2015.5
3	光引发的活性自由基聚合	34	3037	2015.3
4	镍 / 光氧化还原协同催化	23	2350	2015.2
5	全无机钙钛矿纳米晶光电材料	18	3951	2015.1
6	钙钛矿太阳能电池	25	3361	2015.1
7	硼烯	19	1831	2015.1
8	高介电常数聚合物基纳米复合材料	16	1959	2015
9	串行飞秒晶体学	19	2190	2014.6
10	低共熔溶剂及其应用	18	2990	2014.2



平带体系





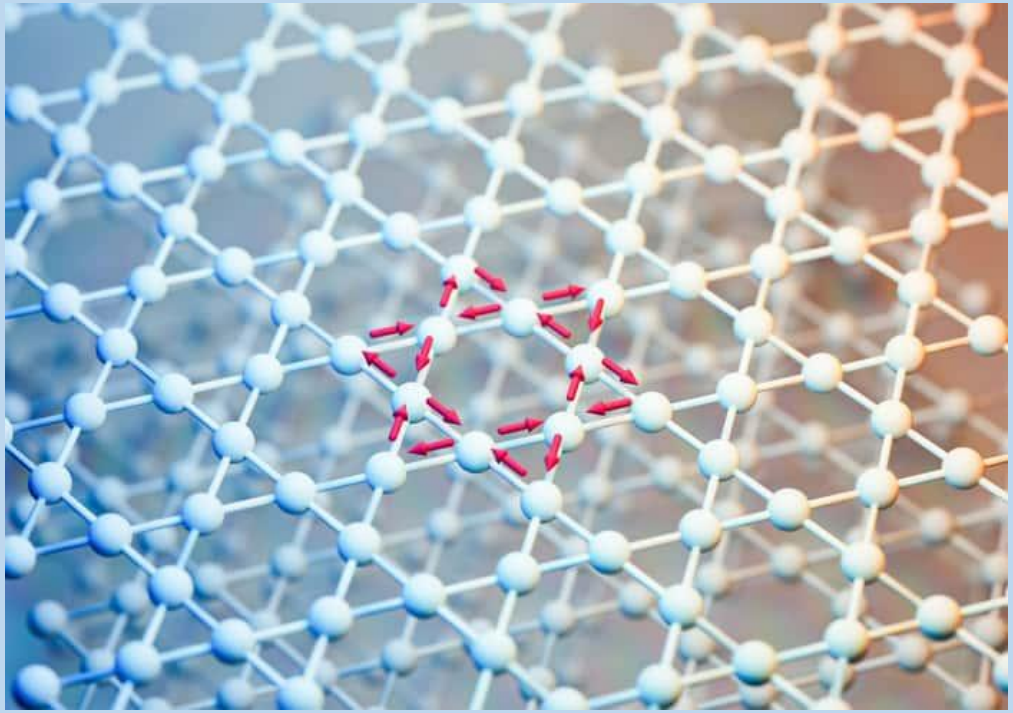
孙振宇（2023年毕业）
本科：兰州大学
博士研究生国家奖学金
去向：美国布朗大学

平带：电子关联作用很强（库伦能）

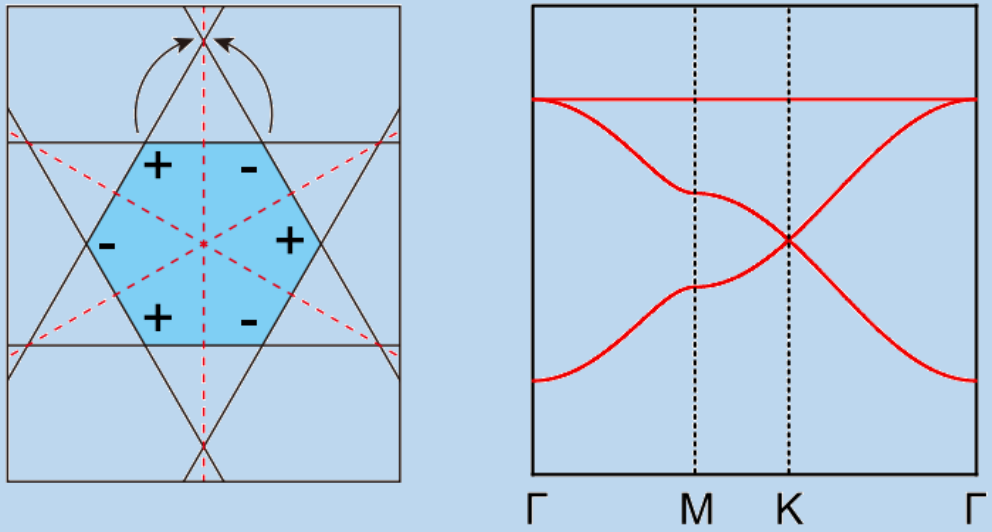
平带超导
平带铁磁
分数量子霍尔效应

平带体系

Kagome Lattice（笼目晶格）



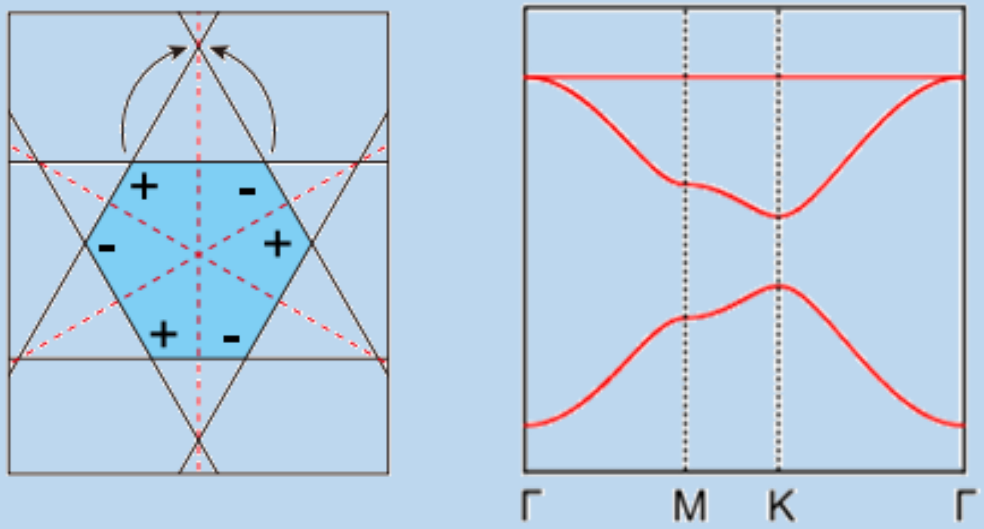
平带体系



笼目晶格（Kagome lattice）

- 平带：受镜面对称的保护；
- 狄拉克锥：受中心对称的保护，类似与石墨烯
- M点存在范霍夫奇点.

Z. Sun...**B. Feng**, Nano Lett. 22, 4596 (2022).



呼吸笼目晶格（Breathing kagome lattice）

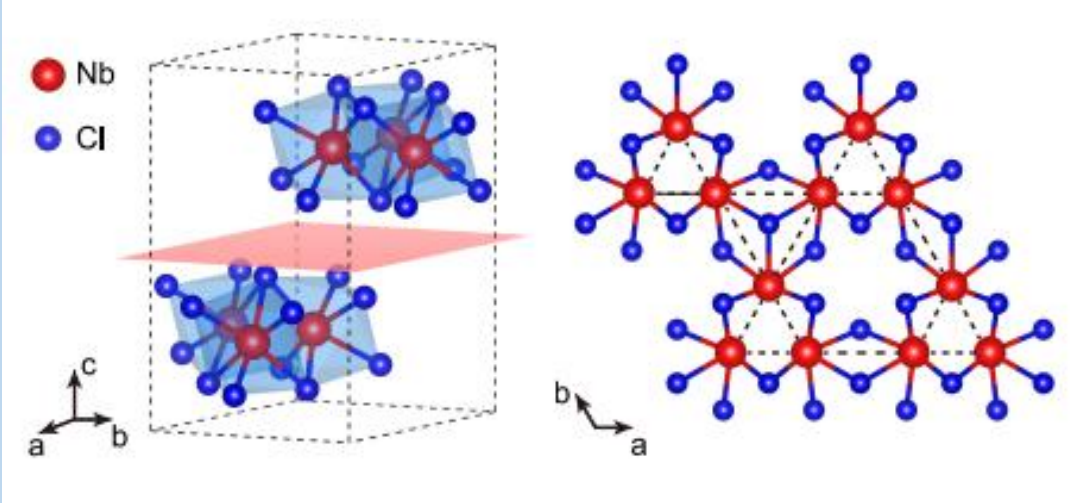
- 狄拉克锥：打开能隙（中心对称破缺）
- 平带：仍然存在（镜面对称保留）

笼目半导体（Kagome semiconductor）

器件应用：通过门电压调控平带的开关

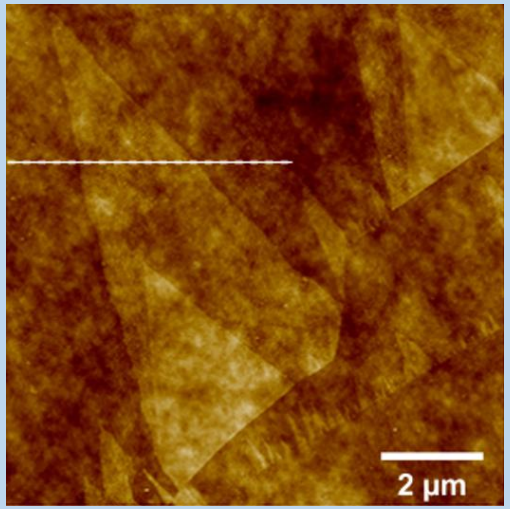
平带体系

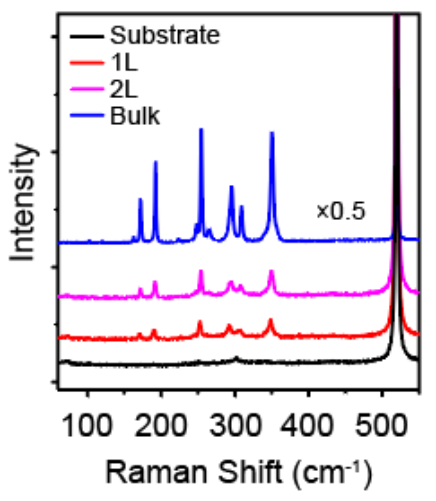
Nb_3Cl_8：第一种笼目半导体



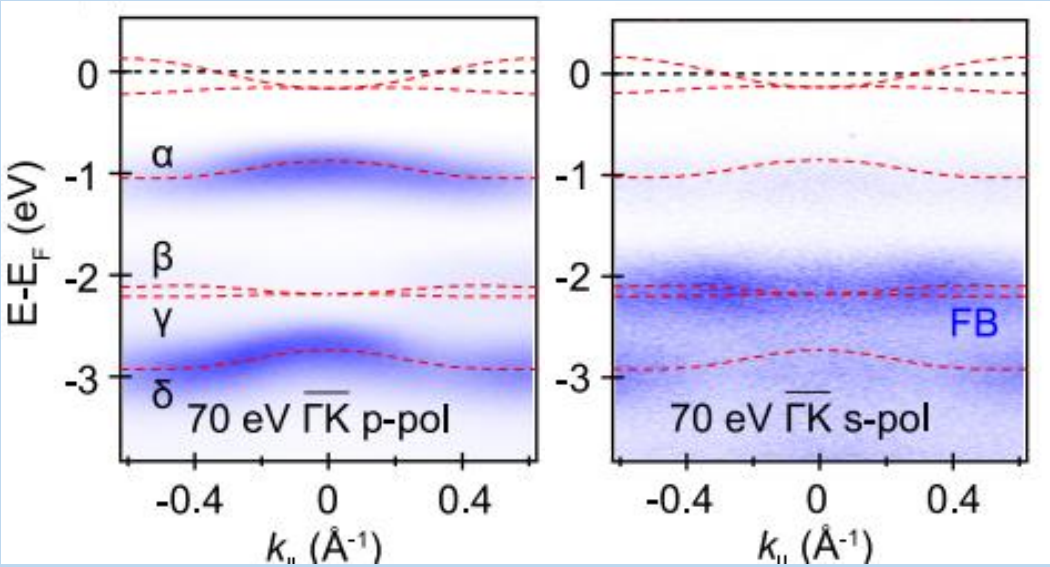
孙振宇
本科：兰州大学
博士研究生国家奖学金
去向：美国布朗大学

单层Nb_3Cl_8的机械剥离



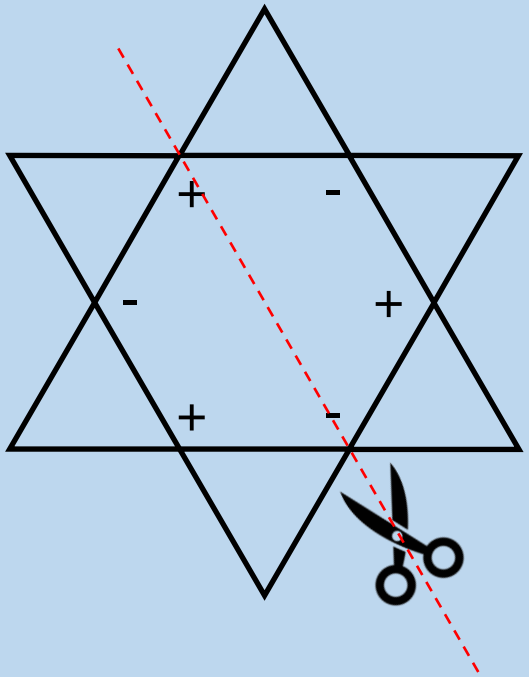


ARPES测量结果

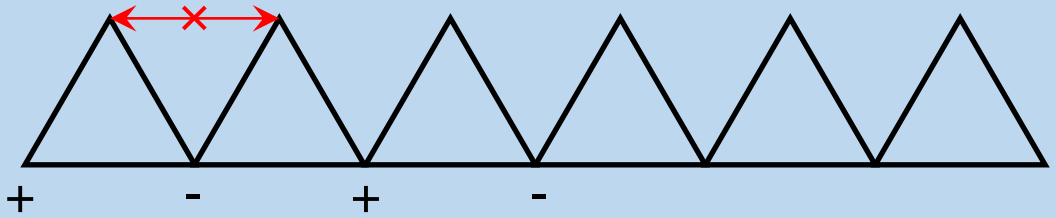


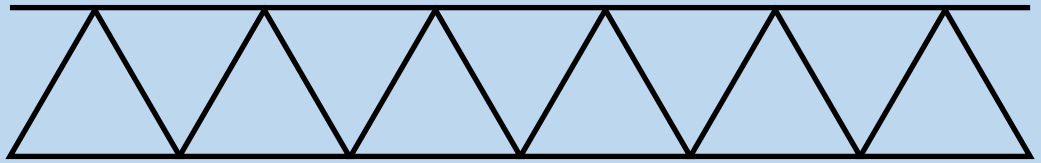
一维平带材料

Kagome Lattice

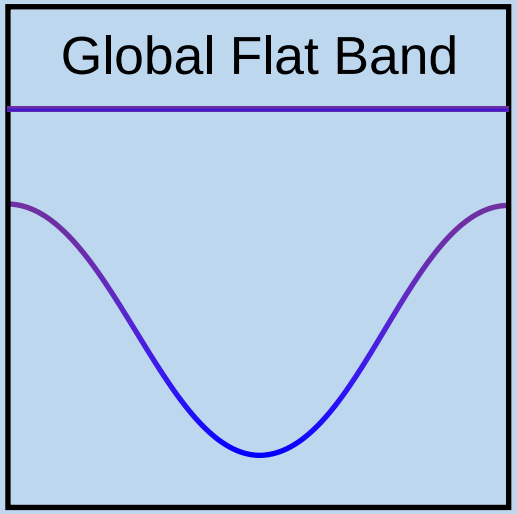


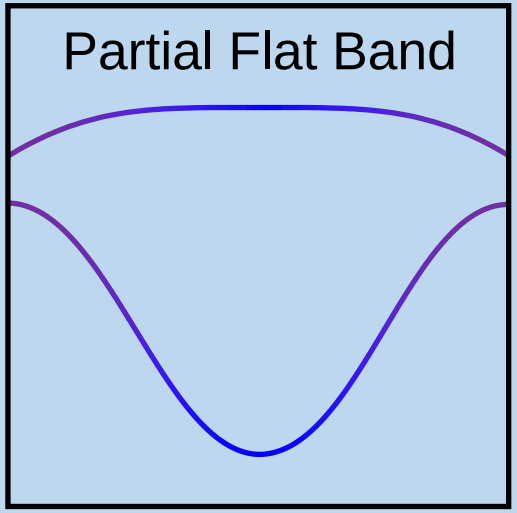
Sawtooth Lattice





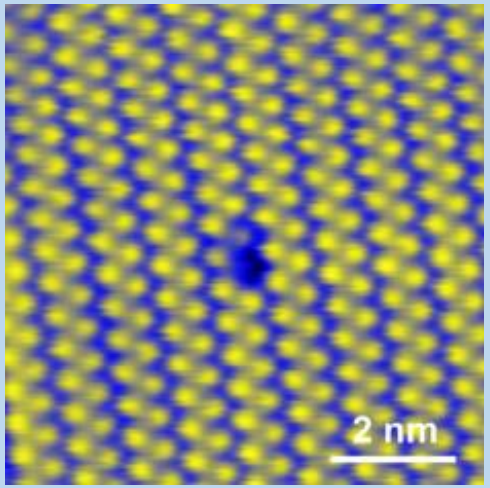
Zigzag Lattice



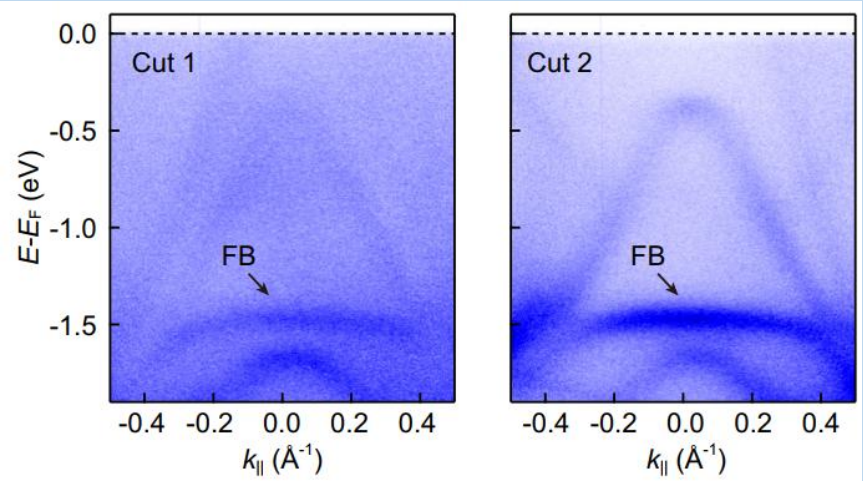


一维CuTe链中的拓扑平带

一维CuTe链的实验合成：



STM topography



ARPES measurements

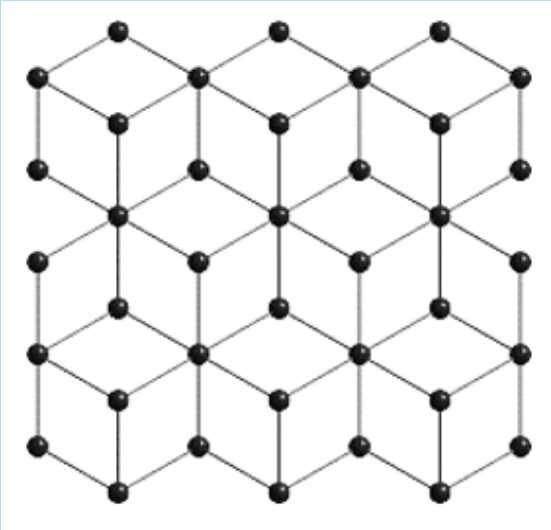
高纪松
(2025年夏季毕业)
本科：南开大学

- **铜原子组成了一维zigzag晶格**
- **理论计算表面其中存在一维平带**

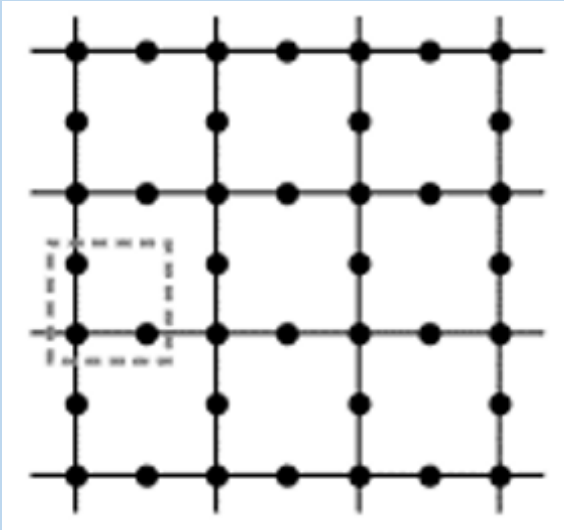
J. Gao...**B. Feng***, Phys. Rev. Lett. 134, 086202 (2025).

其他拓扑平带材料

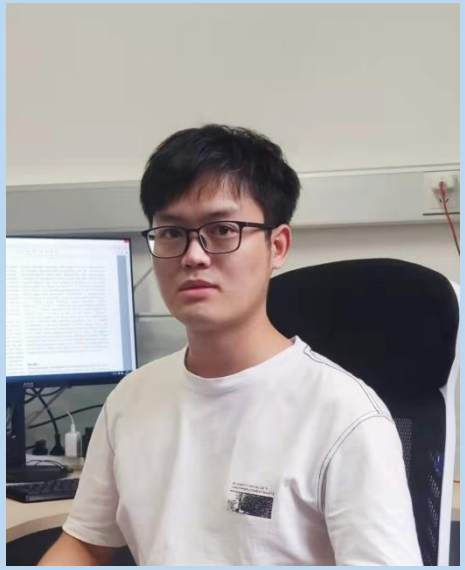
理论预言的具有平带的阻挫晶格



Dice

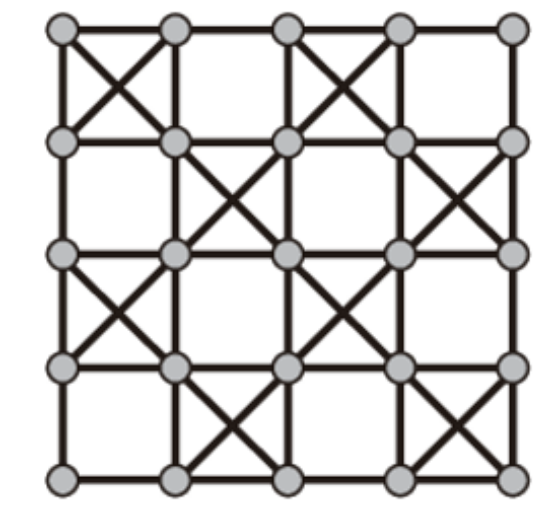


Lieb



胡学高（2025夏季毕业）
本科：北京航空航天大学
获奖：所长奖学金特优奖、朱李月华优秀博士生奖

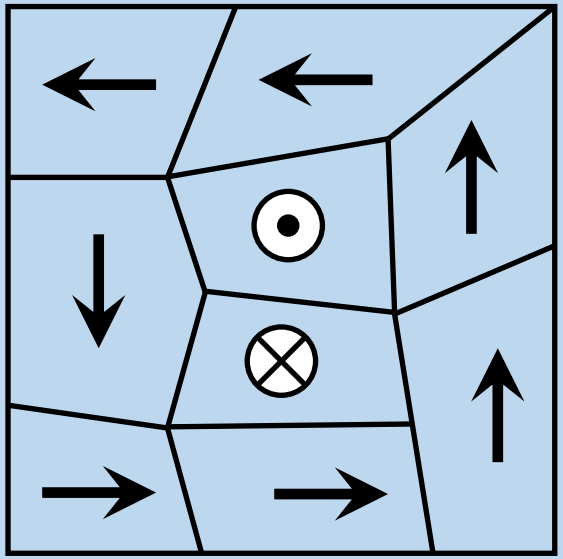
除了笼目晶格以外，能否实现具有平带的阻挫晶格?



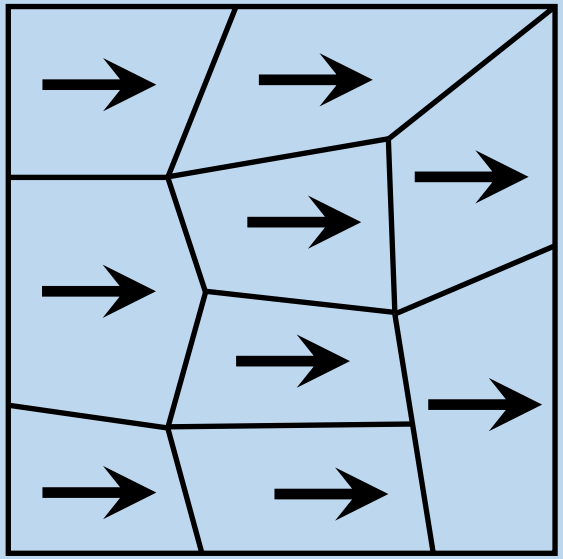
Checkerboard

二维多铁材料

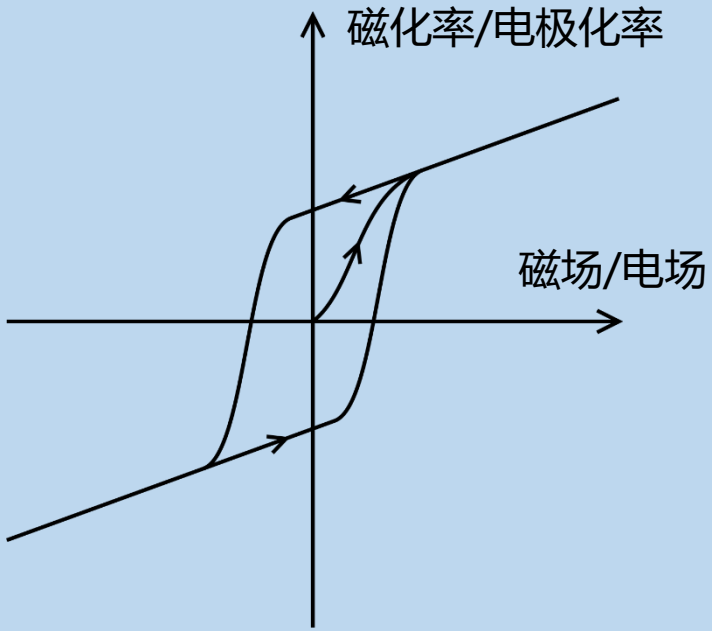
铁电和铁磁材料

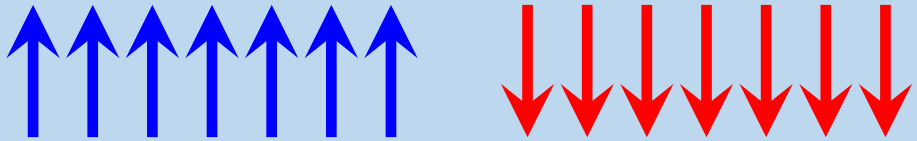


No net polarization/magnetization

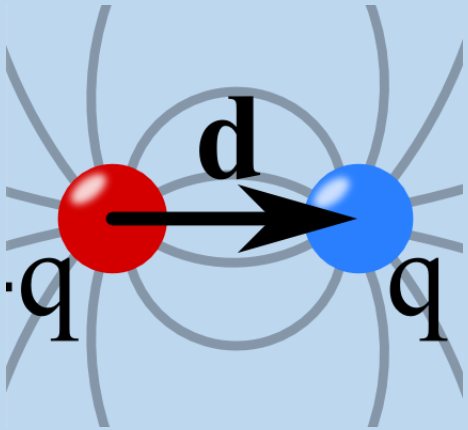


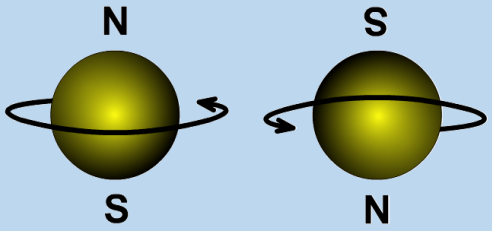
Net polarization/magnetization





电子自旋极化方向或电极距方向

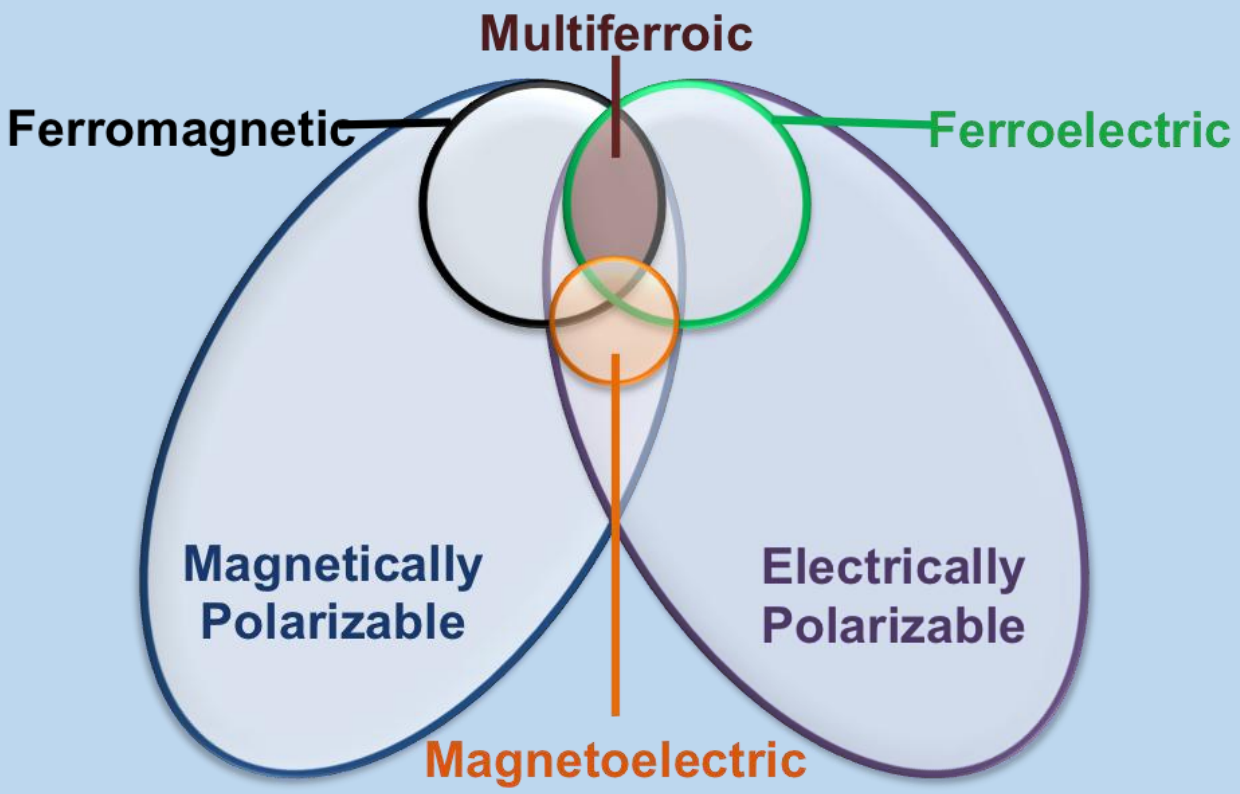


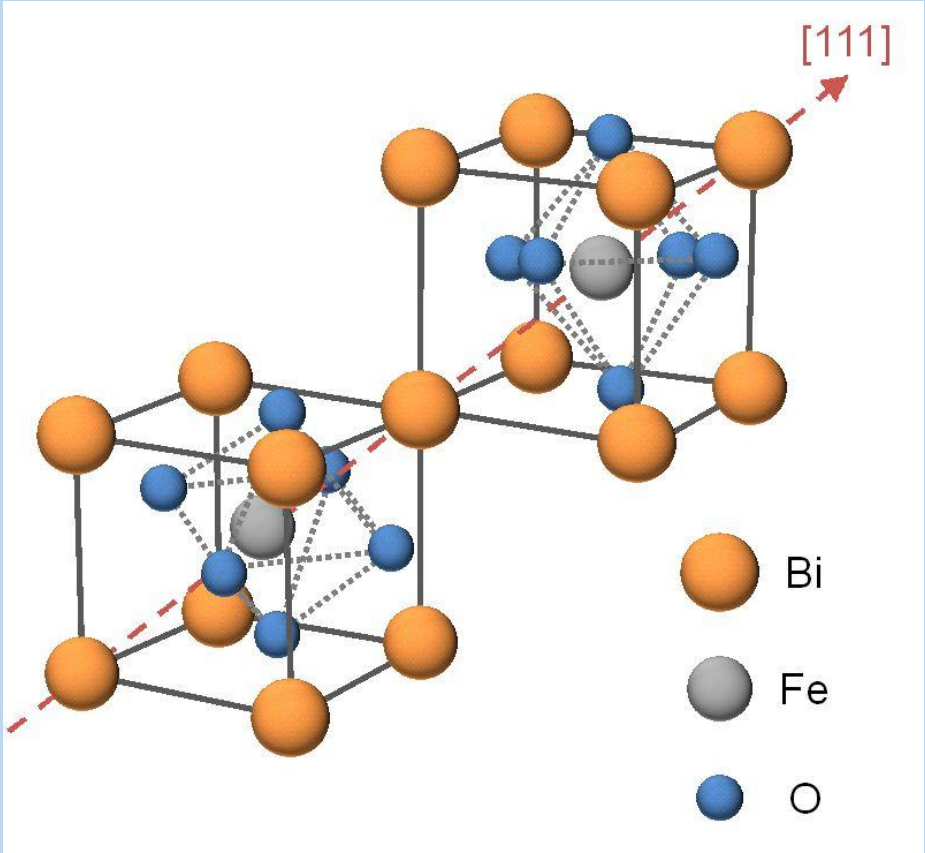


二维多铁材料

多铁材料：

铁磁和铁电序共存



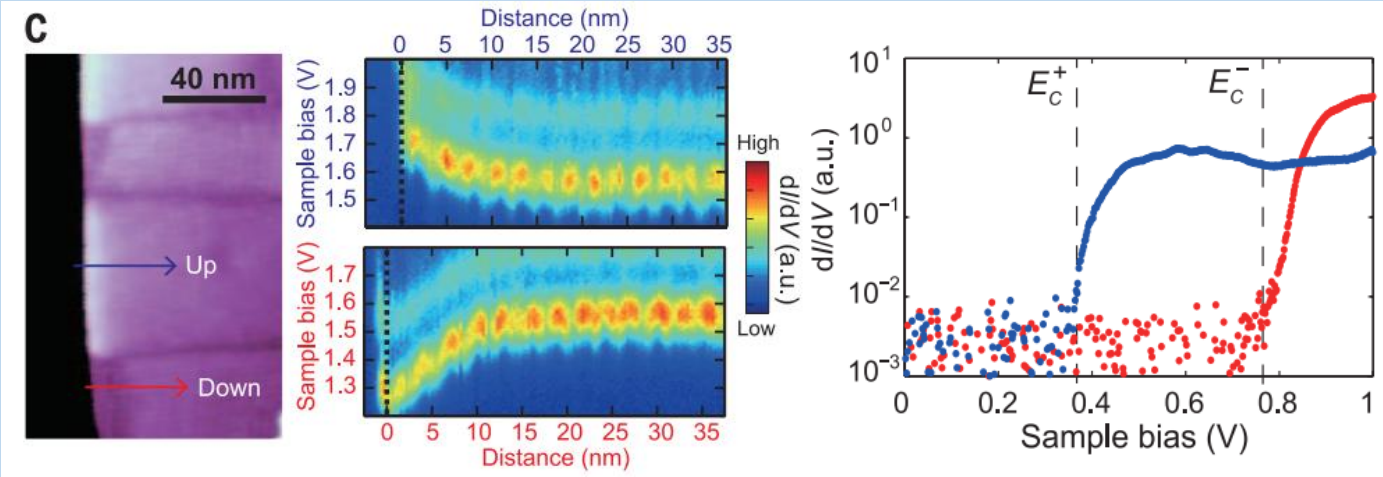


$BiFeO_3$

二维多铁材料

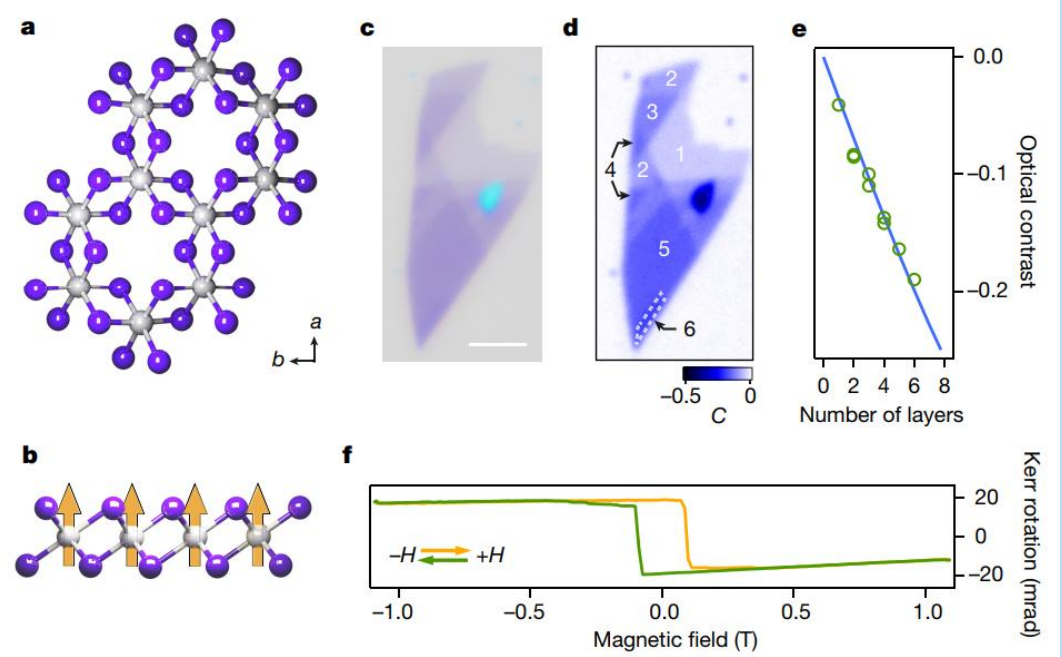
二维铁电和二维铁磁近年来才有实验突破

近年来的研究热点



单层SnTe中的二维铁电性质

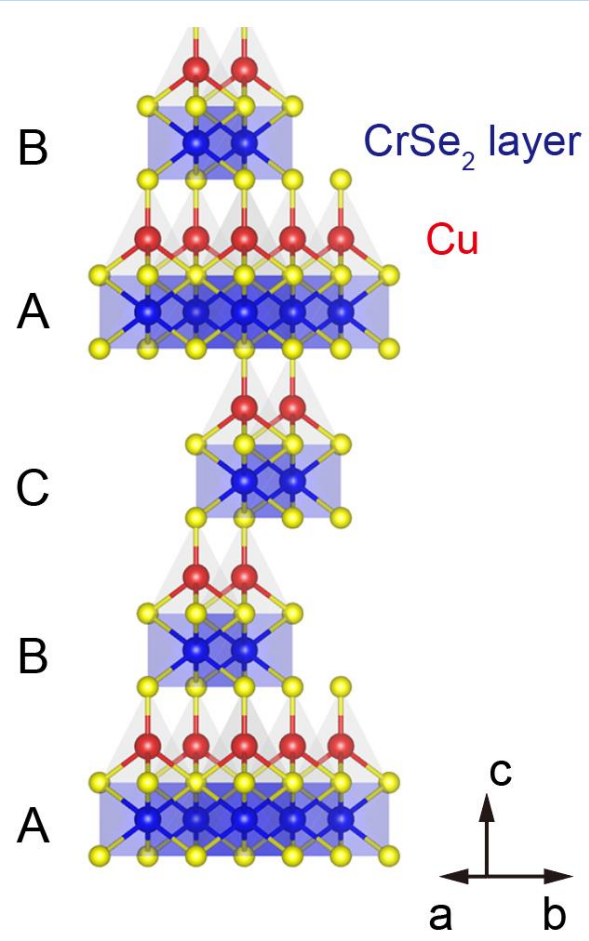
K. Chang, *et al.* Science **353**, 274 (2016).

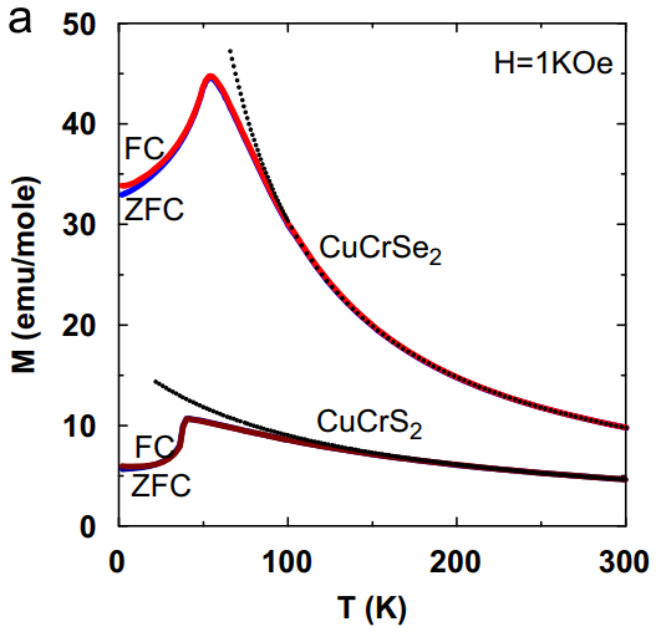


单层CrI_3中的二维铁磁性

B. Huang, *et al.* Nature **546**, 270 (2017).

二维多铁材料





块材$CuCrSe_2$是反铁磁

T_N~55 K.

孙振宇（2023年毕业）

本科：兰州大学

博士研究生国家奖学金

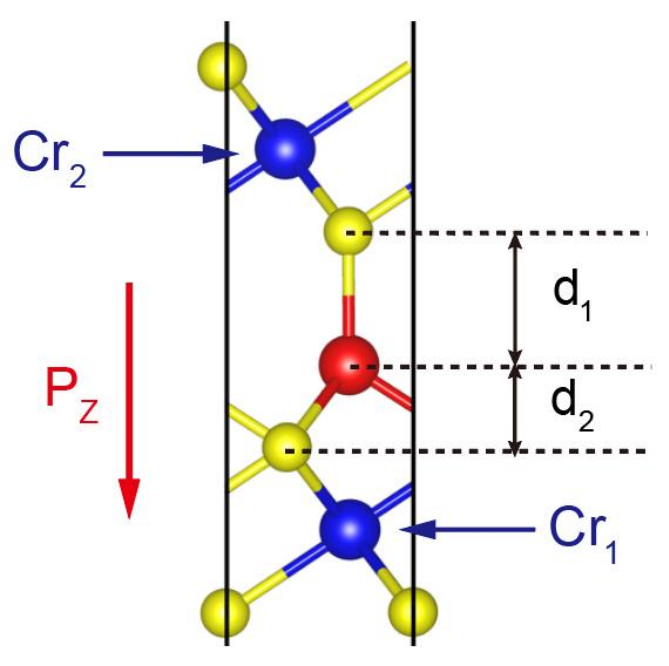
去向：美国布朗大学

$CuCrSe_2$

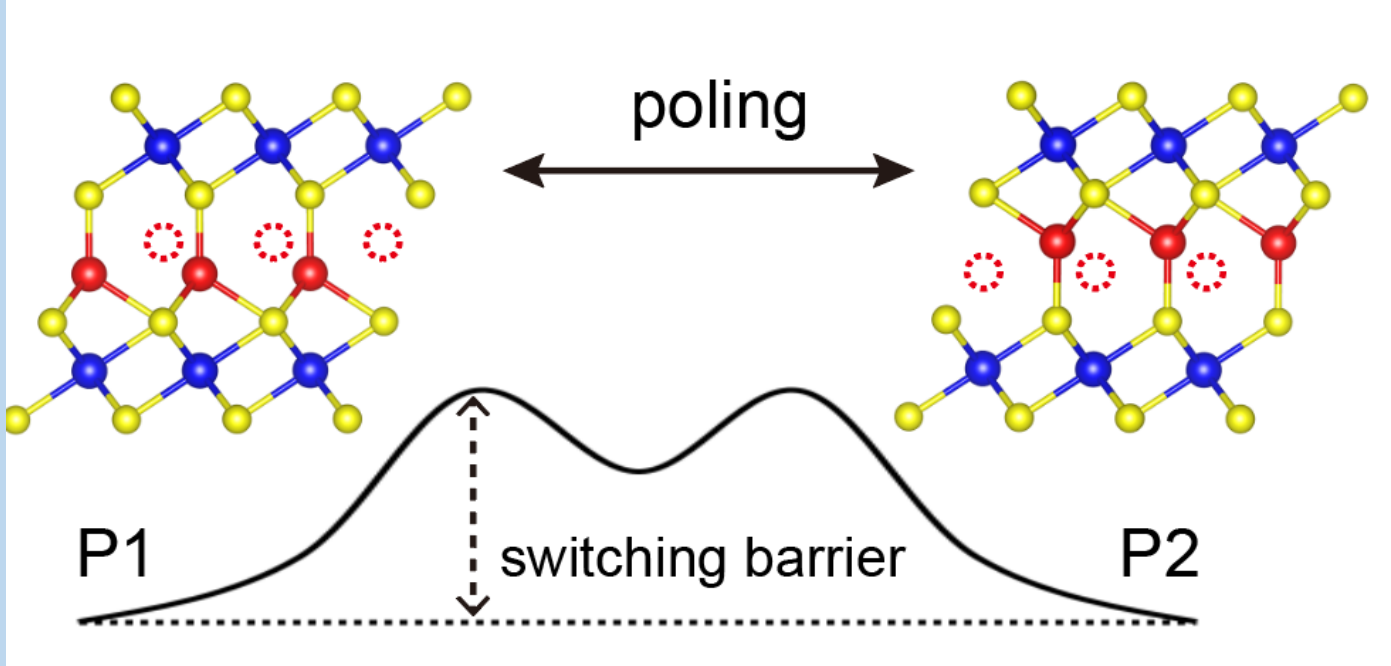
G. C. Tewari, et al. J. Solid State Chem. 198, 108 (2013).

二维多铁材料

结构支持自发电极化：



空间反演对称性破缺

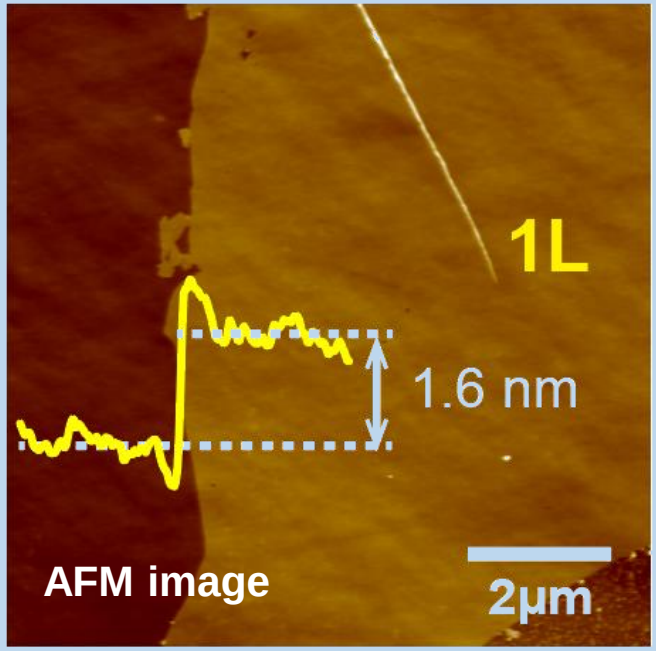


两种可能的Cu原子位置

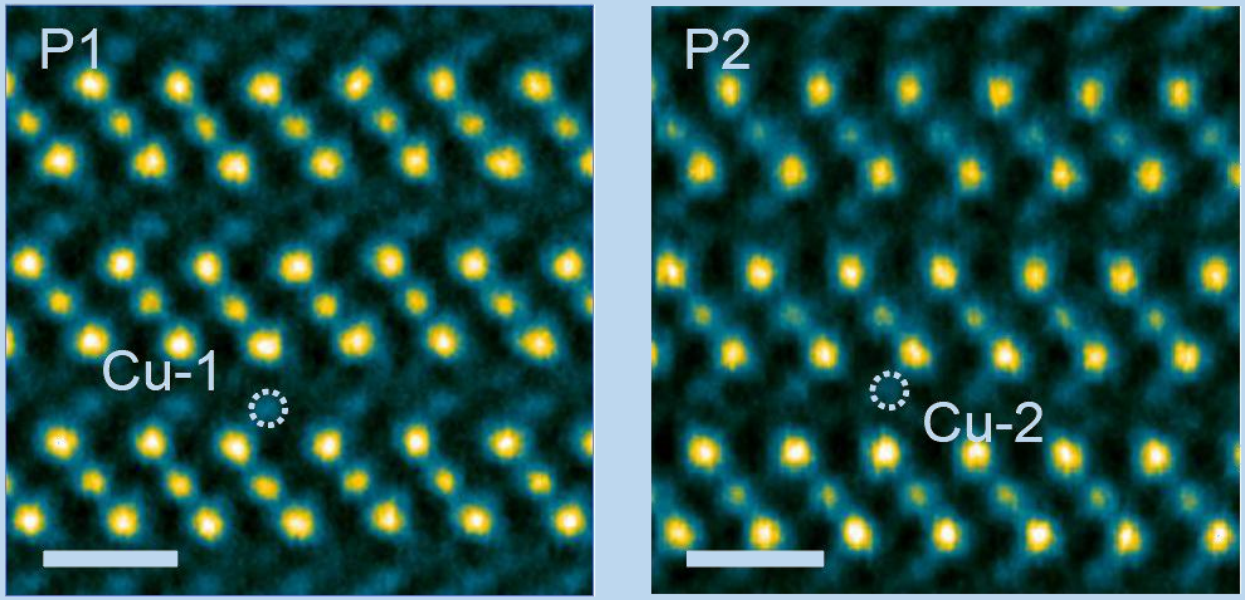
Z. Sun...**B. Feng***, Nat. Commun. 15, 4252 (2024).

二维多铁材料

室温铁电性的确认



透射电镜观测两种Cu原子



直接观测到两种Cu原子

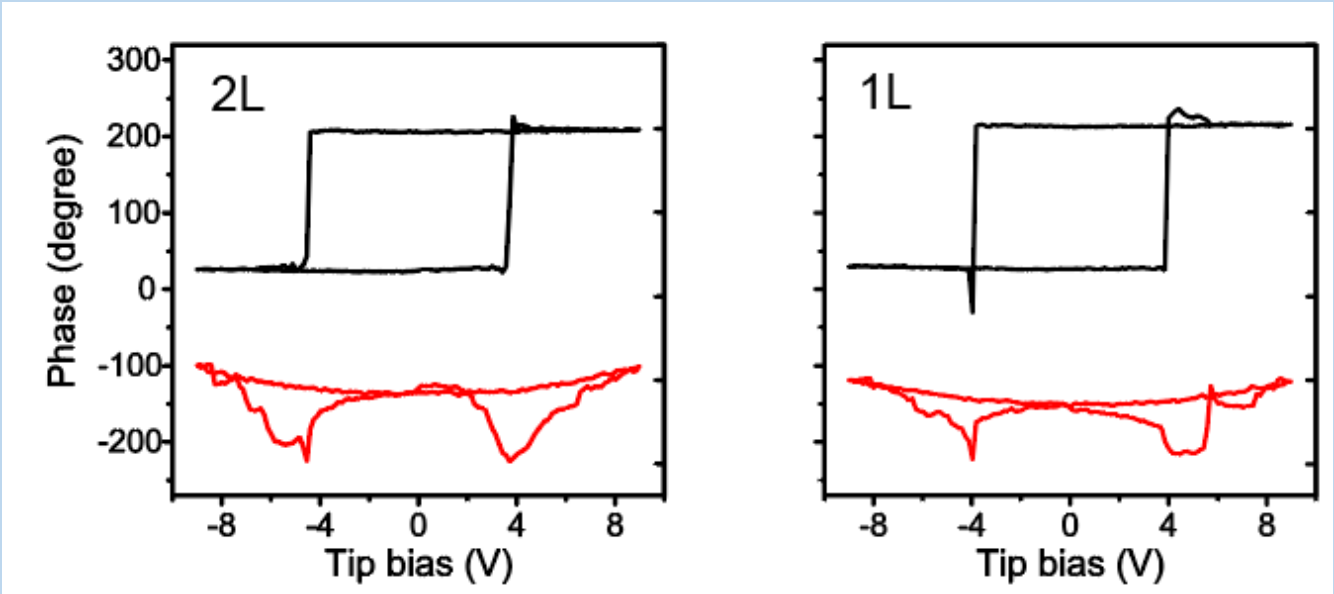
- AMX_2 家族材料的化学剥离
- 可获得超薄$CuCrSe_2$，可到单层。

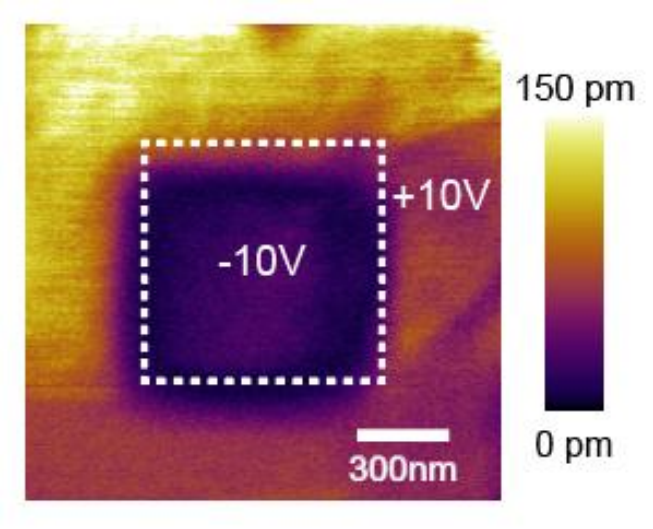
Z. Sun...**B. Feng***, Nat. Commun. 15, 4252 (2024).

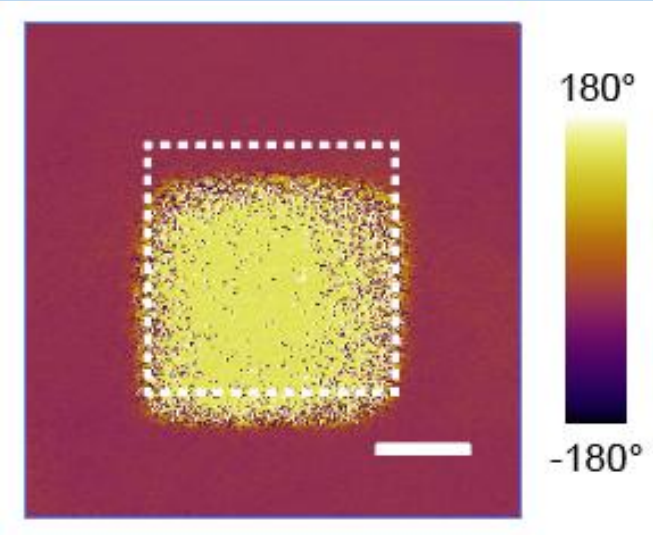
二维多铁材料

室温铁电性的确认

压电力显微镜PFM测量



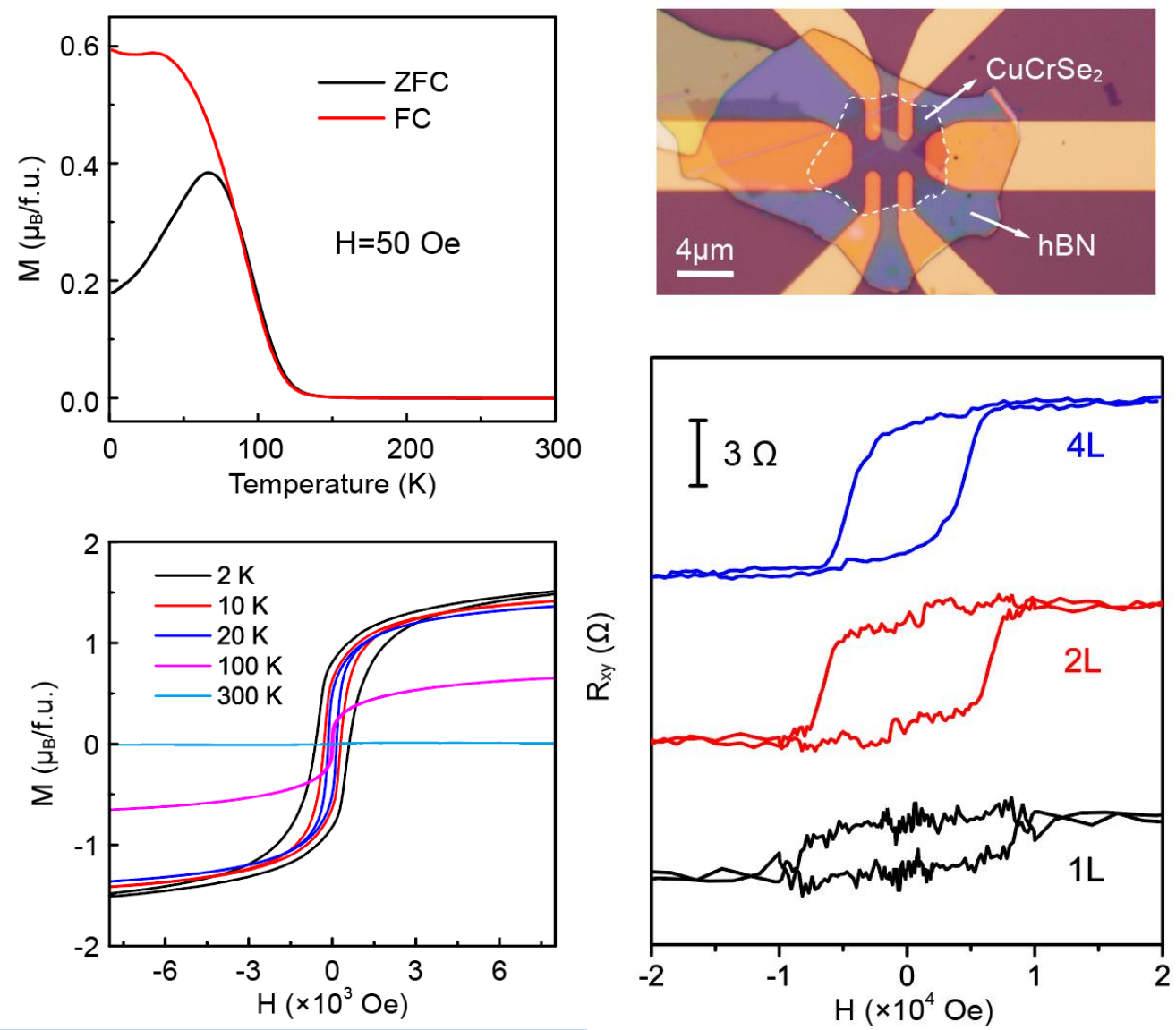




Z. Sun...**B. Feng***, Nat. Commun. 15, 4252 (2024).

二维多铁材料

单层$CuCrSe_2$的二维铁磁性



- 发现了一种二维多铁材料；
- 铁电转变温度超过室温；
- 铁磁转变温度：~120 K；
- 潜在应用价值。

Z. Sun...**B. Feng***, Nat. Commun. 15, 4252 (2024).

报告内容

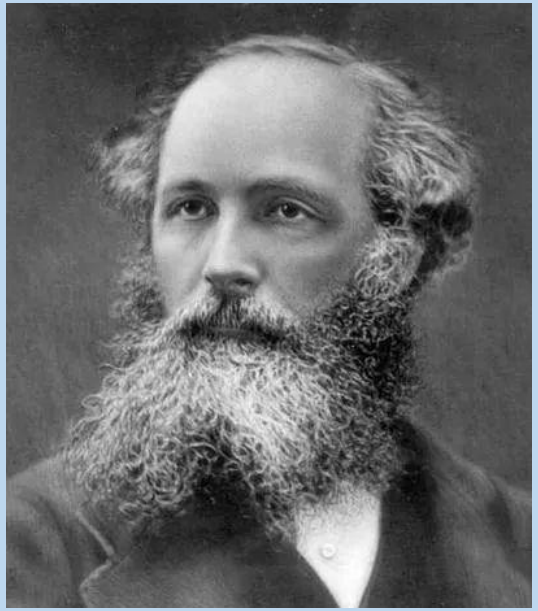
1. 研究手段

2. 研究实例：硅烯、硼烯、笼目晶格、二维多铁材料

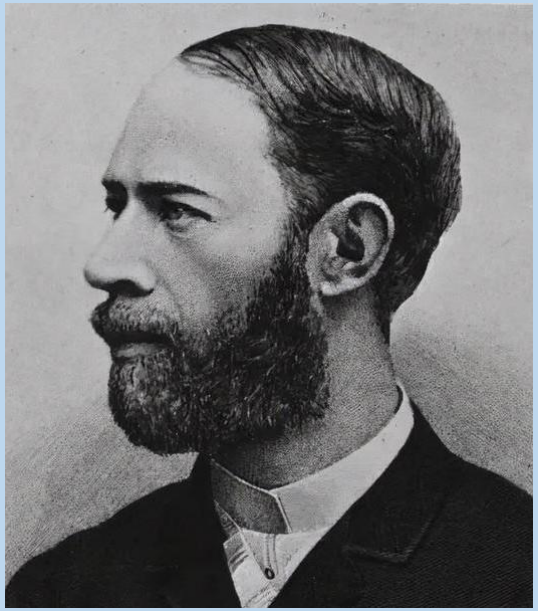
3. 新型实验技术研发

仪器研发：科学进步的动力

电磁波：



麦克斯韦（1864）



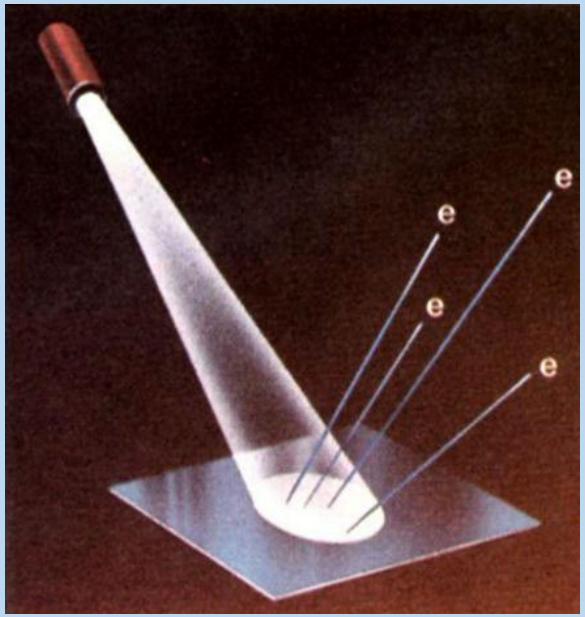
赫兹（1886）

马可尼（1895）

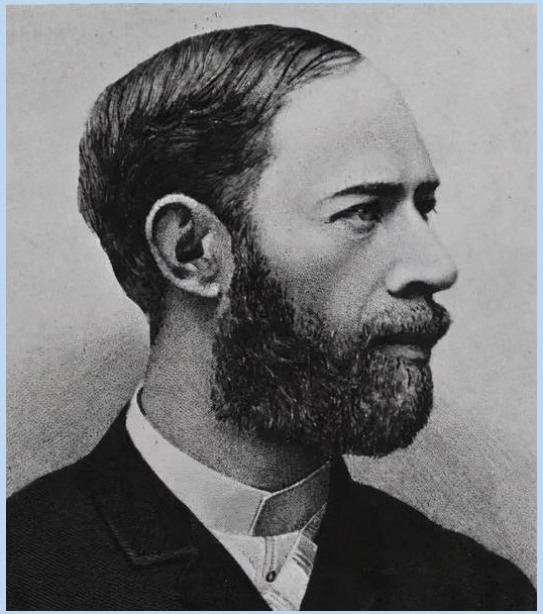
电磁波已经广泛应用于通信、雷达、卫星、导航、定位、侦查等各个领域。

仪器研发：科学进步的动力

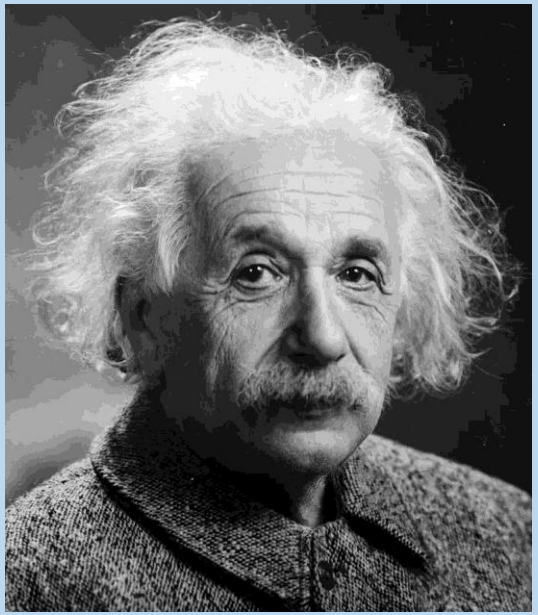
光电效应：



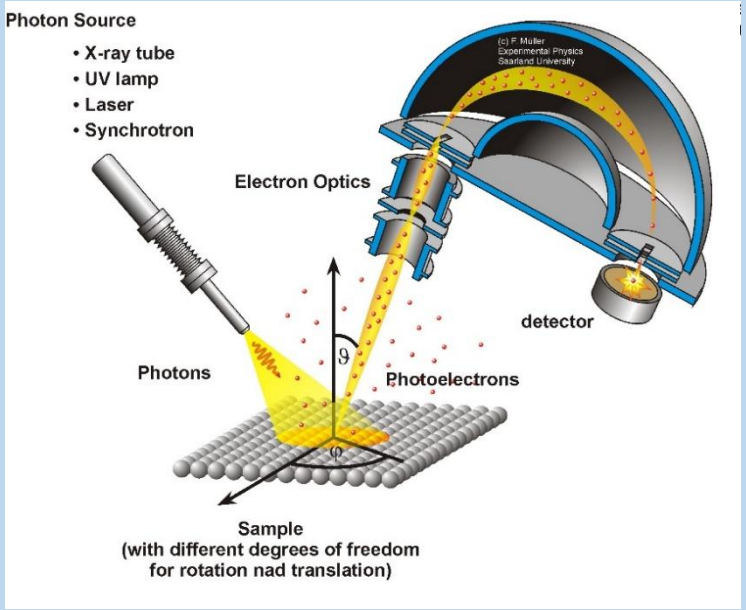
光电效应



发现：赫兹，1886



解释：爱因斯坦，1905



ARPES（1970年以来）

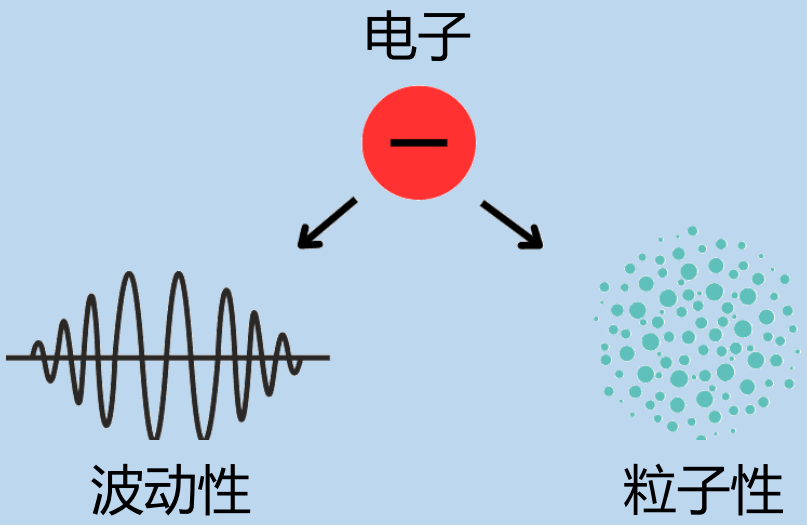
当年的遇到的困难：
材料能带结构的确认

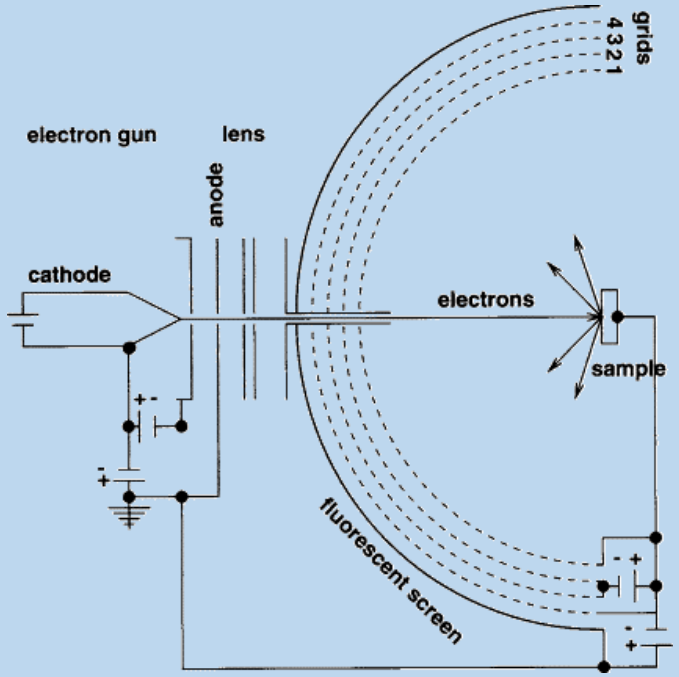
仪器公司：Scienta、SPECS

仪器研发：科学进步的动力

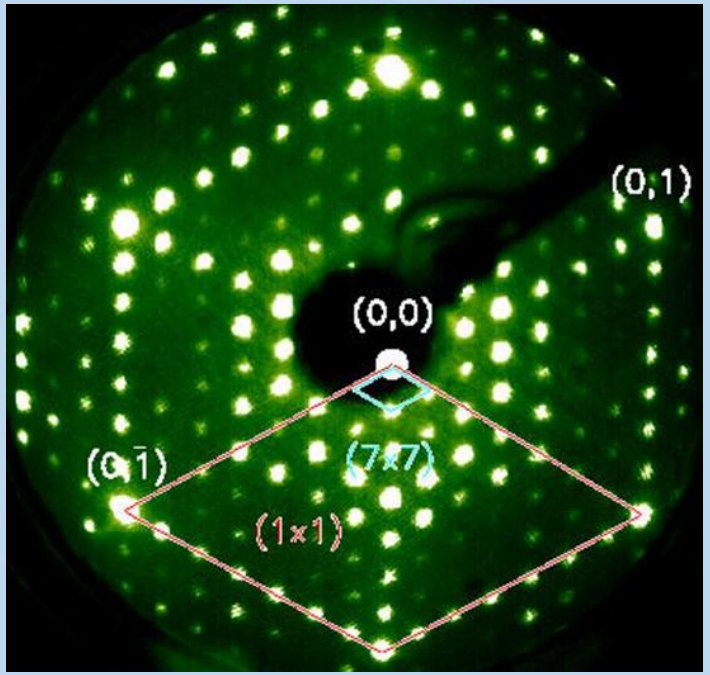
量子力学的几个基本概念（薛定谔方程，1926）：

电子的波动性（扫描电子显微镜、透射电子显微镜、低能电子衍射）





低能电子衍射（LEED）



Si(111)-7×7

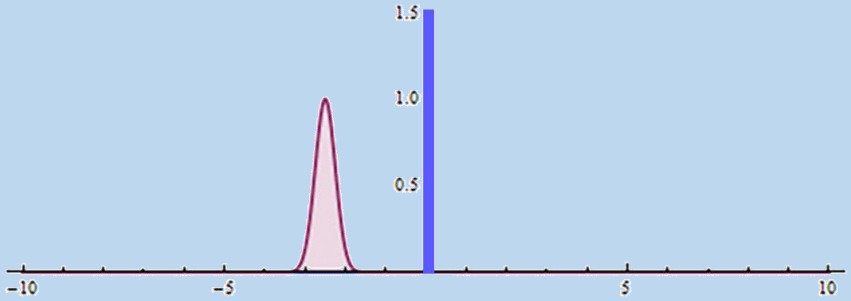
当年的遇到的困难：
材料表面原子结构的确认

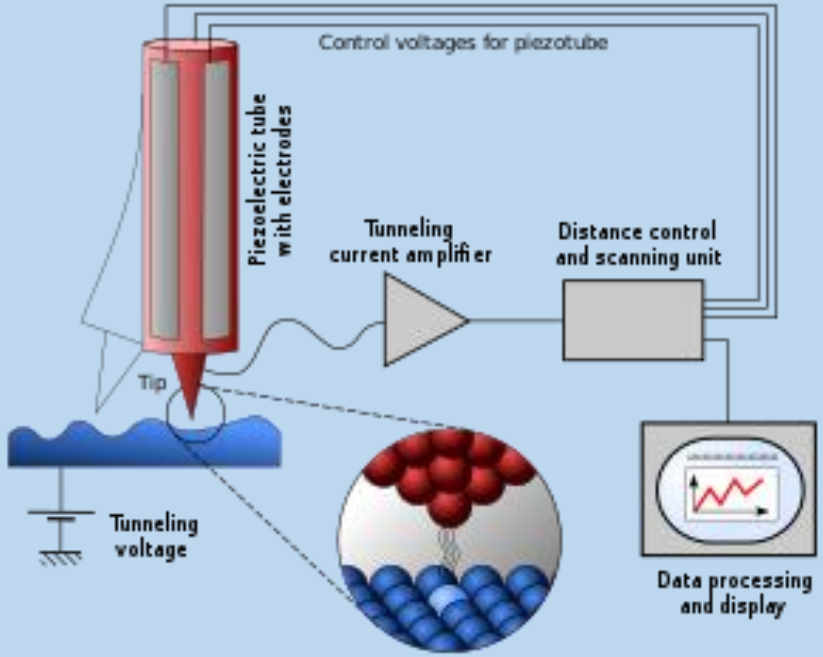
问题：LEED仅能探测表面周期，无法确认表面的原子结构。

仪器研发：科学进步的动力

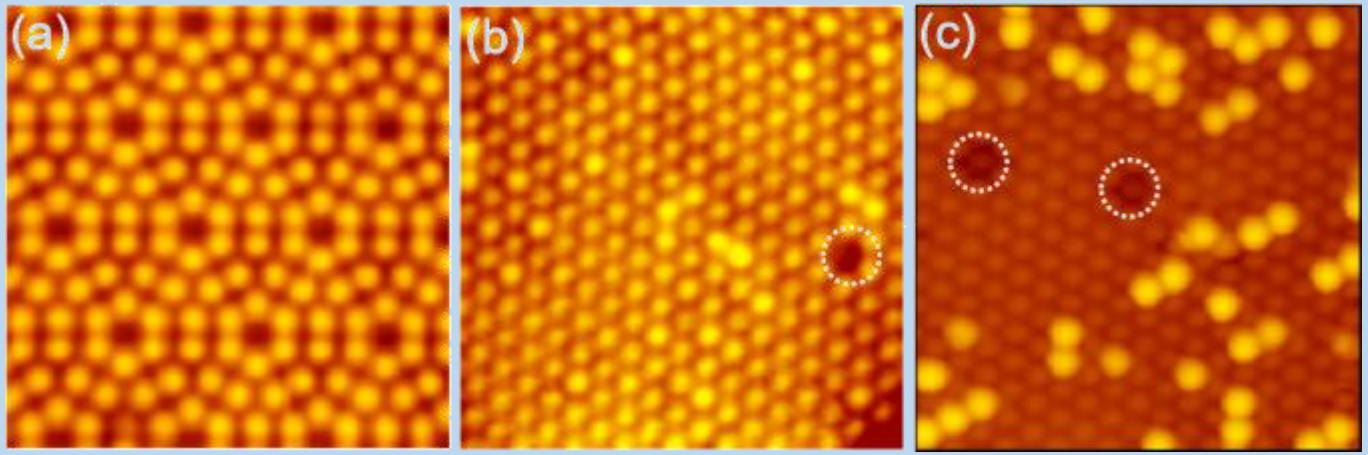
量子力学的几个基本概念（薛定谔方程，1926）：

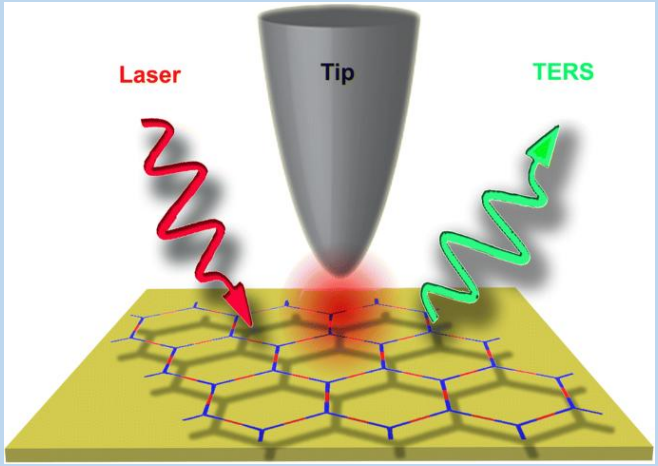
量子隧穿



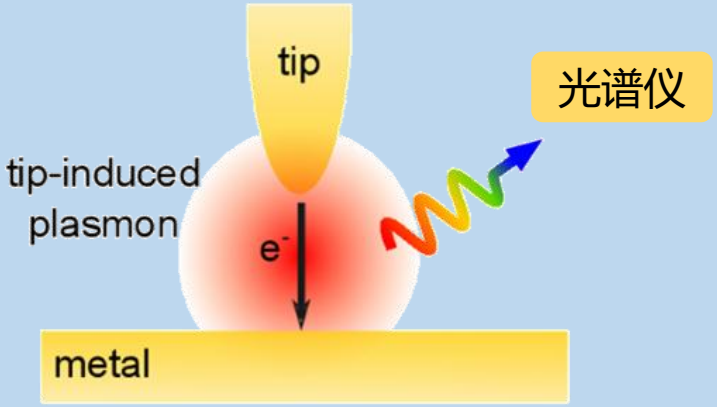


Si(111)-7×7以及Ga吸附





针尖增强拉曼光谱

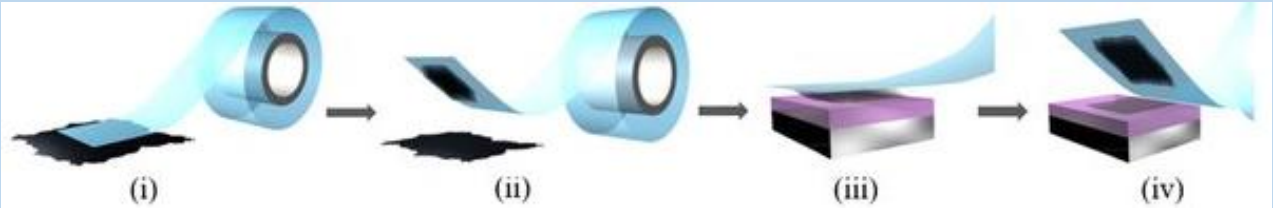


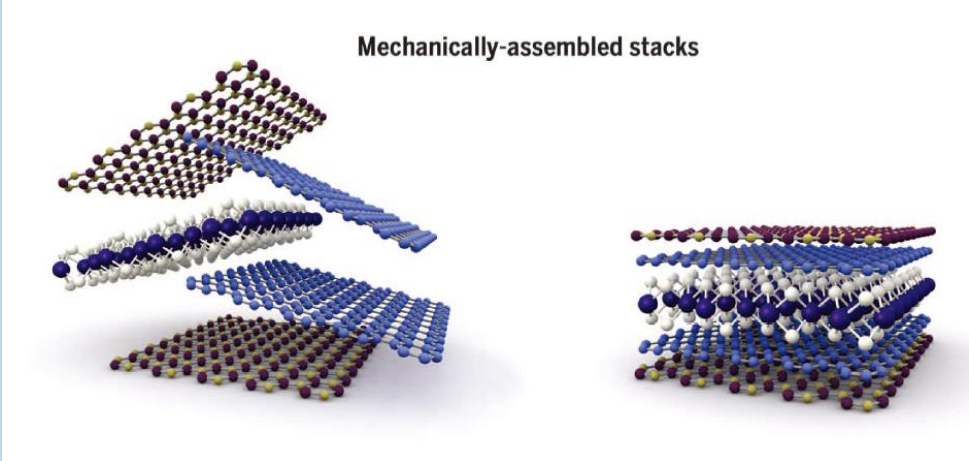
电致荧光

新技术1：超高真空剥离-堆垛技术

常用的二维材料制备方法：

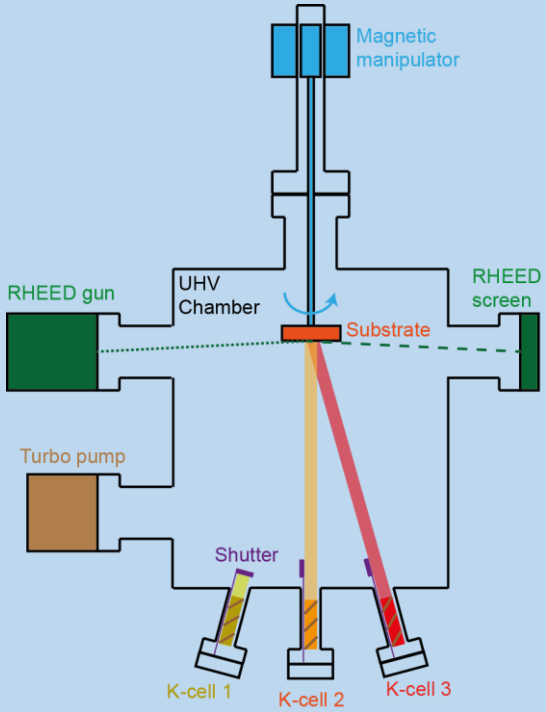
“自上而下”——机械剥离及干法堆叠





优势：灵活性高、样品质量高
问题：表界面污染、仅适用于层状材料

“自下而上”——外延生长

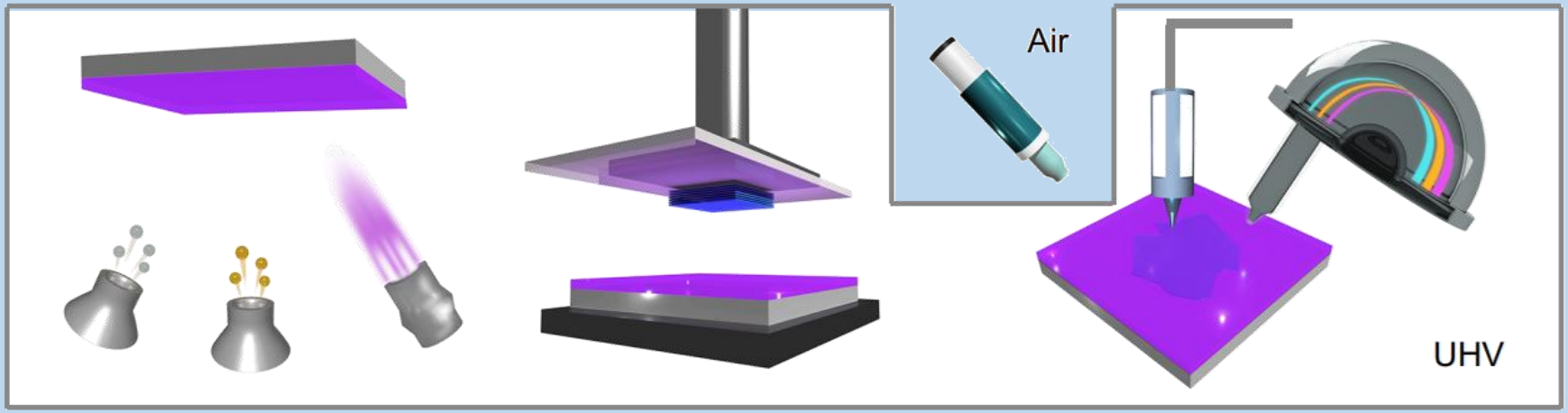


优势：均匀性好、层数/厚度可控
问题：受限于生长规律、探索过程耗时

新技术1：超高真空剥离-堆垛技术

问题：很多衬底表面无法长出我们想要的结构。

Si(111)表面无法长出MoS2、Bi-2221、FeSe



衬底处理
加热、生长…

机械剥离、
堆叠

ARPES、STM、
LEED、AES...

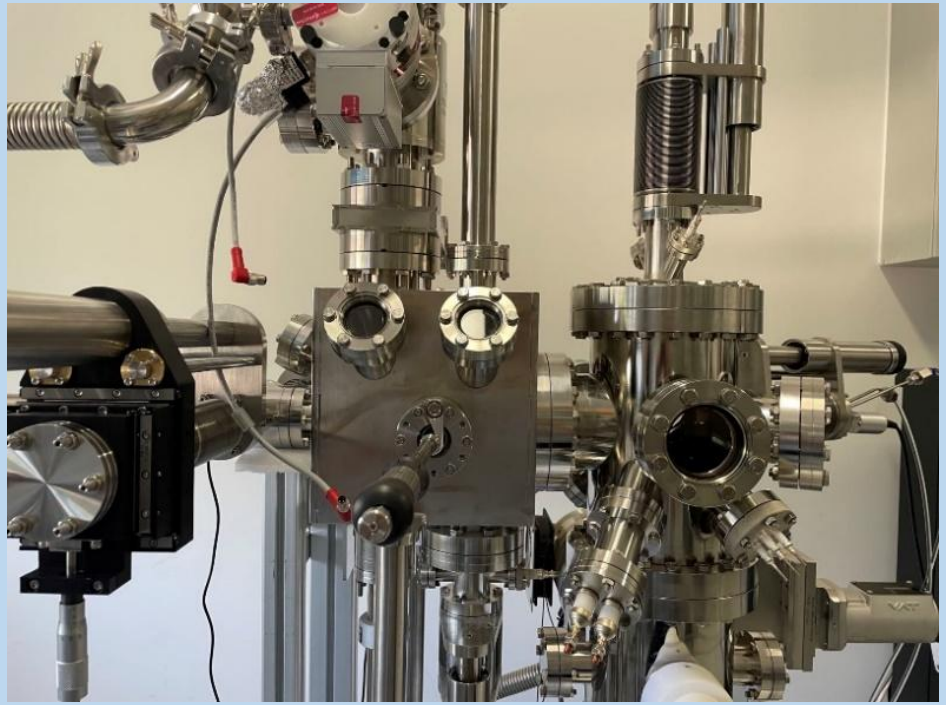
孙振宇（2023年毕业）
本科：兰州大学
博士研究生国家奖学金
去向：美国布朗大学

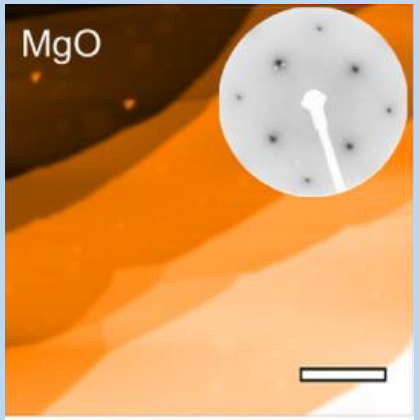
Z. Sun...**B. Feng**, Sci. Bull. 67, 1345 (2022).

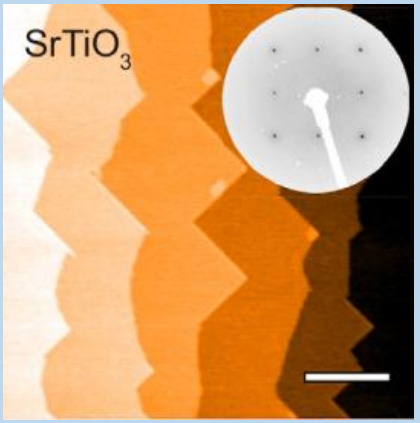
新技术1：超高真空剥离-堆垛技术

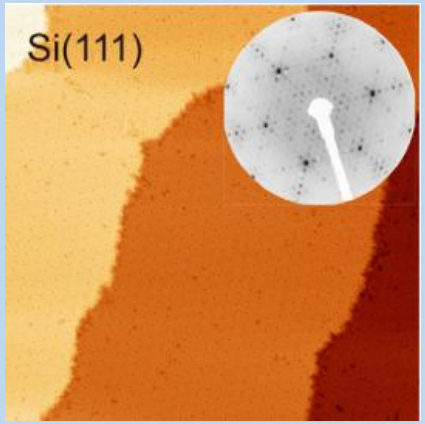
绕过生长动力学的限制，实现人工设计、构筑二维异质结构

自制的超高真空剥离-堆垛系统





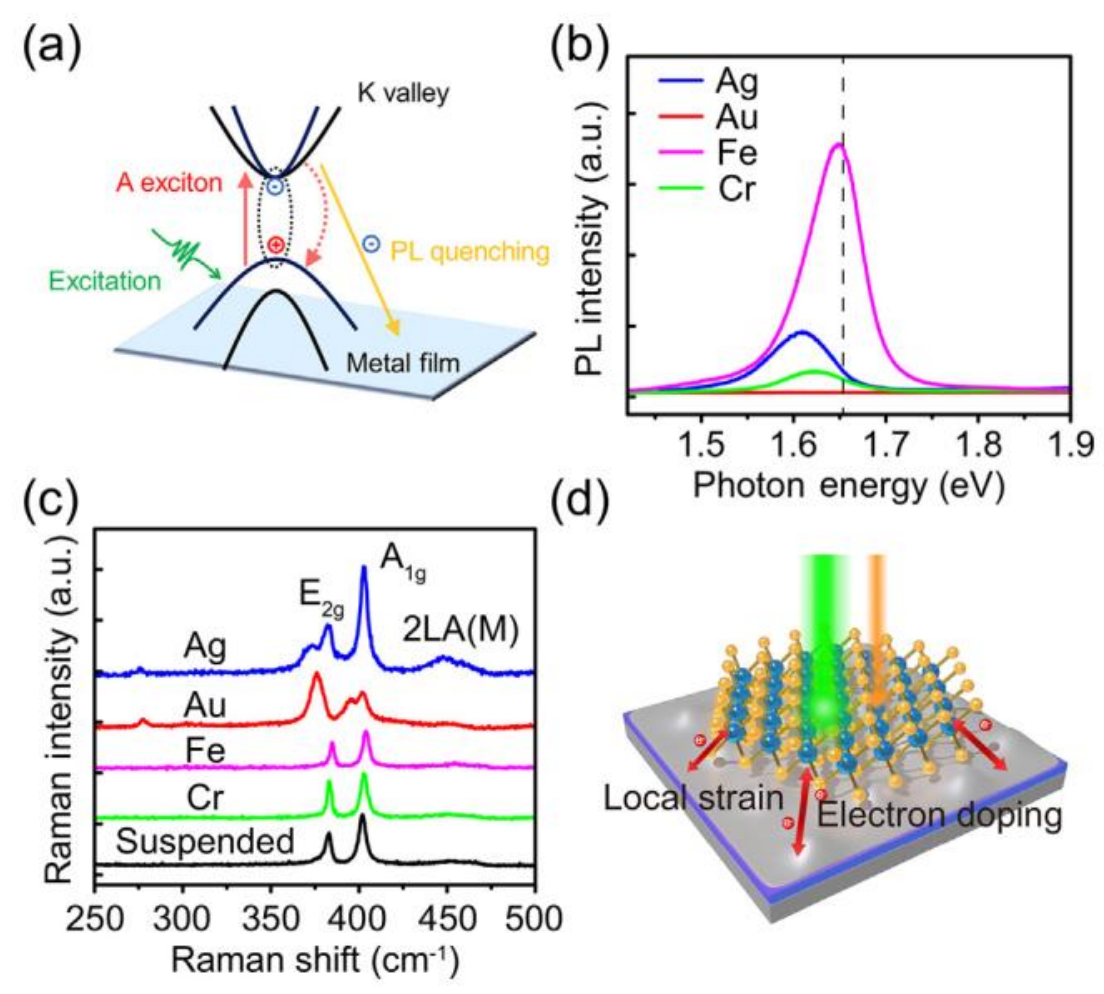




FeSe/STO　BSCCO/Si(111)

Z. Sun...**B. Feng**, Sci. Bull. 67, 1345 (2022).

新技术1：超高真空剥离-堆垛技术



MoS_2在不同衬底上的荧光和拉曼

中国发明专利申请号 202210633473X

申请人：中国科学院物理研究所

发明人：冯宝杰、吴克辉、孙振宇、黄元

发明名称：一种制备二维材料异质结的方法

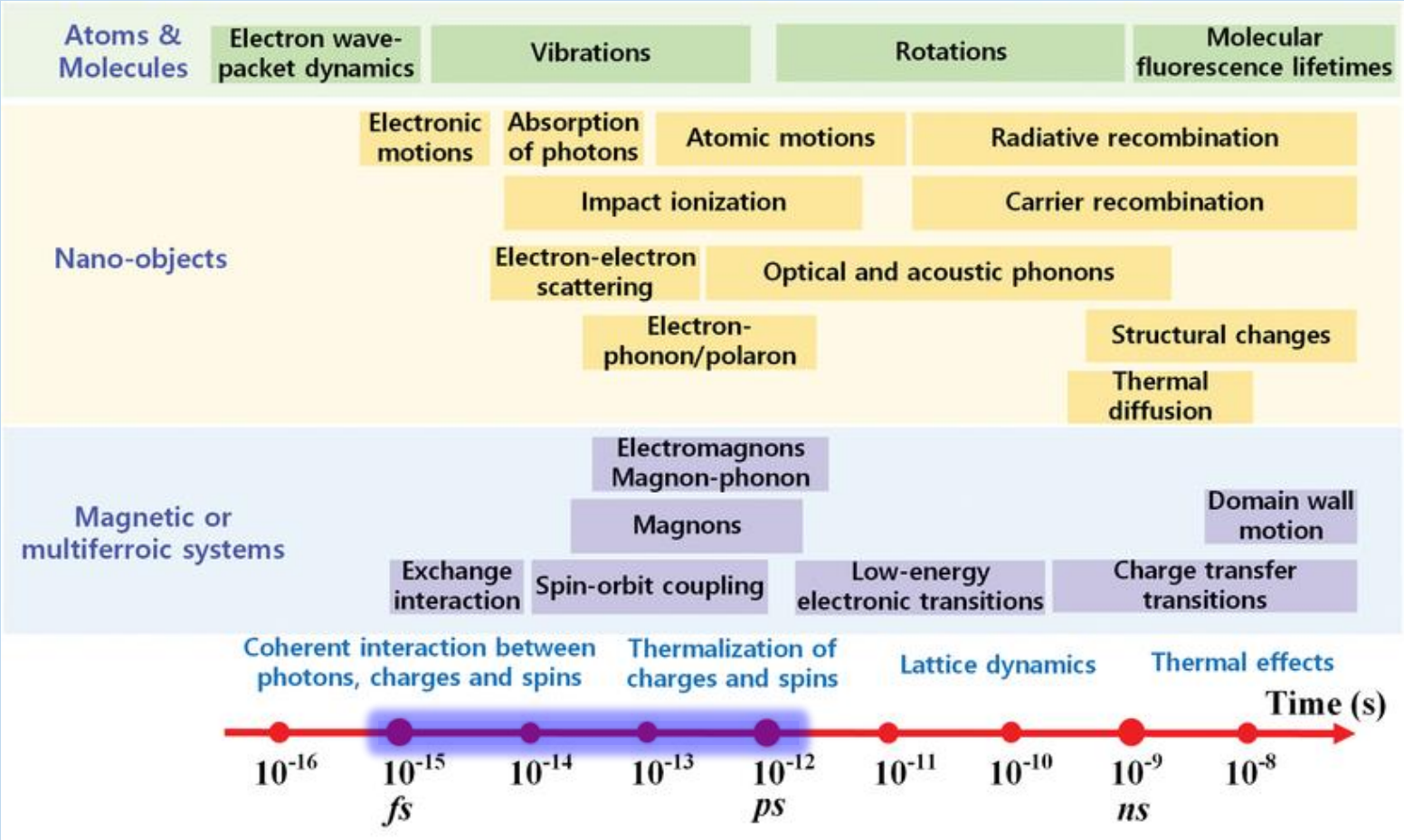
贵方卷号：SF09

我方卷号：DIC22110016

该技术已经实现商业化

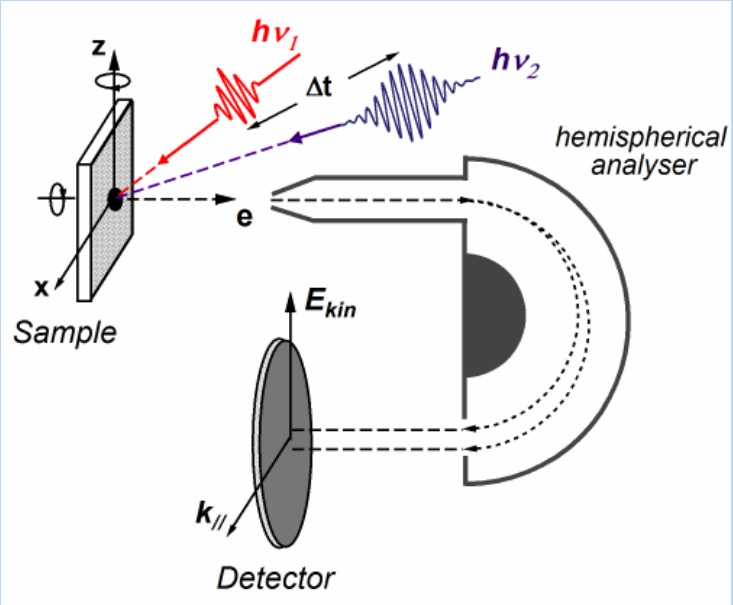
新技术2：极紫外时间分辨ARPES

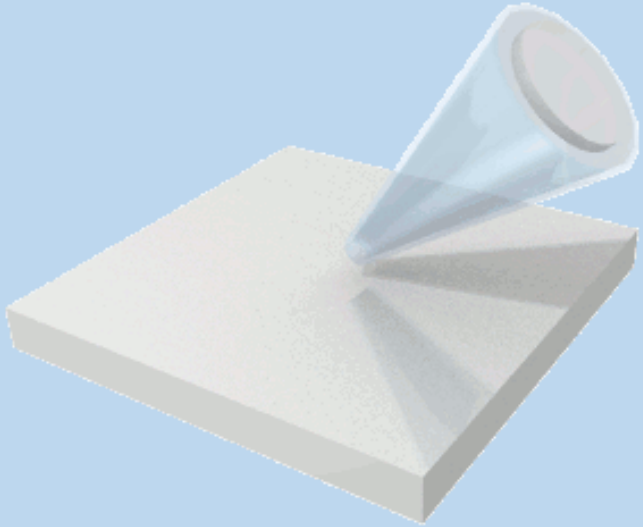
电子动力学过程，发生的时间尺度在飞秒到皮秒量级。



Y. Zhang, et al. Adv. Sci. (2021).

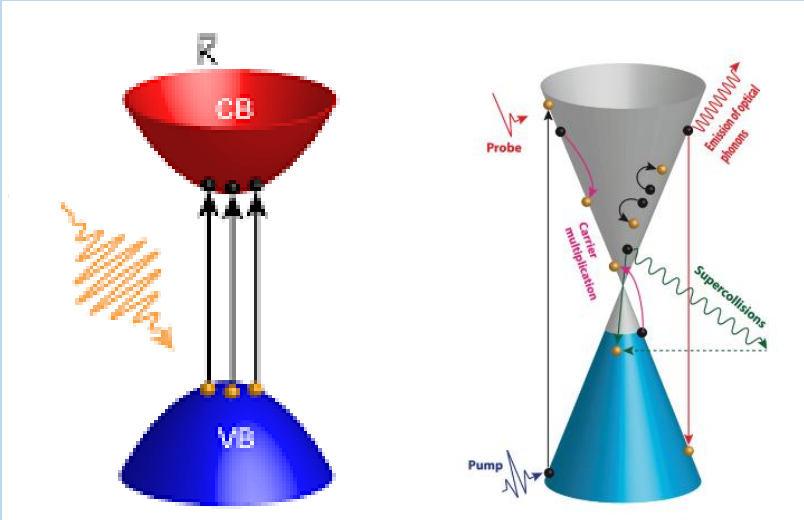
时间分辨ARPES（泵浦-探测技术）



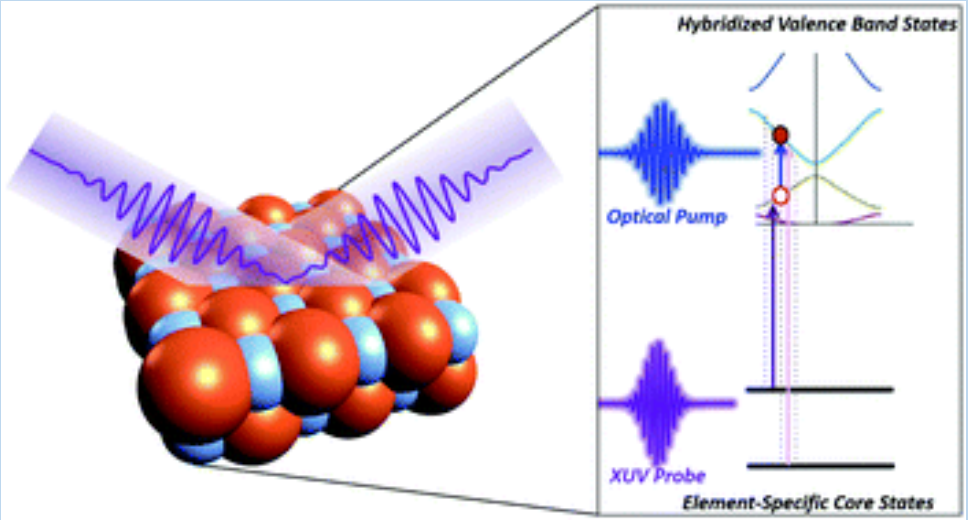


新技术2：极紫外时间分辨ARPES

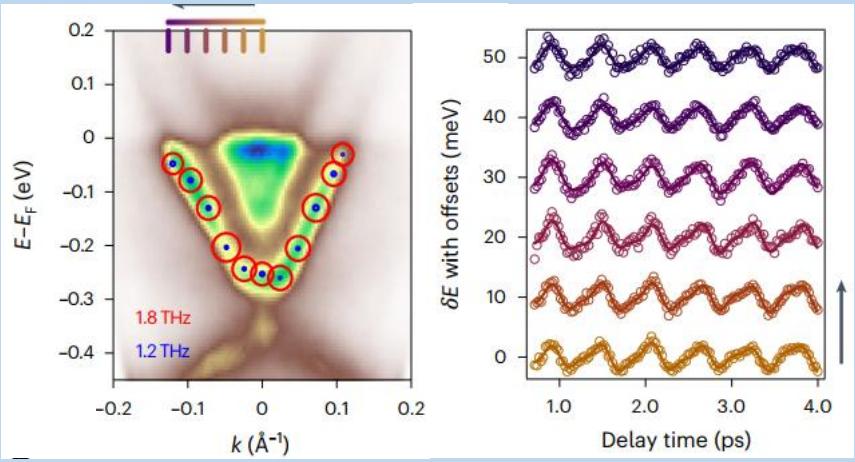
1. 费米面以上的电子态（上下）



2. 准粒子的动力学性质（动静）

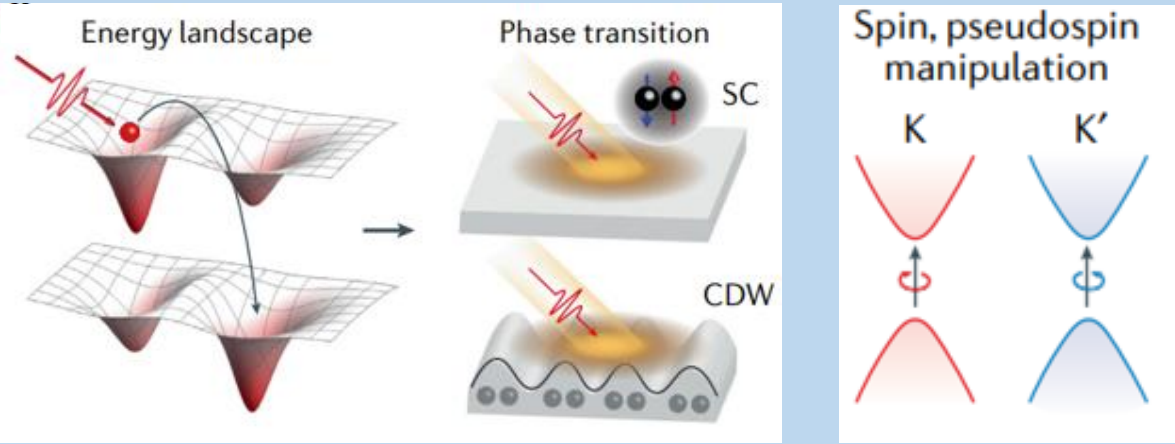


3. 时域/频域性质（声子等）



W. Lee, *et al.* Nat. Phys. 19, 950 (2023).

4. 光致相变（物性调控）



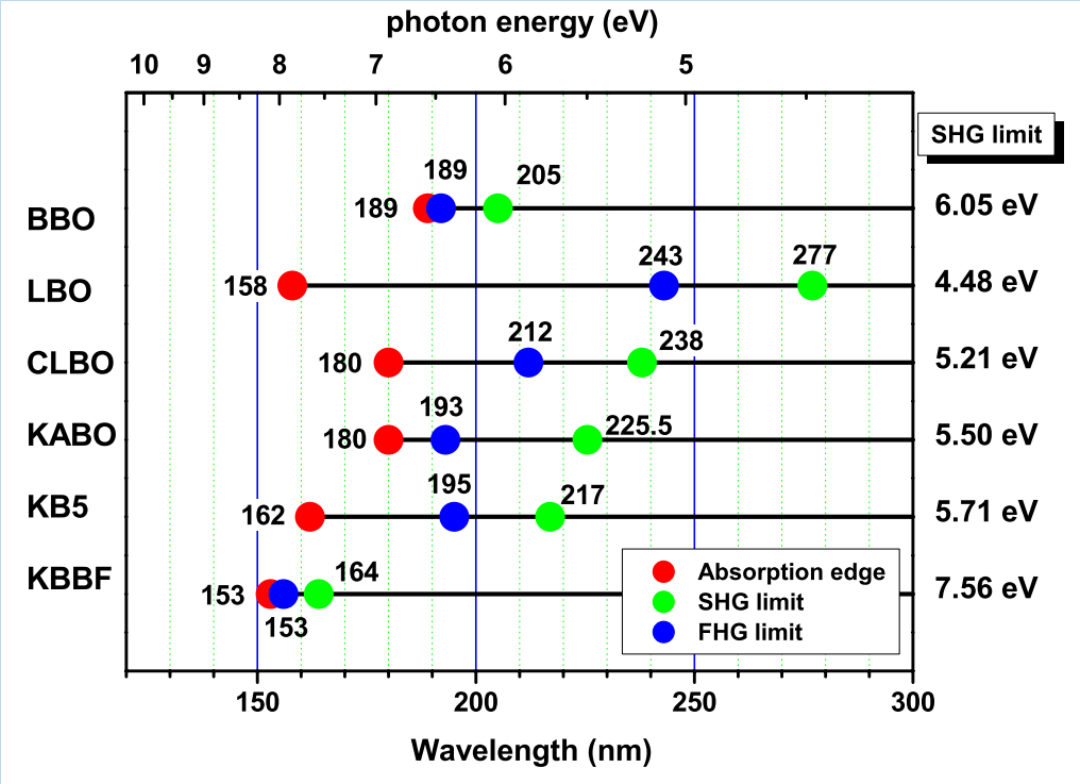
C. Bao et al. Nat. Rev. Phys. 4, 33 (2022).

新技术2：极紫外时间分辨ARPES

时间分辨ARPES的要求：激光（相干性）

~~1. 气体放电光源（氦灯、氙灯…）；~~

~~2. 同步辐射光源。~~

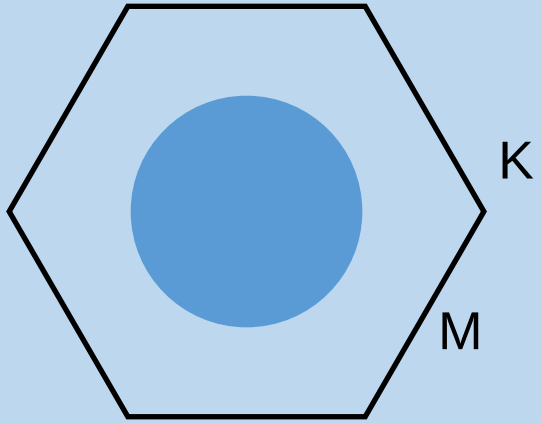


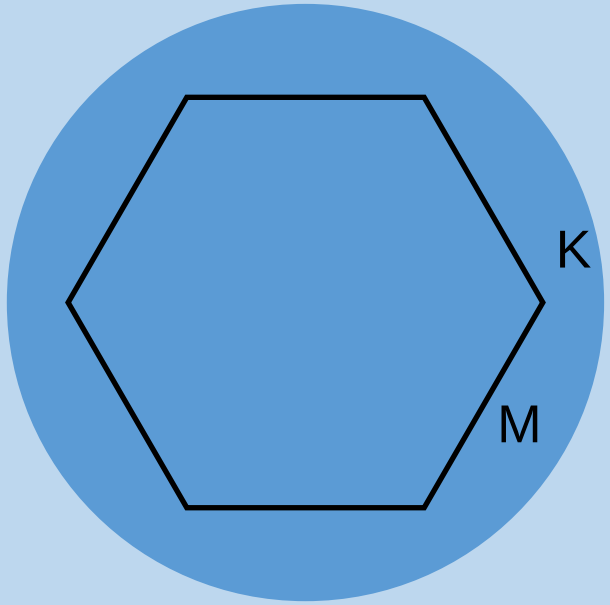
G. Liu, et al. Rev. Sci. Instrum. 79, 023105 (2008).

晶体倍频可获得的最大光子能量：~7.5 eV.

光子能量决定ARPES测量的动量范围

石墨烯的布里渊区





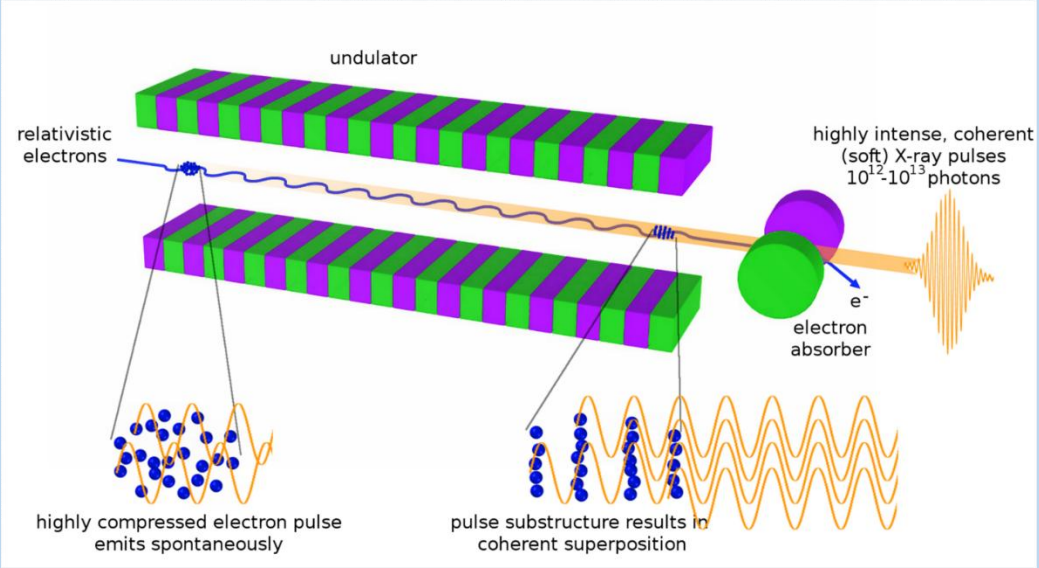
7eV激光的测量范围　　21.2 eV（氦灯）的测量范围

研制时间分辨ARPES的难点：
高光子能量激光：极紫外

新技术2：极紫外时间分辨ARPES

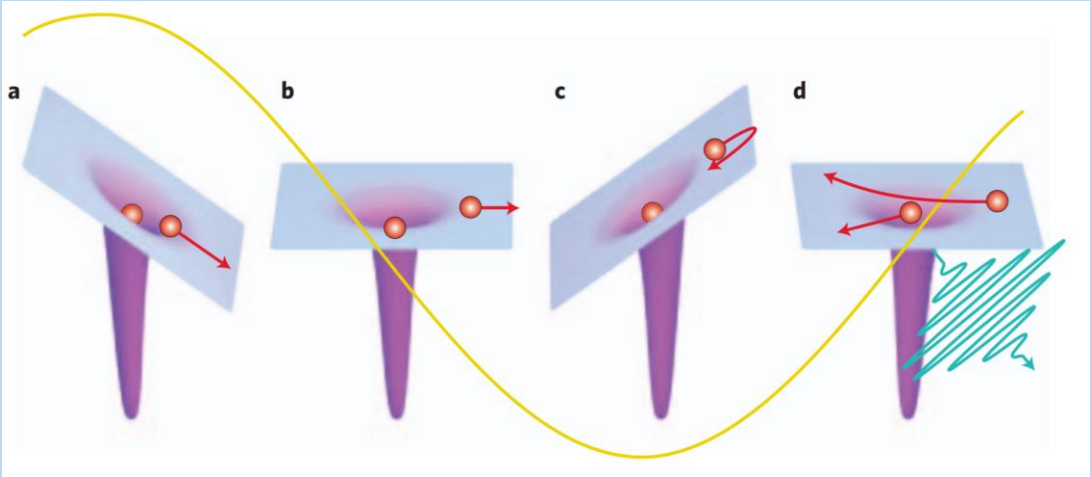
产生高光子能量激光的方法：

1. 自由电子激光（FEL）



- 大科学装置，成本极高；
- 重复频率低：空间电荷效应。

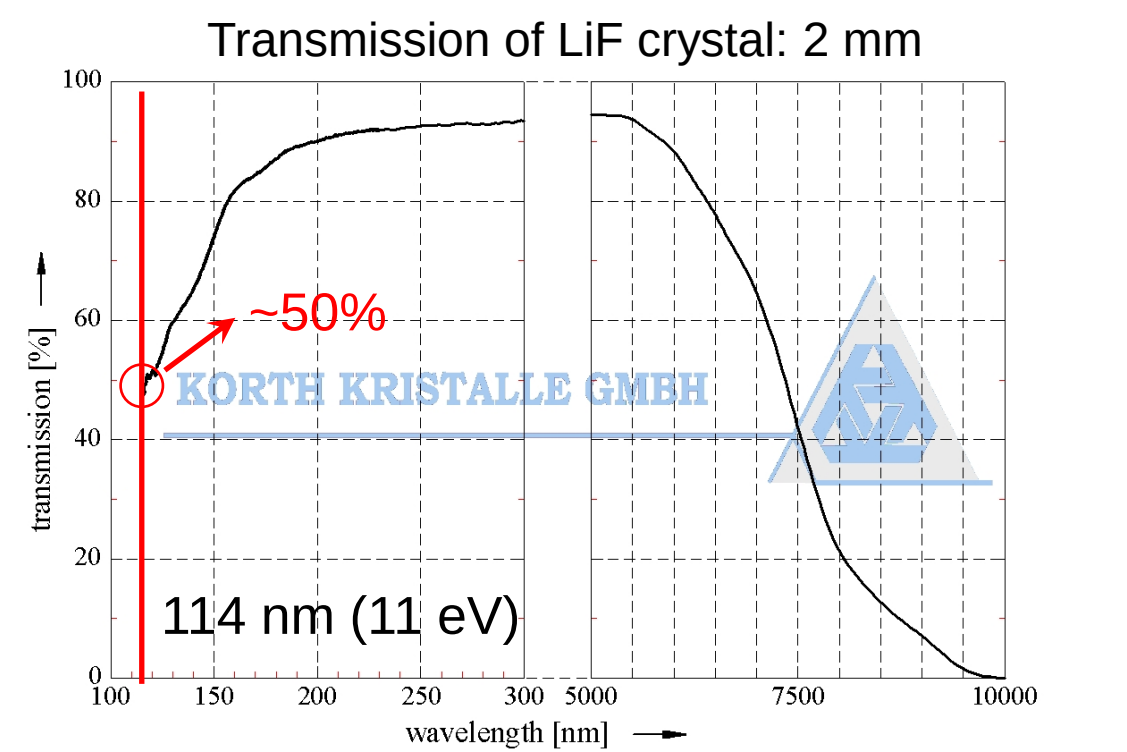
2. 气体高次谐波（HHG）

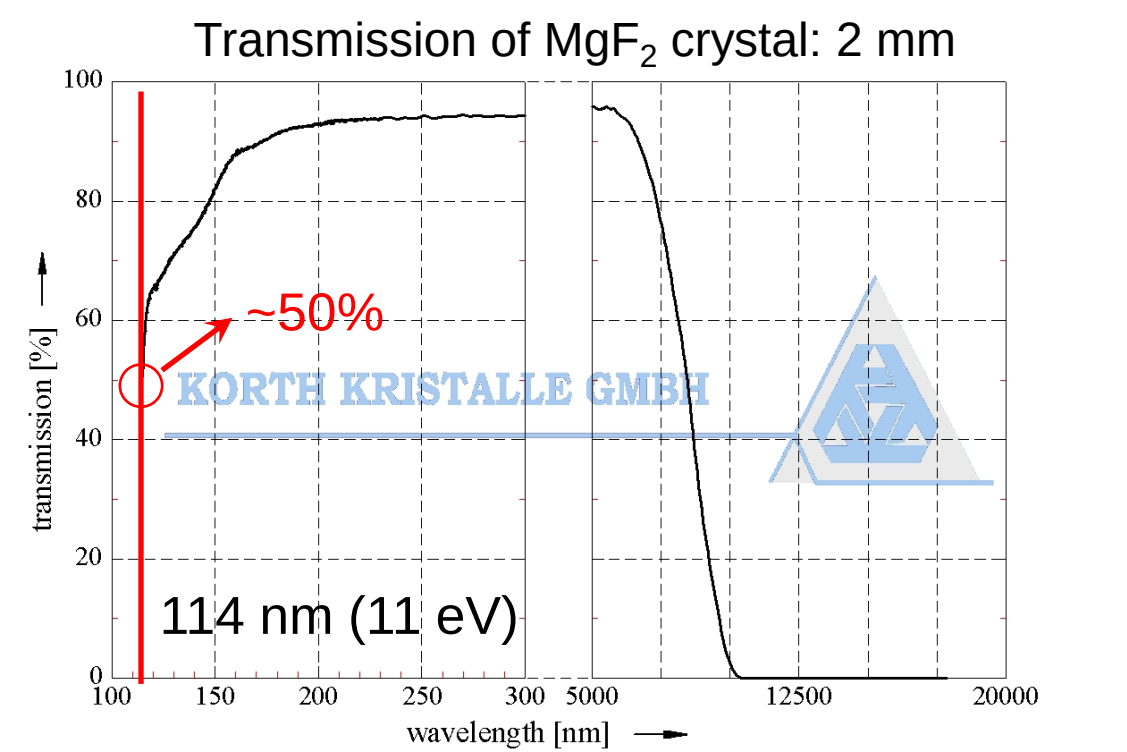


- 能量转化效率低；
- 谱线多、需要光栅分光；
- 需要差分系统。

新技术2：极紫外时间分辨ARPES

11 eV（114 nm）激光的优势





- 吸收边: ~11 eV，
- 真空窗口：隔离高真空和低真空，无需差分系统；
- 光学透镜、反射镜、棱镜；
- 设计简单、造价低

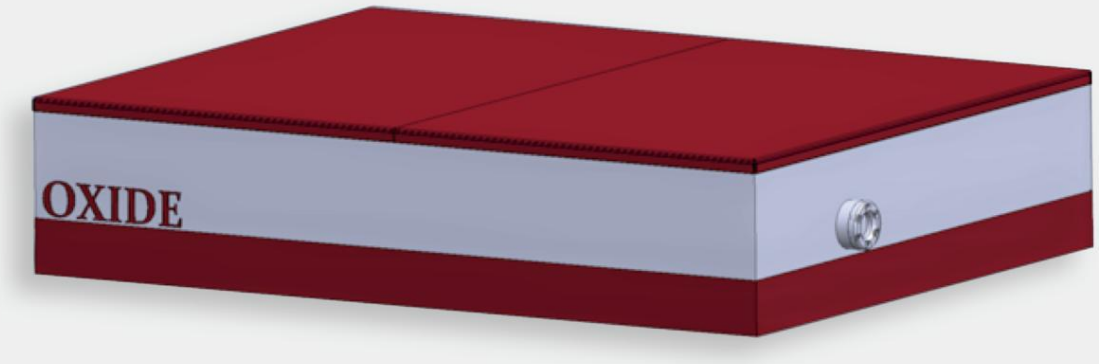
Data from Korth Kristalle

新技术2：极紫外时间分辨ARPES

商业11eV激光器：

共振四波混频技术

日本公司产品（最初由美国Lumeras公司研发）



https://www.opt-oxide.com/en/products/pev/

PEV Series VUV Laser Source
(**114 nm, 11 eV**)

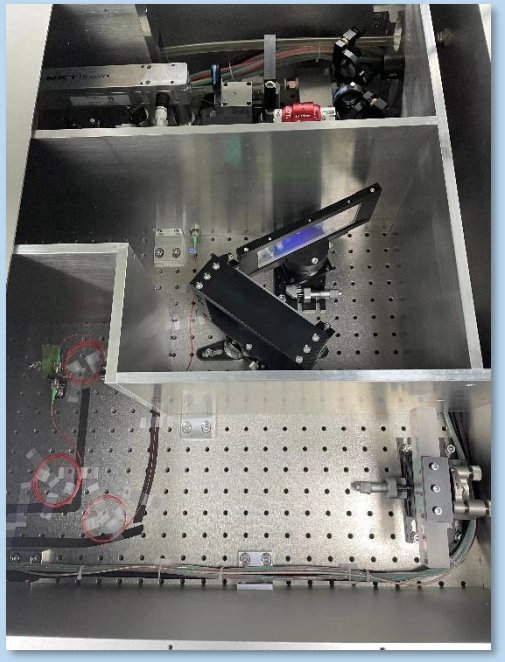
Model	PEV-H	PEV-L
Photon energy	11eV	
Energy resolution	< 0.6meV	
Repetition rate	50MHz	5MHz
Output power	> 5μW	>3μW
Pulse bandwidth	< 30ps	
Features	Peak power is suppressed so that the space charge effect is reduced	Factory pre-set repetition rate can be selectable for the customer's TOF application

脉冲宽度：~30 ps（线宽窄）
能量分辨率：~0.6 meV （能量分辨率高）
缺点：无法实现超短脉冲，原理所限

→ **11 eV飞秒激光?**

新技术2：极紫外时间分辨ARPES

自制的大功率激光器（中科院物理所）

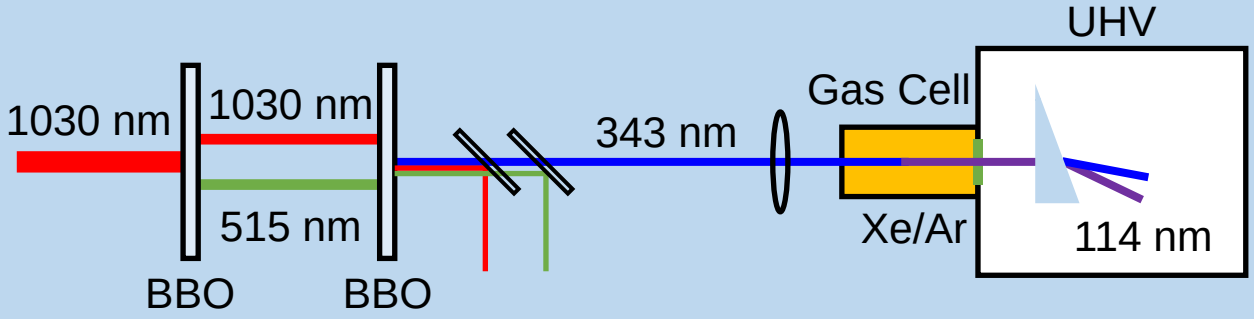


中心波长：1030 nm
重复频率：1 MHz
最大功率：60 W
脉冲宽度：300 fs

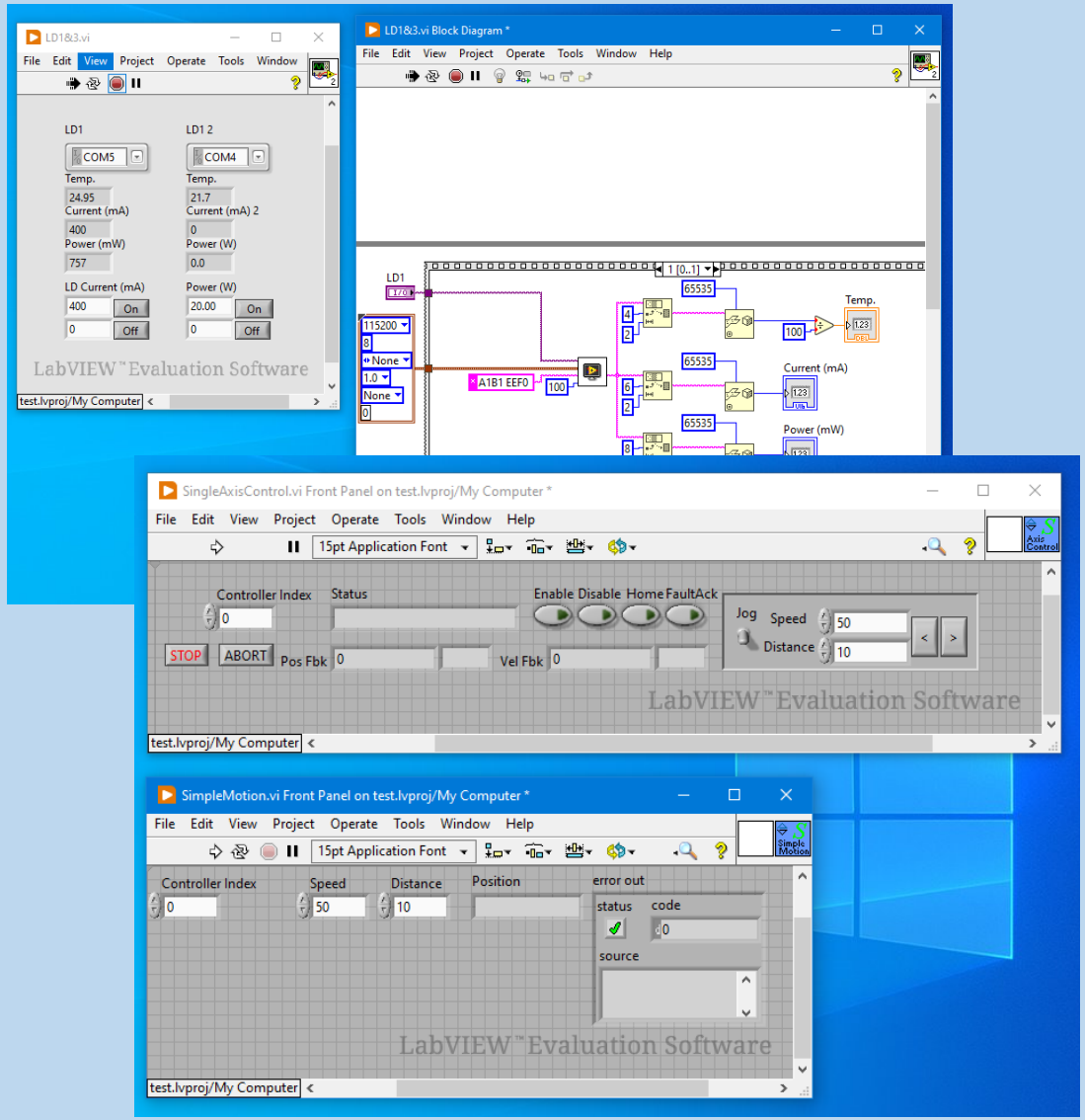
与山东大学赵智刚教授合作

赵峭消
山东大学 2020

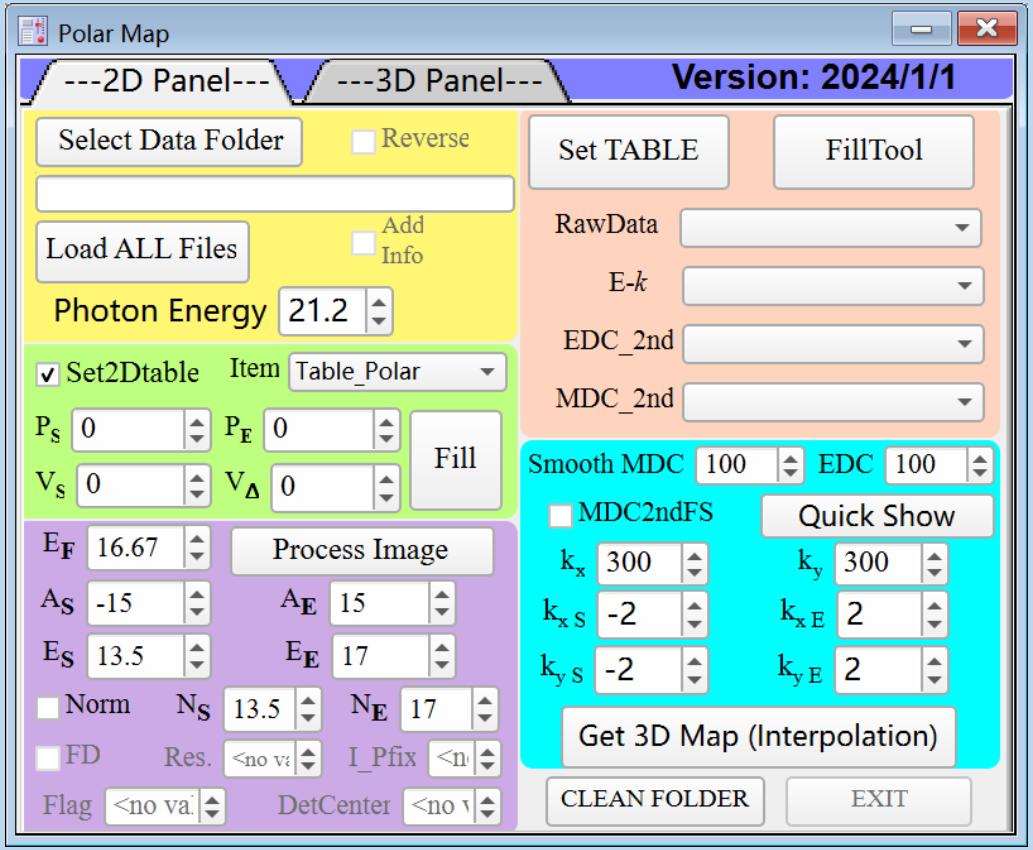
高纪松
南开大学 2020



新技术2：极紫外时间分辨ARPES



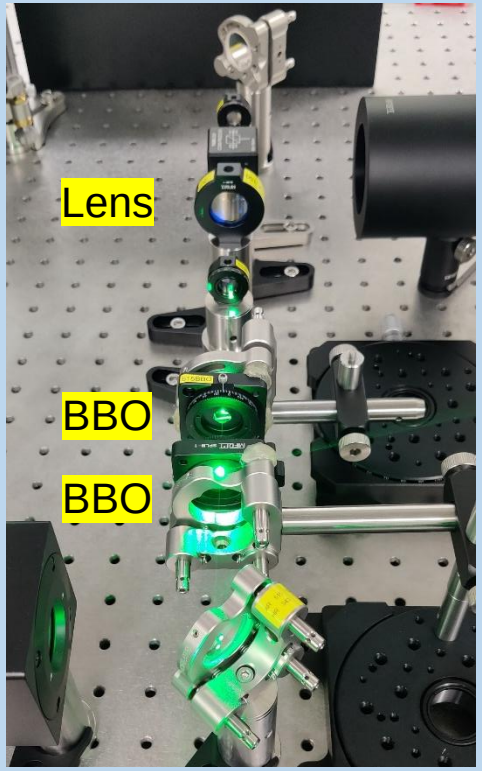
激光器控制程序Labview

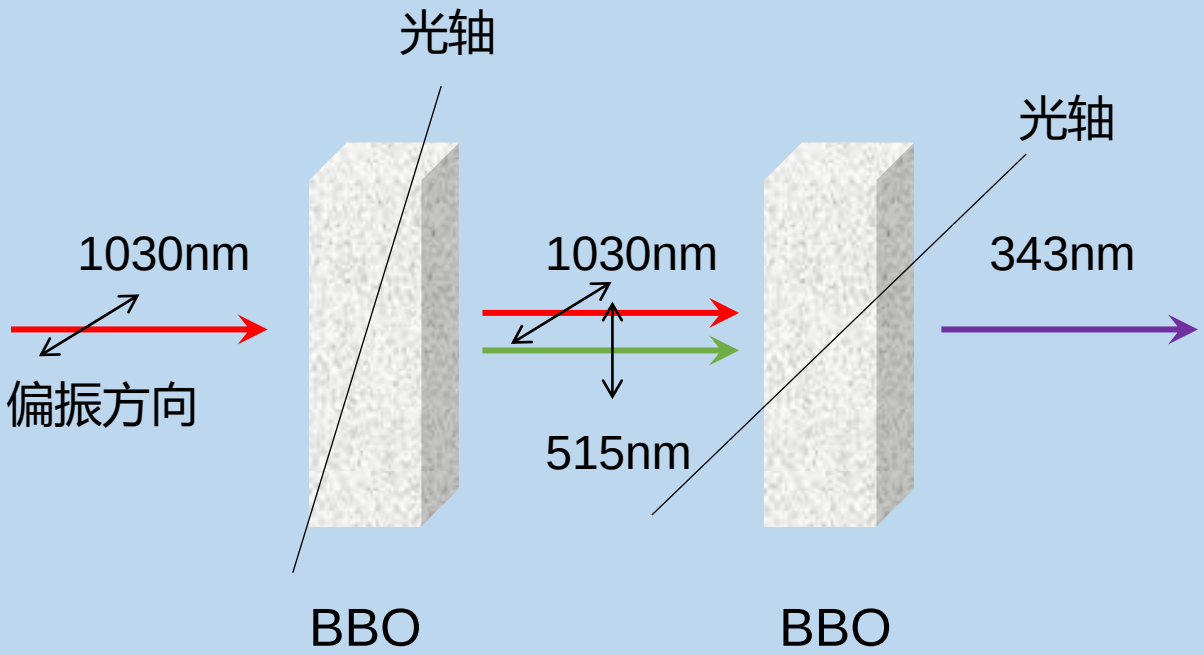


ARPES数据处理程序Igor

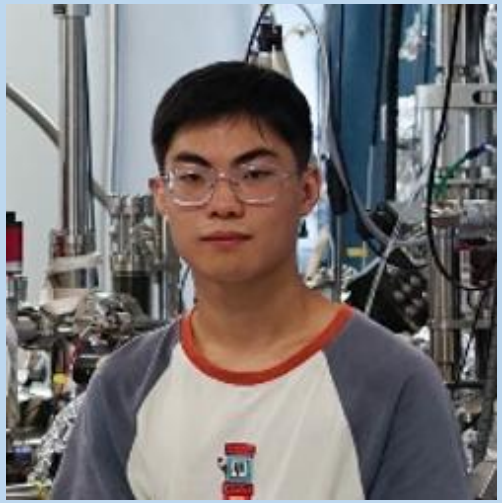
新技术2：极紫外时间分辨ARPES

11eV飞秒激光的搭建





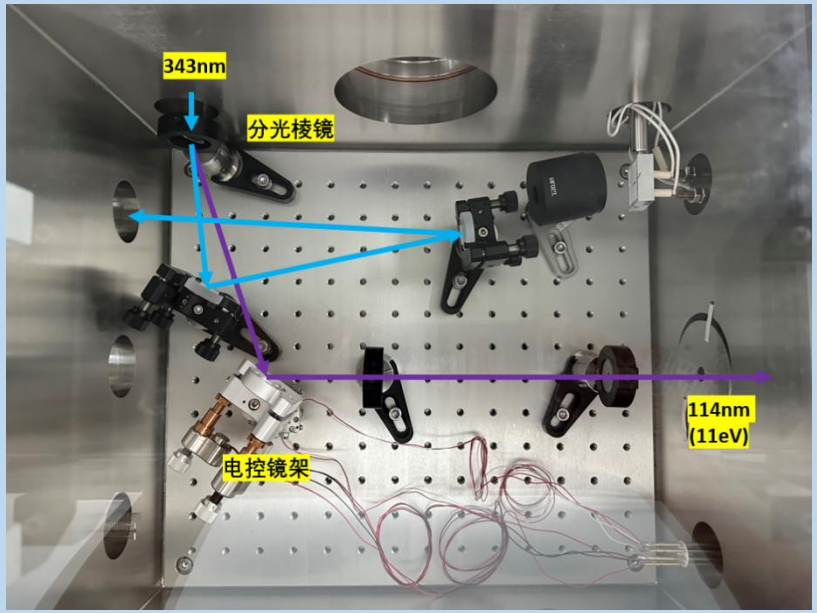
相位匹配优化

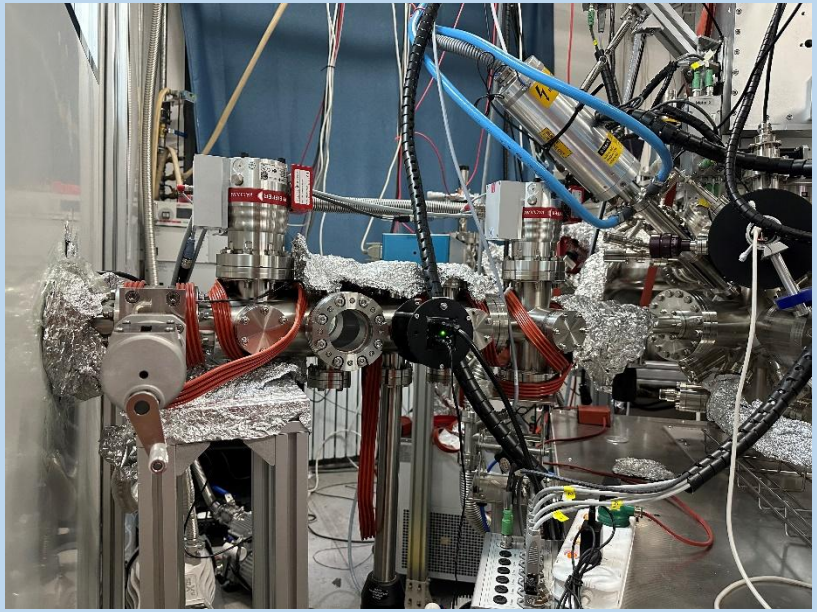


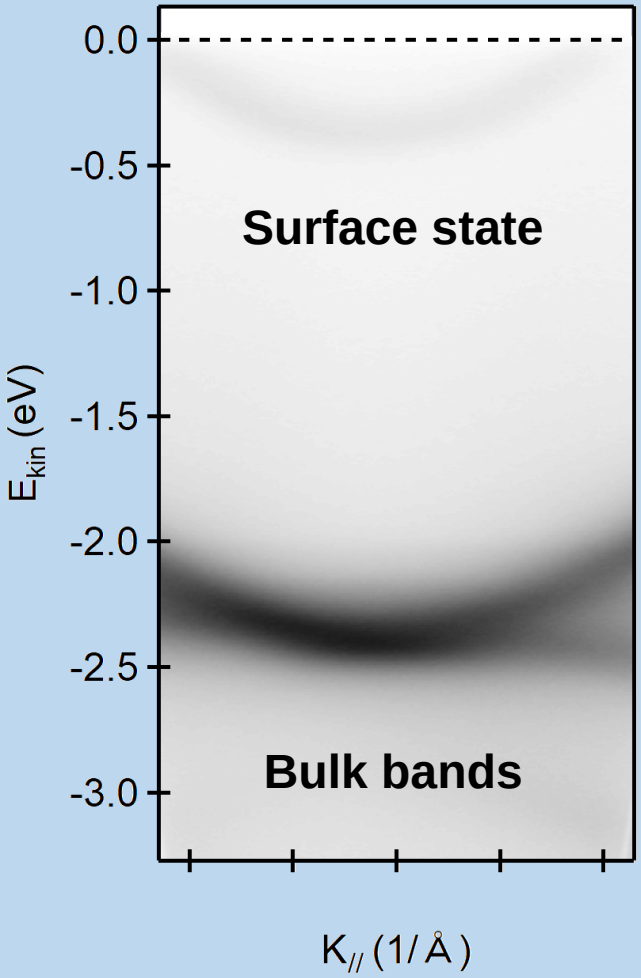
刘文博
山东大学 2023
本科毕业设计工作

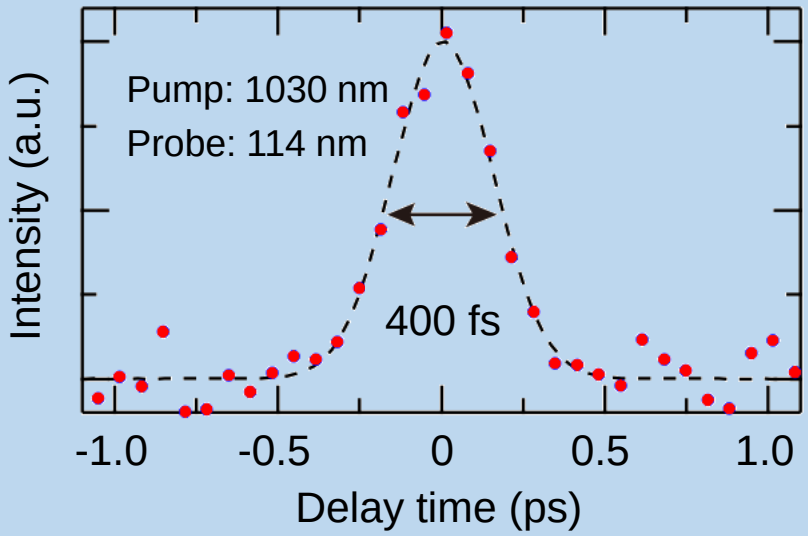
利用BBO晶体进行三倍频

新技术2：极紫外时间分辨ARPES









时间分辨率：~400 fs

能量分辨率：~20 meV

利用11eV飞秒激光测量Cu(111)：

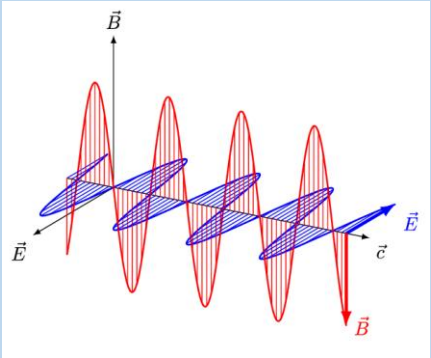
观测到表面态、体能带

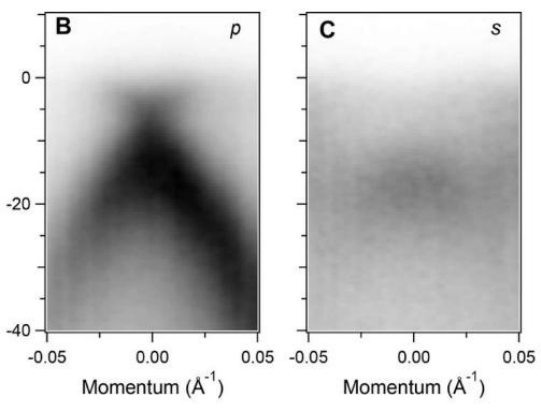
J. Gao...**B. Feng***, Rev. Sci. Intrum. Under Review

新技术2：极紫外时间分辨ARPES

激光的偏振：线偏振、圆偏振（高光子能量的情况很困难）

线偏振：轨道选择性



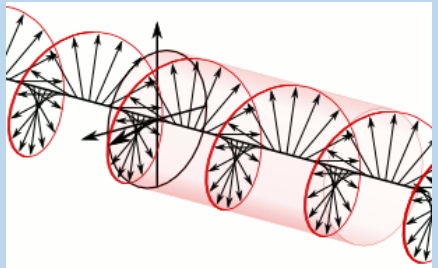


P. Zhang, et al. Science. 360, 182 (2018).

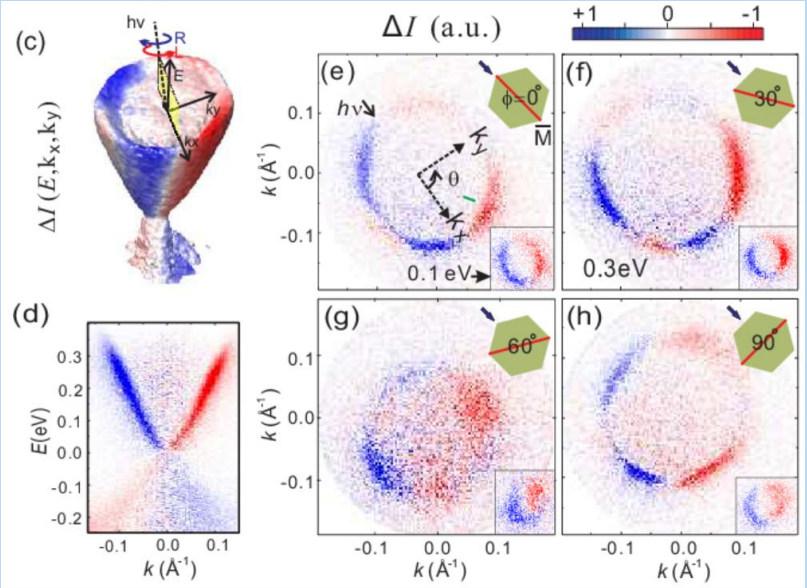
拓扑超导材料$FeTe_{0.55}Se_{0.45}$：
狄拉克锥p偏振光可见，s偏振光不可见！

- 对于高光子能量的激光而言，改变偏振非常困难。
- 理论上圆偏振光无法激发高次谐波。

圆偏振：圆二色性（自旋、手性）



- 携带角动量
- 可与电子自旋耦合

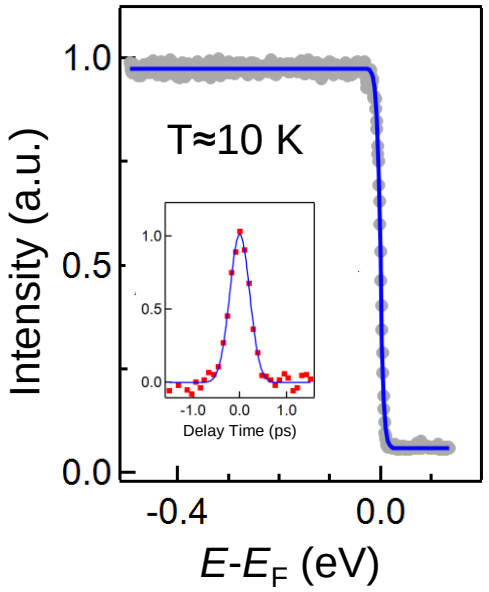


Y. H. Wang, et al. Phys. Rev. Lett. 107, 207602 (2011).

新技术2：极紫外时间分辨ARPES

所有偏振可调，包括线偏振和圆偏振（世界首次、激光技术的进步）

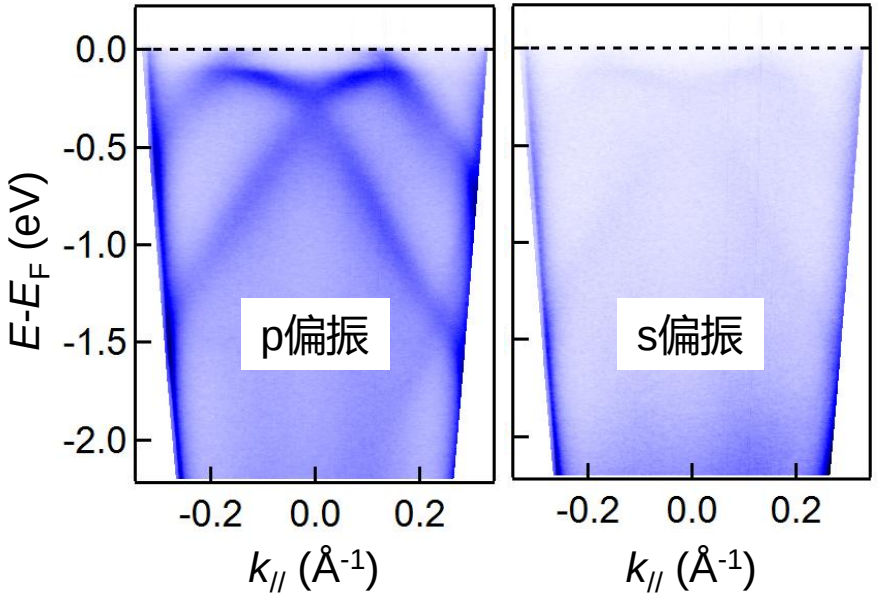
E and *k* resolution



ΔE≈12 meV, Δt≈400 fs

近傅里叶极限

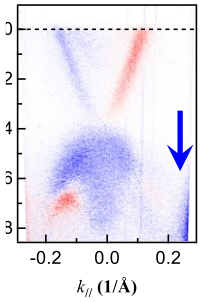
Linear-dichroism ARPES



LD of Bi-√3-Ag(111)

Orbital

CD-ARPES



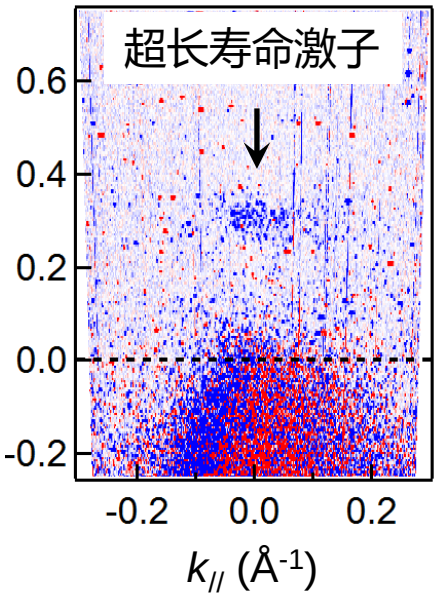
LCP-RCP

$k_{//}$ (Å^{-1})

DC of Bi_2Se_3

Spin

Pump: 1030 nm



Excitons in BP

Time

线宽：11.2 meV

脉宽：<200 fs

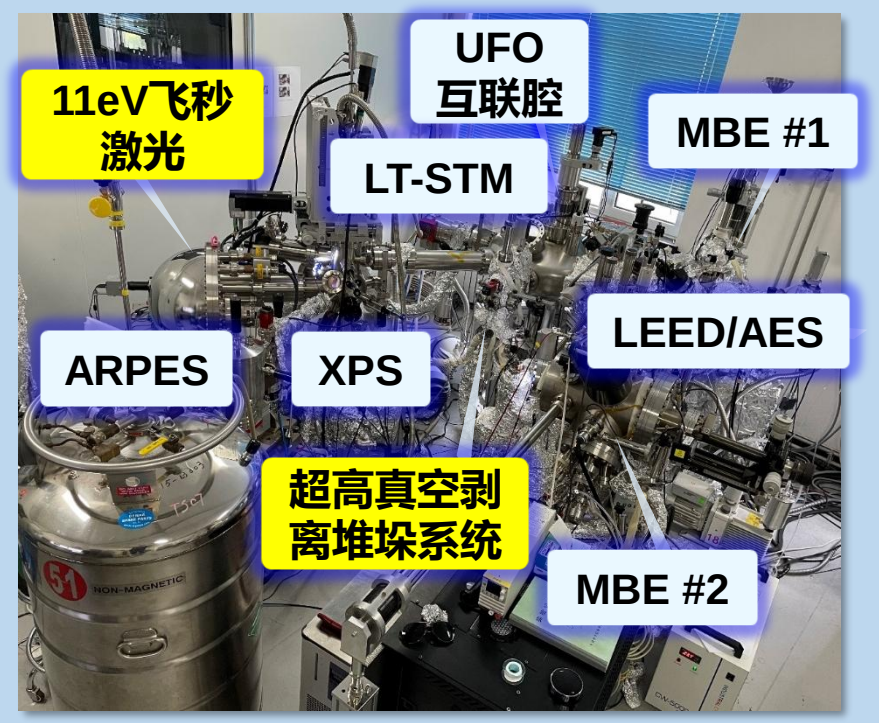
- ✓ **Polarization-tunable tr-ARPES**
- ✓ **Spin and orbital dynamics**

J. Gao...**B. Feng***, Rev. Sci. Intrum. Under Review

我们的大型科研设备（北京中关村）

迷你表面物理实验室（A213）

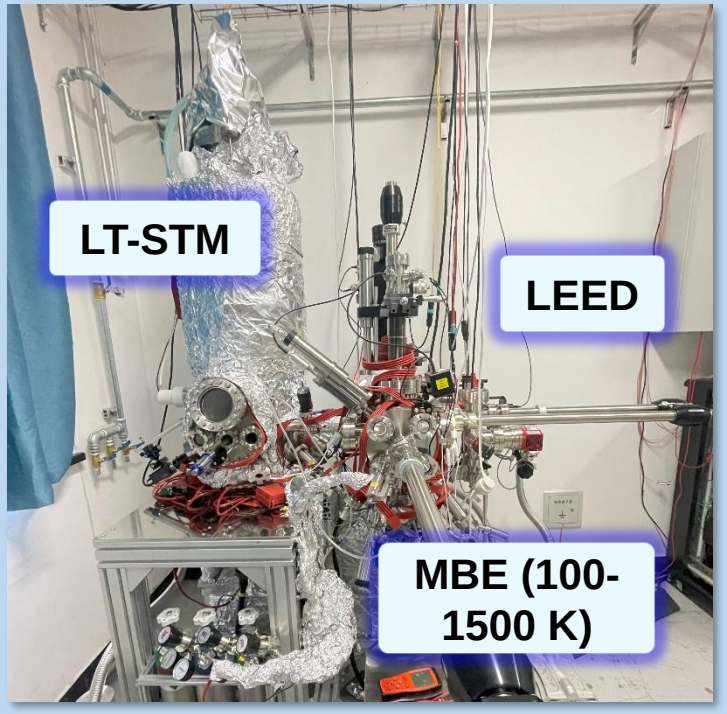
原位样品制备和多维度物性表征



- 系统本底真空度<2×10^{-10} mbar
- 拥有较为齐全的表面物理分析手段
- 后续升级空间大

低温STM-MBE系统（A213）

新材料的生长和谱学表征



- 独立系统，稳定性好
- 低温测量：液氦、液氮
- 用于新材料的生长和高精度研究

二维材料转移系统（B218）

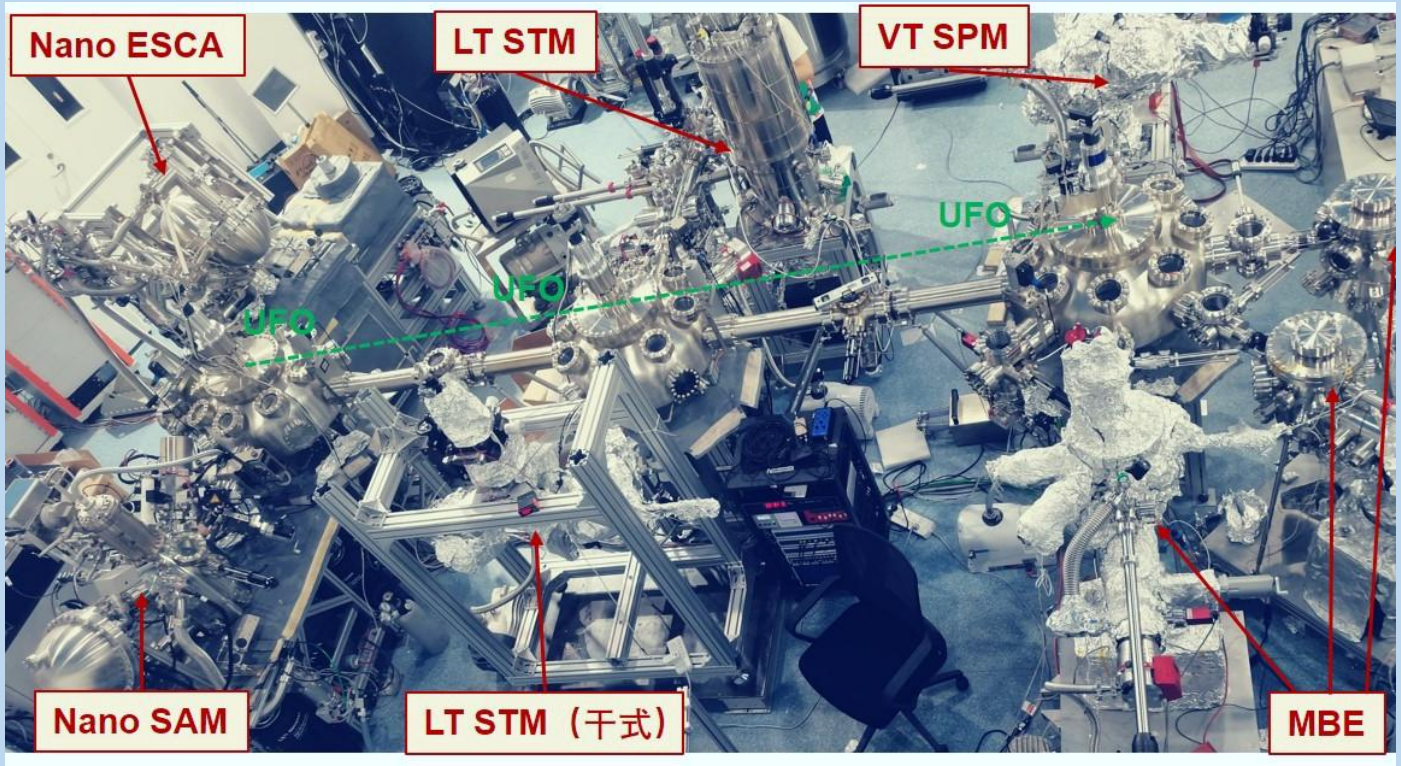
常规二维材料及器件的制备

- 镀膜、等离子体清洗、二维材料转移和堆垛都在手套箱里进行
- 原子力显微镜
- 可以传至超高真空系统

我们的大型科研设备（广东东莞）

松山湖材料实验室分部

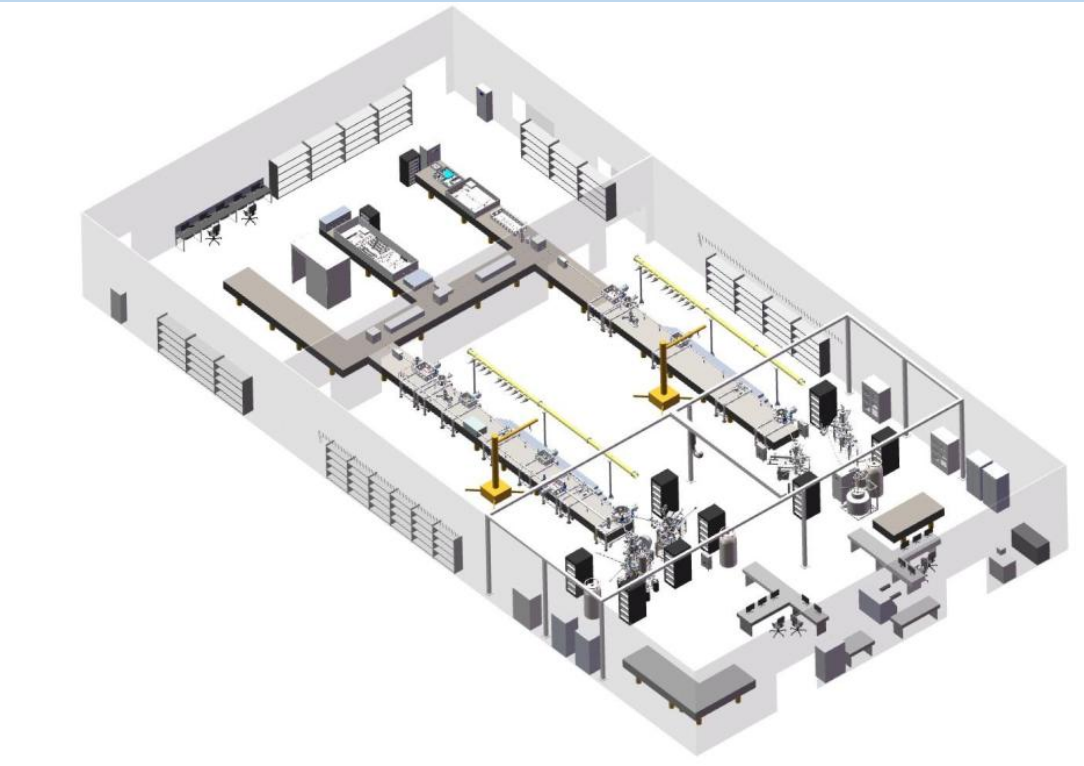
微区ARPES、扫描俄歇、STM/AFM、MBE



- NanoESCA：微区分辨ARPES，国内首台
- NanoSAM：扫描俄歇电子能谱系统，国内首台*
- 超高真空剥离堆垛装置（自制）
- 适用于机械剥离获得的微小样品的研究

先进阿秒激光设施 在建

时间分辨角分辨光电子能谱



- 大科学装置（现代实验科学的最高水平）
- 光子能量可调
- 极致的时间分辨率

我们的科研设备

世界各地的角分辨光电子能谱

世界各地同步辐射中心（美国、日本、欧洲……）：光子能量可调、超高的能量分辨率

意大利同步辐射

北京光源（在建）

总结

- 聚焦低维材料：拓扑电子态、电子关联、表界面化学性质、铁电和铁磁
- 研究手段丰富：分子束外延（MBE）、角分辨光电子能谱（ARPES）、扫描隧道显微镜（STM）、原子力显微镜（AFM）、超快激光、
- 新技术研发：时间分辨ARPES、时间分辨STM、超高真空剥离堆垛
- 大科学装置的建设和使用

我们毕业学生的情况

1. **出国深造：知名高校、科研院所的博后；**
2. **国内公司：半导体公司、国内普通高校讲师/副教授；**

鼓励学生自主创业，突破欧美的技术封锁。

ARPES（角分辨光电子能谱）：
电子能量分析器对国内很多高校禁运，但是出口审查严格，经常需要几年。

STM（扫描隧道显微镜）：
日本Unisoku公司的极低温、强磁场STM已对国防七子、清华、北大等很多高校禁运。

MBE（分子束外延）：
与MBE有关的零部件都在禁运名单。

联系方式

手机（微信）：15110293978
办公室电话：010-82649158
电子邮箱：bjfeng@iphy.ac.cn

THANKS