



中國科學院物理研究所

Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences



# 超导基础理论和实验技术讲座

National Lab for Superconductivity Lecture Series

【第98期】

## 超导量子计算及量子模拟



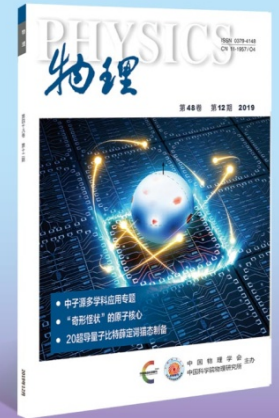
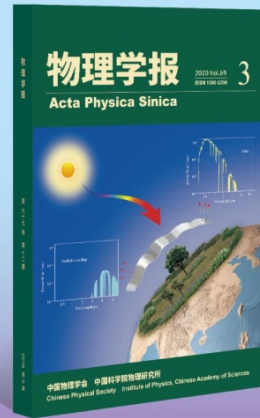
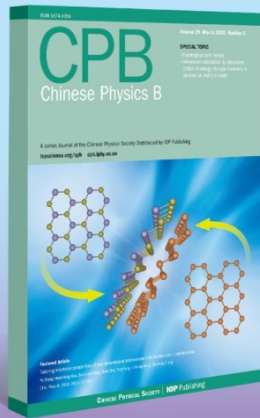
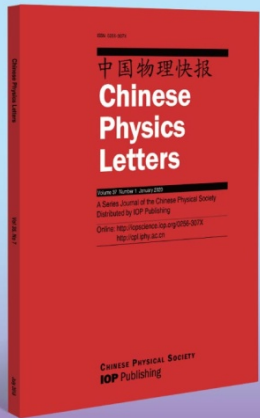
于扬

南京大学

主办 中科院物理所超导国家重点实验室、学术服务部

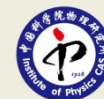
协办 《物理学报》 | CPL | CPB | 《物理》

# 与中国物理学同行



## 欢迎关注 欢迎投稿

- ▶ CPL, CPB 和《物理学报》被SCI收录, “中国科技期刊卓越行动计划” 入选期刊。
- ▶ CPL的 Express Letters 栏目对标 PRL, 质量高, 发表快, 国际推广。接收邮件投稿:  
[zhaiz@iphy.ac.cn](mailto:zhaiz@iphy.ac.cn)
- ▶ CPB和《物理学报》刊登中英文物理学优秀原创成果, 物理学前沿研究领域专题与综述。
- ▶ 《物理》是国内权威物理类中文科普期刊, 集学科大家之力, 为读者精心奉献高品质作品。





# 中船重工鹏力（南京）超低温技术有限公司

## CSIC PRIDE (NANJING) CRYOGENIC TECHNOLOGY CO.,LTD.

### 发展历程

**2020年**  
08 牵头承担国家重点研发计划重大仪器专项  
无液氦低温强磁场综合物性测量仪  
成功推出无液氦低温强磁场综合物性测量  
系统、低温真空泵

**2018年**  
07 成功研制1.5K无液氦低温系统  
开始研制稀释制冷机  
国家级博士后工作站申报获批

**2016年**  
06 GM低温制冷机实现MRI市场批量供货  
GM低温制冷机首次完成海外市场批量供货

**2015年**  
05 GM低温制冷机进军海外低温泵市场  
氦回收纯化液化设备实现产业化，应用于各大  
科研院所

**2014年**  
04 获批“高新技术企业”其中部分产品被  
认定为高新技术产品  
系列化低温设备在大科学工程领域得到  
良好应用

**2013年**  
03 加入中船重工，成立中船重工鹏力  
（南京）超低温技术有限公司

**2011年**  
02 首批氦回收纯化液化设备研制成功  
成功研制出4K/10K/77K系列低温设备，打  
破了国外垄断，保障了国内科研与军工领域的  
研究需求

**2010年**  
01 1月，成立，注册资金：3000万  
8月，成功研制出首套4.2K GM低温制冷机

### 公司定位

- 低温产品制造商
- 低温系统服务商



## 主要产品

公司始终专注于GM低温制冷机、稀有气体提纯和液化装备、低温恒温器的研制和生产，同时也是一家提供全方位低温应用及解决方案的服务商。可为客户提供指标优异、性能稳定的低温产品。



GM低温制冷机



氦回收纯化液化装置



无液氦低温强磁场  
综合物性测量仪



稀释制冷机



(超)低振动低温恒温器



低温泵



1.5K低振动探针台恒温器



氦循环制冷装置



中國科學院物理研究所

Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences



## 超导基础理论和实验技术讲座

National Lab for Superconductivity Lecture Series

【第98期】

# 超导量子计算及量子模拟



于扬，教育部长江学者特聘教授，国家杰出青年科学基金获得者。主要研究领域是超导量子计算和超导器件。2002年首次实验观测到超导相位量子比特中的量子相干振荡，2010年率先演示了三个固态量子比特的相干调控。代表性工作还有在超导量子比特中观测到宏观量子系统的 MACH-ZEHNDER 干涉、量子几何相的 LANDAU-ZENER 干涉等宏观量子现象、利用量子比特模拟拓扑能带结构等。

主办 中科院物理所超导国家重点实验室、学术服务部

协办 《物理学报》 | CPL | CPB | 《物理》



超导基础理论和实验技术讲座, 2020/10/20

# 超导量子计算及量子模拟

于 扬

南京大学物理学院, 固体微结构国家重点实验室

誠朴雄偉  
勵學敦行



# 合作者

---

南京大学(实验): 谭新生, 赵鹏, 兰栋

香港大学: 汪子丹

南京大学(理论): 朱诗亮, 赵宇欣, 朱燕青

华南师大: 张丹伟, 颜辉

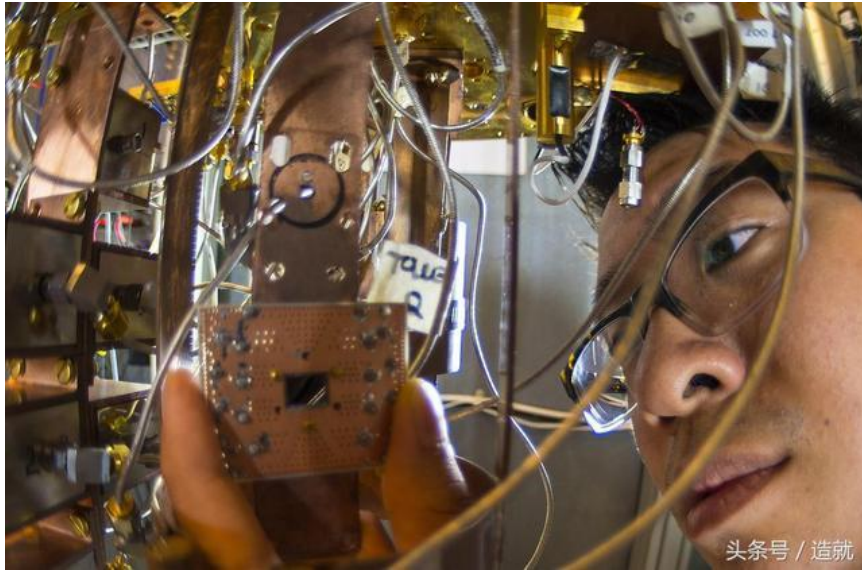
¥ ¥ ¥科技部, 广东省

# 提 纲

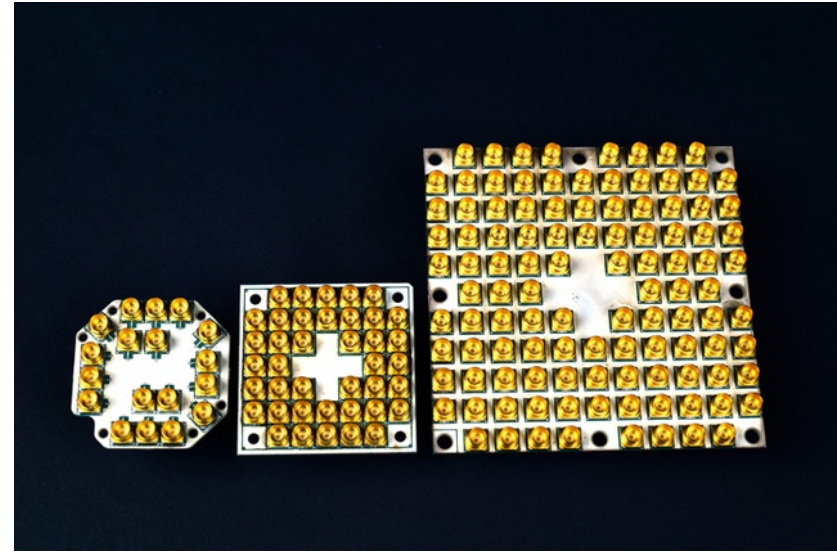
- 超导量子电路：人工原子
- 磁场中的自旋和微波驱动下的量子系统
- 模拟自旋为  $1/2$  系统：外尔半金属
- 模拟自旋为  $1$  系统：拓扑麦克斯韦金属



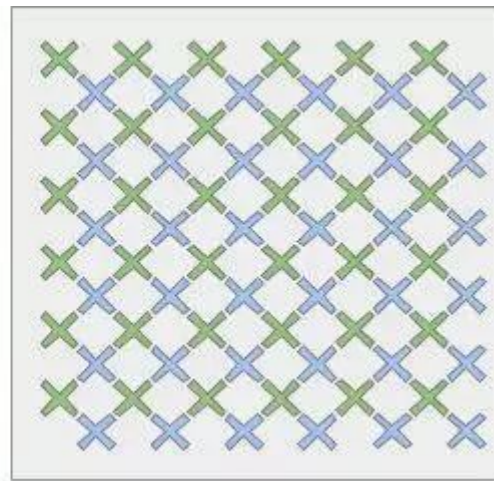
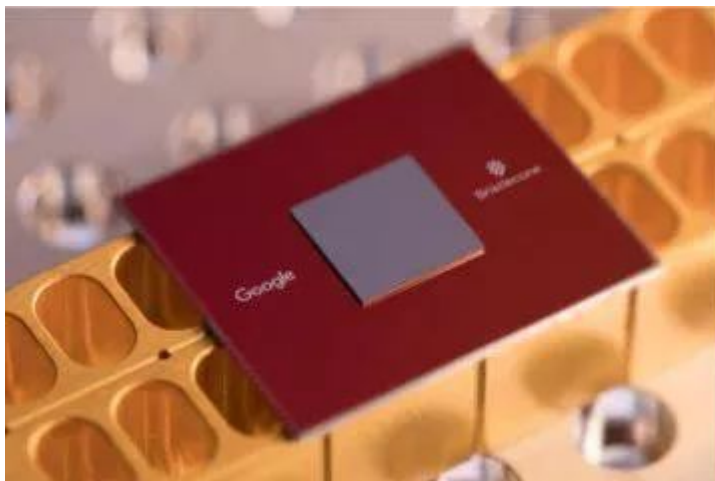
# 量子超越: 超越经典的量子计算机



IBM 17 qubit 芯片

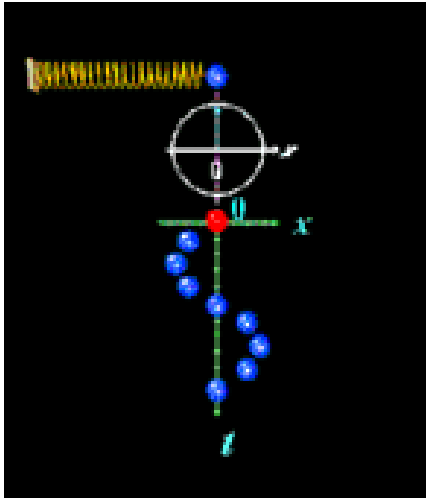


Intel 49 qubit 芯片



Google 72 qubit 芯片

# 量子电路

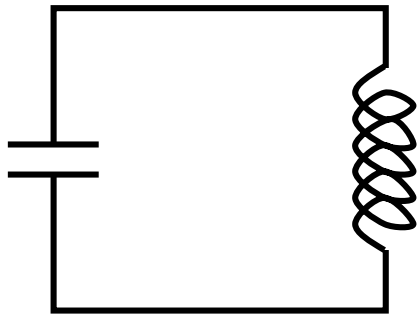


$$T = \frac{1}{2} m \dot{x}^2$$

$$V = \frac{1}{2} m \omega^2 x^2$$

弱阻尼

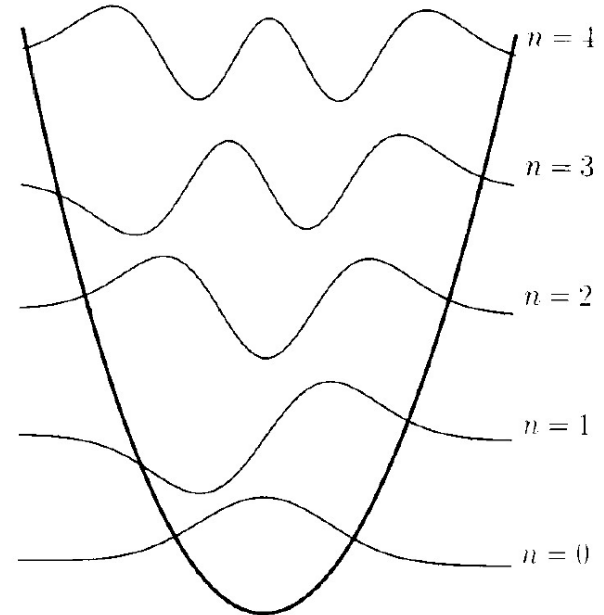
$$k_B T \ll \hbar \omega$$



$$T = \frac{1}{2} C \dot{\Phi}^2$$

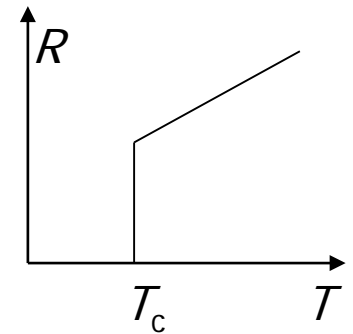
$$V = \frac{1}{2L} \Phi^2$$

$$C \rightarrow m, \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad Q = \frac{1}{\omega RC}$$



# 为什么用超导材料

$T < T_c$   $R = 0$ , 超导电性,  
零电阻, 无损耗




优良性质:

- 电子相干性好
- 磁场和电流的方便转换



# 约瑟夫森效应

超导体

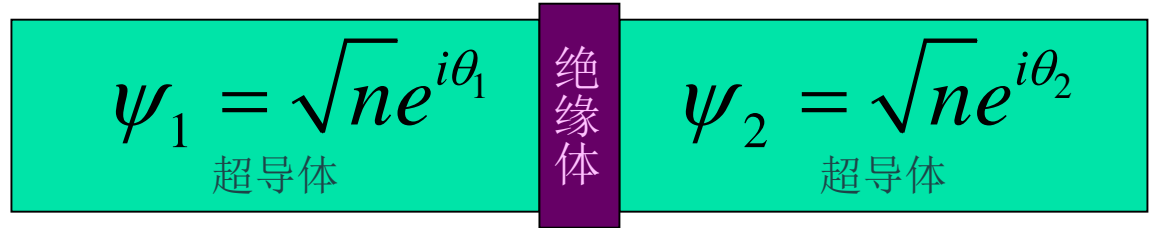


$$\psi = \sqrt{n} e^{i\theta}$$

约瑟夫森效应

$$I_s = I_c \sin \varphi$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{2eV}{\hbar}$$



1 nm

$$\varphi = \theta_1 - \theta_2$$

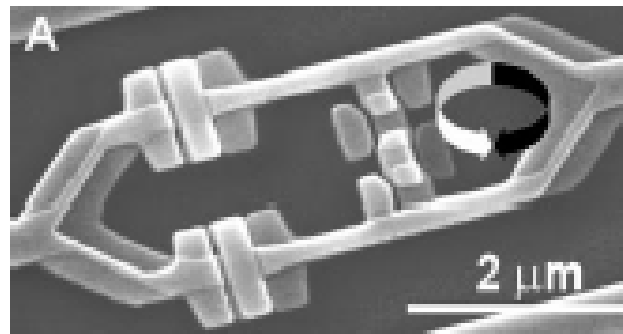
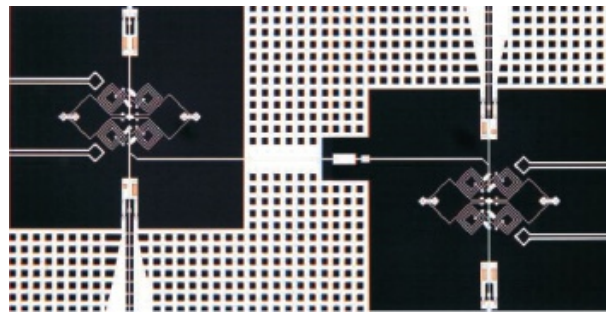
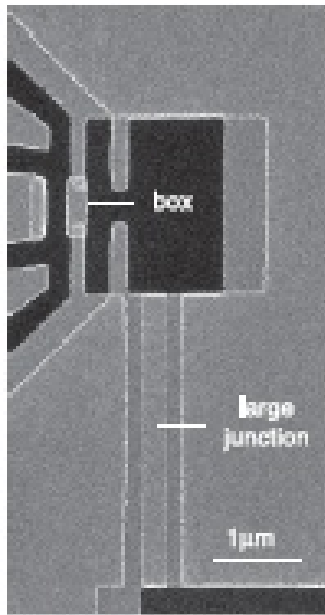
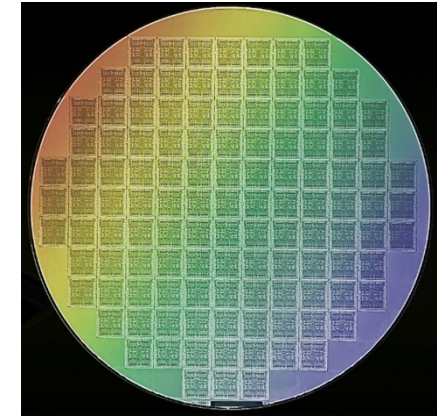
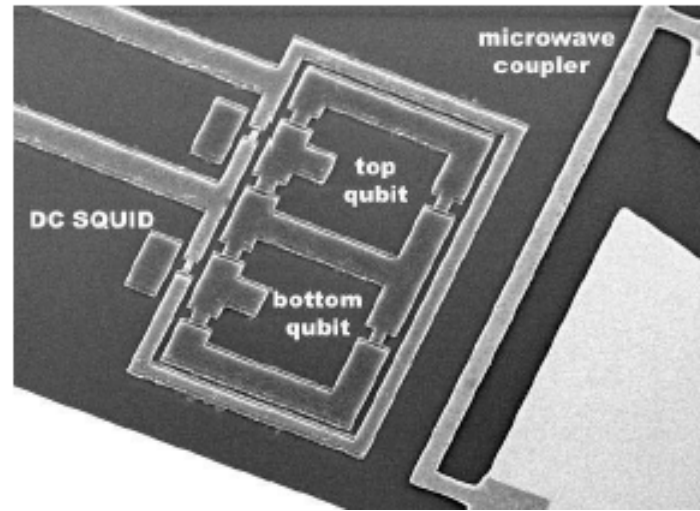
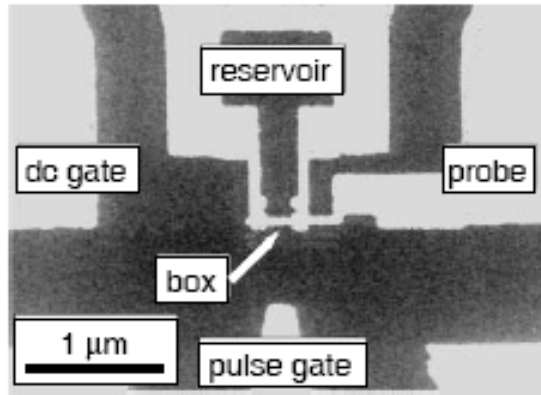
非线性电感

$$L \frac{dI}{dt} = LI_c \cos \varphi \frac{d\varphi}{dt} = V = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\varphi}{dt}$$

$$\Rightarrow L = \frac{\hbar I_c}{2e} \frac{1}{\cos \varphi}$$

$$E_J = \frac{I_c \Phi_0}{2\pi}, \quad E_C = \frac{2e^2}{C_J}$$

# 人工原子



	Atom	Quantum dot	Josephson junction
$E = 0$			
$E \neq 0$			

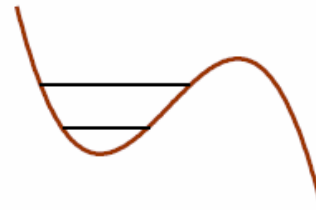
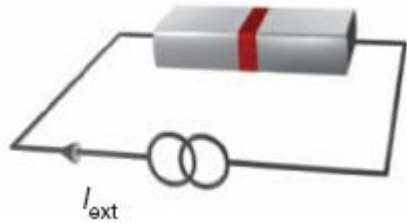
$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \approx 100 \text{ GHz}$$



# 超导量子比特分类

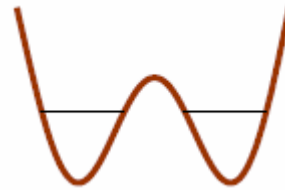
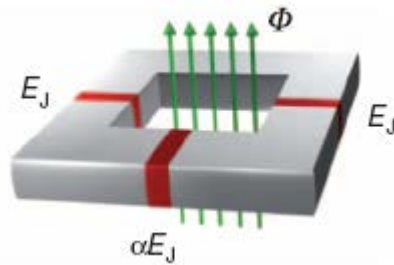


$E_J \ll E_C$   
Phase



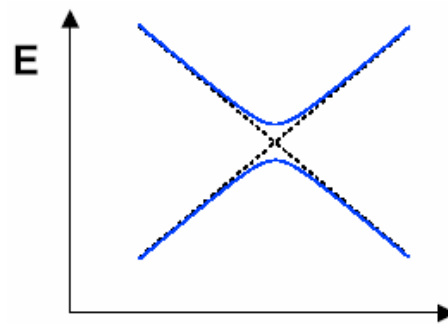
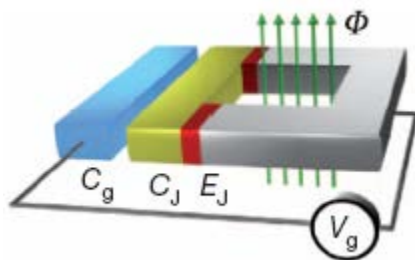
$$H_{\text{qubit}} = \frac{\hbar\omega_{01}}{2}\sigma_Z + \sqrt{\frac{\hbar}{2\omega_{01}C_J}}\Delta I(\sigma_X + \chi\sigma_Z),$$

$E_J \geq E_C$   
Flux

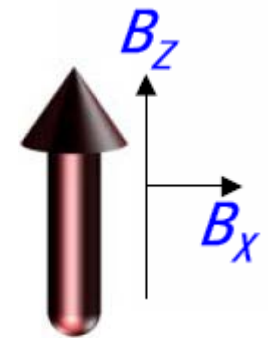


$$H_{\text{qubit}} = -E_z(\sigma_Z + X_{\text{control}}\sigma_X)$$

$E_J \leq E_C$   
charge



电压或磁场



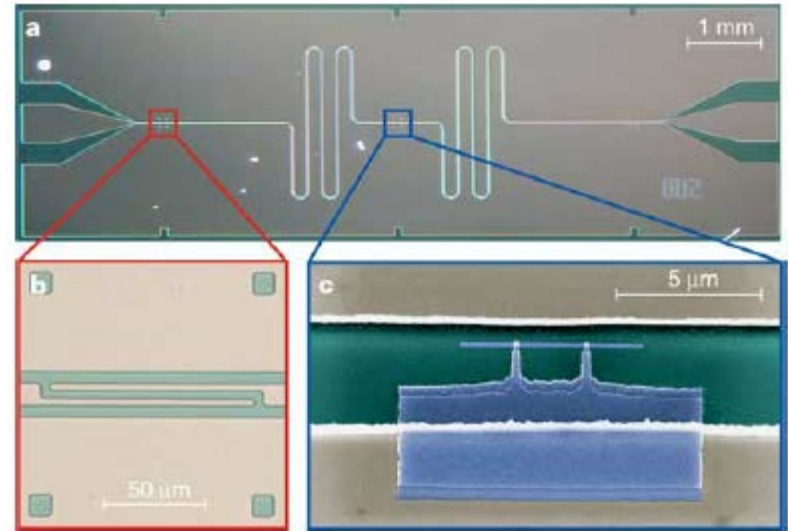


# 超导量子比特的的发展



## Strong coupling of a single photon to a superconducting qubit using circuit quantum electrodynamics

A. Wallraff<sup>1</sup>, D. I. Schuster<sup>1</sup>, A. Blais<sup>1</sup>, L. Frunzio<sup>1</sup>, R.-S. Huang<sup>1,2</sup>, J. Majer<sup>1</sup>, S. Kumar<sup>1</sup>, S. M. Girvin<sup>1</sup> & R. J. Schoelkopf<sup>1</sup>



## How coherent are Josephson junctions?

Hanhee Paik,<sup>1</sup> D. I. Schuster,<sup>1,2</sup> Lev S. Bishop,<sup>1,3</sup> G. Kirchmaier,<sup>1</sup> A. P. Sears,<sup>1</sup> B. R. Johnson,<sup>1,4</sup> M. J. Reagor,<sup>1</sup> L. Frunzio,<sup>1</sup> L. Glazman,

<sup>1</sup>Department of Physics and Applied Physics, Yale University, New Haven, CT

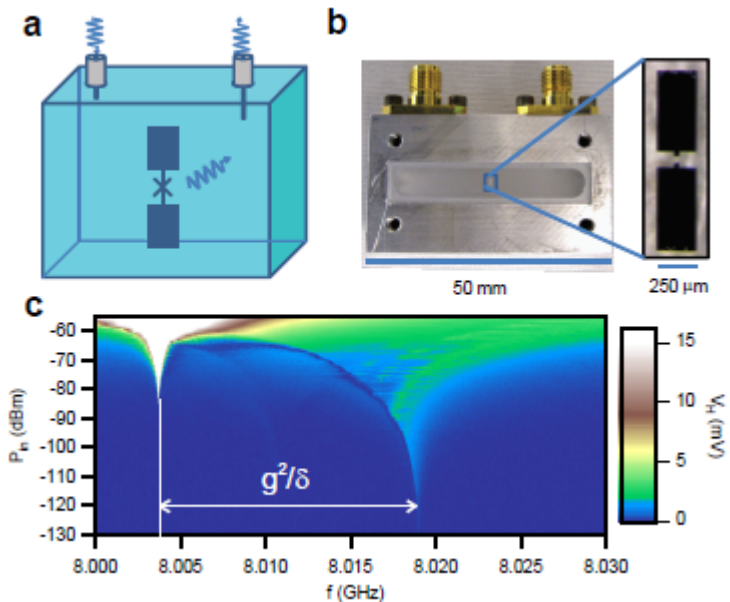
<sup>2</sup>Department of Physics and James Franck Institute, University of Chicago, Chicago, IL

<sup>3</sup>Joint Quantum Institute and Condensed Matter Theory Center, University of Maryland, College Park, MD

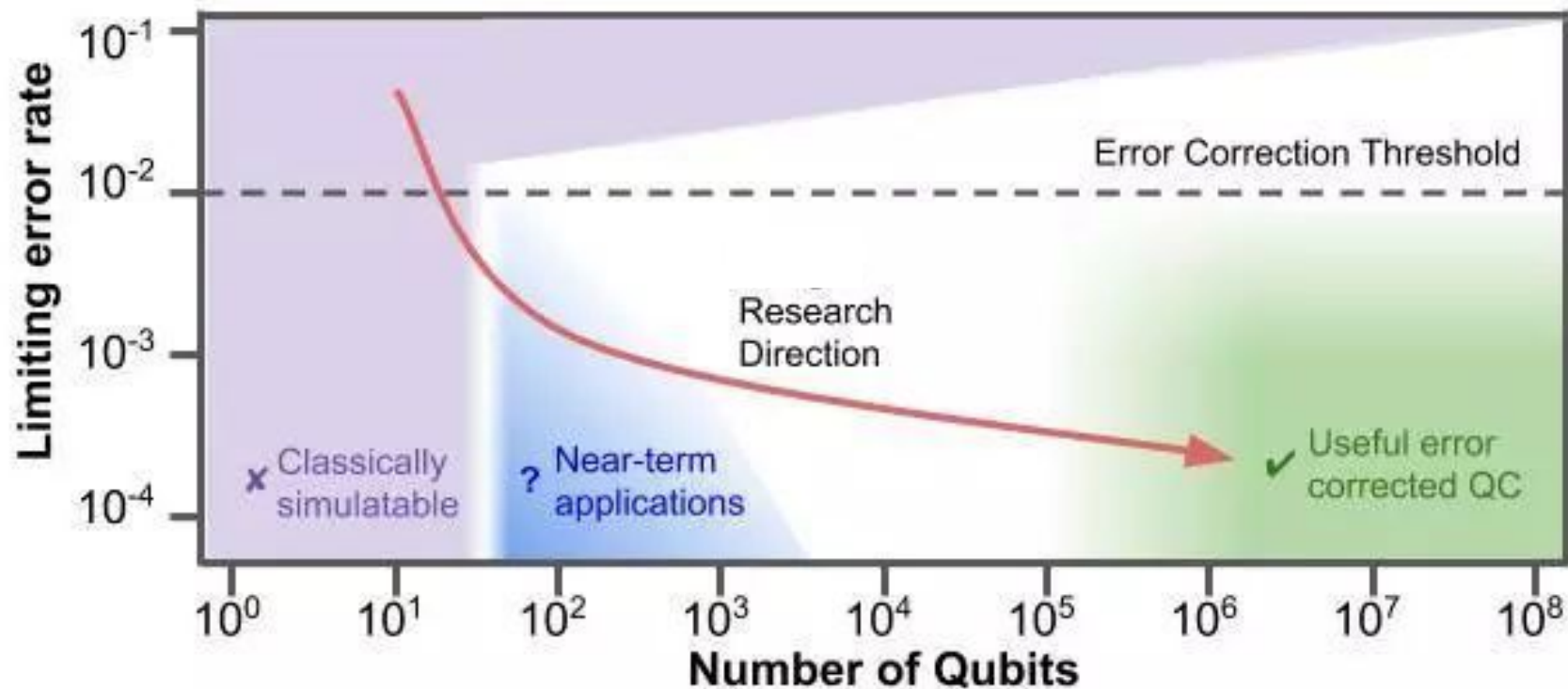
<sup>4</sup>Department of Physics, University of Maryland, College Park, Maryland

<sup>4</sup>Raytheon BBN Technologies, Cambridge, MA 02138, USA

(Dated: May 26, 2011)



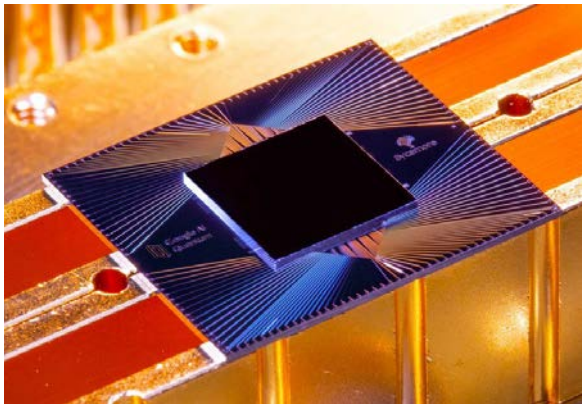
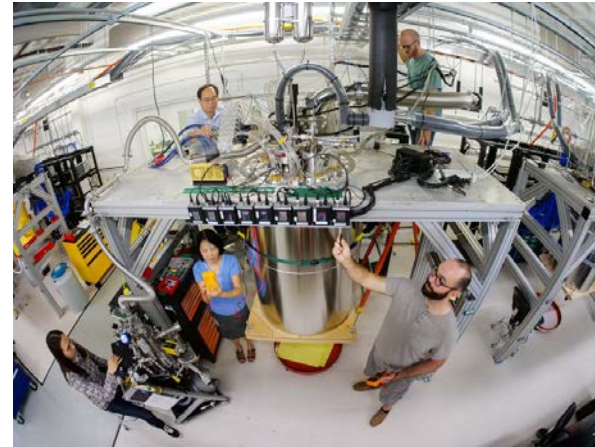
# 量子计算机只是工程问题？



Two Q (Quantity 和 Quality)

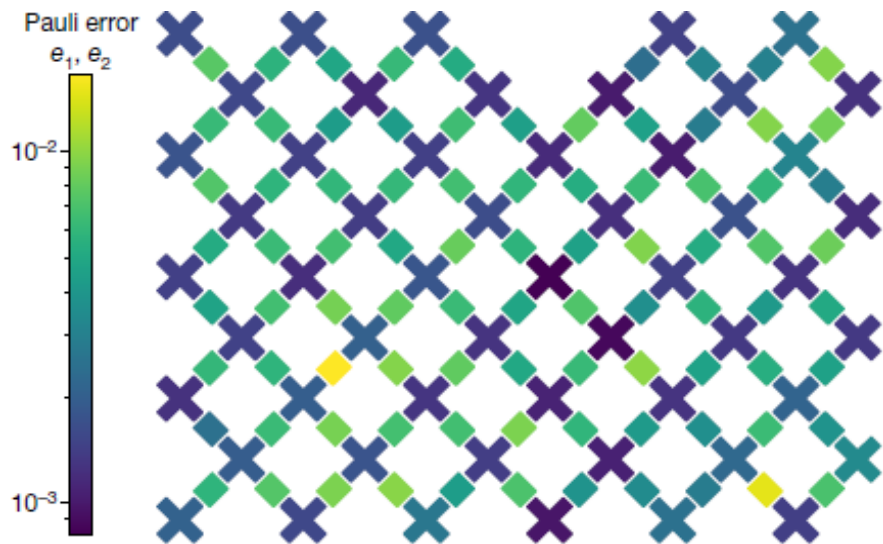


# 谷歌实现量子霸权



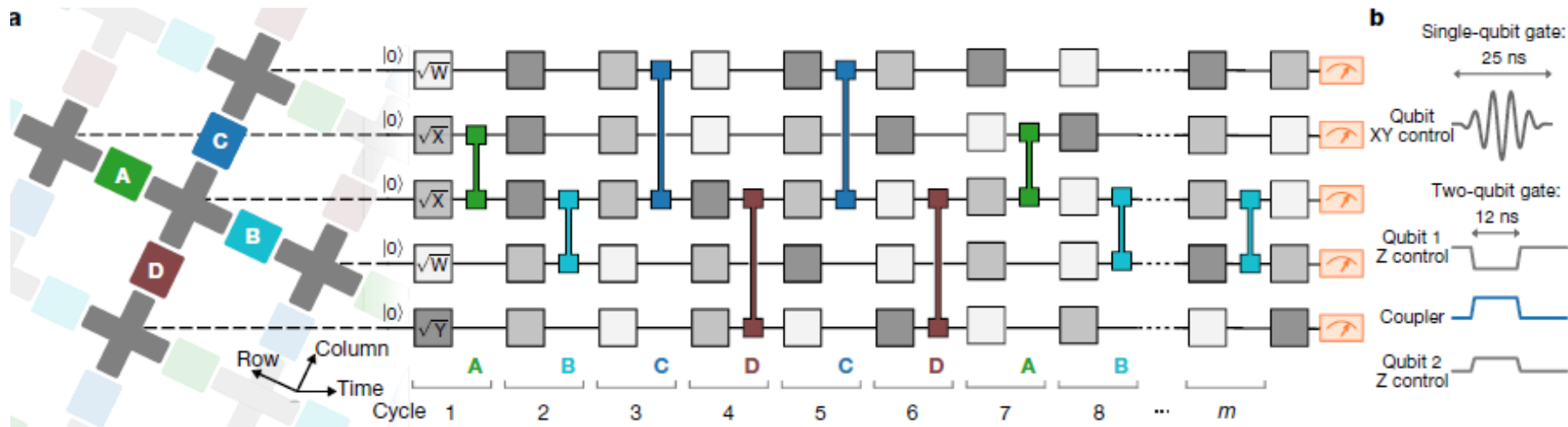
单比特 > 99.97%  
两比特 > 99.5%

# 错误率降低、耦合可控、倒装焊

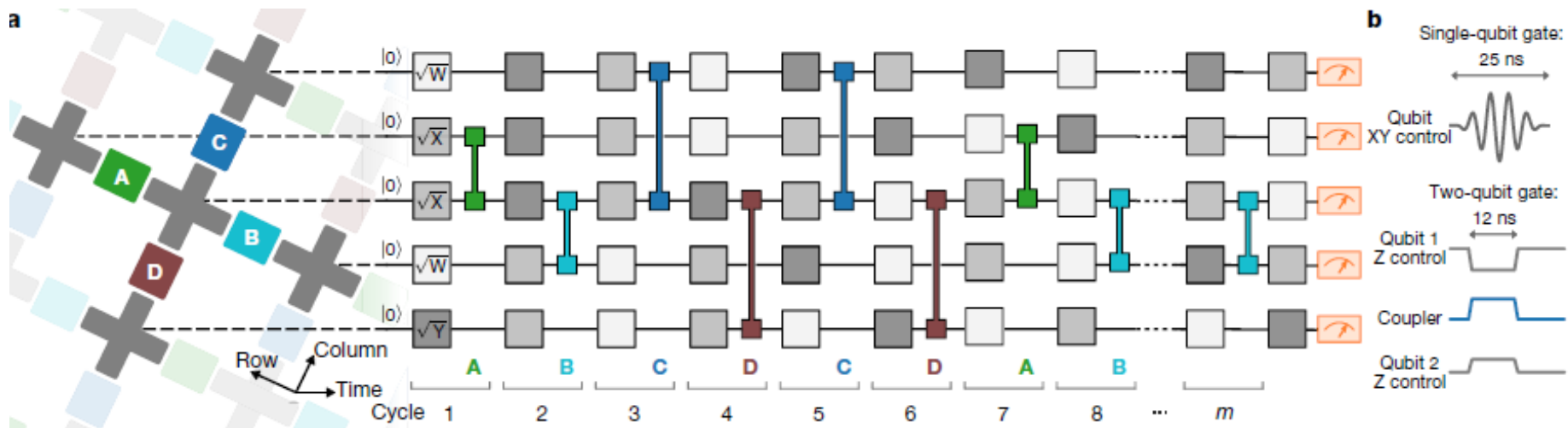


目前难点:

- 保真度
- 扩展性

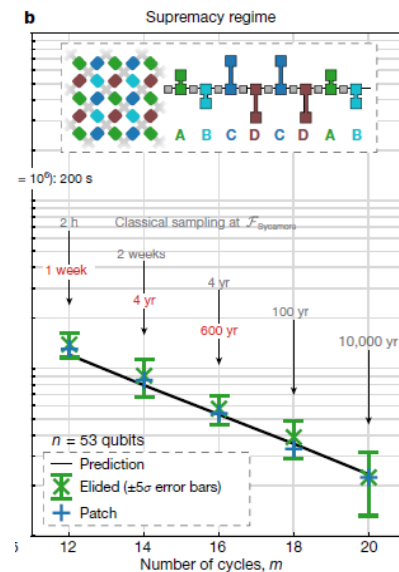
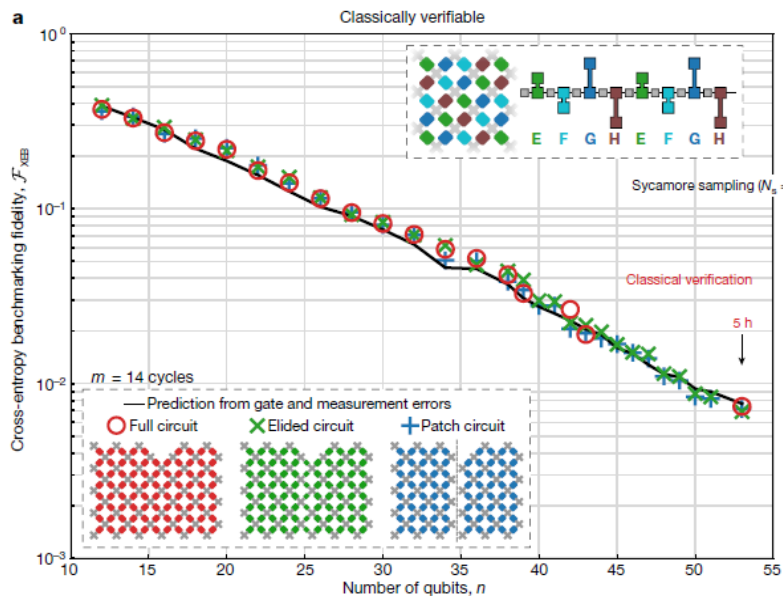


# 做了什么？随机序列

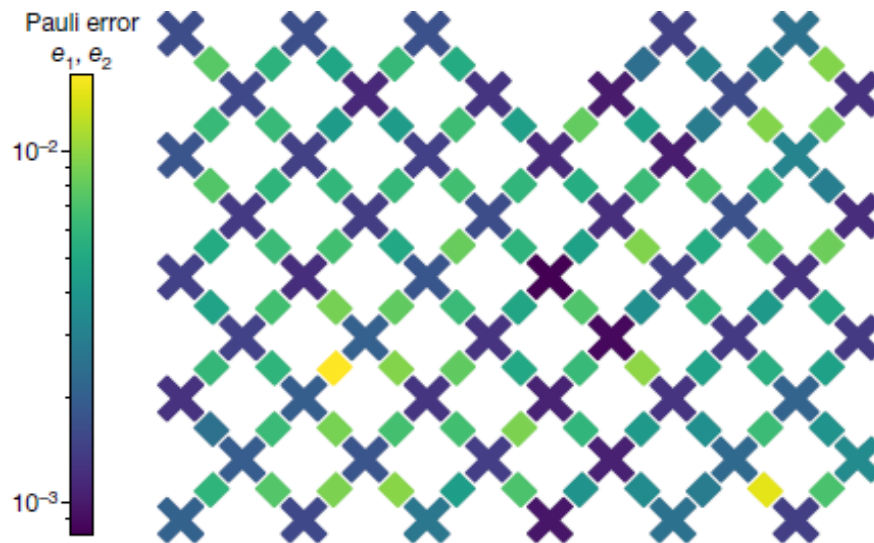


$$\mathcal{F}_{\text{XEB}} = 2^n \langle P(x_i) \rangle_i - 1$$

交叉熵  
保真度



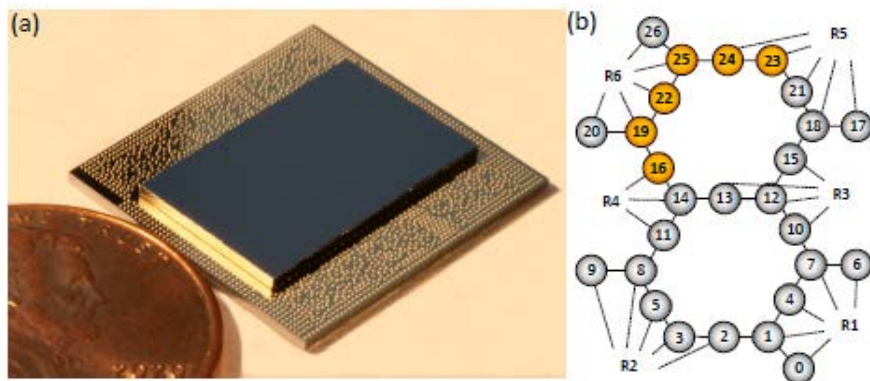
# 意义和局限？



- 高度可控的量子计算机可以超过经典计算机
- 只有最近邻耦合。
- 保真度仍待提高。
- 有实际意义的算法？

# IBM实现64量子体积

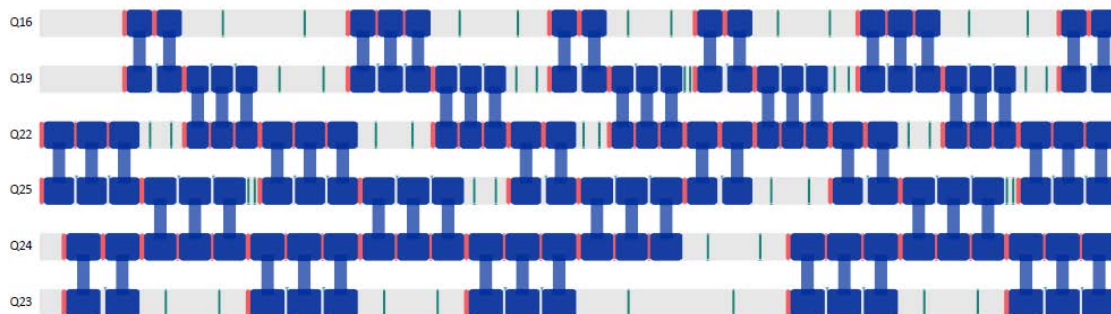
Demonstration of quantum volume 64 on a superconducting quantum computing system



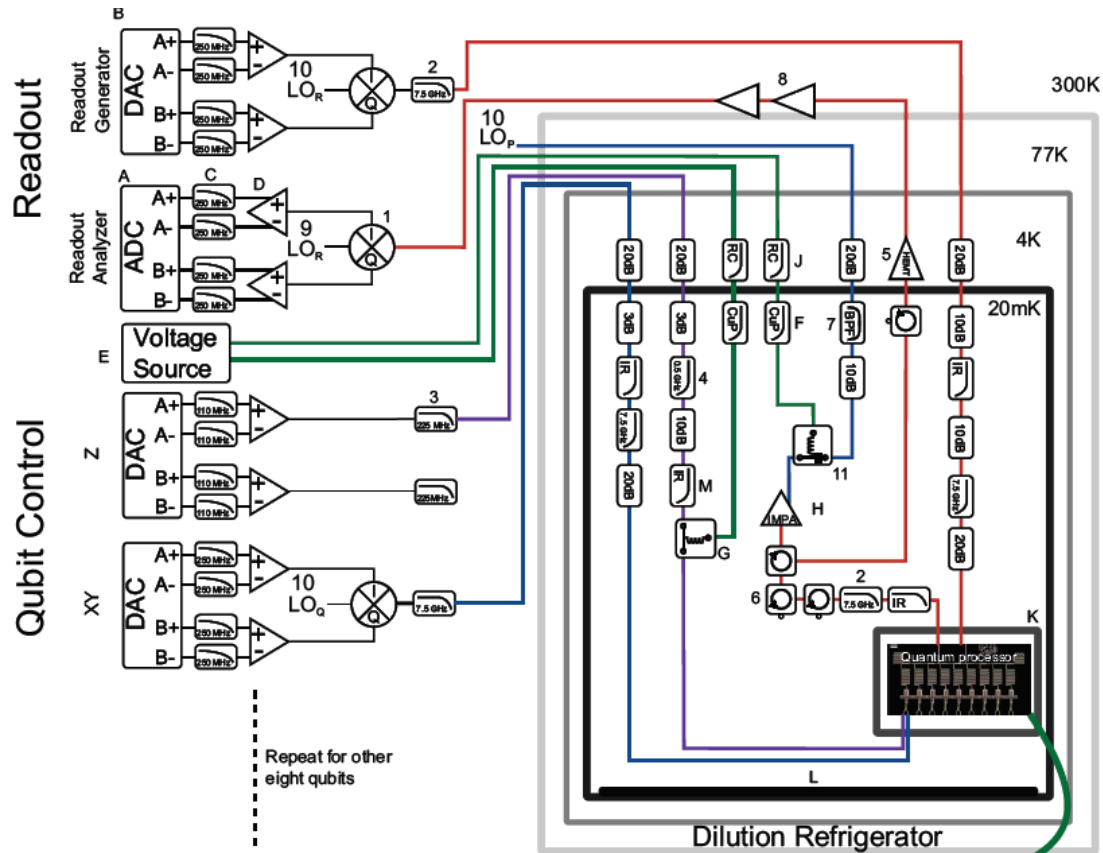
27 qubits

中的6个

单比特  $> 99.97\%$   
两比特  $> 99.3\%$



# 量子芯片测控系统不断成熟

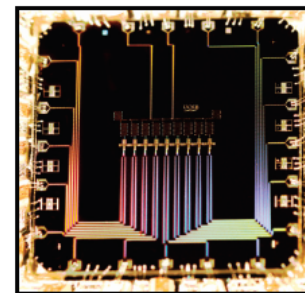


## Commercial

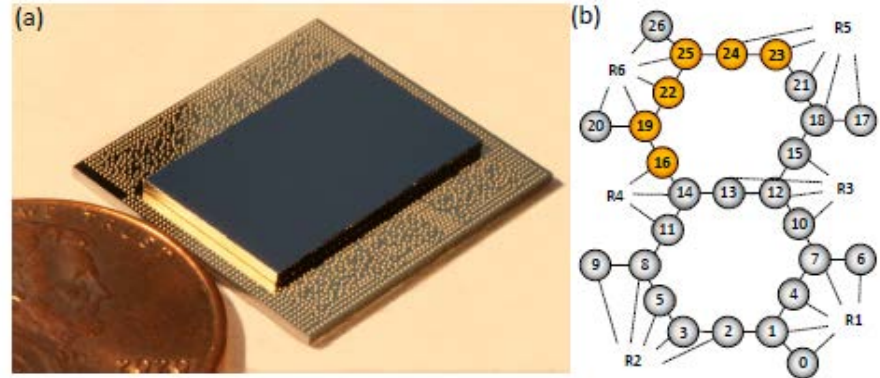
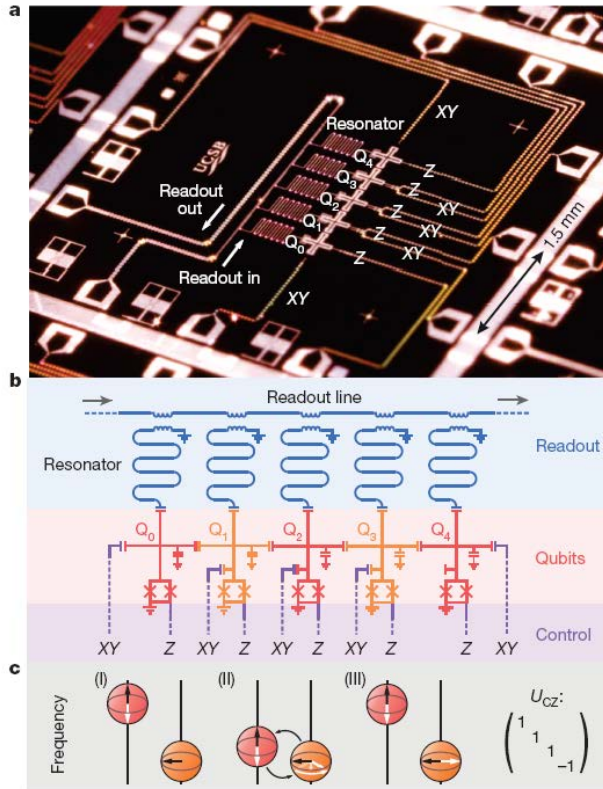
1	Marki IQ-0307
2	Marki FLP-0750
3	Mini Circuits VLFX-225
4	Mini Circuits VLFX-500
5	Low Noise Factory LNC4_8A
6	QuinStar CTH1392KS
7	Marki FB-1310
8	Miteq AFS3-0010200-22-10P-4
9	Hitite HMC-T2100
10	Anritsu MG3692C
11	Sigalek SB11D2

## Custom

A	Analog to Digital Converter (ADC)
B	Digital to Analog Converter (DAC)
C	Gaussian Filter
D	Differential Amplifier
E	Voltage source ("Fastbias Card")
F	Copper powder & light tight LPF
G	DC Bias T
H	Parametric Amplifier (MPA)
J	1.5k cold resistor
K	Magnetic Shield
L	"IR-black" coating
M	Light tight LPF



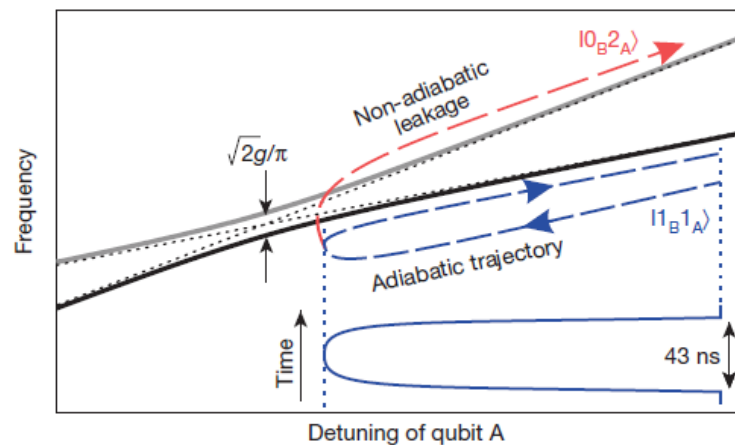
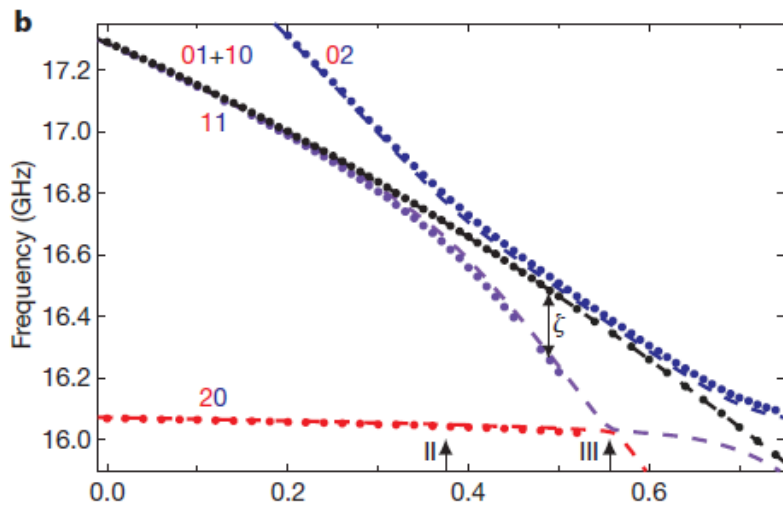
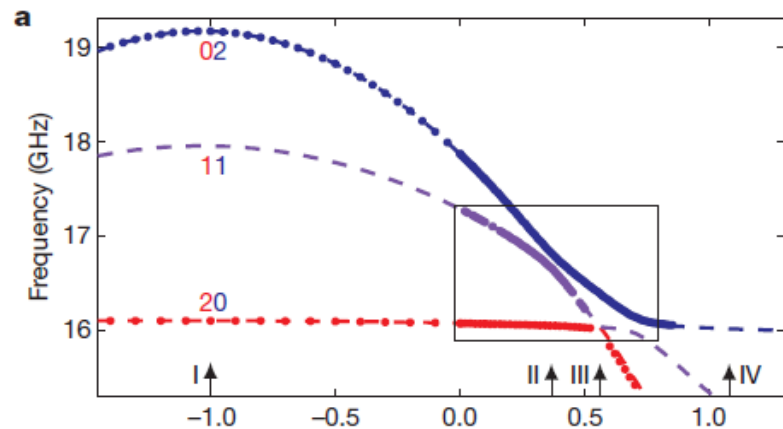
# 量子芯片架构如何改进？



IBM:  
CR, 比特固定

Google:  
比特可调, 耦合固定

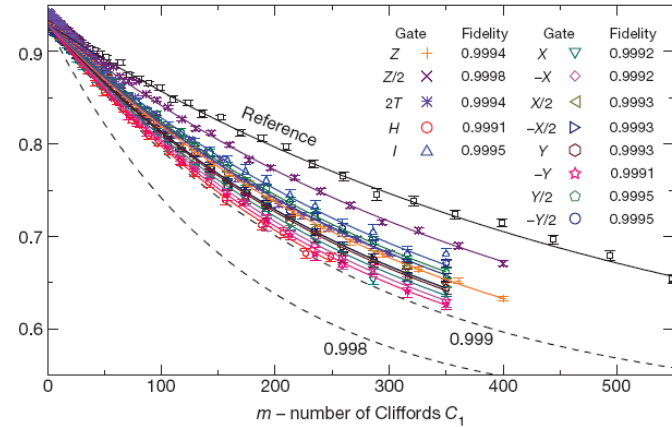
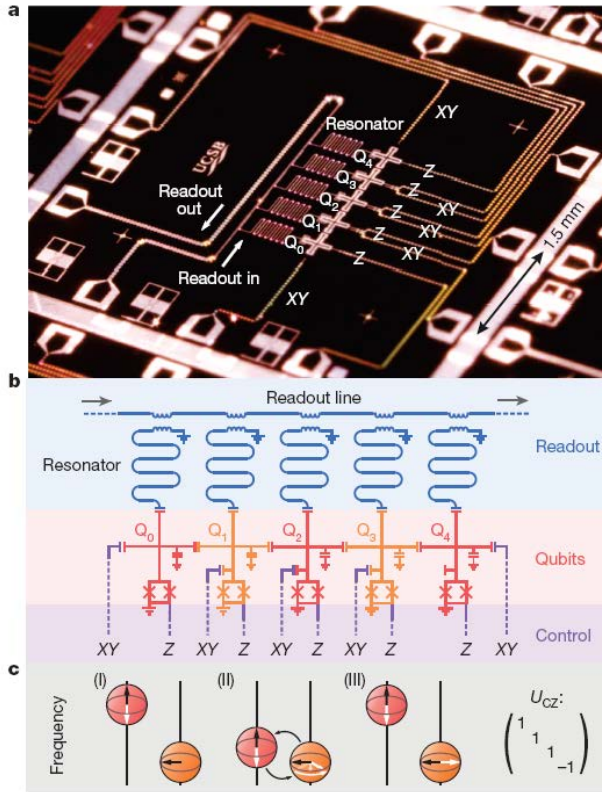
# 两比特CZ逻辑门



1. 泄漏到02态导致保真度降低。
2. Qubit可调导致退相干时间短。



# 目前的两比特耦合设计



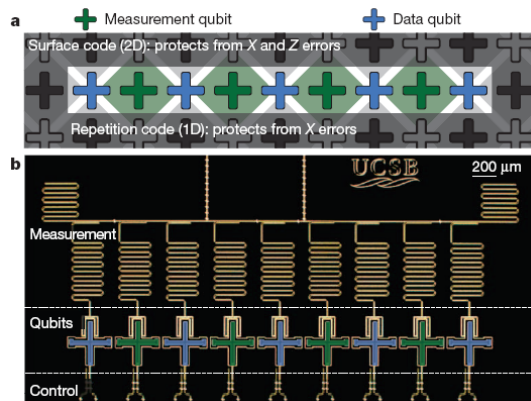
五比特实验:

单比特保真度 0.9994

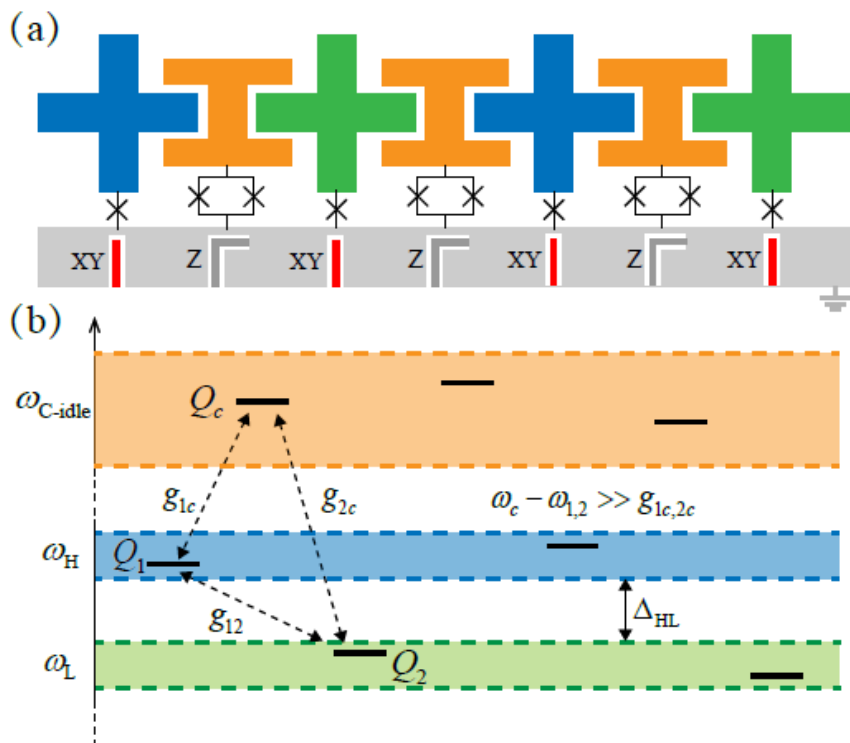
C-phase保真度  $0.9944 \pm 0.0005$

GHZ保真度  $81.7\% \pm 0.5\%$

测量保真度 (140ns) 99%

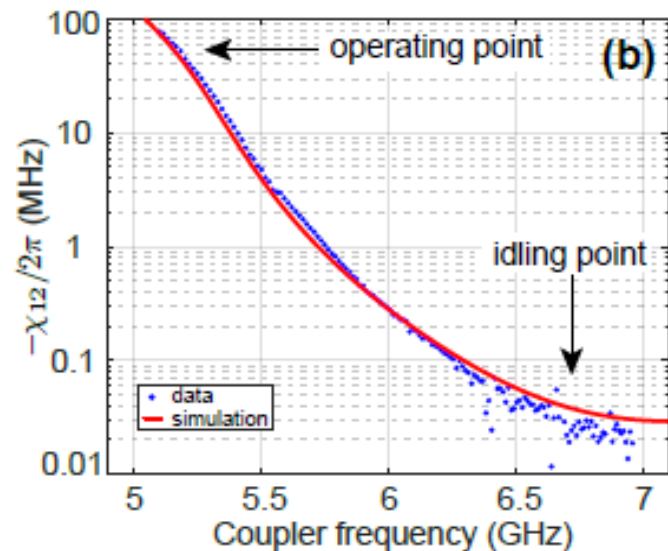
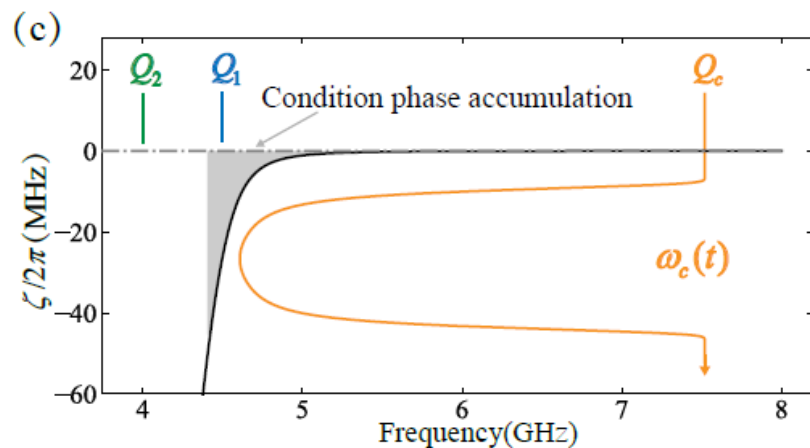


# 新的两比特耦合设计

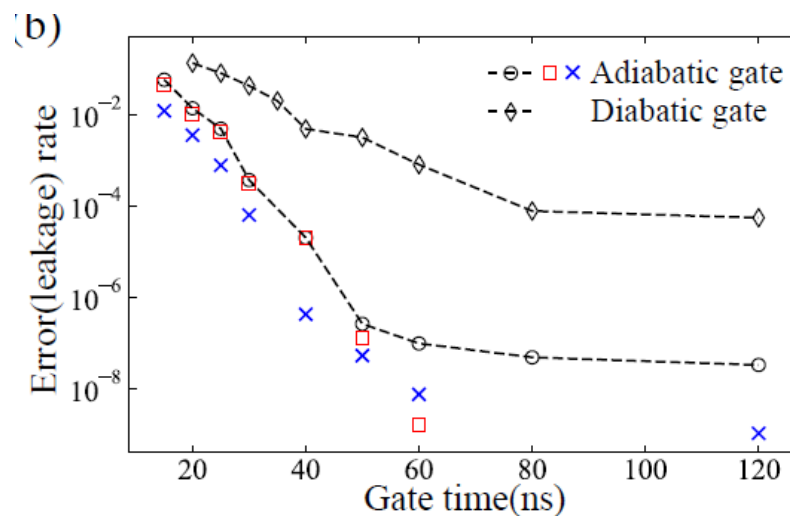
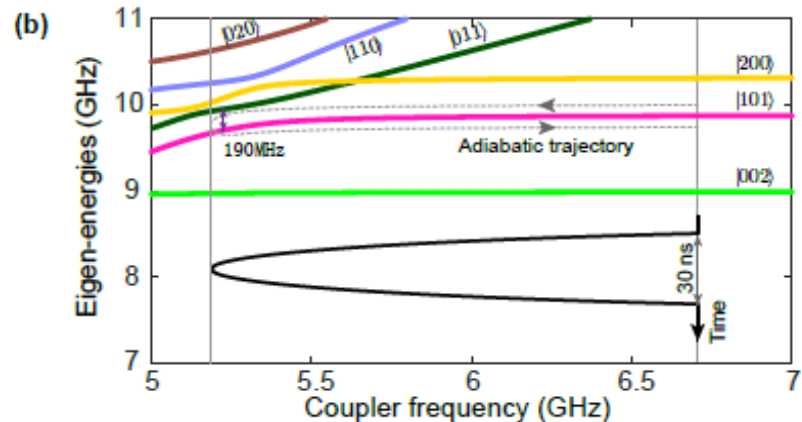
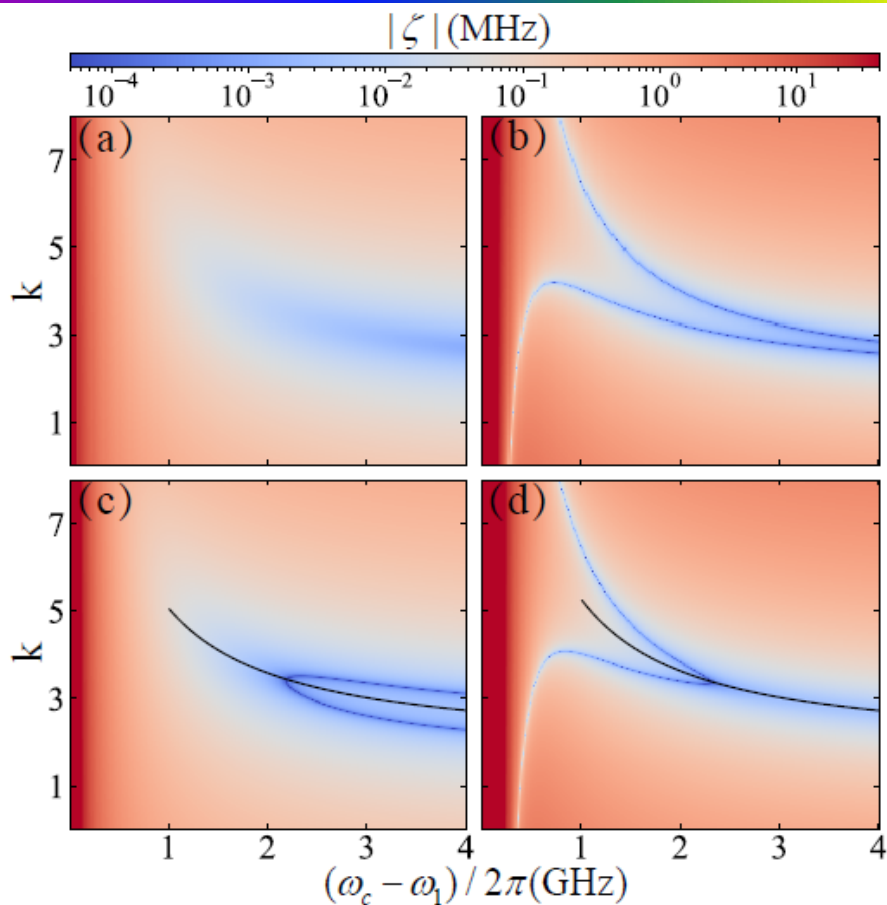


开: 100 MHz。

关: 50 kHz



# 保真度和退相干提高



保真度: 99.48%

Error 77%来自退相干

PRL in press

# 新的两比特结构设计

## High-contrast ZZ interaction using superconducting qubits with opposite-sign anharmonicity

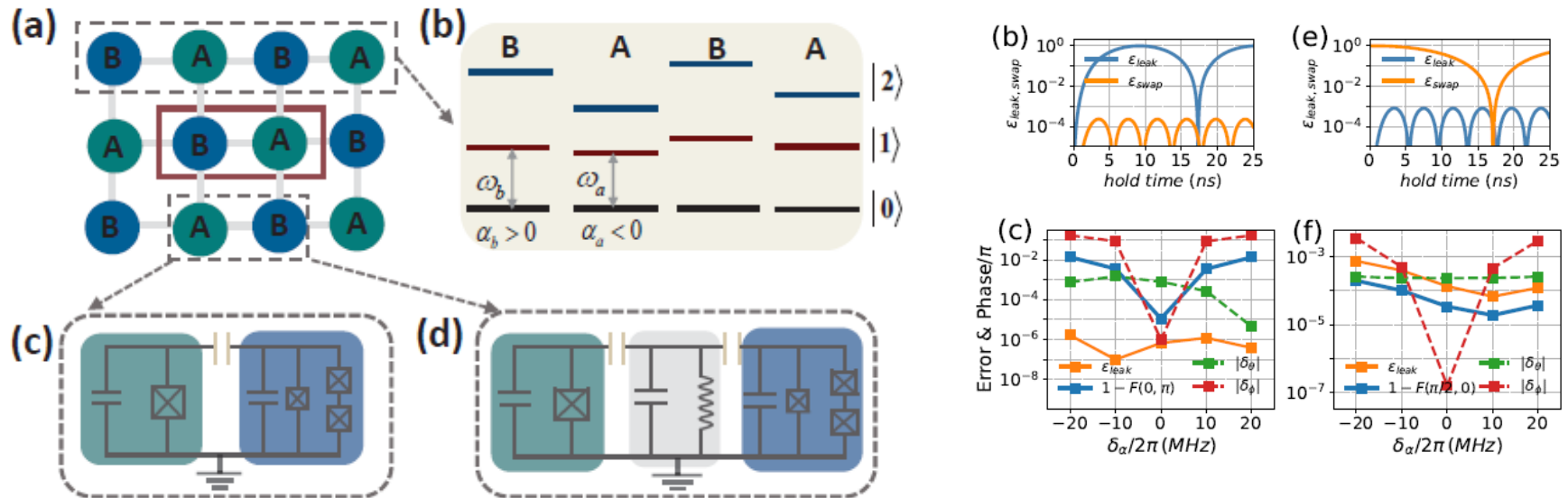
Peng Zhao,<sup>1,\*</sup> Peng Xu,<sup>1,2,3</sup> Dong Lan,<sup>1</sup> Ji Chu,<sup>1</sup> Xinsheng Tan,<sup>1,†</sup> Haifeng Yu,<sup>1</sup> and Yang Yu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Laboratory of Solid State Microstructures, School of Physics, Nanjing University, Nanjing 230039, China

<sup>2</sup>Institute of Quantum Information and Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, 210003, China

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Quantum Optics and Devices, Shanxi University, Taiyuan, 030006, China

(Dated: July 10, 2020)

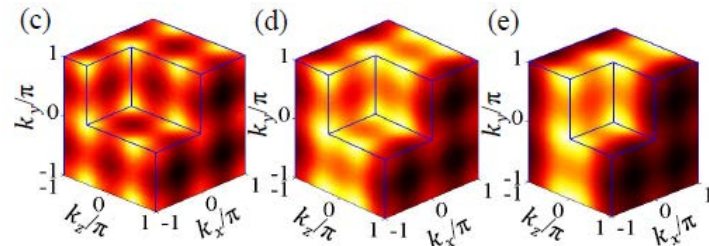
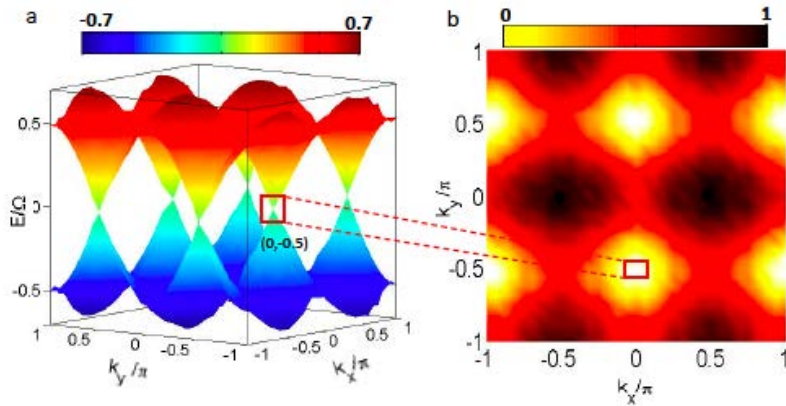
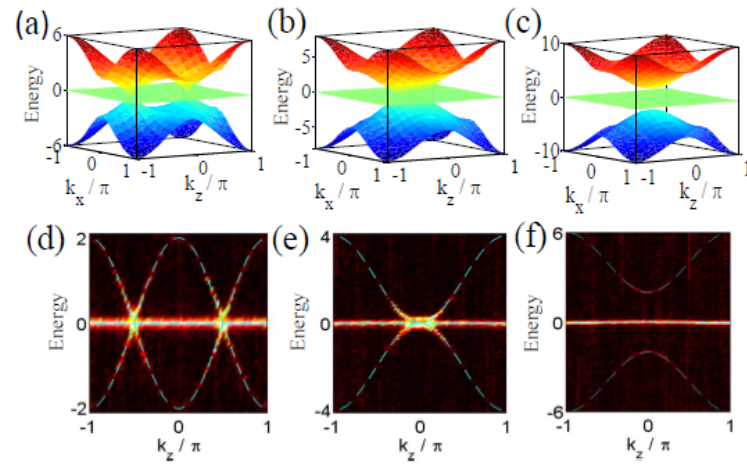


PRL in press

# 前量子计算机时代

量子模拟机：模拟拓扑材料（量子信息之外）

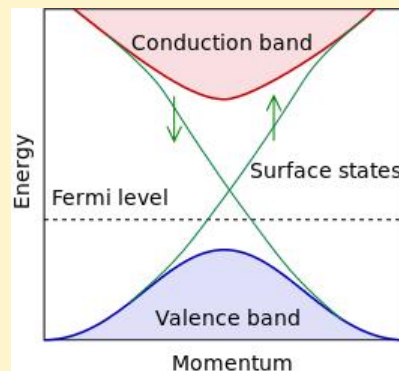
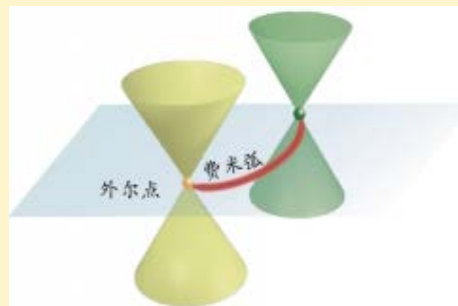
1. 能带结构
2. 拓扑性质
3. 拓扑相变



# 凝聚态物理学关心的问题

## 拓扑材料

- 拓扑绝缘体
- 外尔半金属
- 狄拉克半金属
- ...



通常具有自旋-轨道耦合

$$H(k) = \sin k_x \sigma_2 + (\lambda \pm \cos k_y) \sigma_3$$



# 在超导量子系统中实现拓扑哈密顿量

$$H(k) = \sin k_x \sigma_2 + (\lambda \pm \cos k_y) \sigma_3$$

- 难于合成这样的材料。
- 以前人们认为超导量子比特难于模拟自旋轨道耦合哈密顿量，因为超导量子比特是固定的。
- 我们提出一个新方法，把动量空间作为参数空间，可以模拟许多拓扑材料的哈密顿量。

# 自旋哈密顿量

- ▶ 自旋在磁场中的哈密顿量

$$\hat{H} = \sum_{i=0}^3 B_i S_i$$

- ▶ 微波驱动量子系统

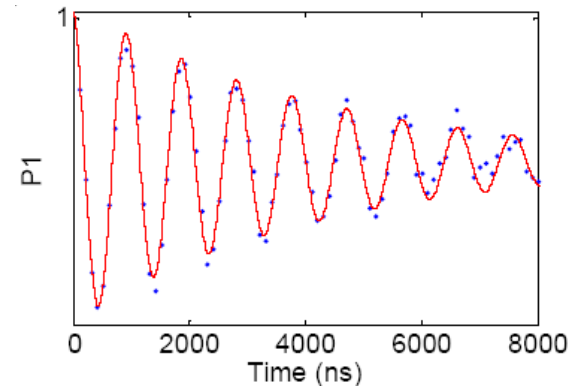
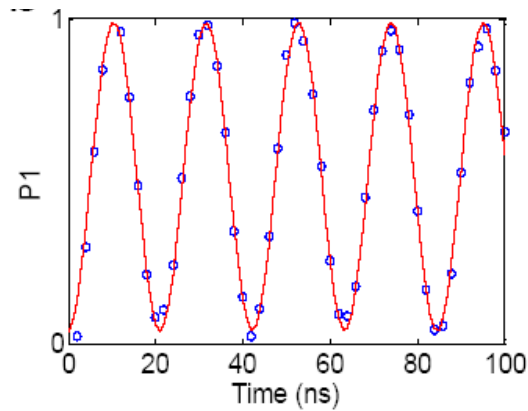
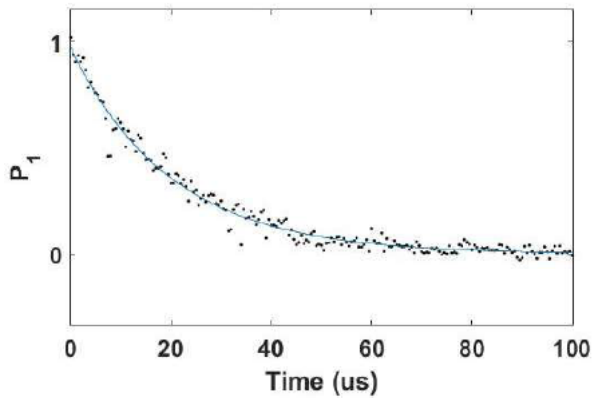
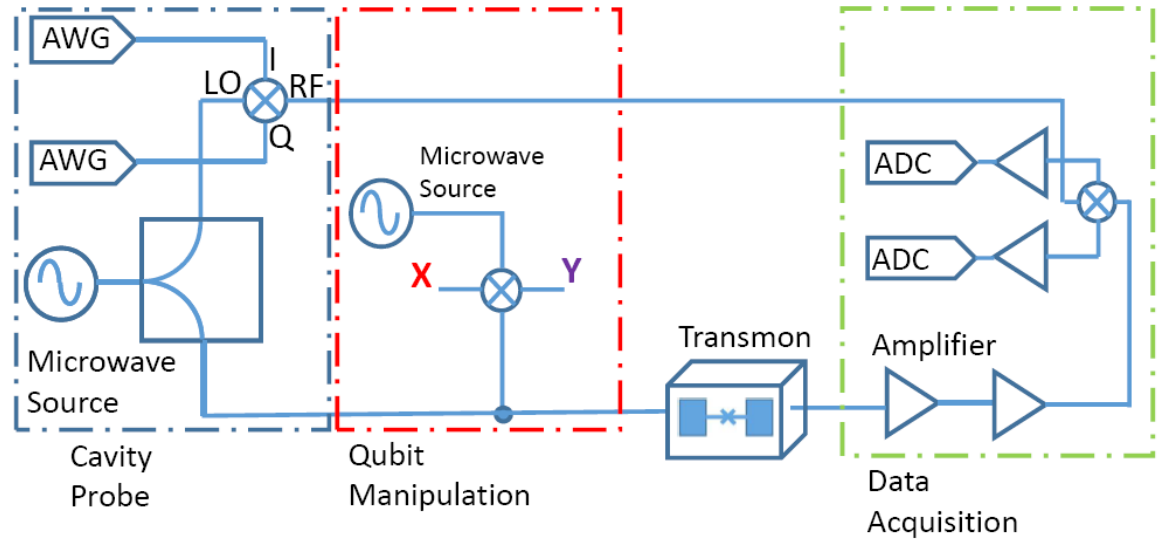
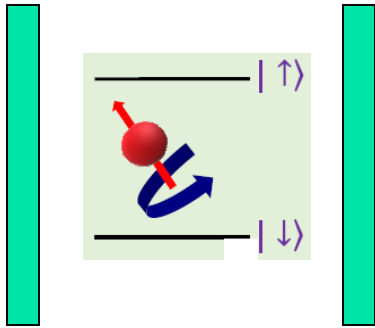
$$\hat{H} = \sum_{i=0}^3 \Omega_i S_i$$

- ▶ 拓扑材料哈密顿量子举例

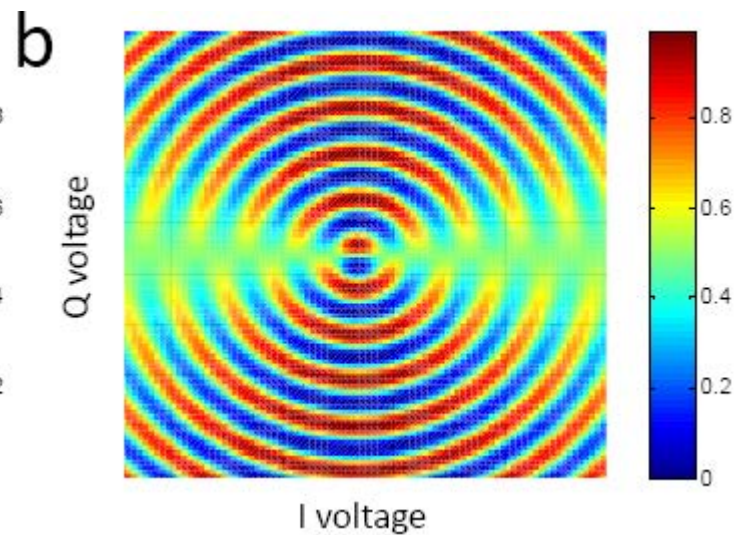
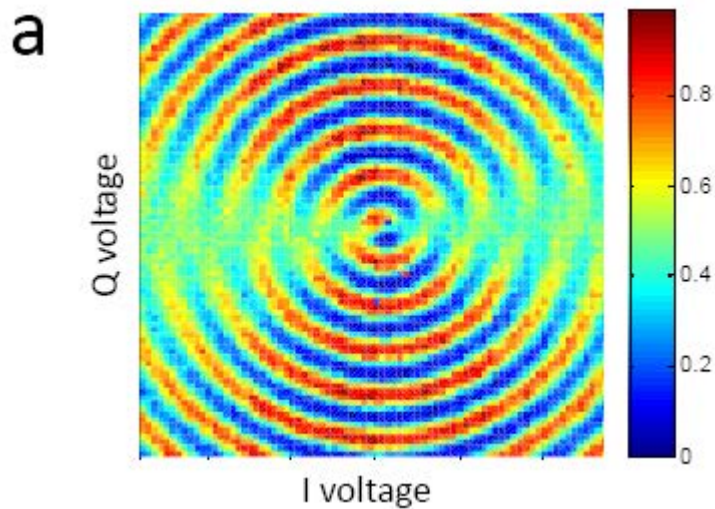
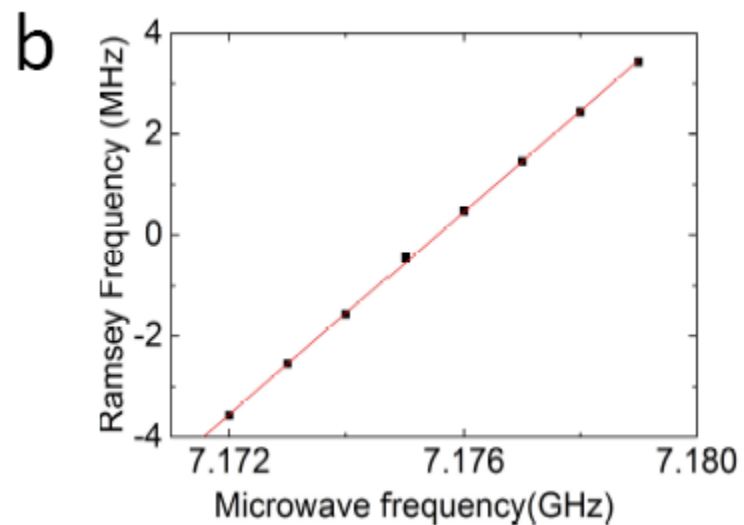
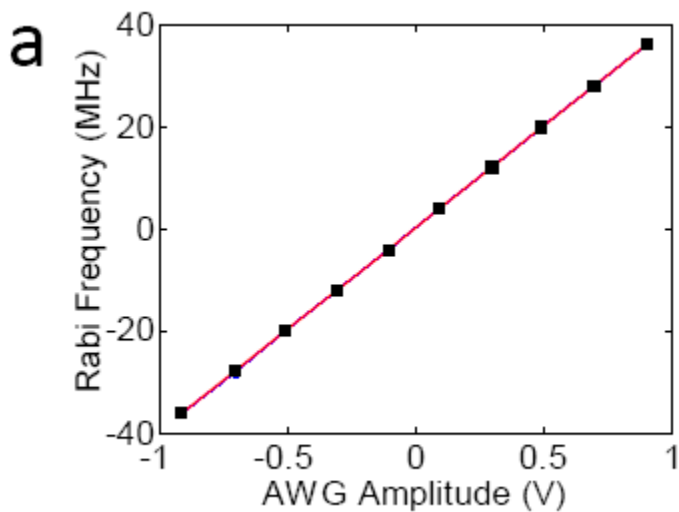
$$H(k) = \sin k_x \sigma_2 + (\lambda \pm \cos k_y) \sigma_3$$



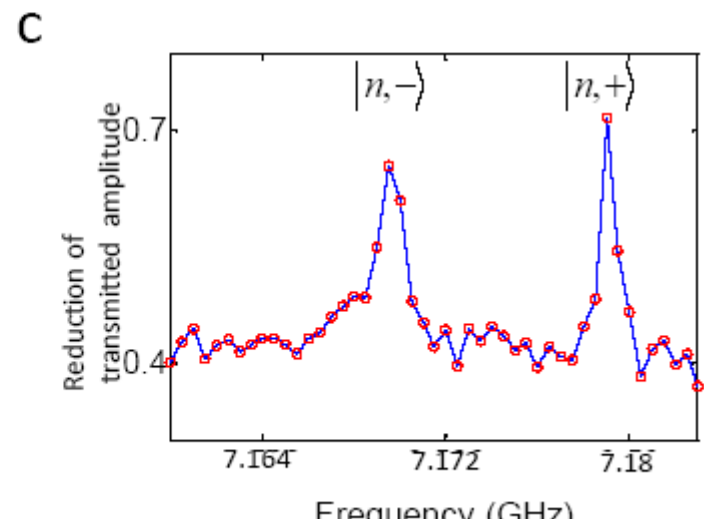
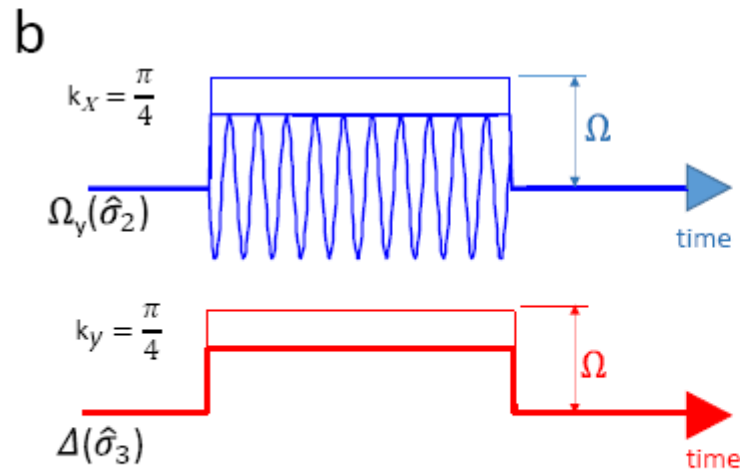
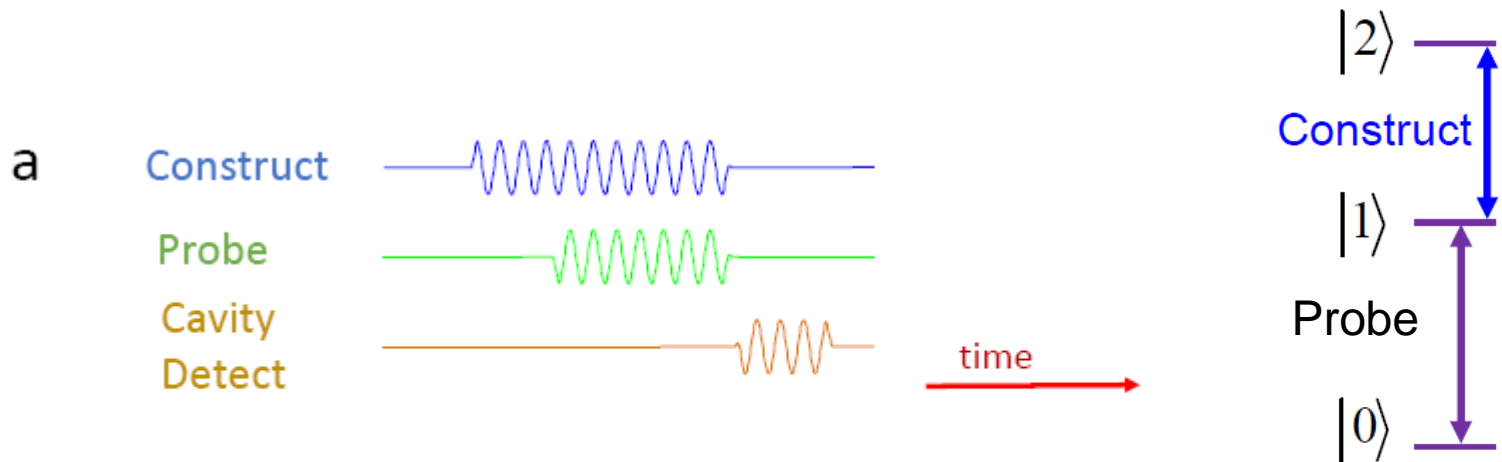
# 3D Transmon



# 参数校准



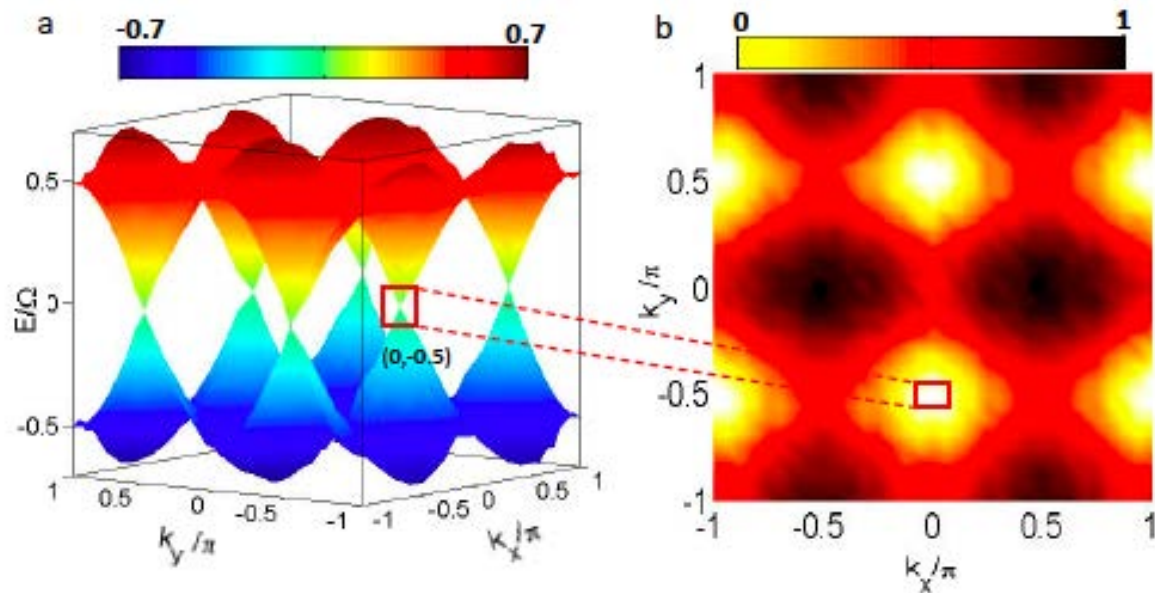
# 能谱测量



$$E_n = \omega_{01} + m\omega_{12} + \Delta_{12}/2 \pm \sqrt{\Delta_{12}^2 + \Omega_{12}^2}/2, \quad m = 0, 1$$

$$\Delta_{12} = \lambda + \cos k_y \quad \Omega_{12} = \sin k_x$$

# 能谱



$$H(k) = \sin k_x \sigma_2 + (\lambda \pm \cos k_y) \sigma_3$$

能谱结构第一布里渊区 Brillouin zone (BZ).

4个狄拉克点可以被直接观测到  $(0, \pm\pi/2), (\pi, \pm\pi/2)$

# 提 纲

- 超导量子电路：人工原子
- 磁场中的自旋和微波驱动下的量子系统
- 模拟自旋为  $1/2$  系统：外尔半金属
- 模拟自旋为  $1$  系统：拓扑麦克斯韦金属

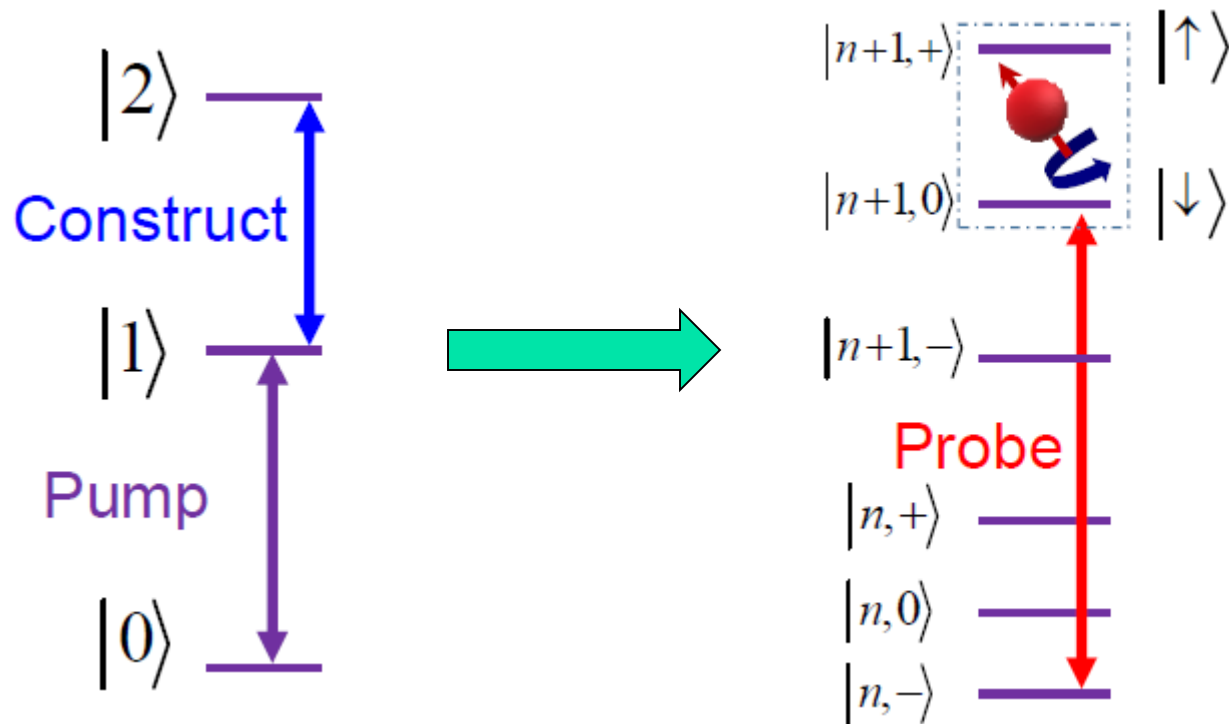
# Motivation

- 狄拉克费米子——外尔费米子——马约拉纳费米子
- 外尔半金属中手征反常是一个热门话题，手征反常的关键在于在平行的电场 $E$ 和磁场 $B$ 的作用下，左手(右手)手性的外尔点转化为右手(左手)手性的外尔点。
- 另一种拓扑现象-手征磁效应实验没有看到过。当一对手性相反的外尔点出现能量差时，引入外加磁场将导致外尔点附近产生正比于磁场强度并沿着磁场方向的拓扑电流。

手征磁效应纯粹由拓扑特性引起。

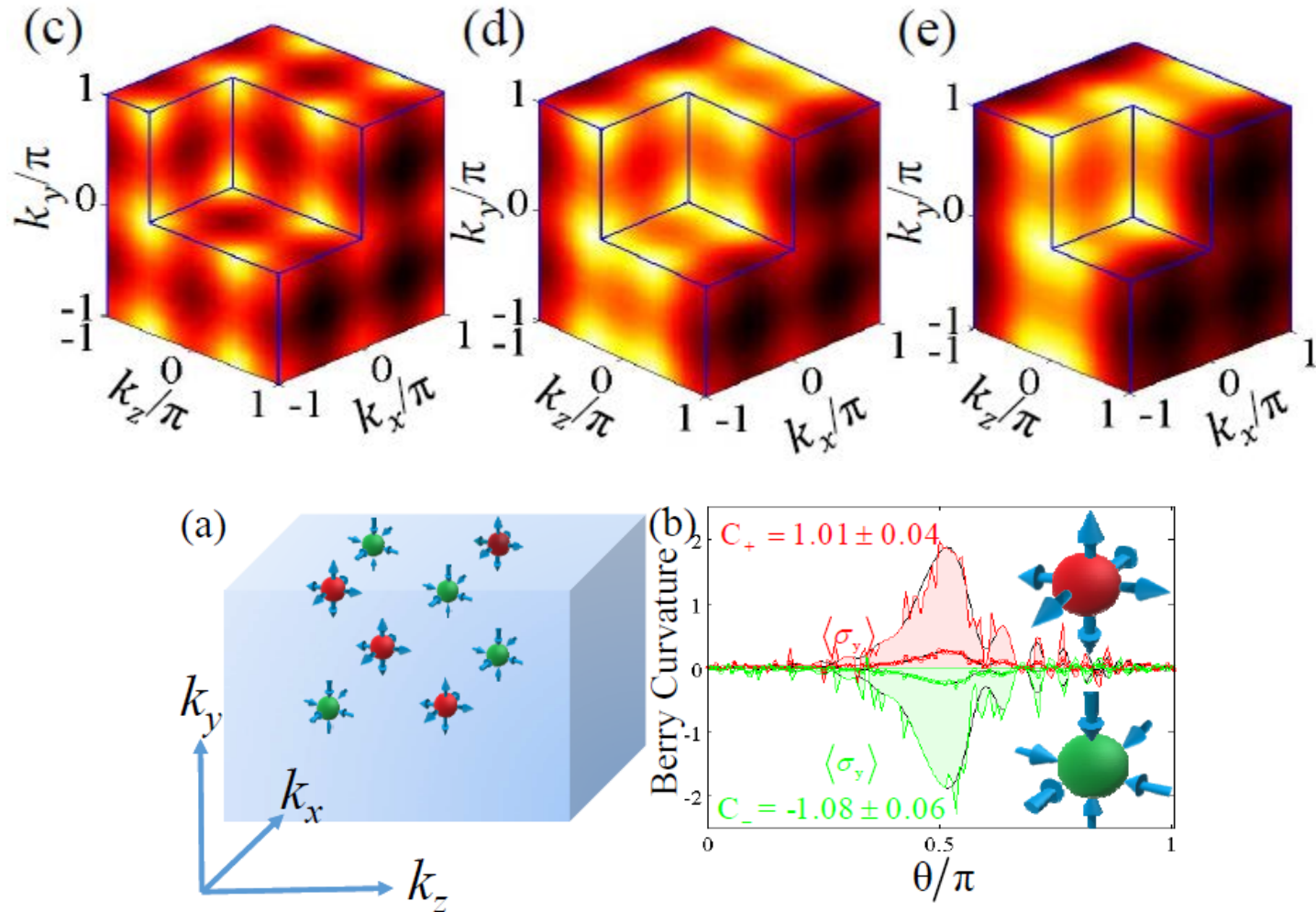
手征反常的实现需要电场 $E$ 和磁场 $B$ 的共同作用，而手征磁效应引起的拓扑电流通常只需要磁场 $B$ 的作用就可以。

# 模拟外尔半金属选用的能级



$$H(k) = \sin k_x \sigma_x + \sin k_y \sigma_y + (\lambda + \cos k_z) \sigma_z$$

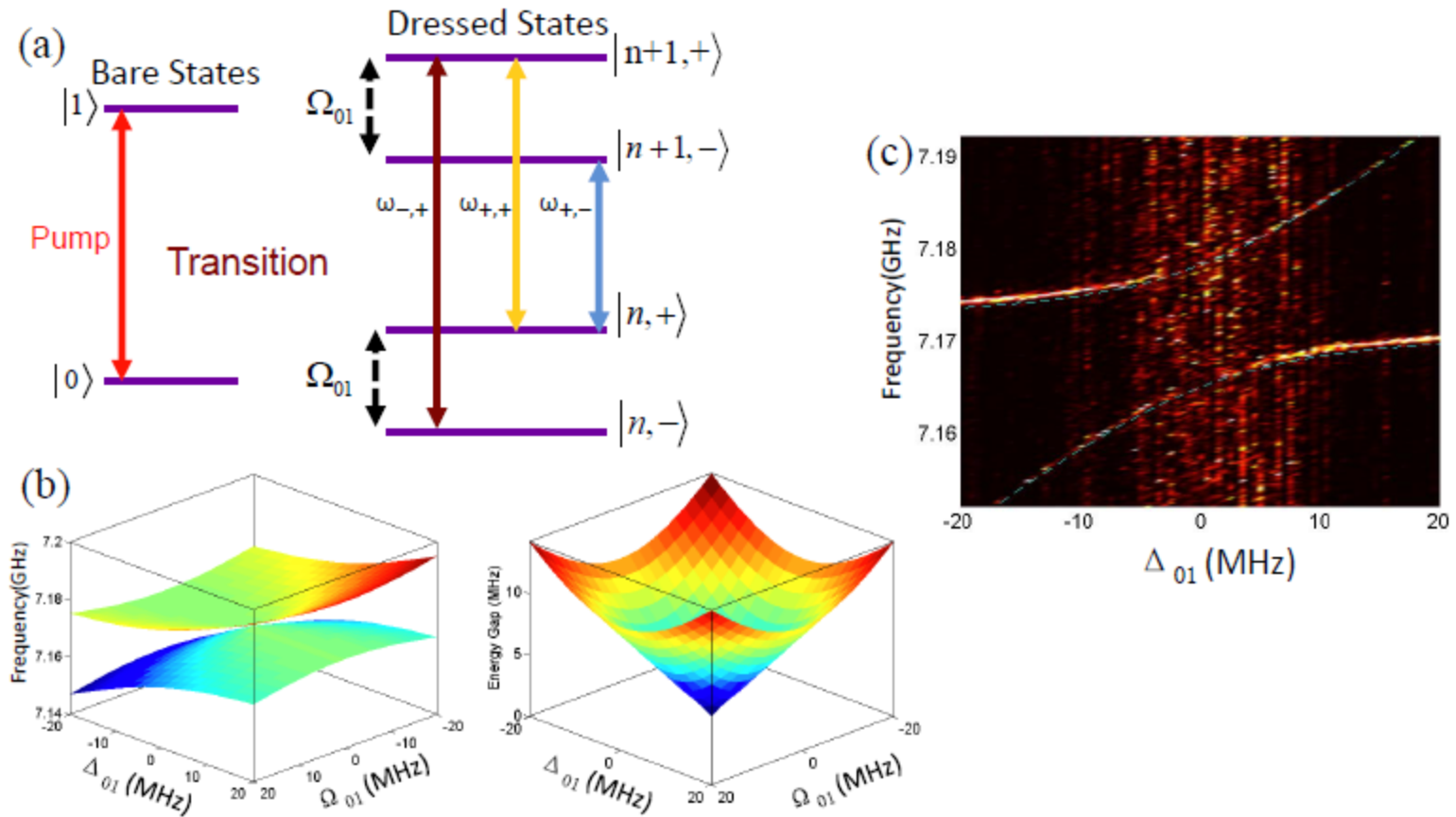
# 外尔半金属



k 空间调控能带

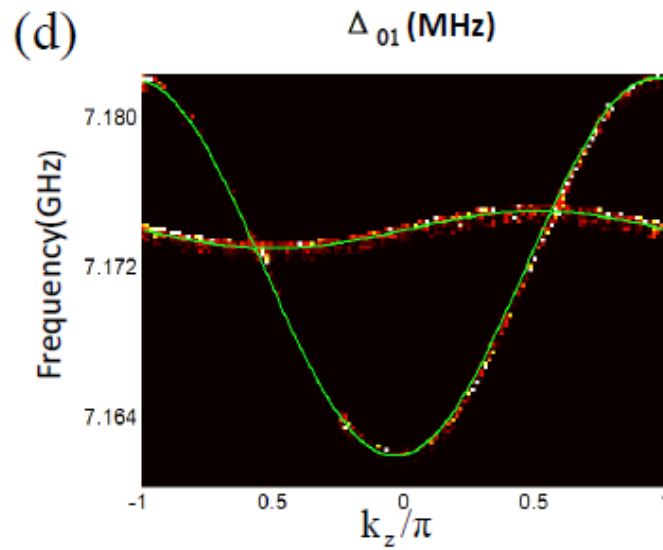
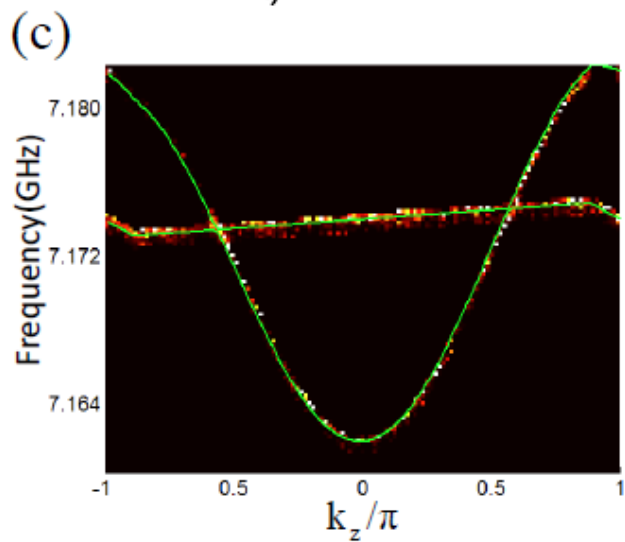
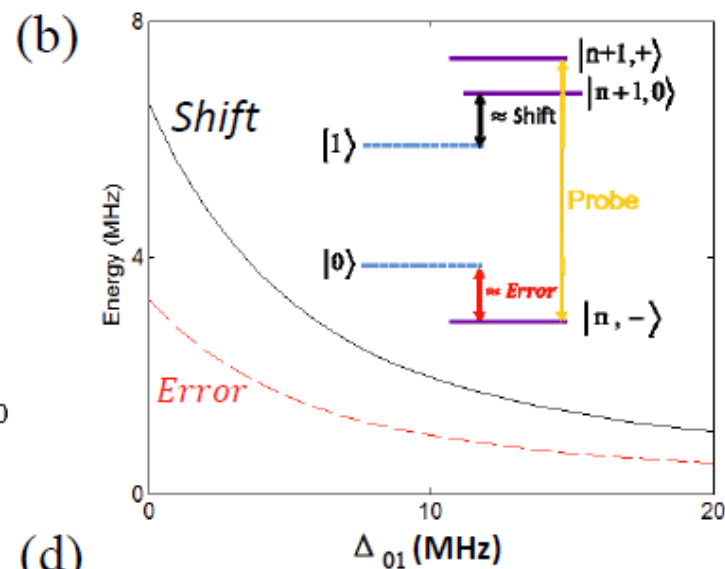
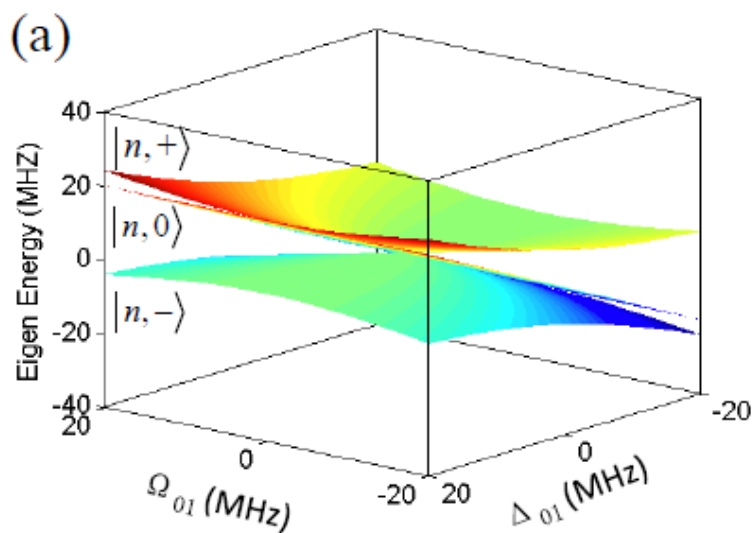


# 改变能量的零点

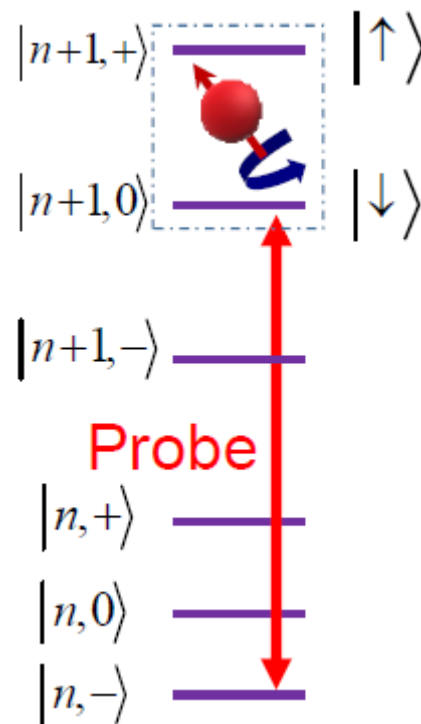
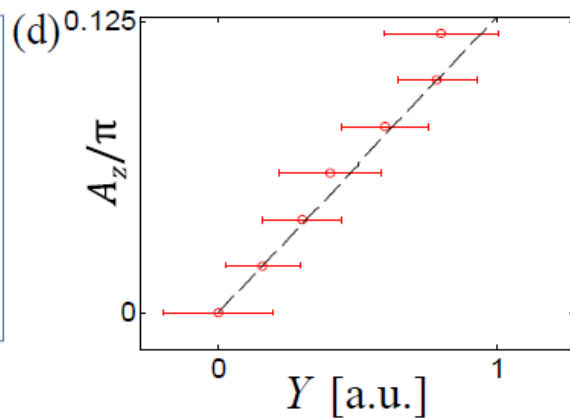
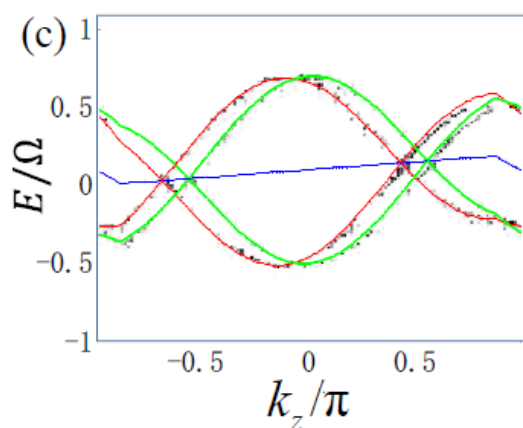
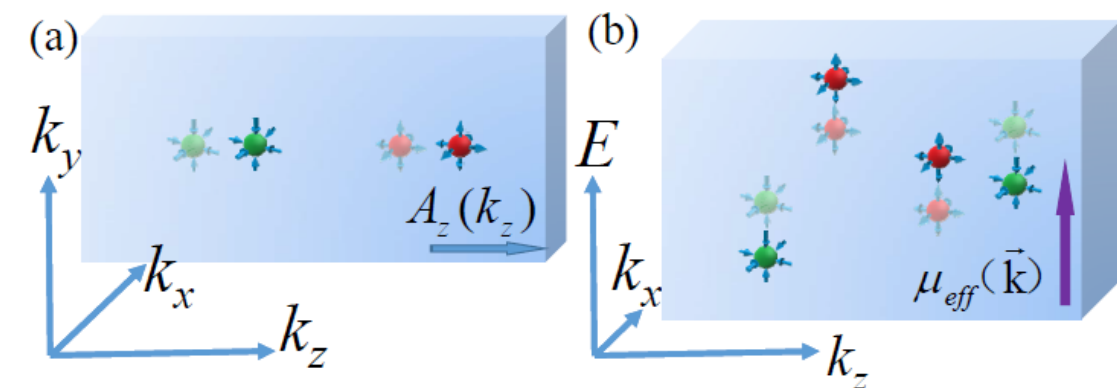


Mollow Triplet

# 参数校准及动量依赖的化学势



# 手征磁效应



$$H(\mathbf{k}) = \sin k_x \sigma_x + \sin k_y \sigma_y + (\lambda + \cos k_z) \sigma_z + \mu_{eff}(\mathbf{k}) \sigma_0,$$

$$\mathbf{J}_{topo} = \frac{b_0}{4\pi^2} \mathbf{B} \quad b_\mu = \sum_s (K_s^{+,\mu} - K_s^{-,\mu})$$

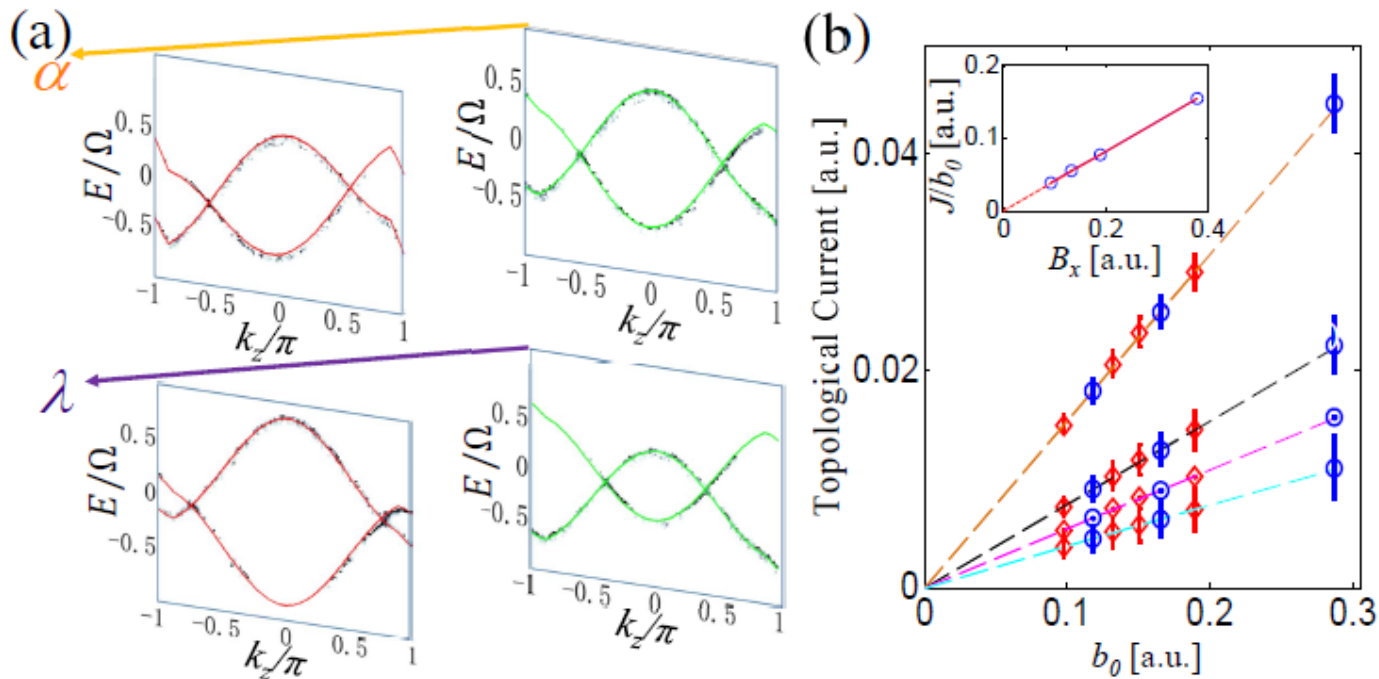
能量空间调控能带，调节外尔点的能量

# 手征磁效应

在  $k_z$  上加偏移  $k_z + A_z$ , 等价于加规范场,  $B_x = \partial A_z / \partial Y$

由于在外尔点附近能带和动量有很好的线性依赖关系,  $A_z$  的微小变化将导致能量的变化。能量变化等于力乘位移

$$\Delta E \propto \Delta A_z, \quad \Delta E \propto F_Y \Delta Y \rightarrow \Delta A_z \propto \Delta Y$$



Tan, Xinsheng *et. al*, *Phys.Rev. Lett.* 122,010501 (2019).

# 提纲

- 超导量子电路：人工原子
- 磁场中的自旋和微波驱动下的量子系统
- 模拟自旋为  $1/2$  系统：外尔半金属
- 模拟自旋为  $1$  系统：拓扑麦克斯韦金属

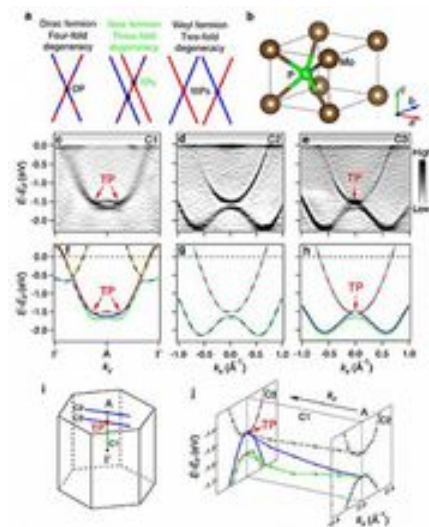
# Motivation

➤理论预言在固体系统中可能存在和狄拉克（4重）-外尔（2重）-马约拉纳费米子不同的费米子，具有3重简并。

➤丁洪课题组磷化钼的电子结构（2017），看到3重简并能带结构。 评为十大科学进展

➤但是拓扑性质有待进一步验证。

$$\mathcal{H}(\mathbf{k}) = R_x S_x + R_y S_y + R_z S_z,$$



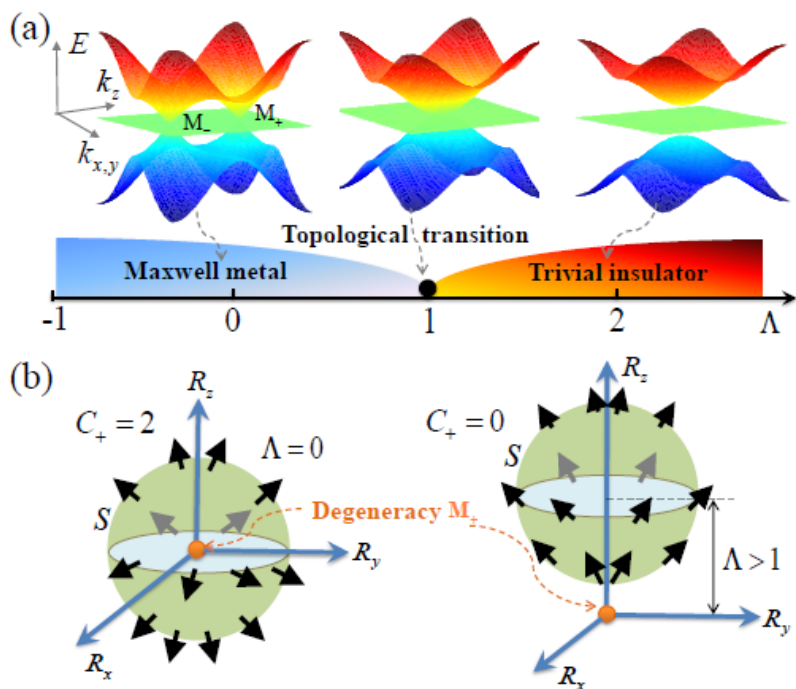
模拟我校朱诗亮老师课题组理论预言的麦克斯韦金属。  
具有三重简并、陈数2、拓扑相变等特性

# Spin-1的麦克斯韦金属

$$\mathcal{H}(\mathbf{k}) = R_x S_x + R_y S_y + R_z S_z,$$

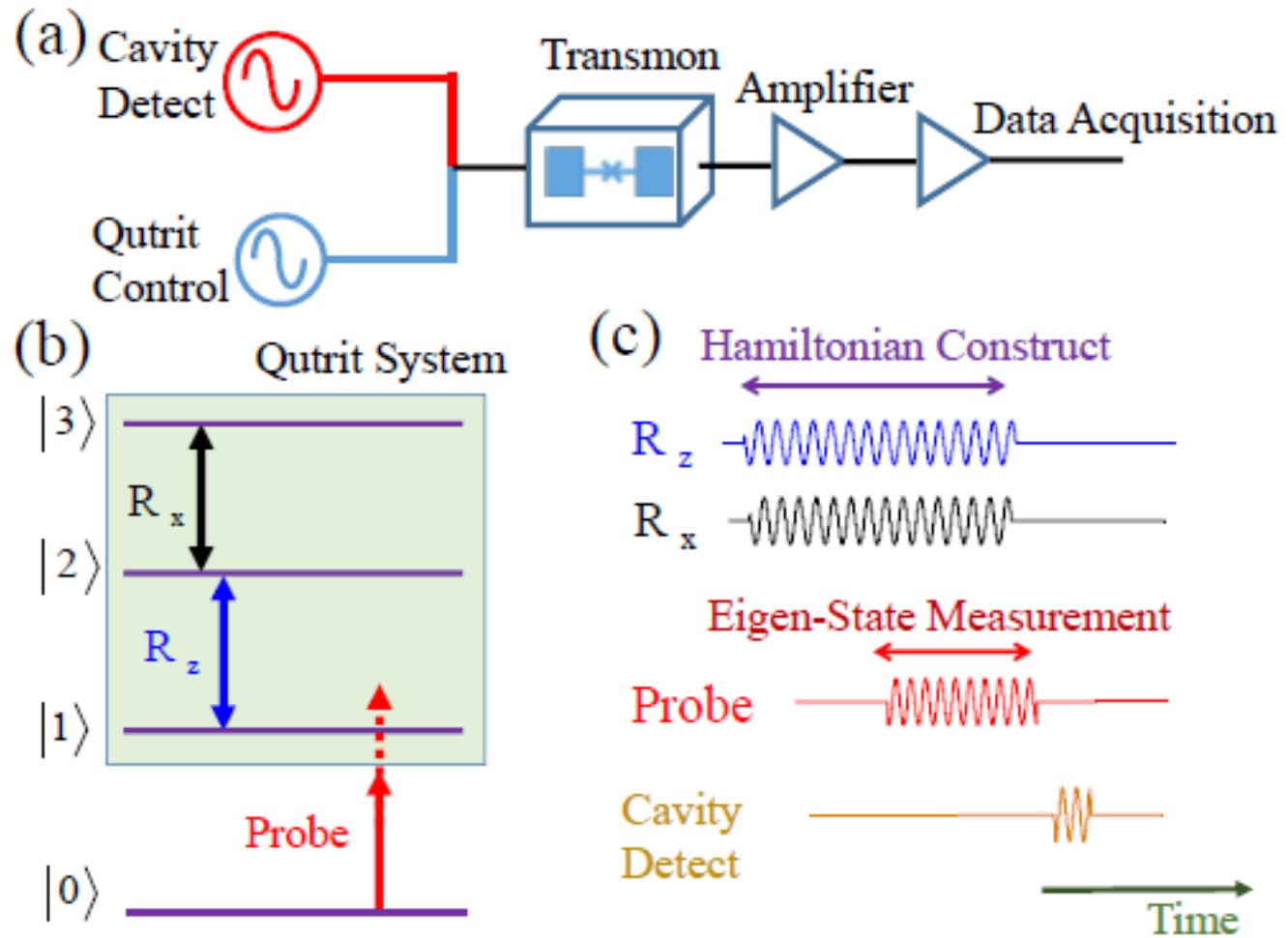
$$\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)$$

$$R_x = \sin k_x, R_y = \sin k_y \quad R_z = \Lambda + 2 - \cos k_x - \cos k_y - \cos k_z$$



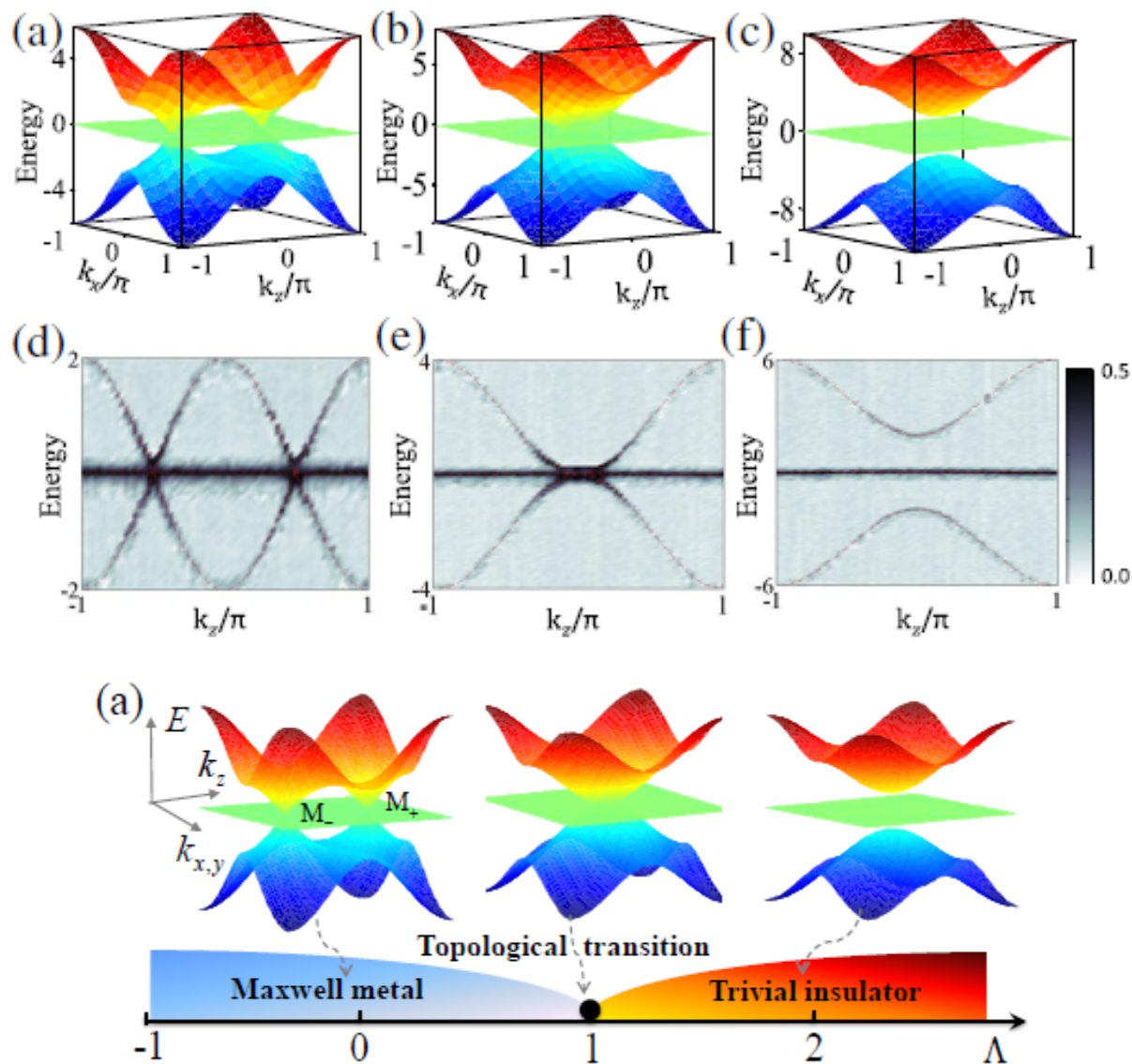
- Two Maxwell points  $M_\pm$
- Topological transition from Maxwell metal to trivial insulator
- Chern number of Maxwell points =  $\pm 2$

# 能谱测量

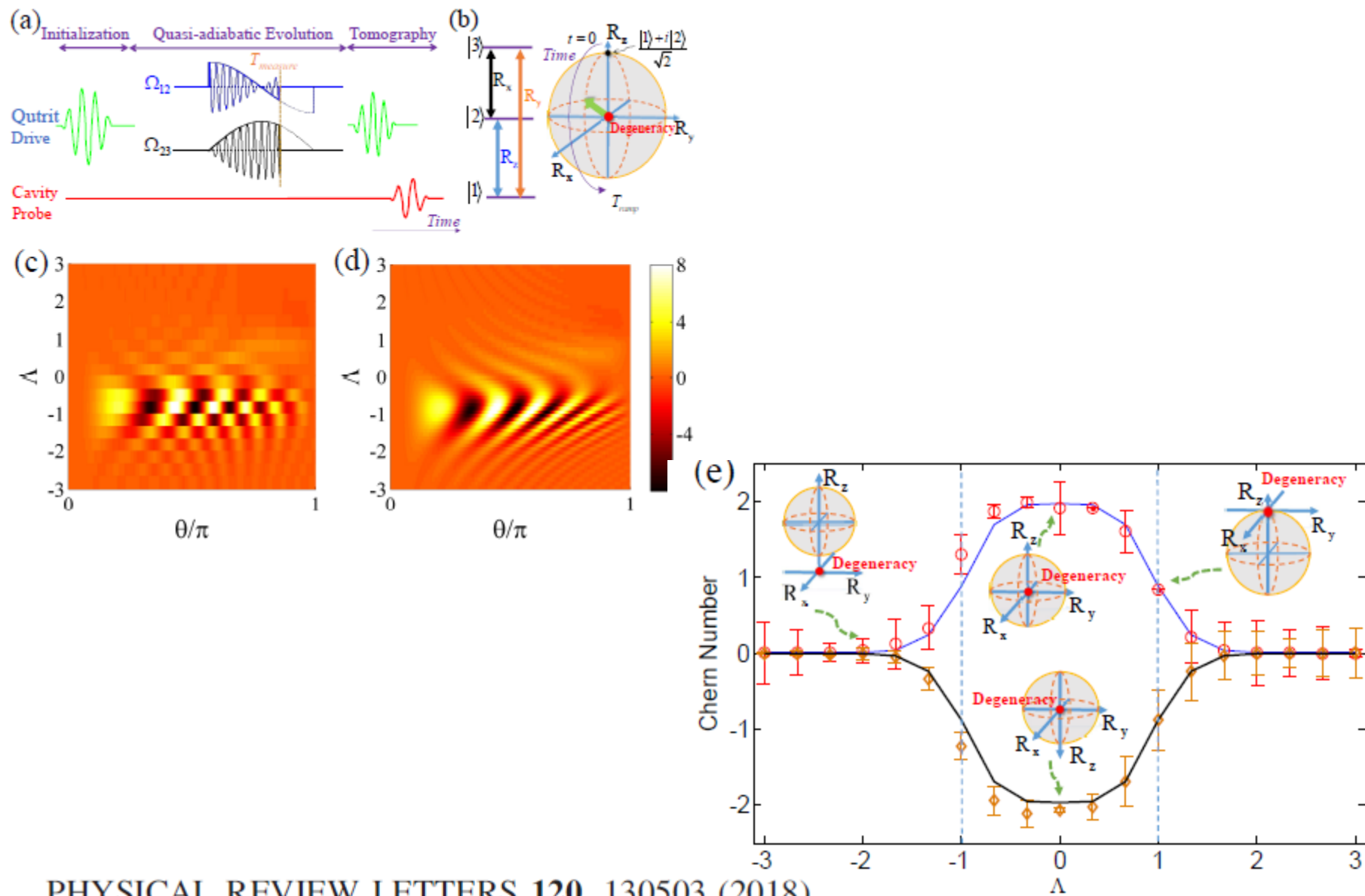




# 能带结构



# 陈数的测量



# 展望

- 通用性：利用一个系统完成多种拓扑材料的模拟
- 实用性：把凝聚态物理和超导量子比特联系起来
- 升级：多比特模拟相互作用系统。

谢谢!

