

自旋超导二极管

孙庆丰

北京大学 物理学院 量子中心

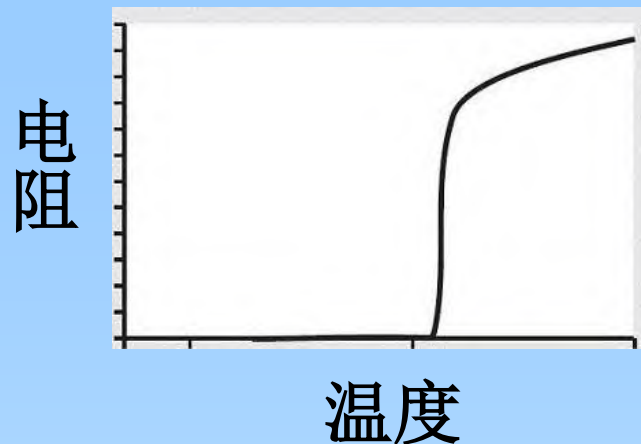
2024年 12月 7日

自旋超导二极管

- 一、超导介绍
- 二、自旋超导介绍
- 三、超导二极管
- 四、自旋超导二极管
- 五、总结

一、超导介绍

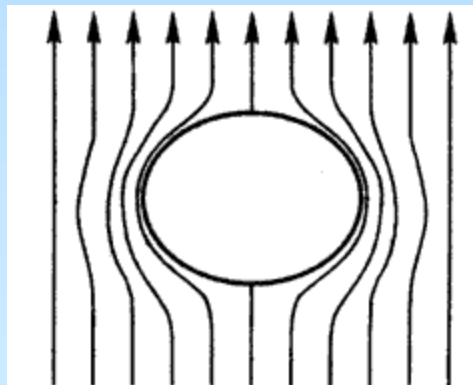
❁ 零电阻现象:



当温度小于 T_c 时，电阻变为0.

❁ Meissner效应

完全抗磁性:



* Josephson效应

二个超导弱耦合，如：SIS、SNS:



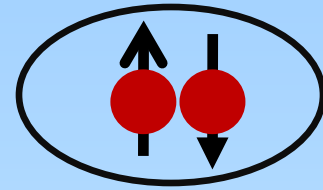
0电压时，可以有电流；

有限dc电压时，出现ac电流.

* 超导起因和BCS理论:

电子电子之间的吸引相互作用，使得二电子结合成库珀对；

库珀对：电荷为 $2e$ ，自旋通常为0：



大量库珀对凝聚成超流态，能隙打开。

BCS哈密顿量：

$$H_S = \sum_{\mathbf{k}, \sigma} \epsilon_{\mathbf{k}} a_{\mathbf{k}\sigma}^\dagger a_{\mathbf{k}\sigma} + \sum_{\mathbf{k}} \Delta (a_{\mathbf{k}\uparrow}^\dagger a_{-\mathbf{k}\downarrow}^\dagger + H.c.)$$

Δ 是超导序参量。

二、自旋超导介绍

自旋超导态是我们约于十年前提出的一个概念：

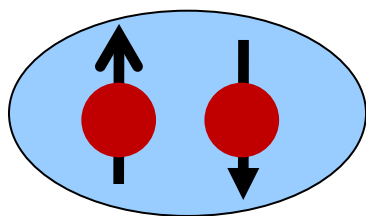
QF Sun, ZT Jiang, Y Yu, XC Xie, Phys. Rev. B 84, 214501(2011)

QF Sun, XC Xie, Phys. Rev. B 87, 245427(2013)

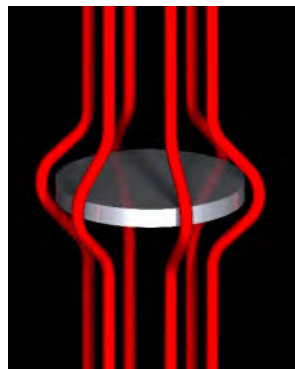
ZQ Bao, XC Xie, QF Sun, Nature Commun. 4, 2951(2013)

P Lv, AM Guo, H Li, C Liu, XC Xie, QF Sun, Phys. Rev. B 95,104516(2017)

超导态：库珀对的凝聚

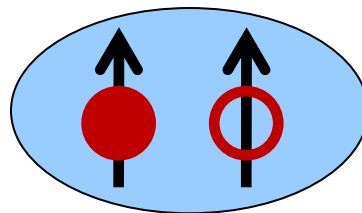


库珀对：
电荷为2，

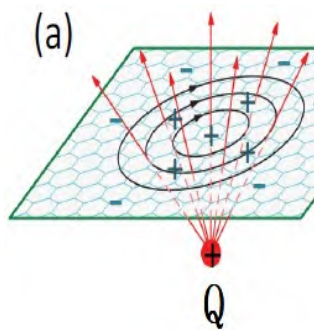


零电阻
磁Meissner效应
Josephson效应

自旋超导态：电子空穴对凝聚



自旋非零玻色子：
自旋为1



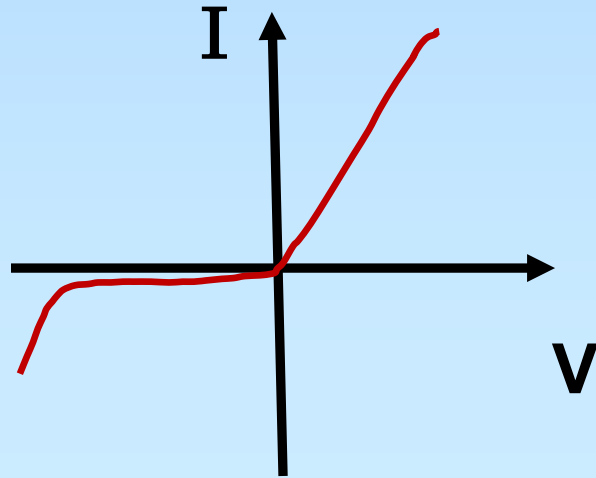
零自旋阻
电Meissner效应
自旋流Josephson效应

三、超导二极管

1、二极管介绍



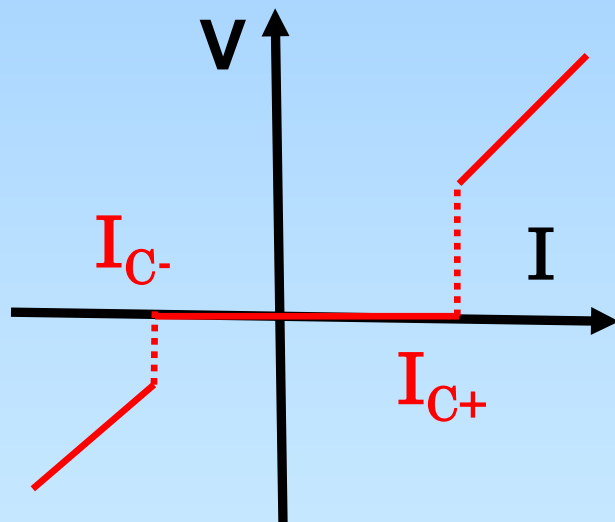
二极管是一个单向导通的电子器件，是当今集成电路和芯片中一个至关重要的元器件。它在正向电压时，电流能通过；但反向电压时，电流几乎不能通过。



2. 超导二极管

由于普通二极管有非零的电阻，器件在工作时不可避免地会发生热耗散。

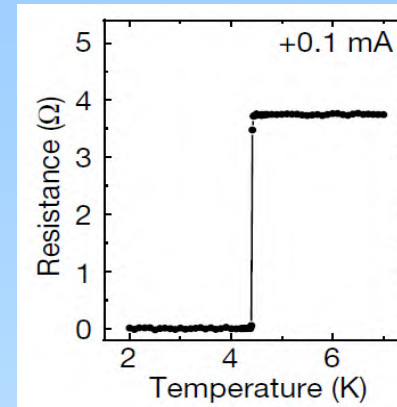
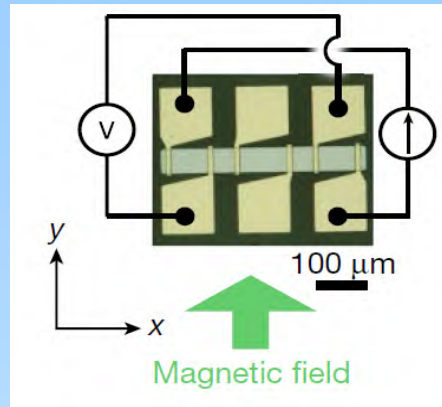
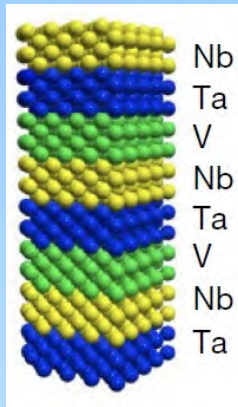
人们提出了超导二极管：
即该超导器件的正向和反向临界电流不相等。



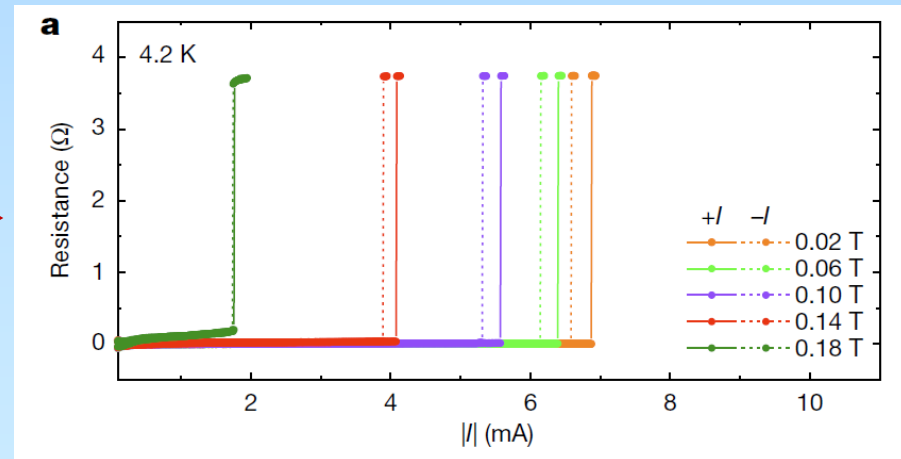
当流过该器件的电流处于正反临界电流之间时，正方向还保持超导和电阻为零，而反方向电阻为有限值，器件具有很好地整流效应。

➤ 超导二极管实验进展:

在铌钒钽[Nb/V/Ta]₂超导:



超导二极管效应: ➡

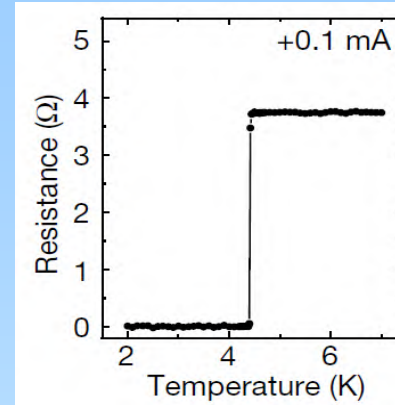
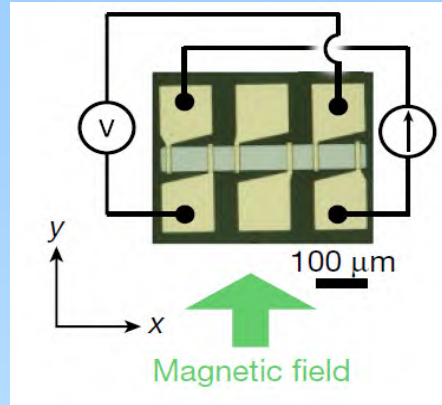
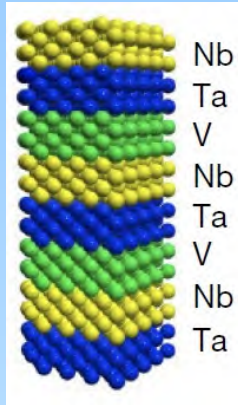


体系破坏时间和空间反演对称性。

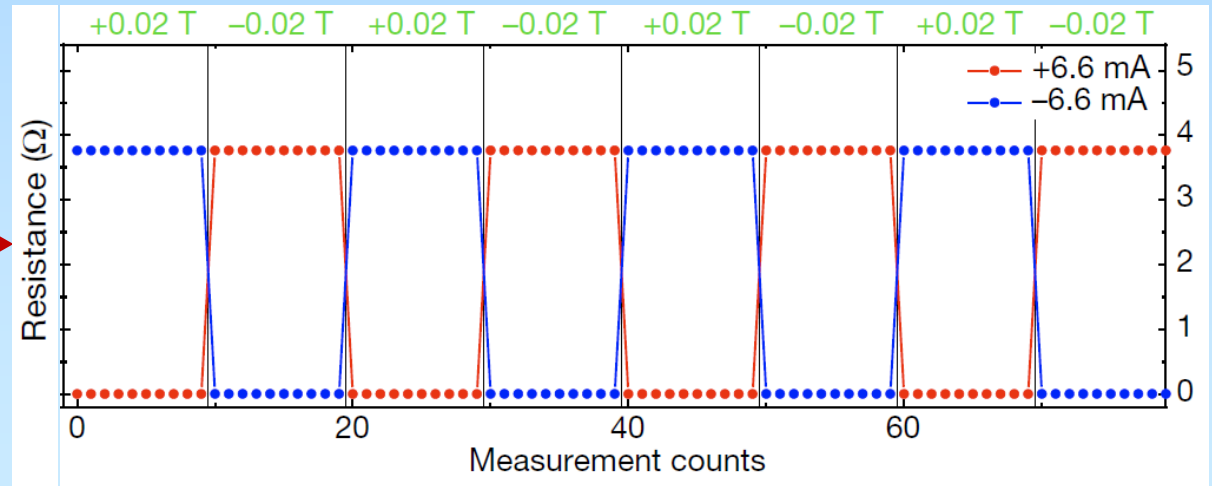
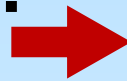
F. Ando, et al, Nature 584,373(2020)

➤ 超导二极管实验进展:

在铌钒钽[Nb/V/Ta]₂超导:



单向电阻为零:
整流效应:

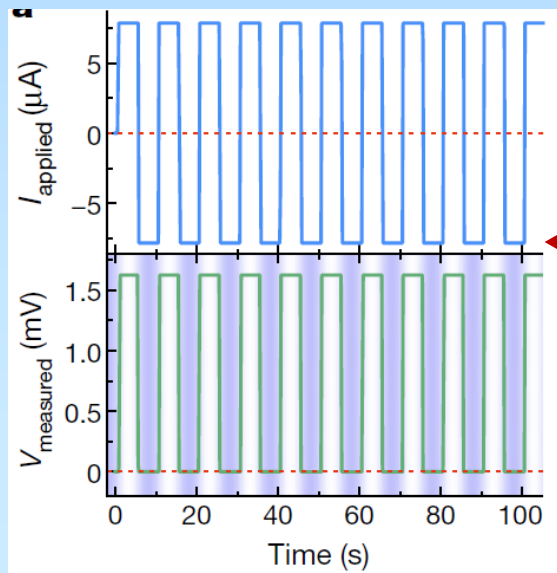
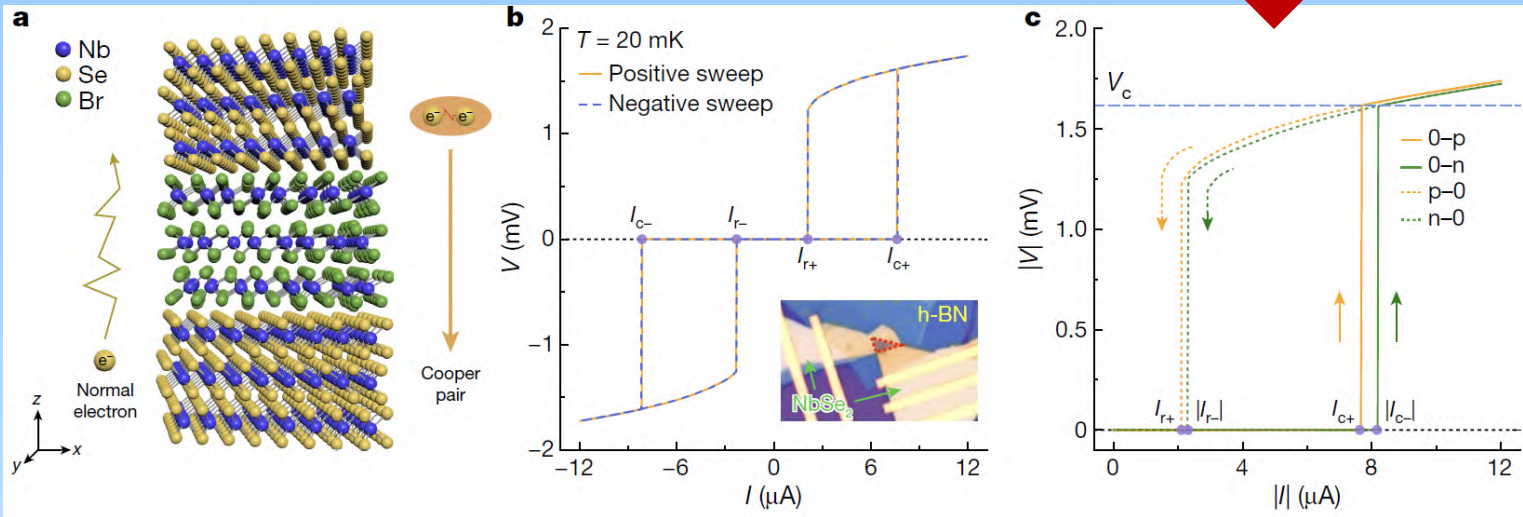


F. Ando, et al, Nature 584,373(2020)

➤ 超导二极管实验进展：

在NbSe₂/Nb₃Br₈/NbSe₂超导结：

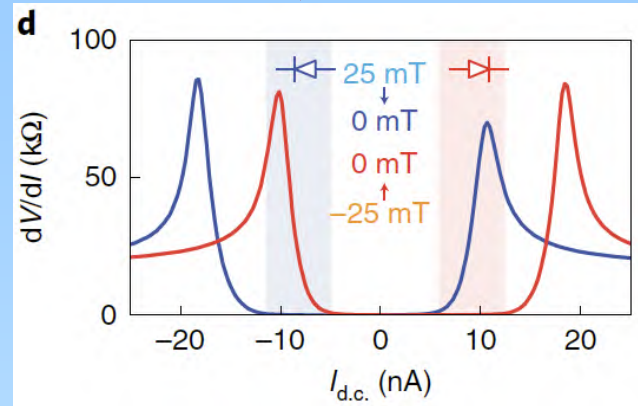
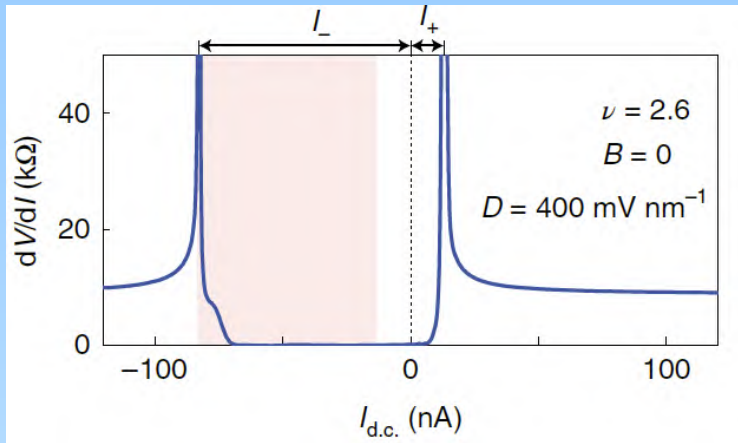
超导二极管效应：



单向电阻为零：
整流效应：

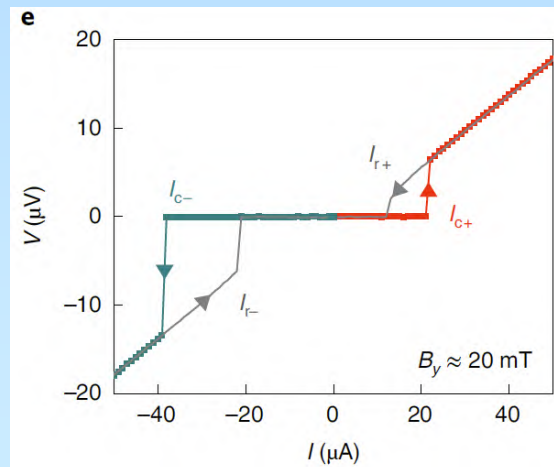
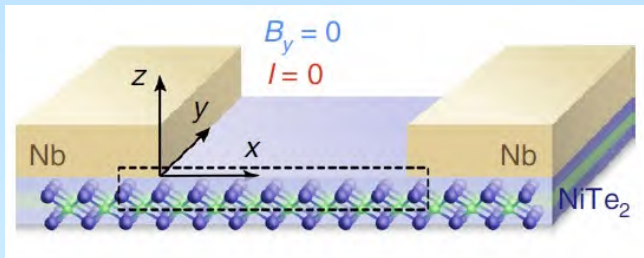
➤ **超导二极管实验进展：**
小转角三层石墨烯体系：

先加磁场，然后把
磁场调节到零：



J.X. Lin, et al., Nature Phys. 18,1221(2022)

铌/碲化镍/铌超导结：



B. Pal, et al., Nature Phys. 18,1228(2022)

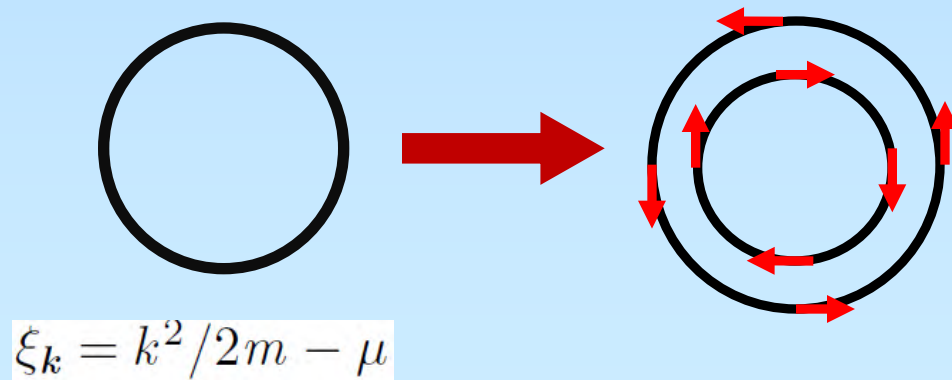
➤ 超导二极管理论进展：

原则上，超导二极管效应出现需要破坏空间反演对称性和时间反演对称性。

考虑有Rashba自旋轨道耦合+磁场的超导体：

哈密顿量为： $H_k = \xi_k + g_k \cdot \sigma + B \cdot \sigma$ ，其中： $\xi_k = k^2/2m - \mu$
 $g_k = \alpha_R \hat{z} \times \hat{k}$

只有Rashba自旋轨道耦合时，费米面为二个同心圆。配对二电子的动量正好相反，库伯对动量为零。

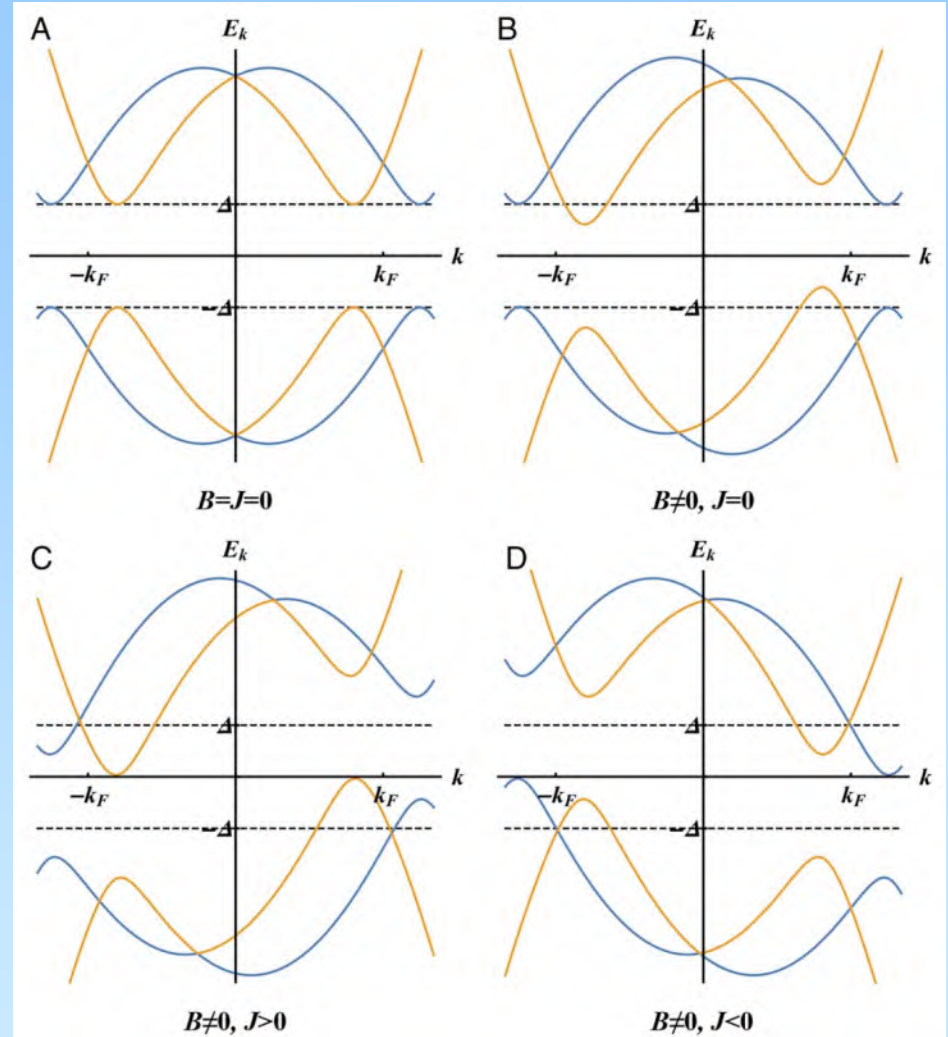


➤ 超导二极管理论进展：

$I=0$ 时，库伯对有限动量使得超导打开的能隙不处于费米面上下对称位置，见图B。

超导体加超流时，相当于库伯对上再加动量，引起超导能隙改变。当能隙与费米面接触时，超导破坏，近似的这时超流最大。

由于 $I=0$ 的库伯对就有有限动量，能隙不对称，这使得破坏超导的 $+k$ 和 $-k$ 不相等，从而正反临界超流不相等。



➤ 超导二极管理论进展：

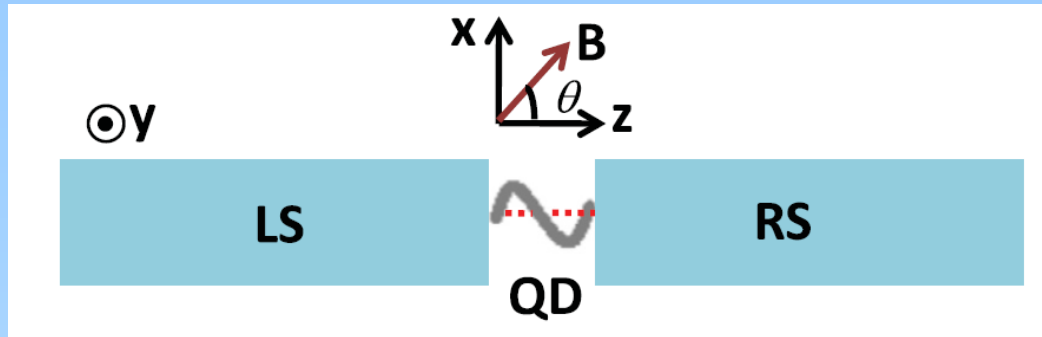
此外，人们在具有非中心对称的超导体，也发现超导二极管效应与有非零动量的FFLO态有紧密联系。

在超导/中间层/超导结体系，理论发现在中间层为一对介观结、三层铁磁、处于磁场下的弯曲半导体纳米线、铁磁绝缘体耦合到拓扑绝缘体、等，可以有超导二极管效应。

1. A. Daido, et al, Phys. Rev. Lett. 128, 037001 (2022).
2. R. S. Souto, et al, Phys. Rev. Lett. 129, 267702 (2022).
3. K. Halterman, et al, Phys. Rev. B 105, 104508 (2022).
4. A. A. Kopasov, et al, Phys. Rev. B 103, 144520 (2021).
5. Y. Tanaka, et al, Phys. Rev. B 106, 214524 (2022).
6. Y. Zhang, et al, Phys. Rev. X 12, 041013 (2022).

超导二极管 与 Josephson二极管：

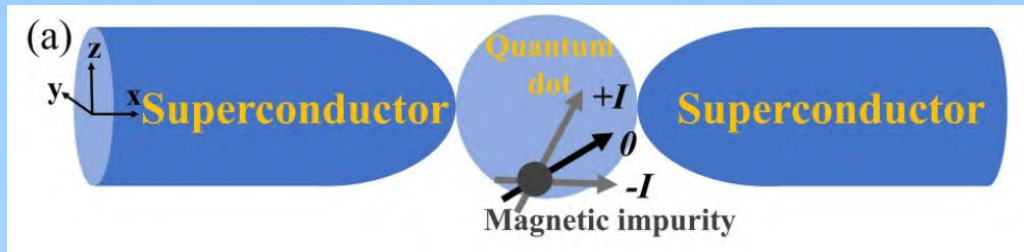
3、利用手性结构构建超导二极管



事实上，有很多微观分子或者人造低维体系都是螺旋结构的。我们提出利用低维螺旋手性体系来构建超导二极管器件。

物理图像：正反超流产生的磁场相反。如果有外磁场时，总磁场不相等，导致正反输运特性不相同，因此应当会导致超导二极管现象。

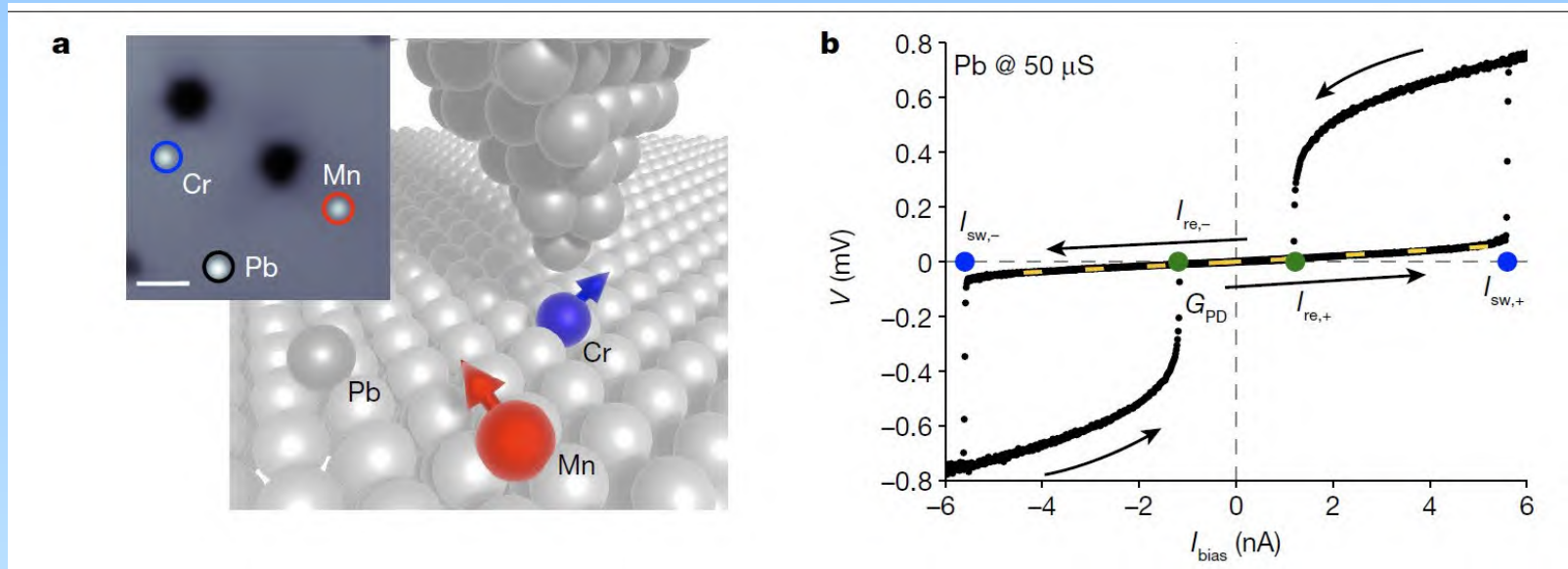
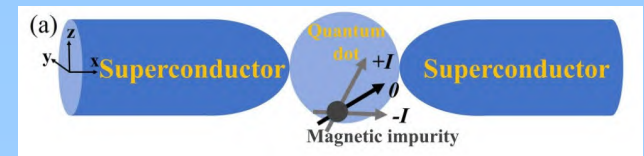
4、利用单磁杂质构建超导二极管



考虑一个量子点中含有一个磁性杂质，利用电流对磁杂质的影响，来构建超导二极管器件。

物理图像：正反超流产生的相反磁场，从而对磁杂质有相反作用，因此导致超导二极管现象。

4、利用单磁杂质构建超导二极管



非常最近，他人利用单杂质实现了超导二极管。

超导Pb/磁杂质/超导STM体系， $I_{c+} \neq |I_{c-}|$

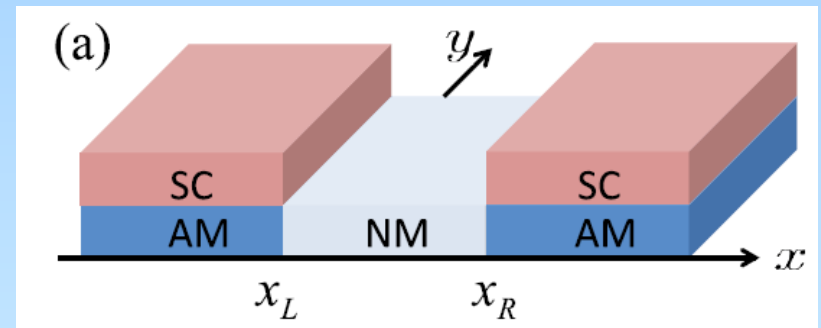
M. Trahms, et al., Nature 615, 628 (2023)

5、利用交错磁构建无宏观磁的超导二极管

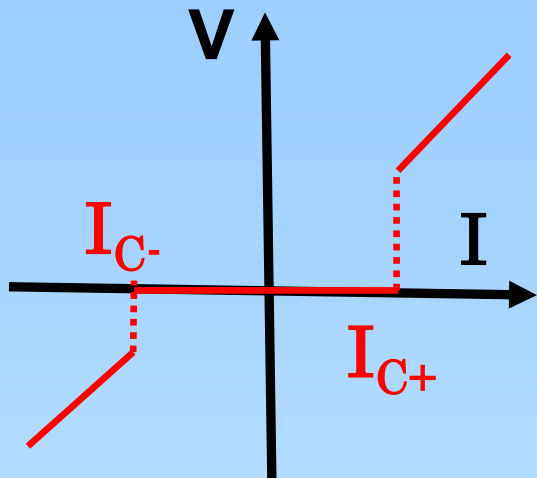
铁磁和磁场对器件高密度集成有很大的影响。

设计无宏观磁性的器件对高密度集成很有帮助。

我们考虑交错磁体基
的超导Josephson结，

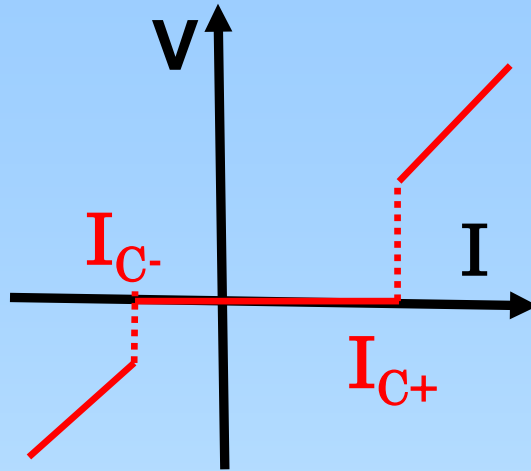


6、极端超导二极管



普通超导体系

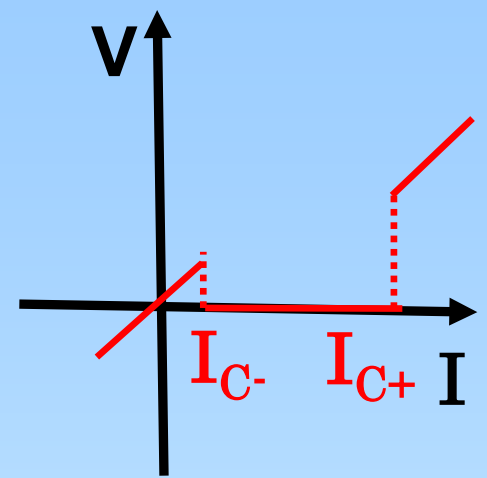
$$I_{C+} = -I_{C-}$$



超导二极管

$$I_{C+} \neq -I_{C-}$$

临界电流
一正一负

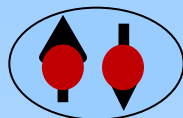


极端超导二极管

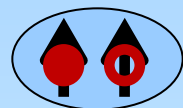
I_{C+} , I_{C-} 同号, 如都是正。这时在电流为零时, 体系不是超导, 随着电流增大体系进入超导。

四、自旋超导二极管

(电荷)超导： 由电荷为 $2e$ 自旋通常为 0 玻色子(库伯对)凝聚成的超流态

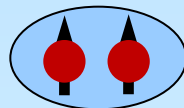


自旋超导： 由自旋非 0 电荷通常为 0 玻色子凝聚成的超流态



自旋三重态超导： 库伯对的自旋 $S=1$ ，电荷为 $2e$.

既是电荷超导，又是自旋超导。



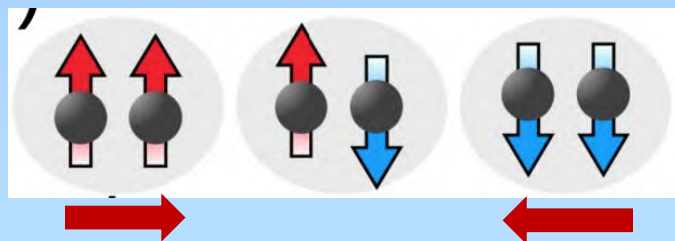
下面我们在 $S=1$ 超导中提出自旋相位，自旋Josephson效应、和自旋超导二极管。

S=1超导: 

自旋三重态的库伯对有自旋**S=1**，电荷为**2e**。

在这体系，电阻为零，自旋阻也为零。

电流和自旋流都可以无耗散的流过。



只要等量的 $S_z=1$ 和 $S_z=-1$ 库伯对相反运动，而 $S_z=0$ 的库伯对不动，就可以得到纯的自旋流，并且这自旋流肯定是超流。

尽管纯的自旋三重态超导(**p波超导**)还不确定存在，但在一些自旋不是好量子数的体系，既有**S=0**的库伯对，也有**S=1**的库伯对，**即存在S=1超导成分**。

如：**Ising**超导，拓扑超导，等。

自旋相位:

在超导结中, (电荷) 相位驱动 Josephson 超电流。
我们引入自旋相位, 它将驱动自旋超流。

➤ 电荷相位 ϕ_c :

$$\psi_{\uparrow} \rightarrow \psi_{\uparrow} e^{i\phi_c/2}$$

$$\psi_{\downarrow} \rightarrow \psi_{\downarrow} e^{i\phi_c/2}$$

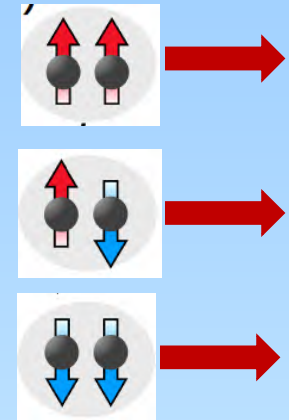
$$\Psi_{\uparrow\uparrow} \rightarrow \Psi_{\uparrow\uparrow} e^{i\phi_c}$$

$$\Psi_{\uparrow\downarrow} \rightarrow \Psi_{\uparrow\downarrow} e^{i\phi_c}$$

$$\Psi_{\downarrow\downarrow} \rightarrow \Psi_{\downarrow\downarrow} e^{i\phi_c}$$

$$\Psi_{S=0} \rightarrow \Psi_{S=0} e^{i\phi_c}$$

驱动四种类型
库伯对向同方
向运动:



➤ 自旋相位 ϕ_s :

$$\psi_{\uparrow} \rightarrow \psi_{\uparrow} e^{i\phi_s/2}$$

$$\psi_{\downarrow} \rightarrow \psi_{\downarrow} e^{-i\phi_s/2}$$

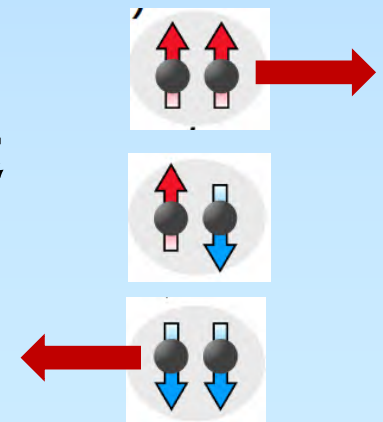
$$\Psi_{\uparrow\uparrow} \rightarrow \Psi_{\uparrow\uparrow} e^{i\phi_s}$$

$$\Psi_{\uparrow\downarrow} \rightarrow \Psi_{\uparrow\downarrow}$$

$$\Psi_{\downarrow\downarrow} \rightarrow \Psi_{\downarrow\downarrow} e^{-i\phi_s}$$

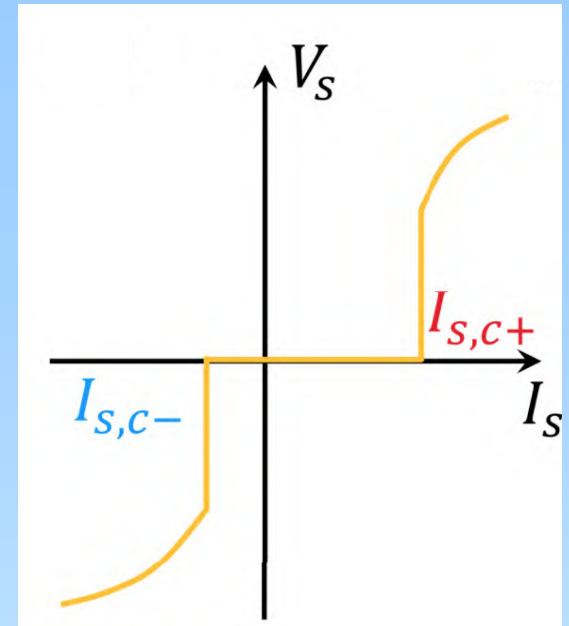
$$\Psi_{S=0} \rightarrow \Psi_{S=0}$$

驱动 $S_z=1$, $S_z=-1$
的库伯对相反运
动。 $S_z=0$ 和 $S=0$
的库伯对不动。



自旋超导二极管：

- 正向临界自旋超流和反向临界自旋超流不相等。
- 在自旋超流与自旋相位的关系曲线上，正反最大值不相等。
- 在正反临界自旋超流之间，自旋压为零。超出这范围，有自旋压非零。



$$I_{s,c+} \neq |I_{s,c-}|$$

自旋超导二极管:

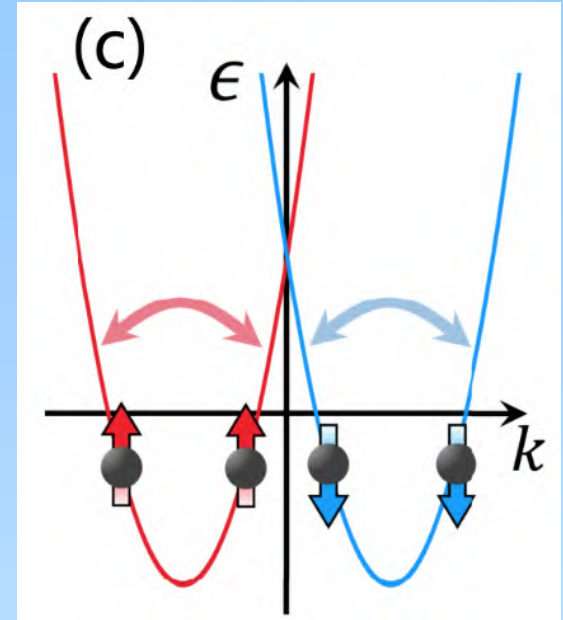
考虑体系有自旋轨道耦合，SOC分裂自旋简并，如果有同自旋超导配对 ($S=1$ 配对)，那库伯对就有有限动量，并且 $S_z=1$ 和 $S_z=-1$ 库伯对的动量相反。

$$H_1 = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} - \mu + \alpha \sigma_z \hbar k$$

如果考虑p波超导配对，

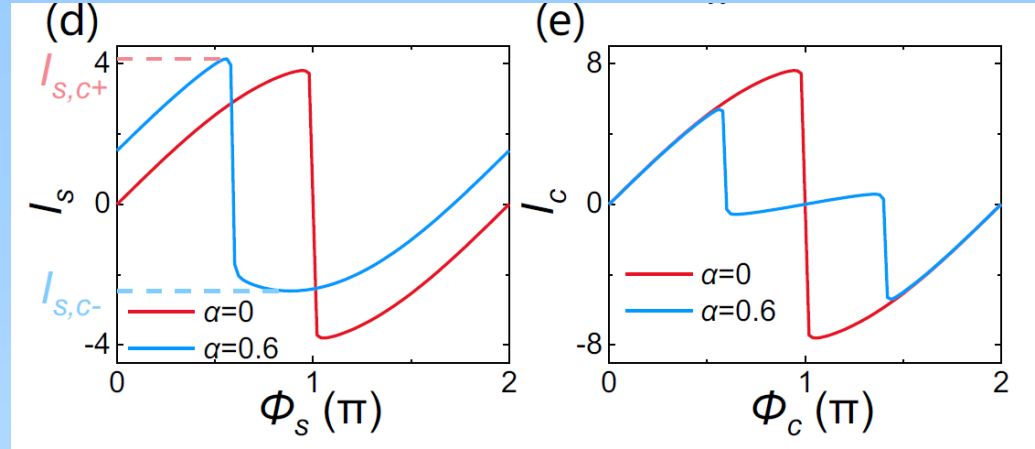
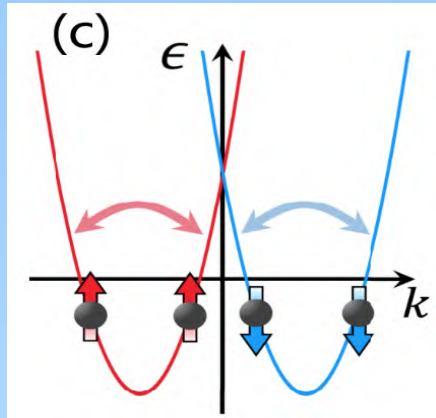
$$H_2 = H_1 + H_p;$$

$$H_p = k(\Delta_{\uparrow\uparrow} \psi_{k,\uparrow}^\dagger \psi_{-k,\uparrow}^\dagger + \Delta_{\downarrow\downarrow} \psi_{k,\downarrow}^\dagger \psi_{-k,\downarrow}^\dagger) + h.c.$$



然后在自旋相位作用下，就会有自旋超导二极管效应。

p波超导结中的自旋超导二极管：



- p波超导结，自旋相位差驱动下，无自旋超导二极管现象。
- p波超导结+SOC，自旋相位差驱动下，有自旋超导二极管现象。
- p波超导结+SOC，电荷相位差驱动下，无电荷超导二极管现象。

自旋超导二极管：

加磁场引起自旋三重态配对，哈密顿量为：

$$H_3 = H_1 + H_s + H_B$$

其中：

$$H_1 = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} - \mu + \alpha \sigma_z \hbar k$$

$$H_s = \Delta \psi_{k,\uparrow}^\dagger \psi_{-k,\downarrow}^\dagger + h.c.,$$

$$H_B = (\psi_{k,\uparrow}^\dagger, \psi_{k,\downarrow}^\dagger) (-B_x \sigma_x - B_z \sigma_z) (\psi_{k,\uparrow}, \psi_{k,\downarrow})^T.$$

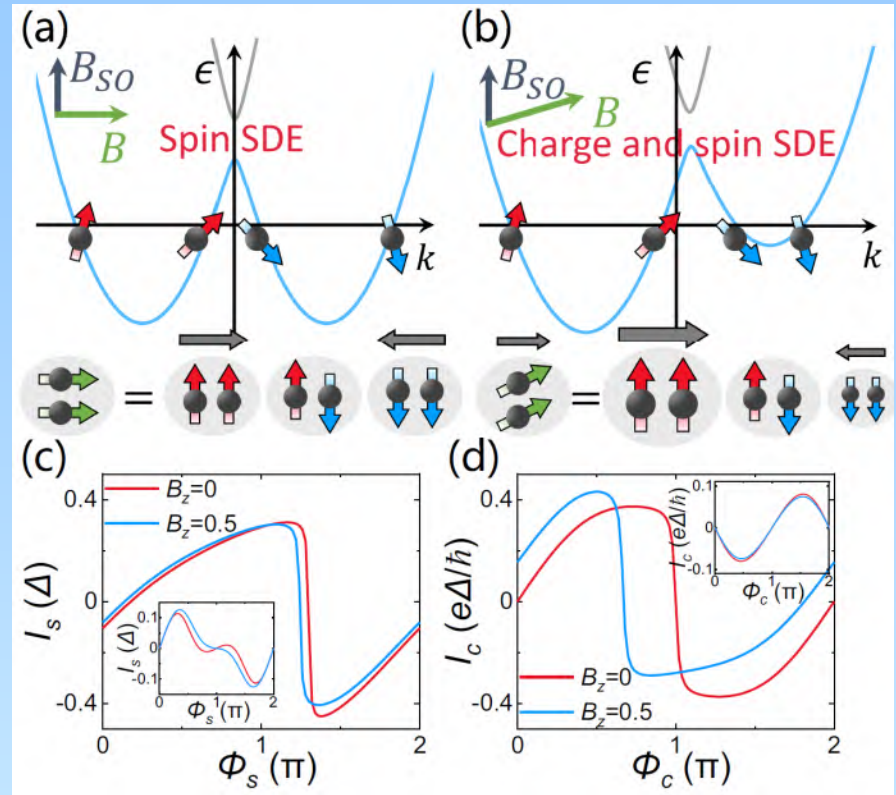
S波超导体含有SOC, x方向磁场, z方向磁场。

自旋超导二极管：

加x方向磁场，引起 $S_x=1$ 的库伯对，这库伯对分解为等量的 $S_z=1, -1$ 的库伯对。

所以在有SOC时，出现自旋超导二极管效应。

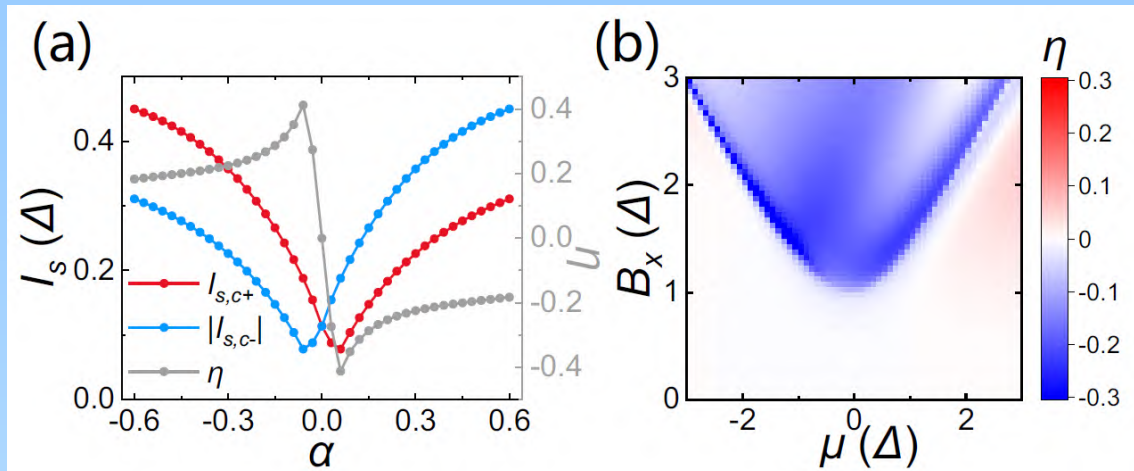
只加x方向磁场，该体系没有电荷二极管效应，但有z方向磁场，使得 $S_z=1, -1$ 库伯对分量不相等，可以出现电荷超导二极管现象。事实上，这时的电流是自旋极化超导电流。



自旋超导二极管：

正反临界自旋超流：
自旋超导二极管效率：

$$\eta = \frac{I_{s,c+} - |I_{s,c-}|}{I_{s,c+} + |I_{s,c-}|}$$



- 效率是SOC强度的奇函数。
- 当发生正常超导-拓扑超导相变时，自旋超导二极管效率增加很多。

自旋超导二极管普适特性：

自旋流是一个张量，当给定输运方向之后，它还是一个矢量，即自旋朝向。

这与电流有本质不同：电流是一个矢量，当给定输运方向之后，它是一个标量。

上文研究的是自旋朝z方向的自旋超导二极管效应，即 $I_{sz,c+} \neq |I_{sz,c-}|$

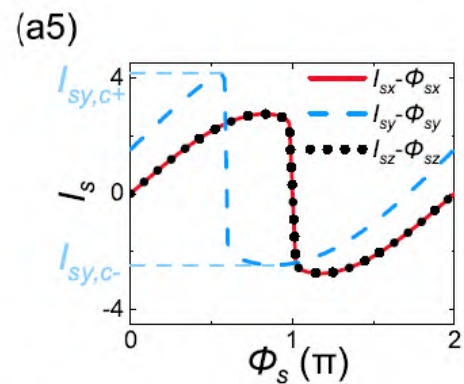
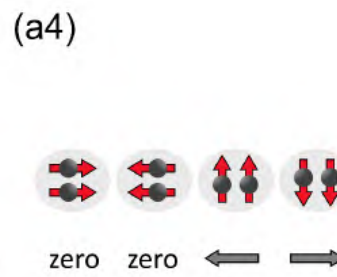
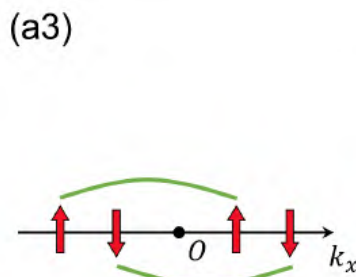
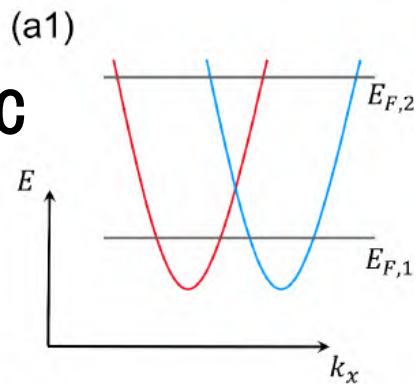
但是在x, y方向，就没有自旋超导二极管效应。

普适地，对于一个自旋超导二极管器件，某个自旋朝向 \hat{n} 有自旋超导二极管现象，而与其垂直方向就没有自旋超导二极管现象。

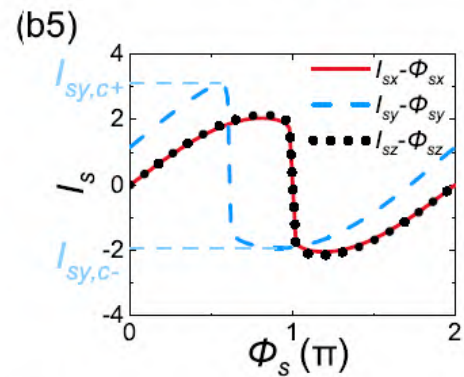
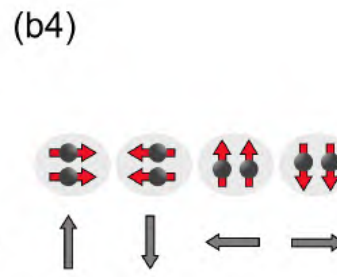
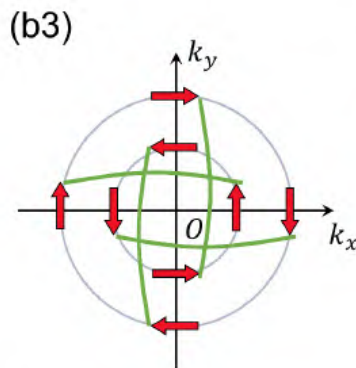
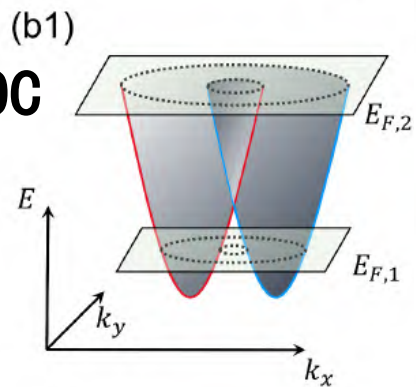
也就是说，自旋超导二极管器件有特定自旋朝向的。

通常来说，SOC普适引起自旋超导二极管效应

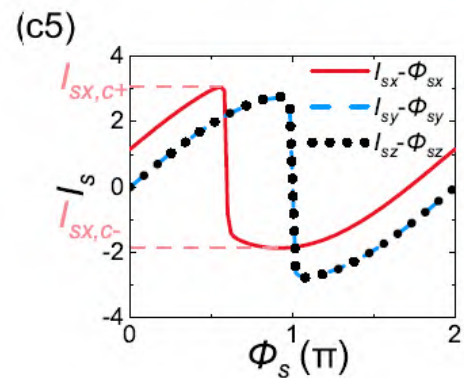
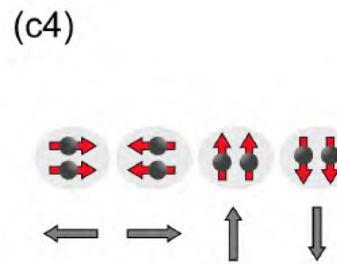
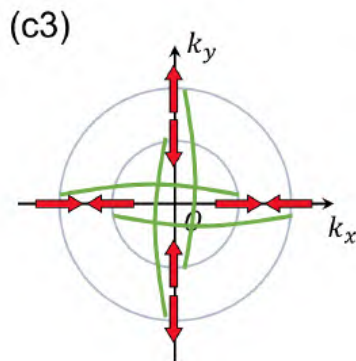
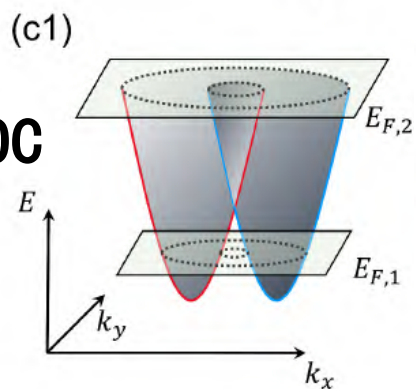
y RSOC



2D RSOC



2D DSOC



五、结论

- $S=1$ 超导既是(电荷)超导，也是自旋超导。
- 我们提出各种实现超导二极管的方案。
- 在SOC和磁场共同作用下， $S=1$ 超导体系原则上出现自旋超导二极管效应。

合作者：

自旋超导二极管：

毛岳、庄钰晨、闫青。

超导二极管：

青岛理工大学 程强

孙雨菲、毛岳、庄钰晨。

感谢基金委和科技部对本课题研究的支持！

谢谢大家!!!