

自旋流与自旋轨道耦合

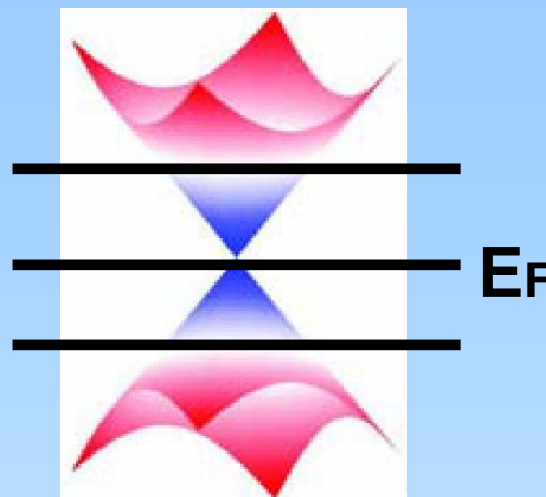
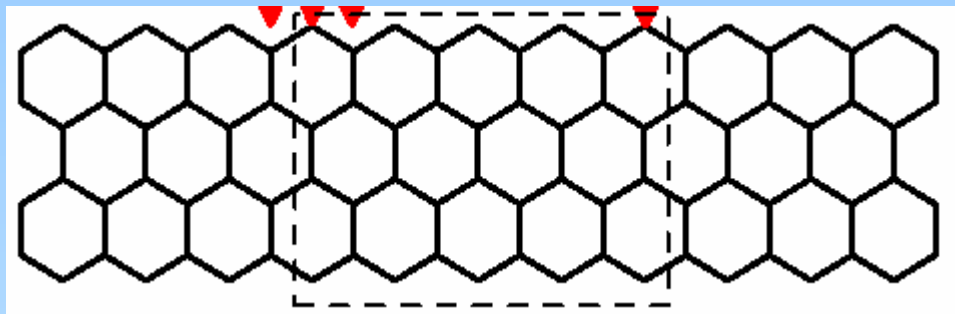
孙庆丰

中国科学院物理研究所

2008年 10月 30日

单层石墨及其p-n结的输运性质研究

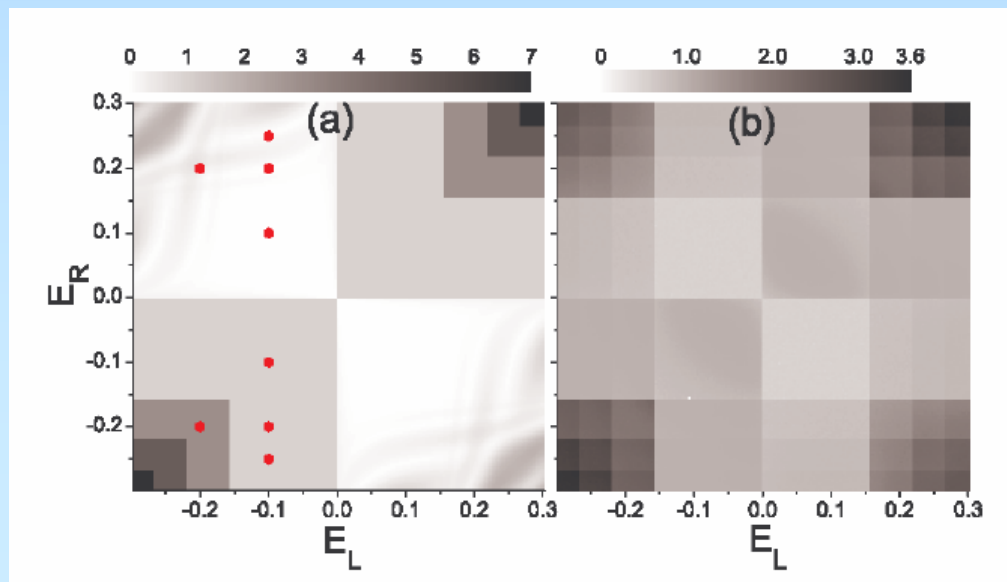
W. Long, Q.F. Sun, J. Wang, *Phys. Rev. Lett.* 101, 166806(2008)



低能色散关系是线性，与静止质量为**0**的**Dirac**方程一样，准粒子有相对论粒子的行为。

这体系实验可实现！

各种参数可控！

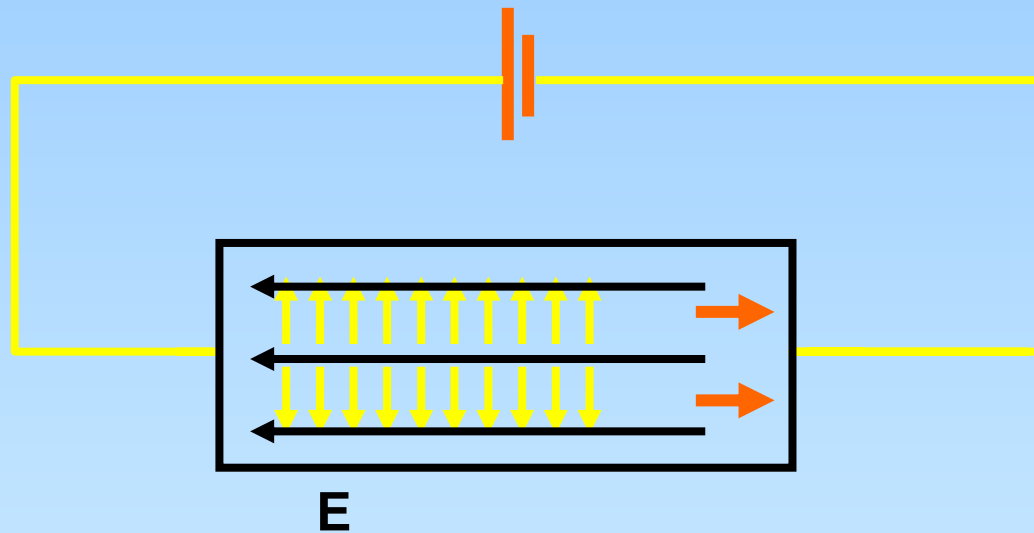


自旋流与自旋轨道耦合

- 一、自旋电子学和自旋流介绍
- 二、自旋轨道耦合介绍
- 三、近几年来我们一些工作介绍
- 四、退相干对量子自旋Hall效应的影响
- 五、总结

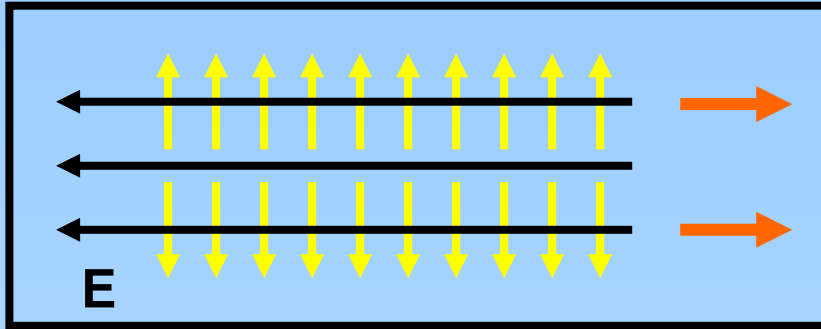
一、自旋电子学和自旋流介绍

1. 电荷流, 即电流





电子的定向漂移运动，产生电流。

电子具有电荷和自旋自由度



在传统的电路或半导体电子器件中，自旋向上的电子和自旋向下的电子向同一方向运动，以至于自旋和自旋流被抵消，仅仅电荷流（即电流）存在。

	I_e	I_s
	eI_{\uparrow}	$\frac{\hbar}{2}I_{\uparrow}$
	eI_{\downarrow}	$-\frac{\hbar}{2}I_{\downarrow}$

电荷流： $I_e = e(I_{\uparrow} + I_{\downarrow}) \neq 0$

自旋流： $I_s = \frac{\hbar}{2}(I_{\uparrow} - I_{\downarrow}) = 0$

这时，仅仅电流存在

事实上，尽管对于电子的应用已有一百多年的历史，但在传统的电路和电子器件中，它们仅仅利用了电子的电荷流（电流），而电子的自旋流和自旋自由度始终没有被加以利用。

近十年来，随着微加工技术和大规模集成电路的发展，电子器件的尺寸越做越小，即将进入量子阶段。在这超小（纳米）尺度范围内，自旋在很多性能方面比电荷优越，例如：退相干时间长，能耗低，数据处理速度快，集成度高，稳定性强等。

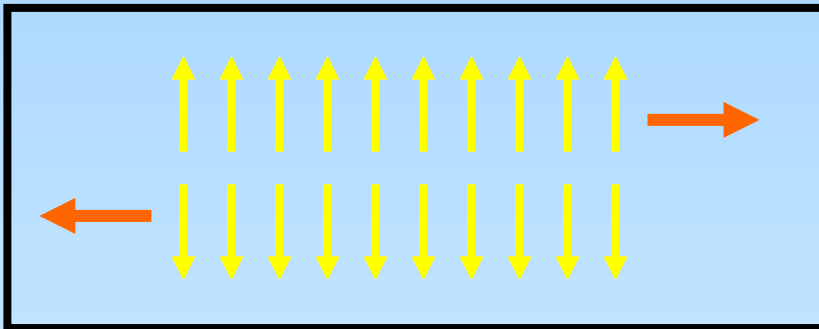
能否利用电子的自旋自由度制造电子器件？
自旋电子学（**spintronics**）

自旋电子学 (spintronics)

- 应用 **自旋** 自由度来制造电子器件
- 或应用 **自旋** 和 **电荷** 自由度一起来制造电子器件

2、纯自旋流 （零电荷流）

设想在一个导体中，如果能使自旋向上的电子向一个方向运动，而相同数目自旋向下的电子向相反方向运动，这样电(荷)流正好被抵消，而自旋流 将被加倍。

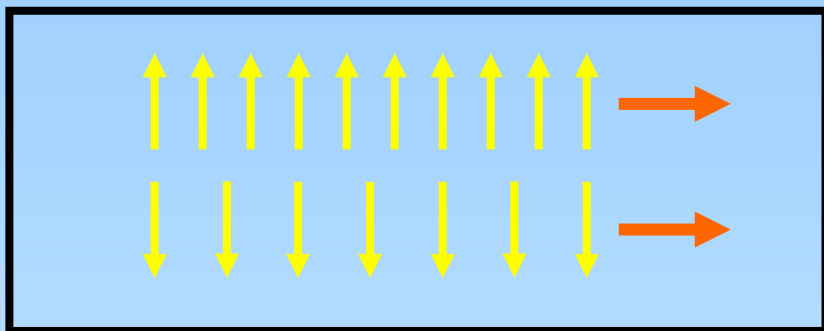


$$\text{电荷流: } I_e = e(I_{\uparrow} + I_{\downarrow}) = 0$$

$$\text{自旋流: } I_s = \frac{\hbar}{2}(I_{\uparrow} - I_{\downarrow}) \neq 0$$

有什么办法使电子象上图所示那样运动？
即怎样产生自旋流？

3、自旋极化流



电荷流： $I_e = e(I_{\uparrow} + I_{\downarrow}) \neq 0$

自旋流： $I_s = \frac{\hbar}{2}(I_{\uparrow} - I_{\downarrow}) \neq 0$

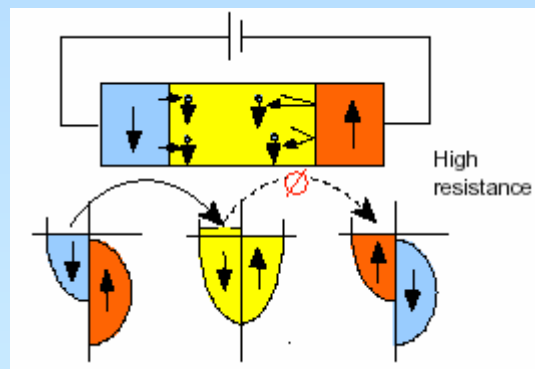
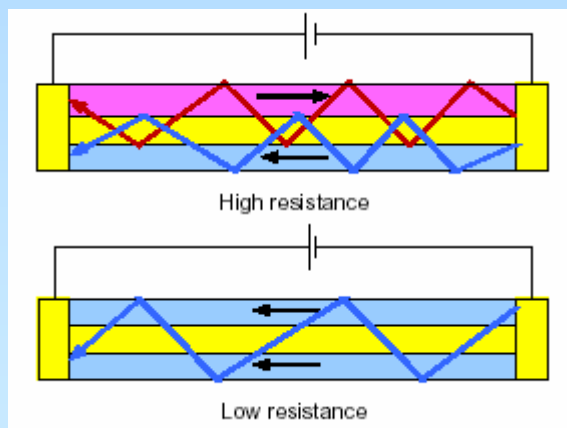
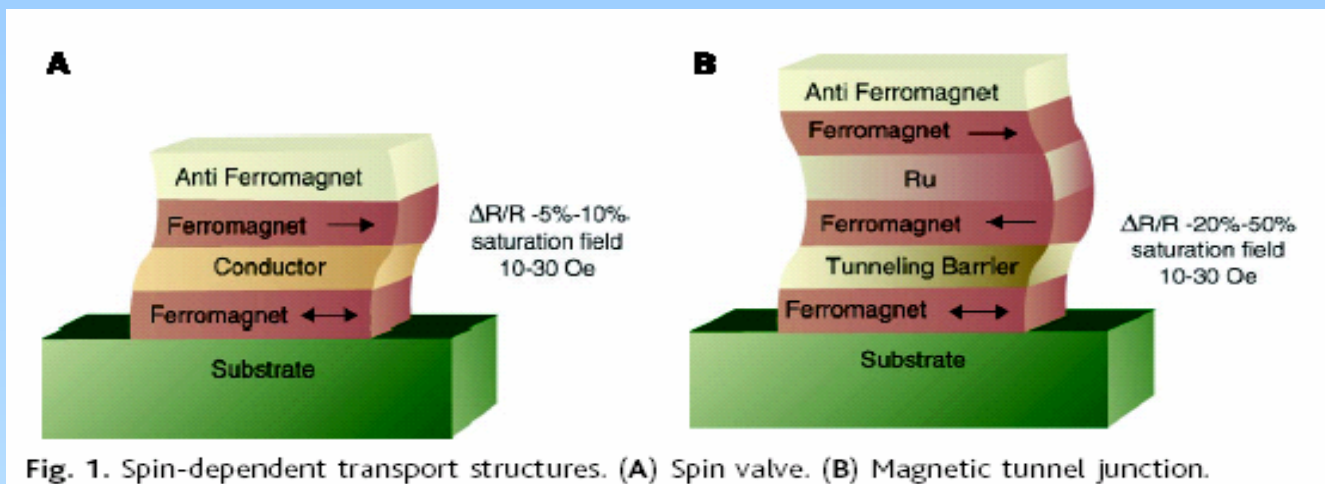
电荷流和自旋流都存在

近二十年来，自旋极化流已被广泛研究，

并已有巨大的商业应用

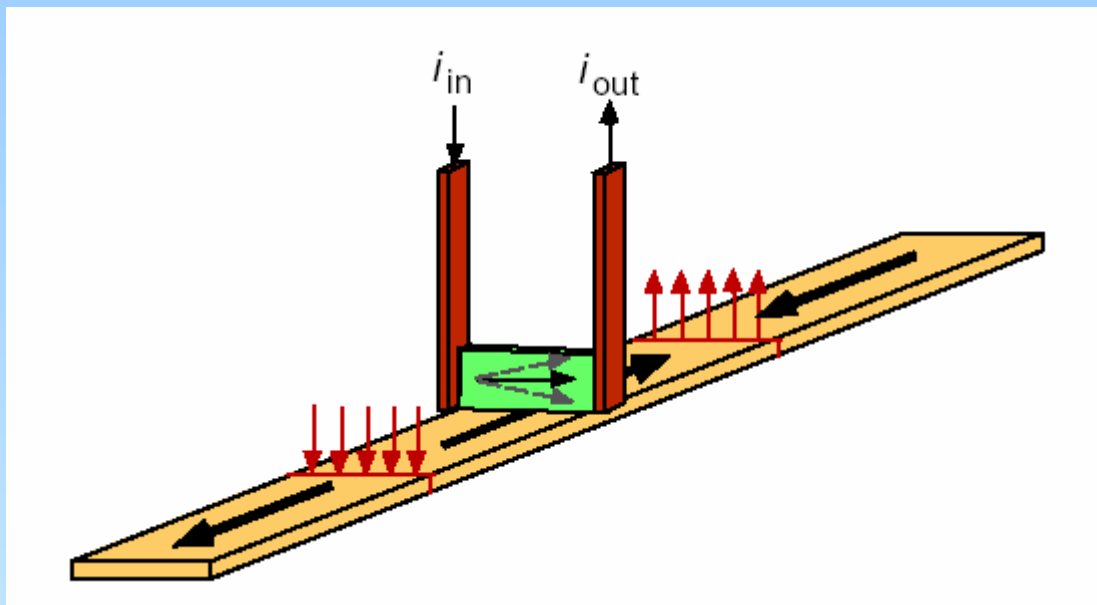
4、自旋电子学的一些已有应用

例如：**GMR**和**TMR**



综述文章： 1. G.A. Prinz, science 282, 1660 (1998);
2. S.A. Wolf, et. al. science 294, 1488 (2001).

GMR的读磁头



二、自旋轨道耦合介绍

自旋电子学涉及的问题：

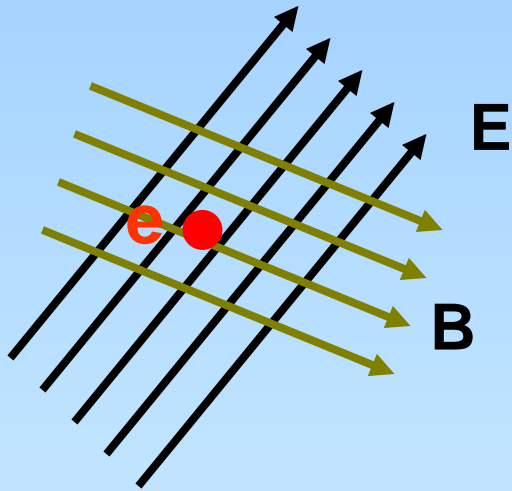
自旋流的产生、探测、和调控等；

自旋的控制、操纵等；

自旋轨道耦合对这些的实现有很大的帮助！

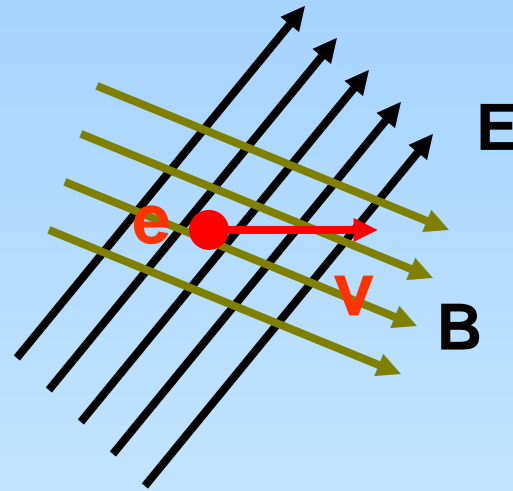
1、自旋轨道耦合介绍

电磁场对电荷、自旋的作用



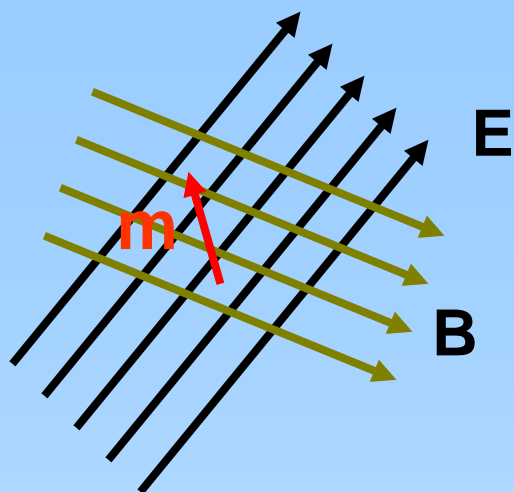
$$\mathbf{F} = e\mathbf{E}$$

B对静止电荷无相互作用

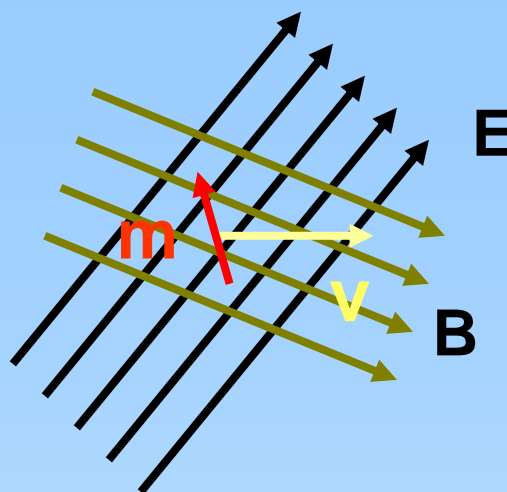


$$\mathbf{F} = e\mathbf{E} + e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

B对运动电荷有力的作用



$$-m \cdot B$$



$$m \cdot (v \times E) / c^2$$

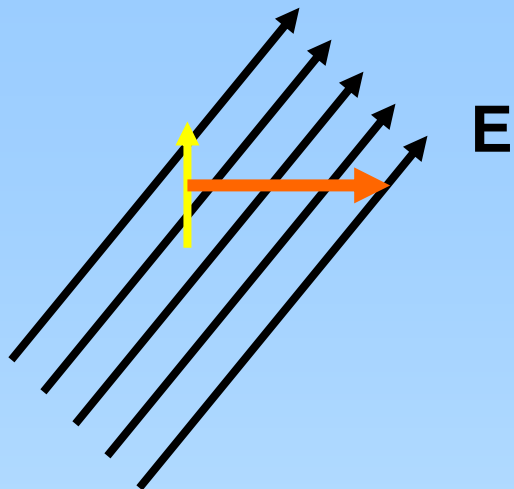
$$= g\mu_B \sigma \cdot (v \times E) / c^2$$

- 磁场对磁矩有力矩的作用
- 电场对静止磁矩无相互作用
- 电场对运动磁矩也有力矩作用

- * 电场对电荷有力的作用
- * 磁场对磁矩(自旋)有力矩的作用
- * 磁场对运动电荷有力的作用
- * 电场对运动磁矩(自旋)有力矩的作用

$$m \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{E}) / c^2 = g \mu_B s \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{E}) / c^2$$

经典体系：电场对运动自旋的作用。



$$\alpha S \cdot (v \times E)$$

ii. 量子体系：自旋轨道耦合

$$\frac{\alpha}{2} [\sigma \cdot (p \times \nabla V(r)) - \sigma \cdot (\nabla V(r) \times p)]$$

$$= \frac{\alpha}{2} [(\sigma \times p) \cdot \nabla V(r) + \nabla V(r) \cdot (\sigma \times p)]$$

注意：自旋轨道耦合作用 $\sim (v/c)^2$ ，所以只有在很强的电场下，这一项才起作用。

从**Dirac**方程的非相对论极限，也可以得到自旋轨道耦合项

$$\frac{\alpha}{2} [(\boldsymbol{\sigma} \times \mathbf{p}) \cdot \nabla V(r) + \nabla V(r) \cdot (\boldsymbol{\sigma} \times \mathbf{p})]$$

(i)、如果 $\mathbf{V}(\mathbf{r})$ 是中心力场势，上式化为：

$$\nabla V(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{r}}{r} \frac{d}{dr} V(r)$$

$$\begin{aligned} \nabla V(\mathbf{r}) \cdot (\boldsymbol{\sigma} \times \mathbf{p}) &= \frac{\mathbf{r}}{r} \frac{d}{dr} V(r) \cdot (\boldsymbol{\sigma} \times \mathbf{p}) \\ &= -\frac{1}{r} \frac{d}{dr} V(r) \boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{r} \times \mathbf{p}) \\ &= -\frac{1}{r} \frac{d}{dr} V(r) \boldsymbol{\sigma} \cdot \hat{l} \end{aligned}$$

Thomas项的自旋—轨道耦合： $\alpha(\mathbf{r}) \hat{s} \cdot \hat{l}$

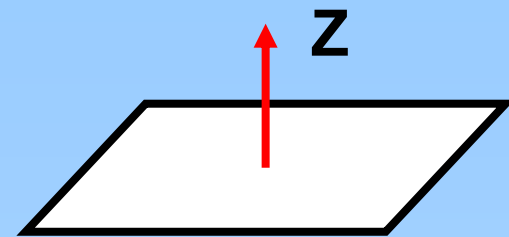
(ii)、在二维体系， $V(\mathbf{r}) = V(z) + V(x,y)$

通常 $\nabla V(z)$ 远大于 $\nabla V(x,y)$

$$\frac{\alpha}{2} [(\boldsymbol{\sigma} \times \mathbf{p}) \cdot \nabla V(r) + \nabla V(r) \cdot (\boldsymbol{\sigma} \times \mathbf{p})]$$

$$= \frac{\alpha}{2} \left[(\boldsymbol{\sigma} \times \mathbf{p}) \cdot \hat{z} \frac{d}{dz} V(z) + \hat{z} \frac{d}{dz} V(z) \cdot (\boldsymbol{\sigma} \times \mathbf{p}) \right]$$

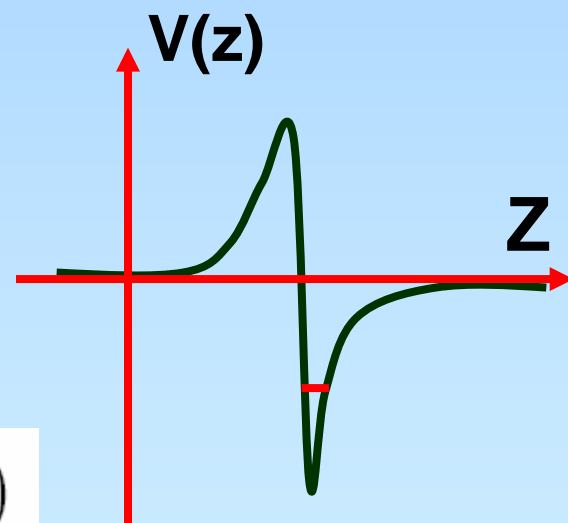
$$= \alpha \frac{d}{dz} V(z) \hat{z} \cdot (\boldsymbol{\sigma} \times \mathbf{p})$$



如果 $V(z)$ 不是镜面对称，这有：

Rashba自旋轨道耦合：

$$\alpha \hat{z} \cdot (\boldsymbol{\sigma} \times \mathbf{p})$$



2、自旋轨道耦合的一些普遍性质

✿ 含有自旋轨道耦合的哈密顿是时间反演不变：

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 + \frac{\alpha}{2} [(\boldsymbol{\sigma} \times \mathbf{p}) \cdot \nabla V(r) + \nabla V(r) \cdot (\boldsymbol{\sigma} \times \mathbf{p})]$$

$$H_0 = \mathbf{p}^2 / 2m + V(r)$$

$T = -i\sigma_y K$ T 是时间反演算符， K 是取复共轭算符

例如： $Kp_x = -p_x K$

$$Tp_x = -p_x T$$

$$T\sigma_x = -\sigma_x T$$

容易证明：

✿ $[T, H] = 0$

❁ Kramers简并:

如果 φ 是 \mathbf{H} 的能量本征态,

这 $T\varphi$ 也是本征态, 并且 $T\varphi$ 和 φ 正交。

证明: $HT\varphi = TH\varphi = \varepsilon_n T\varphi$

$$\langle \varphi | T\varphi \rangle = \langle T^2\varphi | T\varphi \rangle = -\langle \varphi | T\varphi \rangle$$

$$\therefore \langle \varphi | T\varphi \rangle = 0$$

$$\text{❁ } \langle f | \varphi \rangle = \langle T\varphi | Tf \rangle$$

如果令:

$$\varphi = \begin{pmatrix} \varphi_{\uparrow}(\mathbf{r}) \\ \varphi_{\downarrow}(\mathbf{r}) \end{pmatrix} \quad T\varphi = -i\sigma_y K\varphi = \begin{pmatrix} -\varphi_{\downarrow}^*(\mathbf{r}) \\ \varphi_{\uparrow}^*(\mathbf{r}) \end{pmatrix}$$

量子力学, 曾谨言, 科学出版社 (1993).

- ✿ 在平衡态时，
任何类型的自旋轨道耦合绝不会引起自旋极化。

证明：

$$\begin{aligned}\langle \sigma_z \rangle &= f(\varepsilon_n) [\langle \varphi | \sigma_z | \varphi \rangle + \langle T\varphi | \sigma_z | T\varphi \rangle] \\ &= f(\varepsilon_n) [\langle \varphi | \sigma_z | \varphi \rangle + \langle T\varphi | -T\sigma_z \varphi \rangle] \\ &= f(\varepsilon_n) [\langle \varphi | \sigma_z | \varphi \rangle - \langle \sigma_z \varphi | \varphi \rangle] \\ &= f(\varepsilon_n) [\langle \varphi | \sigma_z | \varphi \rangle - \langle \varphi | \sigma_z | \varphi \rangle] \\ &= 0\end{aligned}$$

注意：

在平衡态时，相同本征能的本征态的占据几率相同

自旋轨道耦合和磁场的区别：

$$H = p^2 / 2m + V(r) + g \hat{\sigma} \cdot B$$

磁场破坏时间反演不变性， $[T, H] \neq 0$

解除体系的简并，

在平衡态时，通常引起自旋极化。

自旋轨道耦合保持时间反演不变性， $[T, H] = 0$

体系有**Kramers**二重简并，

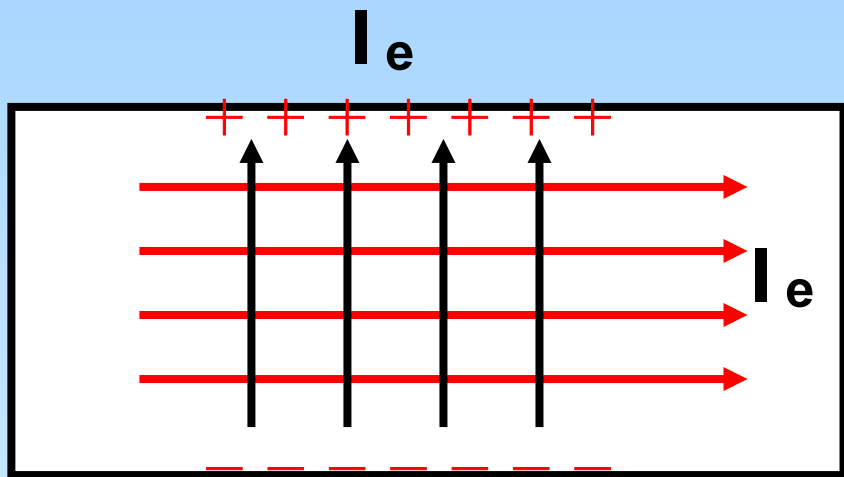
在平衡态时，自旋处处不极化。

❁ 注意：这和自旋轨道耦合有本质的不同！！！！

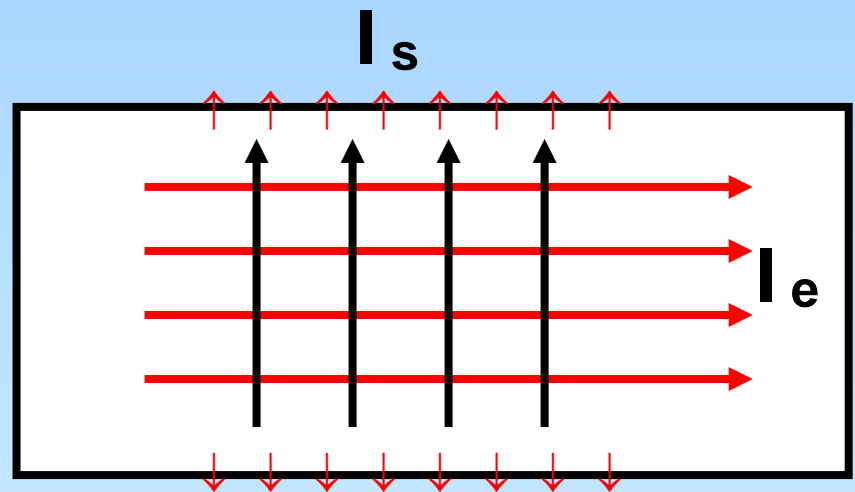
3、与自旋轨道耦合有关的一些效应:

i. 自旋轨道耦合引起无耗散的自旋流:

Spin Hall effect:



垂直方向加磁场



自旋-轨道耦合

关于Spin Hall effect 的一些参考文献:

S. Murakami, et.al. Science 301,1348 (2003);

S. Murakami, et.al. Phys.Rev.B 69, 235206 (2004);

J. Sinova et.al. Phys.Rev.Lett. 92, 126603 (2004);

S.-Q. Shen, et.al. Phys.Rev.Lett. 92, 256603 (2004);

etc.

Y. K. Kato, R. C. Myers, A. C. Gossard, and D. D. Awschalom, Science **306**, 1910 (2004); V. Sih, R. C. Myers, Y. K. Kato, W. H. Lau, A. C. Gossard, and D. D. Awschalom, Nature Phys. **1**, 31 (2005); V. Sih, W. H. Lau, R. C. Myers, V. R. Horowitz, A. C. Gossard, and D. D. Awschalom, Phys. Rev. Lett. **97**, 096605 (2006).

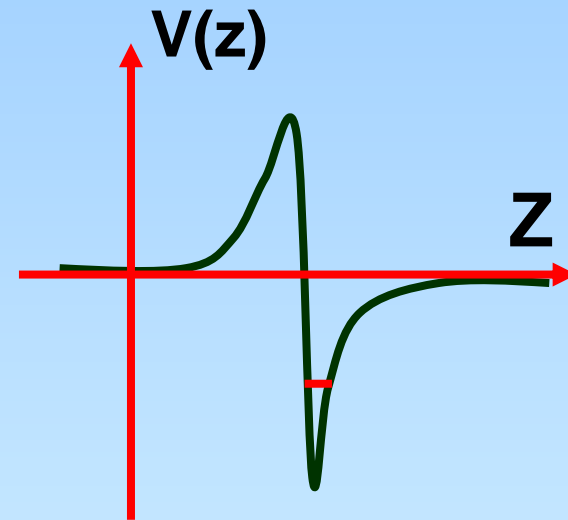
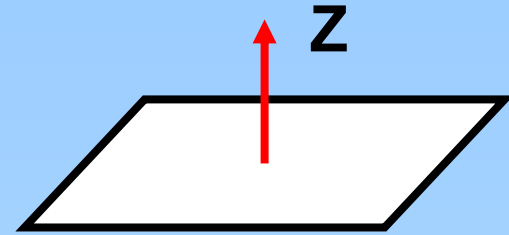
J. Wunderlich, B. Kaestner, J. Sinova and T. Jugwirth, Phys. Rev. Lett., **94**, 047204 (2005).

S. O. Valenzuela and M. Tinkham, Nature (London) **442**, 176 (2006).

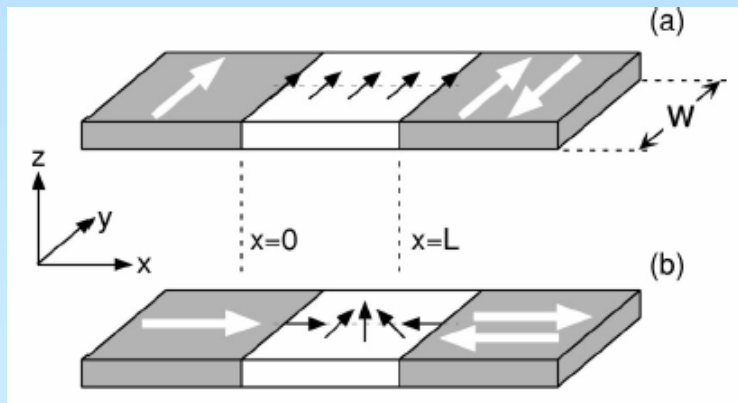
ii、利用自旋轨道耦合用电场(或电压)来控制自旋

用栅电压可以调节 α 的值，
从而控制自旋。

$$\alpha \hat{z} \bullet (\sigma \times \mathbf{p})$$



iii、自旋进动。



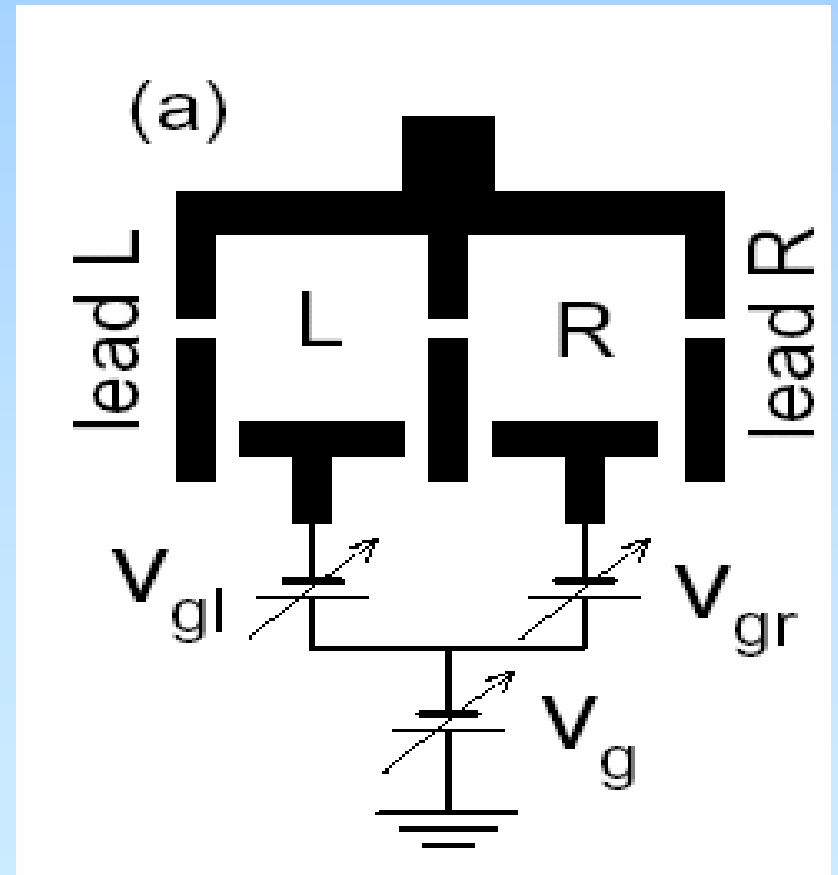
S. Datta and B. Das, Appl. Phys. Lett. 56, 665(1990)

三、近几年来我们一些工作介绍

(一)、理论设计的自旋池（自旋流产生问题）

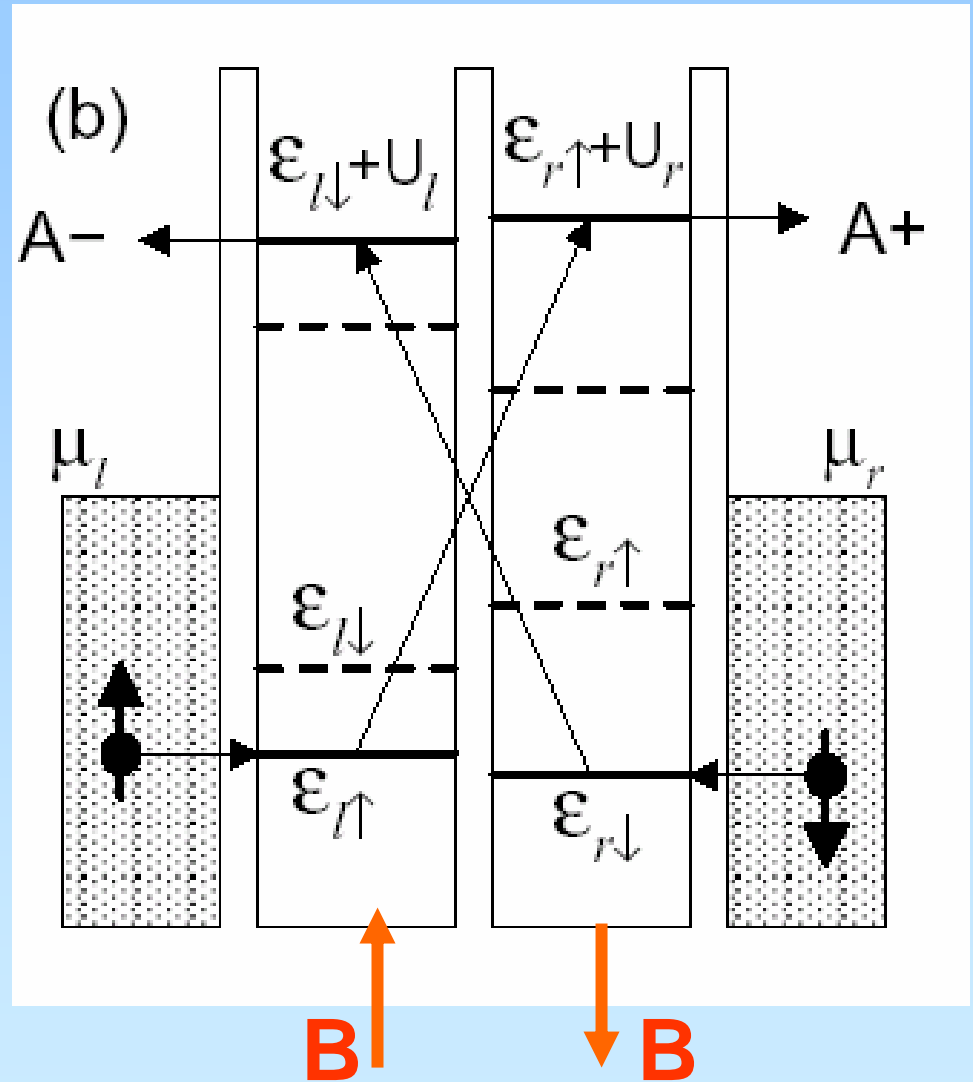
Q.-f. Sun, H. Guo, J. Wang, *Phys. Rev. Lett.* 90, 258301 (2003).

- 1、两个耦合的量子点
- 2、一个非均匀的外磁场
- 3、一个非均匀的外微波场



工作原理:

- 1、点内加磁场，**Zeeman**分裂
- 2、双量子点处于单占据
- 3、光子协助隧穿过程 **A₋**和**A₊**； 它们的电荷流相反，但自旋流相同。



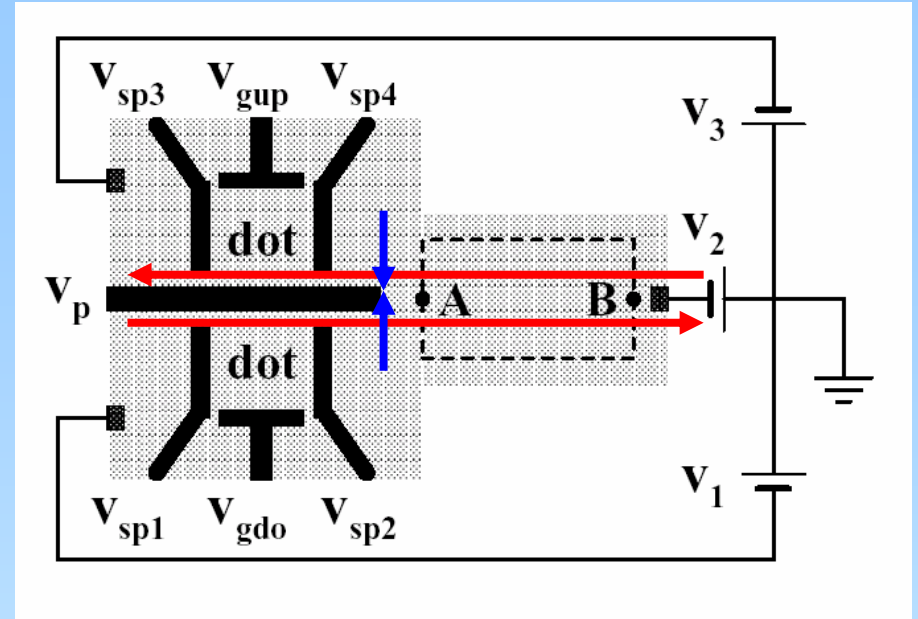
把这装置接到外电路，

它能对外电路源源不断的输出自旋流！！

W. Long, Q.F. Sun, H. Guo, J. Wang, Appl.Phys.Lett. 83, 1397 (2003).

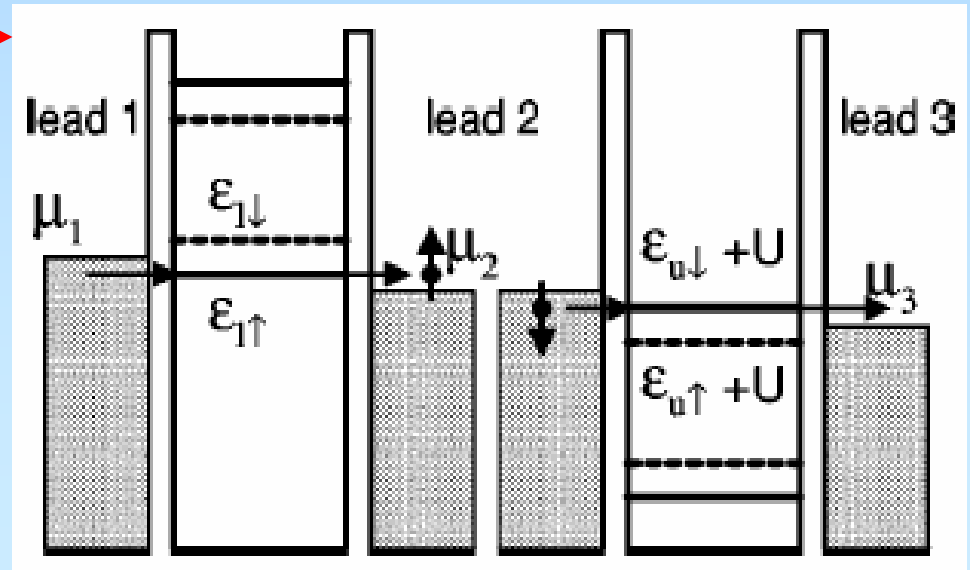
装置结构：两个无直接耦合的并联量子点。

条件：加磁场(均匀或非均匀都可)偏压：1端最高，3端最低。



工作原理： →

下点电子占据数
正从0到1的变化。
上点电子占据数
正从1到2的变化。



在A, B区域存在自旋流!

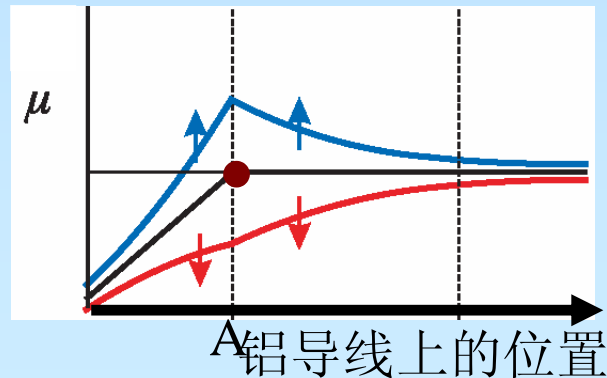
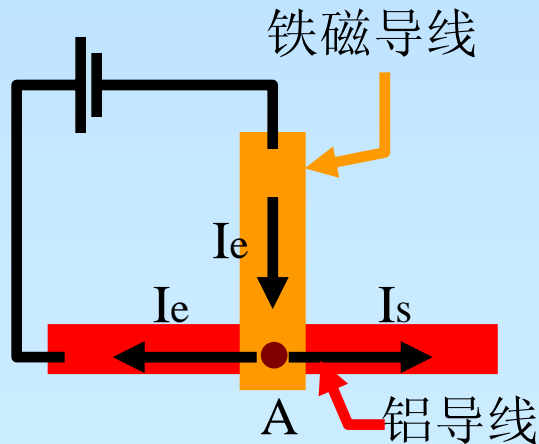
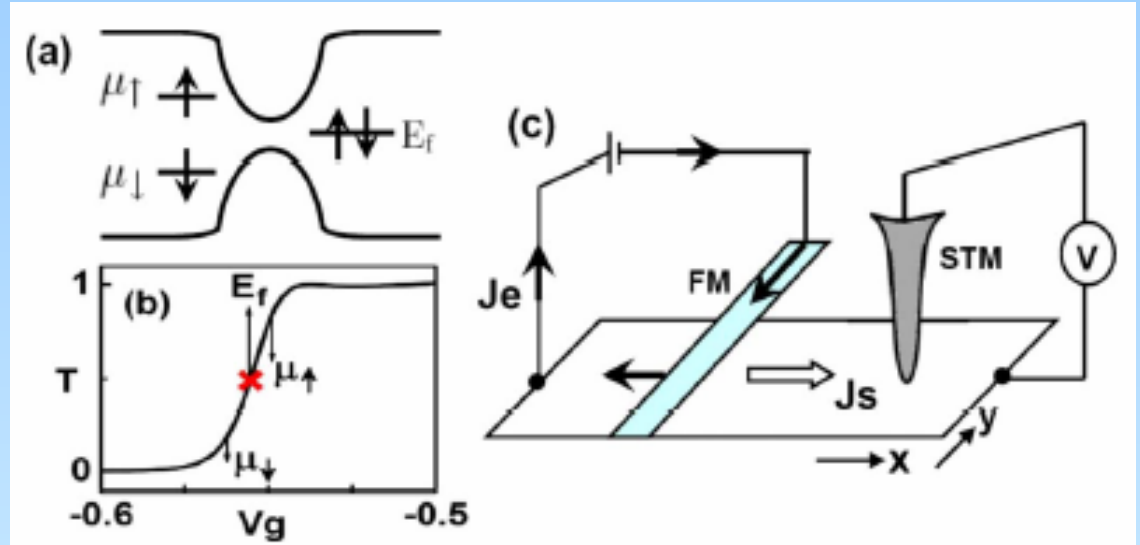
(二)、自旋流探测:

Q.F. Sun, Y. Xing, S.Q. Shen, Phys. Rev. B 77, 195313(2008).

Y. Xing, Q.F. Sun, J. Wang, Appl.Phys.Lett. 93, 142107(2008).

量子点接触或STM探测自旋流:

装置图, 工作原理

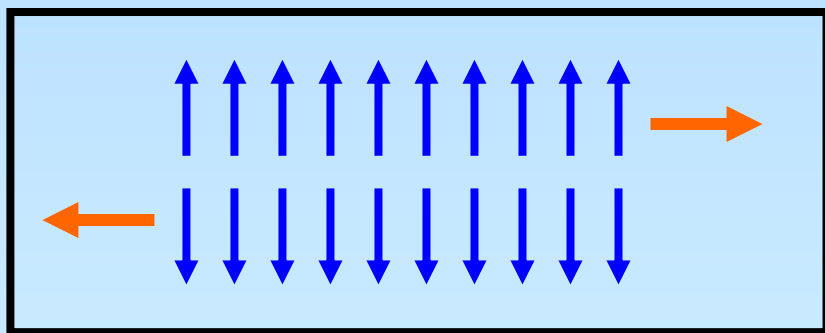


(三)、自旋流产生电场

Q.F. Sun, H. Guo, J. Wang, Phys. Rev. B 69, 054409(2004);
Q.F. Sun and X.C. Xie, Phys. Rev. B 72, 245305(2005).

电(荷)流能产生磁场：安培环路定理，毕奥 - 萨伐尔定
律
自旋流能产生什么吗？

更确切的说：一个纯的自旋流，（净自旋为零，净电
荷为零，电荷流为零），它还能产生什么吗？



$$\vec{j}_s(\mathbf{r}, t)$$



$$\vec{j}_\omega(\mathbf{r}, t)$$

自旋流产生电场

自旋流元产生的电场:

$$\begin{aligned} \vec{E}_s &= \frac{-\mu_0 g \mu_B}{4\pi} \nabla \times \int \mathbf{j}_s dV \cdot \frac{\mathbf{r}}{r^3}, \\ \vec{E}_\omega &= \frac{-\mu_0 g \mu_B}{4\pi} \int \vec{j}_\omega dV \times \frac{\mathbf{r}}{r^3}, \end{aligned}$$

即一个纯的自旋流，（**净自旋为零，净电荷为零，电荷流为零**），这自旋流还能产生电场。

角自旋流与线自旋流相似，也能产生电场。

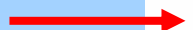
- * 电场对电荷有力的作用
- * 磁场对运动电荷有力的作用
- * 磁场对自旋有力矩的作用
- * 电场对运动自旋有力矩的作用

- * 电荷产生电场
- * 电(荷)流产生磁场
- * 自旋产生磁场
- * 自旋流产生电场

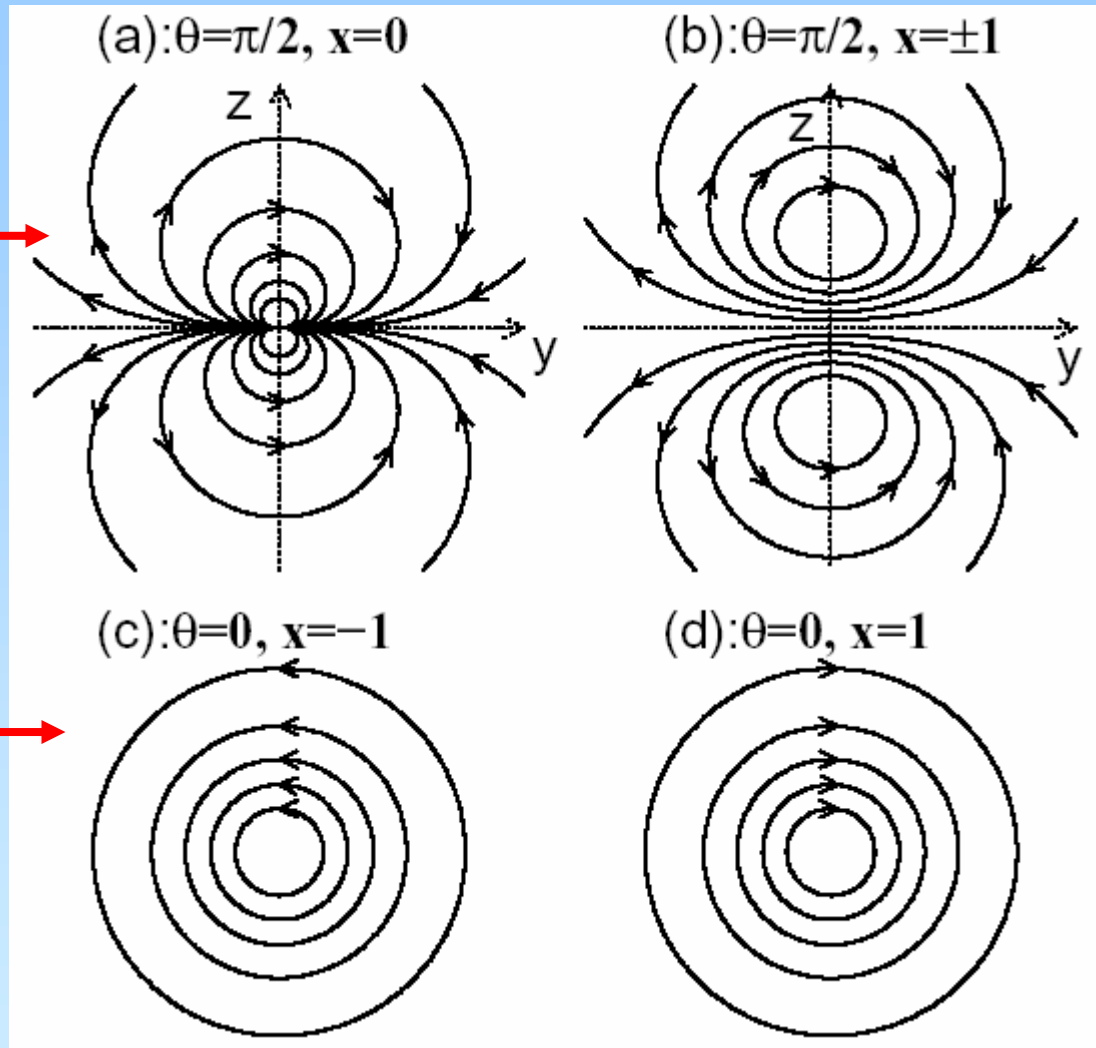
线自旋流元产生的电场

自旋流方向沿x轴


自旋方向沿z轴



自旋方向沿x轴



由于自旋流能产生电场，**Maxwell**方程组被改写为：

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \mu_0 \mathbf{J}_{mc},$$



自旋流产生电场

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \mathbf{J}_{ec},$$


电流产生磁场

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho_{ec} / \epsilon_0,$$


电荷产生电场

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \mu_0 \rho_{mc},$$


自旋产生磁场

(四)、含自旋轨道耦合量子点的二次量子化哈密顿

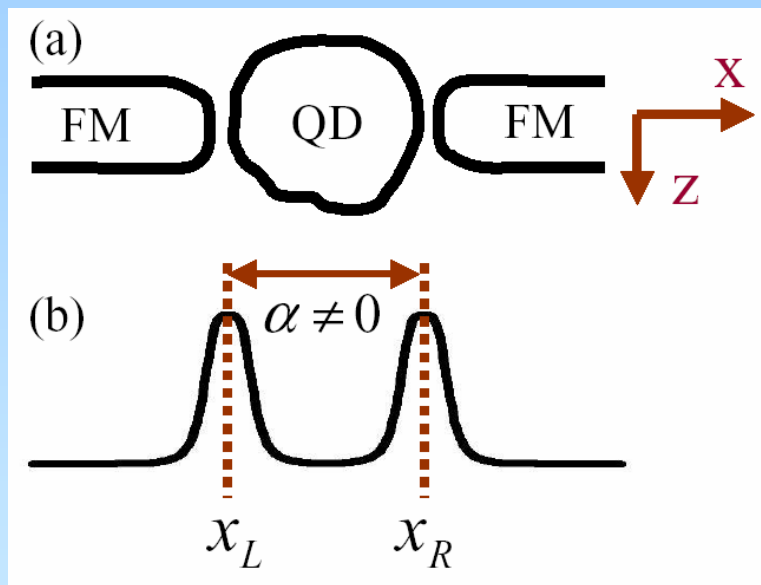
Q.F. Sun, J. Wang, H. Guo, Phys.Rev.B 71,165310(2005)

- i、最近含自旋轨道耦合的介观体系已被广泛的研究，也的确很有意思。
- ii、但在几乎所有的前人工作中，电子-电子相互作用都被忽略。但在介观小尺寸体系，这应当很重要的。
- iii、如果有二次量子化形式的哈密顿量，各种多体理论方法能方便的应用。

具体体系：

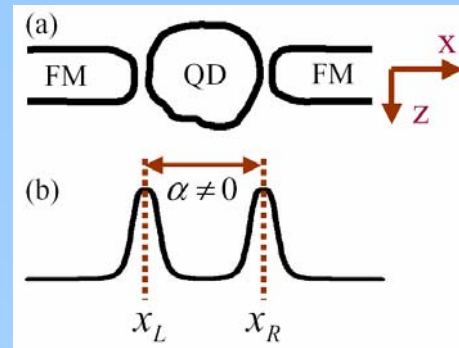
一个介观小区域耦合到铁磁导线。

介观区域内有自旋轨道耦合 和电子-电子相互作用



实空间的多体哈密顿量是：

$$H(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N) = \sum_i H_s(\mathbf{r}_i) + \sum_{i,j(i \neq j)} H_I(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)$$



其中：

$$H_I(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \frac{e^2}{2|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|^2}$$

← 电子-电子相互作用

$$H_s(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{p}^2}{2m^*} + V(\mathbf{r}) + \hat{\sigma} \cdot \mathbf{M}(\mathbf{r}) + \hat{\sigma} \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}) + H_{so}(\mathbf{r})$$

↑
动能

↑
势能

↑
铁磁磁矩

↑
外磁场

↑
自旋轨道耦合

导线可以是铁磁或正常，

外磁场在中间区，

取自旋轨道耦合是**Rashba**自旋轨道耦

合：

$$H_{so} = \frac{\hat{y}}{2\hbar} \cdot [\alpha(\hat{\sigma} \times \mathbf{p}) + (\hat{\sigma} \times \mathbf{p})\alpha]$$

二次量子化后的哈密顿量是：

$$H = H_{QD} + \sum_{\beta=L,R} H_{\beta} + H_T$$

$$\begin{aligned}
 H_{QD} &= \sum_{n,s} (\epsilon_n + sB_z) d_{ns}^{\dagger} d_{ns} + \sum_{ns,ms' (ns \neq ms')} U_{ns,ms'} \hat{n}_{ns} \hat{n}_{ms'} \\
 &+ \sum_{m,n} \left[t_{mn}^{so} d_{m\downarrow}^{\dagger} d_{n\uparrow} + B_x t_{mn}^B d_{m\downarrow}^{\dagger} d_{n\uparrow} + H.c. \right] \\
 H_{\beta} &= \sum_{k,s} (\epsilon_{k\beta} + sM_{\beta}) a_{k\beta s}^{\dagger} a_{k\beta s} \\
 H_T &= \sum_{k,n,s,\beta} \left[t_{k\beta n} \left(\cos \frac{\theta_{\beta}}{2} a_{k\beta s}^{\dagger} - s \sin \frac{\theta_{\beta}}{2} a_{k\beta \bar{s}}^{\dagger} \right) \right. \\
 &\quad \left. \times e^{is\phi_{\beta}/2} e^{-isk_R x_{\beta}} d_{ns} + H.c \right]
 \end{aligned}$$

where $t_{mn}^{so} = -t_{nm}^{so}$ and $t_{mn}^B = t_{nm}^B$.

❁ 自旋轨道耦合引起一个自旋有关相位因子 $e^{-is\phi_{so}}$ 。

这相位因子和磁通的**AB**相位因子 $e^{i\phi}$ 既相似，又不同。

强调： $e^{-is\phi_{so}}$ 是保持时间反演不变性

$e^{i\phi}$ 是破坏时间反演不变性

❁ 自旋轨道耦合引起不同能级之间的跃迁。

$$H_{R2} = \sum_{m,n} t_{mn}^{so} d_{m\downarrow}^\dagger d_{n\uparrow} + H.c.$$

其中： $t_{mn}^{so} = -t_{nm}^{so}$.

(五)、持续自旋流

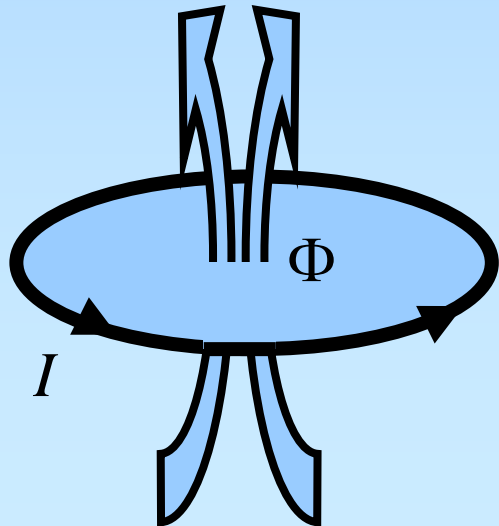
Q.F. Sun, X.C. Xie, J. Wang, Phys. Rev. Lett. 98,196801(2007)

Q.F. Sun, X.C. Xie, J. Wang, Phys. Rev. B 77,035327(2008)

- ✳ 在仅仅只有自旋轨道耦合的体系，这自旋轨道耦合还能产生持续自旋流

在**20**年前，在一磁通穿过的介观小环体系中人们发现持续电流和已被广泛的研究。

持续电流存在在平衡态和没有耗散，它是一个纯量子的效应。



M. Buttiker, et al. Phys.Lett. 96A, 365(1983);

H.F. Cheung, et al. Phys.Rev.Lett. 62,587(1989);

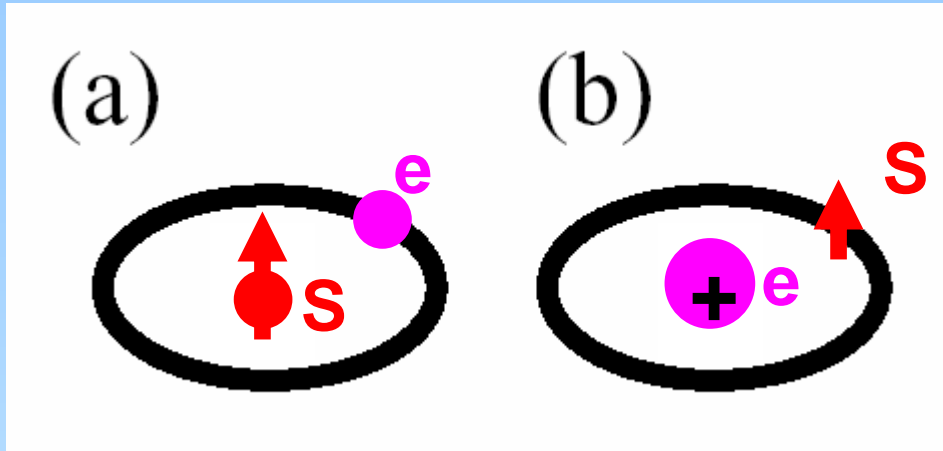
L.P. Levy, et al. Phys.Rev.Lett. 64,2074(1990);

V. Ambegaokar and U. Eckern,

Phys.Rev.Lett. 65,381(1990).

《介观物理》，阎守胜，甘子钊，
北京大学出版社

i、从电磁对应原理角度来说：持续自旋流应当存在！



- (a)、一个介观小环和它的中心有一磁性原子，这在环上将有一持续电荷流。
- (b)、同样的介观小环和它的中心是带电荷的离子，由电磁对应原理，这环上应当有持续自旋流。

ii、从Berry相位角度分析：持续自旋流应当存在！

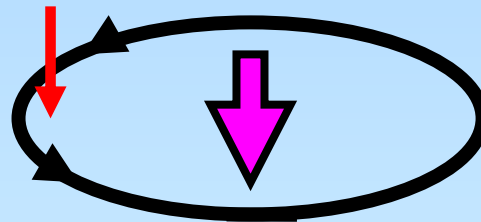
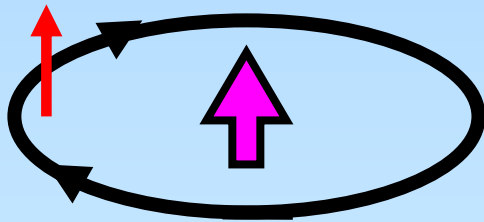
当存在自旋轨道耦合，一个运动的自旋好象受到一个等效的磁场。

❁但自旋相反的电子受到的等效磁场方向也相反！

$$e^{-is\phi_{so}}$$

$$e^{i\phi}$$

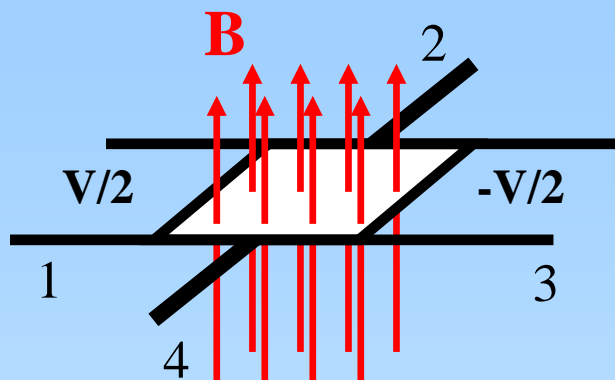
$$\alpha \hat{z} \cdot (\sigma \times \mathbf{p})$$



*自旋相反的电子受到的Berry相位相反，所以它们向相反的方向运动！产生持续的自旋流！

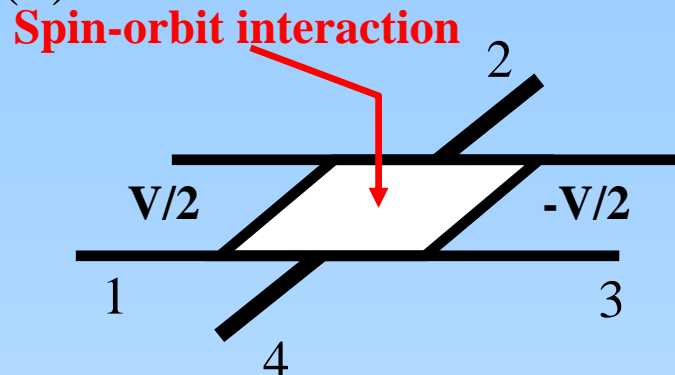
iii, 比较Hall效应, 自旋Hall效应, 持续电流, 持续自旋流

(a)



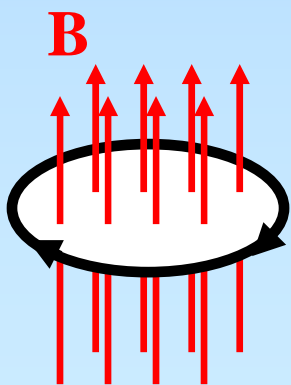
Hall effect

(b)



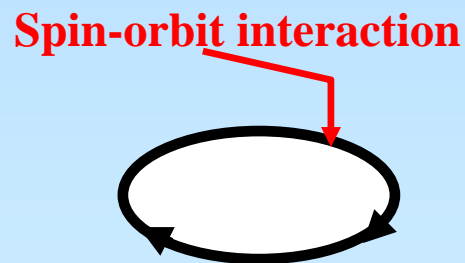
Spin Hall effect

(c)



Persistent current

(d)



Persistent spin current

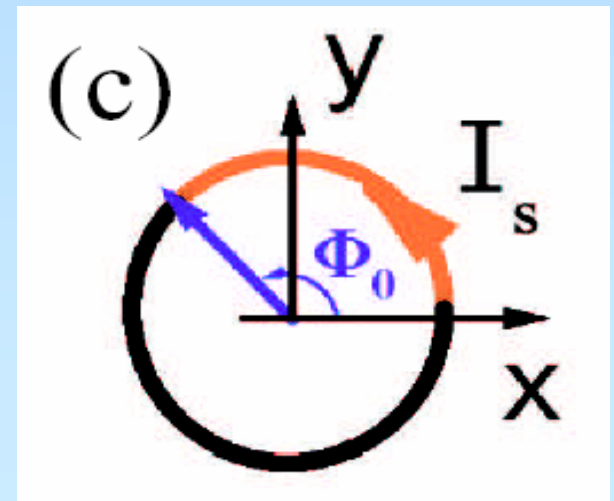
以上从电磁对应原理，从**Berry**相位，等等来分析的确存在平衡的持续自旋流。

我们考虑一个正常-Rashba自旋轨道耦合复合系统，
绕过自旋流定义，来说明持续自旋流肯定存在！

注意在正常区域，

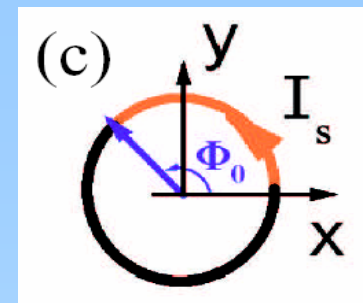
自旋流的定义是明确的！！！！

红色是正常区域，
黑色是Rashba区域。



具体的，我们考虑一维的环，哈密顿量是：

$$H = -E_a \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} - \frac{i\sigma_r}{2a} \left[\alpha_R(\varphi) \frac{\partial}{\partial \varphi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} \alpha_R(\varphi) \right] - i \frac{\alpha_R(\varphi)}{2a} \sigma_\varphi \quad (1)$$



这哈密顿量能被严格的求解。

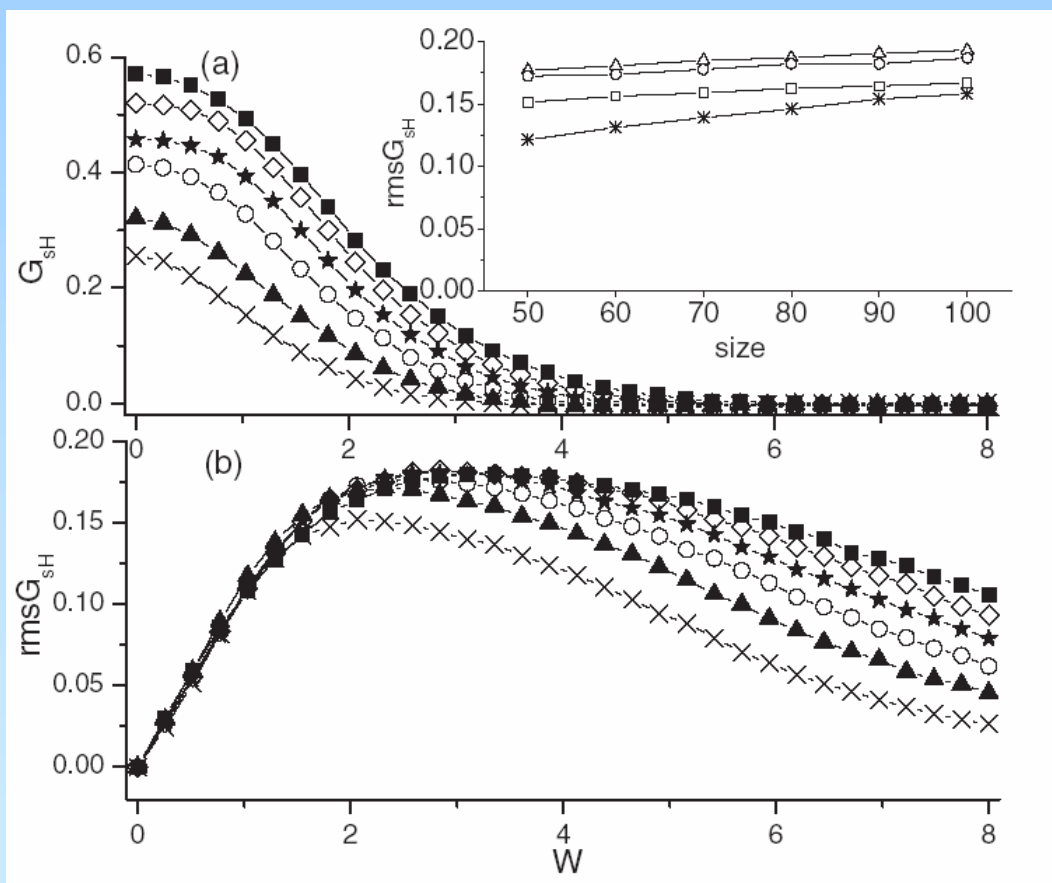
- 标准求解过程： (1)、求本征波函数： $H\Psi = E\Psi$
(2)、代入自旋流表达式。

计算结果表明自旋轨道耦合的确能产生持续自旋流！！

(六)、普适自旋电导涨落

W. Ren, Z. Qian, J. Wang, Q.F. Sun, H. Guo, Phys. Rev. Lett. 97,066603(2006)

自旋电导涨落与杂质无序度和自旋轨道耦合强度的关系



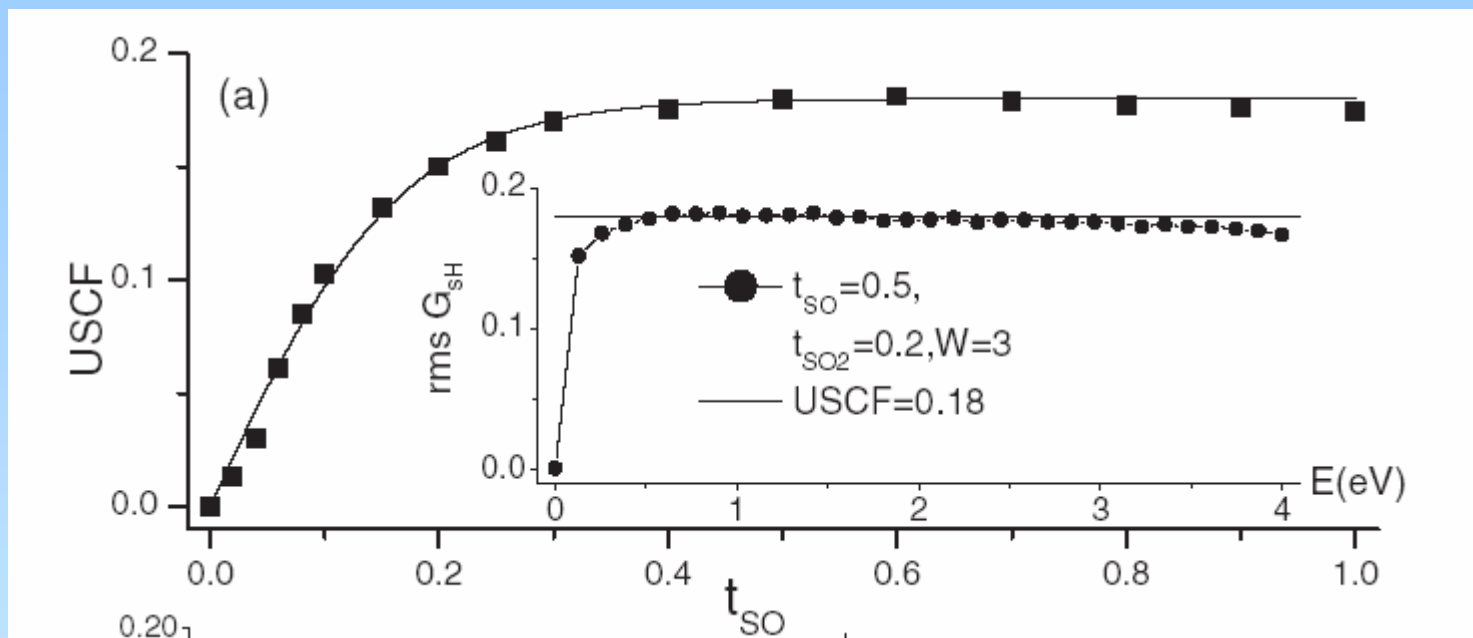
弹道区 $W < 2$

扩散区 $2 < W < 4$

绝缘区 $W > 4$

$t_{so} = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$

自旋电导涨落与自旋轨道耦合强度的关系:



四、退相干对量子自旋Hall效应的影响

(一)、自旋**Hall**效应

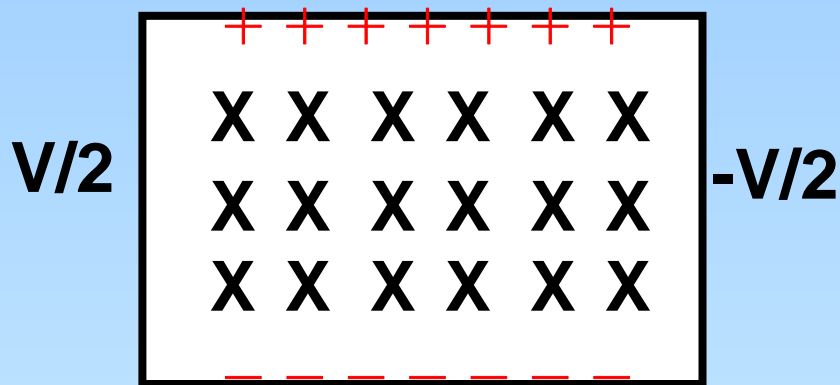
(二)、量子自旋**Hall**效应

(三)、退相干对量子自旋**Hall**效应的影响

(四)、宏观可观测量

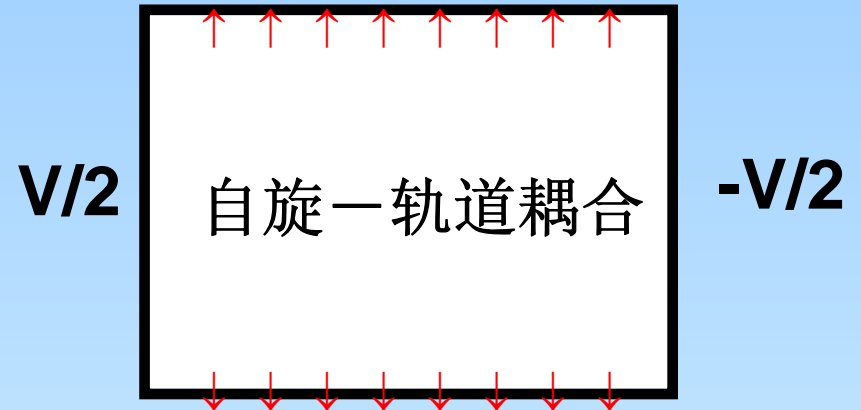
(一)、自旋Hall效应

Hall效应



垂直方向加磁场

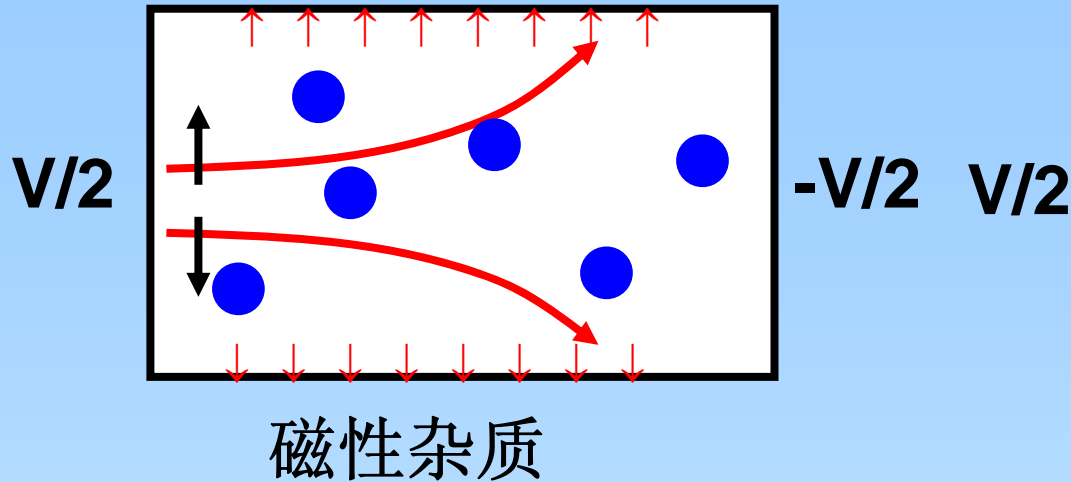
自旋Hall效应



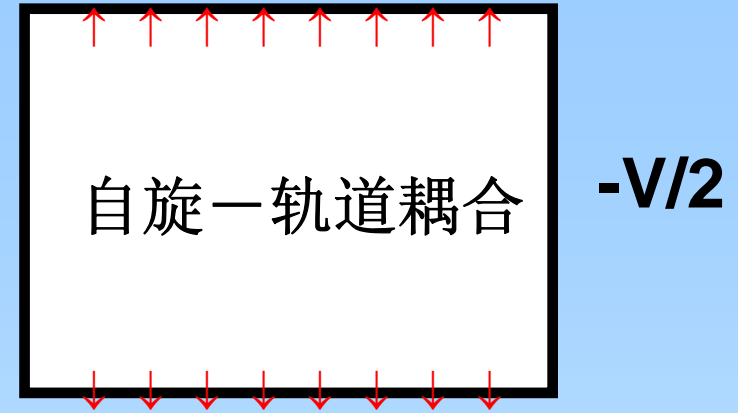
S. Murakami, et.al. Science 301,1348 (2003);

J. Sinova et.al. Phys.Rev.Lett. 92, 126603 (2004);

外在自旋Hall效应



内在自旋Hall效应



¹J. E. Hirsch, Phys. Rev. Lett. **83**, 1834 (1999).

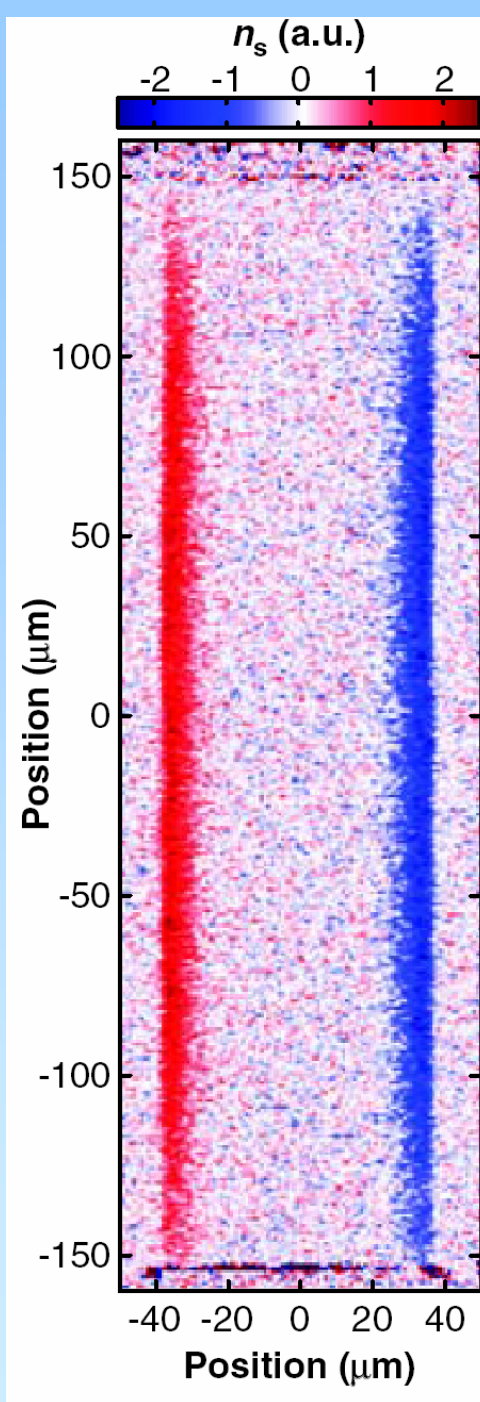
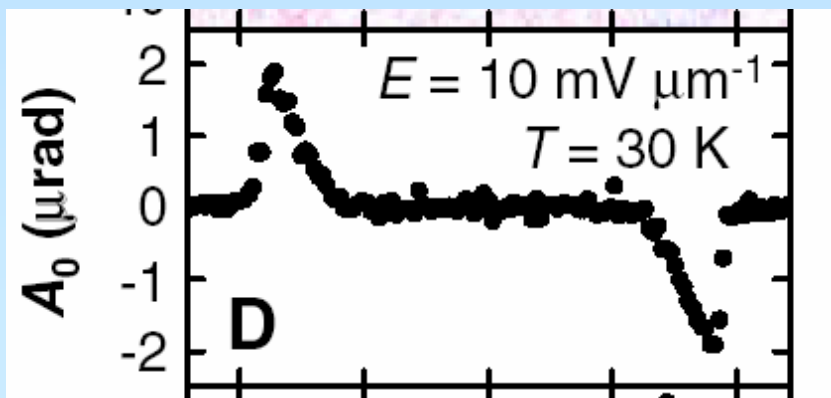
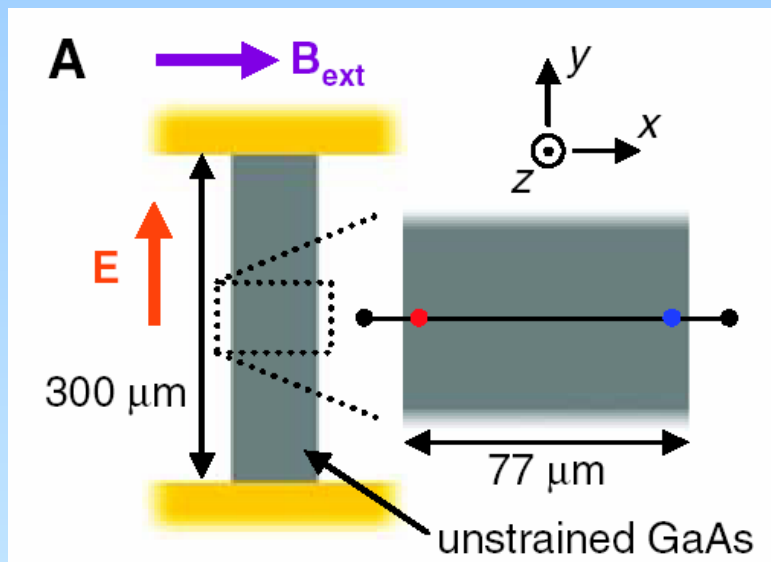
²M. I. Dyakonov and V. I. Perel, JETP Lett. **13**, 467 (1971); Phys. Lett. **35A**, 459 (1971).

S. Murakami, et.al. Science 301,1348 (2003);

J. Sinova et.al. Phys.Rev.Lett. 92, 126603 (2004);

实验方面的工作:

Y.K. Kato, et.al. *Science* 306,1910(2004)



Y. K. Kato, R. C. Myers, A. C. Gossard, and D. D. Awschalom, *Science* **306**, 1910 (2004); V. Sih, R. C. Myers, Y. K. Kato, W. H. Lau, A. C. Gossard, and D. D. Awschalom, *Nature Phys.* **1**, 31 (2005); V. Sih, W. H. Lau, R. C. Myers, V. R. Horowitz, A. C. Gossard, and D. D. Awschalom, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 096605 (2006).

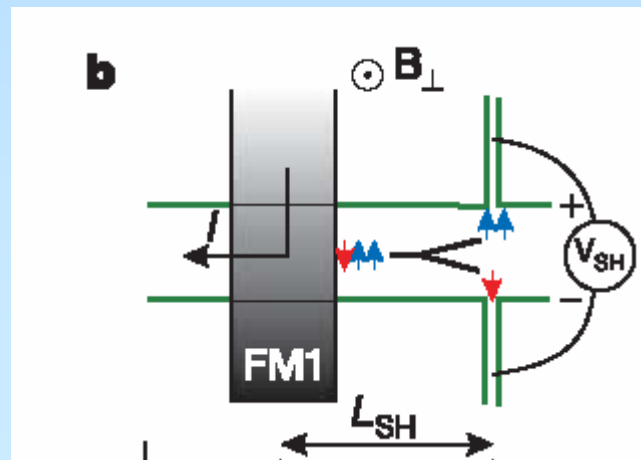
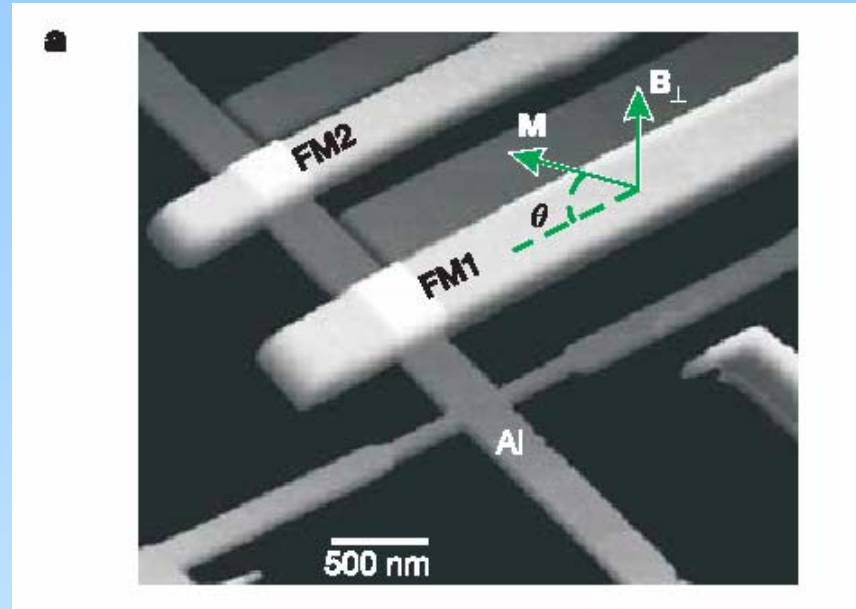
J. Wunderlich, B. Kaestner, J. Sinova and T. Jugwirth, *Phys. Rev. Lett.*, **94**, 047204 (2005).

S. O. Valenzuela and M. Tinkham, *Nature (London)* **442**, 176 (2006).

再介绍一个实验工作：逆自旋Hall效应

S.O. Valenzuela and M Tinkham, Nature 442, 176(2006)

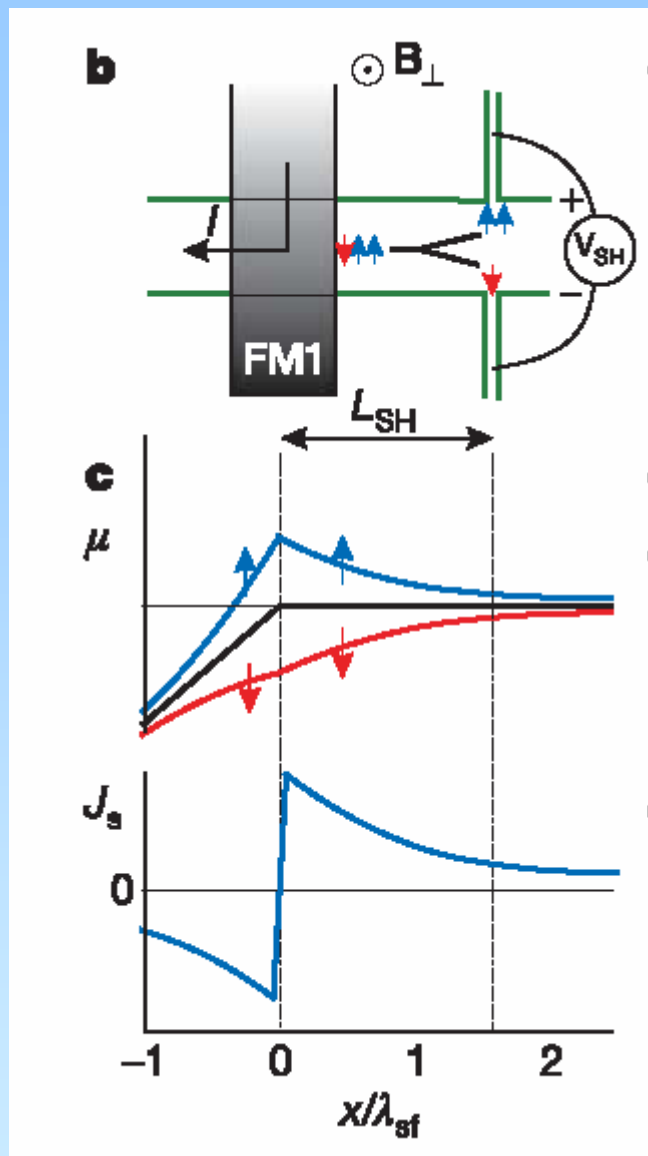
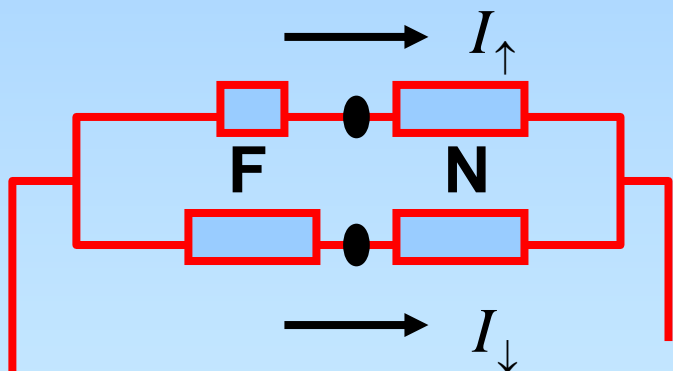
实验装置：铁磁导线
耦合到铝导线。



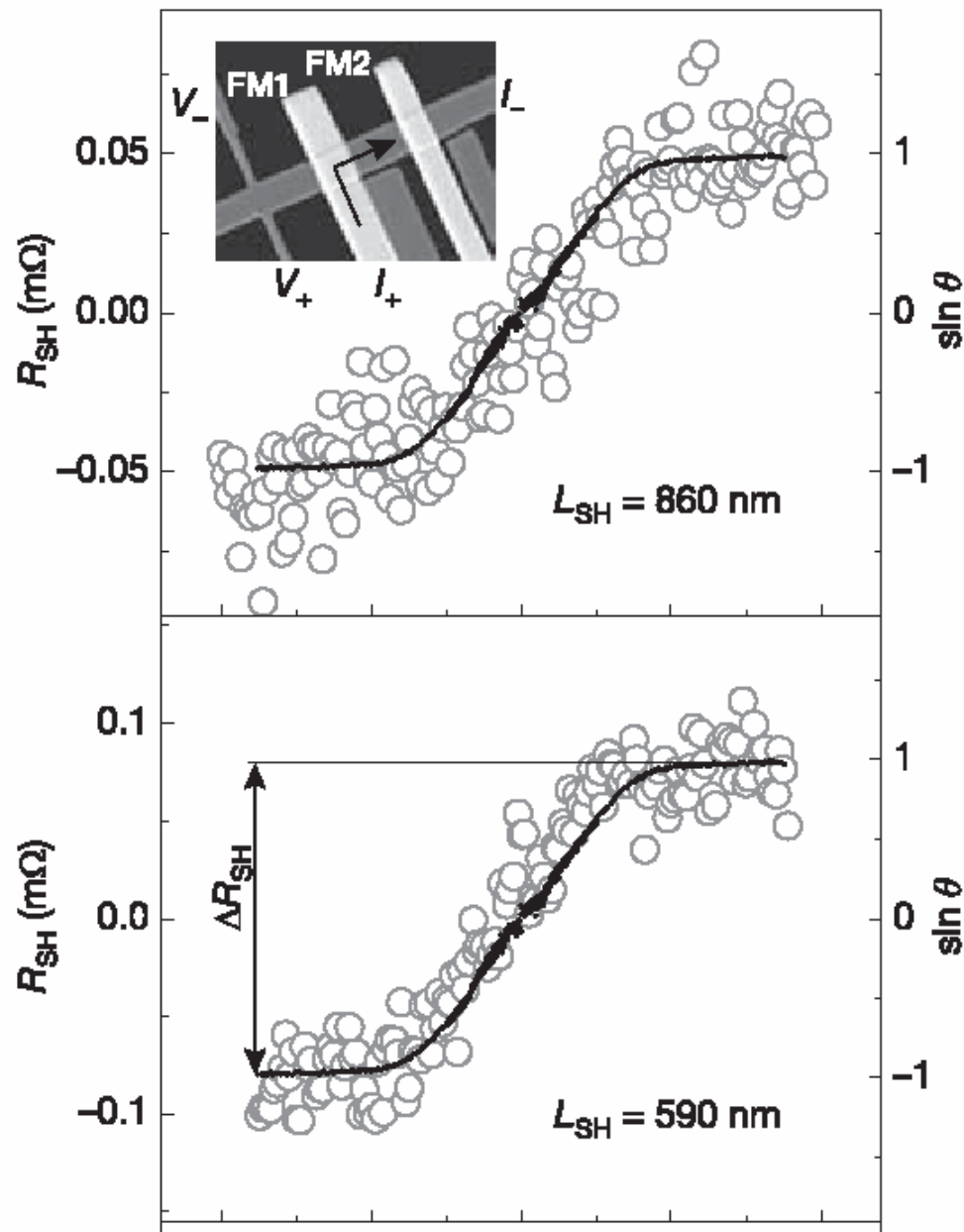
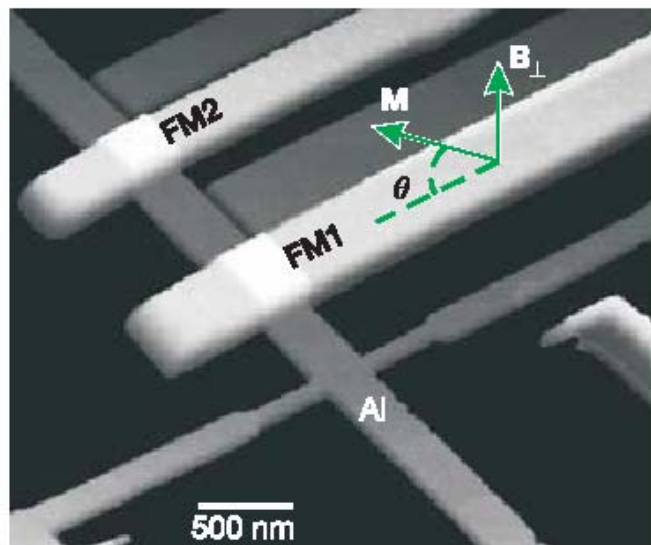
原理:

* 自旋流产生

* 逆自旋Hall效应



实验结果:



自旋Hall效应和量子Hall效应的比较：

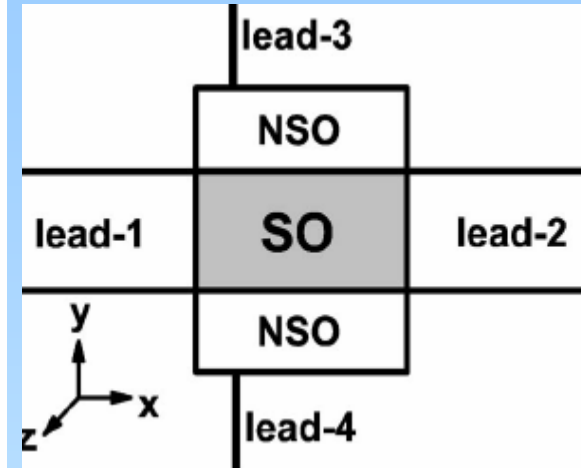
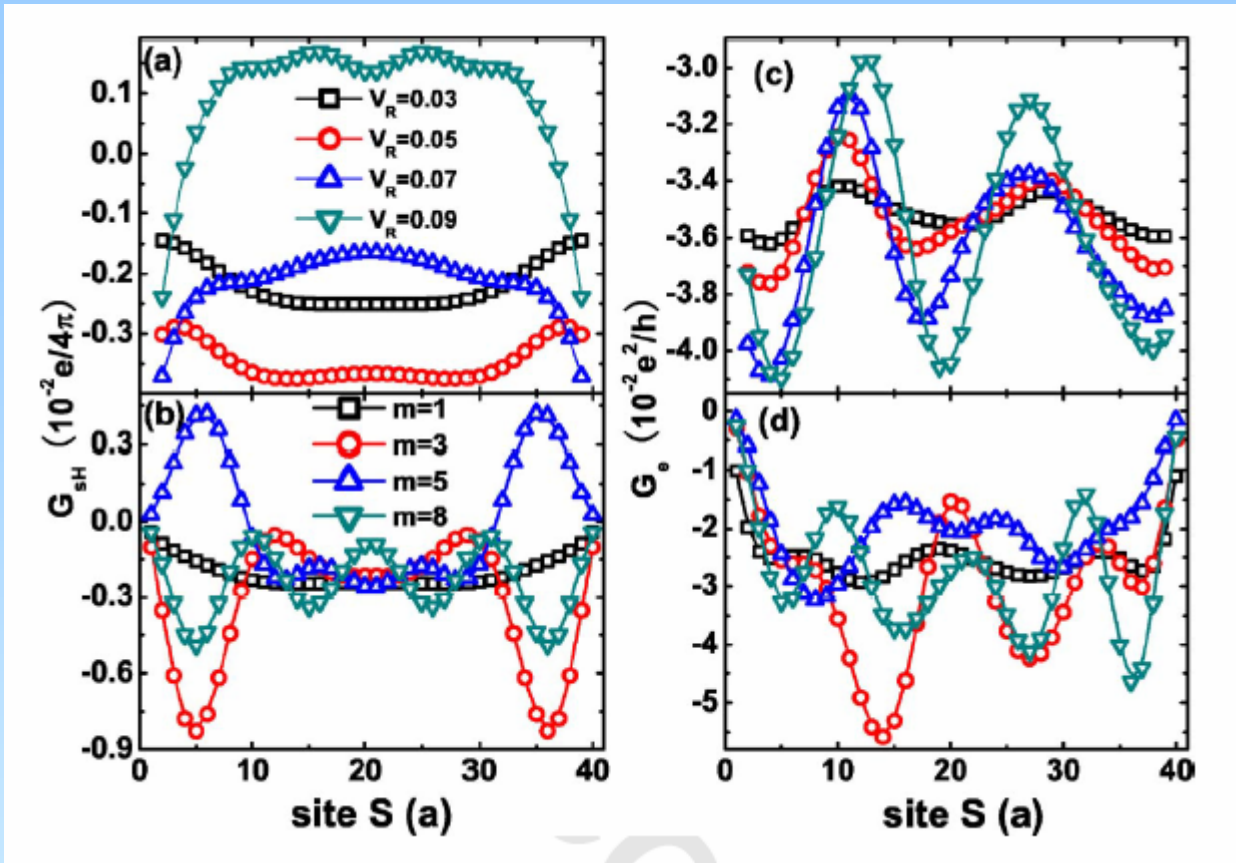
量子Hall效应对杂质、无序、退相干有很强的抵制能力；

但即使存在很少的杂质或退相干，自旋Hall效应会有极大的被影响。

量子Hall效应的Hall电压与测量位置、体系尺寸无关；

自旋Hall效应和测量位置、体系尺寸有关。

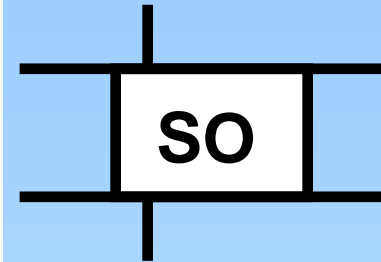
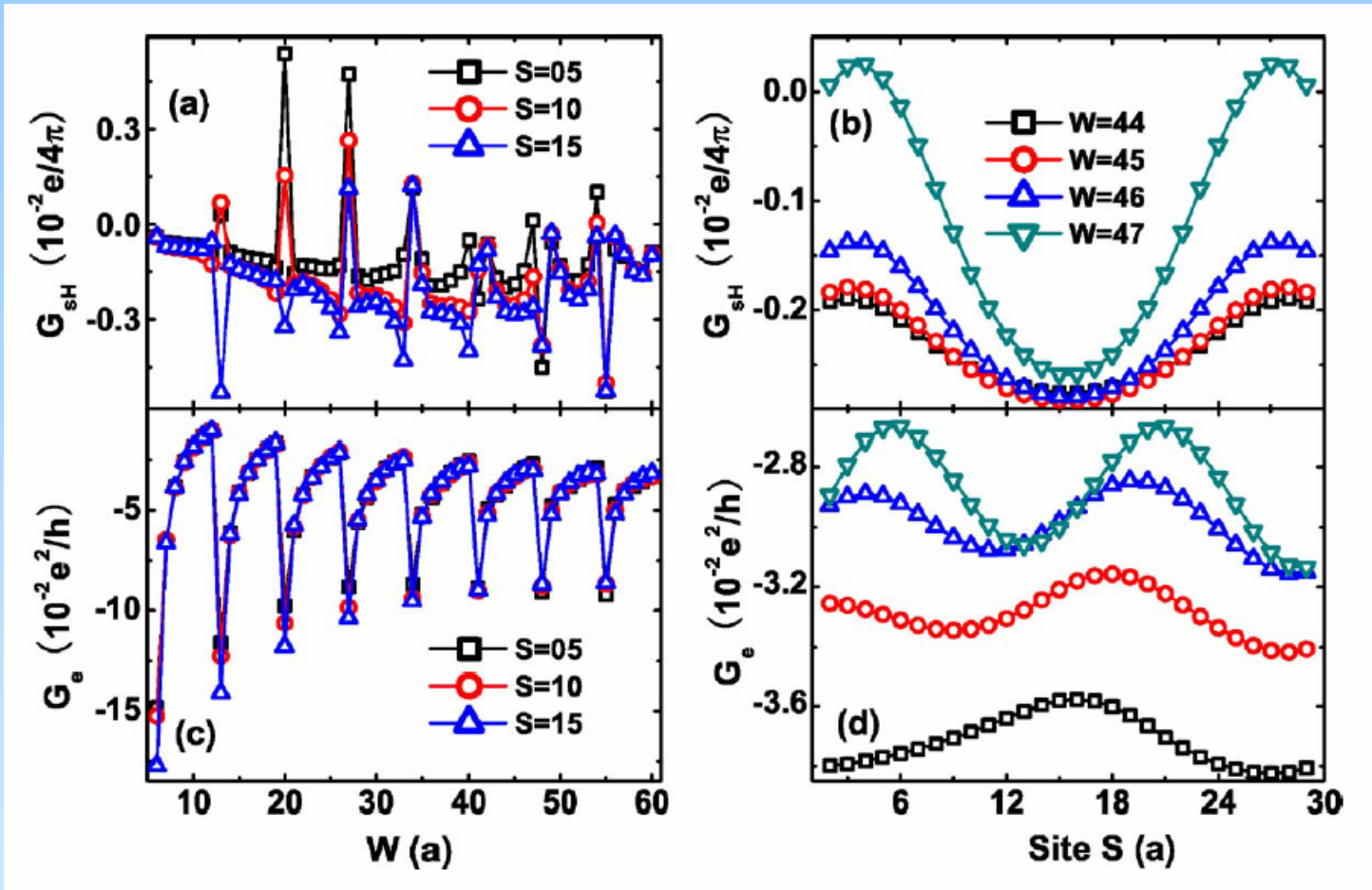
自旋霍尔电导与横向测量位置的关系:



自旋Hall电导强烈的依赖于测量位置，
自旋Hall电导强烈的与无SO区域的宽度有关。

Y.X. Xing, Q.f. Sun, and J. Wang, PRB 73, 205339(2006)

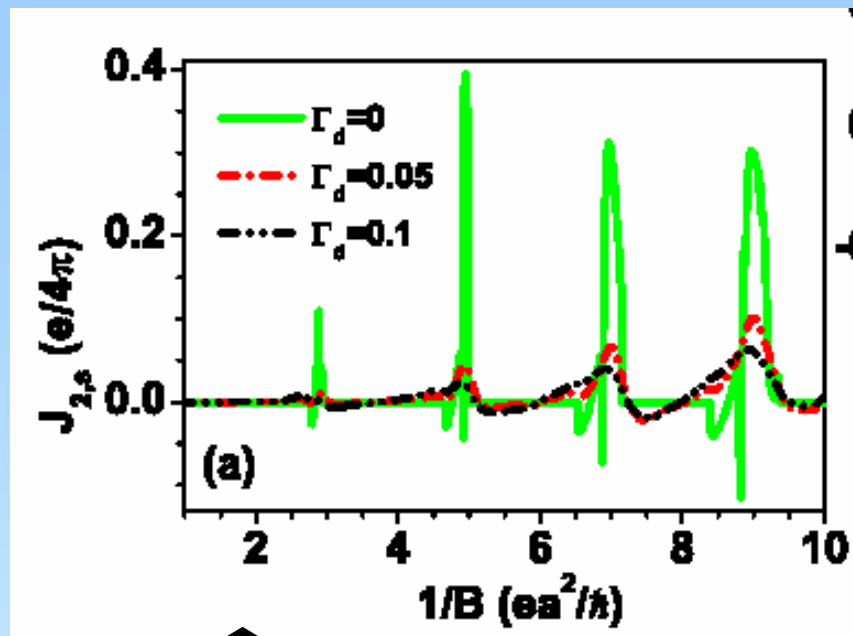
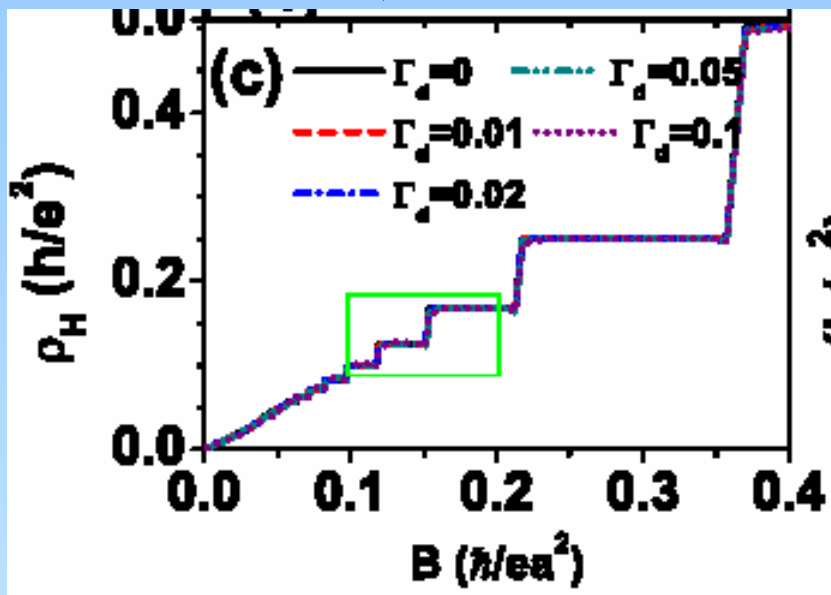
系统的尺寸及形状对自旋霍尔电导的影响:



自旋Hall电导强烈的与系统的尺寸有关!

Y.X. Xing, Q.f. Sun, and J. Wang, PRB 73, 205339(2006)

量子Hall效应对退相干有很强的抵制能力。



但即使很小的退相干对自旋Hall效应也有很大的影响。

Y.X. Xing, Q.f. Sun, and J. Wang, PRB 77, 115346(2008)

主要原因：

在自旋**Hall**效应中，不存在边态。

使得：

自旋**Hall**效应依赖于体系的形状、尺寸、和测量位置；

自旋**Hall**效应对杂质，退相干很敏感；即使在很少的杂质或很弱的退相干，自旋**Hall**效应被毁掉。

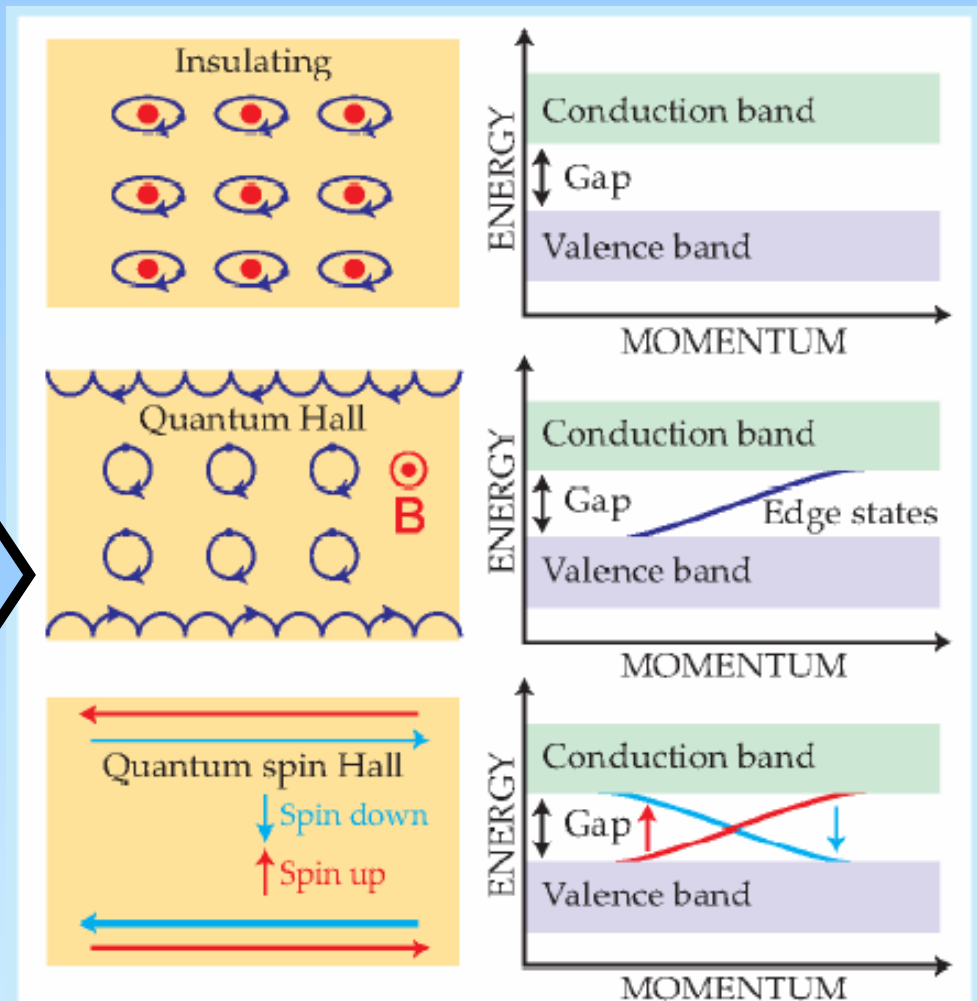
(二)、量子自旋Hall效应

存在边态，自旋相反电子向相反方向运动；

体材料是绝缘，存在能隙。

比较绝缘体、量子Hall体系、和量子自旋Hall体系的电子运动和能带结构

量子自旋Hall效应存在二个要素：自旋轨道耦合和特殊能带结构

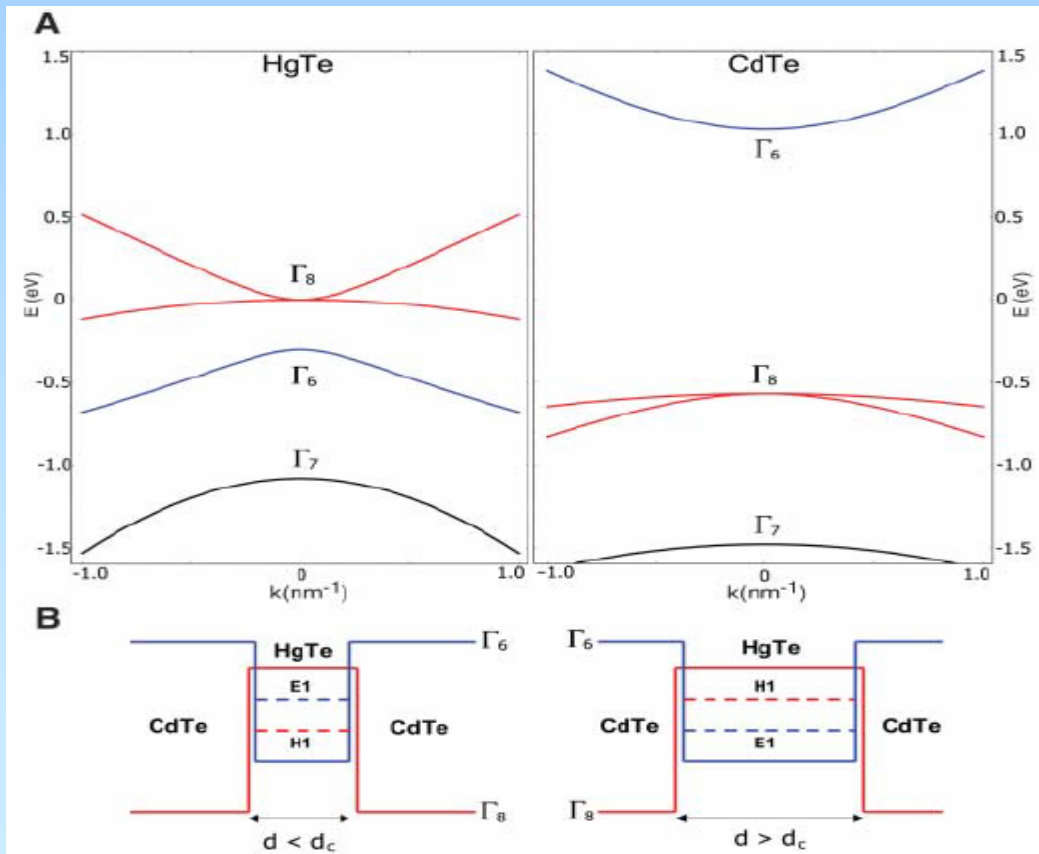


最早提出量子自旋Hall效应的是Kane和Mele在单层石墨体系。

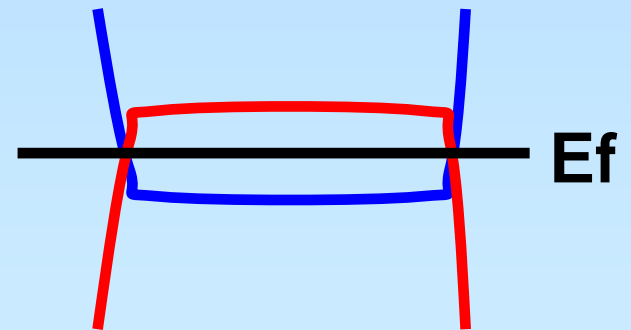
C.L. Kane and E.J. Mele, PRL 95,226801(2005); PRL 95,146802 (2005).

下面我简单介绍Zhang SC在HgTe/CdTe量子阱的一个工作：

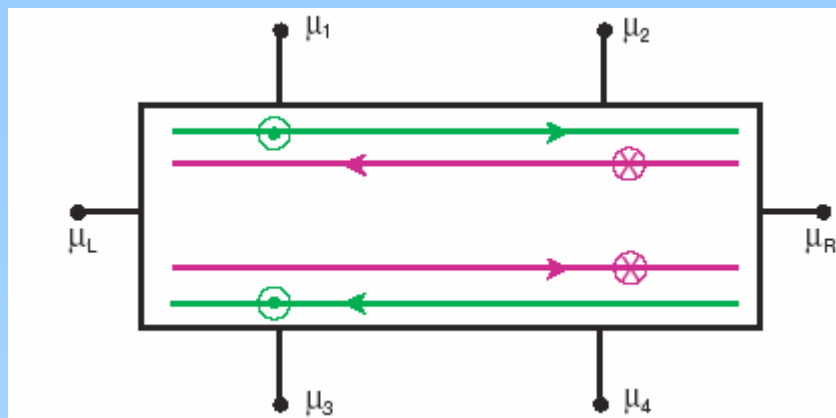
B.A. Bernevig, et al. Science 314,175(2006).



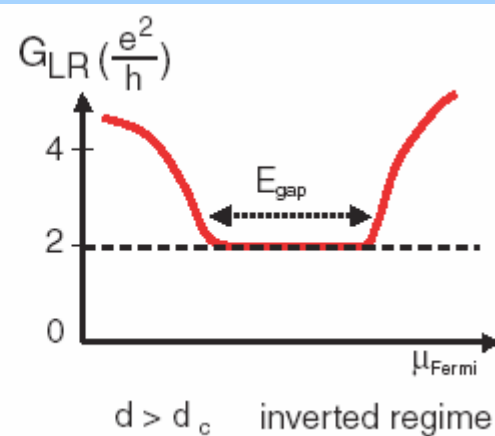
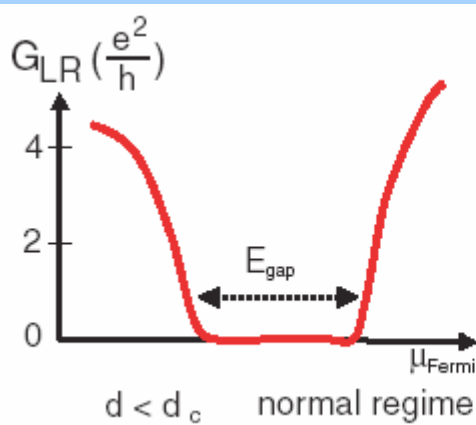
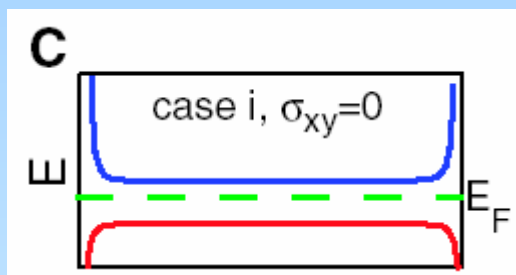
量子阱内的能带发生翻转。



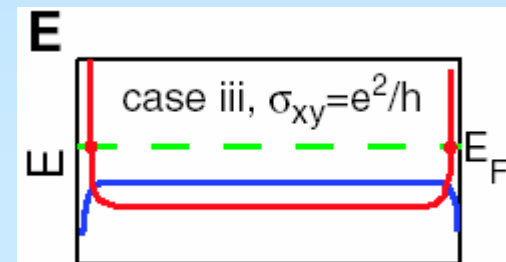
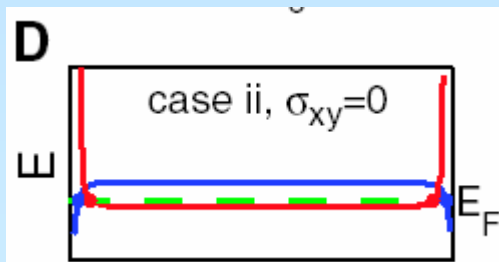
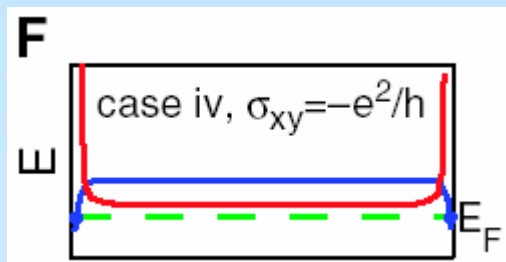
边态出现，电导量子化：



普通情况，没有**QSHE**

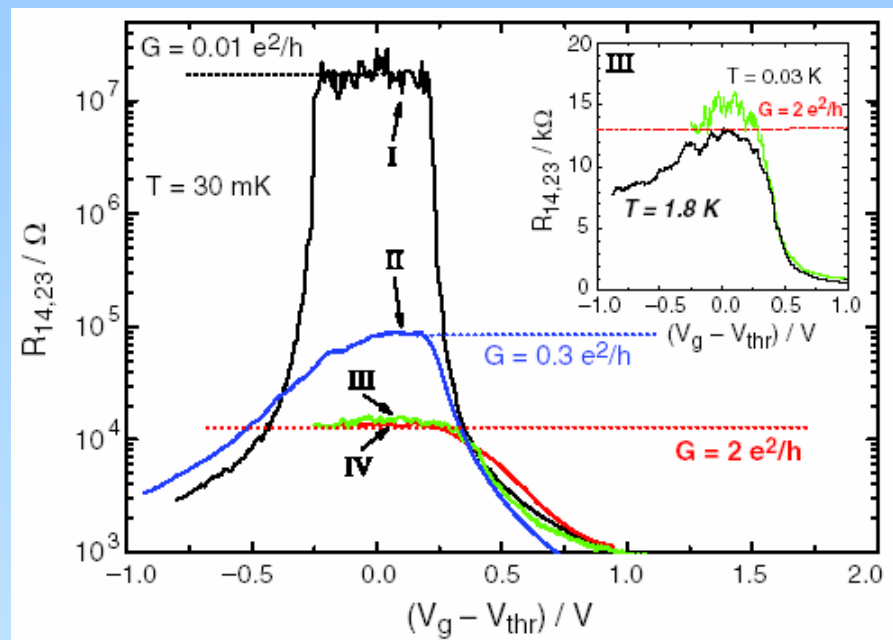
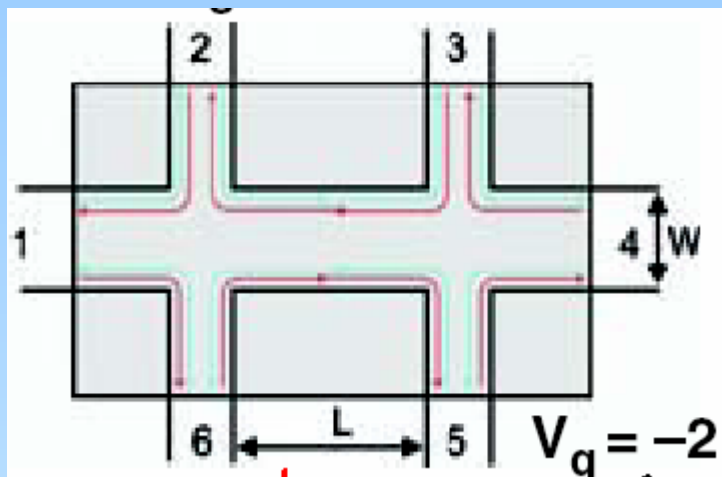


翻转情况，**QSHE**：



实验结果:

Konig ... Science 318, 766(2007).



*但是，只在介观体系（ $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ 和 $1 \times 0.5 \mu\text{m}^2$ ）看到，
在宏观体系（ $20 \times 13.3 \mu\text{m}^2$ ）没有。为什么？

*问：量子自旋Hall效应有没有象量子Hall效应那样抵抗杂质、无序、退相干干扰的能力。

(三)、退相干对量子自旋Hall效应的影响

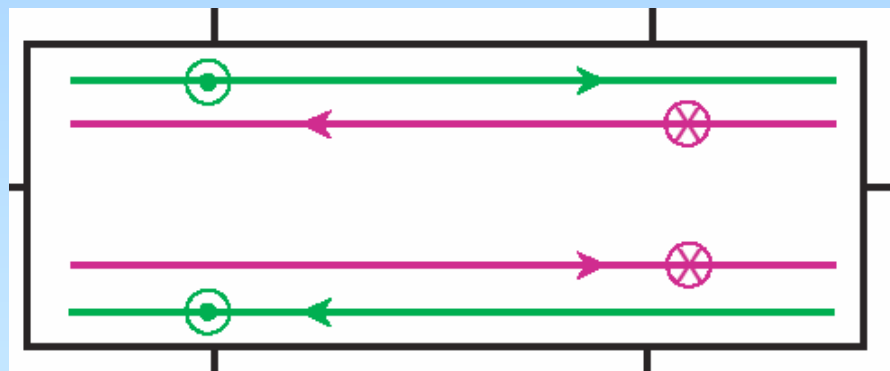
二类退相干：

普通退相干：丢失位相记忆，但保持自旋相干记忆

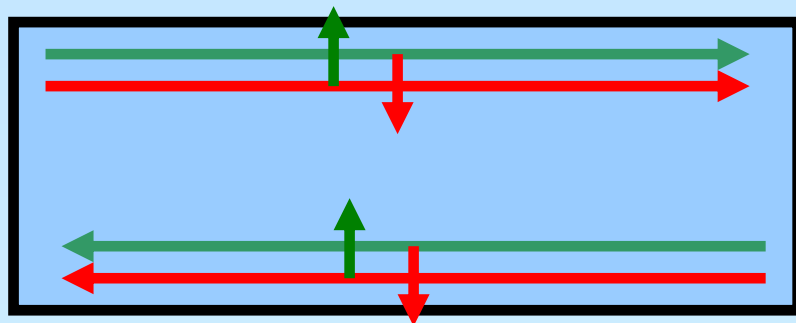
自旋退相干：位相和自旋相干都丢失。

例如：核自旋、磁性杂质、外磁场等。

直观图象：自旋翻转散射将对量子自旋Hall效应有极大的影响。

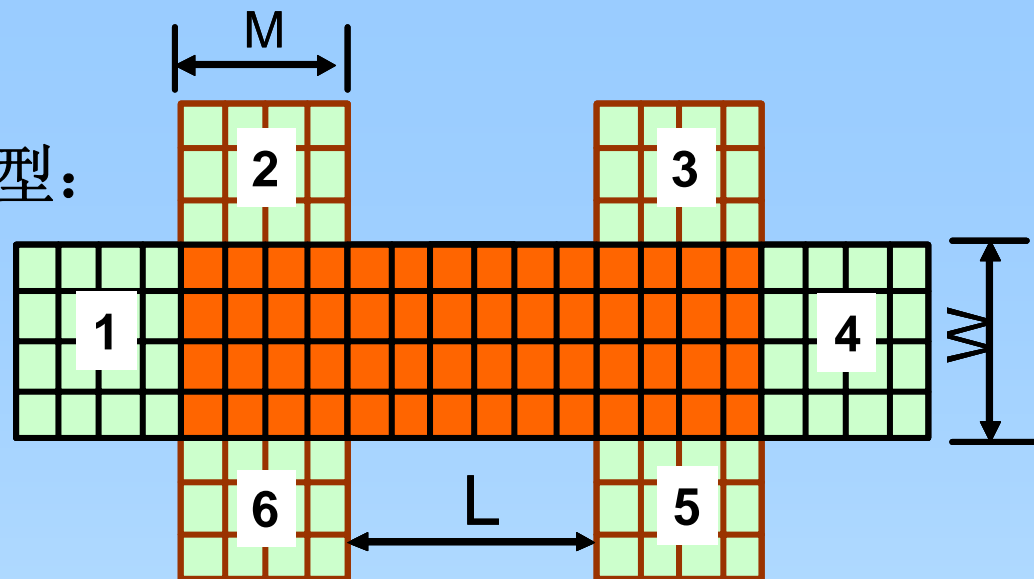


但对量子Hall效应，任何散射没有作用。



模型和哈密度量:

六端体系, 格点化紧束缚模型:



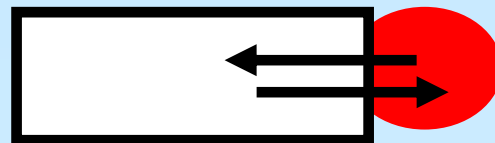
哈密度量:

$$H = -\left[\sum_{\langle ij \rangle \sigma} t e^{i\eta(\sigma)\phi_{ij}} c_{i\sigma}^\dagger c_{j\sigma} + H.c. \right] + \left[\sum_{ik\sigma} \epsilon_{k\sigma} a_{ik\sigma}^\dagger a_{ik\sigma} + (t_{k\sigma} a_{ik\sigma}^\dagger c_{i\sigma} + H.c.) \right]$$

第一项, 格点化哈密度量;

自旋轨道耦合表现在位相上; QF Sun, et al PRB71,165310(2005)

退相干用 **Buttiker** 虚拟导线来模拟。



隧穿系数:

$$T_{pq}^{\sigma} = \text{Tr}[\Gamma_{p\sigma} \mathbf{G}^r \Gamma_{q\sigma} \mathbf{G}^a]$$

Green函数:

$$\mathbf{G}^r = [\mathbf{G}^a]^{\dagger} = [E_F \mathbf{I} - \mathbf{H}_{cen} - \sum_{p\sigma} \Sigma_{p\sigma}^r]^{-1}$$

$$\Gamma_{p\sigma} = i[\Sigma_{p\sigma}^r - \Sigma_{p\sigma}^{r+}]$$

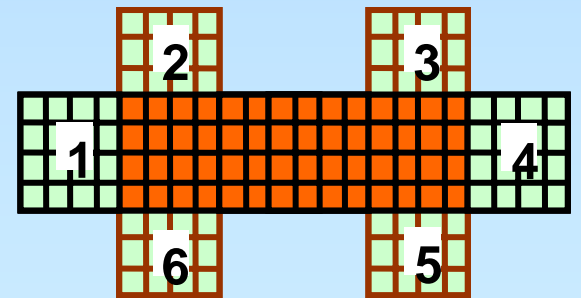
自能:

$$\Sigma^r(\epsilon) = \mathbf{H}_{01} \mathbf{g}^r(\epsilon) \mathbf{H}_{10}$$

或 $-i\Gamma/2$

电流:

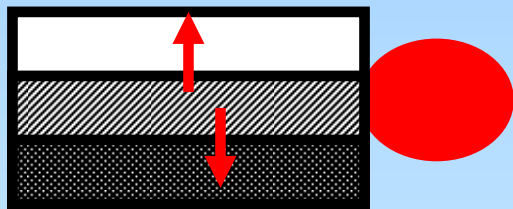
$$J_{p\sigma} = \frac{e}{\hbar} \sum_{q \neq p} T_{pq}^{\sigma} (V_{p\sigma} - V_{q\sigma}),$$



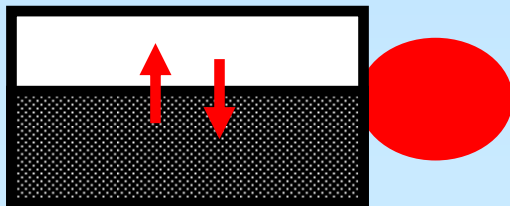
电流:
$$J_{p\sigma} = \frac{e}{\hbar} \sum_{q \neq p} T_{pq}^{\sigma} (V_{p\sigma} - V_{q\sigma}),$$

虚拟导线的电压:

1)、对相位退相干, 由虚拟导线的流 $J_{p\sigma}$ 分别为**0**来定, 然后 $V_{p\sigma}$ 与自旋有关。

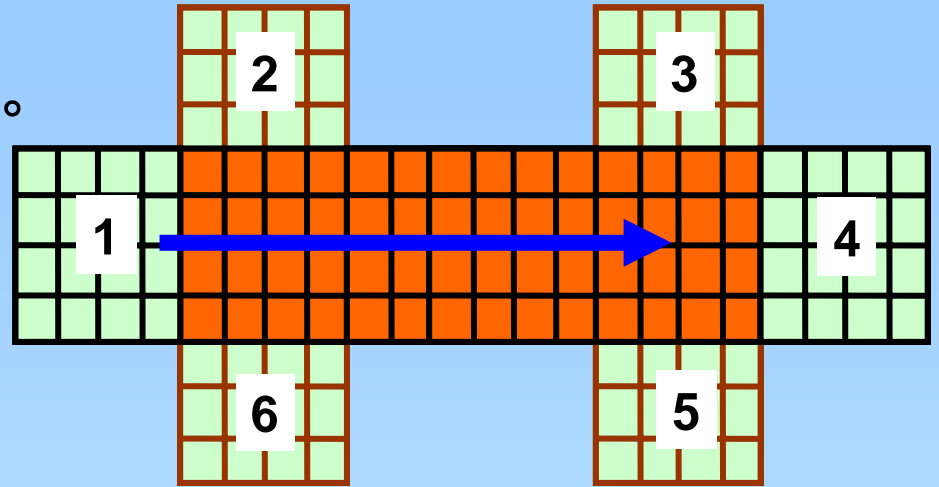


2)、对自旋退相干, 由虚拟导线的总流为**0**来定, 然后 $V_{p\sigma}$ 与自旋无关。



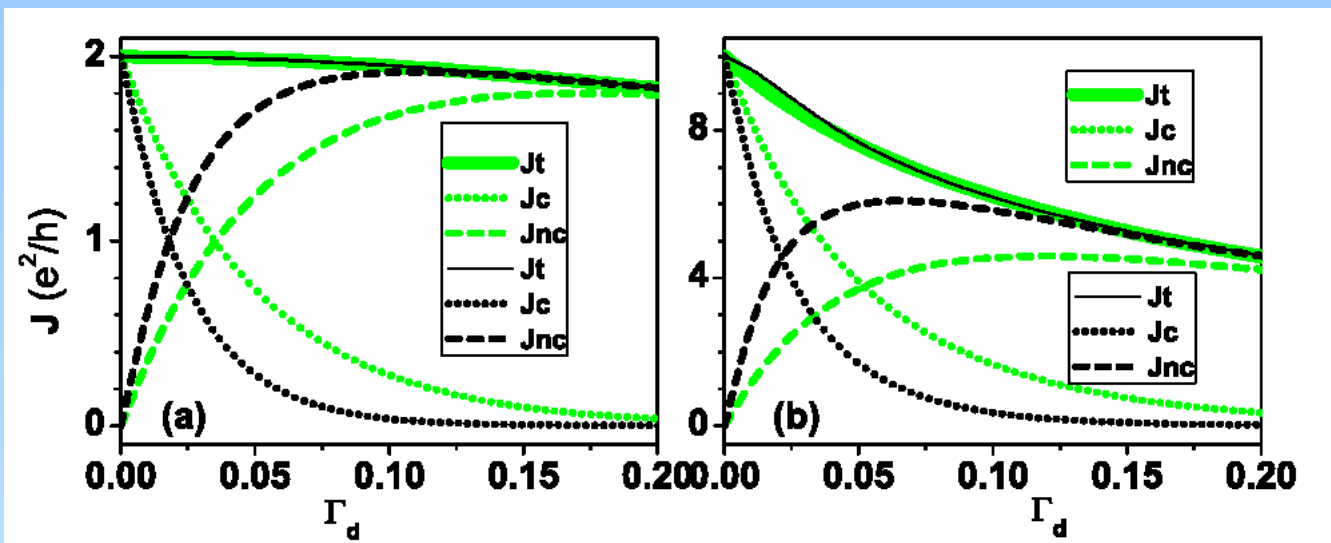
$V_{p\sigma}$ 确定之后, 六个端口的流 $J_{p\sigma}$ 能计算出。

最后，令**2,3,5,6**端口的流为**0**，这**4**个端口的电压能获得。

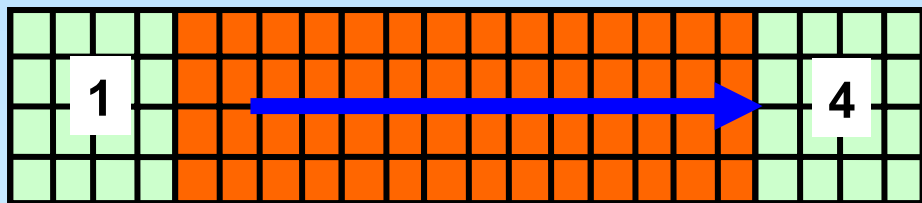


下面数值计算： $R_{14,23} = V_{23}/I_{14} = (V_2 - V_3)/I_1$

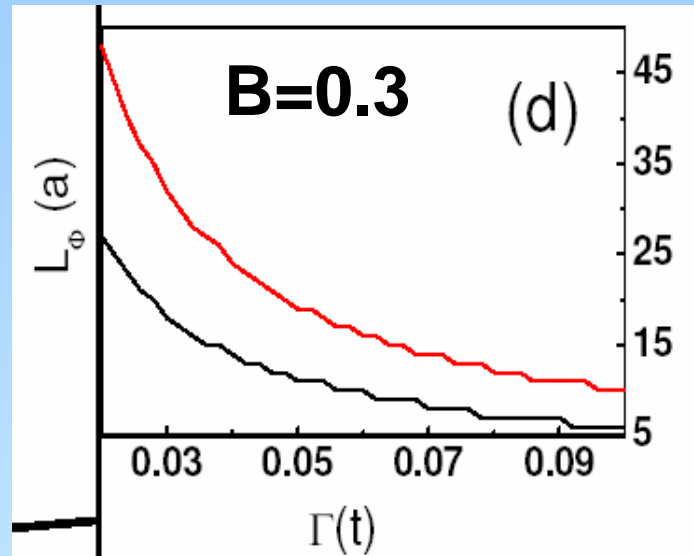
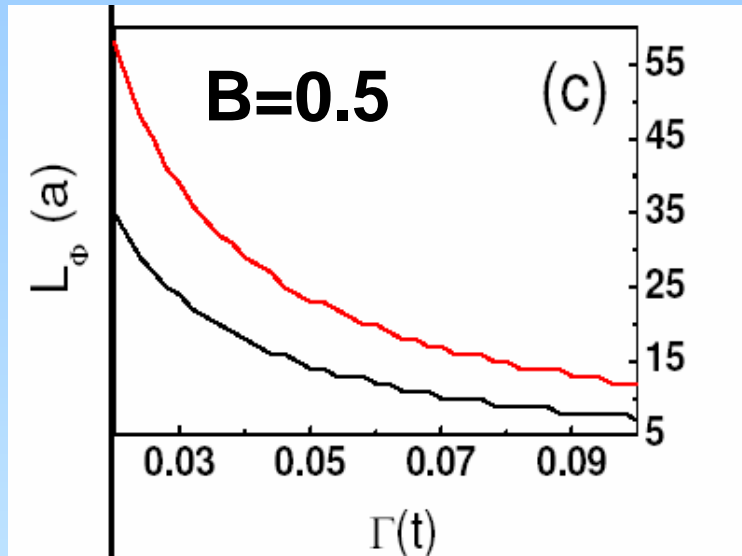
虚拟导线的耦合强度 Γ 和位相相干长度的关系:



二端体系，
相干和非相
干流。

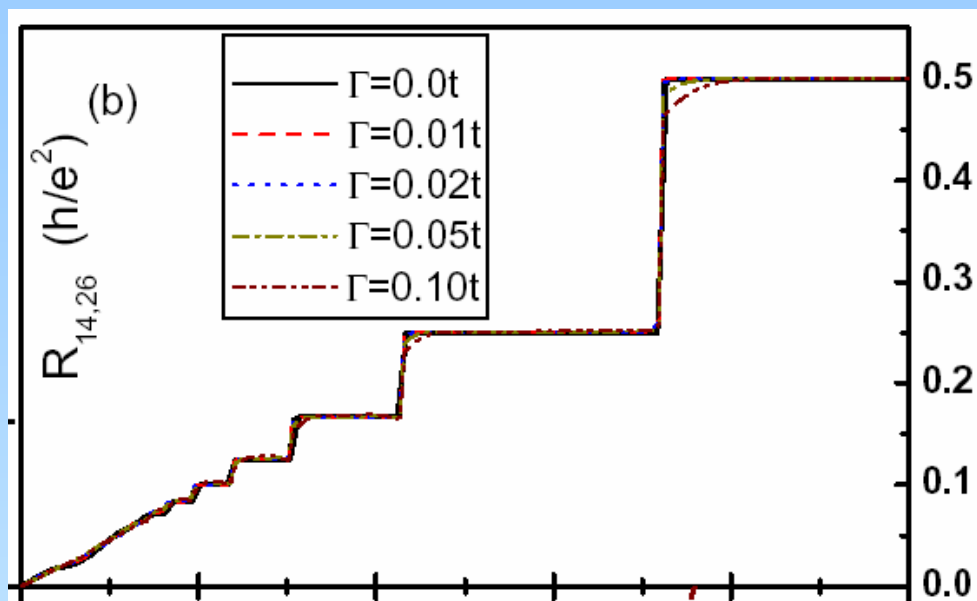


虚拟导线的耦合强度 Γ 和位相相干长度的关系:

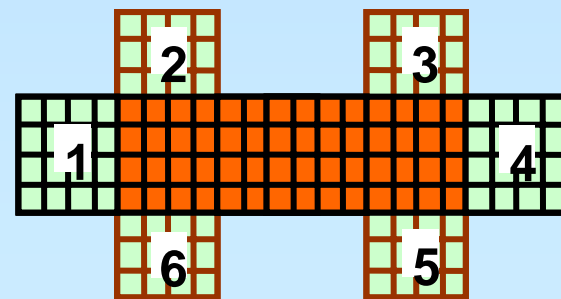


黑线是位相退相干，红线是自旋退相干。

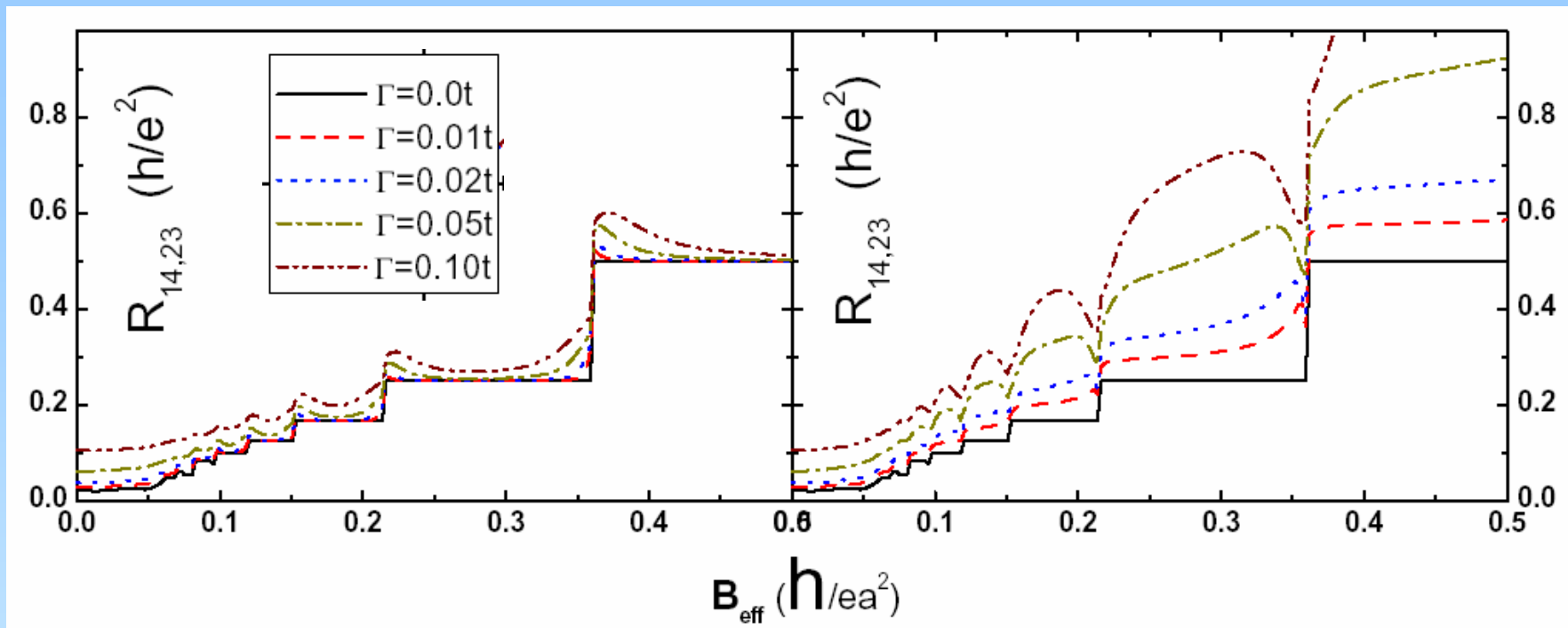
先看一下退相干对量子Hall效应的影响：



退相干对量子Hall效应几乎没有影响！！



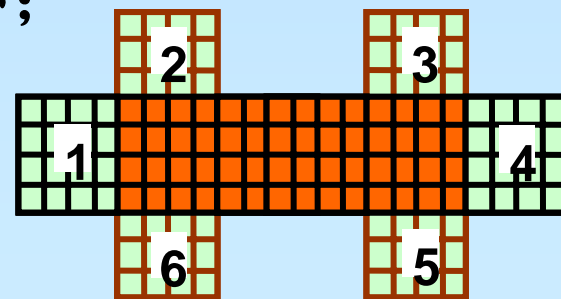
退相干对量子自旋Hall效应的影响：



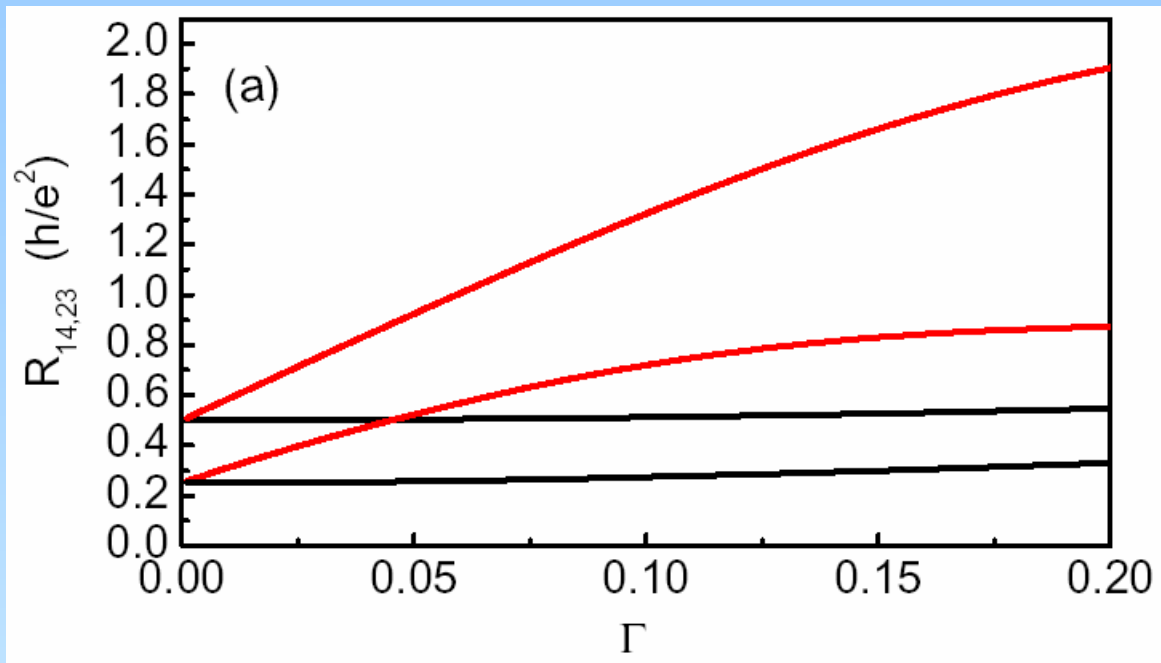
没有退相干时，量子自旋Hall平台出现。

位相退相干对量子自旋Hall效应影响很小；

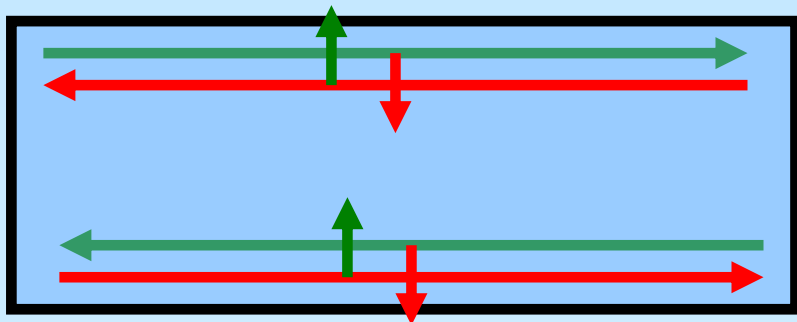
但自旋退相干对量子自旋Hall效应有极大的影响！！



退相干对量子自旋Hall效应的影响：
固定有效磁场在平台位置，变化退相干强度，



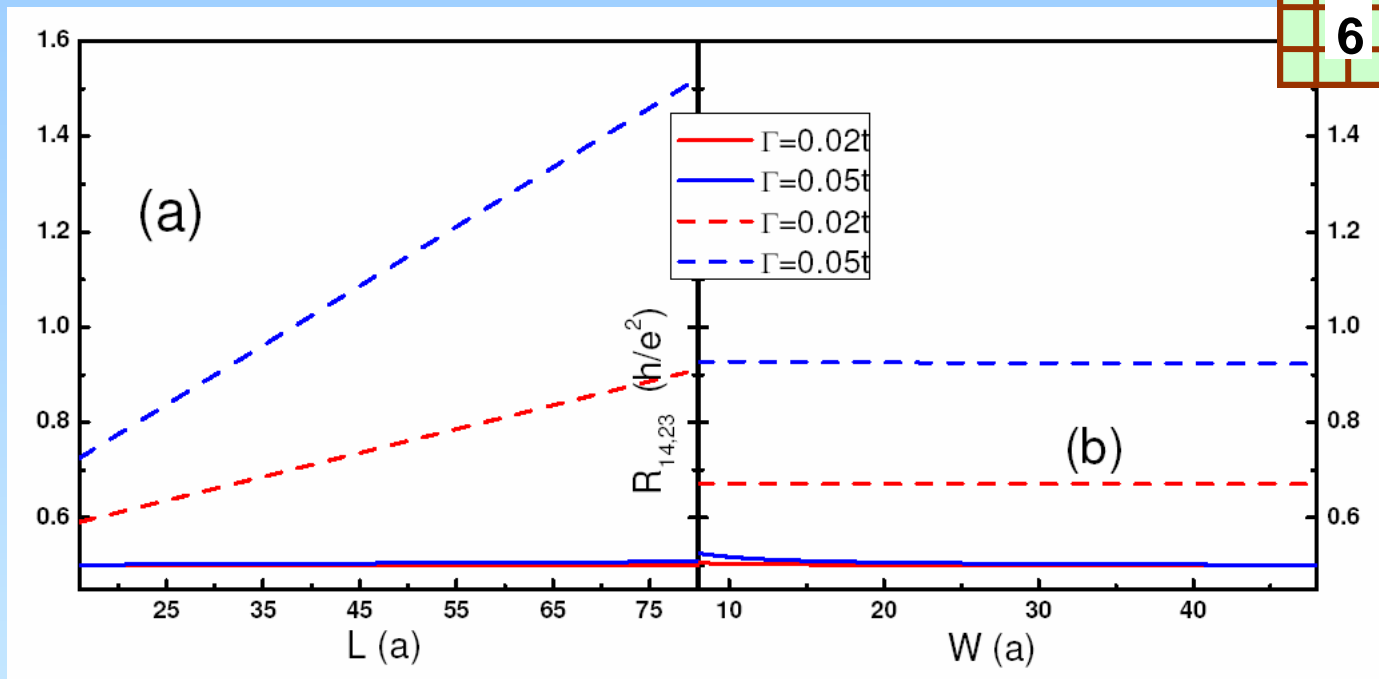
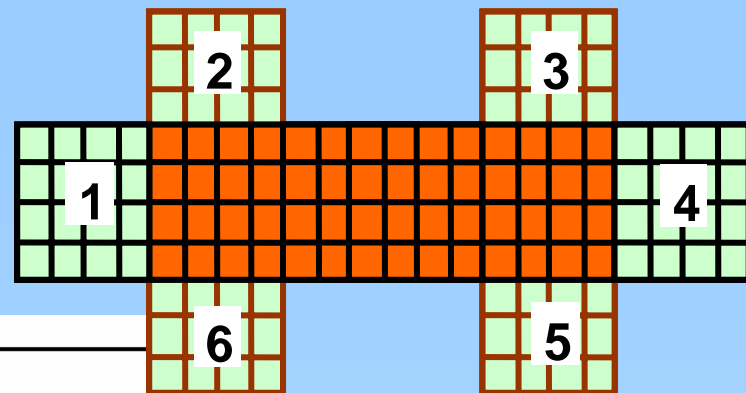
位相退相干对量子自旋Hall效应影响很小；
但自旋退相干对量子自旋Hall效应有极大的影响！！



*这解说了为什么实验上仅仅只在介观体系看到量子平台。

*说明QSHE还没有QHE那么好。

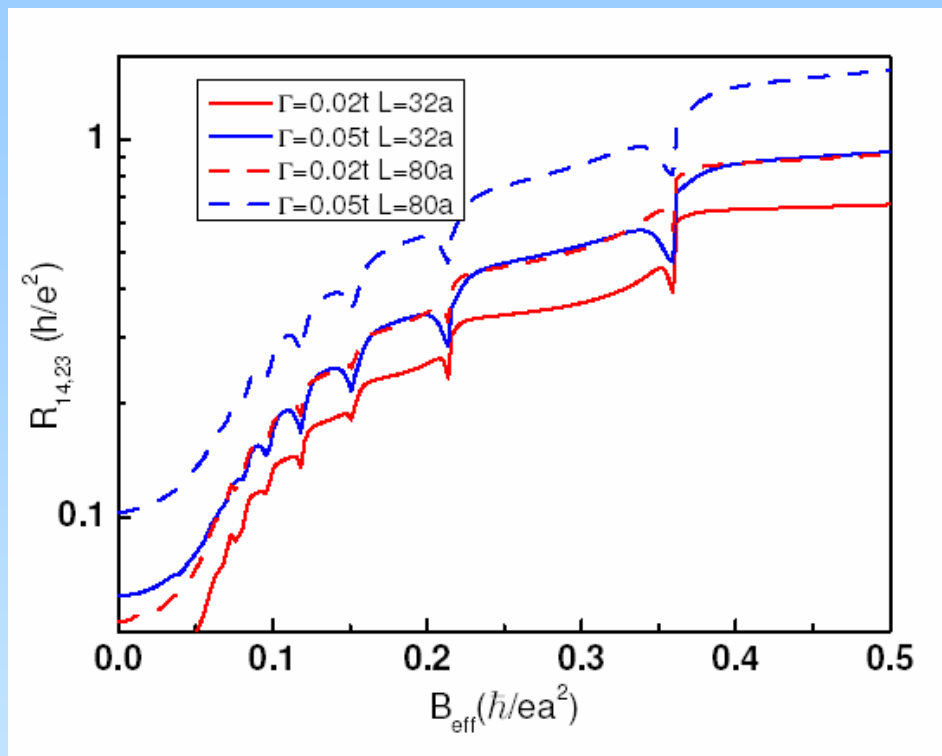
有退相干时，系统尺寸对量子自旋Hall效应的影响。



只存在位相退相干时，系统尺寸对量子自旋Hall效应几乎没有影响。

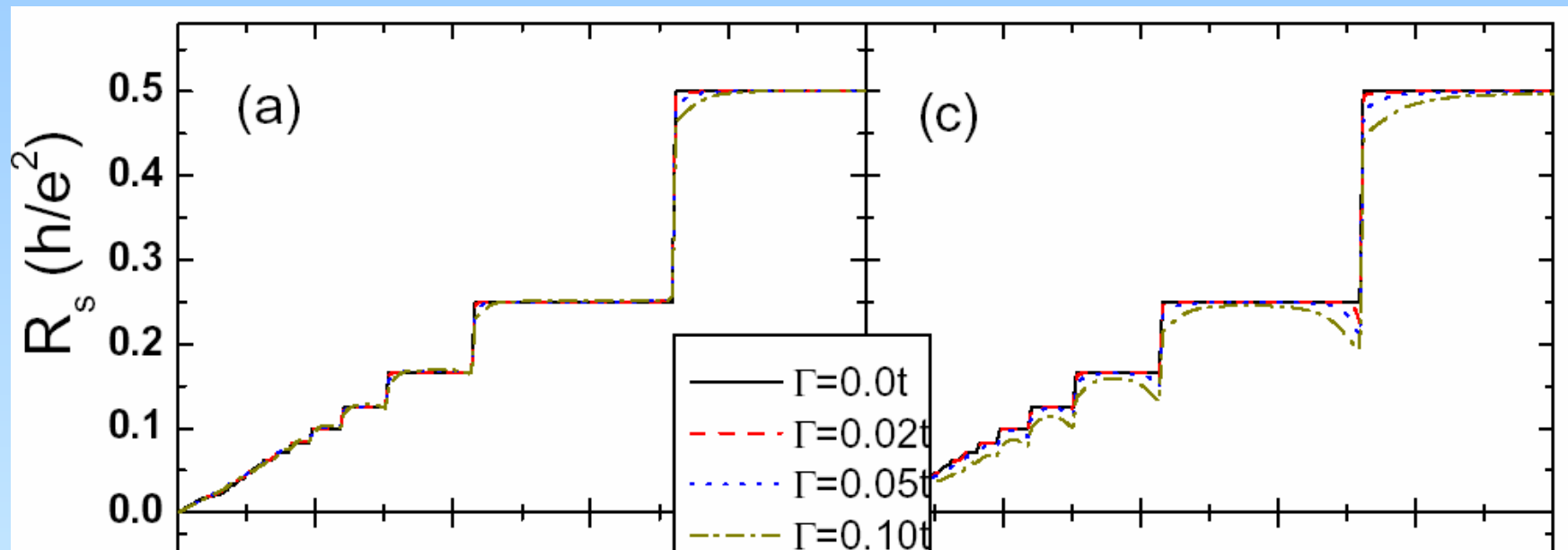
但存在自旋退相干时，系统变长量子自旋Hall电阻变大；系统变宽，QSH电阻不变。

有退相干时，量子自旋Hall导的平台是否还存在？

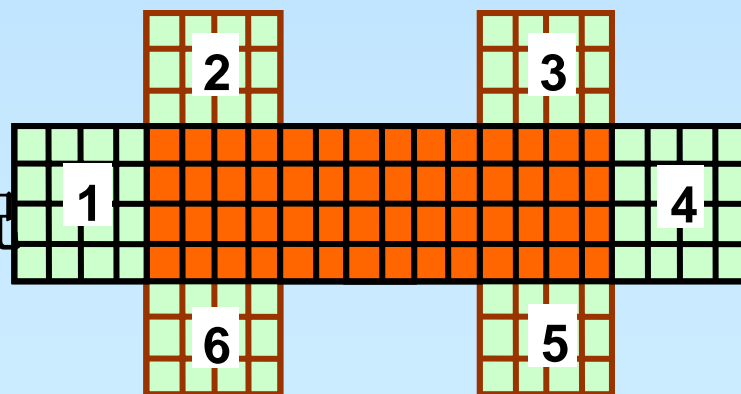


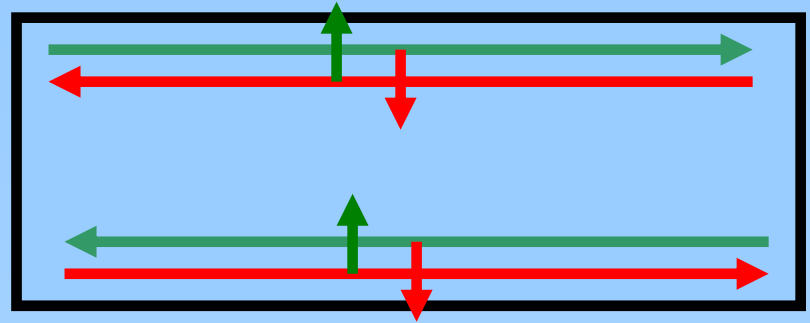
(四)、宏观可观测量

在量子自旋Hall体系是否有宏观可观测量？

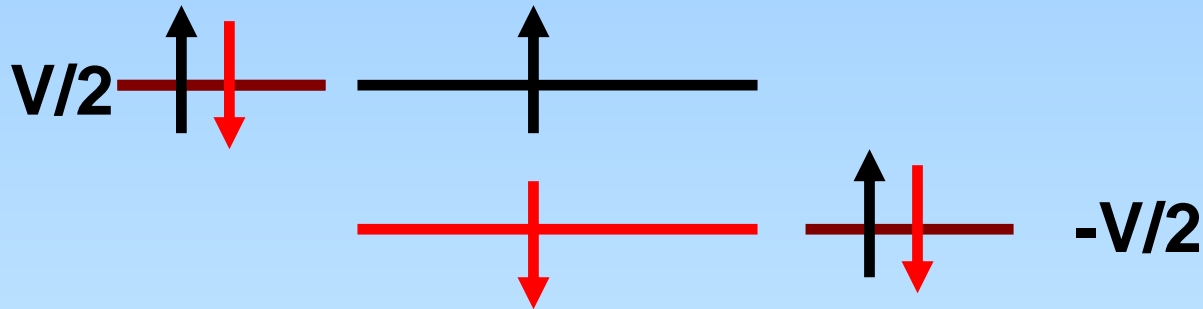


上图显示 $R_s = (V_{2\uparrow} - V_{2\downarrow})/I_{14}$ vs 有效磁场，它在大的自旋退相干情况还存在量子平台，并平台值不变

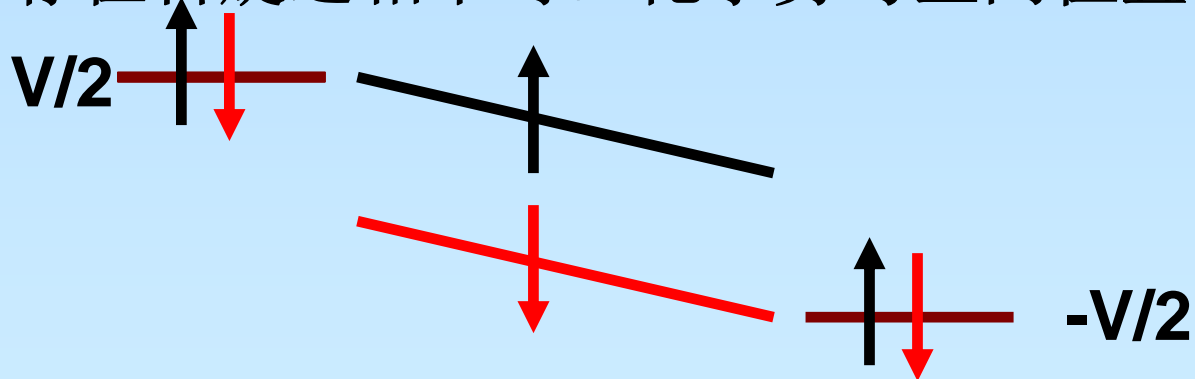




没有自旋退相干时：化学势与空间位置的关系

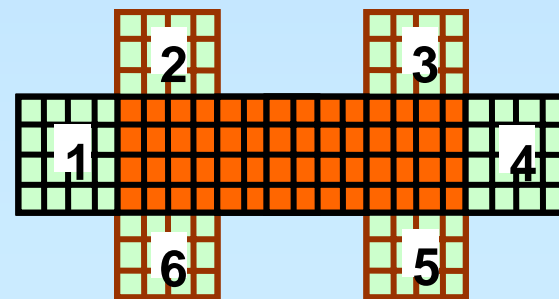
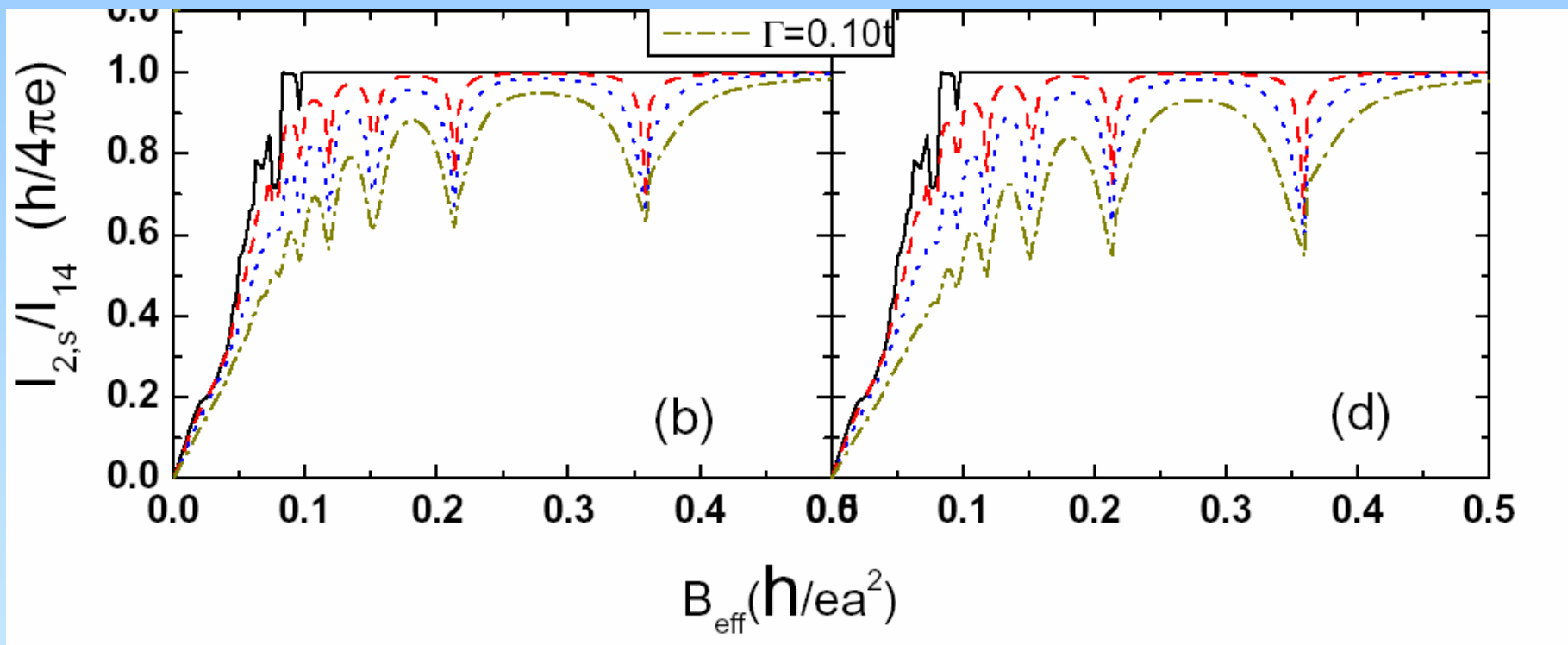


存在自旋退相干时：化学势与空间位置的关系



所以 $R_s = (V_{2\uparrow} - V_{2\downarrow})/I_{14}$ 不变。

横向端口的纯自旋流与有效磁场的关系，它也在大的自旋退相干下存在。



五、总结

我们从理论上设计自旋池装置，讨论自旋流的探测，研究自旋Hall效应和量子自旋Hall效应的一些特点，提出一个稳恒的自旋流能产生电场，预言仅有自旋轨道耦合的体系存在持续自旋流，等等。

自旋电子学是一门新兴的学科，有很多的问题有待于我们进一步的研究。最后，我们也期望自旋流能象电(荷)流那样，具有广泛的应用前景，能制造出丰富多彩的自旋电子器件。使大家的生活更美好。

合作者：

谢心澄教授，中科院物理所和Oklahoma State Univ.

郭鸿教授，加拿大McGill大学

王健教授，沈顺清教授，香港大学

博士生：邢燕霞、江华、成淑光。

感谢大家的出席！！！！

感谢国家自然科学基金委和科技部对本课题研究的支持！