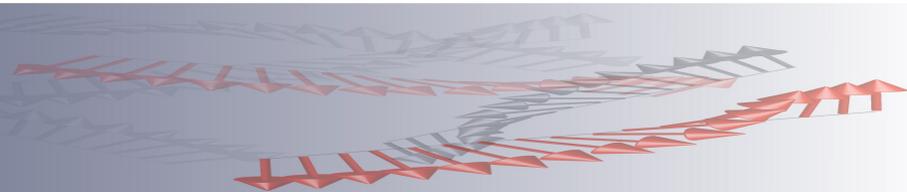


「スピン流で観る物理現象」

大阪大学 大学院理学研究科 物理学専攻

新見 康洋



スピントロニクスとは？

スピン + エレクトロニクス → メモリ産業と深くつながっている！

スピン

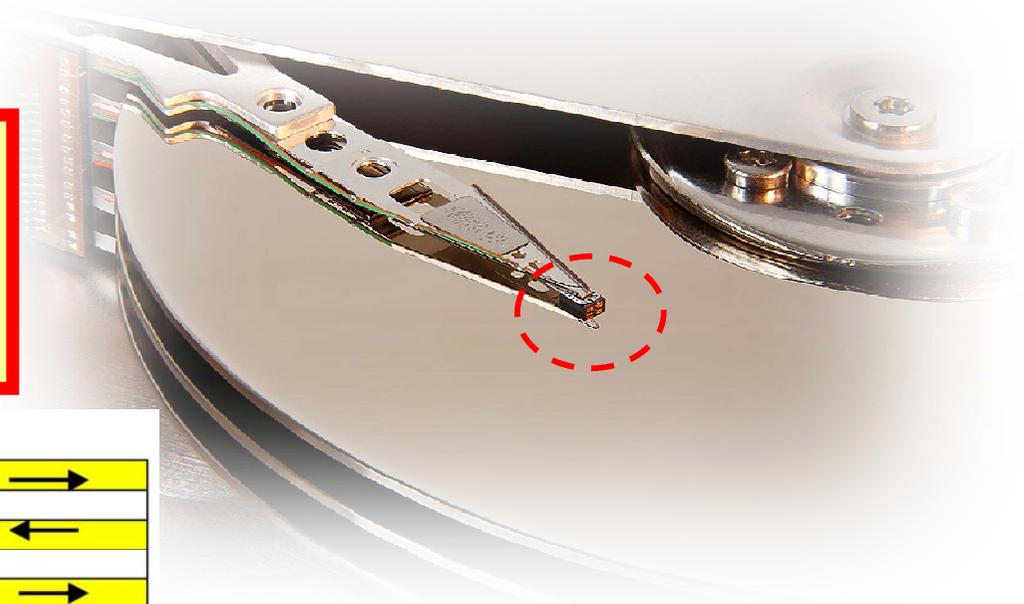
N

電荷 $-e$

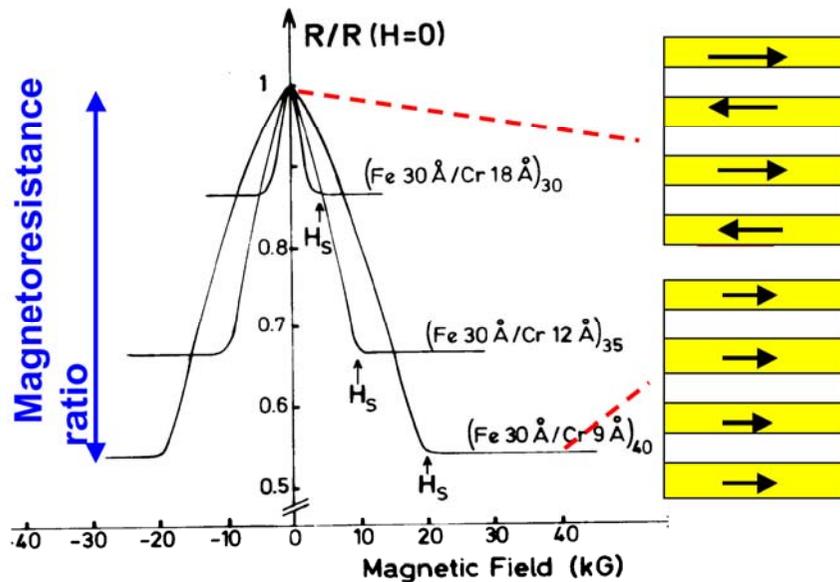


スピンの流れ
(スピン流)

ハードディスクドライブの読み取りヘッド



巨大磁気抵抗効果
(GMR)



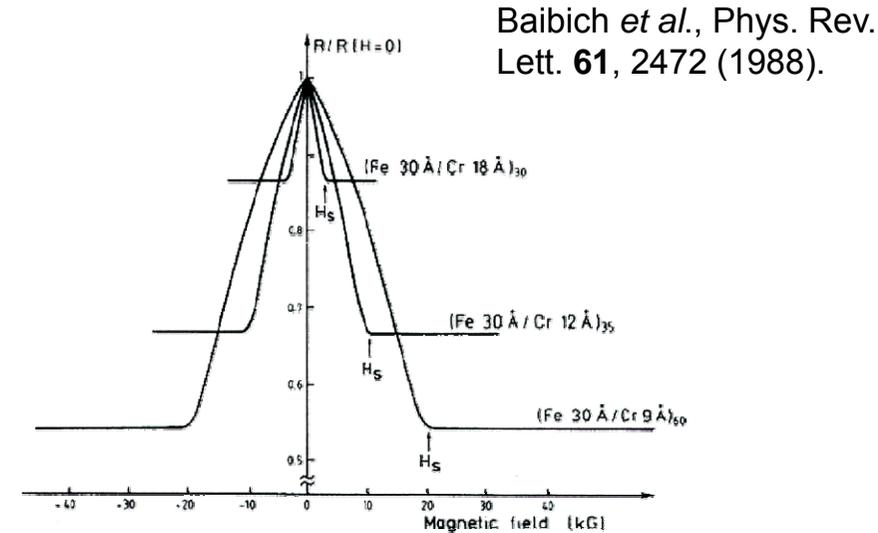
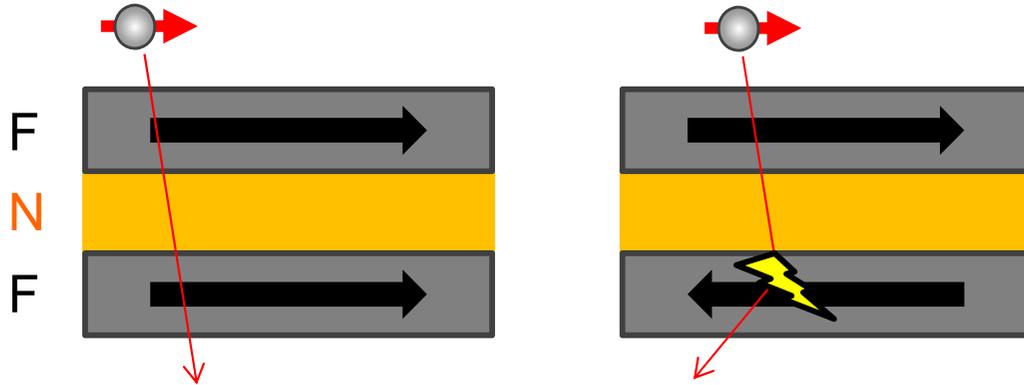
from
http://en.wikipedia.org/wiki/Disk_read-and-write_head

M. N. Baibich, **A. Fert**, *et al.*, PRL 1988;
G. Binasch, **P. Grünberg**, *et al.*, PRB 1989.

スピン流

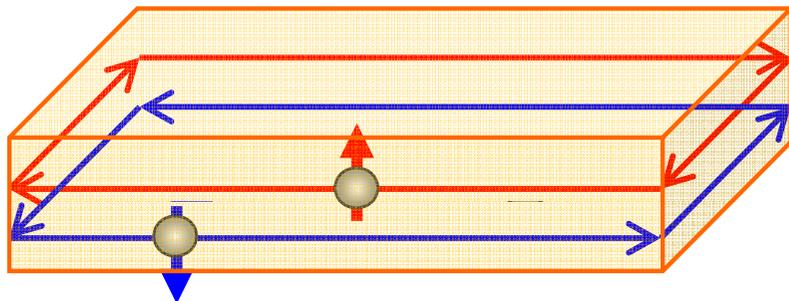
スピン流: スピン角運動量の流れ

1. スピン偏極電流



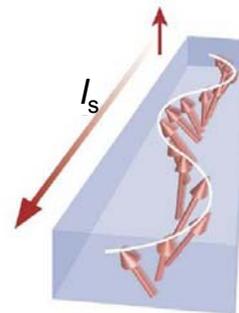
巨大磁気抵抗効果

2. 純スピン流



スピン軌道相互作用の強い非磁性体、トポロジカル絶縁体

3. スピン波スピン流



磁性絶縁体

Y. Kajiwara *et al.*,
Nature **464**, 262 (2010).

スピン流

純スピン流とスピン波スピン流は正味の電荷の流れを伴っていない!!!

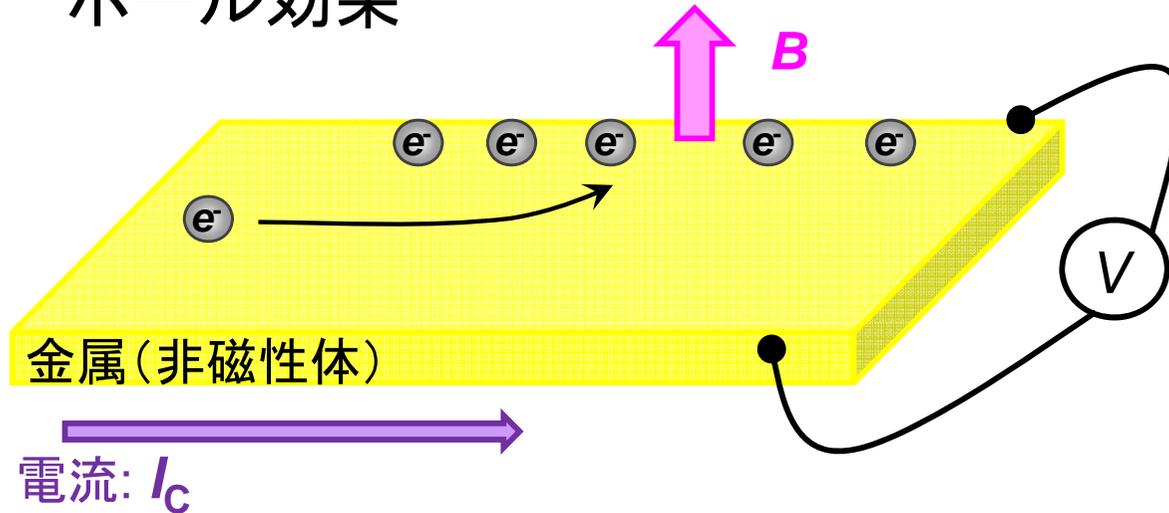
1. 低消費電力素子への応用
(応用という観点で重要)

2. スピン構造に敏感なプローブとして利用
(基礎研究、特に複雑なスピン構造をもつ物性の解明に役立つ)

スピン流は、保存量ではない!!
観測するためには、保存量に変換する必要がある。

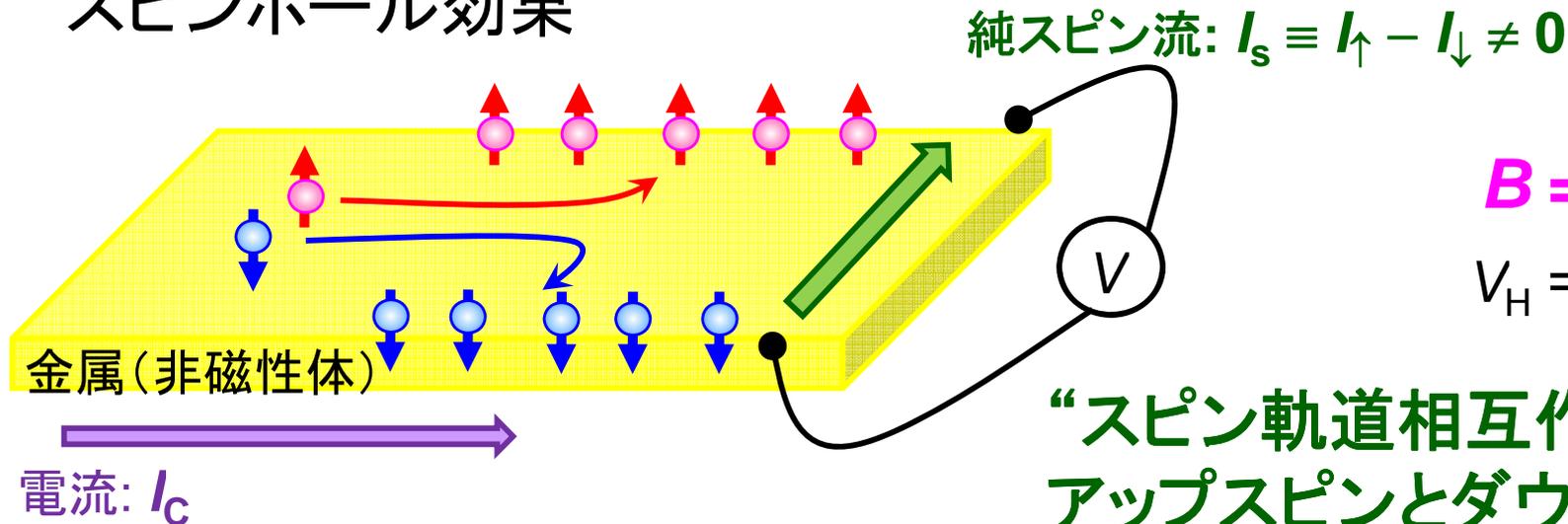
スピンホール効果

ホール効果



ローレンツ力:
 $F = ev_F \times B$

スピンホール効果



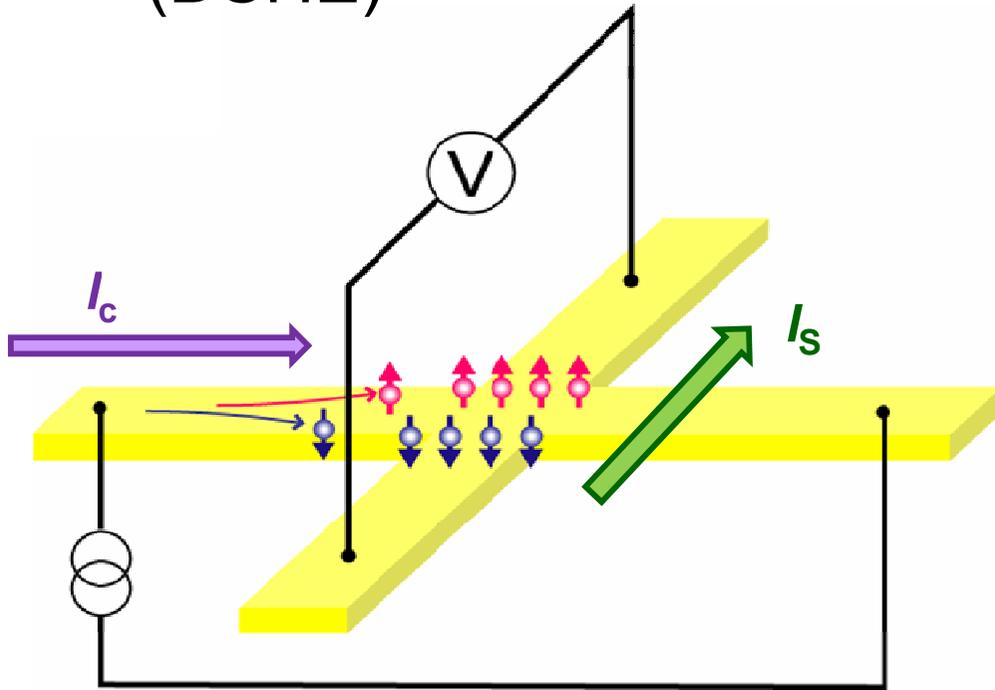
$B = 0$

$V_H = 0!!$

“スピン軌道相互作用”によって
アップスピンとダウンスピンの
散乱方向が異なる。

スピンホール効果の電気的検出

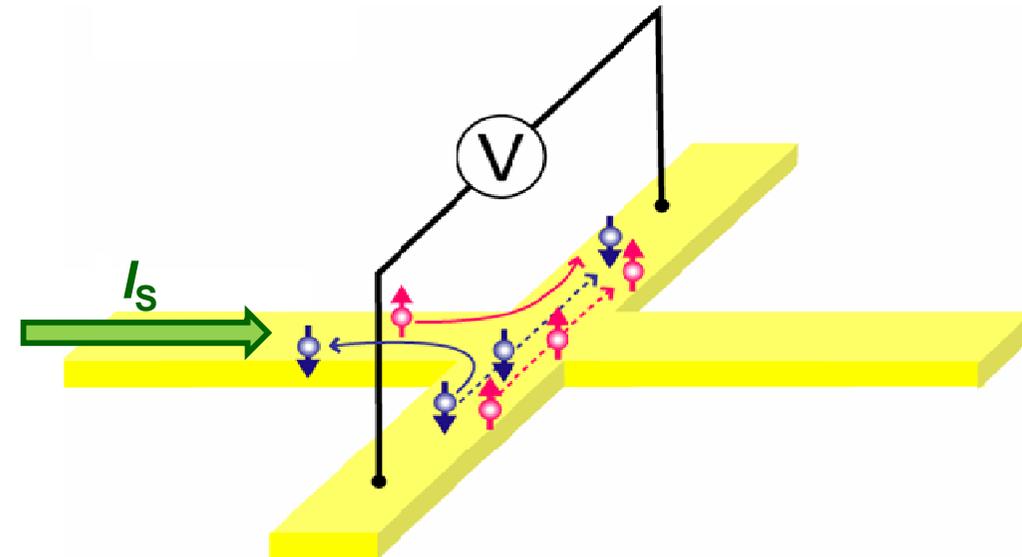
正スピンホール効果
(DSHE)



$$\mathbf{I}_S \propto \mathbf{I}_C \times \mathbf{S}$$

非磁性体中では $V_H = 0$

逆スピンホール効果
(ISHE)

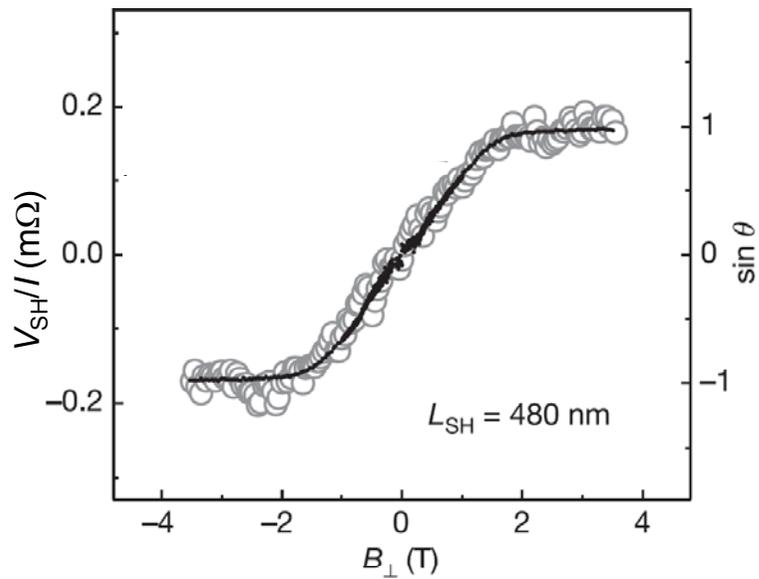
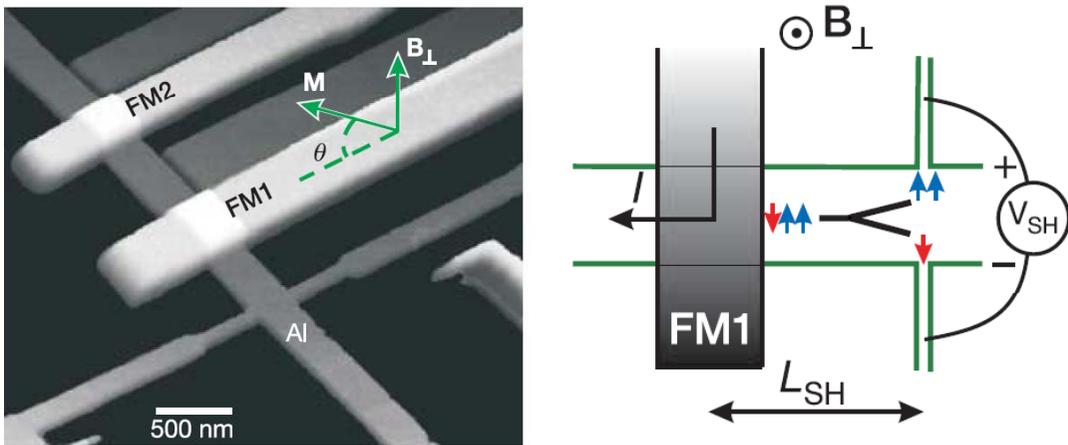


電圧として観測できる

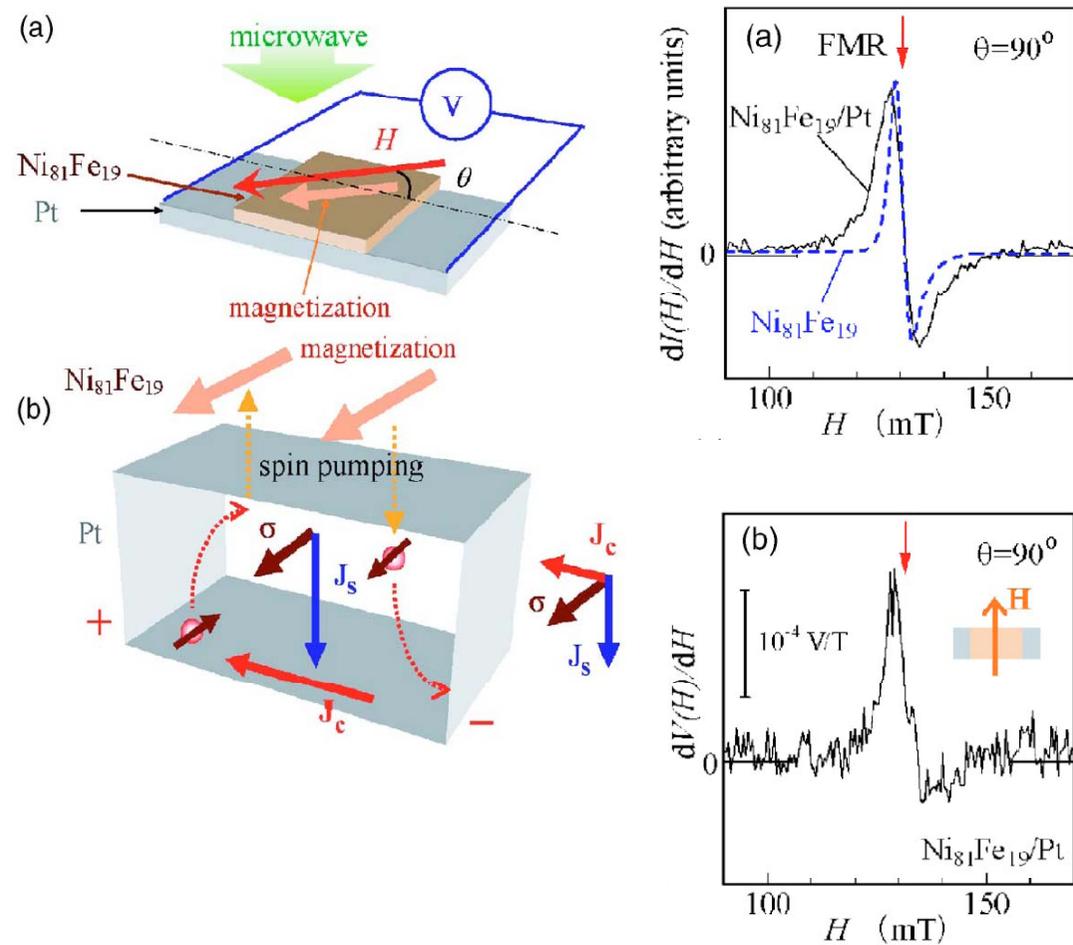
変換効率: スピンホール角 $\alpha_H \equiv \frac{J_S}{J_C} = \frac{\rho_{SHE}}{\rho_{xx}}$

金属中でのスピンホール効果の観測

逆スピンホール効果の電氣的検出



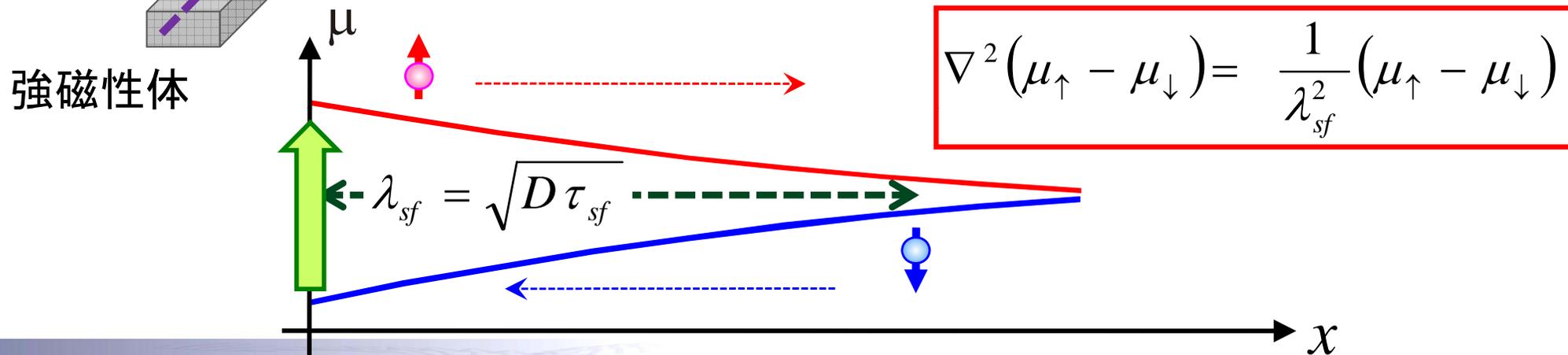
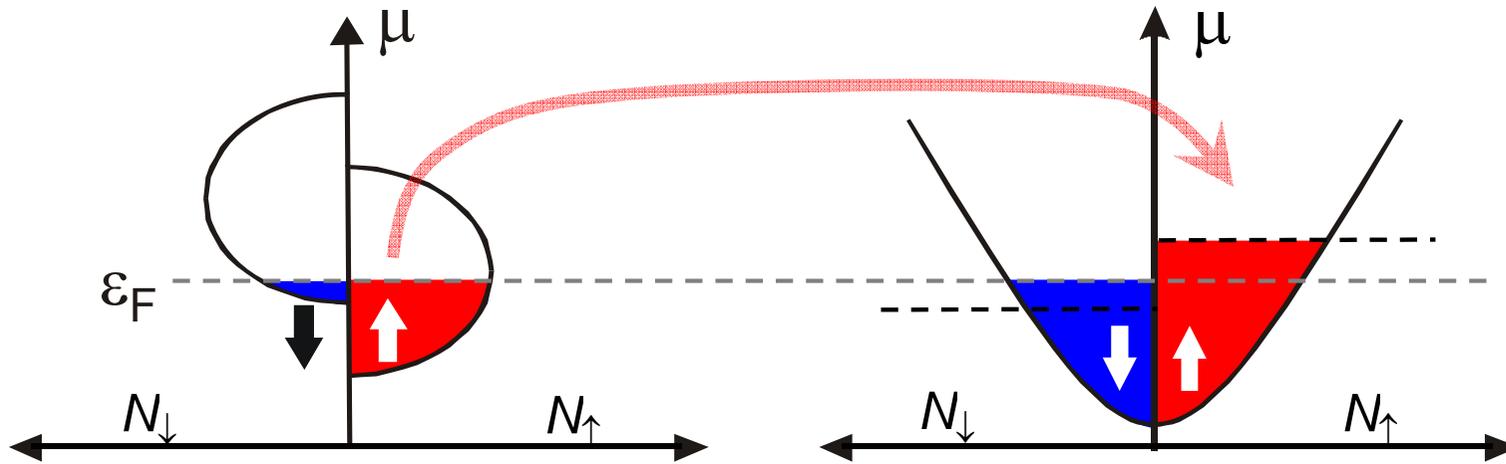
スピンポンピング法を用いた手法



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

E. Saitoh et al., Appl. Phys. Lett. **88**, 182509 (2006).

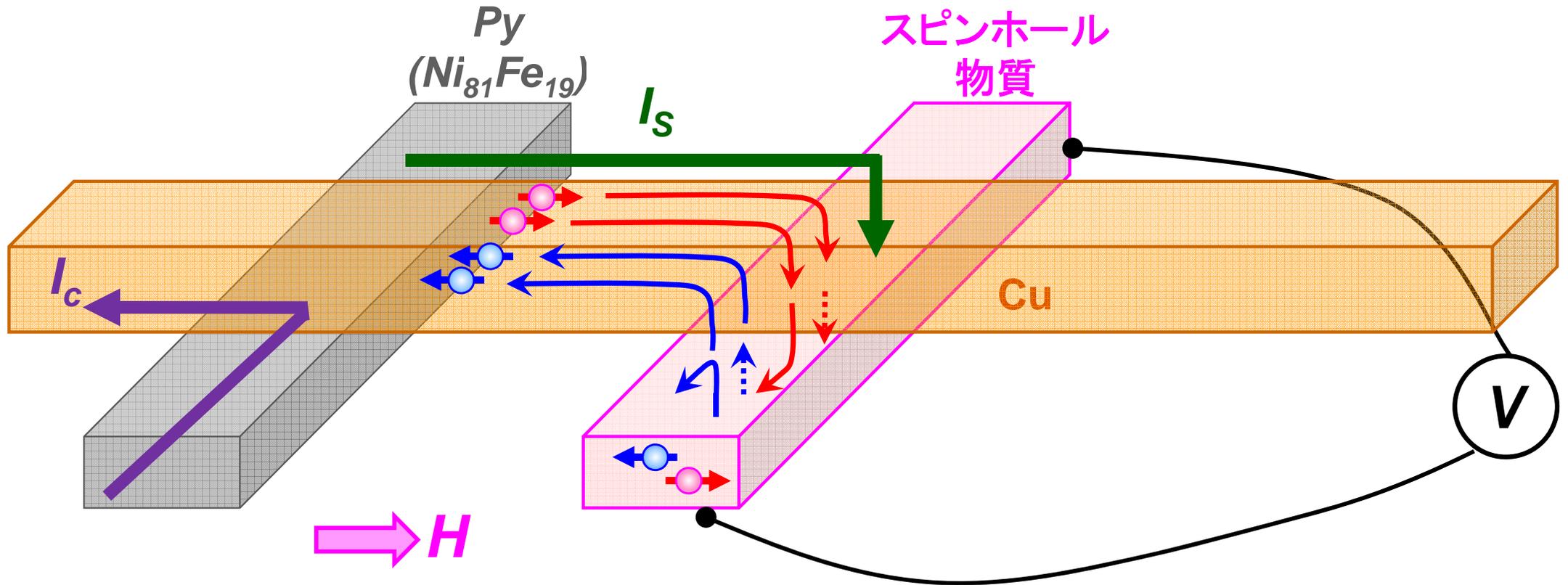
非局所スピン流注入



スピン吸収法を用いた逆スピンホール効果の測定

逆スピンホール効果

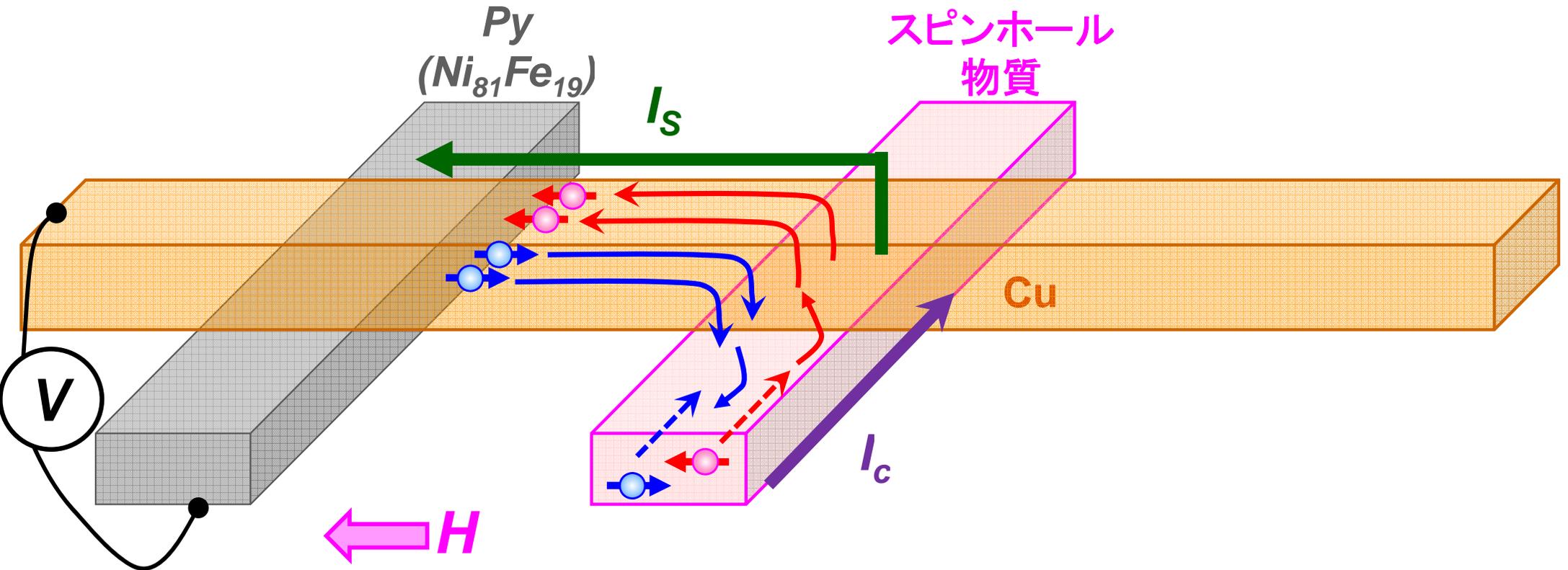
Y. Niimi *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 054401 (2014).



スピン吸収法を用いた正スピホール効果の測定

正スピホール効果

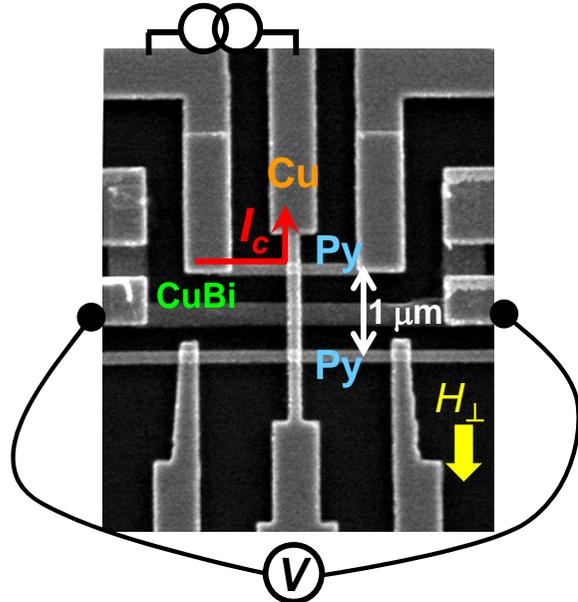
Y. Niimi *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 054401 (2014).



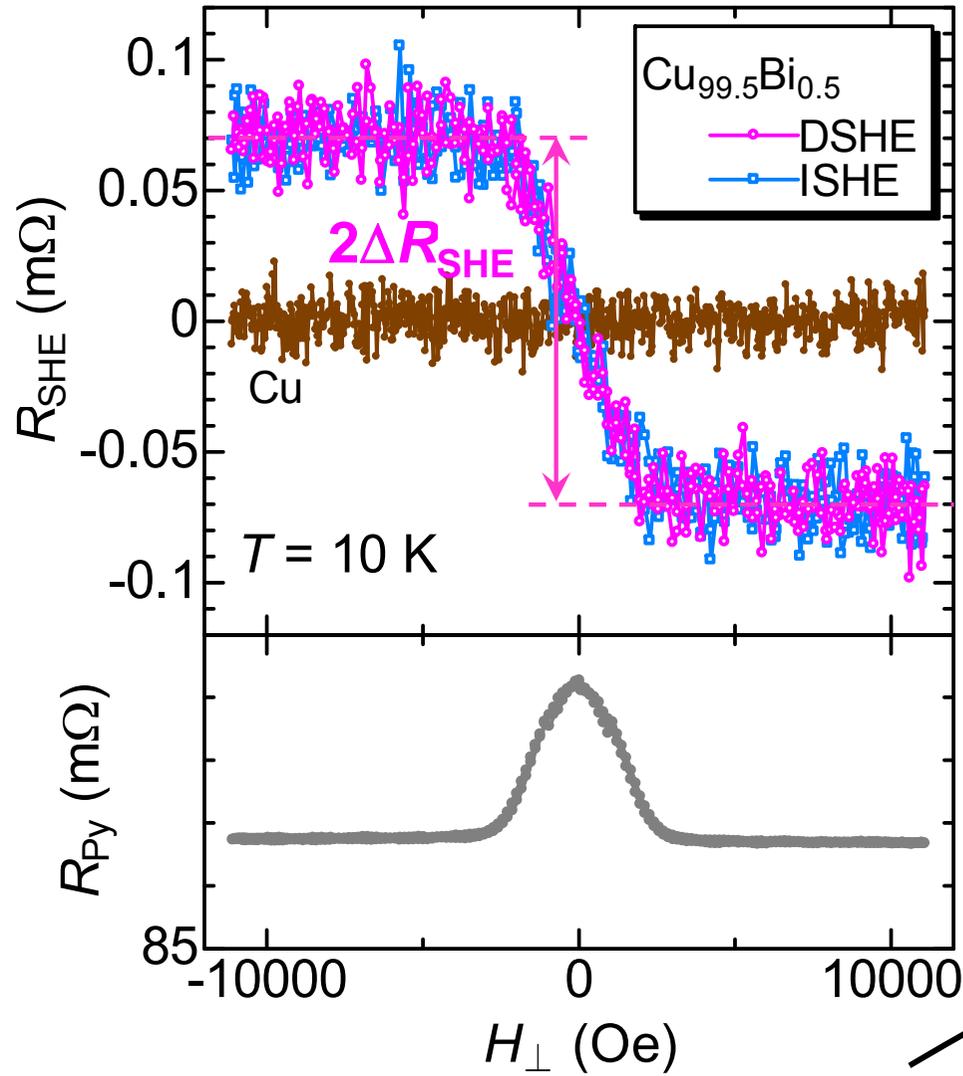
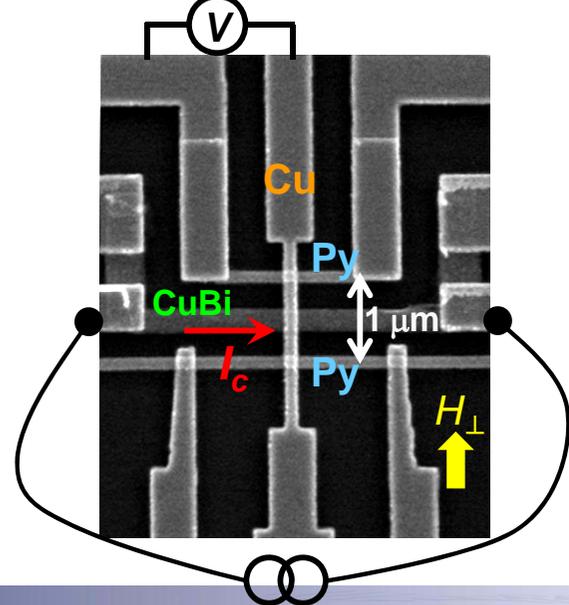
電流端子と電圧端子を入れ替えるだけで、正スピホール効果の測定も可能。

外因性スピントール効果 (Cu+Bi)

逆スピントール効果



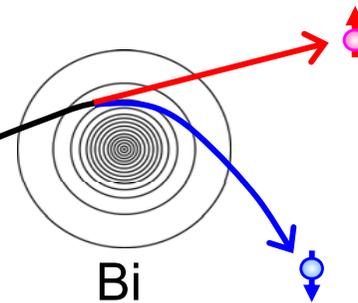
正スピントール効果



Y. Niimi *et al.*, PRL 2011.
 Y. Niimi *et al.*, PRL 2012.
 Y. Niimi *et al.*, PRL 2013.

$$\alpha_H^{CuBi} = -24(\pm 9)\%$$

$$\Delta R_{ISHE} = \Delta R_{DSHE} \quad \longrightarrow \quad \text{Onsagerの相反定理}$$



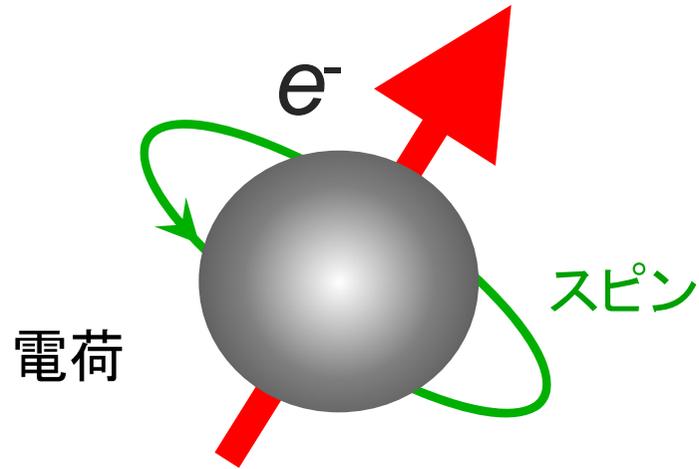
3つの研究例

🍬 超伝導スピnhホール効果

🍬 スピnhホール効果で観るフラストレート磁性

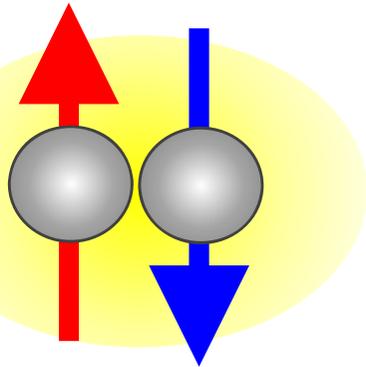
🍬 強磁性体転移温度近傍でのスピnh揺らぎ

超伝導スピントロニクス

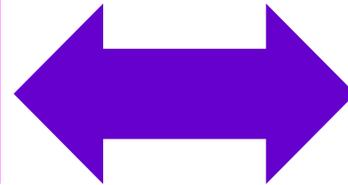


スピン1重項状態

クーパー対



s波超伝導体



共存できる？

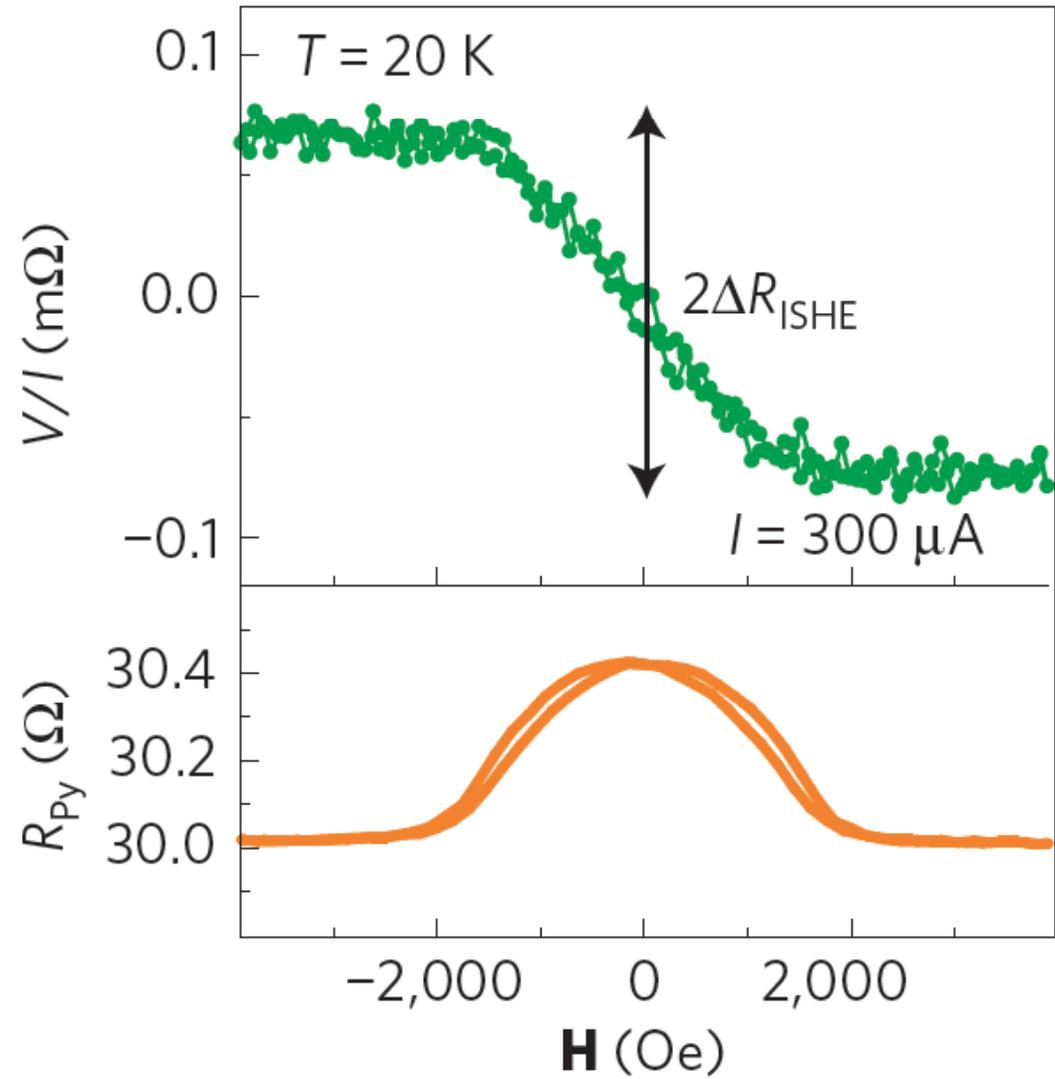
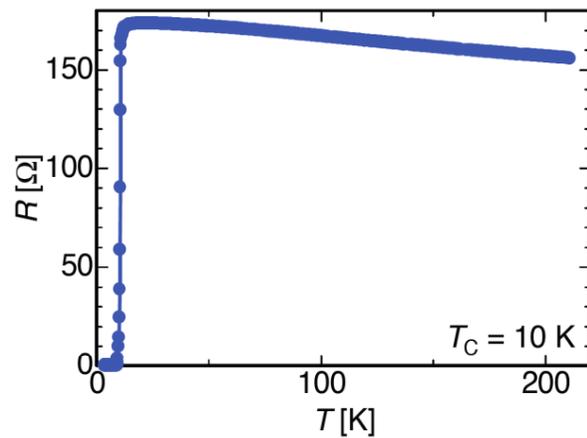
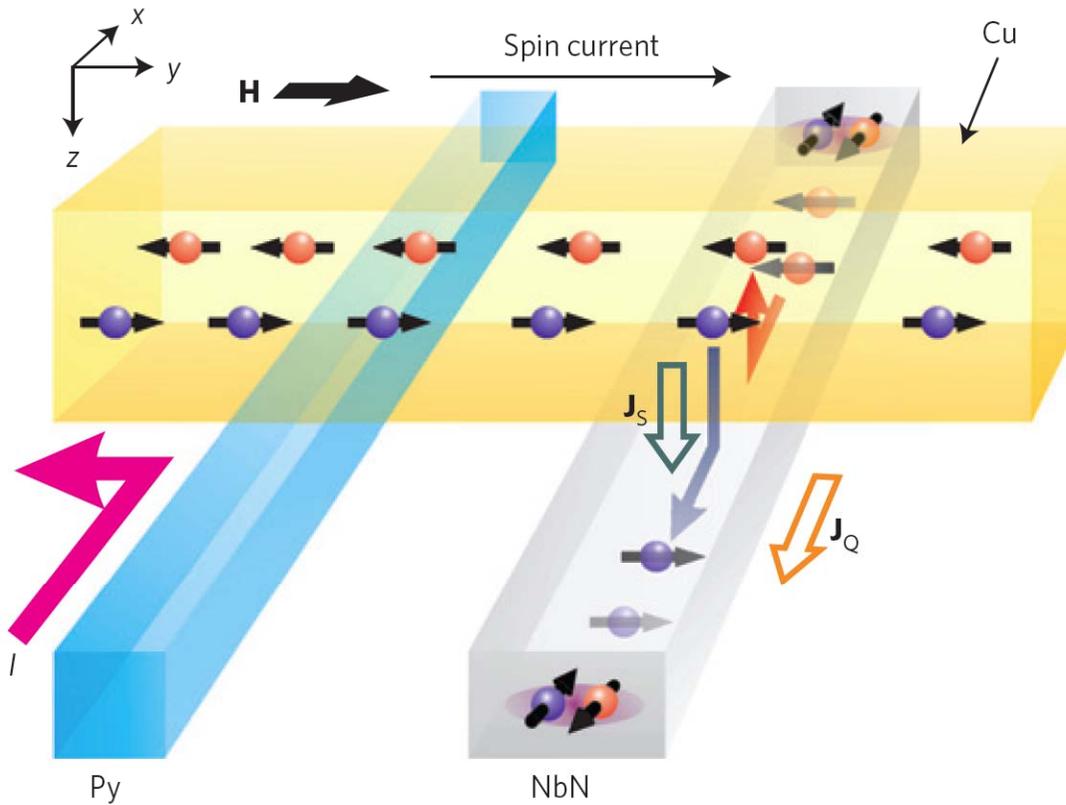
スピン流



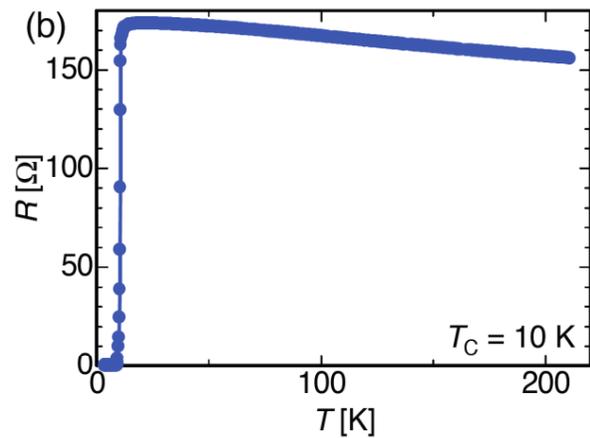
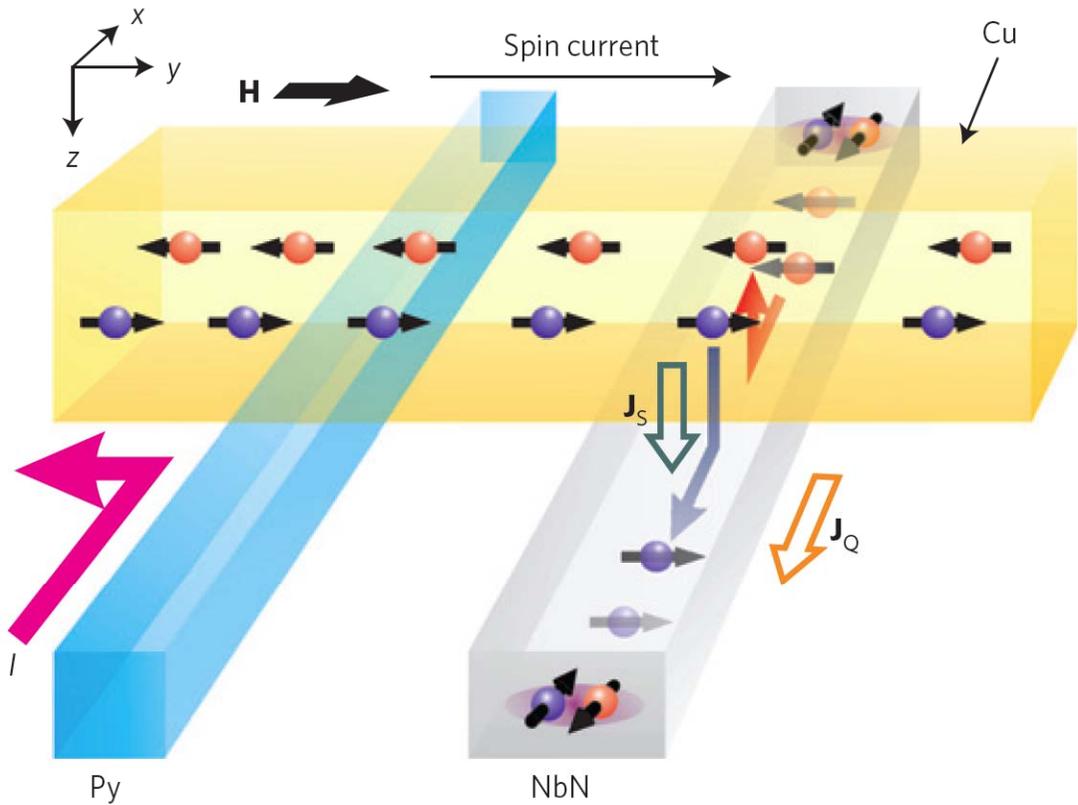
強磁性体やスピントロニクスデバイス

超伝導スピンホール効果

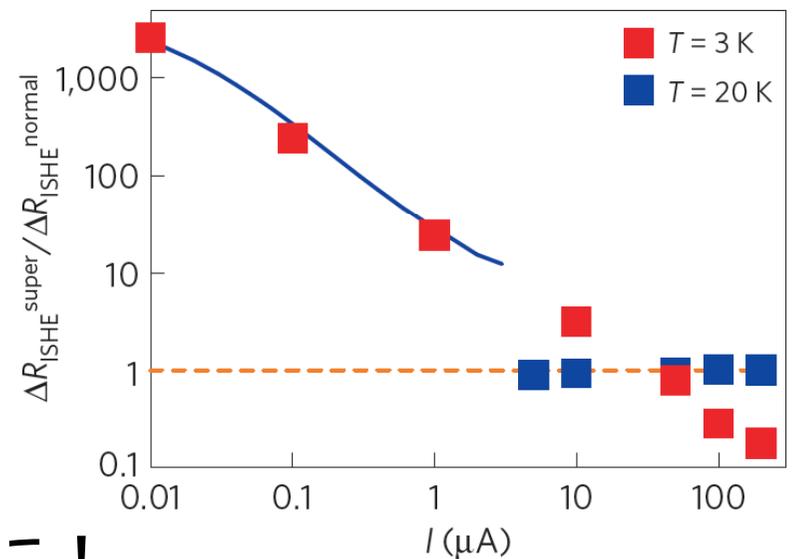
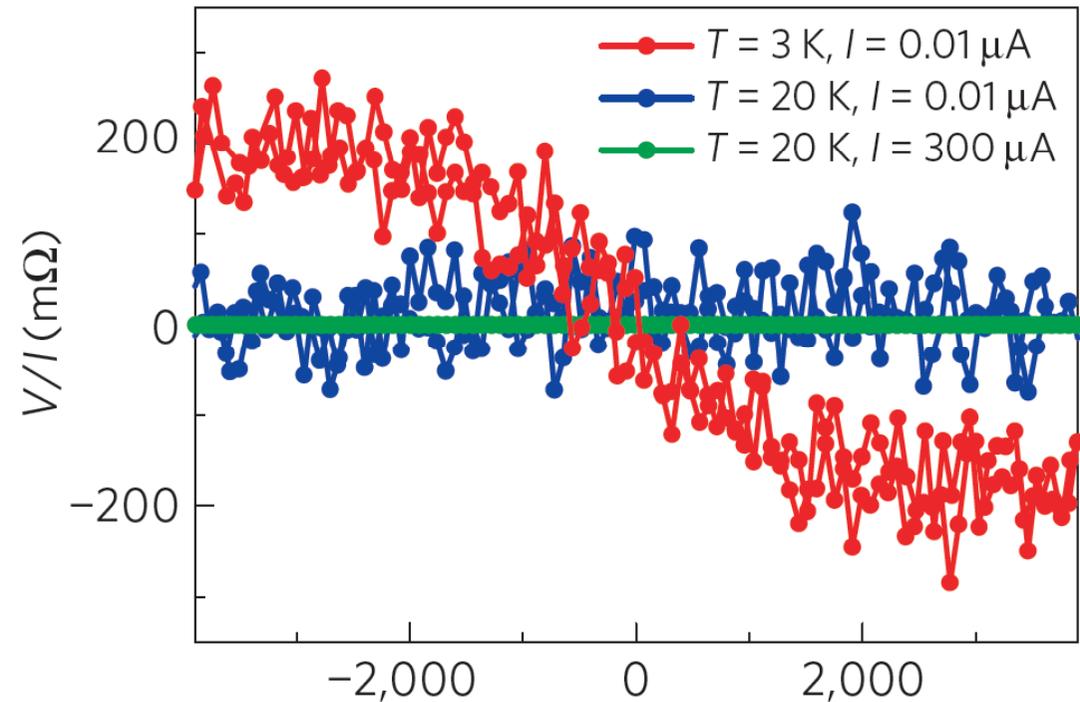
T. Wakamura, Y. N. *et al.*, Nat. Mater. 2015.



超伝導スピンホール効果



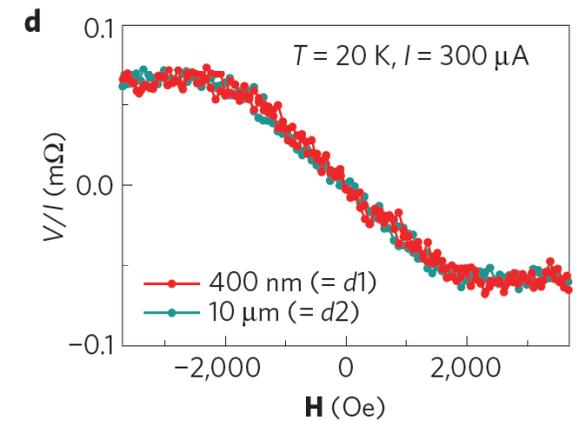
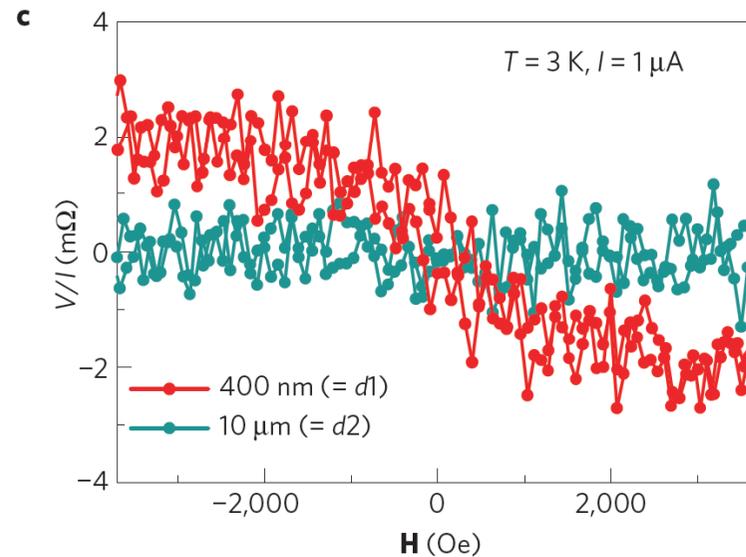
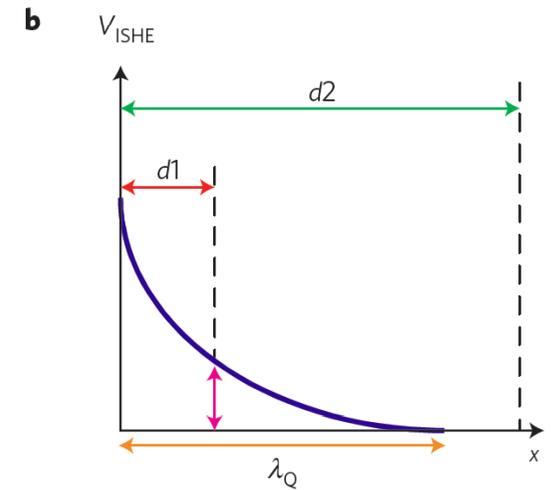
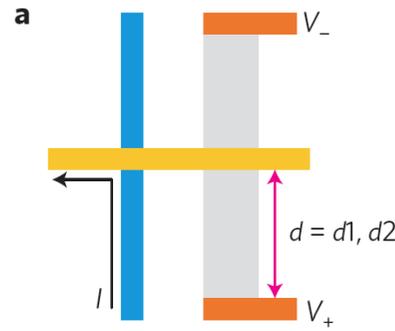
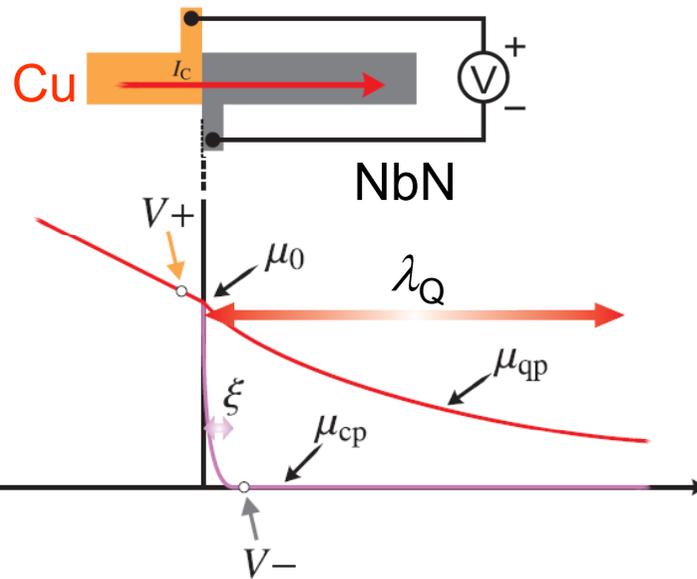
T. Wakamura, Y. N. *et al.*, Nat. Mater. 2015.



Pyに流す電流を小さくするだけで、2000倍に！

超伝導スピンホール効果のメカニズム ~1~

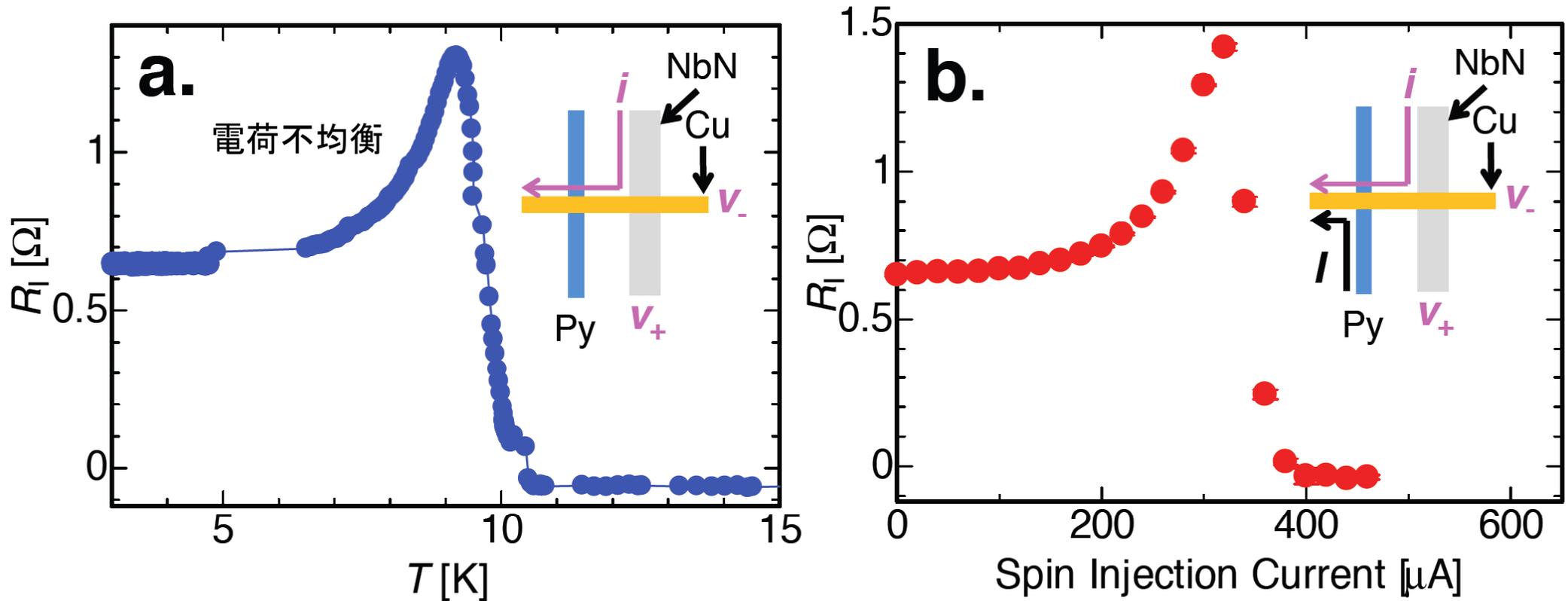
準粒子流



- 準粒子は λ_Q ($\sim 1 \mu\text{m}$)まで生き残れる。
- λ_Q よりも十分距離を離すと、信号が消滅!
- 準粒子の抵抗は、 ρ_{xx} から $\rho_{qp} = \rho_{xx} / f_0(\Delta) = \rho_{xx} (\exp(\Delta/k_B T) + 1)$ に増大する。

超伝導スピンホール効果のメカニズム ~2~

非局所電流と電子温度



➤ 非局所電流 I と電子温度 T は等価。

ジュール熱のエネルギー $\propto I^2$ \rightarrow 電子比熱 $\times T$
 $\propto T^2$

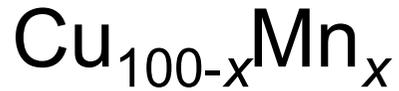
3つの研究例

🍬 超伝導スピnhホール効果

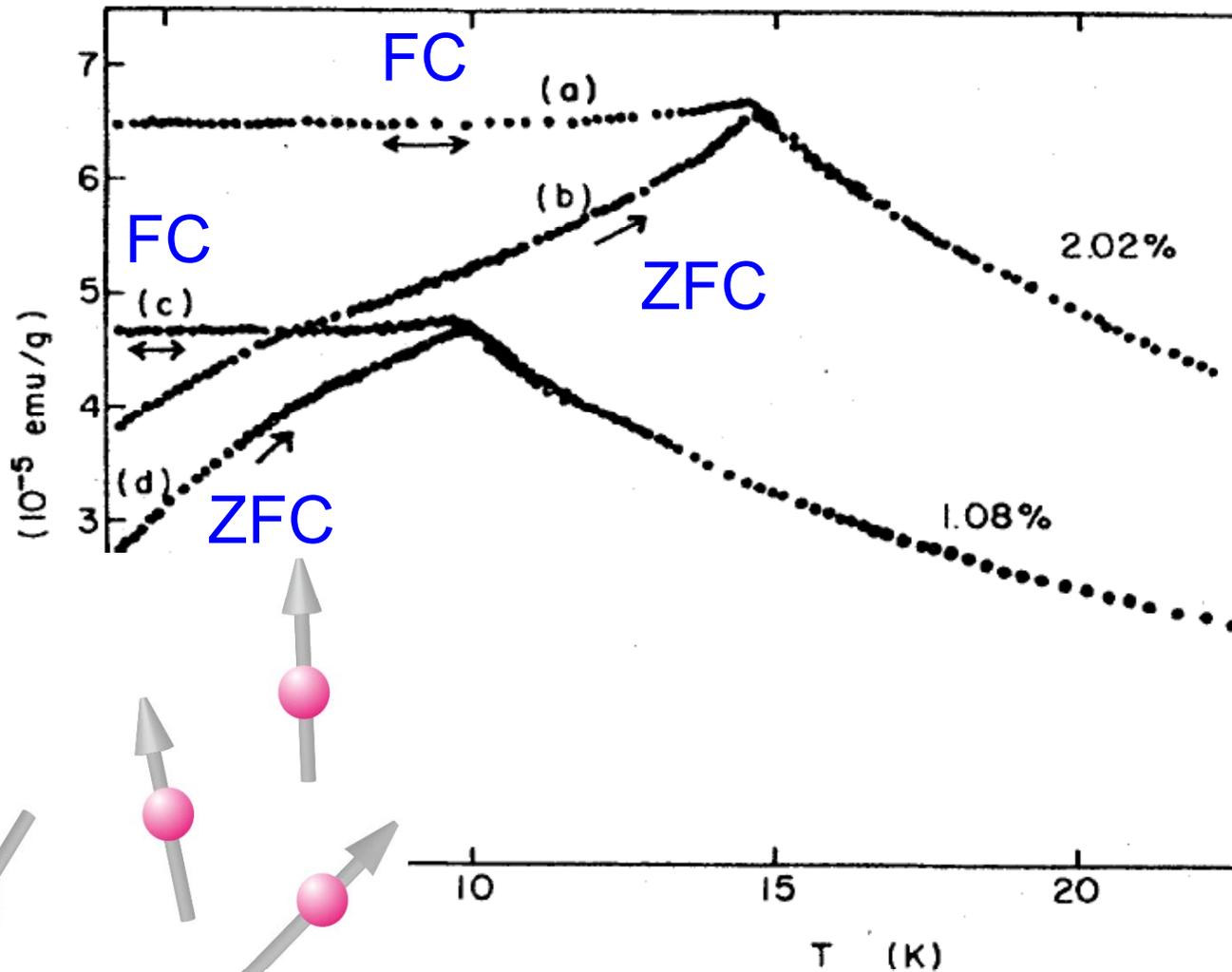
🍬 スピnhホール効果で観るフラストレート磁性

🍬 強磁性体転移温度近傍でのスピnh揺らぎ

フラストレート系 (スピングラス)

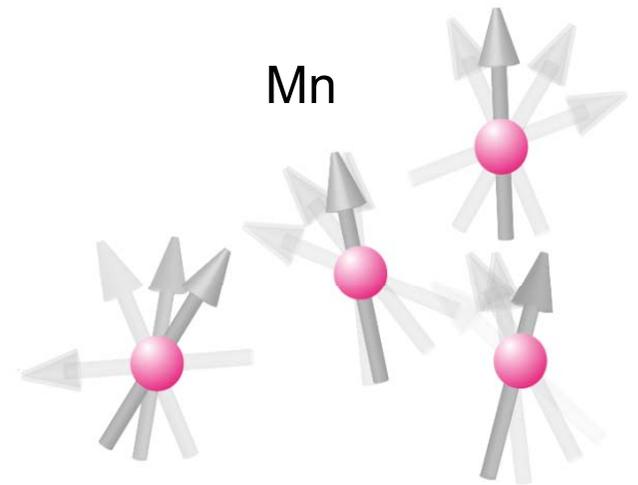


S. Nagata *et al.*, Phys. Rev. B **19**, 1633 (1979).



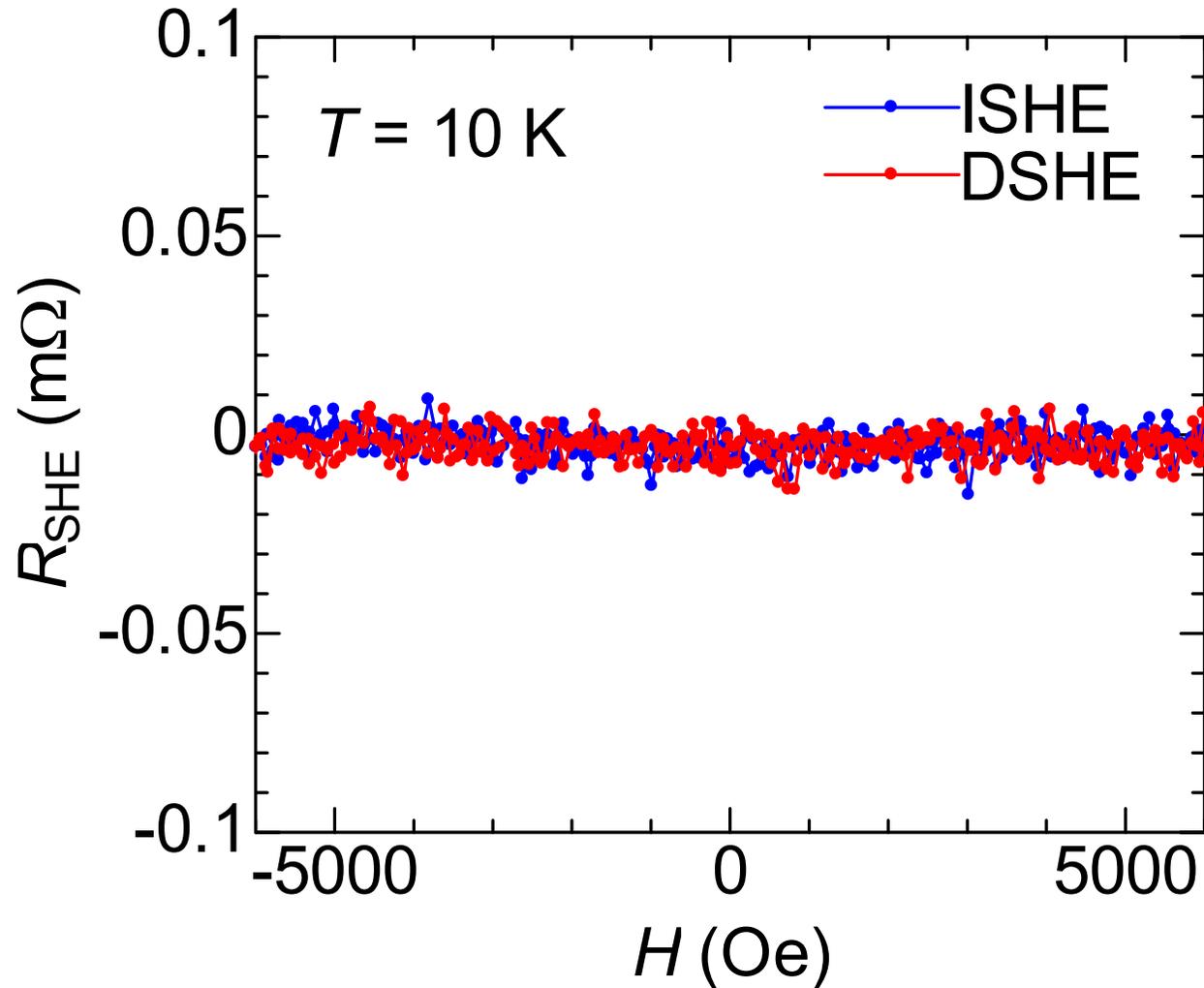
Mnの分布がランダム
→ RKKY相互作用がランダム

強磁性体と反強磁性体と
が競合する系



フラストレートした系に純スピンの流を注入するとどうなるか？

$Cu_{97}Mn_3$ のスピントール効果

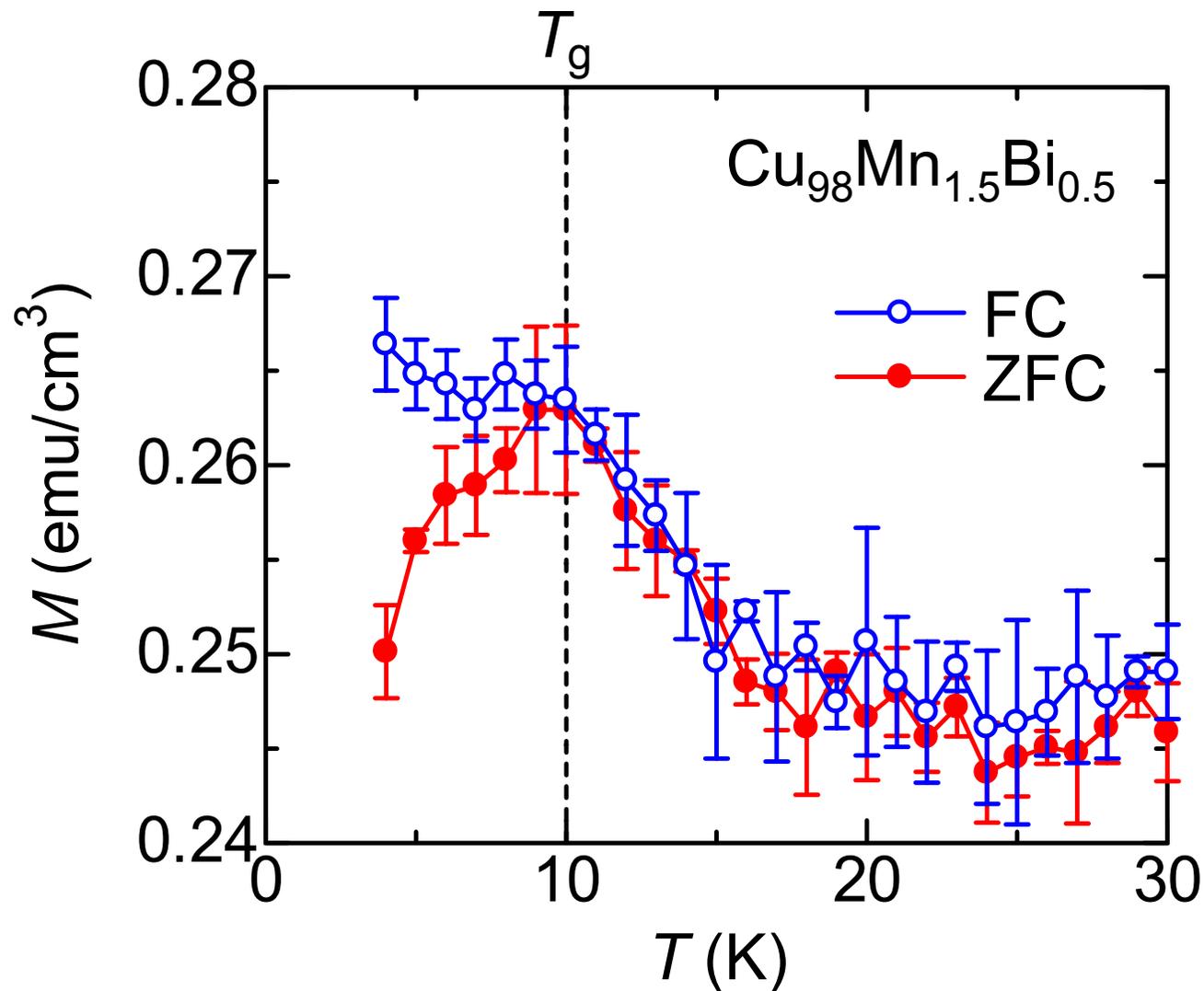


↑ スピントール効果は観測されない!

➡ スピントール効果を観測するためには、スピンを散乱させる機構が必要。

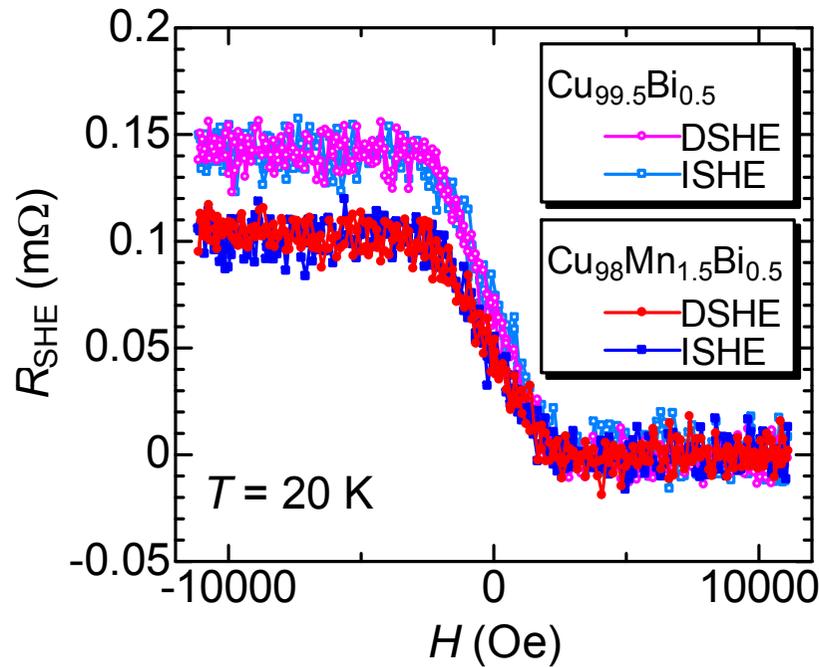
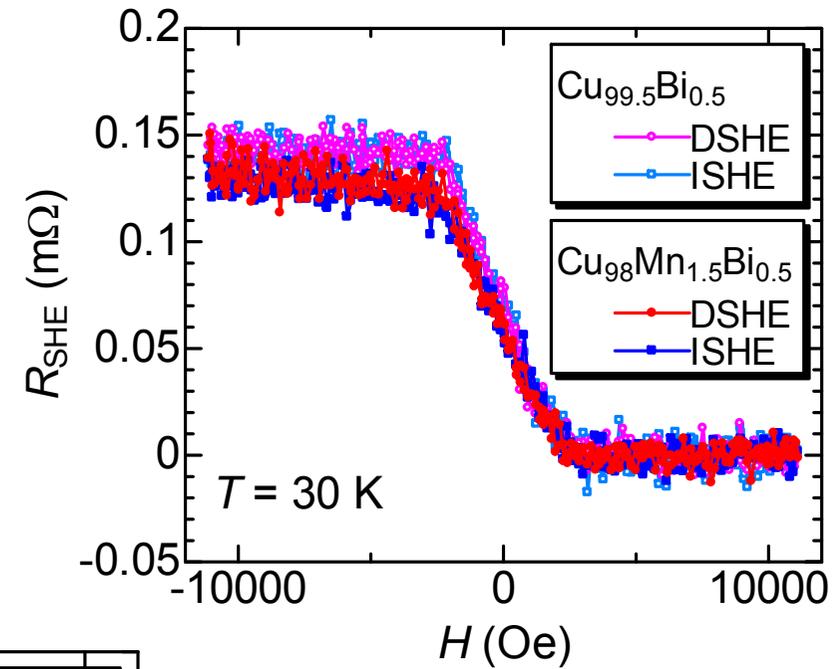
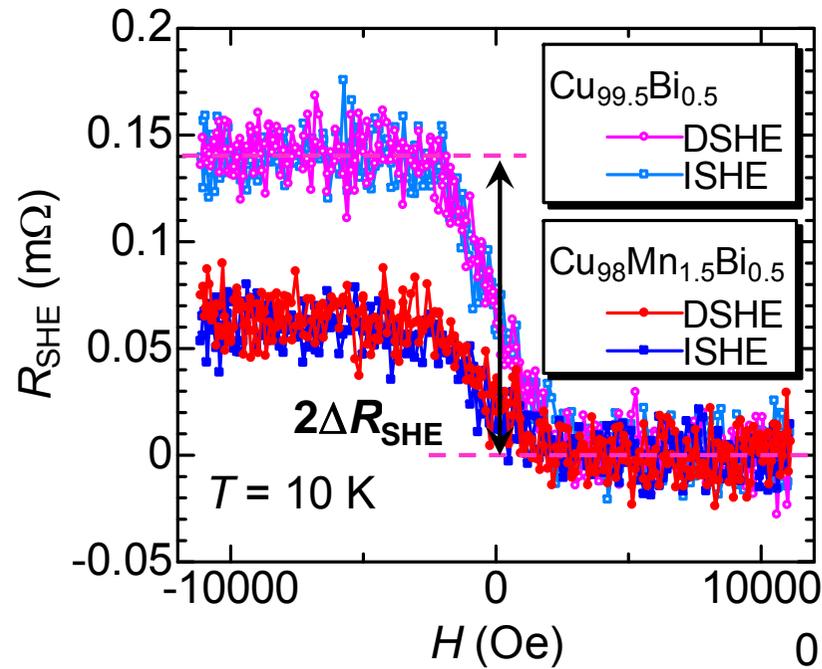
だからBiをスピン散乱体として加える!

CuMnBiの磁化測定



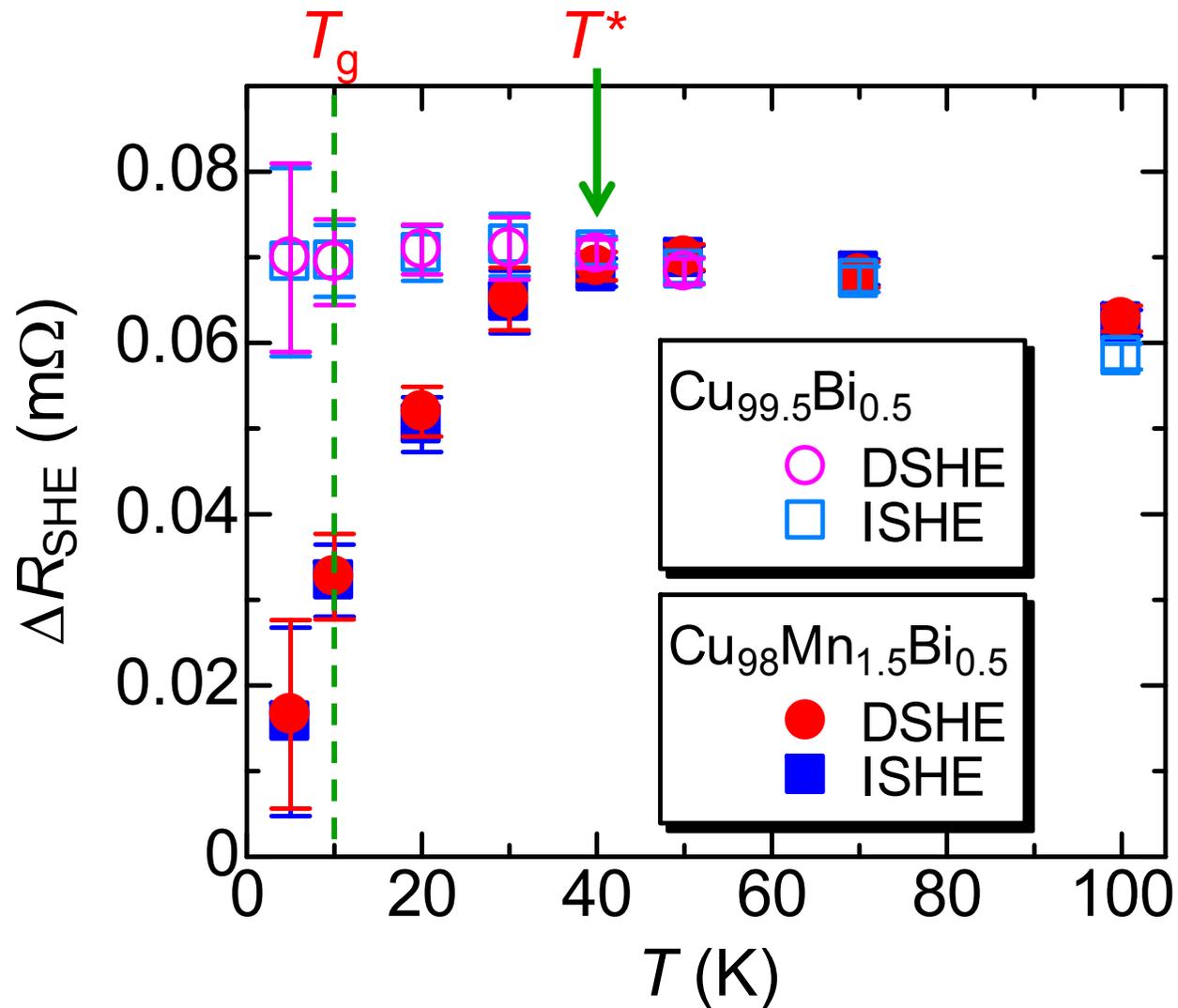
- ↑ Biを添加しても $T_g = 10$ Kで典型的なスピングラス状態を示す。

$\text{Cu}_{98}\text{Mn}_{1.5}\text{Bi}_{0.5}$ のスピントール効果



CuBi の ΔR_{SHE} は温度に対して一定。一方、 CuMnBi の ΔR_{SHE} は温度変化する。

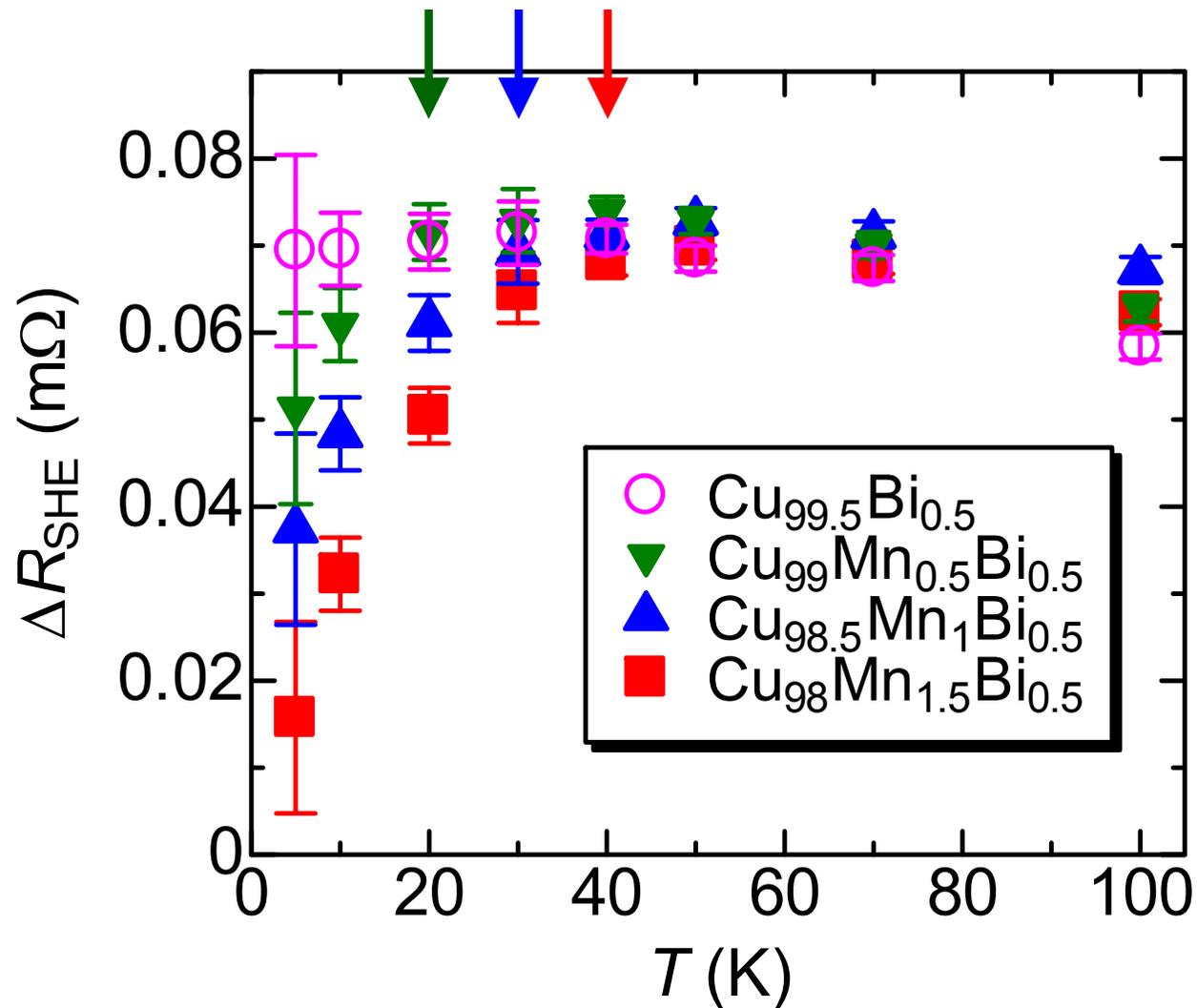
ΔR_{SHE} vs T



$T = 50$ Kでは、CuBiとCuMnBiに違いはない。このことは、Bi不純物による外因性スピンホール効果を意味している。

T_g よりも高い温度 T^* から減衰はすでに始まっている!!!

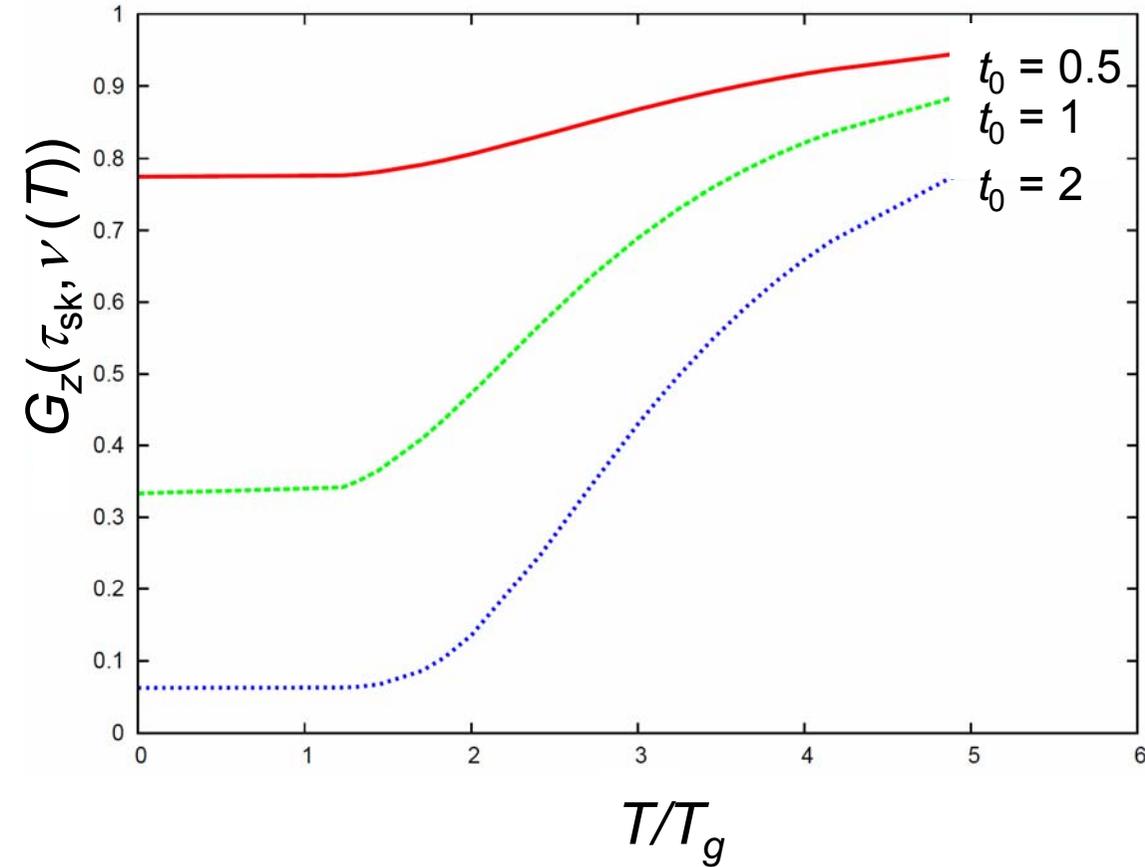
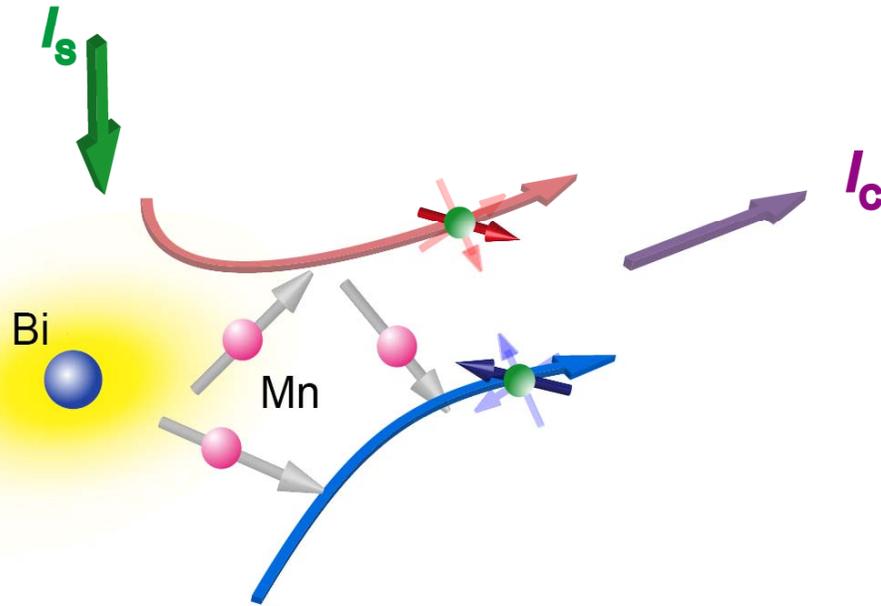
Mn濃度依存性



Mn濃度を減らすと、 T^* も低温側にシフトする。

スピホール効果の減衰は、明らかにMn不純物の特性に起因している。

スピンホール効果減衰のメカニズム



- スピン流から電流への変換は、Bi不純物で起こり、変換時Mnモーメントは揺らいでいる。
- 高温だと、揺らぎが激しいため、伝導電子とカップルしない。
- T_g に近づくにつれて、伝導電子はMnモーメントの揺らぎを感じて、スピンの向きがランダムになる。

$$\vec{J}_C \propto \vec{J}_S \times \vec{s}$$

定性的に実験結果を再現できる。

まとめ

- ❖ 純スピン流は、スピン角運動量のみの流れ。特に基礎研究には、**スピン構造を探るプローブ**として利用できる。
- ❖ **超伝導体**にスピン流を注入すると、準粒子の抵抗が増大することが要因となり、**指数関数的にスピホール抵抗が増大**する。
- ❖ **フラストレート磁性**の典型例であるスピングラスにスピン流を注入すると、伝導電子と局在磁性の揺らぎのために、**スピホール抵抗が減衰**する。