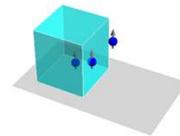


スピン流と角運動量の物理

東京大学 工学系研究科 物理工学専攻

齊藤 英治



1

2

目次

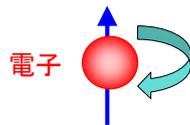
1. はじめに
 - 1.1. スピントロニクスと社会
 - 1.2. 「角運動量をもつ素励起」の魅力
2. スピン流とは？
3. スピン流の電磁現象を開拓する！
4. スピン流：新しい物質観へ
5. 面白い現象を幾つかご紹介
 - 5.1. スピンで発電？
 - 5.2. 核とスピン流
 - 5.3. スピン流とナノ機械

2

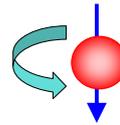
🚩 電子のスピンとは？

スピンとは、電子の持つ自転のような性質

アップ(上向き)スピン



ダウン(下向き)スピン

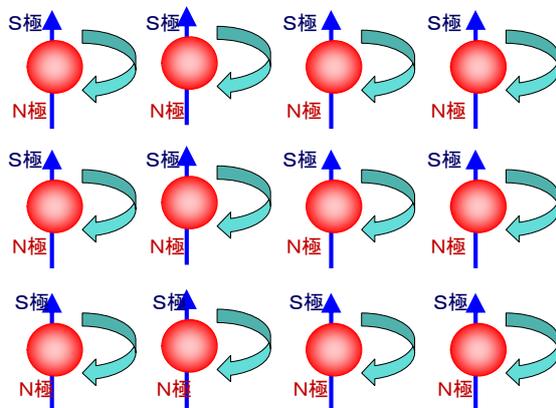


回転軸の向き(矢印)で回転方向を表わす。

3

🚩 磁石の起源はスピン

磁石中は電子のスピンが揃った状態



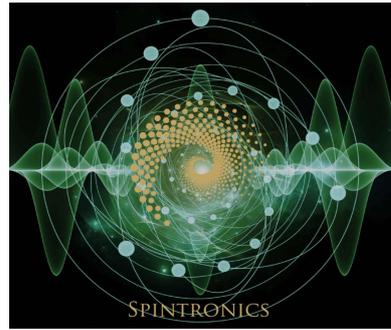
4

🚀 エレクトロニクス・スピントロニクス

■ エレクトロニクス



■ スピントロニクス



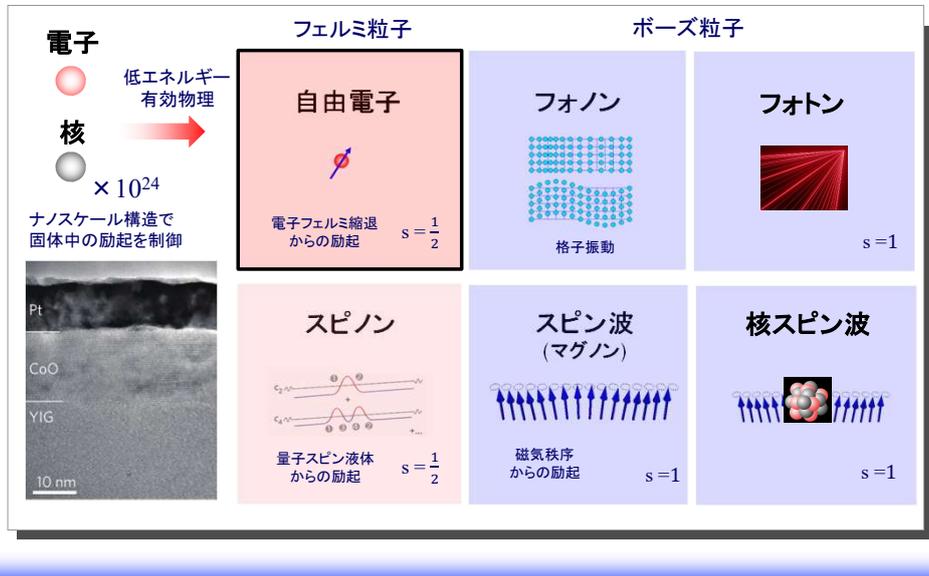
5

🚀 目次

1. はじめに
 - 1.1. スピントロニクスと社会
 - 1.2. 「角運動量をもつ素励起」の魅力
2. スピン流とは？
3. スピン流の電磁現象を開拓する！
4. スピン流：新しい物質観へ
5. 面白い現象を幾つかご紹介
 - 5.1. スピンで発電？
 - 5.2. 核とスピン流
 - 5.3. スピン流とナノ機械

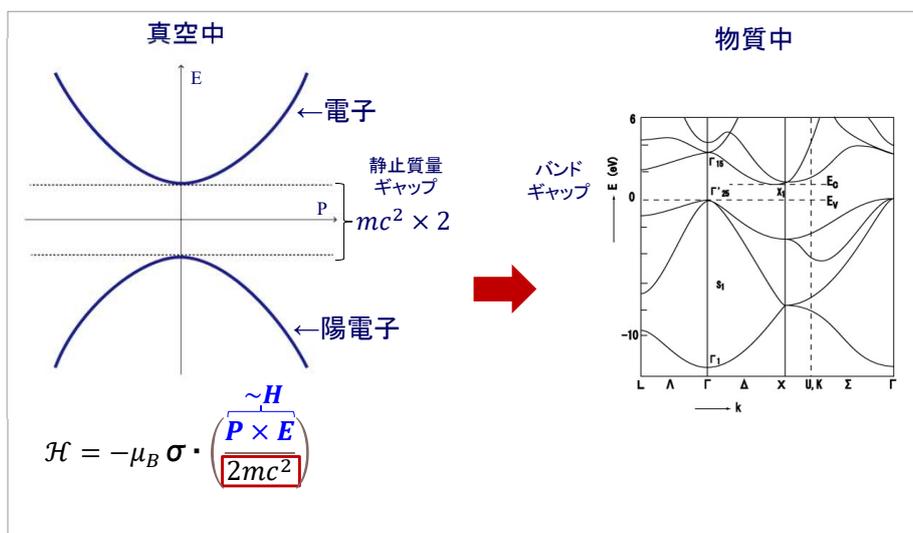
6

物質の中のさまざまな素励起



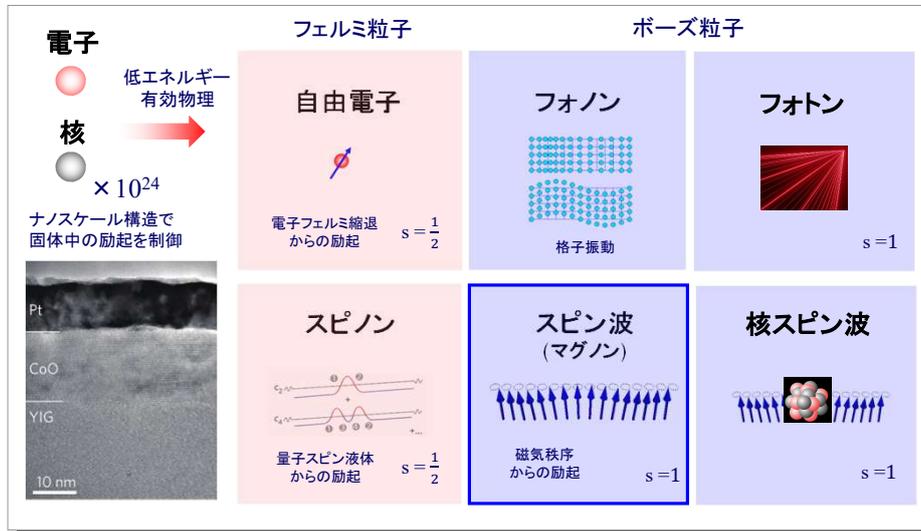
7

自由電子 と スピン軌道相互作用



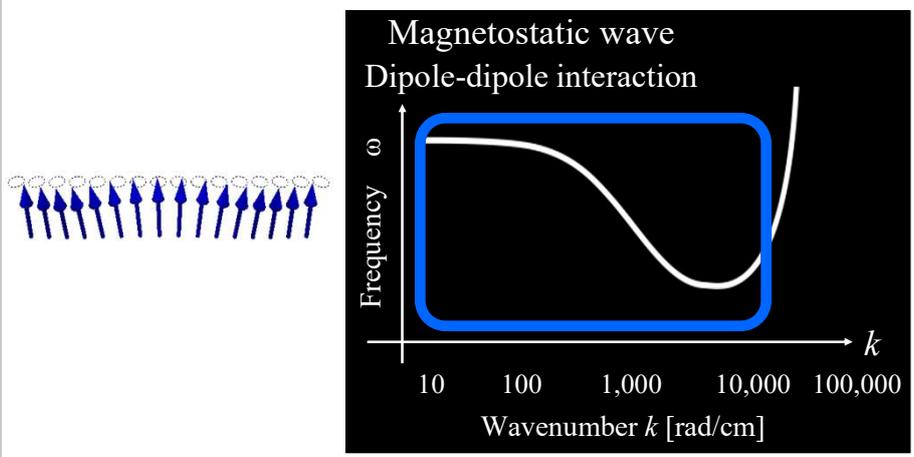
8

物質の中のさまざまな素励起



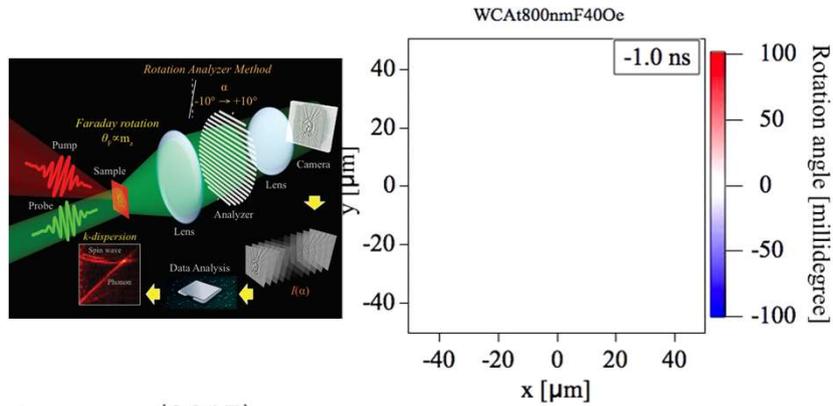
スピン波 (マグノン) : 高コヒーレンス

- 薄膜ナノ磁性体の静磁スピン波分散



スピノ波トモグラフィ法の開発

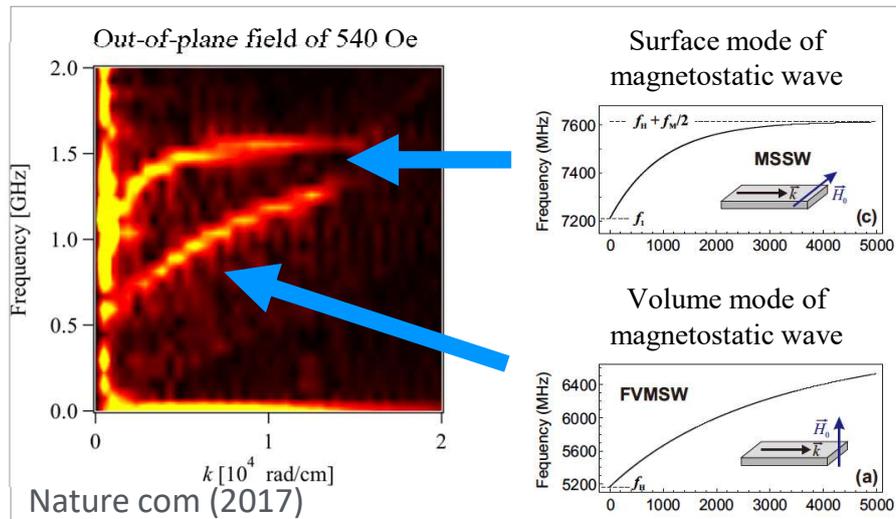
■ フェムト秒時間分解ファラデーイメージング



Nature com (2017)

11

スピノ波トモグラフィ法



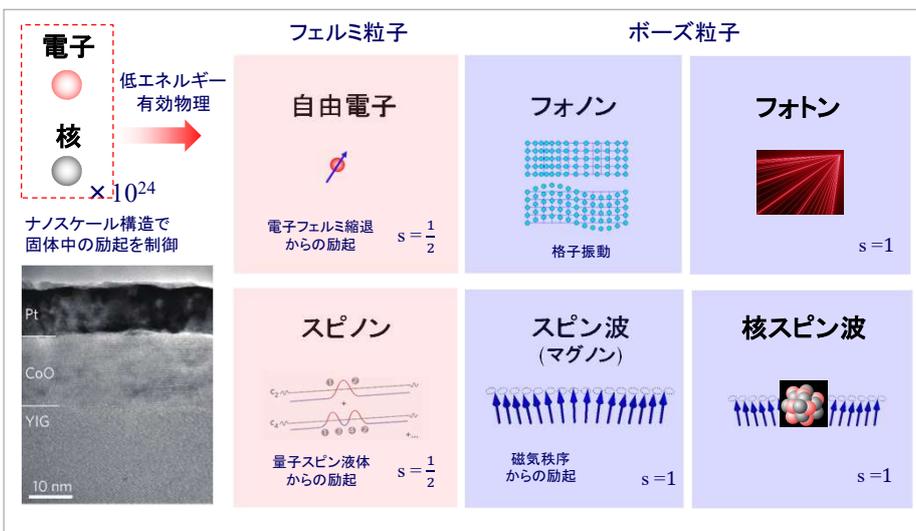
12

目次

1. はじめに
 - 1.1. スピントロニクスと社会
 - 1.2. 「角運動量をもつ素励起」の魅力
2. スピン流とは？
3. スピン流の電磁現象を開拓する！
4. スピン流：新しい物質観へ
5. 面白い現象を幾つかご紹介
 - 5.1. スピンで発電？
 - 5.2. 核とスピン流
 - 5.3. スピン流とナノ機械

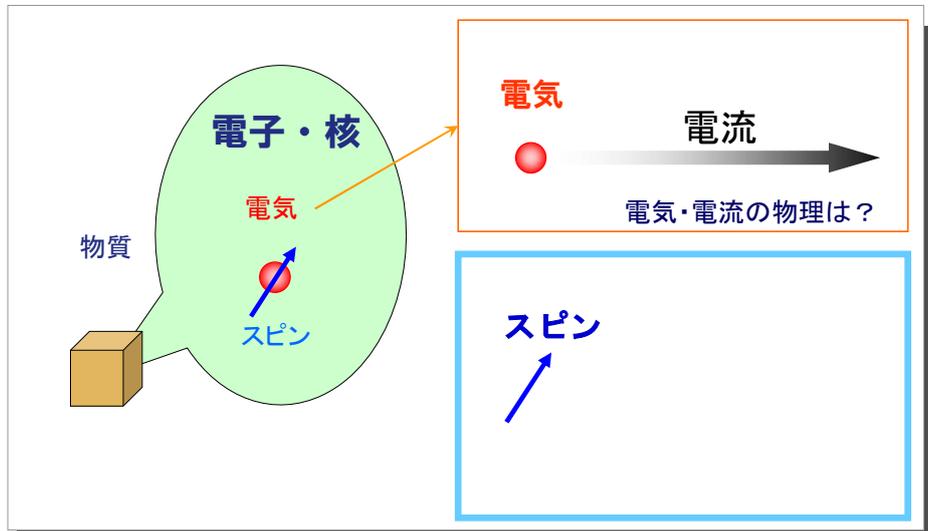
13

物質の中のさまざまな素励起



14

すべての素励起の起源は電子、核、電磁場



15

16

電流の基礎現象 (エレクトロニクスの基礎)

「右ねじの法則」
(アンペールの法則)

電流 → 磁場

電流の周りの砂鉄

ファラデーの電磁誘導

磁場 → 電流

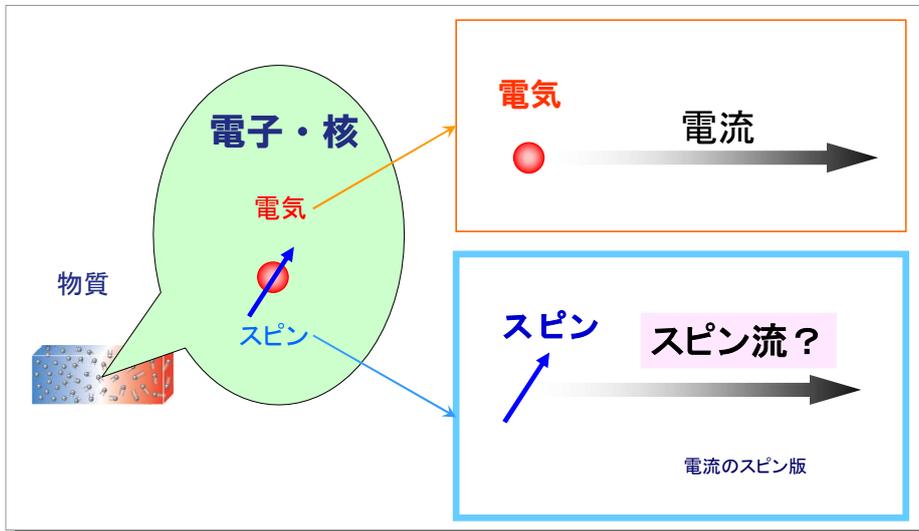
マイケル・ファラデー (1791-1867)

電磁気学の基礎法則

$$\begin{aligned} \text{div} \mathbf{D} &= \rho \\ \text{div} \mathbf{B} &= 0 \\ \text{rot} \mathbf{E} &= -\dot{\mathbf{B}} \\ \text{rot} \mathbf{H} &= \dot{\mathbf{D}} + \mathbf{j}_c \\ \mathbf{D} &= \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \\ \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M} \\ \mathbf{j}_c &= \mathbf{j}_{ce} + \sigma \mathbf{E} \end{aligned}$$

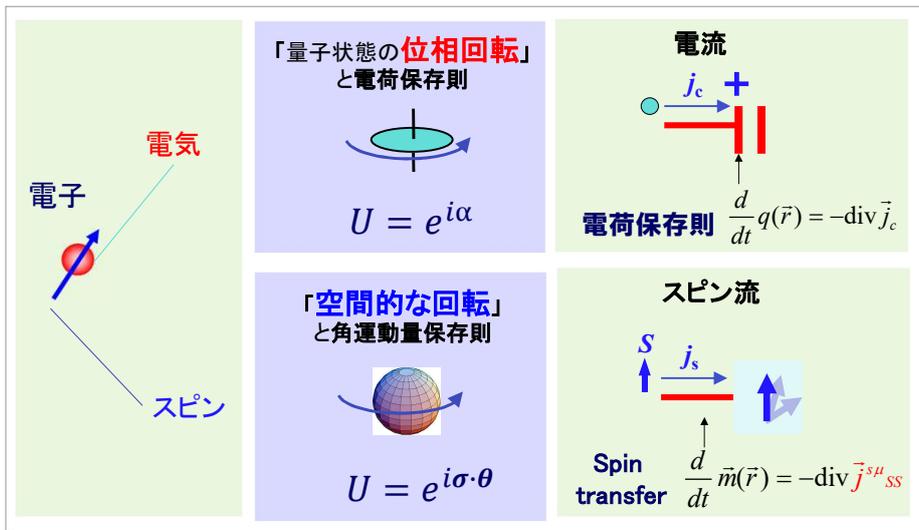
16

スピンドット (電流のスピンドット)



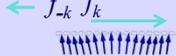
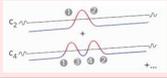
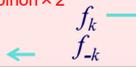
17

電流とスピンドット



18

物質の中のさまざまなスピンの流(一部)

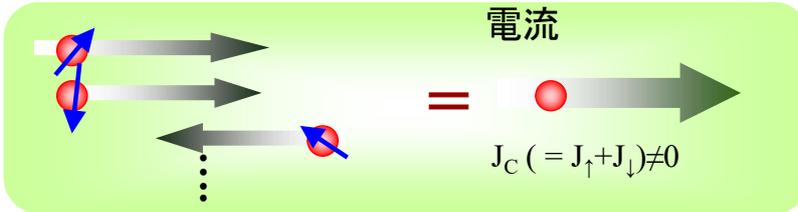
	対応する基底状態	スピンの流
自由電子 	フェルミ縮退 	Free electron spin current  $j_S = j_{\uparrow} - j_{\downarrow}$
スピン波 (マグノン) 	磁気秩序状態 	Spin Wave spin current  $j_S^z = \sum_{k \geq 0} k \cdot (f_k - f_{-k})$
核スピン 	核スピン秩序 (forced orderされた) 	Nuclear wave spin current  $j_S^z = \sum_{k \geq 0} k \cdot (f_k - f_{-k})$
スピノン 	量子スピン液体 	Spinon spin current spinon $\times 2$  $j_S^z = \sum_{k \geq 0} k \cdot (f_k - f_{-k})$

19

自由電子の電流とスピンの流

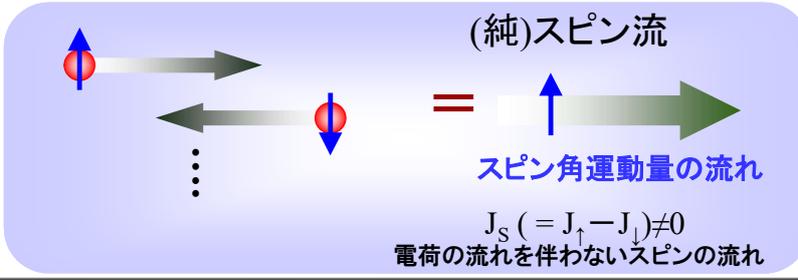
● : charge ↑ : spin

電流



$J_C (= J_{\uparrow} + J_{\downarrow}) \neq 0$

(純)スピンの流



スピンの流
スピンの角運動量の流れ

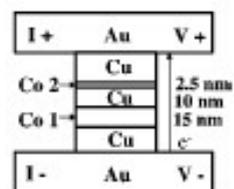
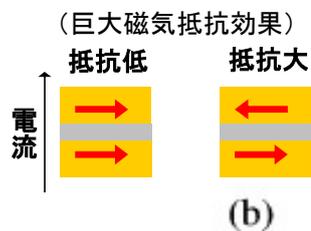
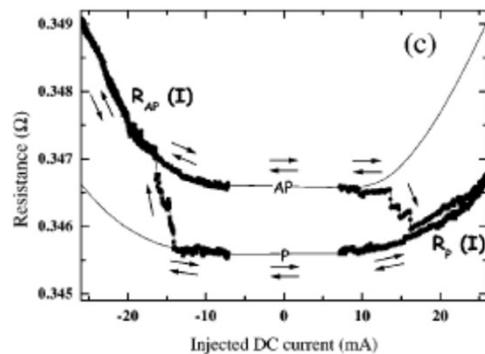
$J_S (= J_{\uparrow} - J_{\downarrow}) \neq 0$
電荷の流れを伴わないスピンの流れ

2009年95月

20

ナノ磁石で発見されたスピン注入磁化反転

- Grolier, Fert *et al.* (2001)

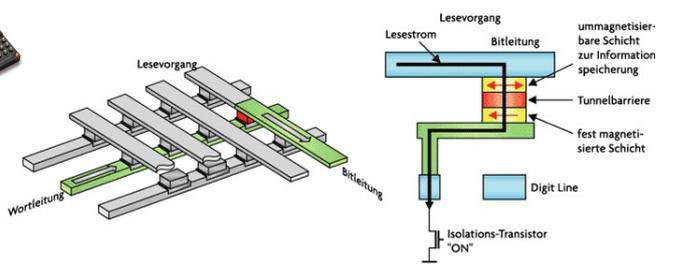


2009年95月

21

MRAM

- 磁気抵抗ランダムアクセスメモリ



IBMウェブサイトより

ビットの操作:
読み込み: 磁気抵抗効果
書き込み: 磁場 or 電流誘起磁化反転

ビット情報を表現



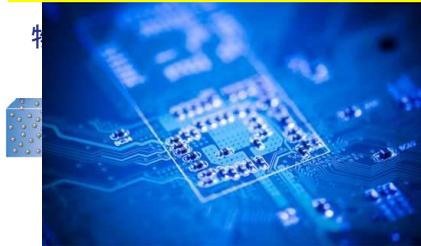
2009年95月

22

電流とスピン流

「ナノテクノロジー」:

1ミリの10万分の1くらいの世界を扱う技術
の出現!



電気

電流

スピン

スピン流?

1ミリの千分の1くらいで消えてしまう。

23

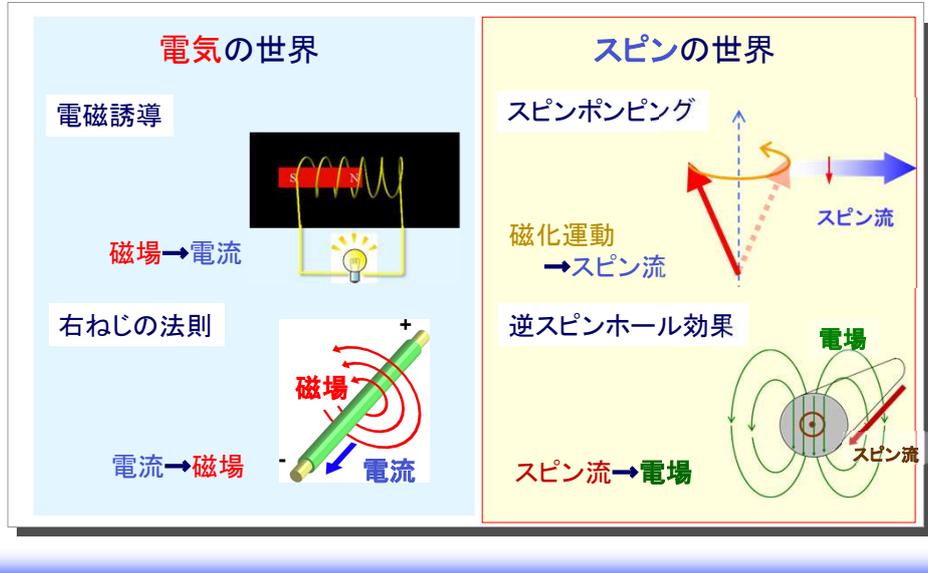
24

目次

1. はじめに
 - 1.1. スピントロニクスと社会
 - 1.2. 「角運動量をもつ素励起」の魅力
2. スピン流とは?
3. **スピン流の電磁現象を開拓する!**
4. スピン流: 新しい物質観へ
5. 面白い現象を幾つかご紹介
 - 5.1. スピンで発電?
 - 5.2. 核とスピン流
 - 5.3. スピン流とナノ機械

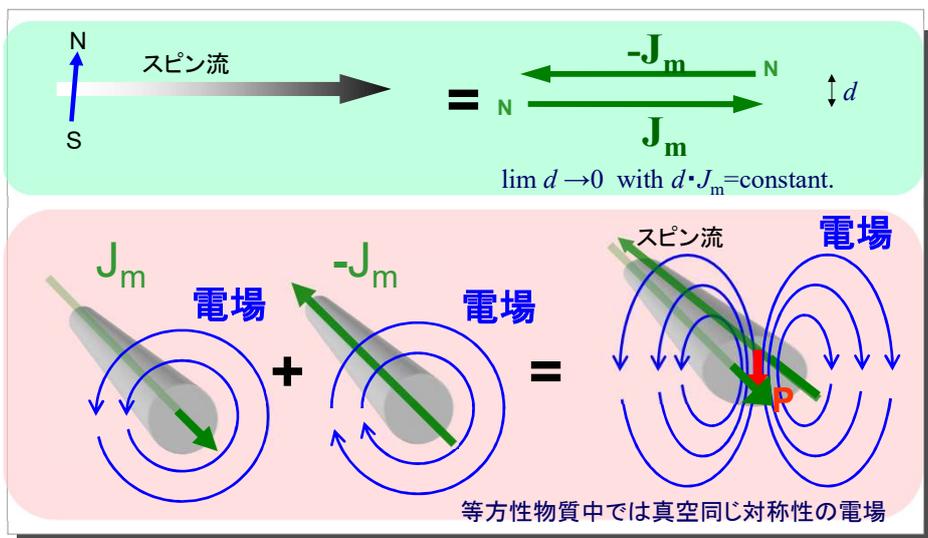
24

スピンの基礎現象の発見



25

現象が持つべき対称性



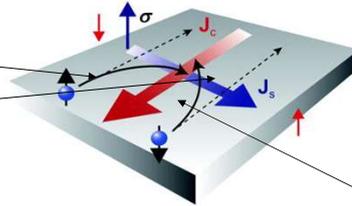
26

スピントール効果と逆スピントール効果

スピントール効果

入力: 電流

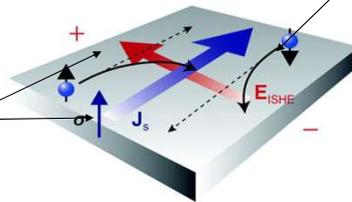
出力: スピントール



逆スピントール効果

入力1: スピントール

出力: 電流



スピントール相互作用

バンドベリ-位相
不純物効果
により、物質中で強くなる

27

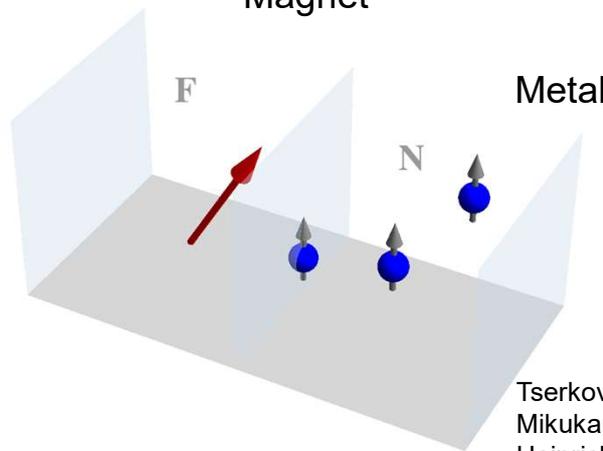
スピントールポンピング

Magnet

F

Metal

N



Tserkovnyak et al. PRL(2002).
Mikukami et al. JJAP(2001).
Heinrich et al. PRL(1987).

28

スピンプンピング

Precessing Magnetization

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_{xy} \cos \Omega t \\ m_{xy} \sin \Omega t \\ M_z \end{pmatrix}$$

Magnet

Metal

σ

$H' = J \mathbf{M} \cdot \boldsymbol{\sigma}$

Interface Spin Exchange scattering

$$H' = J \mathbf{M} \cdot \boldsymbol{\sigma} = J \begin{pmatrix} m_{xy} \cos \Omega t \\ m_{xy} \sin \Omega t \\ M_z \end{pmatrix} \cdot \boldsymbol{\sigma} = J \begin{pmatrix} M_z & m_{xy} e^{i\Omega t} \\ m_{xy} e^{-i\Omega t} & -M_z \end{pmatrix}$$

$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

29

simple reflection

Accelerated

OUT (scattered spin)

$$H' = J \begin{pmatrix} M_z & m_{xy} e^{i\Omega t} \\ m_{xy} e^{-i\Omega t} & -M_z \end{pmatrix}$$

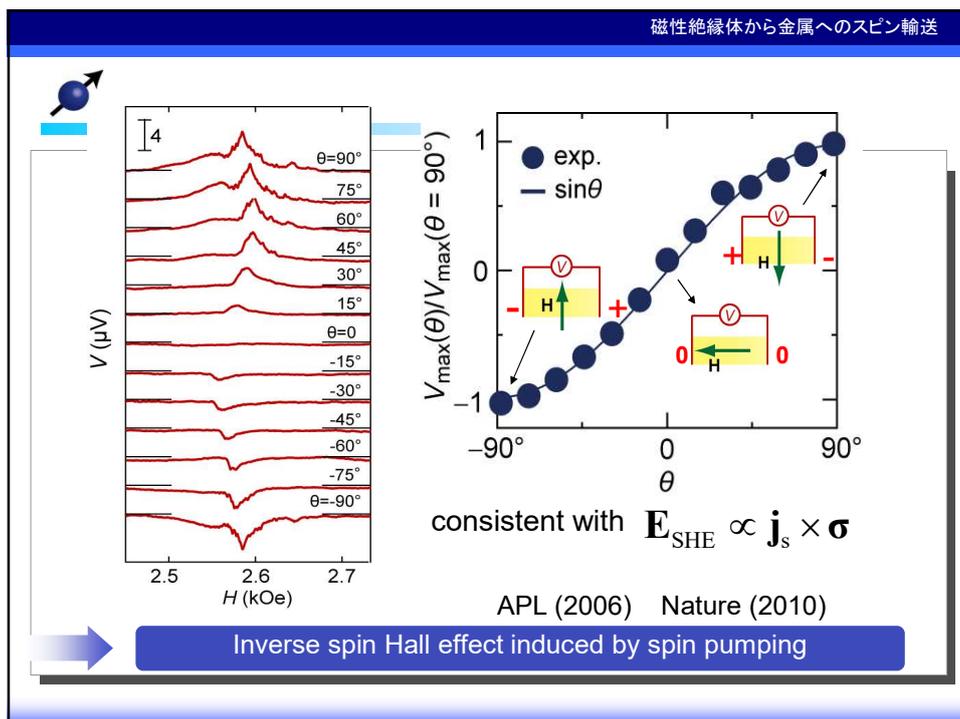
IN (injected)

Slowed down

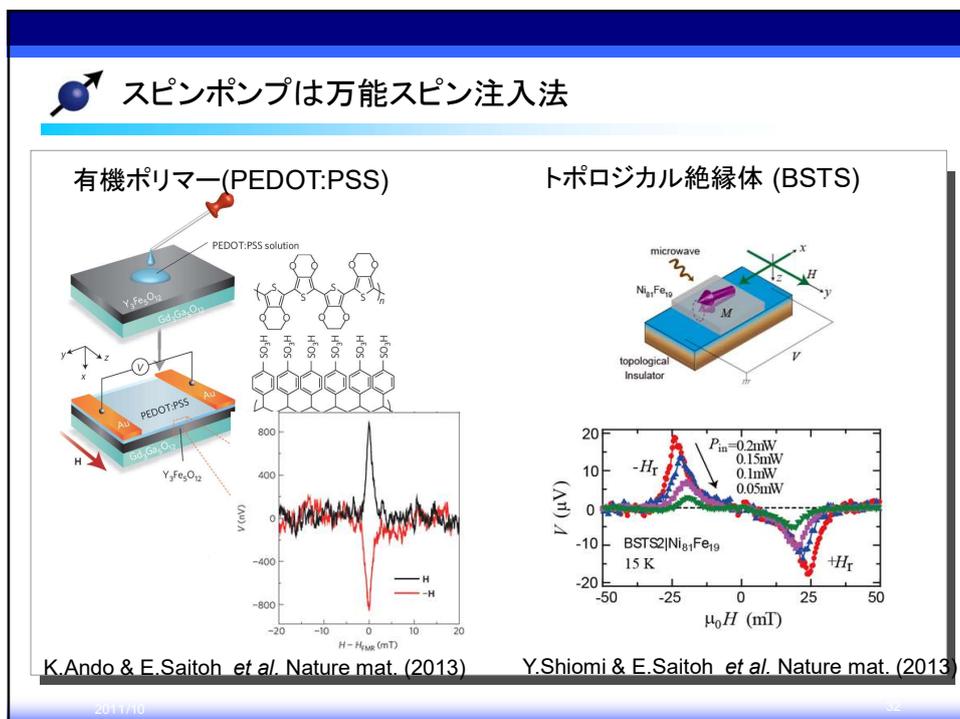
simple reflection

Spin current physics/ E. Saitoh

30



31



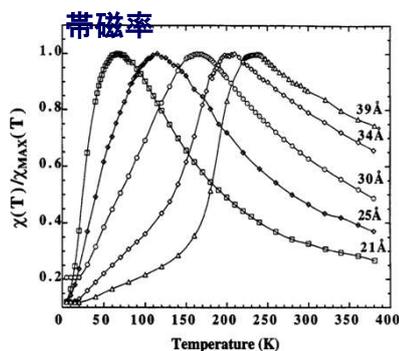
32

📍 目次

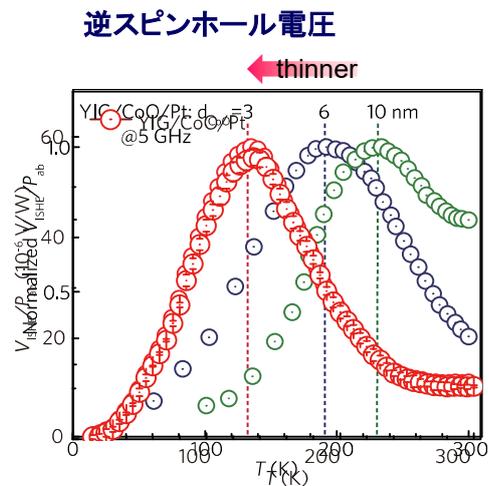
1. はじめに
 - 1.1. スピントロニクスと社会
 - 1.2. 「角運動量をもつ素励起」の魅力
2. スピン流とは？
3. スピン流の電磁現象を開拓する！
4. スピン流：新しい物質観へ
5. 面白い現象を幾つかご紹介
 - 5.1. スピンで発電？
 - 5.2. 核とスピン流
 - 5.3. スピン流とナノ機械

33

ナノスケールスピン伝導物性測定 $\sigma \sim \text{Im} \chi$?



Nature com (2014)



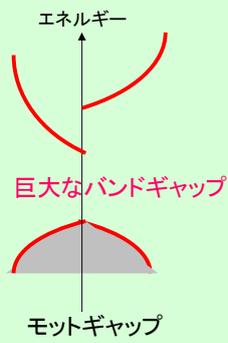
Spin current physics/ E. Saitoh

34

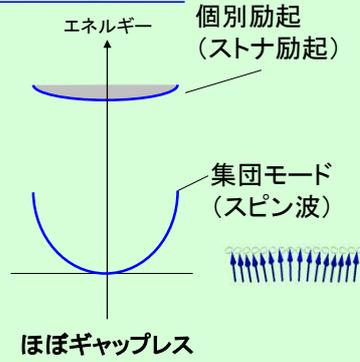
34

電気は流さないが、スピンは流す物質はあるか？

電荷セクター



スピンセクター



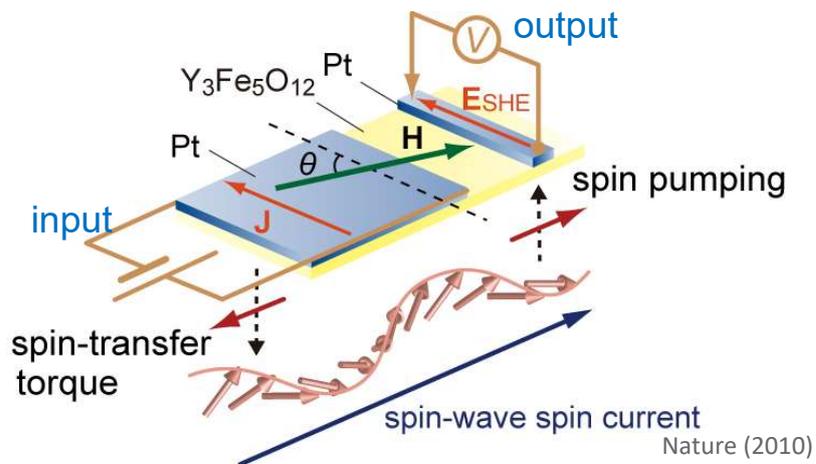
Nature (2010)

35

35

絶縁体YIGはスピンを流すことができる！

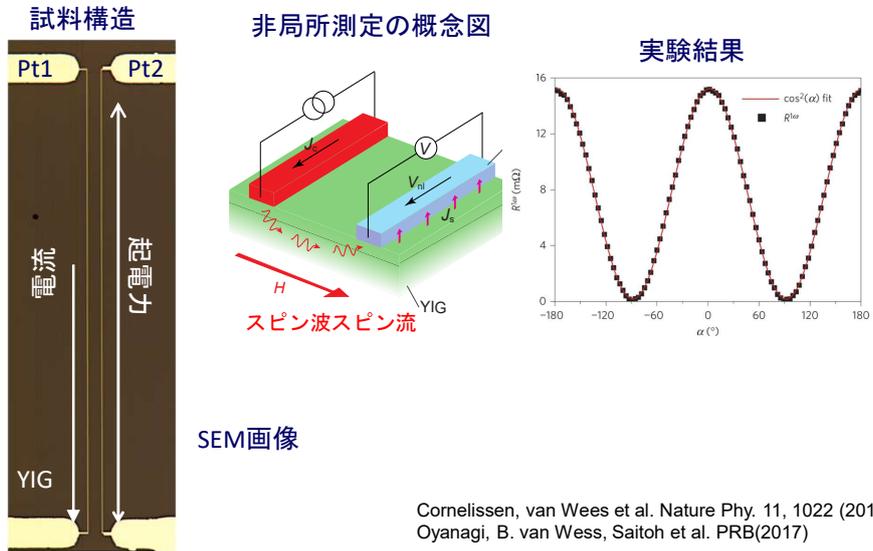
Pt(10nm) / $Y_3Fe_5O_{12}$ (1.2 μ m) / Pt(10nm)



36

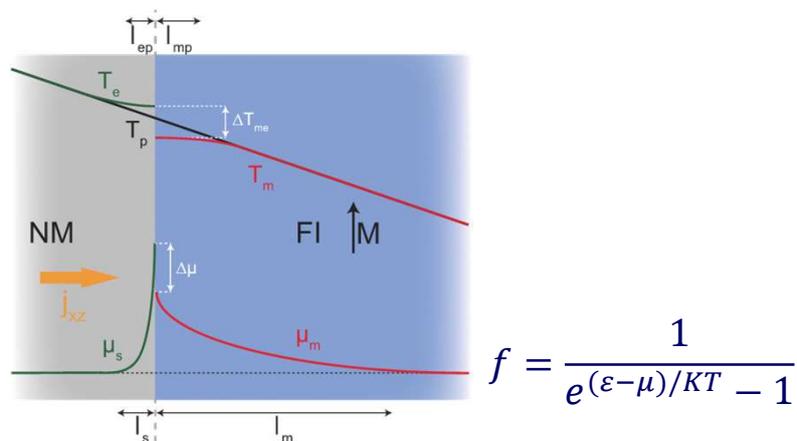
36

スピン波による絶縁体中の電気信号伝送（線形領域）



37

マグノンが化学ポテンシャルを持つ可能性



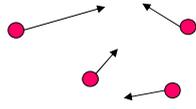
Spin current physics/ E. Saitoh

38

38

マグノンが化学ポテンシャルを持つ可能性

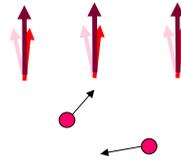
フォノン・光子



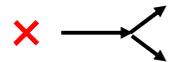
生成・消滅が自由
化学ポテンシャル $\mu=0$

$$f = \frac{1}{e^{\varepsilon/KT} - 1}$$

マグノン(スピン波)

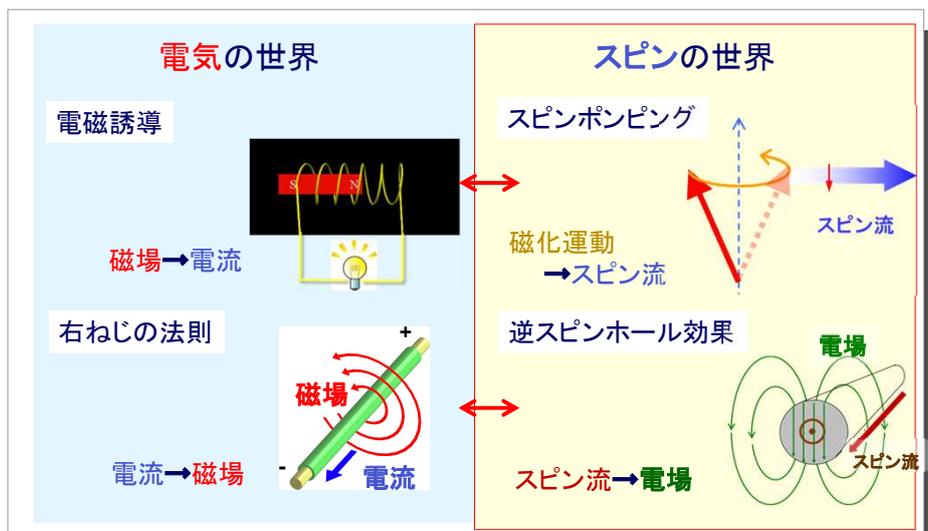


z-角運動量 \hbar
角運動量保存→粒子数保存



$$f = \frac{1}{e^{(\varepsilon-\mu)/KT} - 1}$$

スピンの基礎現象



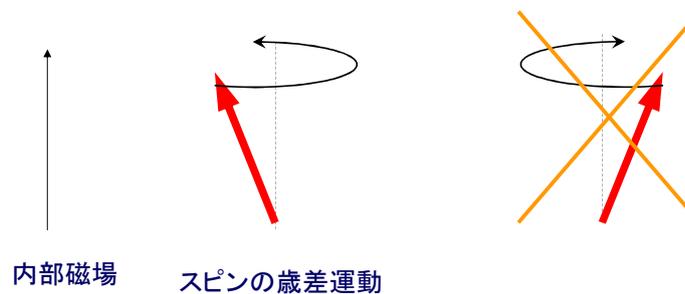
📍 目次

1. はじめに
 - 1.1. スピントロニクスと社会
 - 1.2. 「角運動量をもつ素励起」の魅力
2. スピン流とは？
3. スピン流の電磁現象を開拓する！
4. スピン流：新しい物質観へ
5. 面白い現象を幾つかご紹介
 - 5.1. スピンで発電？
 - 5.2. 核とスピン流
 - 5.3. スピン流とナノ機械

41

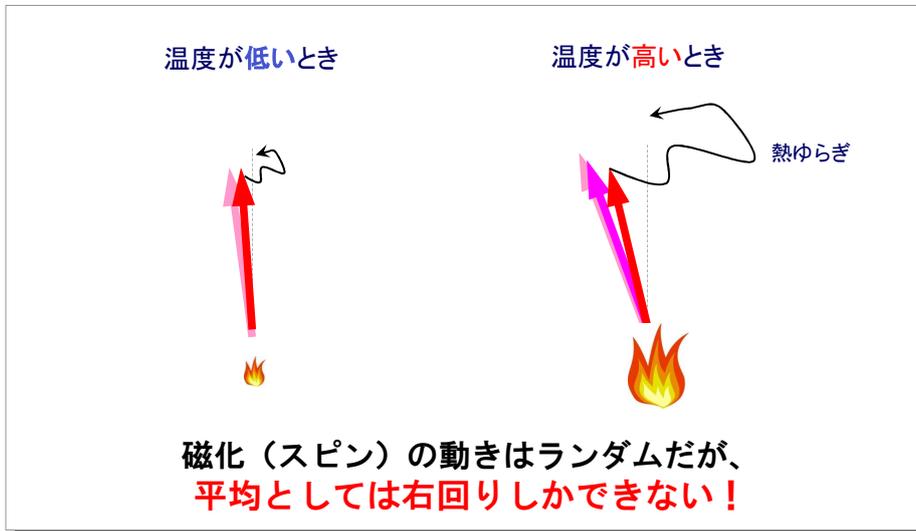
📍 磁性体の磁気ダイナミクスの性質（非相反性）

- 歳差運動するが、特定の方向しか回らない



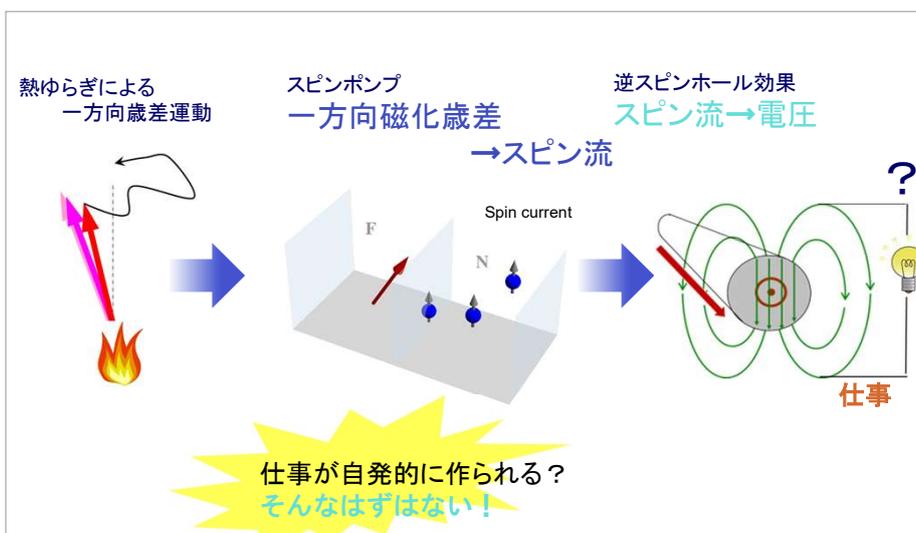
42

熱ゆらぎでも局所磁化は一方向しか回らない！



43

問題意識



44

新しい発電原理へ到達

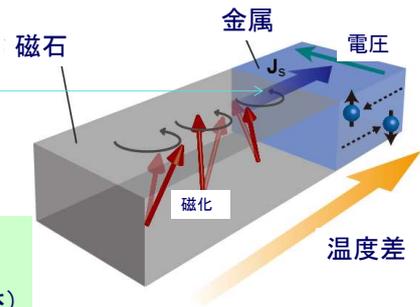
スピンの「ラチェット」を使って熱からスピン流・電気を作る方法

生成されるスピン流

$$\langle I_z \rangle \simeq \frac{\gamma \hbar g_r k_B}{2\pi M_s V_a} (T_F^m - T_N)$$

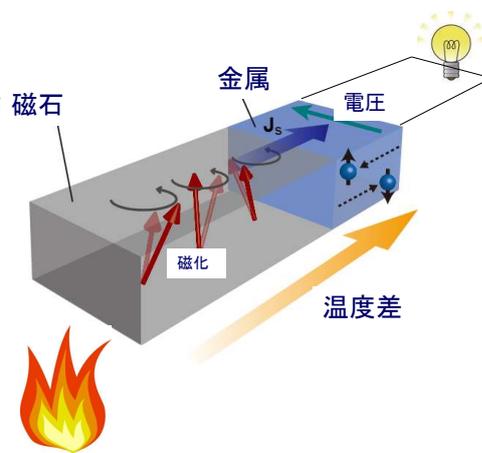
スピン温度:
(スピンの
ゆらぎの大きさ)

電子温度:
(電子の
ゆらぎの大きさ)



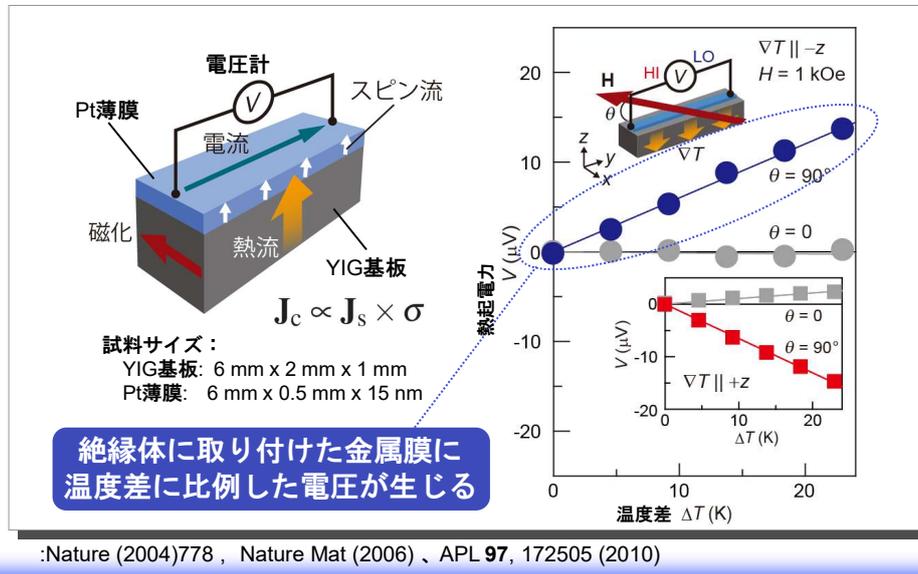
45

新しい発電原理へ到達



46

スピナーベック効果



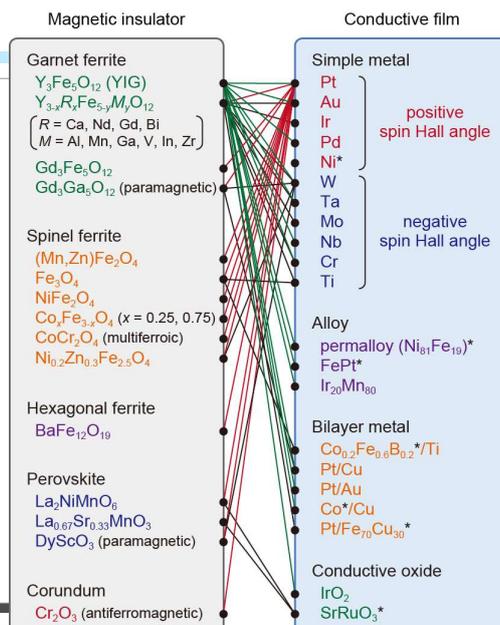
47

SSEの普遍性

Model system:

Pt/Y₃Fe₅O₁₂ (YIG) junction

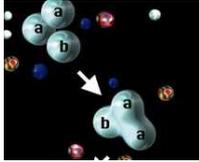
K. Uchida, H. Adachi, T. Kikkawa,
A. Kiriwara, M. Ishida, S. Yorozu,
S. Maekawa, and E. Saitoh,
"Thermoelectric generation based on
spin Seebeck effects"
Proceedings of the IEEE (2016),
DOI:10.1109/JPROC.2016.2535167.



48

この原理で、いろいろなものから発電可能なはず

化学反応から発電

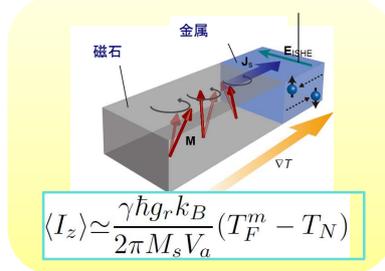


生体の運動から発電



電源、センサー

新しい発電の原理



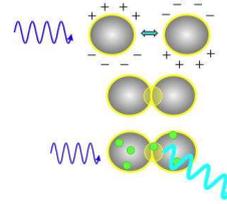
$$\langle I_z \rangle \sim \frac{\gamma \hbar g_r k_B}{2\pi M_s V_a} (T_F - T_N)$$

放射線から発電

X線 ガンマ線
 中性子

放射線測定

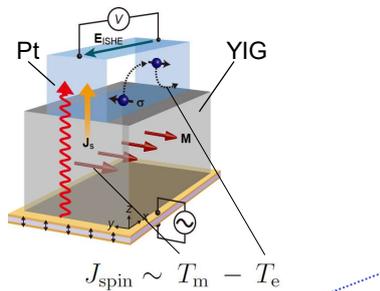
光から発電



ソーラーセル、センサー

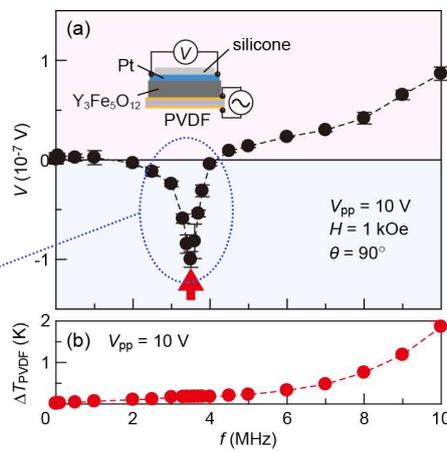
音→スピン流→発電

Generation of spin currents by sound-wave injection



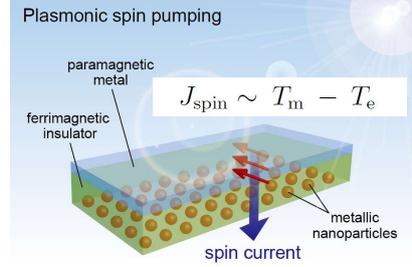
Piezoelectric mechanical resonance frequency

Nature Materials (2011).



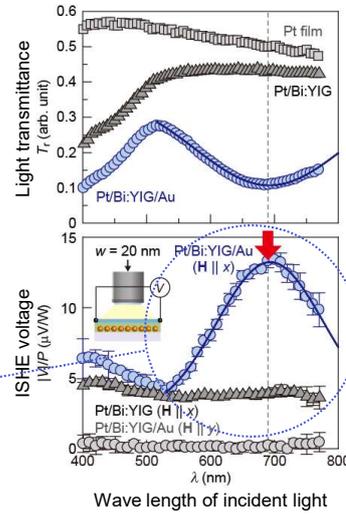
光 → 表面プラズモン → スピン流 → 発電

Generation of spin currents by surface plasmon resonance



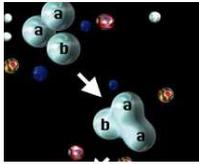
surface-plasmon-resonance condition

Nature Communications (2015).



この原理で、いろいろなものから発電可能なはず

化学反応から発電

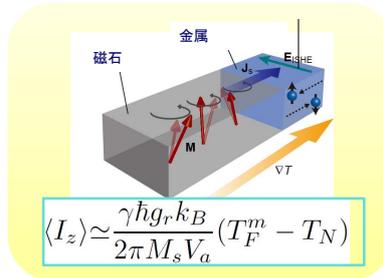


生体の運動から発電



電源、センサー

新しい発電の原理



放射線から発電

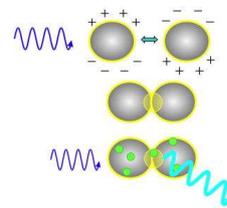
X線

ガンマ線

中性子

放射線測定

光から発電



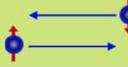
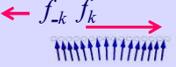
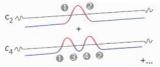
ソーラーセル、センサー

📍 目次

1. はじめに
 - 1.1. スピントロニクスと社会
 - 1.2. 「角運動量をもつ素励起」の魅力
2. スピン流とは？
3. スピン流の電磁現象を開拓する！
4. スピン流：新しい物質観へ
5. 面白い現象を幾つかご紹介
 - 5.1. スピンで発電？
 - 5.2. 核とスピン流
 - 5.3. スピン流とナノ機械

53

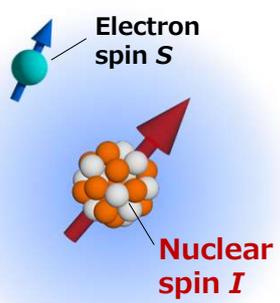
様々なスピン流

自由電子 	フェルミ縮退 	Free electron spin current  $j_S = j_{\uparrow} - j_{\downarrow}$
スピン波 (マグノン) 	磁気秩序状態 	Spin Wave spin current  $j_S^z = \sum_{k \geq 0} k \cdot (f_k - f_{-k})$
核スピン 	核スピン (forced orderされた) 	Nuclear wave spin current  $j_S^z = \sum_{k \geq 0} k \cdot (f_k - f_{-k})$
スピノン 	量子スピン液体 	Spinon spin current spinon $\times 2$  $j_S^z = \sum_{k \geq 0} k \cdot (f_k - f_{-k})$

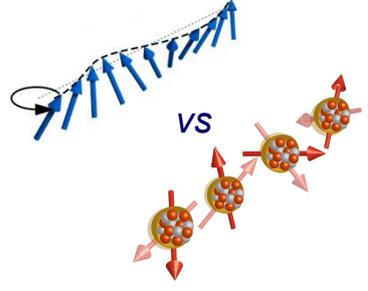
Spin current physics/ E. Saitoh

54

核スピンと電子スピン



スピン波ゼーベック効果

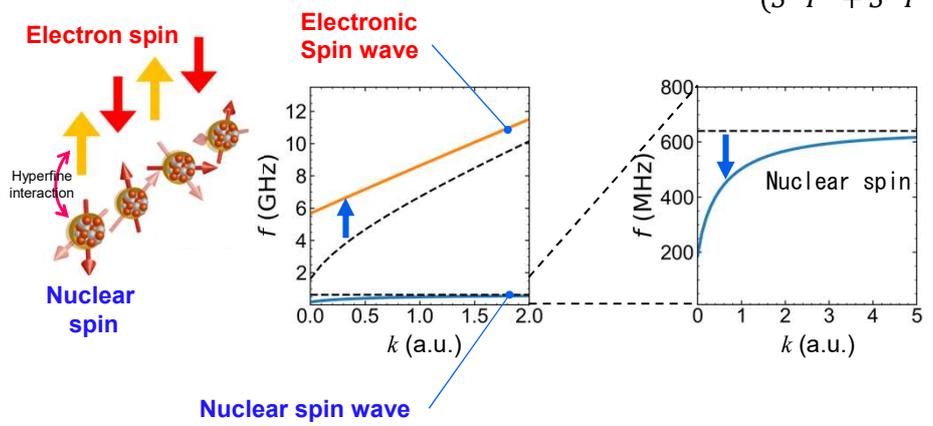


✓ Tiny gyromagnetic ratio γ_n and Zeeman coupling ($\gamma_n/\gamma_e \sim 10^{-3}$).

孤立性の高い核スピンも、スピン流を担えるか？

核の集団励起モード

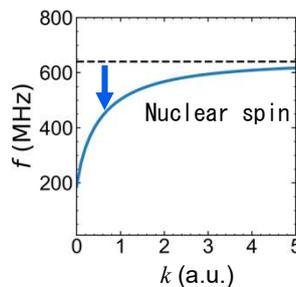
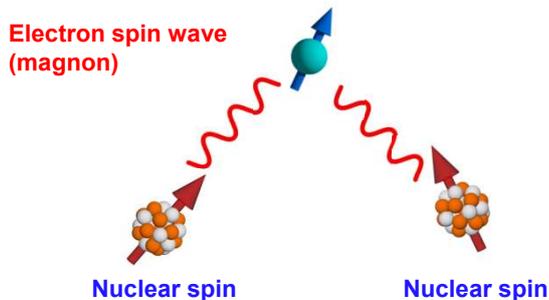
With hybridization due to transverse hyperfine ($S^+I^- + S^-I^+$)



Level Repulsion due to nuclear-electron spin Hybridization (Pulling effect)

核の集団励起モード

With hybridization due to transverse hyperfine
 $(S^+I^- + S^-I^+)$

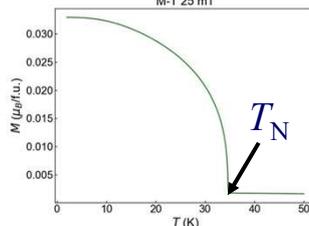
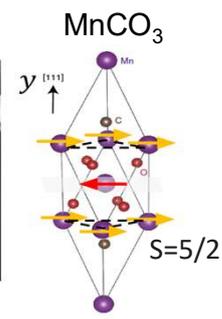
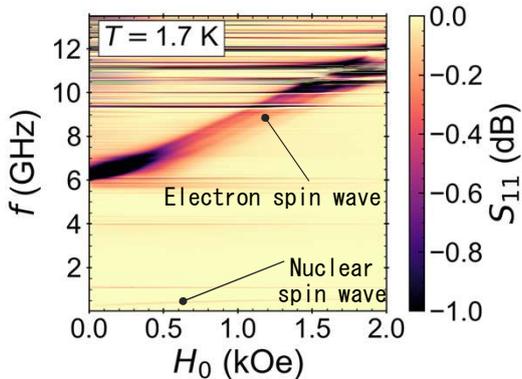


Level Repulsion due to nuclear-electron spin Hybridization (Pulling effect)

Spin current physics/ E. Saitoh

57

Microwave absorption spectra

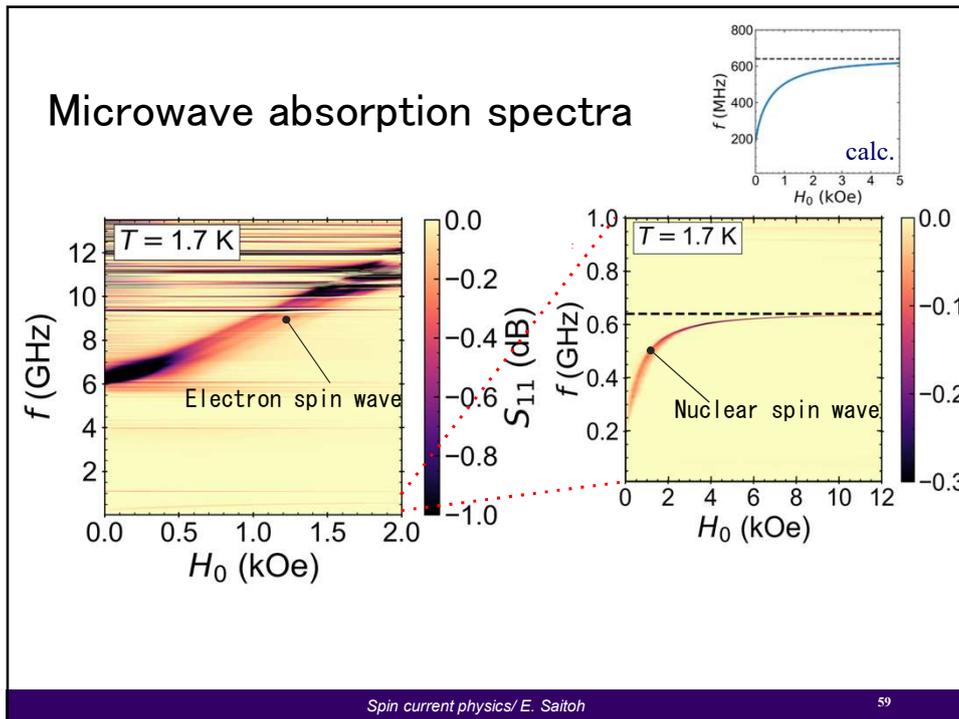


- $^{55}\text{Mn}^{2+}$ $I=5/2$ nuclear spin (100% natural abundance)
- Antiferromagnetic order + weak ferromagnetism (DM)
- Mn^{2+} : $L=0$: small spin-wave gap

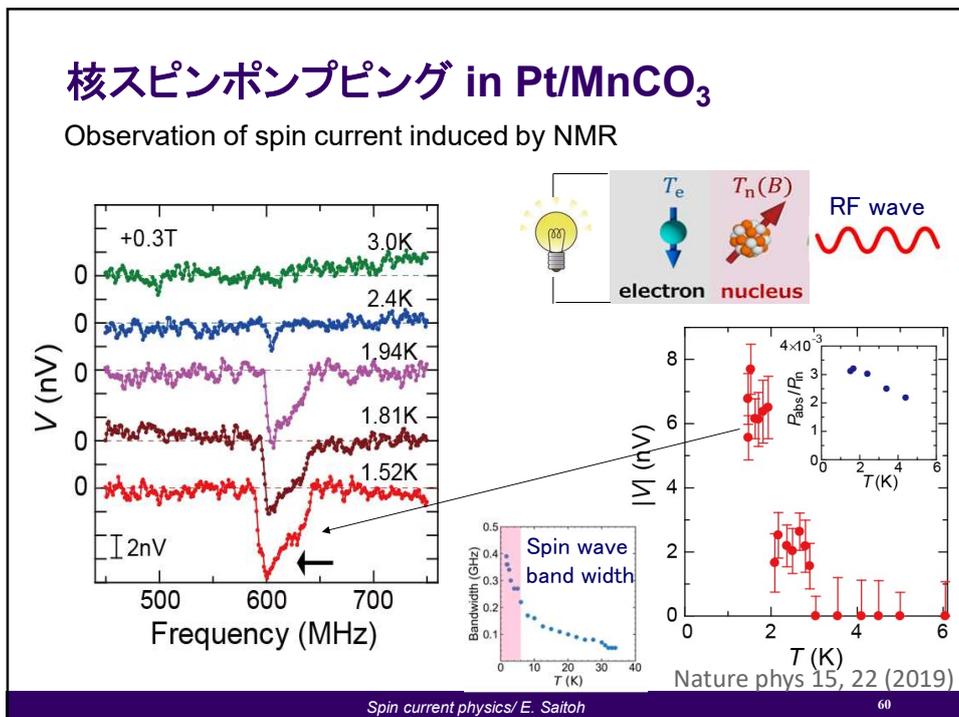
Spin current physics/ E. Saitoh

58

58



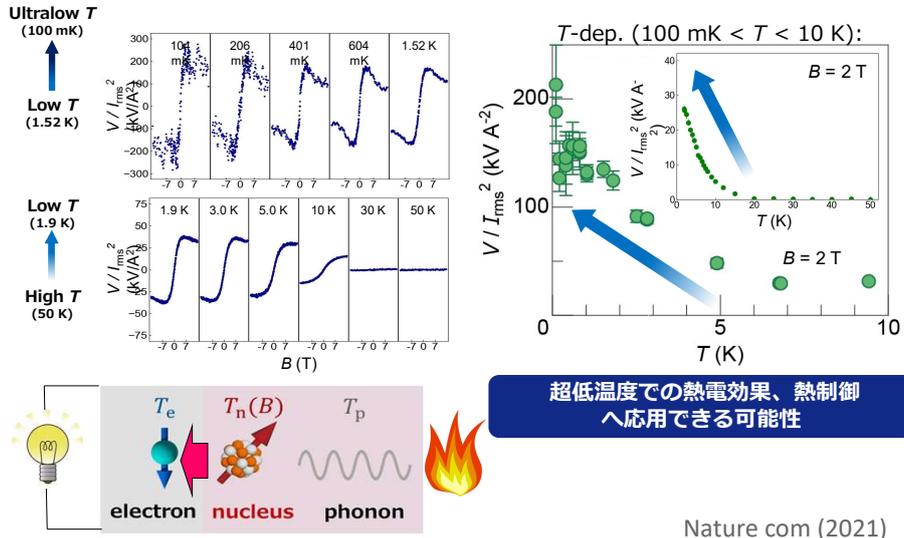
59



60

核スピンゼーベック効果 (核スピンの熱電効果)

61



Spin current physics/ E. Saitoh

61

62

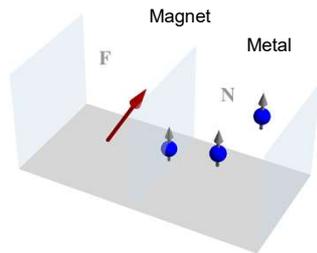
目次

1. はじめに
 - 1.1. スピントロニクスと社会
 - 1.2. 「角運動量をもつ素励起」の魅力
2. スピン流とは？
3. スピン流の電磁現象を開拓する！
4. スピン流：新しい物質観へ
5. 面白い現象を幾つかご紹介
 - 5.1. スピンで発電？
 - 5.2. 核とスピン流
 - 5.3. スピン流とナノ機械

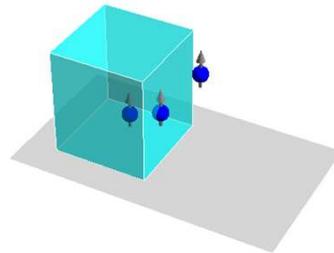
62

🌀 いろいろな回転からスピン流を作る

Magnetization Rotation → Spin current **Mechanical** rotation → Spin current



Spin pumping & SSE
and application to
spectroscopy for spin

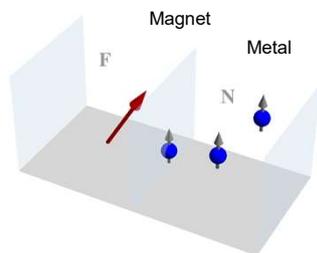


Mechanical
spin current generation?

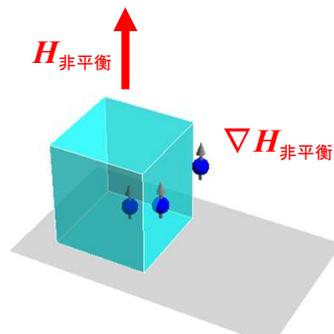
63

🌀 いろいろな回転からスピン流を作る

Magnetization Rotation → Spin current **Mechanical** rotation → Spin current



Spin pumping & SSE
and application to
spectroscopy for spin

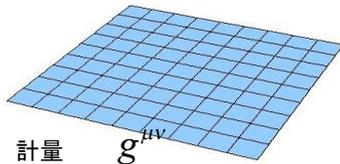


Mechanical
spin current generation?

64

一般座標変換のもとでの電子論

平坦な時空(慣性系)



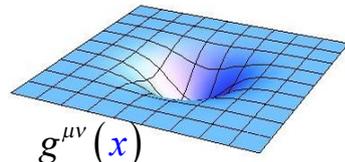
計量 $g^{\mu\nu}$
微分 ∂_μ

特殊相対論的ディラック方程式

$$\left[\gamma^\mu \left(\partial_\mu - i \frac{q}{\hbar} A_\mu \right) + \frac{mc}{\hbar} \right] \psi = 0$$

$$\{ \gamma^\mu, \gamma^\nu \} = 2g^{\mu\nu}$$

曲がった時空(回転系・加速系): 一般相対論的



計量 $g^{\mu\nu}(x)$
微分 $\partial_\mu - \Gamma_\mu [g(x)]$

カルタン幾何学+ディラック方程式

$$\left[\gamma^\mu(x) \left(\partial_\mu - \Gamma_\mu [g(x)] - i \frac{q}{\hbar} A_\mu \right) + \frac{mc}{\hbar} \right] \psi = 0$$

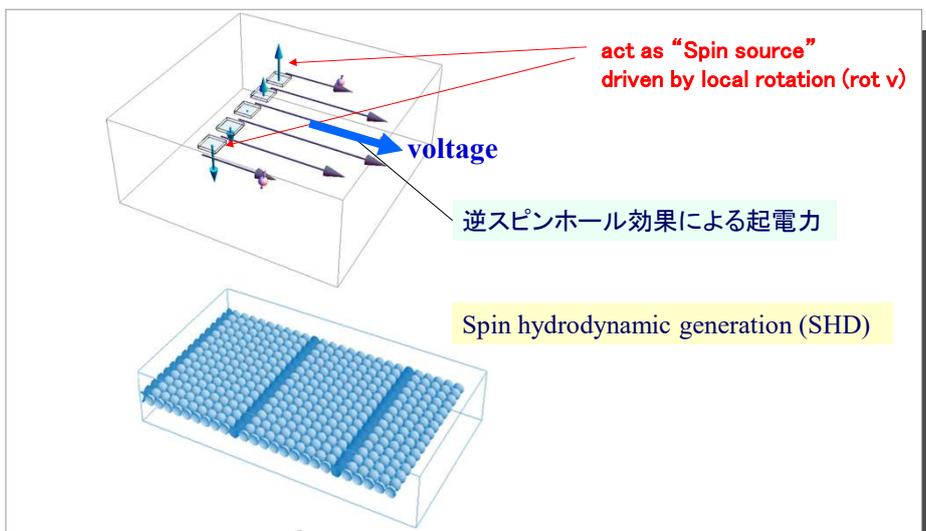
$$\{ \gamma^\mu(x), \gamma^\nu(x) \} = 2g^{\mu\nu}(x)$$

回転 =
有効磁場
 \uparrow
 B_{eff}

see 松尾、齊藤、前川 物理学会誌 72-9 (2017)

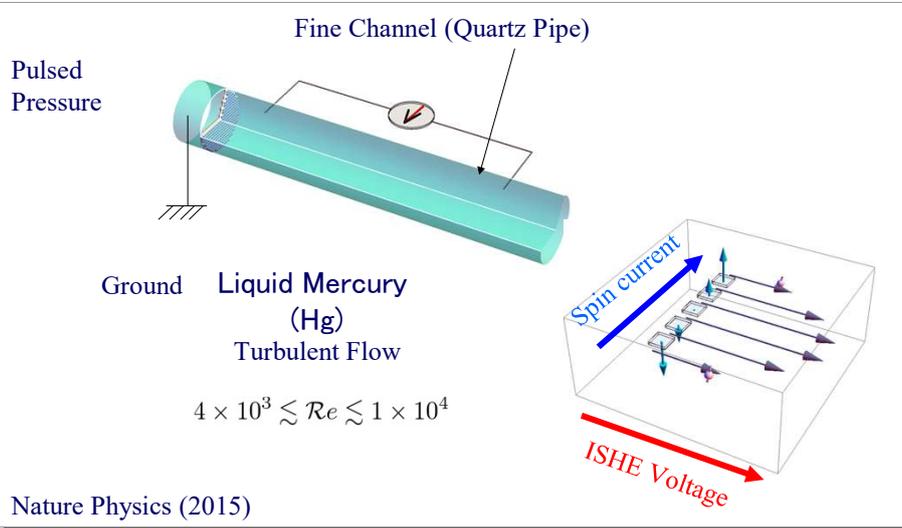
65

Spin hydrodynamics (SHD) generation



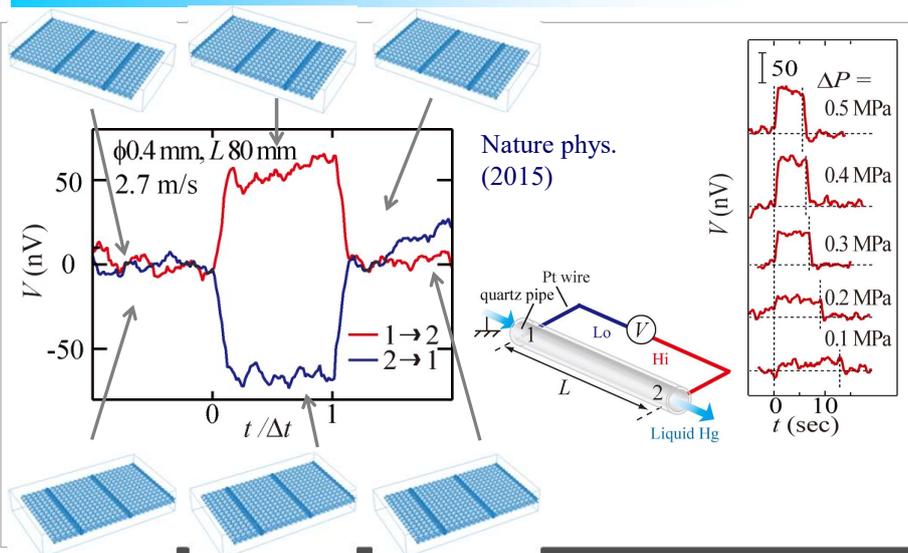
66

Spin hydrodynamic (SHD) generation



67

Spin hydrodynamic (SHD) generation



68

Magnetization caused by rotation in Quark-Gluon plasma

LETTER

@Brookhaven accelerator

doi:10.10

motivated by our *spintronics* work

Global Λ hyperon polarization in nuclear collisions

The STAR Collaboration*

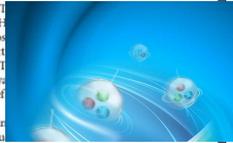
The extreme energy densities generated by ultra-relativistic collisions between heavy atomic nuclei produce a state of matter that behaves surprisingly like a fluid, with exceptionally high temperature and low viscosity¹. Non-central collisions have angular momenta of the order of $1,000\hbar$, and the resulting fluid may have a strong vortical structure²⁻⁴ that must be understood to describe the fluid properly. The vortical structure is also of particular interest because the restoration of fundamental symmetries of quantum chromodynamics is expected to produce novel physical effects in the presence of strong vorticity⁵. However, no experimental indications of fluid vorticity in heavy ion collisions have yet been found. Since vorticity represents a local rotational structure of the fluid, spin-orbit coupling can lead to preferential orientation of particle spins along the direction of rotation. Here we present measurements of an alignment between the global angular momentum of a non-central collision and the spin of emitted particles (in this case the collision occurs between gold nuclei and produces Λ baryons), revealing that the fluid produced in heavy ion collisions is the most vortical system so far observed. (At high energies, this fluid is a quark-gluon plasma.) We find that Λ and $\bar{\Lambda}$ hyperons show a positive polarization of the order of a few per cent, consistent with some hydrodynamic predictions⁶. (A hyperon is a particle composed of three quarks, at least one of which is a strange

RHIC is essential to understand quark confinement and the origin of hadron mass.

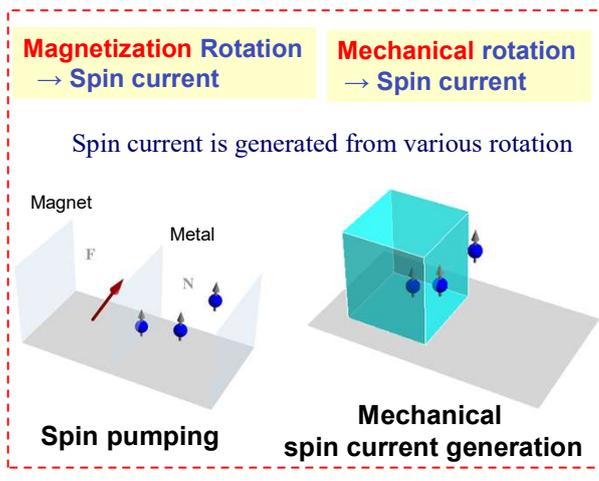
A collaboration of physicists from 13 countries operates the STAR detector system¹², which has recorded billions of collisions at RHIC. A rendering of the STAR experiment is shown in Fig. 1. Opposite beams of gold nuclei collide in the centre of the time projection chamber (TPC), generating a spray of charged particles. The TPC signal from a single event is shown in Fig. 2. Forward- and backward-travelling particles and fragments that experience only a small deflection are measured in the beam-beam counters.

Most collisions at RHIC are not head-on, and so involve substantial angular momentum, of the order of $1,000\hbar$ (where \hbar is the reduced Planck constant) for a typical collision. A slight sideward deflection of the forward- and backward-travelling fragments¹³ from a given collision allows experimental determination of the direction of the overall angular momentum \vec{F} , as shown schematically in Fig. 3.

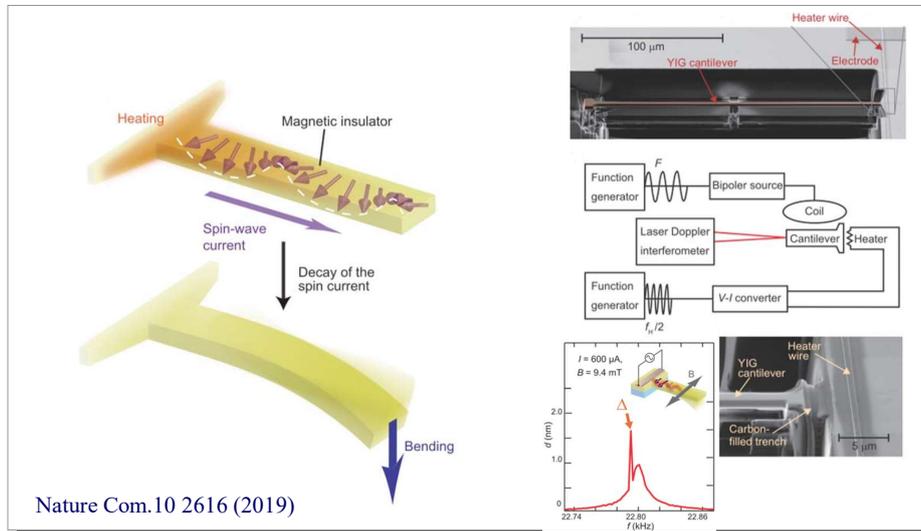
Recently, Takahashi *et al.*¹⁴ reported the first observation of a coupling between the vorticity of a fluid and the internal quantum spin of the electron, opening the door to a new field of fluid spintronics. In their study, the vorticity ω —a measure of the 'swirl' of the velocity flow field around any point (non-relativistically, $\omega = \frac{1}{2}\nabla \times v$)—is generated through shear viscous effects as liquid mercury flows next to a rigid wall.



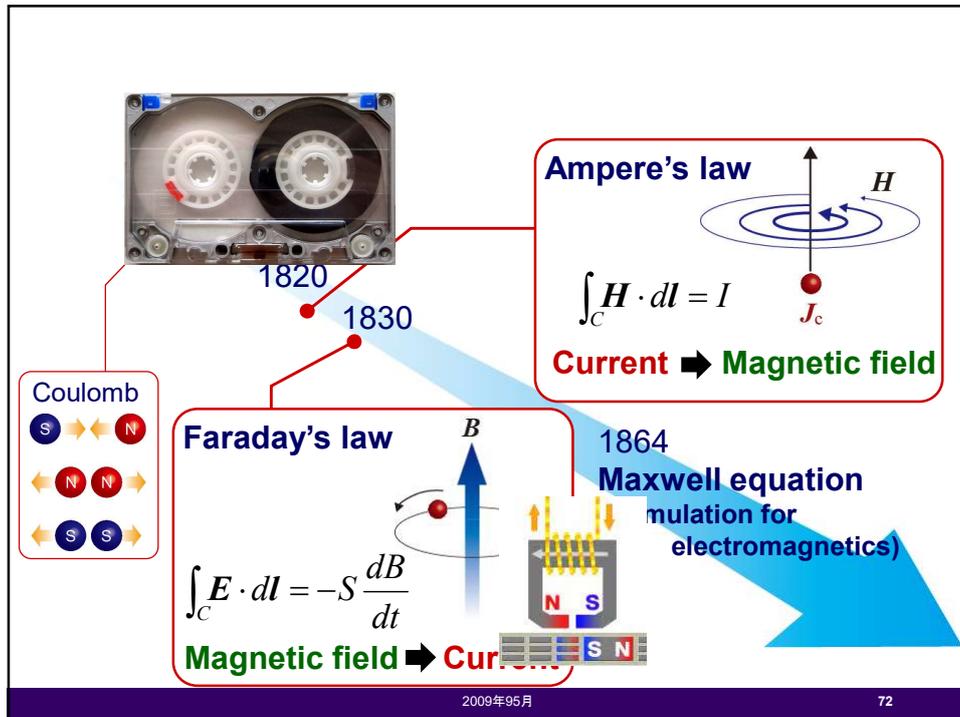
Nature
63 548 (2017)



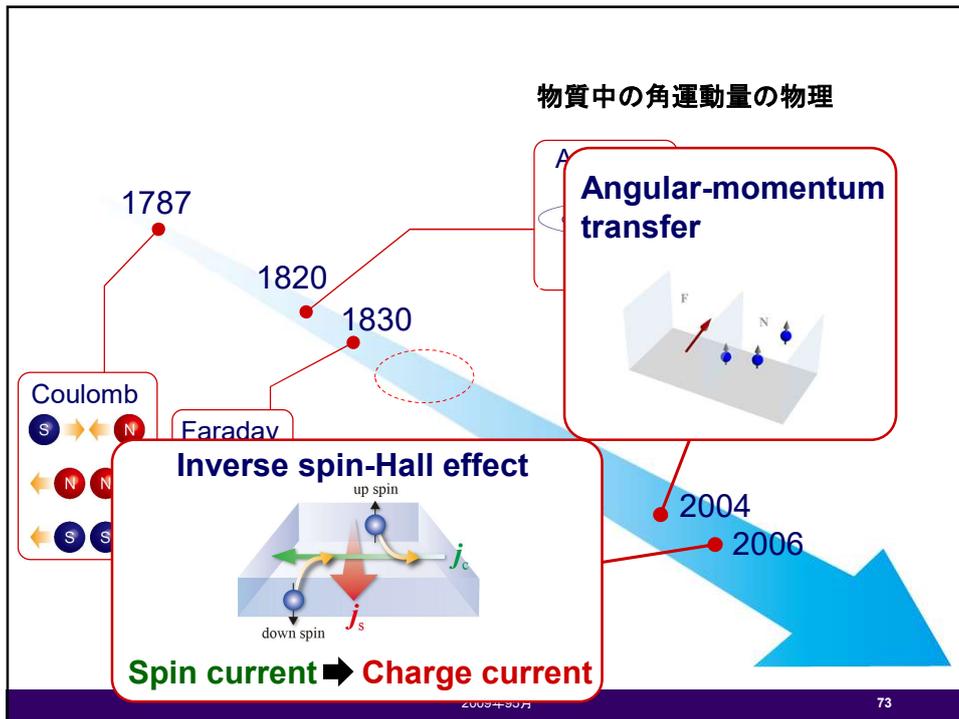
スピンドル → 弾性体トルク



71



72



73

74

謝辞：主な共同研究の皆様（敬称略）

<p>安藤 和也(現:慶應大学) 内田 健一(現:NIMS) 吉川 貴史(現:東京大学) 塩見 雄毅(現:東京大学) 針井 一哉(現:QST) Lustikova Jana(現:東北大学) 高橋 遼(現:お茶の水大学)</p>	<p>橋本 佑介(現:東北大学) 梶原 瑛祐(現:東芝研究所) 巻内 崇彦(東京大学) 廣部 大地(現:静岡大学) Zhiyong Qiu(現:大連大学) 桐原 明宏(NEC) 小野正雄 (JAEA)</p>	<p>前川 禎通(理化学研究所) Gerrit Bauer(東北大学) 松尾 衛(現:中国科学院大学) 安立 裕人(岡山大学) Jiang Xiao(復旦大学) 高橋 三郎(東北大学) 多々良 源(理研) Yaroslav Tserkovnyak (UCLA)</p>
---	--	--

74

74