巨視的回転運動を用いたスピン依存伝導の制御

松尾 衛[1,2]

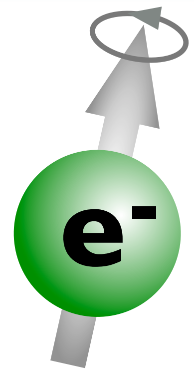
家田淳一[1,2], 針井一哉[1,2], 齊藤英治[1,2,3,4], 前川禎通[1,2]



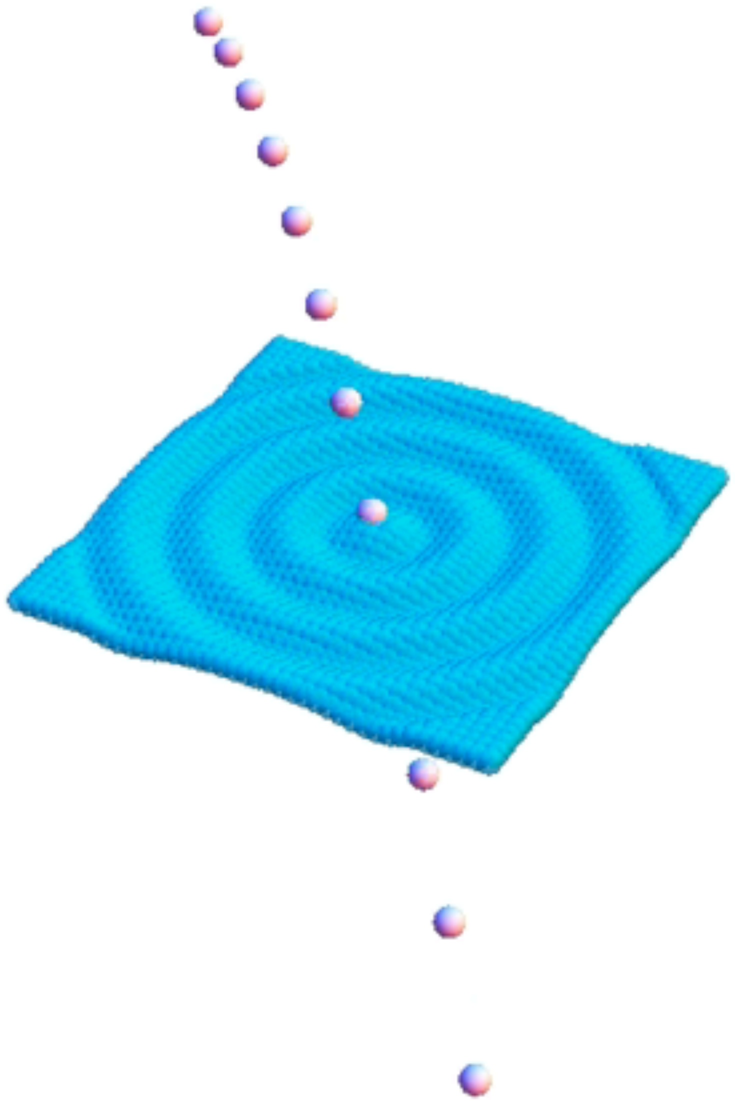

[1]ASRC-JAEA, [2]JST-CREST, [3]IMR-Tohoku Univ., [4]WPI -Tohoku Univ.

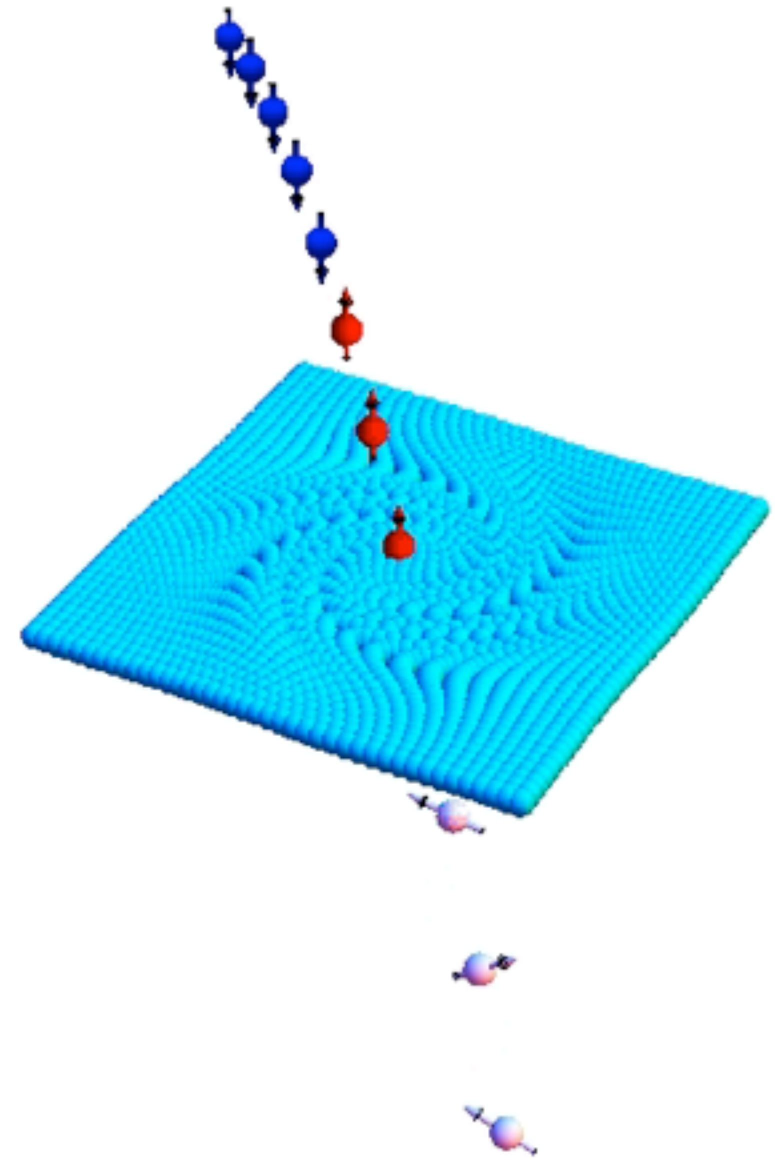
From mechatronics to “spin-mechatronics”

電荷 = 電気の起源



スピン = 磁気の起源





電流と力学運動

従来のモーター・発電機

スピン流と力学運動

スピン角運動量を直接利用する
ナノスケールのモーター・発電機

Outline

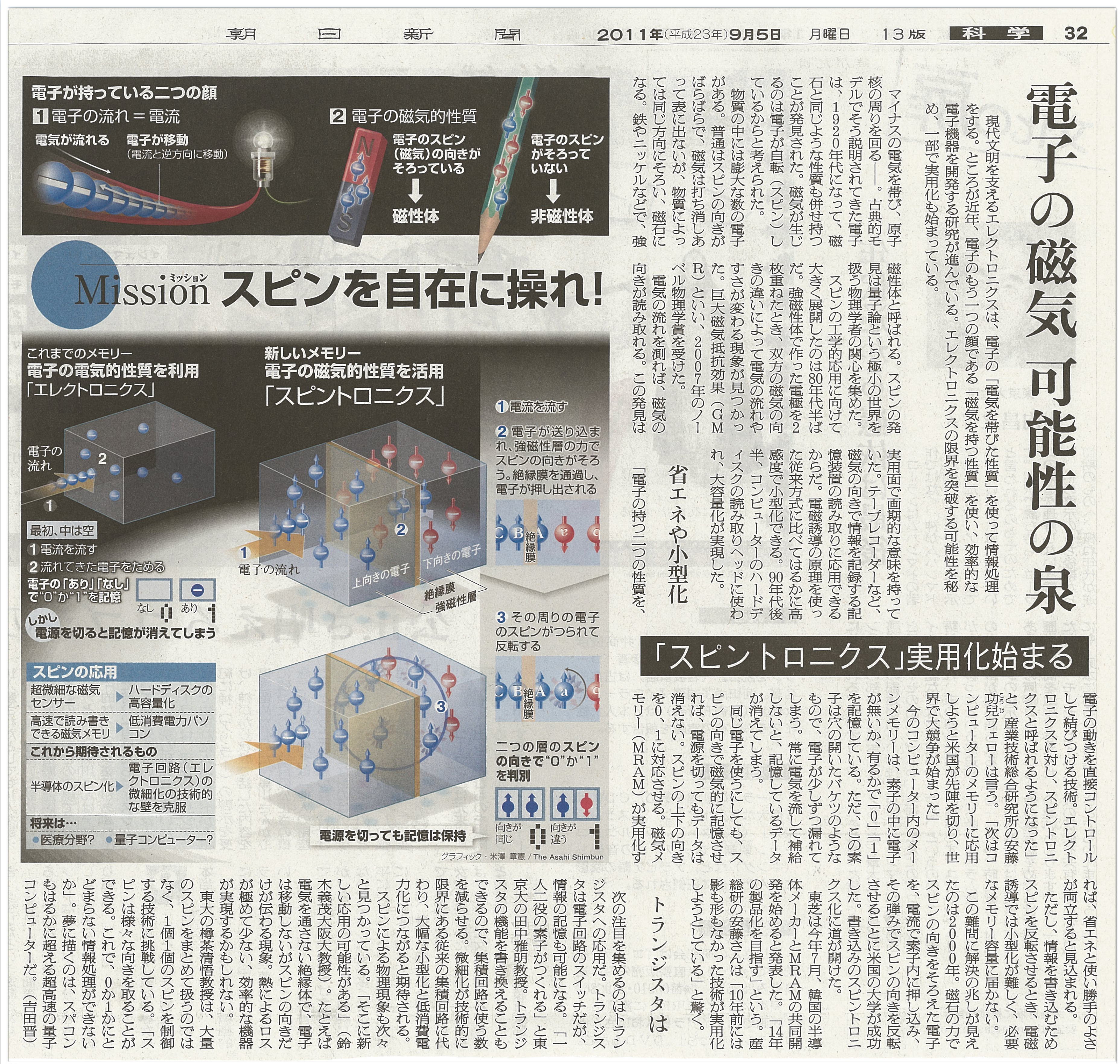
Spintronics and spin current

Magnetism and mechanical rotation

Spin current generation from

rigid and elastic motion

ASAHI Shinbun, 2011/9/5



朝日新聞　2011年（平成23年）9月5日　月曜日　13版　科学　32

電子の磁気 可能性の泉

現代文明を支えるエレクトロニクスは、電子の「電気を帯びた性質」を使って情報処理をする。ところが近年、電子のもう一つの顔である「磁気を持つ性質」を使い、効率的な電子機器を開発する研究が進んでいる。エレクトロニクスの限界を突破する可能性を秘め、一部で実用化も始まっている。

マイナスの電気を帯び、原子核の周りを回る――。古典的モデルでそう説明されてきた電子は、1920年代になって、磁石と同じような性質も併せ持つことが発見された。磁気が生じるのは電子が自転（スピン）しているからと考えられた。

物質の中には膨大な数の電子がある。普通はスピンの向きがばらばらで、磁気は打ち消しあって表に出ないが、物質によっては同じ方向にそろい、磁石になる。鉄やニッケルなどで、強磁性体と呼ばれる。スピンの発見は量子論という極小の世界を扱う物理学者の関心を集めた。

スピンの工学的応用に向けて大きく展開したのは80年代半ばだ。強磁性体で作った電極を2枚重ねたとき、双方の磁気の向きの違いによって電気の流れやすさが変わる現象が見つかった。巨大磁気抵抗効果（GMR）といい、2007年のノーベル物理学賞を受けた。

電気の流れを測れば、磁気の向きが読み取れる。この発見は実用面で画期的な意味を持っていた。テープレコーダーなど、磁気の向きで情報を記録する記憶装置の読み取りに応用できるからだ。電磁誘導の原理を使った従来方式に比べてはるかに高感度で小型化できる。90年代後半、コンピューターのハードディスクの読み取りヘッドに使われ、大容量化が実現した。

省エネや小型化

「電子の持つ二つの性質を、電子の動きを直接コントロールして結びつける技術。エレクトロニクスに対し、スピントロニクスと呼ばれるようになった」と、産業技術総合研究所の安藤功児フェローは言う。「次はコンピューターのメモリーに応用しようと米国が先陣を切り、世界で大競争が始まった」

今のコンピューター内のメーンメモリーは、素子の中に電子が無いか、有るかで「0」「1」を記憶している。ただ、この素子は穴の開いたバケツのようなもので、電子が少しずつ漏れてしまう。常に電気を流して補給しないと、記憶しているデータが消えてしまう。

同じ電子を使うにしても、スピンの向きで磁気的に記憶させれば、電源を切ってもデータは消えない。スピンの上下の向きを0、1に対応させる。磁気メモリー（MRAM）が実用化すれば、省エネと使い勝手のよさが両立すると見込まれる。

ただし、情報を書き込むためスピンを反転させるとき、電磁誘導では小型化が難しく、必要なメモリー容量に届かない。

この難問に解決の兆しが見えたのは2000年。磁石の力でスピンの向きをそろえた電子を、電流で素子内に押し込み、その弾みでスピンの向きを反転させることに米国の大学が成功した。書き込みのスピントロニクス化に道が開けた。

東芝は今年7月、韓国の半導体メーカーとMRAMの共同開発を始めると発表した。「14年の製品化を目指す」という。産総研の安藤さんは「10年前には影も形もなかった技術が実用化しようとしている」と驚く。

「スピントロニクス」実用化始まる

トランジスタは

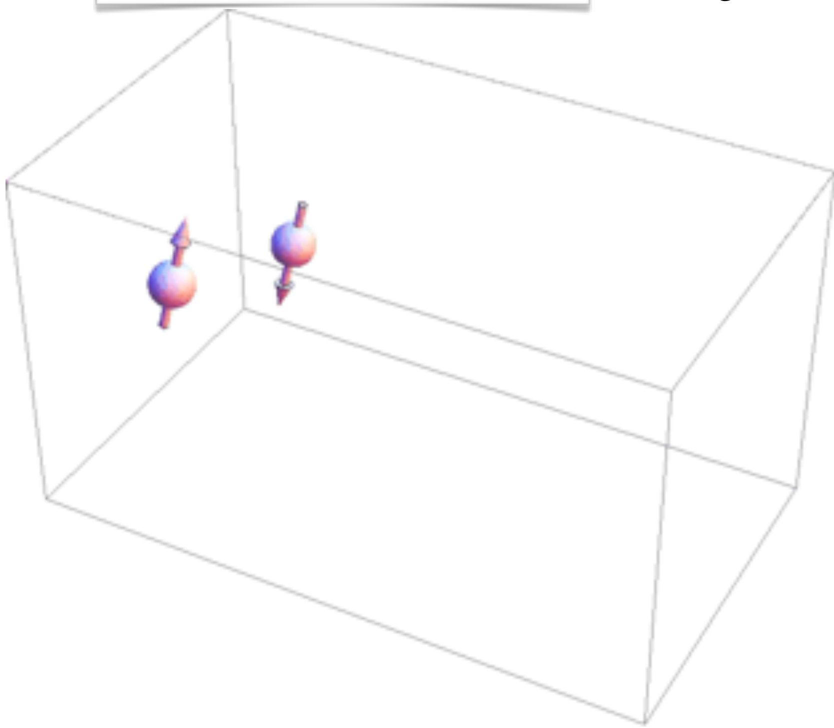
次の注目を集めるのはトランジスタへの応用だ。トランジスタは電子回路のスイッチだが、情報の記憶も可能になる。「一人二役の素子がつくれる」と東京大の田中雅明教授。トランジスタの機能を書き換えることもできるので、集積回路に使う数を減らせる。微細化が技術的に限界にある従来の集積回路に代わり、大幅な小型化と低消費電力化につながると期待される。

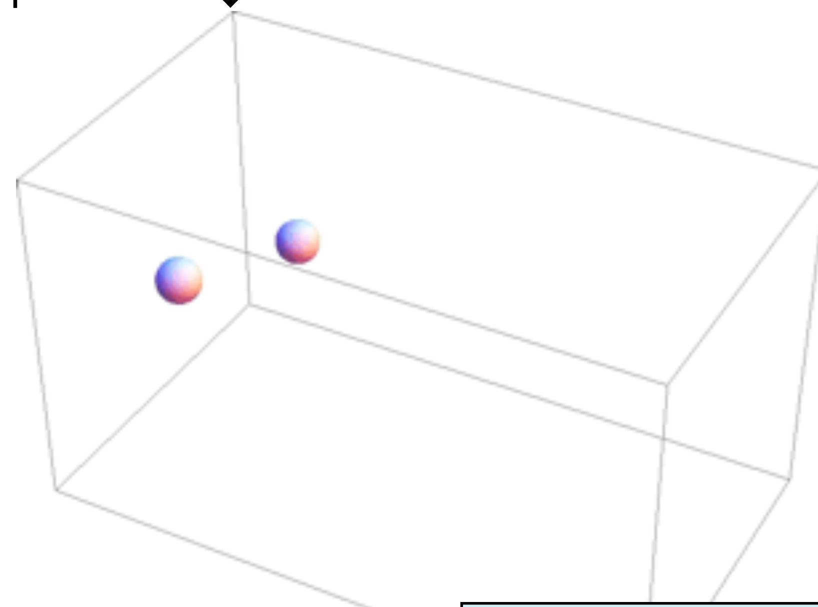
スピンによる物理現象も次々と見つかっている。「そこに新しい応用の可能性がある」（鈴木義茂大阪大教授）。たとえば電気を通さない絶縁体で、電子は移動しないがスピンの向きだけが伝わる現象。熱によるロスが極めて少ない、効率的な機器が実現するかもしれない。

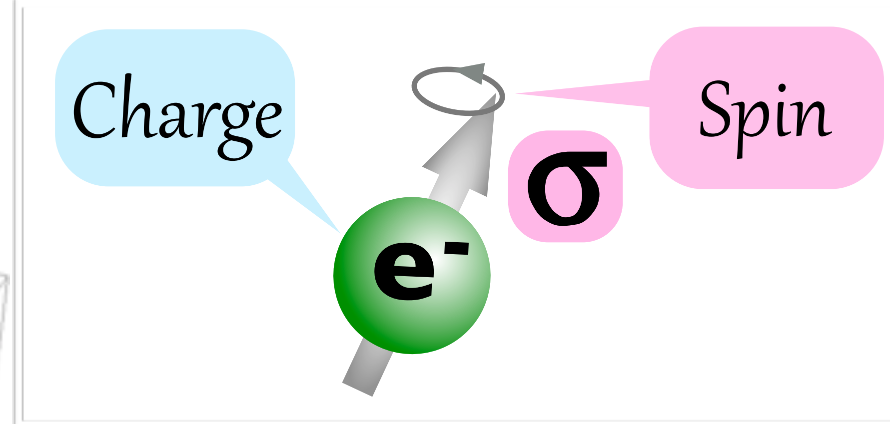
東大の樽茶清悟教授は、大量のスピンをまとめて扱うのではなく、1個1個のスピンを制御する技術に挑戦している。「スピンは様々な向きを取ることができる。これで、0か1かにとどまらない情報処理ができないか」。夢に描くのは、スパコンもはるかに超える超高速の量子コンピューターだ。（吉田晋）

Charge and spin currents

Charge current $J_c = J_\uparrow + J_\downarrow$

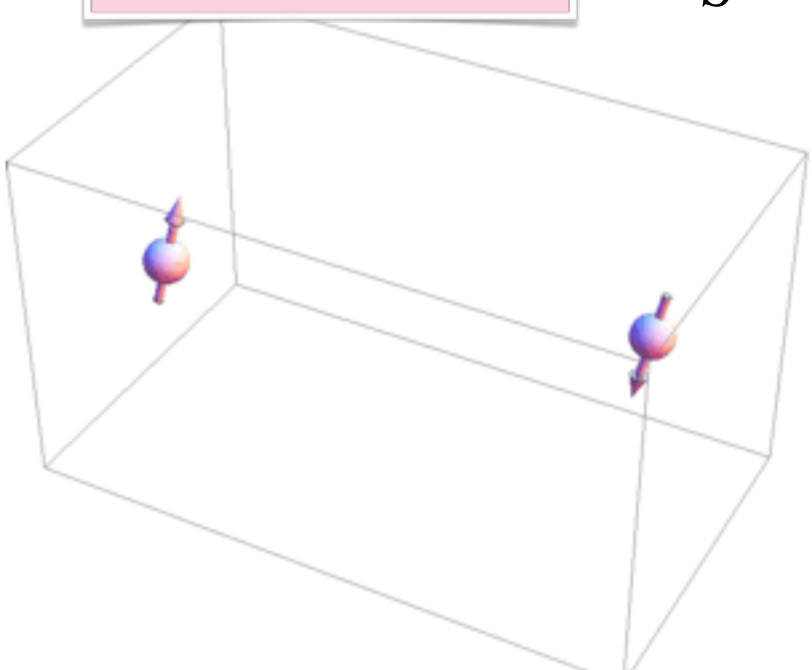


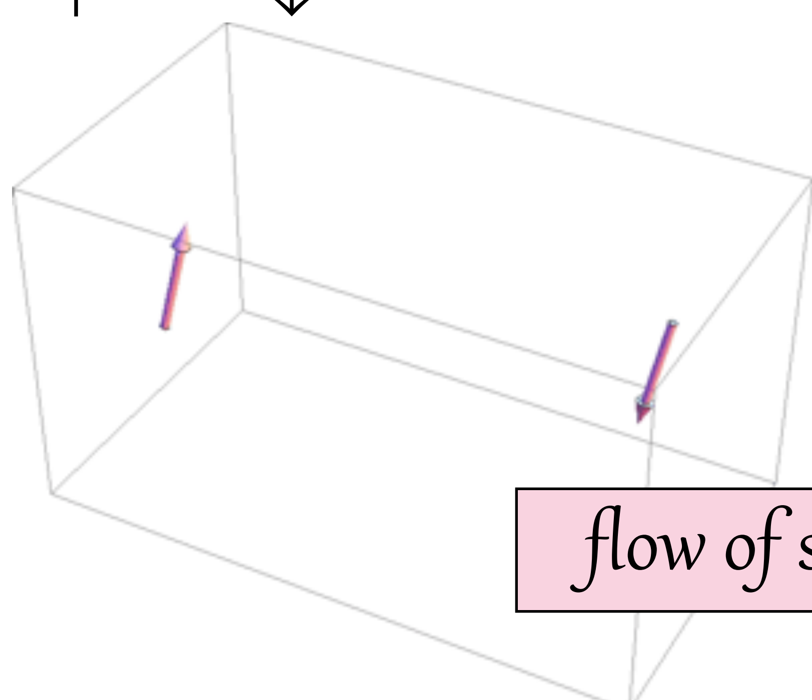


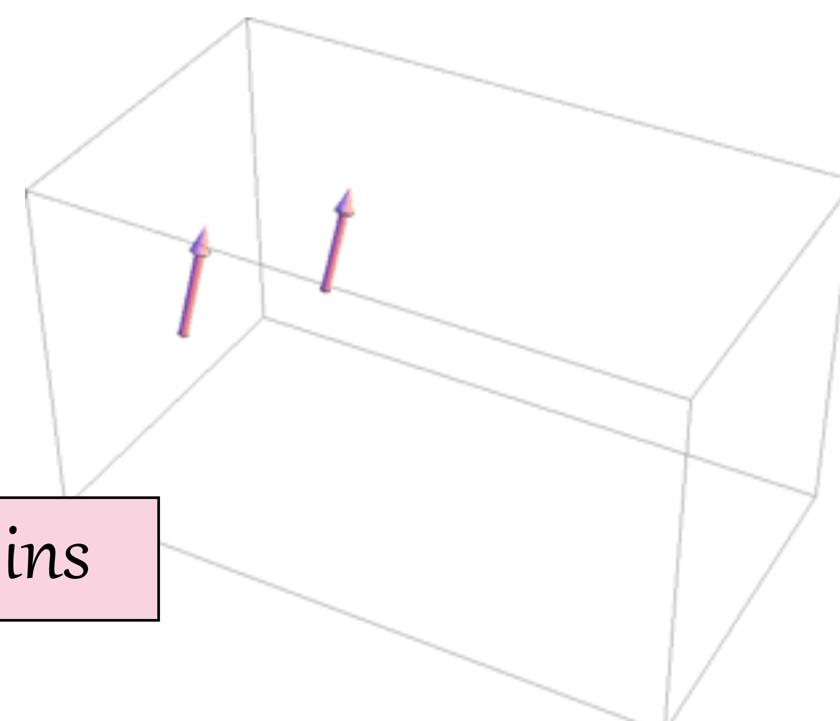


flow of charges

Spin current $J_S = J_\uparrow - J_\downarrow$





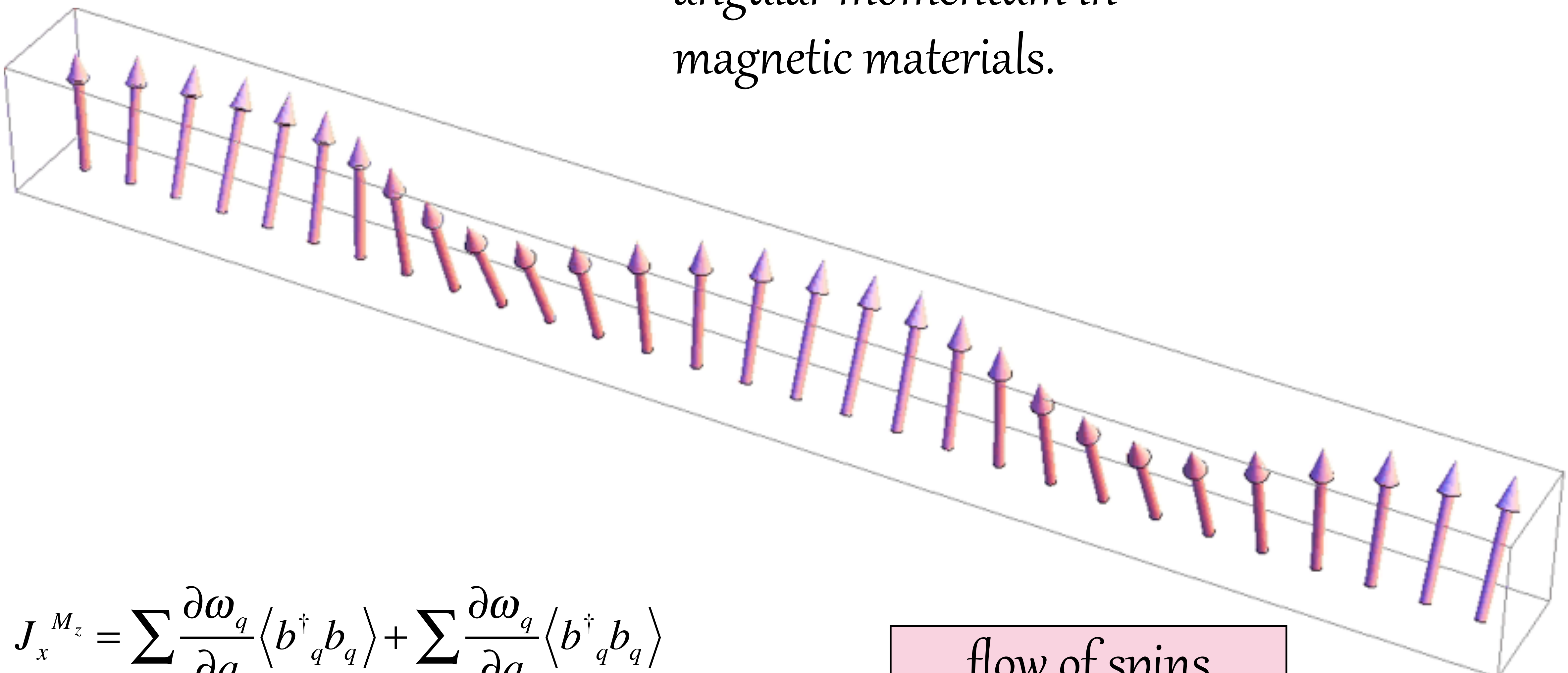


flow of spins

Spin wave spin current

Spin wave spin current

Spin wave carries angular momentum in magnetic materials.

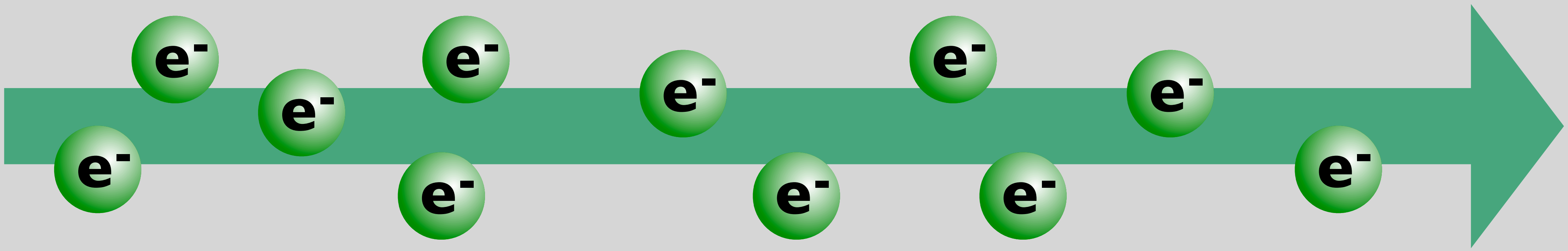


$$J_x^{M_z} = \sum_{q>0} \frac{\partial \omega_q}{\partial q} \left\langle b^\dagger{}_q b_q \right\rangle + \sum_{q<0} \frac{\partial \omega_q}{\partial q} \left\langle b^\dagger{}_q b_q \right\rangle$$

flow of spins

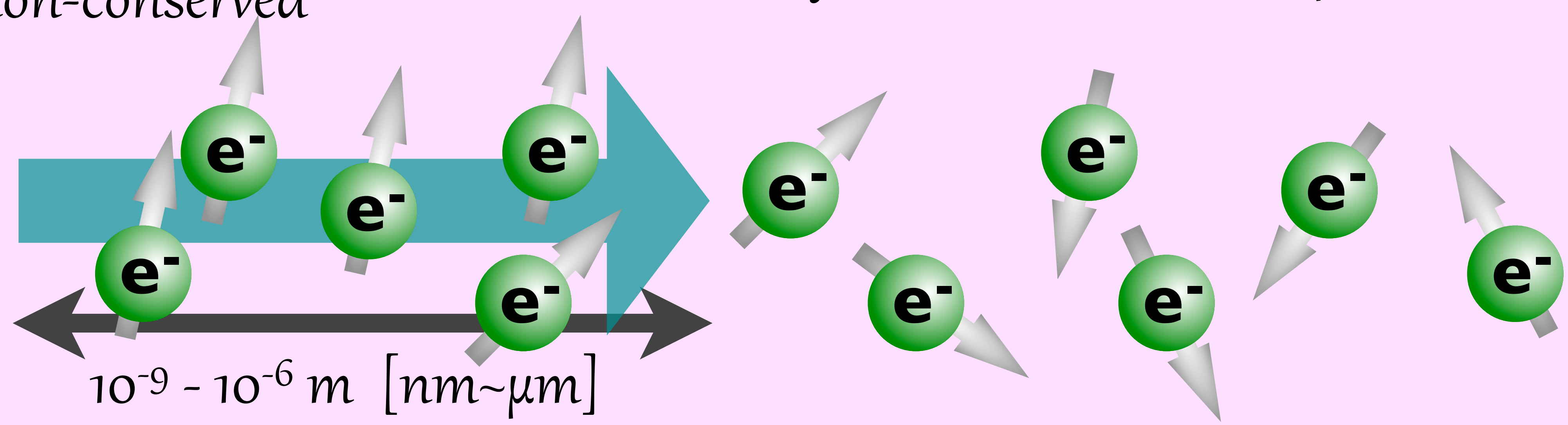
Spin current is fragile

Charge current: conserved → can travel infinite distance



Easy to control → Electronics in 20th century

Spin current: non-conserved → can travel only short distance [nm~μm]

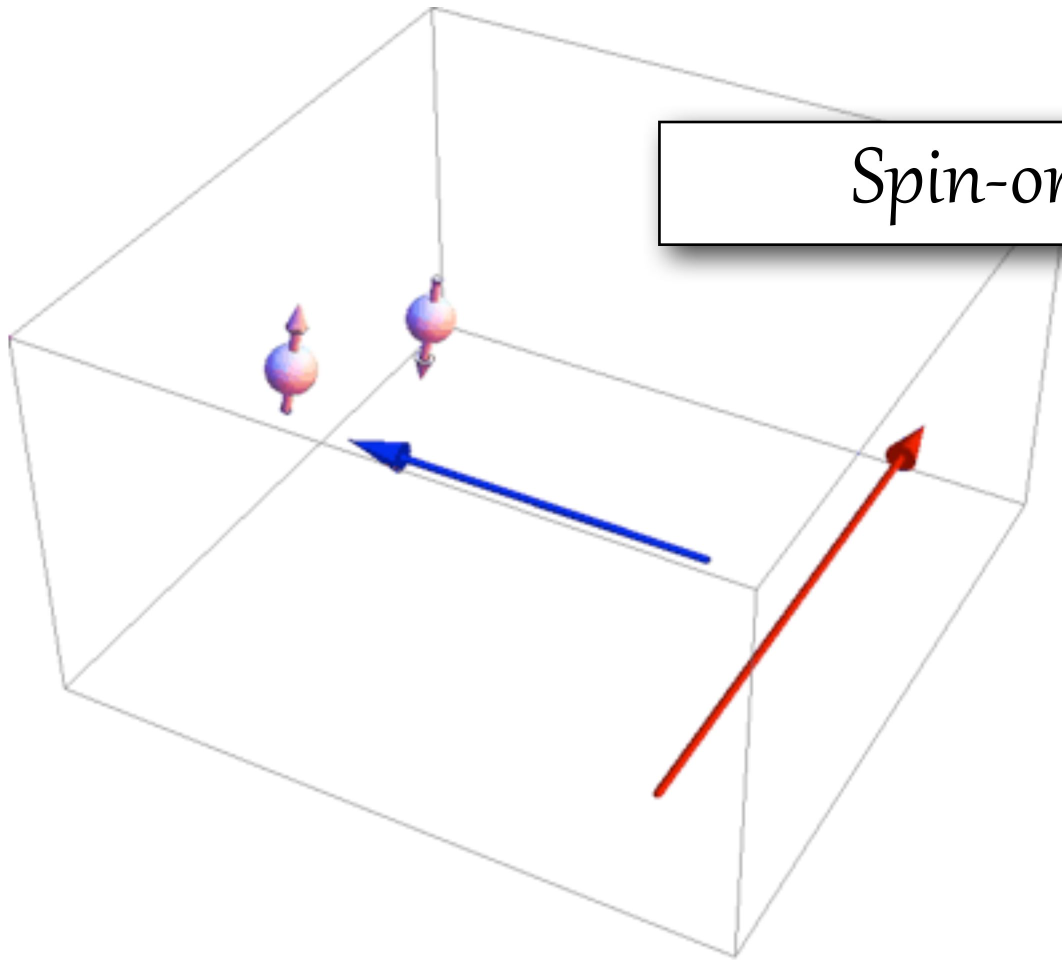


Need nanotechnology → Spintronics in 21st century

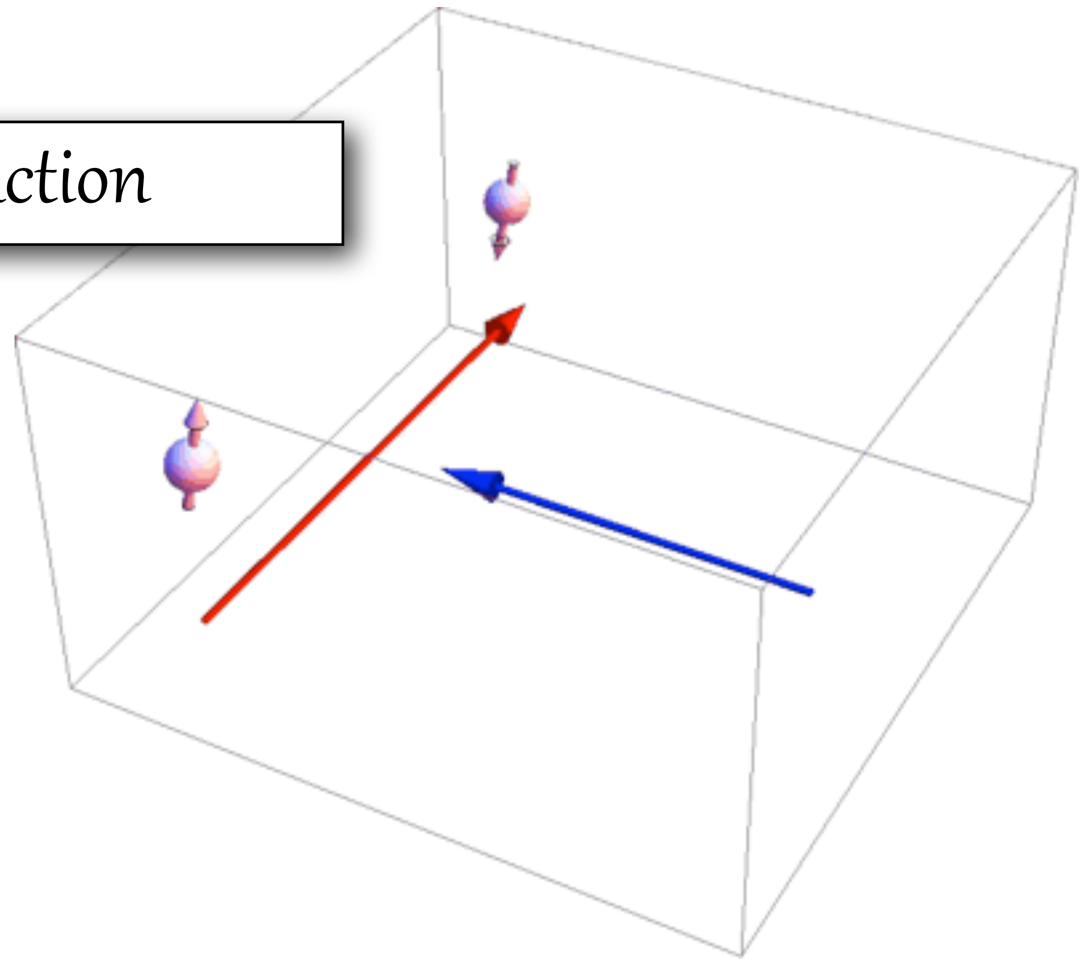
Spin Hall Effect / Inverse Spin Hall Effect

Spin Hall Effect

Inverse Spin Hall Effect



Spin-orbit interaction



charge current

→ spin current

GaAs; MOKE

Y.K. Kato et al, Science (2004)

Spin current

→ charge current

Pt; FMR

E. Saitoh et al, APL (2006)

Transmission of electrical signals in insulator

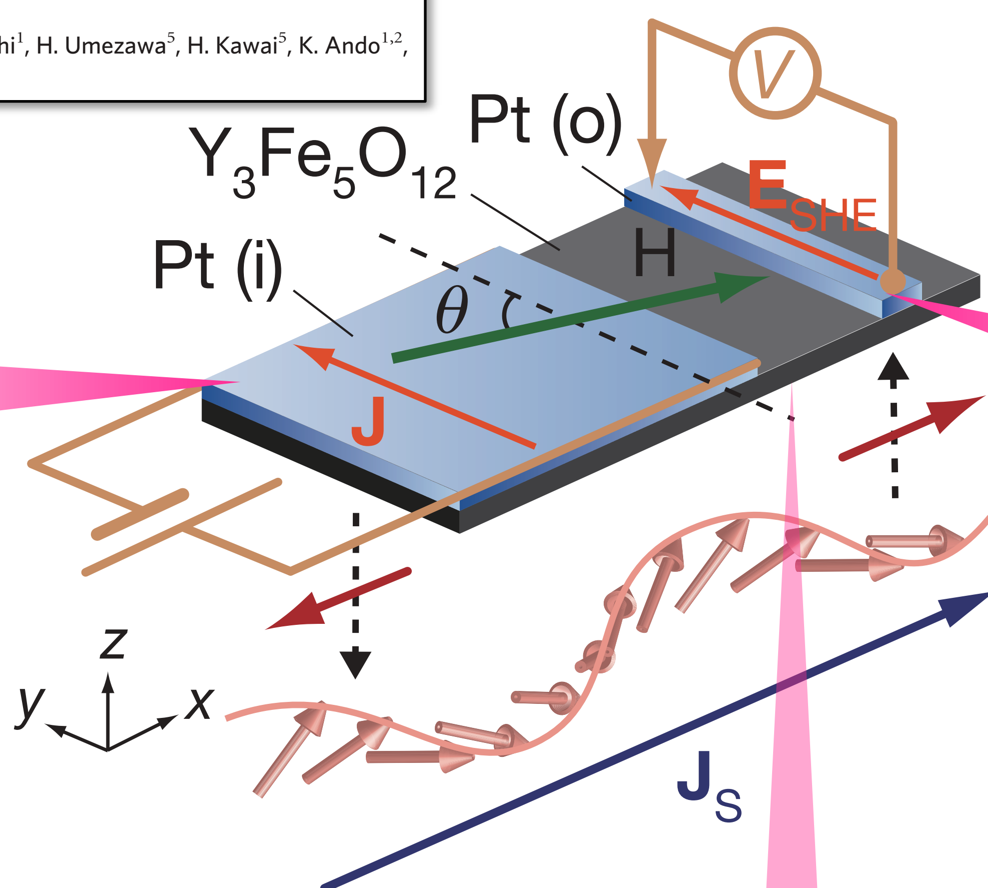
nature Vol 464 | 11 March 2010 | doi:10.1038/nature08876

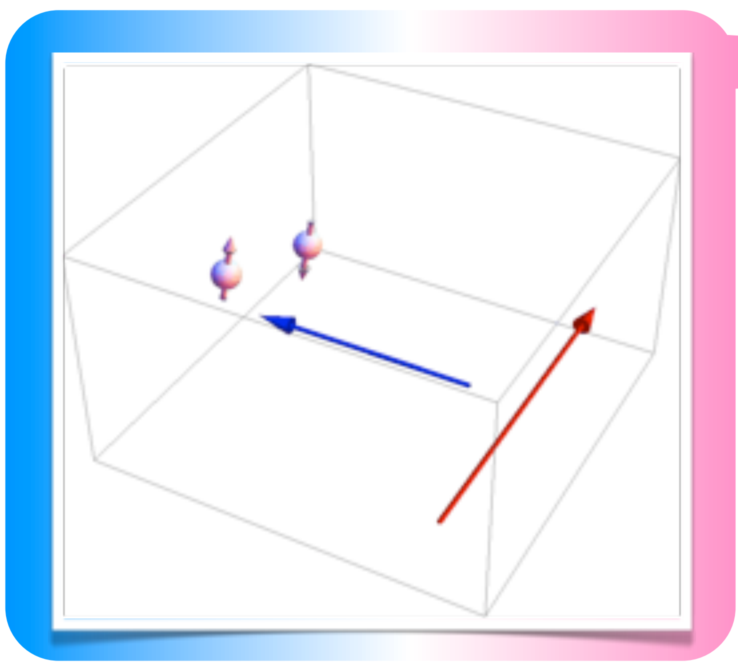
LETTERS

Transmission of electrical signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator

Y. Kajiwara[1,2], K. Harii[1], S. Takahashi[1,3], J. Ohe[1,3], K. Uchida[1], M. Mizuguchi[1], H. Umezawa[5], H. Kawai[5], K. Ando[1,2], K. Takanashi[1], S. Maekawa[1,3] & E. Saitoh[1,2,4]

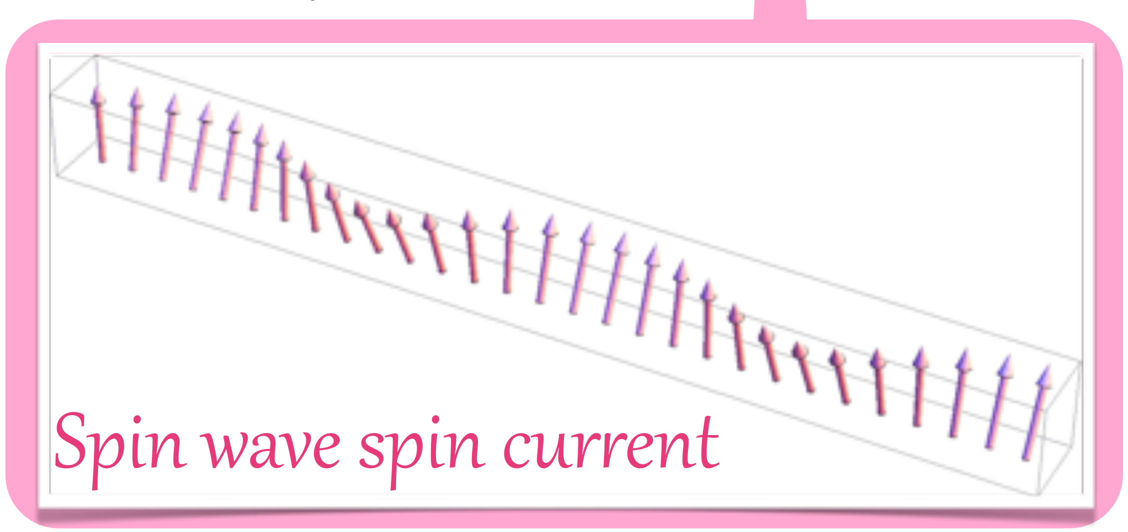
Kajiwara et al, Nature (2010)

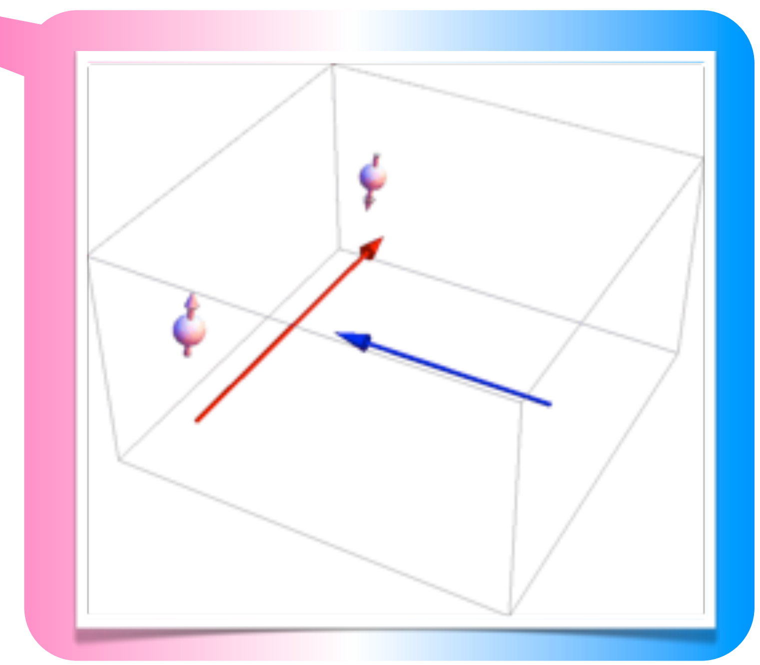




charge current

→ spin current





Spin current

→ charge current

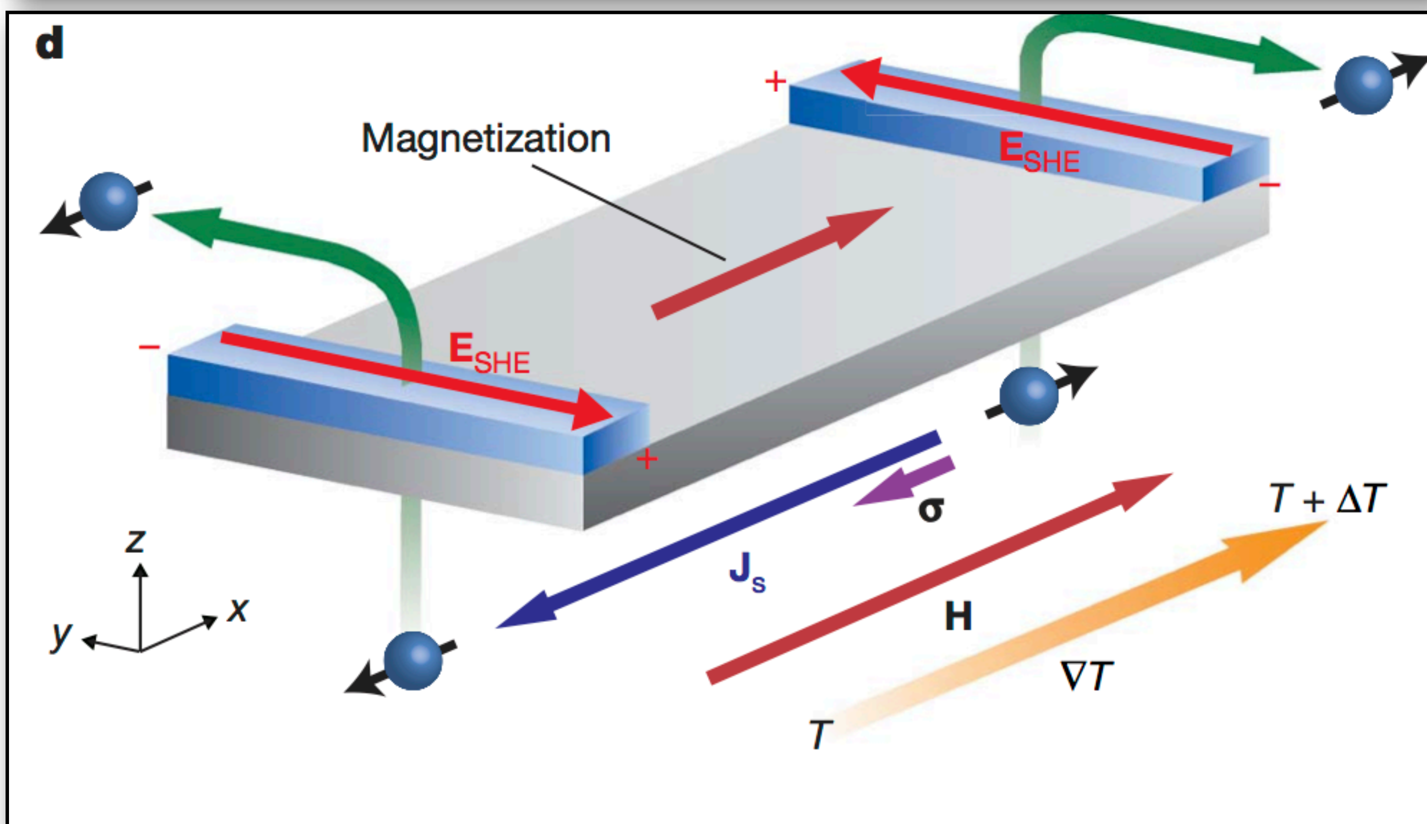
Spin Seebeck Effect

nature Vol 455 | 9 October 2008 | doi:10.1038/nature07321

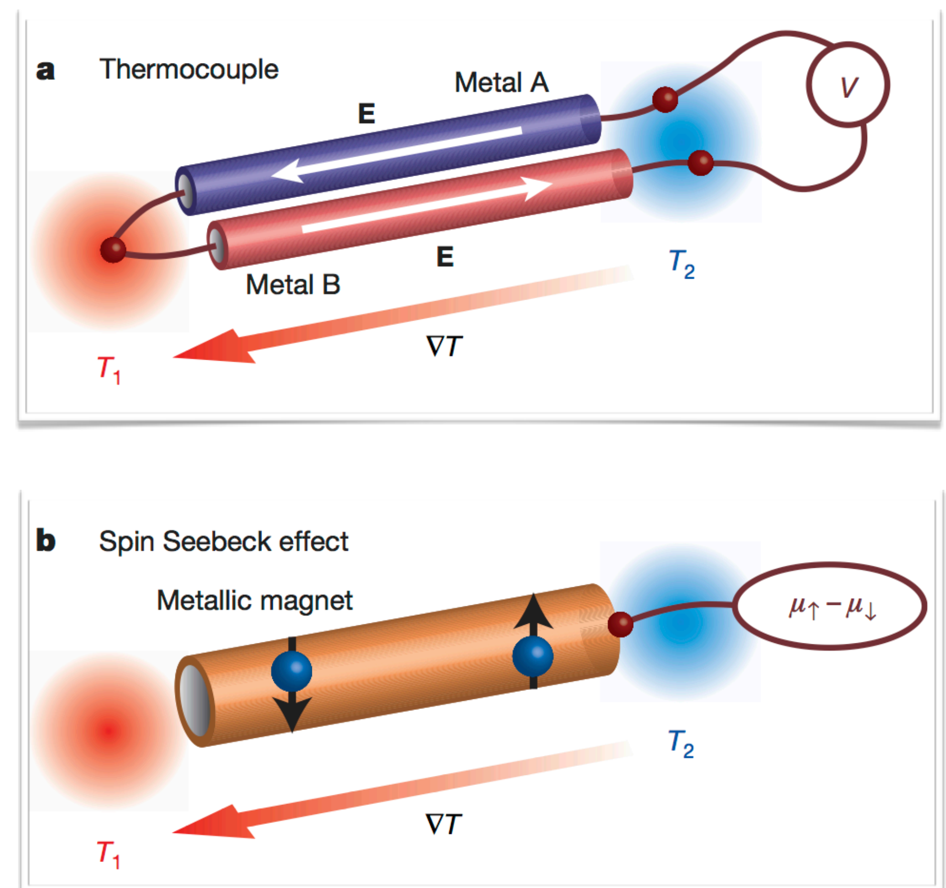
LETTERS

Observation of the spin Seebeck effect

K. Uchida[1], S. Takahashi[2,3], K. Harii[1], J. Ieda[2,3], W. Koshibae[4], K. Ando[1], S. Maekawa[2,3] & E. Saitoh[1,5]



Uchida et al, Nature (2008)



Temperature gradient → Magnetization dynamics →Spin current→(Inverse Spin Hall Effect)→Charge current

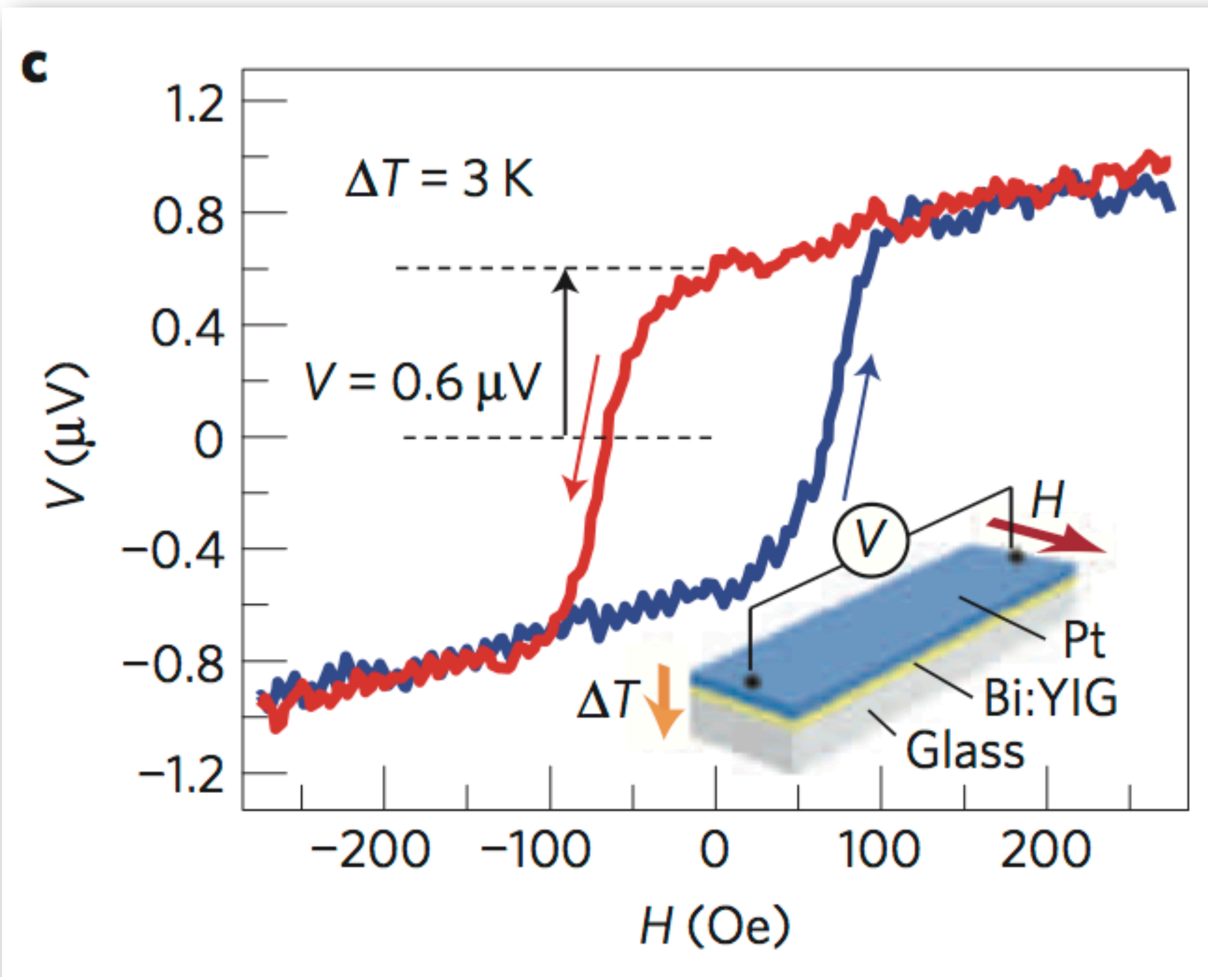
Energy Harvesting by Spin Seebeck Effect

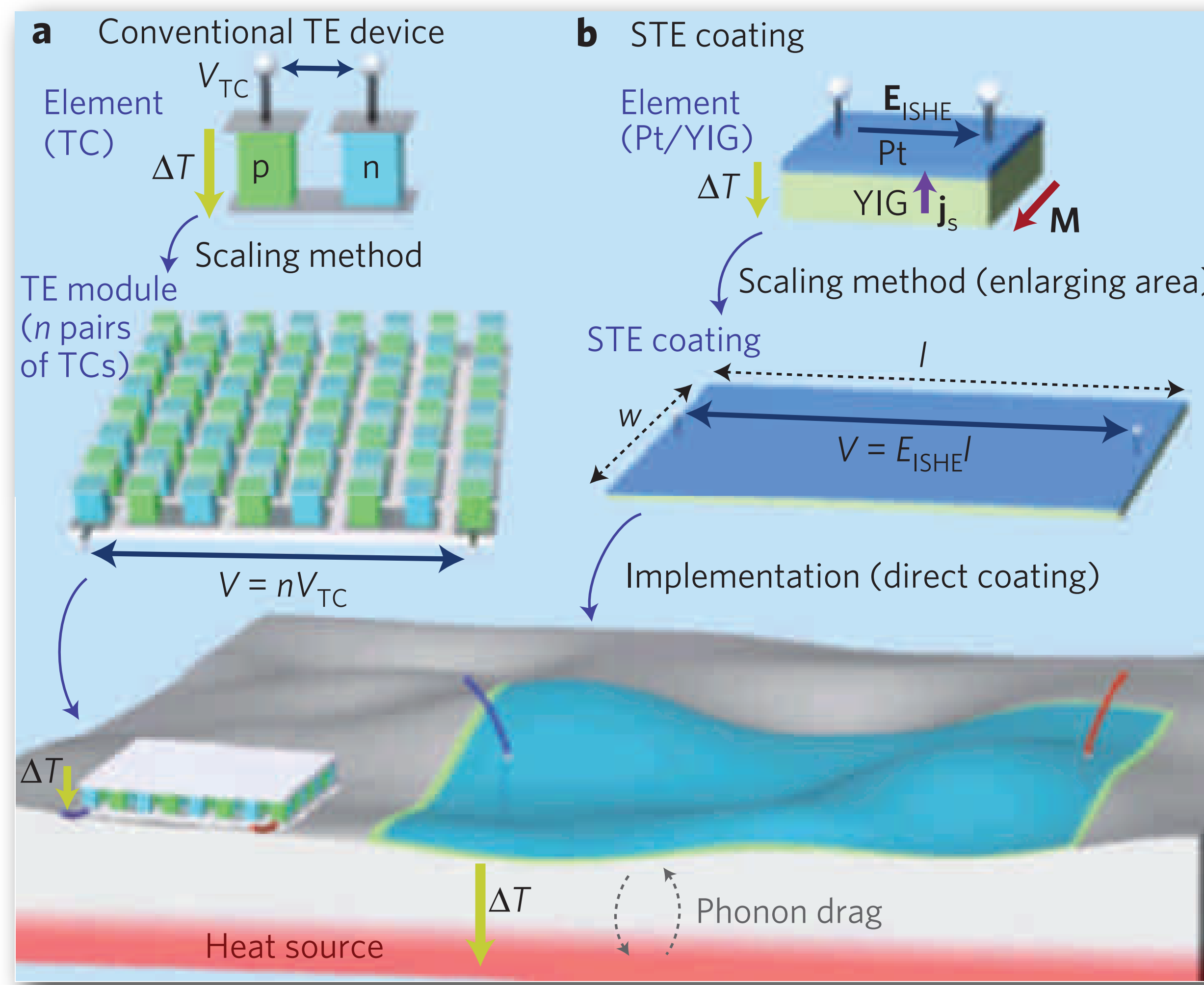
LETTERS
PUBLISHED ONLINE: 17 JUNE 2012 | DOI: 10.1038/NMAT3360
nature materials

Spin-current-driven thermoelectric coating

Akihiro Kirihara[1]*, Ken-ichi Uchida[2,3], Yosuke Kajiwara[2,3], Masahiko Ishida[1], Yasunobu Nakamura[1†], Takashi Manako[1], Eiji Saitoh[2,3,4,5] and Shinichi Yorozu[1]

NEC





Spin Transfer Torque MRAM

TOSHIBA
Leading Innovation >>>

Press release on 2012/12/10

世界最高の低消費電力性能を実現した新方式の不揮発性磁性体メモリ（STT-MRAM）を開発

— 高性能モバイルプロセッサの消費電力を３分の１に低減 —

2012年12月10日

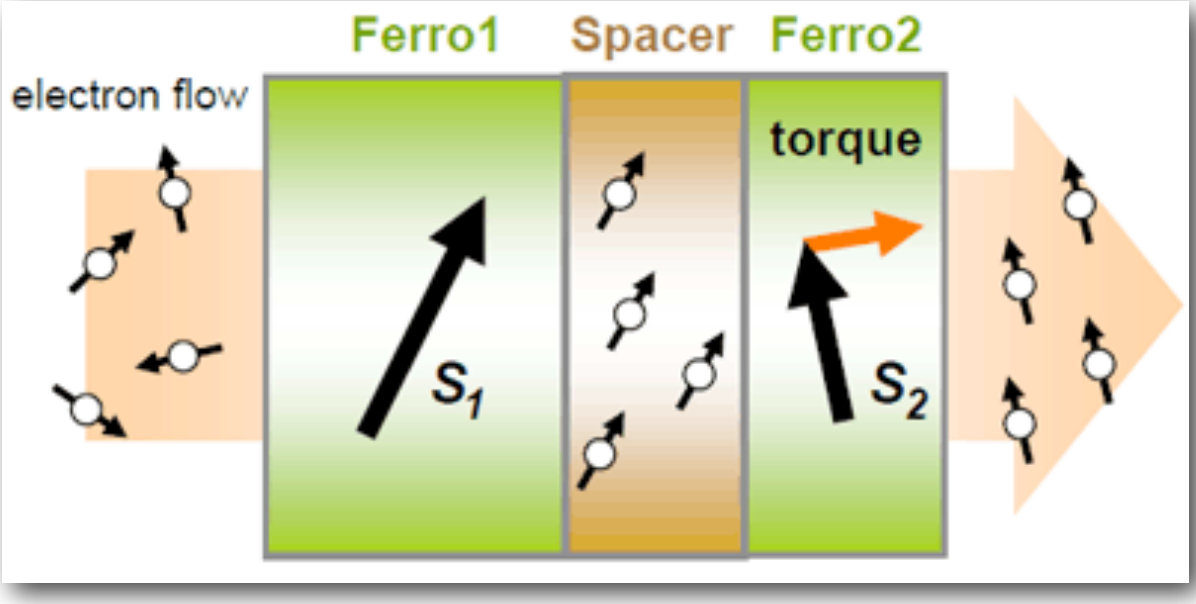
当社は、スマートフォンやタブレットなどに搭載されているモバイルプロセッサ用キャッシュメモリ向けに、世界最高 注1 の低消費電力性能 注2 を実現した新方式の不揮発性磁性体メモリ（STT-MRAM 注3）を開発しました。新開発のSTT-MRAMは、世界で初めて 注1、キャッシュメモリに適用されているSRAMよりも低消費電力での動作を実現しました。さらに、新型STT-MRAMのキャッシュメモリを搭載したプロセッサ用の高精度シミュレータを開発し、実際にプロセッサ上でソフトを動作させた際の消費電力が、標準的なモバイル向けプロセッサと比較して3分の1程度に低減できたという計算結果を示しました。

今回開発したのは、垂直磁化方式 注4 のSTT-MRAMをベースに、メモリ構造を改良すると同時に、30nm以下まで素子の微細化を進めた新方式のSTT-MRAMです。従来のSTT-MRAMでは、省電力化と速度向上は二律背反の関係にありましたが、新開発のSTT-MRAMは、消費電力を下げつつ、同時に動作速度を上げることに初めて成功し、動作時の電力消費量を従来 注5 の10分の１程度に低減しました。さらに、メモリから漏れ出す電流（リーク電流）のパスが無い回路を新たに設計することで、動作状態でも待機状態でも、リーク電流が常にゼロになるノーマリオフ回路構造を実現しました。

モバイルプロセッサは、高性能化に伴い内部のSRAM(主にキャッシュメモリ)の容量も増大しており、動作状態と待機状態それぞれのメモリのリーク電流に起因する電力消耗の増加が課題でした。SRAMの代替メモリとしてMRAMが検討されていますが、これまで開発されてきたMRAMは、不揮発性のため待機状態でのリーク電流は減るものの、動作状態での電力が非常に大きく、結果的にSRAMより消費電力が大きくなるという問題があり、これがプロセッサ適用の障壁となっていました。

当社は今回、SRAMの代替となり得る高速化と低消費電力化を両立したSTT-MRAMを開発することで、プロセッサの電力削減の可能性を示すとともに、今後も開発した新型STT-MRAMにさらに改良を加えるなど、実用化に向け研究開発を加速していきます。
なお、本技術は、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）のノーマリオフコンピューティング基盤技術開発プロジェクトの成果を含んでおり、12月10日から米国サンフランシスコで開催されるIEEEの電子素子に関する国際学会「IEDM」にて、現地時間の12月11日と12日に合わせて3件の論文にて発表します。

Spin Transfer Torque:
Spin current
→ torque on magnetization



[Taken from Prof. Miyazaki's website]

Spin-mechatronics project since 2010

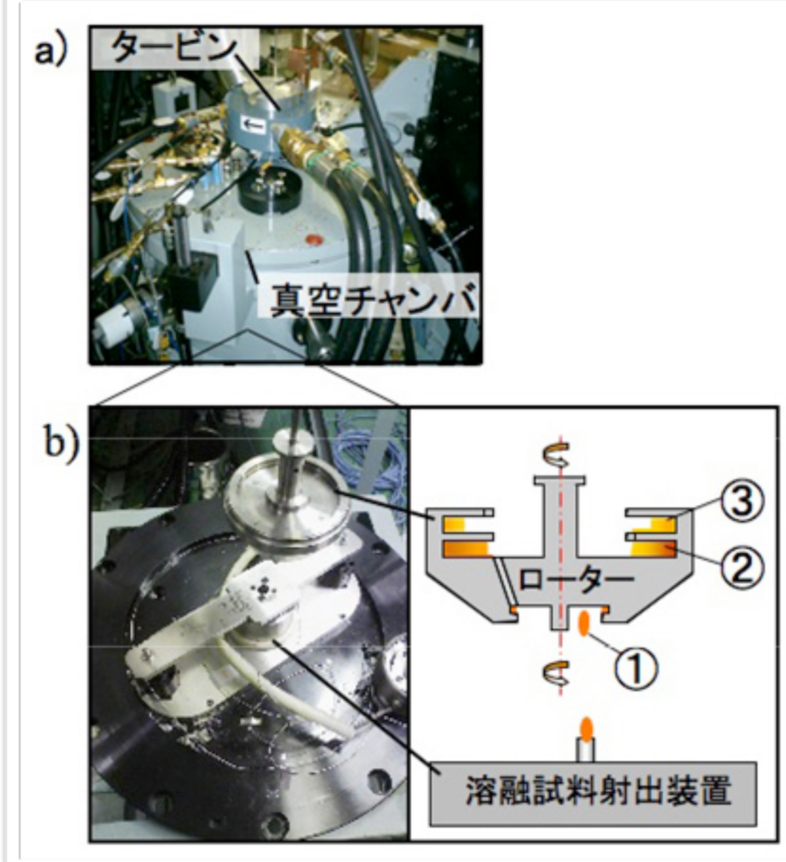
2010.4 From IMR-Tohoku Univ. to ASRC- JAEA

Prof. Maekawa
ASRC, Director General

"Reconsider Einstein-de Haas/Barnett effect
in terms of spin current
after an interval of one century."

Prof. Saitoh
IMR, WPI, Tohoku Univ.
"Spin-mechatronics group" in ASRC

"Spin current physics in accelerating frames!
But, what is the Hamiltonian?"



Ultra high-speed rotor
in ASRC:
Centrifuge of isotopes

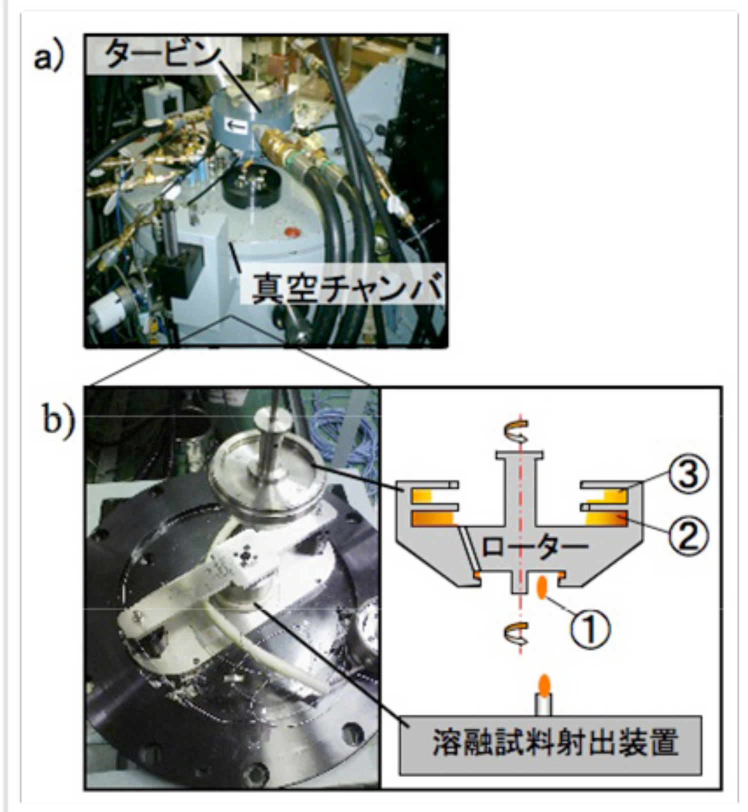
Rotation at 5kHz

5kHz-rotation as gravity

1 million G !! (@ 1 cm from rotation axis)

→Centrifugal force destroys the rotor itself

$$r\Omega^2 = 0.01m \times \left(0.5 \times 2\pi \times 10^4 s^{-1}\right)^2$$
$$= 10^7 m/s \sim 10^6 G$$



Ultra high-speed rotor in ASRC[MAX:10kHz]

According to textbook on magnetism:
rotation/(gyromagnetic ratio) = "magnetic field"

10kHz-rotation as Magnetic field

Gyromagnetic ratio of electron: 1T~30GHz

5kHz→180nT

$$B = \Omega/\gamma_e$$

$$\gamma_e = \frac{e}{m} = 1.76 \times 10^{11} \mathrm{rad} \cdot \mathrm{s}^{-1} \cdot \mathrm{T}^{-1}$$

Geomagnetism in Tokyo

46,000 ± 50 nT

- Too small magnetic field?
- Rotation on spin currents?

We have two answers:

1. Spin current from rigid motion

   w/ spin-orbit interaction [Pt, GaAs]

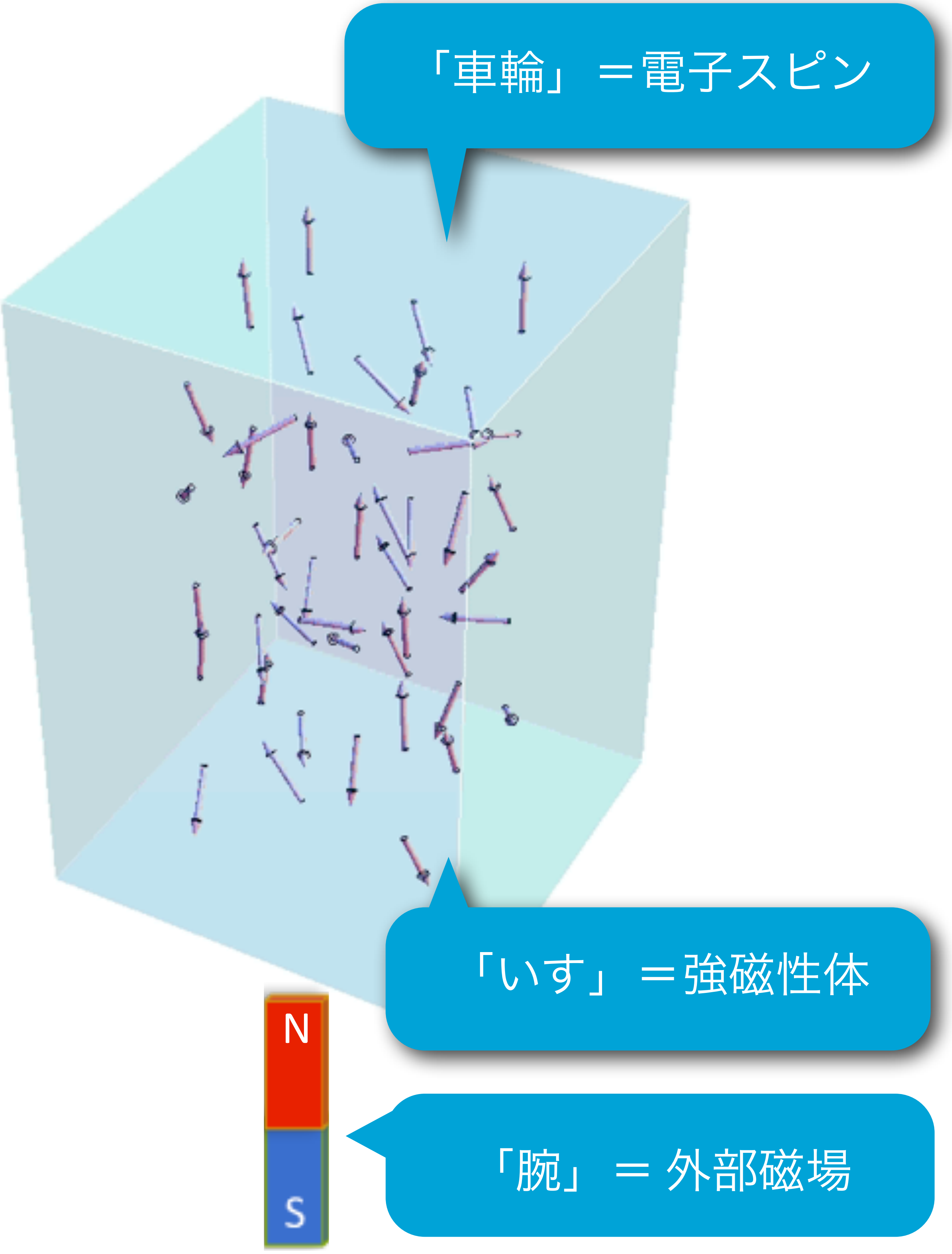
2. Spin current from elastic motion

   w/o spin-orbit interaction [Al, Cu]

Magnetism and mechanical rotation

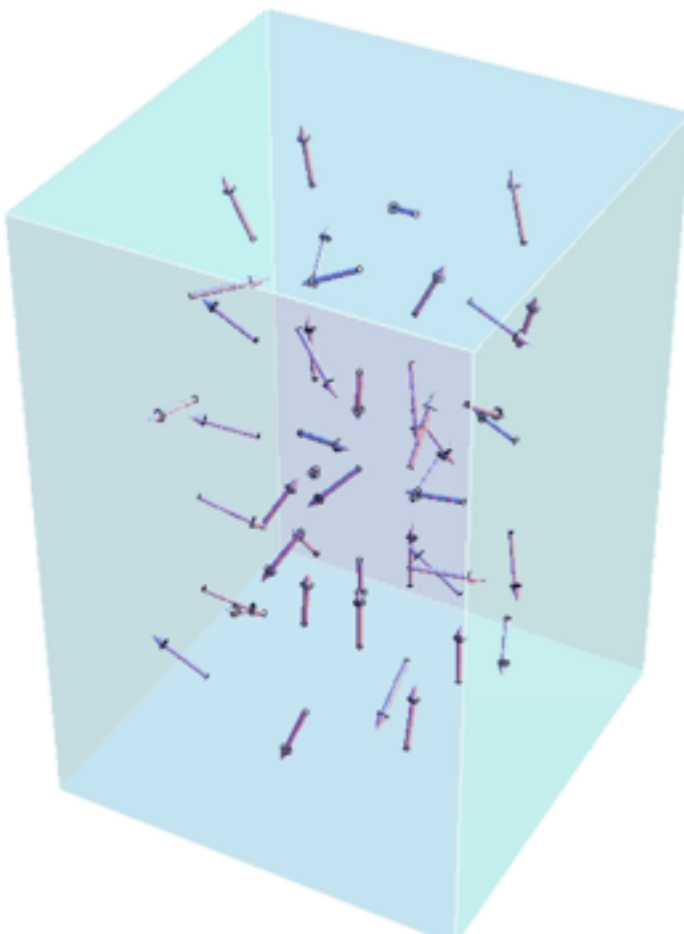
Spinning stool with wheel

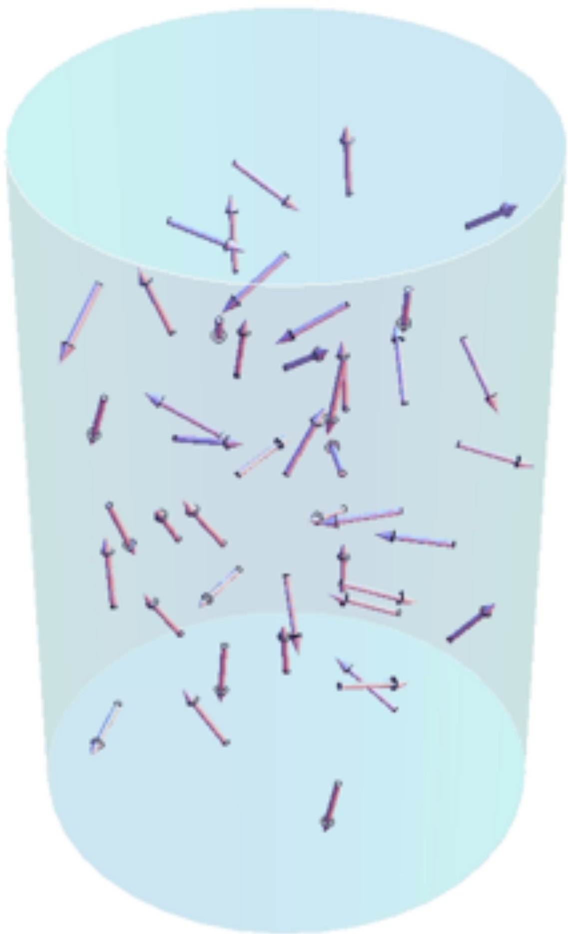
Einstein-de Haas (1915)

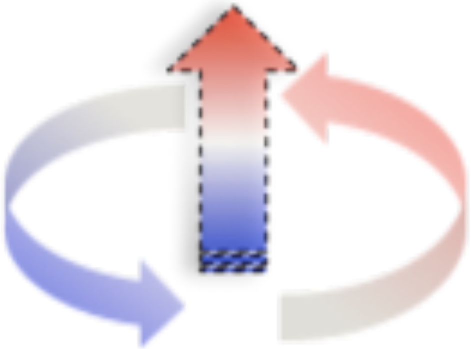


アインシュタインの思考実験　両手に１個ずつジャイロスコープを持ち，回転台の上に立つ，という思考実験によって，アインシュタインとド・ハースは，鉄の磁性の説明に成功した。腕を広げて，時計回りに回転するジャイロスコープを持つと，２つの角運動量が打ち消しあってゼロになる。次にジャイロスコープを頭上に持ち上げると，２つの角運動量が横並びになり，ゼロにならない。この系全体の角運動量は保存されるので，合計をゼロにするため回転台は回り始める。同様に，棒磁石内の鉄原子の電子軌道に磁場を加えて同方向に向かせると，磁石全体が回り始める（アインシュタインらの理論ではそうだったが，後に修正された）。

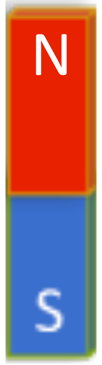
Magnetization by rotation: Barnett effect (1915)



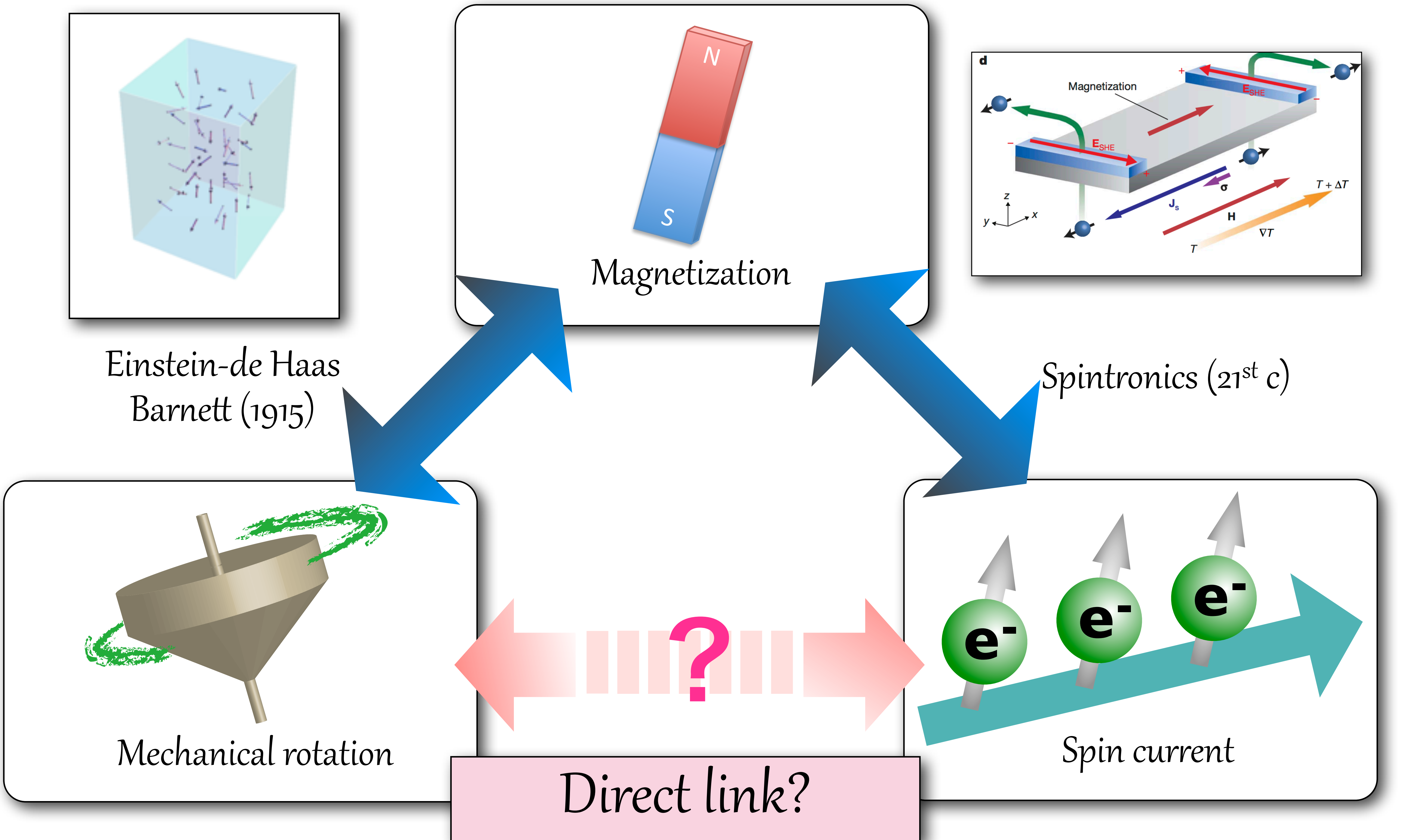




Rotation ~ Magnetic field



Motivation

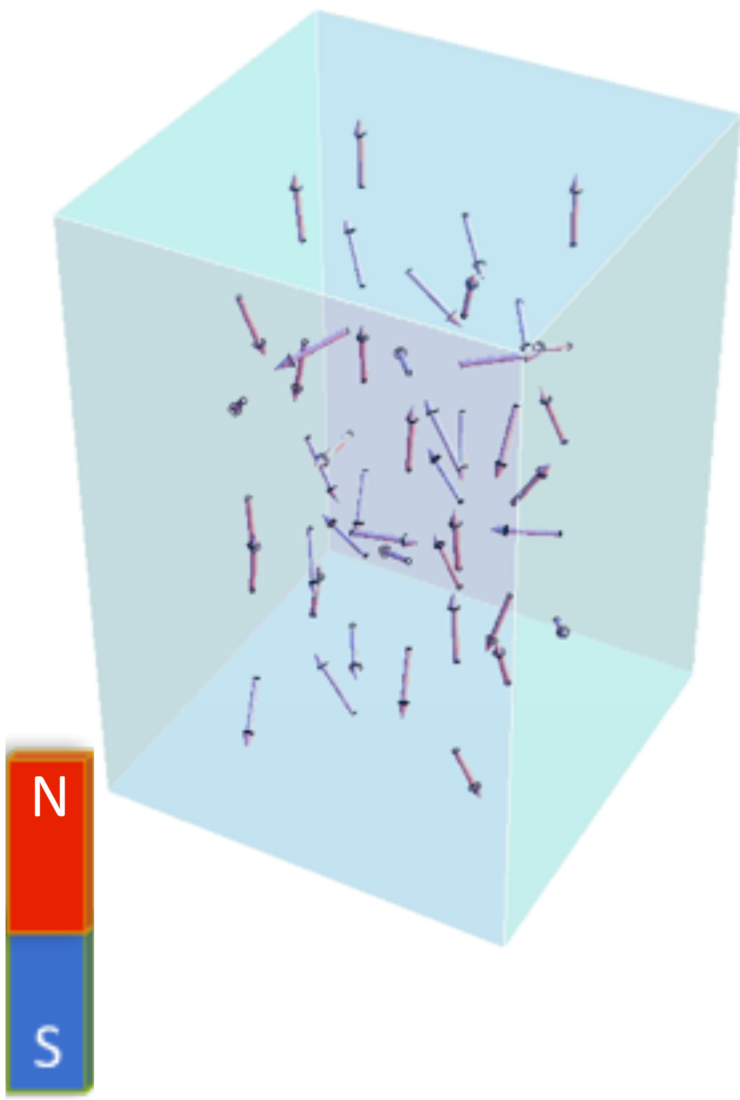


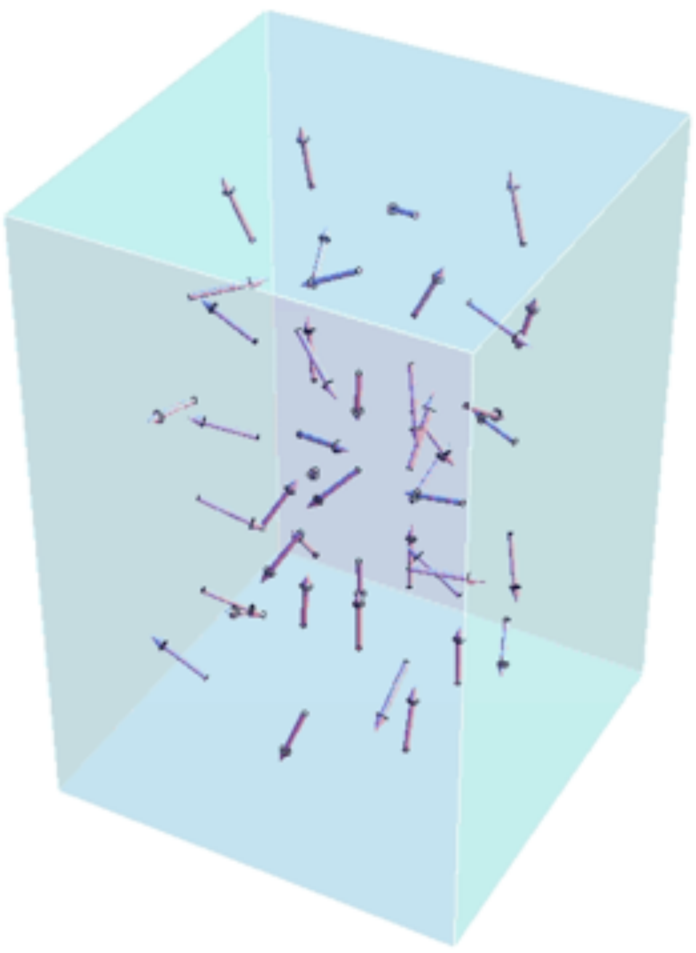
Einstein-de Haas
Barnett (1915)
N
S
Magnetization
d
Magnetization
E_SHE
J_s
σ
H
T + ΔT
∇T
T
Spintronics (21st c)
Mechanical rotation
?
e-
e-
e-
Spin current
Direct link?

Electron spin ⇔ Macroscopic rotation

Einstein - de Haas:
spin → rotation

Barnett:
rotation → spin

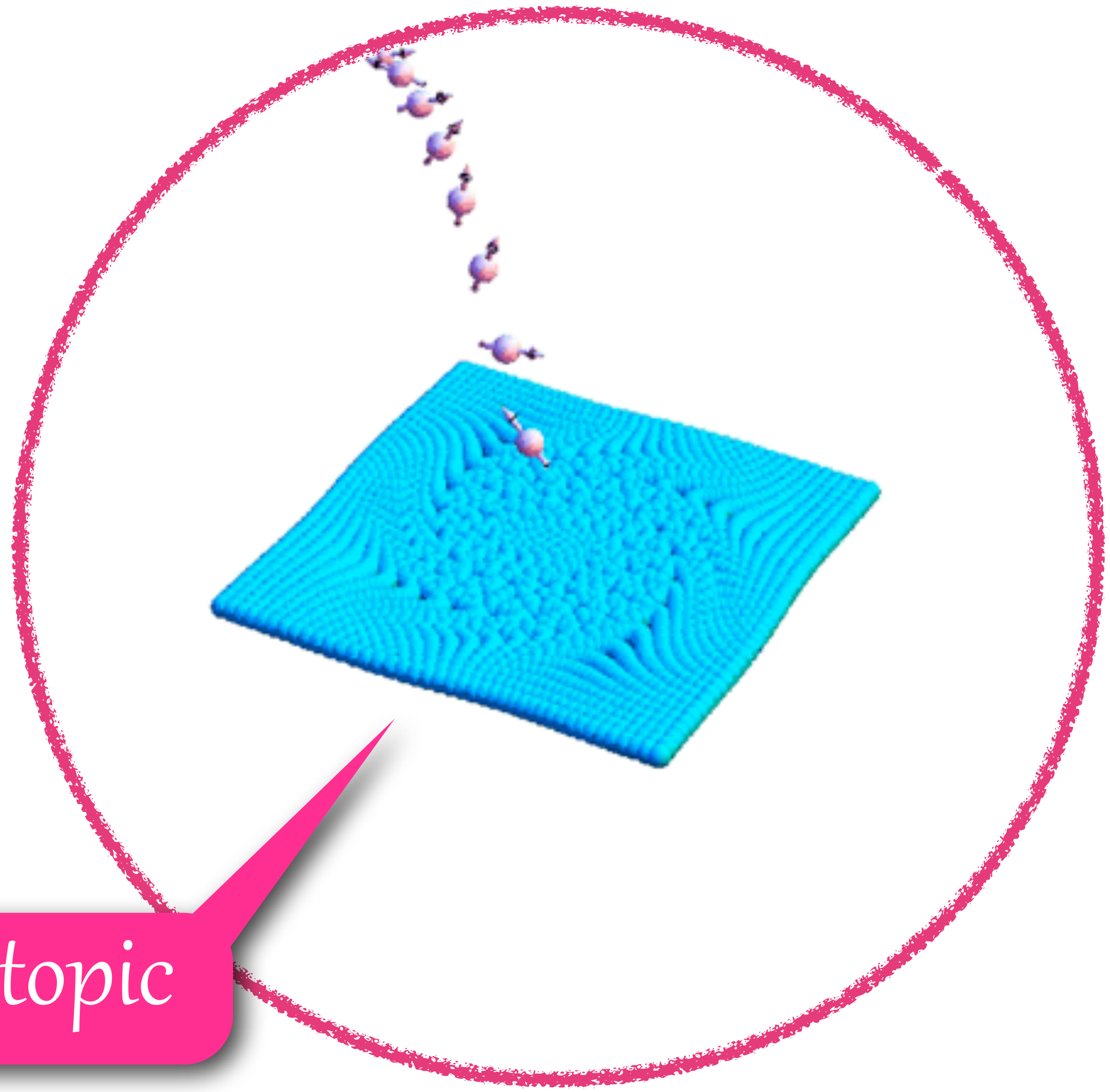




Spin current ⇔ Macroscopic rotation

"Einstein - de Haas":
spin current → rotation

"Barnett":
rotation → spin current



Today's topic

Can we realize angular momentum conversion between spin current ⇔ rotation ?

We have two answers:

1. Spin current from rigid motion

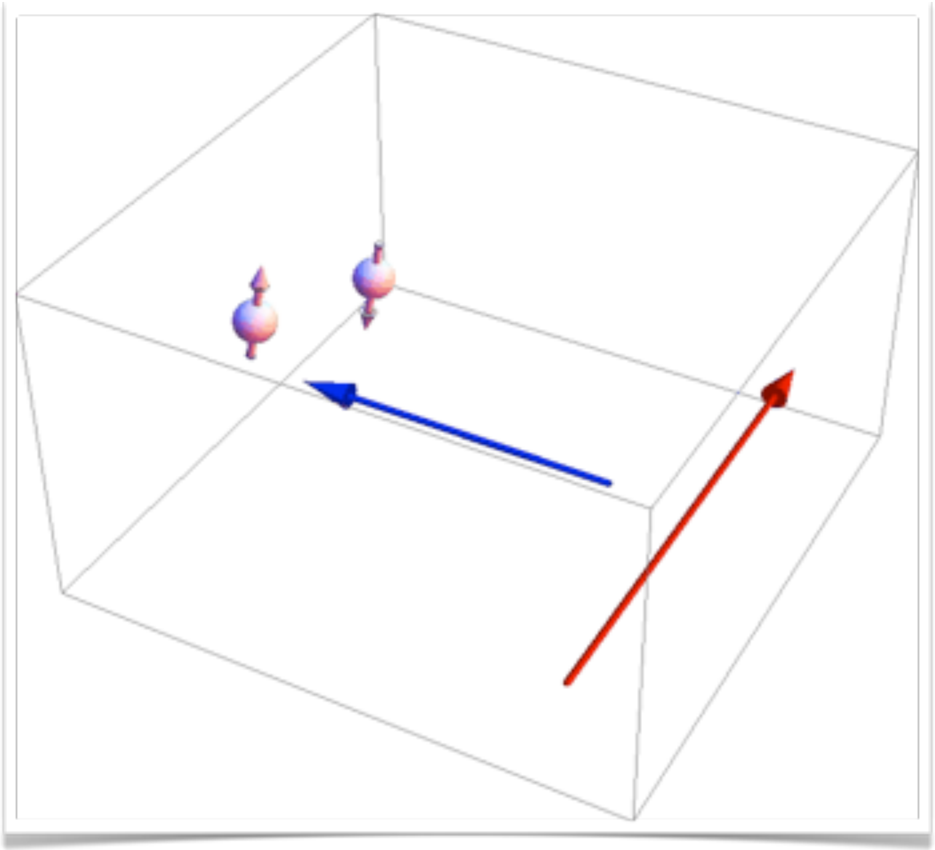
   w/ spin-orbit interaction [Pt, GaAs]

2. Spin current from elastic motion

   w/o spin-orbit interaction [Al, Cu]

Spin-orbit interaction is modified by inertial effects?

Spin Hall Effect



charge current
→ spin current

Spin-Orbit Interaction
→ Spin-dependent velocity

$$H_{SOI} = \frac{-e\bar{\lambda}}{\hbar} \boldsymbol{\sigma} \cdot \left[(\mathbf{p} + e\mathbf{A}) \times \mathbf{E} \right]$$

$$v_\sigma = \frac{1}{i\hbar} \left[r, H_{SOI} \right] = \frac{-e\bar{\lambda}}{\hbar} \boldsymbol{\sigma} \times \mathbf{E}$$

Spin current generated perpendicular to E-field

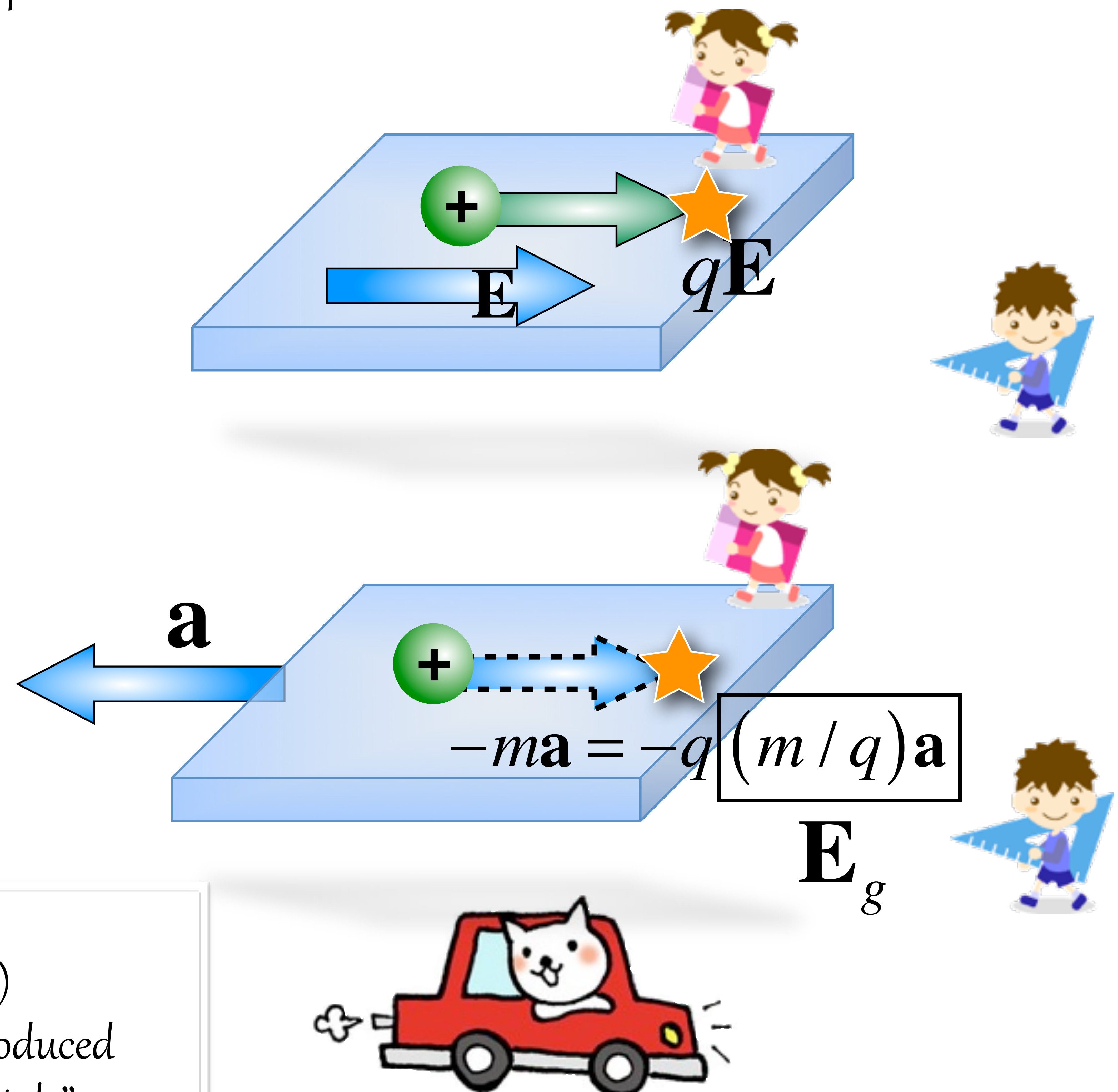
Is Spin-Orbit Interaction modified by inertial effects?

Inertial force on charged particle

Two ways to act on charged particle

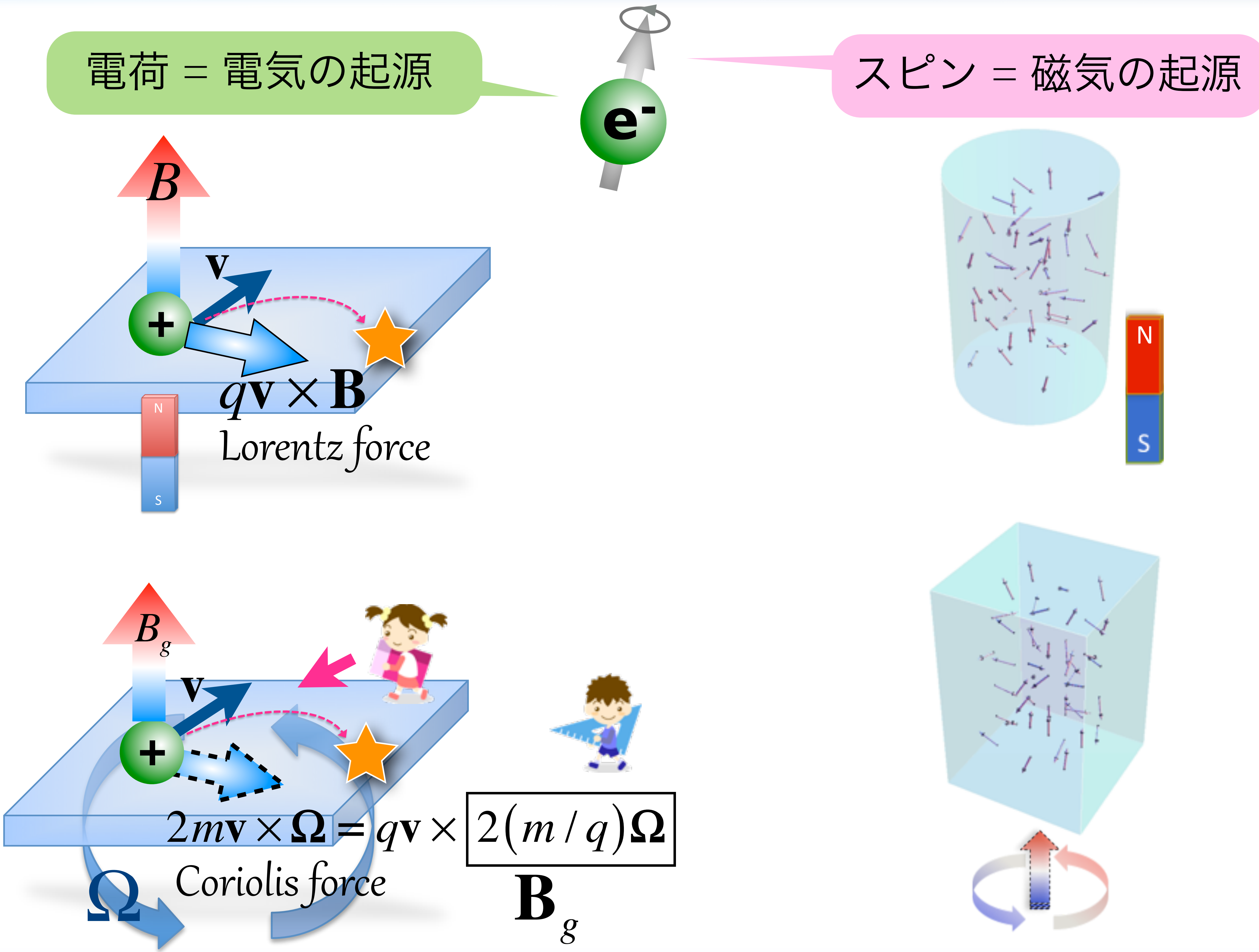
Electric field:
directly act on charge

Inertial force:
indirectly act on mass
→ Effective electric field



Tolman & Stewart,
Phys. Rev. 8, 97 (1916)
"The electromotive force produced
by the acceleration of metals"

Magnetic field and mechanical rotation



Our strategy

Generally covariant Dirac equation

metric, spin connection:
inertial effects due to
rotation and vibration

Low energy expansion

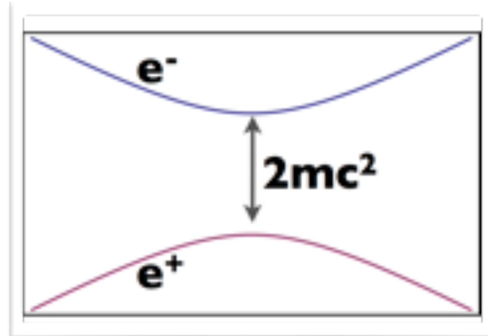
Pauli-Schrödinger eq. in vacuum

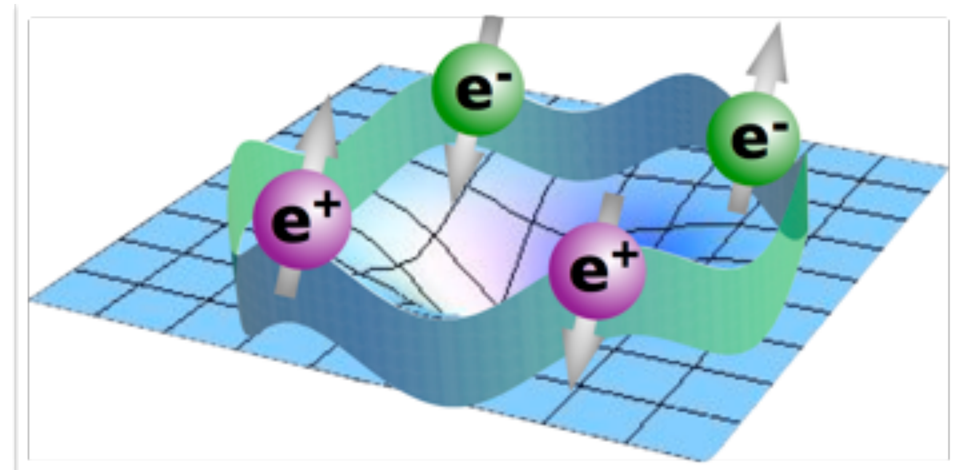
Zeeman/Spin-rotation
Mechanical Spin-Orbit Int./
Darwin Int.

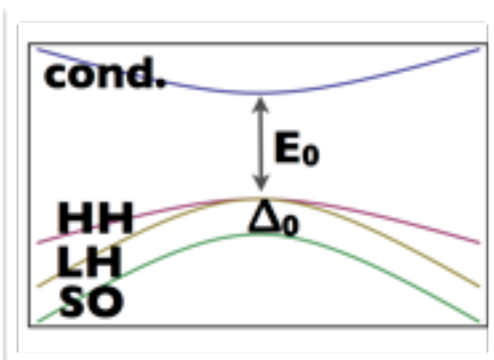
Interband mixing

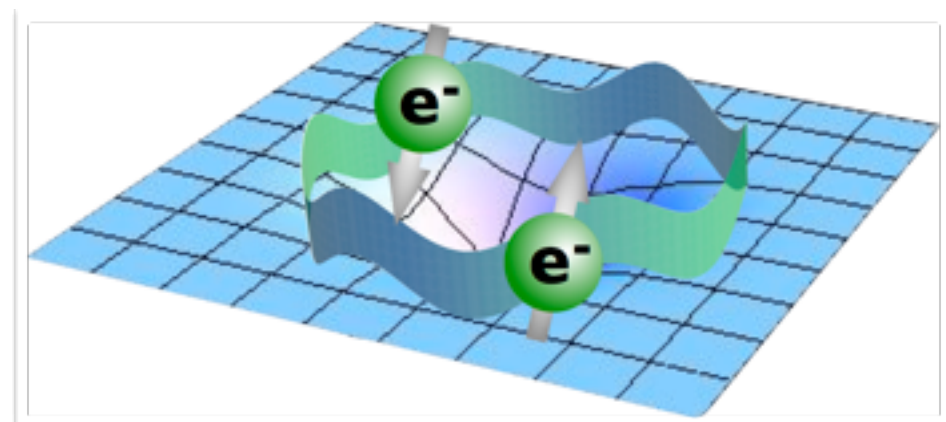
Pauli-Schrödinger eq. in solid

Renormalized couplings:
g-factor, Spin-Orbit Int.









Matsuo, Ieda, & Maekawa,
“Renormalization of spin-rotation coupling”,
Phys. Rev. B87, 115301 (2013)

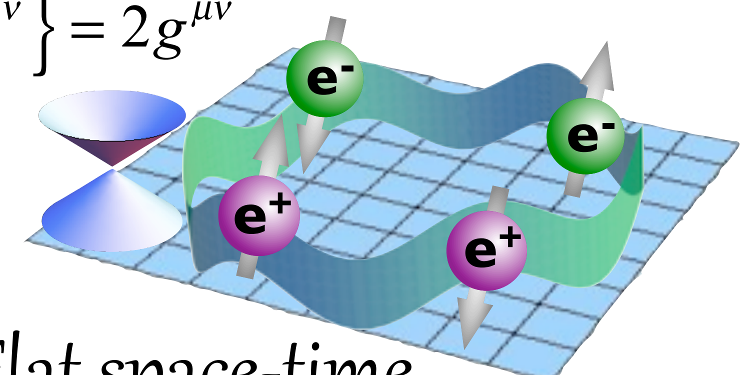
Dirac equation with electromagnetic and gravitational field

Electromagnetic and gravitational fields can be included by introducing "covariant derivatives."

Dirac eq. with E-M fields

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

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

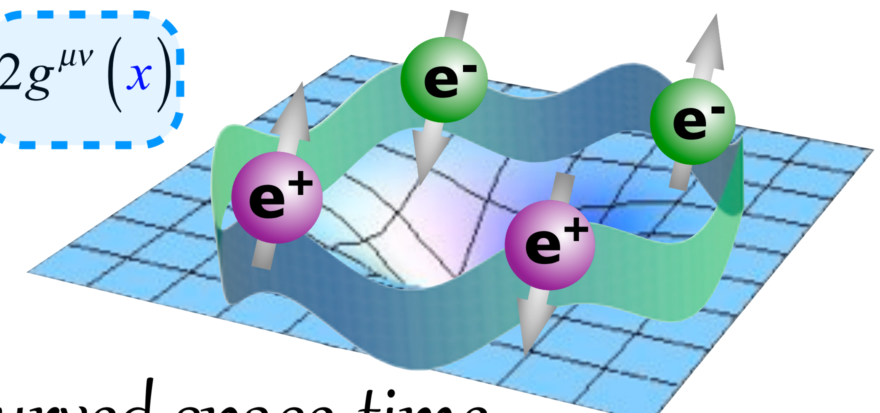


Flat space-time
(non-accelerating systems)

Dirac eq. with E-M & gravitational fields

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

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



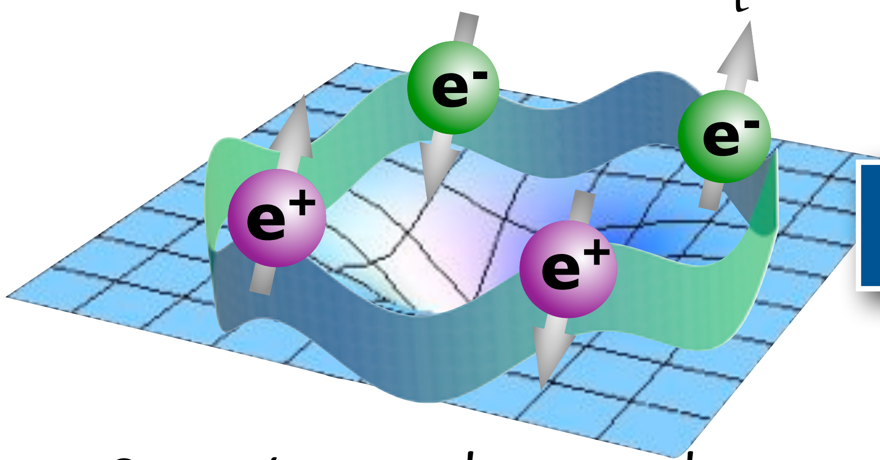
Curved space-time
(accelerating systems)

$$A_{\mu}\begin{bmatrix}E\\B\end{bmatrix}+\Gamma_{\mu}\begin{bmatrix}a(\text{vibration})\\\Omega(\text{rotation})\end{bmatrix}\Rightarrow$$

ψ electron wave function
charge/spin

Rigorous derivation of spin-orbit interaction due to gravitational filed

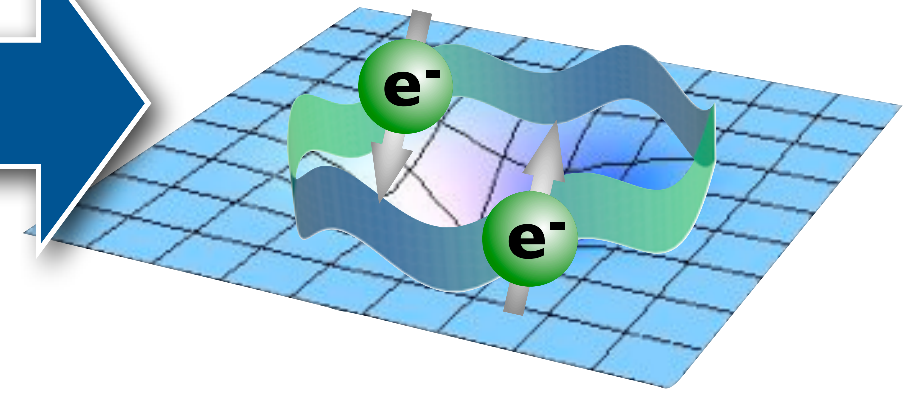
General Relativisitc Dirac eq.



Spin-1/2 particle in accelerating systems

Low energy limit

Pauli-Schrödinger equation in accelerating systems



Gravitational field due to massive point particle with electromagnetic field:

de Oliveira - Tiomno, Nuovo Cimento (1962)

Gravitational field in Schwarzschild spacetime without electromagnetic field:

e.g. Obukhov, Phys. Rev. Lett. (2000), Silenko-Teryaev, Phys. Rev. D (2007)

Rigid rotation & Liner acceleration <u>without</u> electromagnetic field:

Hehl - Ni, Phys. Rev. D (1990)

Rigid rotation <u>with</u> electromagnetic field:

Matsuo, Ieda, Saitoh, & Maekawa, Phys. Rev. Lett. (2011)

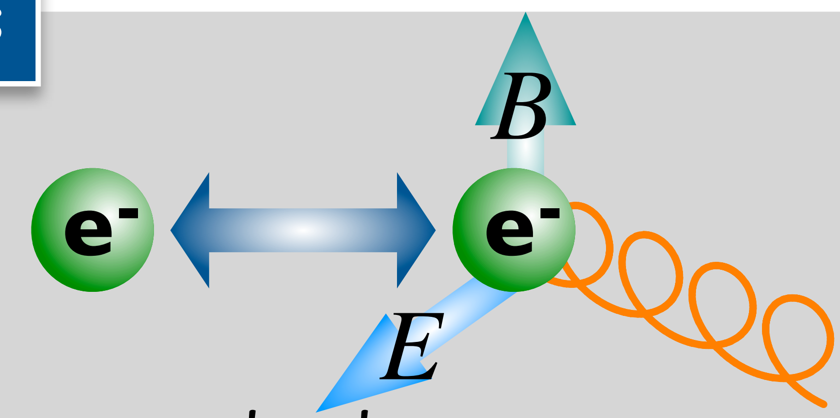
Pauli-Schrödinger eq. in non-accelerating systems

Low energy limit of Dirac eq. in non-accelerating systems

$$H = \frac{1}{2m}(\mathbf{p} + e\mathbf{A})^2 + e\phi$$

Coulomb
& Lorentz

electric/
magnetic field
↓
charge

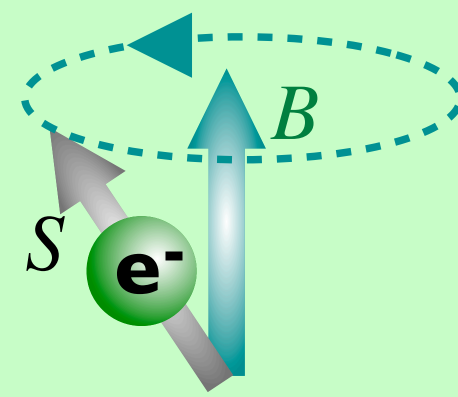


Coulomb & Lorentz

$$-\mu_B \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{B}$$

Zeeman

magnetic field
↓
spin

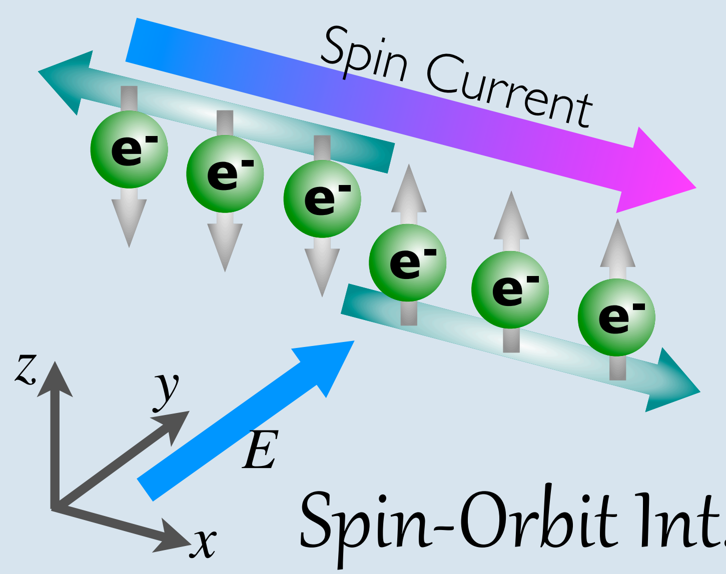


Zeeman

$$+\frac{\lambda}{\hbar}\boldsymbol{\sigma} \cdot \left[(\mathbf{p} + e\mathbf{A}) \times (-e)\mathbf{E}\right]$$

Spin-Orbit Int.

electric field
↓
spin current



Spin-Orbit Int.

Pauli-Schrödinger eq. in rotating frame

Low energy limit of Dirac eq. in rotating frame

$$H = \frac{1}{2m}(\mathbf{p}+e\mathbf{A})^2 + e\phi \quad -\mathbf{L}\cdot\boldsymbol{\Omega}$$

Coulomb & Lorentz | Coriolis

electric/magnetic field + rotation → charge

$$-\mu_B \boldsymbol{\sigma}\cdot\left(\mathbf{B} + (m/e)\boldsymbol{\Omega}\right)$$

Zeeman | Barnett

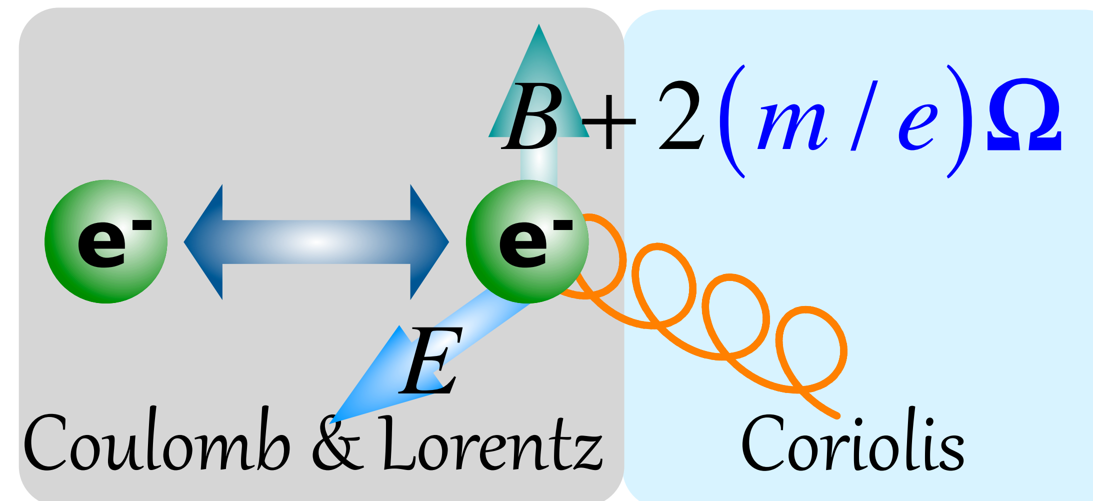
magnetic field+ rotation → spin

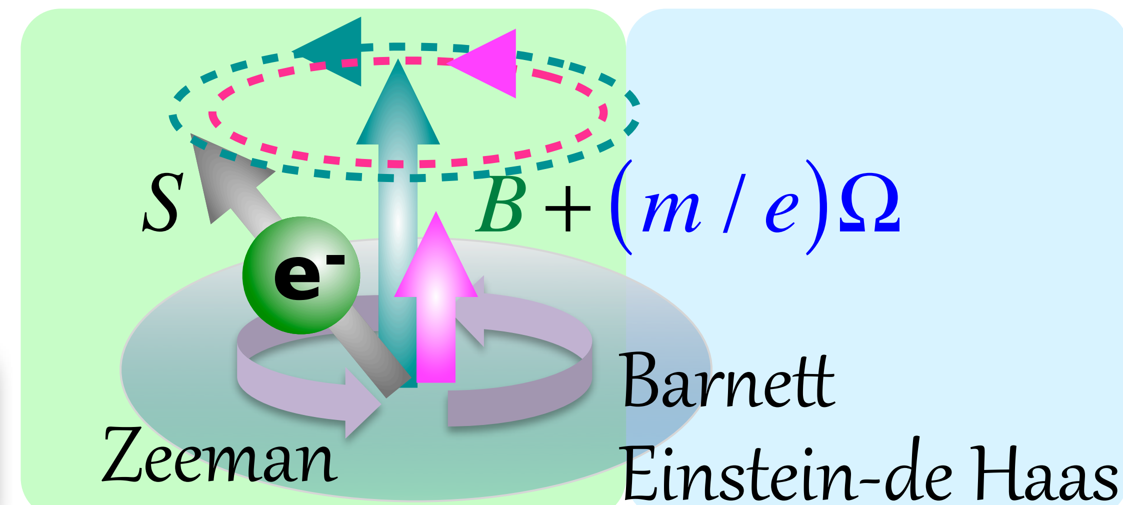
$$+\frac{\lambda}{\hbar}\boldsymbol{\sigma}\cdot\left[(\mathbf{p}+e\mathbf{A})\times(-e)\left(\mathbf{E}+(\boldsymbol{\Omega}\times\mathbf{r})\times\mathbf{B}\right)\right]$$

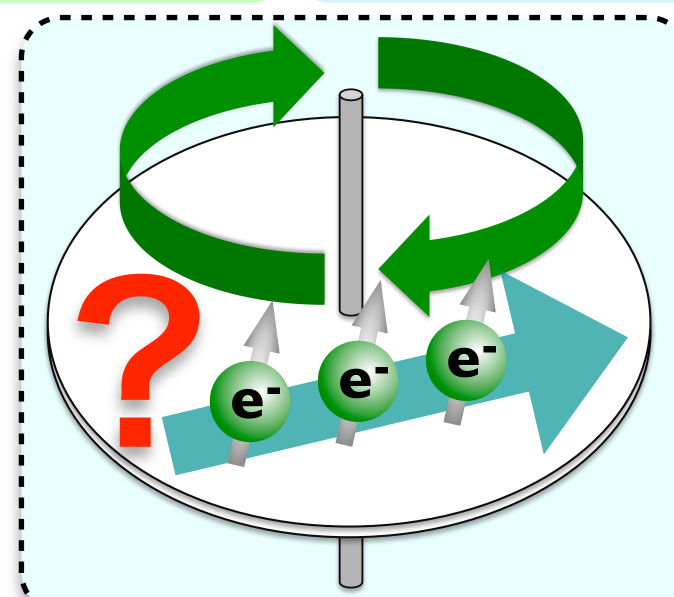
Spin Orbit Int. | **NEW!**

electric field / magnetic field x rotation

→ spin current







Mechanical Spin Hall Effect due to rotation

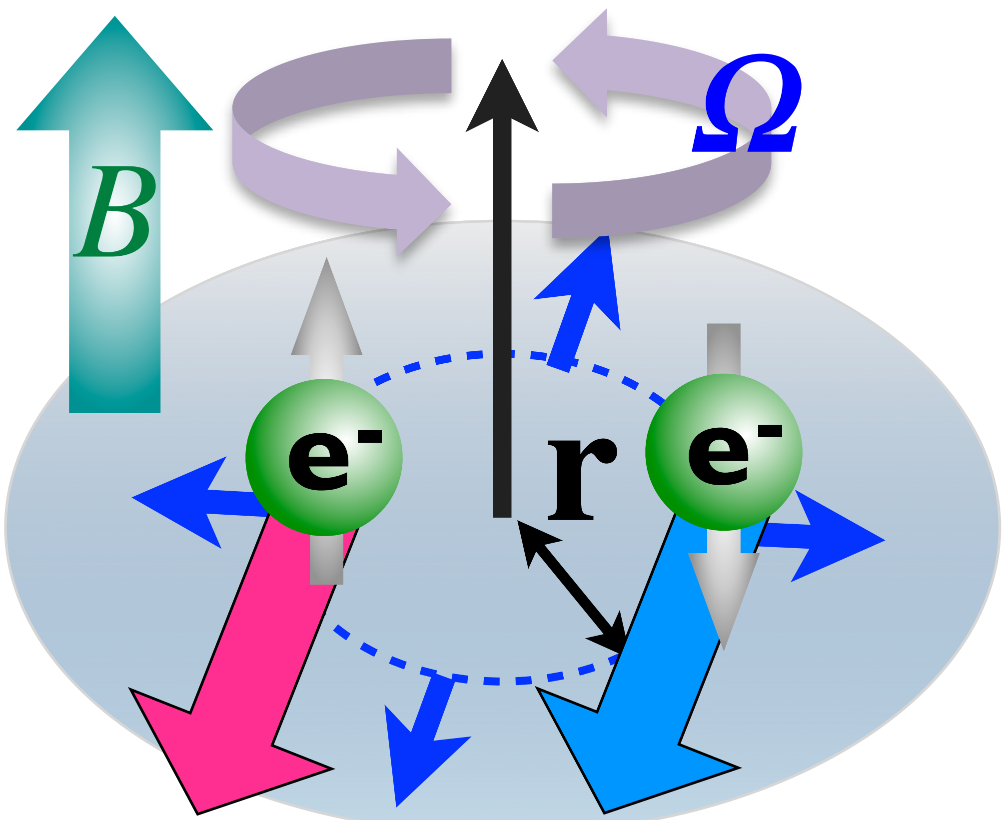
Mechanical Spin-Orbit Int.

$$+\frac{\bar{\lambda}}{\hbar}\boldsymbol{\sigma}\cdot\left[(\mathbf{p}+e\mathbf{A})\times(-e)\left(\mathbf{E}+(\boldsymbol{\Omega}\times\mathbf{r})\times\mathbf{B}\right)\right]$$

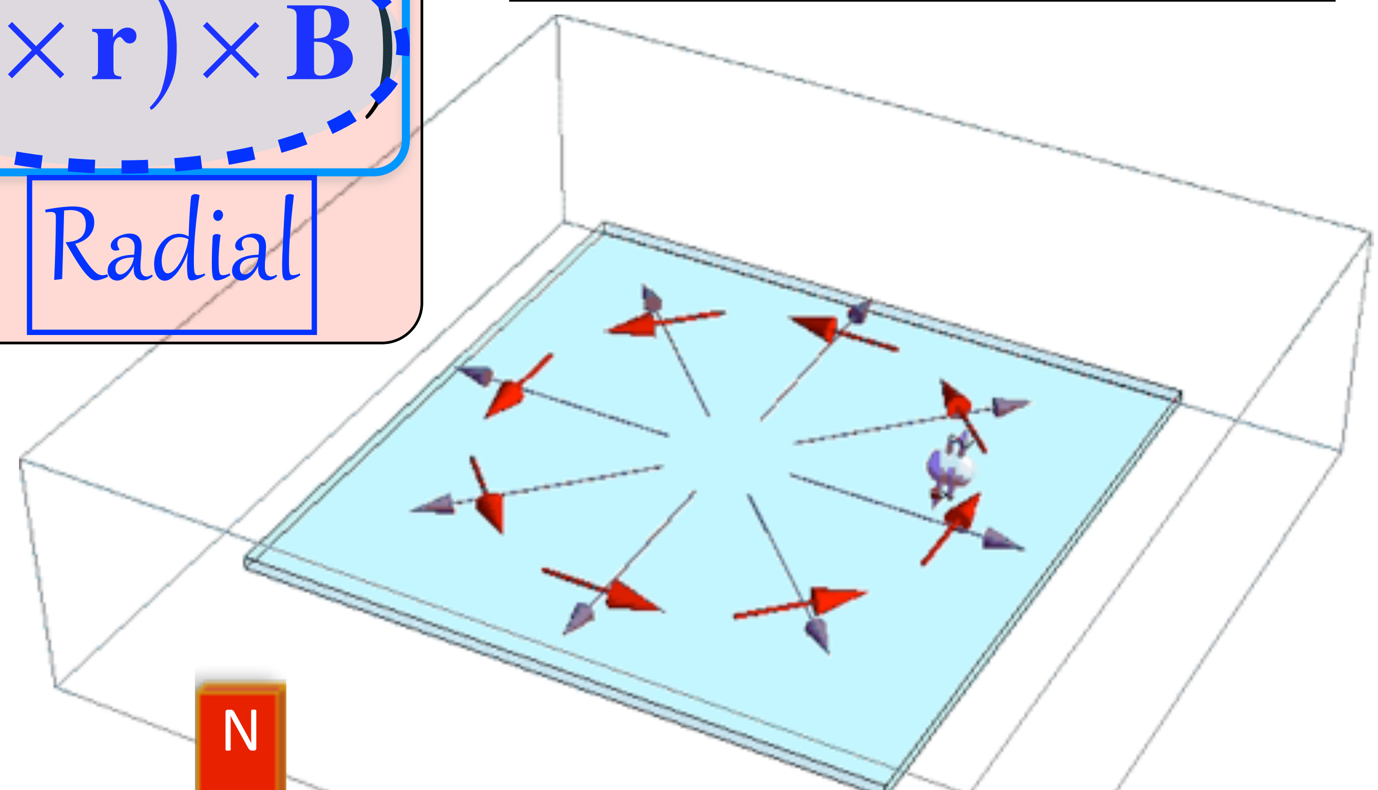
$$\frac{d}{dt}\mathbf{r}=\mathbf{v}-\frac{e\bar{\lambda}}{\hbar}\boldsymbol{\sigma}\times\left(\mathbf{E}+(\boldsymbol{\Omega}\times\mathbf{r})\times\mathbf{B}\right)$$

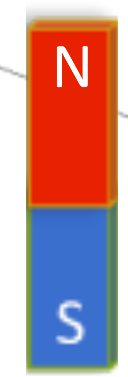
±Azimuthal $\quad \pm z \quad \mathbf{E}_{rot} \quad$ Radial

Spin current generated in azimuthal direction



$$\mathbf{E}_{rot}=(\Omega\cdot B)\mathbf{r}$$





Pt; B = 1T, Omega = 10kHz, r=1mm

→ Spin current $10^6 A/m^2$

Spin current > $10^5 A/m^2$ is detectable .

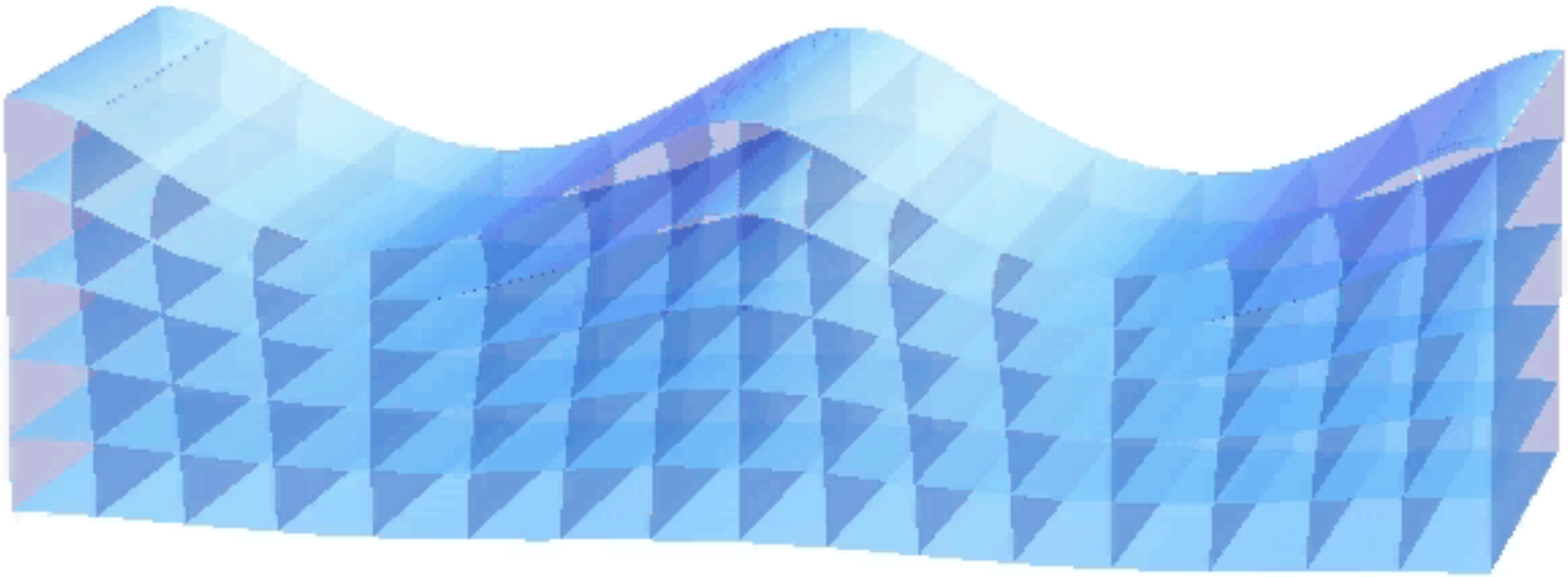
Matsuo et al., PRL 106, 076601(2011)

We have two answers:

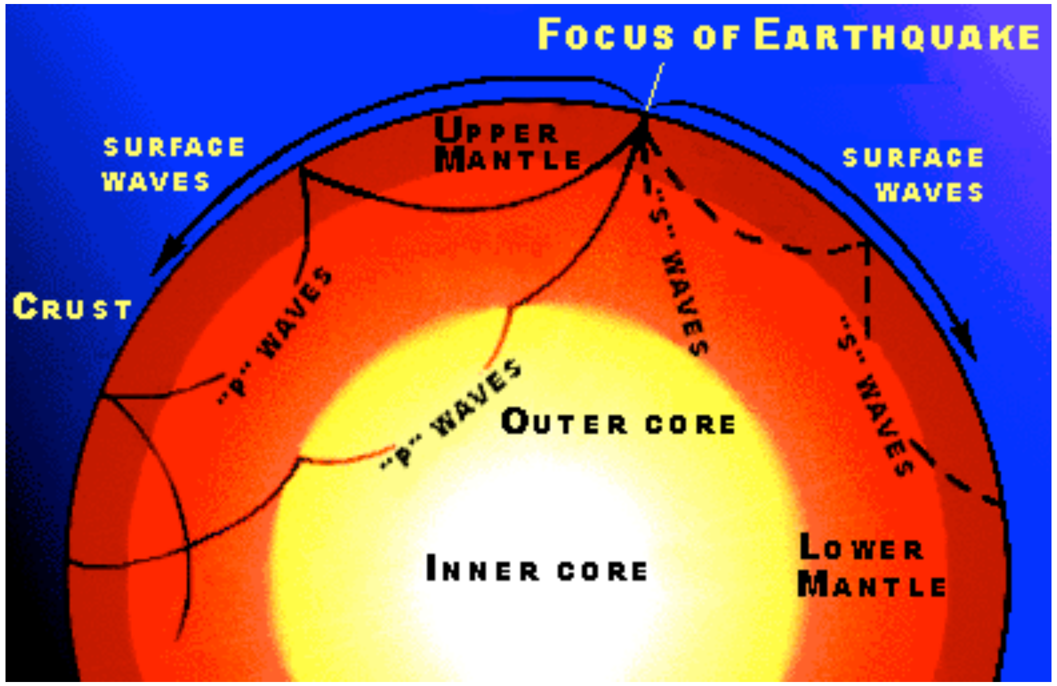
1. Spin current from rigid motion
w/ spin-orbit interaction [Pt, GaAs]

2. Spin current from elastic motion
w/o spin-orbit interaction [Al, Cu]

Surface acoustic wave



SAW in geophysics

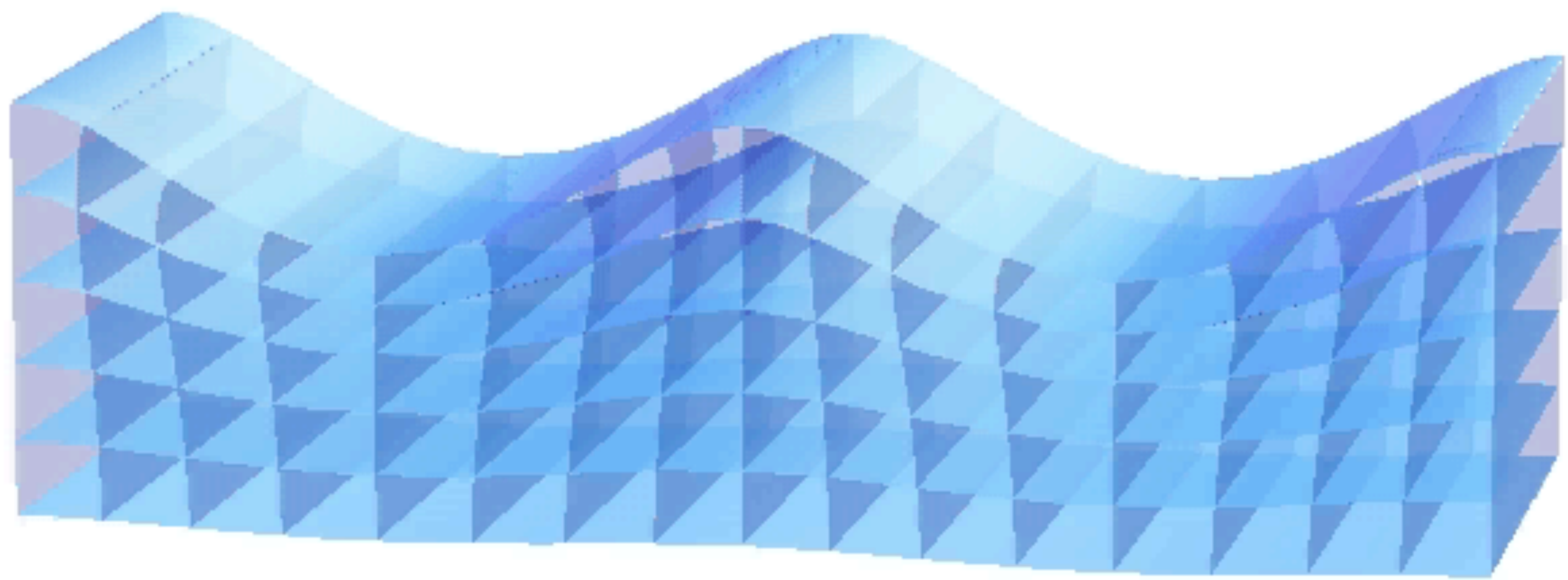


http://www.the-science-site.com/earthquake-facts.html

SAW devices in cell phone for noise filtering

www.murata.com

Purely mechanical generation of spin current by SAW



Purely mechanical generation of spin current?

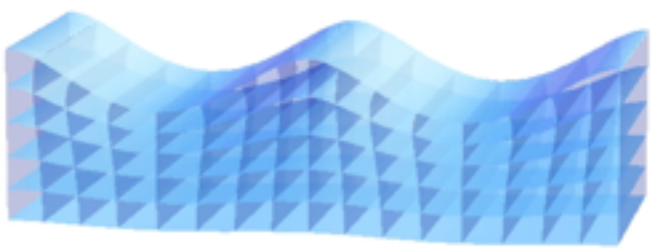
No magnetic field,
No magnetism,
No spin-orbit interaction.

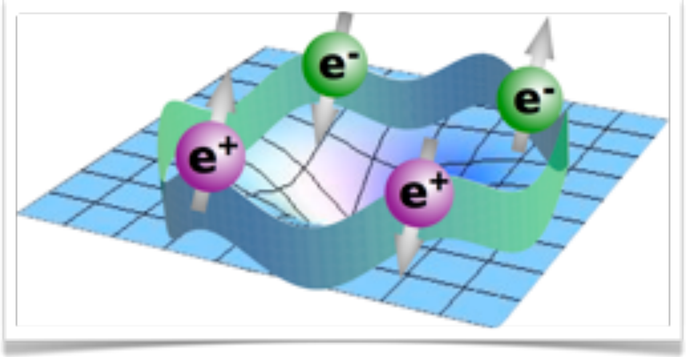
Spin-rotation coupling

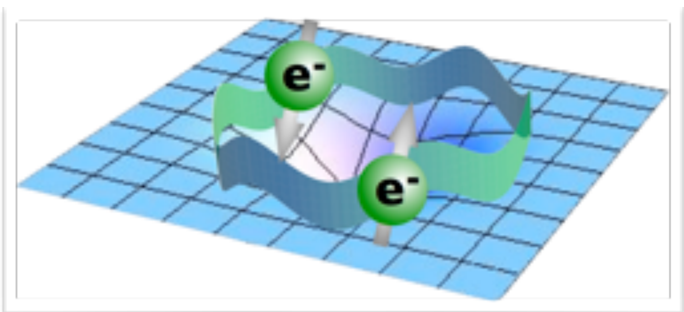
Generally covariant Dirac equation

$$\frac{d\mathbf{r}'}{dt} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} + \dot{\mathbf{u}} \Rightarrow g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -\left[1+(\dot{u}/c)^2\right] & \dot{u}_x/c & \dot{u}_y/c & \dot{u}_z/c \\ \dot{u}_x/c & 1 & 0 & 0 \\ \dot{u}_y/c & 0 & 1 & 0 \\ \dot{u}_z/c & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Local rest frame of velocity field







$$H_{2\times 2} = \frac{(p-qA)^2}{2m} + qA_0 + \dot{u}\cdot(p-qA) - \frac{q}{m}S\cdot B - S\cdot\Omega$$

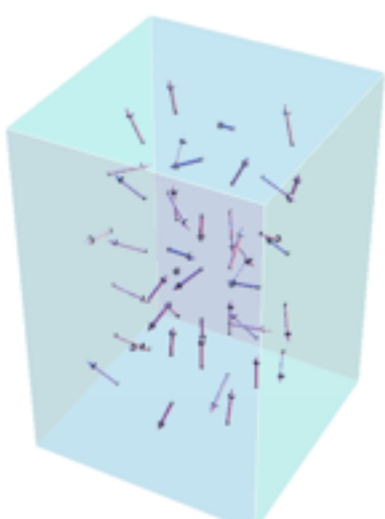
Coriolis

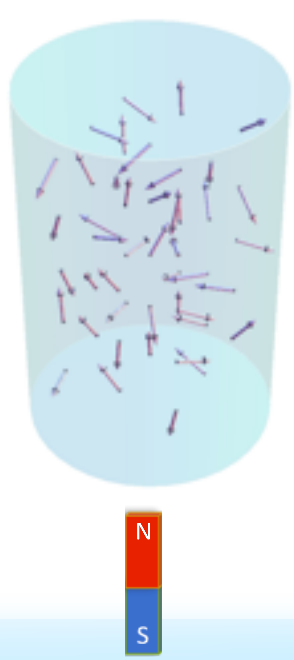
Spin-rotation

$$\Omega = \nabla \times \dot{u}$$

Spin-rotation vs. Zeeman

Mechanical	Electromagnetic
$H_{\text{Spin-rotation}} = S \cdot \Omega$	$H_{\text{Zeeman}} = \dfrac{e}{m} S \cdot B$
$\Omega = \dfrac{1}{2} \nabla \times \dot{u}$	$B = \nabla \times A$
$\dot{u}$: velocity field	A : vector potential

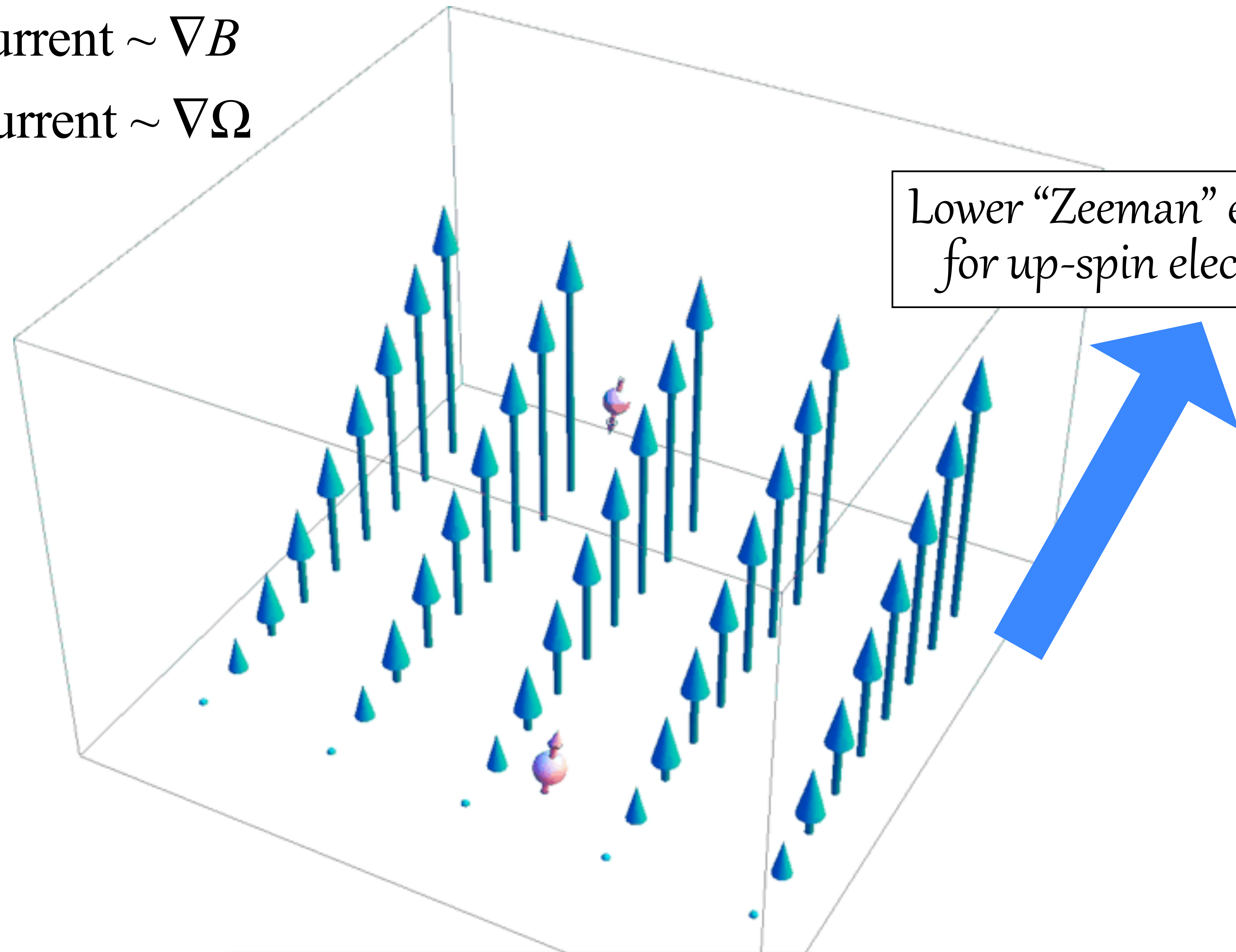




Mechanical Stern-Gerlach effect

$S \cdot B \Rightarrow$ Spin current $\sim \nabla B$

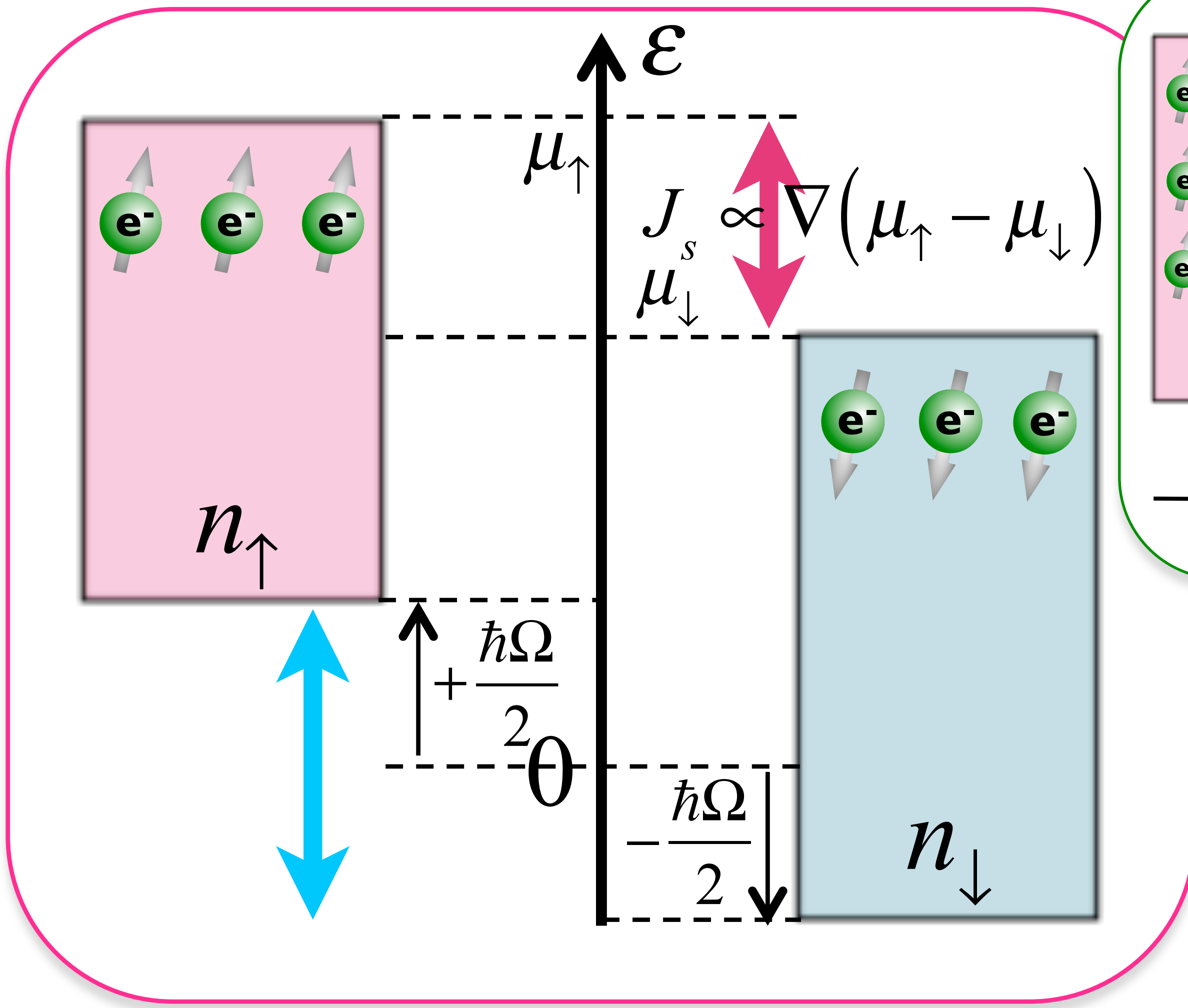
$S \cdot \Omega \Rightarrow$ Spin current $\sim \nabla \Omega$

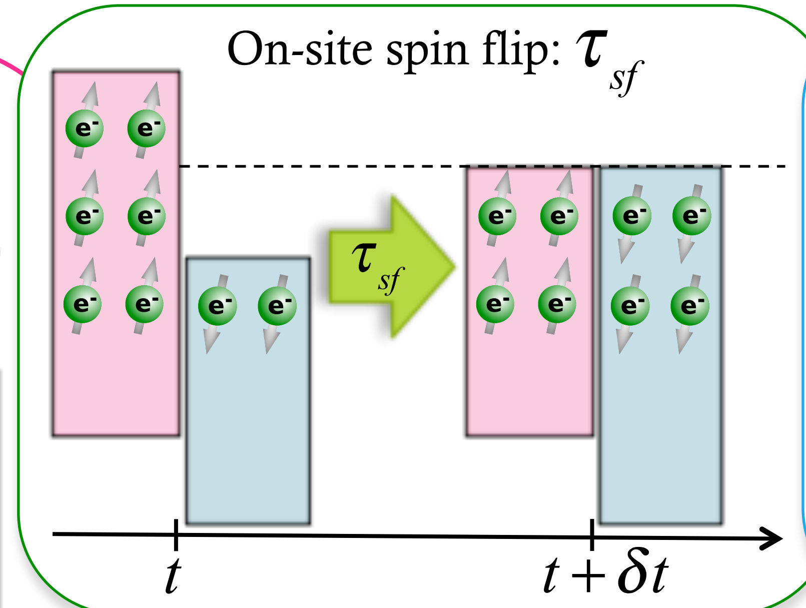


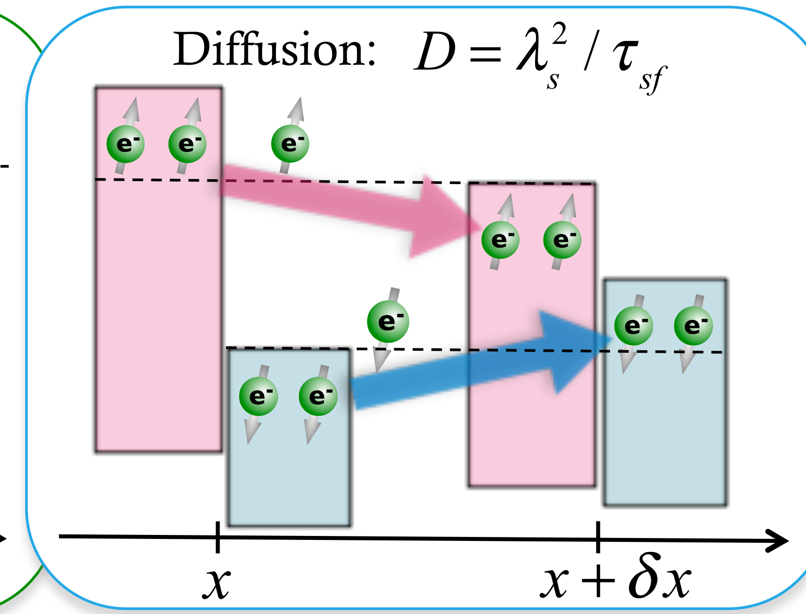
Lower "Zeeman" energy for up-spin electron

Spin current is generated along rotation-gradient!

Spin diffusion equation with spin-rotation coupling







$$-\frac{\sigma_0}{e^2}\frac{\delta\mu}{\tau_{sf}}$$

$$\frac{\sigma_0}{e^2}\frac{\partial^2\delta\mu}{\partial x^2}$$

$$n_\uparrow - n_\downarrow = \int_{+\hbar\Omega/2}^{\mu_\uparrow} d\varepsilon N_0(\varepsilon) - \int_{-\hbar\Omega/2}^{\mu_\downarrow} d\varepsilon N_0(\varepsilon)$$

$$\approx N_0\left(\mu_\uparrow - \mu_\downarrow - \hbar\Omega\right)$$

$$= \frac{\sigma_0}{e^2 D}(\delta\mu - \hbar\Omega)$$

Barnett effect:
Magnetization by rotation

Spin diffusion eq. with spin-rotation coupling

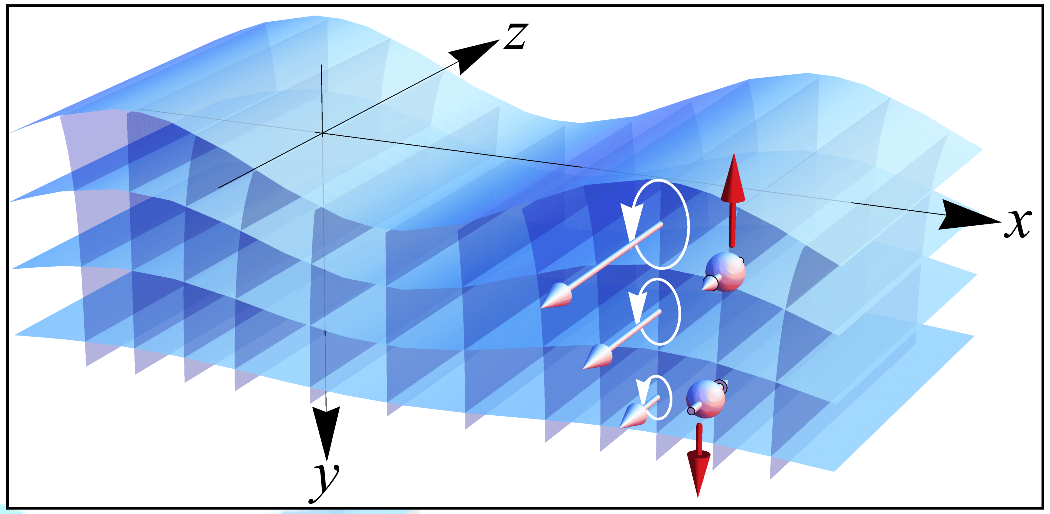
$$\left[\frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{\tau_{sf}} - \frac{\lambda_s^2}{\tau_{sf}}\nabla^2\right]\delta\mu = \hbar\frac{\partial\Omega}{\partial t}$$

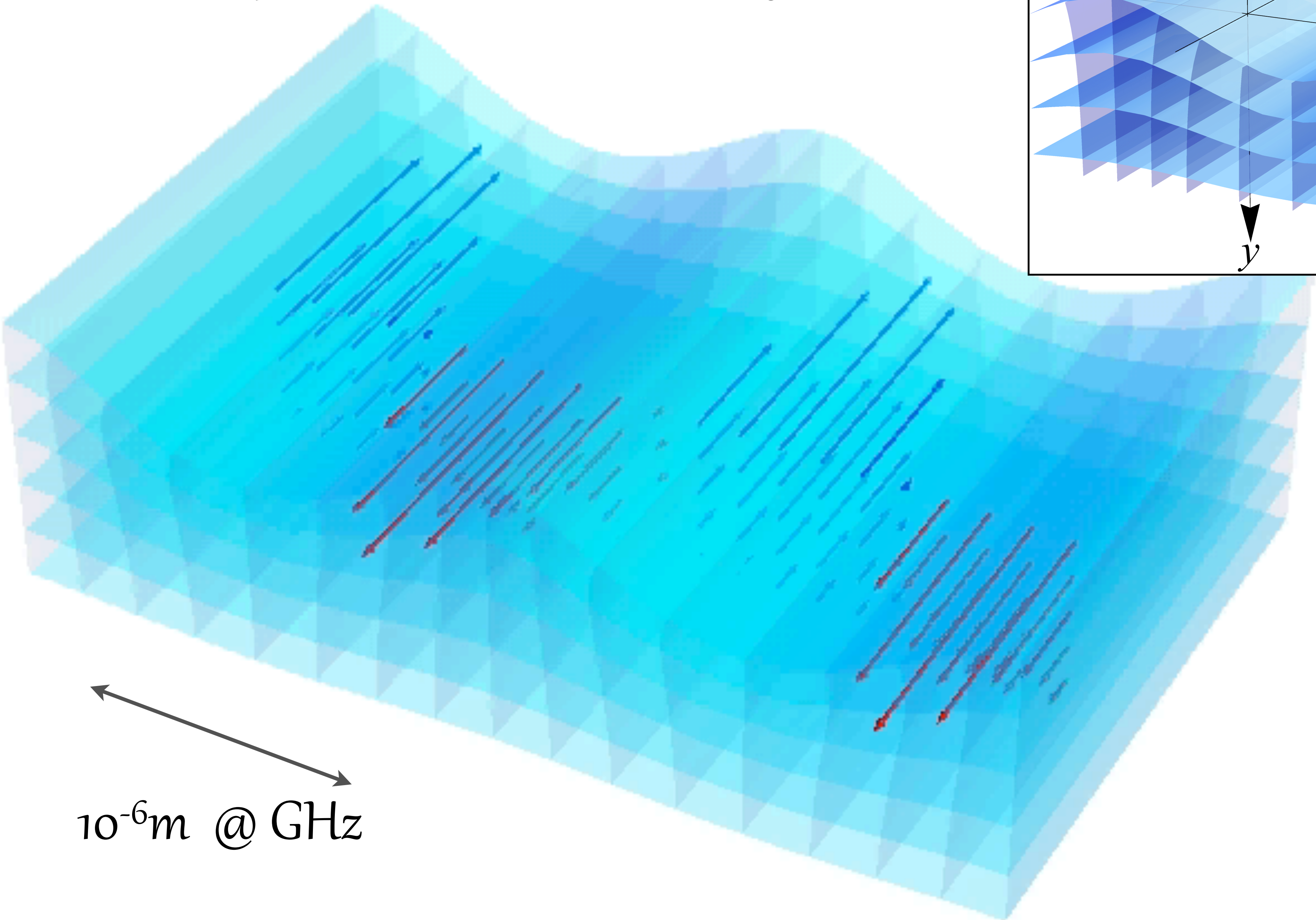
$$\Rightarrow J_s = \frac{\sigma_0}{e}\nabla\delta\mu$$

Space-time dependent rotation!

Spin current from Surface Acoustic Wave

Spin current $\propto$ Gradient of rotation





Matsuo, Ieda, Harii, Saitoh, & Maekawa, Phys. Rev. B87, 180402(R) (2013)

Spin current induced by SAW

Spin current~(Conductivity) x(Spin lifetime) x (Frequency)^4

2.5GHz: Js(Pt)~10^4A/m^2 << Js(Cu)~10^7A/m^2

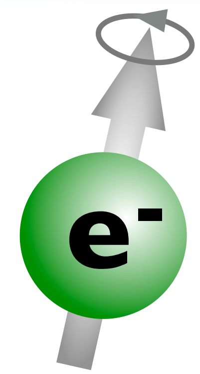
	Conductivity [$10^7\Omega^{-1}m^{-1}$]	Spin lifetime [ps]	Js/Js(Pt) (2.5GHz)
Pt	0.96	0.3	1
Al	1.7	100	250
Cu	7.0	42	650
Ag	2.9	3.5	34
Au	2.5	2.8	33
GaAs	3.3 x 10^{-4}	10^5	0.05

Longer spin lifetime, Larger spin current!

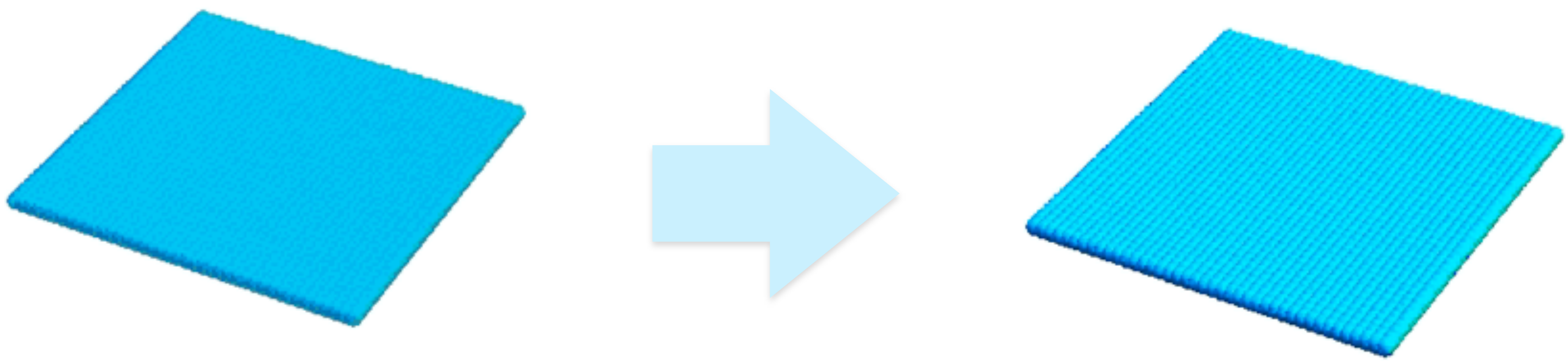
Matsuo, Ieda, Harii, Saitoh, & Maekawa, Phys. Rev. B87, 180402(R) (2013)

Toward “spin-mechatronics device”

電荷 = 電気の起源



スピン = 磁気の起源



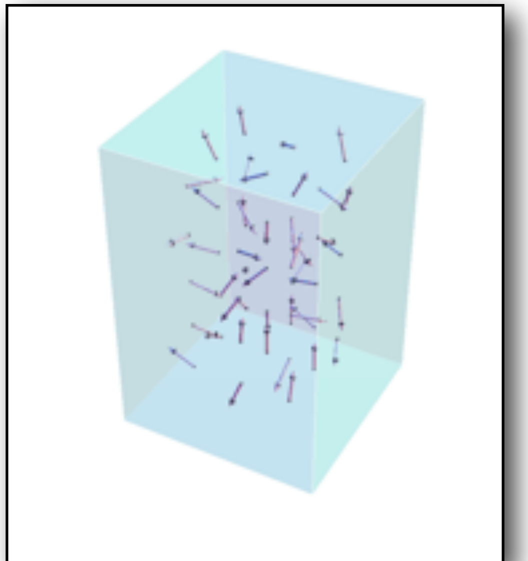
電流と力学運動

従来のモーター・発電機

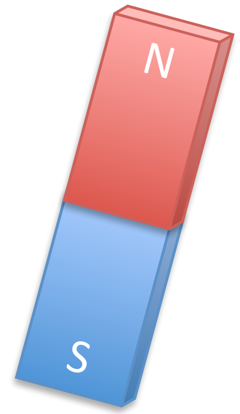
<u>スピン流</u>と力学運動

スピン角運動量を直接利用する
ナノスケールのモーター・発電機

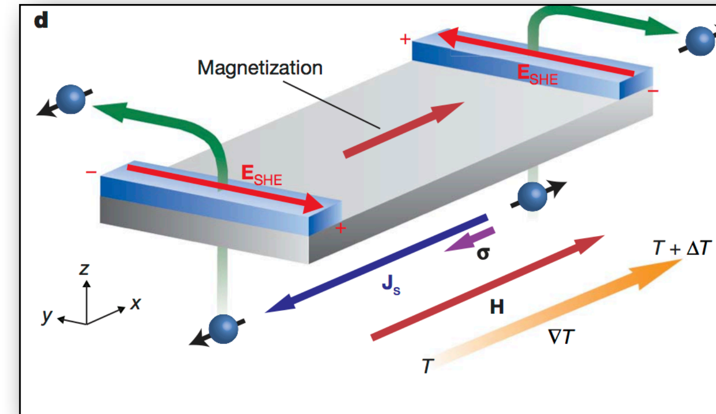
Summary (1) Bridge the link



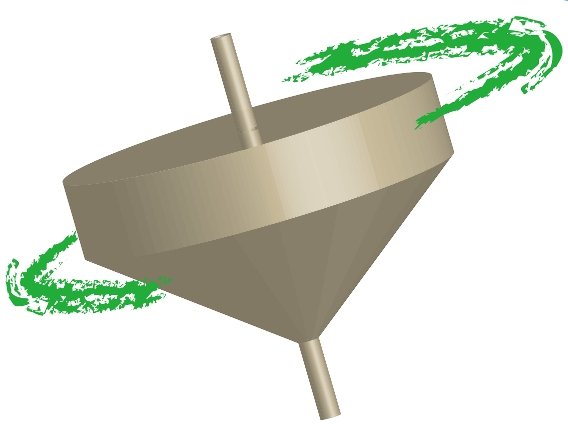
Einstein-de Haas
Barnett (1915)



Magnetization

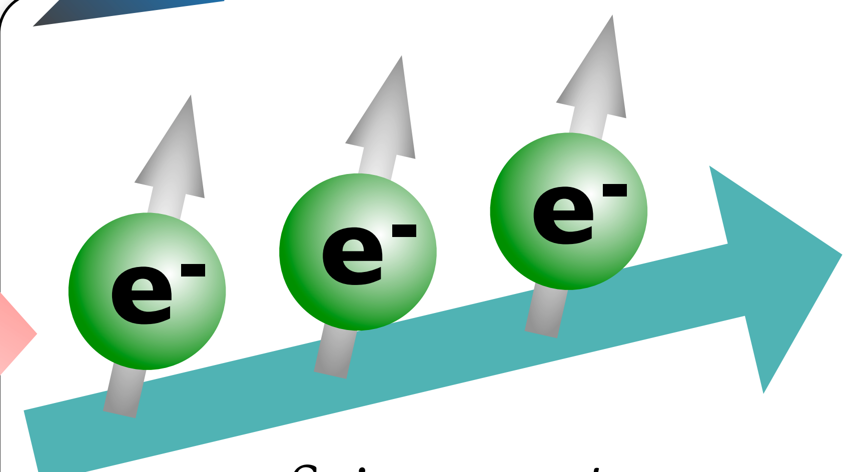


Spintronics (21st c)



Mechanical rotation

!



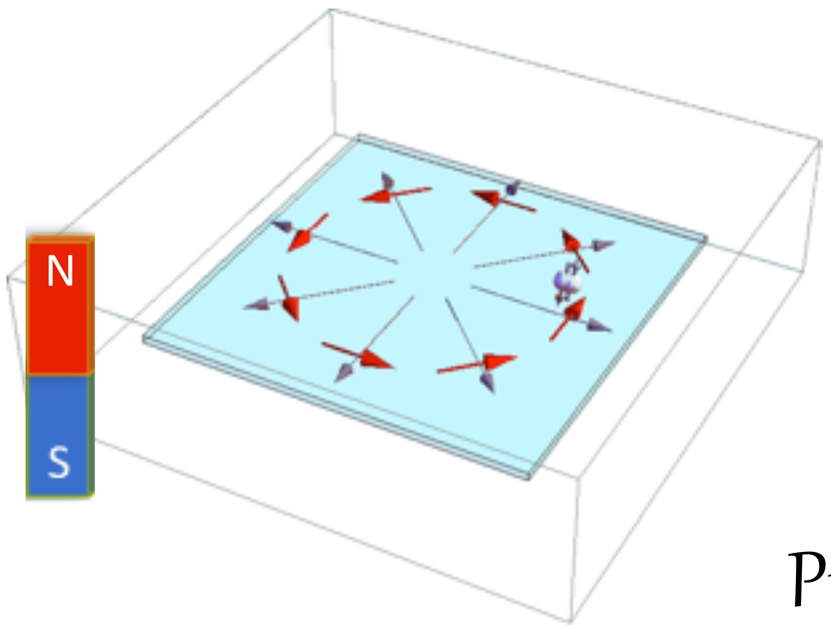
Spin current

Bridge the link!
1. Mechanical spin Hall effect
2. Mechanical Stern-Gerlach effect

Summary (2)   Spin current from mechanical motion

Mechanical Spin-Orbit

Rigid rotation



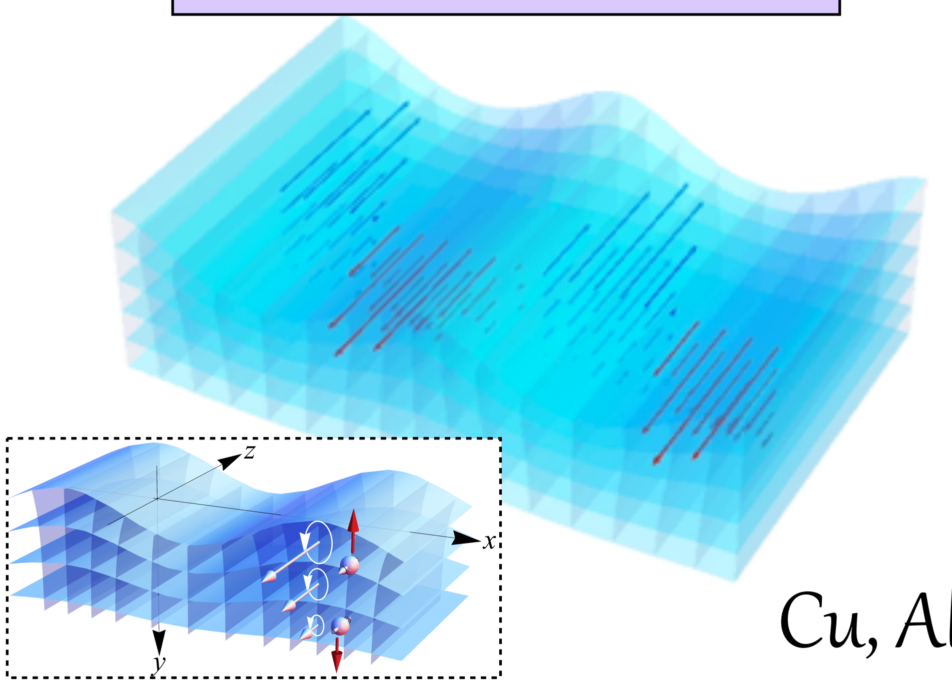
Spin current~(SOI)×Ω×B×r

Pt;
B = 1T, Omega = 10kHz, r=1mm
→ DC Spin current $10^6 A/m^2$

PRL106, 076601 (2011); APL98, 242501 (2011);
PRB84, 104410 (2011)

Spin-rotation

Surface acoustic wave



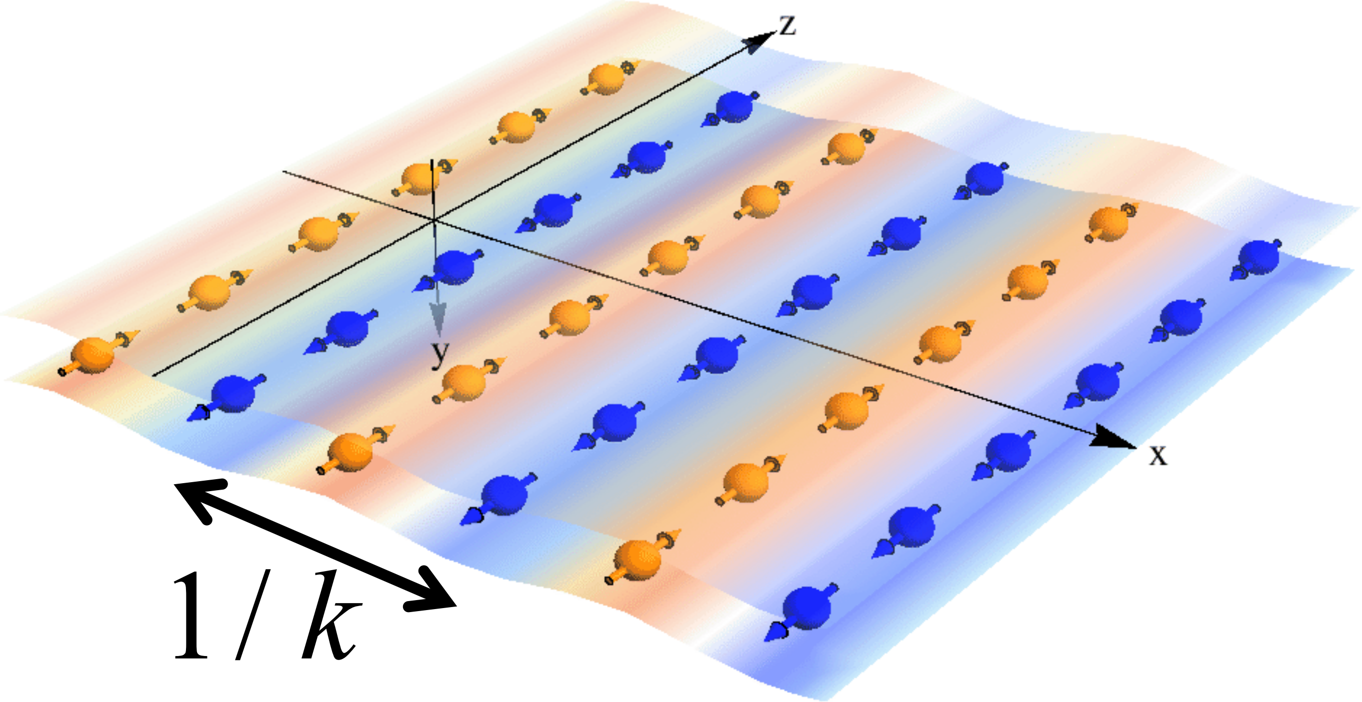
Spin current
~(Spin lifetime)
×(Conductivity)× (Frequency)^4

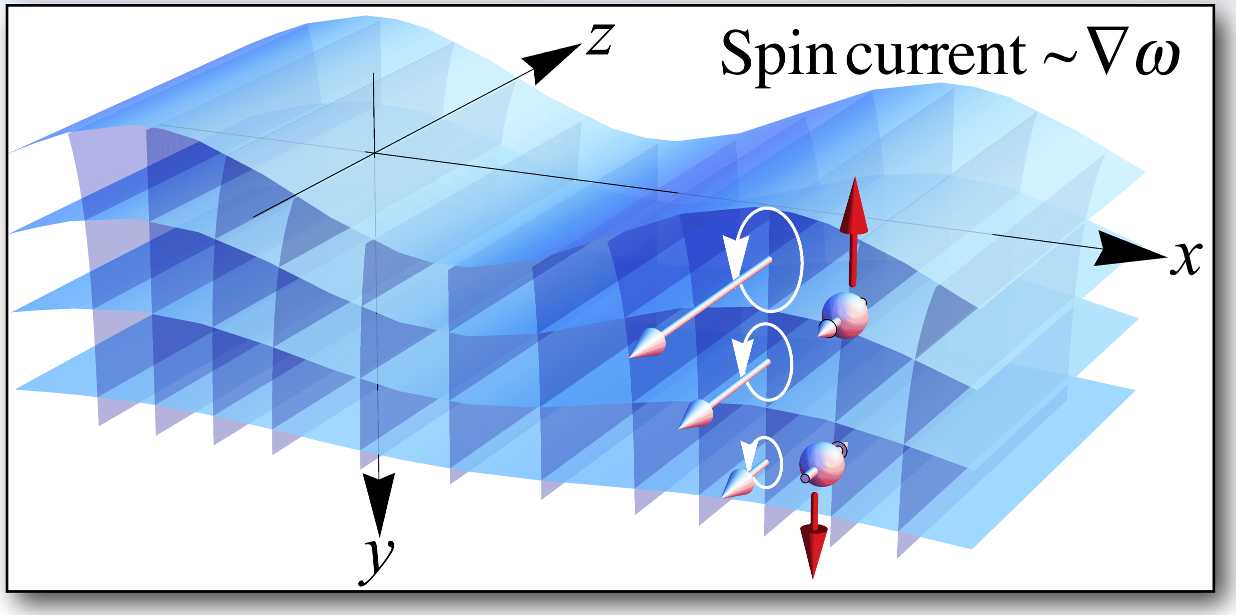
Cu;
Omega = 2.5GHz
→ AC Spin current $10^6 A/m^2$

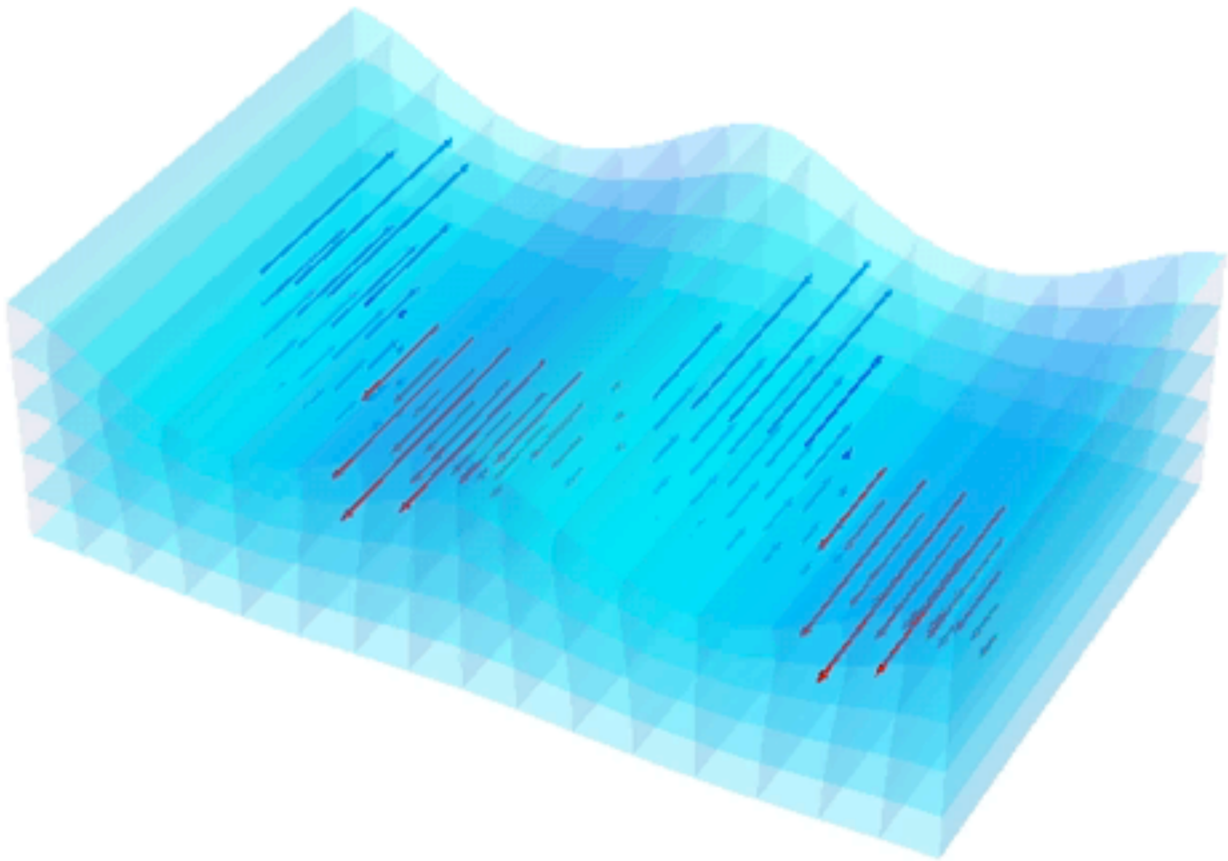
Phys. Rev. B87, 180402(R) (2013)

Thank you so much for your attention!!

Spin accumulation at the surface:





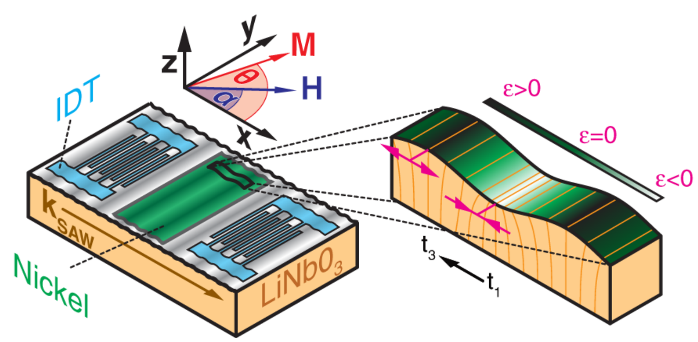


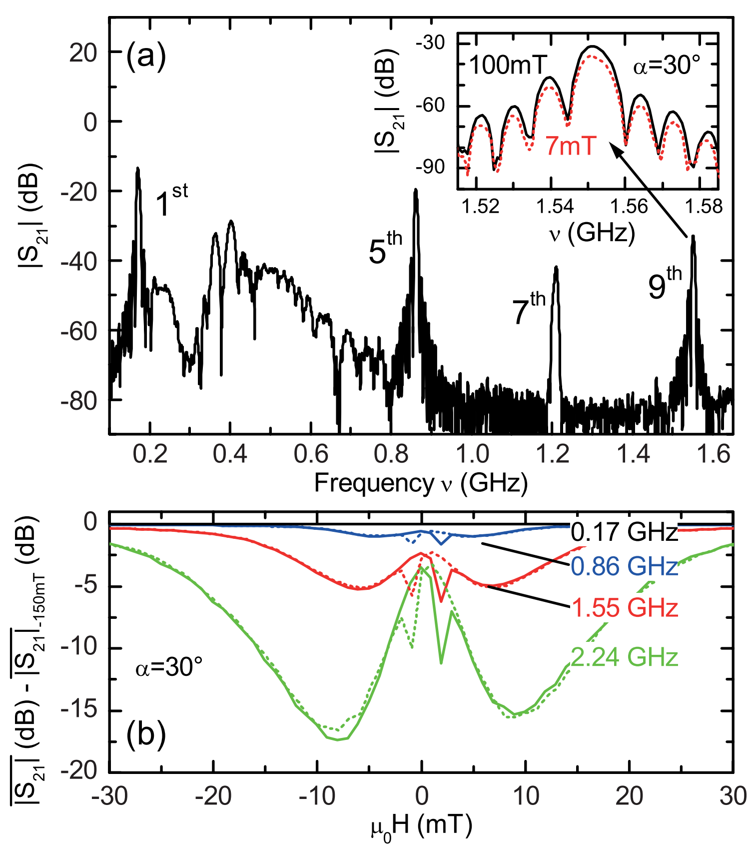
SAW in ferromagnets

PRL 106, 117601 (2011) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 18 MARCH 2011

Elastically Driven Ferromagnetic Resonance in Nickel Thin Films

M. Weiler,[1] L. Dreher,[2] C. Heeg,[1] H. Huebl,[1] R. Gross,[1] M. S. Brandt,[2] and S. T. B. Goennenwein[1]
[1]*Walther-Meißner-Institut, Bayerische Akademie der Wissenschaften, 85748 Garching, Germany*
[2]*Walter Schottky Institut, Technische Universität München, 85748 Garching, Germany*
(Received 24 November 2010; published 14 March 2011)





nature materials LETTERS
PUBLISHED ONLINE: 21 AUGUST 2011 | DOI: 10.1038/NMAT3099

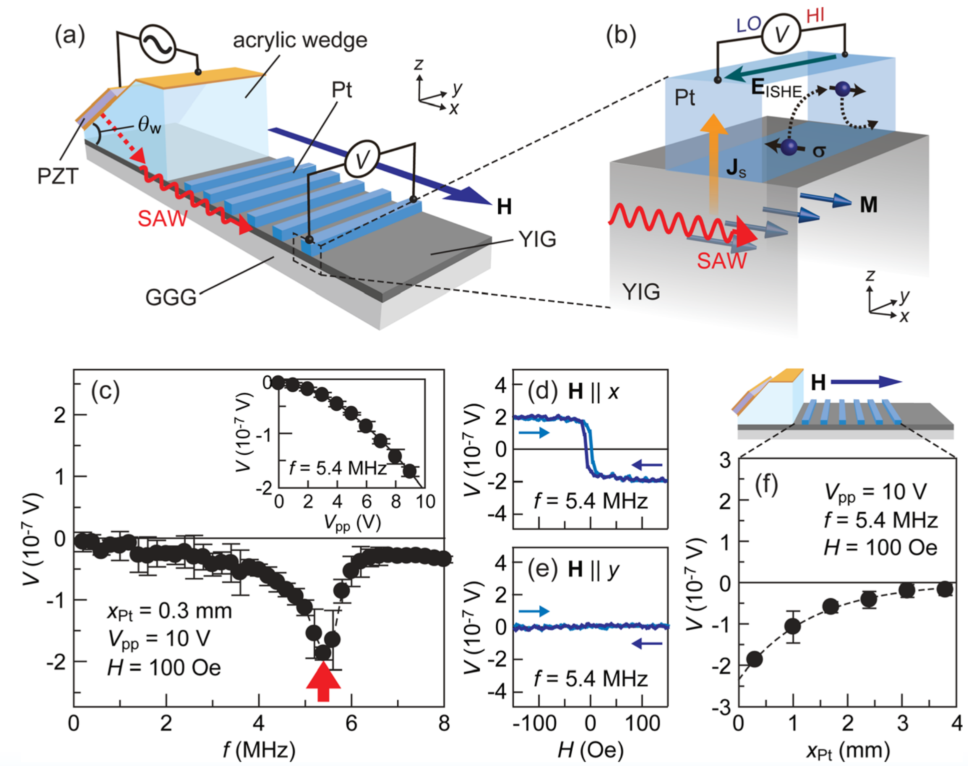
Long-range spin Seebeck effect and acoustic spin pumping

K. Uchida[1,2], H. Adachi[2,3], T. An[1,2], T. Ota[1,2], M. Toda[4], B. Hillebrands[5], S. Maekawa[2,3] and E. Saitoh[1,2,3,6]★

JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 111, 053903 (2012)

Acoustic spin pumping: Direct generation of spin currents from sound waves in Pt/$Y_3Fe_5O_{12}$ hybrid structures

K. Uchida,[1,2,a)] H. Adachi,[2,3] T. An,[1,2] H. Nakayama,[1,2] M. Toda,[4] B. Hillebrands,[5] S. Maekawa,[2,3] and E. Saitoh[1,2,3]
[1]*Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan*
[2]*CREST, Japan Science and Technology Agency, Sanbancho, Tokyo 102-0075, Japan*
[3]*Advanced Science Research Center, Japan Atomic Energy Agency, Tokai 319-1195, Japan*
[4]*Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan*
[5]*Fachbereich Physik and Forschungszentrum OPTIMAS, Technische Universität Kaiserslautern, 67663 Kaiserslautern, Germany*

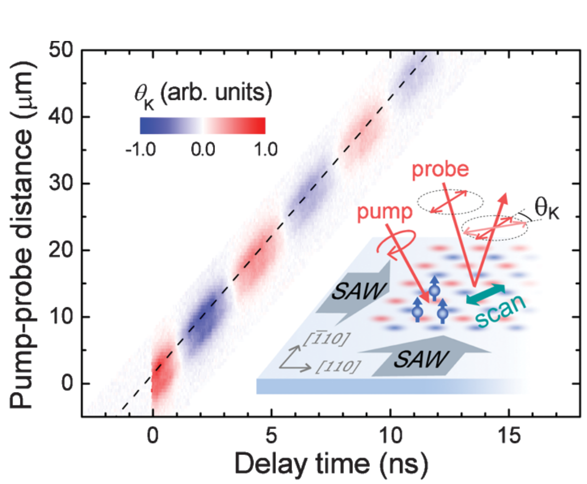


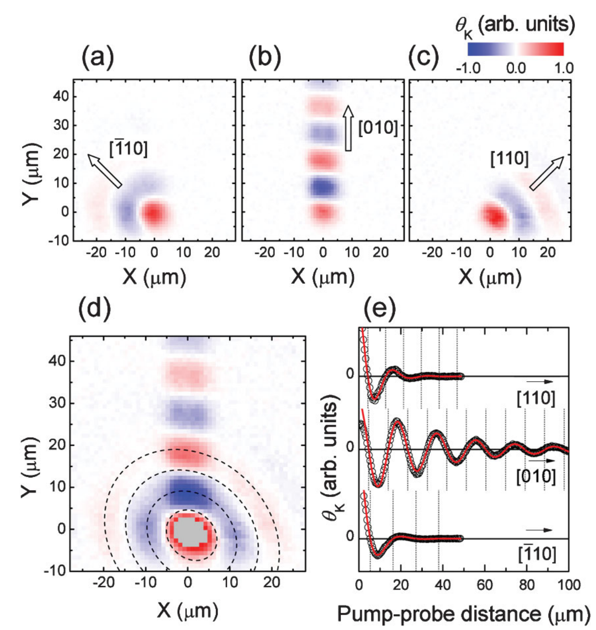
Spin manipulation by SAW: strain spin-orbit interaction

PRL 106, 216602 (2011) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 27 MAY 2011

Acoustically Induced Spin-Orbit Interactions Revealed by Two-Dimensional Imaging of Spin Transport in GaAs

H. Sanada,[1,*] T. Sogawa,[1] H. Gotoh,[1] K. Onomitsu,[1] M. Kohda,[2] J. Nitta,[2] and P. V. Santos[3]
[1]NTT Basic Research Laboratories, NTT Corporation, 3-1 Morinosato-Wakamiya, Atsugi, Kanagawa 243-0198, Japan
[2]Department of Materials Science, Tohoku University, 6-6-02 Aramaki-Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan
[3]Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik, Hausvogteiplatz 5-7, 10117 Berlin, Germany
(Received 22 November 2010; published 26 May 2011)



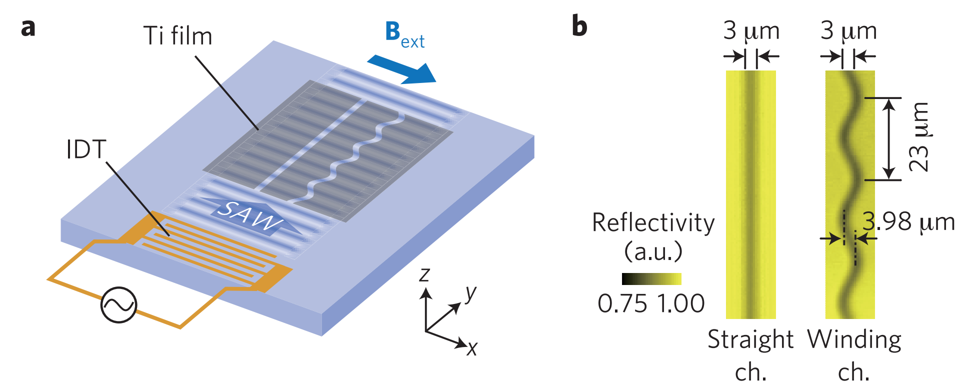


GHz range SAW:
Strain induced spin-orbit interaction in GaAs

nature physics LETTERS
PUBLISHED ONLINE: 17 MARCH 2013 | DOI: 10.1038/NPHYS2573

Manipulation of mobile spin coherence using magnetic-field-free electron spin resonance

H. Sanada[1*], Y. Kunihashi[1], H. Gotoh[1], K. Onomitsu[1], M. Kohda[2], J. Nitta[2], P. V. Santos[3] and T. Sogawa[1]



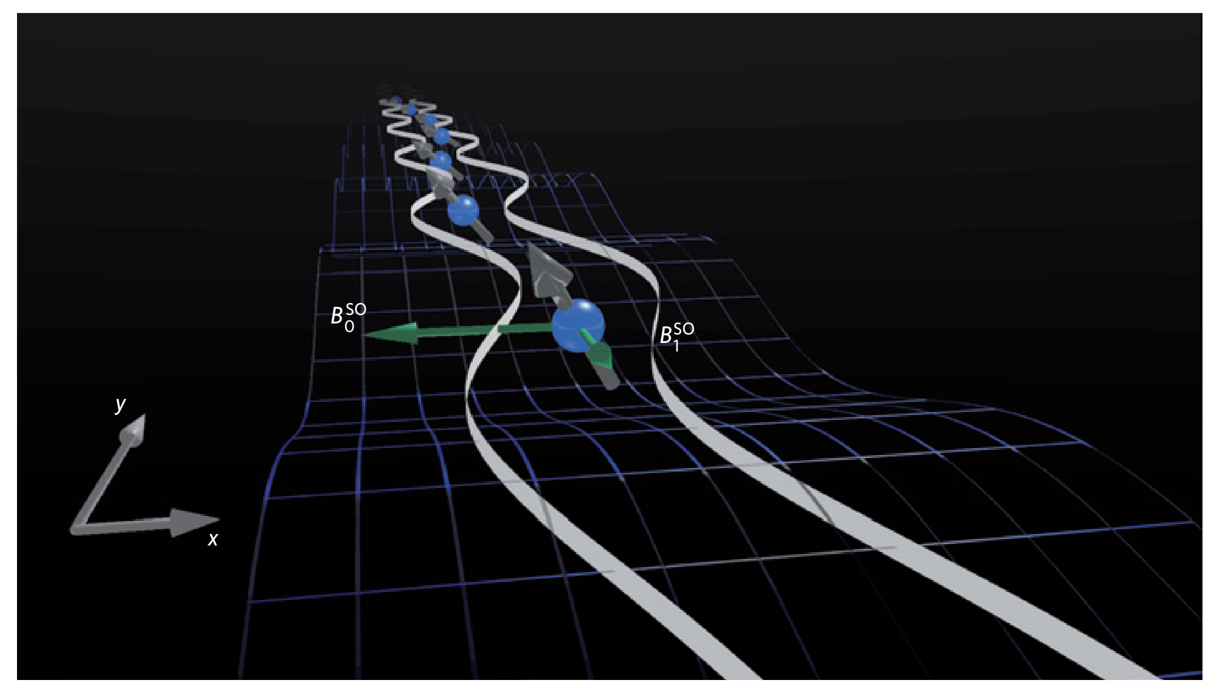
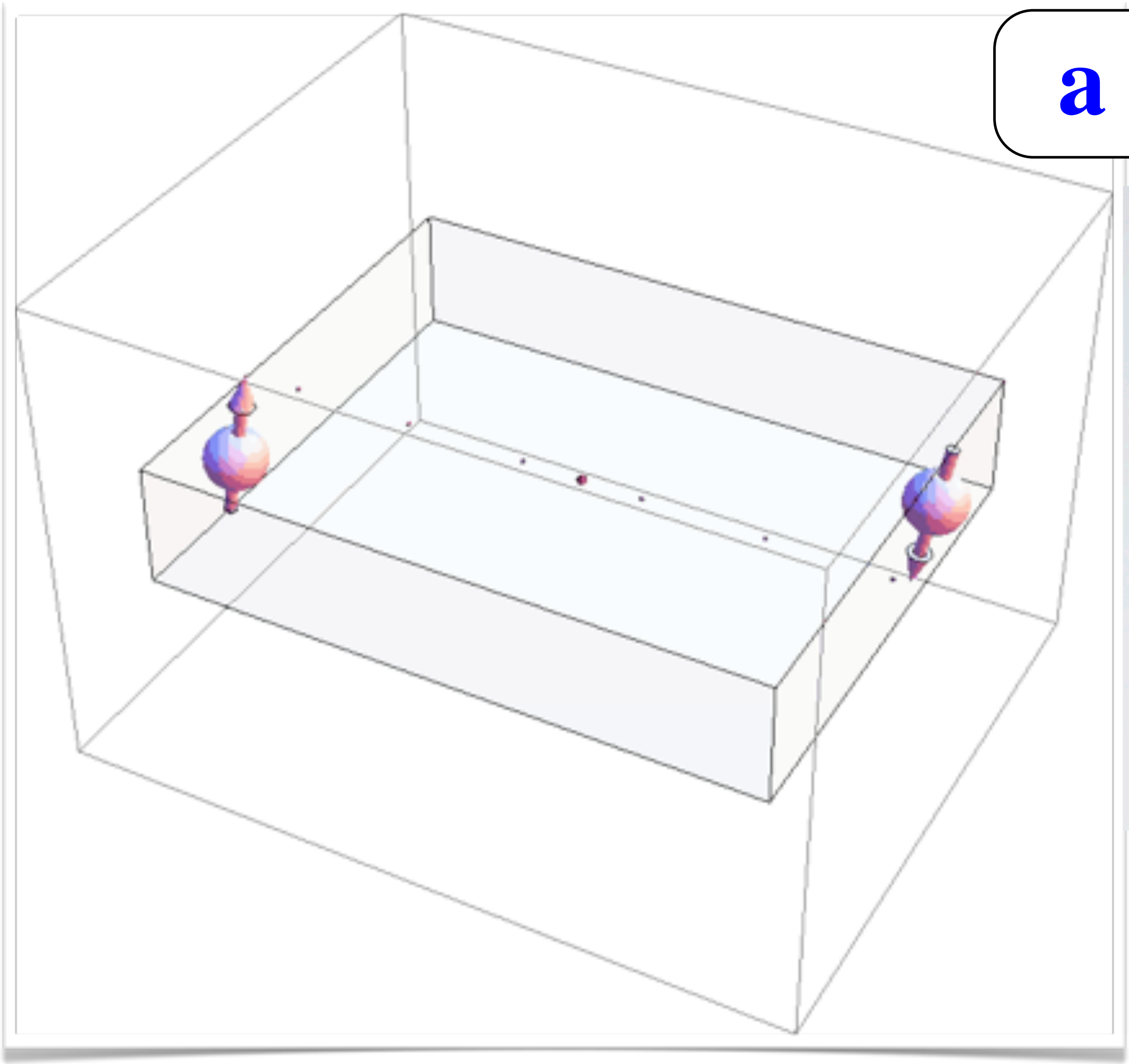


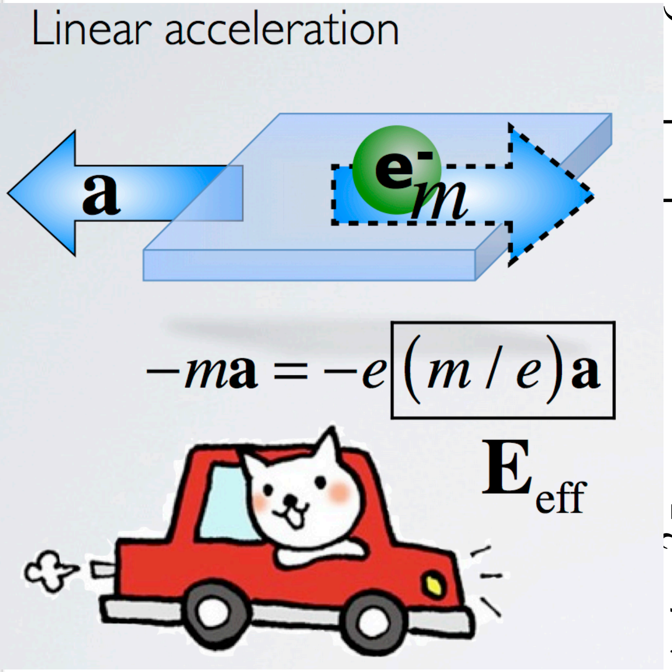
Figure 1 | Magnetic field-free ESR. Using SAWs in GaAs, electrons are guided along a meandering path. The SAWs move the electrons in the *y* direction with a constant momentum, generating a constant effective magnetic field B_0^{SO} in the *x* direction through the spin–orbit interaction. The meandering path oscillates the momentum in the *x* direction, generating an alternating effective magnetic field B_1^{SO} in the *y* direction.

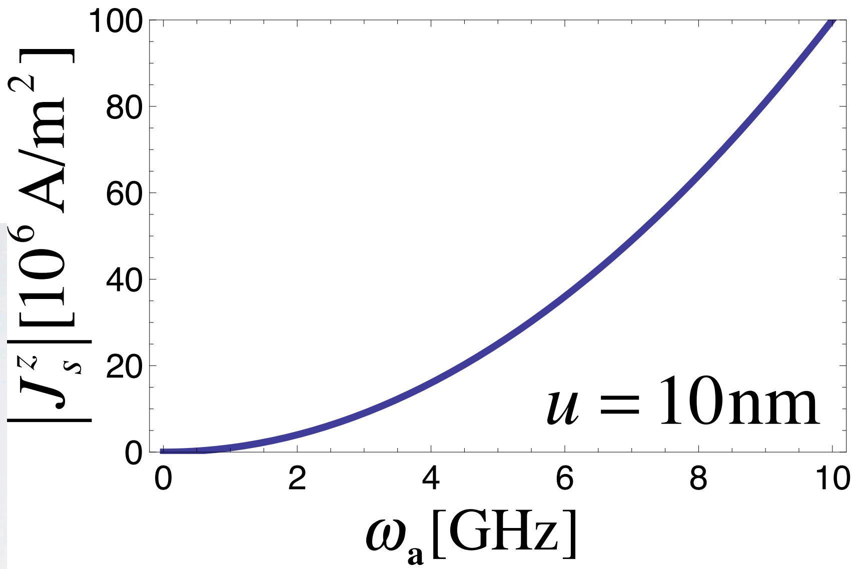
Mechanical Spin Hall Effect due to vibration

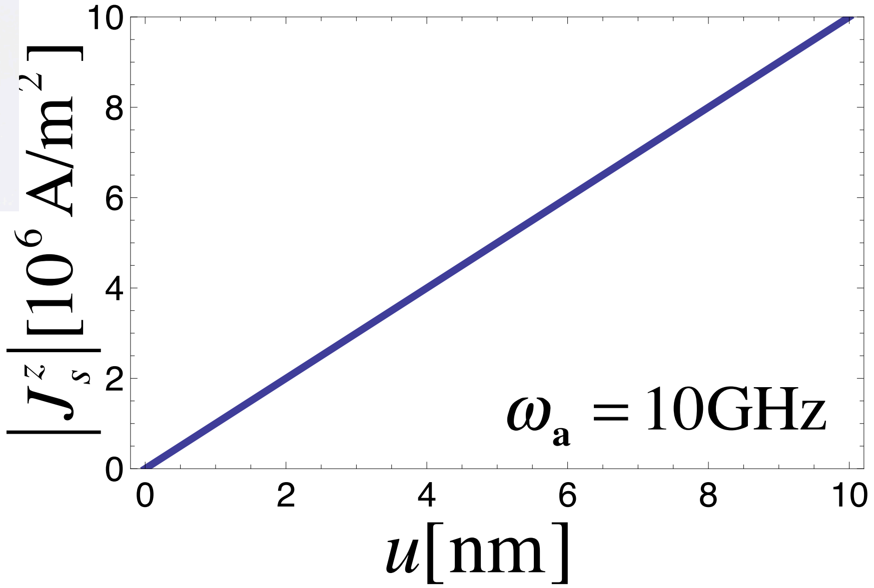
$$+\frac{\bar{\lambda}}{\hbar}\boldsymbol{\sigma}\cdot\left[(\mathbf{p}+e\mathbf{A})\times(-e)\left(\mathbf{E}+m\mathbf{a}/(-e)\right)\right]$$



$$\mathbf{a}=u\omega_{\mathrm{a}}{}^{2}e^{i\omega_{\mathrm{a}}t}$$







$$J_s^{\,a}(R)=2ne\bar{\lambda}k_F{}^2\frac{\hbar}{\varepsilon_F}\times\boxed{u\omega_a{}^2}$$

$$=10^{-5}\times\boxed{10^{-9}\mathrm{m}\times\left(10^{10}\mathrm{Hz}\right)^2}\Rightarrow 10^6\,\mathrm{A/m^2}$$

Matsuo et al., PRB 84, 104410 (2011)

Time-resolved Kerr spectroscopy

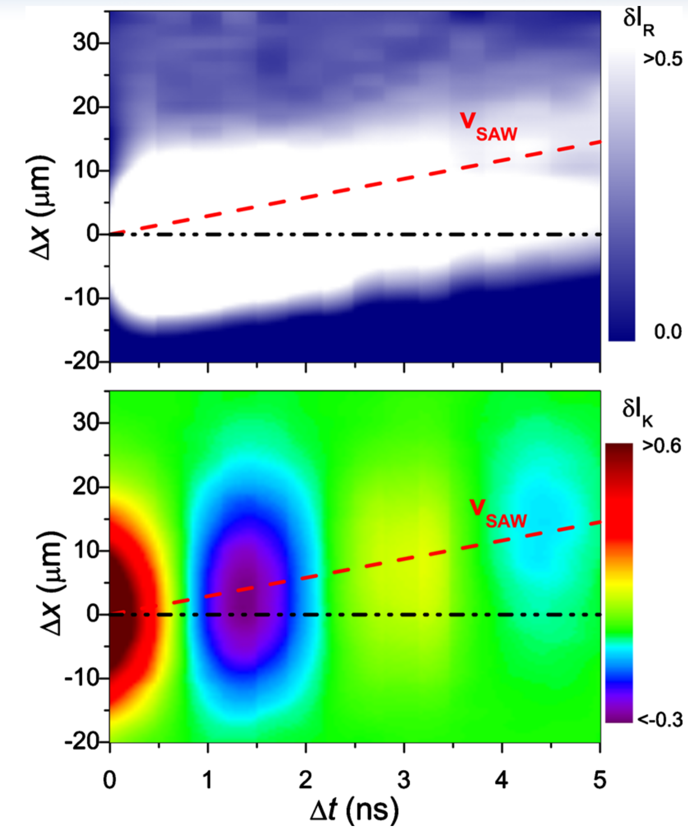
APPLIED PHYSICS LETTERS **97**, 242110 (2010)

Kerr detection of acoustic spin transport in GaAs (110) quantum wells

A. Hernández-Mínguez,[a)] K. Biermann, S. Lazić, R. Hey, and P. V. Santos
Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik, Hausvogteiplatz 5-7, 10117 Berlin, Germany

(Received 29 September 2010; accepted 12 November 2010; published online 16 December 2010)

Time-resolved Kerr reflectometry (TRKR) is used to investigate the long-range transport of spins by surface acoustic waves in undoped GaAs (110) quantum wells. TRKR measurements under an applied magnetic field demonstrate the coherent precession of the optically generated electron spin during acoustic transport over several micrometers and yield information about the relaxation processes for moving spins. © *2010 American Institute of Physics*. [doi:10.1063/1.3524218]

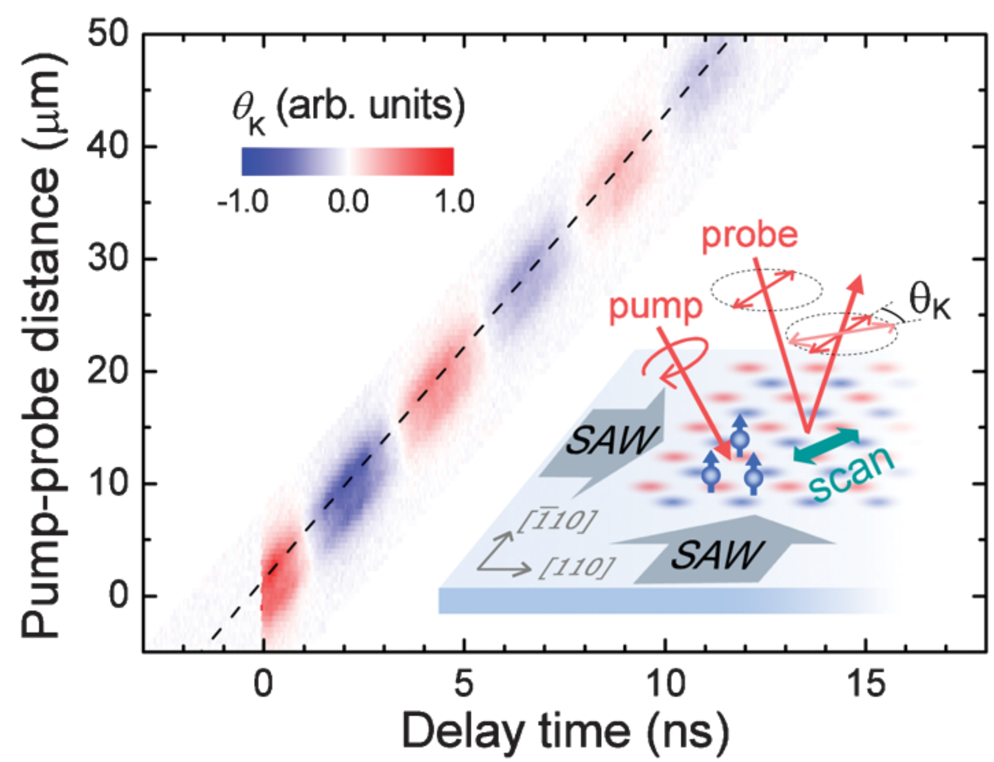


PRL **106,** 216602 (2011) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 27 MAY 2011

Acoustically Induced Spin-Orbit Interactions Revealed by Two-Dimensional Imaging of Spin Transport in GaAs

H. Sanada,[1,*] T. Sogawa,[1] H. Gotoh,[1] K. Onomitsu,[1] M. Kohda,[2] J. Nitta,[2] and P. V. Santos[3]
[1]*NTT Basic Research Laboratories, NTT Corporation, 3-1 Morinosato-Wakamiya, Atsugi, Kanagawa 243-0198, Japan*
[2]*Department of Materials Science, Tohoku University, 6-6-02 Aramaki-Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan*
[3]*Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik, Hausvogteiplatz 5-7, 10117 Berlin, Germany*
(Received 22 November 2010; published 26 May 2011)

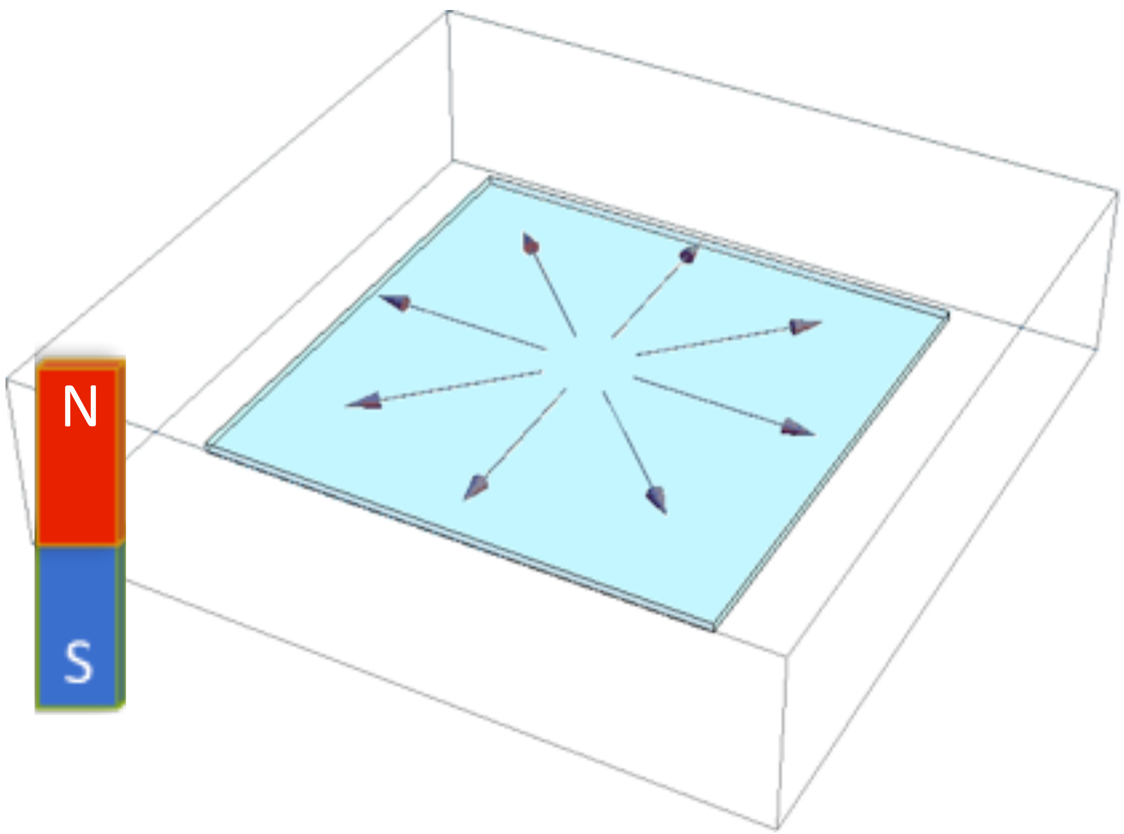
Magneto-optic Kerr microscopy was employed to investigate the spin-orbit interactions of electrons traveling in semiconductor quantum wells using surface acoustic waves (SAWs). Two-dimensional images of the spin flow induced by SAWs exhibit anisotropic spin precession behaviors caused by the coexistence of different types of spin-orbit interactions. The dependence of spin-orbit effective magnetic fields on SAW intensity indicates the existence of acoustically controllable spin-orbit interactions resulting from the strain and Rashba contributions induced by the SAWs.



Maxwell's equations on merry-go-round

L. I. Schff, Proc. Nat. Acad. Sci. (1939)
"A question in general relativity"

"Maxwell's eq. on merry-go-round"



$$E_{rot} = E + (\Omega \times r) \times B$$
$$B_{rot} = B$$

$$H_{SOI} = \frac{q\lambda}{\hbar} \sigma \cdot (p - qA) \times (E + (\Omega \times r) \times B)$$

Consistent with E-B field in rotating frame.

cf. Matsuo, Ieda, Saitoh, & Maekawa,
Phys. Rev. B 84, 104410 (2011), Appendix

E-M field in rotating frame

Rotation (non-inertial frame) asymmetry of E/c & B

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{\mathrm{rot}} \approx \mathbf{E}_{\mathrm{rest}} + (\boldsymbol{\Omega}\times\mathbf{r})\times\mathbf{B}_{\mathrm{rest}} \\ \mathbf{B}_{\mathrm{rot}} \approx \mathbf{B}_{\mathrm{rest}} \end{cases} \text{(rotating frame)}$$

$\Uparrow$ general coordinate tr. by velocity $\boldsymbol{\Omega}\times\mathbf{r}$

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{\mathrm{rest}} \\ \mathbf{B}_{\mathrm{rest}} \end{cases} \text{(rest frame)}$$

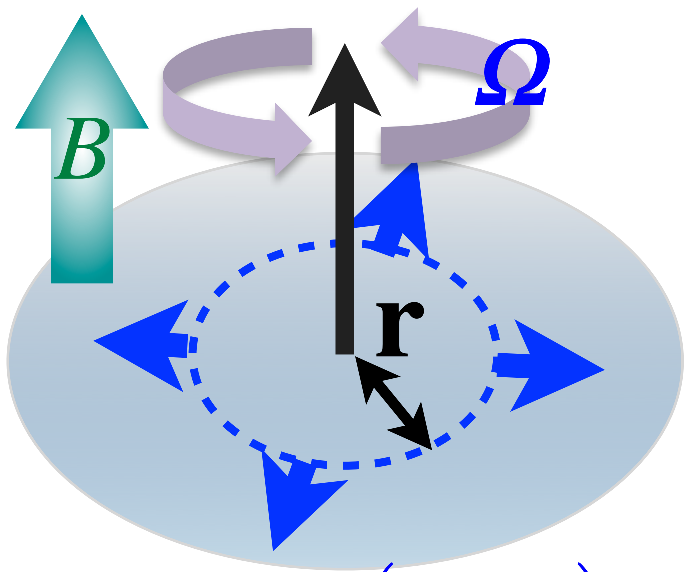
Lorentz tr. (inertial frame) symmetry of E/c & B

$$\begin{cases} \mathbf{E}'/c = \gamma(\mathbf{E}/c + \boldsymbol{\beta}\times\mathbf{B}) - \dfrac{\gamma^2}{\gamma+1}(\boldsymbol{\beta}\cdot\mathbf{E}/c)\boldsymbol{\beta} \\ \mathbf{B}' = \gamma(\mathbf{B} - \boldsymbol{\beta}\times\mathbf{E}/c) - \dfrac{\gamma^2}{\gamma+1}(\boldsymbol{\beta}\cdot\mathbf{B})\boldsymbol{\beta} \end{cases}$$

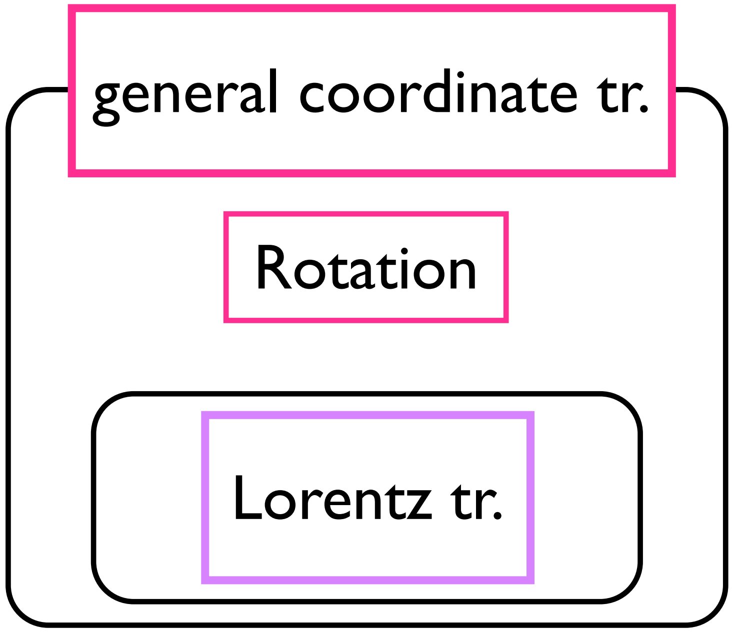
$\Uparrow$ Lorentz tr. by $\boldsymbol{\beta} = \mathbf{v}/c \left(\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}\right)$

$$\begin{cases} \mathbf{E} \\ \mathbf{B} \end{cases} \text{(rest frame)}$$

$$\boxed{\tilde{H}_{SOI} = \frac{\lambda}{\hbar}\boldsymbol{\sigma}\cdot\left[(\mathbf{p}-q\mathbf{A})\times q\left(\mathbf{E}+(\boldsymbol{\Omega}\times\mathbf{r})\times\mathbf{B}\right)\right]}$$



$$\mathbf{E}_{rot} = (\Omega\cdot B)\mathbf{r}$$



GENERAL COORDINATE TRANSFORMATION

$$\begin{pmatrix} dt' \\ dx' \\ dy' \\ dz' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \partial t'/\partial t & \partial t'/\partial x & \partial t'/\partial y & \partial t'/\partial z \\ \partial x'/\partial t & \partial x'/\partial x & \partial x'/\partial y & \partial x'/\partial z \\ \partial y'/\partial t & \partial y'/\partial x & \partial y'/\partial y & \partial y'/\partial z \\ \partial z'/\partial t & \partial z'/\partial x & \partial z'/\partial y & \partial z'/\partial z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dt \\ dx \\ dy \\ dz \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} t' \\ x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Omega t & -\sin\Omega t & 0 \\ 0 & \sin\Omega t & \cos\Omega t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} dt' \\ dx' \\ dy' \\ dz' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\Omega y & \cos\Omega t & -\sin\Omega t & 0 \\ \Omega x & \sin\Omega t & \cos\Omega t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dt \\ dx \\ dy \\ dz \end{pmatrix} \qquad R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\Omega y & \cos\Omega t & -\sin\Omega t & 0 \\ \Omega x & \sin\Omega t & \cos\Omega t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

GENERAL COORDINATE TRANSFORMATION

$$F_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & E_x & E_y & E_z \\ -E_x & 0 & -B_z & B_y \\ -E_y & B_z & 0 & -B_x \\ -E_z & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix}$$

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\Omega y & \cos\Omega t & -\sin\Omega t & 0 \\ \Omega x & \sin\Omega t & \cos\Omega t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$F' = R^T F R$$

$$\Rightarrow \begin{cases} E' \approx E + (\Omega \times r) \times B \\ B' \approx B \end{cases}$$