

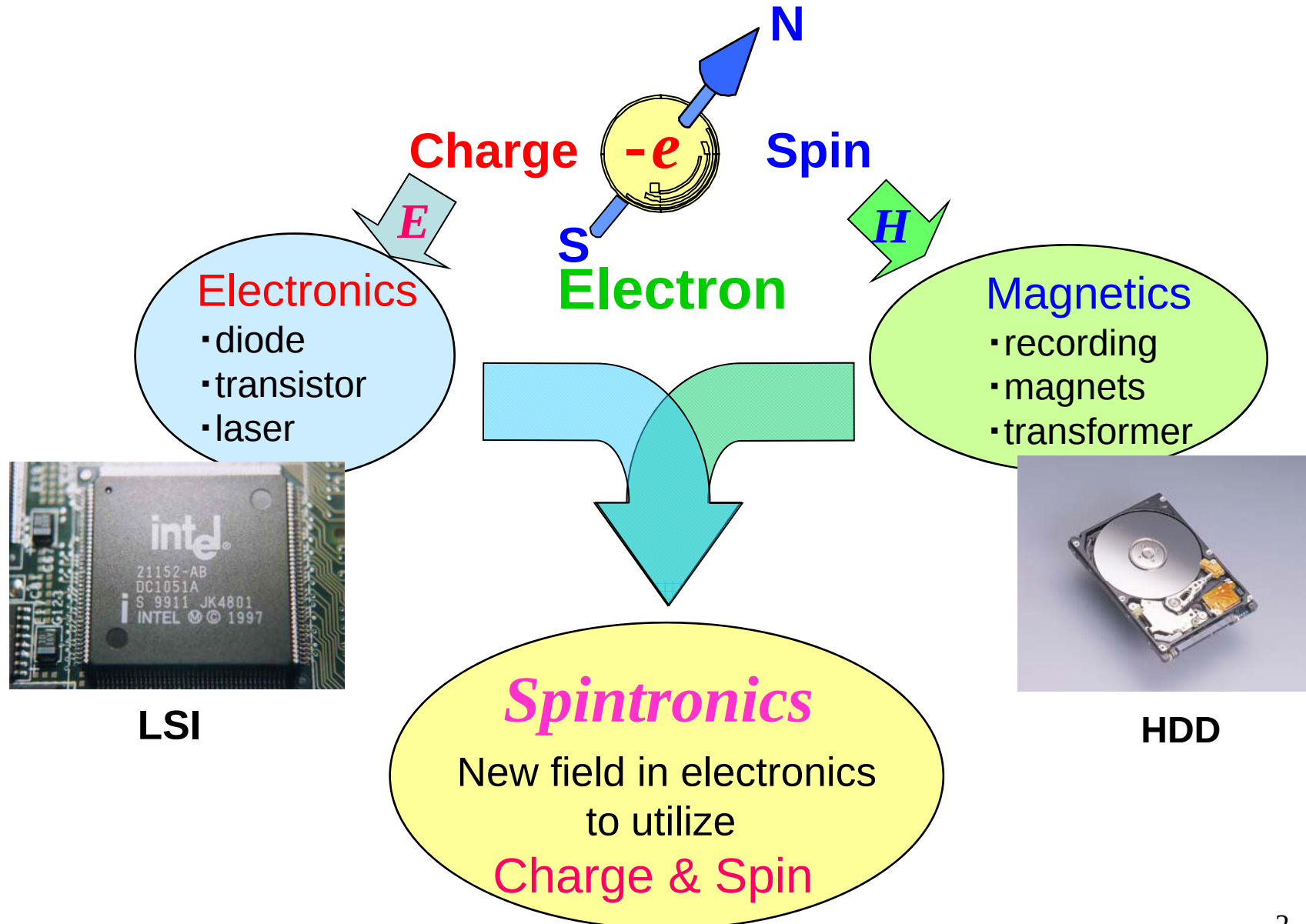
第34回 MSJサマースクール
「応用磁気の基礎」
2010年7月21日(水)

スピノエレクトロニクス

京都大学化学研究所
小野輝男



スピントロニクスとは？



High speed, High density, Low power consumption, etc.

スピニエレクトロニクスの展開

スピン依存伝導

磁気構造 → 電気伝導

- 巨大磁気抵抗効果
- トンネル磁気抵抗効果

スピントランスポー

スピン電流 → 磁気構造

- スピン注入磁化反転
 - 磁壁電流駆動
 - マイクロ波発振
- スピントルクダイオード

スピンホール効果

???

HDD

MRAM

高周波デバイス
スピントランジスタ
ポストHDD
???

スピニエレクトロニクス

スピンエレクトロニクス研究のマイルストーンの実際

年	事項	文献
1975年	トンネル磁気抵抗効果 (TMR) の発見	[1]
1985年	非磁性金属へのスピン注入	[2]
1988年	巨大磁気抵抗効果 (GMR) の発見	[3]
1991年	強磁性半導体 (InMnAs) の合成 (日本)	[4]
1995年	室温 TMR 効果 (日本)	[5]
1998年	スピン注入磁化反転の実証 (理論提案[17])	[6]
1999年	非磁性半導体へのスピン注入 (日本)	[7]
2000年	電界による強磁性半導体転移温度制御 (日本)	[8]
2001年	非局所 GMR 効果	[9]
2003年	スピン注入磁化反転素子のマイクロ波発振	[10]
2004年	電流駆動磁壁移動の実証 (理論提案[18]) (日本)	[11]
2004年	MgOバリア巨大 TMR 効果実証 (理論提案[19]) (日本)	[12]
2004年	スピンホール効果実証 (理論提案[20]) (日本)	[13]
2005年	スピントルクダイオード効果 (日本)	[14]
2007年	スピンホール絶縁体の実証 (理論提案[21])	[15]
2008年	スピンゼーベック効果の発見 (日本)	[16] ⁴

スピン依存伝導

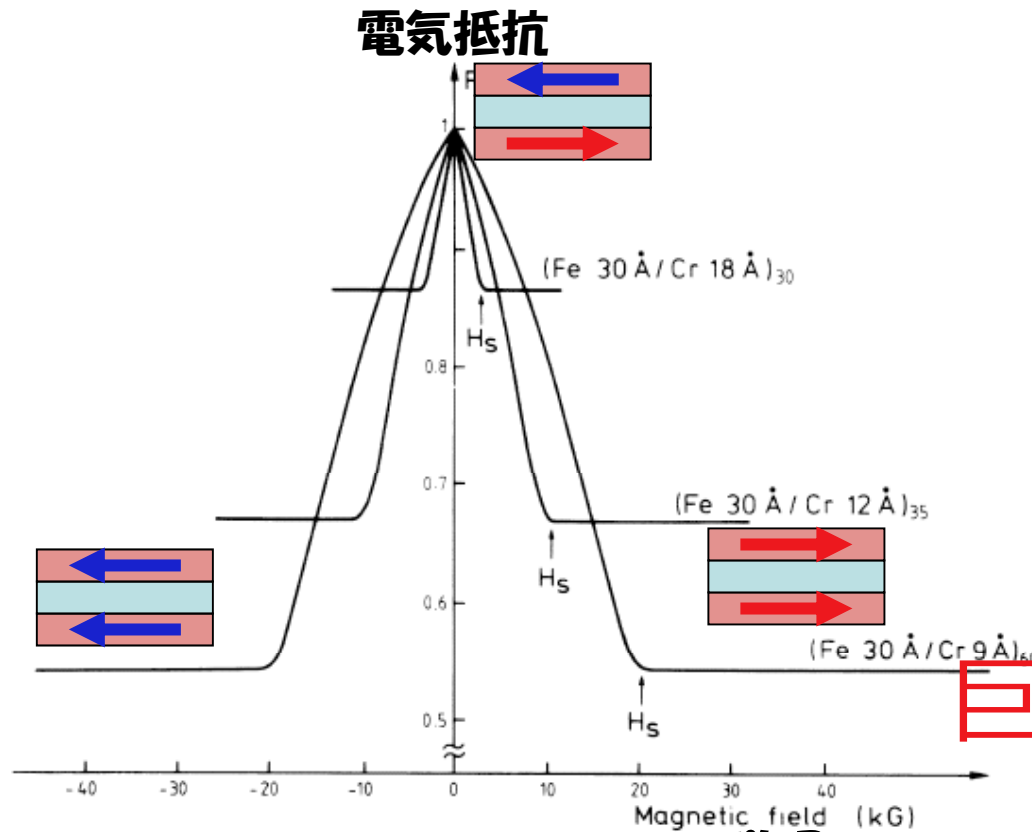
- ・ 巨大磁気抵抗効果
- ・ トンネル磁気抵抗効果

A large, stylized pink cloud shape with a small tail at the bottom left, serving as a background for the title text.

巨大磁気抵抗効果 (Giant Magnetoresistance) とハードディスクドライブ

巨大磁気抵抗効果とは

2007年ノーベル物理学賞受賞者

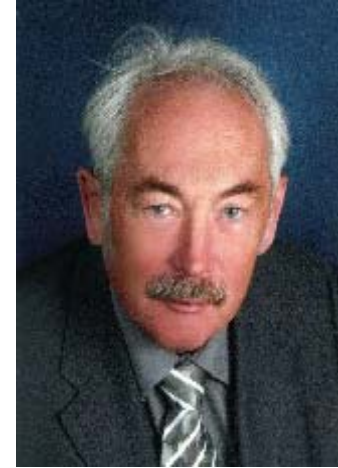


Phys. Rev. Lett. 61, (1988) 2472.

磁場



A. Fert



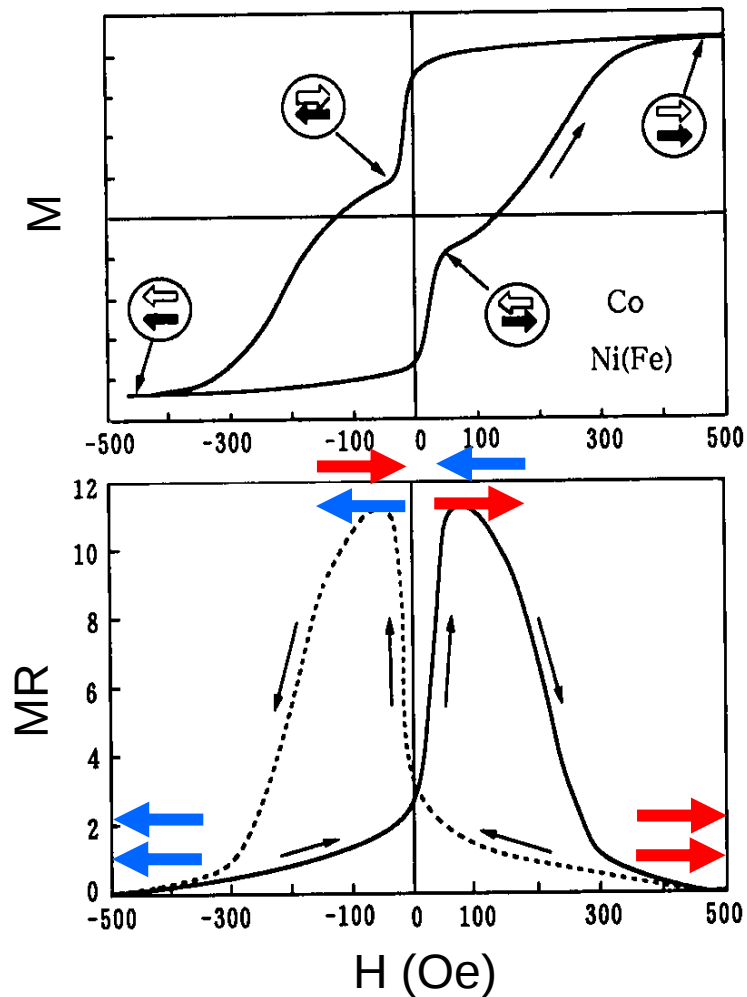
P. Grunberg

磁場による
巨大な電気抵抗変化

読みとりヘッドへの応用

読み取りヘッドにするには磁場が大きすぎる！

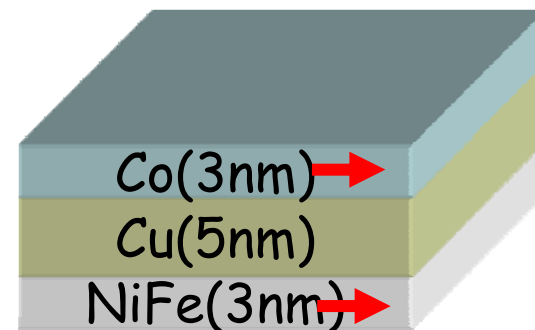
応用への大きなステップ。



T. Shinjo & H. Yamamoto, JPSJ 59 (90) 3061



新庄輝也 京大名誉教授

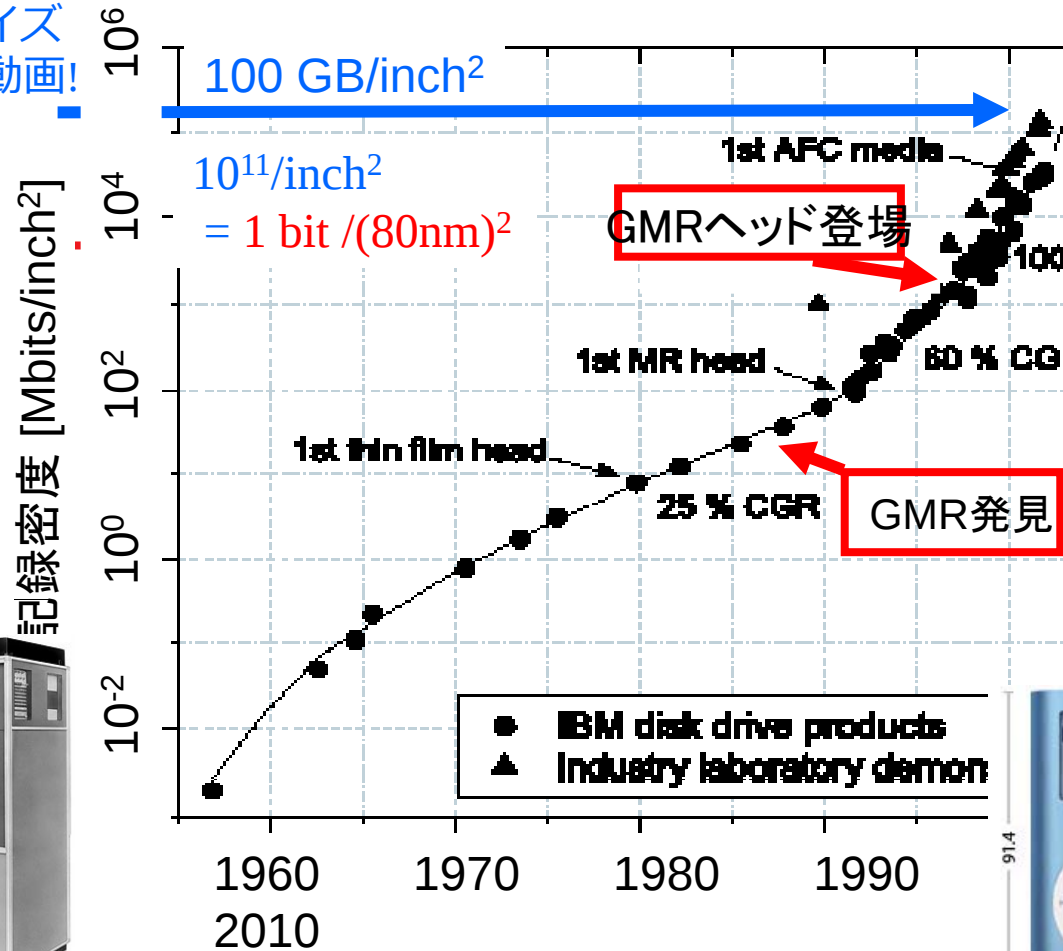


Co 磁氣的にハード
NiFe 磁氣的にソフト

小さな磁場で抵抗変化が起こることを実証⁸!

GMRが世界を変えた！

500円玉サイズ
数百時間の動画！



130
Gbits/in²



数百時間の録画！



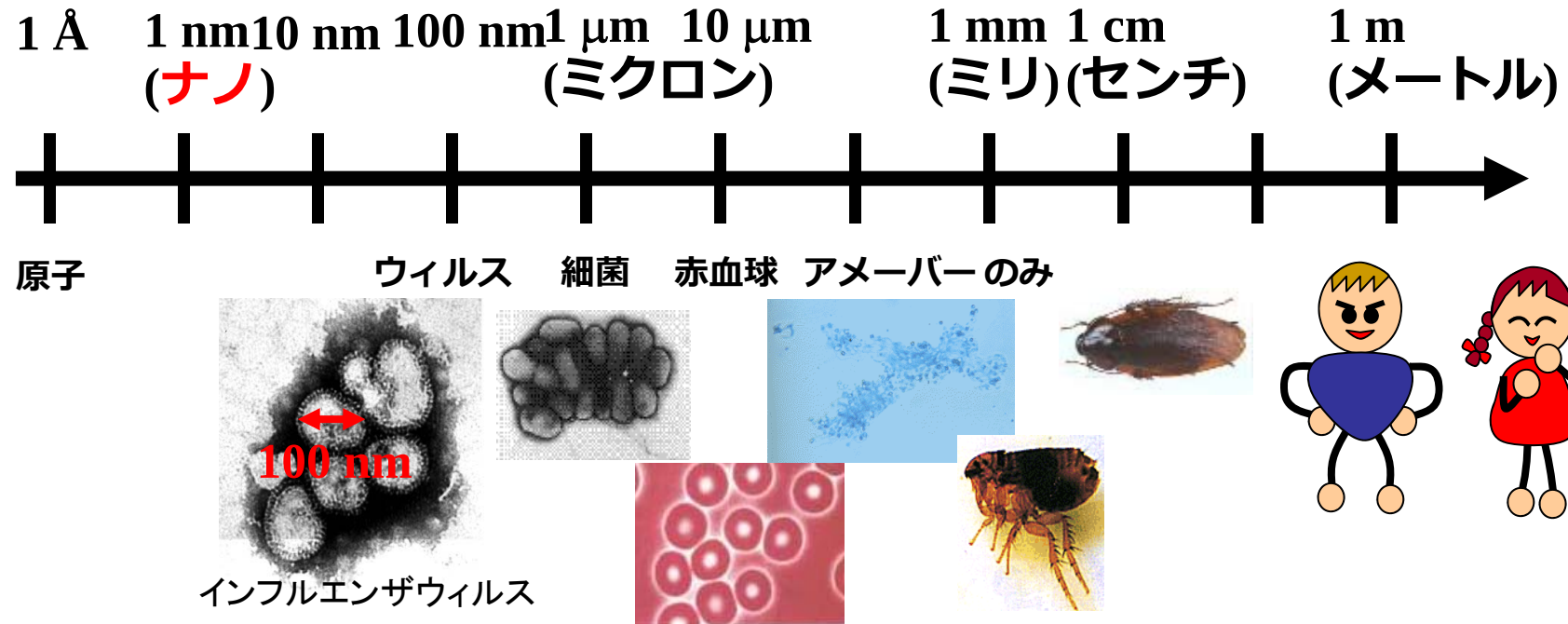
(IBM 1956年)

5MB

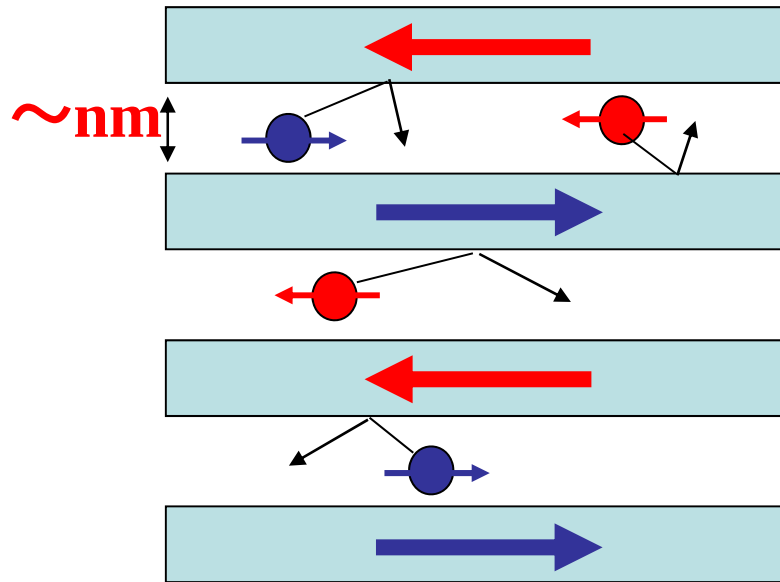


携帯プレーヤーで数千曲

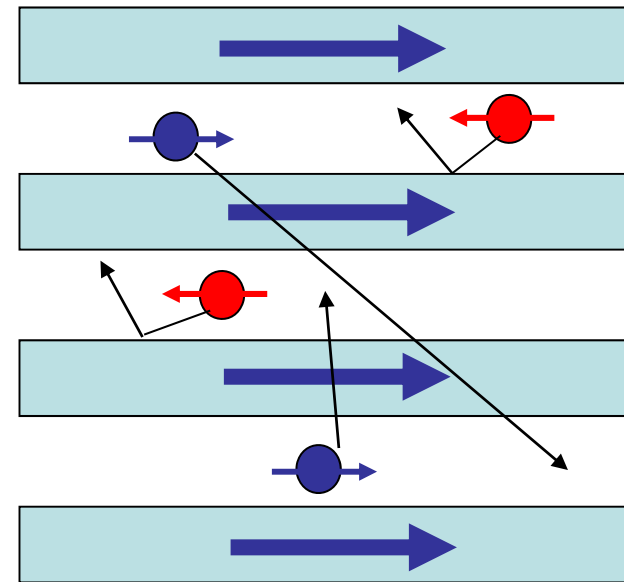
ナノメートルの世界



巨大磁気抵抗効果の原理



反平行
抵抗大

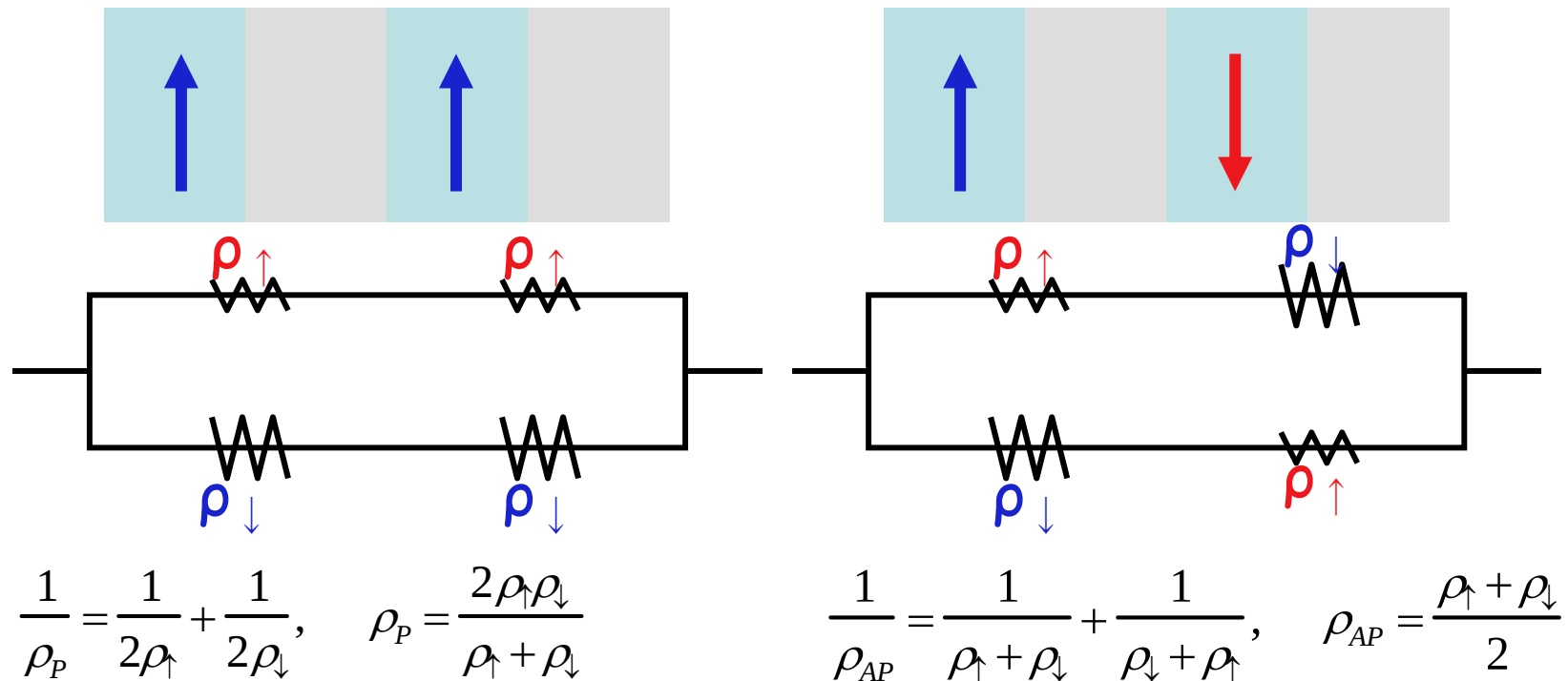


平行
抵抗小

青スピン電子が短絡回路

GMRが教えてくれたこと
伝導電子のスピン自由度の重要性
スピンを利用したエレクトロニクスへ！！

Two-current model



$$\rho_{AP} - \rho_P = \frac{(\rho_{\uparrow} - \rho_{\downarrow})^2}{2(\rho_{\uparrow} + \rho_{\downarrow})} \geq 0$$

スピントロニクス展開

スピン依存伝導

磁気構造 → 電気伝導

- 巨大磁気抵抗効果
- トンネル磁気抵抗効果

スピントランスポース

スピン電流 → 磁気構造

- スピン注入磁化反転
 - 磁壁電流駆動
 - マイクロ波発振
- スピントルクダイオード

スピンホール効果

???

HDD

MRAM

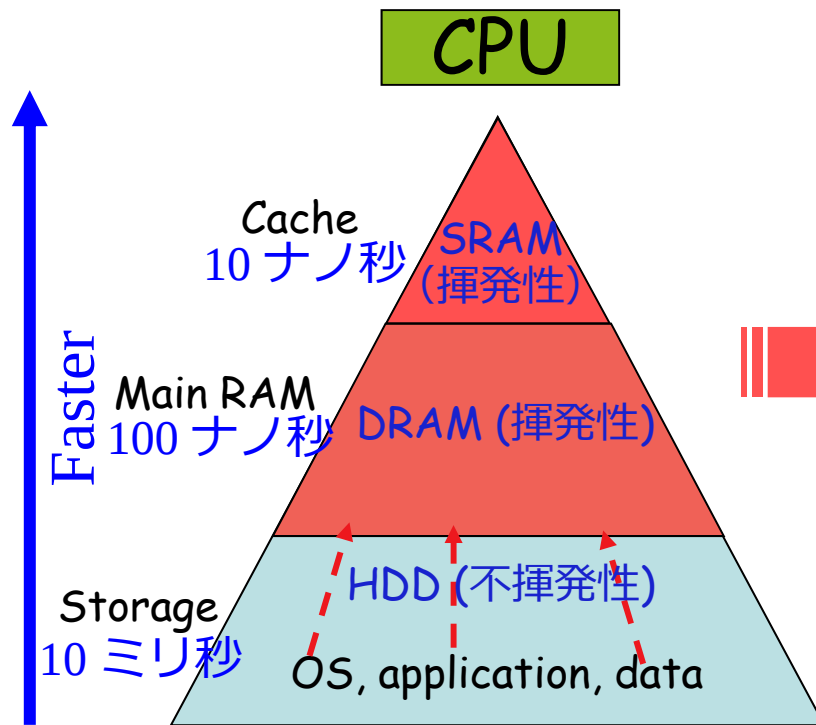
高周波デバイス
スピントランジスタ
ポストHDD
???

スピントロニクス

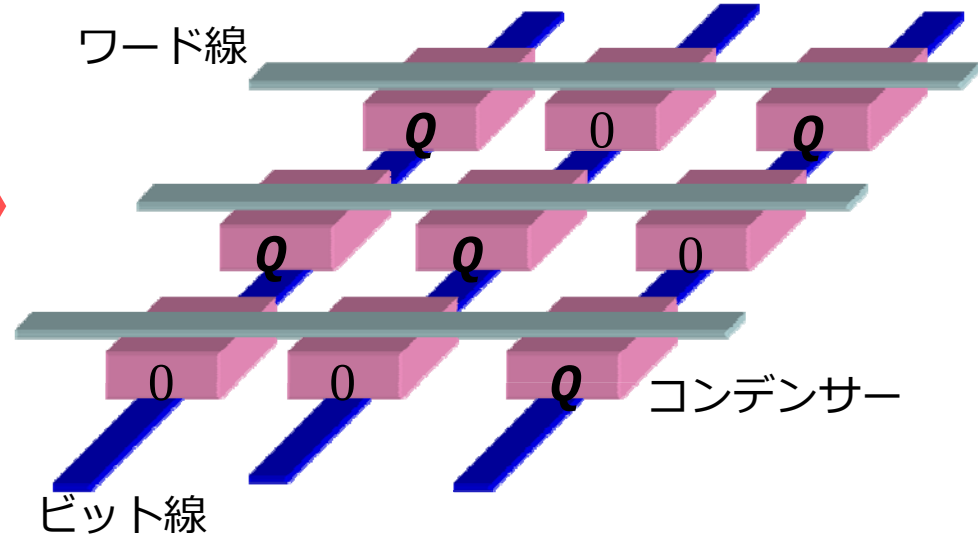
A large, stylized pink cloud shape with a small tail at the bottom left, serving as a background for the title text.

トンネル磁気抵抗効果 Tunnel Magnetoresistance と磁気メモリー

コンピューターの階層構造



半導体ランダムアクセスメモリの構造



コンデンサーから電荷が漏れてしまうので
情報が短時間でなくなってしまう（揮発性）

常に情報を書き込み続けている！

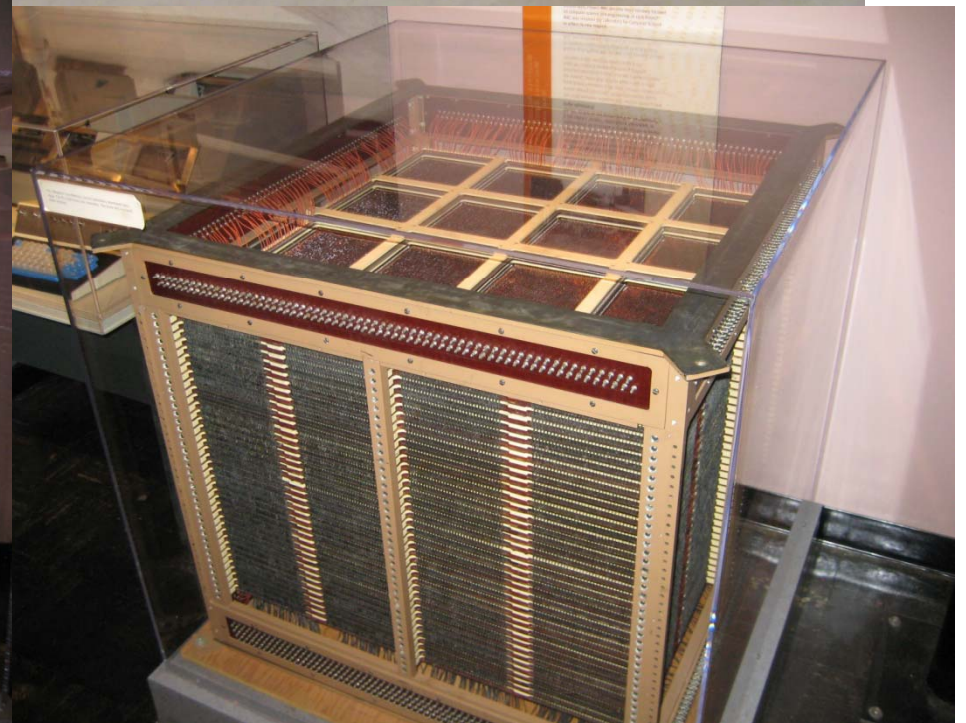
ノーマリー・オンコンピューター
エネルギーの無駄遣い

ノーマリー・**オフ** コンピューターは
作れるか？

ノーマリー・オフコンピューターは
安藤功児氏（産総研）の造語

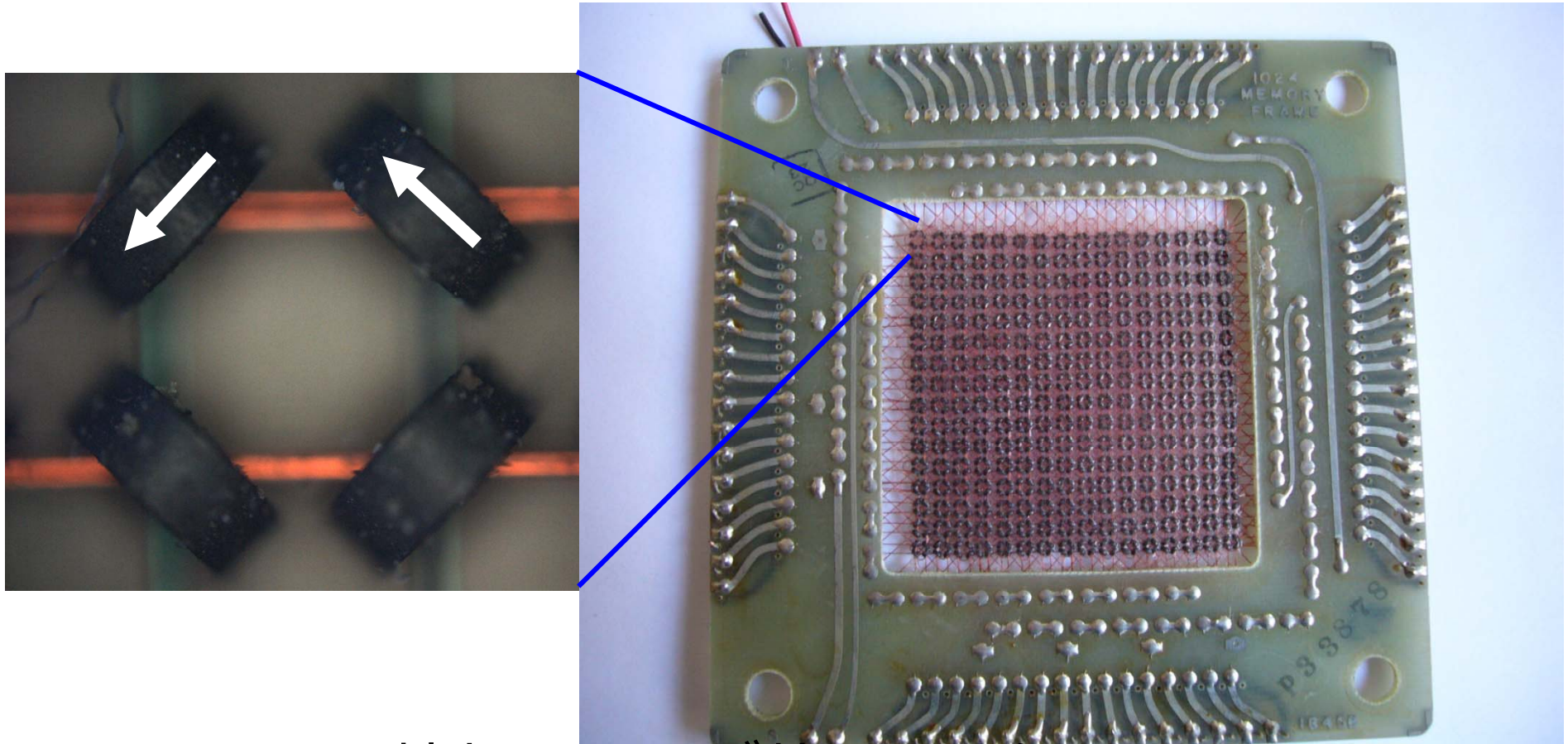
半導体メモリーが出来る前は
コンピューターの情報は
磁気メモリーに蓄えられていた

TX-2 Magnetic Core Memory, Lincoln Laboratory, developed 1952-1959. The TX-2 had three core memories. This is the fast 64k-word index memory.



@MIT museum

磁気コアメモリー



情報はリング状磁石の向き
電源を切っても情報は消えない！

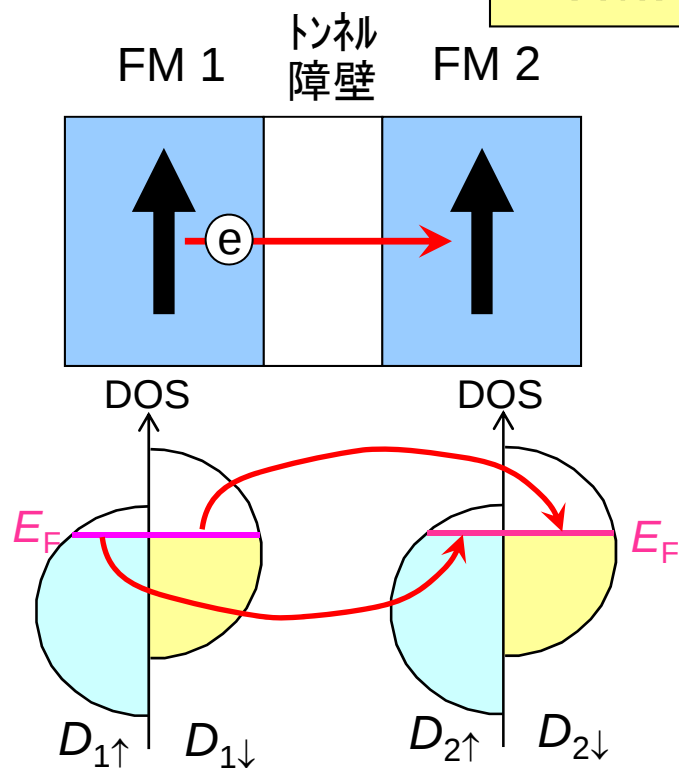
しかし、微細化が困難であった。。。 18

どうやって
ノーマリー・オフ コンピューターを作るか？

小さな磁気メモリーを作るだけでよい！

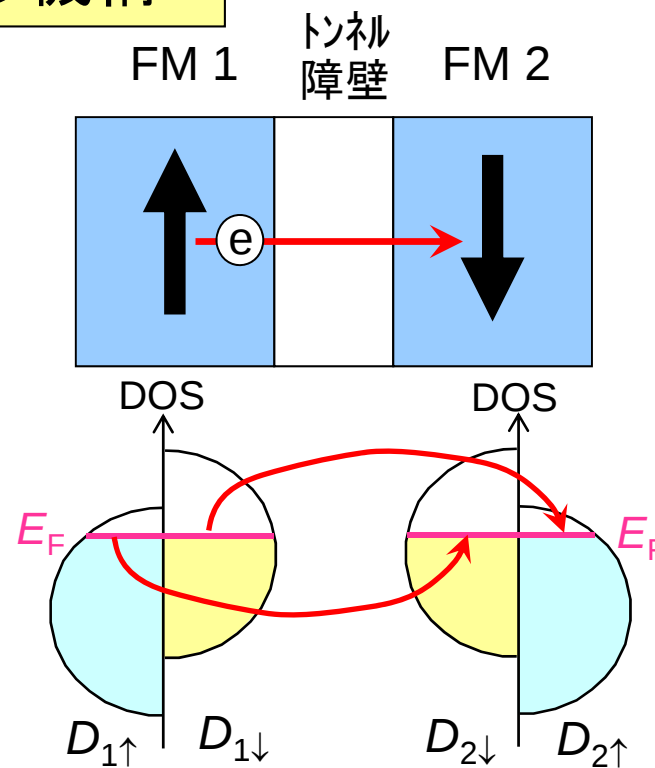
TMR効果の機構

Julliereモデル(1975)



平行磁化

トンネル抵抗: R_P



反平行磁化

トンネル抵抗: R_{AP}

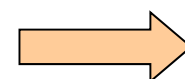
$$MR \equiv (R_{AP} - R_P) / R_P = 2P_1P_2 / (1 - P_1P_2), \quad P_\alpha = \frac{(D_{\alpha\uparrow}(E_F) - D_{\alpha\downarrow}(E_F))}{(D_{\alpha\uparrow}(E_F) + D_{\alpha\downarrow}(E_F))}, \quad \alpha = 1, 2.$$

スピン分極率

(Courtesy of Shinji Yuasa(AIST))

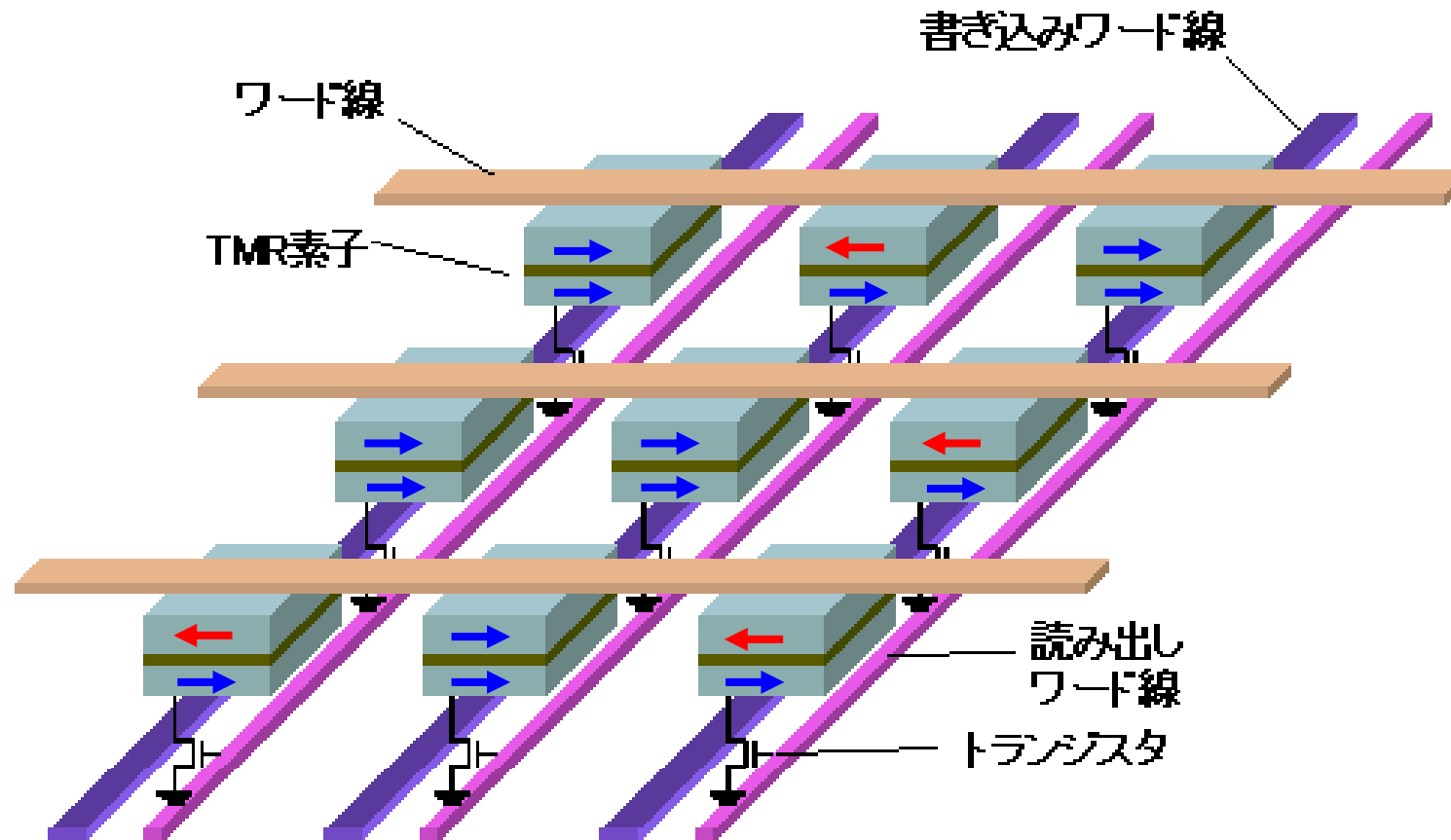
3d強磁性金属・合金のスピン分極率 P

$P < 0.6$ (低温における実験値)



MR 比 $\sim 100\%$ (低温)
 $\sim 70\%$ (室温)

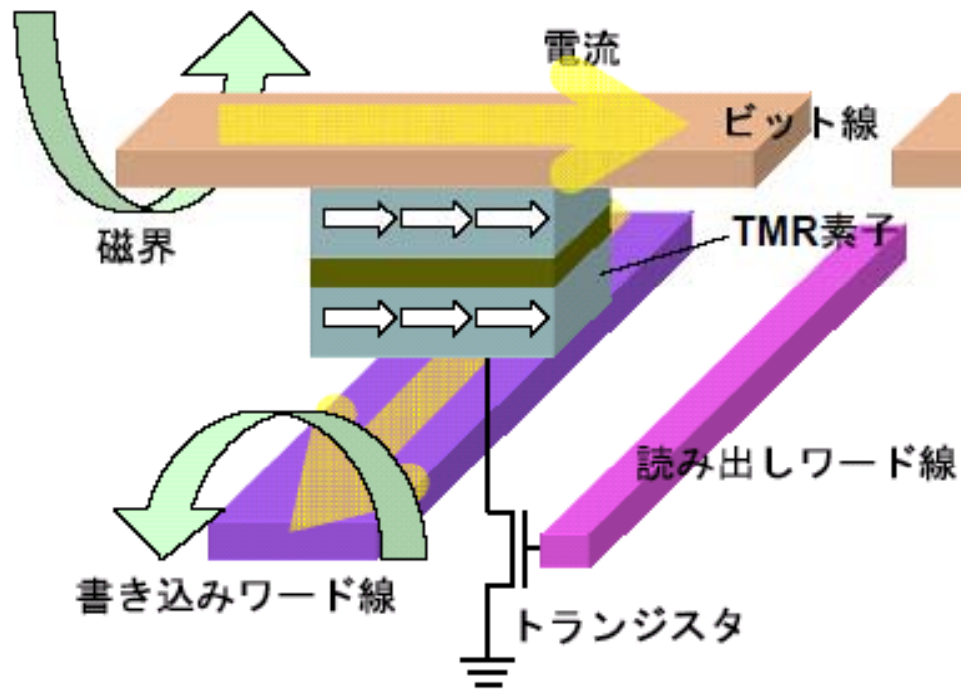
磁気ランダムアクセスメモリー (MRAM) の概念図



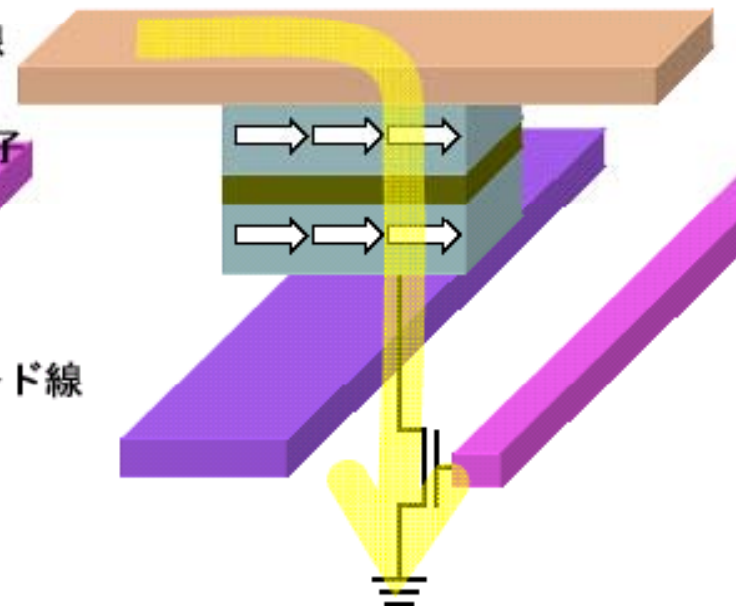
不揮発・高速読み書き・無限書換え耐性

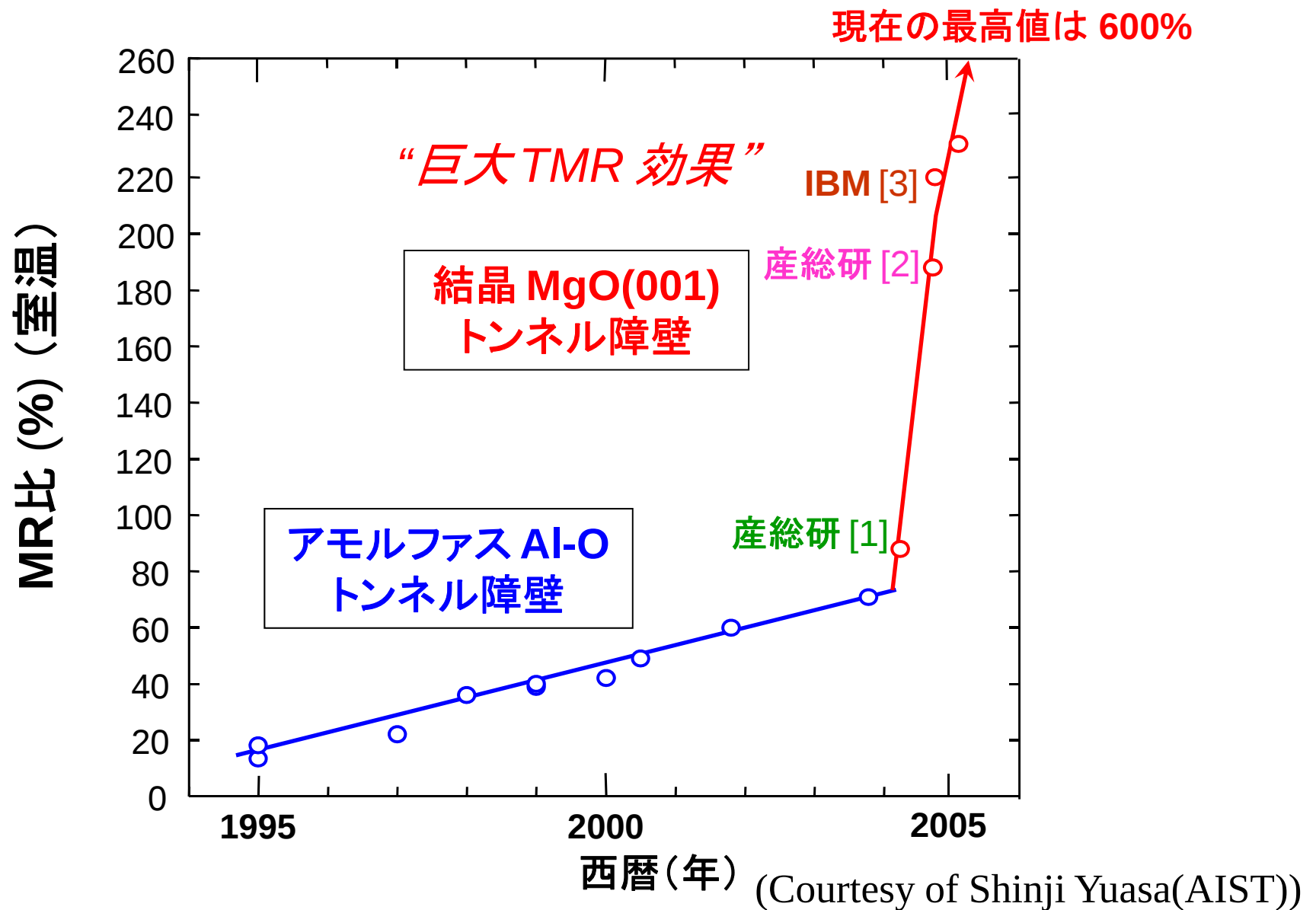
動作原理

書き込み



読み出し





[1] Yuasa, *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, L558 (2004). [2] Yuasa, *Nature Mater.* **3**, 868 (2004).
[3] Parkin, *Nature Mater.* **3**, 862 (2004).

Fe/MgO/Fe MTJ

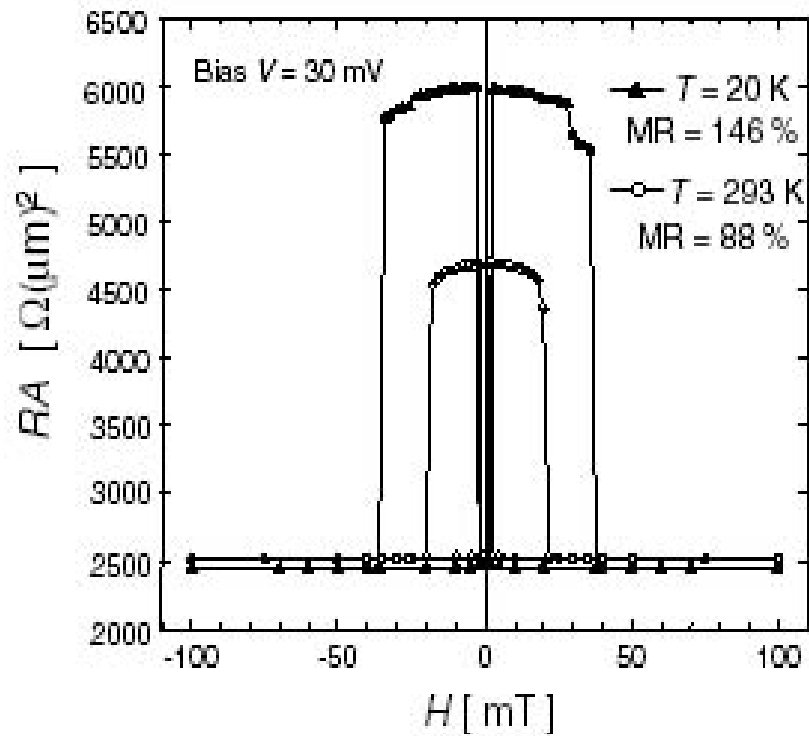
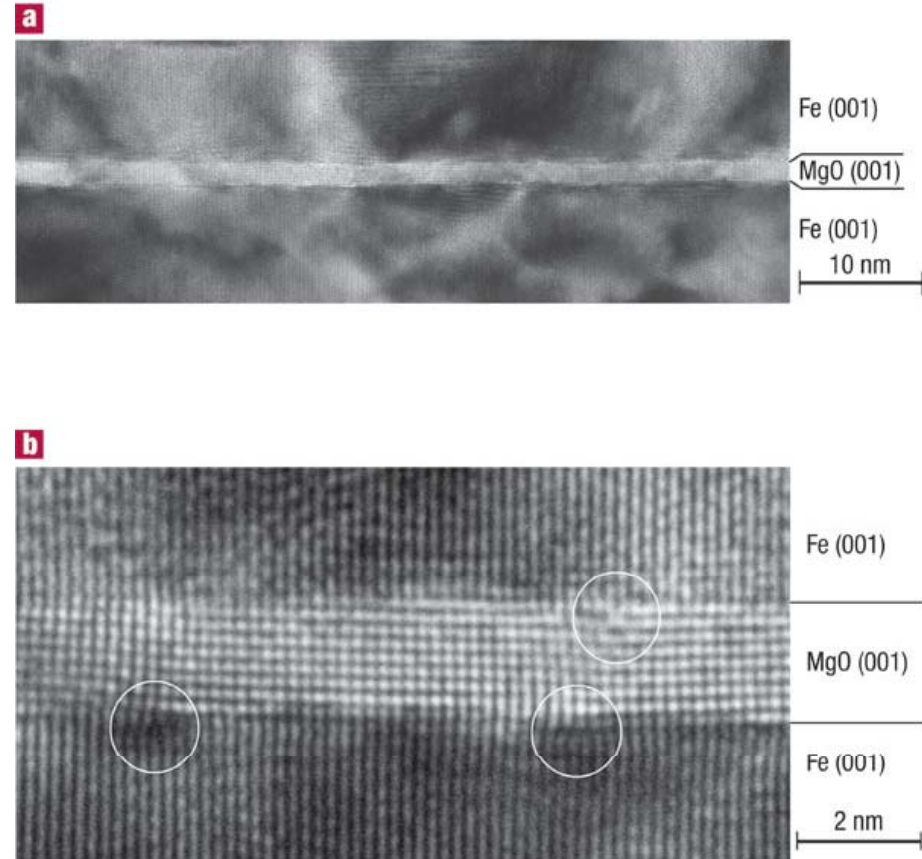


Fig. 3. Magnetoresistance curves for Fe(001)/MgO(001)(20 Å)/Fe(001) MTJ at $T = 293$ and 20 K . The MR ratios were 88% and 146%, respectively.

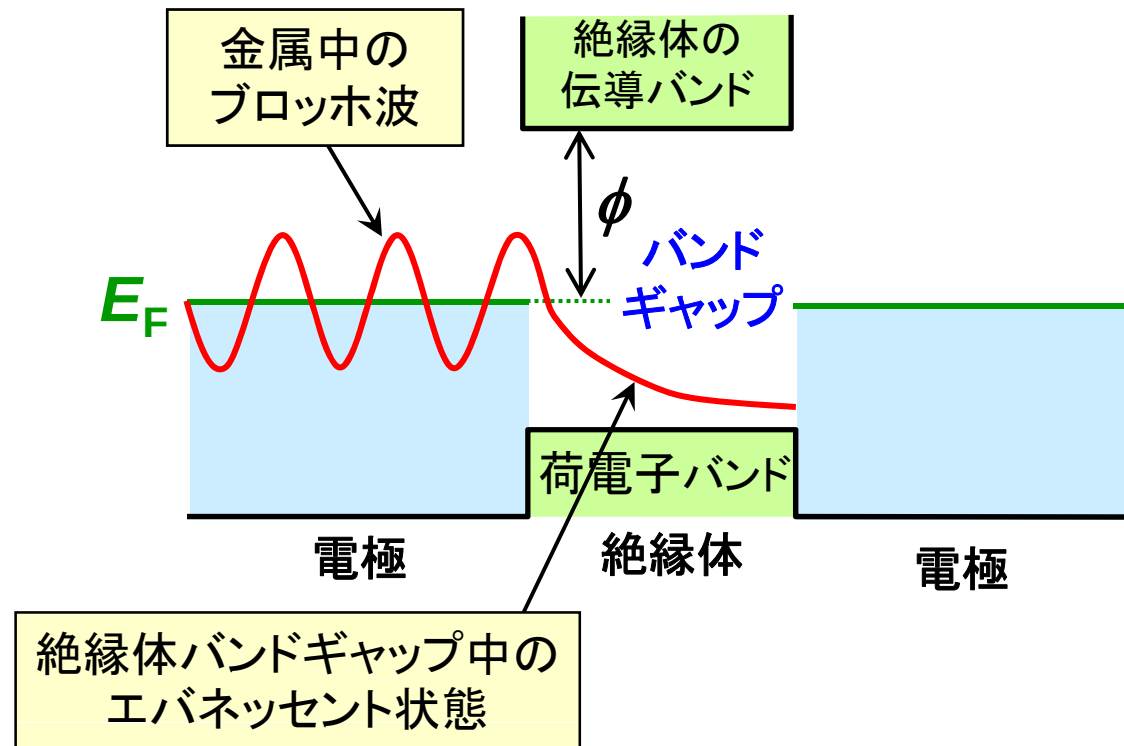


S. Yuasa *et al.*, *Nature Materials* **3**, 868–871 (2004)

24

(Courtesy of Shinji Yuasa(AIST))

現実の絶縁体トンネル障壁の電子トンネル

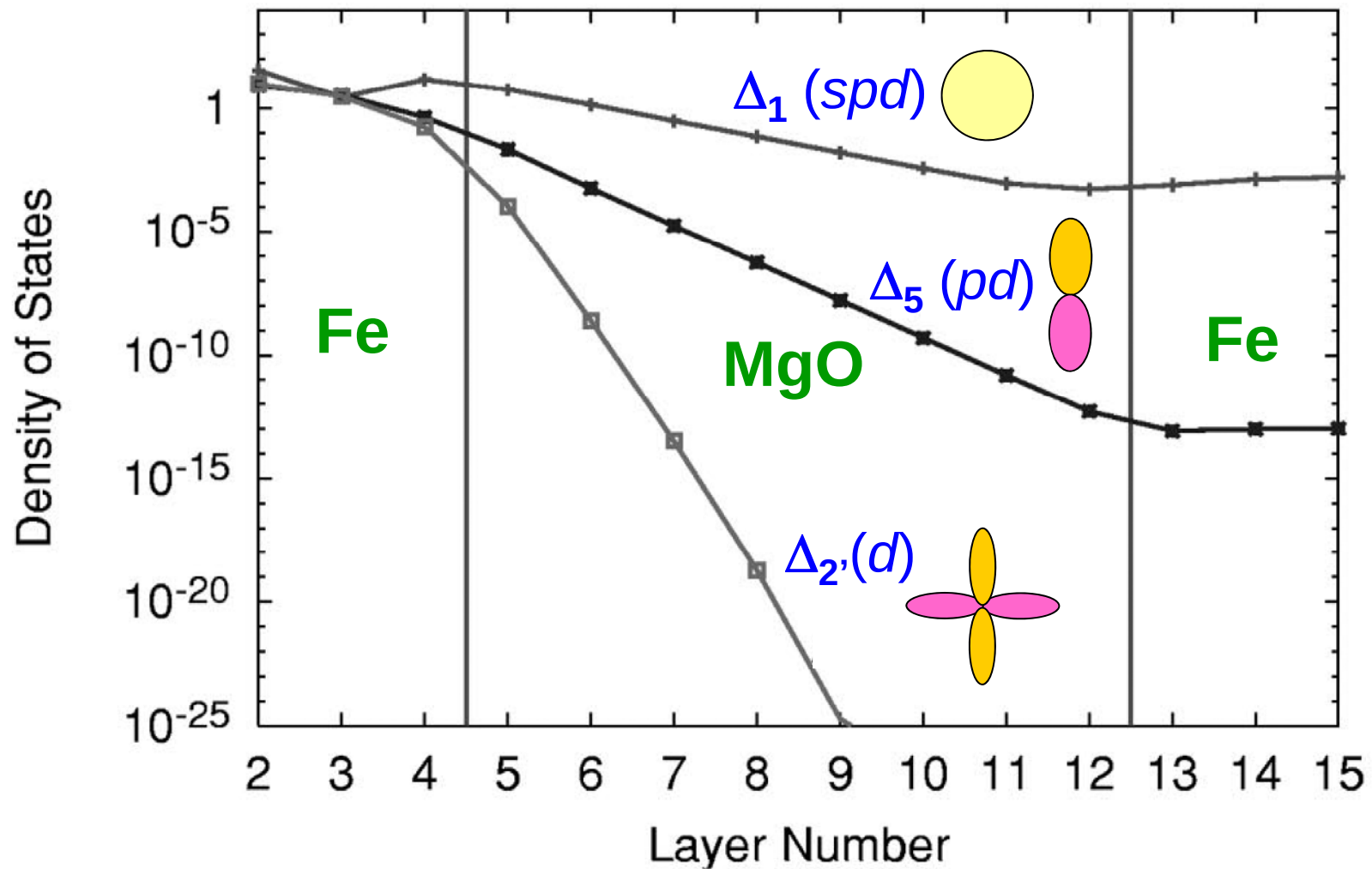


ブロッホ状態 や エヴァネッセント状態は、
(i) 特有の波動関数の軌道対称性 と (ii) 特有のバンド分散 を持っている

ブロッホ状態とエバネッセント状態が、界面でどのように接続するか？

MgO障壁内のエヴァネッセント状態の減衰長

Majority Density of States for Fe|MgO|Fe

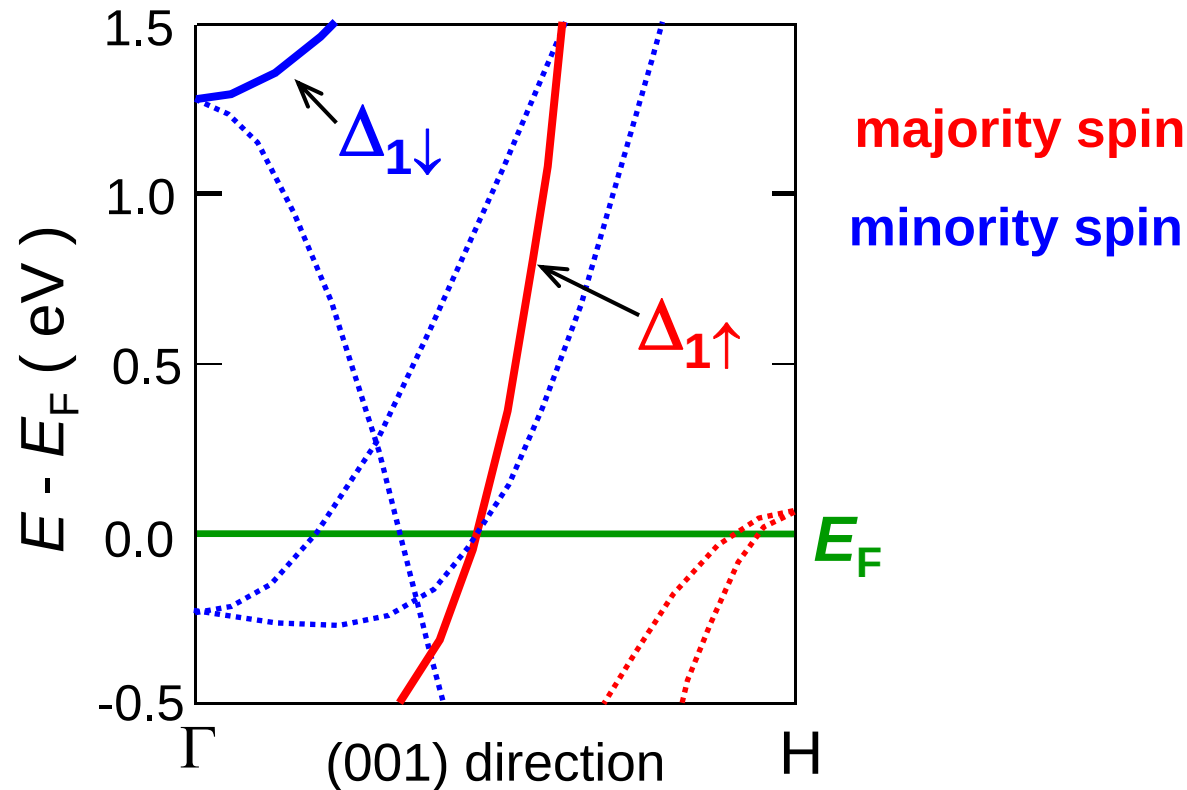


• Butler et al., *Phys. Rev. B* **63**, 056614-1 (2001).

26

(Courtesy of Shinji Yuasa(AIST))

Fe(001) のバンド構造 ($k_{\parallel}=0$ 方向)



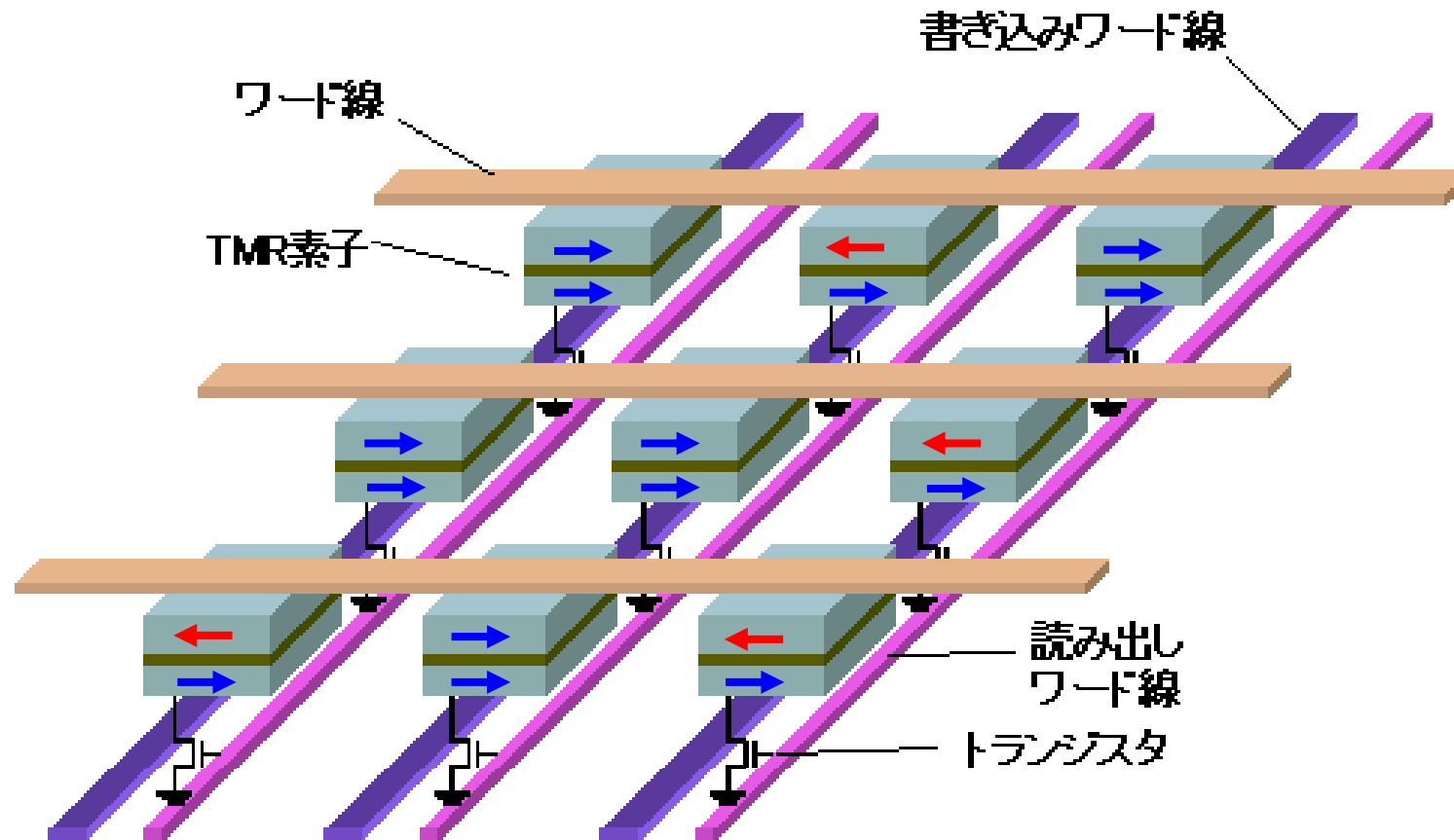
完全にスピン分極した Δ_1 バンド ($P=1$)

⇒ **巨大なTMR効果** が理論的に期待される

Δ_1 バンドが完全にスピン分極しているのは bcc Fe に限った話ではなく、
Fe や Co を主成分とする bcc 強磁性合金は類似のバンド構造を持つ
(例) bcc Fe-Co, ホイスラー合金

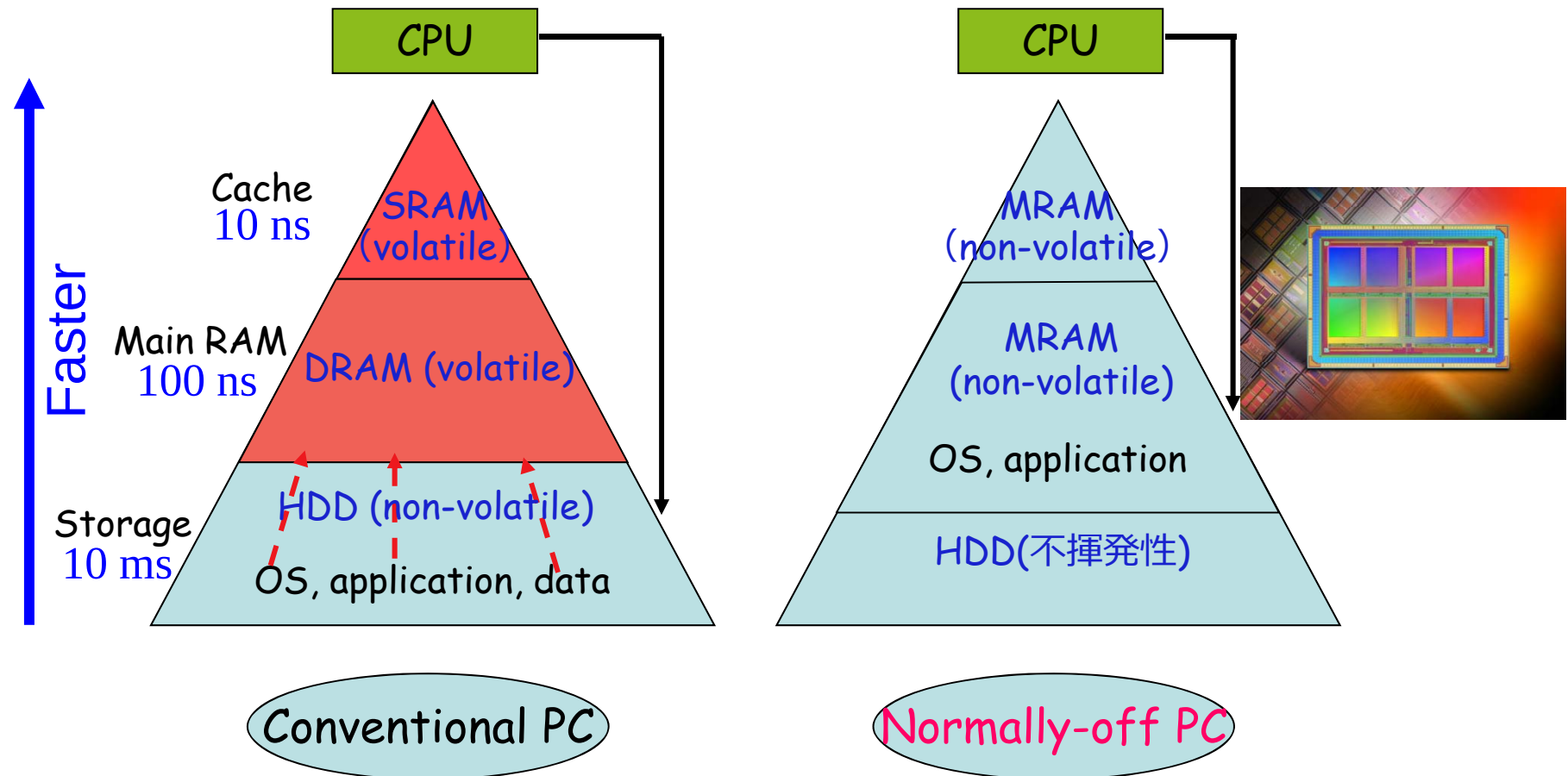
(Courtesy of Shinji Yuasa(AIST))

磁気ランダムアクセスメモリー (MRAM) の概念図



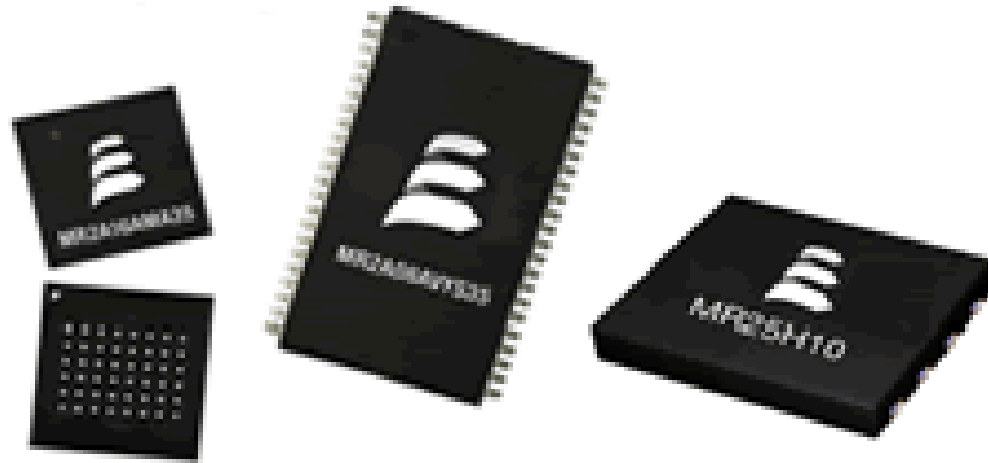
不揮発・高速読み書き・無限書換え耐性

Normally-off computer の実現へ向けて



SRAM & DRAM are volatile
記憶保持のために, Normally-On

エバースピン社がMRAM製造を開始 2006～

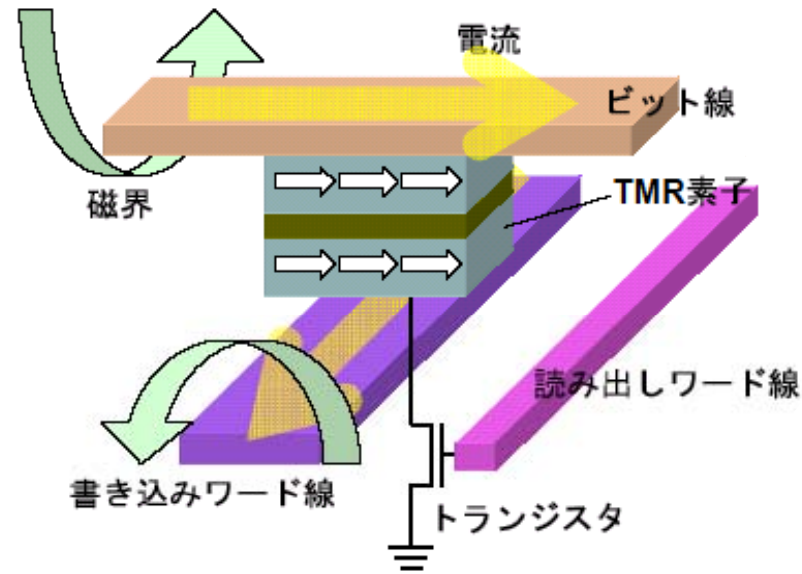


しかし、たったの 16 Mb...

DRAMを置き換えるには1 Gb MRAMが必要

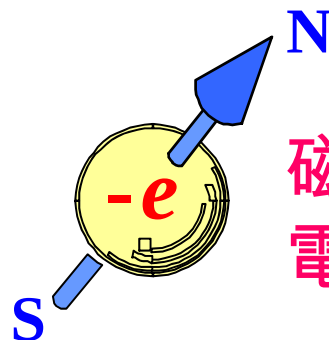
何が問題なのか？

現状MRAMの限界



アンペールの法則: $H = I/2\pi r$

集積化のために書込線の幅が狭くなると
電流密度が上がって融けてしまう。。。



磁場を使わず
電荷とスピンの量子力学的結合を利用³¹

新婚旅行で宇宙遊泳

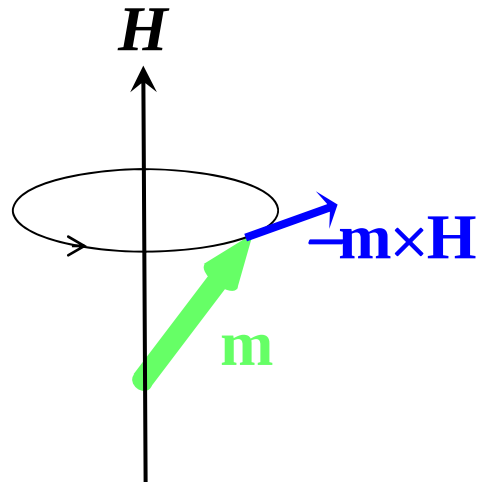


A large, stylized pink cloud shape with a small tail at the bottom left, serving as a background for the text.

スピントランスフアー効果

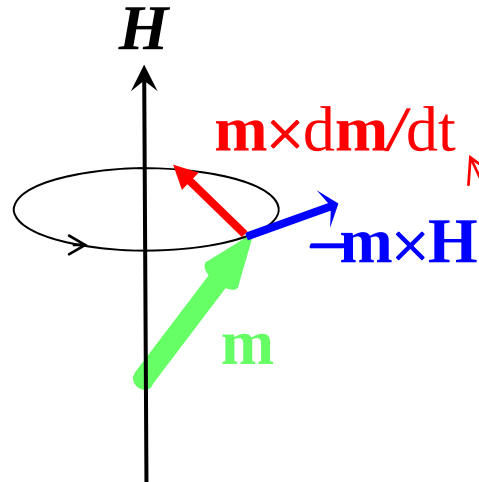
- ・ スピン注入磁化反転
とM R A M

磁化のダイナミクス



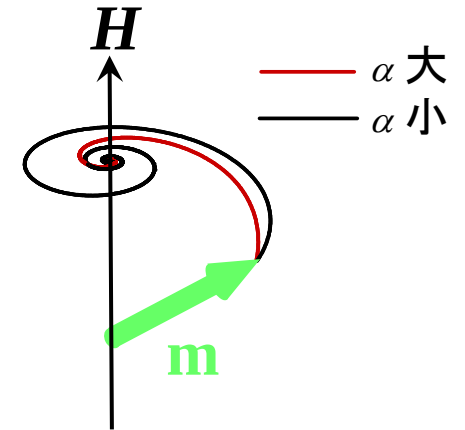
$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = \gamma \mathbf{m} \times \mathbf{H}$$

ラーモア歳差運動



$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = \gamma \mathbf{m} \times \mathbf{H} + \alpha \mathbf{m} \times \frac{d\mathbf{m}}{dt}$$

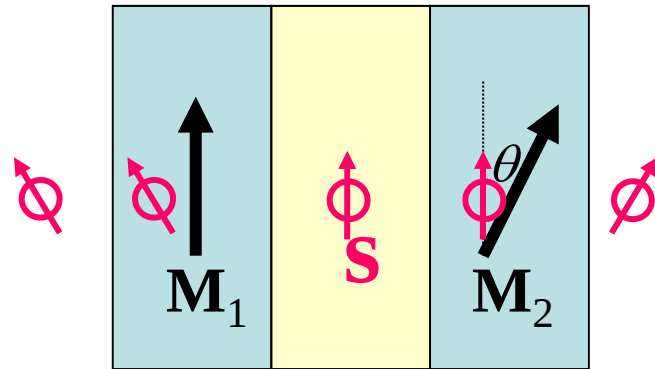
LLG (Landau-Lifshits-Gilbert) 方程式



これを見つめて考えればよい

スピントランスファー効果

電子のスピンと磁化の作用・反作用



電子が $\mathbf{M}_2$ 層を通り抜ける際に
電子系の角運動量変化が変化する

この角運動量は $\mathbf{M}_2$ に吸収され
 $\mathbf{M}_2$ の向きを変える ($d\mathbf{M}_2/dt$: トルク)

$$\left| \frac{d\mathbf{M}_2}{dt} \right| = - \left| \frac{ds}{dt} \right| \approx -\hbar / 2$$

トルクの向きは $\mathbf{M}_2$ が $\mathbf{s}$ に倒れる方向なので、
1電子通過による $\mathbf{M}_2$ に働くトルクは

$$\frac{d\mathbf{M}_2}{dt} = - \frac{ds}{dt} \approx -\frac{\hbar}{2} \mathbf{m}_2 \times (\mathbf{m}_2 \times \mathbf{m}_1)$$

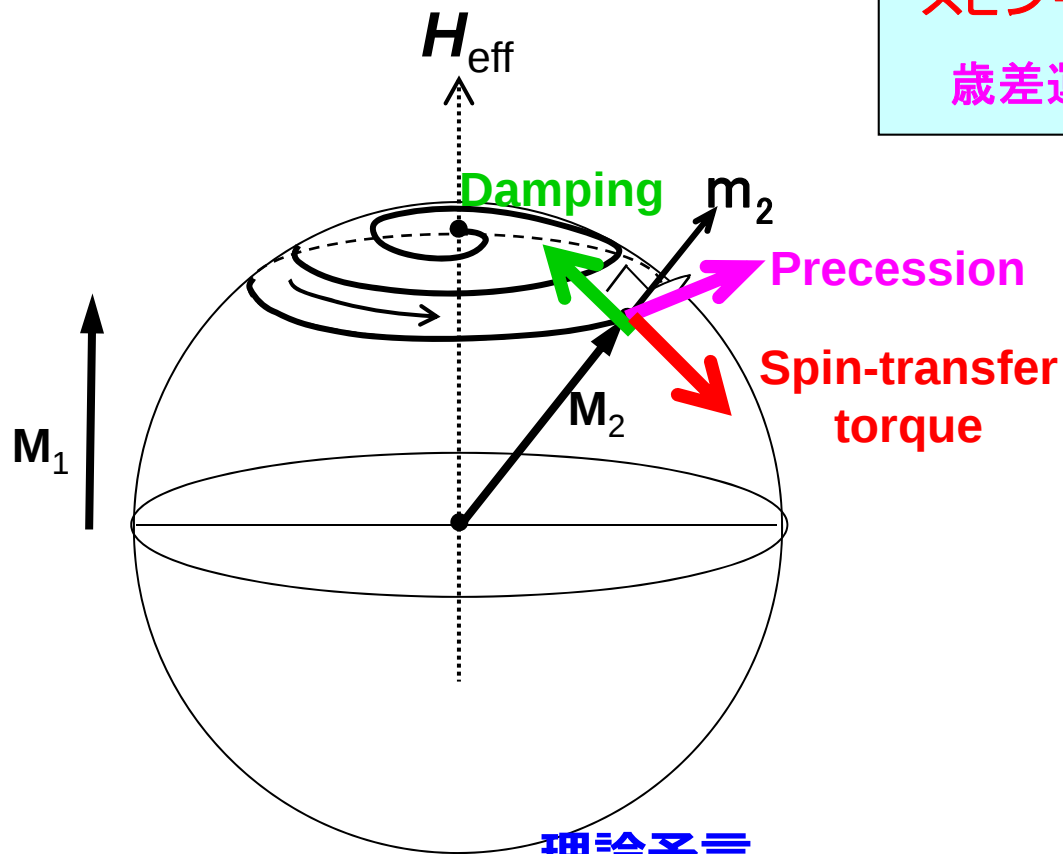
($\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2$ は $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2$ 方向の単位ベクトル)

電流 I_e が流れる時のスピントランスファートルクは

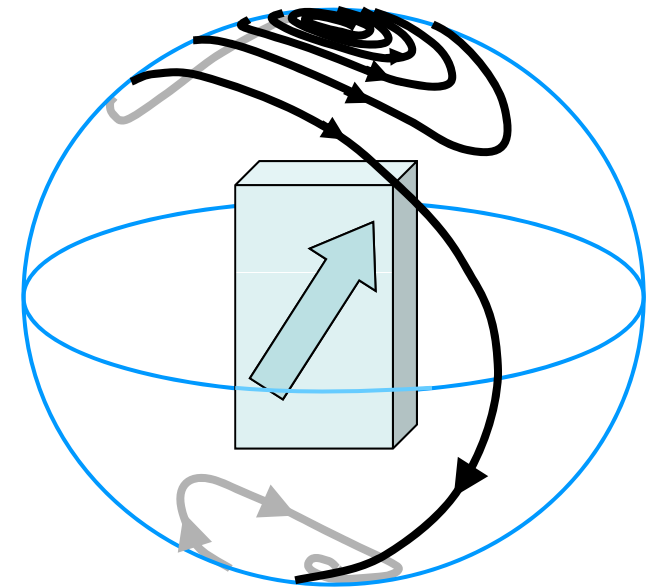
$$\frac{d\mathbf{M}_2}{dt} \approx -\frac{\hbar}{2} \mathbf{m}_2 \times (\mathbf{m}_2 \times \mathbf{m}_1) \times \frac{I_e}{e}$$

$\mathbf{M}_2$ の運動を司る運動方程式は

$$\frac{d\mathbf{M}_2}{dt} = \underbrace{\gamma \mathbf{M}_2 \times \mathbf{H}_{\text{eff}}}_{\text{Spin-torque}} + \underbrace{\alpha \mathbf{m}_2 \times \frac{d\mathbf{M}_2}{dt}}_{\text{Damping}} - \underbrace{g(\theta) \frac{\hbar}{2} \frac{I_e}{e} \mathbf{m}_2 \times (\mathbf{m}_2 \times \mathbf{m}_1)}_{\text{Spin-transfer torque}}$$



スピン・トルク が **damping** 項より大きいとき
歳差運動が増幅されて、磁化反転に至る



理論予言

J. C. Slonczewski, J. Magn. Magn. Mater. 159 (1996) L1.

磁化反転に必要な電流は？

$$\frac{d\mathbf{M}_2}{dt} = \gamma \mathbf{M}_2 \times \mathbf{H}_{eff} + \alpha \mathbf{m}_2 \times \frac{d\mathbf{M}_2}{dt} - g(\theta) \frac{\hbar}{2} \frac{I_e}{e} \mathbf{m}_2 \times (\mathbf{m}_2 \times \mathbf{m}_1)$$

$d\mathbf{M}_2/dt$ がおもに歳差運動で決まる場合は、
ダンピング項の $d\mathbf{M}_2/dt$ **に** $\gamma \mathbf{M}_2 \times \mathbf{H}_{eff}$ **を代入して**

$$\frac{d\mathbf{M}_2}{dt} \approx \gamma \mathbf{M}_2 \times \mathbf{H}_{eff} + \alpha \mathbf{m}_2 \times \gamma \mathbf{M}_2 \times \mathbf{H}_{eff} - g(\theta) \frac{\hbar}{2} \frac{I_e}{e} \mathbf{m}_2 \times (\mathbf{m}_2 \times \mathbf{m}_1)$$

$\mathbf{M}_1 // \mathbf{H}_{eff}$ の場合は、 $\mathbf{H}_{eff} = H_{eff} \mathbf{m}_1$ 、さらに $\mathbf{M}_2 = M_2 \mathbf{m}_2$ なので

$$\frac{d\mathbf{M}_2}{dt} \approx \gamma \mathbf{M}_2 \times \mathbf{H}_{eff} + \alpha \gamma M_2 H_{eff} \mathbf{m}_2 \times (\mathbf{m}_2 \times \mathbf{m}_1) - g(\theta) \frac{\hbar}{2} \frac{I_e}{e} \mathbf{m}_2 \times (\mathbf{m}_2 \times \mathbf{m}_1)$$

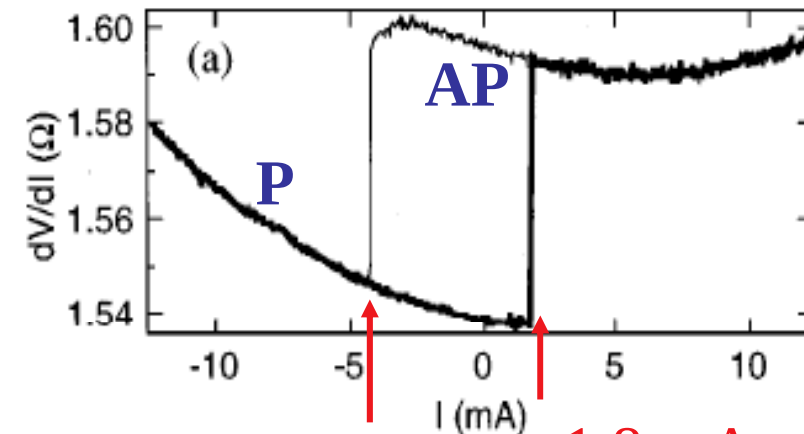
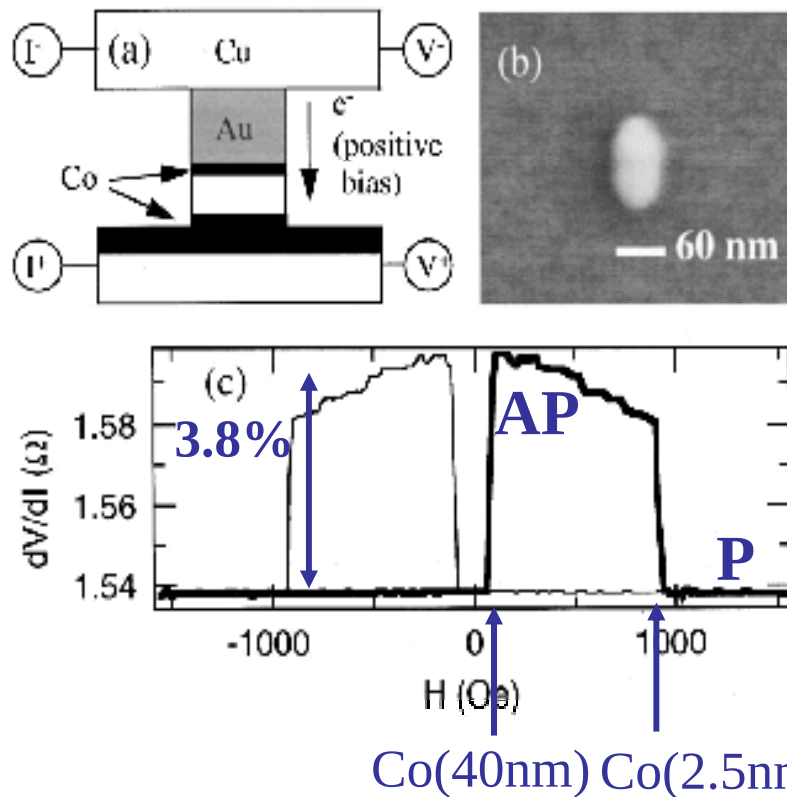
$$\frac{d\mathbf{M}_2}{dt} \approx \gamma \mathbf{M}_2 \times \mathbf{H}_{eff} + (\alpha \gamma M_2 H_{eff} - g(\theta) \frac{\hbar}{2} \frac{I_e}{e}) \mathbf{m}_2 \times (\mathbf{m}_2 \times \mathbf{m}_1)$$

負になれば磁化反転する

$$I_c = \frac{2e\alpha\gamma M_2 H_{eff}}{g(\theta)\hbar} = \frac{e\gamma}{g(\theta)\mu_B} \alpha M_s V H_{eff}$$

スピン注入磁化反転

柱の断面積
 $130 \times 60 \text{ nm}^2$

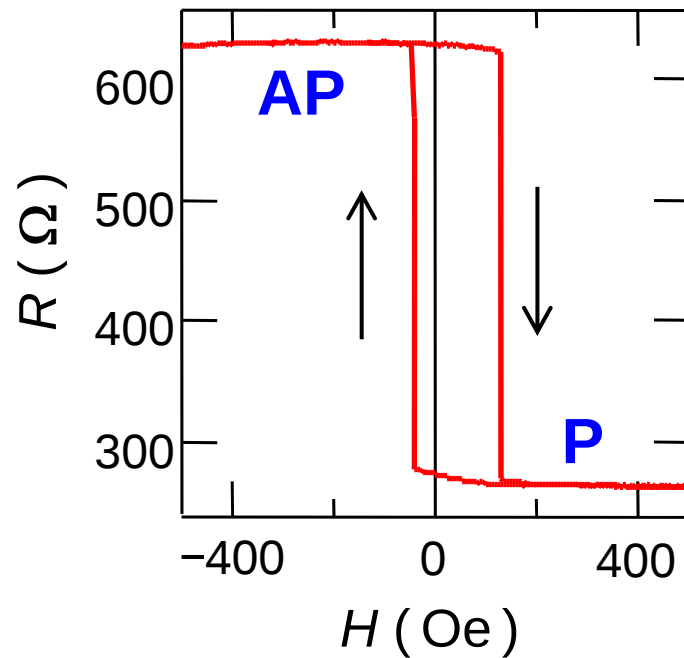


-4.3 mA $+1.8 \text{ mA}$
 $= 2.3 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$

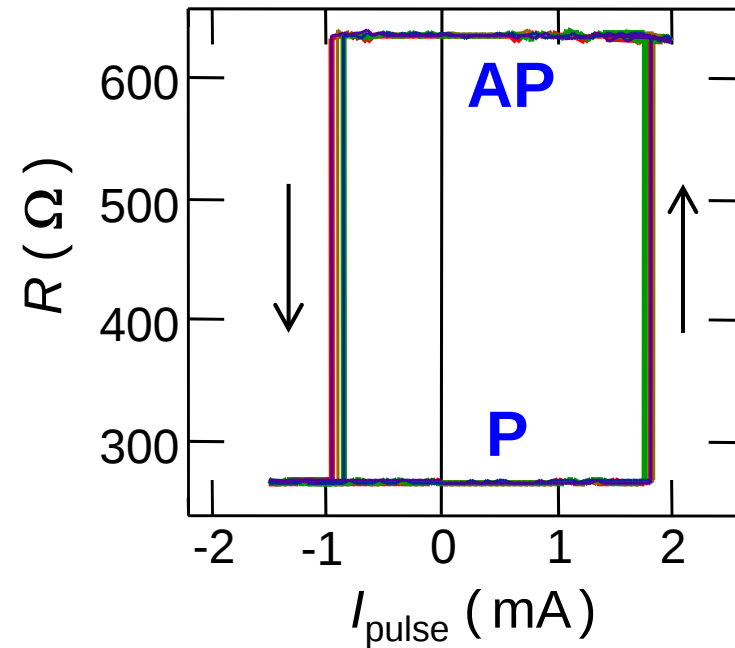
•正バイアスでAP, 負バイアスでP

F.J. Albert *et al.*, Appl. Phys. Lett., 77 (2000) 3809.

MgO-MTJ 素子のスピン・トルク磁化反転



磁界書き込み

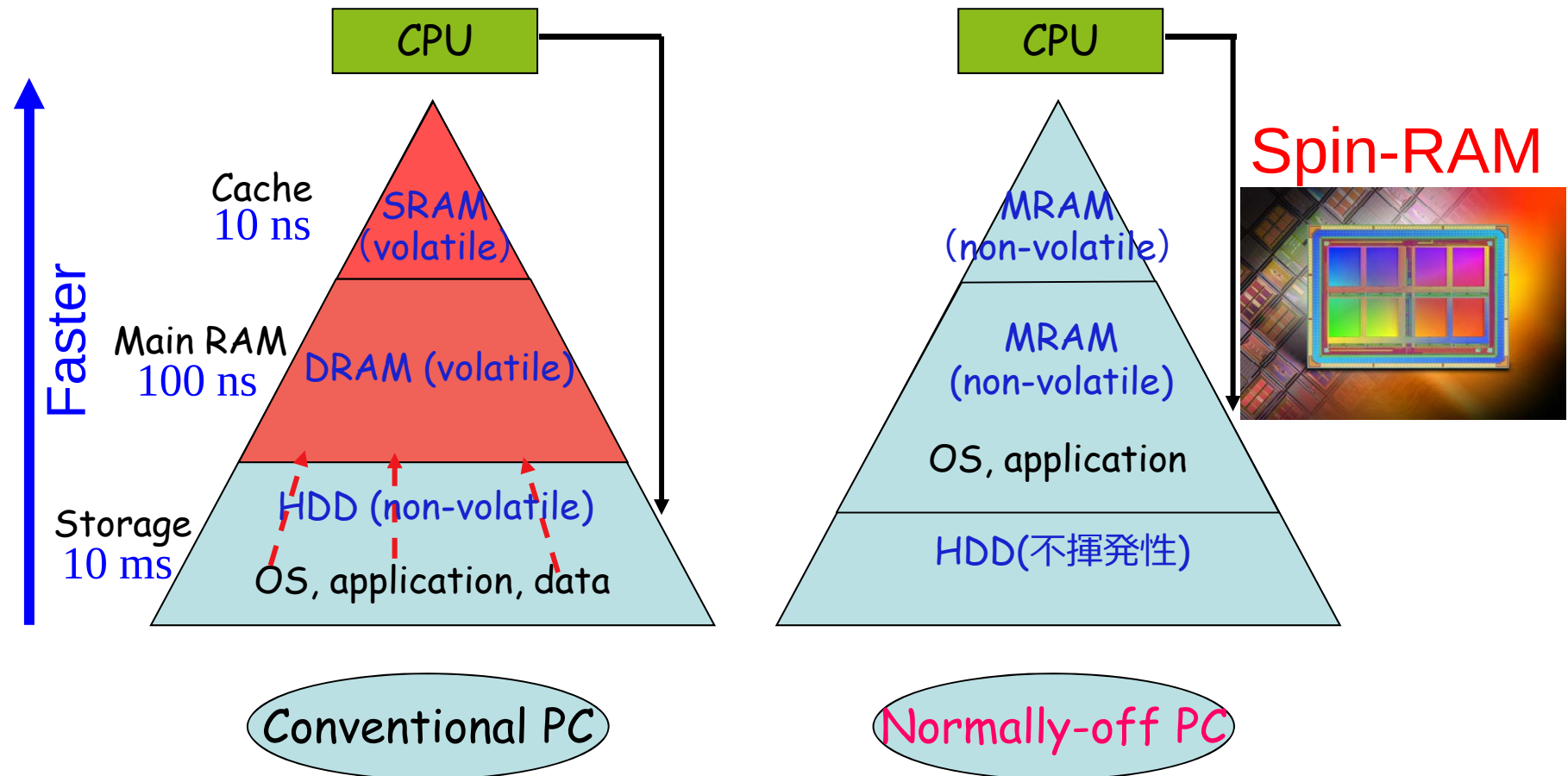


スピン注入書き込み

H. Kubota, SY *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, L1237 (2005).

$$J_{\text{C0}} \sim 1 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$$

Normally-off computer の実現へ向けて



SRAM & DRAM are volatile
記憶保持のために, Normally-On

スピントロニクス展開

スピン依存伝導

磁気構造 → 電気伝導

- 巨大磁気抵抗効果
- トンネル磁気抵抗効果

スピントランスポース

スピン電流 → 磁気構造

- スピン注入磁化反転
 - 磁壁電流駆動
 - マイクロ波発振
- スピントルクダイオード

スピンホール効果

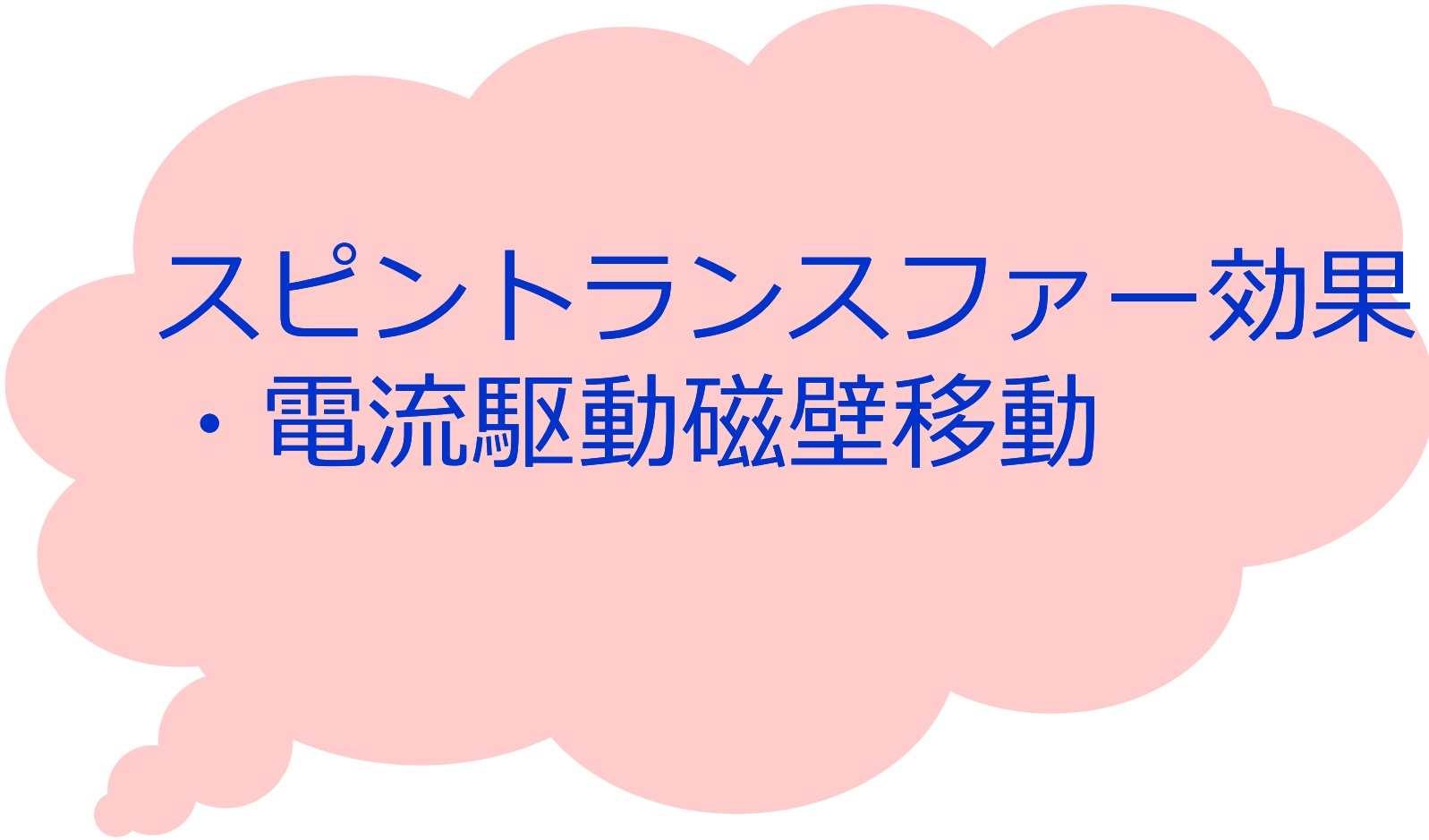
???

HDD

MRAM

高周波デバイス
スピントランジスタ
ポストHDD
???

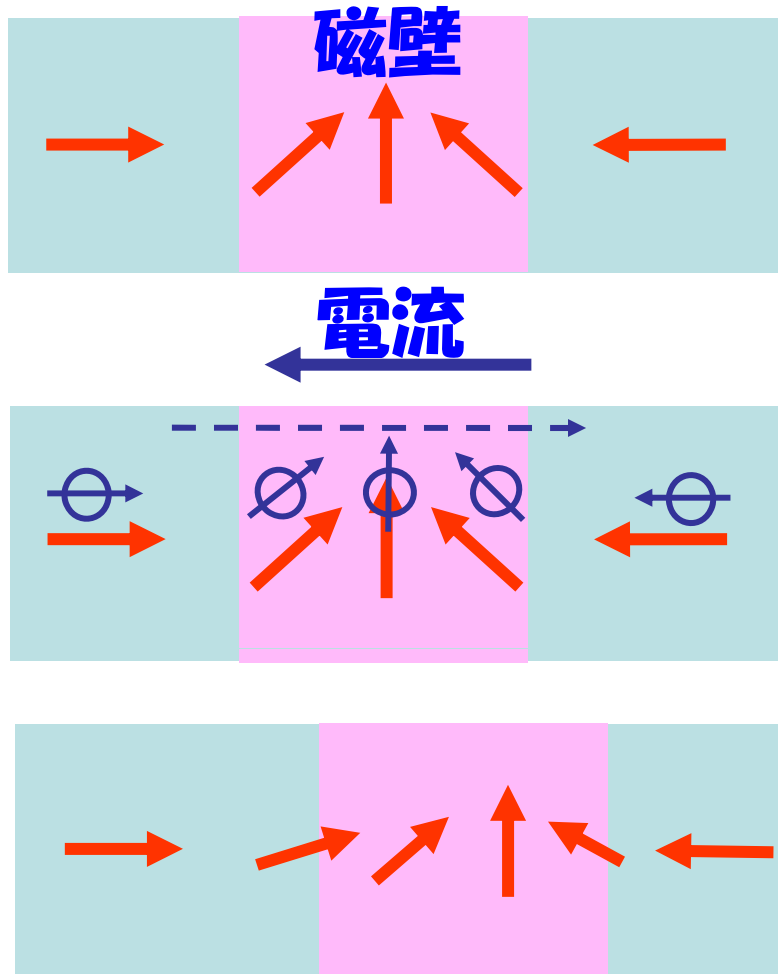
スピントロニクス



スピントランスポーター効果

- ・ 電流駆動磁壁移動

電流で磁石の境界（磁壁）を動かす (伝導電子のスピンと磁石の作用・反作用)



電子は反時計回りに回転

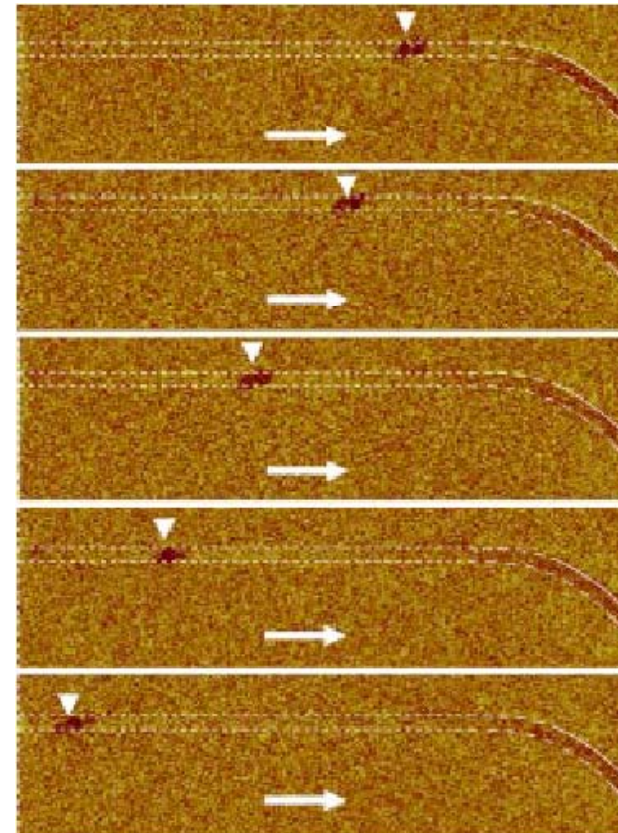
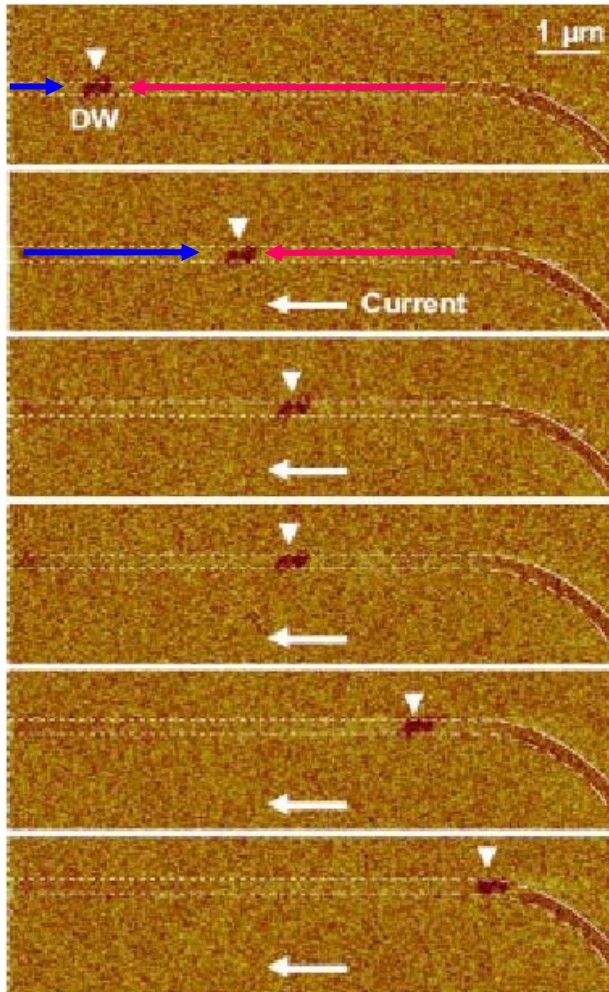
↓ 作用・反作用！

磁化が時計回りに回転

電流を流すだけで磁場なしで磁石の状態を変えられる！

電流パルスによる磁壁移動観察結果

(7×10^{11} A/m², 0.5 μ s)

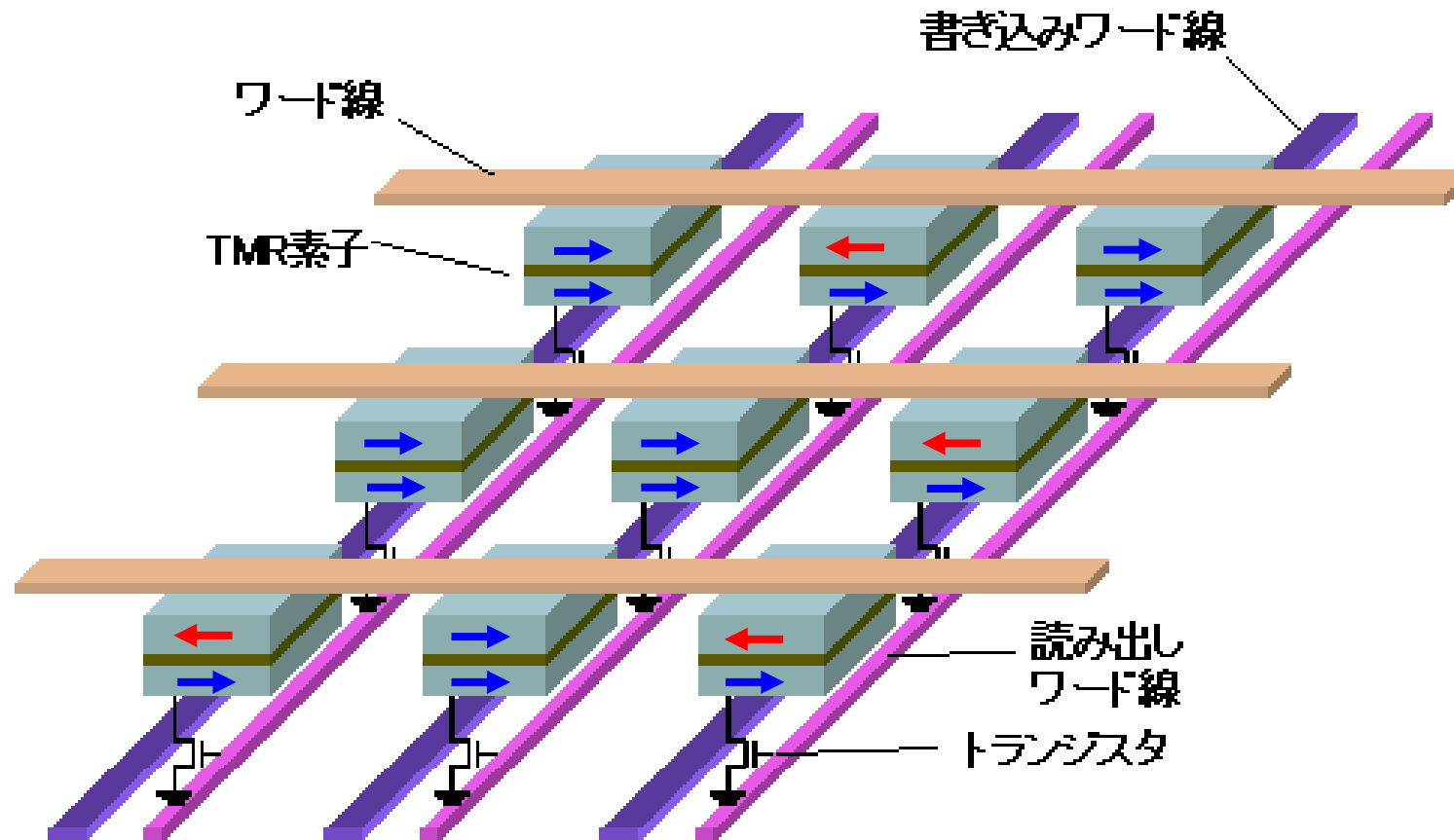


NiFe, $w = 240$ nm, $t = 10$ nm

Phys. Rev. Lett., 92 (2004) 077205.

磁壁の位置は電流を流すだけで制御できる！

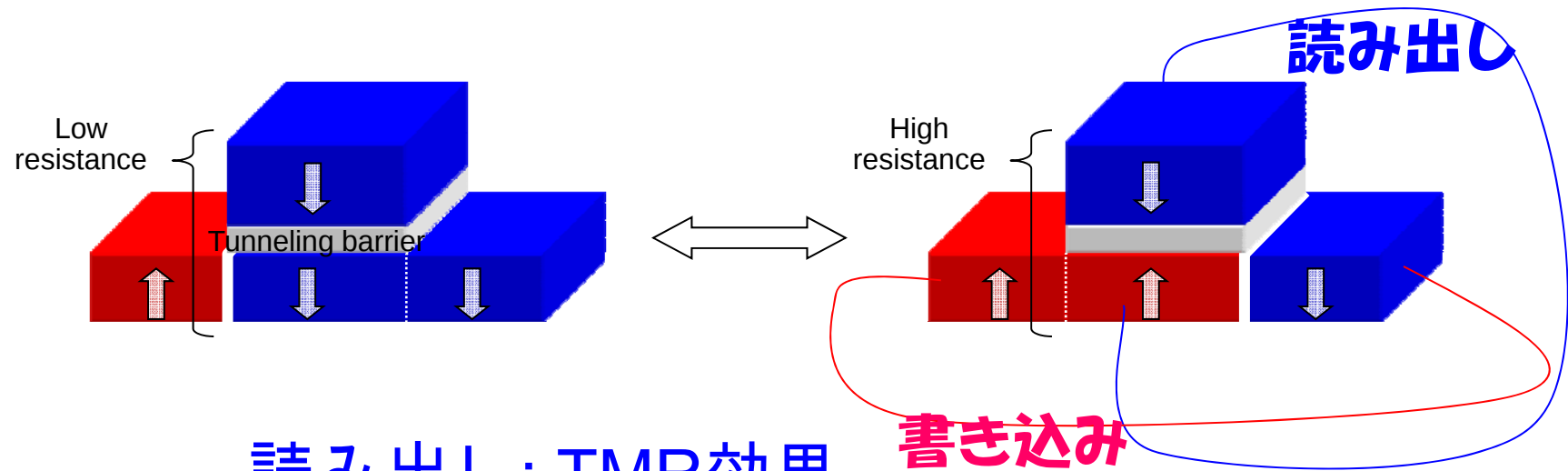
磁気ランダムアクセスメモリー (MRAM) の概念図



不揮発・高速読み書き・無限書換え耐性

NEC提案の磁壁電流駆動-MRAM

S. Fukami et al., 52nd Conference on MMM Abstracts FE-06 (2007).



読み出し: TMR効果

書き込み: 磁壁の電流駆動

読み書きに二つの別回路

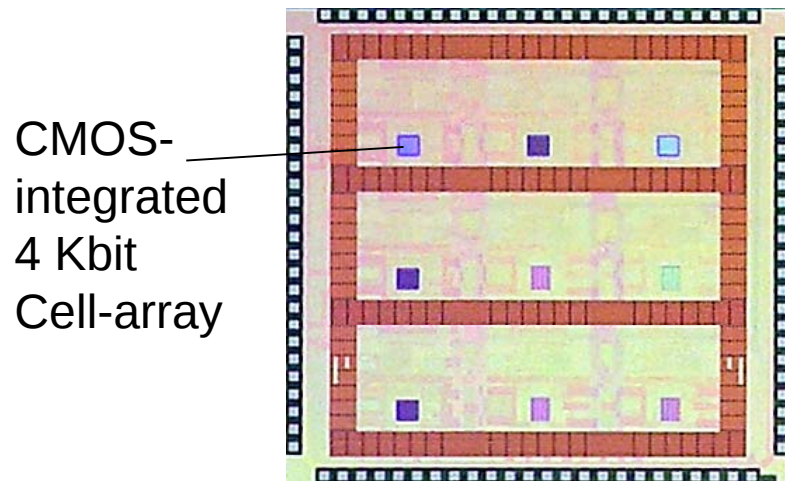
高速動作

SRAM置き換えへ

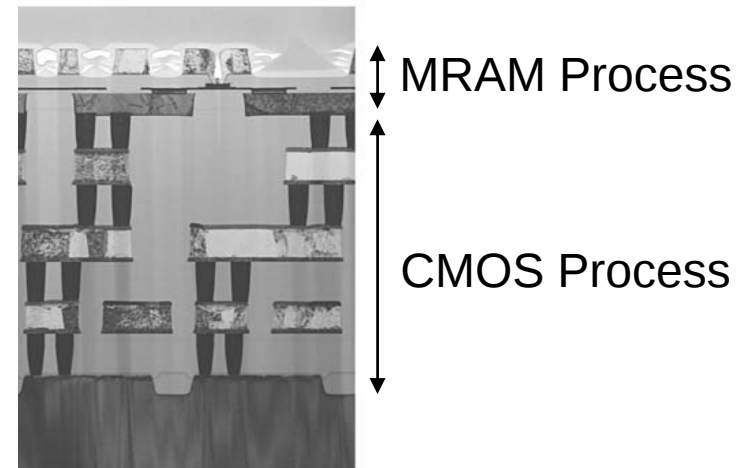
46

NEDO Spintronics nonvolatile devices project

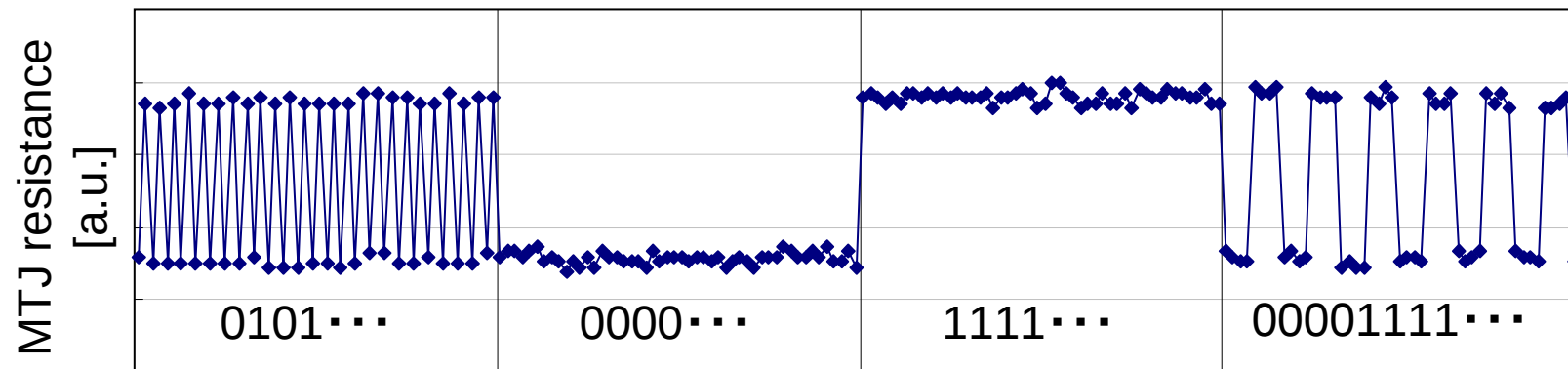
磁壁メモリーの動作実証 (NEC)



Test Chip



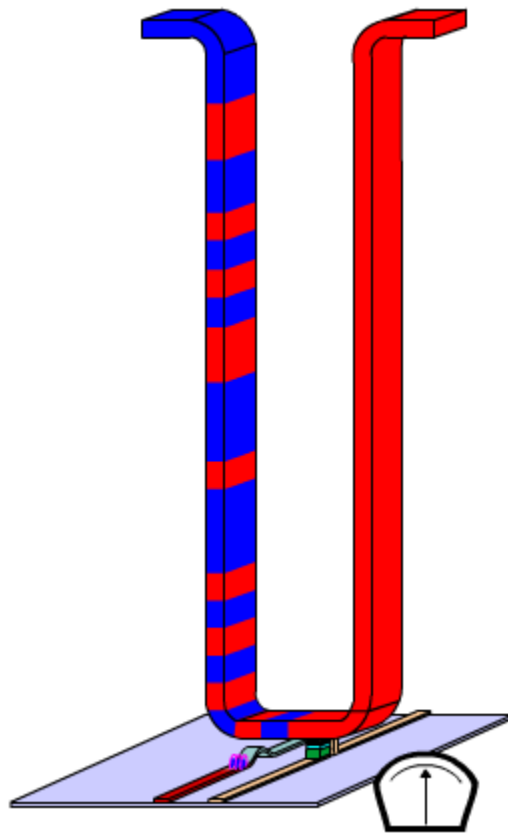
Cross Section of Test Chip



Write-Read Cycle $>10^9$

Symposium on VLSI Technology, 2009.6.17

Magnetic Racetrack Memory proposed by IBM

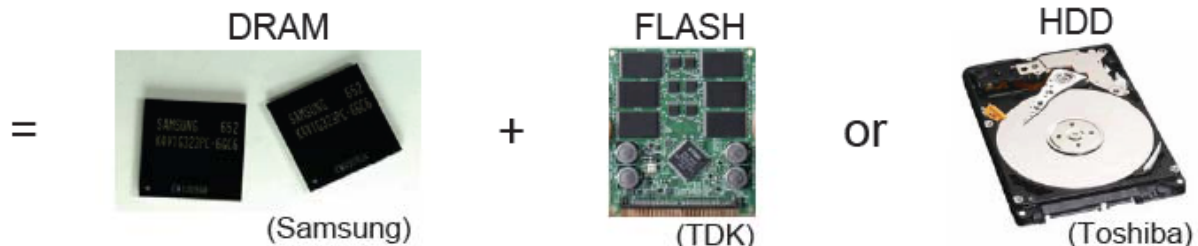
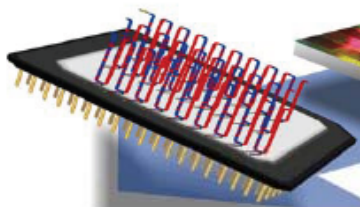


A novel three-dimensional spintronic storage class memory



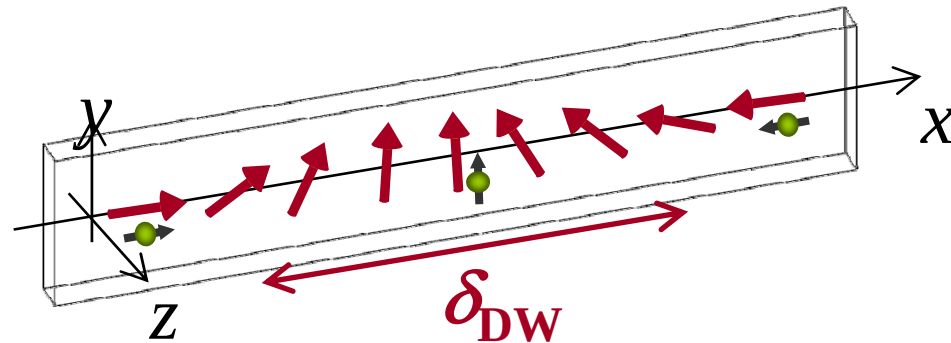
Magnetic nanowires: information stored in the domain walls

- Capacity of a hard disk drive
- Reliability and performance of solid state memory (DRAM, FLASH, SRAM...)



Courtesy of Stuart Parkin (IBM)

スピン分極電流による磁壁内のスピントランスファートルク



adiabatic limit: $\delta_{DW} \gg \hbar v_F / E_{sd}$ であれば伝導電子のスピンの向きが磁壁内部の局所的な磁化の向きに完全に追従して変化することができる

$\mathbf{m}(x)$ $\mathbf{m}(x+dx)$ s電子の磁化変化=d電子の磁化変化

$$\frac{j}{e} P \mu_B \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial x} = - \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} M_s$$

$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} = - \frac{j \mu_B P}{e M_s} \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial x} \equiv -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{m}, \quad \mathbf{u} = \frac{\mu_B P}{e M_s} \mathbf{j}$$

Ni₈₀Fe₂₀に対しては、 $j = 10^{12} \text{ A/m}^2$ で $u = 50 \text{ m/s}$

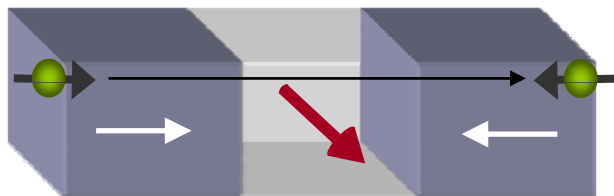
uはM_sで規格化したスピン流の速度
効率100%なら磁壁はこの速度で動く

電流駆動磁壁移動のダイナミクス

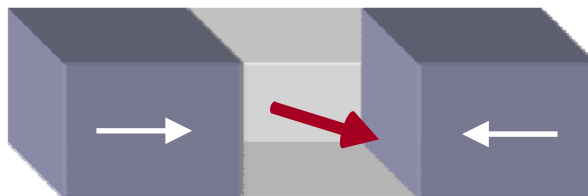
Modified LLG eq. with spin-transfer term

$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} = \underbrace{-\gamma \mathbf{m} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}}_{\tau_k} + \underbrace{\alpha \mathbf{m} \times \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t}}_{\tau_d} - \underbrace{\frac{j\mu_B P}{eM_s} \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial x}}_{\tau_s}$$

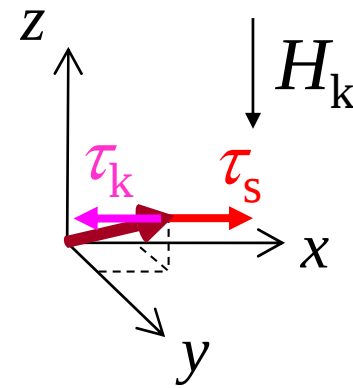
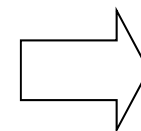
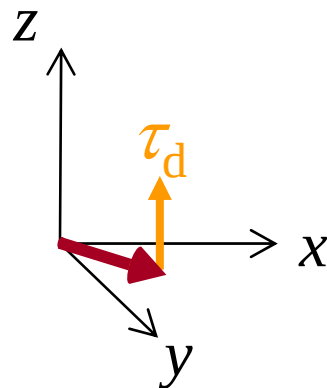
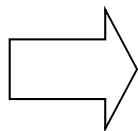
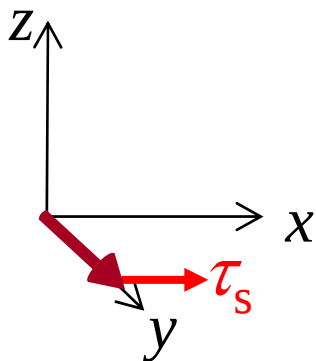
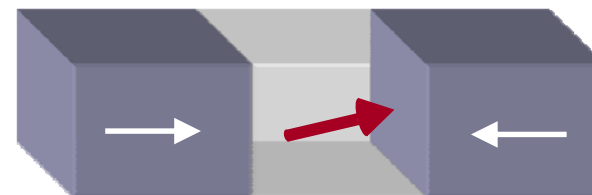
τ_s により磁壁内部の
磁化が傾く



ダンピング(τ_d)により
z方向に磁化が生じる



τ_k と τ_s が釣り合うため、
磁壁が移動できない



スピントルクが H_k に打ち勝つと動き出す

しきい電流密度の求め方

Modified LLG eq. with spin-transfer term

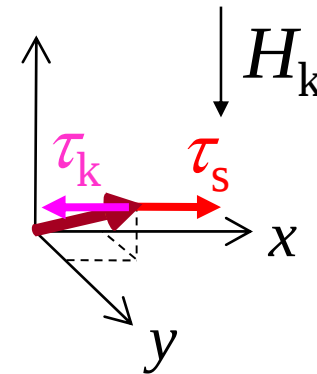
$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} = \underbrace{-\gamma \mathbf{m} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}}_{\tau_K} + \underbrace{\alpha \mathbf{m} \times \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t}}_{\tau_d} - \underbrace{\frac{j\mu_B P}{eM_s} \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial x}}_{\tau_s}$$

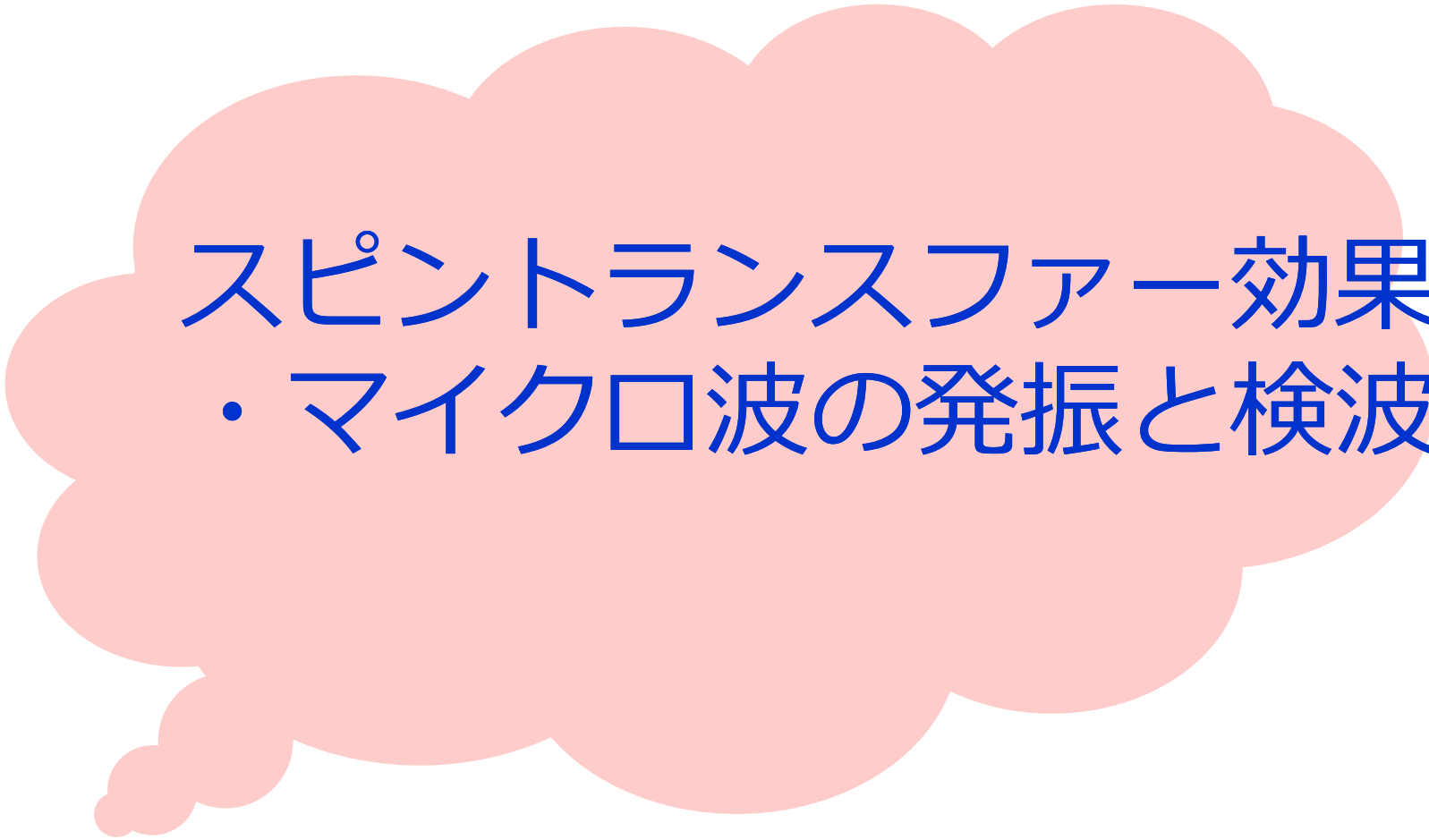
$$\tau_K = -\gamma \mathbf{m} \times \mathbf{H}_K$$

$$\tau_s = \frac{j\mu_B P}{eM_s} \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial x} = \frac{j\mu_B P}{eM_s} \frac{\pi}{\delta}$$

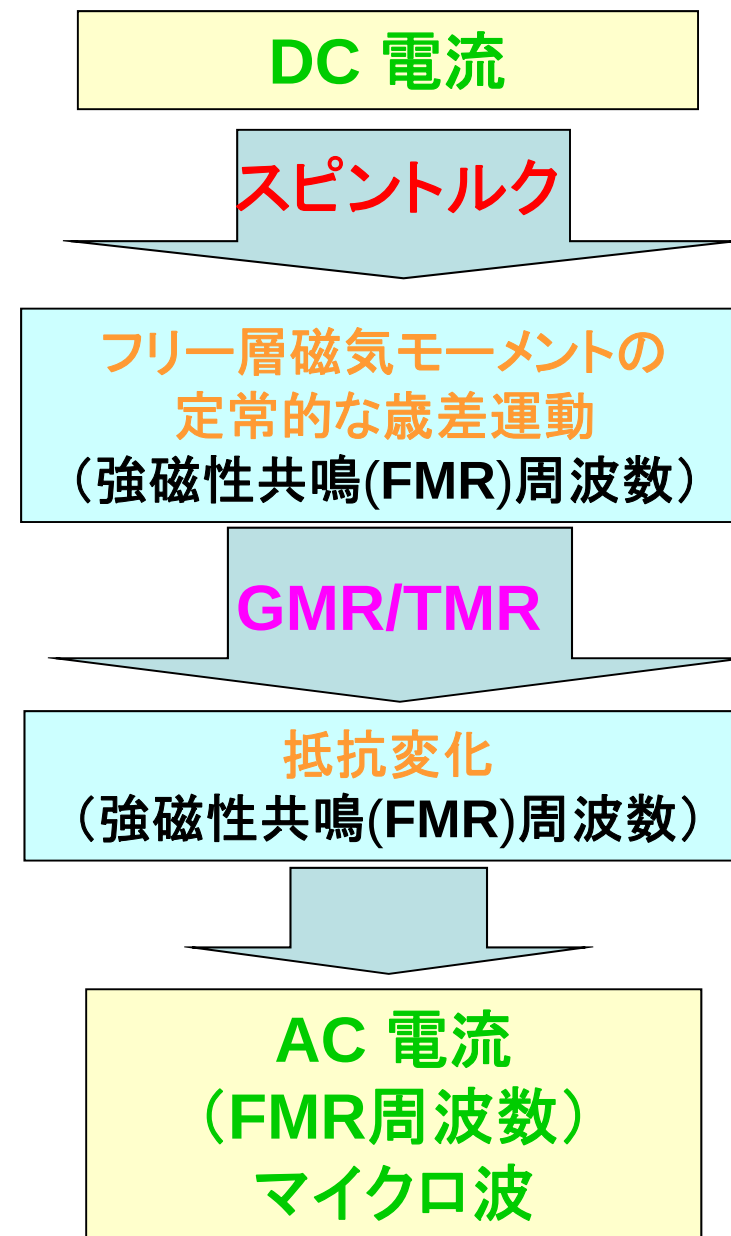
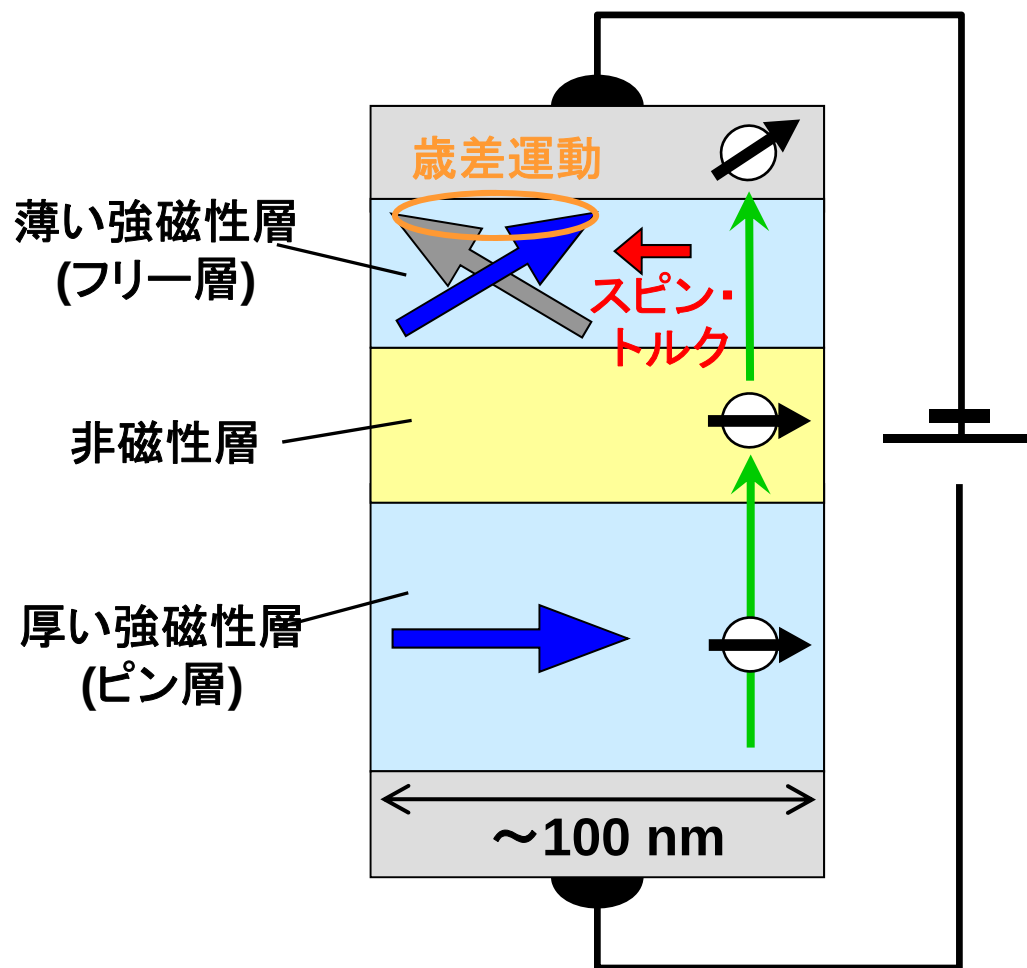
$$\gamma H_K = \frac{j\mu_B P}{eM_s} \frac{\pi}{\delta}$$

$$j = \frac{\gamma \delta H_K M_s}{\pi \mu_B P} = \frac{2e\delta K}{\pi \hbar P}$$



A large, stylized pink cloud shape with a small tail at the bottom left, serving as a background for the title text.

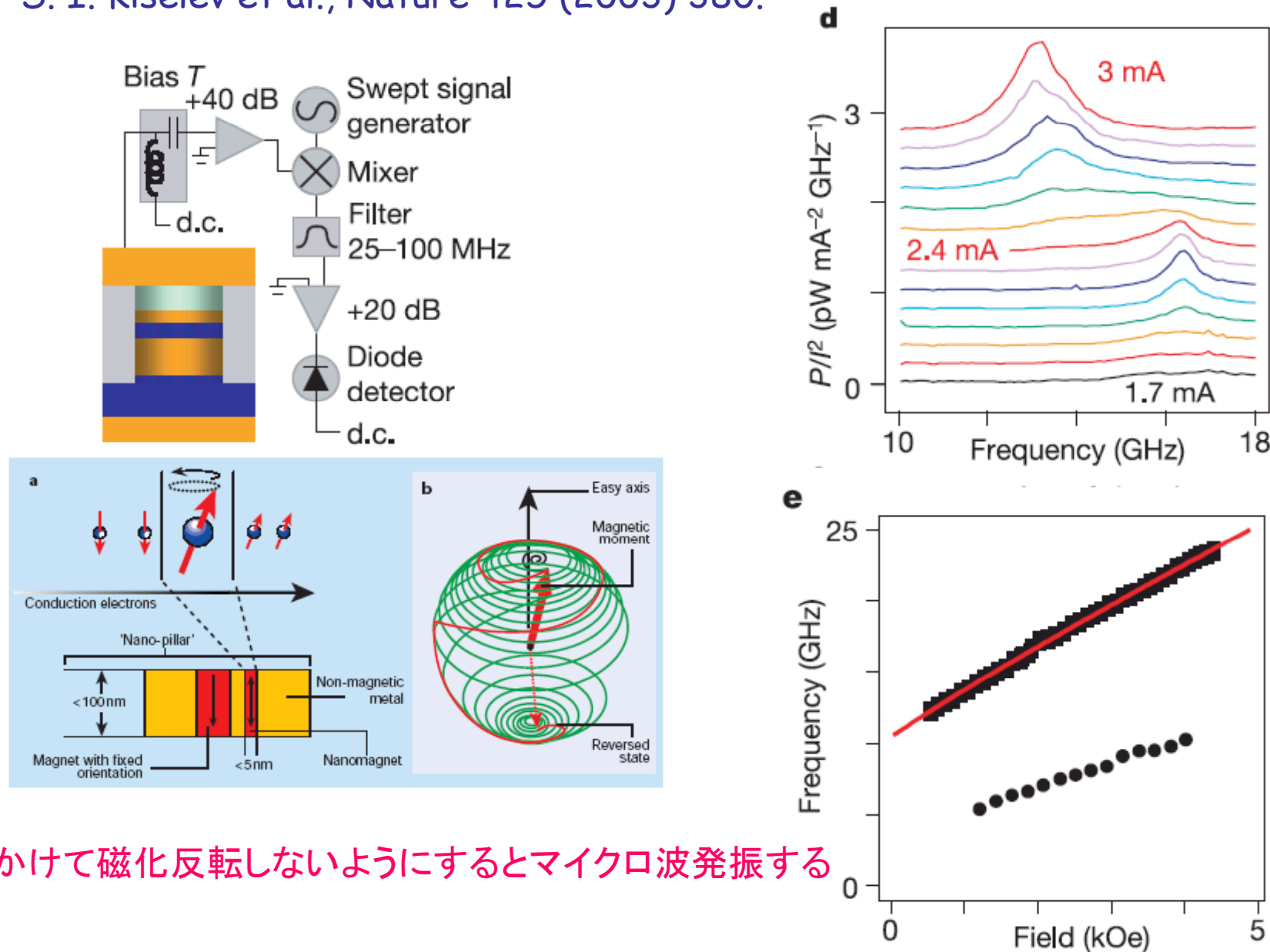
スピントランスフアー効果 ・マイクロ波の発振と検波



(Courtesy of Shinji Yuasa(AIST))

Microwave oscillations of a nanomagnet driven by a spin-polarized current

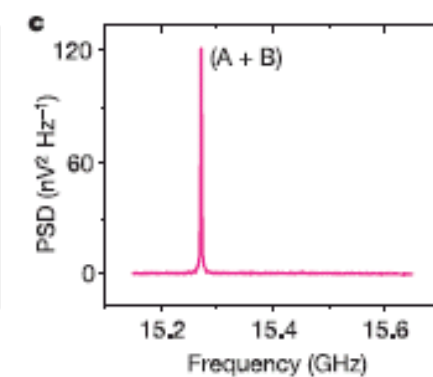
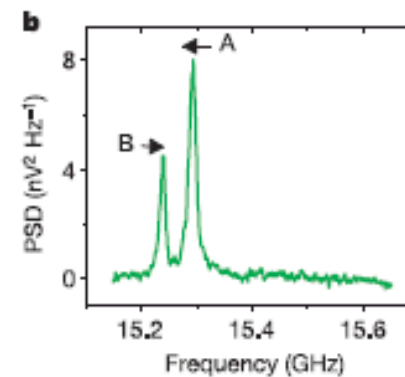
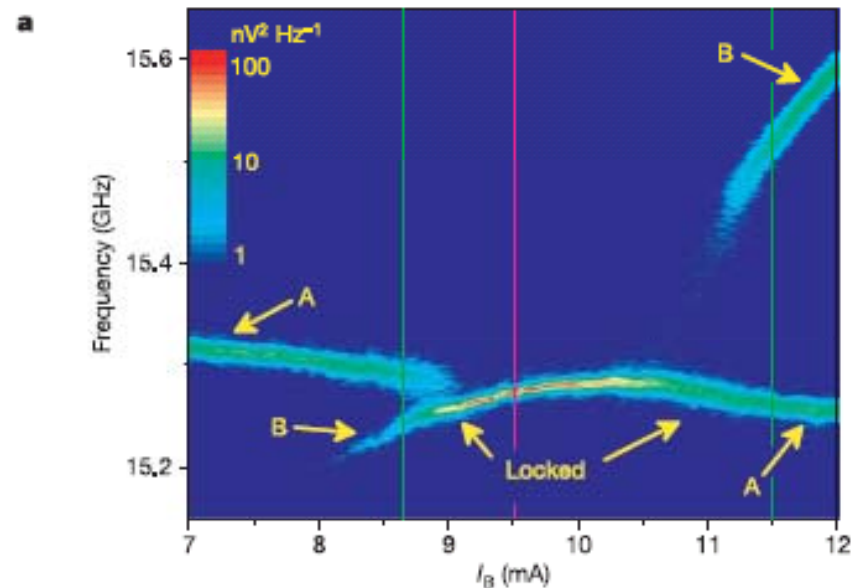
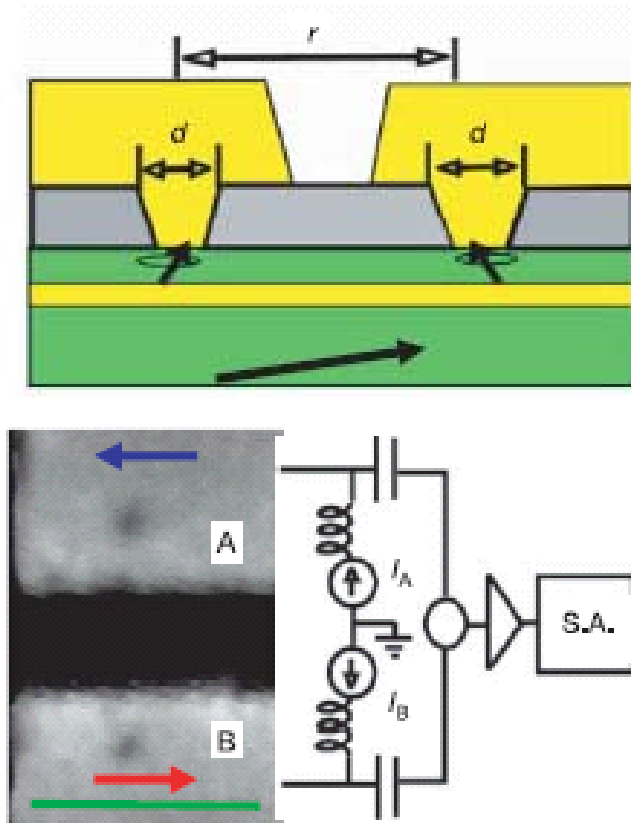
S. I. Kiselev et al., Nature 425 (2003) 380.



磁場をかけて磁化反転しないようにするとマイクロ波発振する

Mutual phase-locking of microwave spin torque nano-oscillators

S. Kaka et al., Nature 437 (2005) 389.



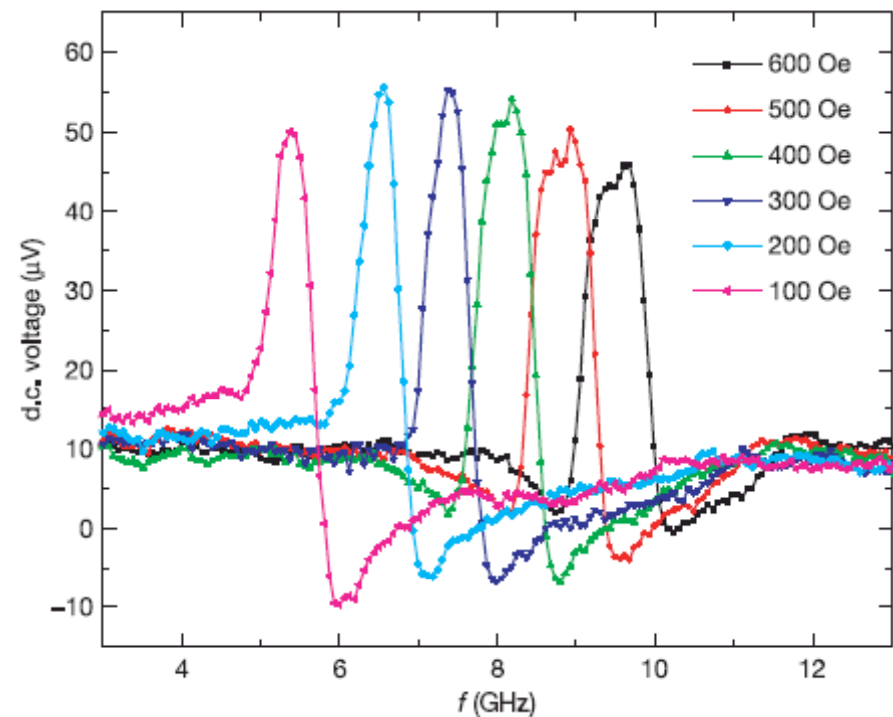
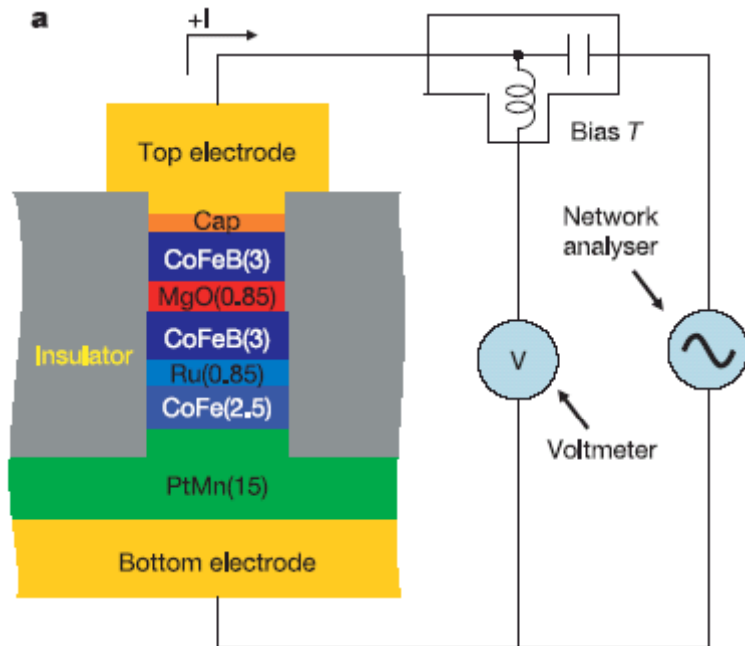
マイクロ波検波

Spin-torque diode effect in magnetic tunnel junctions

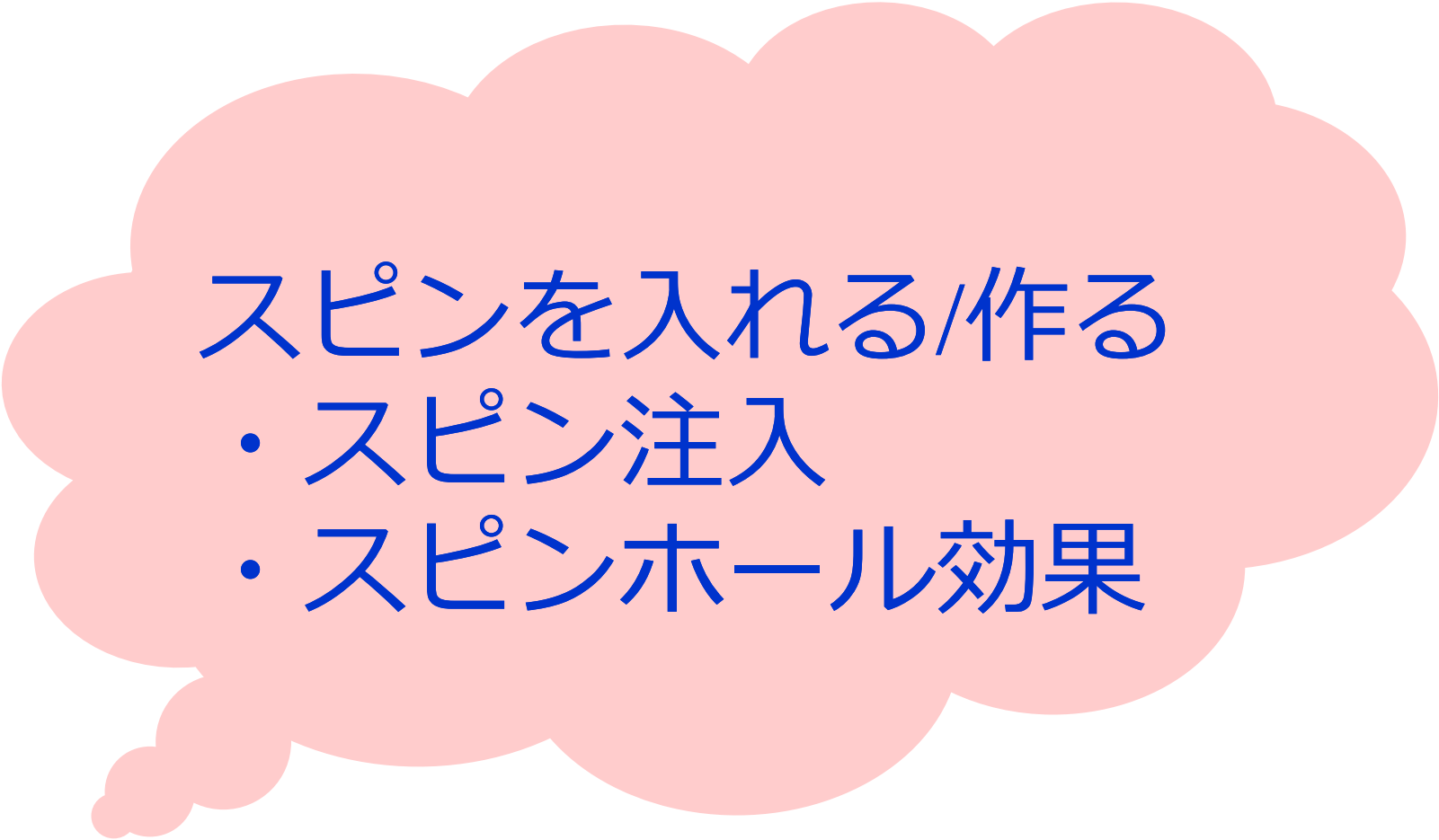
A. A. Tulapurkar et al., Nature 438 (2005) 339.

DC → AC マイクロ波発振

AC → DC ?!



マイクロ波の検波ができる！

A large, light pink cloud-like shape with a small tail at the bottom left, containing blue text.

スピンを入れる/作る

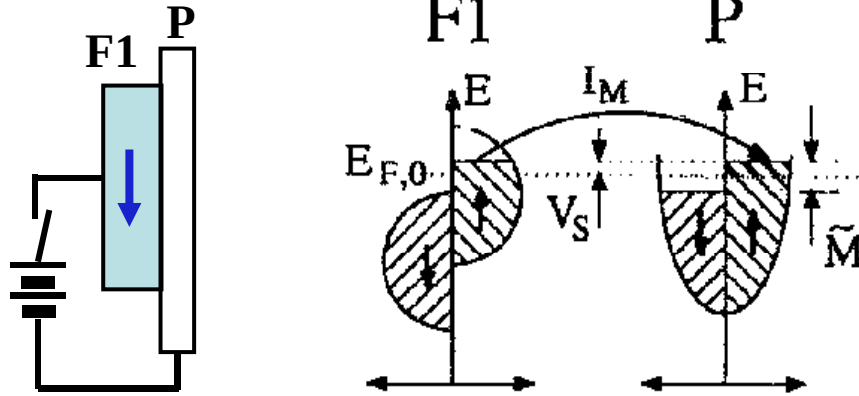
- ・スピン注入
- ・スピンホール効果



スピンを入れる
・スピン注入

スピン注入とは

M. Johnson and R.H. Silsbee,
Phys. Rev. Lett. 55 (1985) 1790.



スピン偏極電流によって非磁性体に非平衡磁化が生じる

$$I_M = \mu_B I_e / e$$

← 磁気モーメントの流れ

$$M = I_M \tau / Ad = \mu_B I_e \tau / eAd$$

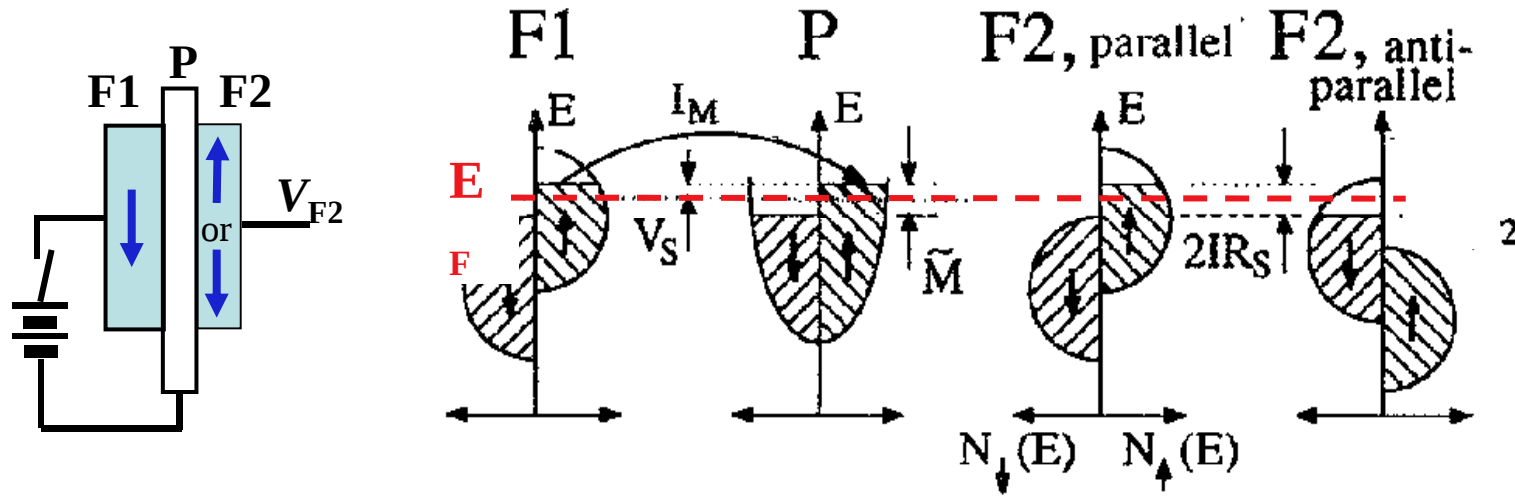
← P中の非平衡磁化

$$M / \mu_B = N(E_F) e V_s$$

$$eV_s = \frac{M}{\mu_B N(E_F)} = \frac{\tau}{eAdN(E_F)} I_e = \mu_B \frac{M}{\chi}$$

← スピン注入による
化学ポテンシャル変化

どうやって検出するか？

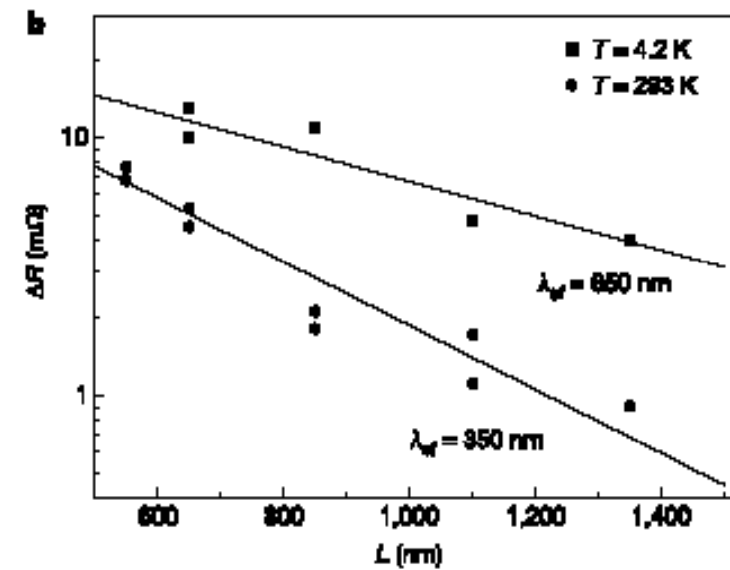
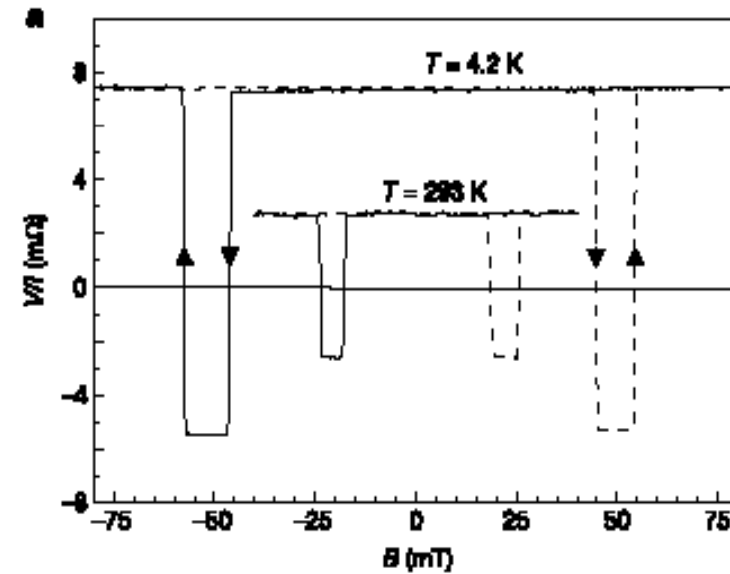
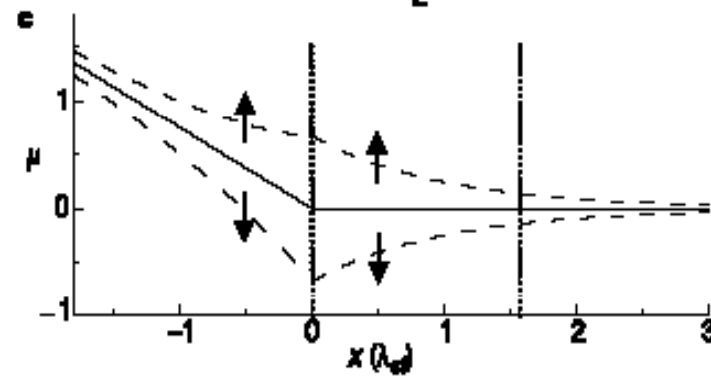
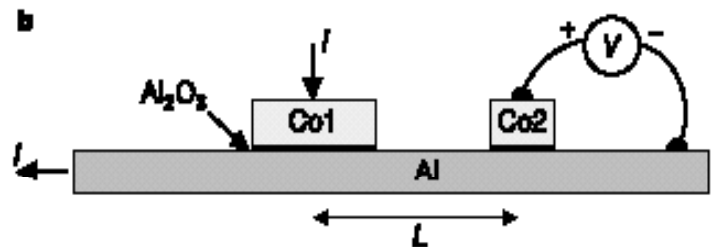
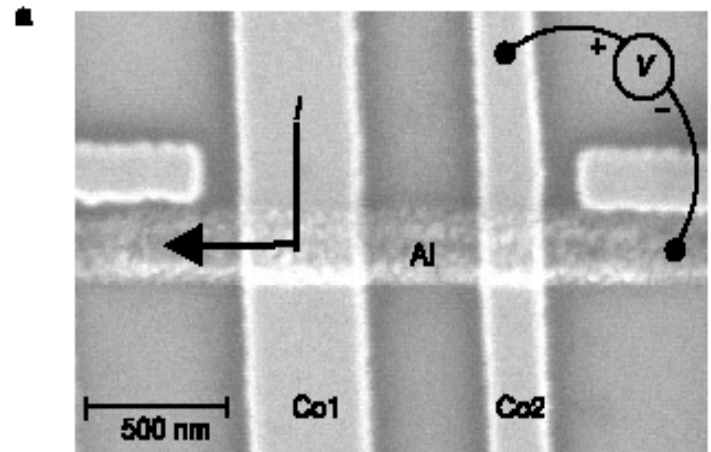


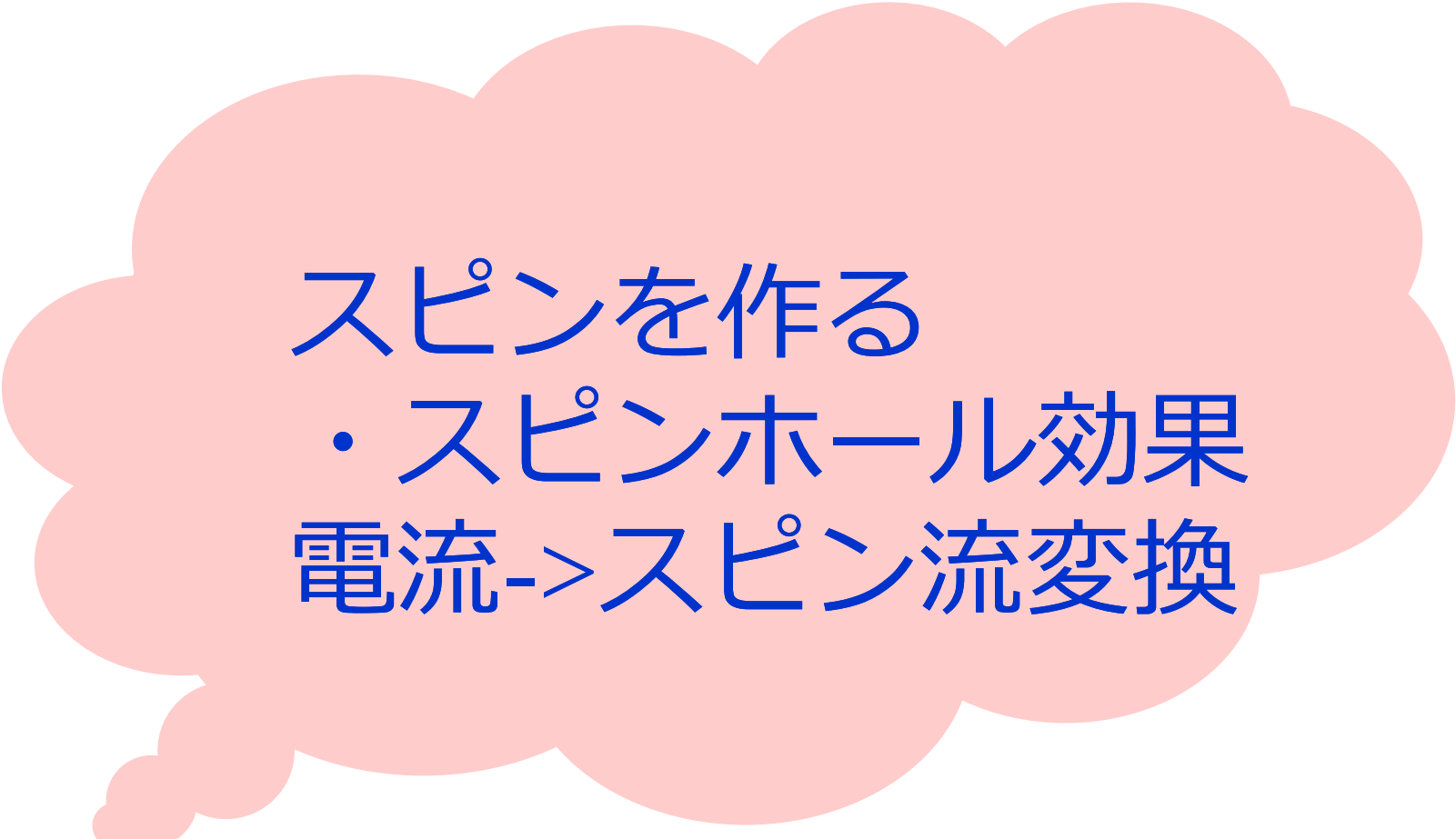
- V_{F2} がフロート
F2の磁化の向きにF2の電位が依存
 $V_s \propto I_e$
- V_{F2} がground
F2の磁化の向きに依存した電流

M. Johnson, Science 260 (1993) 320.

非局所測定によるスピン依存化学ポテンシャル測定

F.J. Jedema *et al.*, Nature, 410 (2001) 345.



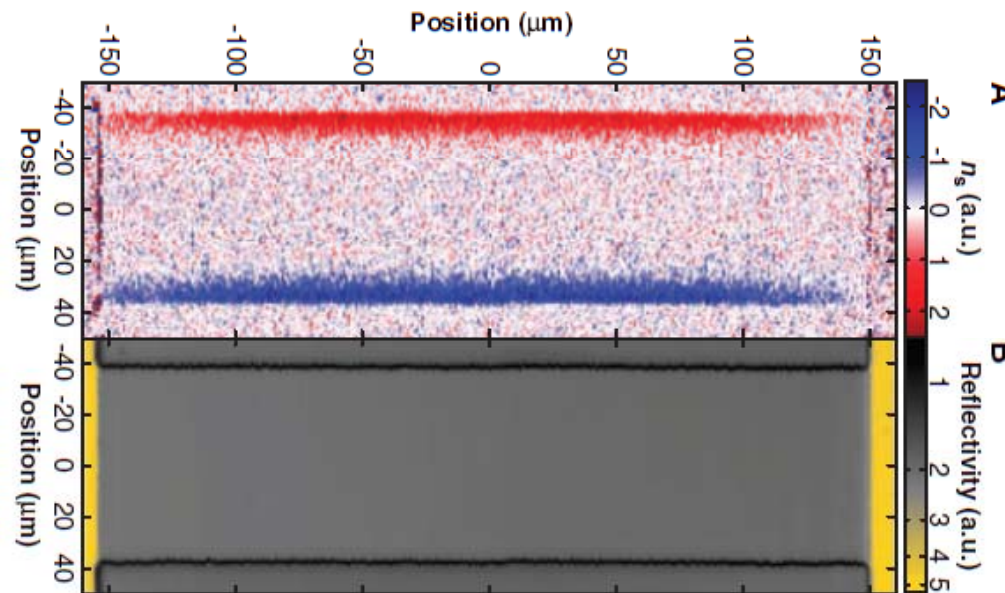
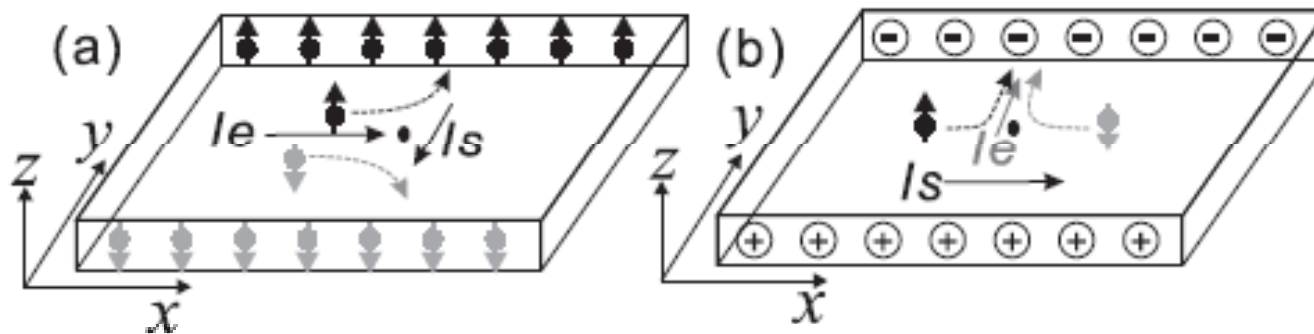
A large, light pink cloud-like shape with a small tail at the bottom left, serving as a background for the text.

スピンを作る
・スピンホール効果
電流->スピン流変換

スピンホール効果

電流を流すだけでスピンの流れができ端にスピンがたまる
スピン軌道相互作用によるスピン依存非対称散乱

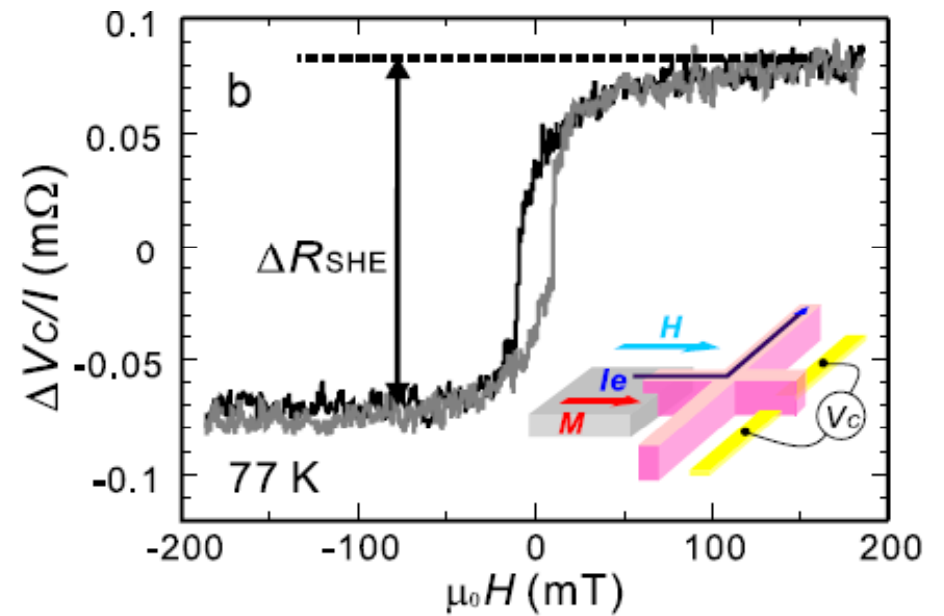
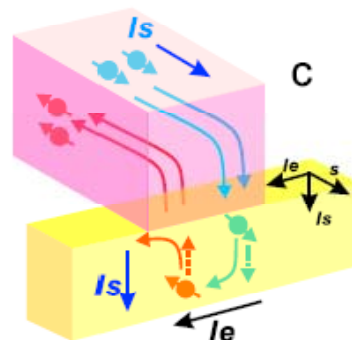
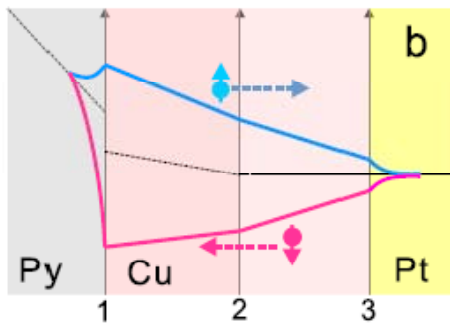
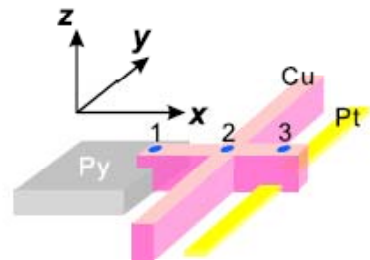
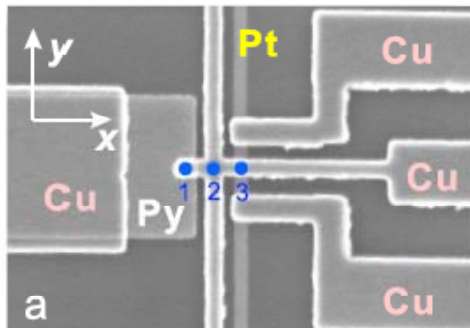
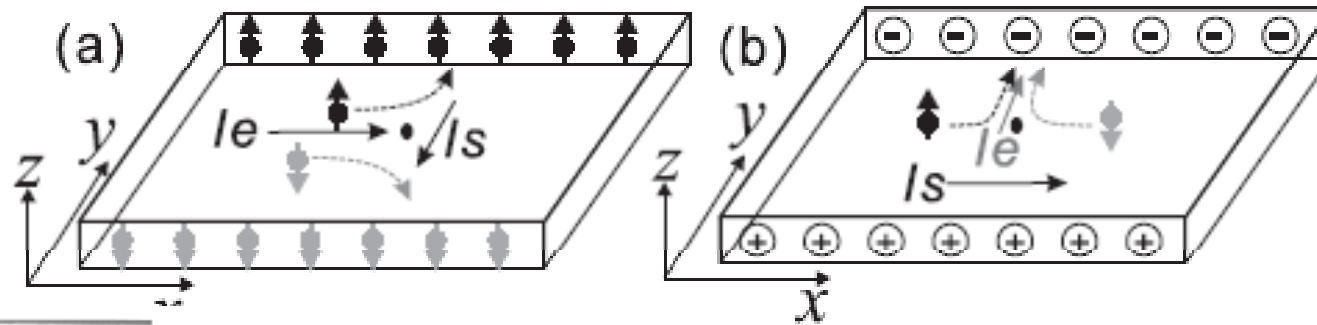
理論予言 M. I. D'yakonov and V. I. Perel, JETP Lett. 13 (1971) 467.



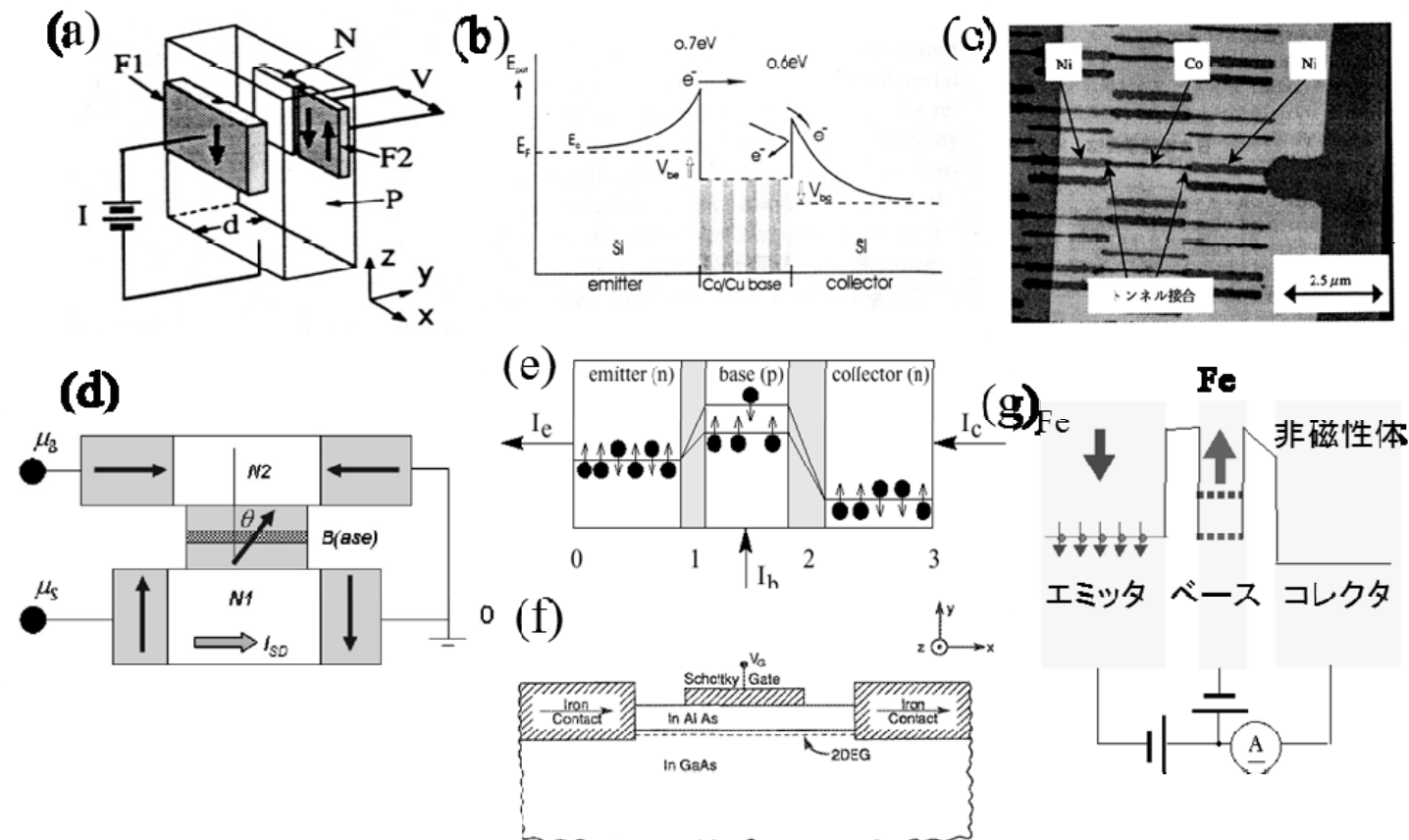
スピンを計る
・逆スピンホール効果
スピン流→電流変換

逆スピンホール効果

スピンの流れが電流になり端に電荷がたまる



スピントランジスタ



非磁性体に
スピンを注入



ゲートで
スピン状態制御



コレクターで
スピン状態検出

不揮発・書き換え可能

課題：論理回路を組むにはゲインが必要！

スピントロニクス展開

スピン依存伝導

磁気構造 → 電気伝導

- 巨大磁気抵抗効果
- トンネル磁気抵抗効果

スピントランスポース

スピン電流 → 磁気構造

- スピン注入磁化反転
 - 磁壁電流駆動
 - マイクロ波発振
- スピントルクダイオード

スピンホール効果

???

HDD

MRAM

高周波デバイス
スピントランジスタ
ポストHDD
???

スピントロニクス