

■本資料のご利用にあたって(詳細は「利用条件」をご覧ください)

本資料には、著作権の制限に応じて次のようなマークを付しています。
本資料をご利用する際には、その定めるところに従ってください。

***** : 著作権が第三者に帰属する著作物であり、利用にあたっては、この第三者より直接承諾を得る必要があります。

CC : 著作権が第三者に帰属する第三者の著作物であるが、クリエイティブ・コモンズのライセンスのもとで利用できます。

 : パブリックドメインであり、著作権の制限なく利用できます。

なし : 上記のマークが付されていない場合は、著作権が東京大学及び東京大学の教員等に帰属します。
無償で、非営利的かつ教育的な目的に限って、次の形で利用することを許諾します。

- I 複製及び複製物の頒布、譲渡、貸与
- II 上映
- III インターネット配信等の公衆送信
- IV 翻訳、編集、その他の変更
- V 本資料をもとに作成された二次的著作物についての I からIV

ご利用にあたっては、次のどちらかのクレジットを明記してください。

東京大学 UTokyo OCW 学術俯瞰講義
Copyright 2015, 石坂香子

The University of Tokyo / UTokyo OCW The Global Focus on Knowledge Lecture Series
Copyright 2015, Kyoko Ishizaka

超伝導・強相関・トポロジカル物質

物性科学の最先端研究の話題を紹介

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻
量子相エレクトロニクス研究センター

石坂 香子

outline

- 物性科学とは
- 固体中の電子
- 強相関電子系
- 超伝導
- トポロジカル絶縁体

物性科学 凝縮系物理, 固体物理学

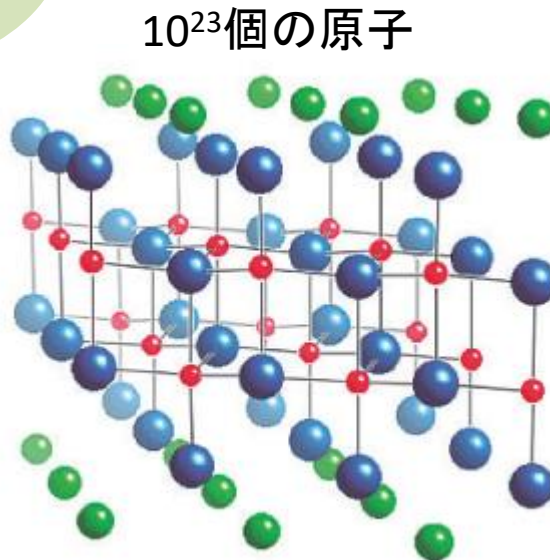
半導体

金属

絶縁体

強磁性

強誘電



* 画像提供: 池田直氏 (岡山大学)・高輝度
光科学研究センター

超伝導

物質中の量子力学的な世界
多様な性質と機能を引き出す
新しい物質を創り出す

物性科学 マテリアルサイエンス

電子工学・化学など幅広い分野と連携 → 社会



Image by Mytho88, from Wikimedia Commons [CC BY-SA 3.0](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2009_Toyota_Prius_01.jpg)
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2009_Toyota_Prius_01.jpg

半導体

LSI(集積回路)
メモリ(USBメモリ、SDカード)
LED(発光ダイオード)
レーザー
ディスプレイ

磁石

モーター
発電機
ハードディスク



Image by Pixeden.com, from
Wikimedia Commons [CC BY 3.0](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IPhone5white.png)
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IPhone5white.png>

金属

基板, 導線
端子, 電極材料

物性科学(固体物理学)と半導体産業

半導体産業の黎明と隆盛

「バンド理論」(固体物理学の基礎)

バンド理論(1920's):

固体中の電子を近似的に取り扱う基礎的手法

原子の周期構造が本質的に重要

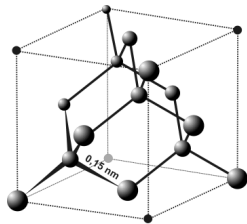
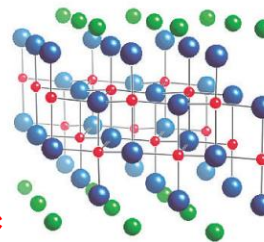


Image by Anton, from
Wikimedia Commons
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diamonds_glitter.png CC BY-SA 3.0



*
画像提供: 池田直氏(岡山大学)・高輝度
光科学研究センター

- ✓ 物質の分類(金属、半導体、絶縁体)に成功
- ✓ 半導体の電気、光学特性の記述に成功

1920	バンド理論
1939	ダイオード
1948	トランジスタ
1950's	集積回路
1960's	LSI
1962	赤色LED 半導体レーザー
1993	青色LED

outline

- ➡ • 固体中の電子とバンド理論
- 強相関電子系
- 超伝導
- トポロジカル絶縁体

電子 (electron) とは

マイナスの電荷 $-1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
質量 $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$
スピン (磁石の素) $1/2$

をもつ素粒子のひとつ

スピンの自由度

$S=+1/2$
up



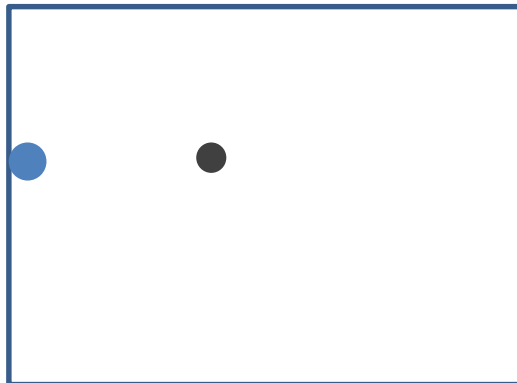
$S=-1/2$
down



ミクロの世界では、
全てのものが「粒子」と「波」の性質を持つ “量子力学”

Photo Credit: ESO/M. Alexander. CC BY 4.0
<https://www.eso.org/public/images/potw1404a/>

粒子の動き
「運動」



波の動き
「波動」



電子の状態は量子力学的な「波動関数」で記述される

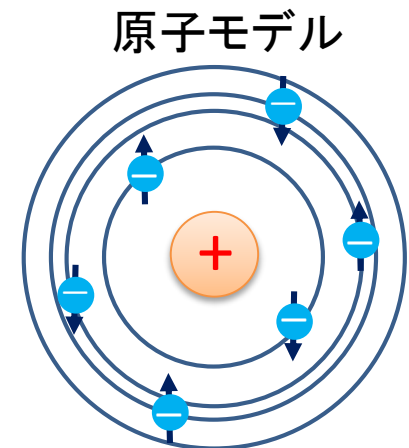
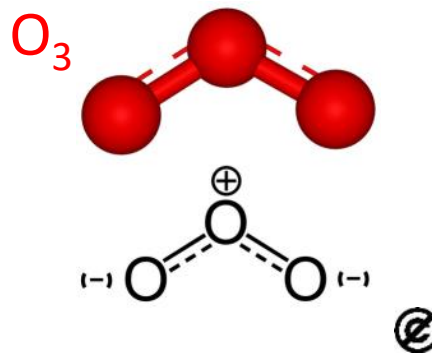
原子中の電子

電子はエネルギーの低い順に2つ(スピンup, down)ずつ埋まっていく

原子で一番高いエネルギーを持つ電子 = 最外殻電子

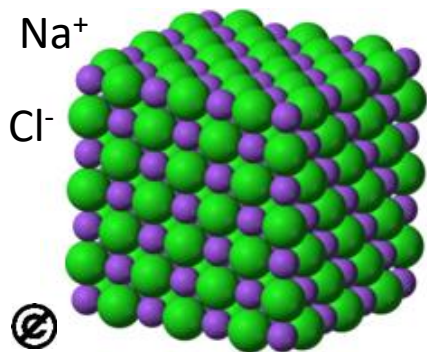
最外殻電子は、近くに他の原子がいれば、原子間を移動することも可能

原子間の電子のやりとり = 化学結合
→ 分子や固体を形成



様々な結晶構造をもつ固体

イオン結合
岩塩NaClなど



共有結合
シリコン,ダイヤモンド

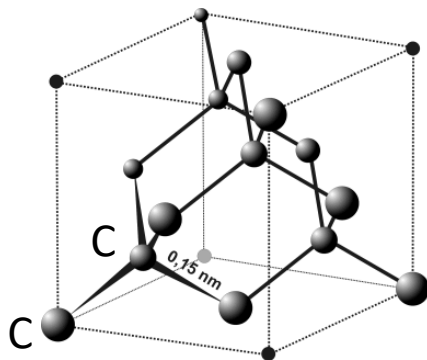


Image by Anton, from
Wikimedia Commons
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diamonds_glitter.png CC BY-SA 3.0

金属結合
貴金属など

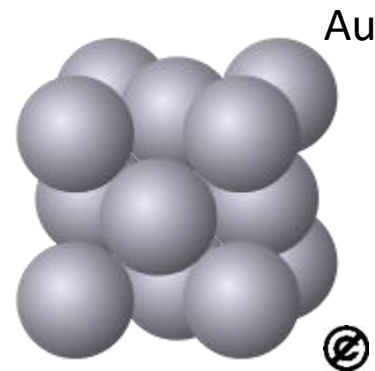
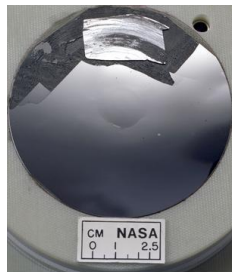


Image by Didier Descouens, from
Wikimedia Commons CC BY-SA 4.0
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Selpologne.jpg>



Image by Mario Sarto, from
Wikimedia Commons CC BY-SA 3.0
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brillanten.jpg>



*
Image by
NASA
Glenn
Research
Center



Image by World Imaging, from
Wikimedia Commons CC BY-SA 3.0
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Toi_250kg_gold_bar.jpg

Image by Periodictableru, from
Wikimedia Commons CC BY 3.0
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Platinum_crystals.jpg

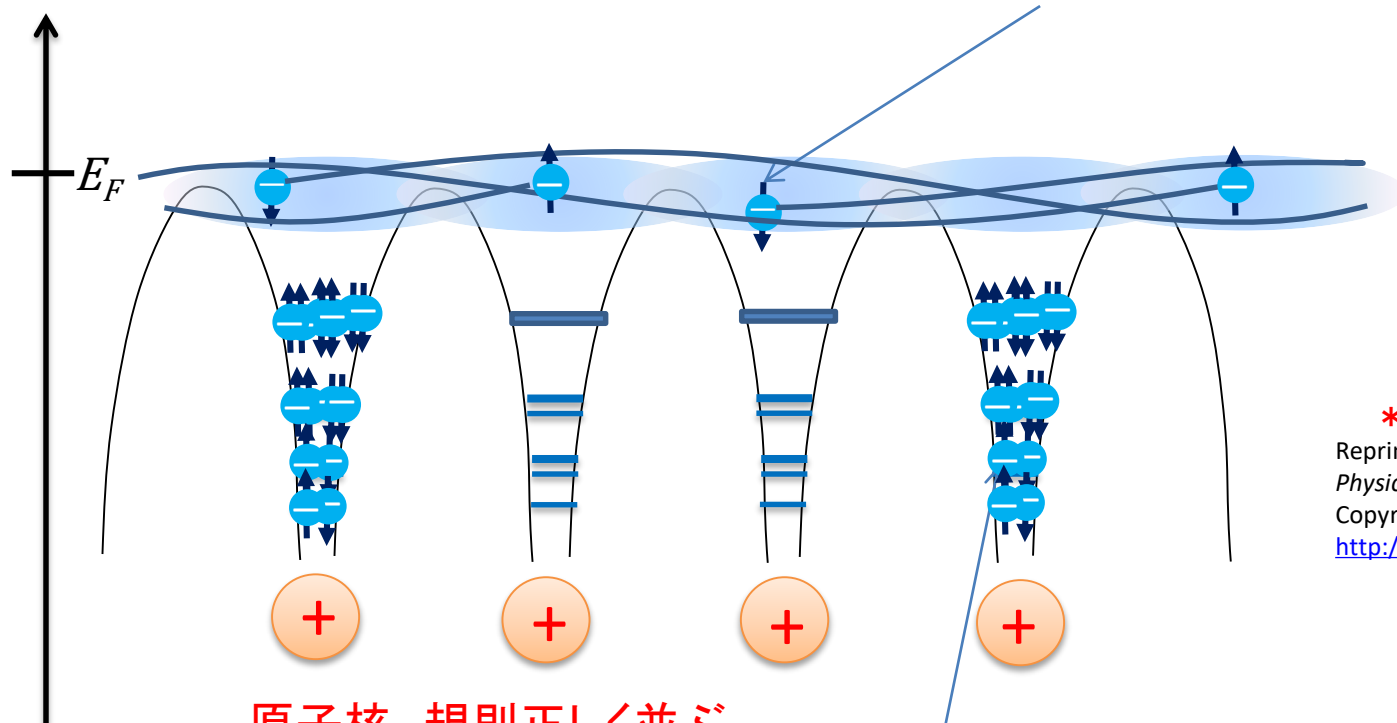


元素(～100種)の組み合わせ × 様々な結晶構造
無限の可能性

固体中の電子(大雑把な理解)

エネルギー

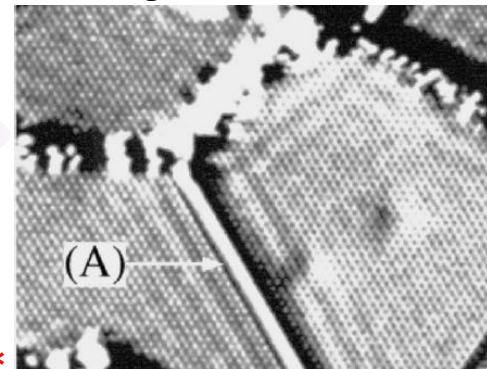
格子上を自由に動き回る「遍歴」電子(伝導電子): 金属だけに存在



原子核 規則正しく並ぶ
「格子」を組む

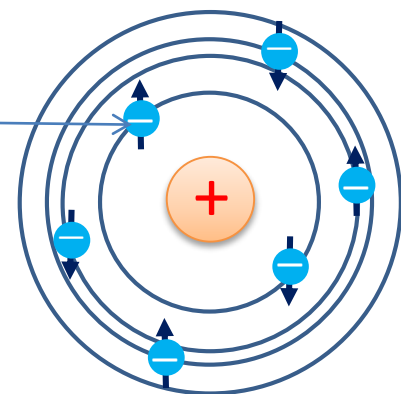
ひとつの原子の周り
にとどまる「局在」電子

銀Ag表面のSTM像



*
Reprinted image with permission from Sato et al.,
Physical Review B, vol.59, pp.2035-2039, 1999.
Copyright 1999 by the American Physical Society.
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.59.2035>

原子



電子を詰めたときの最大エネルギー
フェルミレベル(E_F)

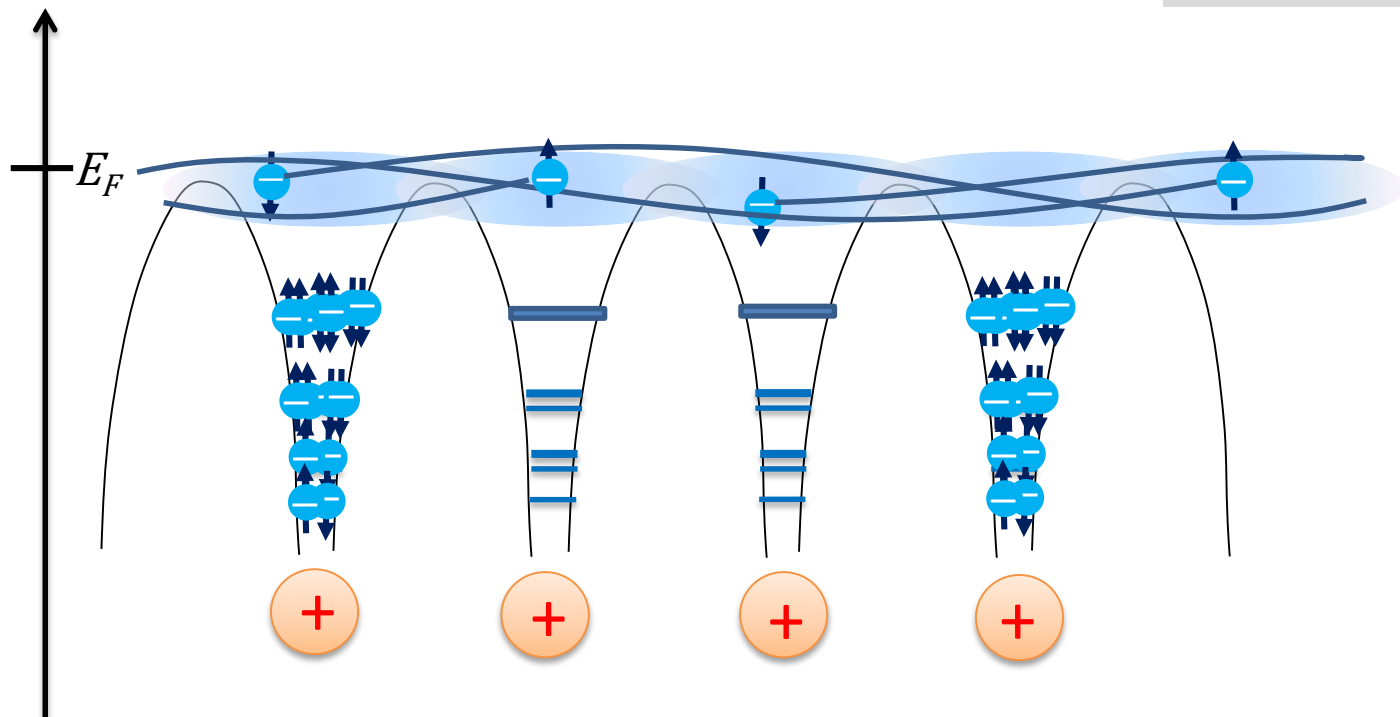
固体中の電子の取り扱い

固体中の電子は原子核からの引力と他の電子からの斥力を感じる
→ 1cm^3 当り 10^{23} 個の粒子が絡んだ複雑な多体系

多体問題は難しい

著作権の都合により
ここに挿入されていた画像を
削除しました

テニスボール積み画像

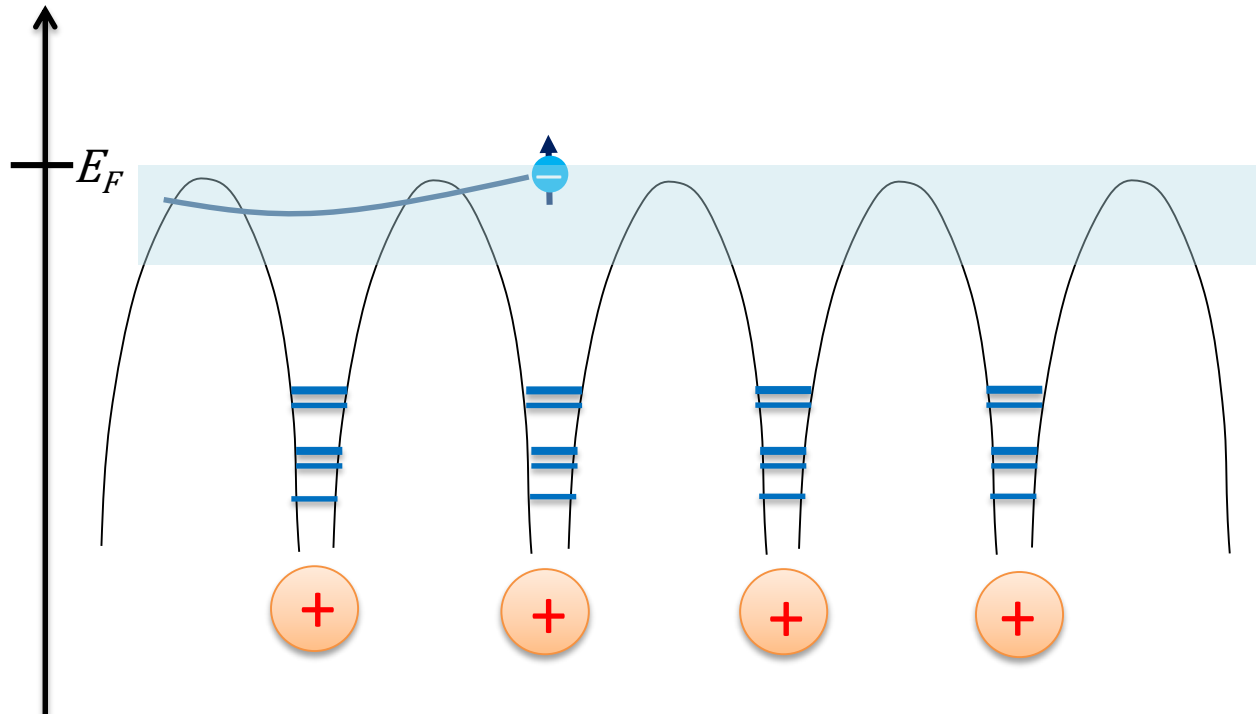


固体中の電子の取り扱い

固体中の電子は原子核からの引力と他の電子からの斥力を感じる
→ 1cm^3 当り 10^{23} 個の粒子が絡んだ複雑な多体系

大胆な簡単化(近似)

ある電子に着目し、他の電子が作る斥力は平均化
→ 「多体系に対する**一体近似**」 バンド理論の礎



固体中の電子の取り扱い

固体中の電子は原子核からの引力と他の電子からの斥力を感じる
→ 1cm^3 当り 10^{23} 個の粒子が絡んだ複雑な多体系

大胆な簡単化(近似)

ある電子に着目し、他の電子が作る斥力は平均化
→ 「多体系に対する一体近似」 バンド理論の礎

原子核の周期的な引力ポテンシャル $V(r)$ の中を各電子が独立に動いている、とみなす。

- × 他の電子からの影響(多体効果)は記述できない
- × 有限温度で結晶格子が熱振動する影響等も記述できない

逆にいうと、それらが気にならない場合はとても有用

固体中の電子の取り扱い

例) 銀Ag表面のSTM像

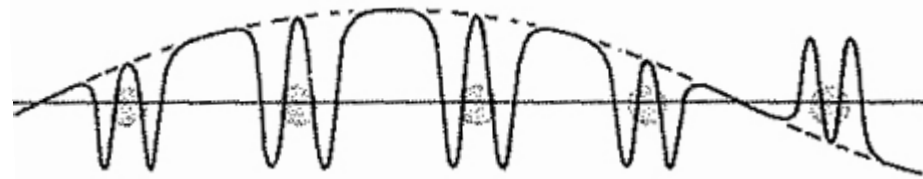
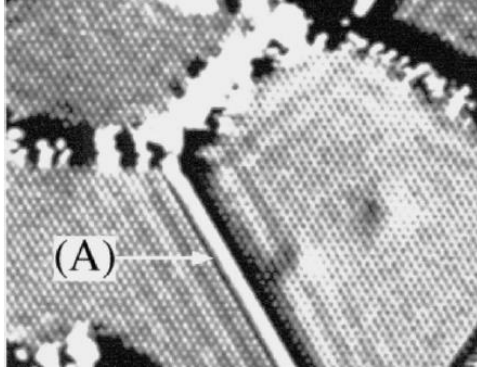


Image by Praveen Thappily, from Wikimedia Commons [CC BY-SA 3.0](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bloch_function.jpg)
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bloch_function.jpg



結晶構造を反映した
電子の波(波動関数)

シュレディンガー方程式

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dr^2} + V(r) \right\} \phi(r) = E \phi(r)$$

注目する電子の運動エネルギー 原子核の周期ポテンシャル 波動関数

E : 着目する電子のエネルギー

全ての電子の E を計算する **バンド計算**

金属、半導体、絶縁体など分類できる **バンド理論**

バンド計算の例: ダイヤモンド

ダイヤモンド C

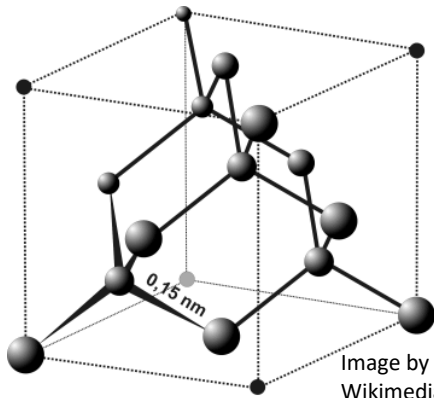


Image by Anton, from
Wikimedia Commons
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diamond_s_glitter.png CC BY-SA 3.0

結晶構造
原子座標を入力



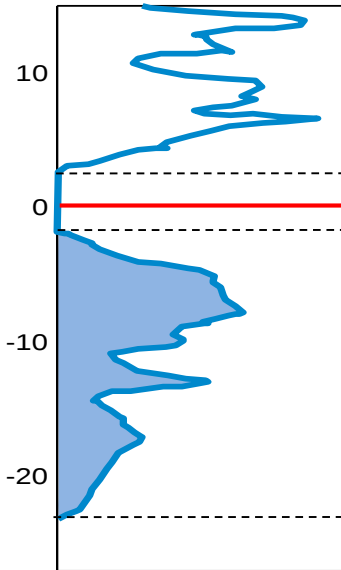
$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dr^2} + V(r) \right\} \phi(r) = E \phi(r)$$



エネルギー E を計算
(バンド計算)

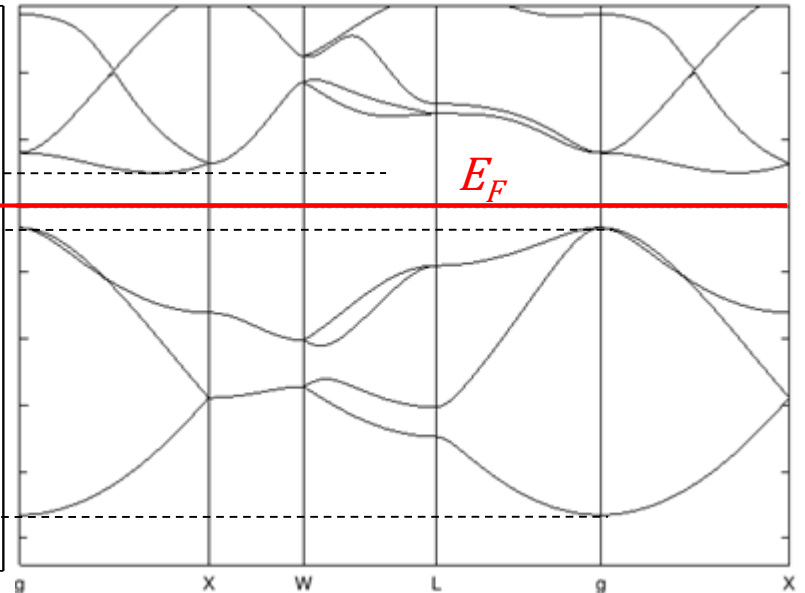
状態密度

エネルギー E (電子ボルト)



データ出典: OpenMX

バンド計算



電子の波数 k
(波長 λ の逆数)

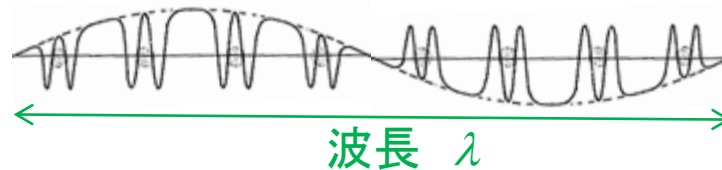


Image by Praveen
Thappily, from
Wikimedia Commons
CC BY-SA 3.0
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Block_function.jpg

バンド計算の例: ダイヤモンド

ダイヤモンド C

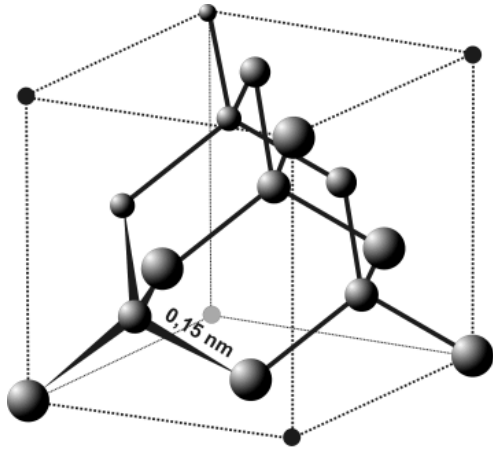
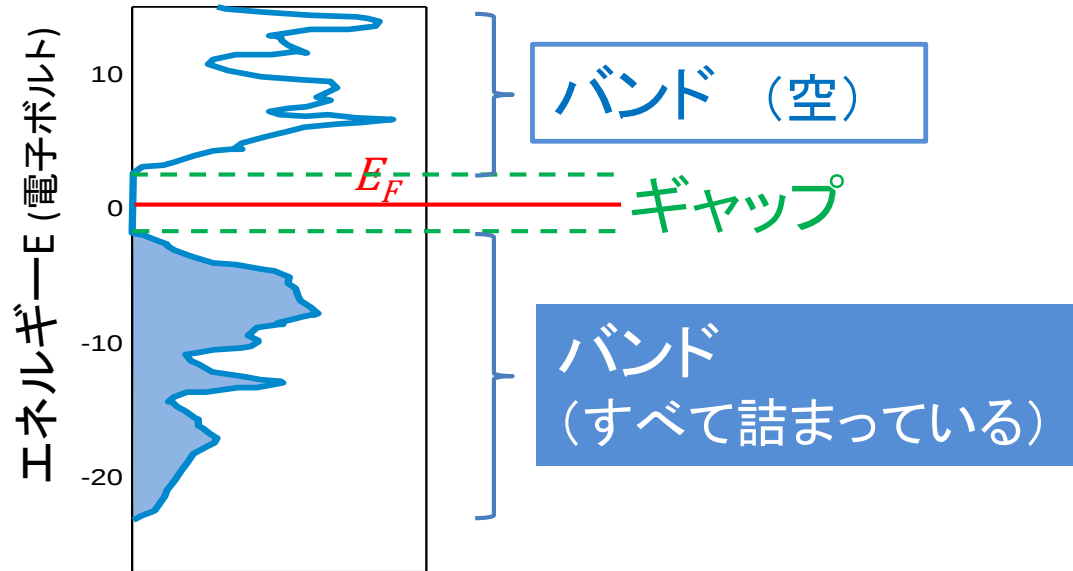


Image by Anton, from Wikimedia Commons
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diamonds_glitter.png CC BY-SA 3.0

状態密度



データ出典: OpenMX

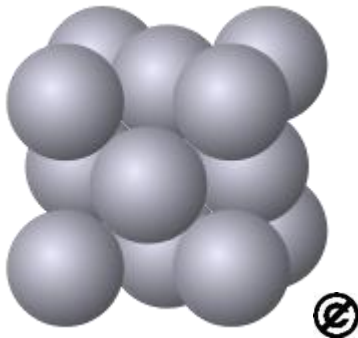
バンドに電子が完全に詰まっている場合
簡単には動けない(ギャップを超える必要有り)
→絶縁体or半導体



Image by Mario Sarto, from
wikimedia commons CC BY-SA 3.0
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brillanten.jpg>

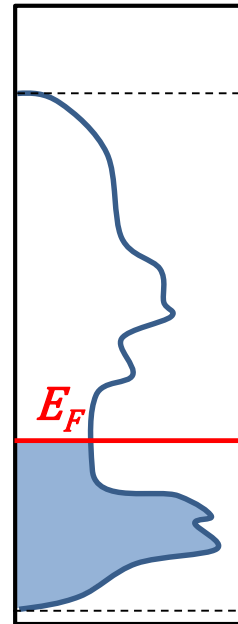
バンド計算の例： 金 Au

金 Au

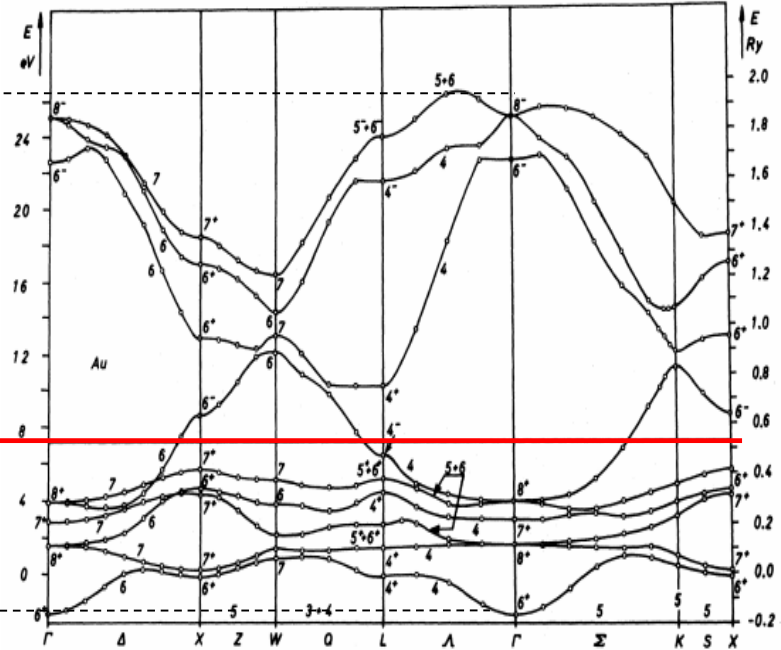


状態密度

エネルギー



バンド計算



電子の波数
(波長 λ の逆数)

バンドに電子が部分的に詰まっている場合
電子は動ける(伝導電子) → 金属

Reprinted figure with permission from N. Egede Christensen and B. O. Seraphin, *Physical Review B*, vol.4, pp.3321-3344, 1971. Copyright 1971 by the American Physical Society. <https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.4.3321>

Image by World Imaging, from Wikimedia Commons https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Toi_250kg_gold_bar.jpg CC BY-SA 3.0



金属、半導体、絶縁体

金属

電気を通す(導電性)



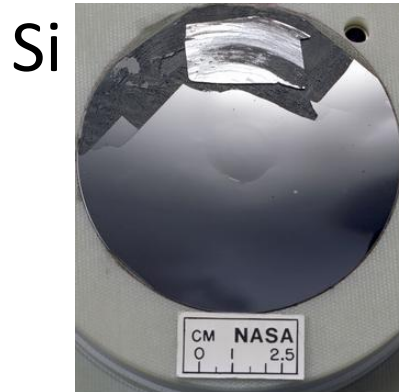
Image by Periodictableru, from Wikimedia Commons
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Platinum_crystals.jpg CC BY 3.0

金属光沢

可視光ほぼ反射

半導体

導電性を電気制御できる



* Image by NASA Glenn
Research Center

Siは黒色

可視光の吸収

絶縁体

電気を通さない



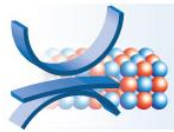
Image by Didier Descouens, from Wikimedia Commons
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quartz_Br%C3%A9sil.jpg CC BY-SA 4.0

透明

可視光ほぼ透過

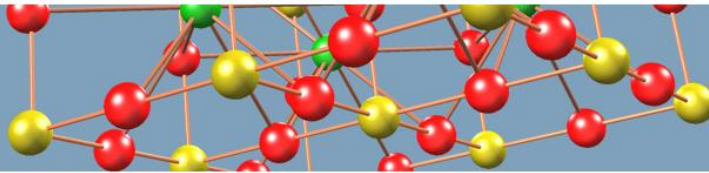
バンド計算 → 電氣的性質、光学的性質を非経験的に予測可能
特に半導体産業の隆盛とともに成熟、今なお進化中

最先端では、、、 例) <http://www.centerforinversedesign.org/> トップページ



Center for Inverse Design

Achieving the grand challenge of materials and nanostructures by design



*

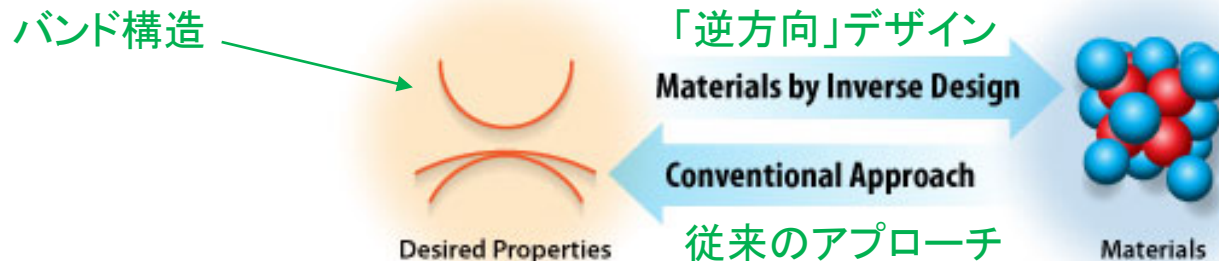
計算機科学, データベース

バンド理論に基づく
物質設計戦略

アメリカ合衆国
エネルギー省

Center for Inverse Design

The Center for Inverse Design is an Energy Frontier Research Center of the U.S. Department of Energy Office of Science. To address a crucial scientific grand challenge, the Center is pursuing a new approach to material science. As shown in the figure below, rather than using the conventional direct approach ("Given the structure, find the electronic properties"), we are using a "materials by inverse design" approach ("Given the desired property, find the structure").



Comparison of the "materials by inverse design" approach (left to right) versus the conventional approach (right to left)

The target properties of interest include general semiconductor optical and electrical properties; the desired materials functionalities include electron- and hole-conductive transparent conductors, solar absorbers, and nanostructures for energy sustainability. Our predictions of materials are examined iteratively by various synthetic approaches, including high-throughput parallel materials science.

*

しかし、これからお話しするのは、従来のバンド理論では説明できない現象

強相関電子系: 1937年 金属のはずなのに絶縁体。なぜ??

電子間に働く斥力「電子相関」が極端に強い場合がある

磁性・電荷・格子(軌道)が絡んだ物質

→巨大応答・外場制御 強相関エレクトロニクス

超伝導: 1911年 低温実験中に偶然発見されたゼロ抵抗

電子の間に引力が働く場合がある

2電子を対にする「のり(glue)」: 格子振動

BCS超伝導～高温超伝導

実用技術と新超伝導体の探索 →室温超伝導へむけて

トポロジカル絶縁体: 2005年 理論が提唱した新しい絶縁体

バンドの持つ「トポロジカル」な性質

トポロジー (位相幾何学): 連続変形した際の「形」の分類

バンド構造だけでなく、電子の波動関数を計算しないとわからない

中身は「絶縁体」、表面は「特殊なスピンを持つ金属(低損失)」

outline

- 固体中の電子とバンド理論

- ➡ • 強相関電子系

- 超伝導

- トポロジカル絶縁体

相互反発が強い電子：強相関電子

1937年 ド・ボア, フェルウェー
「バンド理論では説明できない絶縁体がある」

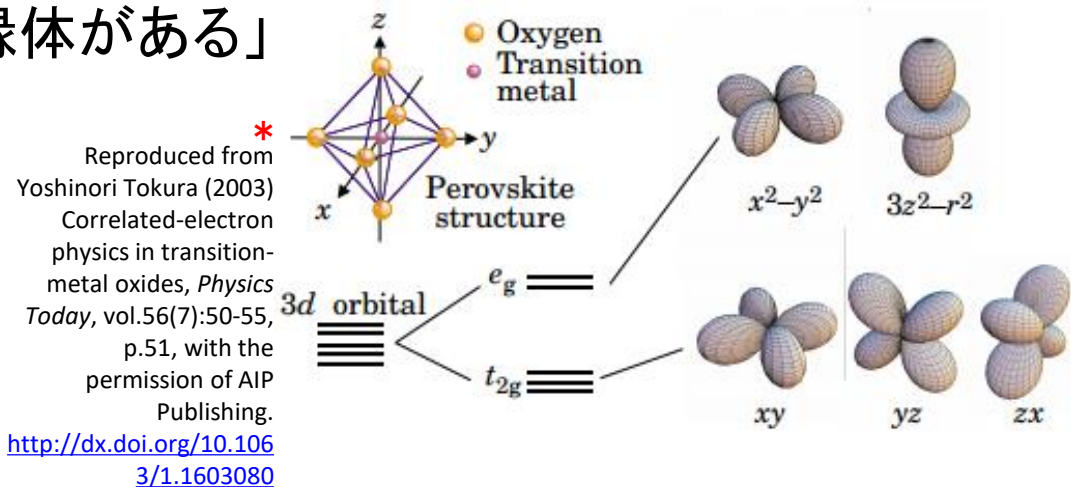
迁移金属酸化物

MnO, FeO, CoO, NiO など

O $1s^2 2s^2 2p^4$ 8個

Ni $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^8$ 28個

Co 27個, Fe 26個, Mn 25個



d電子は波動関数の 広がりが小さい

→電子相関が強い

1 H	2 He																
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*1	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	*2	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo

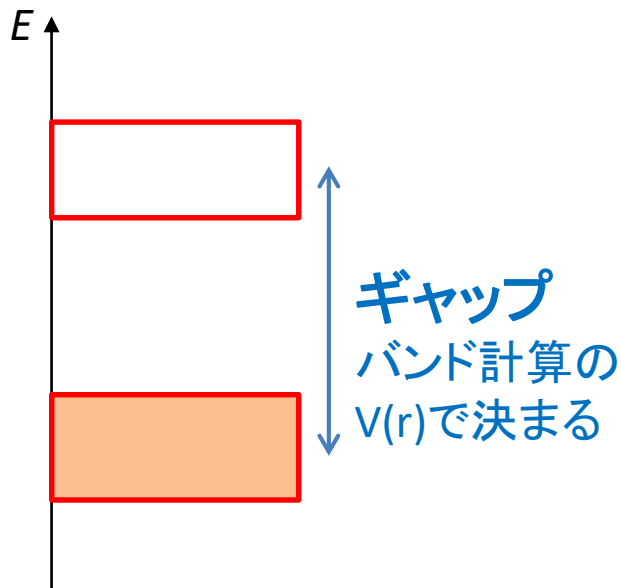
周期表、ウィキペディア日本語版 **CC BY-SA 3.0**
<https://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%91%A8%E6%9C%9F%E8%A1%A8&oldid=61955163>

電子相関が大きな極限：モット絶縁体

バンド絶縁体



詰まって動けない



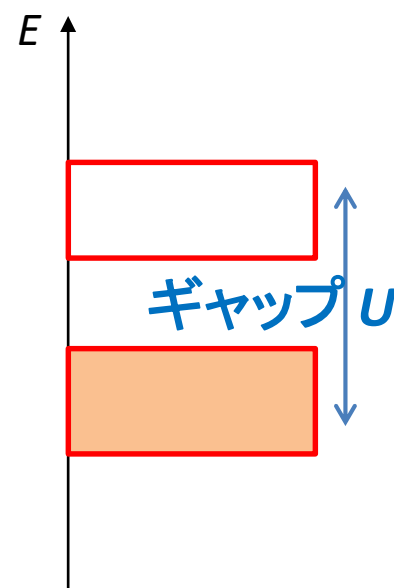
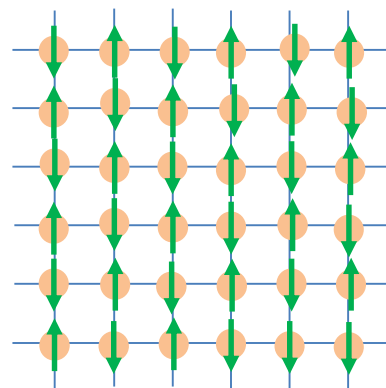
電子が2個詰まって動けない
スピンは相殺
電子を1個に減らせば金属

モット絶縁体

 反発 U



反発が強くて動けない

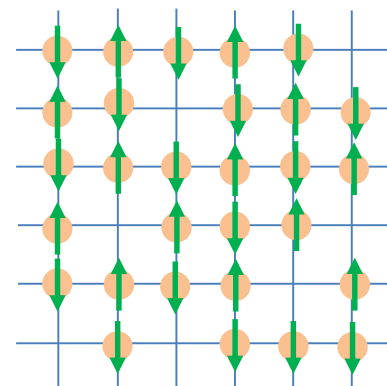
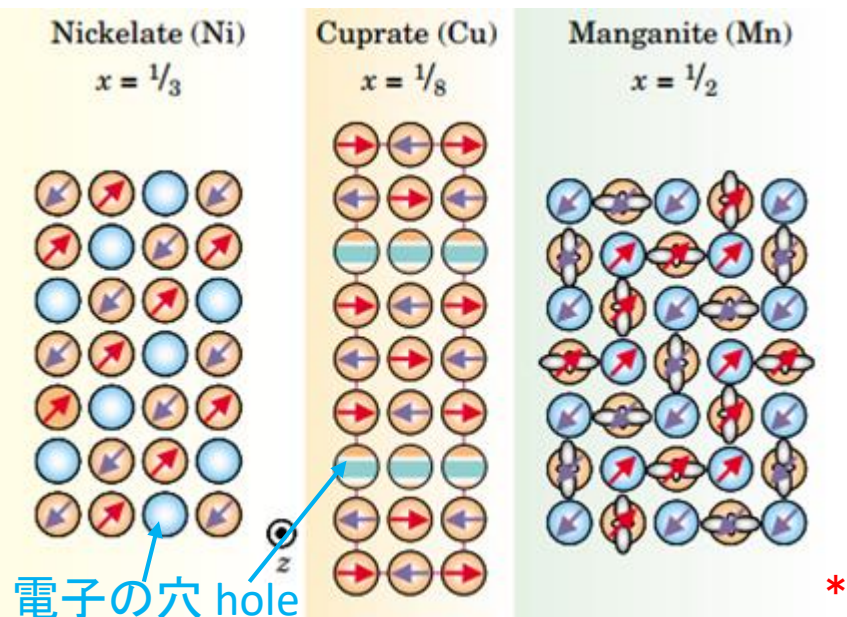


電子が1個なのに動けない
スピン自由度が顔を出す
スピン秩序 (反強磁性、強磁性)

モット絶縁体の電子を抜き取ると？

多彩なスピン電荷軌道秩序
(多様な自由度を持つ絶縁体)

ドロドロの強相関金属
(多様な自由度を維持した伝導体)



スピンゆらぎ
電荷ゆらぎ
軌道ゆらぎ
(秩序の残滓)

- ・高温超伝導 (*後半で)
- ・超巨大磁気抵抗
- ・電界誘起巨大抵抗変化
- ・光誘起金属・磁石・超伝導etc
- ・強誘電転移
- ・マルチフェロイクス

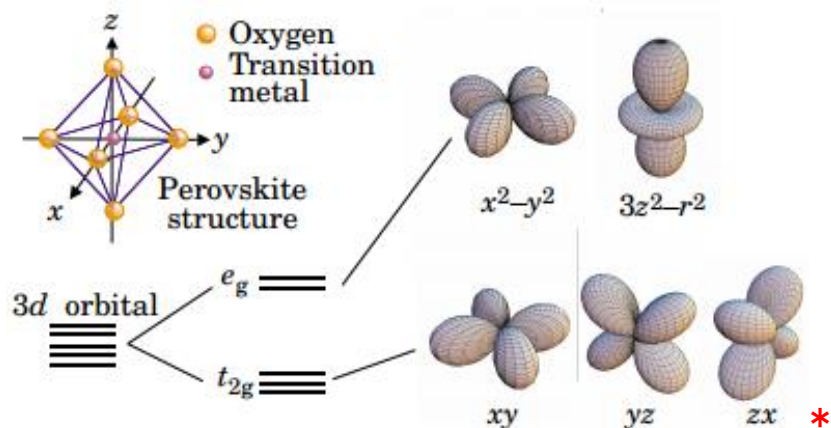
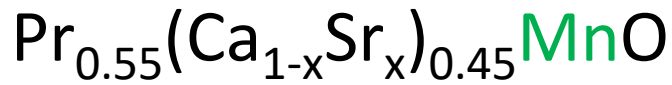
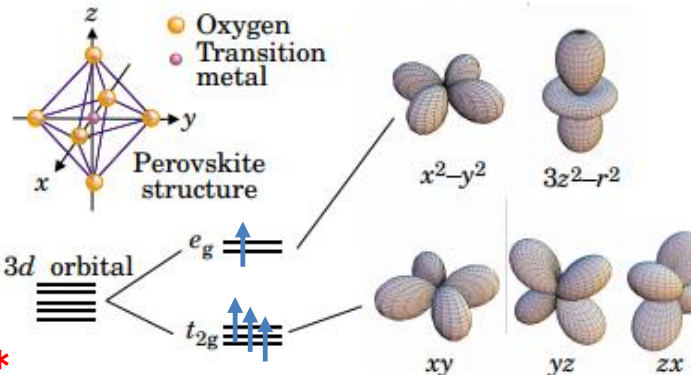
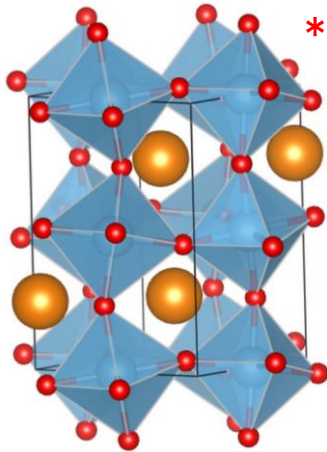


Image Credits: Reproduced from Yoshinori Tokura (2003) Correlated-electron physics in transition-metal oxides, *Physics Today*, vol.56(7):50-55, [left above] p.52 Fig.2(b-d) and [left below] p.51, with the permission of AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1603080>

マンガン酸化物の巨大磁気抵抗



* Courtesy of William R. Brant

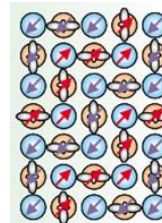


$\text{Mn}^{3+} S=2$

$\text{Mn}^{4+} S=3/2$

大きなスピン(フント則)

反強磁性
絶縁体



*

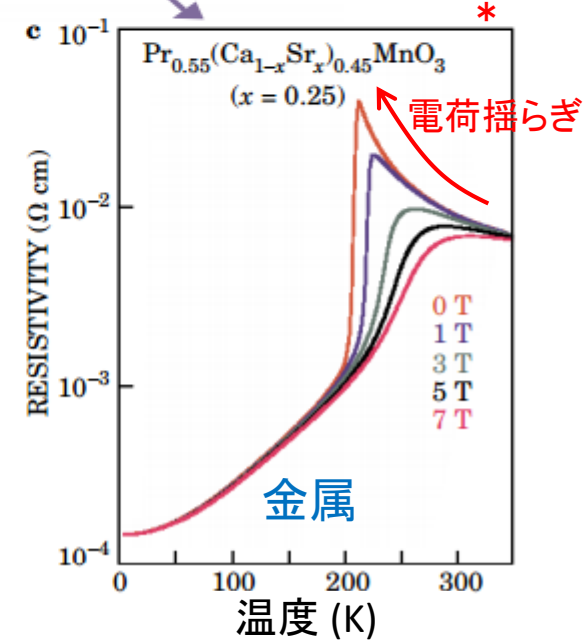
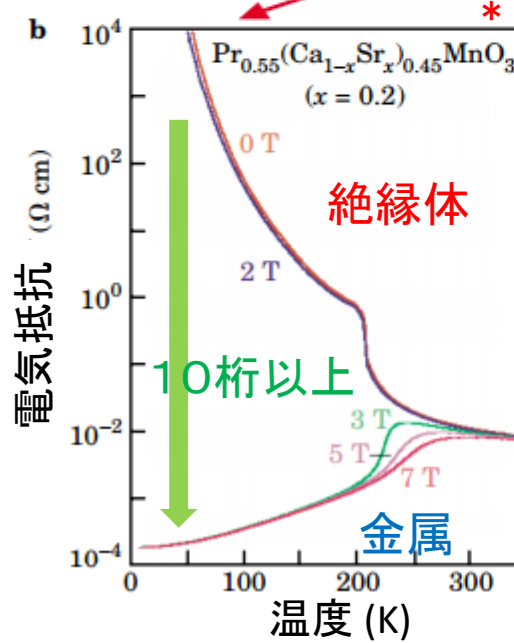
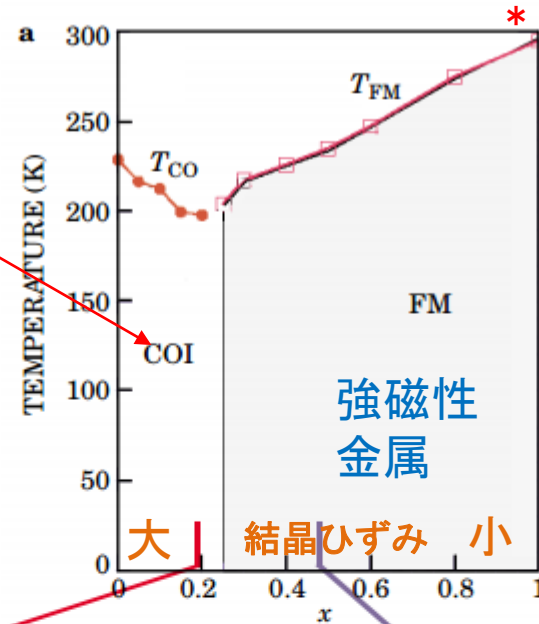
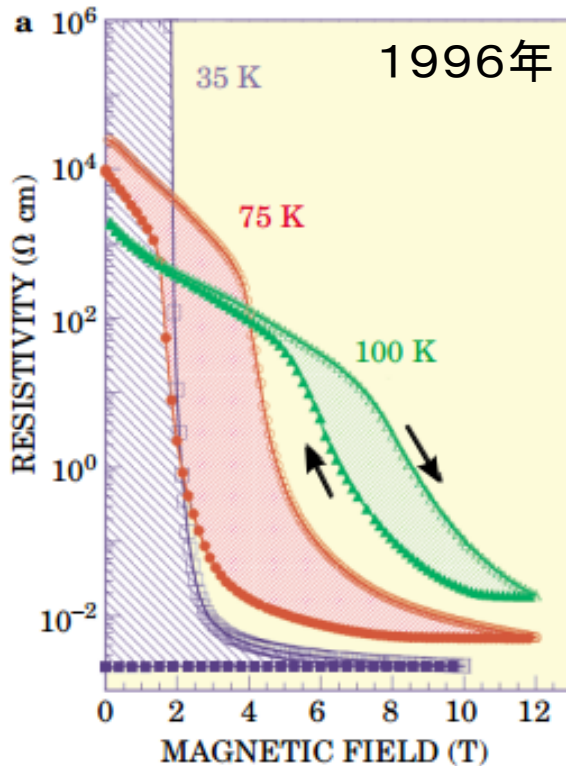


Image Credits:
Reproduced from
Yoshinori Tokura (2003)
Correlated-electron
physics in transition-metal
oxides, *Physics Today*,
vol.56(7):50-55, [graphs
on the right half] p.53
Fig.3 [center] p.52 Fig.2(c);
[left below] p.51, with the
permission of AIP
Publishing.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.1603080>

マンガン酸化物の巨大外場応答

超巨大磁気抵抗

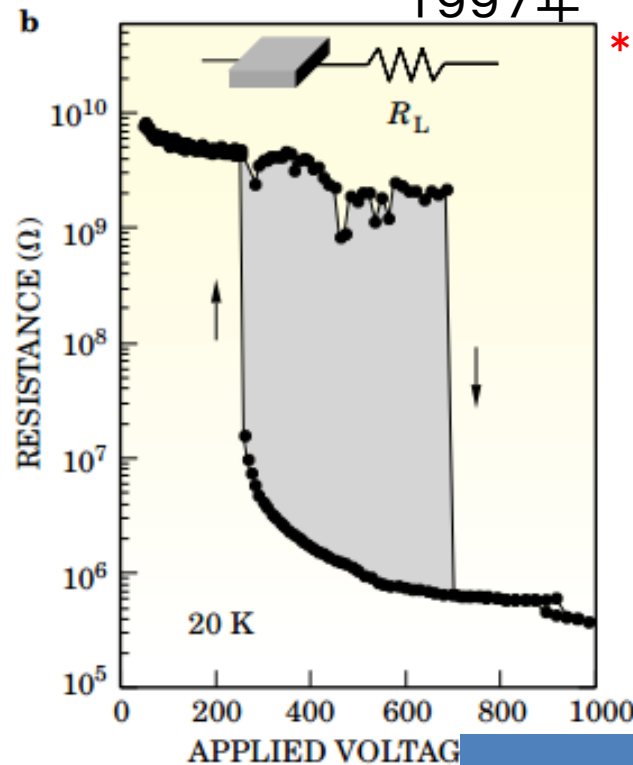
colossal magneto-resistance



電界誘起

巨大抵抗変化

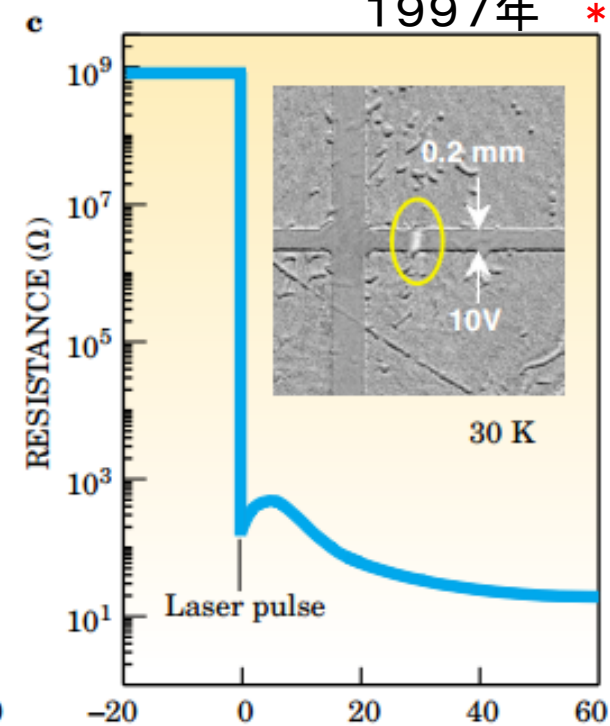
1997年



光誘起

巨大抵抗変化

1997年 *



2002年シャープ
PCMO薄膜を用いた
ReRAMを試作



*
十倉好紀教授提供

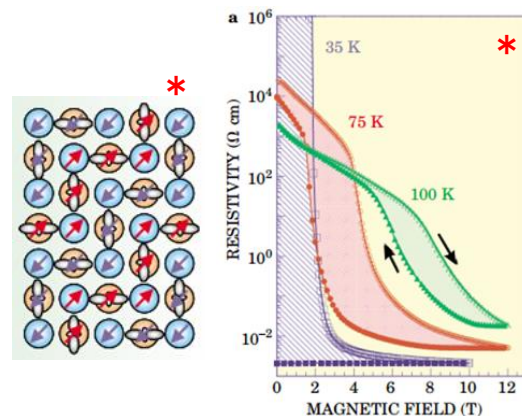
東大工・物理工学科
十倉好紀 教授
ノーベル物理学賞の候補に挙がる
「Mn酸化物の巨大応答と相制御」

Reproduced from Yoshinori Tokura (2003)
Correlated-electron physics in transition-metal
oxides, *Physics Today*, vol.56(7):50-55, p.54
Fig.4, with the permission of AIP Publishing.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.1603080>

強相関電子系の巨大外場応答, 相制御



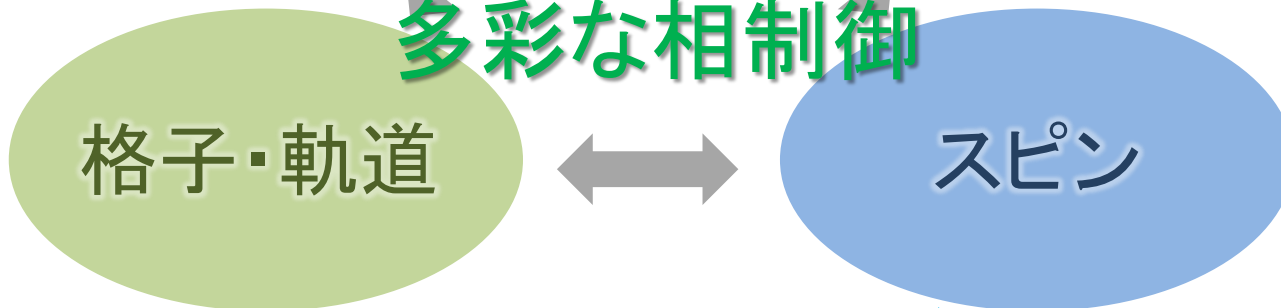
多様な外場応答



Reproduced from
Yoshinori Tokura
(2003) Correlated-
electron physics in
transition-metal
oxides, *Physics
Today*, vol.56(7):50-
55, p.52 Fig.2(d) and
p.54 Fig.4 (a), with
the permission of
AIP Publishing.
[http://dx.doi.org/10
.1063/1.1603080](http://dx.doi.org/10.1063/1.1603080)



多彩な相制御



構造変化

压力·歪

磁場

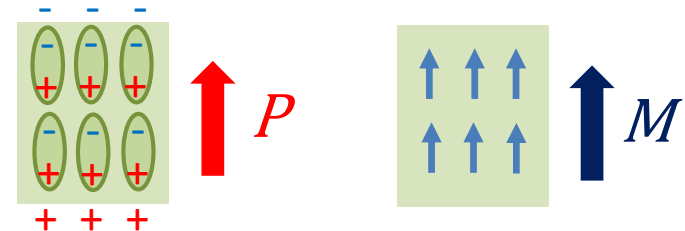
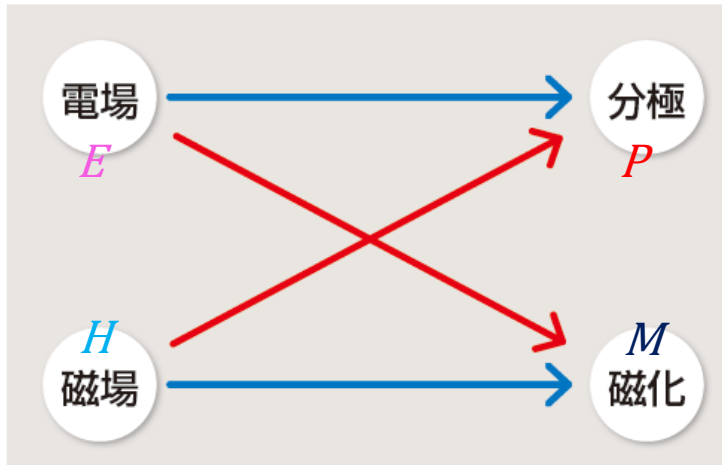
強磁性転移

多数の元素

多数の元素

周期表、ウィキペディア日本語版 **CC BY-SA 3.0**
<https://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%91%A8%E6%9C%9F%E8%A1%A8&oldid=61955163>

強相関絶縁体の交差相関：電気磁気効果



磁場で電気分極 P を
電場で磁化 M を作る

$$\begin{array}{l} M = \chi H \\ P = \varepsilon E \end{array} \rightarrow \begin{array}{l} M = \alpha E \\ P = \beta H \end{array}$$

ピエール・キュリーが提唱
1960年代に確認

磁場（大電流が必要）を使わずに磁化を制御できる材料
しかし、交差相関は一般に小さい

巨大な交差相関応答：マルチフェロイクス

2003年 東大物工 十倉グループ

multi 複数の + ferroic 強的 → 強磁性・強誘電

十倉好紀 教授

木村剛 博士（現阪大）

- スピン・軌道秩序を示す
モット絶縁体 TbMnO_3 に着目
- 強誘電転移を発見
 - 磁場で強誘電分極を制御

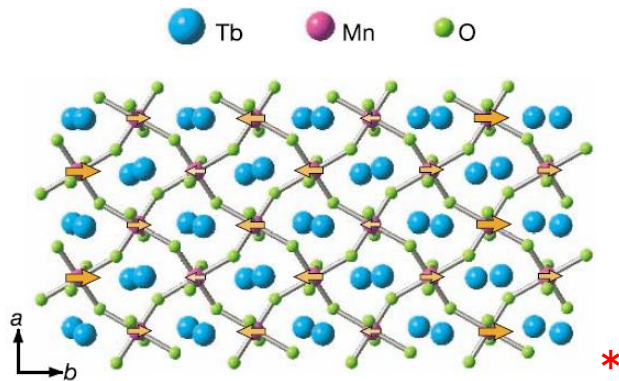
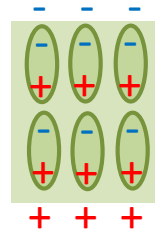


Image from: T. Kimura, K. Ishizaka et al. (2003) Magnetic control of ferroelectric polarization, *Nature* 426(6962):55-58, p.55 Fig1a
<http://www.nature.com/nature/journal/v426/n6962/full/nature02018.html>

NATURE 426, 55 (2003)

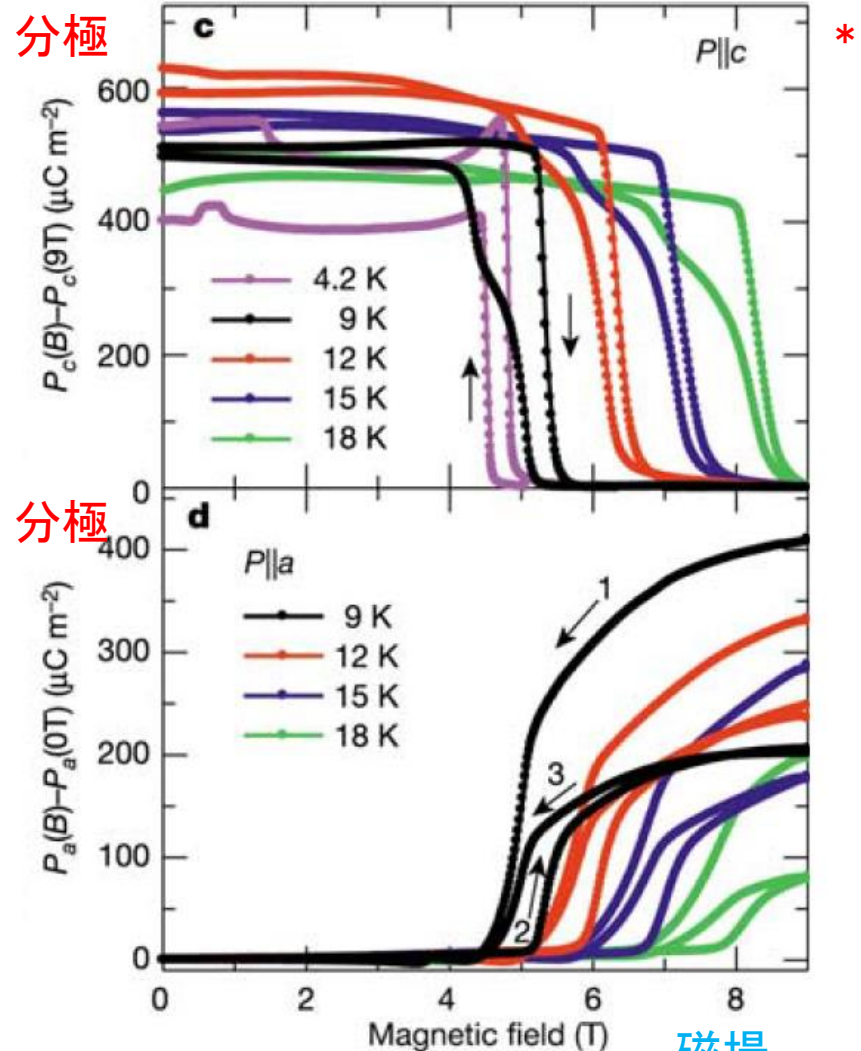
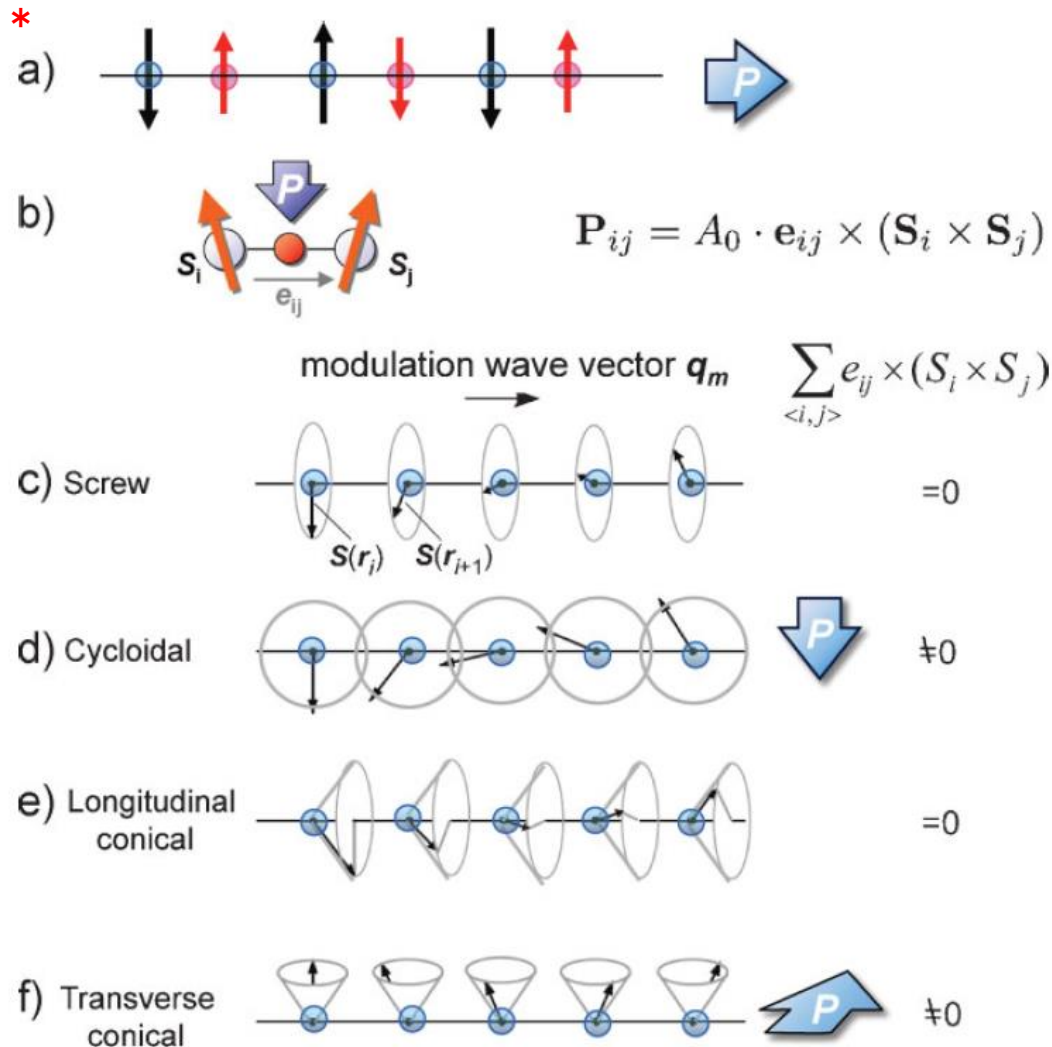


Image from: T. Kimura, K. Ishizaka et al. (2003) Magnetic control of ferroelectric polarization, *Nature* 426(6962):55-58, p.57 Fig3c, d
<http://www.nature.com/nature/journal/v426/n6962/full/nature02018.html>

マルチフェロイクスのメカニズム



2005－2007年
精力的な理論研究

様々なスピン構造
フェリ磁性
らせん型
サイクロイド型
円錐型

→電気分極を誘発

遷移金属酸化物の探索
Mn, Fe, Cr, Co, Cu,,,

マルチフェロイクスの進展

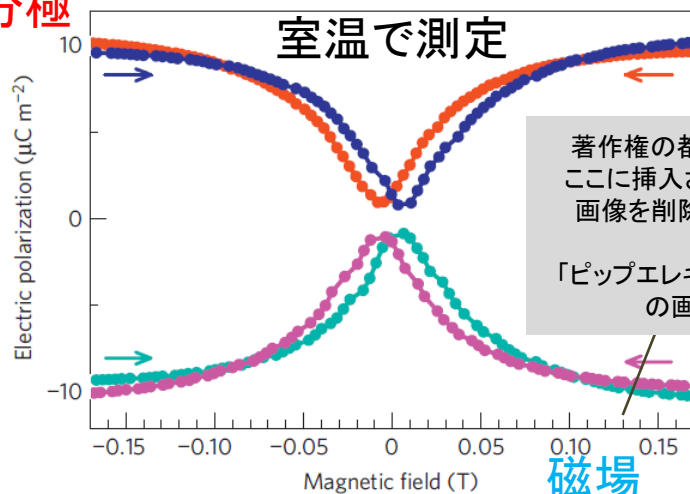
室温, 低磁場で強誘電制御

$\text{Sr}_3\text{Co}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 2010 阪大・木村G

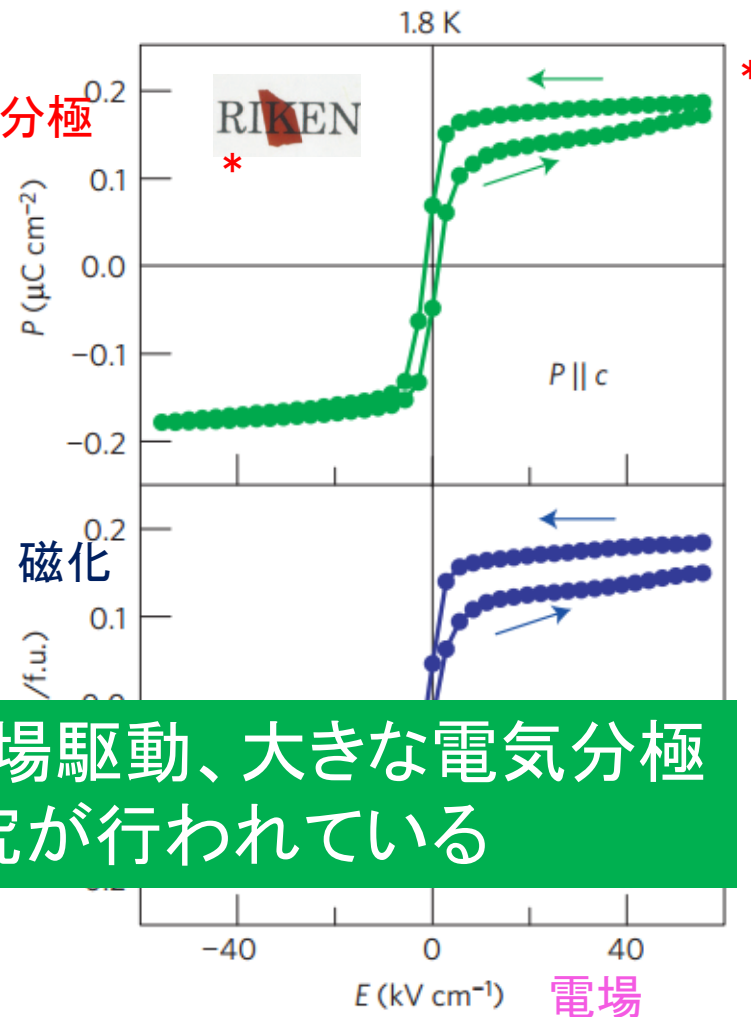
電場で磁化制御

$\text{Dy}_{0.70}\text{Tb}_{0.30}\text{FeO}_3$ 2012 東大理研・十倉G

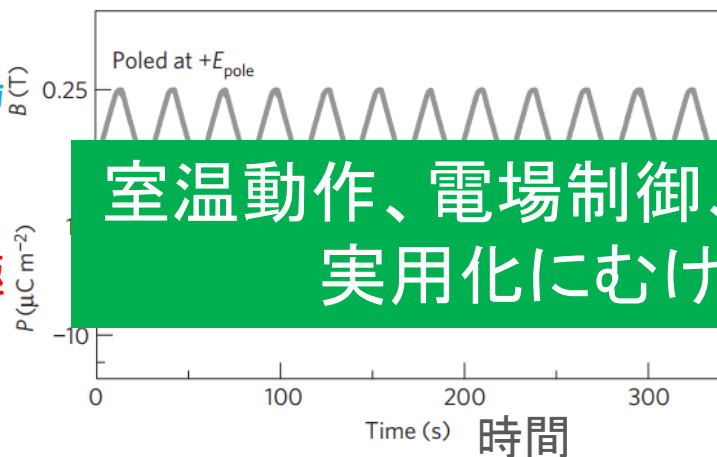
分極



分極



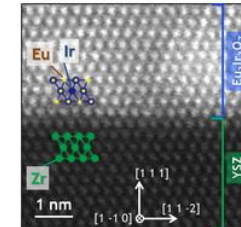
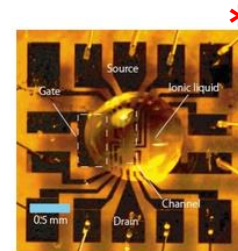
室温動作、電場制御、低磁場駆動、大きな電気分極
 実用化にむけて研究が行われている



強相関電子系 その他の最新の話題

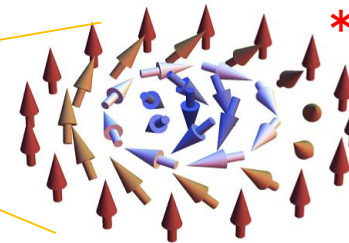
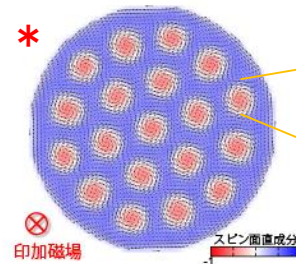
酸化物エレクトロニクス

Image from Ueno et al. 2011. Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Nature Nanotechnology, 6(7), 408-412, p.409 Fig.1(b), copyright 2011.



Adapted from:
Fujita et al.,
Scientific Reports 5,
9711(9711).
[doi:10.1038/sr9711](https://doi.org/10.1038/sr9711)
ep09711
CC BY 4.0

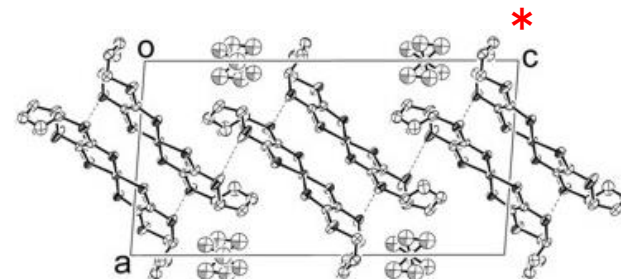
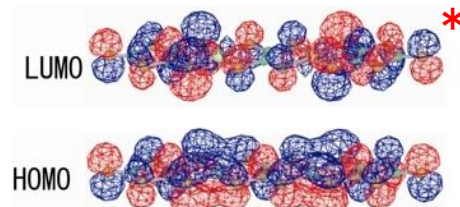
固体中に天然の微小な磁気粒子 “スカーミオン”



数10 ナノメートル

画像提供(左・右とも): 理化学研究所

有機導体でも強相関電子系



画像提供(左・右とも): 理化学研究所
加藤分子物性研究所

新原理の応用展開

多電子の太陽電池? 多くの自由度を使った熱電材料?

Break

outline

- 固体中の電子とバンド理論
- 強相関電子系
- ➡ • 超伝導
- トポロジカル絶縁体

超伝導

Wikipediaによると、

超伝導（ちょうでんどう、superconductivity）とは、特定の金属や化合物などの物質を非常に低い温度へ冷却したときに、**電気抵抗**が急激にゼロになる現象。**電気工学**分野では「**超電導**」と表記されることもある。**1911年**、オランダの物理学者**ヘイケ・カメルリング・オンネス**により発見された。この現象と同時に、**マイスナー効果**により外部からの**磁力線**が遮断されることから、電気抵抗の測定によらなくとも、超伝導状態が判別できる。この現象が現れるときの温度は超伝導**転移温度**と呼ばれ、この温度を室温程度に上昇させること（**室温超伝導**）は、現代物理学の重要な研究目標の一つ。

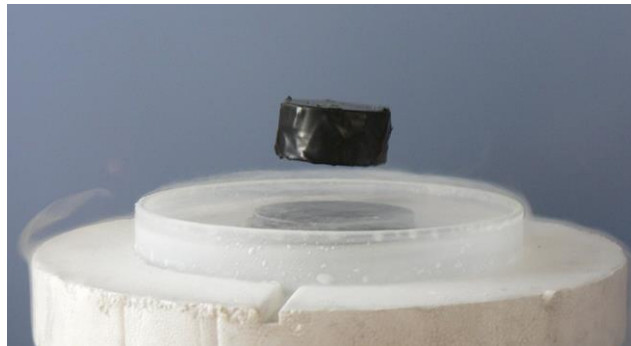


Image by Mai-Linh Doan, from Wikimedia Commons [CC BY SA 3.0](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Meissner_effect_p1390048.jpg)
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Meissner_effect_p1390048.jpg

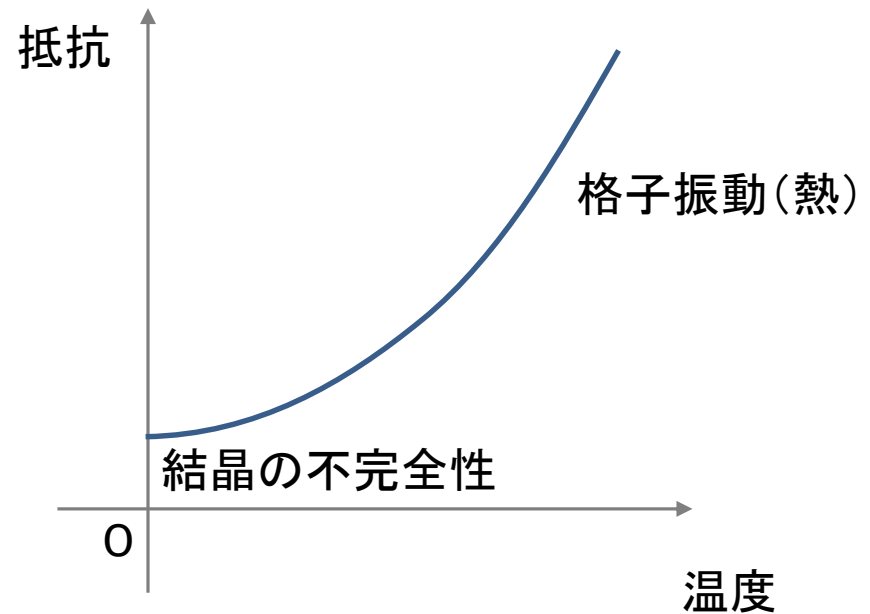
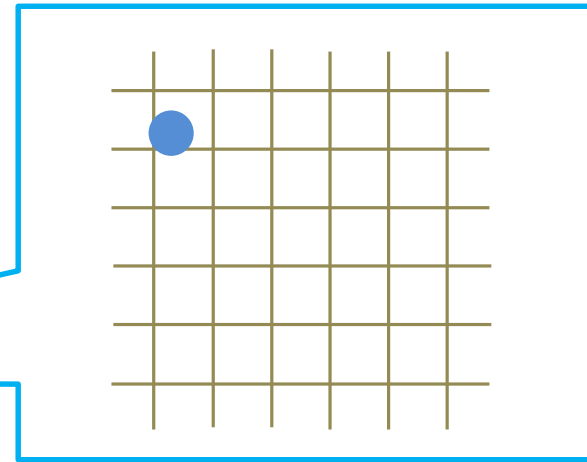
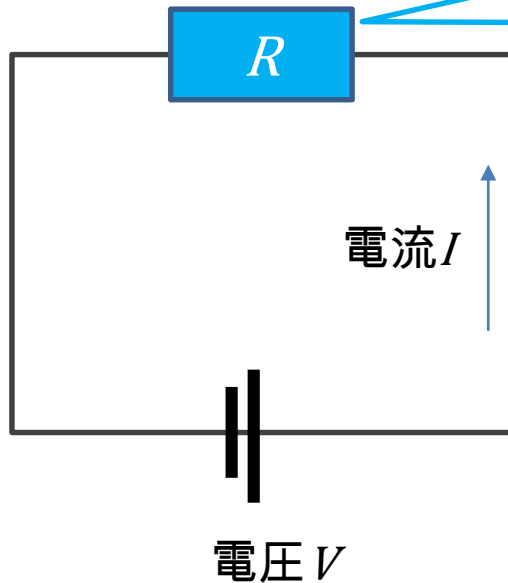
超伝導

- 超伝導とは？ゼロ抵抗、マイスナー効果
- 超伝導のメカニズム
 - BCS理論と電子格子相互作用
- 銅酸化物高温超伝導体
- 新しい超伝導体の探索 室温超伝導へ
- 超伝導の実用技術と現状

「普通の金属」の電気抵抗

オームの法則 $V = IR$

ジュール熱 $W = IR^2$



金属の抵抗は低温にすると
小さくなるが、有限に残る

超伝導(ゼロ抵抗)の発見

1911年 カマリンオネスが水銀で発見

背景

1908年にヘリウムの液化に成功 絶対温度4 K (-269°C)

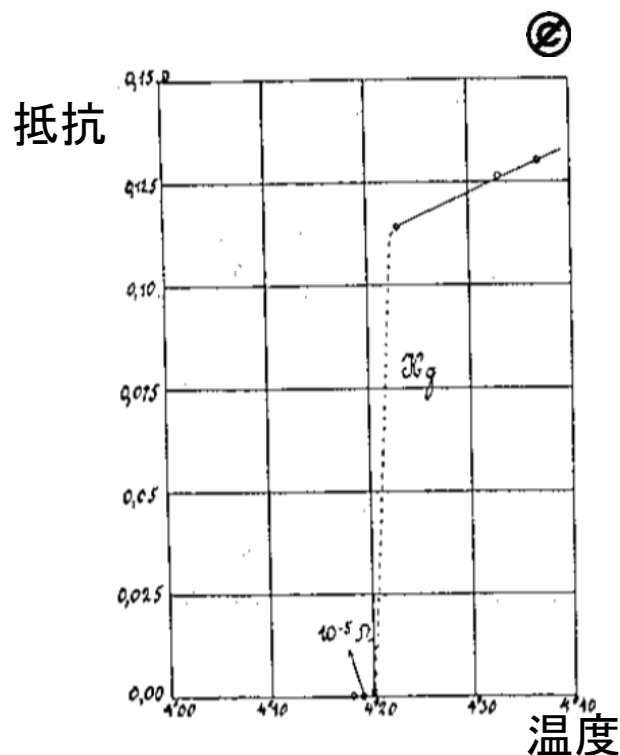
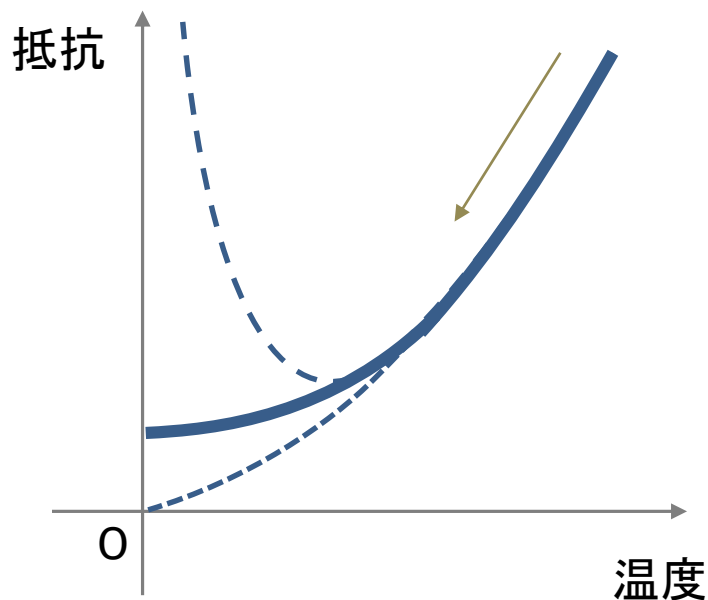
「金属は低温極限でどうふるまうか??」を実験



©

1913年ノーベル物理学賞

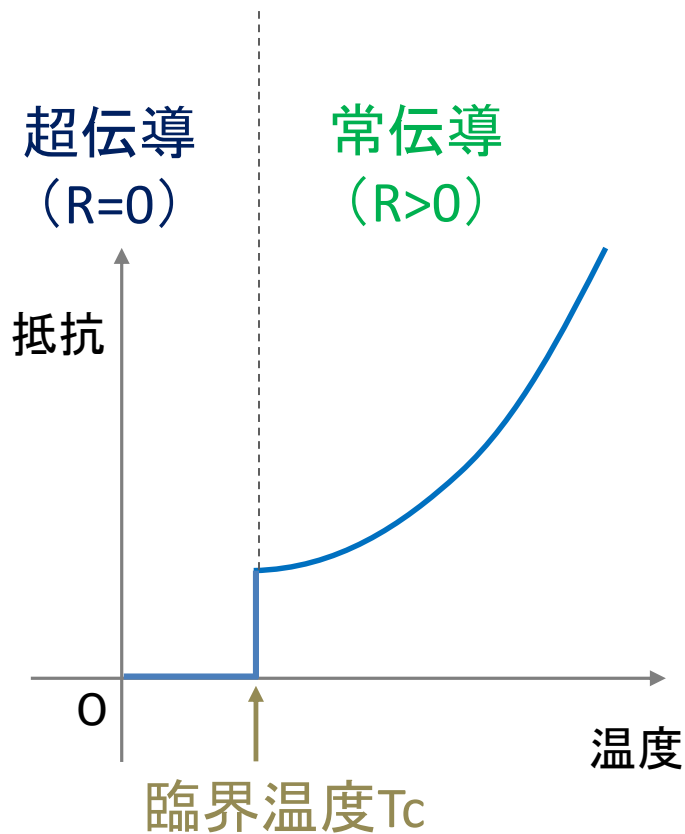
当時の論争は主に2派



Hgは
「金属」から
別の何かに
相転移

ゼロ抵抗
「超伝導」

ゼロ抵抗： 損失(ジュール熱)ゼロ



$$T < T_c \text{ で } R = 0 \rightarrow V = IR = 0$$

$$I \neq 0 \text{ でも } V = 0$$

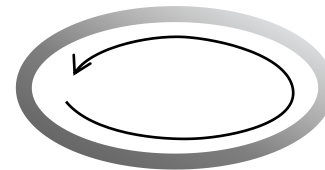
電圧をかけなくても電流が流れる

$$\text{ジュール熱 } W = I^2 R = 0$$

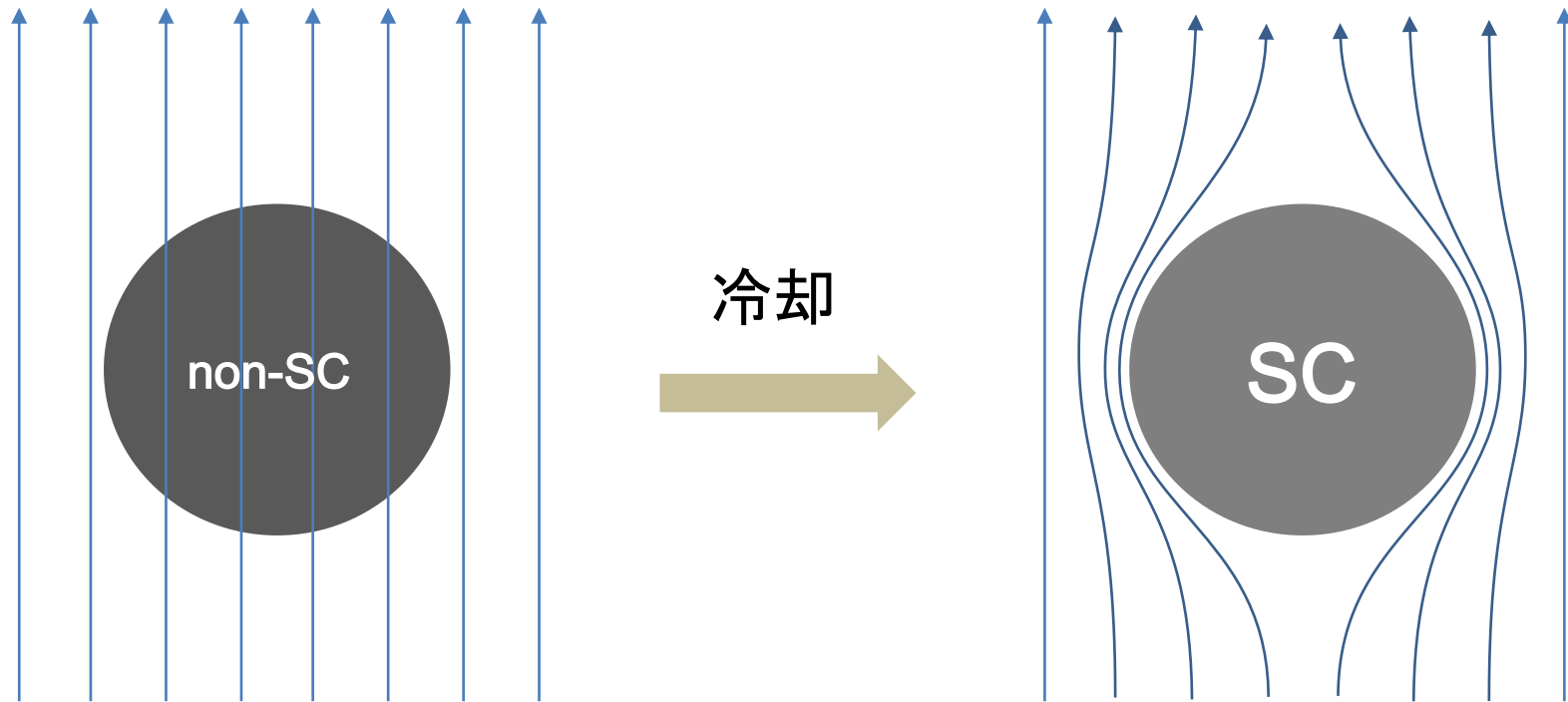
電流を流してもジュール熱発生しない

エネルギー損失がゼロ

永久電流



マイスナー効果(完全反磁性)



超伝導体は磁場をはじく。中身では磁束密度 $B=0$
すなわち自分で反対向きの磁場を発生して打ち消している
→ 完全反磁性 (perfect diamagnetism) “超伝導の証”

余談：新規超伝導体を見つけたら

ゼロ抵抗、マイスナー効果(磁化率)、結晶構造(X線回折) の
3点セットをそろえないと信頼されない

例) 2008年東工大細野グループによる鉄系超伝導体 ($T_c=26\text{K}$) 発見の論文
Kamihara et al, J. AM. CHEM. SOC. 130, 3296-3297 (2008)

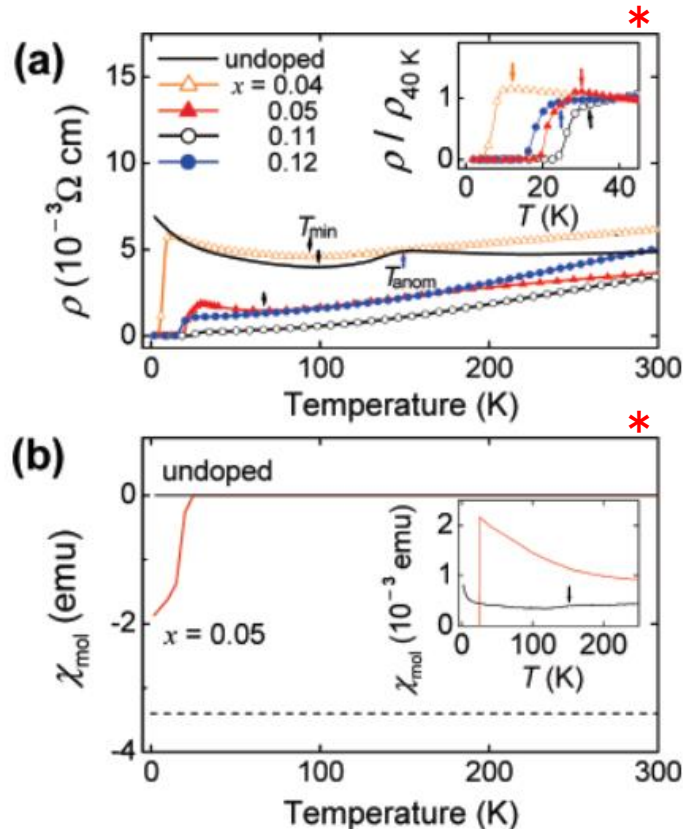
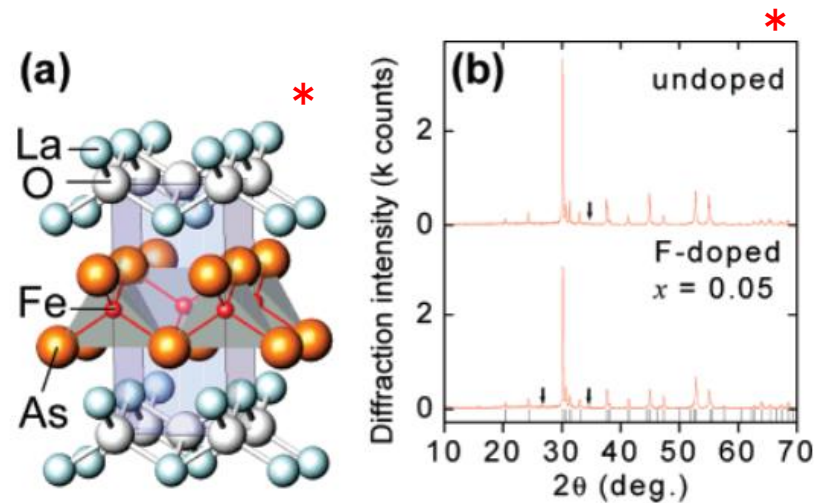


Image credits: Reprinted with permission from Kamihara et al. (2008) Iron-Based Layered Superconductor $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ ($x=0.05\text{--}0.12$) with $T_c=26\text{K}$, *Journal of the American Chemical Society* 130(11):3296-3297, [left] p.3297 Fig.2(a, b) and [right] p.3296 Fig.1(a, b). Copyright 2008 American Chemical Society.

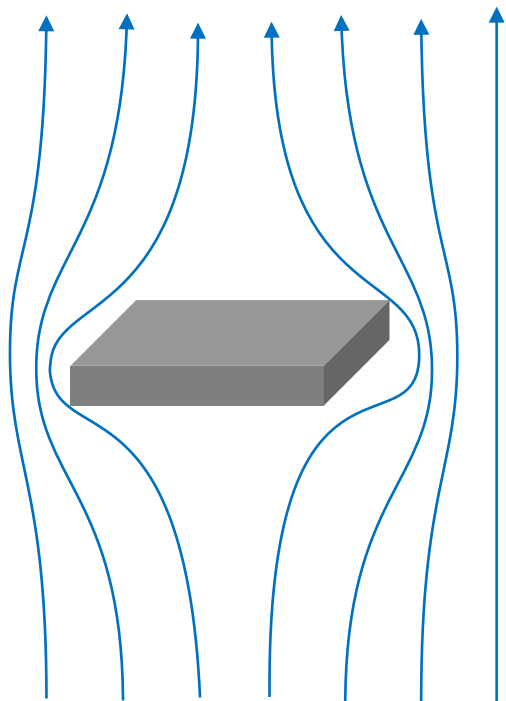


加えて、他グループによる速やかな
追試と再現が重要。

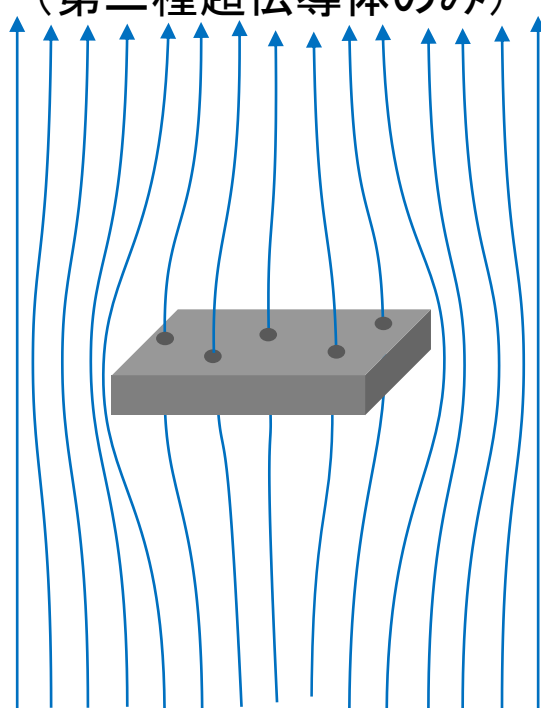
cf “Unidentified Superconducting Object (USO)”

超伝導体にかかる磁場を強くすると、

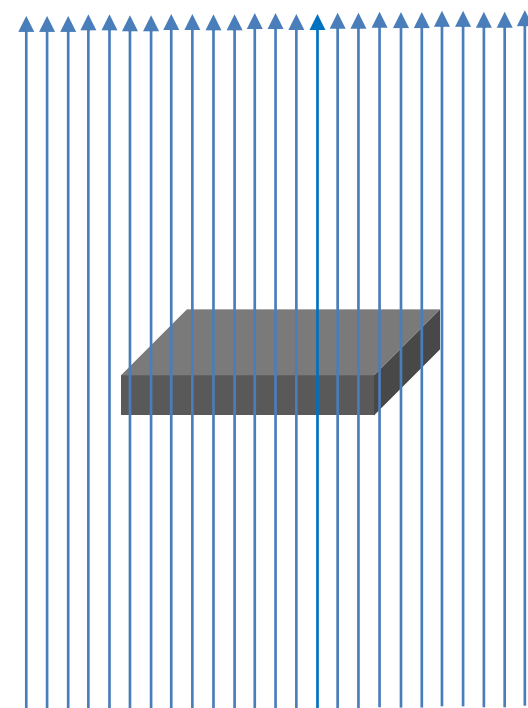
完全反磁性



磁束の侵入
(第二種超伝導体のみ)



超伝導の破壊



第二種超伝導体では磁場と超伝導が共存可能
→ 安定な磁気浮上

超伝導が壊れる磁場 = 臨界磁場 H_c
超伝導が壊れる電流 = 臨界電流 j_c



超伝導の微視的理論: BCS理論

1911 Hg 超伝導

1920's バンド理論の確立→説明できない

1957 Bardeen, Cooper, Schrieffer

革新的な発想と論理展開

- 電子と電子に働く力は、固体中では引力になりうる
- 2個の伝導電子を考えたとき、引力があれば必ず対を組んだ束縛状態を作る「クーパー対」

Credit: AIP
Emilio Segre
Visual Archives,
Physics Today
Collection, Gift
of Sir Brian
Pippard



1972年ノーベル賞受賞

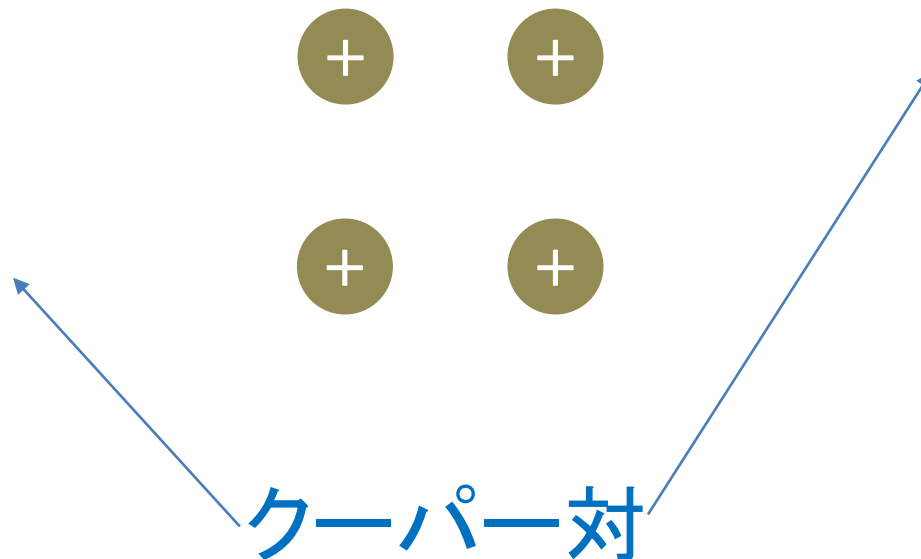
電子間に引力がはたらく仕組み

電子格子相互作用 電子(-)と原子核(+)の引力

電子の動きが格子振動を引き起こす

格子振動は電子の動きを変える

原子核の動きは電子に比べて非常に遅い



超伝導の微視的理論: BCS理論

1957 Bardeen, Cooper, Schrieffer

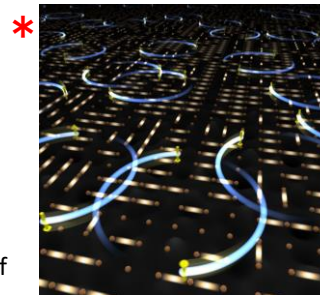
革新的な発想と論理展開

- 電子と電子に働く力は、固体中では引力になりうる
「電子格子相互作用」
- 2個の伝導電子を考えたとき、引力があれば必ず対を組んだ束縛状態を作る「クーパー対」
- 全ての伝導電子がクーパー対を組み、全体で位相が揃った多体の波動関数を形成する

「巨視的コヒーレント状態」

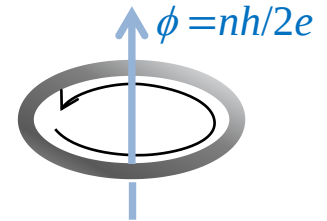
Credits: [left] © Yuhki Kohsaka, RIKEN and Cornell University [right] Image by Julien Bobroff and Frederic Bouquet (LPS, Orsay, France), from Wikimedia Commons https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stable_Levitation_of_a_magnet_on_a_superconductor.jpg

Credit: AIP
Emilio Segre
Visual Archives,
Physics Today
Collection, Gift
of Sir Brian
Pippard



巨視的位相 → 巨視的量子効果

超伝導でリングを作ると、貫く磁束は量子化される



2個の超伝導体を接触させると、位相の差の分だけ電流が流れる
「ジョセフソン効果」 1962年に提唱、すぐに実証

超伝導量子干渉デバイス (SQUID)

超精密磁気測定

地磁気の10億分の1

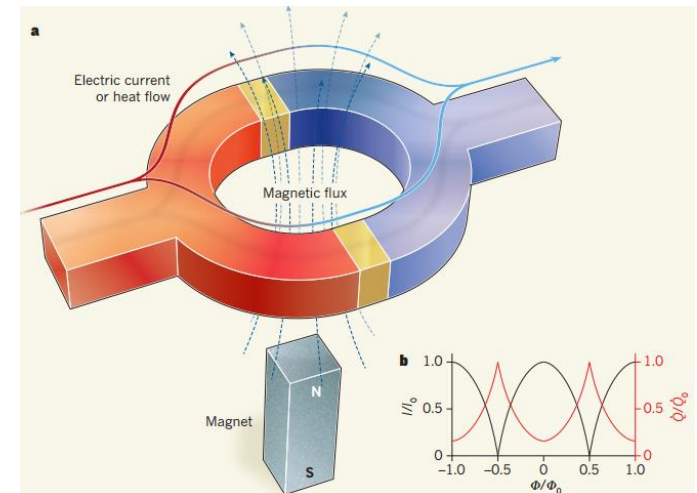
地磁気: 0.045 mT

脳磁計、心磁計

Credit: National
Institute of Mental
Health, National
Institutes of Health,
Department of
Health and Human
Services



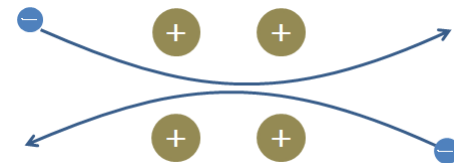
超伝導固有の原理による機能



* Image from Simmonds 2012. Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: *Nature* 492(7429), 358–359, p.358 Fig.1, copyright 2012

BCS理論で得られる超伝導臨界温度

$$k_B T_c = 1.1 \hbar \omega_D \exp \left(- \frac{1}{V N(E_F)} \right)$$



- ① ω_D 格子振動数 $\propto \sqrt{1/M}$ (原子の重さ)
軽い元素が望ましい
- ② V 電子格子相互作用
大きいほうがよいが、大きすぎると構造変形し絶縁化
- ③ $N(E_F)$ 電子の状態密度
大きいほうがよいが、大きすぎると不安定

全てを大きくするには限度がある
理論家による予想 $T_c = 30 - 40$ K 「BCSの壁」

単元素超伝導体の特性

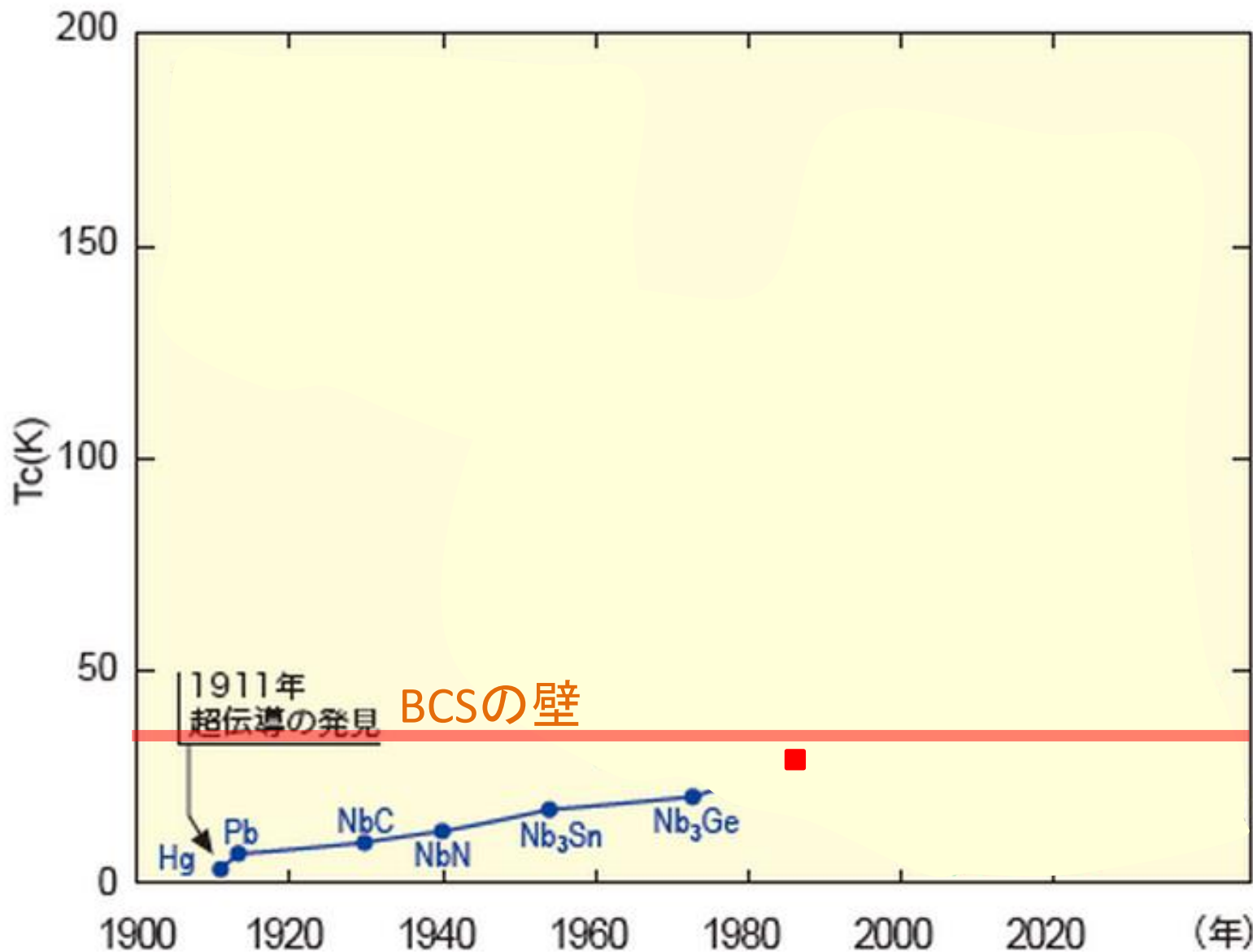
H																	He
Li 0.0004 14	Be 0.026 10.6											B 11	C	N	O 0.6	F	Ne
Na	Mg 0.0005 5.5											Al 1.18 5.7	Si 8.2 7.5	P 13 9.4	S 17.3 5	Cl	Ar
K	Ca 25	Sc 19.6	Ti 0.4 3.35	V 5.4 16.5 6.02	Cr 1.5	Mn	Fe 2.1	Co	Ni	Cu	Zn 0.85 1.9	Ga 1.08 7 8.5	Ge 5.35 5.1	As 2.4 6	Se 8 7.1	Br 1.4	Kr
Rb	Sr 7 3.8	Y 19.5	Zr 0.61 11	Nb 9.25 9.9 10.1	Mo 0.92 8.7	Tc 7.9	Ru 0.49	Rh 0.0003	Pd	Ag	Cd 0.52 0.91	In 3.41 7	Sn 3.72 5.3 7.5	Sb 3.9 8.8	Te 7.5 4.4	I 1.2	Xe
Cs 1.3	Ba 5 3	La 6.1(α) 13 6.74	Hf 0.13 8.6	Ta 4.47 4.5 4.51	W 1.5 4.55	Re 1.7 7	Os 0.66	Ir 0.11	Pt	Au	Hg 4.15	Tl 2.38 3.15	Pb 7.2 7.5	Bi 8.5 12.3	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac															
			Ce 1.7	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu 2.75	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu 1 12.4	
			Th 1.38	Pa 1.4	U 0.8(β) 2.4(α)	Np	Pu	Am 1 2.2	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

V	元素記号
5.4	常圧下での T_c (K)
16.5	圧力下での T_c (K)
6.02	薄膜の T_c (K)

元素超伝導体の特性

元素	価電子数	結晶系	T_c (K)	臨界磁場(mT)	ω_D デ바이温度(K)	$N(E_F)$ γ (mJ / mol K ²)
La	3	立方晶(面心)	6.1	110	140	9.8
Ti	4	六方晶	0.4	5.6	415	3.3
Nb	5	立方晶(体心)	9.25	20	276	7.8
Mo	6	立方晶(体心)	0.92	9	460	1.83
Tc	7	六方晶	7.9	141	411	6.28
Ru	8	立方晶(体心)	0.49	6.9	580	2.8
Ir	9	立方晶(面心)	0.11	1.6	425	3.2
Hg	12	三方晶	4.15	41.1	88	1.81
In	3	正方晶(体心)	3.41	28.2	108	1.67
Pb	4	立方晶(面心)	7.20	80.3	96	3.1

新規超伝導体の開発と臨界温度の変遷



*
画像提供:
科学技術
振興機構(JST)
(一部改変)

Possible high T_c superconductivity in the Ba–La–Cu–O system

J. G. Bednorz and K. A. Müller

Z. Phys. B Cond. Matt. 64, 189 (1986)



著作権の都合により
ここに挿入されていた
画像を削除しました

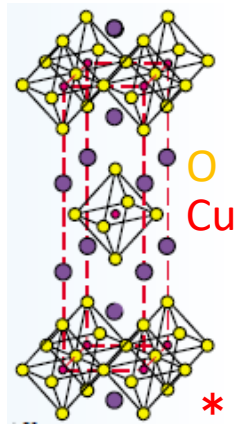
J. G. Bednorz and K. A. Müller (1986)
Possible high T_c superconductivity in the
Ba–La–Cu–O system, *Zeitschrift für Physik B*
- *Condensed Matter* 164(2):189-193, p.190

Fig.1 “Temperature dependence of
resistivity in $\text{Ba}_x\text{La}_{5-x}\text{Cu}_5\text{O}_{5(3-y)}$...”

“The characterization of the new, apparently superconducting, phase is in progress. An identification of that phase may allow growing of single crystals for studying the Meissner effect, and collecting specific-heat data to prove the presence of high T_c bulk superconductivity.” (Bednorz and Müller 1986, p.192)

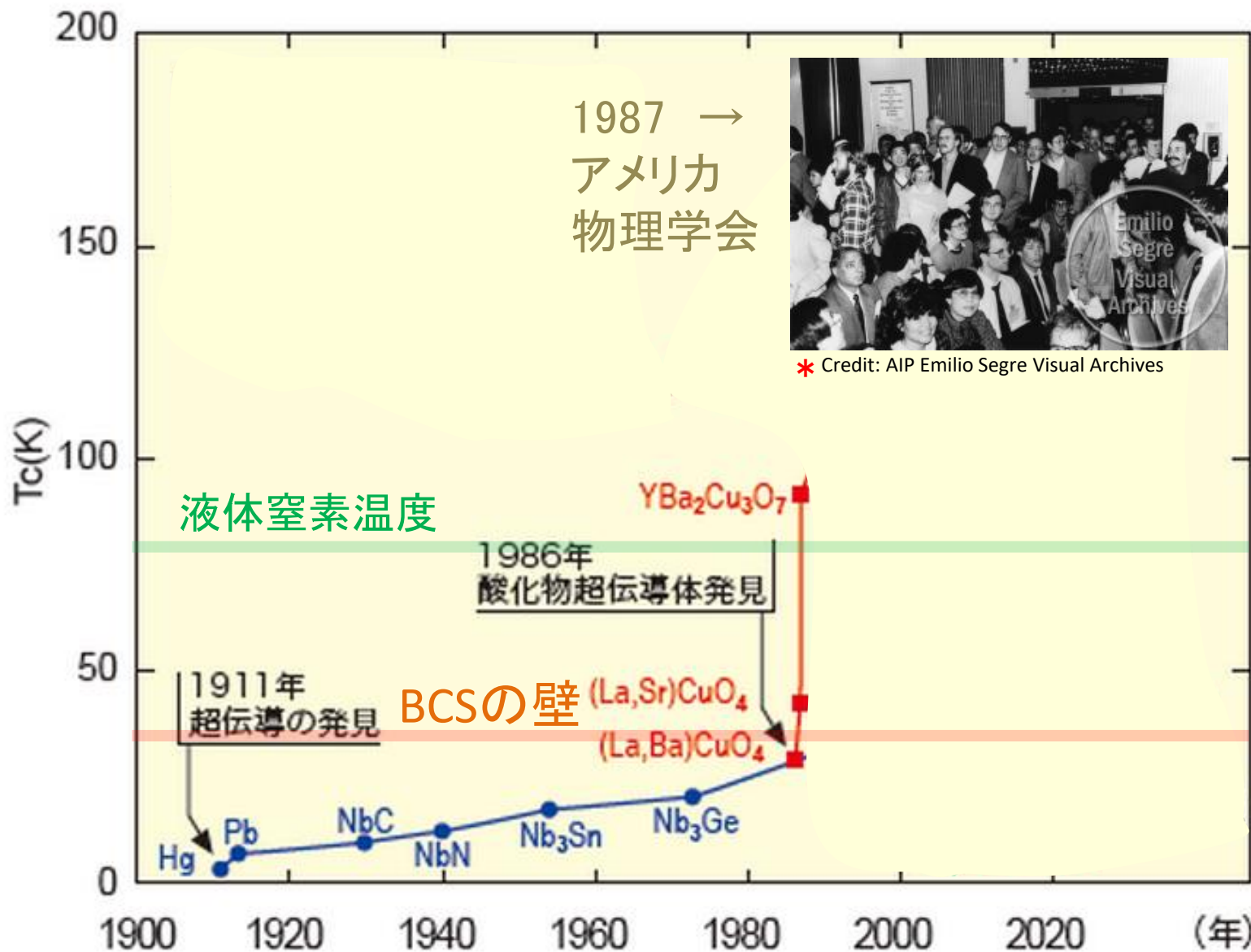
東大 田中研 すぐに追試
結晶構造、組成の確認

$\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_{4-y}$
→全世界で一斉に
層状銅酸化物の探索



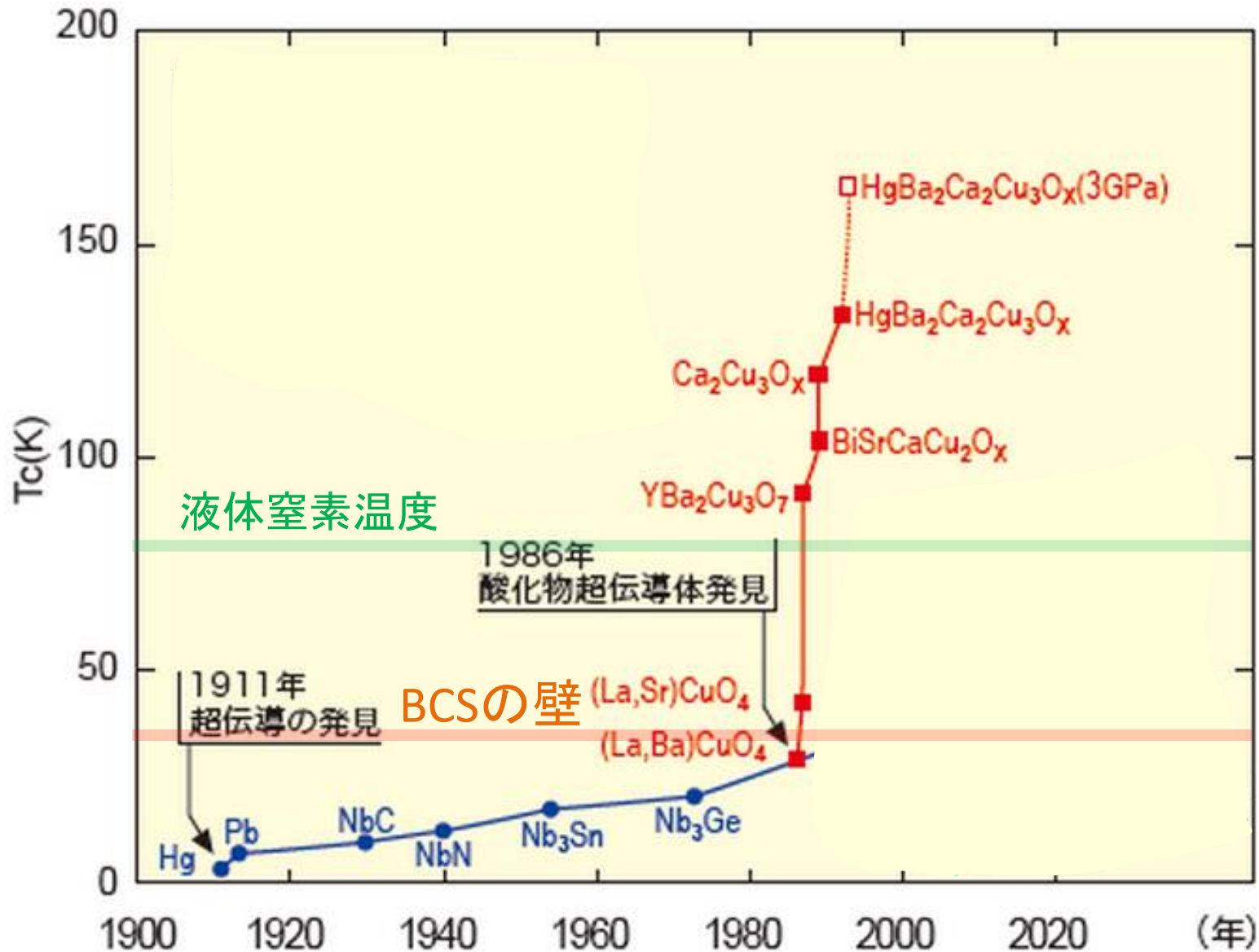
Reproduced from Yoshinori Tokura (2003) Correlated-electron physics in transition-metal oxides, *Physics Today*, vol.56(7):50-55, p.52
Fig.2(a), with the permission of AIP Publishing.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.1603080>

新規超伝導体の開発と臨界温度の変遷



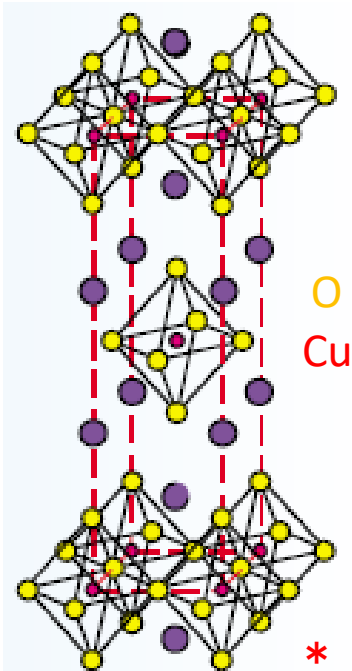
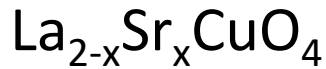
*
画像提供：
科学技術
振興機構(JST)
(一部のみ転載)

新規超伝導体の開発と臨界温度の変遷

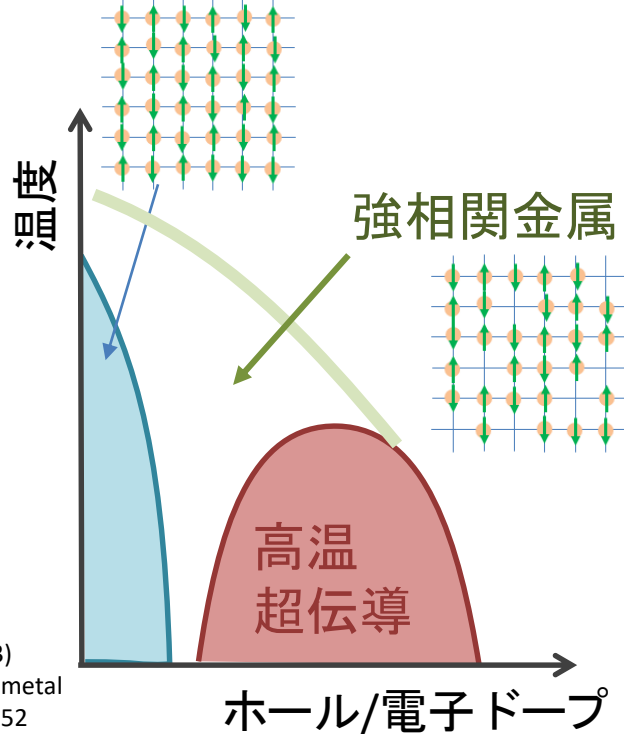


*
画像提供:
科学技術
振興機構(JST)
(一部のみ転載)

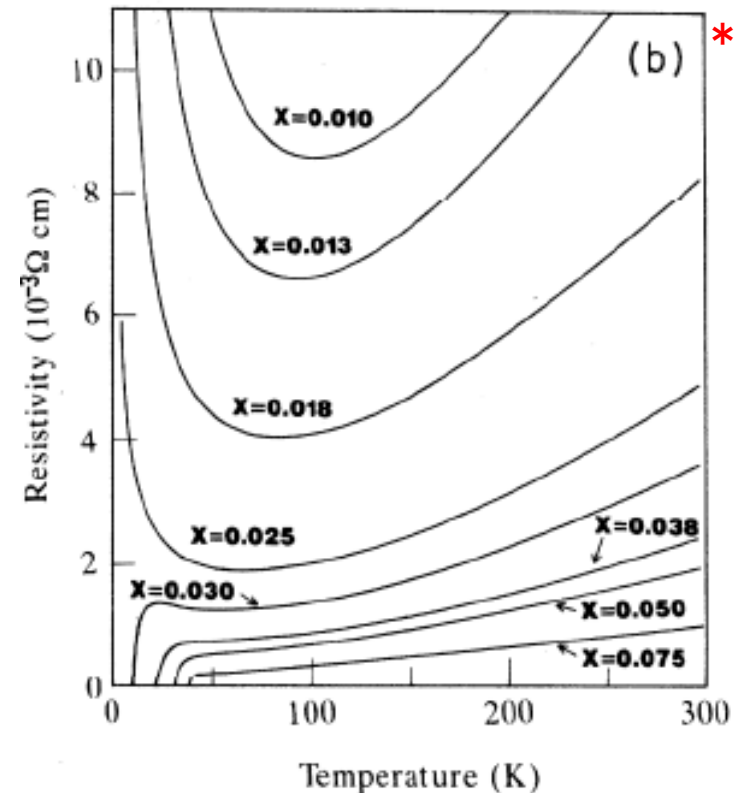
銅酸化物高温超伝導体に共通の物性



モット絶縁体
(反強磁性)



H. Takagi *et al.*, Phys. Rev. B40 (1989) 2254.



Reproduced from Yoshinori Tokura (2003)
Correlated-electron physics in transition-metal
oxides, *Physics Today*, vol.56(7):50-55, p.52
Fig.2(a), with the permission of AIP Publishing.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.1603080>

Reprinted figure with permission
from Takagi *et al.*, *Physical Review B*
40(4), 2254-2261, 1989. Copyright
1989 by the American Physical
Society.
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.40.2254>

- ・2次元的な CuO_2 面が重要
- ・ドロドロの強相関金属で高温超伝導が出現
反強磁性スピン揺らぎ？不均一な電荷揺らぎ？
- ・30年経つても、メカニズムはいまだ不明

「一般化された」BCS理論

$$k_B T_c \approx E_0 \exp \left(-\frac{1}{\lambda - \mu^*} \right)$$

- ① E_0 「のり(引力)」の特徴的なエネルギー

格子振動以外に、スピン揺らぎ,電荷揺らぎ,軌道揺らぎ？

- ② λ 電子と「のり」の相互作用の大きさ

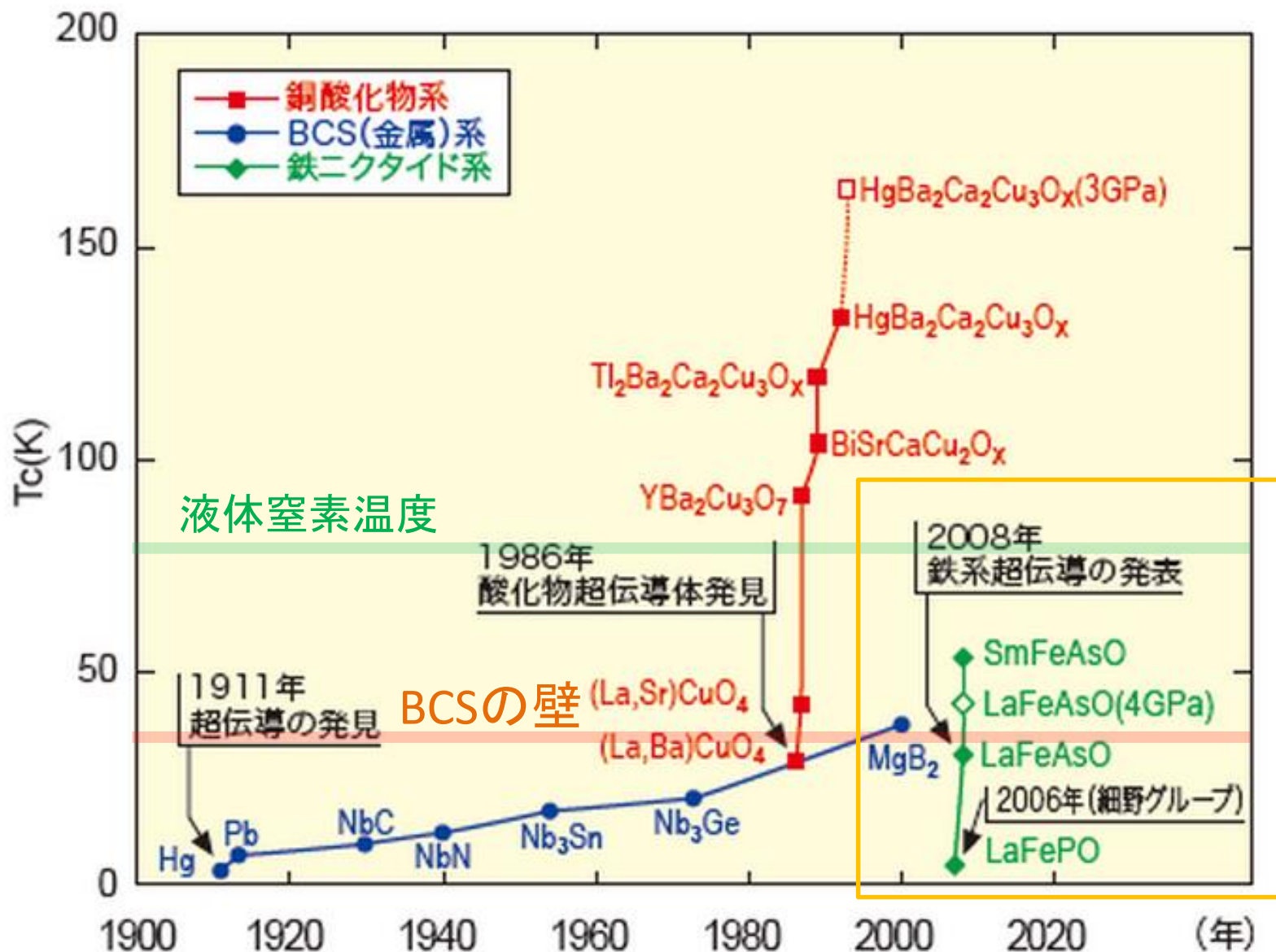
理論で見積もるのは難しい(実験でも難)

- ③ μ^* 電子間の斥力の大きさ

理論的にもよくわからない経験的なパラメータ

「のり」の正体の解明、新しい「のり」の探索

新規超伝導体の開発と臨界温度の変遷

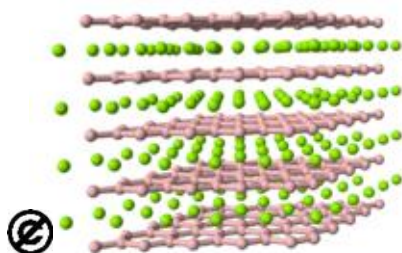


*
画像提供:
科学技術
振興機構(JST)
(一部加筆)

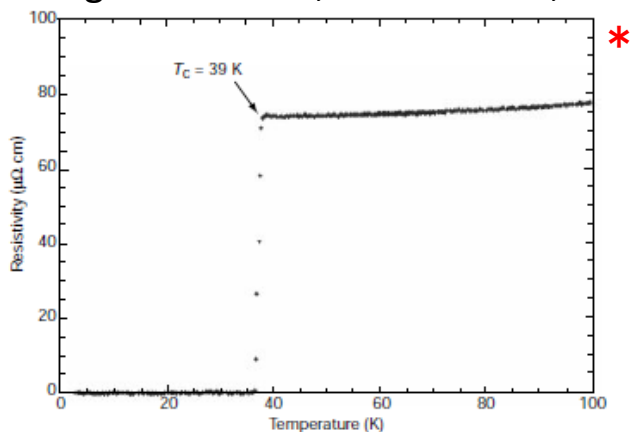
軽い元素(B, C)を使った超伝導体

MgB₂ T_c=39 K 2001年

青山学院大 秋光純 教授
(現 岡山大学)



J. Nagamatsu et al, NATURE 410, 63 (2001)



金属間化合物では最高T_c
実は市販試薬

Image from Nagamatsu et al. 2001. Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: *Nature*, 410(6824), 63-64, p.64 Fig.4, copyright 2001.

フラーレンC₆₀ T_c=33K (高压下38K)

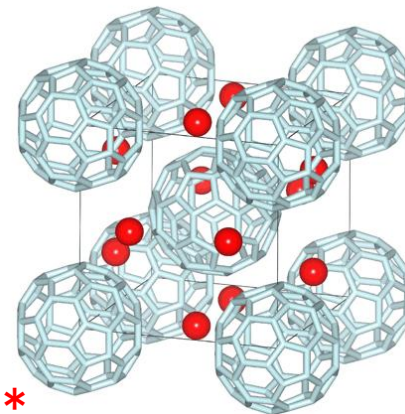
1991年発見

18 K → 33 K (常圧)

2008年

38 K (高压)

非BCSである可能性も



*
提供: 理化学研究所

ダイヤモンド (2004)

B(ホウ素)ドーピングにより T_c = 14 K

グラファイト(1990)

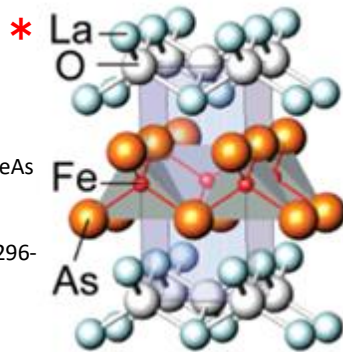
Caのインターカレーションにより
最高 T_c = 11 K (高压下15 K)

鉄ニクタイド超伝導体(2008年～)

2008年

東工大 細野秀雄 研究室

Reprinted with permission
from Kamihara et al. (2008)
Iron-Based Layered
Superconductor $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$
($x=0.05-0.12$) with $T_c=26\text{ K}$,
*Journal of the American
Chemical Society* 130(11):3296-
3297, p.3296 Fig.1(a).
Copyright 2008 American
Chemical Society.

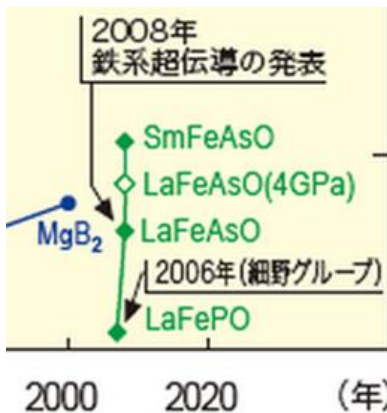


LaFeAsO 26 K

J. AM. CHEM. SOC. 130, 3296 (2008)

「鉄で超伝導は意外」

SmFeAsO 58 K



*
画像提供:
科学技術
振興機構(JST)
(一部のみ転載)

様々な鉄系超伝導体に共通の相図

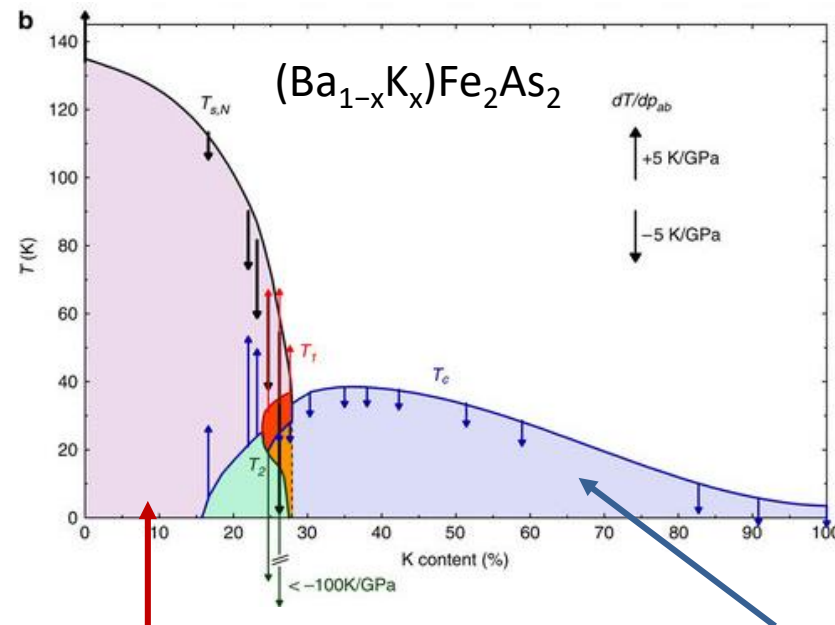


Image from Böhrer
et al. (2015)
Superconductivity-
induced re-entrance
of the orthorhombic
distortion in
 $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ *Nat.*
Commun. 6:7911, p.5
Fig.3(b).

<http://dx.doi.org/10.1038/ncomms8911>

©2015 Macmillan
Publishers Limited
CC BY 4.0

ドーブ
圧力etc

反強磁性金属(軌道秩序)→超伝導

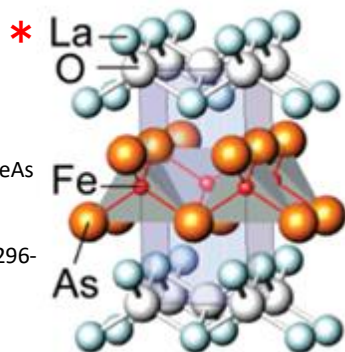
スピン揺らぎ、軌道揺らぎが「のり」?
理論・実験で盛んに研究進行中

鉄ニクタイド超伝導体(2008年～)

2008年

東工大 細野秀雄 研究室

Reprinted with permission
from Kamihara et al. (2008)
Iron-Based Layered
Superconductor $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$
($x=0.05-0.12$) with $T_c=26$ K,
*Journal of the American
Chemical Society* 130(11):3296-
3297, p.3296 Fig.1(a).
Copyright 2008 American
Chemical Society.

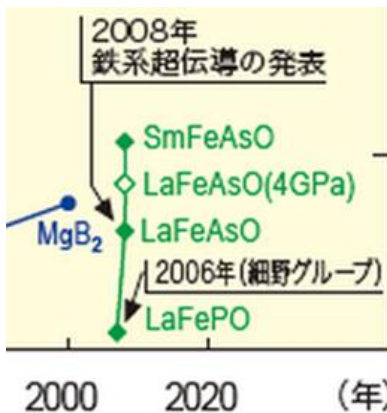


LaFeAsO 26 K

J. AM. CHEM. SOC. 130, 3296 (2008)

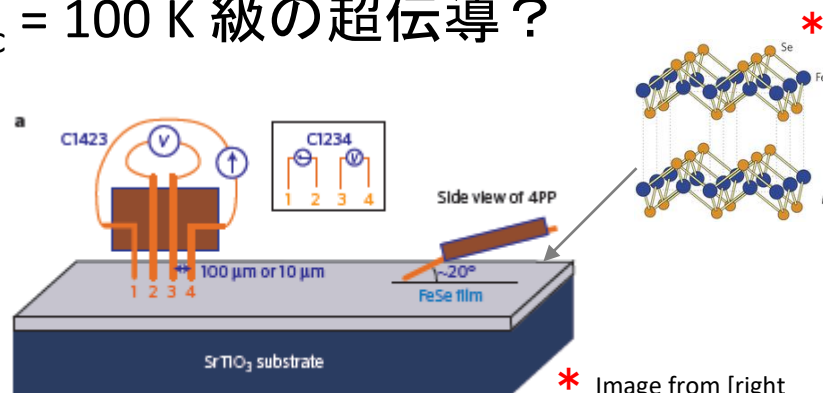
「鉄で超伝導は意外」

SmFeAsO 58 K

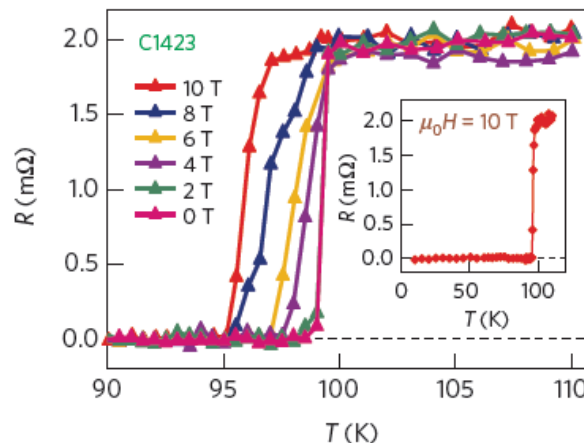


*
画像提供:
科学技術
振興機構(JST)
(一部のみ転載)

FeSe を一層だけ SrTiO_3 基板に積層
 $T_c = 100$ K 級の超伝導？



* Image from [right above] Baek et al. 2015 and [left above and below] Ge et al. 2015. Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: [right above] *Nature Materials* 14(2), 210-214, p.211 Fig.1(a), copyright 2015; [left above] *Nature Materials* 14(3), 285-289, p.286 Fig.2(a), copyright 2015; [left below] *ibid.*, p.287 Fig.4(a)

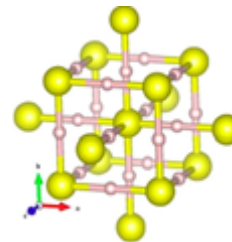
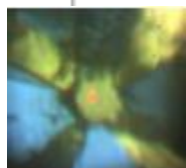
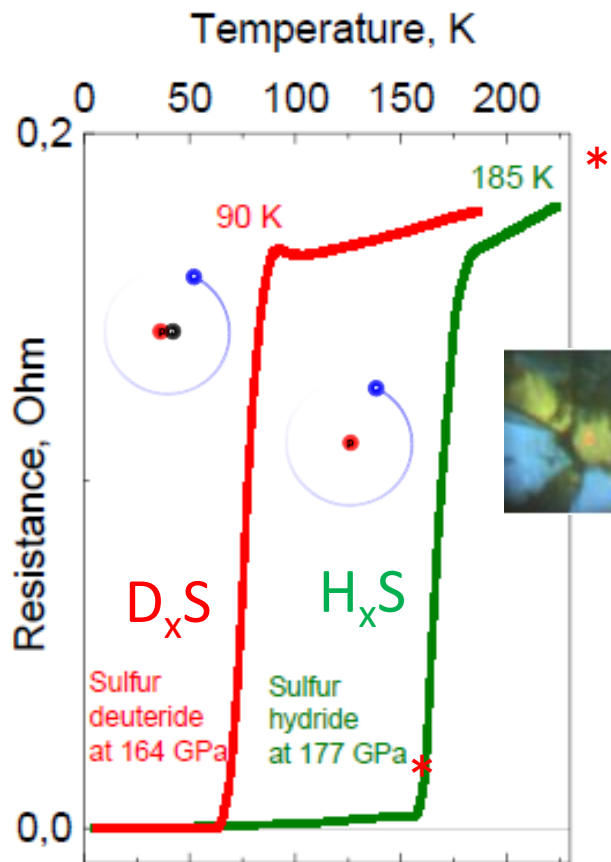


J. Ge et al., NATURE MATERIALS 14, 285 (2015)

究極に軽い元素(水素)の超伝導体？

理論予測: 金属水素・水素化物では高い $T_c=80-260\text{K}$ 、ただし高压下
実験報告: H_2S (H_3S) に高压をかけると $T_c = 190\text{ K}$ の超伝導 (2014年)

Drozdov et al., arXiv:1412.0460 (2014) *まだ正式な論文ではない



LiH_2 LiH_6	BeH_2
NaH_3 NaH_7 NaH_9 NaH_{11}	MgH_4 MgH_{12}
KH_3 KH_5 $\text{KH}_8 \dots$	MgH_{16} CaH_6
RbH_3 RbH_5	SrH_6
CsH_3 CsH_7 $\text{CsH}_9 \dots$	BaH_6 BaH_8 $\text{BaH}_{12} \dots$

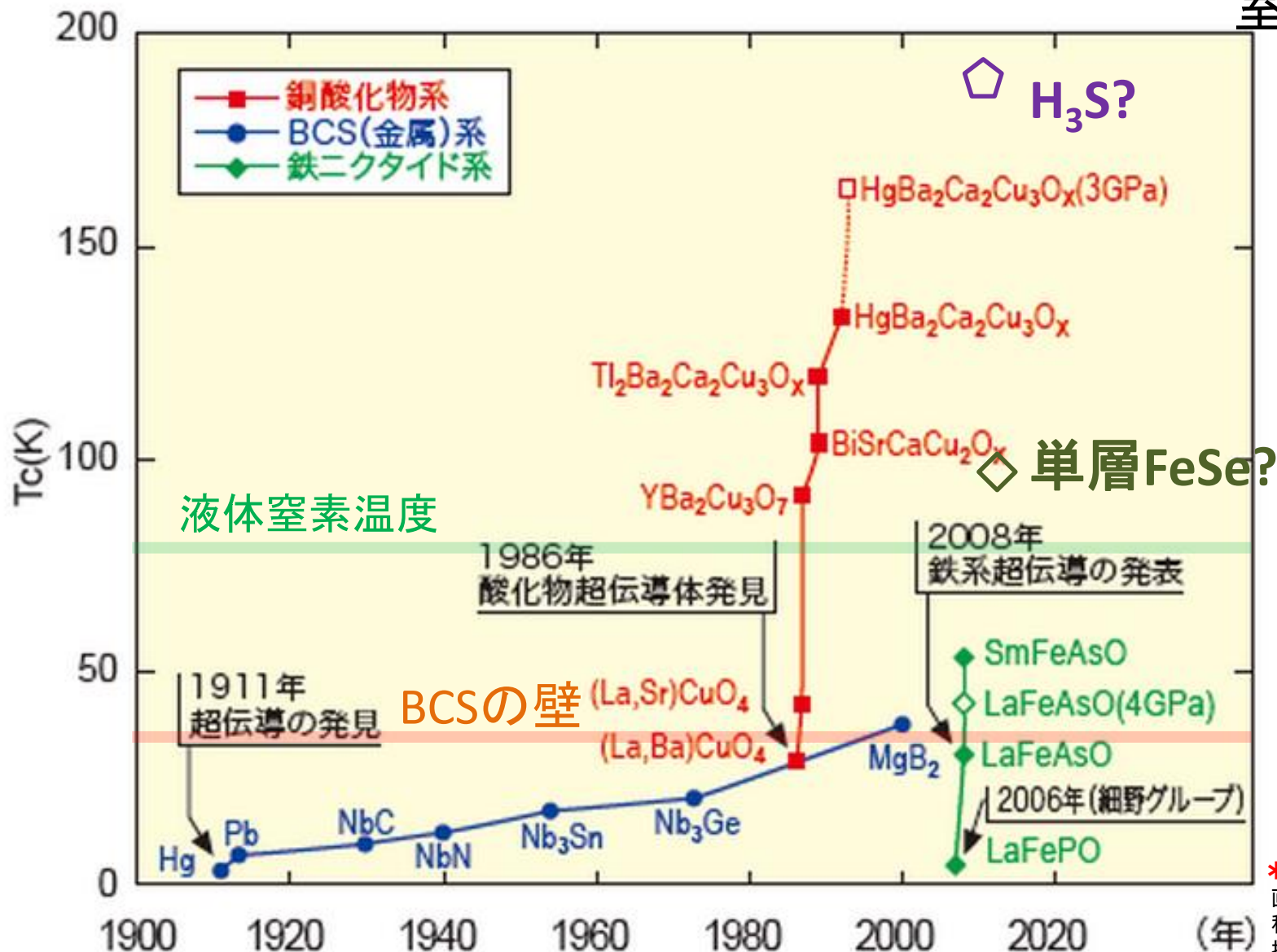
H_2	
LiH	BeH_2
NaH	MgH_2
KH	CaH_2
RbH	SrH_2
CsH	BaH_2

			H_2	
B_2H_6	CH_4	NH_3	H_2O	HF
AlH_3	SiH_4	PH_3	H_2S	HCl
GaH_3	GeH_4	AsH_3	H_2Se	HBr
	SnH_4	SbH_3	H_2Te	HI
	PbH_4	BiH_3	H_2Po	HAt

追試成功、マイスナー効果も観測？
高精度の非経験的超伝導理論による再現
水素化物で室温超えが可能か？？

新規超伝導体の開発と臨界温度の変遷

室温300 K



*
画像提供:
科学技術
振興機構(JST)
(一部加筆)

超伝導の実用技術

超伝導線材 (NbTi, Nb₃Snなど) : 低損失で大電流を流せる
→ 超伝導コイルによる超強力磁石としての実用がほとんど

超伝導磁石



Copyright © 2014 Oxford Instruments
plc, Tubney Woods, Abingdon, Oxon
OX13 5QX, UK

医療用MRI (1.5 - 3 T)



Image by KasugaHuang, from Wikimedia Commons
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Modern_3_T_MRI.JPG CC BY-SA 3.0

日本に6000台程度

リニアモーターカー



Image by Hisagi, from Wikimedia Commons CC BY-SA 4.0
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:JR_Central_SC_Maglev_L0_Series_Shinkansen_201408081006.jpg

2005年 技術確立宣言
2027年 JR東海 中央リニア新幹線
開業予定(東京-名古屋)

送電線など: 低温の要請(液体ヘリウムが必要)がネック
より高い T_c , H_c , J_c

超伝導線材開発の歴史

1911	超伝導現象の発見
1913	鉛(Pb)線を用いた超伝導コイル
1935	$\text{Bi}_{0.65}\text{Pb}_{0.35}$ 線
1955	Nb 線を用いたコイル
1961	Nb_3Sn 線、Nb-Zr 線を用いたコイル
1964	Nb-Ti 線材
1967	Nb_3Sn 線材、 V_3Ga 線材
1986	銅酸化物高温超伝導体の発見
1989	短尺 Bi2223 線
1991	短尺 Y123 薄膜線
1996	長尺 Bi2223 線材
2001	MgB_2 超伝導体の発見
2004	長尺 MgB_2 線材
2006	長尺 Y123 薄膜線材

未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会(編著)『超伝導実用技術』日刊工業新聞社、2013年、p.75 を基に作成

銅酸化物高温超伝導体: ~~セラミックなので加工が難しい~~

銅酸化物高温超伝導体の実用化へ

高温超伝導線材、送電ケーブル

Bi系高温超伝導体 Bi2223

Y系高温超伝導体 Y123

より簡単な窒素冷却で、より少ないロスで、
より多くの電流を流せる →低コスト

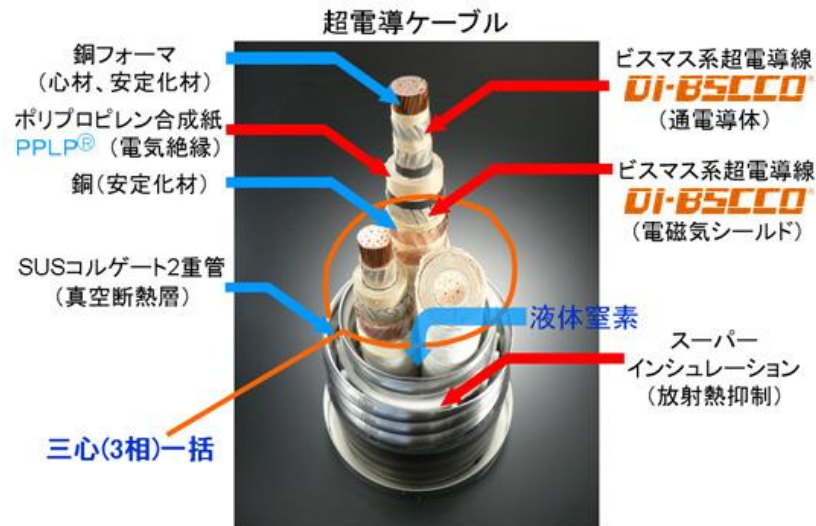
2012年 東京電力, 住友電工, 前川製作所
横浜5万世帯に実験送電 成功

世界的電力網

eg 砂漠で太陽光発電→超伝導ケーブルで他地域へ送電

より強力、小型な超伝導磁石
ポータブルで安価なMRI

住友電工 webより



(注) 安定化材: 事故時の電流分担

* © 2016 Sumitomo Electric Industries, Ltd.

→ より詳しく知りたい方は、
「超伝導実用技術(日刊工業新聞社)」など

outline

- 固体中の電子とバンド理論
- 強相関電子系
- 超伝導
- ➡ • トポロジカル絶縁体

トポロジカル絶縁体

2005年に理論的にKane, Meleにより提唱された新しい絶縁体

* 2014年ノーベル物理学賞候補に挙げられたテーマのひとつ

固体内部はバンド絶縁体

表面(端)部分は特殊なスピンをもつ金属状態

→トポロジカル表面(端)状態

Image by TAKA@P.P.R.S, from flickr
https://www.flickr.com/photos/takaprs_flickr/8703092927 CC BY-SA 2.0



トポロジカル絶縁体

2005年に理論的にKane, Meleにより提唱された新しい絶縁体

* 2014年ノーベル物理学賞候補に挙げられたテーマのひとつ

固体内部はバンド絶縁体

表面(端)部分は特殊なスピンをもつ金属状態

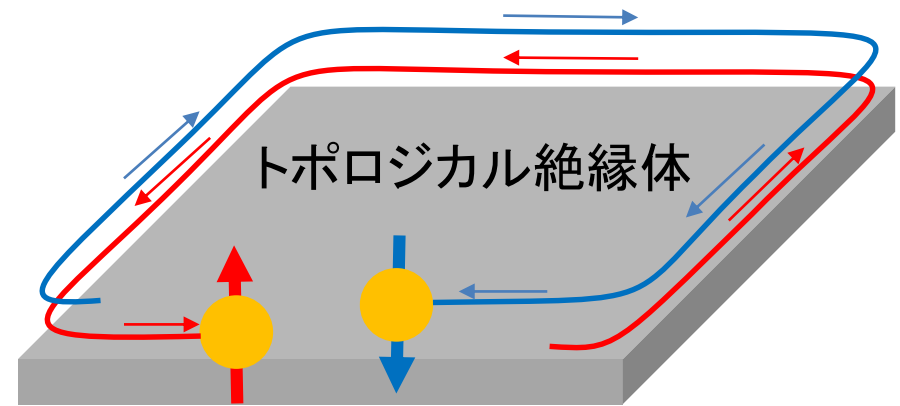
→トポロジカル表面(端)状態

スピンの向きによって
電子の運動量が固定される

スピンを反転させない限り
電子の運動は不変
抵抗が生じない
省電力



*
黒田健太氏提供



upスピン, downスピンの電子は
逆向きに運動

トポロジカル絶縁体

バンドの「トポロジカル」な性質が重要

トポロジー (位相幾何学): 連続変形した際の「形」の分類

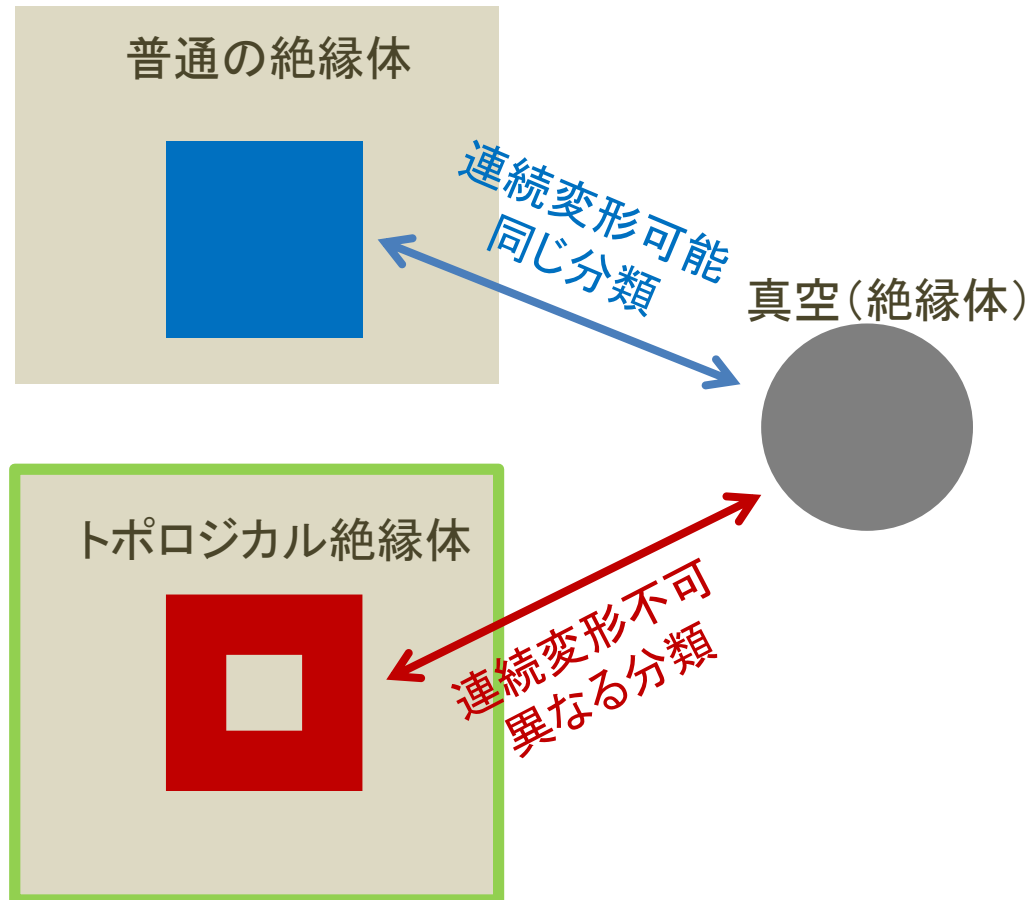


* 画像提供: 理化学研究所

異なる分類の絶縁体どうしは
接続できない
必然的に表面が金属になる
(対称性による不連続の要請)

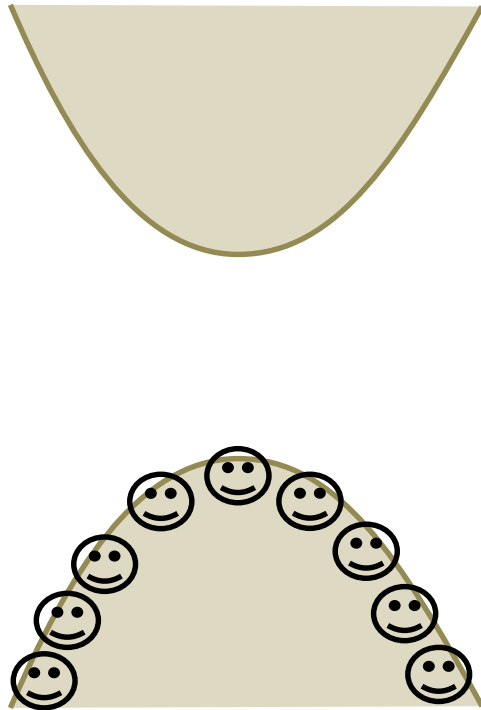
トポロジカルな性質

バンド構造だけではなく、
電子の波動関数を考えない
と分からない



トポロジカル絶縁体

「普通の絶縁体」



「トポロジカル絶縁体」

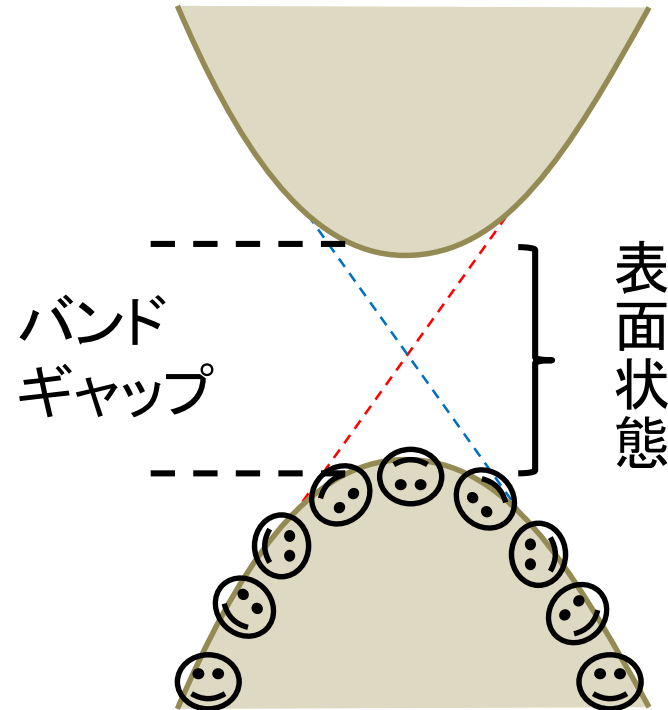


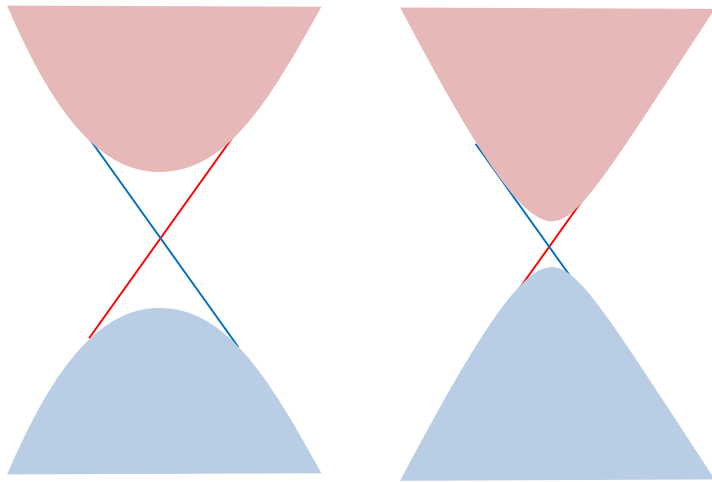
Image by TAKA@P.P.R.S,
from flickr [CC BY-SA 2.0](https://www.flickr.com/photos/takaprs_flickr/8703092927)
https://www.flickr.com/photos/takaprs_flickr/8703092927

波動関数 😊 偶 ☹️ 奇

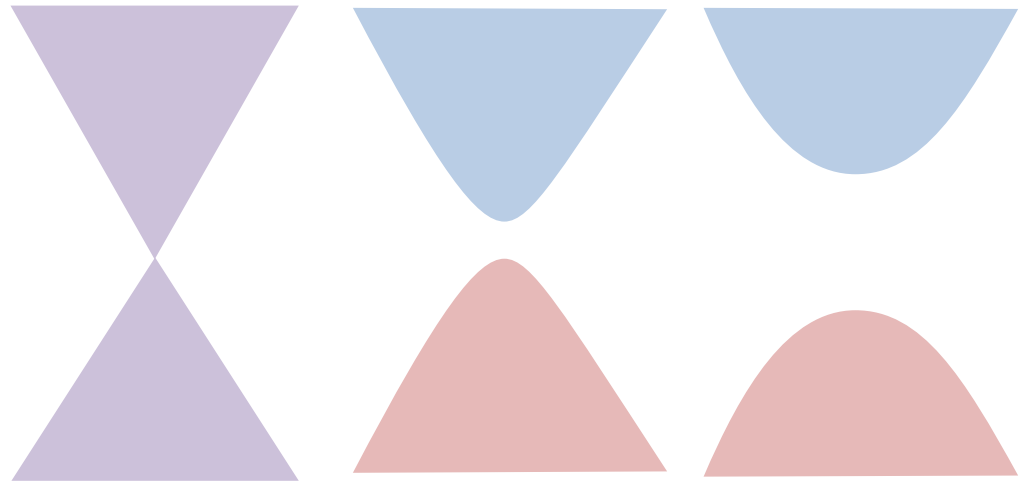
トポロジカル相転移

圧力や元素置換により
「普通の絶縁体」 $\leftrightarrow$ 「トポロジカル絶縁体」

「トポロジカル絶縁体」



「普通の絶縁体」



TlBi(S,Se)_2

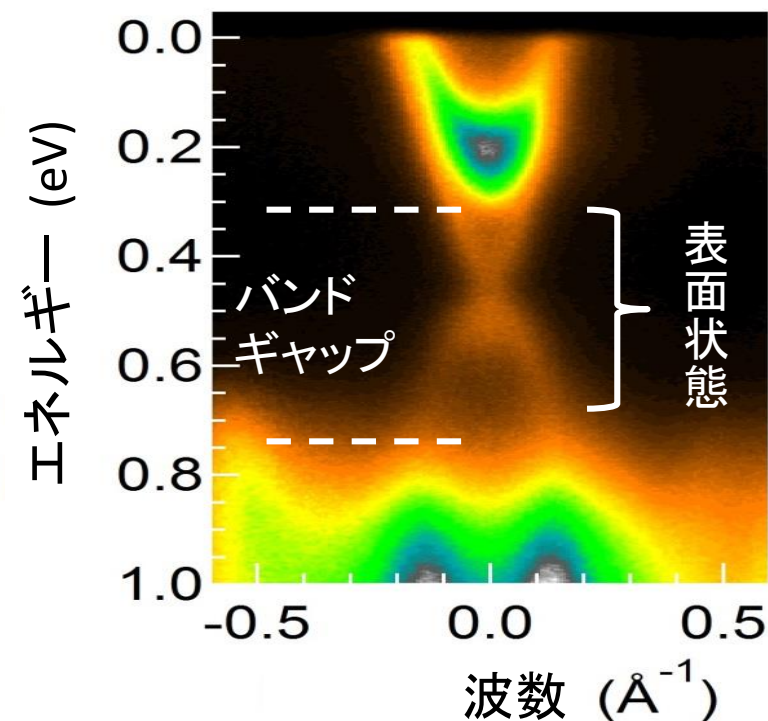
S.Y. Xu et al., Science **332**, 560-564 (2011)

$\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$

Y. Tanaka et al., Nature Physics **8**, 800–803 (2012)

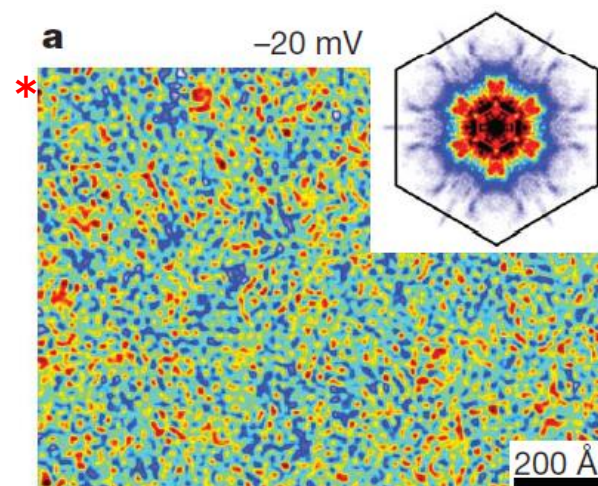
トポロジカル絶縁体(実験)

表面のバンド構造を観測 → トポロジカル表面状態



* Cover Picture of Special Issue: Topological Insulators – From Materials Design to Reality, *Physica Status Solidi RRL* 7(1-2). 2013. Published by John Wiley and Sons. © 2013 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

表面電子の干渉 (STM)

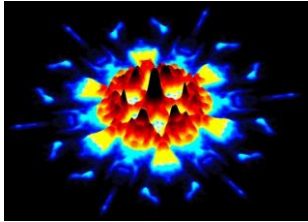


NATURE 460, 1106 (2009)

Image from Roushan et al. 2009. Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: *Nature*, 460(7259), 1057-1170, p.1107 Fig.2(a). copyright 2009

光電子分光、走査型トンネル顕微鏡 (STM) などの表面計測

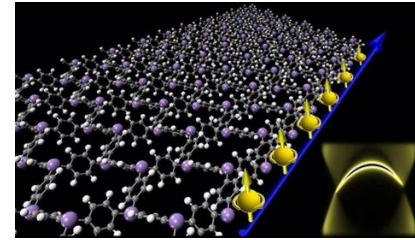
トポロジカル物質科学 急速に進展中



* Image courtesy of
P. Roushan and A.
Yazdani, Princeton
University (2011)

理論提案

新原理の電気磁気効果
強相関・磁性による新トポロジカル相



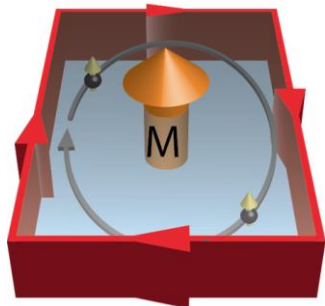
* Photo Credit: Zhengfei Wang
and Feng Liu, University of
Utah

新物質開拓・探索

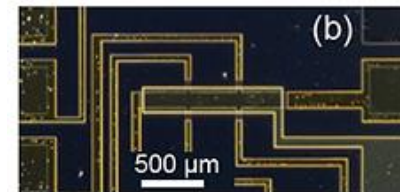
より使いやすいトポロジカル絶縁体
電気・光などによるトポロジカル相転移・相制御
トポロジカル超伝導

先端的な実験による検証

トポロジカル省電力素子を用いた
エレクトロニクスへの展開



* 画像提供: 理化学研究所



* 画像提供: 理化学研究所