京都大学工学研究科融合光・電子科学の展望

# 高温超伝導体固有ジョセフソン接合の物理と応用

-超伝導フェイゾニクス(PHASONICS)へ

#### 掛谷 一弘

京都大学大学院工学研究科電子工学専攻 kakeya@kuee.kyoto-u.ac.jp



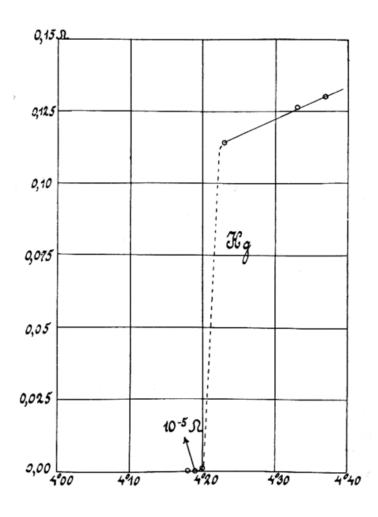
### 内容

- 超伝導の基礎概念
- ・ 高温超伝導体をはじめとする新奇超伝導体
- 高温超伝導体における固有ジョセフソン接合
- 固有ジョセフソン接合からのTHz波発振
- ・超伝導量子コンピュータの開発状況

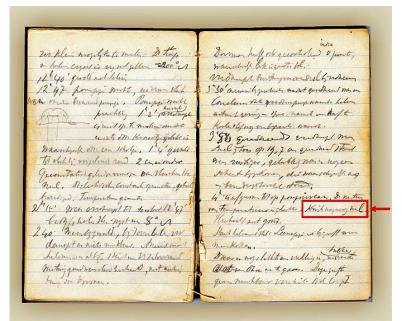
## 超伝導の基礎概念

- Discovery and its background
- Basic properties of superconductors

### 「超伝導」の発見

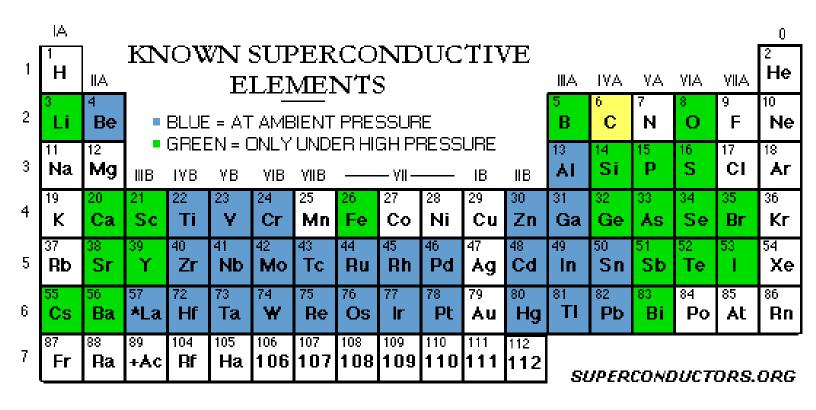


1911年、オンネスによって発見された水銀(Hg)の抵抗変化. データは数ヶ月に渡る数回の測定で取られた



"Kwik nagenoeg nul"

### 周期律表における超伝導元素



\*Lanthanide Series

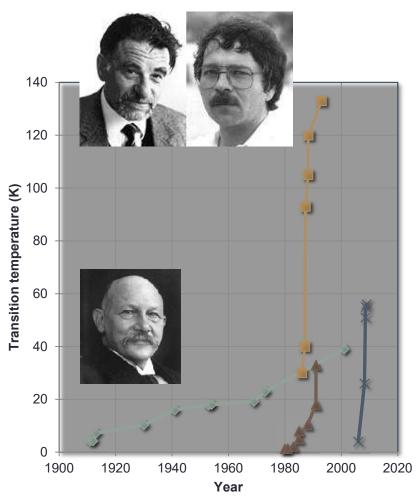
+ Actinide Series

								_				70 <b>Yb</b>	
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
<b>Th</b>	<b>Pa</b>	<b>U</b>	<b>Np</b>	<b>Pu</b>	<b>Am</b>	<b>Cm</b>	<b>Bk</b>	Cf	<b>Es</b>	<b>Fm</b>	<b>Md</b>	<b>No</b>	<b>Lr</b>

### 超伝導転移温度更新の歴史



B. Matthias





H. Hosono



J. Akimitsu

### 「超伝導の歴史」まとめ

•	電気伝導率は、電子のこと例し、有効質量に反比例する。
•	絶対零度付近の電子の あまり変わりない
•	液体ヘリウムの沸点は4.2ケルビンであるが、さらに低い温度を得たい場合は すればよい
•	「超伝導」であることを示すためには、ゼロ抵抗だけでなく、の実証が必要である
•	一般に、圧力を加えると超伝道体になり

### 超伝導の特徴

- •完全導電性(R = 0)
  - ・超伝導電流は101000...年以上も減衰しない
- •完全反磁性(B = 0)
  - •マイスナー効果
- ·磁束量子化
  - •磁束量子: h/2e
- ・ ジョセフソン効果
  - 電圧と周波数の関係: 2eV = hf

### 完全導電性

オンネスによる永久電流測定(1914年)

外部磁場によって超伝導リング (r = 5 cm, d = 1 mm)に誘起された電流を測定

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}$$
  
 $L = 1.3 \times 10^{-7} \text{H}$ 

1時間での電流散逸は1%以下.



$$R \le \frac{-\ln 0.99 \times 1.3 \times 10^{-7}}{3.6 \times 10^{3}} \approx 3.6 \times 10^{-13} \,\Omega$$

### マイスナーオクセンフェルド効果

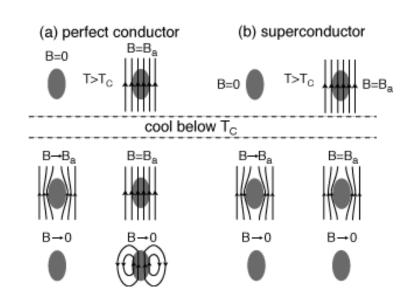
オクセンフェルドが1933年に発見

• 完全反磁性

$$B = 0$$

- ・超伝導体は完全導体なだけで はない
- ・ファラデーの法則  $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E}$
- 仮想的な完全導体では*E* = 0, したがって、

$$B = const$$
 初期条件に依存する



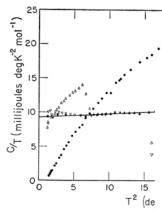
### Bardeen-Cooper-Schrieffer 理論

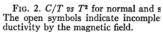
- ・フェルミ面近傍の電子(フェルミ粒子)がクーパーペア (ボーズ粒子)を形成する
  - ・反平行のスピン
  - ペアの距離(ξ)>> 電子間距離(Δ<<ε<sub>F</sub>)
- T<sub>c</sub>において、ボーズアイン シュタイン凝縮が起きる
  - ・比熱の飛び
  - トンネル伝導における微分伝 導率のピーク











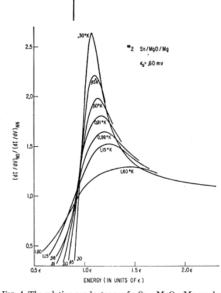


Fig. 4. The relative conductance of a Sn-MgO-Mg sandwich; i.e., the conductance of the sandwich when the tin film is superconducting, divided by the conductance when the tin film is normal, plotted against energy normalized to the energy gap for several different temperatures. Since the energy gap is a function of temperature, we have used the experimentally verified BCS variation of the gap with temperature for the energy normalization. The energy gap at T=0 is given in the figure. Note that for maximum detail the zero has been offset.

### 電子格子相互作用

- 1次過程 (電子-格子)
  - フォノンによる散乱

$$k \to k + q$$
$$k \to k - (-q)$$

- ・2次過程(フォノンを媒介とした電子-電子)
  - 実効ハミルトニアン

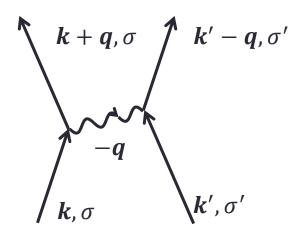
美効ハミルトーアン
$$H = \frac{1}{2} \sum_{\mathbf{k}, \mathbf{k'}, \mathbf{q}, \sigma, \sigma'} V_{ph}(\mathbf{q}) c_{\mathbf{k}+\mathbf{q}, \sigma}^* c_{\mathbf{k'}-\mathbf{q}, \sigma'}^* c_{\mathbf{k}, \sigma} c_{\mathbf{k'}, \sigma'}$$

$$2|g(\mathbf{q})|^2 \hbar \omega_{\mathbf{q}}$$

$$V_{ph}(\mathbf{q}) = \frac{2|g(\mathbf{q})|^2 \hbar \omega_{\mathbf{q}}}{\left(\epsilon_{\mathbf{k}+\mathbf{q}} - \epsilon_{\mathbf{k}}\right)^2 - \left(\hbar \omega_{\mathbf{q}}\right)^2}$$

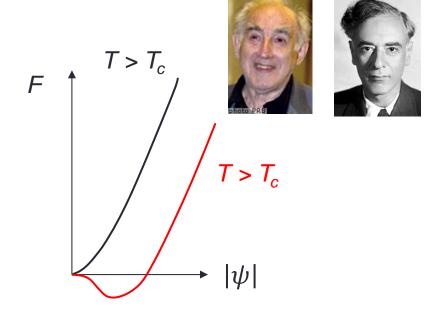
・ 引力が働く場合

$$\left|\epsilon_{k+q} - \epsilon_k\right| < |\hbar\omega_q|$$



### ギンツブルグランダウ理論

- 超伝導状態を記述する現象論
- ・秩序パラメタ $\psi = |\psi|e^{i\phi}$  (巨視的量子状態)
  - $|\psi|^2$ :超伝導電子密度
  - φ: 位相(ジョセフソン効果で 顕わ)
- BCS理論と本質的に同一



$$\begin{split} &f_s - f_{n0} \\ &= \alpha |\psi|^2 + \frac{\beta}{2} |\psi|^4 \\ &+ \frac{1}{2m^*} \left| \left( \frac{\hbar}{i} \nabla - \frac{e^*}{c} A \right) \psi \right|^2 + \frac{h^2}{8\pi} \end{split}$$

#### コヒーレンス

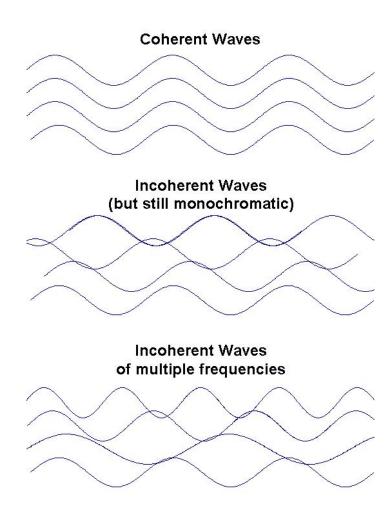
- ・波の干渉のしやすさ(可干 渉性)
- ・コヒーレントな複数の波
  - 同じ波長λ(単色)
  - ・同じ位相 $\theta$

$$A\sin(2\pi x/\lambda + \theta)$$

振幅

波長 位相

位相空間における 自発的対称性の破れ

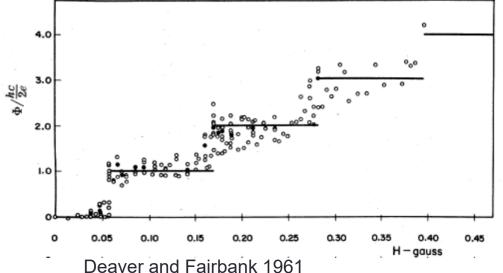


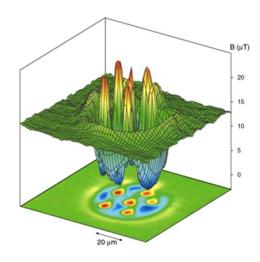
### 磁束の量子化

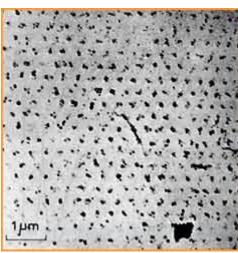
$$\Phi_0 = \frac{h}{2e}$$

F. London, 1950 第1種超伝導体 A. A. Abrikosov, 1957 第2種超伝導体





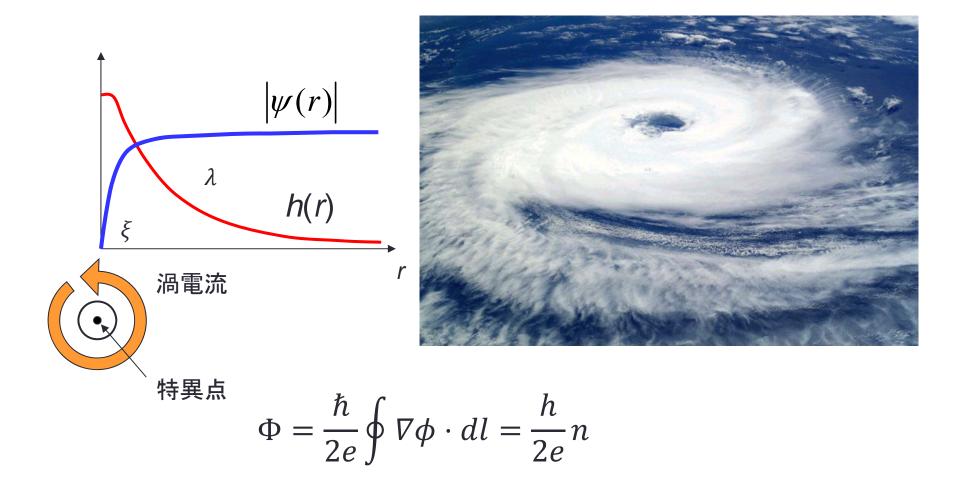




U. Essmann and H. Trauble

Physics Letters 24A, 526 (1967)

### 量子化磁束(渦糸)



### 第2種超伝導体の基底状態

- ・アブリコソフは、混合状態が第2種超 伝導体で最低自由エネルギーである ことを示した
  - ・超伝導と常伝導の境界エネルギーは  $H_c$  において $\gamma = H_c^2 \delta/8\pi$

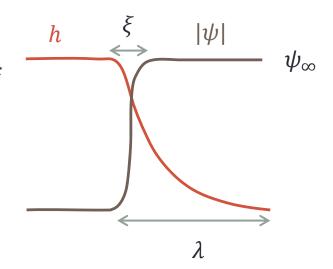
$$\delta = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \left( 1 - \frac{h}{H_c} \right)^2 - \left( \frac{\psi}{\psi_{\infty}} \right)^4 \right] dx$$

$$\delta = 1.89 \xi \ (\kappa \ll 1)$$

$$\delta = -1.104\lambda \ (\kappa \gg 1)$$

ここで, 
$$\kappa = \lambda/\xi$$

- ・第2種超伝導体では  $(\kappa > 1/\sqrt{2}) \delta < 0$ なので、常伝導領域はできる限り細分化される。
  - ・ 磁束の量子化



### 第2種超伝導体の発見で実現されたもの



Siemens, Germany



LHC, CERN



MAGLEV, Japan

### ジョセフソン効果

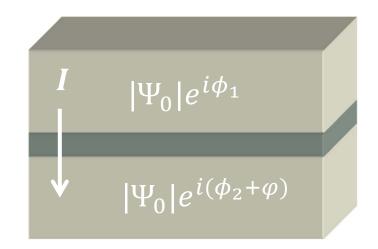
B. D. Josephson, 1962

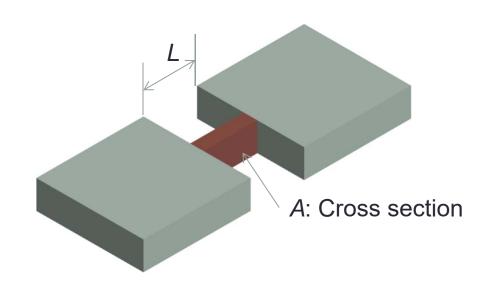
$$I = I_c \sin \varphi, V = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\varphi}{dt}$$
 
$$\varphi = \phi_1 - \phi_2 - \frac{2\pi}{\Phi_0} \int \mathbf{A} \cdot d\mathbf{s},$$

 $\phi_i$ : 秩序パラメタの位相

A:ベクトルポテンシャル

$$I_c = \frac{2e\hbar\psi_{\infty}}{m^*} \frac{A}{L}$$





### 「超伝導の特徴」まとめ

•	超伝導は電子が対になり、整数スピンの として振る舞うことにより生じる
•	電子対の結合の強さを決める要素の一つは 振動数である
•	電子対の波動関数は巨視的にしてある
•	第2種超伝導体とは、磁場を して内部に取り 込むことが安定な物質である
•	MRIは 超伝導体の発見により実現した
•	ジョセフソン効果は、直流と交流を変換し、変換係数は物質に依存

# 様々な超伝導体

Various superconducting materials discovered after 1986 and their properties

### 銅酸化物超伝導体の発見

#### Possible High $T_c$ Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System

J.G. Bednorz and K.A. Müller IBM Zürich Research Laboratory, Rüschlikon, Switzerland

Received April 17, 1986

Metallic, oxygen-deficient compounds in the Ba-La-Cu-O system, with the composition  $\mathrm{Ba}_x\mathrm{La}_{5-x}\mathrm{Cu}_5\mathrm{O}_{5(3-y)}$  have been prepared in polycrystalline form. Samples with x=1 and 0.75, y>0, annealed below 900 °C under reducing conditions, consist of three phases, one of them a perovskite-like mixed-valent copper compound. Upon cooling, the samples show a linear decrease in resistivity, then an approximately logarithmic increase, interpreted as a beginning of localization. Finally an abrupt decrease by up to three orders of magnitude occurs, reminiscent of the onset of percolative superconductivity. The highest onset temperature is observed in the 30 K range. It is markedly reduced by high current densities. Thus, it results partially from the percolative nature, bute possibly also from 2D superconducting fluctuations of double perovskite layers of one of the phases present.



K. A. Muller and J.G. Bednorz

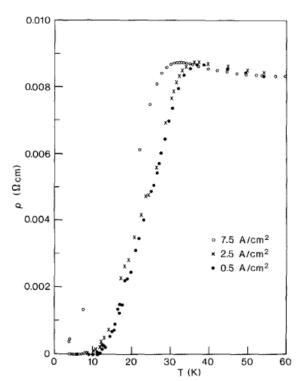
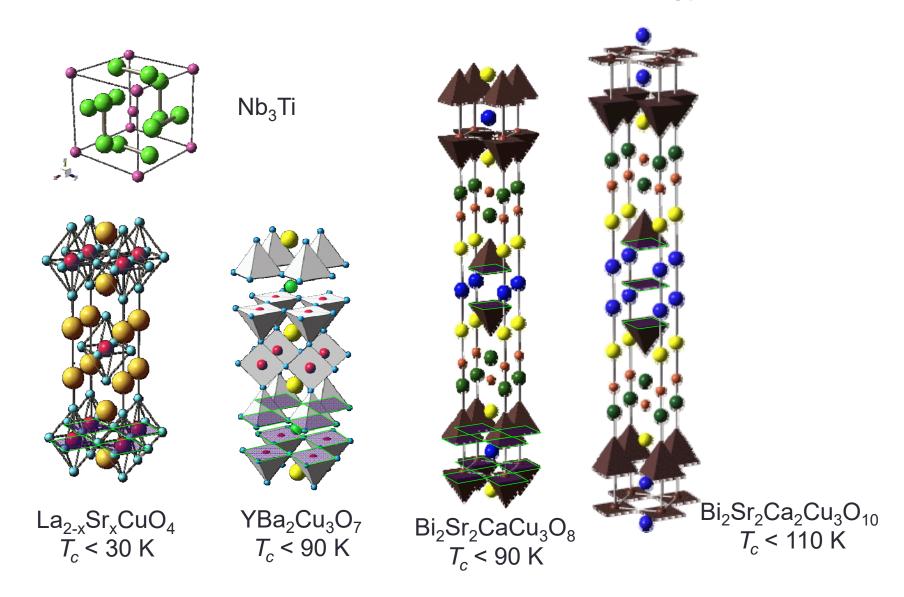


Fig. 3. Low-temperature resistivity of a sample with x(Ba) = 0.75, recorded for different current densities

### 代表的な銅酸化物高温超伝導体

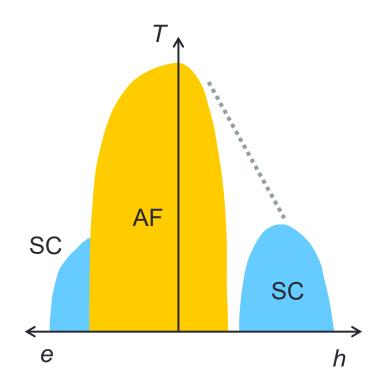
- La-Ba-Cu-O: 30K
  - ベドノルツとミュラーによって発見
  - ・東大のグループが結晶構造を報告し、超伝導フィーバーに
- YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> (YBCO): 90K
  - チュー(米)らによって発見。
  - ・同時に東大とアムステルダムのグループで発見
- Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10</sub> (Bi2223) : 110 K
  - つくばの金属材料研究所(現NIMS)で発見
- Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub> (Bi2212): 90 K
  - 単結晶が比較的容易に得られる
- (Hg,TI)Ba<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>8</sub>: 138K
  - 常圧で最高の転移温度

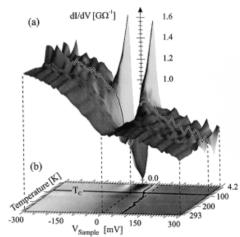
### 銅酸化物高温超伝導体の結晶構造



### 高温超伝導体の物理

- ・超伝導相は反強磁性相の隣に 現れる
  - 磁気的相互作用が重要
- ・d波の超伝導ギャップ
  - ・無限小のエネルギーで準粒子が励起される
- Tc以上で擬ギャップが存在
  - 別のオーダーパラメータ vs 対形成の前駆現象
- 不均一な超伝導ギャップ
  - 内因的 vs 外因的?

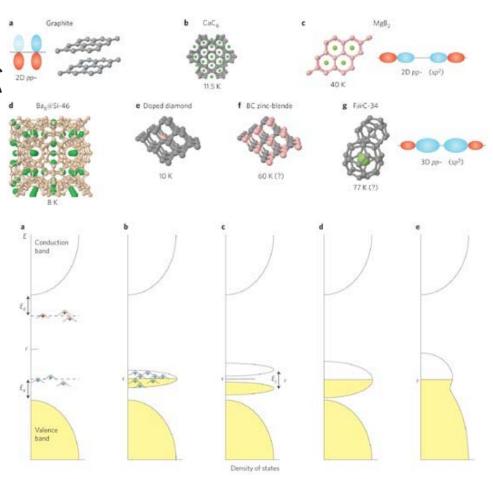




C. Renner *et al.*, Phys. Rev. Lett. **80** (1998) 149.

### ユビキタス超伝導体

- ・軽元素からなる超伝導体
- ・共有結合のため、高いデバ イ周波数
  - ・高い Tc (マクミランの式)
  - ワイドギャップ半導体にキャリアドープ
- MgB<sub>2</sub>, CaC<sub>6</sub>, B- doped diamond, SiC:B, Si:B SrTiO<sub>3</sub>...
- K<sub>3</sub>C<sub>60</sub>, Rb<sub>2</sub>CeC<sub>60</sub>, ...



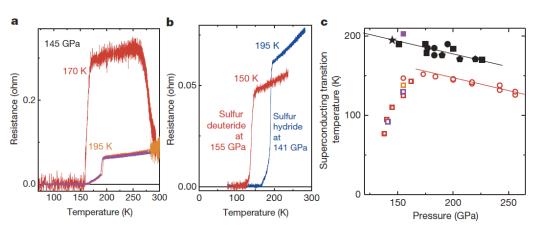
X. Blase et al., Nature Mat.8 375

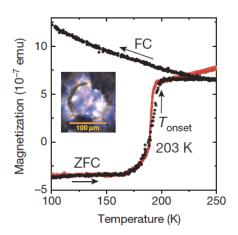
### -70°C超伝導(圧力下) LETTER

doi:10.1038/nature14964

# Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system

A. P. Drozdov<sup>1</sup>\*, M. I. Eremets<sup>1</sup>\*, I. A. Troyan<sup>1</sup>, V. Ksenofontov<sup>2</sup> & S. I. Shylin<sup>2</sup>





H<sub>2</sub>Sが圧力下でH<sub>3</sub>S 203 Kで超伝導!!

地上最低気温記録: - C(1983年南極ボストーク基地)

### 氷温超伝導

#### PHYSICAL REVIEW LETTERS 122, 027001 (2019)

**Editors' Suggestion** 

Featured in Physics

#### Evidence for Superconductivity above 260 K in Lanthanum Superhydride at Megabar Pressures

Maddury Somayazulu,<sup>1,\*</sup> Muhtar Ahart,<sup>1</sup> Ajay K. Mishra,<sup>2,‡</sup> Zachary M. Geballe,<sup>2</sup> Maria Baldini,<sup>2,§</sup>

Yue Meng,<sup>3</sup> Viktor V. Struzhkin,<sup>2</sup> and Russell J. Hemley<sup>1,†</sup>

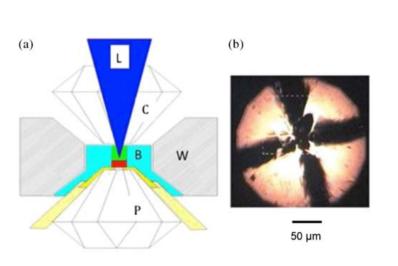
<sup>1</sup>Institute for Materials Science and Department of Civil and Environmental Engineering,

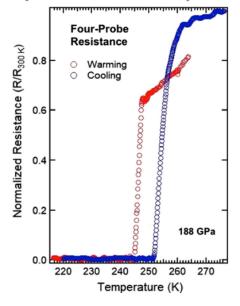
The George Washington University, Washington, DC 20052, USA

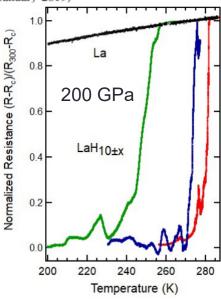
<sup>2</sup>Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington, Washington, DC 20015, USA

<sup>3</sup>HPCAT, X-ray Science Division, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois 60439, USA

(Received 23 August 2018; revised manuscript received 3 December 2018; published 14 January 2019)







### 「様々な超伝導体」まとめ

- ・銅酸化物高温超伝導体は強 本の研究から見つ かった
- 銅酸化物高温超伝導体は層状の結晶構造を持ち、 素原子面が超伝導を担う
- ・鉄ヒ素系超伝導体は素の構造が超伝導を担う
- ・軽元素にキャリアをドープして得られる超伝導体は、 高いデバイ振動数のため、 が高い
- ・圧力下で得られる\_\_\_\_\_\_\_ 化合物の超伝導体は、室温近くで観測されているが、銅酸化物よりむしろ低温超伝導体に似ている

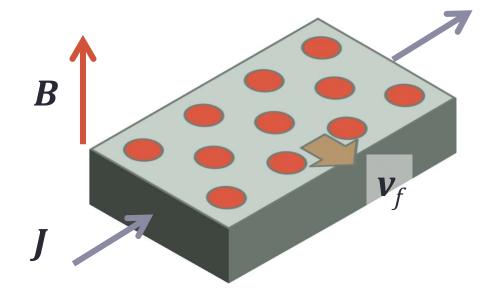
# 応用に向けた超伝導の物理

Basic researches for possible superconducting devices

- Vortex phase in mixed state
- Intrinsic Josephson junctions

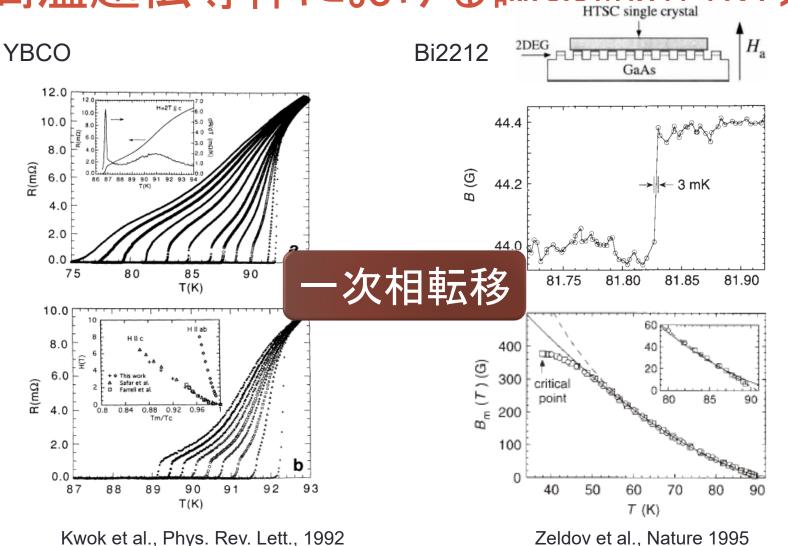
### 超伝導体の渦糸状態

$$E = v_f \times B = \rho_f J$$

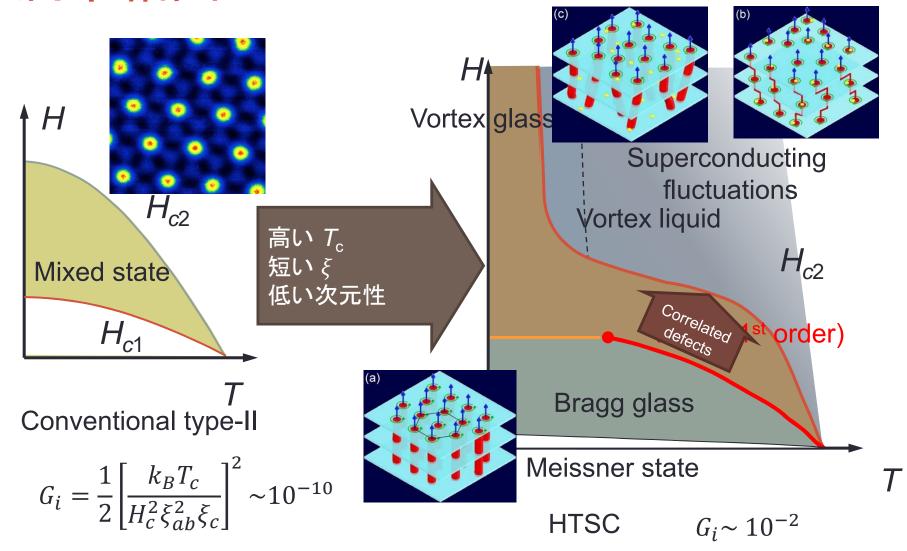


渦糸状態の研究は最重要課題

### 高温超伝導体における磁束融解転移



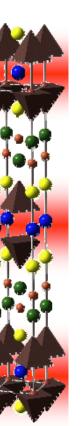
### 渦糸相図



### 固有ジョセフソン接合

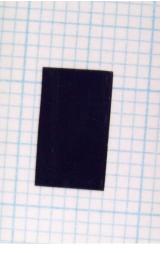
Bi2212

Ψ

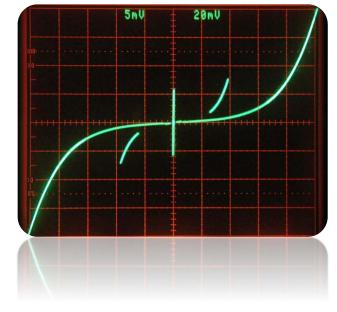


S I S

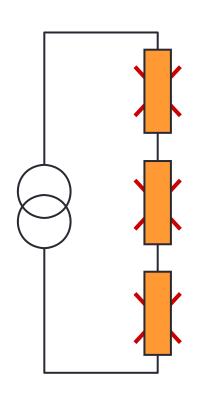


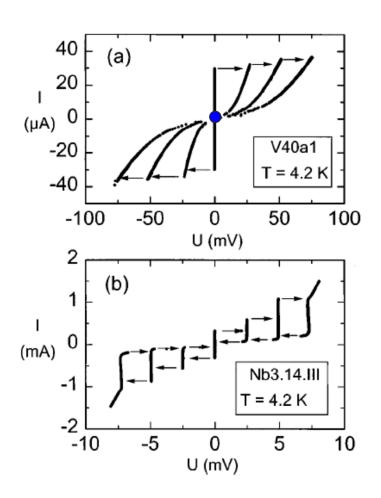


高温超伝導体で見られる超伝導秩序パラメタΨのc軸に沿った強い変調に伴うジョセフソン接合



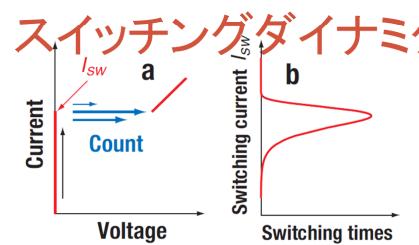
### 固有ジョセフソン接合の特徴





Schlenga et al, 1998

### ジョセフソン接合における



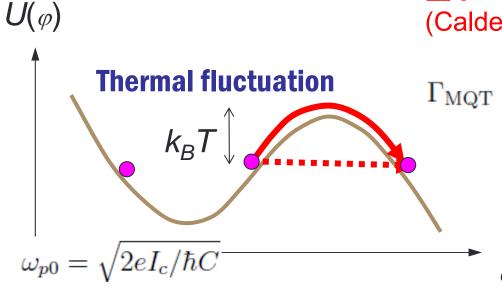
熱ゆらぎ脱出

(Kramers, Physica 1940)

$$\Gamma_{TA} = a_t \frac{\omega_p}{2\pi} \exp\left(-\frac{\Delta U}{k_B T}\right)$$

#### 量子トンネル

(Caldeira and Legett, PRL 1981)



 $\Gamma_{\text{MQT}} = \frac{\omega_p}{2\pi} \sqrt{\frac{864\Delta U\pi}{\hbar \omega_p}} \exp\left(-\frac{36\Delta U}{5\hbar \omega_p}\right)$ 

量子計算の基本要素

現デバイス: T < 0.1 K

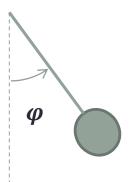
# 振動子としてのジョセフソン接合

$$I = I_{C} \sin \varphi, V = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\varphi}{dt}$$

$$U = -E_{J}(\alpha \varphi + \cos \varphi)$$

$$\alpha = I/I_{C}$$
Bias current
$$A$$

$$\varphi/\pi$$



# 「応用に向けた超伝導の物理」まとめ

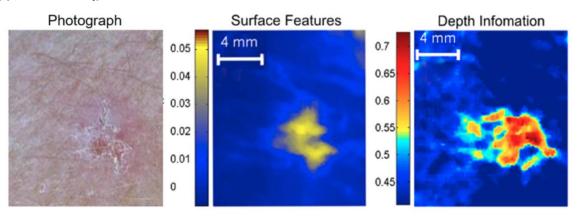
•	磁場中の第2種超伝導体に電流を加えると、量子化磁束が動いて を発生することがある
•	超伝導線のマグネット・送電応用には量子化磁束のを制御することが重要である
•	銅酸化物高温超伝導体の磁束状態は に多様な現象がみられる
•	銅酸化物高温超伝導体は伝導の が高く、ジョセフソン効果で説明される
•	固有ジョセフソン接合は量子ビット、 への応用に適している

# 固有ジョセフソン接合からの テラヘルツ発振

- Bi2212単結晶メサ構造からコヒーレントTHz波が放射
- 0.5THzで0.6mWの最大出力
- メサ形状により、偏光を制御できる

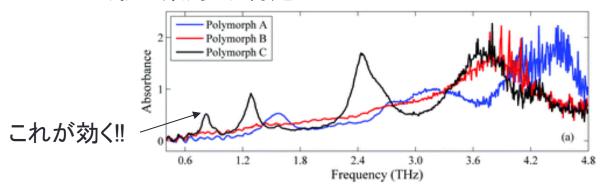
# 医療•薬品応用

皮膚がん組織in-vivo検査



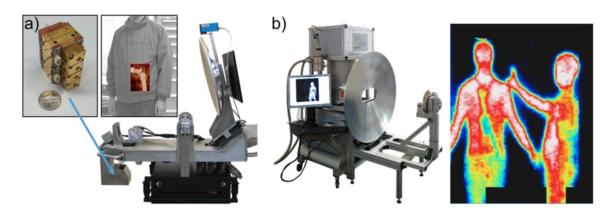
Wallace V P et al 2004 Br. J. Dermatol. 151 424-32

#### メベンダゾール(駆虫薬)多形特定

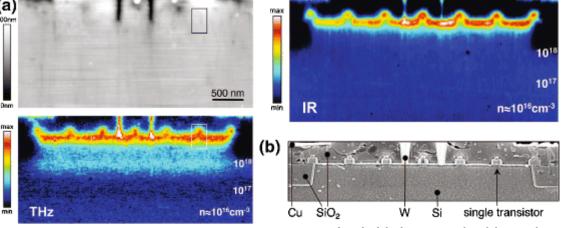


V.H. da Silva, F.S. Vieira, J.J. Rohwedder, C. Pasquini, C.F. Analyst, 142 (2017), pp. 1519

# セキュリティ・非破壊検査



Heinz E et al. 2015 *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* 36 879–95



A. J. Huber et al., *Nano Letters*, 8(11):3766–3770, 2008.

# ジョセフソンプラズマ振動

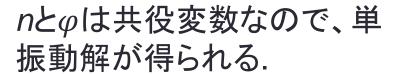
P. W. Anderson, 1964

$$H = \frac{Q^2}{2C} + E_J (1 - \cos \varphi)$$

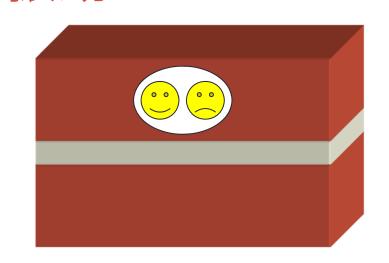
$$\simeq \frac{(2e)^2}{2C} n^2 + \frac{E_j}{2} \varphi^2$$



n: トンネル粒子数



$$\omega_p = \frac{2\pi}{\Phi_0} \sqrt{\frac{E_J}{C}} = \sqrt{\frac{8\pi e dJ_0}{\varepsilon \hbar}}$$



#### ジョセフソンプラズマ振動数

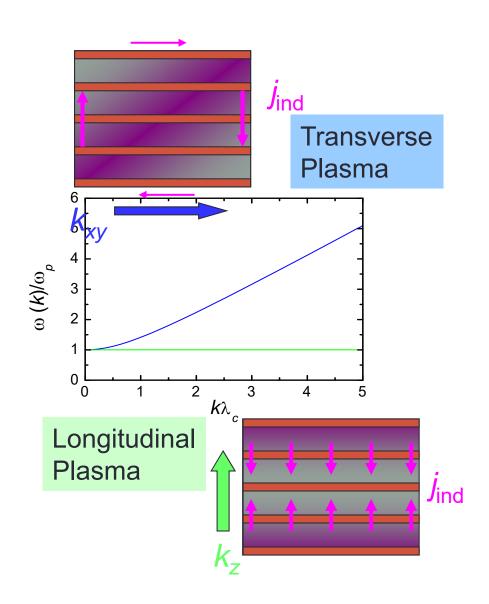
自発的対称性の破れた系における集団 励起モード

(Nambu-Goldstone モード)

層状高温超伝導体におけるジョセフソン

プラズマ

- Bi2212では、100 GHz程度
- 超伝導ギャップにより守られているため、減衰が無視できる。(Tachiki et al., PRB 1994)
- ・横方向に伝搬するジョセフソ ンプラズマは有限の波数を 持ち、テラヘルツ領域で安定.

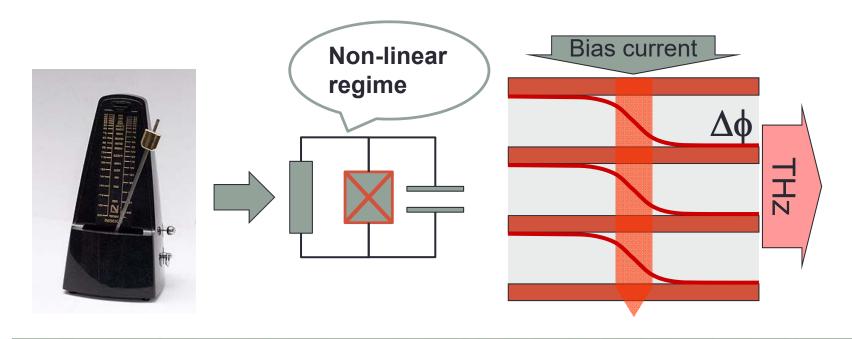


## メトロノームの同期振動



http://youtu.be/DD7YDyF6dUk

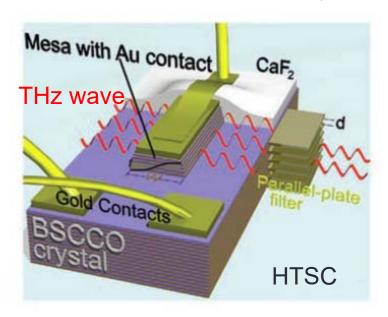
### 我々の興味はメトロノームでなく・・・

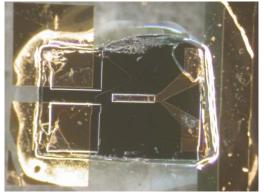


大きな数のジョセフソン接合を同期振動させることが可能か?

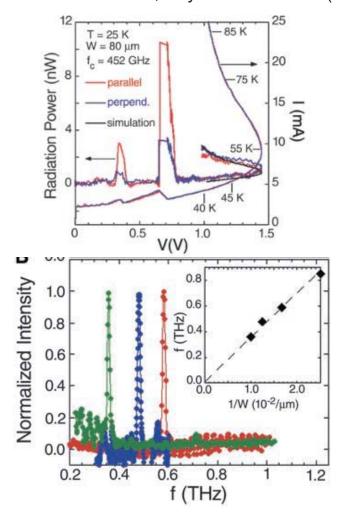
できた!

# ジョセフソンプラズマ放射の実証 L. Ozyuzer *et al.*, Science 318, 1921 (2007)



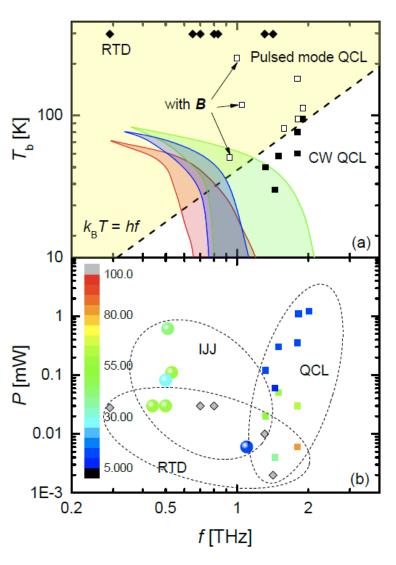


K. Kadowaki et al., Physica C 468 634 (2008)



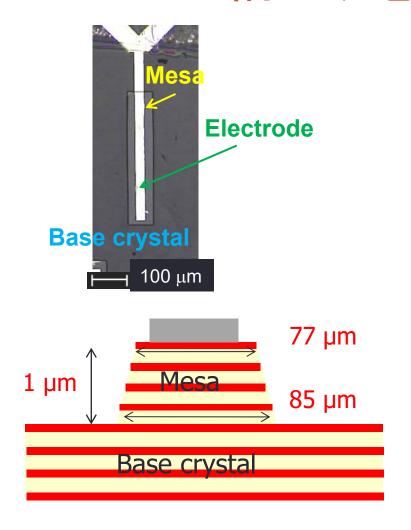
# 重要な特性

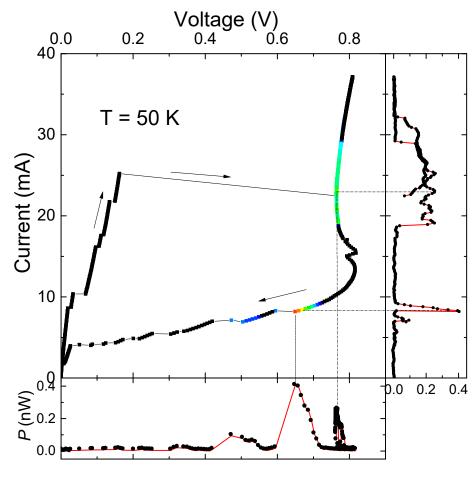
- 連続波
  - Minami et al, APL 95 232511 (2009)
- 最大出力: 0.6 mW
  - Benseman et al, APL 103 022602 (2013)
- 狭帯域: ~ 10 MHz
  - Li et al., PRB 86 060505 (2012)
- 周波数範囲: 0.5-2.4 THz
  - Kashiwagi et al, APL 107 082601 (2015).
- 周波数範囲: 1-11 THz
  - Borodianskyi and Krasnov, Nat. Comm. 8 1742 (2017).
- ·動作温度< 84 K
  - Hao et al., PRApp. 3 (2015).



IK and H. B. Wang, Supercond. Sci. Technol., **29**, 073001 (2016)

# デバイス構造、電流電圧特性と放射





特願2012-118983、国立大学法人京都大学

# 「高温超伝導体からのテラヘルツ放射」まとめ

- 1 THzに相当するエネルギーは、絶対温度にしておよる Kであるので、室温でのレーザー励起が不可能である
- ・テラヘルツ波は、十分な と良好な透過性を持 つので、所持品や生体組織の検査に適している
- ・多数のジョセフソン接合を 」させることにより 高温超伝導体からテラヘルツ波を出すことができる
- ・極低温である必要はないが、温度を上昇させると、 強度は する

# 超伝導量子コンピュータの開 発

- ・ 機械学習から人工知能へ
- D-Wave, Google, IBMなどがハードウェア開発
- 巨大国家プロジェクトが続々スタート、日本は・・・

# 世界初の商用量子計算機D-Wave



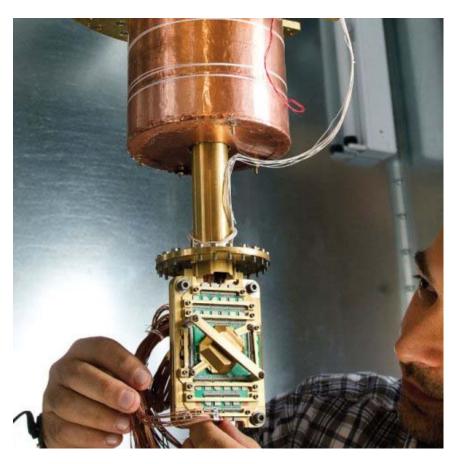




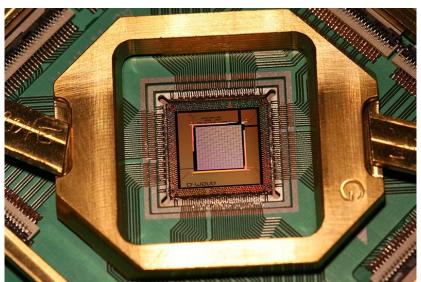
量子アニーリングにより組み合わせ最適化問題を解く。

D-Wave One (128 qubits): 2011年 D-Wave Two (512 qubits): 2013年 D-Wave 2X (1024 qubits): 2015年 経路、情報伝達、投資の最適化

# D-waveのテクノロジー

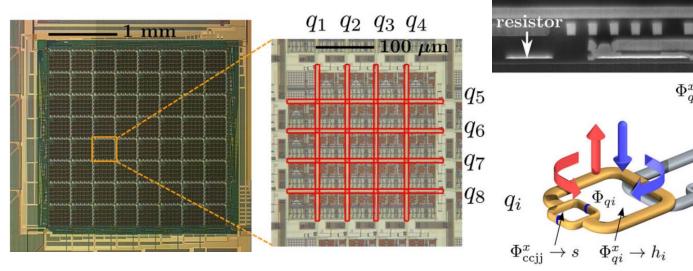


希釈冷凍機によって12 mKまで冷やされた超伝導デバイス

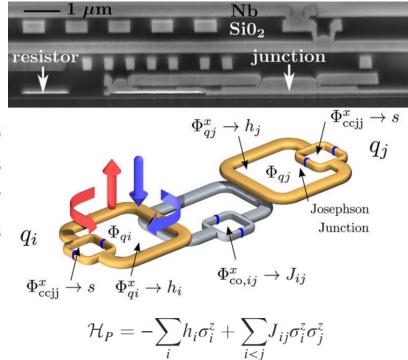


D-waveウェブサイトより

## D-waveの超伝導回路(SQUID)



T. Lanting *et al.* Phys. Rev. X **4**, 021041 (2014)

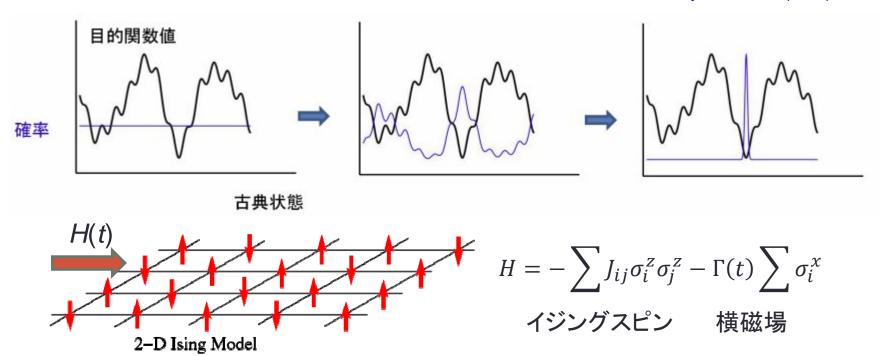


最新のD-wave 2X (1024 qubits) では、128,000個のジョセフソン接合

# 量子アニーリングとは?

量子トンネルを取り入れた最適化問題の解法として、東工大の西森らが1998年に提案

T. Kadowaki and H. Nishimori, Phys. Rev. E58 (1998) 5355.

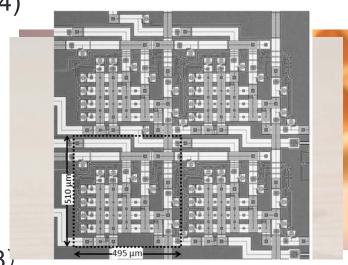


西森 秀稔教授のサイト http://www.stat.phys.titech.ac.jp/~nishimori/

最急降下法、シミュレーテッド・アニーリングと比較して、計算が高速化できる

### 超伝導量子計算機をめぐる最近の動き

- Google (+ UCSB)
  - Xmon: 2 qubitの忠実度が99 %を超える (2014)
  - 72 qubit プロセッサ "<u>Bristlecone</u>" (2018)
- IBM
  - 量子クラウドサービスIBM Q(2016)
  - 50 Transmons プロセッサ (2017)
- Intel + TU Delft
  - 49 qubitプロセッサ "<u>Tangle Lake</u>"(2018)
- Others
  - Rigetti Computing: 19 qubitsプロセッサ (2018)
  - Quantum Flagship (EU), QEO (USA), 量子計算センター (CHN)
- 日本
  - ・ 産総研、量子アニーリングプロセッサを開発(2018) arXiv:1809.01425
  - JST ERATO中村巨視的量子機械プロジェクト(2016年より)
  - 文科省Q-LEAP伊藤プロジェクト(2018年より)



# 「超伝導量子計算」まとめ

- ・超伝導を用いた新しい の確立に必要な要素は、 デバイス設計・物性解明・物質開発である
- 2011年からD-waveが発売している組み合わせ最適 化問題を解く量子計算機はニオブの を用いている
- ・量子アニーリングとは、2次元 系のイジング模型に基づいた計算原理である
- ・超伝導体を用いた量子計算機の原理は、超伝導電子の 効果である

# Summary of lecture

- 超伝導量子計算機は、すでに商用化されている
- ・高温超伝導デバイスが一般に行き渡る日はすぐそこに来ている
  - ・テラヘルツ光源は小型スターリングクーラーで動作
- 巨視的秩序パラメータの位相を操る「フェイゾニクス」の確立 が必須である
  - スピントロニクスとの融合
- ・固有ジョセフソン接合、テラヘルツ時間発展の研究は未開の 沃野である
- ・超伝導フェイゾニクスは量子計算技術と融合して AI分野へ の発展が期待される

# レポート課題

- 超伝導デバイスについて、講義で紹介したものでないものを 挙げ、そのデバイスの超伝導に由来する特性を説明せよ
- 最適化問題の解法について調査し、それらの特徴を述べよ
- 量子計算機について、超伝導を用いない方式を挙げよ
- ・講義の感想・意見・質問