

光る超伝導体

— THz 波を発振する固有ジョセフソン接合—

世界で初めて実験的に成功

<概要>

超伝導体が光る？発光する？夢のような話だ。果たして、それはどのような光なのか？それは、THz 帯¹ (10^{12} Hz) で肉眼では見えない。赤外線よりも波長が長く、マイクロ波より短い電磁波である。このような THz 領域の電磁波を、超伝導体を用いて発振させ、外部に取り出すことに世界で初めて実験的に成功した。

この THz 波は、高温超伝導体の固有ジョセフソン接合内をジョセフソン磁束が高速運動するとき、超伝導電子と絡み合い、集団となって超伝導プラズマ波が発生する。このプラズマ波がジョセフソン接合内部で共鳴し、電磁波として接合の外へ位相をそろえて放出される。これは、これまでの発光現象とは原理的に機構が異なり²、「第三の光」と呼ぶにふさわしい。超伝導体によるレーザーの発振が実現した。

<背景>

THz 波は、ちょうど電波と光波（光）の狭間にあり、光技術や電波技術がうまく使えない技術的に困難な領域であり、驚くほど開発が遅れている領域にある。この領域で使える光源、検出器の開発も極端に遅れており、暗黒領域と呼ばれている。

高温超伝導体は 1986 年にスイスにある IBM の研究所で発見³された。応用が大いに期待され、爆発的な研究が行われたことは記憶に新しい。その後、早 20 年を経ようとしているが、未だに半導体などのように日常的に利用されていない。その理由は、高温超伝導を高温で利用することがきわめて技術的に困難であるからである。

しかしながら、超伝導は電気抵抗がゼロという、極めて特徴的な性質を持つため、エネルギー損失が無く、しかも動作電圧を半導体などの $\sim V$ から $\sim mV$ に下げることができるから、ノイズがなく、動作速度も数桁速くできることから、高周波デバイスとして利用すれば、エネルギー密度を上げ、集積度を原理的には大幅に上げることができるから、半導体をしのぐ超高速・超高密度化が可能である。1970 年代、IBM は超伝導ジョセフソン素子を用いた超伝導コンピューターの開発に着手したが、技術的には可能だがコスト的な問題で実現しなかった。

¹ 電磁波のうち、周波数が $5 \times 10^{11} \sim 5 \times 10^{13}$ d/sec(または Hz)の領域であるものを指す。これ以下の周波数の電磁波はマイクロ波と呼ばれ、これ以上の周波数の電磁波は遠赤外線と呼ばれる。

² 光は、第一に、荷電粒子の加速度運動、第二に、量子軌道のエネルギー準位間の遷移によって起こることがこれまで知られている。ジョセフソン磁束の集団的強制運動によってジョセフソン磁束と超伝導電子の合成波が形成され、その電磁波部分を外部に取り出すという方法はこれまでに無く原理的に新しい。

³ J. Goerge Bednorz と K. Alexander Müller によって発見された。

1992年、ドイツのクライナー(Kleiner)らは、高温超伝導体では原子レベルでジョセフソン接合が形成されていることを示唆する実験事実を発見した[1]。これは、高温超伝導体の超伝導を担う CuO_2 面が、電氣的に不良導体である原子層を挟んだ積層したサンドイッチ構造を形成し、ジョセフソン接合となり、高温超伝導体は、さらにそれが多数積層した構造をしていると主張するものである。これは高温超伝導体の結晶中に、自然に原子レベルでジョセフソン接合が形成されていることを意味し、固有ジョセフソン接合と呼ばれている。

この結果は当時あまりにも斬新であったためにほとんど信用されなかった。

1993年、我々はこの結果を独立に検証し、固有ジョセフソン接合としての特性が高温超伝導体の様々な基礎物性に大きく関わっていることを明らかにした。特に、磁場中における高温超伝導体の異常な電気抵抗の発生は、この固有ジョセフソン接合が存在することによって超伝導電子の結合が弱められ、超伝導揺らぎが増強されるためであることを明らかにした。このため、超伝導電流が破壊され、抵抗が発生するのである。高温超伝導体は本質的に不均一超伝導体として理解されるのである。これが、高温超伝導体が高温領域で電気抵抗ゼロという、超伝導のもっとも基本的な性質を失う原因である。また、これが高温超伝導の応用が困難である原因でもある。

1994年、プリンストン大学のツイ(Tsui)らは、高温超伝導体の $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ にマイクロ波を照射すると吸収が起こることを発見した。彼らはこの現象をサイクロトロン共鳴のような共鳴現象で説明したが(この説明は誤りであった)、その原因は特定できなかった。

この現象に着目し、1995年、我々は、この現象がマイクロ波による超伝導プラズマ励起にともなう吸収現象であることを初めて明らかにした。この超伝導プラズマは高温超伝導の固有ジョセフソン接合を流れる超伝導電流によって起こることから、ジョセフソンプラズマと命名された。

ジョセフソンプラズマ現象それ自体には磁場を必要としないが、磁場中でも共鳴現象が観測される。磁場中では超伝導体の中に量子化磁束[3]が多数存在するから、この量子化磁束とジョセフソンプラズマが結合し、多彩な現象を作り出すことがその後の研究でわかった。たとえば、ジョセフソンプラズマ現象を使うことで高温超伝導体の高温領域で消失しかけた超伝導状態の磁束状態を調べることができる。高温超伝導体の磁束状態の研究がその後、ジョセフソンプラズマ現象を利用して大きく進展した。

異方性が極めて強い高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ では[4]、超伝導を担う CuO_2 面内に磁場をかけたとき、それ以外の場合と全く異なるジョセフソンプラズマ共鳴現象が起こることが、最近、発見された。 CuO_2 面に平行に磁場をかけた場合、量子化磁束はジョセフソン磁束[5]としてジョセフソン接合内に入り込むが、ジョセフソン磁束がある場合、ジョセフソンプラズマはそれがない場合とは全く異なり、磁場に比例して共鳴周波数が上昇する現象を発見したのである。そして、このモードはジョセフソン接合内を伝搬する超伝導電流と電磁波の絡み合った波であり、しかも横波であることがわかったのである。このことは逆に、ジョセフソン磁束のある状態で何らかの手法でこの波を生成することができれば、

マイクロ波か、それ以上の周波数の電磁波を取り出すことができるのではないかという予想ができる。

このような考えに基づき、超大型スーパーコンピューター（地球シミュレーター）を用いた数値計算が立木らによって行われた。その結果、ごく最近（1995年）、ジョセフソン磁束を電流で高速で運動させることにより、固有ジョセフソン接合から THz 波が放出されることが予想されることがわかった。

およそ1年前から、門脇らはこの検証実験を開始し、高品質の単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ の固有ジョセフソン接合素子[6]を用いて、THz 帯の電磁波の発振の実験的証拠を世界で初めて確認した（2005年5月18日）。その後、これまでに5つの異なるジョセフソン接合を用いて検証し、確認した。高温超伝導固有ジョセフソン接合を用いた THz 波の発振の成功であり、すなわち、発信器の開発の第一歩である。高温超伝導体を用いて、画期的な応用の可能性が生まれた。

<広がる THz 光の応用の可能性>

多くの分子、特に複雑な構造を持つ分子や、タンパク質、高分子などの分子の振動モードがちょうどこの THz 領域にあることが知られており、分子の構造や存在の同定が可能なことから、タンパク質やその他の生体物質の分析、同定、環境汚染物質の検出、薬物の検出、新薬の開発、医療や病気の診断、超高周波デバイス、大容量近距離通信など、セキュリティ、環境、医療、情報通信など、極めて広範な分野で有効であり、THz 波は最近、応用上、特に脚光を浴びている。今後10年以内の開発を目指す国家基幹技術として、第3期科学技術基本計画（2006～2010年度）の重点戦略目標のトップに取り上げられている。

<解説>

[1]. ジョセフソン接合(Josephson junctions)

2つの超伝導体が非常に薄い絶縁膜を介して接合されているとき、超伝導電子はこの絶縁膜を透過することができる。これは、純粋に量子力学的な効果であり、トンネル効果と呼ばれる。トンネル効果は通常の導体（金属や半導体など伝導性のある物質）でも起こるが、超伝導体の場合、超伝導電子がペアを作り、2個が一組となり、一つの単位として絶縁膜を透過するため、通常のトンネル効果とは区別してジョセフソン効果という。このような接合体をジョセフソン接合とよぶ。これは、このペアトンネリング現象を1962年に予言したジョセフソン（Brian David Josephson）にちなんだ名称である。ジョセフソンは1973年、江崎（Reo Esaki）とギエバー（Ivar Giaever）とともにノーベル物理学賞を受賞した。

[2]. ジョセフソンプラズマ(Josephson Plasma)

このジョセフソンプラズマには縦波と横波が存在する。は超伝導の相転移、すなわち、対称性の破れという自然界の基本原則を解明するために極めて重要な役割を果たした。電

磁波の縦波、横波のモードの同定も行われた。

[3]. 量子化磁束 (quantized magnetic flux, fluxoid)

超伝導電子は量子力学的な波となり超伝導体の中を伝搬する。超伝導電流が流れ、波が乱れるとある閾値以上の電流では超伝導電流の渦が発生し、その渦を「渦糸」(Vortex または Vortex line) と呼ぶ。この超伝導電流の渦は量子力学的な要請により量子化されており、渦を取り巻く全電流が作る磁場を計算するとすべて $\Phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-7} \text{ G} \cdot \text{cm}^2$ ($2.07 \times 10^{-15} \text{ Wb}$) を単位として量子化されている。この最小単位の超伝導電流の渦を量子化磁束という。

外部から印加した磁場は超伝導電流を発生させるから、磁場を印加することは超伝導電流を流すことに相当する。

このような超伝導電流の渦が発生し、それが量子化されることを最初に指摘したのはアブリコソフ (A. A. Abrikosov) であり (1957 年)、彼はこの功績によりギンツツブルグ (Vitaly L. Ginzburg)、レゲット (Anthony J. Leggett) とともに 2003 年ノーベル物理学賞を受賞した。

[4]. 高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (2212相)

1988 年、H. Maeda (前田 弘: 科学技術庁金属材料技術研究所筑波支所) らが発見した高温超伝導体であり、発見当時、初めて 100 K を超す超伝導体として注目された。その後の研究で、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ (2223相) と $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+\delta}$ (2201相) の 3 種類の化合物が存在することが判明し、100 K を超す超伝導体は 2223 の示す 110 K であり、2212 相は最大 92 K、2201 相は 25 K であることが知られている。

この物質はいずれも結晶構造上、 CuO_2 の超伝導層とそれを挟む絶縁体的な Bi_2O_2 層があることから電子構造が極めて異方的で、超伝導状態になってもそれが維持されている。すなわち、この物質は CuO_2 面を強い超伝導電流が流れる 2 次元的な異方性の強い層状超伝導体である。

[5]. ジョセフソン磁束 (Josephson vortex)

ジョセフソン接合内に形成される量子化磁束をいう。ジョセフソン接合部は絶縁体のため超伝導が弱められているため、接合面に平行に磁場をかけると磁束は最も超伝導の弱い部分に進入する。超伝導が弱く、従って超伝導電流が弱いから磁束の量子化条件を満たすだけの磁束を全体で維持するためには電流を広範囲で獲得する必要があり、渦を形成する電流は渦の中心から空間的に大きく広がって分布するようになる。このような磁束をジョセフソン磁束という。

[6]. 高品質大型単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$

ジョセフソンプラズマ現象や THz 発振には原子層レベルのジョセフソン接合 (固有ジョ

セフソン接合) が本質的に重要な役目を果たすが、この固有ジョセフソン接合が結晶全体にわたって一様でなければならない。すなわち、個々の固有ジョセフソン接合は同等であり、ばらつきがないことが重要である。このためには、欠陥のない極めて高品質な単結晶の存在が必要不可欠である。

門脇らは、高温超伝導体発見以来、高温超伝導体の高品質単結晶の育成に取り組み、大型で高品質の単結晶の育成に成功した。現在、大型でかつ、世界最高品質の単結晶が育成されており、世界的な高品質単結晶の供給基地となっている。

連絡先：数理物質科学研究科物性・分子工学専攻

門脇和男教授

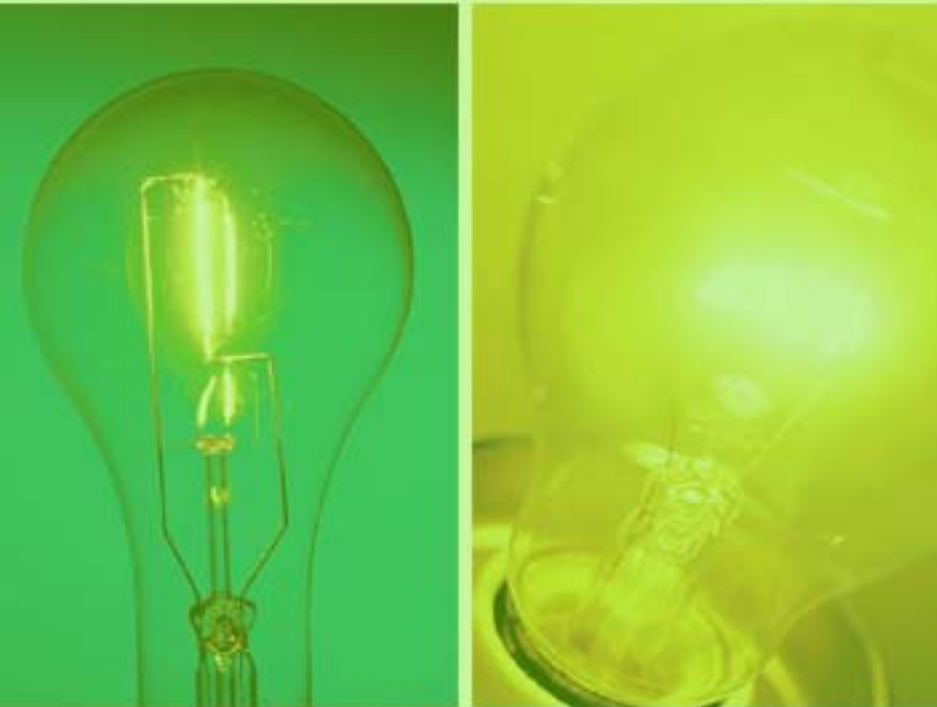
電話：029-853-5291



超伝導による連続THz波の発振

筑波大学数理物質科学研究科教授： 門脇和男

超伝導によるTHz発振を世界で初めて検証！



1. 原理が全く新しい(第3の光)
2. 連続THz光
3. チューナブル
4. エネルギー効率が高い

量子エレクトロニクス、環境、製薬、
医療・診断、セキュリティなど
きわめて幅広い応用に資する
新しい計測・分析基盤技術



発表内容

- 1. どのような原理による光源か？
 - 超伝導を使った新しい原理による第3の光とは？
 - 光の暗黒領域とは？
 - 固有ジョセフソン接合とは？

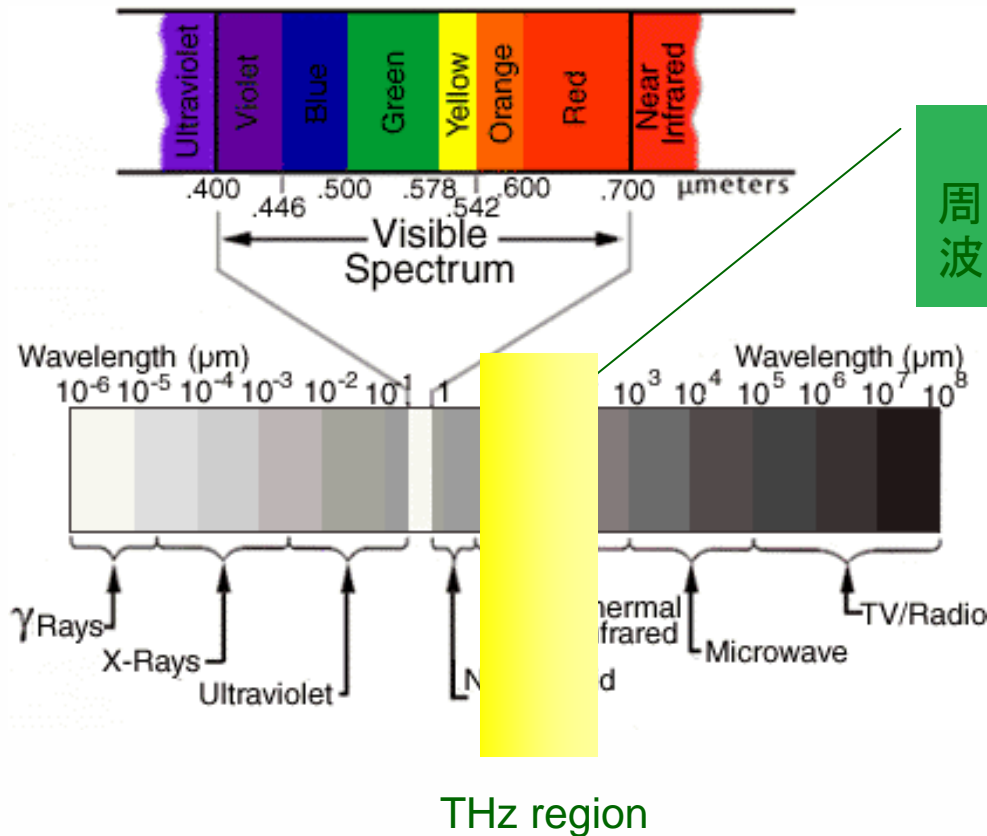
- 2. どのような実験か？
 - 検出方法
 - 実験結果

- 3. 社会的なインパクトと今後の展望



THz波とは？

THz波は電波と光の中間領域： 電磁波の一種

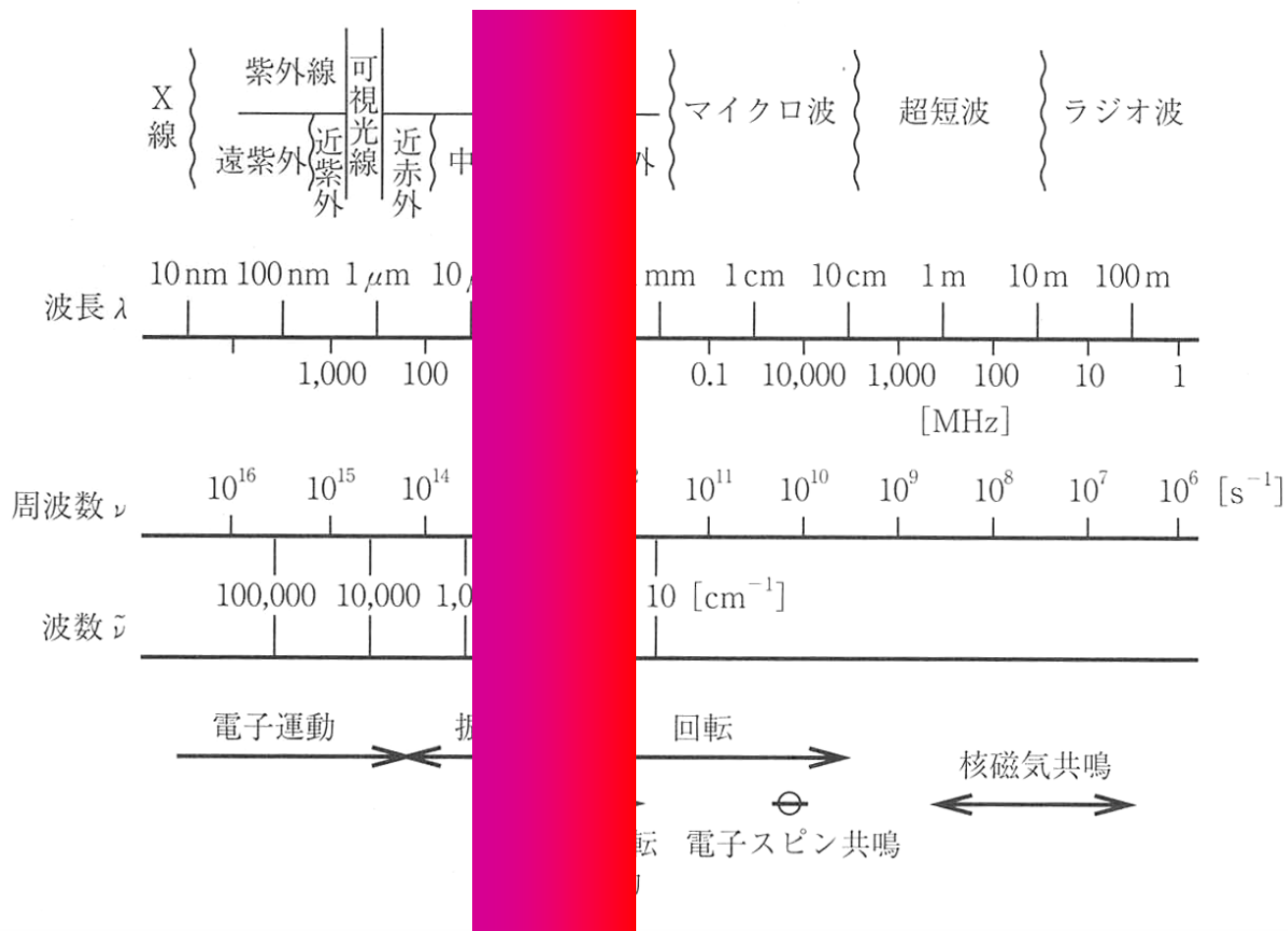


THz波
周波数: 10^{12} - 10^{13} Hz (Cycle/sec)
波長: 300 -30 μm

電磁波のスペクトル

$$\lambda = c / \nu$$

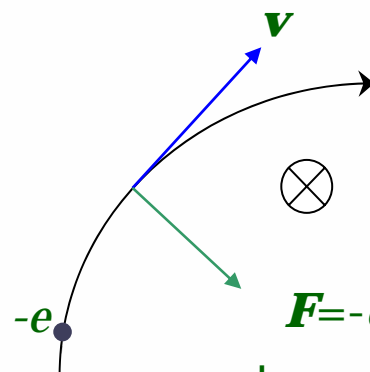
$$= \frac{2.99 \times 10^{10}}{\nu}$$



THz帯

発光の原理

- 1. 荷電粒子の加速度運動
 - シンクロトン放射(スプリング-8)
 - X線(レントゲン線)

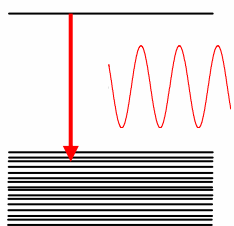


Lorentz force



スプリング-8

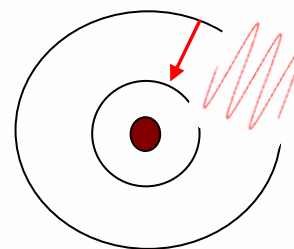
- 2. 量子エネルギー準位間の遷移
 - 原子・分子の発光
 - 電子・空孔の再結合(ペア消滅)
(LED、固体レーザーなど)



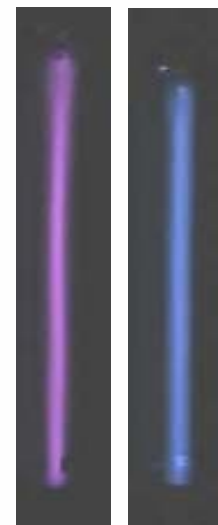
量子遷移



固体レーザー



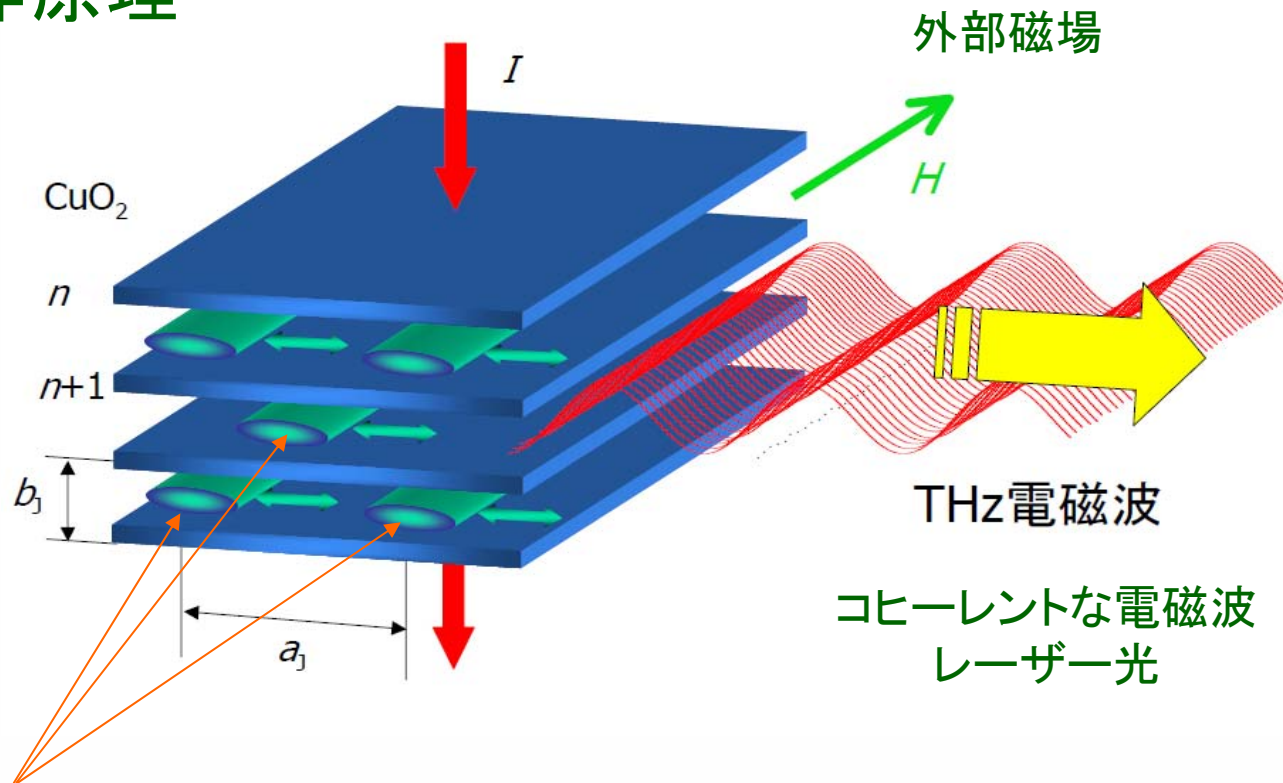
原子の軌道



放電管による原子の発光現象

超伝導体から光が！(THzの発光)

動作原理



ジョセフソン磁束

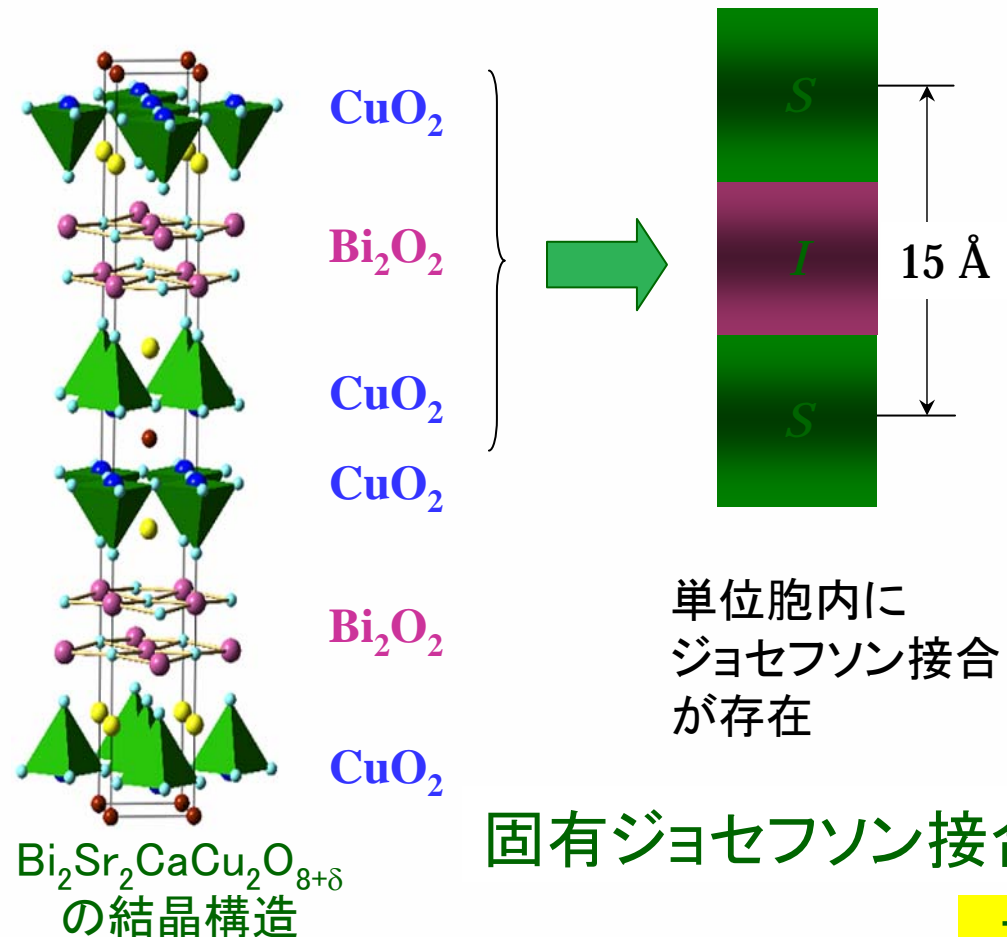
高温超伝導体の固有ジョセフソン接合
(*intrinsic Josephson junction*)

固有ジョセフソン接合とは？

特徴

- ・ 高温超伝導体に内在する理想的に均一なジョセフソン接合
- ・ 超伝導層が極めて薄い (~ 0.1 nm) 多層膜構造
- ・ plasma周波数 $\omega_p \sim 0.5$ meV は超伝導ギャップ $2\Delta \sim 60$ meV より十分小さい
- ・ Landauダンピングが無い (損失が少ない)

原子レベルで形成されたジョセフソン接合





研究の背景

実験事実1

高温超伝導体は結晶自体に原子スケールのジョセフソン接合を内在している
(固有ジョセフソン接合の発見: R. Kleiner, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **68** (1992) 2394.)

実験事実2

高温超伝導体の磁場中マイクロ波吸収の発見
(O. K. C. Tsui, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **73** (1994) 724.)

正しい理解

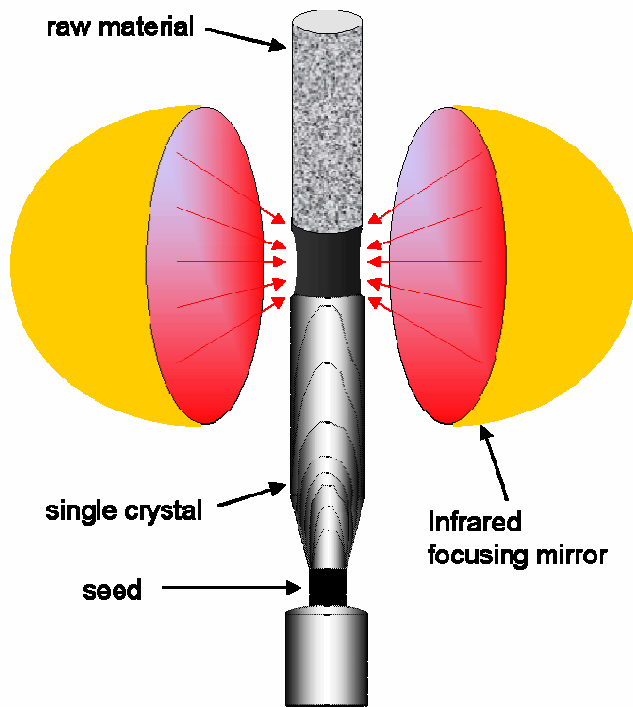
Y. Matsuda, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **75** (1995) 4512.
K. Kadowaki *et al.*, Phys. Rev. **B56** (1997) 5617.

理論的理解

M. Tachiki, *et al.*, “*Coherence in High Temperature Superconductors*”, eds. By G. Deutscher and A. Revcolevschi, p371 (1995).
M. Tachiki, *et al.*, Phys. Rev. **B71** (2005) 134515.

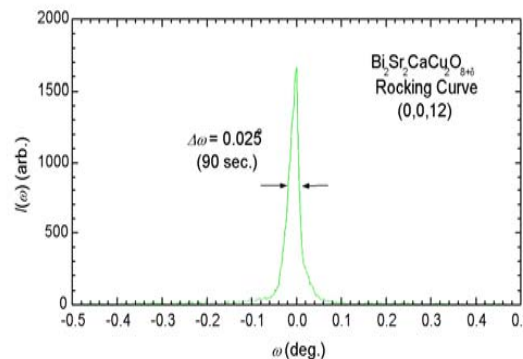
高品質大型単結晶が不可欠

- 均一な固有ジョセフソン接合



High Quality Large Single Crystal Growth
Sophisticated ILSTSFZ Method

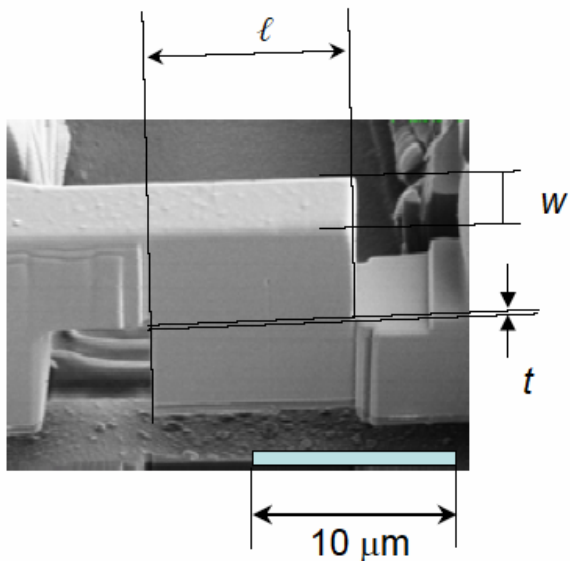
Laue photo



Single Crystal

Rocking Curve

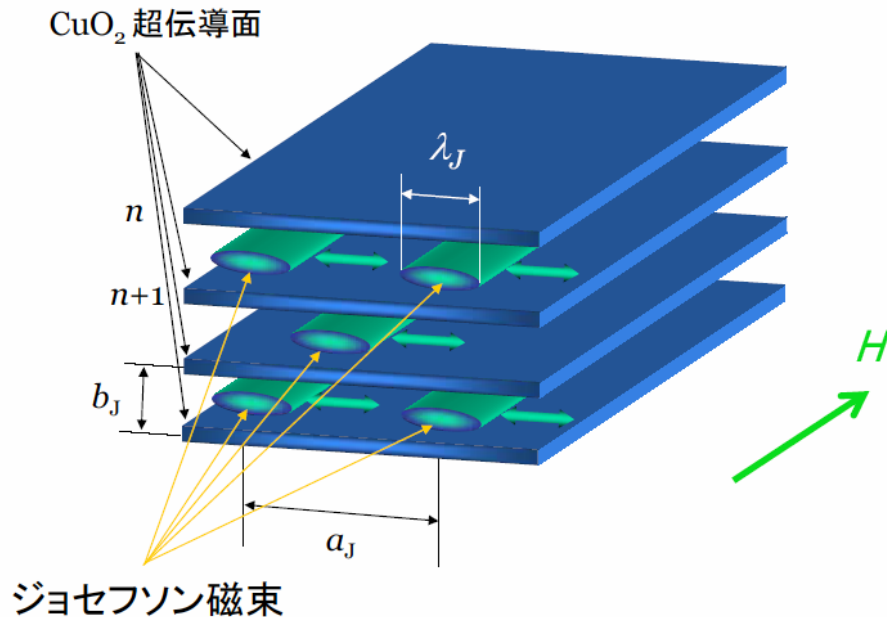
磁場中での層状超伝導体： ジョセフソン磁束の形成



l : $0.5 \sim 50 \mu\text{m}$, w : $1 \sim 10 \mu\text{m}$,
 t : $150 \text{ nm} \sim 3 \mu\text{m}$
 (CuO₂面が100~2000層)

実際の単結晶Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ}から
 作られた固有ジョセフソン接合部写真

$H^* > \sqrt{3}\phi_0 / 2\gamma s^2 \approx 3 \text{ T}$ でCuO₂面間が
 ジョセフソン磁束で隙間無く満たされる。
 (変形した3角格子を形成する)



THz電磁波の発生機構

超伝導体が光り輝く理由

外部からの定常電流 I による
ジョセフソン磁束の集団フロー（運動）
（交流ジョセフソン効果を誘導）



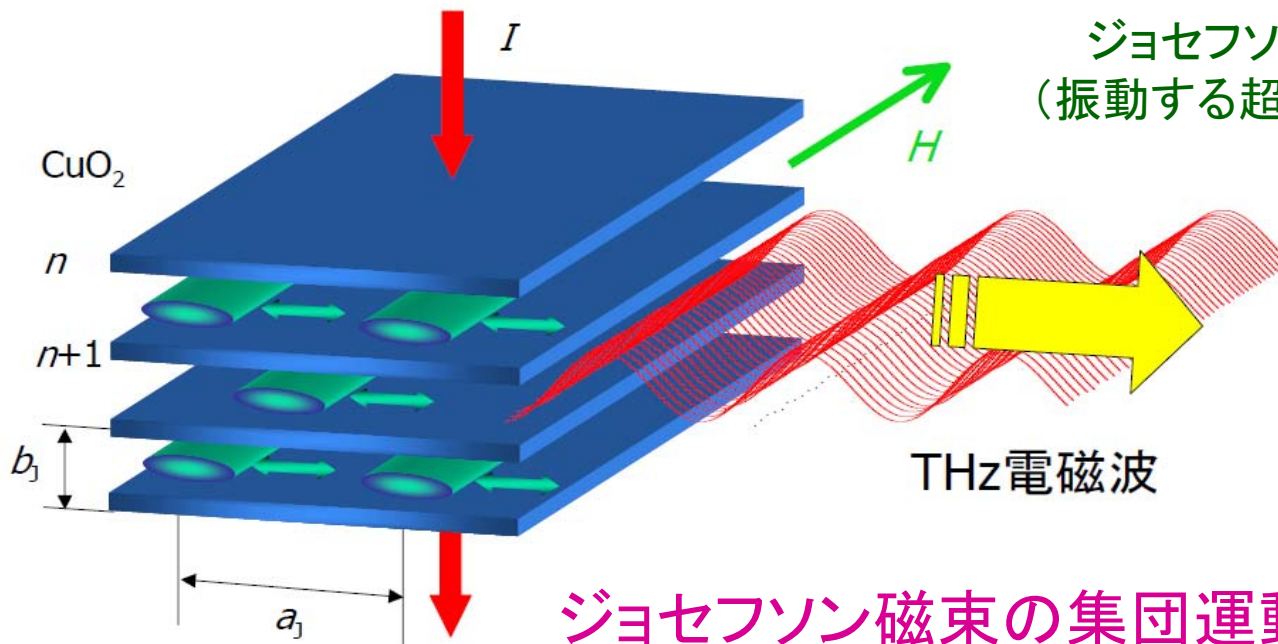
ジョセフソン磁束の非線形運動により接合内部
にジョセフソンプラズマが発生



ジョセフソンプラズマの生成
（振動する超伝導電流 + 電磁波）



電磁波部分を
外部へ放出



THz電磁波

ジョセフソン磁束の集団運動による混合増幅
自励発振型ジョセフソンプラズマの生成



発振の特徴

発振条件

- 非線型効果が重要 (ジョセフソンプラズマの励起)
- McCumberパラメータ β が小さい (損失が小さい → 良質の結晶が必要) ($\beta = 0.01 \sim 0.05$)
- 磁場 H 、電流 I はある適度な値が必要

特徴

- 連続発振 (半導体では不可能)
- 可干渉 (コヒーレント (coherent)) 光: レーザー光
- 周波数可変 (チューナブル (tunable))
- 高効率: 全エネルギーの約5%

* 紫色字は半導体では不可能または困難

研究の独創性・新規性

● 原理的に新しい電磁波発生法

ジョセフソン磁束の非線形集団運動

—————▶ ジョセフソンプラズマ励起

—————▶ 電磁波

● わが国オリジナルで独創的

過去10年にわたる超伝導プラズマ研究

+

高品質かつ大型単結晶

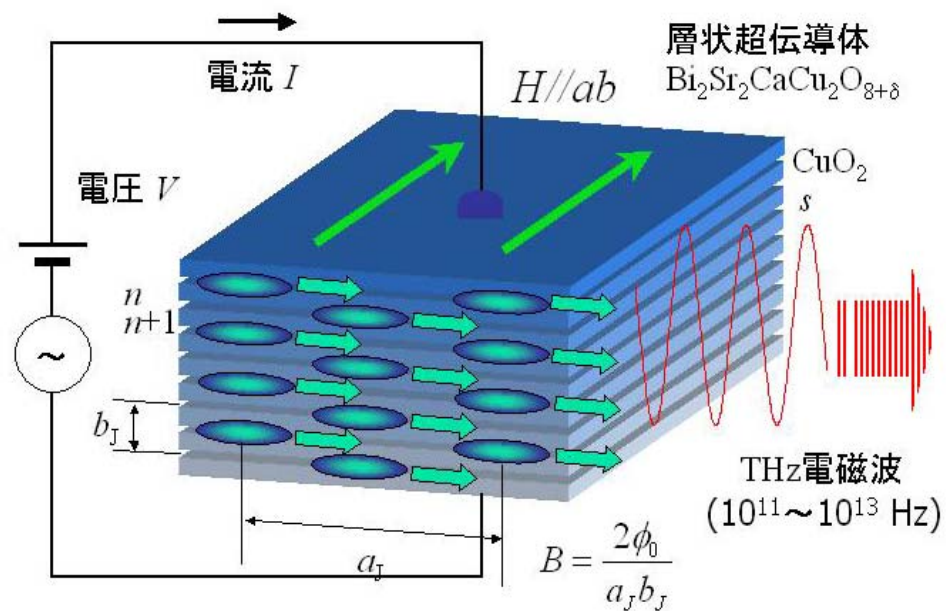
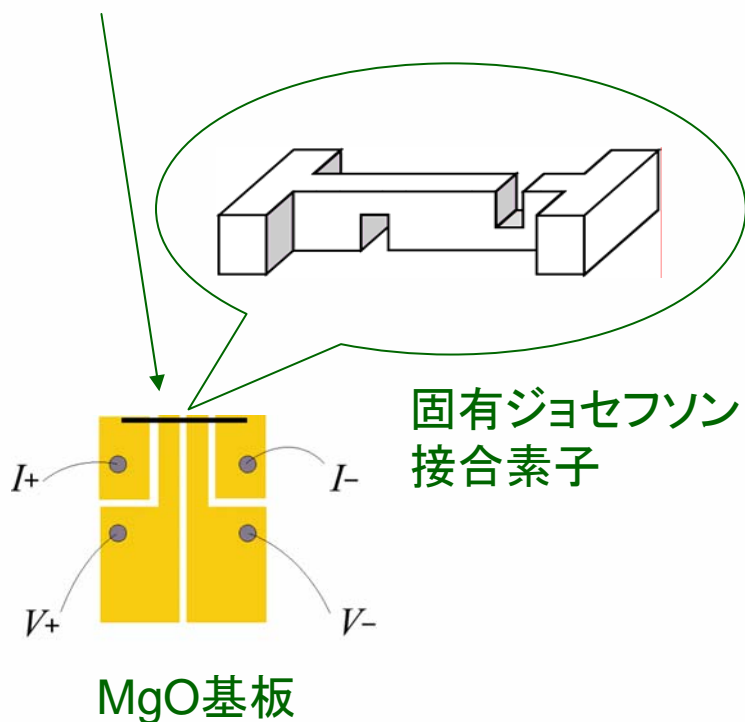
+

優れた理論

固有ジョセフソン接合素子 (実験)

- 微細加工を用いた固有ジョセフソン接合素子の作成

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 単結晶を
FIBにより微細加工



ジョセフソン磁束の集団運動 (I)

・ 接合インピーダンスの振動現象

インピーダンスの磁場に対する振動の周期

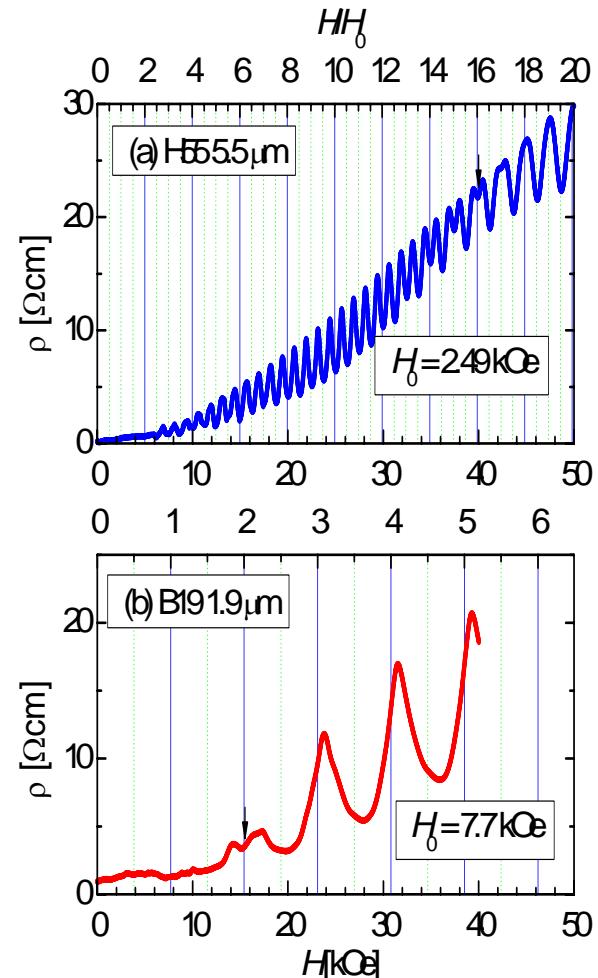
$$H_0 = \phi_0 / wt \quad \text{高磁場領域}$$

: 回折効果 (Fraunhoferパターン)

$$H_0 = \phi_0 / 2wt \quad \text{低磁場領域}$$

: 干渉効果 (DC-SQUID効果)

三角格子 ~~X~~ を形成する



ジョセフソン磁束の集団運動 (II)

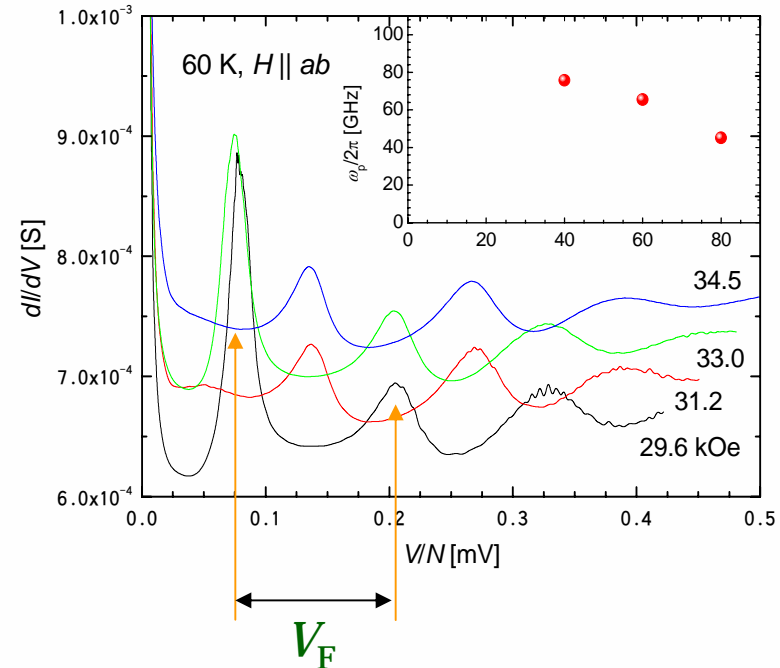
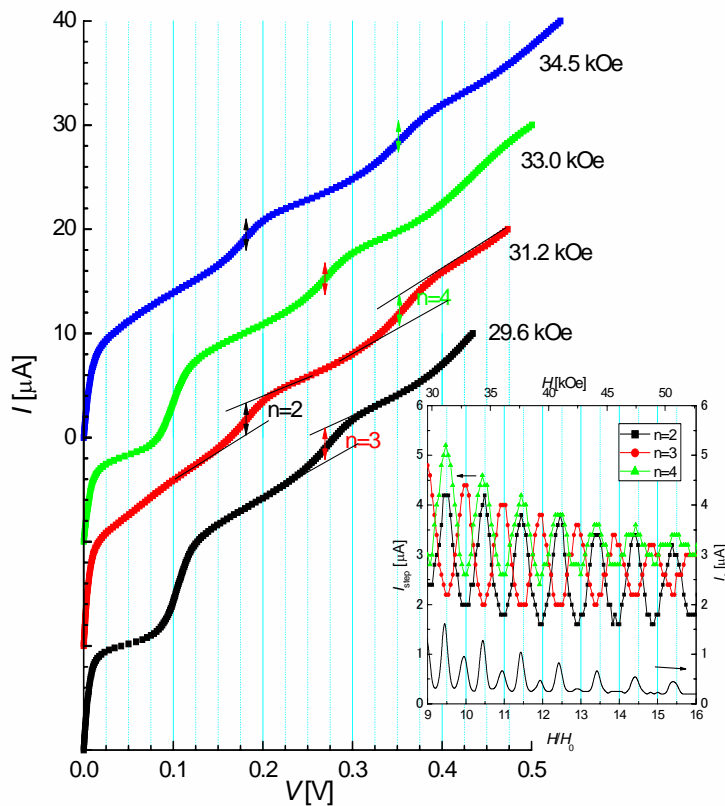
- Fiske Step*の観測

$$V_F = \phi_0 c_s / L$$

c_s : Swihart velocity $\sim 1.5 \times 10^{-3} c_0$,

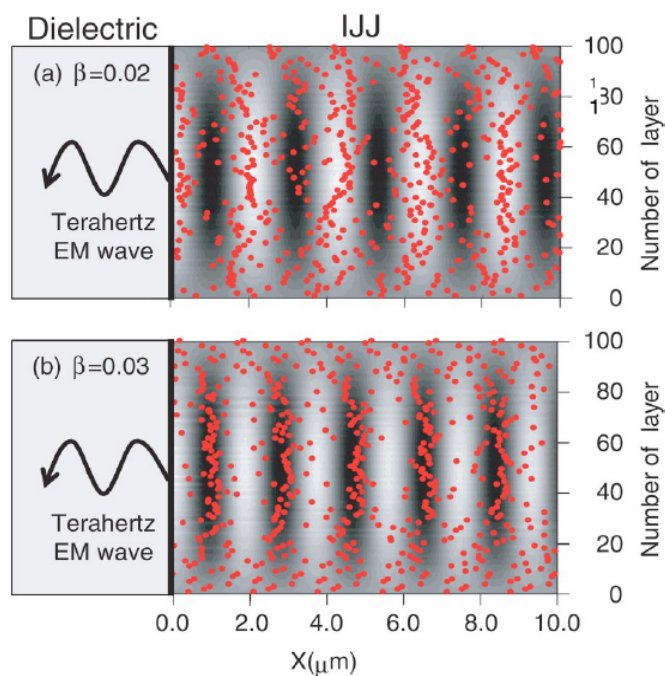
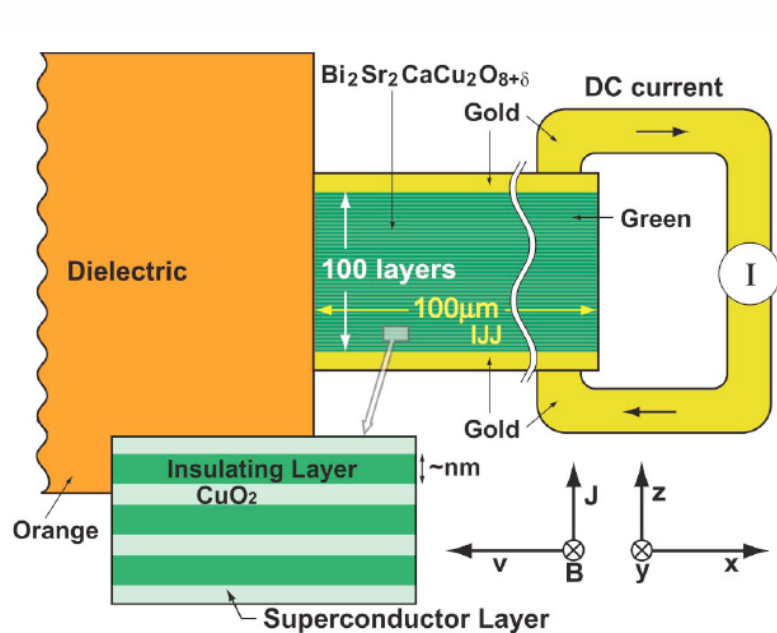
L : dimension of the sample

$v_F = c_s / L \sim 100$ GHz for $L = 4.1 \mu\text{m}$



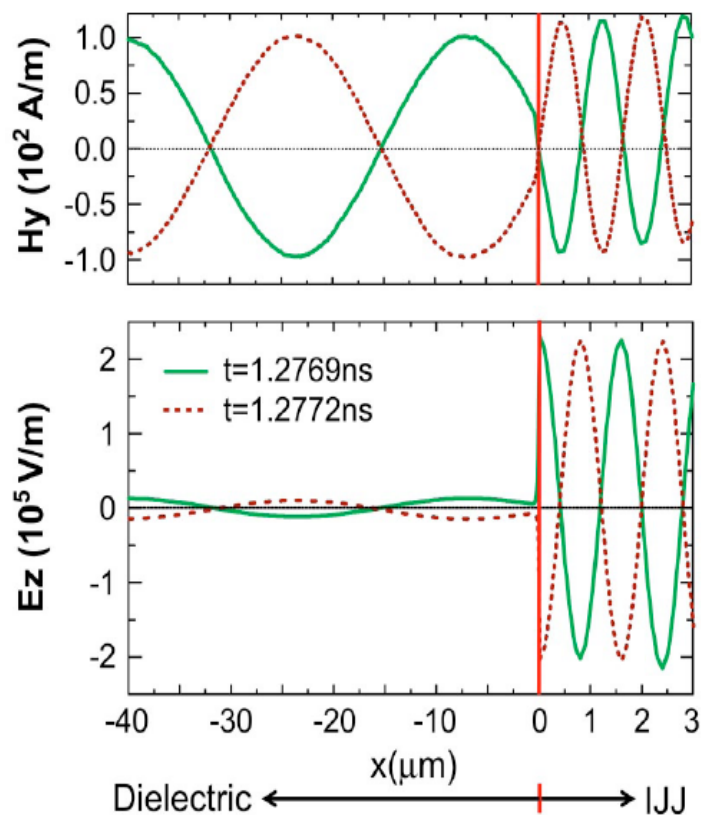
立木理論の結果 (I)

- 地球シミュレーターによる非線型波動方程式の解析

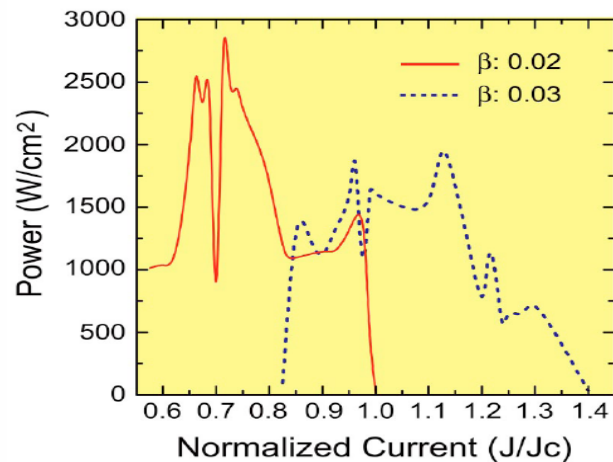
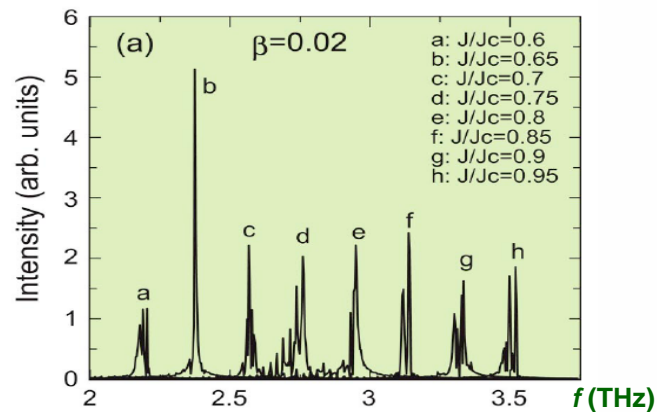


立木理論の結果(II)

Standing waves



power spectra

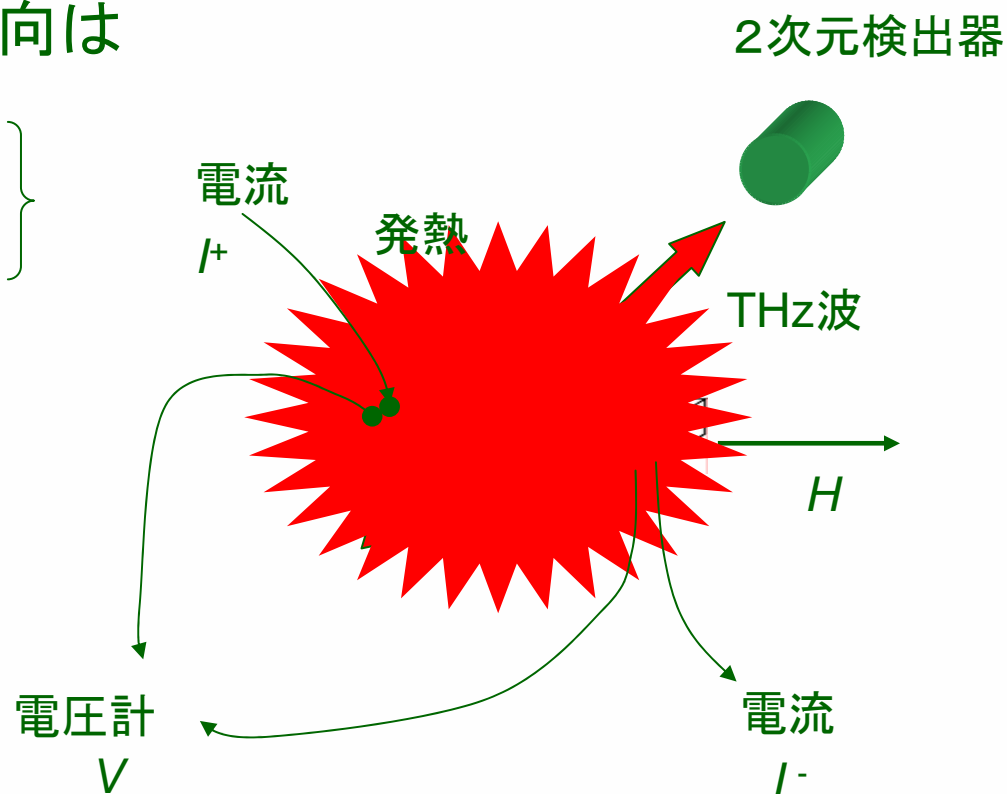


電磁波の直接検出(1)

- ボロメーターによるエネルギー積分法

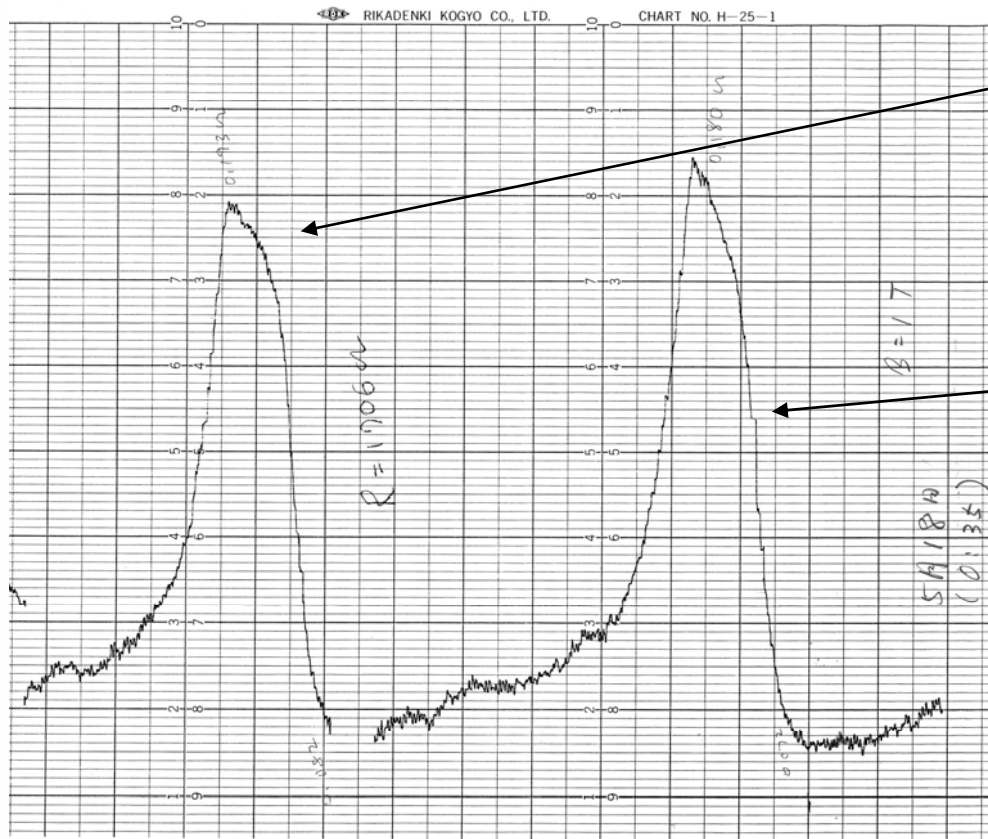
電磁波の放射方向は

{ 電流方向反転
磁場方向反転 }
で反転



実験データ

放射パワー(電力)の直接検出



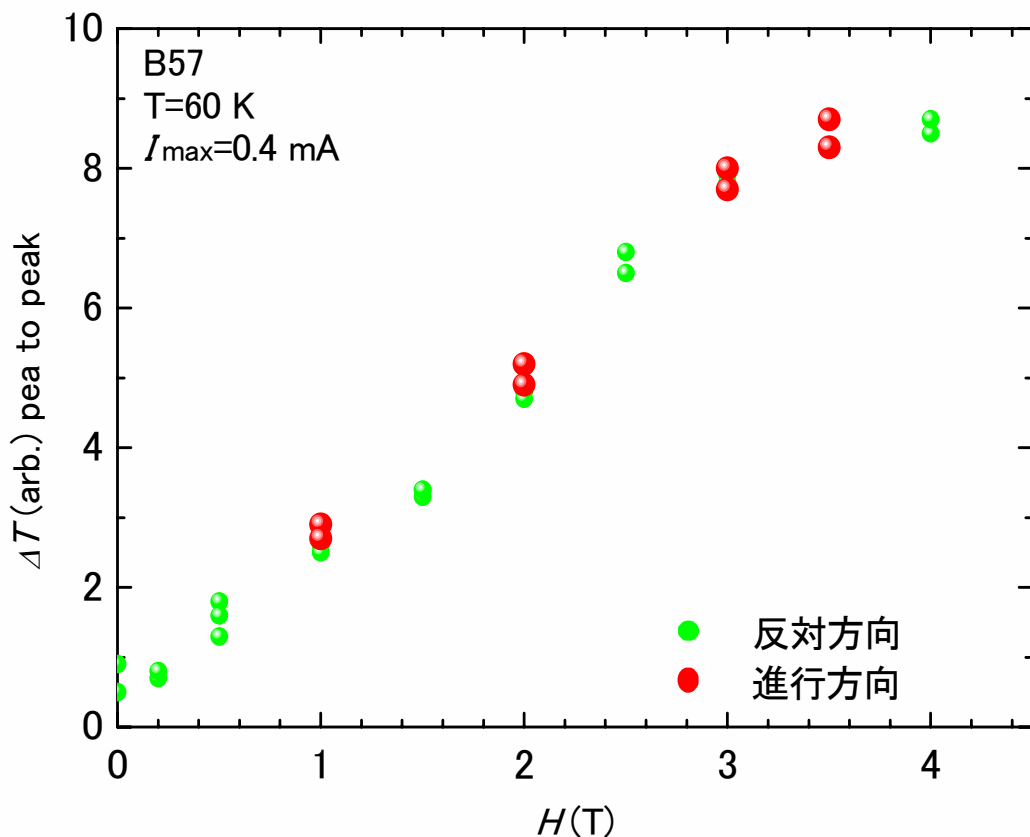
ジョセフソン磁束が
検出器と反対方向へ運動する
条件の時(小)

ジョセフソン磁束が
検出器の方向へ運動する
条件の時(大)

面積が電力に比例！

実験結果 (I)

電磁波のエネルギー = 全エネルギー - 熱エネルギー



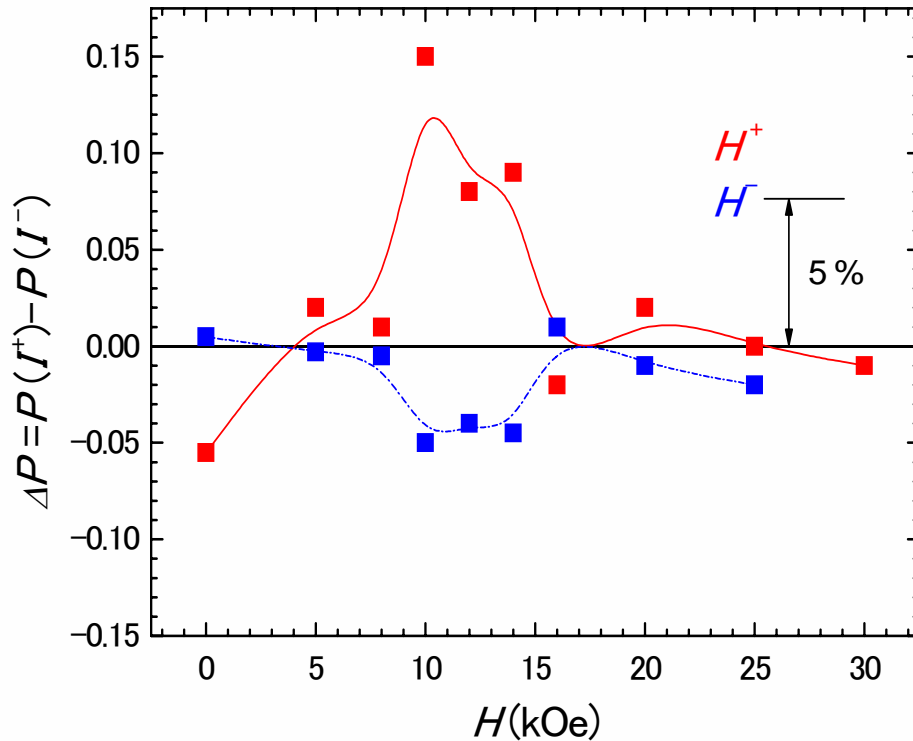
$$P = \frac{\text{Red Circle} - \text{Green Circle}}{\text{Red Circle}}$$

~5%

● ~0.1 mW

$P \sim 5 \mu\text{W}/10 \mu\text{m}^2$
~50 W/cm²

実験結果 (II)



	l (μm)	w (μm)	t (μm)	溝
B77	5 (3.5)	20 (18)	0.9	Yes
B58	5.3	20	0.8	No
B59	5.0	18	1.0	Yes
B60	5.0	2.5	0.2	No
B65	5.0	10.0	0.9	No

これまで調べた試料

$H \sim 1$ T付近に3~6%程度の差が検出される \longrightarrow 発振の直接的検証



社会的インパクト

- ✦ 全く新しいTHz発振の原理を考案し、世界で初めて実証した。第3の光を検証
- 発振光は半導体を用いた方法にはない優れた特徴を持っている。
- THz帯の電磁波は分子や高分子・タンパク質などの振動モードに一致するため、分子の同定・検出が可能である。このため、量子エレクトロニクス、環境、製薬、医療・診断、セキュリティなどはば広い応用が可能。
- ➔ きわめて幅広い応用に資する新しい計測・分析基盤技術の開拓と新産業創出へ。



今後の研究計画

- **固有ジョセフソン接合素子の理解と性能向上**
効率の向上、安定性、周波数スペクトル、温度特性、磁場特性など
- **高感度THz帯電磁波検出・分光器の開発**
 - 磁場: 数T
 - 温度: 4.2~300 K(1 mK以上の安定度)
 - 角度: 小型ゴニオメータ(精度:1/1000度)
 - 波長: 1 μ m~0.1 cm
- **検出器の開発**
 - 積分型:ボロメーター(Siボロメーター)
 - InSbホットエレクトロン検出器
 - その他:高感度新型検出器の開発
- **THz帯の導波路・アンテナ技術の開発**
近距離通信、イメージングなどに不可欠



謝辞

本研究は、

- 21世紀COEプログラム「未来型機能を創出する学際物質科学の推進」(文部科学省)
- 先端研究拠点事業「超伝導ナノサイエンスと応用」(日本学術振興会)
- 筑波大学数理物質科学研究科物性・分子工学専攻

の支援を得て実施されました。ここに厚く感謝いたします。



謝辞

この研究は研究室の教職員および、大学院生、並びに技官の方々の協力によって行われたものであり、心から感謝いたします。

教員： 掛合一弘(講師)、小久保伸人(講師)

21世紀COEプログラム研究員： Jovan Mirkovic

大学院生(博士課程)： 山本 卓、久保結丸、佐藤浩一、山崎拓也、朝田高志、清水夏美、村田圭、八巻和宏

技官： 齊藤静夫、室井光裕、皆川雄功

21aYF-1 固有ジョセフソン接合による THz 発振(はじめに)

筑波大数理物質 門脇和男

THz Generation by Intrinsic Josephson Junctions (Prologue)

Institute of Materials Science, U of Tsukuba, K. Kadowaki

近年、THz 領域の電磁波の重要性が多方面にわたり指摘されている。特に、この周波数領域には分子の振動や回転運動の振動モードが多数あり、分子構造の同定や環境汚染物質などの微量検出、医療やセキュリティ、通信などの広い分野にわたって有用であることが認識されている。ところが、これまで、THz 領域の電磁波は適当な光源や検出器がなく、また、光と電磁波のちょうど中間領域にあり、技術的な困難があり、開発が驚くほど遅れている領域である。現在、遠赤外領域から半導体技術により THz 領域の開拓が急速に進んでいる。

最近、超伝導を用いた THz 発振が注目されている。これは、原理的に新しい電磁波の発生方法であり、「第 3 の光」といえる。この紹介が本シンポジウムの主題である。

高温超伝導体は超伝導を示す平面的な CuO_2 面が、伝導性の貧弱な原子層を挟み、単位胞内でサンドイッチ構造を形成しており、そのひとつひとつが原子層レベルでジョセフソン効果を示すことが知られている。これは、固有ジョセフソン接合と呼ばれ、固有ジョセフソン効果による超伝導プラズマ現象、磁束状態でのプラズマ現象の研究が近年大きく進展した。特に、マイクロ波領域でのジョセフソンプラズマ共鳴現象の結果によると、磁場を CuO_2 面内に印加した場合、ジョセフソン磁束と超伝導プラズマとの相互作用のため、超伝導横プラズマが通常、励起されることが明らかにされた。この横プラズマは超伝導体内の電磁波と超伝導電子の集団運動であるから、このジョセフソン磁束を制御することで逆に超伝導プラズマを励起でき、それを試料の外へ電磁波として取り出すことができれば、発振器として動作することが期待される。高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ の場合、

ジョセフソンプラズマ周波数 ω_p は 200–500 GHz であり、横プラズマの磁場効果を使えばこの周波数は THz 領域に上昇すると考えられる。

このように、ジョセフソン磁束状態で高温超伝導体の固有ジョセフソン効果を利用すると THz 領域の電

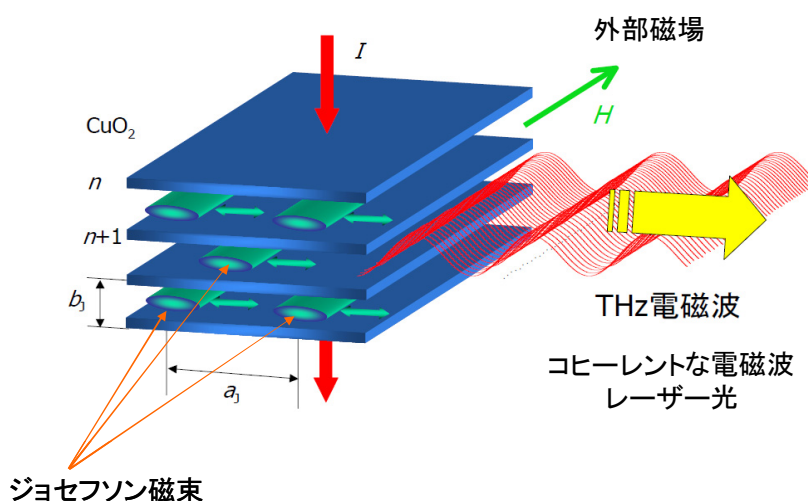


図 1. THz 発振の原理

磁波を発生できると予想されるが、最近になって、このことが理論と実験の両面においてほぼ実証された(理論は立木理論を参照)。このシンポジウムではこの両者の研究の最近の研究の最前線と発展状況を紹介しますと同時に、一方で最も応用に近い半導体を用いた THz 領域での研究の進展現状も概観してみよう。

以下に、超伝導体による THz 帯の発振の実験結果を説明する。

図1にその原理を示す。その実験方法を図2に模式的に示した。超伝導 CuO_2 面内に磁場を印加するとジョセフソン磁束が CuO_2 層間に進入し、大きく歪んだ 3 角格子を形成する。電流を面間に流すとジョセフソン磁束はローレンツ力により容易に運動を始める。ジョセフソン磁束はピン止め力が弱いため、僅かな電流で磁束フロー状態が実現できるのである。このフロー状態では面を横切る電流の磁束線による回折効果と干渉効果が動的に起こり、ジョセフソン磁束が複雑な集団運動をする。ジョセフソン効果が本質的に非線型であるため、解析的に運動状態の解を得ることは難しい。このジョセフソン磁束の集団運動がジョセフソンプラズマを励起し、それが THz 帯の電磁波となって試料の外へ放出される。

この放出された電磁波は図2のような方法で検出できる。すなわち、電流、磁場の方向に対しジョセフソン磁束のフロー方向は反転するから、フロー方向に電磁波がより強く放出されればその方向依存性を測定することで電磁波の到達を検出できることになる。

図3に実験結果を示す。これは
 (検出される全エネルギー) =
 (熱エネルギー) + (電磁波エネルギー)
 と仮定し、熱エネルギー分(等方的と仮定)を電流の反転に対する平均値として差し引き、さらにその磁場方向依存性を示したものである。このように磁場の反転に対し約 5%程度の差が見られ、これは電磁波によるものと結論できる。この電磁波のエネルギーは全エネルギー量から評価すると概ね数 $\mu\text{W}/10\mu\text{m}^2$ であり、すなわち単位面積当たり数 $10\text{W}/\text{cm}^2$ の出力に相当することになる。

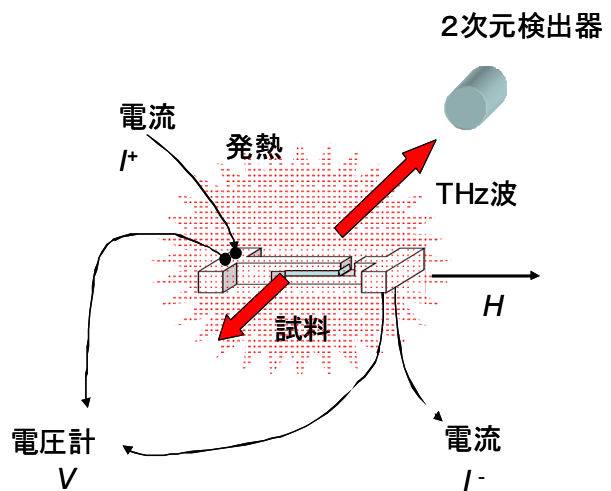


図2. 放出される電磁波の検出方法

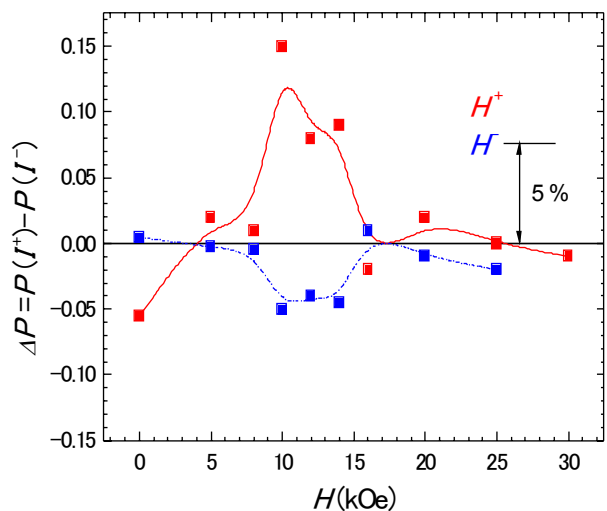


図3. 磁場反転効果 (差分, $T=40\text{ K}$)