

超伝導検出器の開発

岡山大学大学院自然科学研究科

石野 宏和

ishino@fphy.hep.okayama-u.ac.jp

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

羽澄 昌史

masashi.hazumi@kek.jp

理化学研究所 テラヘルツイメージング研究チーム

美馬 寛

mima@riken.jp

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

吉田 光宏

mitsuhiro.yoshida@kek.jp

2013年(平成25年)5月18日

1 イントロダクション

KEK 測定器開発室超伝導検出器 (SCD, Superconducting Detector) グループは 2007 年に活動を開始し、SCD の開発を続けている。本稿では、SCD の開発状況を紹介します¹。

超伝導検出器 (SCD) とは超伝導体で構成されている検出器である。超伝導体内では 2 つの電子からクーパー対が構成され、それらの寄与により直流電流に対しては抵抗が 0 になる。超伝導体内の電子のエネルギー準位を見ると、半導体と同様にフェルミエネルギーを中心にしてエネルギーギャップが形成され、クーパー対はフェルミエネルギー上に存在する。外部からエネルギーが付与されると、クーパー対が破壊されて伝導帯に電子が持ち上げられる。それらの電子は準粒子と呼ばれる。SCD は準粒子の数の変化を検知し、その数を数えることによりエネルギーを測定する。超伝導体内のギャップエネルギー Δ と超伝導転移温度 T_c の間には、BCS 理論によると

$$2\Delta = 3.52k_B T_c \quad (1)$$

の関係がある。ここで k_B はボルツマン定数である。クーパー対を 1 つ破壊し準粒子を 2 つ生成するのに必要なエ

ネルギーは $2\Delta/\eta$ である。ここで $\eta = 0.57$ は変換効率である。アルミニウム (Al) であれば $2\Delta/\eta = 0.34/0.57 = 0.60$ meV である。これはシリコンで電子・ホール対を生成するエネルギー (~ 3 eV) の約 5 千分の 1 程度なので、SCD は原理的に半導体検出器をはるかに凌駕するエネルギー分解能を持つことができる。また、小さいギャップエネルギーを持つことから、SCD はミリ波帯の電波から X 線・ γ 線といった高エネルギー光子までの広い波長領域と α ・ β 線といった荷電粒子を単一技術で検出することができる。

SCD には様々な種類が存在する：主なものとして、超伝導転移端 (略して TES, Transition Edge Sensors) ボロメータ²、超伝導トンネル接合素子 (STJ, Superconducting Tunnel Junctions) と力学的インダクタンス検出器 (MKID, Microwave Kinetic Inductance Detectors) が挙げられる。それぞれの種類の検出器は、その特性に従って様々な用途に使分けられている。これらの SCD は、ミリ波・サブミリ波天文・宇宙背景放射・X 線天文・暗黒物質探索・ニュートリノ絶対質量測定といった様々なところに利用・応用されている、あるいは考えられている。

我々のグループはこれまで主に STJ と MKID の開発を行ってきたので、これら 2 つの検出器の開発の現状について述べる。

¹SCD グループでは、筆者ら以外にも樹林敦子 (岡山大)、服部香里 (KEK)、岐部佳朗 (岡山大)、渡辺広記 (総研大) が活躍しています。また、筑波大学が中心となって宇宙背景ニュートリノ探索に向けた Hf-STJ と Nb/Al-STJ の開発も進めています³、これについては今後別の記事になると考えて割愛します。

²TES はクーパー対破壊を利用しないで、超伝導と常伝導のはざまでの抵抗変化を測定するので、上で述べた検出原理とは異なる。

2 超伝導検出器作製装置群と性能評価システム

検出器の詳細を述べる前に、SCD の開発に必要な超伝導検出器作製装置群と性能評価に用いる冷凍機について述べる。

我々は主に KEK クリーンルームにある超伝導検出器作製装置群を用いて SCD を作製している。SCD 作製には、フォトリソグラフィ技術を用いる。そのために、金属や絶縁薄膜を形成するスパッター装置、薄膜を削るエッチング装置、パターンを形成するアライナー露光装置、検出器の出来栄をチェックする段差計や光学顕微鏡・AFM・電子顕微鏡を用いる。SCD 作製時間は、工程数にも依存するが、簡単なものでは数時間、工程が複雑なものでは 2 日間程度かかる。

超伝導は極低温で発現するので、検出器を作動させるためには冷凍機が必要である。低雑音を実現するためには、超伝導体の転移温度 T_c の 10 分の 1 程度まで冷却するのが望ましい。例えば、SCD に良く使われている Nb は $T_c = 9.2$ K である。液体 ^4He の減圧により 1.5 K 程度まで冷却できるので、Nb のみから構成される SCD の性能評価は、液体ヘリウムに浸ければ可能である。一方、Al ($T_c = 1.2$ K) を用いる場合は、0.3 K まで冷却できる ^3He ソープションポンプ式の冷凍機、さらに 0.1 K 以下まで冷却できる希釈冷凍機や断熱消磁冷凍機を用いる。SCD に Al を用いるのは、式 (1) により T_c が小さいほど Δ が小さくなるため、同じ付与エネルギーに対してより多くのクーパー対を破壊することができるからである。また、Nb と Al を組み合わせることにより、ギャップエネルギーの違いを利用して準粒子を閉じ込めてより感度を上げることができる。

冷凍機の 1 例として、図 1 に高エネ研の ^3He ソープション冷凍機の写真を示す。この冷凍機は機械式で、液体 ^4He を用いないので無冷媒冷凍機とも呼ばれる。 ^3He は大変高価なため、容器内に密閉されている。パルスチューブ冷凍機により容器内の ^3He を液化し、チャコール吸着ポンプを使って ^3He の減圧蒸発を行うことにより 0.3 K まで冷却する。最低温度は最大約 24 時間維持される。

3 STJ の開発

STJ は超伝導体・絶縁膜・超伝導体のサンドウィッチ構造 (SIS 構造) を持つジョセフソン型検出器である。片方の超伝導体にエネルギーが付与されてクーパー対が破壊、準粒子が生成されるとトンネル効果により準粒子が絶縁膜を通り抜ける。STJ 両端にバイアス電圧を印加することにより準粒子を回収し電流として検出する。STJ



図 1: KEK の 0.3K 無冷媒冷凍機の外観。

は主に X 線の検出器として利用されてきた。最近、平面アンテナと STJ を結合することにより、サブミリ波を直接検出する検出器が提案・実証された [1]。我々のグループは、将来の宇宙背景放射やミリ波・サブミリ波天体観測を行うための検出器として開発を始めた。

STJ には他の検出器と比較していくつかの特徴がある。まず大きなダイナミックレンジを持ち、速い応答 ($\sim \mu\text{sec}$) を持つ。後に見るように Nb STJ では 0.8K 以下では雑音の大きさが変わらず信号応答も変わらないので、温度制御の精度はあまり必要ない。作製方法は十分成熟している。一方で、ジョセフソン電流を抑制するために直流磁場を印加する必要があり、また多重読み出しが容易ではない。これらの不利な点をもってしてなお STJ が用いられるのは、クーパー対破壊以外に光助成トンネル効果 (PAT, Photon Assisted Tunneling) [2] が検出原理として存在するからである。PAT は、SIS 構造をまたいだ印加電圧 V を用いて、

$$h\nu > 2\Delta - eV \quad (2)$$

の条件を満たす光子であれば起こすことができる。ここで、 h はプランク定数、 ν はミリ波周波数、 e は素電荷を示す。つまり、エネルギーが 2Δ 以下の光子でも価電子帯にある電子を絶縁膜をまたいで伝導帯に持ち上げることができ、検出可能となる。

過去の検出器は、集中定数型の複数の STJ を並列に配置することにより LCR 回路を形成し共振を起こし、帯域幅を確保した。我々のグループも当初このデザインに基づいて STJ の開発を行った。図 2 は我々のグループが初めて STJ で撮ったミリ波 (周波数 90 GHz, 波長約 3 mm) のイメージを示す。一方で、この検出器には

測定したい周波数で共振するデザインを設計することが容易でない欠点があった。著者の一人である美馬は、分布定数回路であるマイクロストリップ形を持つ伝送線路型 STJ を提案・作製し [3], 広い周波数領域と大きな帯域幅を持ち、かつ共振周波数の選択が容易な検出器の開発に成功した [4]。

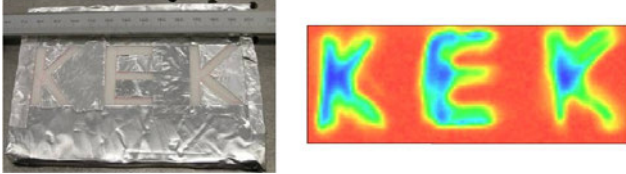


図 2: 撮像で用いた金属マスク (左図) と STJ で撮像した 90GHz ミリ波 (右図)。金属マスクを 1mm ずつ動かしながら 90GHz ミリ波の強度を 1 つの STJ で測定した。

図 3 は、今回開発されたアンテナ結合伝送線路型 STJ の構造を示す。シリコン基板上に Nb の薄膜でできた広帯域な平面对数周期型アンテナの上にインピーダンス整合ストリップラインが構成され、両端が伝送線路型 STJ で支持されている。アンテナから入ってきた電磁波はストリップライン上に電場を励起し、両端の STJ に伝送される。STJ の先端は解放されており、ストリップラインとはインピーダンスが不連続なために、STJ ストリップ長が半波長の整数倍の長さを持つ周波数信号が選択的に共振を起こす。STJ は、Nb/Al/AIO_x/Al/Nb の積層構造になっている。Al の厚みは約 10nm、絶縁膜である AIO_x の厚みは約 1nm である。図 4 に電子顕微鏡で撮った断面像を示す。STJ の分布定数回路の係数はほぼそれらの物性値で決まるので、伝送線路型 STJ の長さを決定すれば測定したい周波数領域のみを選択することができる。

図 5 はフーリエ分光器³による測定結果を示す。STJ に印加するバイアス電圧を増やすと、測定可能周波数の下限がクーパー対破壊に必要な $2\Delta/h$ から式 (2) に従って、減っていくのが分かる。周波数 f は、伝送線路型 STJ の長さ $L = 40 \mu\text{m}$ と波長 λ を用いて $a = 2L/\lambda$ と表すとき、 $f = v/2L \cdot a$ という関係式になる。ここで v は伝送線路型 STJ をミリ波が伝わる速さであり、 a を規格化された長さ (normalized length) と定義する。伝送線路型 STJ の長さが $40 \mu\text{m}$ ($20 \mu\text{m}$) のものについて、 a が 1 以上の整数 (偶数) のとき共振が起きるものとして、共振周波数と a をプロットしたものが図 6 である。6 つの異なるデザインで共振周波数が一致し、また $20 \mu\text{m}$ の STJ については偶数のところでのみ共振が見えており、STJ の長さが半波長の整数倍で共振を起こすという解釈を支持する。また、傾きから得られた伝送速度は光速の約 3% となった。これは、伝送線路型 STJ の単位長

さ当たりの静電容量 C_0 とインダクタンス L_0 から得られる $1/\sqrt{L_0 C_0}$ の計算値と一致する。

図 5 において、それぞれのピークの幅は帯域幅を示す。STJ の常伝導状態での電気抵抗 R_n と STJ の静電容量 C を用いると、期待される帯域幅は $1/(\omega C R_n)$ と表される。期待値は周波数に依存し 1~3% である。一方、フーリエ分光器の分解能を考慮してピークをフィットして得られた結果は、3~10% であり、予測値より数倍大きい。これは多重トンネル効果による増幅効果により、 R_n が減ったためであると考えられるが、より詳細な研究・検証が今後必要である。

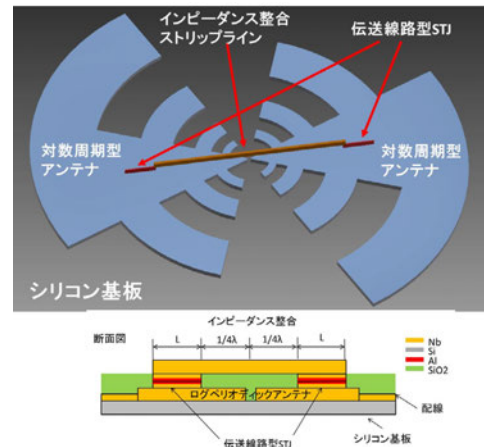


図 3: アンテナ結合伝送線路型 STJ の 3次元構造 (上) と横から見た構造 (下)。

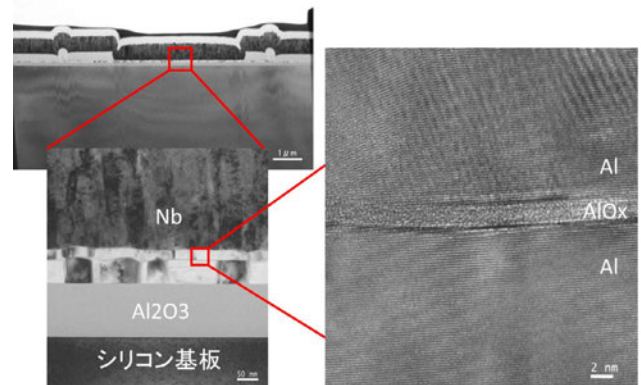


図 4: 作製した STJ の断層の透過型電子顕微鏡の写真。左上からスケールが小さくなり、右下では、厚さ 1.5 nm の AIO_x 絶縁層が形成されているのがわかる。

STJ の主な雑音源は、絶縁体膜を通して流れる漏れ電流によるショット雑音である。漏れ電流は、熱励起による準粒子のトンネル電流に起因し、温度に指数関数的に依存し、低い温度ほど小さい。ところが、絶縁膜に欠陥である穴 (ピンホール) があったり、ジャンクション周辺からの回り込み電流があると、漏れ電流が増える。前者は、リフトオフ製法によって金属薄膜に余分

³フーリエ分光器は検出感度の周波数依存性を測定する装置。

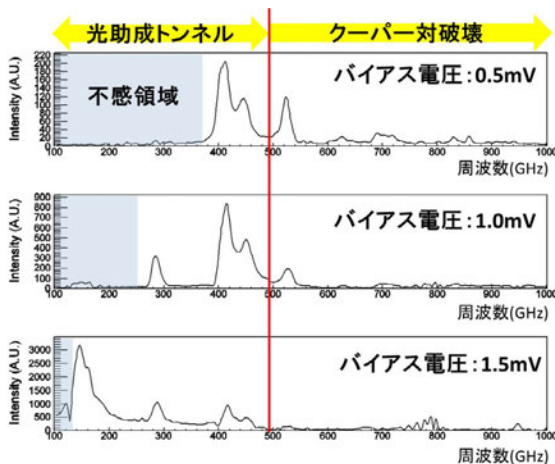


図 5: アンテナ結合伝送線路型 STJ の周波数応答のバイアス電圧依存性. アンテナ応答周波数 150 GHz 以上, STJ ストリップ幅と長さはそれぞれ $2 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$ のデザインのもの. 500GHz の所の実線 (赤線) は, STJ の電流・電圧特性から求めたギャップエネルギーに相当する周波数を示す. Al と Nb の近接効果により, ギャップエネルギーは純粋な Nb のそれよりも小さい.

なストレスを与えないことによって, 後者は陽極酸化方法によってジャンクションの周りを厚く酸化することによって避けることができた. 図 7 は, STJ の漏れ電流と温度の関係を実測値と BCS 理論の予言と比較したものである. 0.8 K での漏れ電流は 4.2 K での値の 10^{-6} 程度になっており, これは世界最高水準である. なお, 0.8 K 以下で漏れ電流が減らないのは, ギャップエネルギー Δ が実数ではなく複素数であるためという説があるが明らかになっていない. STJ はこのような物性の性質を詳しく調べる装置としても将来役に立つかもしれない. 測定漏れ電流を I とすると, NEP⁴は,

$$\text{NEP} = \frac{h\nu}{\eta} \sqrt{\frac{2I}{e}} \quad (3)$$

と表される. 検出効率 $\eta = 0.5$ と仮定すると, $\nu = 414 \text{ GHz}$ で $\text{NEP} = 7.8 \times 10^{-17} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ と見積もられる. これは地上でサブミリ波を観測するのに十分な雑音レベルである.

4 MKID の開発

MKID は約 10 年前に提唱された比較的新しい検出器である [5]. MKID の一番の特徴は, 周波数領域読み出しにより 1 本の配線で原理的に 1000 チャンネルの読み出しが可能であることである. また, STJ と違い単層または 2 層の金属薄膜のみから構成され, 作製が容易である. ダイナミックレンジが大きく, 応答は速い ($\sim \mu\text{sec}$).

⁴Noise Equivalent Power. ノイズパワーと等価になる入力パワー.

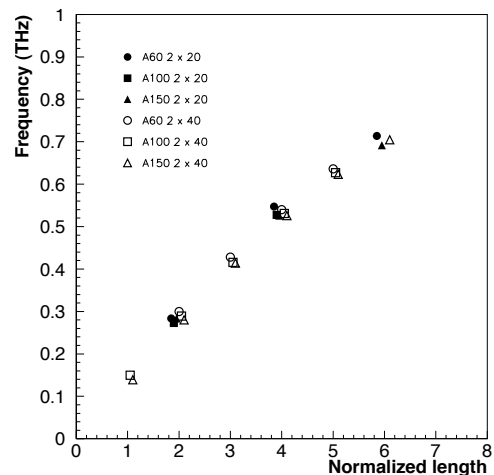


図 6: 周波数と規格化された長さの関係. 黒印は幅が $2 \mu\text{m}$, 長さが $20 \mu\text{m}$ の STJ について, 白印は幅が $2 \mu\text{m}$, 長さが $40 \mu\text{m}$ の STJ について示す. 丸, 四角, 三角印はそれぞれ対数周期アンテナが 60 GHz, 100 GHz, 150 GHz 以上に感度があるものを示す. 横軸の各位置で見やすいようにわざと少しずらして表示している. 高い周波数で傾きが変わっているように見えるのは, クーパー対破壊作用が働き損失効果が効くためである.

また, バイアスが不必要であるので, バイアス用のケーブルが要らない. よって, 検出器に接続するケーブルの数は, 入力と出力の 2 本のみで, 冷凍機への熱流入が他の SCD と比較して小さい.

MKID の構造を図 8 に示す. MKID は共振器とフィードラインから構成されている. 共振器はそれぞれ独自の共振角周波数 $\omega = 1/\sqrt{LC}$ を持つ. 通常 $3 \sim 8 \text{ GHz}$ の範囲が共振周波数として使われる. ここで, L と C は共振器のインダクタンスと静電容量である. フィードラインに各共振器の共振周波数信号を入力すると (図 8 の A に相当する所), それぞれの共振器は図 8 の D の部分から自分自身の共振周波数のみ吸収するので, (図 8 の B からの) 出力は 0 になる⁵. 共振器のインダクタンス L は, 共振器の幾何学的構造から決まるインダクタンス L_g と, 超伝導自身が持つ力学的インダクタンス (kinetic inductance) L_k の和である: $L = L_g + L_k$. L_k はクーパー対の運動エネルギーに関連する量で, その大きさはクーパー対の密度に依存する. 外部からエネルギー付与がありクーパー対の一部が破壊され密度が変わると, インダクタンス L が変わり, 従って共振周波数も変化する. そうなると, これまで出力が 0 であった信号が出力されるようになる. 図 9 に, MKID の回路模式図と, 共振周波数の変化による振幅と位相の変化の様子を示す. どの周波数信号の出力が変化したのかを見ることによ

⁵実際には, 共振器とフィードラインの容量結合の大きさに依存して出力が変わる. ここでは話を簡単にするために, 出力が 0 になると仮定する.

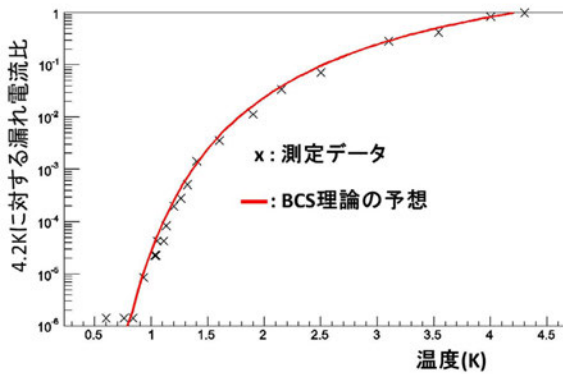


図 7: STJ の漏れ電流の実測値 (バツ印) と BCS 理論の予想曲線 (実線)。

り、どのチャンネルにエネルギーが付与されたのかを決定することができ、また変化量からエネルギーを測定することができる。

我々は、フォノン検出器用 MKID、ミリ波検出用アンテナ結合 MKID、そして MKID 読み出し装置を開発している。以下、それぞれ紹介する。

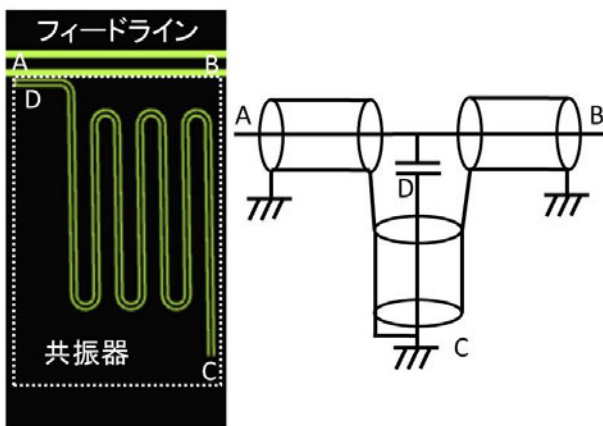


図 8: MKID の構造。マイクロ波を流すフィードラインと、メアンダ状の共振器からなる。左図の黒い部分に超伝導薄膜が形成され、黄色い (白抜き) 部分は溝になる。フィードラインと共振器は容量結合されている。共振器の長さは、共振周波数信号の波長の 4 分の 1 になる。右図は、MKID の構造の模式図を示す。

4.1 フォノン検出用 MKID の開発

SCD は、その高いエネルギー分解能から X 線のエネルギー測定に良く使われている。 X 線を SCD の素子で直接検出することにより、クーパー対破壊によって生じた準粒子または熱量を測定する。一方、SCD の大きさはせいぜい 1mm 以下であるので、立体角が小さい。発想を変えて、SCD が形成されている基板にエネルギーが付与されるとフォノンになるので、そのフォノンの量を

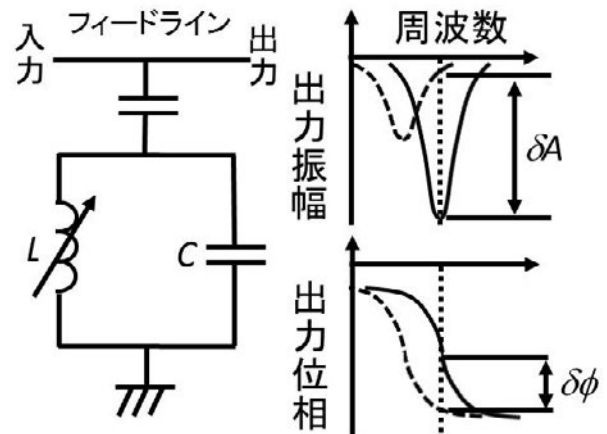


図 9: MKID の回路模式図 (左) と信号受信の様子 (右)。左図において、信号受信の結果インダクタンスが変化すると、右図のように共振周波数と位相が実線から破線のように変化する。フィードラインにおいて共振周波数信号を入力すると、その出力の振幅と位相が同時に変わる。

測定してエネルギーを測定する方法が存在する。この方法は、基板吸収型と言われ、大きな立体角を持つことができる (例えば $5 \times 5 \text{ mm}^2$)。その反面、エネルギー分解能は直接検出ほど良くない。しかしながら、STJ によって ^{55}Fe の X 線 (エネルギー 5.9 keV) で、半導体検出器 ($\sim 120 \text{ eV}$) よりも良いエネルギー分解能 ($\sim 70 \text{ eV}$) が既に得られている [6]。我々は基板吸収での検出を MKID を用いて行うことを考えている。

フォノン信号が MKID で受かるかどうかを調べるために、図 10 のようなデザインの MKID を作製した。厚さ $280 \mu\text{m}$ の Si 基板の上に、1 層の金属薄膜をスパッターし、溝を図のように削って作製する。このようなパターンで形成されているものは Coplanar Waveguide (CPW) と呼ばれ、電気交流信号を伝播させる働きを持つ⁶。共振器の長さは波長の 4 分の 1 となっており、波長と周波数は 1 対 1 の関係にあるので、共振器の長さが共振周波数を決定する。共振器の先端の四角い部分 (パッド) は Al で、周りの共振器やグラウンドは全て Nb からなる。共振器には電流の定在波が立ち、フィードラインと容量結合している部分は節、先端のグラウンドに繋がっている部分は腹になる。MKID の感度は電流の 2 乗に比例するので、共振器の先端部分が最も感度が良い。従って、その部分にだけ 2Δ が小さい Al を使えば、感度が増すと考えられる。Al パッドの部分は二つの共振器に繋がっており、従って Al パッドでフォノン信号を受けると、二つの共振器は同時に反応する。

MKID の読み出し方法は次のようなホモダイン式である。ある共振器が持つ共振周波数のマイクロ波を信号

⁶同軸ケーブルの芯線と周りのグラウンド線が 2 次元平面に投影されたようなものとも考えることもできる。

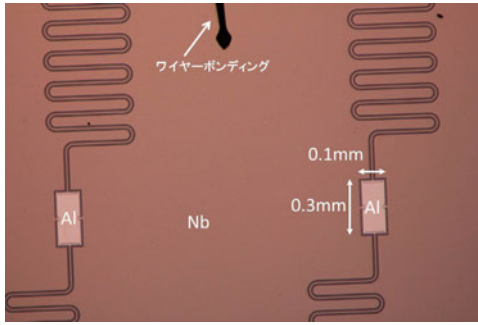


図 10: フォノン検出用 MKID の顕微鏡写真. メアンダ状のパターンは共振器, その先端には長方形のパッドが接続され, 真ん中のところでグラウンドに接続されている. パッドの部分のみ Al で, 他の部分は全て Nb で形成されている. 膜厚は約 200 nm.

発生器で生成する. その周波数を ν とする. それを二手に分けて, 一方を MKID に入力する. MKID の出力は, 位相と振幅が変わり $f_{\text{out}}(t) = A \sin(2\pi\nu t + \phi)$ というような信号になったとする. 最初に分けたもう一方の信号をさらに 2 つにわけ, 一方はそのまま $\sin 2\pi\nu t$, もう一方は位相を 90 度ずらし $\cos 2\pi\nu t$ とする. これら 2 つの信号を $f_{\text{out}}(t)$ と掛け算することにより, $I = A \cos \phi$, $Q = A \sin \phi$ を得る⁷. こうして, 振幅 A と位相 ϕ を I (In-phase) と Q (Quadrature) 信号から計算することができる. MKID に外部からエネルギー付与が無ければ, I と Q は一定であるが, 信号を受けると振幅 A と位相 ϕ が同時に変わるので, I と Q は時間変化する. ここでは 2 つの共振器のみを同時に読み出すので, 全部で 4 つの信号を読み出す.

検出器測定には α 線源と MKID を冷凍機内にセットし冷却する. 図 11 に, 共振器の位置関係を示す. 図 12 は, それぞれの共振器ペアでの α 線による I/Q 信号を示す. 異なる位置での共振器の反応も見られることから, 基板からのフォノンを検出していると考えられる. それを確認するために, 異なる位置の共振器での信号の立ち上がり時間差を図 12 に示すように測定した. 振幅が小さい信号の方が大きい信号よりも遅く到達していることがわかる. 振幅が大きい信号の位置に α 線が当たったと仮定して, その時間差と共振器の距離から伝播速度を求めると, 1.1 ~ 1.3 km/s が得られた. これは Si 基板でのフォノンの伝播速度を測定した他のグループの結果 (2.2 ± 0.9 km/s) [7] と一致する. さらにフォノン検出を確認するために, Al パッドの下に 50 nm の Al_2O_3 薄膜を敷いた検出器も作製し, α 線照射実験を行った. Al_2O_3 薄膜は基板からのフォノンをブロックする役割を果たすので, α 線が直接当たった共振器のみ反応し, 他の共振器は反応しないと考えられる. 測定の結果, 実際

⁷ 倍周波数 2ν を持つ信号も出力されるが, low pass filter によって落とすことができる.

にそうなることが確認された.

現在 FPGA を用いた読み出し装置の開発を行っており, 今後は多チャンネル同時読み出しを試みる予定である. 多チャンネル読み出しにより, 信号振幅と到達時間から α 線が当たった位置を決定することができ, それからエネルギーを測定することができる.

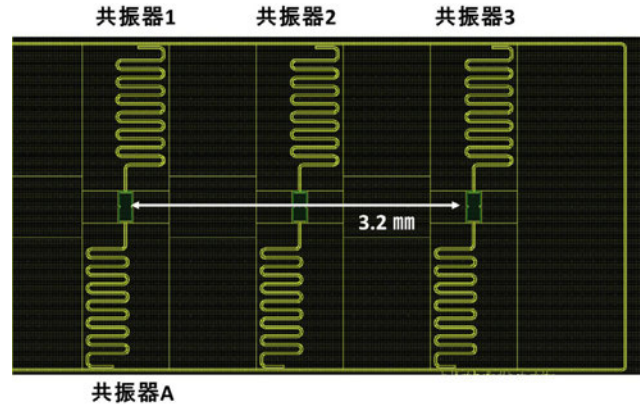


図 11: MKID の共振器の位置.

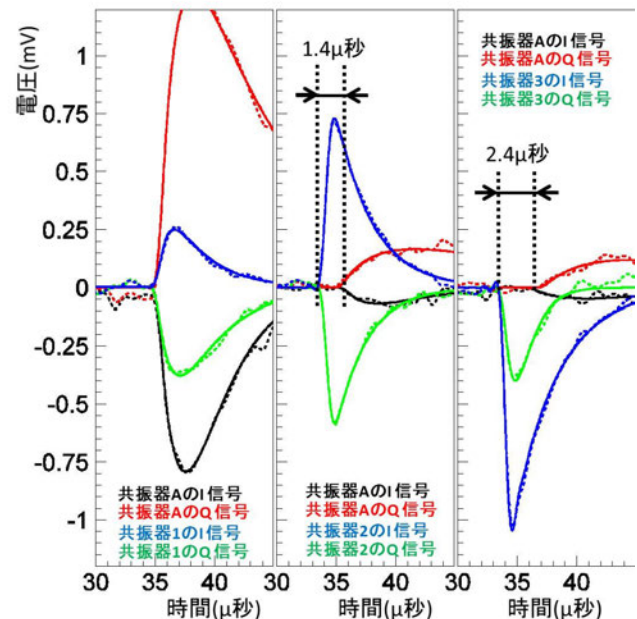


図 12: MKID の α 線フォノン信号. 実線は信号のフィット結果, 点線はデータにデジタルフィルタを施し, ノイズを除去したもの. それぞれの I/Q 信号は, 図 11 の共振器に相当する.

4.2 ミリ波・サブミリ波検出用 MKID の開発

宇宙背景放射やミリ波・サブミリ波天体を検出するために, われわれはアンテナ結合 MKID の開発を行っている. 宇宙背景放射の B モード偏光観測においては, シ

ンクロトンやダスト等の前景放射を差っ引く必要がある。そのためには、多周波数観測を同時に行わなければならない。そこでわれわれは、UC Berkeley グループによって TES ボロメータを用いて確立されている多周波数偏光同時測定技術 [8] を MKID に適用することを考えている。具体的には、Sinuous 平面アンテナ⁸を用いて広帯域な周波数信号を受ける。その後、周波数バンドパスフィルターを用いることにより、必要な周波数を選択し MKID で検出する。こうして、限られた検出器面積を有効利用した多色化カメラを作製することができる。

われわれは Nb と Al を組み合わせた MKID を用いて、まずは 90 ~ 250 GHz の周波数帯域を狙う。Al 内のクーパー対を破壊するためには、 $h\nu > 2\Delta$ が必要なので、周波数の下限である 90 GHz が決まる。また地上では、大気酸素による吸収が 60 GHz 近辺にあるので、90 GHz 以上の観測で十分である。Nb は T_c が高いので、クーパー対を破壊するには 650 GHz 以上の周波数が必要である。よって、ミリ波を受信するアンテナや周波数フィルター、MKID のフィードライン・共振器は全て Nb で作製し、共振器の先端の最も感度がある部分のみに Al を用いる。なお、衛星を用いた宇宙背景放射観測では、受信周波数領域は 60 ~ 300 GHz 程度が必要である。この場合は、 T_c がより低い材質を用いる必要がある。窒化チタン (TiN) が良い候補として有望視されており、アメリカや理化学研究所で研究されている。

地上での宇宙背景放射観測には、大気による雑音のため、検出器に要求される NEP は $\sim 10^{-17}$ W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ である。衛星実験では、宇宙背景放射光子のショット雑音が最終的に残り、要求される NEP は $\sim 10^{-18}$ W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ である。検出器の雑音レベルをそれ以下にしても感度は上がらないので、統計精度を上げるために 100 ~ 1000 の検出素子からなる多素子カメラを開発する必要がある。

以上をまとめると、これらのために必要とされる要素技術は、

- 広帯域・偏光アンテナ
- バンドパスフィルター
- Nb と Al を組み合わせたハイブリッド MKID
- 100 ~ 1000 素子からなる多素子多色カメラ

である。

これらを満たすようなアンテナ結合型 MKID として、KEK・理化学研究所・国立天文台・岡山大が共同で図 13 のような MKID の完成を目標に様々な試験を行なっている。

Nb の MKID 共振器の先端に、2 ~ 3 μm の微細構造の Al を埋め込む技術を実験室で用いて確立

⁸波型の羽を 4 つ持つ自己相補型アンテナ。二偏波屈曲波状アンテナとも言われる。

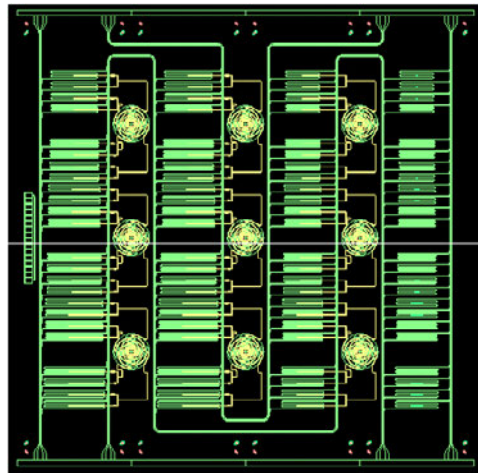


図 13: アンテナ結合型ハイブリッド MKID のデザイン。9 つの丸い構造が Sinuous アンテナを示す。そこから Nb 配線により各 MKID の共振器の Al の部分に信号が配信され、クーパー対が破壊される。

し、ハイブリッド MKID の作製・評価を行っている。アライナー露光機は、MKID 共振器のような個々の形状が違う素子を大面積に多数形成するのに有利な装置である。共振器の性能を表す指標として、共振周波数ピークの幅の逆数 (Q 値) が挙げられる。Q 値が大きいほど共振ピークの幅が狭くなり、従って図 9 から分かるように、同じ周波数変化でも Q 値が高い方が振幅や位相の変化が大きくなり感度が良くなる。われわれはハイブリッド MKID において Q 値が数十万である共振器の作製に成功し、96 GHz のミリ波受信にも成功している。現在、KEK の 0.3K 無冷媒冷凍機および理化学研究所の希釈冷凍機において、光学系を組む作業をしている。前者では、フーリエ分光器と組み合わせることにより周波数特性を評価する。後者には、偏光源が冷凍機内に装備され、MKID の特性評価が行われている。

4.3 MKID 読み出し装置の開発

MKID の読み出しには、上述したように各共振器の I/Q 信号を取得すればよい。多数の共振器を同時に読み出すには、図 14 のように、多数の周波数信号からなる周波数コム⁹を MKID に送り、通過してきた信号の振幅と位相の変化を測定する。FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いたこれらの機能を持つロジックの開発が岐部 (岡山大) によって行われている。FPGA を用いることにより、DAC の帯域幅の範囲内で任意の周波数コムを生成することができるので、FFT を用いた周波数コム生成装置よりも柔軟な対応をすることができる。FPGA コードの開発はほぼ 0 の状態から出発した。当初

⁹周波数空間でみると、送信信号が櫛 (comb) のように見えるので、周波数コムという。

は I/Q 信号に、予期しない周波数の位置にピークが多数見受けられ、また大きなホワイトノイズも存在した。一つ一つロジックとハードウェアの調整を行うことにより、現在では 50 Hz 以上の周波数範囲で FPGA 回路と ADC/DAC 自身のノイズレベルは MKID で予想されるノイズ (NEP で 10^{-17} W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 相当) よりも小さいことが確認されている (図 15)。今後は、4.2 章で紹介した MKID と組み合わせて、KEK の田島氏が中心となって推進している宇宙背景放射偏光観測実験 GroundBIRD [9] に利用する予定である。

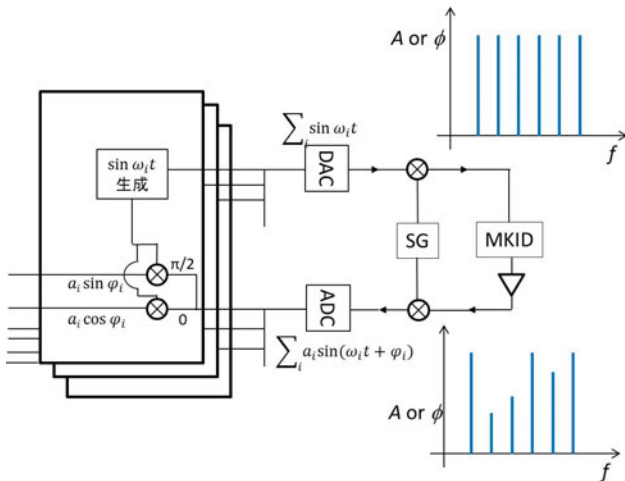


図 14: MKID の読み出しシステム概念図. SG は Signal Generator で、上下の掛け算器で upconvert / down-convert を行っている。

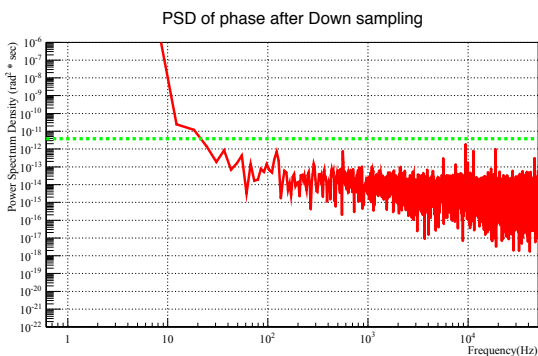


図 15: FPGA 読み出し装置のノイズスペクトル (実線) と MKID のノイズレベル (点線)。周波数が 50 Hz 以上では、読み出し系のノイズは MKID より低い。現在考えている GroundBIRD でのサンプリングレートは 100Hz 以上である。

MKID は原理的には大変大きなダイナミックレンジを持つ。一方読み出しにおいて共振器の共振周波数に固定した信号を用いると、共振ピークの幅以上に共振周波数が動いてしまうと感度がなくなってしまう。服部と吉田 (ともに KEK) は上述の FPGA に加えて、共振周波数信

号の位相をモニターし、位相の変化量から共振周波数を動かし、共振ピークをロックする FPGA 回路を新たに開発した。これは加速器のフィードバック技術に基づいており、加速器科学をもとにした宇宙物理学への応用という点でユニークなアイデアである。図 16 は、アンテナ結合 Al MKID に 96 GHz のミリ波を 10 秒おきに 1 秒間照射したときの、共振周波数の経時変化を 2 つの共振器について測定した結果である。信号には約 80 μsec の速さで追従することができ、宇宙背景放射やサブミリ波天文観測では十分使用可能であることがわかった [10]。

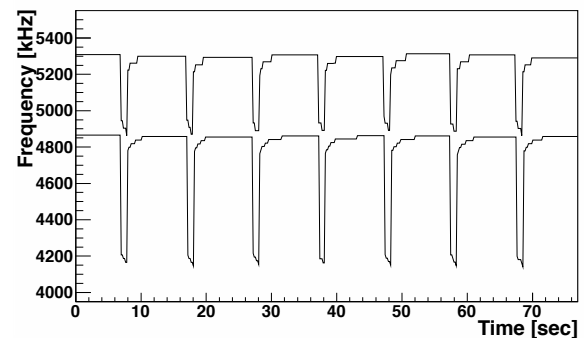


図 16: 2 つの共振器の共振周波数の変化の追従を示した図. Al MKID には 96 GHz のミリ波を 10 秒おきに 1 秒間照射した。

X 線や γ 線、荷電粒子といった放射線の検出には μsec オーダーの I/Q 信号の変化を検出する必要がある。パルス的な変化があったときのみ、その前後の時間のデータのみを抜き出し、下流に流すようなトリガー機能を持つ FPGA ロジックを組み立てればよい。今後の開発要素の一つである。

4.4 素粒子・宇宙物理実験等への応用と海外の研究の現状

SCD のフォノン検出器としての応用例を図 17 に示す。基板吸収型 (上図) の応用例として、大きな立体角を持つ高性能 X 線・ γ 線カメラが考えられる。これは天文学だけでなく、物性の研究にも利用可能である。また、基板そのものを暗黒物質の標的としても使うことができる。このような応用例を考えて、Caltech を中心とする研究グループが MKID を使って新しい結果を最近出している [11]。まだ性能は十分出ていないが、対応策は既に練られているようである。我々グループもどうかしていただけない。

図 17 の下図のように、何らかの標的を SCD に直接装着する方法も考えられる。例えば、超伝導物質 MgB_2 を装着すれば、高感度中性子検出に利用できるかもしれない。また、レニウムを張り付けることによりベータ線

と反跳原子核のエネルギーを測定し、ニュートリノの絶対質量の測定を行うことが考えられる。また、ニュートリノを伴わない二重ダブルベータ崩壊の探索も考えられる。これらの場合、標的を1トンのオーダーで測定する必要があり、チャンネル数が膨大となるが、多重読み出しが容易なMKIDを用いれば、カバーできると考えられる。アメリカグループによって、Snを標的とした超高性能な γ 線検出器がTESボロメータを用いて作製されている。100 keVの γ 線に対して50 eV以下、つまり0.05%以下のエネルギー分解能を達成している[12]。ただし、時定数が2 msecと長く、またダイナミックレンジは狭いと考えられる。ドイツのグループは、Pb標的を用いたAl-STJによって5.9 keVのX線に対して、12 eV (0.2%)のエネルギー分解能を達成している[13]。STJは応答が早く($\sim \mu\text{sec}$)ダイナミックレンジが大きいが、多素子の読み出しが容易ではない。MKIDはその欠点を補うことができる。標的をつけたMKIDについての報告は、われわれの知る限りまだない。今後このような検出器を作製し、サイエンスを広げていきたい。

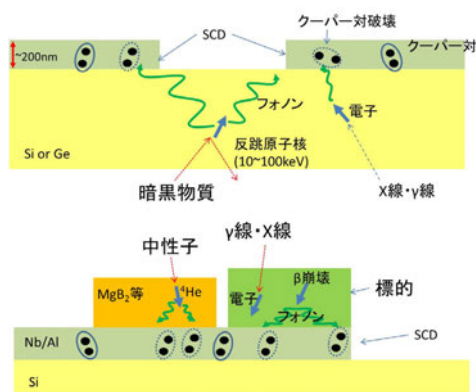


図 17: SCD フォノン検出器の応用例。上図は基板吸収型、下図は標的装着型を示す。

ミリ波・サブミリ波検出用MKIDはアメリカとヨーロッパのグループによって進んでいる。例えば、アメリカグループのMUSICというカメラは756素子を持つ[14]。ハワイのCaltech Sub-millimeter Telescopeに搭載する予定である。MUSICはNbとAlの組み合わせからできており、Nbでできた位相配列アンテナでミリ波を受け、 $\lambda/4$ 共振器の先端のAlの部分でクーパー対を破壊する。AlとNbのギャップエネルギーの間に相当する100～400 GHzの範囲で測定可能である。ヨーロッパグループはNIKAと呼ばれるNbTiNとAlから構成されるMKIDの開発を行っており、スペインのIRAMという30m望遠鏡を用いて150, 220GHzの観測を行いつつある[15]。アメリカの別のグループは、TiN膜からなるMKIDを用いたARCONSという近赤外線と可視光観測用カメラの開発を行っている[16]。我々のグループが国立天文台・理化学研究所と共同開発して

いるMKIDカメラは、GroundBIRD [9]に搭載する予定である。GroundBIRDは、地上で大角度スケールのCMBの偏光を測定し、重力波起源のBモードを見つけることを目的とした実験である。また、将来の衛星実験LiteBIRD [17]への利用も考えられる。

5 まとめと今後

SCDグループがこれまで進めてきた開発の現状を報告した。美馬が開発した伝送線路型STJは、天文台が現在開発している低温アンプと組み合わせることにより、サブミリ波天文に应用される可能性がある。また、低漏れ電流を達成したことによりSISジャンクションそのものの物性物理研究にも応用可能である。美馬が作製したNb-STJは、筑波大が中心となって進めている宇宙背景ニュートリノ探索計画にプロトタイプ検出器として利用されている。MKIDは現在世界で爆発的に開発が進んでおり、その多重読み出しの利便性から今後SCDの主流になる可能性がある。われわれは、基板吸収型フォノン検出用MKIDとアンテナ結合ミリ波検出用MKIDの開発を行っている。前者については、フォノン信号が確認され原理検証は達成できた。今後はトリガー機能を持つFPGA読み出し開発を行い、半導体を凌駕するエネルギー分解能達成を目指す。後者については、新しいアイデアに基づいた検出器が開発されつつある。読み出し装置と組み合わせることにより、今後GroundBIRDに搭載することによりフィールドテストを行う予定である。

6 謝辞

SCDグループは様々な方々にサポートされています。クリーンルームの維持・管理においては佐藤伸明氏・川井正徳氏(KEK)と河野久雄氏(株式会社真巧)に感謝します。その他、KEK・国立天文台・理化学研究所・産総研において関連する方々にも感謝します。SCDグループそのものをサポートして頂いているKEK測定器開発室には大変感謝しております。

参考文献

- [1] S. Ariyoshi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. **45**, No. 37, L1004-1006 (2006).
- [2] J. R. Tucker and M. F. Millea, Appl. Phys. Lett. **33**, 611 (1978).
- [3] K. Hattori, S. Mima *et al.*, Phys. Procedia **37**, 1406 - 1412 (2012).

- [4] 美馬 覚 「ミリ波・サブミリ波検出用アンテナ結合
伝送線路型超伝導トンネル接合素子の開発」, 博
士論文, 岡山大学 (2013).
- [5] P. K. Day *et al.*, *Nature* **425**, 817 (2003).
- [6] M. Kurakado *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. A*
621, 431 - 436 (2010).
- [7] L. J. Swenson *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 263511
(2010).
- [8] A. Suzuki *et al.*, *Proc. SPIE*, 8452 (2012).
- [9] O. Tajima *et al.*, *Proc. SPIE*, 8452 - 8458 (2012).
- [10] K. Hattori *et al.*, *J. Low Temp. Phys.* **167**, 671
- 677 (2012).
- [11] D.C. Moore *et al.*, *J. Low Temp. Phys.* **167**, 329
- 334 (2012).
- [12] B. L. Zink *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 124101
(2006); W. B. Doriese *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*
90, 193508 (2007).
- [13] G. Angloher *et al.*, *J. of Appl. Phys.* **89**, 1425 -
1429 (2001).
- [14] P. R. Maloney *et al.*, *AIP Conf. Proc.* **1185**, 176
- 179 (2009); R. Duan *et al.*, in *Proc. SPIE As-
tronomical Telescopes and Instrumentation*, vol.
7741 (2010), p. 77411V.
- [15] A. Monfardini *et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **194**
(2011); M. Calvo *et al.*, *A&A* **551**, L12 (2013).
- [16] B. A. Mazin *et al.*, *Proc. SPIE* **773518**, 773518P-
1 (2010).
- [17] M. Hazumi *et al.*, *Proc. SPIE*, 8442 - 8448 (2012).