

ニュートリノ崩壊探索のための 超伝導素子読み出し用極低温増幅器の開発

SATテクノロジー・ショーケース2023

■ はじめに

ニュートリノの振動実験によりニュートリノには質量が存在することが示され、各ニュートリノの質量二乗差と混合角は判明した。しかし、ニュートリノの絶対質量の決定にはいまだに至っていない。重いニュートリノが軽いニュートリノに光を伴い崩壊すると考えると、重いニュートリノの質量は、 $m_i = |\Delta m_{ij}^2|/2E_\nu$ と計算できる。崩壊光のエネルギー E_ν を精密に測定することができればニュートリノの質量を逆算できる。

COBAND実験では、宇宙背景ニュートリノ崩壊光の探索をはじめ、検出器に超伝導体を用いた超伝導接合素子(STJ)を採用した。ニュートリノの寿命は標準模型では $\sim 10^{43}$ yearsと非常に長いため、崩壊確率は非常に小さく検出が難しくなる。そこで右巻きの結合をするWボソンを許すLeft-Right-Symmetric Modelを仮定するとニュートリノの寿命は $\sim 5.6 \times 10^{17}$ yearsとなる。長寿命ニュートリノを観測するため、ニュートリノ源としてビッグバンの数秒後から生成され現在の宇宙空間に一樣に存在する宇宙背景ニュートリノを対象とした。この崩壊光の予想される波長は、 $m_3 = 50 \text{ meV}$ と仮定すると、波長50 μm 付近の赤外光となり、この波長域での単一光子検出可能な検出器が必要である。

現在、COBAND実験ではNb / Al-STJ検出器と、信号読み出し用の極低温アンプを組み合わせ、遠赤外光での単一光子検出を目標に研究開発を行っている。

■ 活動内容

1. Nb / Al-STJ検出器の研究

本実験では、宇宙背景ニュートリノ崩壊の光子を観測するためにNb / Al-STJ検出器を使用する。STJはSIS(超伝導体-絶縁体-超伝導体)接合の1種で接合部にバイアス電圧を印加すると、超伝導層に入射した光子のエネルギーによってクーパー対が切断され、そのエネルギーに比例し準粒子によるトンネル電流が形成され、エネルギーギャップが非常に小さいため、従来の半導体デバイスよりもはるかに優れたエネルギー分解能を持つ。

現在使用を検討しているNb / Al-STJ検出器は、50 μm の単一光子検出可能な性能を持つが、STJ直近で光応答信号を増幅することにより、S/N比を著しく改善する必要がある。

2. SOIを用いた極低温増幅器の研究開発

STJ信号は微弱であるため信号増幅を行う必要がある。STJ検出器は熱によるリーク電流の影響を低減させるため、極低温下での動作が想定されており、この直後に増幅器を設置するため、増幅器も極低温環境下で動作することが求められる。極低温増幅器の開発には、FD-SOI (Fully Depleted Silicon On Insulator) 技術を採用しており、4Kで機能することが確認されている。

Nb / Al-STJは0.4mVの一定のバイアス電圧で動作し、STJ自身の静電容量20pF程度に対して、STJからの信号を数 μs の時定数で読み出す必要がある。これまでの実証実験では、FD-SOIプロセスを用いていくつかのアンプを試作した。

去年のポスターで、このアンプは室温だけでなく極低温下でも機能することを確認し報告した。今回は、以前からのアンプの問題点として信号中の高周波成分が寄生容量に逃げていることが判明した。そのため、数MHzの周波数帯域で十分な増幅率を持つアンプを設計し、シミュレーションと測定結果を報告する。

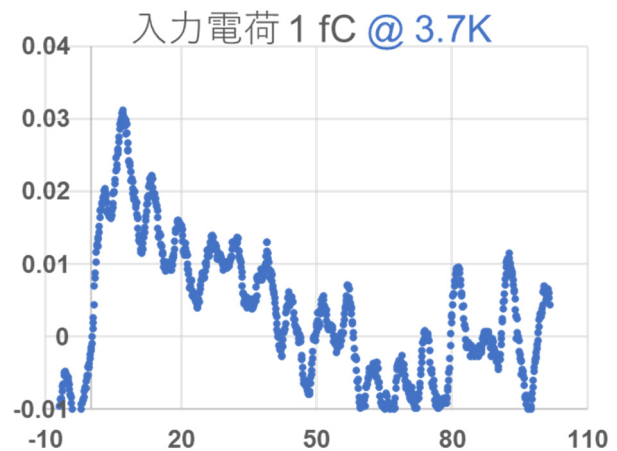


図1 極低温下におけるテスト信号を用いたアンプの増幅試験

■ 関連情報等(特許関係、施設)

この研究は、以下の機関の協力の下行われている。
高エネルギー加速器研究機構、産総研、宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所、Fermi National Accelerator Laboratory

代表発表者 守屋 佑希久(もりや ゆきひさ)

所属 筑波大学大学院
素粒子実験研究室

問合せ先 〒305-8571 つくば市天王台 1-1-1 素粒子実験室
TEL:29-853-4270 FAX:29-853-4491
moriya@hep.px.tsukuba.ac.jp

■キーワード: (1)ニュートリノ
(2)超伝導検出器
(3)遠赤外光検出