2022年6月24日 TCHoU構成員会議

COBAND実験のための反射防止膜の開発

金信弘 筑波大学数理物質系/宇宙史研究センター

COBAND Collaboration

金 信弘,武內勇司,飯田 崇史,浅野千沙,前川群,中原瑳衣子,山根綾太,守屋佑希久,柏木隆城(筑波大学), 松浦周二(関西学院大学),和田武彦,長勢晃一(JAXA/ISAS),吉田拓生,浅胡武志,竹下勉,古屋岳,若林凛(福井大学), 美馬 覚(理化学研究所),木内健司(東京大学),加藤幸弘(近畿大学),新井康夫,倉知郁生,羽澄昌史(KEK),大久保雅隆, 浮辺雅宏,志岐成友,藤井剛(産総研),石野宏和,樹林敦子(岡山大学),川人祥二(静岡大学),中山和也(中部大学), Erik Ramberg, Paul Rubinov, Dmitri Sergatskov (Fermilab),

Soo-Bong Kim (Sungkyunkwan University), Yong-Hamb Kim, Hyejin Lee (Institute for Basic Science CUP)

はじめに

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索COBAND実験の計画と準備状況

● COBANDロケット実験のための反射防止膜の開発



宇宙背景ニュートリノ崩壊探索

1013 素粒子の質量がなぜ11桁以上違うのか? ヒッグス粒子 同じ性質の(質量のみ異なる)粒子の繰り返 W, Z なぜ? **L** : 109 囁子(水素原子核) + アップクォーク ニュートリノ質量の理解が先決 - ダウンクオーク > まだ測定されていない 105 - 荷電レプトン ▶ 質量二乗差 Δm²はニュートリノ振動実験により既知 +ニュートリノ 本研究:ニュートリノ崩壊を観測し,質量を決定 101 重いニュートリノ → 軽いニュートリノ + 光子 $M_{\star} > 10^5 M_{\star}$ 光子(赤外線領域)のエネルギーを測定 → ニュートリノ質量の決定 10-3 $M_{p} > 10^{6} M_{y}$ $\nu_{1} \rightarrow \nu_{2} + \gamma$ 世代

 ニュートリノ:寿命が長く、まれにしか崩壊しない。現在の寿命の下限 = 3×10¹²年 探索には大量のニュートリノが必要 加速器で作るのは不十分 宇宙に大量に存在するはずの 宇宙背景ニュートリノ が唯一の探索方法
 宇宙論で予言されるが未観測
 ・ その観測は宇宙論検証の意義を持つ
 ²

 ニュートリノ崩壊発見によるニュートリノ質量の測定
 それぞれが

非常に重要な発見

宇宙背景ニュートリノの発見

宇宙赤外線観測による宇宙背景ニュートリノ崩壊の探索



*宇宙遠赤外線は大気で吸収されるので,大気圏外での観測が不可欠。

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索ロケット実験・衛星実験

ロケット実験計画: 2026年2月に高度200km以上で5分間データ収集 (実質200秒間) JAXA観測ロケットS-520搭載

ニュートリノ寿命が10¹⁴年以下なら観測可能。(現在の寿命下限は 3×10¹²年).

»超伝導トンネル接合素子 (STJ) 赤外線検出器を開発 50 Nb/Al-STJ ピクセルアレイと回折格子で遠赤外線エネルギー測定



衛星実験or惑星間宇宙望遠鏡:寿命T(v₃)~10¹⁷年なら観測可能 (左右対称模型の予言値)

- > Hf-STJ 赤外線検出器で衛星実験or 惑星間宇宙望遠鏡 (JPSJ 81,024101 (2012))
 - $\Delta = 20 \mu eV$: ハフニウムの超伝導エネルギーギャップが小さいので、回折格子なしでエネルギー測定。



山根綾太 卒業研究より

反射防止膜の役割



反射防止膜設計

・複素屈折率

媒質に吸収がある場合屈折率は消衰係数を虚部として複素数に拡張される。 N = n + ik (n:屈折率,k:消衰係数)

Nbの屈折率と消衰係数の文献値 (Soviet physics JETP volume29 number1,1969)



極低温環境で波長40µm~80µmでのNb屈折率データがない →<u>測定する必要性がある</u>

n=24を仮定

波長40µm

反射防止膜設計

 ・反射率が最小となる防止膜の屈折率は4.9
 ・遠赤外線を透過させ、これを満たす材料はない 射率
 ・Si(FZ):屈折率3.4





集光率を10倍以上改善できる(2%→20~30%)

Nbの屈折率・消衰係数測定

- エリプソメトリ
- ・物質に反射すると光の位相がずれる
- ・屈折率・消衰係数によってずれる度合いが違う
- ・偏光子Aを用いてこのずれを測定する

 $p 備 光 E_{ip} = |E_p| \cos(\omega t)$ s偏光 $E_{is} = |E_s| \cos(\omega t)$ $p 備 H E_{rp} = |r_p| |E_p| \cos(\omega t - \delta_p)$ s 備 H E_{rs} = |r_s| |E_s| \cos(\omega t - \delta_s)



山根綾太

Nb板

修士論文研究より

長軸、短軸、角度 Φ から 反射比 $tan\psi$ (= $|r_p|/|r_s|$)と位相 差 \angle (= δ_p - δ_s)が求まる。

※ ψ と⊿から屈折率nと消衰係数kが決まる。 $n = n_0 sin\theta tan\theta cos2\psi/(1 + sin2\psi cos∆)$ $k = n tan 2\psi sin △$

 E_{ip} 45° E_{is} 入射光電場 E_{rs} E_{rp} E_{rs} E_{rs} E_{rs} E_{rs} 反射光電場 E_{rs}

可視光実験

- 手法の確立のため、文献値が存在する可視光領域で実験。
- ・実験器具
 - ・光源:465nmレーザー
 - ·可視光用偏光子
 - ・検出器:PMT(増幅させずに使用)





実験図

偏光子回転測定

- ・偏光子Aを回転させて測定を行い、フィッティングによってパラメータを決定。 偏光子Pの回転角 ψ_p を $\pi/4$ に決めると出力値*I*は
- $I = \frac{1}{2} |r_s|^2 I_0(tan^2 \psi cos^2 \psi_A + sin^2 \psi_A + tan \psi sin^2 \psi_A cos \varDelta)$

<u>n,kは(θ,ψ,Δ)から求まる (θ:入射角)</u>

・ Ψ_p,Ψ_A:偏光子の回転角 Ψ,⊿:知りたいパラメータ



偏光子回転測定 - $\Psi_p = \pm \pi/4$

・パラメータを減らす方法を考えた。 $\psi_p \epsilon_{\pi/4}, -\pi/4 \ge \sigma \ge I_{+\pi/4} = I(\psi_p = +\pi/4, \psi_A) = \frac{1}{21} |r_s|^2 I_0(tan^2 \psi cos^2 \psi_A + sin^2 \psi_A + tan \psi sin 2 \psi_A cos \Delta)$ $I_{-\pi/4} = I(\psi_p = -\pi/4, \psi_A) = \frac{1}{2} |r_s|^2 I_0(tan^2 \psi cos^2 \psi_A + sin^2 \psi_A - tan \psi sin 2 \psi_A cos \Delta)$

 $I_{+\pi/4} + I_{-\pi/4} \ge I_{+\pi/4} - I_{-\pi/4}$ をフィッティング関数とした 2つの測定比較(前回:青、今回:赤) (グラフ中の数字は入射角) 消衰係数 **7**4 зk 2.5 70 2 1.5 1.5 1.7 2.1 1.9 2.3 屈折率n 1.5 2.5 3.0 0.0 2.0 2.5 入射角度[rad] Ψ_A 回転角[rad] 前回と比較して測定精度が向上 Ψ_{A} 回転角[rad]

振幅が(tan²ψ-1)に比例

振幅が*cos*⊿に比例

偏光子回転測定 - 入射角10点

・60~80°まで2°おきに入射角を変えてtanψとcos⊿を測定、
 屈折率nと消衰係数kでフィッティング
 (n,k)=(1.83,2.27)

<u>誤差について</u>

測定結果は期待した値からずれている。 これはNbの表面状態によることがわかり、Si基 板にNbをスパッターした板を用いることによっ て改善した。







表面状態が良いNbを用いた測定

・表面状態がより良いNbを用いて実験を行った。 Si基板にNbをスパッターした板



- ・(n,k)=(1.75±0.07,2.67±0.06)を得た。
- ・文献値(n,k)が最も測定値に近づくのは、 酸化膜厚さ1.90nmの時で文献値(n,k)は(1.72,2.72)となり、 1σの範囲で一致した。

常温可視光の条件下では、Nbの屈折率と消衰係数を 精度よく測定する手法を確立した。



遠赤外実験 n,kの測定

- 福井大学遠赤外領域開発研究センターの遠赤外線レーザービームで測定
- 2022年3月7日~9日:山根(前M2), 柏木(M2), 金, 吉田(福井大),古屋(福井大), 中山(中部大)

遠赤外実験

波長47.6µmの遠赤外領域で実験。

外用偏

焦電検出器

- ・実験器具
 - ・光源:47.6µmレーザー
 - ·遠赤外用偏光子

遠赤外線レーザ

ビーム スプリッタ-

射出口

·検出器:焦電検出器





使用 した Nb



(n,k)=(12±3,20±4)を得た。

今回のn,k測定結果



波長[µm]



反射防止膜テスト

遠赤外線テスト@福井大遠赤外センター 2022年3月7日~9日

- 遠赤外線ビーム:波長47.6µm S偏光,波長118.8µm P偏光
- 反射防止膜: 10µm厚のSi(FZ)膜 50µmまで研削加工した後にエッチングで10µmまで加工



反射防止膜テスト結果の解析方法

●Nb板反射データのX座標を∆X平行移動して、さらに規格係数Fをかけて、鏡面反 射データ(反射ビームプロファイル)の両端データに一致するようなΔX、Fを求 める。



観測されるdipの関数形

Nb板反射データ/鏡面反射データを下記の関数でフィットして相対反射率1-Aを 求める。Aとbがフィットパラメーター



反射防止膜テスト結果(波長47.6µm 入射角45°, 70°)



反射防止膜テスト結果

波長:47.6µm s偏光

波長:118.8 µm p偏光

(n,k)=(12,22)での反射率 si:10.5µm,接着材:0.2µm (n,k)=(12,22)での反射率 si:10.5µm,接着材:0.2µm



今後の遠赤外線ビームテスト予定

- 今回の実験を0.2mmステップで細かくデータをとり、確認実験を行う。(7月14-16日)
- 波長118.8µmのn,kを測定する。(7月14-16日)
- Nb/Al-STJに反射防止膜をつけたサンプルをHe4減圧冷凍機内に設置して試験する。

サンプル: Nb/Al-STJに5μ厚Si(1枚)λ=68μm ,

Nb/Al-STJに10μ厚Si(2枚)λ=136μm

Si(FZ)5µ厚をNb/Al-STJに接着したサンブル



<mark>反射防止膜ありのNb/Al-STJと反射防止膜なしのNb/Al-STJ</mark>に同時に、波長 70.5µm(23mW)のビームを照射して、それらの応答比を測定する。

まとめ

- 1. 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索COBANDロケット実験を 2026年に実施する予定で下記の測定器開発を進めている。
- 多チャンネルNb/Al-STJ検出器
- 極低温SOIプリアンプと読み出しエレクトロニクス
- 光学系(反射鏡・回折格子・集光器・反射防止膜)
- ロケット搭載用0.4K冷凍機
- データ収集・転送
- 2. Si反射防止膜が常温で十分に働くことがわかった。今後 極低温で反射防止膜付きNb/Al-STJ試作器のテストを行う。
- 3. 将来的には、衛星実験あるいは惑星間宇宙望遠鏡で COBAND実験を行う。