

DOSUE-RR: ミリ波を用いたダークマター探索実験

京都大学

安達 俊介

adachi.shunsuke.5d@kyoto-u.ac.jp

隅田 土詞

toshi.sumida@cern.ch

鈴木 惇也

suzuki.junya.4r@kyoto-u.ac.jp

2022年(令和4年)11月1日

1 はじめに

DOSUE-RR は「どすえ-ダブルアール」と読む。京風キラキラネームだが、“Dark-photon dark-matter Observing System for Un-Explored Radio-Range”の略である。DOSUE-RR 実験は、冷たいダークマター (Cold Dark Matter, CDM) を説明するようなダークフォトン(光子)を電波(特にミリ波)計測によって検出することを目指している。Simons Observatory や GroundBIRD といった宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) 望遠鏡の開発研究で培った技術をもとに 2020 年から京都大学で実験を進めている。本記事では、DOSUE-RR の最初の探索結果 [1] と今後の展望について解説する。

2 ダークフォトンとその探索方法

2.1 ダークフォトンとは?

ダークフォトン(光子)は標準模型のラグランジアンに新たな $U(1)$ 対称性を導入することで、光子と弱く相互作用する未知粒子として現れる [2]。ダークフォトン(光子)は質量を持ち、WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) やアクシオンとは異なる CDM 候補粒子になる。DOSUE-RR は、ダークマターの正体がダークフォトン(光子)だと地上で検出しようとする実験である。

2.2 ダークフォトン CDM の転換光とその特徴

ダークフォトン(光子)は光子との結合定数 χ を持ち、 χ に比例する“隠れた”電場を持っている。そのダークフォトン(光子)の持つ電場 E_{DP} が金属表面のような電磁気的境界面を横切の際に実光子(“転換光”)を放出する [3]。転換

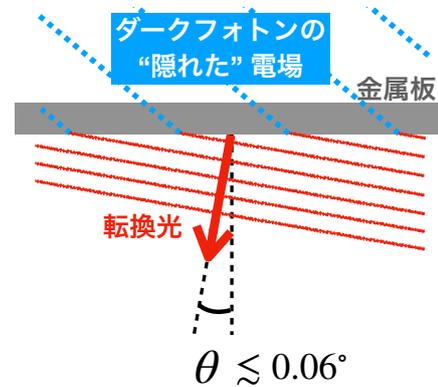


図 1: ダークフォトンの隠れた電場が金属と空気との境界面で転換光に変換される。

光を放出する理由は、金属表面での電磁気的境界条件(表面に平行方向の電場が 0, $E_{DP,||} + E_{実光子,||} = 0$)と、ダークフォトンと転換光の間のエネルギー保存を満たす必要があるからである。これら 2 つの条件から、転換光は 2 つの特徴を持つ。

1 つ目の特徴は、放出される転換光の方向が金属板に対してほぼ垂直となることである。電磁気的境界条件からダークフォトンの運動量の平行成分が保存され、かつエネルギー保存則からダークフォトンの質量エネルギーが転換光の運動量の垂直成分に変換される。ダークフォトン(光子)が CDM であれば、その運動エネルギーは質量エネルギーより小さいため¹転換光の運動量の平行成分より垂直成分が大きくなる。よって、図 1 に示すように転換光はほぼ垂直に放出される [5]。

2 つ目の特徴は、転換光の周波数がダークフォトン(光子)の質量に一対一対応することである。エネルギー保存則から導かれる転換光のエネルギーは、ダークフォトン(光子)の

¹地球と CDM の相対速度はおおよそ 220 km/s である [4]。

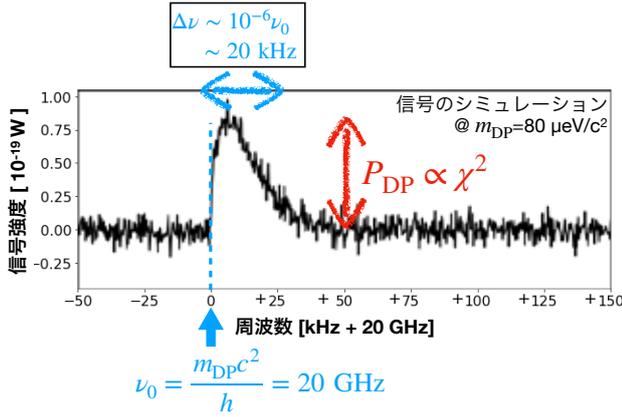


図 2: ダークフォトンの転換光を測定した場合の周波数スペクトルのシミュレーション。質量が $80\mu\text{eV}/c^2$ のダークフォトンと仮定した時、20 GHz にピークをもち、幅 20 kHz 程度の信号となる。

運動量を無視するとその質量で決まり、 $h\nu_0 = m_{\text{DP}}c^2$ となる。例えば、 $m_{\text{DP}} = 80\mu\text{eV}/c^2$ であれば、 $\nu_0 = 20\text{ GHz}$ となる。もちろんダークフォトンの運動量はゼロではないので、転換光の周波数はその運動量分だけ ν_0 からずれ、また運動量分布に起因するわずかな幅をもった周波数分布となる。ダークフォトンの運動量分布は一般的に Maxwell-Boltzmann 分布 (熱平衡状態気体) で仮定され、 $\Delta\nu/\nu_0 \sim (v_{\text{DP}}/c)^2 \sim 10^{-6}$ になる²。つまり、転換光はかなり細いピーク信号になる。図 2 に期待される周波数スペクトルを図示した。

² v_{DP} はダークフォトン CDM の速さ。

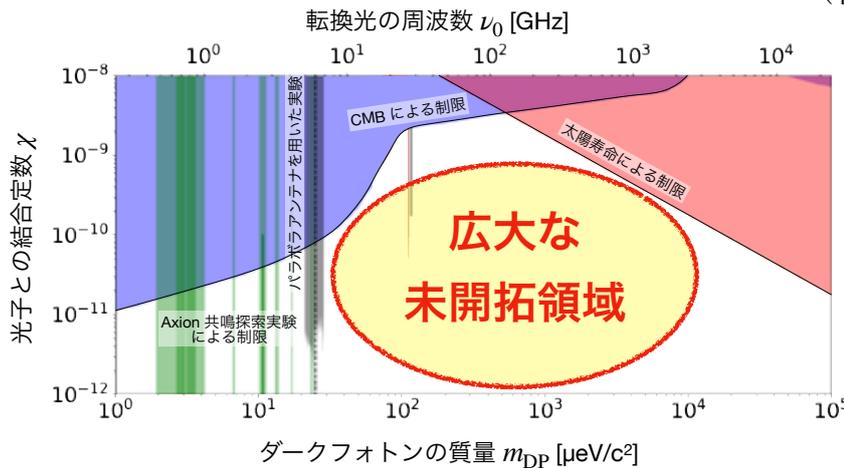


図 3: ダークフォトンの質量 m_{DP} と光子との結合定数 χ に対する制限。その質量は転換光の周波数に一対一対応するので、x 軸下部に質量 m_{DP} を、x 軸上部に周波数 ν_0 を記載した。10 GHz 以上では宇宙観測よりも強い制限を与える実験結果はほぼ皆無であった。唯一ある細い縦線の制限は、KUMODeS と呼ばれる CMB 観測技術の気象応用で開発されたミリ波受信機を用いた先行研究である (といっても周波数幅は $\Delta\nu = 10\text{ MHz}$ しかない)。[6, 7] を参照されたい。

2.3 ダークフォトン CDM 探索の現状

ダークフォトン転換光の 2 つの特徴によって、金属板から垂直に放出される転換光を捉えて分光し、得られた周波数スペクトルの中から信号のピークを探すことで、ダークフォトンを探ることができる。その質量 m_{DP} は検出される周波数で決まり、ダークフォトンと光の結合定数 χ の 2 乗は得られた信号強度の大きさに比例する。図 3 に 2 つのパラメータ (m_{DP}, χ) に対する制限を示す。広い範囲に渡って宇宙観測から制限がつけられている。10–300 GHz にわたるミリ波の周波数帯域では宇宙観測からの制限が弱く、これまでに探索実験がほとんど無い。つまり、未開拓領域が広大にある。この周波数領域は CMB の観測周波数帯と合致している。DOSUE-RR は CMB 望遠鏡で利用されている技術を用いて、ダークフォトンの検出を目指す。

この転換光の特徴を利用した探索方法として、元々パラボラアンテナを用いることで、垂直に放出される転換光を一点に集めて転換光を検出する方法が考案された [3]。我々の実験では金属平板を置き、そこから出てくる転換光をホーンアンテナで集めて測定する (図 4)。金属表面のどのくらいの面積からくる転換光が集められるかは、アンテナの実効的な開口面積 $A_{\text{eff}}[\text{cm}^2]$ で決まる。得られる信号の強度 $P_{\text{DP}}[\text{W}]$ は、 A_{eff} だけでなく、結合定数 χ 、ダークマターのエネルギー密度 $\rho_{\text{DM}} (= 0.39 \pm 0.03\text{ GeV}/c^2$ [8]) から推定できる [3]:

$$P_{\text{DP}} = 1.1 \times 10^{-19}\text{ W} \times \left(\frac{\chi}{10^{-10}}\right)^2 \left(\frac{A_{\text{eff}}}{17.3\text{ cm}^2} \frac{\rho_{\text{CDM}}}{0.39\text{ GeV}/\text{cm}^3}\right). \quad (1)$$

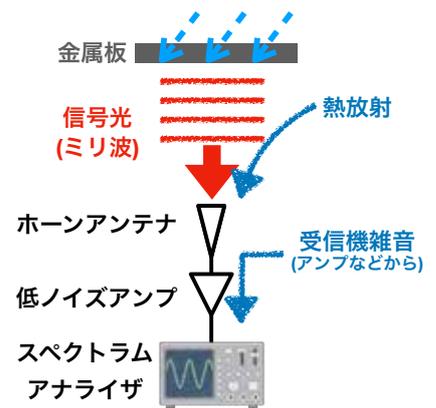


図 4: DOSUE-RR の実験概念図。金属板からの転換光をアンテナで集光し、アンプで増幅したのちにスペクトラムアナライザで分光測定する。雑音には 2 種類あり、アンテナに入ってくる熱放射雑音と、アンプなどの機器で生じる受信機雑音がある。

後述する我々のセットアップでは、 $A_{\text{eff}} = 17.3 \text{ cm}^2$ であり、目指す χ の精度を 10^{-10} と設定すると、 $P_{\text{DP}} \sim 10^{-19} \text{ W}$ となる。これは非常に小さな信号強度である。例えば、ダークフォトン転換光と同じ帯域幅 (20 kHz) で CMB の強度を計算すると、 10^{-18} W である。つまり、CMB よりも微弱な信号を従来の観測装置よりも桁違いに高い周波数分解能で検出する必要がある。

3 初号機: DOSUE-K K-band 受信機の開発と探索

3.1 受信機の開発

前述の図 4 のように、金属平板から垂直に放出される信号光をホーンアンテナで集光し電気信号に変換する。微弱な信号を読むために電気信号をアンプで増幅し、その後スペクトラムアナライザでフーリエ変換し、周波数スペクトルを測定する。測定の際に問題となる雑音は 2 種類あり、ホーンアンテナからスペクトラムアナライザまでの過程で混入する雑音 (受信機雑音) と、ホーンアンテナに入ってくる信号光以外の光 (熱放射) による雑音がある (図 4)。受信機雑音は電子回路内での熱雑音が主原因であるため、低雑音なアンプを極低温 (3 K) で動作することで抑制する。一方、熱放射は金属板やホーンアンテナをすべて極低温クライオスタット内に入れてしまえば、外界からの熱放射を遮断できるが、装置のゲイン較正を高頻度でおこなうことが困難になる。そこで、我々のセットアップではポリエチレン製の窓をクライオスタットに搭載し、窓の外にアルミ製の金属板を置くことによって、金属板部分をミリ波光源に変更しておこなうゲイン較正を可能にした。常温に置かれた金属板自身からの熱放射を気にされる読者もいるかもしれないが、金属は一般に放射率 (要するに完全な黒体に近いかどうか) が低いため、金属板自身からの熱放射は少なくて済む。

クライオスタットは円筒形であり、円筒上側に信号を入れるための窓、下側に冷凍機を設置している。内部構造としては外側から真空層、30 K 層、3 K 層という 3 層構造になっており、3 K 層の内壁は電波吸収体で覆われている。つまり、窓のある極低温電波暗室のようになっている。アンテナ、低雑音アンプは最内層に配置され、3 K まで冷やされるようになっている (図 5)。このクライオスタットは、縦に長い円筒形 (約 1.5 m) に設計した。ホーンアンテナが取り込むことができる信号光はアンテナ開口の面積で制限されるので、アンテナが見込む金属板の立体角を大きくしても転換光の信号強度は増えない。この事を利用して、外来の熱放射をさらに抑制する。窓の位置をアンテナから十分離すことで、アンテナ

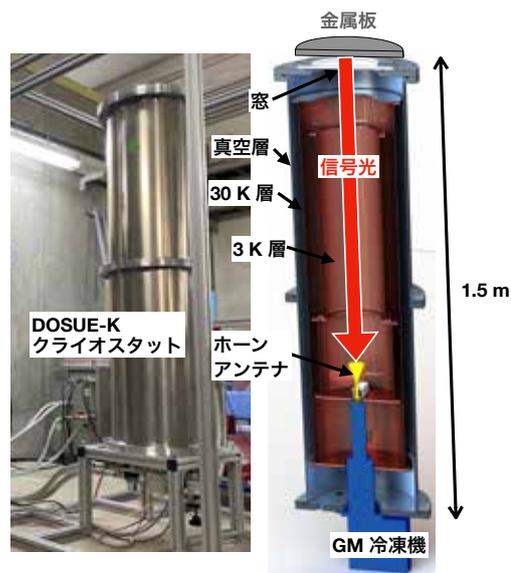


図 5: 受信機全体の写真 (左図) と断面図 (右図)。クライオスタット上部の窓の上に設置された金属板の底面でダークフォトンが光に転換され、その転換光をクライオスタット下部にあるホーンアンテナで捉える。金属板からホーンアンテナまでの光路の大部分が 3 K 層で覆われており、熱放射を抑制する構造となっている。

ナが望む窓の立体角を小さくし、転換光の強度を維持しつつ熱放射を抑制した。

クライオスタットの組み立て手順としては、冷凍機に真空層、30 K、3 K 層のそれぞれの底面を取り付けた上で、3 K 層、30 K 層、真空層の円筒を内側から順に組み付けていった (図 6)。3 K 層、真空層は上下の 2 段で分解できるようにしていたが、30 K 層のみ 1 m ほどの高さの円筒を一体物で作ってしまったために、手で持ち上げるのが難しいという困難を生んでしまったが、力を合わせて持ち上げてなんとか組み立てることができた。(現在は、クレーンが使える場所に移動して困難は解消されている。)

3.2 初探索と結果

ダークフォトンの初探索は 2021 年 11 月 29 日から 12 月 10 日の 12 日間にわたっておこなった。当時修士 2 年の小高駿平氏 (現在は民間企業に就職) が主導した。スペクトラムアナライザは 1 回の測定でわずか 2 MHz の範囲しか測定できないので、測定周波数を 18 GHz から 26.5 GHz まで少しずつずらして測定をおこなった。各周波数帯域に対する実効測定時間は 24 秒であった。おおよそ 40 分かけて 100 MHz の範囲を測定し、その後ゲイン較正をおこない、その較正を元にスペクトラムアナライザでの測定値をアンテナに入ってきた信号の強度に変換した。12 日間かけて、18–26.5 GHz の範

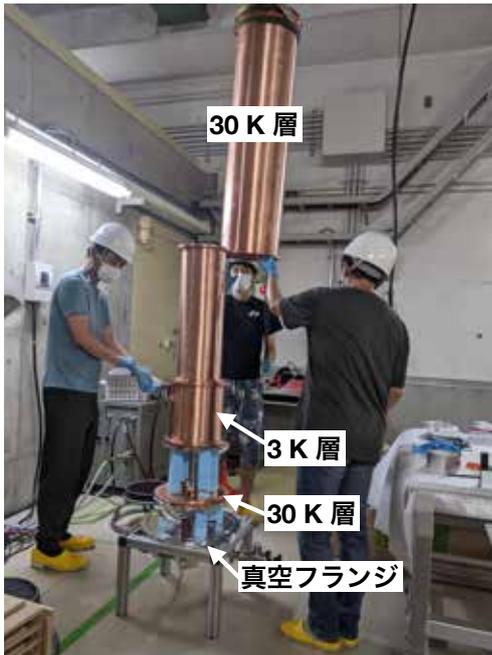


図 6: DOSUE-K クライオスタットを組み立てている様子。30 K 層は長さ 1 m 程もあり、組み立てに人手が必要である。

圏に渡る周波数スペクトルを得た。

取得したスペクトルデータに対してピークの高さ P_{DP} をフリーパラメータとしたフィッティングを周波数毎におこなった。解析をおこなう際のスペクトルデータのビン幅の決定や誤差の推定などに、CMB のデータ解析手法を適用した (例えば、ヌルサンプル法と呼ばれるノイズレベルや系統誤差を評価する手法)。図 7 に P_{DP} のフィッティング値とそれらに対する null-signal-hypothesis (信号が無い仮定) における p -value を示す。各フィッティングの p -value が低い周波数も見受けられたが、フィッティングの試行回数が非常に多い (4×10^6 回) ため、全フィッティングに対する p -value (global p -value, いわゆる look-else where effect を考慮した p -value) は 68 % であった。つまり、信号がないという仮定と矛盾がないため、今回の探索では信号の兆候はなかったと結論づけた。

それでも万が一、「もうちょっと統計精度を上げたら発見があった！」なんてことがあったら、悔やんでも悔やみきれない。そこで、さらなる努力もおこなった。具体的には、 p -value が小さい 27 箇所の周波数領域に対して、10 倍の測定時間をかけて追測定をおこなった。そして、あらためて信号がないことを確認した。図 7 には追測定後の結果も赤色 (白黒印刷では濃い色) で重ね書きした。

以上の測定結果を式 (1) を用いて χ への制限に焼き直したものを、図 8 に示す。この質量領域で、世界最高感度の探索結果である。また、CMB による χ への制限より 1 桁以上小さい制限を与えることができた。

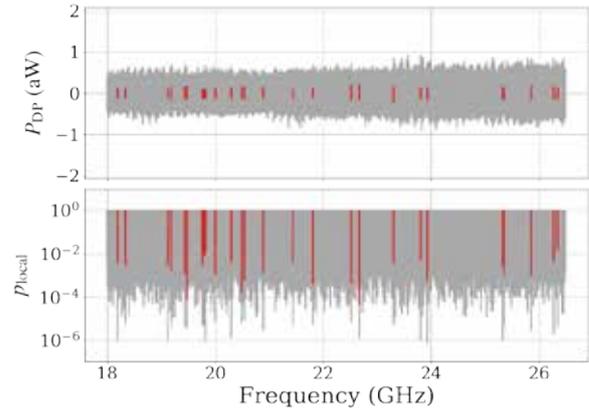


図 7: 各周波数でのフィッティングから得られたピークの高さ (P_{DP} , 上図) と local p -value (p_{local} , 下図)。 $p_{local} < 10^{-6}$ であった 27 点に対しては、追測定を 10 倍時間をかけておこなった。追測定の結果を赤色 (白黒印刷では濃い色) で示す。

4 今後の戦略

4.1 質量領域の拡大:

DOSUE-Q/V/W/D/Y

DOSUE-RR の探索はこれで終わらない。さらなる未開の周波数領域を開拓することを計画している。各周波数帯域でミリ波の規格が Q-バンド、V-バンド、W-バンド、D-バンド、Y-バンドと名付けられており、それに合わせて DOSUE-Q, DOSUE-V, DOSUE-W, DOSUE-D, DOSUE-Y と受信機を改造し、探索を行っていく予定である³。110 GHz を境に受信機に利用する技術が異なるのでそれぞれ説明していきたい。

DOSUE-Q/V/W

K-バンドよりも一つ上の Q-バンド (33–50 GHz) での測定は、基本的には K-バンドと同様の手法で行える。ただし、スペクトラムアナライザの対応周波数が 26.5 GHz 以下に限られているため⁴、図 9 に示すようなミキサを

³東北大の K 氏に DOSUE-RR/Q, DOSUE-RR/V などという言い方にすべきではないかと言われたが、RR=radio-range は非常に広い範囲の周波数帯域を表す言い方であるので、ここを各バンドに置き換えて DOSUE-Q = “Dark Photon Observing System for Un-Explored Q-band” というように言っていると理解してほしい。

⁴高い周波数に対応したスペクトラムアナライザも存在するが非常に高価になる。

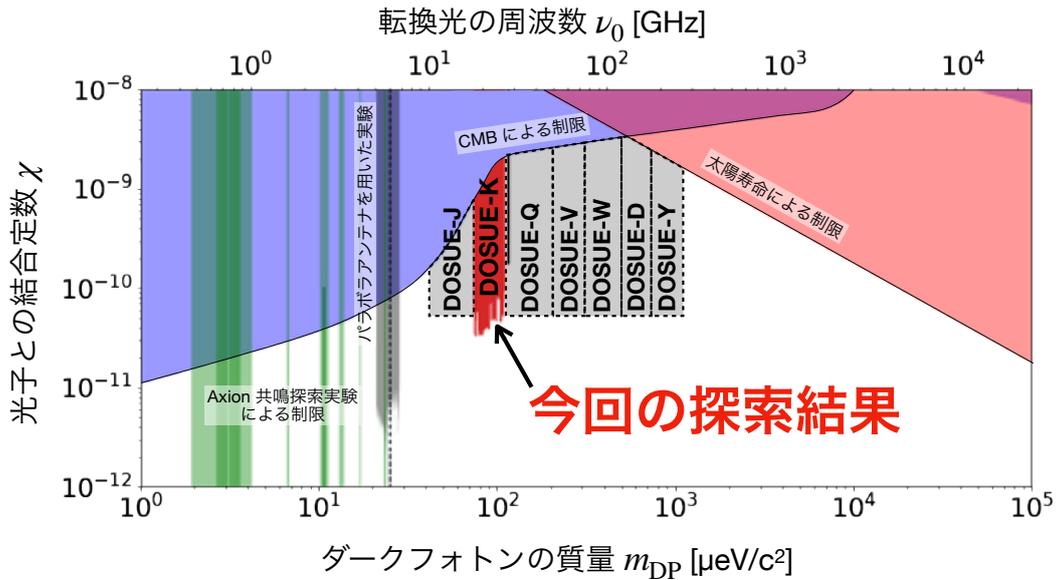


図 8: ダークフォトンの質量 m_{DP} と光子との結合定数 χ に対する制限。DOSUE-RR の初探索である 18–26.5 GHz での測定 (DOSUE-K) で CMB より強い制限を与えた。今後は、帯域ごとに受信機を改造して、より広い帯域に渡って探索していく。

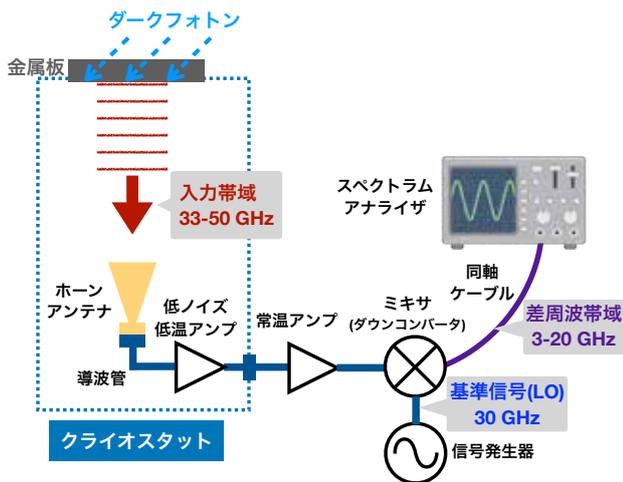


図 9: Q-バンドで測定のダイアグラム。

用いた周波数のダウンコンバージョンが必要となる。具体的には、入力帯域に対応したアンプで信号を増幅した後ミキサに入力し、信号発生器で設定した基準信号との差周波をスペクトラムアナライザで読み出す。このような手法を用いることで、より高い周波数 (V-バンド: 50–75 GHz, W-バンド: 75–110 GHz) においても、適切な周波数の基準信号を使用して、測定可能な低い周波数に変換することができる。

高周波になるほど同軸ケーブルでの減衰が大きいため、ミキサの手前まで導波管を用いて信号を取り回す必要があるが、低温層の中での断熱を適切に行いながらこれを行う。現在、断熱導波管、フレキシブル導波管などを組み合わせて、低温層内の綿密な設計をおこない、温度による収縮なども考慮した減衰の少ない信号測定の

実現を目指している。

さらなる高みへ... DOSUE-D/Y

DOSUE-RR では D-バンド (110–170 GHz) と Y-バンド (170–260 GHz) での探索も計画している。しかしながら、110 GHz 以上の周波数になると、市販の低ノイズアンプの雑音レベルが劇的に (典型的には一桁程度) 悪くなり、価格も非常に高価になる。つまり、アンプで増幅してミキサでダウンコンバートする手法は望ましくない。

この解決策として電波天文学で導入されたのが、SIS ミキサと呼ばれる超伝導デバイスである。SIS ミキサは「トンネル効果」、「粒子性」(単一光子による Photon-Assisted Tunneling 電流)、「波動性」(周波数変換) という量子的性質を統合した機能を提供するデバイスであり、低ノイズ (雑音温度換算で 50–100 K) に周波数をダウンコンバートできる [9]。ダウンコンバートできれば、低周波数用の低ノイズアンプを用いることができ、高感度に測定できる。現在は、Y-バンド向けのプロトタイプ受信機の準備をおこなっている (図 10)。今年度中に、SIS ミキサを初めて用いた探索を Y-バンドでおこなう計画である。

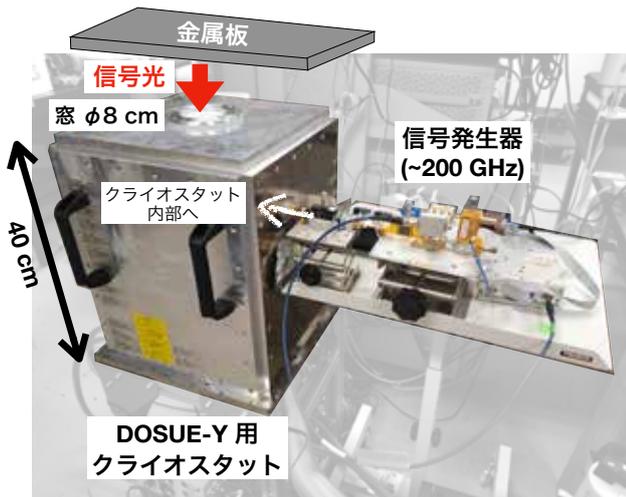


図 10: DOSUE-Y 受信機のプロトタイプ。上の窓から転換光を導入し、中にあるホーンアンテナで集光して計測する。SIS ミキサには基準となる高周波信号を入れる必要があり、それを右側の信号発生器で生成し、クライオスタット内に導入している。

4.2 統計精度の向上戦略

RFSoc エレクトロニクス「dSpec」の開発

ミリ波周波数領域でのダークフォトンやアクションダークマターの探索では、図 2 に示したように周波数スペクトルを測定して特徴的なピークを見つける探索手法が有効である。ただし、一般的な市販のスペクトラムアナライザでは、デッドタイムが 99% を占め、一気に測定できる周波数帯域が狭いという致命的な欠点がある。この欠点により、測定の効率が著しく低い。さらに、市販品は必要以上に機能が多く（つまり、イラナイ機能が）、価格も高い。

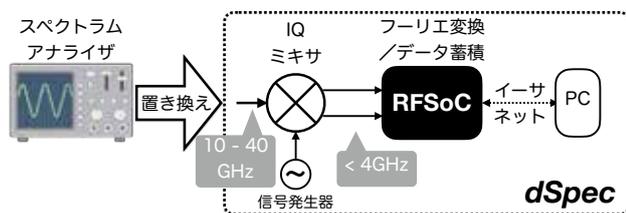


図 11: デッドタイムなし・広帯域測定を可能にするデータ取得システム dSpec の概略図。ダークフォトン由来の信号をミキサでダウンコンバートした後、RFSoc でフーリエ変換・データ蓄積の処理を行う。

この問題を解決するため、デッドタイムなしで広帯域測定ができる測定装置“dSpec”（ディースペック、**d**arkmatter **S**pectrometer）の開発プロジェクトを立ち上げた。図 11 に開発するエレクトロニクスの概略図を示す。ダークフォトン／アクション由来の信号をミキサ

で 4 GHz 以下の信号にダウンコンバートした後、開発するスペクトロメータでフーリエ変換・データ蓄積の処理を行う。その後イーサネット経由でコンピュータにデータを送り、解析処理を行う。

このシステムの心臓部であるフーリエ変換／データ蓄積処理部は Xilinx 社製の RFSoc で構築する。RFSoc は高速 ADC・DAC, FPGA, CPU などが一体になったチップで、5G 通信などを背景に生まれた新しい技術である。4 GSPS を超えるサンプリング速度の ADC で広い測定帯域幅を実現し、FPGA で並列データ処理を行う。

この開発で最もチャレンジングなのは、RFSoc の FPGA 部分のファームウェア開発である。4 GSPS の超高速レートサンプリングによりデータ量が膨大になるため、dSpec では FPGA でフーリエ変換・蓄積処理を行いデータ量を削減した後、PC へとデータ転送する。FPGA は CPU のような高速動作はできないため、帯域 4 GHz のデータをさばく工夫が必要となる。この問題を解決するため、高速フーリエ変換の回路を 16 個並列に用意し、最後に並列回路の結果を組み合わせることによって、広帯域のフーリエ変換を実現した。組み合わせ部分と後段のデータ蓄積部分では高位合成 (HLS) を駆使し、迅速なファームウェア開発を成し遂げることができる。

本稿の執筆時点では、修士 1 年の竹内広樹氏の実力によって、dSpec のファームウェアが整った。性能の評価をおこなった後に、DOSUE-RR 実験に導入する予定である。今後の発展計画として、帯域をさらに倍化することも検討している。

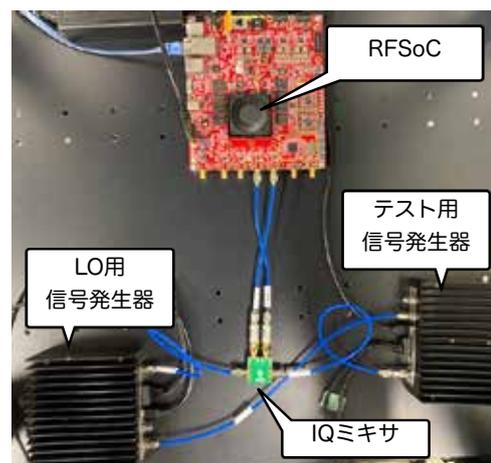


図 12: dSpec のテスト中の様子。二つの信号発生器と IQ ミキサを組み合わせ、模擬信号を生成し、RFSoc の搭載されたボードに入力している。

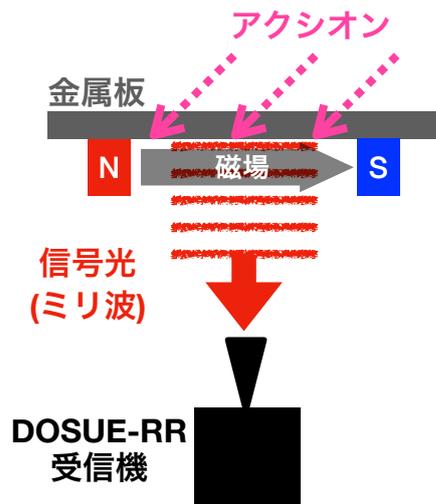


図 13: DOSUE-RR 受信機を用いてアクシオン探索をする場合のセットアップの概念図。

4.3 アクシオン探索への拡張展望

DOSUE-RR の測定セットアップに磁場を組み込むことでアクシオン探索への転用も可能である。アクシオンもダークフォトンと同様に軽いダークマターの候補である。磁場が存在すると、アクシオンと磁場が結合して金属境界面からわずかに転換光を生成する。アクシオンから生成される転換光もエネルギー保存によって同様のミリ波信号になる。

従来のアクシオン探索実験では、主に共振器を用いて信号を増幅して探索する方式が取られており、数 GHz 以下での探索が精力的におこなわれてきた。共振周波数が高くなるほど、共振器には高い工作精度を必要とし、一般に性能が低下する。一方で、DOSUE-RR のように金属板表面からの信号を検出する場合は高い周波数になっても同じ実験手法で探索することが可能である。つまり、高い周波数ほど従来手法と比較した際の強みが増す。この強みを活かした実験の準備を東北大学の岸本康宏氏と共に進めている。図 13 に DOSUE-RR 受信機を用いたアクシオン探索実験のセットアップの概念図を示す。

5 まとめ

DOSUE-RR の初探索結果と今後の戦略について解説した。DOSUE-RR は、着実な成果を上げている小規模実験である。まだまだ始まったばかりの実験でかつ少人数でおこなっており、自身のアイデアで様々な工夫することができる。筆者達は ATLAS 実験や CMB 実験など大規模、中規模の実験も経験しているが、テーブルトップ実験ならではの面白さを日々感じている。少人数だけでなく、各々が DOSUE-RR 以外の大実験で忙

しく、全く人手が足りていないのが実情であり、新たな仲間を常に募集している。周波数バンドの数だけ新たな実験結果を出すことができ、それを主導できるチャンスがある。今後、どんな実験しようか考えている学生、若手研究者にはぜひ興味をもってもらいたい。そして、筆者達まで気軽にご連絡いただきたい。

本記事で紹介した研究は、科研費 20K14486, 20K20427, 21H01093, 21H05460, 22K18713 と村田財団、住友財団、京都大学白眉プロジェクトの助成のもとにおこなっています。

参考文献

- [1] S. Kotaka *et al.*, “Search for dark photon cold dark matter in the mass range $74\text{--}110\ \mu\text{eV}/c^2$ with a cryogenic millimeter-wave receiver”, arXiv:2205.03679 (2022).
- [2] P. Arias *et al.*, “WISPy cold dark matter”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **06** (2012) 013.
- [3] D. Horns *et al.*, “Searching for WISPy cold dark matter with a dish antenna”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **04** (2013) 016.
- [4] F. Mayet *et al.*, “A review of the discovery reach of directional Dark Matter detection”, *Physics Reports* **627**, (2016) 1
- [5] J. Jaeckel and S. Knirck, “Directional resolution of dish antenna experiments to search for WISPy dark matter”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **01** (2016) 005.
- [6] N. Tomita *et al.*, “Search for hidden-photon cold dark matter using a K-band cryogenic receiver”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **09** (2020) 012.
- [7] 田島治, “ミリ波でみる大気と宇宙 ビッグバンとゲリラ豪雨, そしてダークマター”, *応用物理* **91** 巻 (2022) 1 号
- [8] R. Catena and P. Ullio, “A novel determination of the local dark matter density”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **08** (2010) 004.
- [9] 中井直正, 坪井昌人, 福井康雄, 「シリーズ現代の天文学 第 16 巻 電波天文の観測 II-電波天文学」日本評論社 (2020)