

新しい検出器が古くからの問題を解決

ヴァレリー・コフィ・ロズィツヒ

新しい検出器の進歩が、量子テレポーテーションからニュートリノやダークマター(暗黒物質)まで、科学の最もとらえどころのないミステリーを解決する。

検出器に関しては、単一光子検出器(SPD)が、フォトン研究の主力である。アバランシェフォトダイオード(APD)のようなSPDは、過去20年で進化し、依然として、フォトンクスにおける最高感度の検出器である。90%以上の効率で単一光子を検出する能力は、量子もつれを確認する実験で重要な役割を担った。それにより、2022年10月、3名の研究者がノーベル物理学賞を受賞した。アラン・アスペ氏(Alain Aspect)、ジョン・F・クラウザー氏(John F. Clauser)とアントン・ツァイ

リンガー氏(Anton Zeilinger)⁽¹⁾である。これら小型センサに関する受賞者の研究は、2つの粒子のもつれを確認し、量子テレポーテーションを実証して新興の量子技術新時代を可能にしている。

市販の近赤外(NIR)や可視波長SPDは効率的であり、特に、量子鍵配送(QKD)やライダーなどのアプリケーションで有用である。SPDの最先端の開発は、中赤外(Mid-IR)波長域への拡大に重点を置いている。これは、量子センシングで強みがある、また太陽系外惑星研究、ガス分子検出、蛍光イメージング、分光学といった回転振動分子励起に関するアプリケーションでも優位性がある⁽²⁾。Mid-IR検出器の課題は、NIR製品に比べて、検出効率が低く、タイミングジッタが高く、ダークカウントレート(暗計数率)が高いことに関係している。

開発中の最も有望な最近のMid-IR検出器の1つは、超伝導ナノワイヤ単一光子検出器(SNSPD)で、基本的にガイガーモードで動作するp-n接合である。すなわち、ブレイクダウンしき

開発中の最も有望な最近のMid-IR検出器の1つは、超伝導ナノワイヤ単一光子検出器(SNSPD)で、基本的にガイガーモードで動作するp-n接合である。すなわち、ブレイクダウンしき

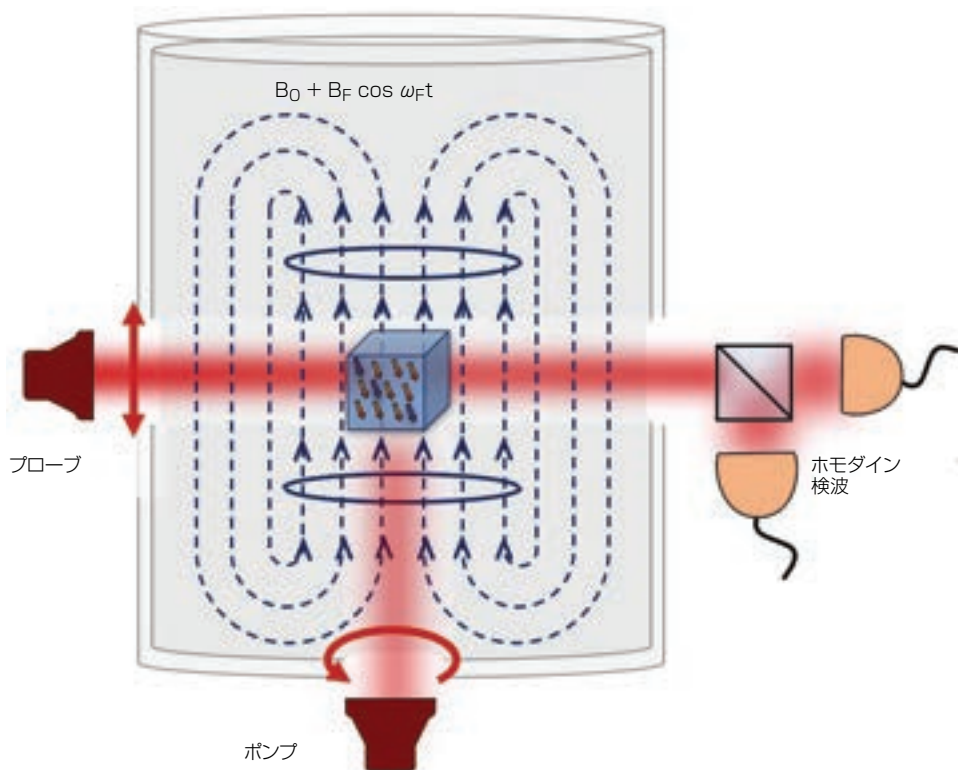


図1 超軽量アクシオンのような暗黒物質向けNASDUCKフロケ(Floquet)量子検出器は、強力な磁気駆動フロケ場、BFを含む。これは、銀河の背景暗黒物質ハローと相互作用する。チャンパー内では、高密度のスピンの偏光129Xeガスと85Rb気体を含む小さな立体ガラスセルは、*in situ*精密光学磁力計として機能する。一方のレーザーが、光学的にRb原子のスピンをポンプし、他方で第2のレーザーがコヒーレントスピン振動をプローブする。これは、アクシオンのような暗黒物質粒子と非重力的相互作用により生成できるものである。結果は、他の粒子との相互作用で暗黒物質の質量限界抑制に役立つ(提供: デューク大カッツ氏)

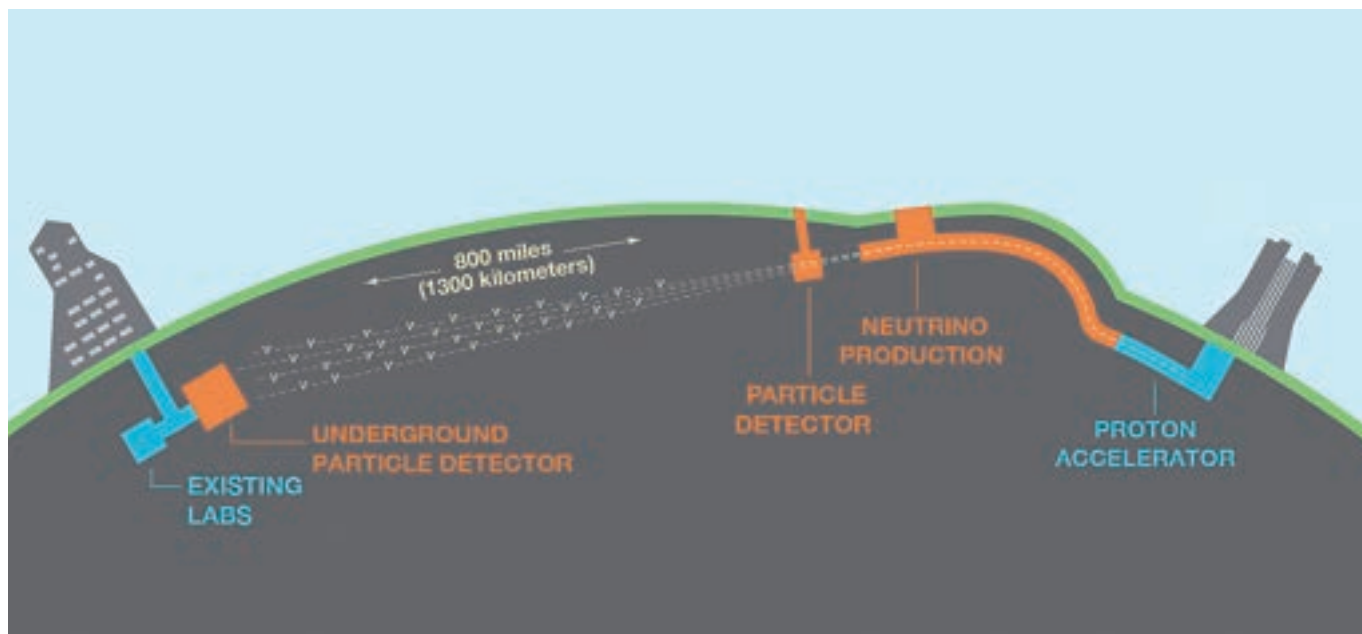


図2 DUNEプログラムは、イリノイ州にあるフェルミ研究所の陽子加速器でニュートリノを生成し、地中を通って800マイル離れたサウスダコタ州のサンフォード地下研究施設の地下粒子検出器に送る(提供:DUNE /フェルミ研究所)

い値電圧のわずかに上であり、これは単一の電子正孔ペアにより強力なアバランシェを引き起こす。SNSPDは、古いタイプのMid-IR検出器と比較して、ダークカウントレートが低く、改善された検出効率が改善され、ジッタが低い。さらに、単一光子は、SNSPDのナノワイヤチャネルに沿って容易かつ効率的に進む、これは安全なQKDでは重要要素である。

英グラスゴー大の研究者は、スペクトルのMid-IR域 $2.1\mu\text{m}$ でQKD研究にSNSPDを適用することで、SNSPDの高効率とタイミング性能を実証した⁽³⁾。光学助教のアデタンマイズ・ダダ氏(Adetunmise Dada)と同僚は、窒化チタンニオブ(NbTiN)薄膜SNSPDを使いデバイスに依存しないQKDを初めて実装し、 $0.254\text{bits}/\text{ペア}$ の安全なキーレートと量子ビット誤り率 3.8% のほぼ最大の2光子エンタングルメントを達成した。 $2\sim 3\mu\text{m}$ 域の検出器から最大 100% の量子効率を観測し、グループは、Mid-IRでSNSPDの利用が日中の自由

空間量子通信、また超高感度ライダーシステムの有望なソリューションであると考えている。

米デューク大の量子物理学研究者、オル・カツ氏(Or Katz)によると、量子アプリケーション向けに開発された検出器は、重力波、ニュートリノ、ダークマターなど、物理学の他の基礎的な問題の解決にいずれ役立つ可能性がある。

「精密計測あるいは量子センシング向けに開発された技術は、素粒子物理学の標準理論を超えて新しい物理学の発見、テストに適用可能であるとわれわれは考えている」とカツ氏は、話している。

標準理論は、宇宙を構成する4つの基本的力のうちの3つ電磁気力、強い核力、弱い核力を最もよく説明する現在の理論である。しかし、標準理論は、第4の力である重力を十分に説明していない、特に素粒子物理学におけるその位置も説明していない。これが大統一理論探求の目的である。もし宇宙に重力粒子があるなら、われわれはまだ

それを見つけていない。

暗黒物質の探求

科学者は、まだ暗黒物質を直接検出していない。それは、遠方の星や銀河の周りで重力レンズの原因となる謎めいた力であるが、光あるいは通常物質と相互作用するようには見えない。これらの神秘を研究する方法は多い。

例えば、イスラエルのテルアビブ大、エルサレム・ヘブライ大、およびワイツマン科学研究所の研究者は、暗黒物質と普通の物質との非重力相互作用を探求している。

カツ氏(以前はイスラエルのグループに所属し、現在はデューク大に所属)と同僚は、超軽量コヒーレント暗黒物質のためのノーブル・アルカリスピン検出器(Noble and Alkali Spin Detectors for Ultralight Coherent dark matter: NASDUCK)と呼ばれるその種のものでは初めて5ヶ月間にわたる共同研究を行った⁽⁴⁾。グループは、地球が銀河を通過する際に、キセノン

129 (129Xe)ガスと背景暗黒物質のスピンの偏極粒子相互作用を観察するためにフロケ (Floquet)量子検出器を使った。フロケ検出器は、高密度スピン偏極129Xeとルビジウム85 (85Rb)ガスが入ったガラス管体でできており、795nmの分布ブラッグ反射器 (DBR)レーザで励起、プローブされ、印加電磁気フロケ場の影響下にある(図1)。

NASDUCKの目標は、アクシオンと呼ばれる仮想素粒子、すなわち、キセノン粒子のスピンの相互作用する可能性があるアクシオンのような粒子の検出である。アクシオンは、量子色力学における「強い電荷共役とパリティ」問題を解決できる可能性があり、暗黒物質の構成要素かもしれない。彼らの研究では、アクシオンや暗黒物質を検出しなかったが、アクシオン様粒子と中性子との相互作用の質量上限を 4×10^{-15} と 4×10^{-12} eV/c²に制限することが可能になった。新たに導出された制約は、以前の境界を大幅に改善し、将来の探索を形作る上で役に立つ。

「特性が非常に精密な原子や分子を制御し、調査するレーザ技術の進歩は、新しい将来の検出器にとっての主要技術である」とカツツ氏は話している。

超低エネルギー現象を検出するもう1つのアプローチは大規模化することである。重力波やニュートリノの検出のために科学者は、惑星規模で数百マイル、あるいは数千マイル離してセンサを設置している。例えば、ニュートリノは、一般的な亜原子の中性子粒子で、ほぼ質量がなく、星の中心部深くの核反応で形成される。ニュートリノは、ほぼ光のスピードで宇宙を疾走し、地球のような質量に達すると、相互作用せずに通り抜けるだけだ。毎秒数十億のニュートリノがわれわれの身体を通り抜けている。ニュートリノにつ

いては、暗黒物質に寄与しているか、質量、どの程度のエネルギーがあるかなど問題が多い。とはいえ、その検出は極めて難しい。

ニュートリノ検出器

DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) 実験装置は、一連のロングベースラインニュートリノ検出器を構築する画期的な多国籍の取組みであり、その最初のもは現在建設中で、2020年代半ばに稼働が予定されている。イリノイ州バタビアにあるフェルミ国立加速器研究所の初の検出器は、独自のビームによって(粒子加速器を介して)生成されるニュートリノを監視し、第2の検出器は、-300° Fまで過冷却された液体アルゴンの巨大な地下タンクであり、サウスダコタ州リードのサンフォード地下研究施設の800マイル(1300km)の地下に存在する(図2)。地球を通過して地下まで進むニュートリノビームにより粒子が振動し、おそらく「特色」を変える。ニュートリノの中には、アルゴンと相互作用するものもあり、荷電電流イオンやフォトン「痕跡」を残す。サンフォードの検出器は、超新星などの自然源からのニュートリノもとらえるかもしれない。

他の2つの検出器は、フェルミ研究所からさらに遠く離れたヨーロッパに設置されることになる。商用入手できる大半の検出器は、ニュートリノがアルゴンを励起して放出される紫外(128nm)フォトンを検出することは

できない。従って科学者は、複数の検出器の設計を開発しているところである。

光トラップ

インディアナ大、フェルミ研究所、MITの研究者が構築しようとしている設計の1つのタイプは、光ファイバケーブルのように光をとらえ、それを外部センサに誘導するガイドバーである。ブラジルの研究者は、ブラジルの先住民の言葉で「鳥のわな」を意味するArapucaと呼ばれる「光トラップ」検出器構成を開発した。単一のArapucaトラップの最新バージョンの1つは、センチメートルスケールの反射ボックスで、128nmのフォトンが入り、それをトラップして内部反射コーティング、ダイクロイックカットオフフィルタ、液体アルゴン層、および波長シフトガイドといったいくつかの階層でそのエネルギーを「ダウンシフト」できる⁽⁵⁾。フォトン、次にシリコン光電子倍增管に向けられ、440nmでうまく検出される。数千のガイドバー、またはArapucaアレイが、現在建設中のプロトタイプ段階のDUNEに導入され、最終的に実際のDUNE施設に設置される。

Arapuca光トラップは、進化中の実験であり、DUNEプログラムが具体化するにつれて継続的に改善される。それが、どの程度よくニュートリノを検出し、計測するかということは、まだわからない。われわれは、物理学のある極めて重要な問題に対する回答に期待を寄せている。

参考文献

- (1) A. Aspect, *Physics*, 8, 123 (2015).
- (2) S. Dello Russo et al., *Photonics*, 9, 470 (2022).
- (3) A. C. Data et al., *Phys. Rev. Appl.*, 16, L051005 (2021).
- (4) I. Bloch et al., *Sci. Adv.*, 8, eabl8919 (2022).
- (5) E. Segreto et al. *JINST*, 13, P08021 (2018).