

超伝導量子ビットの直接励起を用いた暗黒物質探査

諸井 健夫 〈東京大学大学院理学系研究科 moroi@phys.s.u-tokyo.ac.jp〉

渡邊 香凜 〈東京大学素粒子物理国際研究センター karin3@icepp.s.u-tokyo.ac.jp〉

量子コンピュータを**自由**に使えらしたなら、皆さんは何がしたいだろう？ 場の理論の非摂動的解析や物性理解のためのエネルギーレベル計算、あるいは暗号鍵の解読、夢は広がる。

この原稿を書いている私たちの夢は、量子コンピュータを使って**暗黒物質**を発見することである。そう聞いて、量子コンピュータと暗黒物質という一見関連の薄いテーマがどのように結びつくのか、疑問に思う方も多いであろう。ここでは、その疑問に答えつつ、「量子コンピュータを使って暗黒物質を見つける」とは具体的にどういうことなのか、その背景や着想とともに解説していこうと思う。

量子計算を行うには、量子2準位系である**量子ビット**を実現し、そこに様々な量子操作（ゲート操作）を施す必要がある。多くの量子ビットに関して、これらの操作は電磁波（マイクロ波）を作用させることで実現される。これは、量子ビットが電磁波に対して非常に高い感度を持っており、同時に高感度な量子センサーとしても機能することを意味している。この特性を活かし、未発見の暗黒物質の検出を目指すことが、本稿の主題となる。

現在の素粒子・宇宙分野の大きな問題のひとつに、暗黒物質の存在が挙げられる。暗黒物質は宇宙のエネルギー密度の約26%を占める「物質」であり、様々な天文・宇宙的観測からその存在が確認されている。しかし、その素粒子的性質に目を向けた時、まず強調されるべきことは「暗黒物質は**素粒子標準模型**に含まれる粒子ではありえない」ということである。すなわち、暗黒物質がどのような粒子あるいは場であるかについて、我々は何も知らない。そのような未知の粒子（あるいは場）である暗黒物質を直接的に検出するべく、世界中で様々な

探査実験が進められている。しかし熾烈な努力と競争にもかかわらず、未だ暗黒物質の直接検出には成功していない。

近年、電磁場に対して極めて高い感度を持つ超伝導量子ビットを暗黒物質探査に応用するという提案がなされた。ある種の暗黒物質は、質量を持った電磁場のように振る舞い、非常に微弱な電磁場を発生させる。そして、この暗黒物質由来の電磁場により、超伝導量子ビットの励起が起こり得る。超伝導量子ビットについて、暗黒物質による励起確率を見積もってみると、暗黒物質の相互作用の弱さにもかかわらず、検出可能なレベルに達する可能性があることがわかる。このことは、超伝導量子ビットを活用した暗黒物質探査実験の実施を強く後押しするものである。

そして現在、超伝導量子ビット励起を暗黒物質探査実験に利用する機運が高まりつつある。私たちは、超伝導量子ビットを用いた暗黒物質探査実験（DarQ-Direct 実験）を始動させた。この実験により、従来の手法ではアクセスできなかった暗黒物質に関して、新たな知見が得られると期待されている。さらに、中長期的には、量子ビットの量子性を最大限に活用した暗黒物質検出シグナルの量子的な増幅も視野に入れている。そのようなシグナル増幅を実現するためには、量子ビットに多様な量子ゲート操作を施すことが必要であり、それはまさに量子コンピュータによる暗黒物質探査と言えるであろう。

以上の議論は、暗黒物質のみならず、標準模型を超える素粒子物理学の探究においても、量子技術が有用であることを示唆している。量子技術を積極的に導入することで、素粒子物理学はさらに大きな発展が期待できるのである。

——用語解説——

自由：

【広辞苑】一般的には、責任をもって何かをすることに障害（束縛・強制など）がないこと。自由は一定の前提条件の上で成立しているから、無条件的な絶対的自由は人間にはない。【悪魔の辞典（A. ピアス）】想像力のもっとも貴重な財産のひとつ。

暗黒物質：

宇宙の全エネルギーの約26%を占めるとされる物質。銀河の回転曲線や重力レンズや銀河団ダイナミクスから、宇宙の大規模構造、そして宇宙背景放射の揺らぎまで、様々な観測事実からその存在が示唆されている。暗黒物質の直接検出には未だ成功しておらず、その素粒子的性質は未解明のままである。多くの研究者は「暗黒物質は絶対にある」と思っている。

量子ビット：

量子計算を行うにあたって情報の最小単位となる、量子2準位系。超伝導型量子ビットの他、イオントラップやダイヤモンド中のNV中心、リドベルグ原子を用いる方式など、様々なタイプが存在する。「量子ビットは量子計算だけでなく素粒子実験にも使えそう」と心密かに興味を持っている研究者はそれなりに多そうである。

素粒子標準模型：

様々な素粒子現象（ニュートリノ振動を除く）を正確に記述する、かなりうまくいっている素粒子模型。ただし、暗黒物質の存在やその起源については説明できないなど、不満足な点も多い。多くの研究者は「素粒子標準模型はいずれどこかのエネルギースケールで破綻する」と思っている。