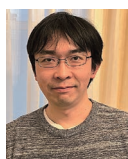


# 量子スピナイス——遅い光と遍歴する磁気モノポール



宇田川将文

学習院大学理学部  
masafumi.udagawa@gakushuin.ac.jp

物質を構成するマクロな個数の電子状態が膨大な重ね合わせを起こしたらどのような物性が生じるだろうか？ この間に答を与えるのが**量子スピナイス**の研究である。20世紀の終わりに発見された磁性体である**スピナイス**は、それ自体魅力的な性質を備えた物質であるとともに、量子スピナイスの魅力を垣間見せる。スピナイスは、その磁気構造が氷(H<sub>2</sub>O)における水素原子配置と同等のルールで記述されるために、「アイス」の名で呼ばれる。氷は見かけ上、熱力学第三法則を破って絶対零度近傍でも有限のエントロピーを保持することは有名であるが、スピナイスはほぼ同量の残留エントロピーを示し、その基底状態は系を構成するスピンの数に対して指数関数的に増大する莫大な個数の縮退をもつ。

量子スピナイスの典型例——量子スピナイス——はこのマクロに縮退したスピナイスの量子力学的な重ね合わせ、すなわちシュレディンガーの猫ならぬ、「シュレディンガーの氷」である。逆にスピナイスは、量子スピナイスが完成する前の前触れ、重ね合わせが生じる前の、高温のスピナイスと位置づけることができる(奇妙に聞こえるが「アイス」が「液体」よりも温度が高いのだ)。

量子スピナイスの示す著しい特徴として、分数化という現象が挙げられる。分数化とは電荷やスピンなど、系を構成する基本的な量子数がより小さい単位に分裂して独立した粒子として振る舞う現象を指す。分数化は量子力学の本質である重ね合わせの原理の裏返しとも言えるだろう。スピンはそれ自体ひとつの実体に見えるけれども、別

の環境下では、もっと基本的な何者かの重ね合わせとしてより自然に振る舞う。

分数化して生じる粒子の振る舞いは強結合のゲージ理論によって記述される。量子スピナイスを記述する**ゲージ理論**は驚くべきことに、我々の世界の基本法則に現れる**量子電磁気学**(QED)である。しかしながら我々の知るQEDとはやや異なる。光は遅い。スピナイスが分裂して生じる**磁気モノポール**は、我々のQEDには(今のところ)存在しない。大きい**微細構造定数**、同符号の電荷に引力が働く電磁気学など、量子スピナイスは「あり得たかもしれないこの世界」の様々な可能性を物質中に実現して我々に提示する。

量子スピナイスを含む、量子スピナイス相が現実の物質で実際に実現しているかどうかは、長年の研究にもかかわらず、まだ定かとは言えない。量子スピナイスの探索には高温のスピナイスがよい道標となるだろう。まだ存在が不確かな量子スピナイスとは異なり、スピナイスは残留エントロピーをはじめとする確固とした実験結果により、Dy<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>やHo<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>などの物質で実現していることが知られている。量子スピナイスの兆候を捉えるために鍵となるのが、高温のスピナイスから出発して、降温とともにいち早く量子性を獲得する磁気モノポールの探索である。強結合のゲージ理論に従う磁気モノポールの振る舞いを捉えることは容易ではないが、物理特性を鋭く見抜く理論手法の開発によりそのダイナミクスが精度よく記述され、量子スピナイスの探索という長年の問題が解決に向けて大きく前進することが期待される。

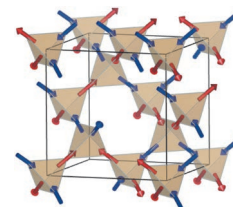
## 用語解説

### 量子スピナイス:

広義には基底状態が磁気秩序を示さない強相関の絶縁体を指す。Kitaevスピナイスや、本稿で紹介する量子スピナイスが代表的な例として盛んに研究され、基底状態のもつトポロジカル縮退や分数化した量子数をもつ励起状態の性質に大きな興味が集まっている。

### スピナイス:

正四面体が頂点共有して連なるパイロクロア格子で定義される磁性体。全ての正四面体上でスピナイスが2-in 2-outの規則で配置する。



### ゲージ理論:

物理的状态に影響しない余分な自由度をもつゲージ場を含んだ場の理論。量子スピナイスの理論では、局所的な拘束条件の存在がしばしばゲージ場の導入につながる。

### 量子電磁気学:

光子によって媒介される、荷電粒子間の相互作用を記述する量子場の理論。

### 磁気モノポール:

単一の磁極のみをもつ粒子のこと。スピナイス中では、磁気双極子を構成するN極とS極を有限のエネルギーコストで無限遠に引き離すことができ、各々の磁極が磁気モノポールとして振る舞う。

### 微細構造定数:

電磁相互作用の強さを表す無次元定数。ガウス単位系で $\alpha = e^2/\hbar c$ の形を取り、 $\alpha^{-1} \sim 137.035999160$ の値をもつ。