

氷の相転移に見られるメモリーと惑星形成

鍵 裕之 (地殻化学実験施設 教授)
 荒川 雅 (化学専攻博士課程修了^{注)})

◆ ◆ 私たちの身の回りには水素原子が2か所を移動する無秩序配置をとり、70 K以下では水素原子が1か所に固定された秩序状態の強誘電性氷に変化する。われわれの中性子回折実験から、70 Kよりもはるかに高い110 K以上の温度でも秩序状態の氷がナノメートルオーダーの微小領域に残留していることが見いだされた(氷のメモリーと命名)。太陽系で大部分の氷の温度は150 K以下であるため、太陽系に普遍的に強誘電性氷が存在していること、強誘電性氷のクーロン相互作用が惑星形成過程に重要な役割を果たした可能性が示された。

◆ ◆ 水素は太陽系でもっとも存在度の高い元素で、水は宇宙空間で水素、一酸化炭素に次いで3番目に高い存在度をもつ分子種である。水の結晶である氷には少なくとも16種類の多形が存在することが知られている。われわれの身の回りには氷Ih(ワンエッチ相、氷の多形を示す記号)水素原子は、水分子間の水素結合上の2つの位置にそれぞれ1/2の存在確率で時間の経過とともに原子位置を変えている。このように、水素原子が2つの位置のどちらにも存在可能な状態を無秩序配置とよぶ。一般的に、無秩序な原子は温度が下がると熱力学第3法則に従って規則的に配置(秩序化)する。氷Ihの場合は、57 Kから62 Kの温度範囲で発熱反応を伴いながら水素原子が1か所に固定され、秩序化した氷XI(イレブン相)に変化することが知られている。ちなみに現在の太陽系では、土星より外側の温度条件が強誘電体の氷XIが安定に存在できる領域に相当する。

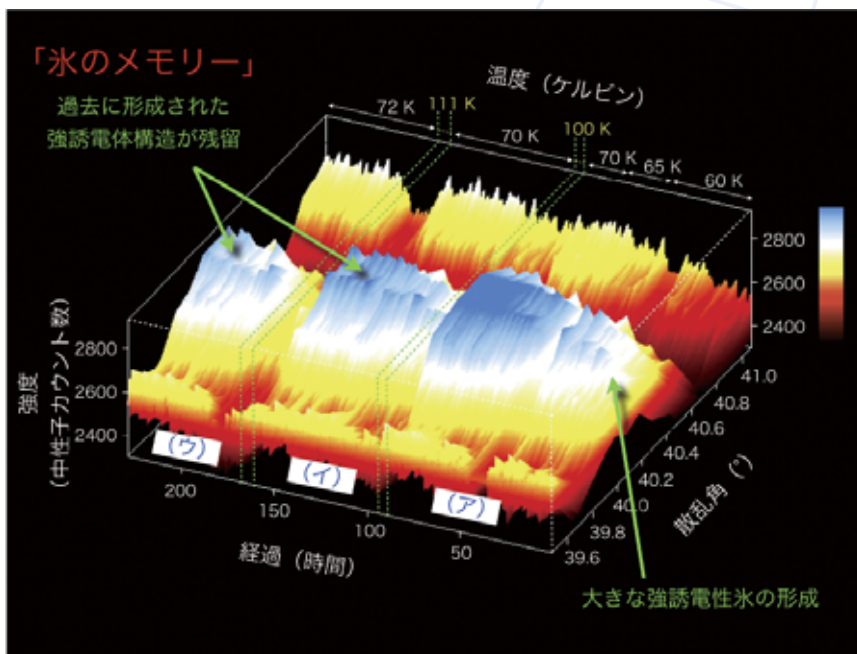
われわれは、さまざまな温度で長い時間を経過させた氷試

料の結晶構造の変化を中性子回折から測定し、温度履歴と水素秩序化の関係を調べた。その結果、過去に秩序化した氷XIに相転移した経験をもつ氷の試料は、無秩序氷が安定である高い温度領域でも、水素原子が秩序化した氷XIに変化するという新しい現象を発見した。まるで氷が記憶をもつかのように過去の結晶構造に影響されることから、われわれはこの現象を氷の「メモリー」と名付けた。この現象は、過去に氷XIに相転移した経験のある氷には、150 K程の高い温度でもナノメートルスケールの微小な領域に秩序構造が残留しており、この小さな秩序領域が核となって氷XIがこれまでに報告のなかった高い温度で結晶成長したと考えられる。

氷XIは、酸素原子と水素原子から生じる双極子モーメントが一方方向に揃った強誘電体で、自発分極により他の物質と大きなクーロン相互作用をもつ。したがって強誘電性氷は、氷同士の合体成長が促進されることで微惑星の成長過程に大きな影響を与えた可能性がある。太陽系の大部分の氷の温度は

150 K以下であるため、本研究で提案したナノスケールの水素秩序化は、太陽系に存在する多くの氷が強誘電体的性質をもつ可能性を示唆している。将来、さらなる研究の進展が期待される小惑星帯にも強誘電性氷が存在するかもしれない。今後、大強度陽子加速器施設(J-PARC)のパルス中性子を用いて、さまざまな結晶構造をもつ氷の性質を深く理解し、惑星形成や物質進化の謎を解明していきたい。本研究は、日本原子力研究機構の深澤裕研究副主幹との共同研究の成果で、M. Arakawa *et al.*, *Geophysical Research Letters* 38, L16101(2011)に掲載された。

(2011年9月5日プレスリリース)



中性子回折実験で観察された「氷のメモリー」の例。(ア)で形成された強誘電体の結晶構造が(イ)と(ウ)に残留している。この残留構造を氷のメモリーと命名した。

注) 現所属：九州大学大学院 理学研究院 化学部門 助教

ミュー粒子から素粒子の大統一理論を探る

森 俊則 (素粒子物理国際研究センター 教授, 物理学専攻 兼任)

素粒子に働く3種類の力は、宇宙開闢時^{かいびやく}にはひとつの力として統一されていたと考えられている(大統一理論)。これを検証するため、ミュー粒子の電子とガンマ線への崩壊($\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊)が注目されている。この崩壊は標準理論では許されず、発見されれば大統一理論の証拠となる。われわれは新たな実験装置を開発してこの崩壊の探索を開始した。まだ発見には至らず、大統一理論に対してこれまでにない厳しい制限を加えることになった。実験は継続中であり、さらに感度を上げて探索を続けていく。

クォークを結びつけて陽子や中性子などを形作る「強い力」と、原子核の β 崩壊などを引き起こす「弱い力」は、素粒子の世界でしか働かない力であるが、身近な力である電磁力と同様、ゲージ対称性から導かれる。そのため、これら3つの力がより大きな対称性によって統一されるだろうという期待がある。3つの力が統一されるとクォークと電子などの区別がなくなって素粒子も統一され、電子と陽子の電荷が正確に同じであることが自然に説明できる。そのいっぽう、陽子が電子やニュートリノに崩壊することも予言される。

1980年代に小柴昌俊特別栄誉教授が始めたカミオカンデ実験やそれに続くスーパーカミオカンデ実験では、陽子崩壊を探索したが見つからず、当時の大統一理論が間違っていることを示した。その後1990年代にわれわれが行ったCERN(欧州原子核研究機構)のLEP実験では、新たな対称性「超対称性」を入れた新しい大統一理論の可能性が示唆された。超対称大統一理論では陽子の寿命はずっと長く、スーパーカミオカンデ実験で陽子崩壊が見つからなかったのも当然で、さらに巨大な実験装置が必要ということになった。

そこで注目を集めたのが $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊である。第二世代の素粒子であるミュー粒子がガンマ線を放出して第一世代の電子へ移り変わる $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊は、標準理論では禁止されている。しかしこのような異なる世代間の遷移はクォークでは許されており、もし大統一理論によって素粒子が統一されれば、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊も $10^{-11} \sim 10^{-14}$ というひじょうに小さい確率で可能となる。これは測定効率を考慮すると、毎秒数千万のミュー粒子崩壊を1年以上観測して1つ見つかるかどうか、というきわめて難しい実験となる。

そこでわれわれはこれまでにない新しい優れた実験装置(図)を開発して、実験に必要な大量の良質ミュー粒子ビームが世界で唯一得られるスイスのポールシェラー研究所(PSI)で実験を開始した。2010年までに取得したデータでは残念ながら発見には至らず、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊の確率は90%の信頼度で 2.4×10^{-12} より小さいことが分かった。この結果は大統一理論に対してかなり厳しい制限を与えた。実験は継続中であり、さらに感度を上げて探索を続けていく予定である。もし $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊が発見されれば、ニュートリノ振動の背後に潜む物理法則にもつながると期待される。また超対称大統一理論の予言する重い素粒子(超対称粒子)は、CERNのLHC実験で探索が行われている。本研究は、J. Adams *et al.* (*MEG Collaboration*), *Physical Review Letter* **107**, 171801 (2011) に掲載された。

(2011年9月27日プレスリリース)



本研究のために開発された実験装置のひとつ、液体キセノンガンマ線測定器を組み立てているところ。2.7トンの液体キセノンの光を、取り囲んだ光電子増倍管がとらえる。

新しい二次元トポロジカル絶縁体の作成に成功

平原 徹 (物理学専攻 助教), 長谷川 修司 (物理学専攻 教授)

トポロジカル絶縁体はバルク（結晶内部）が非磁性で電気を流さないが、端や表面にスピン偏極した質量を持たない電子が存在し、これまでの固体の分類からはみ出る新奇な物質群である。今回われわれは二次元トポロジカル絶縁体であると理論的に予言されていた2原子層の厚さのビスマス超薄膜の実験的作成に成功した。これにより原子1, 2層厚さのナノデバイスや低消費電力スピンドバイス、次世代の量子コンピューター開発の研究が大きく進展するものと期待できる。

近年、金属・半導体・絶縁体・超伝導体といった従来の固体の分類の枠に収まらないトポロジカル絶縁体という物質が注目を集めている（位相幾何（トポロジー）を物質の電子状態の解析に取り入れる事で、これまで知られていた絶縁体とは本質的に異なる新しい絶縁体物質として2005年に提唱された）。普通の絶縁体は電圧をかけても電流が生じないが、トポロジカル絶縁体では物質の中身は絶縁体状態であるにもかかわらず、その表面や端では普通とは異なる特殊な金属状態が実現して、そこだけ電流が流れるといわれている。この端の電子は質量を持たず、スピン（電子の自転）をそろえて動き回るといふ特殊な性質をもつ。また通常の物質とは異なり、トポロジカル絶縁体の端の伝導電子は、磁性の無い欠陥や不純物によって邪魔されることなく（エネルギーを損失することなく）動き回ることができる（図）というひじょうに魅力的な性質をもっている。そのため、トポロジカル絶縁体を利用して、超低消費電力スピンドバイスや、次世代の量子コンピューターの開発に大きな期待が寄せられている。これまで、三次元のトポロジカル絶縁体に

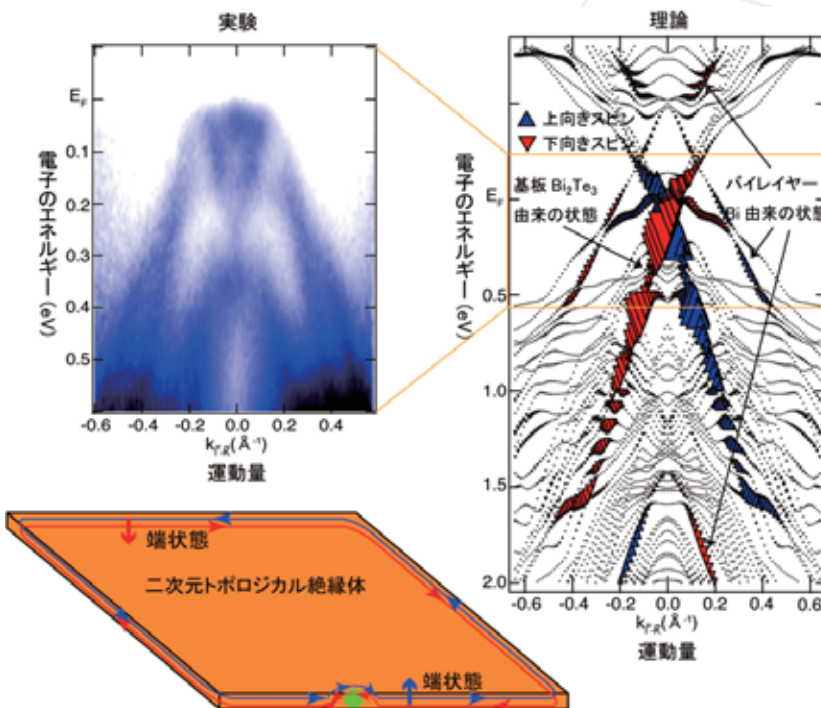
関しては多くの報告があったが、それよりエネルギーの損失が少ないと予測されている二次元トポロジカル絶縁体に関しては実験的には一、二例しか知られていなかった。

2006年に東工大の村上修一准教授によってビスマス（Bi, 原子番号83の元素で物性物理学においてもっともよく研究されているもののひとつ）という物質を2原子層（バイレイヤー）にすると二次元のトポロジカル絶縁体になるということが理論的に予言された。しかし物質を1, 2原子層に二次元化することは、たとえば2010年のノーベル物理学賞対象となった炭素1層のグラフェンなど実際に作成するのは不可能ではないが、簡単にできるのではなく、実際にバイレイヤーBiを作成できたグループはこれまでなかった。

今回、われわれは、基板として三次元トポロジカル絶縁体であるビスマステルライド（ Bi_2Te_3 ）というビスマスによく似た結晶構造をもつ物質を用いることでビスマスがバイレイヤーから単結晶超薄膜として成長できることを、電子回折・走査トンネル顕微鏡観察実験から発見した。そして分子科学研究所

において高分解能角度分解光電子分光法によりこのバイレイヤービスマスの電子の状態を測った。さらにドイツのユーリッヒ研究所の協力を得て従来よりも詳細な理論計算を行った。その結果、今回作成した Bi_2Te_3 上のバイレイヤーBiの電子は概ね村上准教授などの理論計算通りのエネルギー状態をもつことが明らかになった。また基板の Bi_2Te_3 の表面状態もBi吸着によってほとんど影響を受けず、二次元と三次元のトポロジカル絶縁体が共存しているというひじょうに特殊な状況が実現していることが分かった（図）。これを利用して原子1, 2層という究極に薄いナノデバイスや次世代の省エネスピントロニクスデバイス、超高速処理を行う量子コンピューター開発が一歩進むと期待できる。本研究は、T. Hirahara *et al.*, *Physical Review Letter* 107, 166801 (2011) に掲載された。

(2011年10月12日プレスリリース)



二次元トポロジカル絶縁体の概念図（左下）および Bi_2Te_3 上のバイレイヤーBiの電子状態の実験結果と理論計算