2024 年度（第 70 回）仁科記念賞
受賞者と業績

1）下浦 享 Susumu Shimoura

東京大学名誉教授
（前東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センター　教授）

業績題目：

「4中性子状態の実験的研究」

“Experimental study of four-neutron states”

業績要旨：

下浦享氏は、理化学研究所 RI ビームファクトリーで供給される中性子過剰な不安定核 ^{8}He の二次ビームを用いて、高効率的かつ無雑音でテトラニュートロンを生成しうる $^{8}\mathrm{He} + {}^{4}\mathrm{He} \rightarrow {}^{8}\mathrm{Be} + 4\mathrm{n}$ および $^{8}\mathrm{He} + \mathrm{p} \rightarrow \mathrm{p} + {}^{4}\mathrm{He} + 4\mathrm{n}$ という２通りの生成反応を考案して、それぞれの反応での 4 中性子系の質量スペクトルを高精度で測定した。その結果、質量スペクトルの同じ位置に幅の狭い明確なピーク構造を観測し、4 中性子が強く相関して集まったテトラニュートロンが存在することを示した。特に高統計の 2 つ目の実験データでは、ピークの中心質量（エネルギー）が中性子 4 個の質量和より 2.37±0.38（統計）±0.44（系統）MeV 高く、テトラニュートロンが束縛状態ではないことも確定した。このテトラニュートロンの構造は、様々な理論計算によっても現時点では明確になっていないが、本研究は多中性子系の新たな研究領域を拓くもので、今後中性子間 3 体核力の理論的解明などを通して中性子超過剰核さらには中性子星の構造の理解に大きく貢献するものと期待される。

業績詳細:

中性子だけが集まってできた原子核や集合状態が存在するか否か、という問いは、長年にわたって答えが得られていなかった原子核物理学の重要問題である。2 個の中性子間の核力は引力であるものの陽子・中性子間に比べて弱く、陽子・中性子は束縛して重陽子という原子核を形成するのに対し、2 中性子はぎりぎり束縛しないことが分かっている。では、3 個以上の中性子の系はどうなるのだろうか。原子核では、中性子（または陽子）の個数が偶数になると奇数の時よりエネルギーが下がるため、特に 4 中性子については、束縛した準安定原子核として、あるいは、ある時間だけ 4 中性子が一緒になった共鳴状態として、4 中性子原子核（テトラニュートロン）が存在するのではないかと期待され、約 60 年前から実験・理論の両面でさまざまな研究が行われてきた。しかし、これまでに結論は得られていなかった。その最大の理由は、中性子だけを 4 個同じ場所に集めるような実験が極めて難しいためであった。

下浦氏は、中性子過剰な不安定核 ^{8}He のビームを ^{4}He 核の標的に当てる ^{8}He + ^{4}He→ ^{8}Be + 4n という核反応によってテトラニュートロン(4n)を効率よく無雑音で生成する実験を考案した。この反応では、図 1（上）のように、標的の ^{4}He 内の 2 個の陽子が 2 個の中性子に入れ替わることで、4 個の中性子がほぼ静止した状態（無反跳）で残る。ビームの ^{8}He は ^{8}Be に変わるが、この ^{8}He と ^{8}Be のエネルギー（実際には ^{8}Be は即座に ^{4}He 2 個に分かれるためその両方のエネルギー）を精度良く測定すれば、残された 4 中性子系のエネルギーが分かる。下浦氏は、この実験を理化学研究所

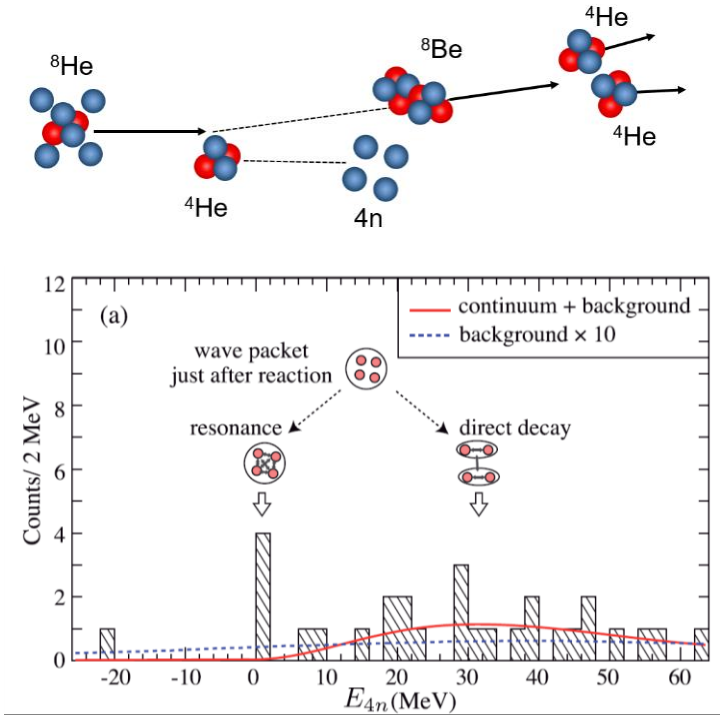

図 1: （上）^{8}He + ^{4}He → ^{8}Be + 4n 反応の模式図。（下）この反応による実験で得られた 4 中性子系のエネルギースペクトル。横軸 E_{4n} は 4 中性子系のエネルギーから 4 中性子の質量和を引いたもの。 $E_{4n} = 0$ のすぐ上に観測されたピークはテトラニュートロンの共鳴状態と考えられる。

RIBF においてが自ら主導して実施した。加速した ^{18}O をベリリウム標的に当て、生成する種々の原子核の中から ^{8}He を分別してビームとし、これを液体ヘリウム標的に入射し、生成した 2 個の

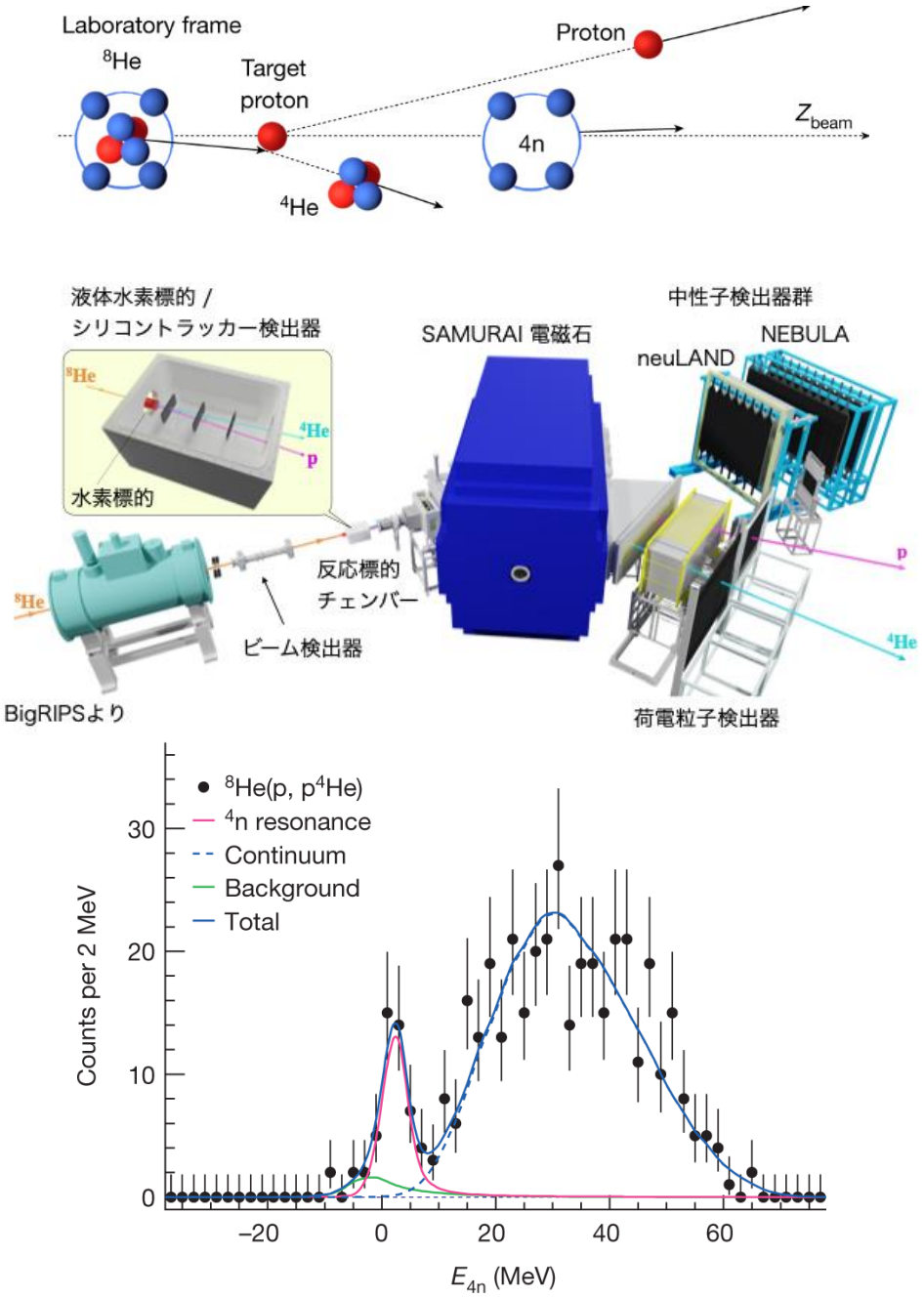

図 2: （上）^{8}He＋p → p ＋ ^{4}He＋ 4n 反応の模式図。（中）この反応を用いた RIBF での実験装置。左から ^{8}He ビームが入射して水素標的で反応し、生成した ^{4}He と陽子 p を電磁石と検出器群からなる SAMURAI スペクトロメータで分析した。（下）得られた 4 中性子系のエネルギースペクトル。横軸 E_{4n} は 4 中性子系のエネルギーから 4 中性子の質量和を引いたもの。E_{4n}＝2.37±0.38(統計)±0.44(系統) MeV に幅 Γ=1.75±0.22(統計)±0.30(系統) MeV のテトラニュートロンの存在を示すピーク（赤線部分）が観測された。

^{4}He を SHARAQ スペクトロメータを用いて分析して 4n 系のエネルギーを測定した。その結果、図 1（下）のように、エネルギースペクトルの中性子 4 個の質量和から約 1 MeV 上に 4 カウント（統計的優位度 4.9σ）のテトラニュートロンの存在を示すピークを観測した[1]。

次に下浦氏は、^{8}He＋p → p ＋^{4}He ＋ 4n というテトラニュートロンを効率よく無雑音で生成できる別の反応を提案した。^{4}He 核（α粒子）のまわりに 4 つの中性子がゆるく束縛した構造をもつ ^{8}He 核を陽子 p に衝突させて、^{8}He 核内の α 粒子を叩き出して残りの 4 中性子をそっと残すという α ノックアウト反応である（図 2（上））。この実験も下浦氏の主導のもと RIBF で実施された。図 2（中）ように ^{8}He ビームを液体水素標的に当てて放出される ^{4}He と p を SAMURAI スペクトロメータで分析した。得られた 4 中性子系のエネルギースペクトル（図 2（下））には、統計的優位度 5σ 以上の高統計(約 60 カウント)のピークが観測され、そのエネルギーは 2.37±0.38(統計)±0.44(系統) MeV、幅は 1.75±0.22(統計)±0.30(系統) MeV であった。これは 1 回目の実験結果と合致する。この結果から、テトラニュートロンは 4 中性子質量より約 2 MeV 高いエネルギーに約 2 MeV の幅の共鳴状態（または強く相関した状態）として存在し、束縛状態ではないことが確定した[2]。

これまでにさまざまな理論計算がなされたが、観測されたこのピークを再現することは難しい状況にある。もととなる核力は既知だとしても、異なる計算方法によって異なるエネルギーや幅の共鳴状態が予言される。共鳴状態は存在せず中性子間の相互作用によって細い幅のスペクトルが観測されるとする解釈もある。この実験結果は、現在の原子核理論に改良や修正を迫るものであり、今後の理論的発展が期待されるところである。

上記 2 つの実験の成功の鍵は、下浦氏が独自に考案したテトラニュートロン生成反応にあり、さらに下浦氏の強力な指導力のもと、国内外の多数の研究者を糾合して実験が実施された。現在、RIBF をはじめとする世界の施設で中性子過剰核の実験研究が進められている。中性子が極めて過剰な核では、複数の過剰中性子が芯原子核の周りにハローとなって広がっている。今回の成果は、このハロー中性子の間の相関や、中性子超過剰核の構造を理解する上で大きな助けとなる。また、原子核物理では、3 個の核子（陽子・中性子）の間に働く 3 体核力の重要性が知られているが、中性子 3 個の間に働く（アイソスピン 3/2 の）3 体核力の性質は分かっていない。今回の結果をもとにこの中性子 3 体核力の性質が明らかになれば、こうした中性子間の核力と重力とによって形成されている中性子星の内部を解明することにもつながる。このように、本成果は、多中性子系の核物理というべき新たな研究領域を拓くもので、これを契機に実験的、理論的研究が一層進むことで、中性子超過剰核や中性子星の構造の理解にも大きな役割を果たすと期待される。

参考論文

[1] K. Kisamori et al., “Candidate Resonant Tetraneutron State Populated by the ^{4}He(^{8}He,^{8}Be) Reaction” Phys. Rev. Lett. **116**, 052501 (2016).

[2] M. Duer et al., “Observation of a correlated free four-neutron system” Nature **606**, 678 (2022).

2）青木 大 Dai Aoki
東北大学金属材料研究所 教授

業績題目：

「アクチノイド化合物における超伝導の先駆的研究」

“Pioneering research on unconventional superconductivity in actinoid compounds”

業績要旨：

超伝導と強磁性（磁石）は、物質が示す相転移現象の中で最も劇的なものであり、現代物理学の中核的研究課題として位置づけられている。この2つの現象は水と油の関係であり長らく相反する現象とされ、その共存は不可能とする見解が支配的であった。青木氏はアクチノイド化合物 URhGe（ウラン・ロジウム・ゲルマニウム）を発見し、両者が常圧下でも微視的に共存することを示した。さらに本物質の発見により、磁場下で一旦消失した超伝導相が強磁場中で再出現する「リエントラント超伝導」現象が見出され、従来の超伝導とは異なる対称性を有する「スピン三重項超伝導」という新規な超伝導状態の研究領域が開拓された。このように青木氏は強磁性超伝導という新しい分野のパイオニア的役割を果たした。

業績詳細:

超伝導も強磁性のいずれも電子の持つスピン角運動量と密接に関連する現象である。ほとんどすべての超伝導は、逆向きのスピン方向を有する二つの電子がクーパー対と呼ばれる電子対を形成することにより発現するのに対し、強磁性は物質中のスピンの向きが一様に同じ方向に配列することにより生じる。さら

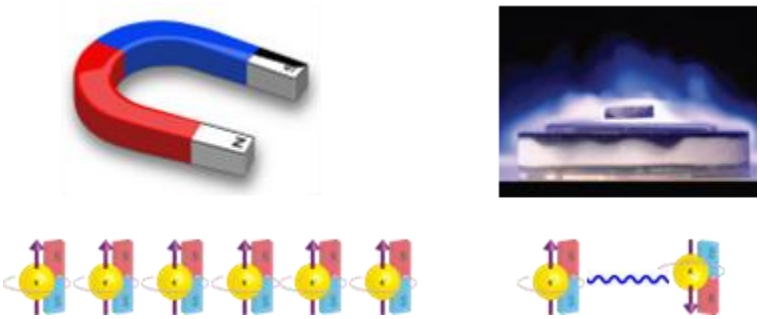

図１：磁石（左）と超伝導（右）

に超伝導状態は内部磁場を完全に排除するのに対し、強磁性状態は強い内部磁場を自発的に作り出す（図1）。このような水と油の関係のような根本的な相違により、両者の共存は不可能とされてきた。

21 世紀に入り、ウラン原子を含有するアクチノイド化合物 UGe_2 において、高圧下で両現象の共存が実証された。この画期的な発見は、従前の物理学的常識を覆す強磁性超伝導体として、学界に多大な反響をもたらした。しかしながら UGe_2 では高圧でかつ極低温でしか超伝導が起こらないため、強磁性超伝導の理解はなかなか進まなかった。青木氏は、この強磁性超伝導が常圧でも観測され、しかも比較的超伝導転移温度が高い URhGe という物質を発見し（図2）、この分野の研究を飛躍的に発展させた[1]。

図 3 に URhGe の温度―磁気相図を示す。ゼロ磁場で温度を下げてゆくと URhGe は、まず強磁性体（FM）に転移する。この強磁性秩序は、磁性を担う電子が結晶中を動き回る遍歴強磁性状態である。さらに大きな磁気モーメントを持つだけでなく、大きな磁気異方性を持ったイジング状態が実現している。更に温度を下げると、超伝導（SC）に転移する。様々な実験から微視的なレベルで超伝導と強磁性が共存していることがわかっている。

驚くべきことに URhGe では、超伝導が磁場によって消失した後、更に強い磁場をかけると再び超伝導

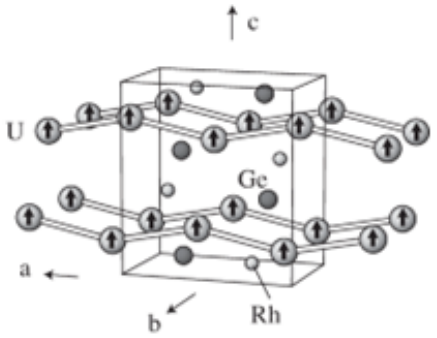

図２：URhGe の結晶構造

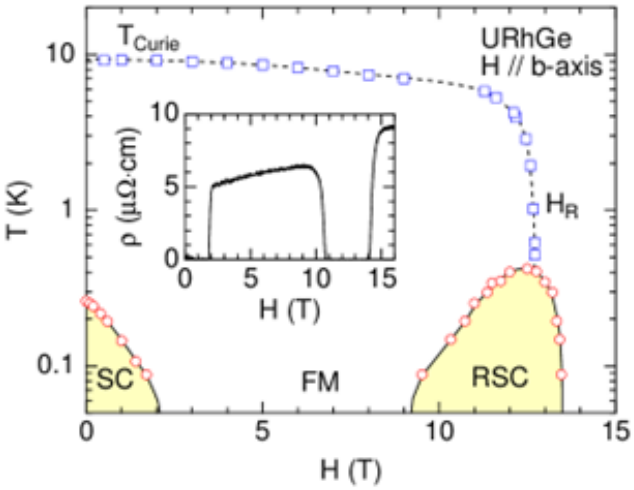

図３：URhGe の温度―磁気相図

が復活する（RSC）（図3）。従来の超伝導体は、電子スピン対の方向が反平行となったスピン一重項状態であるため、強い磁場をかけると一方のスピンがひっくり返り、パウリ臨界磁場とよばれる磁場で超伝導は破壊される。URhGe の高磁場中の超伝導は、このパウリ臨界磁場を大きく超えており、このことはこの超伝導体が、パウリ臨界磁場を持たないスピン三重項超伝導体であることを強く示唆している。またこの磁場誘起超伝導の超伝導転移温度は、強磁性転移温度（T_{Curie}）がゼロとなり強磁性臨界ゆらぎが最大となる磁場付近（H_R）で最大となっている。このことはこの系の超伝導が強磁性ゆらぎにより生じていることを示す強い証拠となっている。青木氏達は一軸性の圧力をかけこの磁場誘起超伝導状態と強磁性状態の両方が、圧力とともに一様に動いていくことを示し、強磁性ゆらぎにより生じる超伝導であるさらなる確証を得た[2]。

さらに青木氏は 2019 年に米国で発見されたスピン三重項超伝導体 UTe_2 において超伝導の対称性が磁場によって別のものに変化する多重超伝導を磁場中・高圧下で発見した[3,4]。これは、超流動ヘリウム3の多重相とも対比できる結果である。UTe_2 の研究は現在世界中でホットな話題となっているが、青木氏はこの研究においても世界のリーダー的立場にある。

青木氏の業績はアクチノイド化合物の純良単結晶育成と極低温までの精密物性測定に基づいており、アクチノイド 5f 電子の特性を限りなく引き出している。本業績の主要な成果である URhGe の発見は、フランス・グルノーブルで行われたものであるが、この発見に至る過程において、青木氏は実験の立案から実施、結果の解析、そして論文の執筆に至るまで、主導的な立場で研究を推進したと考えられている。青木氏は強磁性超伝導という新領域を切り拓いたパイオニア的役割を果たし、基礎科学における革新的な概念の確立に大きく貢献した。

参考論文

[1] D. Aoki, A. Huxley, E. Ressouche, D. Braithwaite, J. Flouquet, J-P. Brison, E. Lhotel, C.Paulsen, “Coexistence of superconductivity and ferromagnetism in URhGe” Nature **413**, 613 (2001).

[2] D. Braithwaite, D. Aoki, J-P. Brison, J. Flouquet, G. Knebel, Ai Nakamura, and A. Pourret, “Dimensionality Driven Enhancement of Ferromagnetic Superconductivity”. Phys. Rev. Lett. **120**, 037001 (2018).

[3] D. Aoki, A. Nakamura, F. Honda, D. Li, Y. Homma, Y. Shimizu, Y.J. Sato, G. Knebel, J.-P. Brison, A. Pourret, D. Braithwaite, G. Lapertot, Q. Niu, M. Valiska, H. Harima, J. Flouquet, “Unconventional superconductivity in heavy fermion UTe_2” J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 043702 (2019).

[4] D. Aoki, F. Honda, G. Knebel, D. Braithwaite, A. Nakamura, D. Li, Y. Homma, Y.Shimizu, Y.J. Sato, J.-P. Brison, J. Flouquet, “Multiple superconducting phases and unusual enhancement of the upper critical field in UTe_2” J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 053705 (2020).

3）村上 修一 Shuichi Murakami
東京科学大学理学院物理学系 教授
広島大学 持続可能性に寄与するキラルノット超物質拠点(SKCM^2) 特任教授 （兼任）

業績題目：

「スピンホール効果とトポロジカル物質の理論」

“Theory of spin Hall effect and topological materials”

業績要旨：

村上氏は、半導体や金属において電子のエネルギーバンド構造に内在するベリー曲率の特異点によって、スピンホール効果が生じることを理論的に示した。この理論的予言が契機となり、多種多様な金属や半導体におけるスピンホール効果の研究が盛んに行われるようになった。また、この理論をきっかけとして米国の研究者らによって提案された量子スピンホール効果の理論を受けて、理論計算からビスマスの 2 層薄膜をその候補物質として提案した。この提案は後の実験によって実証された。なお、量子スピンホール効果を示す系は 2 次元トポロジカル絶縁体ともよばれる。さらに、3 次元トポロジカル絶縁体と通常の絶縁体との間の相転移について考察し、空間反転対称でない結晶では二つの絶縁体相の間にワイル半金属相が必ず現れることを一般的に示して、ワイル半金属物質の設計指針を与えた。ワイル半金属物質は近年多数発見されており、その物性が盛んに研究されている。村上氏はスピンホール効果やトポロジカル物質の理論研究を黎明期から現在に至るまで先導してきた。

業績詳細：

電子はスピンとよばれる固有の角運動量を持ち、スピンは上向きと下向きの二つの状態を取り得る。上向きスピンの電子と下向きスピンの電子が動いているとき、それらの和を電流、差をスピン流とよぶ。スピンを利用・制御して新しい物理現象や機能を探求するスピントロニクスにおいて、スピン流の発生は基本的で重要なプロセスである。

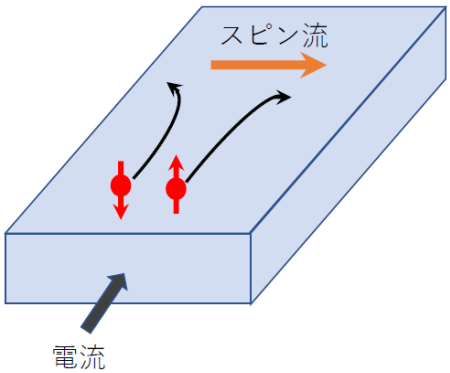

図 1：スピンホール効果の模式図

スピンホール効果は、物質に電場をかけて電流を流したとき、電流と垂直な方向にスピン流が生じる現象である（図 1）。通常のホール効果では、磁場中でローレンツ力によって電流が曲げられ、磁場と電流に垂直な方向に電位差が生じる。これに対して、スピンホール効果では、スピン軌道相互作用とよばれる電子のスピンと軌道角運動量の間の相互作用が磁場の代わりに働く。

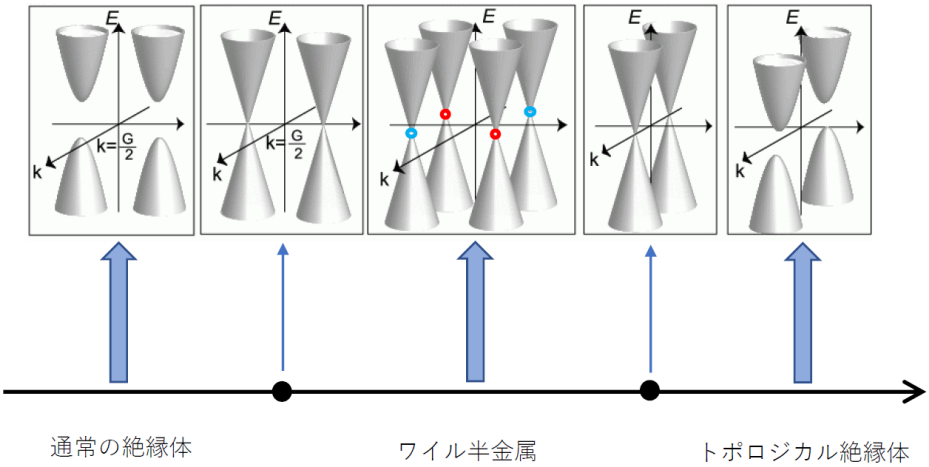

図2：通常の絶縁体 → ワイル半金属 → トポロジカル絶縁体の相転移の模式図。ワイル半金属相ではエネルギーバンドが接する点（ワイル点）にモノポール（青丸）と反モノポール（赤丸）が存在し、ワイル半金属から絶縁体への相転移点でモノポール・反モノポールが重なって対消滅する。

物質中で電子は波として振る舞い、その波数（=2π/波長）の関数として電子のエネルギーを表したものをエネルギーバンドとよぶ。波数を座標とする空間（波数空間）において、電子波動関数から計算されるベリー曲率とよばれる微分幾何学的な量は「磁場」の働きをすることが知られている。村上氏は、東京大学の永長直人教授および Stanford 大学の Shoucheng Zhang 教授との共著論文で、シリコンなどの半導体においてスピン軌道相互作用によって生じるエネルギーバンドの縮退点（接点）が仮想的なモノポール（磁気単極子）と等価であり、モノポールの「磁場」からのローレンツ力によってスピンホール効果が生じることを示した[1]。このメカニズムはエネルギーバンド構造によって決まっているので内因性スピンホール効果とよばれており、広く非磁性物質に適

用できる汎用性の高い理論である。スピンホール効果は多種多様な金属や半導体に対して実験・理論両面で盛んに研究されてきており、論文[1]の波及効果は大きい。

村上氏らの理論の後、2005 年に米国の研究者によって量子スピンホール効果が理論的に予言された。スピン軌道相互作用の強い 2 次元絶縁体において、上向きスピン電子と下向きスピン電子が絶縁体の端に沿って逆方向に運動することによって量子化されたスピン流が生じる現象が量子スピンホール効果である。量子スピンホール効果を示す物質は、2 次元トポロジカル絶縁体ともよばれる。村上氏は 2006 年に、ビスマス二層薄膜が量子スピンホール効果を示すことを理論計算から予言した[2]。量子スピンホール効果を示す候補物質に関する村上氏の提案は、同時期の Stanford 大学グループによる HgTe 量子井戸の提案と並んで、世界初のトポロジカル物質の現実的な提案である。村上氏のビスマス超薄膜での量子スピンホール効果の理論は 2013 年に実験的に検証され、その後の Bi, Sb, Sn などの原子層薄膜での 2 次元トポロジカル絶縁体研究のさきがけとなった。また、2 次元トポロジカル絶縁体の理論は 2007 年に 3 次元へ拡張され、その後に $Bi_{1-x}Sb_x$, Bi_2Se_3, Bi_2Te_3 など多くのビスマス合金が 3 次元トポロジカル絶縁体であることが実験検証されており、論文[2]はビスマス系トポロジカル絶縁体研究の端緒といえる。

さらに、村上氏は 2007 年に出版した論文[3]において、通常の絶縁体と 3 次元トポロジカル絶縁体の間の相転移について研究し、空間反転で非対称な結晶構造をもつ物質では、ワイル半金属とよばれる金属的な状態が二つの絶縁体の中間相として必ず現れることを理論的に明らかにした。ワイル半金属では、3 次元の波数空間にエネルギーバンドが接する点が偶数存在する。このバンド接点付近の波数をもつ電子は、相対性理論に従う質量 0 のフェルミ粒子の波動方程式（数学者ヘルマン・ワイルの名前をとってワイル方程式とよばれる）に従って運動するので、バンド接点はワイル点、そしてワイル点をもつ物質はワイル半金属とよばれる。それらのワイル点は磁荷+1をもったモノポールもしくは磁荷−1をもった反モノポールのどちらかと等価であり、モノポール磁荷は一種のトポロジカルな量なので、ワイル半金属はトポロジカル半金属とよばれる。適当なパラメータを変化させて絶縁体→ワイル半金属→トポロジカル絶縁体の相転移が起こるとき、通常の絶縁体からワイル半金属への相転移点でモノポールと反モノポールの対生成が起こり、ワイル半金属から 3 次元トポロジカル絶縁体への相転移点では対生成のときとは異なるペアでモノポールと反モノポールの対消滅が起こる（図 2）。物質中の電子のエネルギーバンドに縮退点が生じうることは 1930 年代に知られていたが、ワイル点のトポロジカルな安定性やトポロジカル絶縁体との関連については村上氏の研究[3]によって初めて広く認識されるようになった。その後、TaAs, Co_3SnS_2 などワイル半金属物質が多数発見され、表面電子のフェルミアークやカイラル異常と磁気抵抗などのワイル半金属特有の物性について理論・実験両面で研究が盛んになり、トポロジカル半金属は物性物理学の一分野として確立している。

以上のように、村上氏は固体におけるスピン軌道相互作用と関係した基本的な物性の研究で著名な成果を挙げ、この分野の研究を牽引している。

参考論文

[1] S. Murakami, N. Nagaosa, and S.-C. Zhang, “Dissipationless quantum spin current at room temperature”, Science **301**, 1348 (2003).

[2] S. Murakami, “Quantum spin Hall effect and enhanced magnetic response by spin-orbit coupling”, Phys. Rev. Lett. **97**, 236805 (2006).

[3] S. Murakami, “Phase transition between the quantum spin Hall and insulator phases in 3D: emergence of a topological gapless phase”, New J. Phys. **9**, 356 (2007); Corrigendum New J. Phys. **10**, 029802 (2008).