

2020 年度（第 66 回）仁科記念賞

2020 年 10 月 28 日に開催された第 33 回理事会において、本年度の仁科記念賞を以下の 2 件、2 氏に授与することを決定いたしました。

1) 鹿野田 一司 Kazushi Kanoda (62 歳 宮城県出身)

東京大学大学院工学系研究科 教授



業績題目：

「有機伝導体における強相関量子液体の研究」

2) 仲澤 和馬 Kazuma Nakazawa (63 歳 山梨県出身)

東海国立大学機構 岐阜大学教育学部・大学院工学研究科 シニア教授



業績題目：

「原子核乾板を用いたダブルストレンジネス原子核の研究」

「有機伝導体における強相関量子液体の研究」

鹿野田 一司

業績要旨

鹿野田氏は、有機分子 BEDT-TTF を主要な構成要素とする一連の擬 2 次元分子性結晶において、電子間のクーロン斥力に起因する新奇な量子液体状態や強相関現象を発見した。同一分子上の電子間斥力が分子間の電子移動に伴う運動エネルギーを凌駕する場合、電子は局在化し絶縁体となる（モット絶縁体）。このとき物性は電子のスピン自由度により支配される。通常、スピン系の基底状態は個々のスピンの向きが定まった磁気秩序を示すが、三角格子上で反強磁性的に相互作用するスピン系では、磁気秩序の消失した量子スピン液体状態が実現する可能性がアンダーソンによって指摘されていた。鹿野田氏は、核磁気共鳴などの実験を駆使し、有機分子から成る 2 次元三角格子モット絶縁体において絶対零度付近まで磁気秩序が現れないことを示し、その後の量子スピン液体研究の発展を促した。また、圧力印加によって絶縁体が金属に転移するモット転移点近傍において、絶縁体状態と金属状態が量子的に揺らぐ量子臨界流体が実現することを見出した。対称性の低い分子配列を持つ固体では、コーン型のエネルギーバンドを持つ質量ゼロの強相関電子系が実現する。この系においても、核磁気共鳴測定によって電子速度の対数的な増大を観測し、エキシトン対凝縮の揺らぎを示す実験結果を得た。このように、鹿野田氏は、有機物質が持つ結晶格子の高い幾何学的自由度と圧力による優れた制御性を利用して、電子間の相互作用と量子性に起因するさまざまな現象を実験的に発見し、明らかにした。

業績の詳細

固体内の電子は、原子や分子が形成する結晶格子中を伝わる波としての性質と、電子間のクーロン斥力によってお互いを避け合って運動する粒子としての性質を併せ持っており、両者のせめぎ合いによって、独立電子描像を越えた電子集団に特有の現象が引き起こされる。例えば、同一原子（分子）上の電子間クーロンエネルギーが原子（分子）間の電子移動に伴う運動エネルギーを大きく凌駕する場合には、電子は局在化し絶縁体となる（モット絶縁体）。そこでは、個々の原子（分子）上の電子スピンの向きが主要な自由度となり、さまざまな磁性が発現する。これに圧力を加えると、格子の縮小によって電子の移動が容易になるため、絶縁体から金属への転移（モット転移）が起こり、その境界近傍においてしばしば異方的超伝導状態が出現する。電子間相互作用に起因するこれらの多彩な現象の研究は、強相関電子系の物理学という大きな学問領域の形成に至っている。従来その主な舞台は無機物質であったが、近年では、有機分子から成る有機伝導体が一翼を担っている。鹿野田氏は、分子性結晶の幾何学的構造の多様性と圧力による優れた制御性を利用して、永く希求されてきた三角格子での量子スピン液体、金属絶縁体転移境界における量子臨界流体、コーン型のエネルギーバンドを持つ電子系における特異な強相関効果など、重要な量子現象を次々と見出した。

多くのモット絶縁体では、強磁性状態や反強磁性状態などスピンの向きが決まった磁気秩序状態が安定な基底状態であるが、1973 年にアンダーソンは、2 次元三角格子上で反強磁性的に相互作用する量子ス

ピン系では、隣接サイト間で最安定な反平行配置を全スピンの課すことができないという磁氣的フラストレーションのために (図 1a)、量子揺らぎによって絶対零度においてもスピンの向きが定まらない量子スピン液体が出現する可能性を指摘した。しかし長年の努力にもかかわらずこの状態の実験的検証は困難を極め、また理論的にもアンダーソンの当初の提案に疑問が持たれるなど、スピン液体の探索は難航していた。そのような中で、鹿野田氏等は、分子二量体が三角格子を組む局在スピン系・ κ -(BEDT-TTF) $_2$ Cu $_2$ (CN) $_3$ において極低温まで磁気秩序が消失していることを核磁気共鳴実験 (図 1b) や種々の磁氣的・熱力学的測定により実証した[1, 2]。この研究は三角格子とその類縁格子系における量子スピン液体の研究を促進し、現在では、量子スピン液体状態にはアンダーソンの当初の提案を越えて様々な自由度があることが理論的に示され、トポロジカル量子現象の研究と相まって、量子スピン液体の研究は豊かな物理学の領域へと発展している。

BEDT-TTF 分子を主要な構成要素とする一連の分子性結晶は、圧力によって大きく物性が変化し、無機固体に比べて低い圧力でモット転移が起こる。鹿野田氏等は、複数の BEDT-TTF 系伝導体に対して精密な圧力制御の下で電気伝導度測定を行った結果、基底状態での秩序の詳細に関わらず、モット転移近傍における電気抵抗の温度・圧力依存性が普遍的な量子臨界スケージング則に従うことを見出した (図 2)。このことは、電子間斥力によって局在化した電子が圧力下で融解して遍歴する際に、局在状態と遍歴状態の間を量子的に揺らぐ量子臨界流体が実現していることを示唆している[3]。

低対称の結晶構造を持つ層状有機伝導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ は、常圧で電荷秩序絶縁体状態を示すが、加圧により伝導性を獲得する。しかし高圧相は通常の金属とは異なり、コーン状のエネルギーバンド構造 (図 3a) を持つこと (質量ゼロのディラック電子系とも呼ばれる) が知られている。鹿野田氏等は、この系に対して核磁気共鳴実験を行い、理論研究者と共同で、コーンの頂点での状態密度

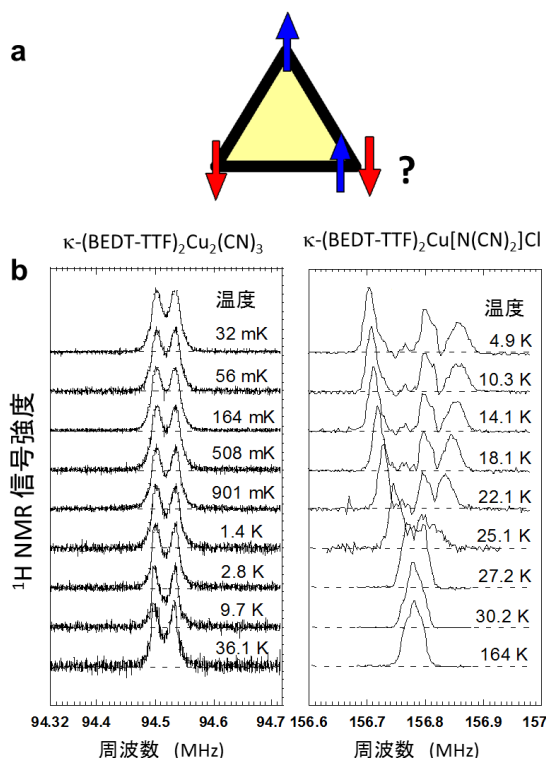


図 1 a 三角格子上の反強磁性スピン. b 三角格子物質 (左図) と歪んだ三角格子物質 (右図) の ^1H NMR 吸収線. 吸収線形の温度変化の有無は磁気秩序の存否に対応する.

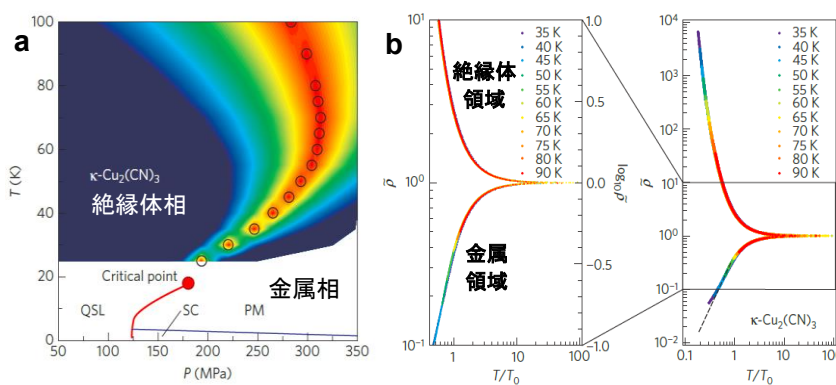


図 2 a α -(BEDT-TTF) $_2$ Cu $_2$ (CN) $_3$ の温度圧力相図 (色は、図 b の規格化された電気抵抗率を表す). b モット転移近傍における規格化された電気抵抗率の量子臨界スケージング. 電気抵抗は金属と絶縁体の 2 本の曲線に帰着される.

の消失による電氣的遮蔽の抑制と波動関数のカイラリティに起因する特異な電子相関効果を見出した。まず、単位胞内の分子サイトを弁別して求めた局所スピン磁化率に対し、クーロン斥力の繰り込み群解析を行うことにより、コーンが強く先鋭化していることを明らかにした (図 3a) [4]。これは、長距離クーロン相互作用により電子の速度がコーン頂点に向かって対数的に増大するという理論的予言を実証するものである。さらに核磁気緩和率の測定から低温でのスピン揺らぎの異常な増大が示され (図 3b)、コーン頂点における縮退した電子と正孔のエキソン対凝縮の揺らぎがその原因であることが示唆された [5]。これは、カイラル粒子が相互作用によって動的に質量を獲得したことを意味している。

鹿野田氏等による量子スピン液体、金属絶縁体量子臨界流体、コーン状の分散を持つ電子系における特異な強相関効果の発見は相互作用する電子系の物理学に新たな展望を与えた。また、これらの異なる創発現象が同一分子 BEDT-TTF を舞台としてその配列の違いのみで起こることが示された意義は大きく、強相関電子系の物理学において格子の幾何学的自由度が重要な役割を果たし、多様な量子現象を生み出す源泉となることが明瞭に実証された。

参考文献

- (1) Y. Shimizu, K. Miyagawa, K. Kanoda, M. Maesato, and G. Saito, “*Spin Liquid State in an Organic Mott Insulator with a Triangular Lattice*”, Phys. Rev. Lett. **91**, 107001 (2003).
- (2) H. F. L. Pratt, P. J. Baker, S. J. Blundell, T. Lancaster, S. Ohira-Kawamura, C. Baines, Y. Shimizu, K. Kanoda, I. Watanabe, and G. Saito, “*Magnetic and non-magnetic phases of a quantum spin liquid*”, Nature **471**, 612 (2011).
- (3) T. Furukawa, K. Miyagawa, H. Taniguchi, R. Kato, and K. Kanoda, “*Quantum criticality of Mott transition in organic materials*”, Nature Phys. **11**, 221 (2015).
- (4) M. Hirata, K. Ishikawa, K. Miyagawa, M. Tamura, C. Berthier, D. Basko, A. Kobayashi, G. Matsuno, and K. Kanoda, “*Observation of an anisotropic Dirac cone reshaping and ferrimagnetic spin polarization in an organic conductor*”, Nature Commun. **7**, 12666 (2016).
- (5) M. Hirata, K. Ishikawa, G. Matsuno, A. Kobayashi, K. Miyagawa, M. Tamura, C. Berthier, and K. Kanoda, “*Anomalous spin correlations and excitonic instability of interacting 2D Weyl fermions*”, Science **358**, 1403 (2017).

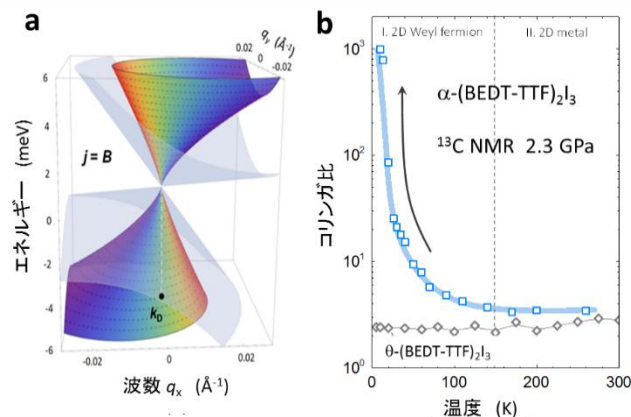


図 3 a α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ におけるコーン状のバンド構造：薄い灰色がバンド計算、濃い色が、NMRの実験結果の解析によって得られたもの。b スピン揺らぎの強度を表す指標 (コリンガ比) の温度依存性。低温で、通常の金属 (図中の θ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$) の値より 3 桁の増大を示す。

「原子核乾板を用いたダブルストレンジネス原子核の研究」

仲澤 和馬

業績要旨

原子核物理学において核力の起源の解明は湯川博士以来の重要課題である。原子核を構成する核子と呼ばれる陽子や中性子の間に働く力だけでなく、3個のクォークからなる核子の仲間であり、ストレンジクォークを1個含むラムダ(Λ)や、2個含むグザイ(Ξ)と呼ばれるバリオンが含まれているハイパー核の実験的研究が核力の解明に非常に重要である。

仲澤和馬氏は長年に渡り原子核乾板を用いたハイパー核探索を主導してきた。原子核乾板は荷電粒子の飛跡を精密に測定できるが、光学顕微鏡を用いた解析には多くの時間を要する。仲澤氏は、原子核乾板と電氣的な粒子検出器を組み合わせた「複合実験法」を開発し、解析効率を飛躍的に向上させた。その結果、KEKの実験において、2個の Λ 粒子を含むダブル Λ ハイパー核が存在することを初めて明確に示した。さらに、史上初めてHe原子核と2個の Λ 粒子からなるダブル Λ ハイパー核の観測に成功し、その解析から Λ Λ 間の相互作用が弱い引力であることを定量的に明らかにした。引き続き、原子核乾板内のすべての画像を自動解析する「全面探索法」を開発し、 Ξ 粒子を1個含むハイパー核の観測に成功し、 Ξ -核子間の相互作用が引力であることを初めて示した。

仲澤氏の研究成果は、中性子星内部の高密度核物質中における Λ 粒子や Ξ 粒子の振る舞いに関する研究に本質的な情報を提供している。また、バリオン間力の理論計算との比較検証により、核力のクォークレベルからの解明に大きな役割を果たしている。

業績詳細

原子核物理学の大きな研究目的として、(1)未知の原子核を探査し存在形態を理解することで宇宙における物質の創生と進化を解明すること、(2)核子の間に働く複雑な核力の起源を理解してなぜ原子核が形成されるかを解明すること、がある。このため核構造の研究、散乱実験による核力の研究、様々な中性子過剰核、陽子過剰核や超重原子核などの研究が行われてきた。過去における研究対象は核子と呼ばれる陽子と中性子からなる原子核が中心であったが、その後クォーク模型という観点からは3個のクォークから構成され核子の仲間分類されるバリオンと総称される粒子を含む原子核に拡張された。バリオンの中でストレンジクォークを含む粒子はハイペロンと呼ばれ、ストレンジクォークを1個含むラムダ(Λ)粒子および2個含むグザイ(Ξ)粒子が最近の原子核物理で重要な役割を果たしている。このように研究対象をストレンジクォークを含む原子核(ハイパー核)に拡張することで、ハイペロンと核子や、ハイペロンとハイペロンの間に働く強い力を調べ、バリオン間相互作用を統一的に理解し、核力の起源をクォークのレベルから解明できる可能性が開かれたが、この展開において仲澤和馬氏は中心的な役割を果たした。

仲澤和馬氏は長年に渡り原子核乾板を用いたハイパー核探索を主導してきた。原子核乾板は厚い感光層を持つ写真フィルム的一种で、荷電粒子の飛跡をミクロン以下の精度で記録するとともに、光学顕微

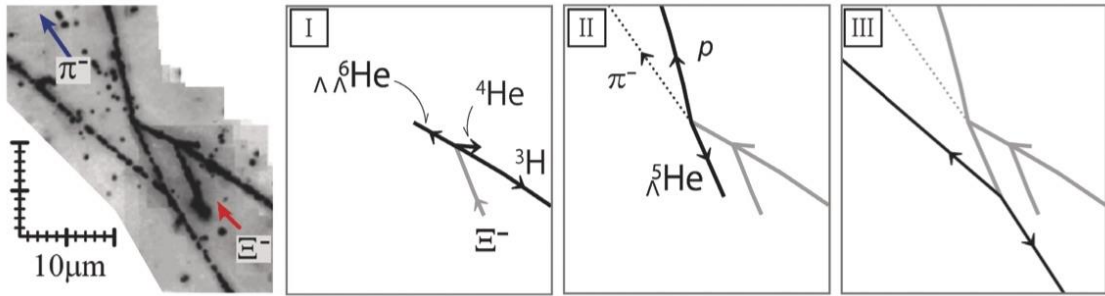


図1；ダブルΛハイパー核($\Lambda\Lambda^6\text{He}$ 核)が観測された原子核乾板の様子 (NAGARA 事象[2])
 (仲澤和馬、吉田純也、肥山詠美子、日本物理学会誌 73(2018)308-313 より)

鏡を用いて飛跡の3次元解析を行い、粒子の飛程や放出角を精密に測定することができる。また、加速器からのK-ビームを原子核標的に照射し、生成した Ξ^- を原子核乾板中の原子核に吸収させてダブルストレンジネス原子核を作ることができる。その生成確率は非常に小さいので、原子核乾板とカウンター(電気的な粒子検出器)を組み合わせた「複合実験法」では Ξ^- と同時に放出される K^+ をカウンターで検出し、 Ξ^- が原子核乾板に入射した領域のみを探索する方法が取られ、解析効率の向上が図られた。この方法を用いて、仲澤氏らは KEK E176 実験で Λ 粒子を2個含むダブルΛハイパー核が確実に存在することを初めて明確に示すことに成功したが、ハイパー核の核種を一意に決めることはできなかった[1]。そして、様々な実験装置の改良を重ねた KEK E373 実験において、初めて核種同定が可能な事象を発見した。NAGARA 事象と命名されたこの事象では、ダブルΛハイパー核($\Lambda\Lambda^6\text{He}$ 核)の生成過程とその崩壊過程を明確に識別することができた[2]。史上初めて核種の不定性なくダブルΛハイパー核を観測することに成功したのである。生成と崩壊の過程の各粒子の運動学的解析から $\Lambda\Lambda^6\text{He}$ 核において Λ 粒子間に働く力は弱い引力(Δ

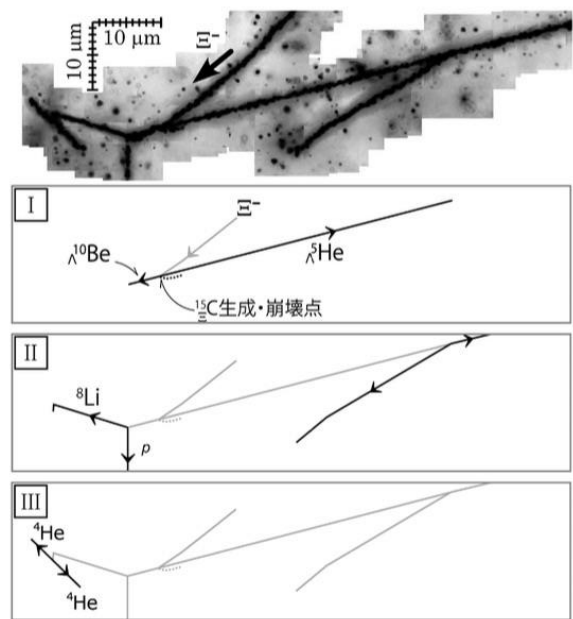


図2；Ξハイパー核($\Xi^{15}\text{C}$ 核)が観測された原子核乾板の様子 (KISO 事象[4])
 (仲澤和馬、吉田純也、肥山詠美子、日本物理学会誌 73(2018)308-313 より)

$B_{\Lambda\Lambda} = 0.67 \pm 0.17$ MeV) であることが判明した[2,3]。

その後、仲澤氏らは画像処理技術と解析技術の向上によって原子核乾板内のすべての画像を自動解析する「全面探索法」に成功し、「複合実験法」では捉えきれなかった事象の解析が可能になった。その結果、E373 実験で得られた約 800 万枚の画像の中から、KISO 事象と呼ばれることになった Ξ ハイパー核 ($^{15}_{\Xi}C$ 核) の生成と崩壊の様子を見つけることに成功した[4]。生成と崩壊に現れた各粒子の運動学的解析から、 Ξ 粒子が原子核と強い相互作用で束縛された Ξ ハイパー核であることが確認された。それまで引力か斥力かわかっていなかった Ξ -核子間の力が、KISO 事象の解析により初めて引力であることがわかった[4]。

仲澤氏の研究により、 Λ 粒子間に働く力が弱い引力であることが実験的に判明することで、バリオン間相互作用や中性子星の冷却の研究に大きな影響を与えることとなった。また、 Ξ -核子間の力が引力であることが実験的に判明したことで、中性子星内部のハイペロンの発現機構や高密度状態方程式に関する研究に大きな知見を与えた。また、仲澤氏の実験データは、格子量子色力学を始めとするバリオン間力の理論計算の検証とそのクォークレベルからの理解にも大きな役割を果している。このように仲澤氏の研究成果は、原子核物理学や宇宙物理学において広範な貢献をしている。現在、仲澤氏らによる J-PARC E07 実験において $^{11}_{\Lambda\Lambda}Be$ [5] を初めとする多くのダブルストレンジネス原子核の研究が進展しており、今後一層の発展が期待されている。

[註]

- 1) Λ 粒子を 2 個含む原子核はダブル Λ ハイパー核、 Ξ 粒子を 1 個含む原子核は Ξ ハイパー核と呼ばれ、それらはダブルストレンジネス原子核と総称される。 $^{6}_{\Lambda\Lambda}He$ 核は、陽子 2 個、中性子 2 個、 Λ 粒子 2 個からなるダブル Λ ハイパー核、 $^{15}_{\Xi}C$ 核は、陽子 7 個、中性子 7 個、 Ξ 粒子 1 個からなる Ξ ハイパー核である。
- 2) 歴史的には、1963 年に原子核乾板を用いたダブル Λ ハイパー核の発見の報告があったが (M. Danysz et al., Phys. Rev. Lett. 11 (1963) 29)、最近のハイパー原子核物理学の進展には直接結びつかなかった。

参考論文

- (1) S. Aoki et al., “Direct Observation of Sequential Weak Decay of a Double Hypernucleus”, Progress of Theoretical Physics **85** (1991) 1287-1298.
- (2) H. Takahashi et al., “Observation of a $^{6}_{\Lambda\Lambda}He$ Double Hypernucleus”, Physical Review Letters **87** (2001) 212502 (1-5).
- (3) J.K. Ahn et al., “Double- Λ hypernuclei observed in a hybrid emulsion experiment”, Physical Review C **88** (2013) 014003 (1-10).
- (4) K. Nakazawa et al., “The first evidence of deeply bound state of $\Xi^{-} - ^{14}N$ system”, Progress of Theoretical and Experimental Physics **2015** (2015) 033D02 (1-11).
- (5) H. Ekawa et al., “Observation of a Be double-Lambda hypernucleus in the J-PARC E07 experiment”, Progress of Theoretical and Experimental Physics **2019** (2019) 021D02 (1-11).