

2019 年度（第 65 回）仁科記念賞

2019 年 10 月 21 日に開催された第 30 回理事会において、本年度の仁科記念賞を以下の 2 件、3 氏に授与することを決定いたしました。

1) 岩佐 義宏 Yoshihiro Iwasa

東京大学大学院工学系研究科 教授

理化学研究所創発物性科学研究センター チームリーダー



業績題目：

「電界誘起 2 次元超伝導の発見」

“Discovery of Electric-field Induced Two-dimensional Superconductivity”

2) 吉田 滋 Shigeru Yoshida

千葉大学大学院理学研究院 教授



石原 安野 Aya Ishihara

千葉大学グローバルプロミネント研究基幹/大学院融合理工学府 教授



業績題目：

「超高エネルギー宇宙ニュートリノの発見」

“Discovery of Ultra-High Energy Cosmic Neutrinos”

「業績要旨」「業績の詳細」は次ページ以降をご参照ください。

「電界誘起 2次元超伝導の発見」

“Discovery of Electric-Field Induced Two-Dimensional Superconductivity”

岩佐 義宏

業績要旨

岩佐義弘氏は、温度降下とともに電気抵抗が大きくなる酸化物絶縁体やカルコゲナイド半導体において、ゲート電圧印加による高濃度キャリアドーピングを達成することで世界初の電界誘起超伝導を発見した。金属-絶縁体-半導体というシリコン集積回路からなる通常の電界効果トランジスタ（FET）では、絶縁破壊のために超伝導が実現するほどの十分高いキャリア濃度を達成することができない。これに対して岩佐氏は、絶縁体部分に電子に対しては絶縁体だがイオンが電気を伝えうるイオン伝導体を用いることにより、通常の FET では実現できない高濃度キャリアドーピングを実現した。この方法を用いると、ゲート電圧によりキャリア濃度を広範囲で変えられ、元素置換等とは異なり、キャリアに対する不純物などの影響も少ない。岩佐氏はこの方法でキャリア濃度を変化させ、絶縁体から金属さらに超伝導に至る電子相図を作成した。また、超伝導体の磁場-温度相図に異常に大きい異方性も観測した。岩佐氏が開発した電界誘起によるキャリアドーピングを用いる新たな実験手法は、超伝導のみならず既に多くの先端的な物性研究に適用されて物質科学の新たな発展を先導しており、本研究の波及効果は大きい。

業績の詳細

薄膜超伝導体は基礎物性からデバイス応用まで超伝導分野の中核を担ってきた。そこで中心となる物質は、Nb、Al、MoGe などの金属蒸着膜であり、これらの示す超伝導物性が通常の 3次元系とは異なることが実験で示された。ところが、今世紀になって薄膜作製技術、デバイス作製技術など、ナノテクノロジーが飛躍的に進展し、1 ナノメートル以下の厚み、ときには単原子層で結晶性の高い超伝導体を作製されるようになった。

一方、岩佐義弘氏は、温度降下とともに電気抵抗が大きくなる酸化物絶縁体やカルコゲナイド半導体を対象として、電界効果トランジスタ（FET）と類似の手法を応用してゲート電圧印加による高濃度キャリアドーピングを行うことで、これらの物質において超伝導を発見した[1]。通常の金属-絶縁

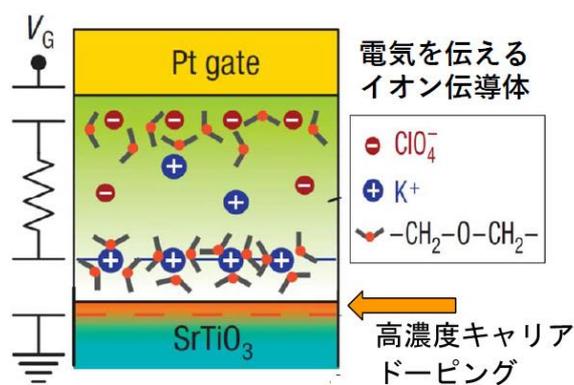


図1 絶縁体の部分にイオン伝導体を用いた高濃度キャリアドーピング FET 構造

体一半導体というシリコン集積回路を構成している FET 構造では、絶縁体の絶縁破壊のために超伝導が実現するほどの十分高いキャリア濃度を達成することができない。

岩佐氏は絶縁体の部分に、電子的には絶縁体だがイオンが電気を伝えるイオン伝導体を用いること (図1) によって通常の FET では実現できない高濃度キャリアドーピングを実現し、ゲート電圧を変えるだけで電気抵抗が劇的に減少し超伝導に達する、世界初の電界誘起超伝導を発見した [1, 2] (図2)。この方法を用いると、ゲート電圧によりキャリア濃度を広範囲で変えられ、元素置換等とは異なり、キャリアに対する不純物などの影響も少ない。さらに、この方法で絶縁体から金属さらに超伝導に至る電子相図を作成した [2] (図3)。また、超伝導体の磁場-温度相図に異常に大きい異方性も観測した [3, 4] (図4)。

このように電界誘起によるキャリアドーピングによって絶縁体を超伝導体に変換させる技術は、量子スピン液体や強相関電子系超伝導等の研究においてこれまで問題となっている不純物効果の影響を除ける重要な実験手法として、これらの系における発現機構の解明に資するこ

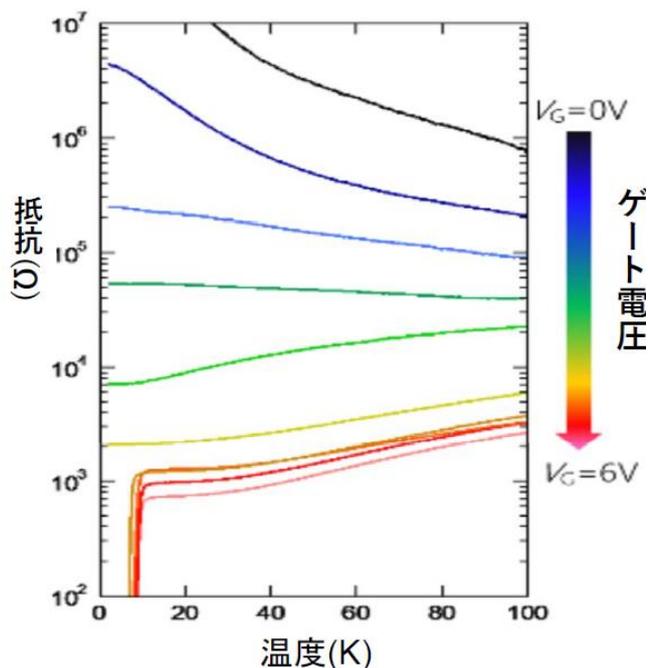


図2 層状半導体 MoS₂ のゲート電圧下 (V_G=0-6V) での電気抵抗の温度変化

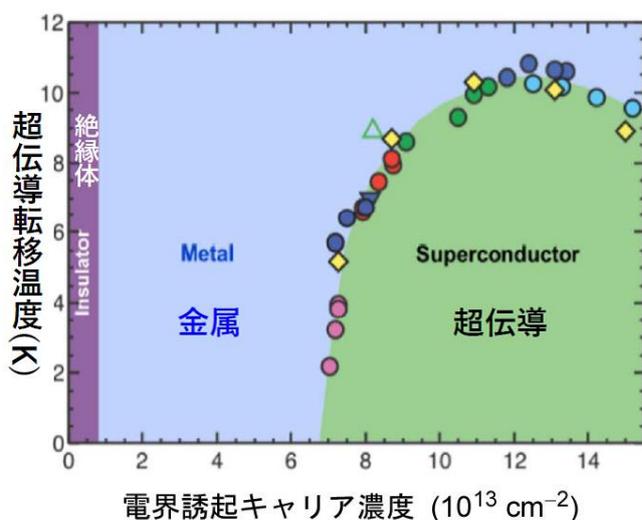


図3 層状半導体 MoS₂ の電界誘起超伝導相図

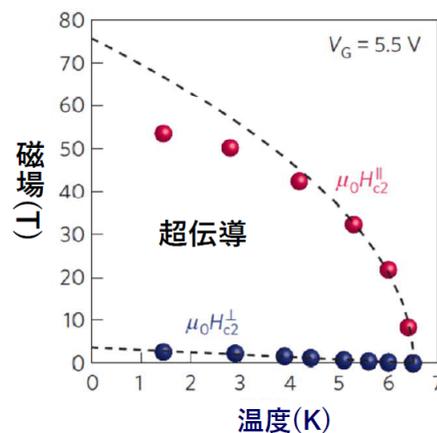


図4 層状半導体 MoS₂ の電界誘起2次元超伝導転移温度の異常な臨界磁場の温度変化

とが期待できる。本実験手法は超伝導以外にも多くの先端的な物性研究に応用され、物質科学の新たな発展を先導しており、本研究の波及効果は非常に大きい。

参考論文

1. K. Ueno, S. Nakamura, H. Shimotani, A. Ohtomo, N. Kimura, T. Nojima, H. Aoki, Y. Iwasa, and M. Kawasaki, “Electric-field-induced superconductivity in an insulator”, *Nature Materials* **7**, 855 (2008).
2. J. T. Ye, Y. J. Zhang, R. Akashi, M. S. Bahramy, R. Arita, and Y. Iwasa, “Superconducting dome in a gate-tuned band insulator”, *Science* **338**, 1193 (2012).
3. Y. Saito, Y. Nakamura, M. S. Bahramy, Y. Kohama, J. T. Ye, Y. Kasahara, Y. Nakagawa, M. Onga, M. Tokunaga, T. Nojima, Y. Yanase, and Y. Iwasa, “Superconductivity protected by spin-valley locking in ion-gated MoS_2 ”, *Nature Physics* **12**, 144 (2016).
4. Y. Saito, Y. Kasahara, J. T. Ye, Y. Iwasa, and T. Nojima, “Metallic ground state in an ion-gated two-dimensional superconductor”, *Science* **350**, 409 (2015).
5. Y. Saito, T. Nojima, and Y. Iwasa, “Highly crystalline 2D superconductors”, *Nature Reviews Materials* **12**, 144 (2017).

「超高エネルギー宇宙ニュートリノの発見」
”Discovery of Ultra-High Energy Cosmic Neutrinos”

吉田 滋 石原 安野

業績要旨

吉田滋氏と石原安野氏は、南極の氷河のなかに設置された1立方キロメートルにもなる巨大な高エネルギー宇宙ニュートリノ実験装置 IceCube を用いて、超高エネルギー宇宙ニュートリノの探索を進めてきた。両氏は、高エネルギーのニュートリノを確実に捉えられる解析手法を構築し、PeV (10 の 15 乗電子ボルト) を超えるエネルギーのニュートリノが惹き起こしたシャワー事象 2 例を 2011–2012 年に取得したデータから発見した。これは有意性 2.8 シグマ (信頼度 99.71%) の世界最初の超高エネルギー宇宙ニュートリノの同定である。この発見によって探索すべき信号の特徴が明確になり、IceCube 共同実験グループはより低いエネルギーのシャワー事象を探索する追解析をおこない、明確な宇宙ニュートリノ信号成分を検出することに成功した。実際、観測データが蓄積された 2014 年には、有意性 5.7 シグマ (信頼度 99.9999994%) で宇宙ニュートリノが存在するとの確証を得た。更に、IceCube 共同実験グループは超高エネルギー宇宙ニュートリノを即時に同定して、到来した方向やエネルギーなどの情報をアラートとして発信することで、世界中の天文施設で追観測を行うシステムを 2016 年に構築し運用を開始した。2017 年 9 月 23 日 (日本時間) に配信されたアラートを受けた追観測により、ニュートリノの到来方向にあるブレーザー天体 TXS 0506+056 が γ 線でフレアを起こしていることが明らかになり、超高エネルギーニュートリノ放射天体を始めて同定することに成功した。これらは IceCube 共同実験グループとしての成果であるが、両氏はそれに本質的な貢献をした。

業績の詳細

吉田滋氏および石原安野氏は、IceCube 観測装置を用いて超高エネルギー宇宙ニュートリノを発見し、宇宙線物理学と高エネルギーニュートリノ天文学に新たな知見をもたらした。宇宙から地球に飛来する宇宙線は最大で 10^{20} eV のエネルギーをもつことが観測されているが、その発生源や加速のメカニズム等に関しての多くはまだ分かっていない。発生源から放出される高エネルギーの陽子や原子核は宇宙空間で様々な反応を繰り返し、地球に到達した時点では発生直後の痕跡がほとんど失われている。宇宙線の発生直後の情報を知る最も有力な手段の一つがニュートリノの観測である。

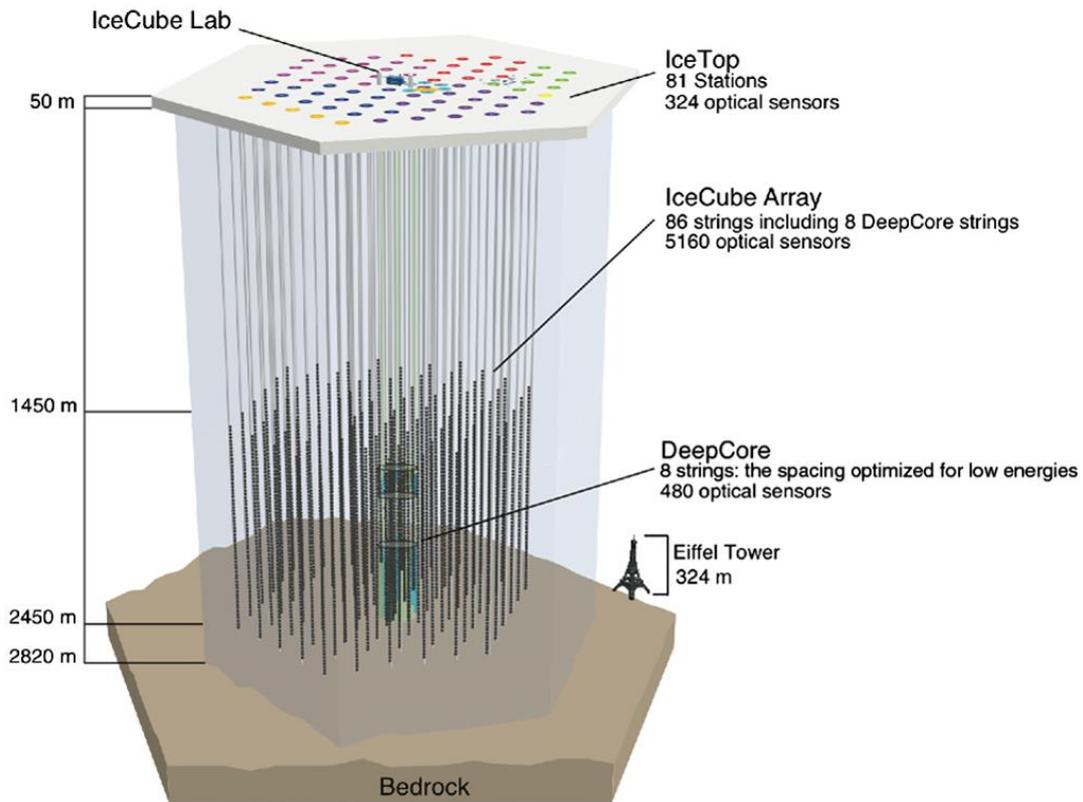


図1 IceCube 観測装置 (文献[2]より)

IceCube観測装置は南極点付近の深氷河1 km³の容積内に5,160個の光検出器を埋設し、チェレンコフ光を検出する装置である(図1参照)。宇宙からのニュートリノが装置の中や近傍で反応し、それによって生まれたカスケードシャワー中の荷電粒子が発生するチェレンコフ光を捉える。吉田滋氏と石原安野氏は、エネルギーが十分高いニュートリノであればどのような種類のものでも確実に捉えることができる解析手法を構築し、その結果PeV (10の15乗電子ボルト)を超えるエネルギーのニュートリノが惹き起こしたシャワー事象2例(図2参照)があることを2011-2012年に取得したデータから発見した(文献[1])。この時点で2.8シグマの有意性(信頼度99.71%)を持つ世界最初の超高エネルギー宇宙ニュートリノ候補の同定である。この観測をベースにして、宇宙遠方でより活動的な種類の天体である電波強度の高い活動銀河核が超高エネルギー宇宙線の主要起源であるとするモデルを否定する(文献[2])など、宇宙線起源天体の特性にニュートリノ観測から具体的な制限が付き始めた。

この最初の発見によって、探索すべき信号の特徴が明確になったことにより、IceCube 共同実験グループはより低いエネルギーのシャワー事象を探索する追解析をおこない、2010年から2013年に取得さ

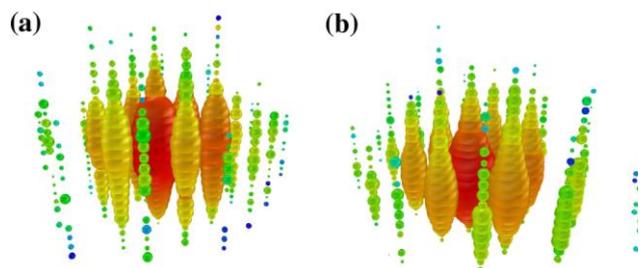


図2 IceCubeにより観測された、それぞれ1.04 PeV、1.14 PeVのシャワー事象。(文献[1]より)

れた約3年分のデータを解析した結果、30 TeV から 2 PeV のエネルギー範囲に37 事象を発見した(文献[3])。図3に示すように得られたエネルギー分布は大気ニュートリノや大気ミュオンバックグラウンドでは説明できない成分があることを示しており、5.7 シグマ(信頼度 99.999994%)で、有意な宇宙ニュートリノが存在するとの確証を得た。

さらに、IceCube 共同実験グループは検出された高エネルギー宇宙ニュートリノを即時に同定して、到来した方向やエネルギーなどの観測情報をアラートとして発信することで、世界中の天文施設で追観測を行うシステムを2016年に構築し運用を開始した。2017年9月23日(日本時間)に宇宙ニュートリノ事象「IceCube-170922A」(図4)が検出され、その情報が世界に流された。その到来情報を元に追観測が行われた結果、巨大ブラックホールを持ち非常に強い γ 線を放つブレイザー天体 TXS 0506+056 が可視光域で増光していることが発見され、その情報を元に Fermi- γ 線衛星の観測チームが Fermi-LAT の観測データの解析から、通常をはるかに上回る輝度で γ 線を放射している事が分かった(文献[4])。さらに、大気チェレンコフ望遠鏡 MAGIC の観測により、この天体から 100 GeV を超える非常に高エネルギーの γ 線も検出された。この宇宙ニュートリノとガンマ線によるニュートリノ放射天体の同定はニュートリノによるマルチ・メッセンジャー天文学の幕開けを示すものである。アラートの発信、IceCube-170922A の解析において、

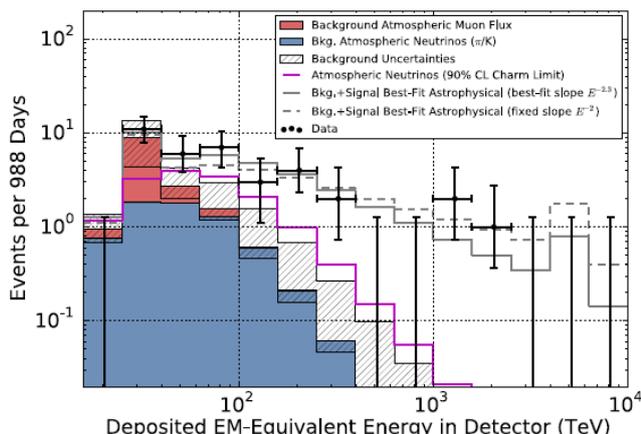


図3 30 TeV から 3 PeV の間の IceCube で観測された事象と、大気ニュートリノ・大気ミュオンバックグラウンドのエネルギー分布。(文献[3])

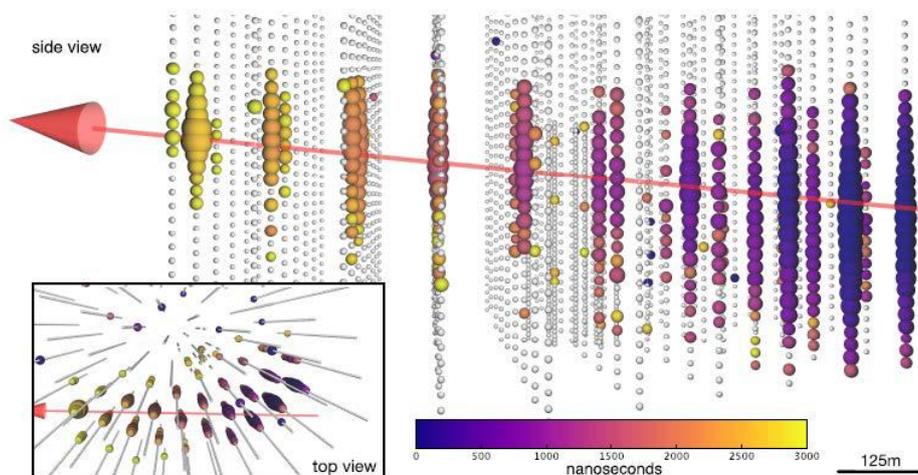


図4 IceCube-170922A 事象。ミュオントラックからニュートリノの到来方向が決定された。(文献[4])

吉田氏及び石原氏は重要な役割を果たした。

以上のように、吉田氏及び石原氏は、超高エネルギー宇宙ニュートリノを発見し、宇宙線物理学や高エネルギーニュートリノ天文学に本質的な貢献をした。

参考論文

- [1] “*First observation of PeV-energy neutrinos with IceCube*”, IceCube Collaboration, Phys. Rev. Lett. **111**, 021103 (2013).
- [2] “*Probing the origin of cosmic rays with extremely high energy neutrinos using the IceCube Observatory*”, IceCube Collaboration, Phys. Rev. D **88**, 112008 (2013).
- [3] “*Observation of high-energy astrophysical neutrinos in three years of IceCube data*”, IceCube Collaboration, Phys. Rev. Lett. **113**, 101101 (2014).
- [4] “*Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A*”, The IceCube Collaboration, *et al.*, Science **361**, eaat1378 (2018).