

CASE 1

明滅するオーロラの起源をERG衛星が解明

極域の夜空を彩るオーロラとして多くの人が真っ先に思い浮かべるのは、まばゆいばかりに揺らめく壮大なカーテン状のものであろう。しかし実は、オーロラには多様な形態がある。なかでも奇妙で不可解なのは、数 km - 数 10 km サイズの「もや」状オーロラの斑点が次々に現れて全天を覆いつくし、しかも斑点のひとつ一つが数秒 - 数 10 秒の周期で明滅をくりかえす、というタイプのもので「脈動オーロラ」とよばれている。実はこの脈動オーロラは、まばゆいカーテン状のオーロラと同じくらい頻繁に出現するものだが、その明滅を引き起こすメカニズムは未解明であった。

オーロラ発光の多くは、宇宙空間を飛び交う電子が種となっている。電子が地球大気に降り込むと、大気酸素原子・分子、窒素分子（イオン）などを励起した後、その励起エネルギーが光として放出されることで、オーロラが発生する。今回の研究テーマである「脈動オーロラ」については、宇宙空間の電子が地球大気に向かって降りたり止んだりすることで、オーロラの明滅が起こる、ということが過去の研究で知られていた。しかし、そのような電子の間欠的な降り込みが宇宙空間のどこで、どのように起こっているかが問題であった。

通常、地球周辺の宇宙空間の電子は、地球磁場の磁力線方向に沿って南北運動をくりかえしており、地球の大気に降ってくることはない（図 (a)、オーロラは見えない）。ところが、何らかの理由で往復運動が破れ、電子が地球の大気に到達することがある（図 (c)、オーロラが見える）。とくに脈動オーロラの場合は、「コーラス波動」とよばれるプラズマ波動の一種が、電磁力によって電子の往復運動を破り、大気への降り込みを駆動するものと考えられてきた（図 (b)）。しかしながら、そのような「電子の往復運動の破れ」の現場を直接観測するには、過去の観測では角度分解能が不足しており、実証の決定打を欠いていた。

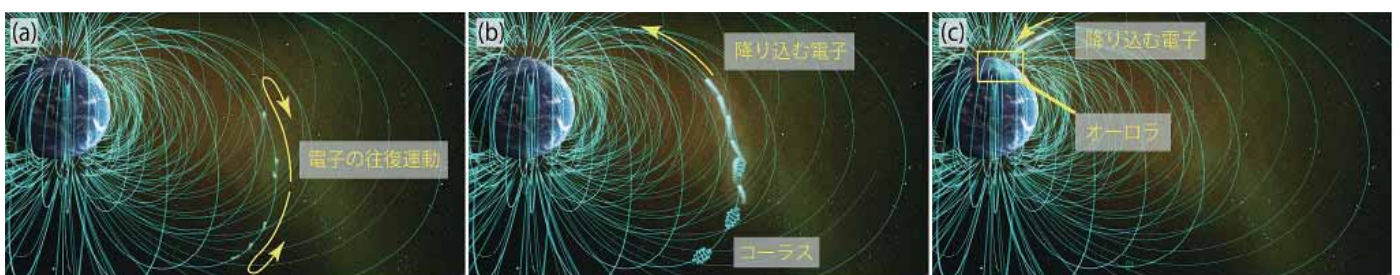
いっぽう、2016年12月にJAXA（宇宙航空研究開発機構）が打ち上げたジオスペース探査衛星 ERG (Exploration of energization and Radiation in Geospace) が搭載している電子分析器は、上記の問題に終止符を打つのに十分な角度分解能をもつものである（筆者がそのように設計した）。打ち上げ後の観測が始まって間もない2017年3月、脈動オーロラが出現している時間帯のERG衛星のデータを解析したところ、間欠的に発生するコーラス波動と同期するようにして、降り込み電子の量も大きく変動する（コーラス波動が強まると、降り込み電子が現れる）様子が驚くほど明瞭にとらえられた。これはまさに、前述のようなコーラス波動による「電子の往復運動の破れ」の決定的証拠である。

さらには、電子を観測している現場から磁力線をたどって地球大気まで行った先（＝電子の降り込む先）で地上の全天カメラが脈動オーロラを視野にとらえていたという強運も手伝い、電子・コーラス波動とオーロラの強度の間により相関があることも確認できた。このように、(1) コーラス波動の発生 → (2) 波動による電子の「往復運動の破れ」 → (3) 電子の大気への降り込み → (4) オーロラの発光、という一連のプロセスが間欠的に起きることで、明滅するオーロラが発生していることが、疑いようなく実証された。

本研究は、Kasahara *et al.*, *Nature*, 554, 337-340 (2018) に掲載された。

(2018年2月15日プレスリリース)

(a) 地球のまわりの宇宙空間内で磁力線に沿って往復運動する電子。(b) コーラス波動の電磁力により往復運動が破られ、磁力線に沿って大気に降り込もうとする電子。(c) 降り注ぐ電子で発生するオーロラ。©ERG science team



CASE 2

対称性の破れを起ささない量子磁石を発見

電子が有する小さな磁石（スピン）の集団である磁性体では、スピン間に互いに平行もしくは反平行にしようとする相互作用が働いている。スピン集団は高温で熱揺らぎによりその向きがばらばらな無秩序状態にあるが、低温では相互作用により自発的対称性の破れを起こし、規則的に方向が揃った磁気秩序状態（強磁性、反強磁性など）へ転移する。ところが、例外的に対称性の破れを示すことなく、絶対零度でもスピンの量子力学的に揺らいでいる、神秘的な状態が存在する。「量子スピン液体」とよばれるこの状態がハニカム（蜂の巣）格子イリジウム酸化物 $H_3LiIr_2O_6$ で実現していることを発見した。

1973年の物理学者フィリップ・アンダーソン (P.W. Anderson) による提案以来、量子スピン液体研究の歴史は長い。にもかかわらず、理論的なモデルの厳密解として液体状態を記述することが困難だったため、ずっと「もやもやした存在」でもあった。(だから面白いともいえるが) その「もやもや」を一気に払拭したのが2006年のキエタフ (Kitaev) モデルである。ハニカム格子上的スピン系を考える。各スピンには三つの隣接スピンを特定の方向に同じ向き（強磁性的）に揃える力が働いている。その方向が、三つの隣接スピンごとに異なり、互いに直交していることがポイントである。「あちら（の隣）を立てればこちら（の隣）が立たず」で、秩序を起しにくいことがすぐに分かる。キエタフのモデルの凄さは、数学のトリックを用いて、1. 基底状態が量子スピン液体、2. スピンの二種類の「マヨラナ粒子」への分裂、が厳密解として示されることである。マヨラナ粒子は粒子と反粒子が同一な電荷中性のフェルミ粒子であり、素粒子物理でニュー

トリノがその候補として議論されている。そのマヨラナ粒子が量子スピン液体の中に潜んでいる。

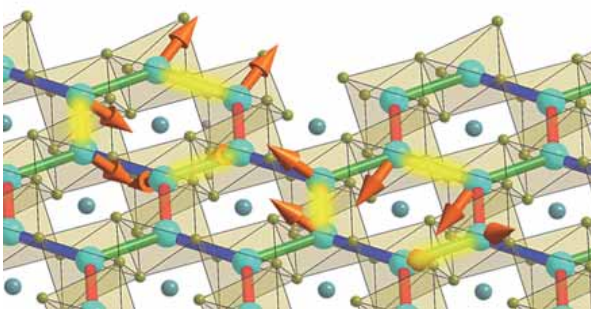
キエタフモデルから導かれる魅力的な量子スピン液体を現実の物質で実現すべく、2010年頃から世界的な競争が始まった。ある種のIr酸化物やRu塩化物では、スピンと電子の軌道モーメントの合成からなる擬スピンのハニカム格子上に存在し、擬スピン間にキエタフモデルと同じ相互作用が働くことが明らかとなったからである。ところが、提案された候補物質では、低温で擬スピン秩序が実験的に観測され、基底状態が量子スピン液体でないことが分かってきた。モデルにない別の相互作用が現実物質には付け加わり、秩序を安定化させるらしい。諦めに近い雰囲気分野に広がりつつあった。

われわれに一日の長があったとすれば、諦めず新たな舞台を探し続けたことかもしれない。化学の分野でpHセンサー材料として研究されていた $H_3LiIr_2O_6$ が目にとまった。合成し、極低温までNMR（核磁気共鳴）、磁化、比熱を測定した。

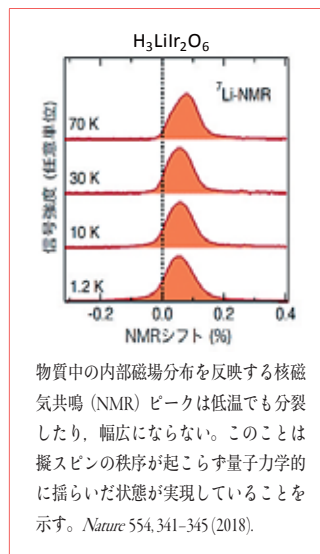
驚くべきことに相互作用温度（阻害要因がなければ秩序が起きる温度）の1/1000以下の極低温（50 mK）でも擬スピンの秩序（対称性の破れ）の兆候が見られなかった。この事実から、キエタフモデルの特徴的要素を備えたハニカム酸化物 $H_3LiIr_2O_6$ において量子スピン液体状態が実現していると結論した。これが今回の主メッセージである。では、キエタフモデルに現われるマヨラナ粒子はどこかに隠れているのか？ その問いにわれわれはまだ答えられていない。挑戦は始まったばかりである。

本研究成果は、K. Kitagawa *et al.*, *Nature* 554, 341–345 (2018) に掲載された。

(2018年2月15日プレスリリース)



量子スピン液体が発現する $H_3LiIr_2O_6$ の結晶構造（左）と ^7Li -NMR スペクトル（右）。左図において、水色がIr（イリジウム）原子、緑がO（酸素）原子、青緑がLi（リチウム）原子を示す。H（水素）原子は図に示す各層を積み重ねた三次元構造の層間に位置する。擬スピン1/2の磁気モーメント（オレンジ矢印）を有するIrがハニカム格子を構成している。擬スピンは、隣接の三つの擬スピンと赤、青、緑の結合を通じて相互作用する。三つの結合は互いに直交した三方向に擬スピンを揃えようとする。このため、図において三つの結合のうち黄色でハッチをつけた結合では隣接擬スピンの向きが揃っているが、残りの二つの結合ではうまく揃えることができない。結合の競合の結果、磁気秩序が強く抑制され、量子スピン液体状態が実現する。



物質中の内部磁場分布を反映する核磁気共鳴 (NMR) ピークは低温でも分裂したり、幅広にならない。このことは擬スピンの秩序が起らず量子力学的に揺らいだ状態が実現していることを示す。 *Nature* 554, 341–345 (2018)。

CASE 3

生殖ゲノムと動く遺伝子と piRNA軍拡競争

実験結果を読み解釈する。

その解釈は新たな疑問を生み、次の実験へとわれわれを導く。

この連鎖は新規モデルの提唱に至るまで続くが、その道のりは長く、険しい。

正しいと思われた解釈に修正が必要となることもある。

得られた結果が定説と合わないという場にも遭遇する。

ひじょうに悩ましく、知力も体力も消耗する。

研究には明白な結末が書かれた脚本は無い。

懐中時計をもった白うさぎも「drink me」と書かれた小瓶も登場しない。

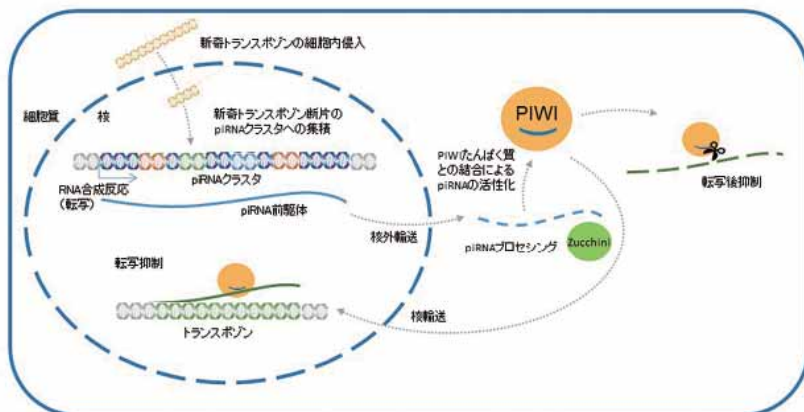
課題突破は自身の「力」に委ねられる。

これこそが研究の醍醐味であり、研究者はその力を養う必要がある。

動く遺伝子として知られるトランスポゾン¹は、ゲノムに潜む外来性遺伝子で、ゲノム上を気ままに転移する。そして、この利己的転移はゲノムに変異をもたらす。変異と一口にいても生命にとって有難い変異もあり、実際、われわれ生物は進化の過程上、その恩恵を被って来た²とされる。が、遺伝情報を次世代に受け継ぐ生殖ゲノムに生じる変異の多くは、不稔を導く。運よく不稔を免れたとしても、子孫は異常な表現型を示す。よって、ヒトを含め有性生殖を伴う生物は、トランスポゾンを「非自己」として認識し、その転移による変異から「自己」の生殖ゲノムを守る仕組みとしてpiRNA¹機構を獲得した。

ゲノムにはトランスポゾンの断片を積極的に集積させる場所がある。これは「トランスポゾンの墓場」と揶揄されるが、piRNAは、この「トランスポゾンの墓場」から生み出され、「親」に相当する活きたトランスポゾンの発現を抑制する。新奇

piRNA クラスターの転写産物から生成したpiRNAはPIWIタンパク質と複合体を形成し、トランスポゾン転写産物に作用することによってトランスポゾンを抑制する。



トランスポゾンが生殖細胞に侵入すると「トランスポゾンの墓場」はその断片を取り込み、新たなpiRNAを生んで、そのトランスポゾンの発現を抑える。動く遺伝子とpiRNA軍拡競争は、生殖細胞で常に起こっている。

2012年、われわれはZucchiniと名付けられたRNA切断酵素がショウジョウバエpiRNA生合成に必須であることを見出した。その機能はマウスにおいても保存されている。Zucchiniはカイコ蛾においても保存されているか。この素朴な疑問に答えるべく、われわれはカイコ蛾卵巣由来生殖細胞株BmN4を用いた実験を開始した。恒温器で継代可能な生殖細胞株はBmN4以外には存在せず、その希少価値はひじょうに高い。

この最初の問いに対する答えは「Yes」であった。この結果と解釈は実験の連鎖を生み、われわれは最終的にpiRNA生合成の新規モデルを提唱するに至った。piRNA機構の生物間の保存性と多様性も明らかになった。保存性はZucchini機能に、多様性はフェーズドpiRNA²への依存性にあらわれた。ショウジョウバエやマウスのフェーズドpiRNAは転写³レベルでトランスポゾンを抑える。カイコ蛾はこの抑制経路をもたず、よってフェーズドpiRNAを作らないというわれわれの発見は理に合っているといえる。つまり、カイコ蛾piRNA機構は、全体的にショウジョウバエのそれに比べ、より単純であるということである。その理由は不明である。また、トランスポゾンを転写抑制する生物としない生物の存在理由も不明である。この新しい研究テーマはどのように料理しようか、と思考するのも研究者の醍醐味のひとつである。

本研究成果は、Nishida *et al.*, *Nature* 555, 260-264 (2018) に掲載された。

(2018年3月1日プレスリリース)

* 1 piRNA 機構：生殖組織特異的に発現する小分子 RNA である piRNA が中核となって起こる遺伝子発現制御機構。piRNA は PIWI タンパク質と複合体を形成してはじめてその機能を発揮できる。

* 2 フェーズド piRNA：piRNA 前駆体の 5' 末端から段階的に切り出されてできる一群の piRNA

* 3 転写：ゲノム上の遺伝子を鋳型として RNA を合成する反応