

研究会・学会スケジュール

第2回トランスフォーマティブ生命分子研究所国際シンポジウム
The 2nd International Symposium on Transformative Bio-Molecules (ISTbM-2)
開催日：2014年5月12日(月)
開催場所：名古屋大学野依記念学術交流館
主催：トランスフォーマティブ生命分子研究所 (ITbM)
問い合わせ：伊丹健一郎 トランスフォーマティブ生命分子研究所 教授
itami@chem.nagoya-u.ac.jp / 052-788-6098

第23回名古屋大学理学懇話会
「極限の世界を見通す物理の目」
開催日：2014年6月7日(土)
開催場所：名古屋大学理学南館 坂田・平田ホール
主催：名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報委員会
講演者：原田正康 理学研究科 教授
佐藤憲昭 理学研究科 教授
問い合わせ：名古屋大学理学部庶務掛
kouhou@sci.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2394

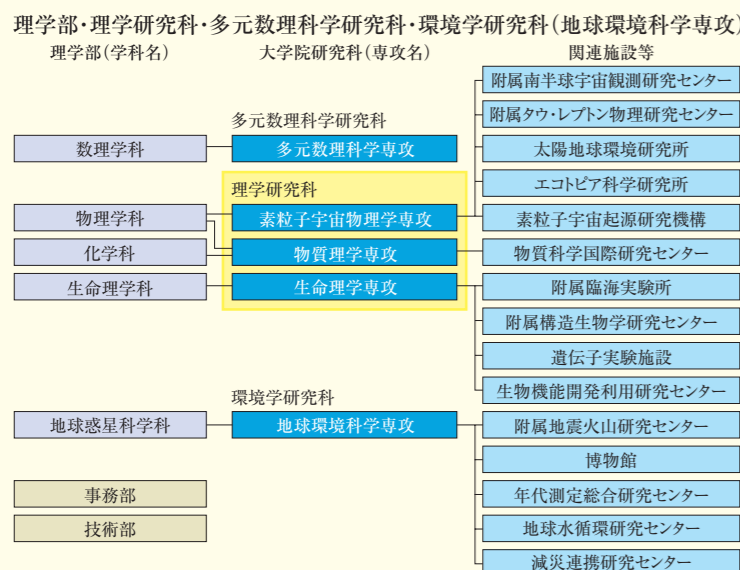
第18回ESR(電子スピン共振法)フォーラム研究会
開催日：2014年7月26日(土)
開催場所：名古屋大学シンポジオン
主催：アナリティカルESR研究会
問い合わせ：三野広幸 理学研究科 准教授
mino@bio.phys.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2882

第6回国際樹木根会議
Sixth International Symposium on Physiological Processes in Roots of Woody Plants
開催日：平成26年9月8日(月)～13日(土)
開催場所：名古屋大学シンポジオン
主催：第6回国際樹木根会議運営委員会
問い合わせ：平野恭弘 環境学研究科 准教授
yhirano@nagoya-u.jp / 052-789-2536

「神経回路による情報処理を読み解く」
Decoding principle of neural circuits using model animals
開催日：2014年9月9日(火)・10日(水)
開催場所：名古屋大学理学南館坂田・平田ホール
主催：名古屋大学脳神経回路研究拠点
共催：名古屋大学グリーン自然科学国際教育研究プログラム (IGER)
問い合わせ：森郁恵 理学研究科 教授
m46920a@nucc.cc.nagoya-u.ac.jp / 052-789-4560
上川内あづさ 理学研究科 教授
kamikouchi@bio.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2903
坂内博子 理学研究科 特任講師
bannai@bio.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2980

第20回名古屋メダルセミナー
The Nagoya Medal of Organic Chemistry 2014
開催日：2014年10月27日(月)
開催場所：名古屋大学野依記念学術交流館カンファレンスホール
主催：名古屋メダルセミナー組織委員会
後援：公益財団法人万有生命科学振興国際交流財団
トランスフォーマティブ生命分子研究所 (ITbM)
問い合わせ：伊丹健一郎 トランスフォーマティブ生命分子研究所 教授
itami@chem.nagoya-u.ac.jp / 052-788-6098
http://www.banyu-zaidan.or.jp/banyu_symp/symp/nagoya/nagoya_prog2014.html

組織図



編集だより

今回の特集は応用数理についてである。比較的最近、多元数理科学研究科に赴任されたお二方に、ご自身の研究について紹介していただいた。多元数理科学研究科は研究者50人以上の大所帯で、そこでは純粋数学から応用数理までさまざまな分野の研究が行われている。一般の方からは「研究科で丸となって取り組んでいるテーマがあるのですか」と聞かれることもあるが、基本的には皆が思い思いのテーマに取り組んでいる。同じ数学の中でも分野が違くと、さっぱり内容がわからないことも多い。数学は研究対象が抽象的で、目に見えるかたちに表せないことが多いので、一般の人々にその魅力を伝えるのはなかなか難しい。その中で今回の特集は我々の日常にも関係する話題であり、楽しんで読んでもらえたのではないかなと思う。数学のまた別の一面を知っていただけたらうれしい。1年間この広報誌の編集に携わり、数学以外の専門家たちとサイエンスの魅力伝えるべく努力したことは、私にとってとても新鮮で楽しい経験であった。(糸健太郎)

表紙説明

応用数理は、数学的知識を他分野に適用することを目的として生まれた学問である。科学技術の急速な発展の中で、物理、化学、生物、さらには情報や電気・電子、建築、土木などの工学とも深くかかわりをもつようになっており、数学と社会を結ぶ回路として大きな成果を上げつつある。



理 *philosophia* — No.26
spring - summer 2014
2014年4月25日発行

広報委員 篠原久典(研究科長)
松本邦弘(副研究科長)
杉山 直(評議員)
糸 健太郎(数理学科)
福井康雄(物理学科)※委員長
戸本 誠(物理学科)
出口和彦(物理学科)
山口潤一郎(化学科)
杉山 伸(生命理学科)
瀧口金吾(生命理学科)
古本宗充(地球惑星科学科)
斉藤 肇(事務長)

編集発行 名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報委員会
〒464-8602 名古屋市中千種区不老町

ご意見、ご感想をお待ちしています。
本誌の原稿執筆や取材などに協力いただける方を求めています。
広報委員会までご連絡ください。
なお、ご投稿などの採否については当委員会にお任せください。
次号は2014年10月頃発行の予定です。

制作 株式会社電通
編集協力 株式会社コミニケ
デザイン 株式会社ティ・エム・シー

・本誌記事、写真等の無断複写、転載を禁じます。 ISSN 1884-8486

TEL 052-789-2394 FAX 052-789-2800 E-mail kouhou@sci.nagoya-u.ac.jp URL http://www.sci.nagoya-u.ac.jp/kouhou/

理

名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報誌
[理フィロソフィア]
spring - summer 2014

26

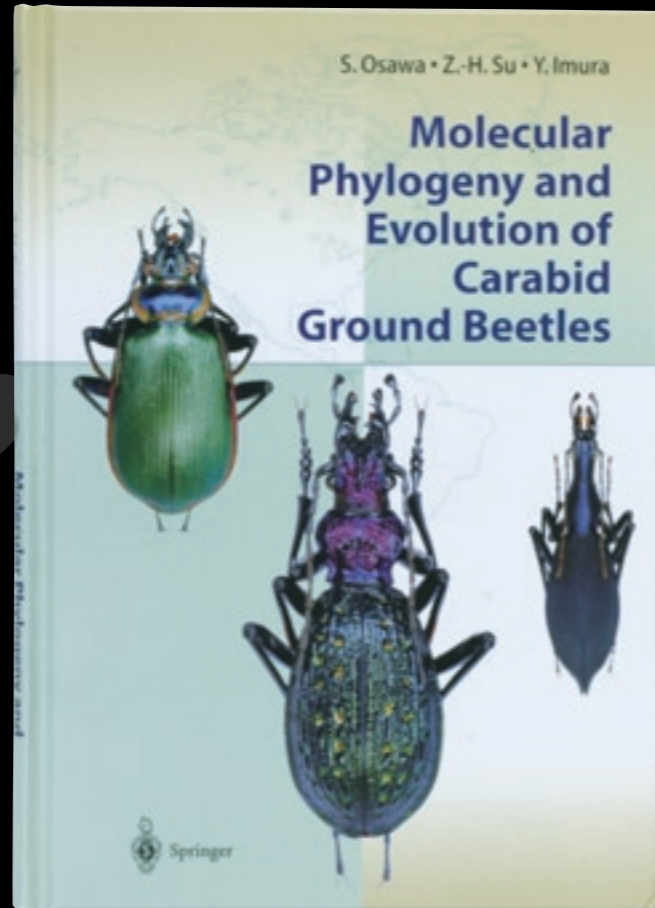
philosophia

特集

「広がる応用数理の世界」

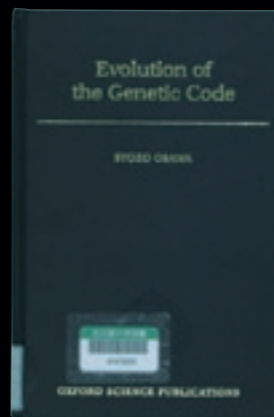
- 04 — 追跡と逃避 一個から集団へ ◇ 大平 徹
- 08 — 究極の暗号通信〈量子暗号〉と数学 ◇ 林 正人
- 02 — 時を語るもの〈大澤省三博士〉 ◇ 堀 寛
- 03 — 理のエッセイ ◇ 阿波賀邦夫
- 12 — 理の先端をいく ◇ 清水裕彦 / 木下俊則・ワン・イン / 立原研悟
- 18 — 理学部交差点

大澤省三博士 — 虫から始まり虫で終わる



写真提供:JT生命誌研究館

おおさわしょうぞう
大澤省三 (1928-)
名古屋大学名誉教授 (1992)
日本学士院賞 (1992)



◇写真の説明

大澤省三博士による代表的な著書。遺伝暗号についての研究書、Osawa, S. (1995), *Evolution of the Genetic Code*, Oxford University Press、和訳「遺伝暗号の起源と進化」(共立出版)、オサムシの分子進化についての研究書、Osawa, S. *et al.* (2004), *Molecular Phylogeny and Evolution of Carabid Ground Beetles*, Springer、自身の研究者としての歩みを振り返った自伝、大澤省三 (2012)『虫から始まり虫で終わる』(クバプロ)。



遺伝子DNAの暗号ではATGはメチオニンというアミノ酸を意味する。ではなぜ、多くの組み合わせの中でこの暗号なのだろうか。それについて長く信じられていたのがワトソン・クリックで有名なあのクリックの偶然凍結説(1966)であった。「遺伝暗号は現存の生物すべてに共通な普遍暗号である。生物の共通祖先で、20億年以上も前に、偶然に成立したものが、その重要さ故に変化できず今日まで維持されている」といったのである。

ところが遺伝子工学技術が発展し、全生物の中で最小のマイコプラズマという細菌の遺伝子を研究していた大澤らは、読まれた配列の中にそれまで普遍と信じられた暗号表にあてはまらない例を発見した(1985)。さらにその変化の理由を分子レベルで解明し、一連の研究を「遺伝暗号も進化する」というコドン捕獲説(1988)へと結実させた。

その経緯は自伝『虫から始まり虫で終わる』に詳しい。この自伝は題名のとおり子どものころの昆虫への興味が、やがて生物学そのものへの興味へと発展し、また昆虫に戻りオサムシの分子進化系統樹をつくり、最後に生物進化の謎をオサムシから迫るまでが描かれている。そこどころが面白い。それでは最初と最後の間は単に研究の虫だったのか。研究室での午後、3時間もヒマができると「堀君、ちょっとキノコムシを採りに猿投山まで行こまい」と声がかかる。昔も今も間違いなく根っからの虫屋である。(堀 寛 名古屋大学名誉教授)

◎理のエッセイ

期待される博士人材の育て方

阿波賀邦夫 物質科学国際研究センター教授



Illustration: Moto Suenobu

「グリーン自然科学国際教育研究プログラム」(IGER)*が開始され、2年が経過した。予定した内容がほぼ完成し、コーディネーターを務める筆者も、一息ついている。この事業の目的は、産学官にわたりグローバルに活躍するリーダー博士人材の育成であるが、従来の大学院博士課程は研究至上主義に陥り、人材を育てていないとの批判があり、それがこの制度発足の根幹にある。理の教員として反論したい気持ちもあるが、確かに筆者は、「社会がどのような人材を求めているのか」を意識し、意見を求め、それを基に教育研究プログラムを考えたことはなかった。研究活動=人材育成では、人材育成を隠れ蓑にして、自分の研究を進めているだけという批判も致し方あるまい。さて、「社会が求める博士人材」に話を戻すと、この質問に対し企業は、「深い専門性と、グループを統率できる能力」と回答する。後者は、社会性や協調性、国際性、学際性を総合した能力であり、まさに、IGERが養成を目的とする能力である。この深さと広さの融合は、理の教育目標である「深い専門性と同時に、やがてはある研究分野をリードし、さらには新学術を切り開く能力の涵養」にも通じる。新学術を切り開く力は、基礎学力をもとにした学際性に他ならない。

IGER発足後、「広さ」を育てるスキルセミナー、英語研修、海外留学を通じて、社会性や国際性については成果が上がりつつある。一方、皮肉なことに、難しいのは、理学が以前から取り組んでいた「学際性」であり、学生の「専門外だから関係ない」といった偏狭さの克服である。学際性の涵養には、さらなる理学融合教育からのボトムアップに加え、研究からのトップダウンが必要で、化学と生命科学の融合をめざす「トランスフォーマティブ生命分子研究所(ITbM)」の設立は朗報である。同様の取り組みを、各分野で期待したい。

IGERは最長で平成29年度まで継続される。皆様の一層のご理解とご協力をお願いしたい。

* IGER (Integrative Graduate Education and Research Program in Green Natural Science) 理学の物質理学専攻と生命理学専攻が参加する名古屋大学博士課程教育リーディングプログラム。

Kunio Awaga

1959年生まれ。1988年東京大学大学院理学系研究科単位取得退学。同年、岡崎国立共同研究機構分子科学研究所助手。1992年東京大学教養学部助教授を経て、2001年より現職。専門は物性化学、とくに分子の機能開拓に関心をもつ。

数学、特に伝統的な純粋数学では、
 数学への内的な興味のために研究がなされ、数学研究そのものが自己目的化されてきた。
 これに対して応用数学は、数学的知識を他分野に適用することを主眼とする。
 工学的見地からコンピューターが、経済学的考察からゲーム理論がもたらされたように、
 そこには新たな数理研究の領域が生まれている。

追跡と逃避 一個から集団へ

大平 徹 多元数理科学専攻教授

「追跡と逃避」を集団化する

「追跡と逃避」は数学では18世紀ころから研究がされてきている問題である。子どものころに親しんだ「鬼ごっこ」を思い浮かべていただければ、物理的な描写となる。この子どもの遊びに、数学者たちも興味をもち、研究がなされてきた。とくに1人の追跡者が1人の逃避者を追いかけるような単純な

問題設定でも、追跡者の軌跡には複雑な数式と美しい曲線などが現れることが知られている。パズル的な要素をもつこともあってか、18世紀から19世紀と続いた英国の人気女性雑誌、『レディース・ダイアリー』では、円周を動く逃避者の追跡問題などが出題されていた(図1)。ここでは追跡者の速度ベクトルは常に逃避者の位置を向いているという問

題設定になっている。逃げるものが直線上で等速で動く場合については、意外と複雑になるにしても、追跡者の軌跡を現す数式が得られることが知られていた。そのため、この円周上の逃避者の動きの場合も熱心に研究されたようだが、残念ながら数式で簡明に表現することができない。しかし、コンピューターによる数値計算を用いることで、ここに示したような軌跡を描くことができるようになった。

20世紀に入るとゲーム理論との接点が見いだされ、とくに「微分ゲーム」として、制御工学だけではなく、経済学などの分野でも研究が進むなど、「追跡と逃避」は異分野と融合しながら、いくつかの展開をみせることになった。

しかし、もともとの数学的な関心の伝統のためか、主に1対1の場合が考えられてきた。一方で、近年においては昆虫、動物、人、自動車のように、物理的な粒子とは違って、自ら動くような「自己駆動粒子」といわれるような「粒子」の集団の研究が盛んに行われるようになってきた。代表的な例としては、名古屋大学でも情報科学研究科の杉山雄規教授による渋滞の数理モデルの研究がある。

私が提案したことは、伝統的な「追跡と逃避」の問題の研究と、この自己駆動粒子の研究を融合することで新しい研究の地平が見えないかということである。具体的には、

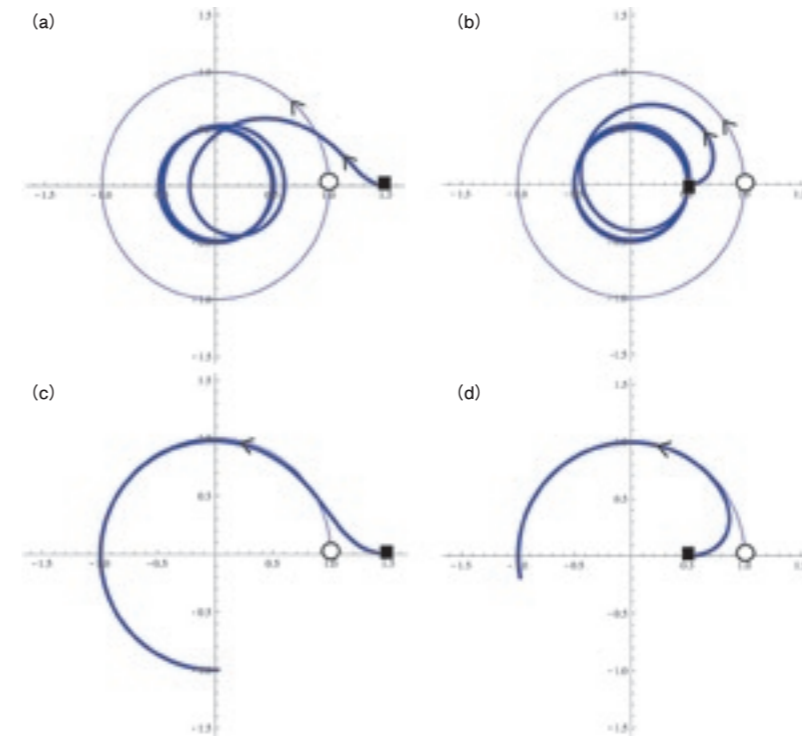


図1 等速度で円運動をする逃避者と追跡者の軌跡
 逃避者は細線、追跡者は太線とし、それぞれの始点は白丸と黒四角で表されている。追跡者と逃避者の速さの比は(a)、(b)1:2(追いつけない)、(c)、(d)1:0.95(追いつく)としてある。なお、(a)、(b)において追跡者の軌跡が逃避者と同様に円となり、その半径が速度比と同じ1:2となることが証明されている。

追跡と逃避の問題を集団化して、あるグループが、別の逃げるグループを追跡する問題、すなわち「集団追跡と逃避」の問題とする拡張を行った。ある意味単純な拡張だが、数学的に「解く」ことはより困難になった。また、予想に反して、意外な挙動が出現した。これらについて本稿では紹介する。

集団鬼ごっこのルールを決める

モデルは、周期境界条件を課したある大きさの2次元正方形格子を考える。これはちょうど、囲碁のマス目板を上下、そして左右でつないで、ドーナツ状の形状にしたことに相当する。各々のマスの角にあたるサイトには、多くとも1つの粒子(追跡者あるいは逃避者)が占有できるとする。

初期状態としては、これも囲碁の白黒の石のように、2種類の粒子の集団をランダムに配置する。追跡者・逃避者は最近接サイトを以下のルールに従い、移動するサイトを選ぶことで追跡・逃避を行うとする。このルールは端的には追跡者は自分に最も近い逃避者に近づこうとし、逃避者は自分に最も近い追跡者から離れようとするということを具体化するものである(図2)。

逃避者は自分から最も近くにいる追跡者から遠ざかるようにする。逃避者の位置と追跡者の位置を直線で結んで最小の距離となる

追跡者が、最も近くにいることになる。ここで、同じ距離の追跡者が2人以上いる場合は、ランダムに1人を選ぶ。逃避者は、その追跡者の位置に従い、その追跡者から遠ざかるサイトを移動先として選ぶ。一般に、遠ざかるサイトは2つあり、どちらかを等確率1/2で選ぶ(図2a)。遠ざかることができるサイトが3つある場合は等確率1/3で選ぶ(図2b)。

一方、追跡者は自分から最も近くにいる逃避者に近づこうとする。逃避者の場合と同様に、最も近くにいる逃避者を選び、その位置に従い、近づくサイトを選ぶ。こちらの場合も、一般に近づくサイトは2つあり、どちらかを等確率で選ぶ(図2a)。一方、(図2b)の場合は、近づくサイトは1つなので、それを選ぶ。

以上のルールで各々が選んだサイトに移動するが、以下に説明する捕獲を除いて、選んだサイトがすでに味方によって占有されている場合は、移動できないとする。

もし、逃避者の最近接サイトに追跡者がいる場合、その追跡者は逃避者のサイトに移動することにより、逃避者を捕獲する。捕獲された逃避者は取り除かれる。追跡者は同様に残りの逃避者を追いかける。つまり、追跡者の数は変化しないが、逃避者の数はどんどん減っていくことになる。注意していただきたいのは、個々は自分の最近接にいる相手のことだけで動きを決めていて、とくに集団内で連絡を取り合っていたりしないということである。また、時間更新は以下のように行う。まず各時間での追跡者・逃避者の位置から、それぞれ追跡者/逃避者は自分から最も近い逃避者/追跡者を決定し、次に移動するサイトを決定する。その後、追跡者を順に動かす。ここで最近接サイトに逃避者がいる場合はそのサイトに動き、逃避者は取り除かれる。その後、(残っている)逃避者を動かす。

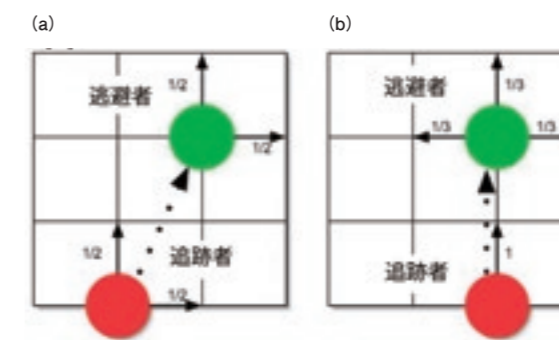


図2 追跡者・逃避者の移動ルール
 追跡者は最も近くにいる逃避者に近づく最近接サイトに移動する一方、逃避者は最も近くにいる追跡者から遠ざかる最近接サイトに移動する。多くの場合複数の候補が存在するので、その際には等確率でその候補の中から1つを選んで移動する。



Toru Ohira

1963年生まれ。グー基金奨学生として米国ハミルトン・カレッジに留学し、1986年卒業。英国ケンブリッジ大学クライスト・カレッジを経て、1993年に米国シカゴ大学大学院物理学専攻博士課程修了、Ph.D.取得。民間企業研究所を経て、2012年4月より現職。専門は「ゆらぎ」や「遅れ」を含むシステムの数理だが、対象の題材は物理、生物・生体、社会・経済など幅広く取り上げている。

この集団の鬼ごっこの1回は初期状態として P 人の追跡者と E 人の逃避者をランダムに配置し、すべての逃避者が捕獲されるまで続けるとする。ここで、初期の配置によっては容易に捕獲されてしまう状況などが考えられるが、以下に示すのはランダムな配置を初期条件とした集団鬼ごっこを繰り返し行ったのちの平均であり、特定の配置から始めた場合だけの平均ではない。

集団ならではのパフォーマンス

さて、このモデルの性質を調べてみよう。そのためのいくつかの指標について考える。まず、初期状態からすべての逃避者を捕獲するまでの時間 T に着目する。この時間は、

別の言い方をすれば、鬼ごっこが始まってから終わるまでの時間であり、また、最後に残った逃避者の寿命でもある。

追跡者と逃避者の速度が同じ場合、図1の例のような1対1の問題では、離れた追跡者は一般には永遠に追いつくことができない。このため捕獲までの時間は追跡者と逃避者の速度比との関係によって議論がなされる。しかし、集団化したことでいくつかの違った側面を見ることができ。まず、我々のモデルでも追跡者と逃避者の速度は同じに設定したので、1人の追跡者では逃避者に追いつくことができない。しかし、集団となったことで、追跡者が逃避者を「囲いこむ」ことにより、そこから逃げられないようにした上で、捕獲を

することができる。このように、追跡者間の交信はないのだが、まるで協力しているかのように見える挙動が条件によっては出現する。また、別の指標として、捕まるまでの典型的な生存時間、つまり逃避者の平均寿命 τ も考えられる。この平均寿命も、全捕獲までの平均時間と同様に、追跡者の数が増加すれば減少することが予想される。

具体的に我々のモデルでこれら、全捕獲までの時間および典型的な生存時間の指標の挙動を調べてみた。図3にはこの2つの指標が、逃避者や追跡者の数を変化させたことに応じてどのように変化するかを見た例が示されている。まず、逃避者の数 E を固定し、追跡者数 P を変化させると、 P が E と同程度

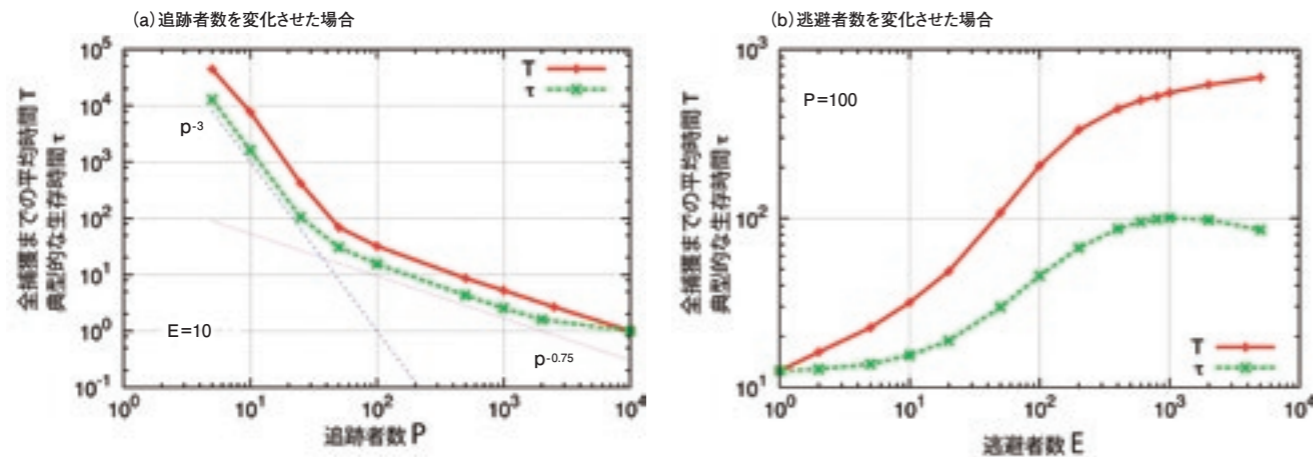


図3 全捕獲までの時間および平均生存時間
全捕獲までの平均時間 T と典型的な生存時間 τ を示す。(a) 逃避者数を $E=10$ に固定して追跡者集を変化させた。この場合には追跡者の数がある程度以上に増えると捕獲の効率が落ちることが見える。(b) 追跡者数を $P=100$ に固定し、逃避者数を変化させた。逃避者数が多いところでは一斉に捕獲されることがおきるため、典型的な生存時間が単調には増加しない。

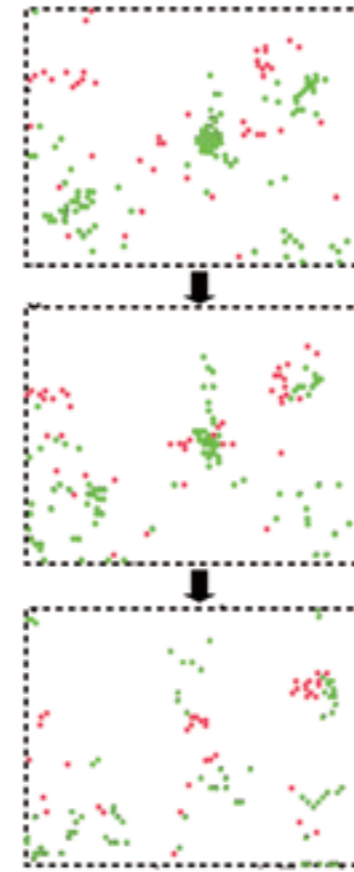
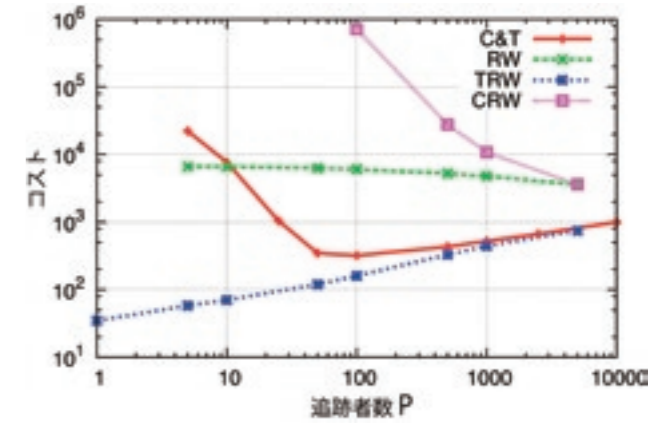


図4 逃避者数が多い場合の捕獲の様相
点が追跡者(赤)と逃避者(緑)を表している。 $E=1000$ 、 $P=100$ の初期条件から始めて、ある時刻(図上部)から10ステップ(図中央)および20ステップ(図下部)を経過した後の様子を示している。逃避者が一網打尽にされている状況が図の中央部分で出現している。

の場合、これらの時間は、ほぼ P^{-3} で短くなるが、ある程度の P をすぎると $P^{-0.75}$ での遅い減少に変化する。捕まえるまでの時間が追跡者の数の増加によって減少することは予想通りだが、この減少の質的变化は集団の効果の1つの現れである。与えられた逃避者の数に対して追跡者の数が多くなりすぎると、各々の追跡者は逃避者に近づく時に、追跡者同士でその動きをブロックして邪魔しあってしまう。これにより、追跡者の増員がそれまでよりも効果的ではなくなってくるのだと考えられる。

逆に追跡者の数を固定し、逃避者の数 E を変化させると、典型的な生存時間の方はピークをもつ(図3b)が、これも集団としての効果と考えられる。図4に、このピークのあたりの状況での捕獲の様相の一例を示す。ここでは、

図5 追跡者数 P を変化させたときのコスト関数 $c=TP/E$ の変化
逃避者数は $E=10$ で固定し、次の4つの場合についての結果を示す。追跡と逃避(C&T)、両者がともにランダムウォーク(RW)、逃避者がランダムウォーク(TRW)、追跡者がランダムウォーク(CRW)に従う。追跡と逃避の時のみ非単調な曲線となり、コストの最適値が得られることが表されている。



ランダムな初期条件から始まり、一部の逃避者を追跡者が追いかけている間に、ほかの逃避者は追跡者から逃れようと凝集する様子が見える(図上部)。一方、追跡者集団は、その凝集している逃避者を取り囲んで逃避者の集団を捕まえようと近づいていく(図中央)。この状況では、追跡者は取り囲むように近づいてくるので、逃避者はあまり動くことができない。さらに一部の逃避者は上下に逃げることに成功しているが、凝集していたために捕獲された逃避者が多くいることも観察できる(図下部)。

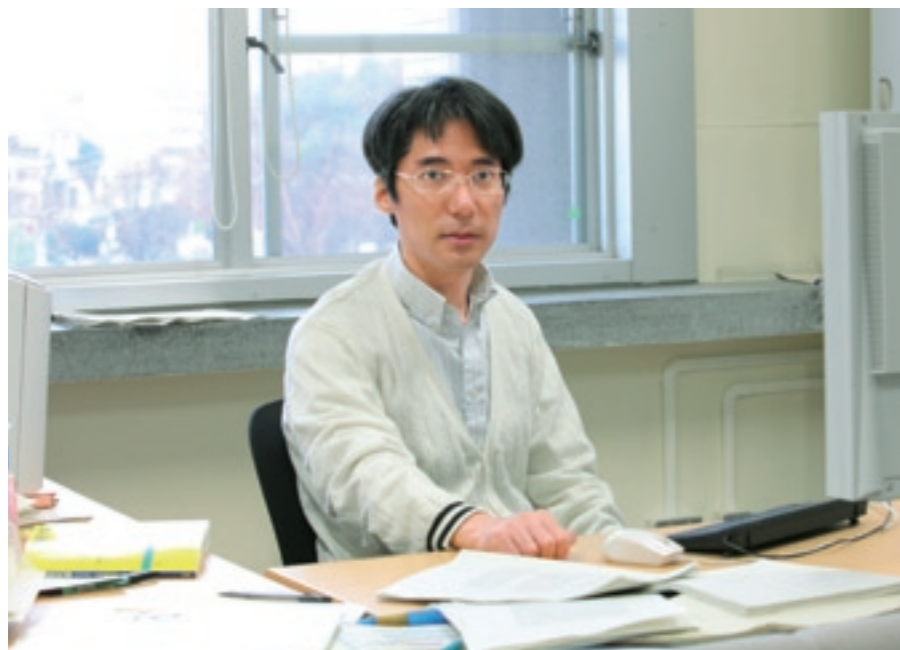
このピークで示唆されているのも集団の効果で、あまりに逃避者が多くなると、こちらも味方同士の動きを邪魔し合い、逆に捕まりやすくなるという状況になると考えられる。つまり、このピークの付近から「一網打尽」になるような状況が増えていくということである。なお、ここでもお互いの交信はなく、敵の集団行動が「反射」して、群れる、もしくは相互通信があるかのようにふるまうのは興味のあるところである。

さらに、より社会的な指標としては1人の逃避者を捕まえるための集団追跡の効率性を表すコスト関数を、 $c = TP/E$ として定義する。これは1つの集団追跡と逃避事件のために、動員した追跡者の数に仕事を終了するまでに働いた時間をかけた「総コスト」を、その事件の中の逃避者の数で割った指標である。これがより小さければ与えられた規模の事件に対して、より効率的な集団追跡

行動であったと解釈できる。このコスト関数を通してみると、逃避者の数が与えられたときに、最適な追跡者の数が存在することがわかった。この様子を図5に示す。大体の感じでは逃避者の5~20倍程度の値が最適な追跡者の数となることがわかった。とくに注目すべきは、この最適な追跡者の数の存在は追跡と逃避の行動の結果であるという点である。たとえばどちらか、もしくは両方の集団が単にランダムウォークをするような場合にはコスト関数は単調になり、このような最適な追跡者数は存在しない。

「追跡と逃避」の新たな地平

現状では、「追跡と逃避」と「集団、群れ」の数理・物理の2つの研究の流れを組み合わせるこの試みの新しさについては、幸い一定の評価を得ることができた。しかし、数理的な理解等が限られるなど、研究としては萌芽的な段階にある。また、イルカの群れによるイワシ群の追跡や、オオカミの群れが鹿の群れを襲う場合など自然界における対応する事例がある。これらの状況をモデルするという視点からは、追跡者あるいは逃避者同士の相互通信や、弱者を狙うなどの追跡と逃避の戦略をさまざまに導入することが必要となる。応用としても、広く適用できる可能性がある。コンピューターウイルスやネットの攻撃への対処など、物理的な空間だけではなくサイバー空間における集団追跡と逃避も重要になってくると予想する。



Masahito Hayashi

1971年生まれ。京大大学院理学部卒業(1994)、同大学院理学研究科数学・数理解析専攻博士後期課程修了(1999)。博士(理学)。科学技術振興機構グループリーダー、東北大学大学院情報科学研究科准教授等を経て、2012年より現職。専門は、量子情報および情報理論。情報の数理的構造とその応用的側面を明らかにすることをめざしている。

究極の暗号通信〈量子暗号〉と数学

林 正人 多元数理科学専攻教授

安全な暗号とは

皆さんは、量子力学と暗号という言葉聞いて何を思い浮かべるだろうか。ご存じのように、量子力学は微視的世界を記述する物理法則である。巨視的世界との大きな違いは、分割不可能な素子を基礎として物理法則が記述される点にある。また、測定すると系の状態が壊れるという特徴がある。実は、この巨視的な系にない2つの特徴が、巨視的な世界で実現できないタイプの暗号を可能にする。

暗号には計算量的暗号と、情報理論的暗号の2種類の暗号がある。前者は、暗号文と平文(伝送したいメッセージ)との間には1対1の対応関係があるもののその関係が複雑であり、解読が極めて困難な暗号である。つまり、暗号文だけから平文を求めるとは

途方もない計算量が必要とされるため、復号化鍵が漏れない限り安全と考えられている暗号である。一方後者は、そもそも平文に関する情報がまったく漏洩していないため、どんなに優れた計算機を用いても解読が不可能なものである。もちろん、後者の方が安全であるのはいうまでもないが、コストなどの関係で、現在は主にRSA暗号*に代表される前者の暗号が用いられている。しかし、計算量をベースにした暗号は、計算機の進歩によりその安全性が損なわれる可能性もあるため、情報理論的暗号の方が望ましいのは間違いない。

それでは、どうやって情報理論的暗号を実現するのだろうか。たとえば、伝送するメッセージと同じビット数の秘密の乱数を送信者と受信者と共有していれば、それらを用いて情報がまったく漏れない通信、すなわち、情報

理論的暗号が実現できる。この方法以外にも、盗聴者に漏れる情報量が正規の受信者よりも小さいという仮定が成り立てば、その仮定を用いて情報理論的暗号を実現できることが知られている。しかし、盗聴者の能力に制約を入れずにそのような暗号を確実に実現するにはどうしたらよいだろうか。そこで量子力学が登場する。

量子の世界での情報

ここで量子力学について情報の観点から説明しよう。量子力学では分割不可能な素子を取り扱うことが可能となる。もう少しこの事実を情報論的に記述すると、「1つの系のみ記述された情報を2つ以上の系に完全に分割することができない」ということになる。ここで、分割不可能な単一の素子を用いて情

報を記述することにしよう。この情報を正規の受信者が完全に受け取ったとすると、その単一の素子は最終的に正規の受信者の手元にあることになる。したがって、第三者にはその単一の素子はまったく渡らず、その結果、第三者にはその情報がまったく漏れないことになる。なぜなら、1つ目の特徴から、その単一の素子から部分的にさえ測定などによって情報が第三者に漏れたとすると、系の状態が壊れ、正規の受信者はこの情報を完全に受けとったことにならないからである。このように、1つ目の特徴はもう1つの「測定すると系の状態が壊れる」という特徴と表裏一体の関係にある。しかし、どうやってその単一の素子が「情報を正規の受信者が完全に受け取った」ことを保証するのだろうか。これを巧妙な方法で実現するのが量子暗号である。

エラーの有無が盗聴の有無を知らせる

この方法について考えるために、量子力学の特徴をもう少し別の視点から見よう。量子力学の世界では、我々の住んでいる世界(古典的世界)と異なり、重ね合わせ状態とよばれる状態がある。通常のコンピュータや通信では、ビットは0と1のどちらかしかないが、量子力学の世界では、0と1を重ね合わせた状態が起こりえる。しかも、その重なり方は1種類だけではなく、さまざまなタイプの重なり方がある。このような量子力学的世界における状態の重なった様子はコヒーレンスとよばれる。一般に、その微細な物理系(量子系)が巨視的な系(我々の住んでいる物理系)と相互作用すると、その相互作用の度合いに応じてコヒーレンスは失われる。とくに、その量

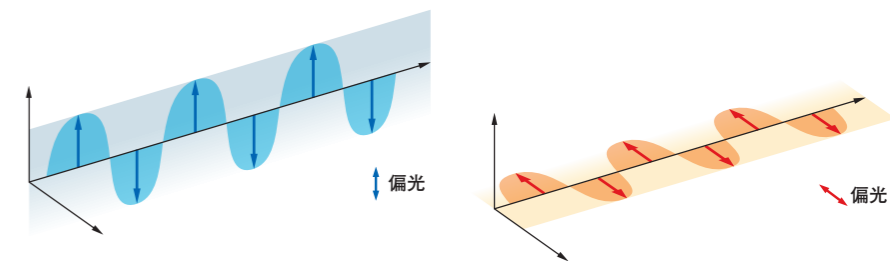


図1 光の偏光

光は波であり、ここではその振動方向(偏光)が一定である直線偏光を考える。独立な2つの振動方向として、たとえば、水平方向の偏光(右)と鉛直方向の偏光(左)を選ぶことが可能である。他の独立な2つの偏光として、水平方向の偏光を45度および135度傾けて得られる偏光(45度偏光および135度偏光)を選ぶこともできる。量子暗号は、これらの偏光の組み合わせによって実現できる。

子系からだれかが情報を得ると、そこで得られた情報の量に応じてコヒーレンスは失われる。実は、量子力学では、ビットの値(0または1)を判定するビット測定とよばれる測定方法以外に、コヒーレンスの度合いを判定する位相測定とよばれる測定方法がある。とくに、ビットの値に関する情報漏洩は、コヒーレンスの破壊度合いに依存することが知られている。そこで、私は、位相測定を行ったときの測定値のエラー(位相エラー率)から情報漏洩の量を推測する方法を与えた。残念ながら、両者の測定を同時に行うことはできないが、量子暗号の標準的手法であるベネットとブラザードによる方法では、複数回通信がなされる場合、その中から、ランダムに位相測定を行う通信を選ぶことで、その通信でのエラーの有無から盗聴の有無を検出することが可能となる。

なお、ここで注意が必要なのは、量子暗号では直接、伝送したいメッセージすなわち平文を送ることはできないという点である。上記の方法で可能なことは、情報漏洩がない秘密の乱数を伝送することである。もし量子通信で伝送したものが単なる秘密の乱数であれば、盗聴があった場合、その乱数を使用しなければ問題ない。量子通信の後で、盗聴が

なかったことを確認してから、その秘密の乱数を用いて秘密通信を行えばよいわけである。

基礎研究への波及効果

ところで、量子系というあまり身近でない世界のように考えられるが、意外なところにも量子系はある。実は、皆さんが日常的に目している光も量子系の1つである。光の粒は、光子とよばれ、光子には波の性質があり、その波の向きが量子系となっている。波の向きは、水平方向、鉛直方向などがあるが、それらを重ね合わせた向きである、45度、135度に傾いた向きの波もある。このような光の波の向きは偏光とよばれ、偏光板を用いて測ることができる(図1)。偏光板は、身近なところでは、サングラスなどに用いられる。量子暗号は、これら水平、鉛直、45度、135度の偏光を組み合わせて用いることで実現することができる。ただし、日常的に目にする光では、たくさんの光子が同時に飛んでいるため、量子暗号には使えない。光子を量子暗号に用いるには、単一光子を使う必要がある(図2)。通常の

* RSA暗号
現在標準的に用いられている暗号方式の1つ。その安全性の根拠は、桁数が大きい合成数の素因数分解問題の困難性にある。

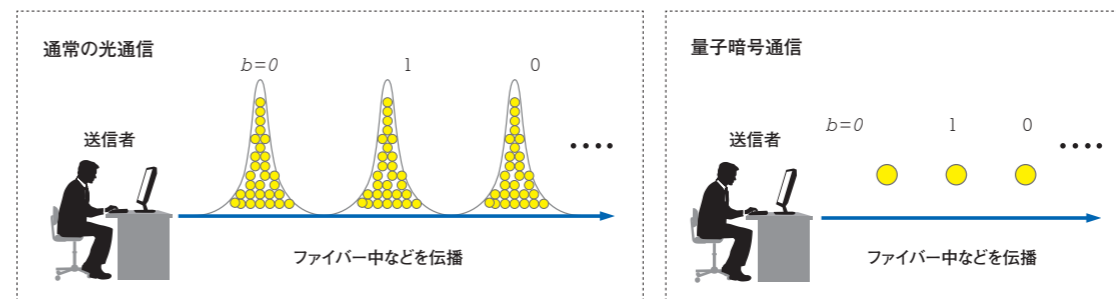


図2 通常の光通信と量子暗号通信
通常の光通信では1パルス当たり 10^8 個程度の光子が送られるが、量子暗号通信では非常に弱い光を生成する少ない個数の光子を送る。1個の光子のみの伝送が理想的であるが、現実には難しい。

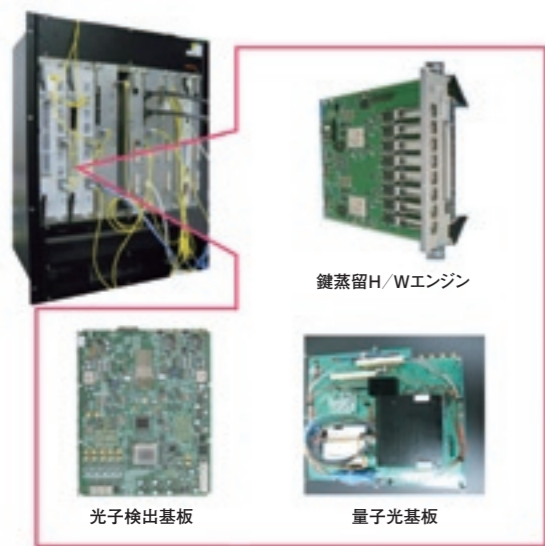


図3 NEC製波長多重量子暗号装置

多くの量子暗号の装置は少ない光子のみを送るために、特殊な技術を用いる。しかし、この装置は量産に適した構造にするため、通常の光通信装置と同様な技術を用い、コンパクトな構成となっている。そのため、既存の光ファイバー網への接続が容易である。また8波長まで多重化が可能となっている。



図4 フィールドファイバーでの長期安定性試験

ファイバーの特性変動の影響を受けず、府中～小金井間往復22kmの距離の既設ファイバー上の通信において、2週間にわたり安定な鍵生成に成功した。損失13dBは、光子の強度が $10^{12} \approx 1/20$ に弱まることを意味している(2013年1月NEC)。

光通信でも一度にたくさんの光子を送るため、通常の光通信とは異なった高度な実験技術が必要である(図3)。しかし、光通信で用いられる光ファイバーは光子を用いた量子暗号にも用いることができる(図4)。

これまで述べたように、情報の漏洩がないという工学的特徴と系のコヒーレンスが保たれているという物理的特徴が表裏一体の関係にあり、この関係を用いて情報理論的に安全な量子暗号が可能となる。量子暗号の研究は暗号という量子力学の現実世界への応用を実現するため、その応用面だけに光が当てられがちである。そのため、基礎物理学を研究する研究者にとっては、物理の基礎には関係ない話題であると考えられがちである。しかし、量子暗号の安全性を考える中で、量子力学の原理的理解が進み、コヒーレンスと情報漏洩の関係など、従来の伝統的な量子力学の研究では見なかった新たな量子力学の基礎的側面が明らかになった。

量子暗号を支える数学

さて、ここで数学と量子暗号の関係について考えよう。理想的な環境で量子暗号の通信を行う場合、あまり数学は重要ではない。しかし、現実的な環境では、さまざまな装置の不完全性があり、それを補うためのさまざまな情報処理が必要である。そのような補助的な情報処理を行った結果、システム全体で情報漏洩のないことを示すために、数学が重要な役割を果たす。

まず、現実の量子暗号のシステムでは、完全にコヒーレンスを保つことができない。そのため、位相測定で得られる位相エラー率の値が完全には0にはならない。そのような場合、この位相エラー率が、部分的な盗聴によるものか、それとも、盗聴者が介入しない単なるノイズなのか、判定することはできない。そのため、量子暗号によって得られる秘密の乱数の安全性を確保するには、部分的な盗聴によるものであると判断する必要がある

(図5)。このとき、部分的に盗聴者に情報が漏洩した乱数から、まったく情報漏洩がない秘密の乱数を取り出す必要がある。このために、秘匿性増強とよばれる技術が用いられる。秘匿性増強では、乱数のビット数を減らす(犠牲にする)代わりに、漏洩した情報を無効にすることができる。すなわち、ビット数が減った新たな乱数を漏洩情報と無関係にすることができる。いわば、自らの肉を絶って相手(盗聴者)の骨を絶つ技術である。このような技術を用いることで、最終的に情報漏洩がない秘密の乱数をつくりだす。しかし、情報漏洩がない秘密の乱数をつくるために必要な犠牲にするビットの割合を求めるのは簡単ではない。この問題に対して、私は、量子力学と情報に関する数学を用いることで犠牲を必要最小限とするビットの量を求めた。ここでは、量子力学の世界を扱うために行列代数が活躍する。秘匿性増強は、一括して処理するビットの数(ブロック



図5 雑音の扱い

単なる雑音と盗聴による雑音は原理的には区別できない。そのため、究極の安全性のためには、すべての雑音を盗聴によるものとみなす。

長)を長くするとその性能が向上するのだが、逆に、ブロック長が長くなるとその処理にかかる時間が増加するという問題がある。そのため、ブロック長が長くても効率的に実行が可能な秘匿性増強が必要となる。私は、三菱電機と共同で有限体の数学を用いて、その計算効率を向上させた新たな秘匿性増強の方法を提案した(図6)。

現実の量子暗号のシステムではもう1つ難しい問題がある。先に、複数回通信の中から、ランダムに位相測定を行う通信を選び、位相エラー率を求めると書いた。しかし、実際に

は乱数の生成に用いる通信と位相測定を行った通信は異なる。なぜならば全体の通信という母集団の中から、ランダムに何回かの通信を抽出し、その通信での位相エラー率が推測できるからである。あくまでも可能なことは推測であり、実際に乱数の生成に用いる通信での位相エラー率が実際に測定値として得られる位相エラー率と完全に一致するわけではないことに注意してもらいたい。測定値として得られる位相エラー率から上下どの程度の範囲に収まるか判断す

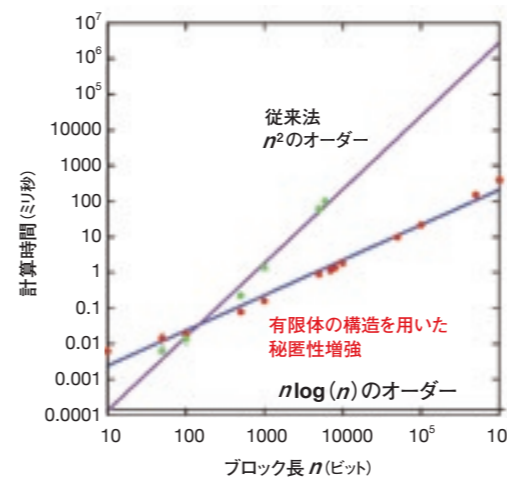


図6 高速化された秘匿性増強

有限体の構造を用いることで、高速化された秘匿性増強の新たなアルゴリズムを提案する。ブロック長が大きくなった場合、従来法に比べ、計算時間が大幅に短縮できる。

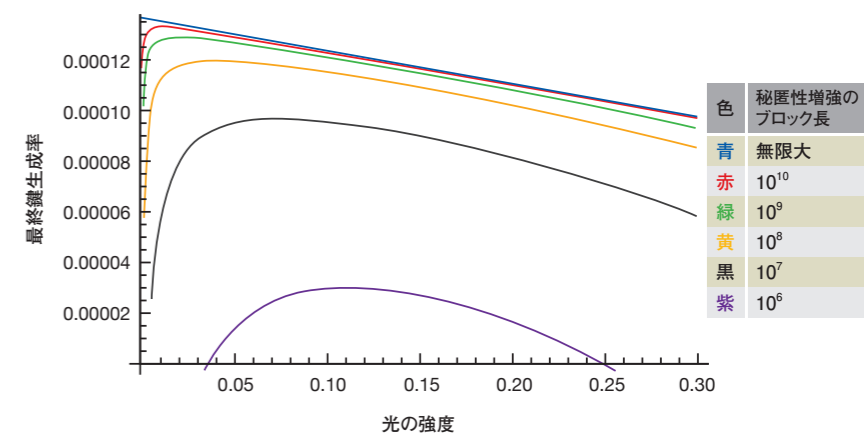


図7 最終的な乱数の生成率

統計的手法により推測誤差を考慮した最終鍵の生成率。ブロック長を長くすると、推測誤差が小さくなり、生成率が向上する。

中性子光学を使った素粒子物理

清水裕彦 素粒子宇宙物理学専攻教授



Hirohiko Shimizu

1962年生まれ。京都大学理学部卒業（1986）、同大学院理学研究科物理学第二専攻修了（1992）。博士（理学）。1992年、高エネルギー物理学研究所助手。1995年、理化学研究所研究員、先任研究員、副主任研究員。2005年、高エネルギー加速器研究機構教授。2012年より現職。専門は原子核・素粒子物理、中性子光学。

どこに中性子は存在するのか

すべての物質を構成する原子は原子核と電子でできている。原子核は陽子と中性子からなり、私たちの体重の半分程度は中性子が担っている。中性子は原子核の中でのみ安定で、原子核から取り出すと平均15分程度で陽子に変化してしまう。そのため日常生活はおろか、科学の世界でも中性子が登

場する場面は多いとはいえない。一見、役に立たない印象を受けるが、中性子に電荷がないということには大きな意味があり、物質の性質を調べたり、工業製品を透視したり、がんの治療などに用いられている。そして、宇宙や素粒子の謎を解明する鍵を探すためにも用いられる。

その「鍵」は、中性子の寿命、中性子内部

の電荷の偏り、中性子を感じる重力など、中性子もつまぎまな性質に潜んでいる。しかし、その「鍵」はとても小さい。「鍵」の1つである電荷の偏りは、 10^{-15} mしかない中性子の大きさのさらに 10^{-13} 倍以下という小ささであり、我々の周囲に充満する電磁場の影響でかき消されてしまう。しかし、中性子には電荷がなく、電場の影響が小さいことが幸いする。

そして、中性子の速度は小さい方がよい。中性子は、原子核から取り出したときには、秒速 10^7 m程度で運動している。そのままでは高精度測定を行うには時間がまったく足りない。そこで、減速してから実験に用いるのだが、ほぼ等方的に広がってしまう。つまり、四方に飛散する中性子を、できるだけ多く測定装置に導かなくてはならない。電荷がある粒子ならば、電磁場を使って軌道を曲げたり、収束したりできるのだが、中性子には電荷がないので特別な工夫が必要になる。

中性子反射鏡と中性子導管

中性子は物質を貫通する能力が大きいですが、速度が遅くなると波の性質が顕著に現れ、平滑な物質表面で反射されるようになる。つまり中性子反射鏡ができる。中性子反射鏡を内表面とする筒は中性子導管とよばれ、筒の内側を通過する中性子は反射されながら

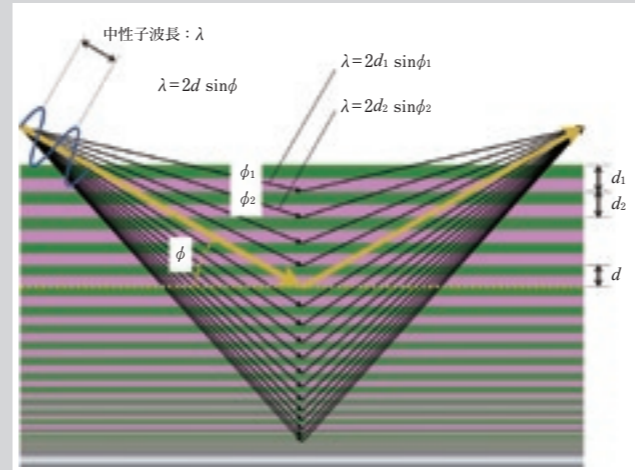


図2 中性子スーパーミラー
積層された薄膜に中性子が入射すると、量子力学的波動の干渉によって、層間距離に対応した角度で入射した中性子が反射される。層間距離を徐々に変化させれば、通常の反射に加えて、より深い角度でも反射が起こるようになる。これを中性子スーパーミラーとよぶ。

進み飛散しない。筒を曲面にして中性子を収束することもできるし、閉じ込め容器をつくることもできる。反射できる最大速度は、秒速7m程度である。我々が実験によく用いる中性子は、秒速1000m程度の冷中性子であり、物質表面すれすれの浅い角度（約0.5度以下）で入射する中性子のみが反射できる（図1）。この角度を大きくするために、物質表面に薄い膜を何枚も貼り付けるという方法がある（図2）。膜厚の周期に対応して起こる中性子波動の干渉によって、追加的な反射が起こる。こうして高性能化された鏡でつくった中性子導管を使うと、桁違いに多い中性子を測定装置に送り込むことができる。

スピンを使った中性子光学

中性子はスピンの方向に磁気双極子能率をもっており、磁場中で棒磁石のようにふるまう。スピンの方向が磁場に平行なときは、反平行のときに比べてポテンシャルエネルギーが大きくなり、

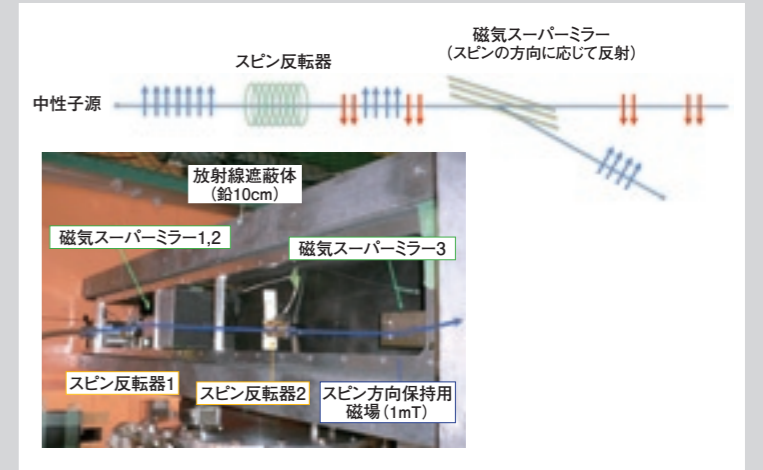


図3 中性子ビーム電磁的振り分け器
飽和した磁性体は特定のスピン状態の中性子だけを反射させるような中性子鏡になる。またスピンに垂直な方向に磁場をかけて中性子スピンの方向を反転させることができる。ある時間にだけ垂直磁場をかけるようにすると、中性子のかたまりを切り出して、測定装置に向けて送り出すことができる。

内部に磁場をもつ物質は平行スピンの中性子だけを反射するような鏡になる。またスピンに垂直な方向に磁場を加えると、スピンを回転させることができる。これを組み合わせると中性子を電磁的に振り分けすることができる（図3）。

磁場を通過する間にスピンを反転させると、中性子の速度が変化するので、中性子加減速器になる。速度が完全に揃っていない中性子は、飛行するに連れて密度が低下してしまい測定精度の悪化を招くが、中性子加減速器を使うと、密度の減少を回避することができる。

以上のような中性子光学は、我々が世界をリードして開拓してきた分野である。中性子光学を駆使した実験装置が整備されつつあり、中性子の性質を桁違いに高い精度で測定することが可能になってきた（図4）。低速中性子を用いた素粒子物理学は、極めて高いエネルギーの現象を研究するために、極めて低いエネルギー領域の現象を用いるという意味で一風変わったものかもしれない。しかし、それ

は変わっているというだけでなく、創意工夫をこらすことで、現在の高エネルギー加速器でも到達困難な領域における宇宙や素粒子の謎に挑む、という手法なのである。

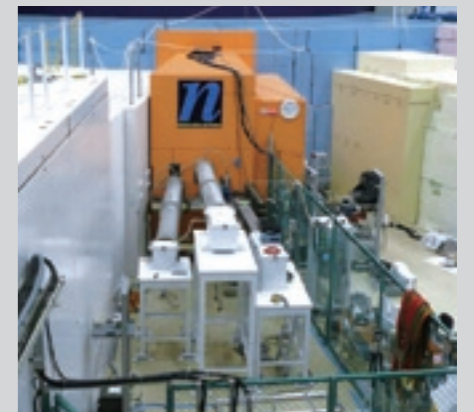
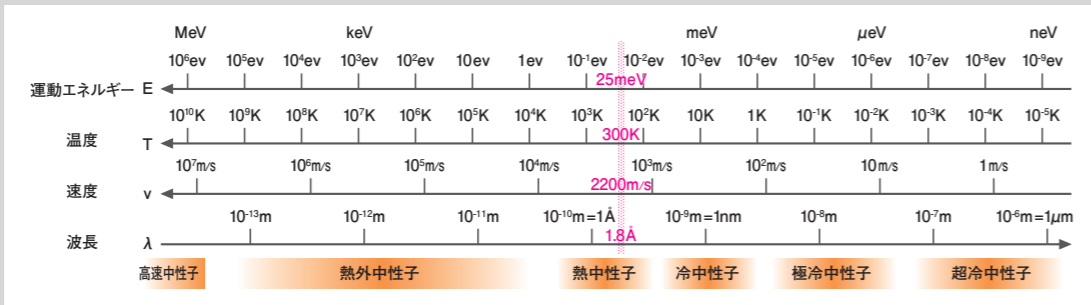
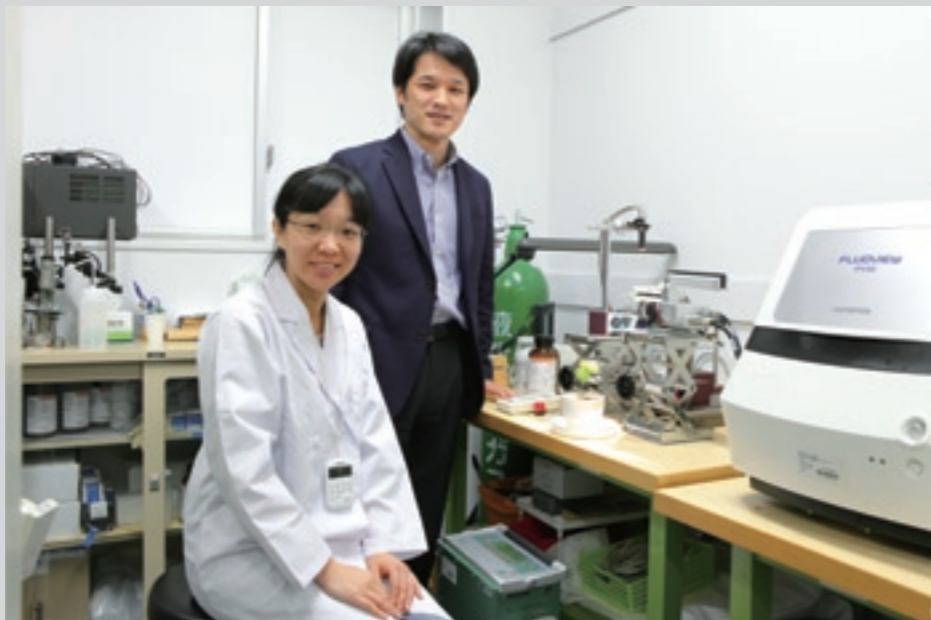


図4 中性子光学基礎物理研究装置
茨城県東海村の大強度陽子加速器研究施設（J-PARC）の冷中性子ビームラインBL05に配備された中性子光学基礎物理研究装置（NOP: Neutron Optics and Physics）。橙色の放射線遮蔽体の中には複数の中性子導管が設置されており、低速中性子のみを3つのビームに分岐して出力する機能をもつ。右側の出力ポートに中性子を輸送する曲導管の内面は磁性体スーパーミラーになっており、スピン偏極ビームが出力される。

図1 中性子の運動学的諸量の関係とエネルギー別の名称

熱中性子、冷中性子、極冷中性子、超冷中性子を合わせて、低速中性子とよぶ。波長は量子力学的な波としての波長のことで、エネルギーが小さくなると波としての性質が顕著に現れるようになる。我々が利用する中性子は冷中性子が多く、場合に応じて極冷中性子および超冷中性子を利用する。超冷中性子は物質の表面に垂直に入射した場合でも反射できるので、容器内に閉じ込めることができる。





Toshinori Kinoshita

1968年生まれ。1991年九州大学理学部生物学科卒業。1994年九州大学大学院理学研究科博士課程中途退学。同・教務員、助手を経て、2007年名古屋大学大学院理学研究科・准教授、2010年同・教授。2013年から現職および名古屋大学遺伝子実験施設長。博士（理学）。専門は植物分子生理学。

Yin Wang

1980年中国生まれ。2003年北京大學環境科学学科卒業。2006年大阪大学大学院理学研究科修士課程修了。2010年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了、博士（理学）。日本政府（文部科学省）奨学金、日本学術振興会特別研究員（DC2）。2011年名古屋大学大学院理学研究科研究員、2014年から現職。

植物の成長を促す気孔に日の光を

木下俊則 トランスフォーマティブ生命分子研究所教授
ワン・イン 高等研究院YLC特任助教

気孔と成長との関係を実証する

植物は光合成を行い、私たちに食物を提供するだけでなく、二酸化炭素の吸収や蒸散・酸素の放出を行うことで地球の大気環境を整えている。植物における二酸化炭素の唯一の取り込み口となっているのが、植物の表

面に存在する気孔とよばれる微細な孔である。私たちが森林の中で涼しく感じるの、日光がささげられているだけでなく、気孔での蒸散により気温が低下するためである。気孔は、一對の孔辺細胞により構成され、葉の表面に1mm²当たり約50個～数百個存在しており、

太陽光下で開口する（図1）。これまでの研究により、光による気孔開口には、青色光受容体フォトロピン*1、気孔開口の駆動力を形成する細胞膜プロトンポンプ*2や内向き整流性カリウムチャネル*3が主要な働きを担っていることが明らかとなってきた（図2）。

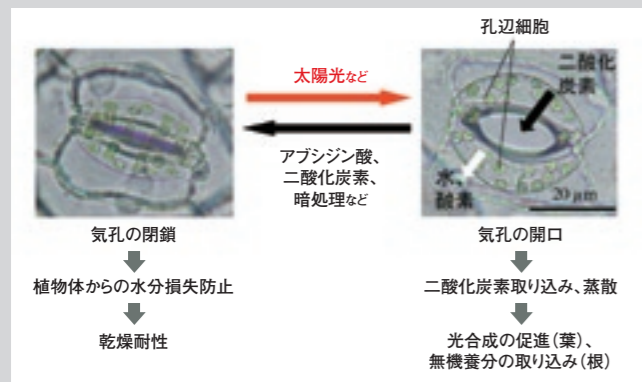


図1 ツユクサ表皮の気孔の写真と気孔の働き

気孔は光照射によって開口し、乾燥ストレスに曝されると植物ホルモン・アブシジン酸の作用により閉鎖する。気孔は光合成に必要な二酸化炭素を吸収する唯一の取り込み口となっている。

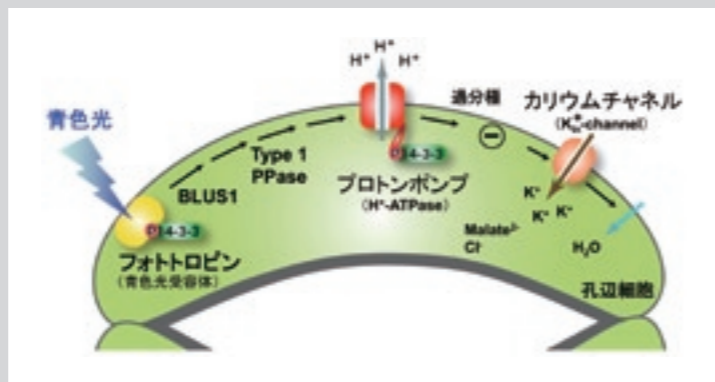


図2 光による気孔開口メカニズム

太陽光に含まれる青色光は、フォトロピンに受容され、細胞膜プロトンポンプを活性化し、カリウム取り込みの駆動力を形成する。細胞内に大量に取り込まれたカリウムは、浸透圧を上昇させ、水が取り込まれ、孔辺細胞の体積が増加することで気孔が開口する。

植物が太陽光のもとで盛んに光合成を行っているとき、多くの二酸化炭素を必要とするが、気孔の孔を通る際に生じる抵抗（気孔抵抗）が二酸化炭素取り込みの主要な制限要因となっており、植物の光合成が制限されていると考えられている。しかしながら、気孔開度が本当に植物の光合成や生産量の制限要因となっているのかどうかについては、明確に実証されていなかった。また、植物の光合成活性をより向上させるためには、気孔の開き具合を大きくし、気孔抵抗を低下させることが解決法として考えられるが、これまで人為的に気孔の開口のみを大きくする技術は報告されてこなかった。

気孔の開口を促すもの

私たちは、これまでの研究により明らかとなった光による気孔開口反応に関わる主要因子（青色光受容体フォトロピン、細胞膜プロトンポンプ、内向き整流性カリウムチャネル）を、気孔を構成する孔辺細胞のみで発現を誘導することが知られている *GCI* プロモーター*4 を用いて、モデル植物シロイヌナズナの孔辺細胞だけに発現量を上昇させ気孔開口を促進させることができるかどうかを調べた。その結果、気孔開口の駆動力を形成する細胞膜プロトンポンプの孔辺細胞での発現量を約1.5倍

増加させることで、光による気孔の開口が野生株よりも約25%大きくなることを発見した（図3）。一方、プロトンポンプ過剰発現株は、光刺激のない状態や気孔を閉じさせる作用のあるアブシジン酸存在下では、野生株と同様に気孔が閉鎖しており、光刺激により気孔開口が促進されたときのみ、気孔が大きく開口する性質をもつことが確認できた。

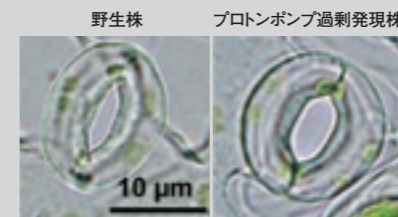


図3 野生株とプロトンポンプ過剰発現株の比較
プロトンポンプ過剰発現株は、光照射後、野生株よりつねに大きな気孔開度を示す。

そこで、光合成蒸散測定装置を用いて詳細な解析を進めたところ、プロトンポンプ過剰発現株では、二酸化炭素吸収量（光合成活性）が約15%増加しており、さらに、植物の生産量について調べたところ、種まき後25日目の栄養成長期の植物において、地上部の重量が1.4～1.6倍増加しており、種まき後45日目の植物が種子を付けた状態の種子や莢を含む花茎の乾燥重量が、野生株と比べ、約1.4倍増加していることを明らかにした（図4）。また、過剰発現株では、野生株と同様な乾燥応答



図4 シロイヌナズナの野生株とプロトンポンプ過剰発現株の植物体の表現型の比較

プロトンポンプ過剰発現株は、野生株と比べて、ひとまわり大きく育ち、種まき後25日目において地上部の生重量と乾燥重量が42～63%増加した（A～C）。種まき後45日目においては、花茎が長くなり、多くの花をつけ、種子の収量が増加した。種子や莢を含む花茎の乾燥重量は、野生株と比べて36～41%増加していた（D）。（Wang et al., 2014 Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 111 (1), 533-538）

や乾燥耐性が見られた。このことは、過剰発現株が野生株と同様の水分環境で生育可能であることを示している。一方で、その他の因子の場合は、気孔の開口促進や植物の生産量増加を引き起こさないことがわかった。

当初は、ともかく気孔を大きく開かせればよいと考え、恒常活性化型のプロトンポンプを用いて、常に大きく気孔が開いた植物体の解析も進めていたが、水不足の状況でないにもかかわらず、この植物体の生産量は野生株と同じかそれ以下になり、夜など光合成を行っていない気孔を閉じさせることが生産量増加に必要なこともわかってきた。

植物の生産量を増やすために

以上の結果は、細胞膜プロトンポンプが気孔開口の制限因子であり、気孔開度が光合成と生産量の制限要因であることを実証する初めての成果となった。さらに、本研究により、人為的に気孔の開口を大きくすることで植物の生産量を増加させることに世界で初めて成功した。本技術は、植物に普遍的な気孔の開口メカニズムを利用しているため、応用範囲が広いと考えられ、今後、バイオ燃料用植物や農作物にこの技術を適用することで有用植物の生産量（収量）や二酸化炭素吸収量の増加に貢献したいと考えている。

*1 青色光受容体フォトロピン
植物特有の光受容体で、光による気孔開口の光受容体として機能する。フォトロピンは、気孔開口の他に、光屈性や葉緑体の光定位運動の光受容体としても機能することが知られている。

*2 細胞膜プロトンポンプ
ATPをエネルギーとして、細胞の内側から外側に水素イオンを輸送する一次輸送体。細胞膜を介して形成される水素イオンの濃度勾配は、さまざまな物質を輸送する二次輸送体の駆動力として利用されている。気孔孔辺細胞においては、青色光により活性化され、カリウム取り込みの駆動力を形成し、気孔開口を引き起こすことが知られている。

*3 内向き整流性カリウムチャネル
細胞膜に存在し、細胞膜プロトンポンプの働きにより引き起こされる膜電位の低下（過分極）に応答して開口し、細胞へのカリウム取り込みを行う。

*4 *GCI* プロモーター
孔辺細胞だけで遺伝子の転写（DNA からRNA を合成する反応）を誘導するプロモーター。プロモーターは主に転写される遺伝子の上流領域に存在する。

乱流状態の星間ガスから星が生まれる

立原研悟 素粒子宇宙物理学専攻准教授

星の材料を観測する

太陽をはじめとする星は、星間物質が集まってつくられる。星間物質の主成分は水素ガスである。何光年にも広がった水素のガス雲が1000万分の1のサイズに凝縮して、星が誕生する。密度にすると20桁をこえる収縮が起きる。46億年前に誕生した我々の太陽系も、希薄で低温な星間物質の重力収縮により誕生したと考えられる。材料の水素ガスはどのように収縮するのだろうか。最近20年の研究の進歩をふりかえてみよう。

1970年頃に星間空間にいろいろな分子が発見され、星間分子の電波観測が活発に行われてきた。分子雲は水素を主成分とし、電波を放つCOなどの微量分子を含む。我々名古屋大学のグループは口径4mの電波望遠鏡を用いて、星の生まれる場である密度の高い分子ガスの塊(分子雲コア)をCOの電波で広く探査した。この結果を生みだした星と比べると、1つの傾向が見えてきた。若い星を形成している高密度分子雲コアは、小さな速度幅をもつ傾向が見られたのである(図1)。

若い星は星風などでガスを加速するので、それまではむしろ「逆の傾向」が予想されていた。観測された速度幅は音速を大きく超える毎秒1km前後である。これは星間乱流とよばれ、星間ガスが超音速で運動していることを示す。つまり星間乱流が大きいと、星がつかれないように見えるのである。

乱流状態の星間ガス

星間ガスの超音速の乱流は、衝撃波を発生する。理論的に考えると、衝撃波によるエネルギーの消滅のために、乱流は1万年以下で、あっという間に消滅するはずである。しかし、観測は乱流が10万年以上の長時間存在することを示す。これは大きな謎であった。乱流の起源については長く論争が続いたが、21世紀になるまで明確な説明はなかった。

この状況を打破できるモデルが、日本の理論グループによって提案された。これは、星間物質は低温で高密度の相と、高温で低密度の二相が混在する、という二層モデルである。

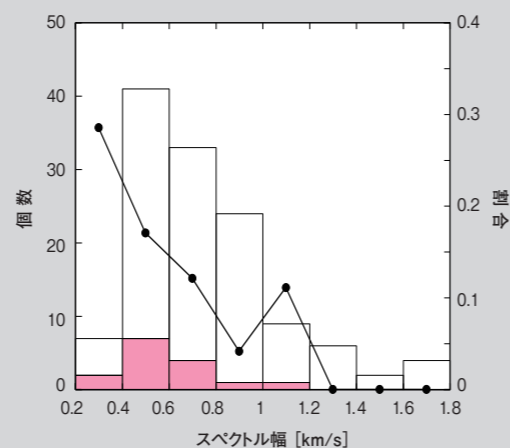


図1 小質量高密度分子雲コアの線幅のヒストグラム。色付きの部分は星を形成しているコアで、●はその割合を示す。線幅が小さい方が星を形成している割合が高いことがわかる(Tachihara et al. 2002, *Astronomy & Astrophysics*, 385, 909)。

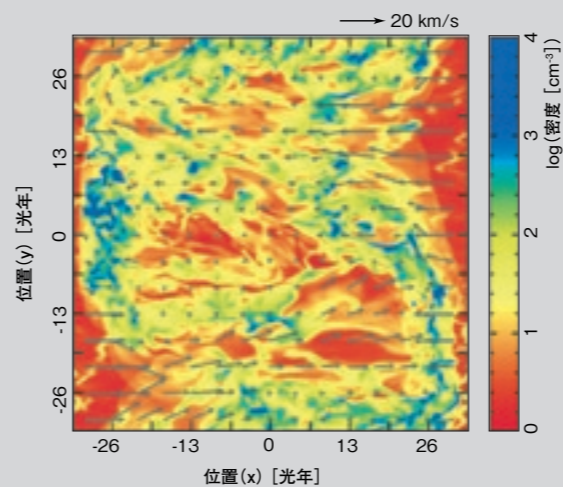


図2 数値シミュレーションで得られた乱流的星間物質の密度分布。左右からの高温低密度ガスが衝突し、その圧縮面でも熱的不安定が成長し、低温高密度の微細構造が形成されているのが見える(Inoue & Inutsuka 2012, *Astrophysical Journal*, 759, 35)。

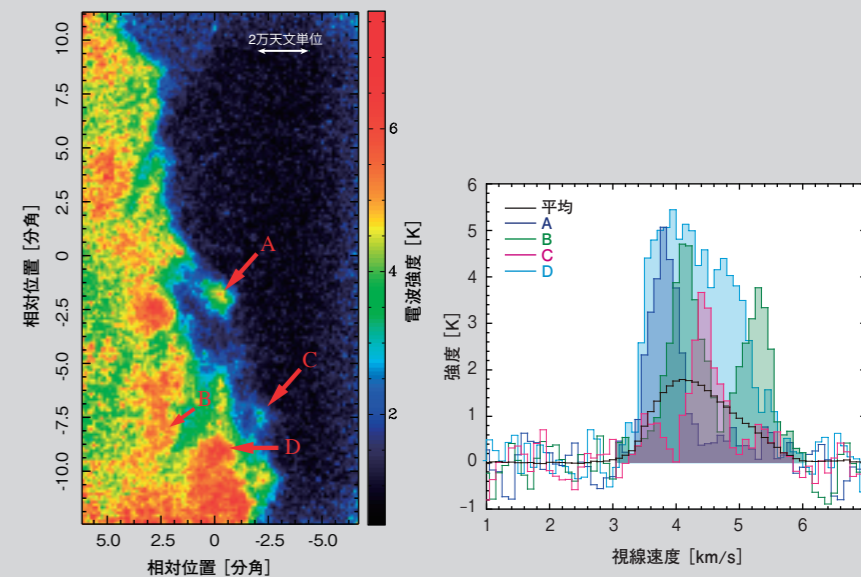


図3 CO輝線観測により分子雲の縁で検出された微細な構造。中央に見える塊の半径はおおよそ6000天文単位(おおよそ0.01光年)。右は矢印の場所でのCOスペクトルのプロファイル。各速度成分の幅は0.5 km/s程度。黒線は観測領域全体の平均スペクトルで、複数の速度成分が混ざり、大きな線幅を示す(Tachihara et al. 2012, *Astrophysical Journal*, 754, 95)。

熱平衡状態にある低温高密度相は小さな塊をつくり、それらは高温低密度相(一般には原子ガス)の中に浸って運動する。高温相の音速は大きく、衝撃波を発生せず、長時間にわたって乱流運動が維持される。私たちが観測していたのは、このような微細構造の重ね合わせであったと考えられる。二層モデルの理論シミュレーションもこの考えを支持する(図2)。

これを検証するために、私は国立天文台野辺山電波観測所の45m電波望遠鏡を使い、分子雲の微細構造の検出を試みた。分子雲の中心部を観測すると、多くの微細構造が重なり合っ、各々を分解することができなくなってしまう。そこで私は分子雲の縁を観測することにした。その結果、サイズが数千天文単位の分子雲の微細な構造が検出され、それらの線幅はほとんど音速に近いわずか0.5 km/s程度であった(図3)。予想どおり、分子雲は乱流の種ともいえる微小微細構造が集まってできており、それらの運動が超音速の速度分散として観測されるということが明らかになった(図4)。

分子雲の形成

星間分子ガスは原子ガスから形成されると考えられるが、その相転移の現場を観測でとらえることは可能であろうか。二相モデルによると、高温低密度相は熱的不安定を起こし、小さな構造の低温高密度相をつくる。原子ガスと分子ガスの相転移もこの低温相の中で進み、原子ガスから小さな分子雲がつけられると考えられる。これまでの水素原子ガスの観測では高い空間分解能を

実現することが難しかったが、今後はアタカマ巨大ミリ波アレー(ALMA)やスクエア・キロメートル・アレー(SKA)といった次世代の電波干渉計望遠鏡を使うことで、空間的・速度的に小さく複雑な構造をもつ原子・分子ガスを検出し、星間乱流と分子雲形成の素過程を調べることが可能になる。長い間の星間物理学の謎が解明されるだけでなく、星形成を支配する物理が明らかにされることであろう。

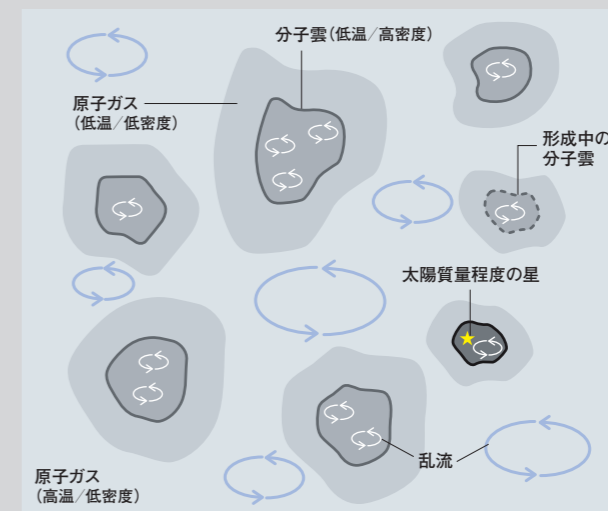
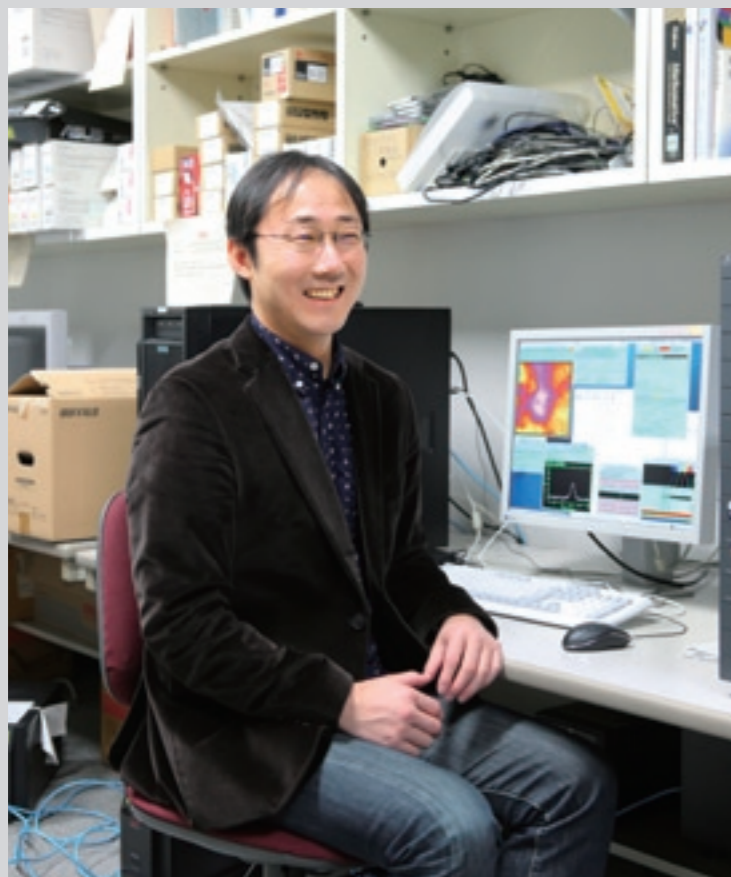


図4 乱流的微細構造からなる星間物質の模式図。分子雲は小さく低温高密度な星間物質が集まってできており、それらが高温低密度な物質の中でランダムに運動している。

天体物理学研究室ウェブサイト <http://www.a.phys.nagoya-u.ac.jp/ae/>



Kengo Tachihara

1999年に名古屋大学大学院理学研究科で学位を取得。その後ドイツのマックス・プランク地球外物理学研究所研究員、フリードリッヒ・ヒンライエナ大学において学術振興会海外特別研究員、神戸大学COE上級研究員を経てALMAプロジェクトに参加。国立天文台チリ観測所助教の後、2013年4月より現職。

同窓生から

理系だからこそできる仕事があった

朝日新聞記者
東山正宜 (Masanobu Higashiyama)

まるで、桜の花びらが風に舞って散っていくかのようだった。

朝日新聞記者として2010年6月13日、小惑星探査機「はやぶさ」の帰還を豪州で取材した。はやぶさが7年60億キロの旅を終え、小惑星の砂粒が入ったカプセルを放出して燃え尽きたのは、朝刊の締め切り20分前。

記事と写真を突っ込むべく、東京本社を1面トップを空けて待っていた。

バラバラになった光が消え、震える手でカメラの再生ボタンを押すと、はやぶさの光跡が天の川に消える姿がはっきり写っていた。持ち上げておいた衛星通信端末で写真を電送しながら、別の衛星携帯で電話した。「予定時刻通りでした。原稿はこのままでOKです。写真も、もうすぐ送り終わります」。

うまく写せた喜びより、紙面に穴を開けずにすんだという安堵感でいっぱいだった。

1994年に名古屋大学理学部に入学したころ、天文学への憧れだけがあった。解析力学や電磁気学の美しさには胸が躍った。でも、量子力学と相対論のあたりから、どうやらこの業界で飯を食っていくのは無理そうだと思い始めた。当時、豊川市にあった太陽地球環境研究所 (STE) でなんとか修士号だけもらい、報道写真から興味をもったマスコミへ、物理から逃げるように就職した。



名古屋駅前の星空

入社してすぐは事件や事故の現場まわり。ヤクザにすごまれ、殺人事件の関係者に怒鳴られながら、少しずつ記事を書いた。切った張ったの現場にやりがいを感じ、8年間は科学の取材をすることもほとんどなかった。

でも、ひょんなことから科学医療部に所属することになり、久しぶりに物理に接すると、やはり物理や天文学は楽しくてしょうがなかった。もちろん、化学や生物学、数学も取材するし、iPS細胞のノーベル賞受賞の記事も書いた。下手をしたら、学生時代より論文を読んでいるかもしれない。

一方、趣味の天体写真はずっと続けていた。デジカメを使って、明るい都会でも星の光跡を写せる撮影手法を考えつき、2011年に東京・銀座で写真展「都会の星」を開いた。縁あって写真集にもなった。

最近、趣味と仕事の境界がますます曖昧になって、社内でも好き放題仕事をしていると思われるらしい。でも、自分の興味がそのまま仕事になるのが記者のいいところ。もし興味をもった方がいたら、理系だからこそ、ぜひ就職先に検討してほしいと思う (2001年素粒子宇宙物理学博士後期課程中退)。



キャンパス通信

映像で理学部を紹介する

生命理学専攻助教
杉山 伸 (Shin Sugiyama)

一般の方に最先端の研究を理解していただくのは大学で講義することよりも格段に難しい。そんな時に解説的な動画があるととても役立つ。そこで今回、理学部を紹介するビデオを新たに制作した。テレビの科学ドキュメンタリーを想像していただきたいのだが、この種のビデオは、実際に見せることのできない現象や概念を、コンピューターグラフィックスなどを多用し映像化することで、いかに直感的に理解できるようにすることが重要となる。

しかし、そうやってつくった仮編集ビデオを試写してみると、次々と登場する研究成果には感心させられるものの、同時に「それがどうした」みたいな気持ちになってしまうところもあった。日頃、現場にいて感じる臨場感や研究のおもしろさが、なかなか伝わってこない。原因を考えると、難解な研究を理解させるという課題に関心が行きすぎ、その成果を生み出した研究者の思いや、それを可能にした状況など、背景を伝えないと研究にもなかなか共感できないことがわかった。そうした点に留意して再度編集に取り組んだ。

完成したビデオは30分の短いものだが、登場する研究者は若手が多く、結果として「理学部の空気」がしっかり伝わってくるものになったと考えている。機会があったらぜひ一度ご覧いただきたい。



<http://www.sci.nagoya-u.ac.jp/>

キャンパス通信

質の保証された学位プログラムの構築・展開のために

平成23年度からスタートした「博士課程教育リーディングプログラム」は、優秀な学生を俯瞰力と独創力を備え広く産学官にわたりグローバルに活躍するリーダーへと導くため、国内外の第一級の教員・学生を結集し、産・学・官の参画を得つつ、専門分野の枠を超えて博士課程前期・後期一貫した世界に通用する質の保証された学位プログラムを構築・展開する大学院教育の抜本的改革を支援し、最高学府に相応しい大学院の形成を推進する事業である。

名古屋大学からは6件が採択され、理学部関連のプログラムは3件に上る。

理学部関連の採択テーマ

「グリーン自然科学国際教育研究プログラム」★

プログラムコーディネーター:
物質科学国際研究センター教授 阿波賀邦夫
取り組み部局: 理学研究科、工学研究科、生命農学研究科

「PhDプロフェッショナル登龍門-フロンティア・アジアの地平に立つリーダーの養成-」☆

プログラムコーディネーター:
素粒子宇宙物理学専攻教授 杉山 直
取り組み部局: 全学

「フロンティア宇宙開拓リーダー養成プログラム-産学官連携と理工横断による次世代産業創出を目指して-」☆

プログラムコーディネーター:
太陽地球環境研究所教授 田島宏康
取り組み部局: 理学研究科、工学研究科

★平成23年度採択 ☆平成24年度採択



国際評価委員会によるパネルディスカッション(フロンティア宇宙開拓リーダー養成プログラム)