

研究会・学会スケジュール

K3, Enriques曲面とその関連について K3, Enriques Surfaces and Related Topics

開催日：2014年11月10日(月)～14日(金)
開催場所：名古屋大学理学南館坂田・平田ホール
主催：日本学術振興会科学研究費基盤(S)
「格子、保型形式とモジュライ空間の総合的研究」
問い合わせ：金銅誠之 多元数理科学研究科 教授
kondo@math.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2815

近藤孝男先生学士院賞受賞記念シンポジウム「生命の時をめぐって」

開催日：2014年11月22日(土)
開催場所：名古屋大学理学南館坂田・平田ホール
発起人：篠原久典 理学研究科 研究科長ほか6名
問い合わせ：近藤孝男 理学研究科 特任教授
052-789-2963 / http://clock.bio.nagoya-u.ac.jp/web/

流体方程式の構造と特異性に迫る数値解析・数値計算

開催日：2014年12月8日(月)・9日(火)
開催場所：名古屋大学理学南館セミナー室
主催：木村芳文 名古屋大学大学院多元数理科学研究科 教授
坂上貴之 京都大学大学院理学研究科 教授
問い合わせ：木村芳文 多元数理科学研究科 教授
kimura@math.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2819

先端の電子顕微鏡技術を用いた生物研究の最前線

Frontiers in biological research with advanced electron microscope technologies
開催日：2015年1月15日(木)・16日(金)
開催場所：名古屋大学ES総合館ESホール
主催：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：成田哲博 理学研究科 准教授
narita.akihiro@f.mbox.nagoya-u.ac.jp / 052-747-6473

日本天文学会春季年会

企画セッション「分子雲衝突と星形成」

開催日：2015年3月18日(水)～21日(土)
開催場所：大阪大学
主催：日本天文学会
問い合わせ：立原研悟 理学研究科 准教授
k.tachihara@aphys.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2839

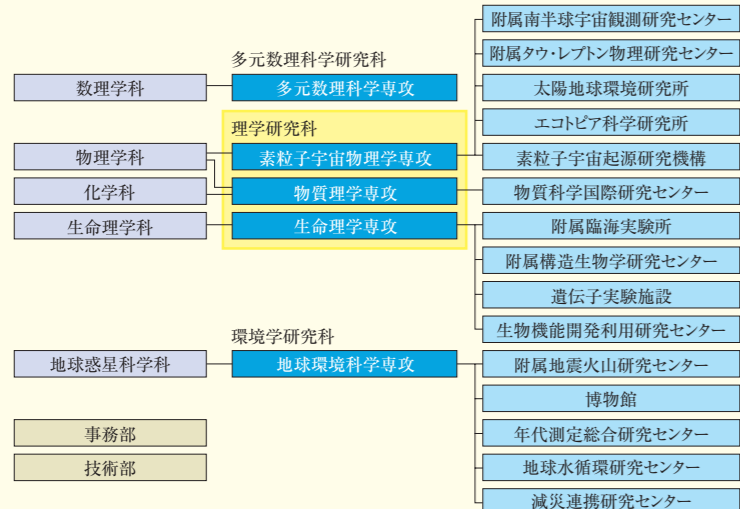
「星間水素」国際ワークショップ2015

International workshop on interstellar hydrogen 2015

開催日：2015年3月26日(木)～28日(土)
開催場所：名古屋市
主催：名古屋大学大学院理学研究科附属南半球宇宙観測研究センター、
日本学術振興会科学研究費基盤(S)
「星間物質の精査によるガンマ線超新星残骸の探究」
問い合わせ：福井康雄 附属南半球宇宙観測研究センター長
fukui@aphys.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2837

組織図

理学部・理学研究科・多元数理科学研究科・環境学研究科(地球環境科学専攻)



編集だより

今回の特集は、サイズを超えた物理法則である。佐藤先生には磁石や超伝導といった身近な物質と、広大な宇宙で見られる現象の間にある普遍的法則について、原田先生には物質を構成する最小単位である素粒子という極微世界の法則について、それぞれお話をいただいた。お二方にはさらにマクロとミクロの世界で成り立つ普遍性についてご説明いただき、記事でも、お互いの図にふれていただいた。あわせてお読みいただければ、物理法則の普遍性の奥深さを感じ取っていただけるのではないだろうか。理学懇話会是一般に公開されており、最近では高校生の参加が多い(今回は81名)。一般の方にもわかってもらえるように努めていただいたが、化学で学位を取った私でも本質まで理解できたとはいいがたかった。しかし、講演後に、活発に質問をする高校生をみると、面白さは十分に伝わったように思われた。機会があれば、ぜひ生の懇話会にもふれていただければと思う。(加藤祐樹)

表紙説明

クオーク、原子核、原子、分子、細胞、生物、地球、太陽系、星雲、そして宇宙。自然界にはさまざまな階層が存在する。一方で極小の世界から極大の世界まで自然界は同じ法則によって支配されている。クオークから宇宙までサイズを超えて存在する物理法則の世界をのぞく。



理 philosophia

No.27
autumn-winter 2014
2014年10月30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)
加藤 淳(数理学科)
福井康雄(物理学科)※委員長
戸本 誠(物理学科)
加藤祐樹(物理学科)
萩原伸也(化学科)
杉山 伸(生命理学科)
花房 洋(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ご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2015年4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]

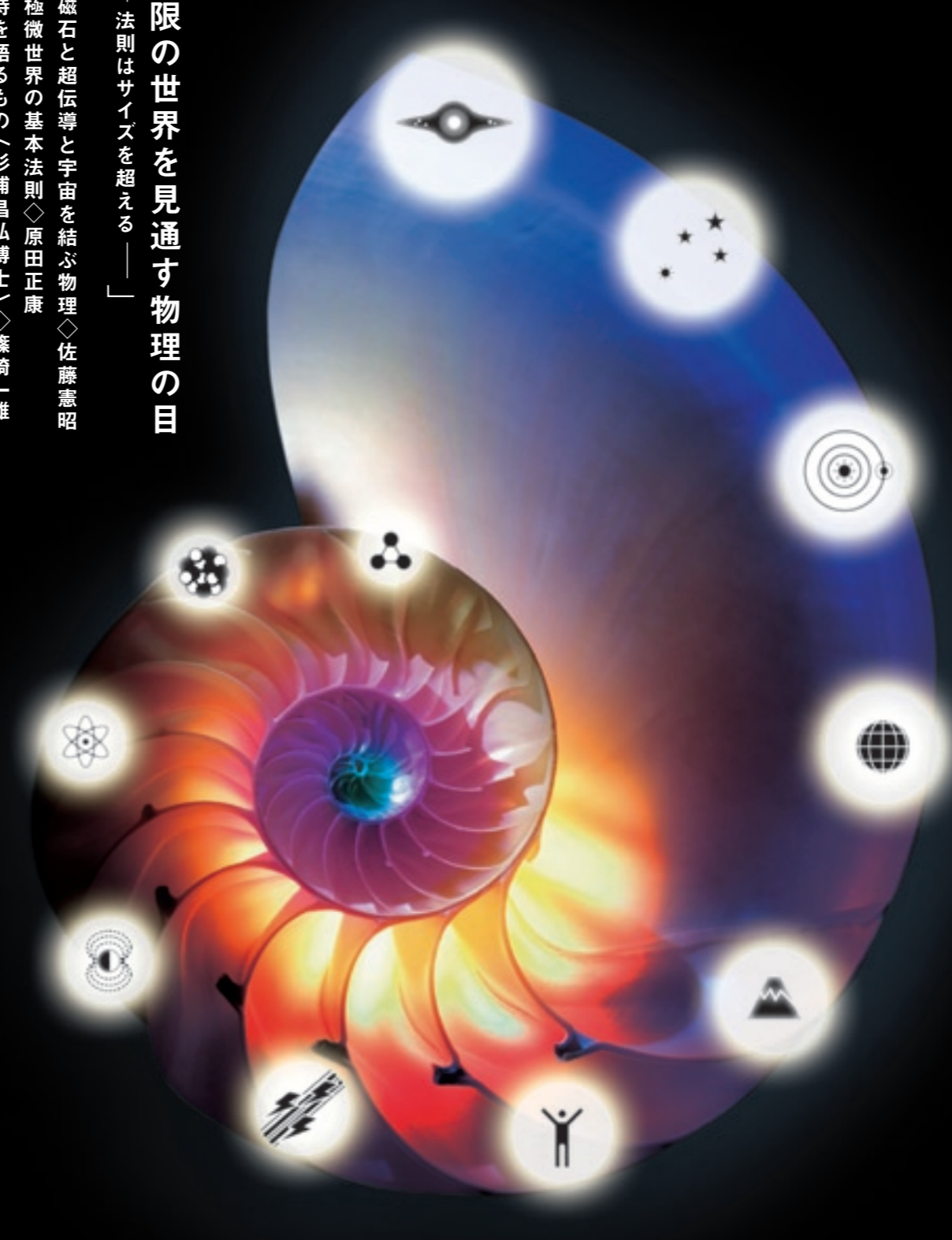
autumn-winter 2014

27

philosophia

「**特集**
極限の世界を見通す物理の目
——法則はサイズを超える——」

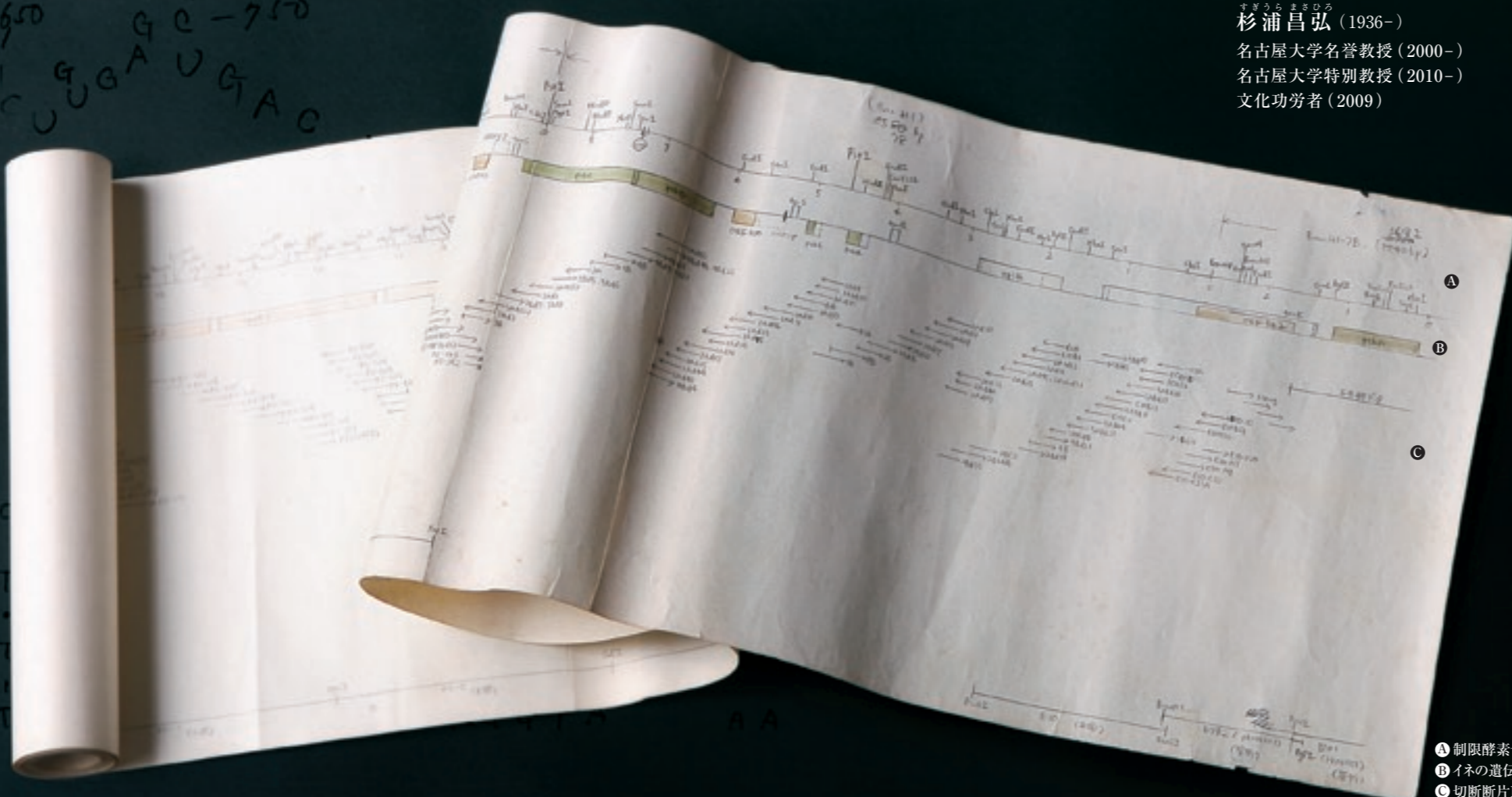
04 磁石と超伝導と宇宙を結ぶ物理 ◆佐藤憲昭
08 極微世界の基本法則 ◆原田正康
02 時を語るもの ◆杉浦昌弘博士 ◆篠崎一雄
03 理のエッセイ ◆竹内 誠
12 理の先端をいく ◆諸田智克 ◆松林嘉克 ◆白水徹也
18 理学部交差点



杉浦昌弘博士—— ゲノム解析研究の事始め



杉浦昌弘 (1936-)
名古屋大学名誉教授 (2000-)
名古屋大学特別教授 (2010-)
文化功労者 (2009)



● 制限酵素切断部位
● イネの遺伝子
● 切断断片DNA

高速シーケンサーを用いて多様な生物の遺伝情報を全体として理解するゲノム科学全盛の時代を迎えている。杉浦昌弘博士は1970年代後半に時代に先駆けてタバコ葉緑体ゲノムDNA解析に挑戦した偉大な先駆者である。1970年代に高等生物の遺伝子解析の技術が急速に進歩した。しかし、約16万塩基対のDNA解読は当時の技術では無謀ともいえる挑戦だった。1986年に発表したタバコ葉緑体の全ゲノム配列解析の成果は葉緑体研究を飛躍的に進めただけでなくゲノム解析から新規遺伝子の効率的な発見に道を開いた画期的な研究成果となった。一連

の研究は光合成研究や葉緑体の起源に関して大きなインパクトを与えた。

その後、杉浦博士は葉緑体の遺伝子発現に関して試験管内の再構成実験系を用いて詳細に解析を進めて新しい分子メカニズムを次々と明らかにした。「流行を追わずに独創性の高い研究を展開する。そしてその研究を極める」。生命科学の研究の進展は早く、ともすれば流行を追いがちな研究の風潮があるが、博士の独自の成果はこのような信念に基づいて生まれてきたのだと改めて感じている。(篠崎一雄 理化学研究所環境資源科学研究センター長)

◇写真の説明

写真はイネの葉緑体ゲノムの制限酵素切断地図。大きなゲノムDNAを、制限酵素で切断した小さなDNA断片にし、システムティックに配列を決定していった。タバコでは10年(1976-1986)かかったゲノム配列の決定が、このような手法をとることで、イネでは2年(1986-1988)で配列を決定できた。A4レポート用紙を貼り合わせた切断地図は3.8mにおよぶ。左上は杉浦博士自身が設計したゲル電気泳動装置に、DNA断片試料をセットしている様子。当時はこうした装置を並べ、今では考えられないような時間をかけ、ゲノム配列を読み解いていった。

自然に学ぶ

竹内 誠 地球環境科学専攻教授



Illustration: Ayako Taniyama

自然に学ぶ。この言葉は、地球科学科初代教授であり、私の研究室の初代教授である故松澤勲先生が愛した言葉である。そして研究室の歴代教授たちもこの言葉を愛し、教育と研究の指針としてきた。自然科学に携わる者の多くが、さまざまな自然現象と遭遇し、それを解明し、そして私たちは自然について学んでいくのである。古典的な地質学(あえて古典的とよぼう)は山や川岸、海岸などに露出している地層や岩石を観察することから研究が始まる。数千万年、数億年とかけて形成された地層や岩石には当時の地球の環境や地殻変動などのさまざまな情報が記録されている。地質学者はその情報を取り出して、地球の営みを解明していくのである。まさに自然界に分け入り、自然と向きあい、そして自然から学ぶのである。

最近では古典的な地質学による研究はめっきり減ってしまった。岩石試料(自分で採取してきたのならまだいいが、他人から譲り受けた試料の場合もある)を高価な分析機器で分析し、データを出すことで満足し、自然を理解した気になってしまう。しかし、その岩石試料は自然界でどのように存在していたのだろうか。その岩石試料の自然界での産状を確認せずには、その岩石の成り立ちを正確には理解できないのである。先の東日本大震災で被った大規模な津波被害を想定外といったが、そのような大規模な津波が過去に仙台平野を襲い、仙台平野の地層の中に津波堆積物として証拠を残していたのに、私たちはそれを重要視しなかったのである。私たちが野外観察を軽視したために、自然から学ぶことができなかったのである。野外観察から始まる地質学は古典的ではなく、地球科学の基本あるいは土台となる重要なものとして存在しなければならない。そして、より高度な分析・測定などを通して、さらに新しい事実を解明していくのである。これが自然に学ぶ姿勢ではないだろうか。

Makoto Takeuchi

1961年生まれ。1988年名古屋大学大学院理学研究科地球科学専攻博士後期課程中途退学。同年通商産業省工業技術院地質調査所研究員。1995年名古屋大学理学部地球惑星科学科助手。同大学院理学研究科助教等を経て、2012年より現職。博士(理学)。専門は地質学。

すべての物質世界は物理法則によって語られる。

物質の質量を生み出すメカニズムを検証するため、高温・高密度での陽子・中性子の性質の研究が進められている。

極限天体とよばれる超高密度の天体内部では、リニアモーターカーにも利用されている極低温で発現する超伝導と質的に同じ現象が起きていると考えられている。

わたしたちが暮らす世界とは無縁に見える極限の世界にも実は基本となる共通の物理法則が存在する。

極限の世界を支配する物理法則を2人の研究者が読み解く。

(2014年6月7日、第23回理学懇話会より)

磁石と超伝導と宇宙を結ぶ物理

佐藤 憲昭 物質理学専攻教授

物理法則の見えざる手

超伝導や磁石といった身近な物質に見られる物理現象と、宇宙や素粒子という広大極微の世界で見られる現象の間には、ある種の普遍性が存在します。今日は、身近な例を通して物理の基礎概念である、相転移における「自発的対称性の破れ」を学んでいただき、その成果が南部陽一郎*1博士の素粒子理論や宇宙の研究にも利用されていることを理解してもらい、物理がいかにか面白く奥深いものか、ということを感じていただきたいと思います。

最初に、万有引力の話から始めます。リングは手から離れると地上に落下しますが、月は地球のまわりをぐるぐるまわり続けています。一見異なって見える現象も、17世紀が生んだ天才ニュートン*2の目から見れば同じ現象です。違いは何かといわれたら、初期条件である初期速度だけです。その違いですべての運命が決まってしまう。

同じようなことは、電磁気的な現象にも現れます。1820年、エールステッド*3は、大学の講義でボルタの電池を使って実験していたとき、たまたま電線の近くに置いてあった方位磁石が北でない方角を指すことに気づき、電流が磁場をつくることを発見しました。

エールステッドの発見を原子に適用してみましょう。磁石を分割していくと、何回、分割



Noriaki Sato

1955年生まれ。1984年東北大学大学院理学研究科博士課程修了。理学博士。名古屋大学教養部助手、東北大学理学部助手、マックスプランク固体化学物理研究所客員研究員、名古屋大学大学院理学研究科助教授を経て、2007年より現職。専門は物性物理学。100年、200年後の中学校の教科書に載るような研究をするのが目標。

をくり返してもN極とS極が両端に生じます。これは「1個の原子が磁石の性質を帯びている」ことを意味します。古典的なモデルで原子を眺めると、中央に原子核があり、そのまわりを電子がぐるぐるまわっています。この電子の周回運動は電流をつくり、原子の周囲に磁場をつくり出します。正確には「スピン」を考える必要がありますが、ここでは省略

します。磁石とは何かというと「まわりに磁場を生み出すもの」ですから、「1個の原子は磁石の性質をもっている」ことがわかります。これを私たちは「原子磁石」とよんでいます。エールステッドが発見した「電流が流れると磁場ができる」というマクロの世界の現象がミクロの世界でも成り立っていることが理解できます。これも物理法則の普遍性の1つです。

相転移から見てくる世界

次に、相転移とは何かということを考えてみます。

水が水蒸気になったり氷になったりすることを、私たちは相転移とよんでいます。物理学的に同じことが宇宙でも起こったと信じられています。今から138億年前に始まった宇宙は、その後、どんどん冷えていったと考えられていて、途中で何回か相転移が起きたといわれています。

銅でできた容器の中に液体窒素を入れます(図1)。すると底の部分に「水滴らしきもの」ができます。これに線香を近づけると線香は燃え上がります。何が起きたのかというと、空気中の酸素が液体になったわけです。気体酸素が冷えることによって相転移を起こし、液体酸素になりました。純粋な液体酸素を試験管に集めると、水色をしていることがわかります。温度をもっと下げると、液体酸素は、水が氷になるのと同じように、固体酸素になります。

次に磁石について考えてみましょう。私立中学校の入学試験に「磁石は鉄の釘を吸いつけるが温度を上げたらどうなるか」という問題が出たことがあるそうです。その答えは、「磁石の性質が消える」です(図2a)。これが磁石の相転移で、その境目の温度、相転移温度はキュリー温度とよばれています。

磁石は原子磁石の集合体です。ミクロな実験を行うと、原子磁石はキュリー温度より低温では同じ方向を向いています(図2b)、高温になるとでんではばらばらな方向を向くことがわかります。

超伝導は、いまから約100年前、オンネス*4



図1 気体酸素の液化

薄い銅製の容器の中に液体窒素が入れると、容器の壁と接触した空気中の気体酸素は冷やされ、容器の底に液体酸素が生成される(左図)。これに線香を近づけると、激しく燃え上がる(中図)。純粋な液体酸素は水色をしており、磁石に引き寄せられる性質をもつ(右図)。

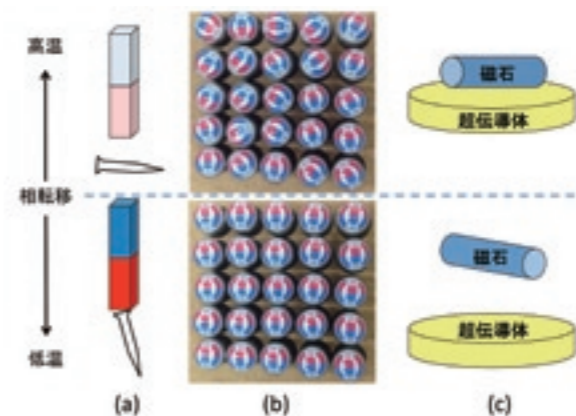


図2 相転移の模式図

(a) 磁石は相転移温度(キュリー温度)より低温では鉄釘を引きつけるが、キュリー温度より高温に温められると、その性質を失う。(b) キュリー温度より低温では、すべての方位磁石(原子磁石)が同じ方向を向いている。キュリー温度より高温においては、方位磁石(原子磁石)は勝手な方向を向く。(c) 超伝導体は、相転移温度以下の低温で、磁石と反発し、磁気浮上現象を示す。

によって発見されました。水銀の温度を下げたところ、有限の抵抗値をもつ「常伝導状態」から、ゼロ抵抗の「超伝導状態」へ相転移が起こったのです。面白いことに、超伝導体は磁石と反発し、リニアモーターカーのように、磁気浮上をひき起こします(図2c)。

超伝導という現象は宇宙にも存在すると考えられています。太陽よりもっと重い恒星は、将来、中性子星に変わります。中性子星は富士山を角砂糖1個分に凝縮したぐらいの高密度状態にある天体です。先ほどの超伝導は電荷を帯びた電子が何の抵抗もなしに空間を飛びまわる現象でしたが、中性子星の内部では、電荷を帯びていない「中性子」が抵抗なしに動きまわっている「超流動」が起こっていると考えられています。

対称性と相転移の関係

相転移を理解するために大切な概念が対称性です。まず、回転対称性について考えてみましょう。

「何度回転するともとの図形と重なるか」と考えると、矢印の場合は360度しかありませんが、正三角形であれば120度、240度、360度の回転で、もとの図形と重なることがわかります(図3)。正多角形の頂点の数をどんどん増やしていくと、最終的に円になります。円の場合、回転角が何度でももとの図形と重なります。群論という数学の言葉を使いますと、円は「連続的な回転対称性をもつ」といいます。言い方を変えれば、矢印や正多角形は「特別の方向をもっている」けれども、円は「特別の方向をもたない」ともいえます。

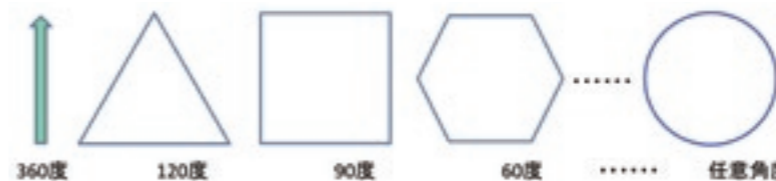


図3 回転対称性

左端の矢印は特別の方向をもち、360度の回転によりもどに戻る。正三角形に対し120度の整数倍の回転操作を施すともとの図形と重なる(区別がつかない)。同様に考えると、正方形では90度の整数倍、正六角形に対しては60度の整数倍の回転操作に対し不変である(もとも変わらない)。一方、右端の円に対しては、いかなる回転に対してももとの図形と重なる。このとき、「円は連続的対称性をもつ」という。

*1 南部陽一郎(1921-) 理論物理学者。小林誠、益川敏英とともにノーベル物理学賞(2008年)を受賞。

*2 I.ニュートン(1642-1727) イギリスの哲学者、自然哲学者、数学者、神学者。ニュートン力学を確立。

*3 H.C.エールステッド(1777-1851) デンマークの物理学者、化学者。

*4 H.K.オンネス(1853-1926) オランダの物理学者。ノーベル物理学賞(1913年)を受賞。

次は、並進対称性です。

水が入った大きな容器を想像してください。容器は非常に大きいので、「容器に端がある」と認識できません。ですから、容器をほんのわずかな距離だけずらしても、ずらしたことに誰も気がつかないはず。このとき、水などの液体は「連続的な並進対称性をもつ」と表現されます。これに対し水や固体酸素などの「結晶格子」はどうかというと、格子の間隔だけ動かすともとに重なりますが、勝手な距離を動かしただけでは重なりません。つまり、結晶格子は「連続的な並進対称性をもたない」ということになります。

それでは、対称性と相転移の関係を考えていきます。液体は連続的な並進対称性を持ち、固体結晶はそれをもちません(図4)。従って、液体から固体結晶に相転移するとき、連続的な並進対称性が「自発的」に消失します。自発的という言葉の意味は、「温度を下げるだけで他には何もしない」ということです。

磁石における相転移では、連続的回転対称性が消失します。なぜなら、キュリー温度より高温ではすべての原子磁石の方向がばらばらになっていて、特別な方向がないのに対し、低温では1つ1つの原子磁石の方向はすべて揃っていて、特別な方向があるからです。

超伝導体を磁石に関連付けて考えてみましょう。高温の常伝導の状態は、原子磁石がばらばらな方向を向いていることに対応し、「位相角 θ 」はばらばらな値をとっています。これに対し、低温の超伝導状態は、原子磁石の位相角 θ の値がただ1つに固定された状態に対応付けられます。これを私たち物理学者は「超伝導になるとゲージ対称性が自発的に破れる」と表現します。

$F=E-TS$ (F は自由エネルギー、 E は内部エネルギー、 T は絶対温度、 S はエントロピー) という式があります。これは宇宙を支配する非常に大事な式で、自由エネルギーの小さな状態が実現することを表します。ボルツマンのお墓に刻まれた式を使いますと、規則正しい状態はエントロピーが0で、乱雑な状態は大きな

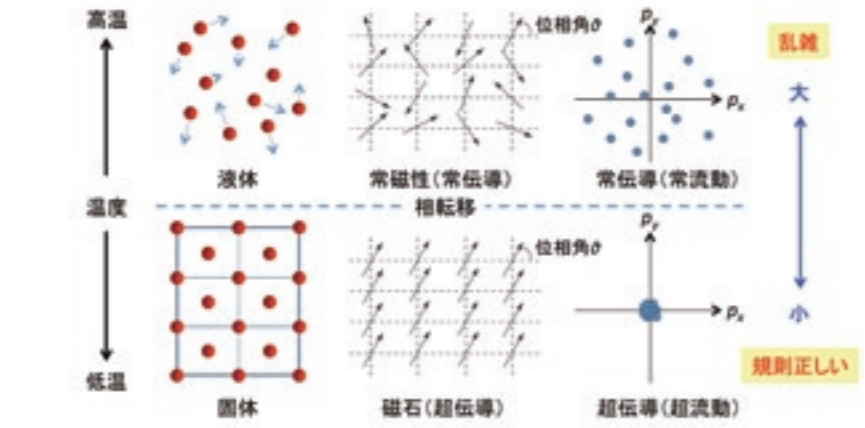


図4 対称性の破れ

液体⇄固体、磁石、超伝導、超流動における相転移温度の上下における状態が示されている。液体では原子・分子は勝手な方向に運動しているが、固体では規則正しく整列している。高温の磁石では、原子磁石は勝手な方向を向いており、位相角 θ はてんでばらばらな値をとる。キュリー温度より低温では、原子磁石は皆同じ向きをもち、位相角 θ は1つの値に固定される。常流動における原子・分子の運動量(図中の p_x や p_y)は勝手な値をもつが、超流動(超伝導)においてはすべての原子・分子(クーバー対)が同じ運動量(上図では $p_x=p_y=0$)に凝縮する。

エントロピーをもちます。詳しい計算をしますと、規則正しい状態は乱雑な状態より小さな内部エネルギーをもつことがわかります。結局、温度が低いときは、規則正しい状態が小さな自由エネルギーをもつため、その状態が実現します。一方、高温では、乱雑な状態の方が、大きなエントロピーのため、小さな自由エネルギーをもつことになり、その結果、その状態が実現します。これが相転移のメカニズムです。

そこで何が起きているのか

では相転移が生じると何が起きるでしょうか。固体に転移すると、液体のときにもっていた連続的な対称性がなくなるわけですが、このとき「格子の波」(音波)が生じます。この「格子の波」を私たちは南部先生の名前をとって南部・ゴールドストーン励起とよんでいます。波や相転移という言葉を知っていても、それらを互いに結びつけて考えたことはないと思います。物理学者は、ここでもまた、互いに関係のように思える現象の間に本質的なつながりがあることに気づいたわけです。

磁石の場合にも、相転移に伴って連続的な対称性が失われると、「スピンの波」が現れます。この「スピンの波」もまた南部・ゴールドストーン励起です。

超伝導の相転移ではさらに不思議なこと

が起こります。現代物理学では光はフォトンという粒子と見なされ、このフォトンの質量は真空中でゼロです。しかし、ゲージ対称性の破れた状態である超伝導体の中に入ると途端に有限の質量をもつようになります。このため、超伝導体の奥深くには侵入できません。これをマイスナー効果とよびます。

この質量の発現機構はアンダーソン*5・ヒッグス*6機構とよばれます。面白いことに、アンダーソン・ヒッグス機構というアイデアの形成に影響を与えた南部理論の発端は超伝導でした。ここでも奥深い物理学の世界を垣間見ることができます。

極限天体を手でつくる

最後に私たちの研究室の最近の成果について紹介いたします。

氷や固体酸素などの結晶は、正方形や正六角形などと同じ回転対称性をもっています。一方、わずか30年ほど前までは、正五角形と同じ回転対称性をもつ固体は存在しないと思われていました。ところが、1984年、シェヒトマン*7らは5回(10回)対称性をもつ物質が存在することを発見しました(この発見により、シェヒトマン氏は2011年のノーベル化学賞を受賞)。のちに「準結晶」と名づけられるこの奇妙な固体は、数学や芸術を巻き込むような

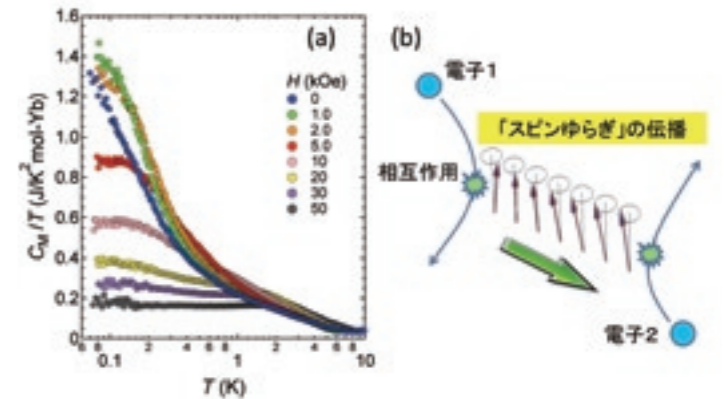


図5 準結晶(Au-Al-Yb)と磁性超伝導体

(a) 縦軸には電子の有効質量に対応する物理量、横軸には温度が対数目盛でプロットされている。試料を超低温に冷やすと(最低温度は約0.08ケルビン)、電子の有効質量が絶対零度に向かって発散的に増大する。(b) 「電子1」から磁気的な相互作用により生み出された「原子磁石(スピン)のゆらぎ」が磁石中を大きな矢印方向に伝播する。このゆらぎと相互作用した「電子2」は進行方向を変え、結果的に、電子1と2の間に引力が生じ、クーバー対が形成される。

話と深く関係していることがわかってきました。

1年半ほど前、私たちは、ある種の準結晶の中を動きまわる電子の質量(正確には「有効質量」)を測定しました。その結果、絶対零度の極限で質量が無限に大きくなることを発見しました(図5a)。質量が無限に大きくなると電子は動けなくなります。この絶対零度の世界は「量子臨界点」とよばれ、「量子臨界点はブラックホールと等価である」と考える理論家もいます。もしこれが正しければ、私たちは掌に乗っている物質の中にブラックホールを作り出せることになります。これも物性物理学の面白さの1つです。

もう1つの私たちの成果は、「超伝導になる磁石」(磁性超伝導体とよばれる)に関するも

のです。いままでの物理学者の常識では、同じ物質が超伝導体にもなって磁石にもなることはあり得ないと考えられていました。ところが、2000年に、磁石にも超伝導体にもなる物質が英仏のグループによって発見されました。そこで私たちは、超伝導発現機構の解明に乗り出しました。その結果、「スピンの波」(正確には「スピンのゆらぎ」)が超伝導引力を媒介することを2年ほど前に見つけ出しました(図5b)。

これは1949年にノーベル賞を受賞した湯川秀樹*8博士の核力に関する理論と関係付けられます。湯川先生は「核子と核子は中間子をキャッチボールすることで生じる引力によって結びついている」ということを理論的に証明されたわけですが、私たちは「2つの

電子はスピンのゆらぎをキャッチボールすることで生じる引力によって結びつけられる」ことを実験的に証明したのです。ここにも、素粒子物理と物性物理の間の類似性を見取ることができます。

最後に、磁性超伝導体の相図をみてみましょう(図6)。この相図は、原田先生の講演で説明するクォーク・グルーオン多体型の相図(本号P.8 図1)と非常によく似ています。これが単なる偶然なのか必然なのか、答えはまだわかりません。もし必然であれば、極限天体を私たちは自在に実験室でつくれることになります。若い方にはその答えをみつめてくださることを期待しています。物理は皆さんの挑戦を待っています。

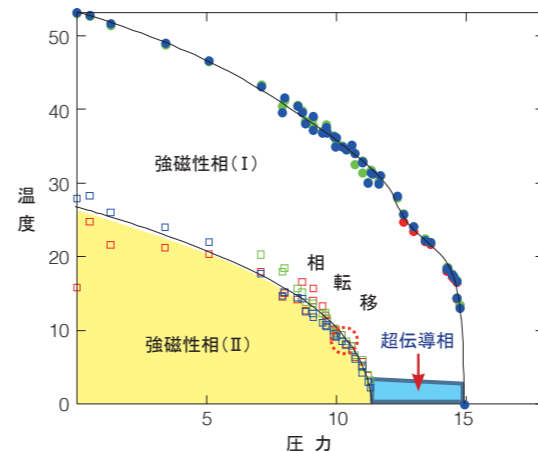


図6 強磁性超伝導体の相図

普通の強磁性体(磁石)と異なり、2つの強磁性相IとII(いずれも自発的に対称性が破れた状態)がある。電子の対(クーバー対)が凝縮した超伝導は、クォークの対が凝縮したカラー超伝導(本号P.8図1の青色の領域)に対応する。また、黄色の強磁性相は、クォーク・グルーオン相図中のハドロン相(同図の黄色の領域)に対応づけられる。

- *5 P.W.アンダーソン(1923-) アメリカの理論物理学者。ノーベル物理学賞(1977年)を受賞。
- *6 P.W.ヒッグス(1929-) イギリスの理論物理学者。ノーベル物理学賞(2013年)を受賞。
- *7 D.シェヒトマン(1941-) イスラエルの結晶物理学者。ノーベル化学賞(2011年)を受賞。
- *8 湯川秀樹(1907-1981) 理論物理学者。ノーベル物理学賞(1949)を受賞。



Masayasu Harada

1964年愛知県生まれ。1988年名古屋大学理学部卒業。1993年同大学院理学研究科物理学専攻修了。博士(理学)。シラキュース大学物理学科研究員等を経て、1998年名古屋大学大学院理学研究科助手、2002年同助教授。2005年より現職。専門はハドロン物理学。カイラル対称性の自発的破れと質量の起源、高温度・高密度状態でのハドロンの性質変化など物理現象解明を目指して理論的解析を中心に研究を進めている。

極微世界の基本法則

原田正康 素粒子宇宙物理学専攻教授

物質を構成するもの

今日は「極微世界の基本法則」というタイトルでお話をさせていただきます。

佐藤先生の講演の最後で、強磁性超伝導体の相図(本号P.7 図6)とクォーク・グルオン多体型の相図(図1)の類似性が指摘されました。私の講演では、このクォーク・グルオン多体型の相図が何なのか、そして、佐藤先生のお話がなぜこの相図につながるのかについてもお話ししたいと思います。

この相図の説明に入る前に、物質の基本要素の歴史を説明します。そのためにまず、20世紀の最初の頃までさかのぼってみましょう。1911年にラザフォード^{*1}の研究により、原子の中心に原子核があって、そのまわりに電子があるということが示されました。原子

の大きさは 10^8 cm、1億分の1cmです。原子核の大きさは 10^{12} cmで、原子と比べると1万分の1程度です。

ここで原子の重さについて考えてみます。電子の質量はほとんど無視できるぐらい

小さいので、原子の質量は、原子核の質量とほとんど同じです。そこで、原子核だけを取り出して、角砂糖1個の大きさにすると大体1億トンになります。そのぐらい、原子核は非常に密度が高い状態であるということ

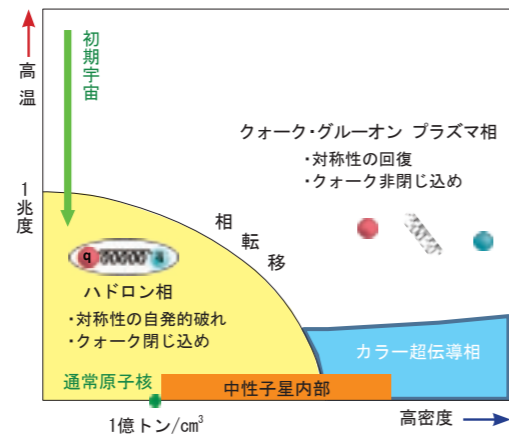


図1 クォーク・グルオン多体型の相図(理論的予想) 通常の我々の世界は「ハドロン相」とよばれ、対称性の破れが自発的に起こっていて、クォークはハドロンの中に閉じ込められている。高温度・高密度では、クォークがハドロンの中から飛び出し、「クォーク・グルオン プラズマ相」が実現されていると考えられている。ここでは、対称性の回復が起きていると期待されている。一方、中性子星内部で実現されている可能性がある高密度状態では、飛び出してきたクォークがクーパー対をつくる「カラー超伝導相」が実現されているとの予想がある。

を頭の片隅に留めておいてください。

現在では原子核は陽子と中性子から成り立っていることがわかっています。原子は原子核と電子から成り立っています。原子核は正の電荷、電子は負の電荷をもって、電気的にくっついています。それでは、正の電荷をもつ陽子と電荷をもたない中性子はどのようにくっついているのでしょうか。ここで登場するのが強い力^{*2}です。

1935年、湯川秀樹^{*3}博士は、陽子と中性子の間でパイ中間子をキャッチボールすることによって核力^{*4}が働くという機構を導入しました。そして、1947年にパウエル^{*5}がパイ中間子を発見し、パイ中間子をキャッチボールする核力が確立しました。しかし、同じ1947年には、陽子・中性子、パイ中間子の仲間の粒子が次々と発見され、これらが最も基本的な粒子とは考えられなくなってきました。

1964年、ゲルマン^{*6}によってクォーク模型^{*7}が提唱されました。当時、導入されたのは、アップクォーク、ダウンクォーク、ストレンジクォークで、これらのクォークを組み合わせると、発見されたハドロン^{*8}がすべてできる模型でした。現在は、ゲルマンの3個のクォークに加えて、チャームクォーク、ボトムクォーク、トップクォークの合計6種類のクォークが発見されています。クォークは6種類あるという予言をされたのが、1973年の論文でノーベ

ル賞を受賞された小林誠^{*9}博士と益川敏英^{*10}博士です。

質量の起源

次に質量の起源についてお話をします。まず、ものをバラバラにして重さを比べることから始めてみましょう。岩があって、その岩をバラバラに砕きます。バラバラに砕く前と後では重さは同じです。もっと細かい原子、さらに陽子、中性子まで細かくしてももとの岩とほとんど同じ重さです。

もっと細かくしてみましょう。陽子、中性子はクォーク3個からできているので、そこまで細かくしてみましょう。実はクォークはまだ単体ではみつからないので、理論的にバラバラにして重さを計ってみると、図2に示すように、陽子・中性子が 1700×10^{-27} g程度であるのに対し、クォーク3個を集めた重さは、大雑把に 60×10^{-27} gぐらいで、中性子1個の重さにはまったく足りません。すなわち、クォーク3個をくっつける部分に重さを生むメカニズムがあることとなります。

このクォークをくっつけているのが、カラー力とよばれる強い引力です。この強い引力によって、クォークと反クォークはペアをつくり、真空中を埋め尽くしています。そこをクォークが通り抜けようとする邪魔され、動きにくくなります。つまりクォークが重くなる、ということです。

我々の質量はどこから来たのか

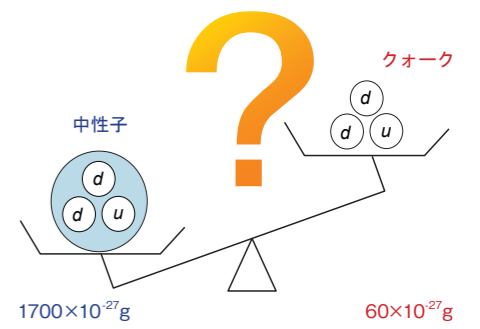


図2 中性子の質量とクォーク3個の質量の比較 中性子の質量は大体 1700×10^{-27} グラムあるが、クォーク3個を合わせた質量は大雑把に 60×10^{-27} グラムぐらいて、中性子1個の重さにはまったく足りない。

*1 E.ラザフォード(1871-1937) ニュージーランドの物理学者、化学者。ノーベル化学賞(1908)を受賞。

*2 強い力 自然界に存在する4つの基本的力のうちのひとつ。重力・弱い力・電磁力に比べて強い力であるが、その影響範囲は大体原子核の大きさ(10^{14} m)程度である。

*3 湯川秀樹(1907-1981) 理論物理学者。ノーベル物理学賞(1949)を受賞。

*4 核力 原子核の中で陽子・中性子を結びつけている力。強い力により生成される。

*5 C.パウエル(1903-1969) イギリスの物理学者。ノーベル物理学賞(1950)を受賞。

*6 M.ゲルマン(1929-) アメリカの物理学者。ノーベル物理学賞(1969)を受賞

*7 クォーク模型 1964年にゲルマンによって提唱された模型。クォークをハドロンの構成要素とし、陽子・中性子等のバリオンがクォーク3個、パイ中間子がクォークと反クォークからできているとした。

*8 ハドロン 強い力の影響を受ける粒子の総称で、バリオンとメソン(中間子)の2つに大別される。

*9 小林誠(1944-) 理論物理学者。名古屋大学特別教授。ノーベル物理学賞(2008年)を受賞。(本誌17号P.2参照)

*10 益川敏英(1940-) 理論物理学者。名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構長・特別教授。ノーベル物理学賞(2008年)を受賞。(本誌16号P.2参照)



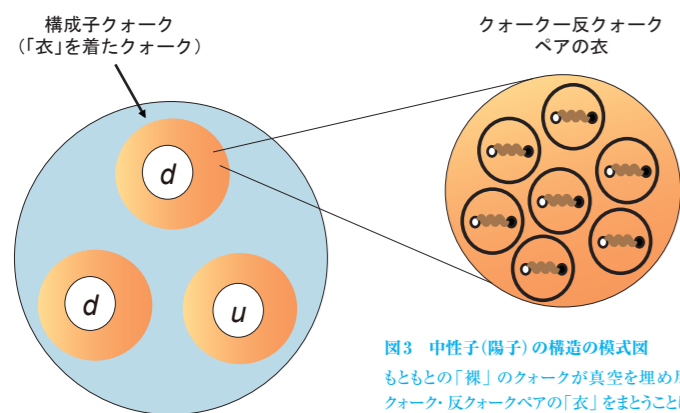


図3 中性子(陽子)の構造の模式図
もともとの「裸」のクォークが真空を埋め尽くしているクォーク-反クォークペアの「衣」をまとうことにより質量を獲得し、「構成子クォーク」となる。その構成子クォークが3個集まって中性子(陽子)をつくると考えられている。

少し見方を変えると、図3に示すように、クォークは、真空中を埋めつくしているクォーク-反クォークペアの衣を着ていると考えられます。その衣をまとったクォークのことを「構成子クォーク」といい、その質量はだいたい 500×10^{-27} gで、陽子、中性子の重さのだいたい3分の1です。このように、陽子、中性子は構成子クォークが3個集まっていると考えられています。

この考え方では、質量の起源の基本は、真空を埋め尽くすクォーク-反クォークペアということになります。このクォーク-反クォークペアは、南部陽一郎^{*11}博士が提唱された対称性の自発的破れを引き起こします。この

対称性の自発的破れとともに現れる、真空を埋め尽くすクォーク-反クォークペアが質量の起源ということですが、これをどのように確かめたいのでしょうか。

佐藤先生の講演にもあったように、「高温度・高密度」では「対称性がある」のですが、「低温度・低密度」になると対称性が自発的に破れています。対称性が破れた世界から、対称性がある世界に行くことを、「対称性が回復する」といいますが、対称性の破れた低温度・低密度の世界で起こっていることを確かめるために、対称性の回復した高温度・高密度の世界に行けば、何かわかるであろうと考えられます。

高温度・高密度の世界

温度や密度を変えると、状態の変化が起こります。水を例にして考えてみましょう。水は、1気圧では0℃より低いときは氷になります。0℃で水になり、100℃で蒸気になります。固体、液体、気体と移り変わることを相転移といいます。

これをハドロンの世界へもっていくとどうなるのでしょうか。実験的に確認されたわけはありませんが、多くの研究者が考えている相図が冒頭に出した図1で、強磁性超伝導体の相図との類似性が見られます。通常の世界はハドロン相にあって、強磁性超伝導体の強磁性相と同様に対称性の自発的破れが起きています。

ハドロン相から温度を上げていくと、宇宙初期に実現されていたと考えられている1兆℃程度で相転移が起き、ハドロンの中に閉じ込められていたクォークが、クォークを結びつけているグルーオンとともに飛び出していきます。この状態は、クォーク-グルーオンプラズマ相とよばれていて、自発的に破れていた対称性が回復していると考えられています。

次に、我々の世界より高密度の世界を考えてみます。ハドロン相では我々の原子核は大体1億トン/cm³ですが、中性子星内部で実現されている可能性がある10億トン/cm³程度の高密度状態では対称性の回復が期待されています。

それではハドロンの相構造の研究は、質量の起源の解明とどうつながるのでしょうか。相図で書いたように、高温度・高密度では、クォークが自由になり、それに伴ってクォーク-反クォークペアが溶けて、「衣」を着たクォークが軽くなると期待されています。その際に、クォークと反クォークからできているメソン等のハドロン自体の質量が軽くなっていくという期待もあります。

では、ハドロンの質量が高温度・高密度では減少するというのを、どのようにチェックすればいいのでしょうか。先ほどいったような1兆℃、1億トン/cm³という状態を、どのように実現すればいいのでしょうか。1つの方法として、密度が1億トン/cm³ある原子核内のメソンの性質を測定し、通常のメソンの性質と比較することが考えられます。高エネルギー加速器研究機構(KEK)で2001年、2006年、2007年に行われた実験では、原子核内のメソンの性質と通常のメソンの性質の違いが測定され、その違いの説明の1つとして原子核内のメソンの質量が数%軽いとするものがあります。それ以外にも違いを説明する仮説はいくつかあります。そこで、東海村のJ-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex: 大強度陽子加速器施設)で新しい実験が計画されていて、新しい情報が得られるものと期待しています。

今、高密度がおもしろい

ここまで高温度・高密度の世界についていろいろな角度から紹介をさせていただきました。今一番興味を持っているテーマについて紹介をします。

先ほどいきましたように中性子星の内部は高密度状態と関連しています。図1の相図と中性子星の内部構造がどのように関連しているかを簡単にみてみましょう。

中性子星は、進化した星が最後に爆発して縮んだ天体で、重力によって主に中性子が集まり、半径10km程度で太陽ぐらいの質量になっています。この中性子星の情報として重要なのは、その質量と半径の関係です。

強い力のみを考えて中性子ばかりを集めると、密度が高くなるとエネルギーが増えます。この関係をここでは核物質の「状態方程式」とよびます。この状態方程式をアインシュタイン方程式から出てくるTOV方程式(重力方程式)に代入して解くと、重力がグッと押し縮めようとする力と中性子が広がろうとする力の釣り合いから、中性子星の半径と質量は決まります。ですから、中性子星の質量と半径を決めるためには、核物質の状態方程式を知ることが重要です。

我々のまわりには中性子だけでできた物質はありません。たとえば皆さんの体をつくっている原子核は「陽子数と中性子数がほぼ同じ物質」で、状態方程式は実験から大体わかっています。すなわち陽子と中性子の数がほぼ同じ場合、密度を変えるとエネルギーは最初、減って行って、あるところから増えていきます。実在するのは一番エネルギーが低い状態で、それが我々の原子核です。

中性子だけの場合の状態方程式は、陽子数と中性子数がほぼ等しい場合の実験結果から理論的に求められていて、多くの提案があります。重要な点は、中性子星の質量には上限があって、ある質量より重い中性子星は実現できないことです。重力でつぶれようとするものをガスの圧力で支えているため、あまりに重くなるとガスの圧力では支えきれなくなり

ブラックホールになってしまいます。ですから、その上限より重い中性子星は存在しないといわれています。

実際、中性子星を観測してみると、みつがっているほとんどの中性子星の質量は、ほぼ太陽質量の1.4倍でした。そこで、太陽質量の1.4倍を超えたらブラックホールとする状態方程式もありました。

ところが、2010年に1つの中性子星の質量が精度よく求められ、太陽質量の2倍程度であることがわかりました。これまでに提案されていた状態方程式の多くでは、太陽質量の2倍になればブラックホールとなっていました。そこで、これまでの多くのモデルが排除されてしまいました。現在、多くの研究者が中性子星内部の状態を表すモデルをつくり直しています。

最後に、ここまでの話に関連した我々の最新の研究を1つご紹介します。先ほどお話ししたように、陽子・中性子の質量の起源の候補として、対称性の自発的破れがあるとしてきました。これに対して、我々の最新の研究では、陽子・中性子には対称性を破らない質量がある可能性があることがわかりました。すなわち、中性子の質量としては、対称性の自発的破れによる質量と、対称性を破らない質量があるということです。これによると、図4に示すように、これまでの密度とともに減少すると

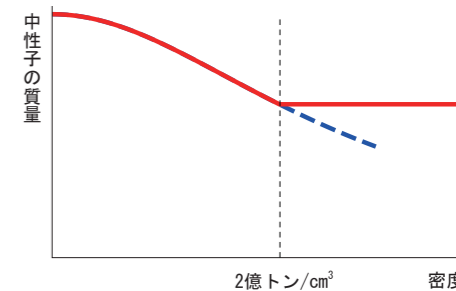


図4 中性子質量の密度変化
横軸が密度、縦軸が中性子質量を表す。これまでは、青色の点線で示すように、密度の増加に伴って中性子質量が単調減少すると考えられていた。赤色の実線で示す我々の最新結果では、標準原子核密度の2倍程度(1cm³あたり2億トン)で新たな相転移が起こり、新しい相では、密度が増加しても中性子質量が一定となり、変化しないことが示唆されている。

考えられていた中性子の質量が、通常の原子核密度より少し大きい密度のところから一定になります。その結果として、先ほどの密度とエネルギーの関係を表す状態方程式が変わり、重い中性子星を説明できるという研究もあります。ですから、最近、発見された重い中性子星や小さい中性子星は、我々の質量の一部は、対称性の破れ以外に質量の起源があることを意味しているのかもしれない。

これで私の話を終わりたいと思います。どうもありがとうございました。

*11 南部陽一郎(1921-) 理論物理学者。小林誠、益川敏英とともにノーベル物理学賞(2008年)を受賞。



月周回衛星「かぐや」がみた月の進化史

諸田 智克 地球環境科学専攻助教

月の形成・進化の描像と問題

月は分化天体の中で最も小型であるため急速に冷却が進み、地質活動は比較的早い段階で終了した。その結果、月の表面は形成初期の進化履歴をよく保存している。地球や金星では形成直後の情報がその後の地質活動によって消されてしまっており、月は地球型惑星の初期進化過程を理解するための数少ない情報源なのである。

1960～70年代のアポロ・ルナ計画で持ち帰られた岩石試料の分析により月の起源・進化に関わる理解は飛躍的に進んだ。現在最も支持される月形成モデルは、原始地球に火星サイズの天体が衝突し、飛び散った破片から月が形成されたとする巨大衝突仮説である。このモデルに従うと、月は完全に溶融した状態であるマグマオーシャン*から始まった

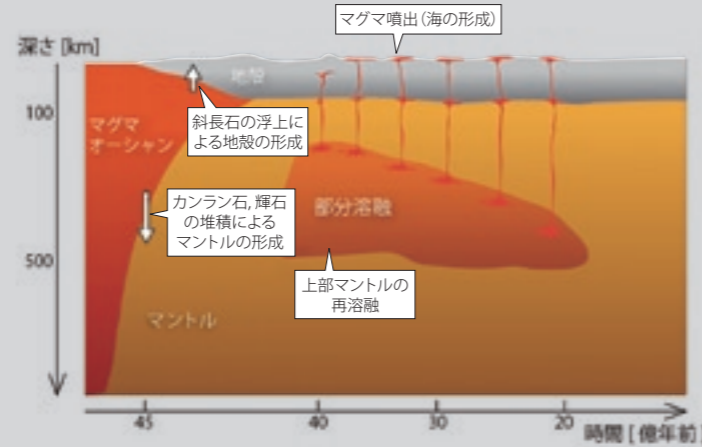


図1 月の進化史の描像
月は完全に溶融した状態から始まったと考えられる。マグマオーシャンが冷えて固まることによって、地殻とマントルに分化した。その後、上部マントルが再び溶融し、そこでつくられたマグマが表面に噴出して、月の海をつくった。

と考えられる(図1)。マグマオーシャンが冷えて固まることによって、相対的に軽い鉱物からなる地殻と重い鉱物からなるマントルに分化した。その後、おそらく放射性元素の壊変熱によって上部マントルが再び溶融し、そこでつくられたマグマが表面に噴出し、月の海をつくったと考えられる。

上記のような月の進化シナリオの実証と各事象の因果関係の解明をめざして、我々は年代学的観点から月の進化過程に関する研究を進めてきた。とくに我々が注目したのは、海を形成したマグマ活動の継続期間の問題である。マグマ噴出の量や時間履歴を理解することは、月の内部がどのように冷えていったか(月の進化)、さらには月が最初にどれだけ熱かったか(月の起源)、を理解する上で鍵となる情報である。またこの問題は、月がいつ死んだ天体になったのか、という素朴な疑問への回答ともいえる。これに答えるためには、マグマ噴出の痕である溶岩流の年代を決定する必要があった。

時を刻むクレータ

ではどうやって月表面にある溶岩流の年代を決定できるのだろうか。一般に、天体表面では、古い地域ほど多くのクレータが存在すると考えられる。このような簡単な原理に基づき、単位面積あたりのクレータ個数(クレータ数密度)から、その地域の年代を見積もる方法をクレータ年代学とよぶ。この手法で絶対年代を決めるためには、表層年代とクレータ数密度の関係を知っている必要がある。幸いに月ではアポロ・ルナ計画の岩石試

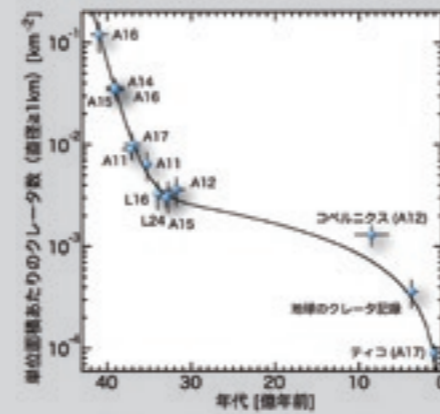


図2 クレータ数密度と表面年代との関係
アポロ・ルナの岩石試料の放射年代と岩石試料を採取した地域のクレータ数密度を関係づけることで得られた。この関係式を用いることで、岩石試料が得られていない地域でもクレータの個数を調べることで年代決定が可能となる。それぞれのプロットの記号のアルファベットはミッション名(A:アポロ、L:ルナ)、数字はミッション番号を表す。(G. Neukum & B.A. Ivanov, 1994, in Hazards Due to Comets and Asteroids, pp. 359, Univ. of Arizona Press)

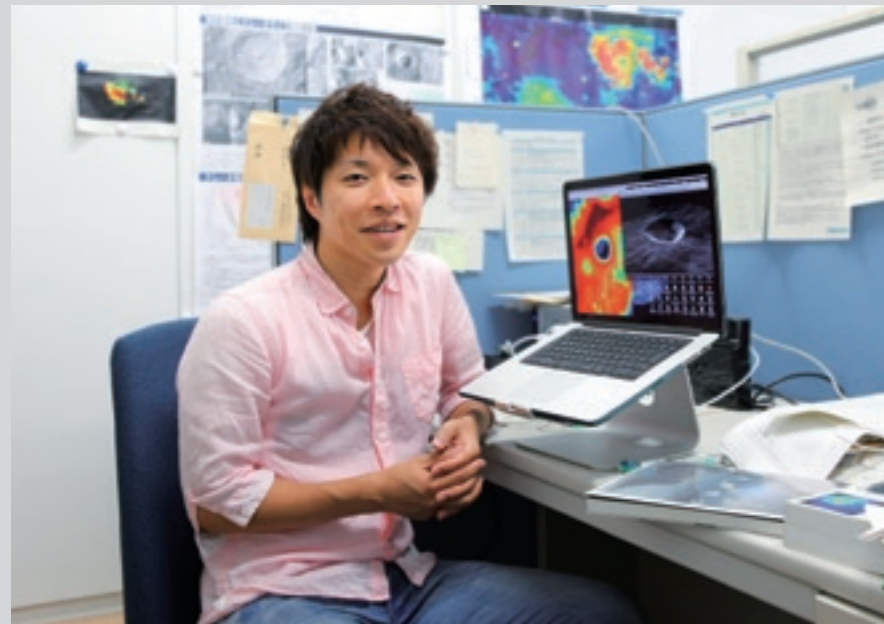
料があり、その放射年代と着陸地点のクレータ密度の関係づけができていた(図2)。この関係を用いることで、岩石試料が得られていない未探査地域でも、画像データからクレータの数密度を求め、絶対年代に変換することが可能なのである。

日本の月探査機「かぐや」は2007年9月に打ち上げられた。「かぐや」は2009年6月の制御落下による観測終了まで、14の科学機器により月の元素組成、地形、重力場、磁場な

どについての多角的な観測を行った。その最大の成果の1つは、月全球において高解像度画像データを取得したことである。我々はこの高解像度画像データを用いて微小クレータを数えることで、月全球の溶岩流の精密な年代決定に成功したのである。

月は15億年前に「死んだ」

その結果、月では全球的に25億年前まで、放射性元素の濃集地域である嵐の大洋・雨



Tomokatsu Morota

2003年金沢大学自然科学研究科物質科学専攻修了。博士(理学)。宇宙航空研究開発機構プロジェクト研究員、日本学術振興会特別研究員、国立天文台RISE月探査プロジェクト研究員を経て、2011年9月より現職。2004年より月周回衛星「かぐや」プロジェクト、2011年より小惑星探査「はやぶさ2」プロジェクトに参加。専門は惑星科学。

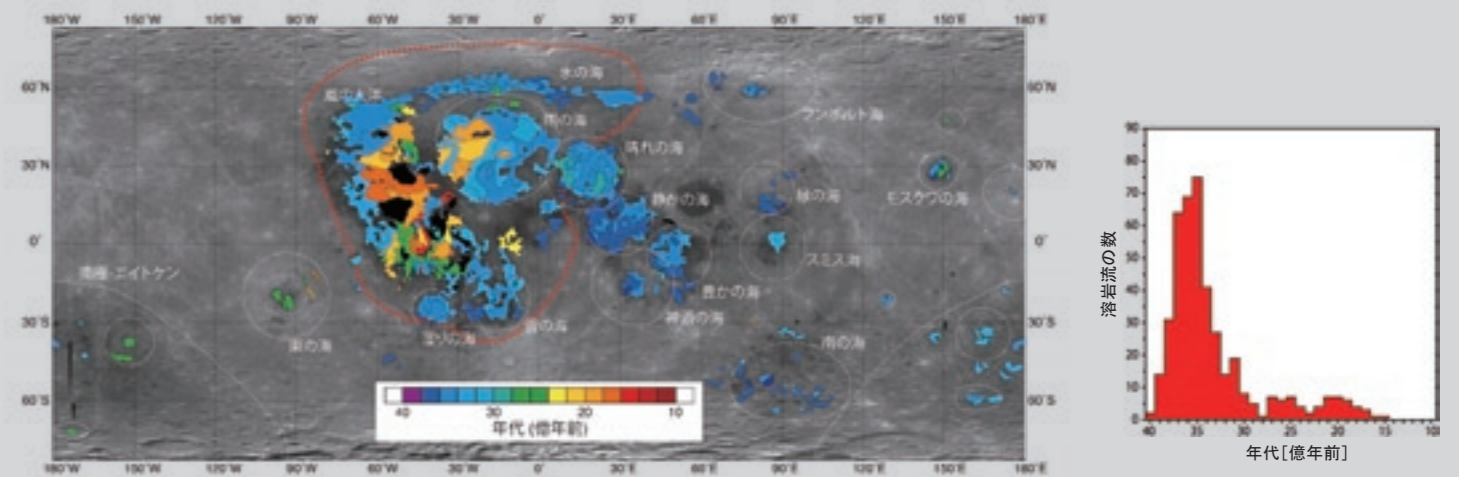
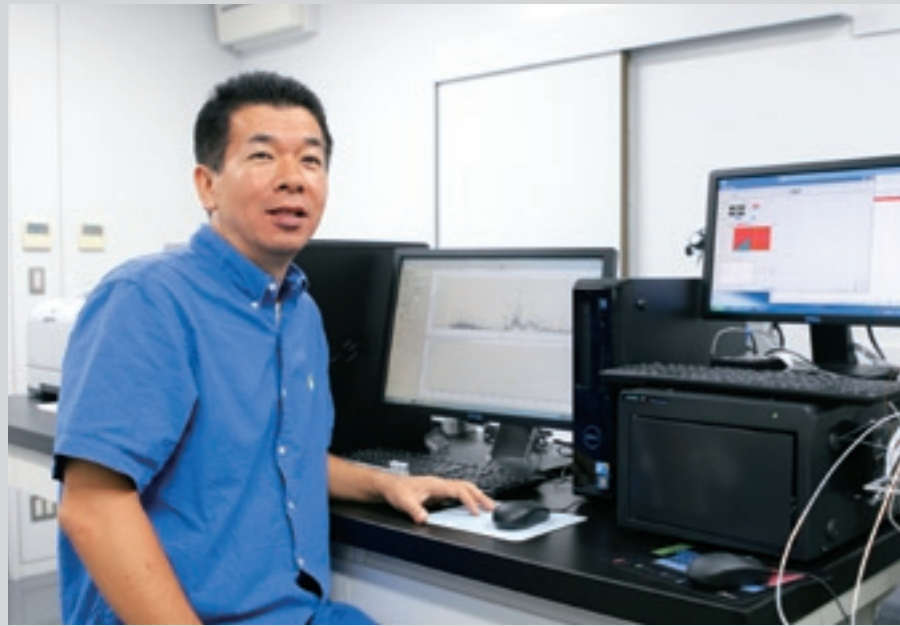


図3 月の海の年代地図
赤い点線の領域はトリウムやウランなどの熱源元素に富むとされる嵐の大洋・雨の海領域を表す。この領域で長期のマグマ活動が起っており、月表層の熱源元素の濃集が内部のマグマ生成に影響を与えていた可能性が考えられる。

図4 月のマグマ活動史
40～30億年前に多くのマグマが噴出した。その後減衰し、15億年前まで噴出は続いた。



Yoshikatsu Matsubayashi

1971年三重県生まれ。1997年名古屋大学大学院生命農学研究科博士課程修了。同助手、助教授(准教授)を経て、2011年より基礎生物学研究所教授。2014年4月から現職。専門は、植物分子生理学、生理活性物質化学。

成長の隠されたたくみを分子の側から探る

松林嘉克 生命理学専攻教授

ペプチドシグナルと翻訳後修飾

わずか1mgの結晶を1000リットルの水に溶解してつくった希薄な溶液にも、生物の細胞は鋭敏に反応する。これが、動物のインシュリンや植物のサイトカイニンなどのホルモンに代表される細胞間情報伝達分子の世界である。生体内の特定の細胞群が分泌した微量の情報伝達分子は、細胞と細胞の隙間を移行し、ターゲットの細胞の表面に存在する受容体分子に結合すると、スイッチとして特定の遺伝子群を活性化する。これにより、離れた細胞同士でも互いにコミュニケーションをとることができる。多細胞生物の体の形成や環境変化への応答には、このような情報伝達分子と受容体とがさまざまな局面で鍵となる役割を担っている。

情報伝達分子の中には、アミノ酸十数個からなる「ペプチドシグナル」とよばれるグループがある。とくに植物では、こうしたペプチドシグナルに酸や糖などが結合してそのアミノ酸の化学特性を変えることが多く、これを翻訳後修飾とよぶ(図1)。情報伝達分子が早く拡散するためには分子サイズはできるだけ小さい方が有利であるが、サイズが小さいことによって低下する分子の特異性を翻訳後修飾によって補うという巧みな戦略であると私たちは解釈している。

植物の成長を支えていたペプチドシグナル

このような情報伝達分子は、これまで特定の生命現象に関与する遺伝子群を1つずつ

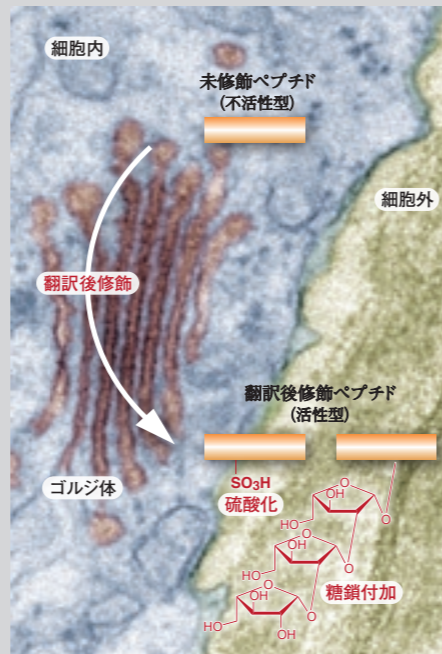


図1 ペプチドシグナルの翻訳後修飾

ペプチドシグナルは、細胞外に運ばれる途中にゴルジ体の中で翻訳後修飾を受けることが多い。修飾を受けることで受容体に結合できる構造となり、本来の機能を発揮する。植物のペプチドシグナルの主要な翻訳後修飾には、チロシンの硫酸化と、ヒドロキシプロリンへの糖鎖付加とがあり、とくにアラビノースが3個結合する糖鎖付加は植物に特徴的である。

探し出して機能を解析したすえに見つかる例が多かったが、我々は逆にこうした情報伝達分子の候補をさまざまな手法で見つけ出し、後からその分子が関与する生命現象を明らかにすることを試みている。あえて逆の方向から研究を進めているのは、着眼点を変えることでこれまで見過ごされていた面白い現象やしくみを見出すことができると考えているからである。

実際、我々がこの観点から研究を進める

中でプレイクルーとなったのは、翻訳後修飾酵素をコードする遺伝子を破壊したシロイヌナズナ植物体を生育させると、破壊した遺伝子に依存して根が顕著に短くなったり、花芽形成が早まったりしていることに気がついたことであった(図2)。翻訳後修飾酵素は多数のペプチドの修飾に関与しているため、修飾酵素欠損株においては、本来修飾される多数のペプチドがすべて修飾を受けないまま分泌されてしまう。それらの中に重要なペプチドシグナルが含まれていれば、図らずも翻訳後修飾酵素を欠損した植物の形態は、未知の情報伝達分子がどこでどのような働きをしているかを我々に教えてくれる。

我々は植物の代表的な翻訳後修飾酵素、チロシン硫酸化酵素の欠損株における、根が顕著に短い形態の原因となっている新しいペプチドシグナルをさらに探索することにした。

シロイヌナズナ的全遺伝子の中から、配列上の特徴を手がかりにチロシン硫酸化されるペプチドをコードする可能性が高い遺伝子を選び出し、ペプチドの構造を質量分析装置^{*1}を使って確かめた上で、人工的に合成した硫酸化ペプチドをチロシン硫酸化酵素が欠損した植物に与えてみた。与えたペプチドが根の成長に必要なものであれば、その成長が回復するはずである。その結果、これまで知られていなかった新しい硫酸化ペプチド群に活性があることを突き止めた。RGF^{*2}と命名したそのペプチド群は、根の先端領域で局所的に発現して根の基部側へ向けて拡散し、この濃度勾配がPLT^{*3}という遺伝子活性の調節因子の量に反映されることで、根の先端で生まれた細胞がしばらく分裂を繰り返した結果、根端から遠ざかると細胞伸長を開始するという根の特徴的な成長のしかたを規定して

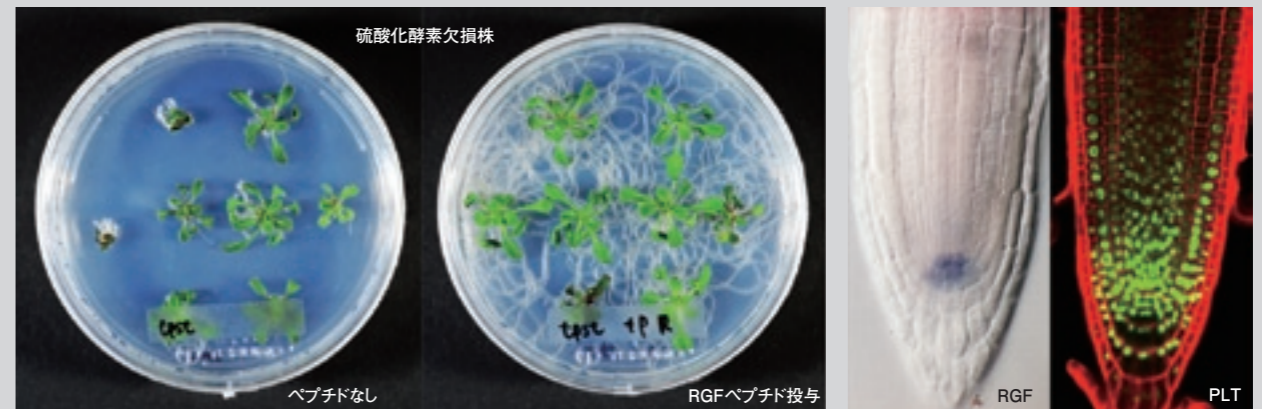


図3 RGFペプチドの活性と発現パターン

チロシン硫酸化酵素を欠損した植物は、根が極端に短い、化学合成したRGFを培地に加えると、根の成長が劇的に回復する。RGF遺伝子は、根端の静止中心や幹細胞などの限られた細胞において発現しており、細胞外に分泌されたRGFペプチドは、細胞間隙を拡散して周囲の細胞群に働きかけ、転写因子であるPLTの発現レベルを調節している。PLTの発現レベルが高いところでは未分化性が維持され、中程度の領域では細胞分裂が活性化し、さらに発現レベルが下がると分化して細胞伸長が起こる。

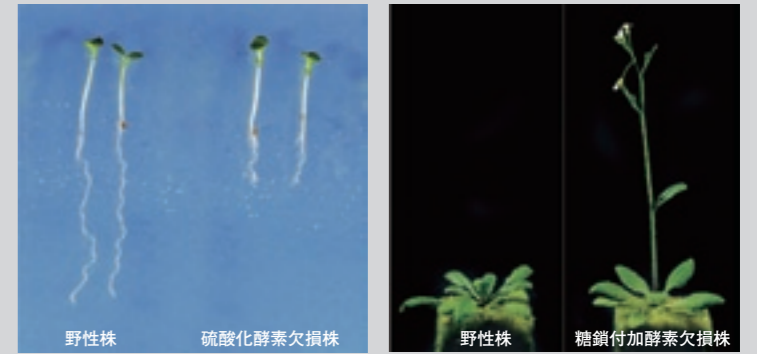


図2 翻訳後修飾酵素遺伝子を欠損したシロイヌナズナ植物体
チロシン硫酸化酵素欠損株では根が顕著に短くなり、ヒドロキシプロリンのアラビノース糖鎖付加酵素欠損株では花芽形成が早まっている。

いたのである(図3)。

新しい情報伝達分子が見つければ、必ず存在するはずのその受容体分子への興味は深まる。シロイヌナズナには600を超える数の受容体様分子が存在するが、どんな情報伝達分子を認識しているかは、数えるほどしかわかっていない。情報伝達分子と受容体とを線で結びながら、一見混沌とした生物の営みの中にある洗練されたたくみを「逆の方向」から解き明かしたいと思っている。

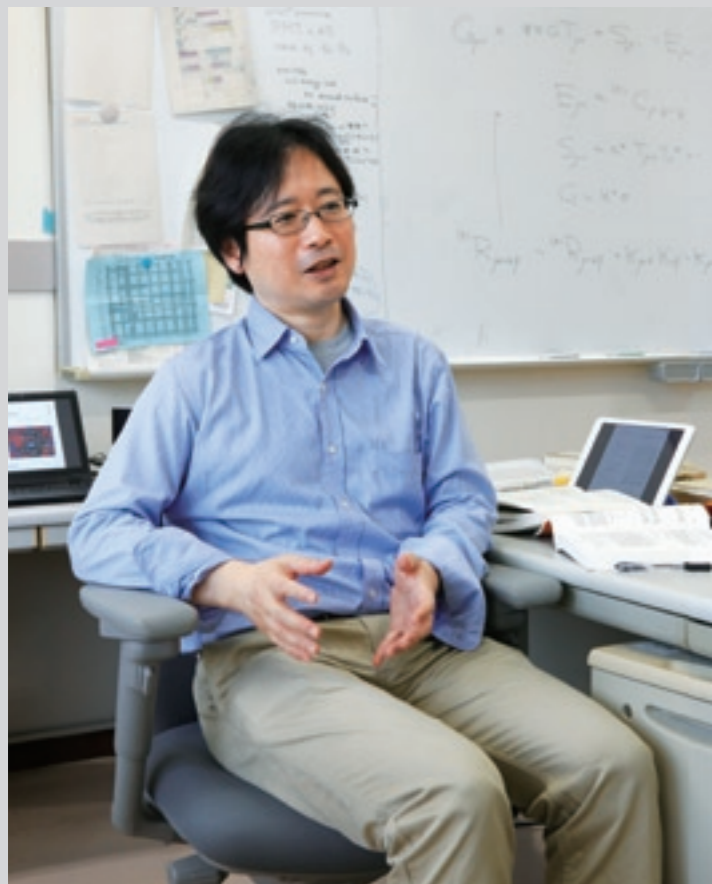
*1 質量分析装置
分子をイオン化し、その質量を精密に測定する装置。分子イオンに不活性ガスを衝突させてさまざまに断片化したものの質量を測定することによって、詳細な分子構造を知ることができる。

*2 RGF
Root meristem growth factorの略。根端分裂組織成長因子の意味を込めている。

*3 PLT
PLETHORAの略。根端分裂組織の形成に必須の遺伝子の1つである。

幾何学で宇宙に楔を打つ

白水徹也 多元数理科学専攻教授



Tetsuya Shiromizu

1969年生まれ。山口大学理学部卒業(1991)、京都大学大学院理学研究科物理学第二専攻修了(1996)。博士(理学)。1996年東京大学大学院理学系研究科助手、2002年東京工業大学大学院理工学研究科助教授、2008年京都大学大学院理学研究科准教授。2014年から現職。専門は相対論、宇宙論。

一般相対論的宇宙と宇宙の加速膨張

一般相対論が誕生してから間もなく100年が経とうとしている。一般相対論の登場により、時空までも物理学の考察対象となり、アインシュタイン方程式がその世界を支配している(図1)。時空はリーマン幾何学とよばれる曲がった空間を扱う数学で美しく記述されている。アインシュタイン方程式ほど人類が手にしている方程式のなかで美しいものはないのではないかと思う。この理論の素晴らしいところは、それを土台とした宇宙論において宇宙の膨張、宇宙の大規模構造をはじめとする予言がことごとく観測により検証されている点である。なぜこんなにも美しい理論が自然を支配しているのか不思議である。

しかし、新たな問題も出始めている。それが2011年にノーベル物理学賞が与えられた宇宙の加速膨張の発見である。一般相対論では通常宇宙が減速膨張することを予想する。観測と理論との間に何が起きているのであろうか。

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

図1 アインシュタイン方程式

人類が手にした物理法則の中で最も美しいものである。どうしてこんなに自然は美しいのだろう。重力は時空の湾曲で説明され、左辺がそれを表わしている。右辺は物質のエネルギー密度である。物質が存在すると時空が曲がる。

未知の法則の探求

アインシュタイン方程式によれば、宇宙の膨張の仕方は宇宙の物質の構成要素から決まる。したがって、宇宙膨張の様子を詳細に観測することによって、宇宙膨張を支える物質の構成要素がわかる。それによれば、宇宙の70パーセントはダークエネルギー^{*1}とよばれる未知の成分である(図2)。現在、ダークエネルギーの性質や正体について観測、理論の両面から研究が進んでいる。一方で、アインシュタイン方程式への修正の可能性についても検討が始まっている。

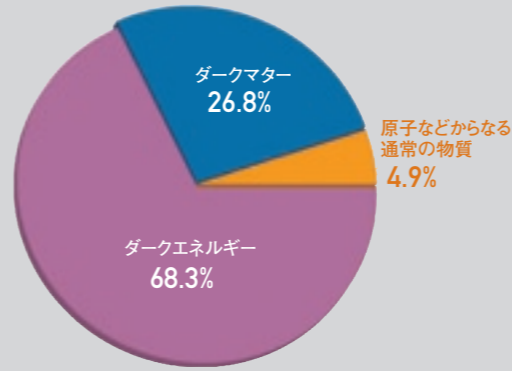


図2 宇宙膨張を支える物質の構成

プランク衛星などによって明らかとなったように原子などの普通の物質は4.9パーセントしかない。ただし、アインシュタイン方程式が成り立つとしている。

幸か不幸か、現状は混沌としている。さまざまな理論やモデルが提案されている。ここで基本に立ち返ることは重要である。そもそもこの類の理論が構築される際には、理論の安定性は最低限保証されてきた。一般相対論は非線形レベルでその安定性が保証されていることが知られている。即ち、全質量Mに対してM≧0が成り立ち、M=0のときに限り時空は大域的に平坦な時空になる(正質量定理^{*2})。重力のエネルギーが負であることを考えるとこれは直感的に自明なことではない。新しい理論やモデルにおいても同様の安定性は保証されるべきであると考えことは自然であり、摂動レベル^{*3}では、これは理論構築の際に最低限要求されることである。よって、ダークエネルギーなどのモデルに強い

$$F_{\mu\nu} := 2(\partial_{[\mu} A_{\nu]} + A_{[\mu} A_{\nu]}) \quad V^\mu = i\bar{\epsilon}\gamma^\mu \epsilon$$

$$8\pi GM = \int_{\Sigma} d\Sigma \left[2i\hat{\nabla}_\rho \epsilon \gamma^{\mu\nu\rho} \hat{\nabla}_\nu \epsilon - G_\nu^\mu V^\nu + S^\mu \right] u_\mu$$

$$G_{\mu\nu} := R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R \quad S^\mu := -i\bar{\epsilon}\gamma^{\mu\nu\rho} F_{\nu\rho} \epsilon$$

図3 正質量定理を証明する式

ダークエネルギーなどがある場合に使用される。中心の式の左辺のMが質量、Gは万有引力定数。右辺が正になることを示すことで定理は証明される。ダークエネルギーはS^μなどに現れている。(Nozawa & Shiromizu 2014, Physical Review D89, 023011)

制限をつけることができる(図3)。具体例として、正質量定理が成り立つことを要請し、ダークエネルギーとしてスカラー場を考えた場合、その運動項とポテンシャル項のかたちが大きく絞られることが私たちの研究でわかった。これが今後の理論構築の新指針の1つになると期待している。

極限状態からのヒントを探る

既存の知識の範疇で深刻な問題に直面した場合、未知の領域を考えることはしばしば理解の助けとなる。たとえば、究極の理論といわれている超弦理論(基本要素はひも)を考えると、私たちの宇宙は高次元時空(10次元)中を運動する3次元の薄膜のようなものであると考えるのが自然のようである(図4)。

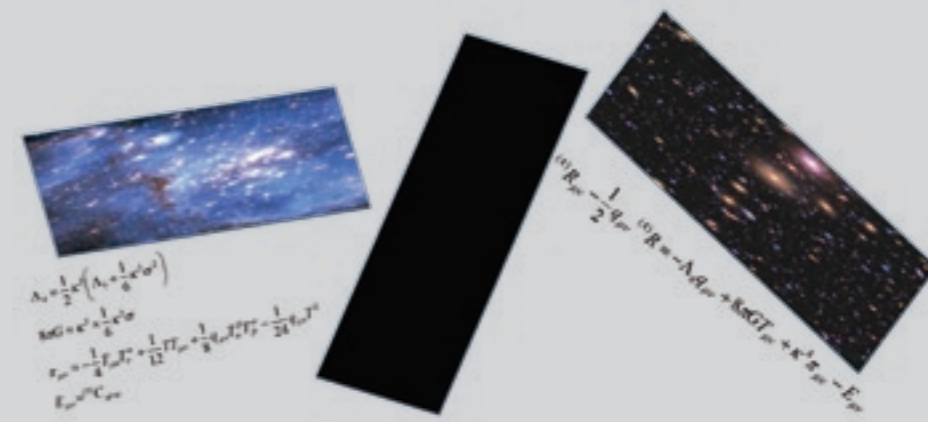


図4 超弦理論に基づいたブレンワールド宇宙

我々の宇宙は高次元時空中を運動する薄膜と考えるのが自然である。式は膜上で成り立つ重力場の方程式である。幾何学の分解公式を用いることで導出ができる。(Shiromizu, Maeda & Sasaki 2000, Physical Review D62, 024012)

ここで幾何学においてしばしば登場する時空の分解公式が役に立つことに私たちは気がついた。高次元の時空の湾曲の度合いを表す量と4次元時空のそれとを関係付ける有名なガウス公式である。これを用いることで、薄膜上の4次元時空を支配している方程式の導出を行うことができた。実はこれは高次元の理論を4次元時空に射影したのようになっており、高次元時空の効果は4次元時空に投影されたかたちで現れる。このことから、もし高次元時空にブラックホールが存在したとすると、薄膜上ではまるで輻射(仮想的な光子気体のようなもの)があるように4次元時空は応答するという興味深い現象が予想される。この種の現象が確認されれば、余剰次元の存在の証明にもなる。また、宇宙の加速膨張の謎解明への手がかりも与えてくれるかもしれない。

幾何学で宇宙に楔を打つことで、今後の大きな潮流が生まれることを期待したい。

*1 ダークエネルギー
加速膨張を担う未知の成分の総称。

*2 正質量定理
1981年にシェーンとヤウ、ウイッテンにより独立に証明された。

*3 摂動レベル
微小な揺らぎを与えて微小な応答をみる範囲。

同窓生から

再発見した理学部の魅力

株式会社プランニングオフィス代表取締役
梅垣啓一 (Keiichi Umegaki)

宇宙の起源や進化に興味をもち理学部に入学し、物理学を卒業した。記憶にあるのはA研で「星の進化」を学んだことや小川修三先生の量子力学のゼミ。ずっと「人」として足踏みを続けていた私は、自分を表現したいと思いついて映画に道を求めたが、斜陽産業に職はなく、TVドラマの制作現場でアルバイトを始めた。不安定なアルバイトを続けるうちに記録映画や産業映画をつくるプロダクションがあることを知り入社した。仕事は面白く3年間休む暇なく働き、仲間と独立した。

その頃、「名古屋大学放送公開講座」というテレビ番組が始まり、10年間にわたりディレクターとして制作に携わるようになった。在学中あまり大学に顔を出さなかった私が足繁く大学に通い、いろんな分野の研究にふれた。

そして昨年、理学部の紹介映像を制作するというまたとない機会を得た。およそ3カ月にわたり、今度は理学部に会い詰め、若い研究者の方々への取材を重ねた。取材内容はみな面白く、和気あいあいと研究に取り組む研究室の雰囲気にも大いに惹きつけられた。今さらながら「なんて素敵なところだったのだ」と思った。

今、自分が学生に戻れたら、どうするか。研究の道を突き進んでみたいとも思うが、映像の道もまた捨てがたい魅力に満ちているのです。名大理学部を再発見させてくれるほどに。



キャンパス通信

信頼関係から生まれる研究成果

元全学技術センター(理)技術専門員
河合利秀 (Toshihide Kawai)

名古屋大学理学部技術部は全国の大学の技術組織の模範といわれるようになった。これは先輩技術職員諸氏の活躍の賜物である。以下は2001年度外部評価からの抜粋である。「最も感銘を受けたのは物理学教室に存在する金工室である。多くの大学ではすでに存在しなくなっている金工室が非常に有効に活用されている。第一線の研究装置の製作や研究開発に使われているのみならず、学生教育にも利用されている。研究者との交流も良い」。

大学の研究は未知の現象を解明することである。そのためにはだれもつかったことのない「装置」が必要だ。ここに私たちの出番がある。技術職員にとって「新しい装置をつくる」ことはこの上ない喜びである。技術職員が力いっぱい技術を発揮するには、教員や学生との信頼関係がなくてはならない。先輩たちは我々にこの信頼関係の大切さを、身をもって教えてくれた。理学部の独創性は教員と技術職員の信頼関係が支えているのである。

現在、理学部の技術職員組織は若返りの最中である。ここで伝統の相互信頼が継承されているであろうか。技術職員が専門性を磨くのはもちろんだが、教員の皆さんの協力が不可欠である。未熟な我々を叱咤激励して、辛抱強く向かい合ってくれた先生方の存在なしには我々の活躍はない。教員と技術職員の信頼関係がより大きなものになることを願ってやまない。



2004年の電波望遠鏡NANTEN2の移設作業。背中が筆者

書籍紹介

『原発と活断層
「想定外」は許されない』

タウ・レプトン物理研究センター准教授
戸本 誠 (Makoto Tomoto)

2011年の東日本大震災にともなう東京電力福島第1原子力発電所の事故によって発足した原子力規制委員会のもとで、原子力敷地内の断層調査や、安全性に関する規則の整備が始まった。

本書は、規制委員会が定めた地震・津波に関する新しい規制基準の検討チームに加わった活断層研究の専門家が、原発敷地内における活断層の認定をめぐる過去の問題を検証し、活断層が軽視されてきた原因、活断層が過小評価された実例をまとめ、その問題をいかに解決すべきか論じたものである。特に、著者が携わった敦賀原発敷地内の調査は説得力のある内容となっている。新聞などの情報には含まれがちな政治的、経済的な主張は一切排除し、純粋に科学的な見地から、原発と活断層に関して知りたい人にお薦めである。

自然に対して知り得る知識には限界がある。科学では、過去や未来に様々な場所で行われた測定を比較し、自然に対する未知と既知を線引きするために、数値化した基準を共有する。そして、人間がその基準値をもとに科学を社会の役立つ情報として還元する。活断層の研究では、基準を数値化することが難しいばかりでなく、科学の社会への還元が人類の幸福に直結する所に怖さを感じた。原発と活断層に関してだけでなく、科学そのもののあり方、そして科学を社会がどう捉えるかに関して、改めて考えさせられる一冊である。



『原発と活断層
「想定外」は許されない』
鈴木康弘 (Yasuhiro Suzuki) 著
岩波書店 / 2013年10月発行
1200円(税別)

キャンパス通信

「TEDxNagoyaU」を開催

生命理学科3年
徐 凌歆 (Xu Linghuan)

「TED Conference」をご存じだろうか。Technology、Entertainment、Designの頭文字を表し、未来のために「価値あるアイデアを広める」という目的で、1年に1度アメリカで開催される世界的に注目されているカンファレンスである。そんなTEDの本部からライセンスを得て、私たち愛知県の大学生は昨年「TEDxNagoyaU」を開催しており、2014年7月6日には第2回を名古屋大学で開催した。

本場のTEDのイメージを大事にしたかった実行委員のメンバーはロゴや動画などの演出に凝る一方で、自分たちにしかできないイベントにこだわり続けた。私は大学に施設の使用をお願いしたり、東京に何回も足を運んで出演依頼したり、運営資金を集めるために企業にアプローチした。そうした活動では、普段の学生生活では身につかないようなソーシャルスキルやマネジメント能力が必要となり、自分自身を見つめ直す良い機会となった。

当日は日本各地から来ていただいた10人のスピーカー、総長はじめとする大学の方々、支援してくださった企業の方々、限定100人のオーディエンスの皆さんのおかげで無事開催ができた。どうせやるならみんなの想像を超えるような素晴らしいものにしたい。そんな思いで活動してきたつながりを大事にし、今年のテーマであるILLUMINATE YOUR HEARTにあるよう、みんなの心を照らせるよう新たな一歩を踏み出そうと考えている。
<http://www.tedx-nagoya-u.com/>

