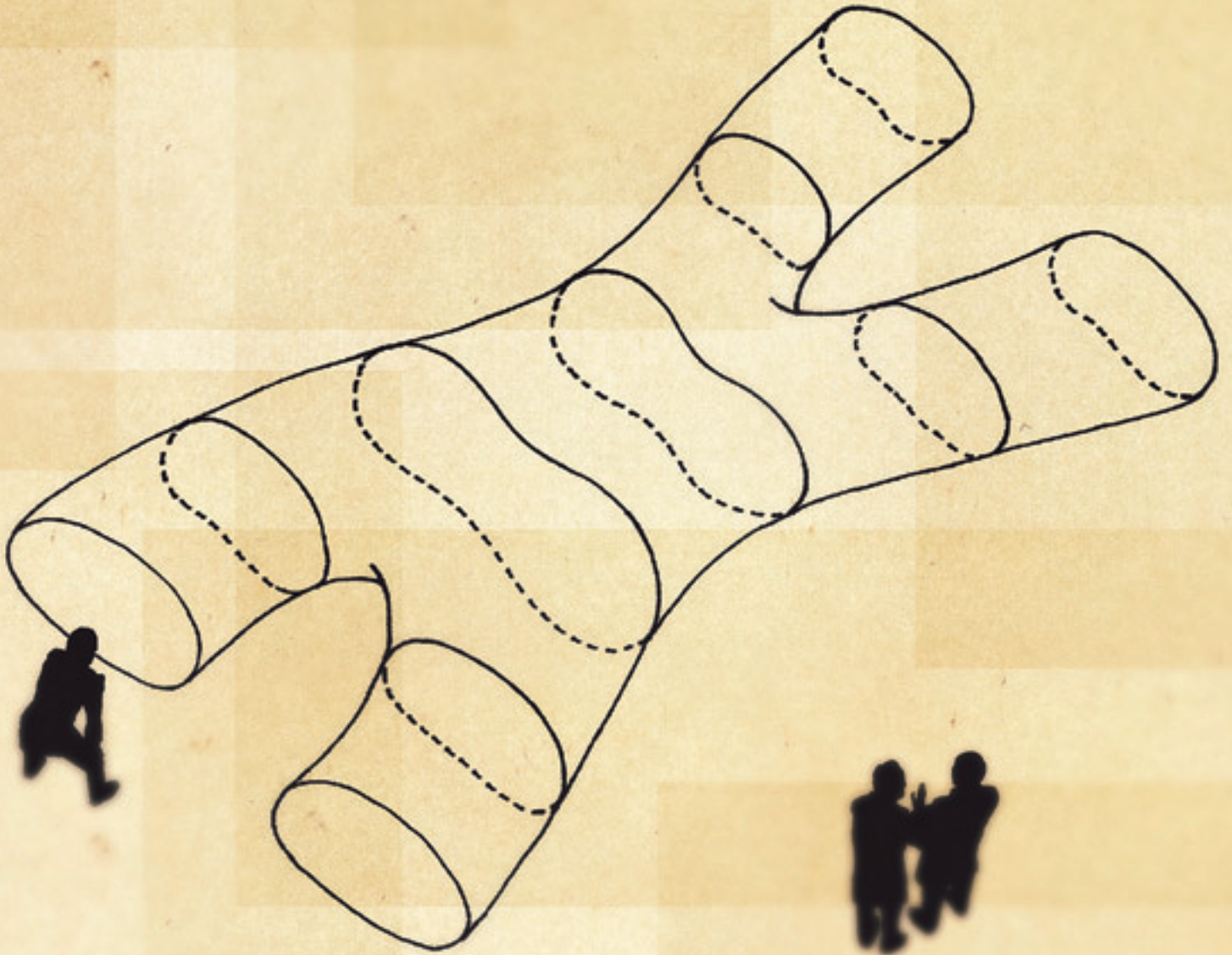


理

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] October 2007

13

philosophia

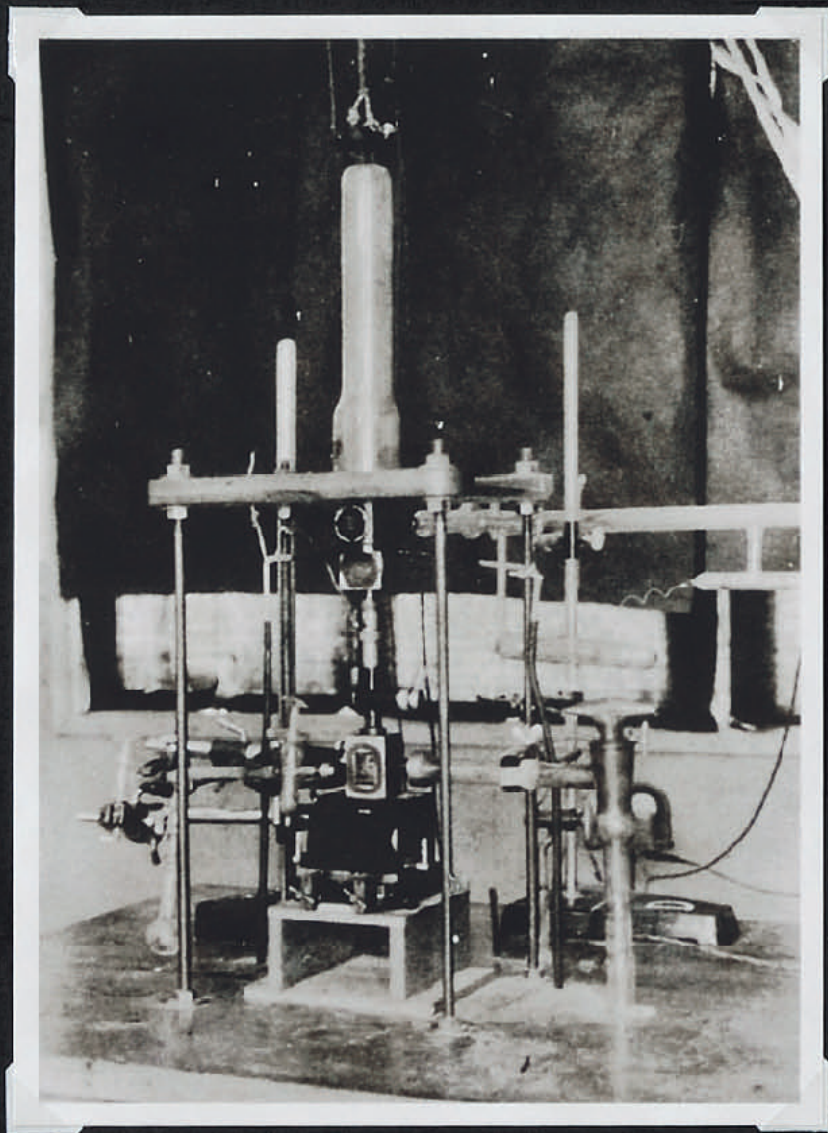


特集

「超弦理論の数理」

- 04 — 弦と素粒子◇杉本茂樹
- 08 — 驚きの双対性◇菅野浩明
- 02 — 時を語るもの〈森野米三博士〉◇朽津耕三
- 03 — 理のエッセイ◇田中 剛
- 12 — 理の先端をいく◇三村耕一／伊藤好孝
- 16 — 講義探検◇宇宙物理学 I / 基礎遺伝学 I
- 18 — 理学部交差点

森野米三博士— 構造化学の礎を築く



気体電子回折装置・第1号機(写真上)と、
製作に携わった上田博士と、森野博士、山崎一雄博士(写真左)

1,2-ジクロロエタン ($\text{ClH}_2\text{C}-\text{CH}_2\text{Cl}$) のCl原子は、C-C結合のまわりで2つの安定な配座^{*1}をもつ。立体化学の一里塚となったこの現象は、水島三一郎^{*2}・森野米三博士らによりラマン分光で発見された。直後に名古屋帝国大学に赴任した森野博士の心は、「配座異性体のCl原子間距離を気体電子回折で測りたい」という思い一筋だった。名古屋には、固体電子回折の専門家である上田良二^{*3}博士が物理教室に1年前に着任していた。森野博士の志望を創設準備の会議で聞いて、上田博士は森野研専用の装置を自作し完成させて着任を待った。森野教授のライフワーク

となった分子構造の研究は、すぐこの装置で始まり、分光学の研究とともに発展して、科学と技術の広い分野で分子設計の基盤づくりに大きなインパクトを与えた。二人の深い交流は、これを契機に半世紀を超えて続いた。上田博士は晩年に語る。「顧みると、二人が名古屋で共に暮らしたのはわずかに5年だった。しかし、二人の間には最後まで爽やかな風が行き交った。私は森野先輩の才能と人格を尊敬し、森野さんは私の自主性を愛して下さった。」

(朽津耕三 東京大学名誉教授)

個体発生は系統発生をたどる

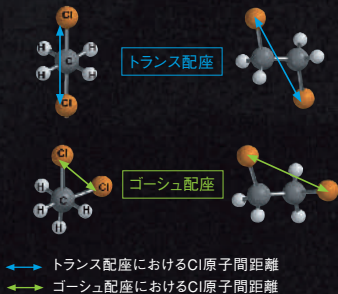


森野米三 (1908-1995)
元名古屋大学理学部教授。日本学士院賞(1964)、
日本学士院会員(1981-1995)、文化勲章(1992)

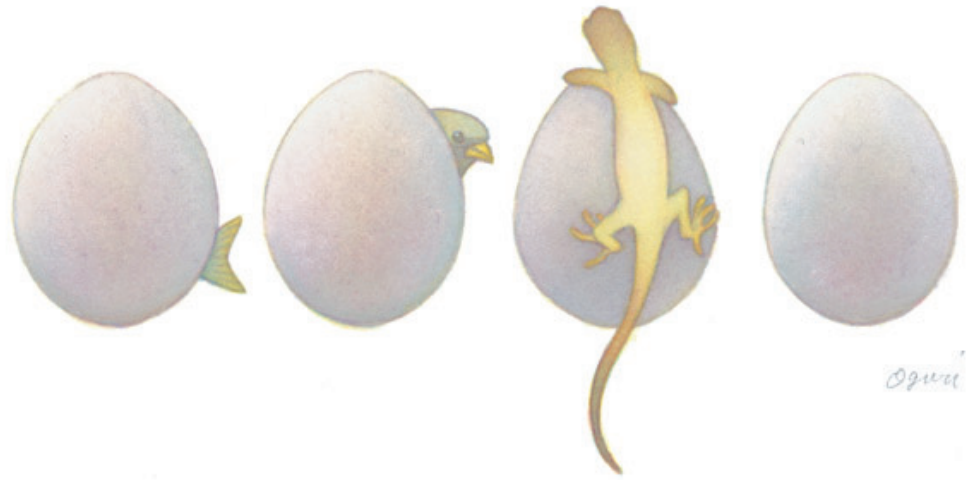
◆写真の説明

森野米三博士が名古屋帝国大学に着任したのは1943年のことであった。1939年に創設された本学は、太平洋戦争の戦禍に巻き込まれ校舎の整備もままならない状態にあり、空襲が激しくなった1945年には、一部研究室の遠方への疎開も行われた。同年8月の終戦後も、混乱する社会の中で研究教育を続けるには想像を絶する努力が必要だった。ようやく大学が落ち着きを取り戻しはじめた1948年には、森野博士は東京大学に戻ることになる。そうした状況下でありながら研究が進められたのは、上田良二博士によって提供された気体電子回折装置が大きな力となったためである。左ページ右の写真は、その第1号機である。設計はもちろん工作の一部も上田博士が自ら手がけた。森野博士は、この装置を存分に使って構造化学の分野で大きな成果をあげた(のちに東京大学名誉教授)。また、名古屋大学の工作室の充実に努めた上田博士は、森野博士の研究に対しても協力を惜しまず、その後3台の装置を製作・提供している。左の写真は、左から上田博士、森野博士、山崎一雄*4博士で、東京大学に戻った後の1951年に本学理学部5号館前にて撮影されたもの。

*1 2つの安定な配座
1,2-ジクロロエタンのCl原子は、2つの安定な配座をもつ。
両配座では、2つのCl原子の距離が異なる。



*2 水島三一郎(1899-1988) 元東京大学理学部教授
*3 上田良二(1911-1997)
元名古屋大学理学部・工学部教授(本誌第6号P.2参照)
*4 山崎一雄(1911-)
名古屋大学名誉教授(本誌第11号P.2参照)



学生のころ、地学の1つ古生物学で“個体発生は系統発生をたどる”と学んだ。受精して生物個体が形成されていく過程で、その個体は、ごく短い時間ではあってもその生物種が長い地質学的な時間をかけて進化してきた道筋をたどるという。人の胎児にもえらや尻尾のたぐいが顕在化する時期があり、それは人も魚や獣を経て進化してきた証拠であるという。その古い形態が最終的に不要なものであるからと切除すると、最終的な状態において、なにかしら不具合が生ずるといわれる。最近はこの説にも異論があるようだが、椅子に座り続け、尾てい骨がむずがゆくなるたびに、自分の体に残る魚や獣との共通点に、ほのぼのとした共感を覚える。

教育の道筋もまた、個体発生においてはその系統発生をたどっているように見える。小学校で植物や星座の不思議を学び、ついで細胞や力学を学び、大学ではさらにその先へと進む。それぞれの段階が学問の歴史的進化に対応している。

理科離れが叫ばれて久しい。理科に携わる我々も、さまざまに誘いの工夫を凝らす。その議論の中で“理学の基礎”という表現をしばしば耳にする。その理学の基礎は、物理・化学と数学にあり、とする意識が強い。さらに耳を澄ますと、“理学の基礎”とは、“大学院において指導者の提示する研究テーマをスムーズに遂行できる力”といったニュアンスに至ることが多い。さて、真の基礎とはそうだろうか。私は、“学問の基礎”とは学問に道を開こうとする個体発生が、短期間であっても学問の系統発生部分に触れることではないかと思っている。研究の先端にいる教員は、学生が進級以前に理科の系統発生部分の多くを学んでほしいと願う。大学初年時教育は、その補完が目的の1つであろう。そこで教えるべき“基礎”は、大学院で有用な手や足のかたちをしたものではなく、入試勉強の効率化のために切り取られた“えら”や“尻尾”の部分、すなわち自然に触れて、星や石や植物の気を感じる、その一瞬をもつ心ではないだろうか。名古屋大学での勉学を志す学生には、それまでに学ぶことが少なかったであろう理学の基礎(受験勉強になかった理学の系統発生部分)に触れることを、まず、勧めたい。物理・化学や数学の展開によって学問の光明を見出すとする地学自体の教育もまた、その“基礎”の上に成り立つものである。

Tsuyoshi Tanaka

地球環境科学専攻教授。1946年香川県生まれ。1969年名古屋大学理学部卒業。工業技術院(現産業技術総合研究所)地質調査所を経て、1990年名古屋大学へ戻る。専門は、地球化学図による地面の環境評価と天然の放射壊変起源同位体を用いた地学。

超弦理論の数理

超弦理論は、これまで点と考えられてきた素粒子を弦と考える理論である。

同じ弦であってもさまざまな振動ができるため、たくさんの種類の素粒子を表現することが可能になる。

さらに超弦理論は、重力を説明する一般相対性理論と小さな素粒子の性質を説明する量子力学とを矛盾なく統一することができる。

大きな可能性を秘めた超弦理論の魅力について、物理学と数学、2つの分野の研究者にそれぞれの視点から紹介していただいた。

(2007年6月16日、第13回理学懇話会より)

弦と素粒子

杉本茂樹 素粒子宇宙物理学専攻准教授

究極の物質像を求めて

今日は「この世は何でできているのか」についてとことん考えてみましょう。この世を構成する最も基本的な構成要素は何であるのか、という究極の物質像を探る人類の旅は実は 2000 年以上も昔から始まっていました。古代ギリシャの自然哲学者であるデモクリトス*1は「この世は原子(アトム)と空虚な空間からなる」という説を唱えました。ここでいう原子とは、これ以上分割できない粒のことです。この世には水、空気、プラスチック、鉄、木などなど、いろんな物質がありますが、どんな物質でもどんどん細かく割って

いくと、最終的にはどこかでこれ以上分割できないような粒に落ち着くというのが彼の考え方です。ご存じのように、それから2000年以上もたち、19世紀ぐらいになって、このデモクリトスの考えが基本的に正しかったことが科学的に実証されました。科学が進歩して、彼がいったとおり、物質は原子からなり、化学反応はその原子の組み換えによって生じることがわかったのです。こんなことを2000年以上も前に思いつくとは、恐るべき先見の明の持ち主ですね。

ところが、これで話は終わりませんでした。

その後、この原子はデモクリトスが考えたように「これ以上分割できない粒子」ではなく、電子、陽子、中性子というもっと小さな粒子からできていることがわかったのです。これは大変な発見だったと思います。物質を構成する材料は、電子、陽子、中性子というたった3種類の粒子だということをいつているわけです。化学の教科書に載っている原子の周期律表を見ればわかるように、原子の種類は100種類以上もあるのですが、実は自然はもっと単純で、たった3つの粒子を知っていれば、それですべてが構成できるということになります。

ところが、実はこれでも話は終わりませんでした。

20世紀の中ごろ、実験が大変進歩し、それに伴って、電子、陽子、中性子では決してつくりえないような、これまで見たことのない新しい粒子が次々に発見されたのです。ここで見つかった粒子の多くは、現在ではハドロンとよばれている粒子の仲間です。このハドロンはさらにその性質の違いからバリオンとよばれる仲間とメソン(中間子)とよばれる仲間に分類されます。陽子や中性子はバリオンの仲間ですが、その兄弟に当たる粒子がごくごく見つかったわけです。メソンの仲間にはπ中間子とよばれる粒子があります。これは、日本で最初にノーベル賞をもらった物理学者の湯川秀樹*2博士が「こういう粒子があるはずだ」と理論的に予言して、それが後に実験で確かめられたことで有名な粒子です。その兄弟みたいな粒子もいっぱい見つかりました。こうして新しく見つかった粒子は数百種類にも及び、世の中のあらゆる物質が電子と陽子と中性子だけでできているという単純な物質像は崩れ去りました。



Shigeki Sugimoto

京都大学で学位を取得後、京都大学基礎物理学研究所、カリフォルニア工科大学・南カリフォルニア大学理論物理学センター、ニールスボーア研究所にてポストドク生活を送り、2003年より京都大学基礎物理学研究所助手、2006年より現職。

現在の物質像

この事態をどう打開したらよいでしょうか。こんなに粒子がいっぱいあるようでは、これは我々が求める究極の物質像とはいえないですね。この問題を解決しようと、人々はいろいろ考えました。その結果、陽子や中性子、そして新しく見つかったその仲間たちも、さらに小さな粒子から構成されるということがわかったのです。その小さな粒子のことをクォークといいます。クォークは全部で6種類見つかっていて、アップクォークやダウンクォークなどという名前がついています。また、クォークと逆符号の電荷をもった反クォークとよばれる粒子もあります。そして、陽子や中性子などのバリオンは3つのクォークがくっついてできたもの、 π 中間子などのメソンはクォークと反クォークがくっついてできたものであることが明らかになりました(図1)。

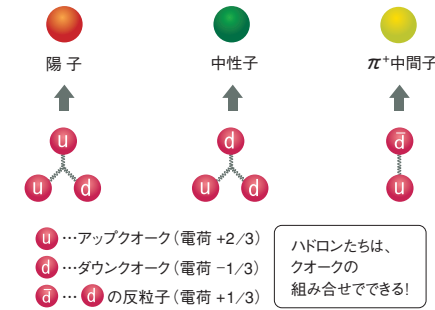


図1 クォークモデル

陽子はアップクォーク2つとダウンクォーク1つがくっついてできたもの、中性子はアップクォーク1つとダウンクォーク2つがくっついてできたもの、 π 中間子はクォークと反クォークがくっついてできたものと考えられている。アップクォークの電荷は+2/3、ダウンクォークの電荷は-1/3であり、このように考えると陽子の電荷が+1、中性子の電荷が0になって、観測されている陽子や中性子の電荷をうまく再現することがわかる。

いが存在することをどこかで相手に知らせなければいけませんね。その役目を果たするのがこの光子なのです。2つの粒子が光子をキャッチボールすることでお互いが存在することを確認しあい、それで力が働くという仕組みになっています。その他にも、素粒子の間に働く力には重力、強い力、弱い力とよばれる力があって、重力は重力子、強い力はグルーオン、弱い力はWボソンとZボソンという名の素粒子が媒介して生じることがわかっています。

いろいろな粒子が登場しましたが、現在のところ見つかった素粒子はここに挙げたものがすべてです。現在までに見つかったあらゆる物質は、これらの素粒子から構成されていると考えられています。ただし、重力子はまだ素粒子として観測されたことはなく、また素粒子の理論の中に矛盾なく組み込むことも完全にはできていません。しかし、私たちが日々重力を感じていることから、ほぼ間違いなく存在すると思われるので、一応入れておきました。ちょっと難しい話になってしまいましたが、とにかく、この世の中は何でできているんだろうという疑問をもったときに、ここに挙げた素粒子たちでできているというのが、今のところの答えです。

ここでちょっと立ち止まってみます。「果たしてこれが私たちの求める究極の物質像だろうか」と考えてみてください。先ほど登場した素粒子で世の中のあらゆる物質が構成されるということは、それはそれですごいことですが、どうして自然はこれだけの種類の素粒子を要求したのかと考えると不思議ですね。自然はもっと単純で美しいは



図2 現在見つかった素粒子

現在見つかった素粒子をまとめた表である。クォーク、電子、ニュートリノの仲間にはそれぞれ反粒子が存在する。アップクォークの仲間、ダウンクォークの仲間、電子の仲間、ニュートリノの仲間がどれもこれも3種類セットで見つかったのは大変特徴的である。なぜ3種類セットで出てくるのか、という疑問が当然湧いてくるが、実はこれはまだ解明されていない。現在の素粒子論の最大のミステリーともいえることで、研究者たちの頭を悩ませている。

ずだと思いませんか。僕にはそう思えてなりません。それから、先ほどちょっといったように、重力を含む素粒子の理論をつくらうとすると、どうしてもいろいろ不備があって、まだ矛盾のない理論ができていません。そういう意味でも、先ほど挙げた素粒子たちでこの世がすべて記述できるとは多くの人が思っていない。

ここでちょっと発想を変えてみましょう。これまで、「物質の最小単位は粒子である」と暗黙のうちに仮定して話を進めてきましたが、これは一体誰が決めたことでしょうか。もちろん、誰も決めていません。なぜか今まではそれでうまくいっていたというしかありません。では、もし物質の最小単位が粒子でないとしたら一体どんな可能性があるだろうかということをちょっと考えてみてください。その1つの答えが弦理論なのです。



*1 デモクリトス(紀元前460年ごろ-紀元前370年ごろ)
古代ギリシアの自然哲学者。原子論を唱えた。

*2 湯川秀樹(1907-1981)
元京都大学教授。陽子と中性子を結びつける役割を果たす中間子の存在を予言し、日本人として初めてノーベル賞を受賞。



弦理論とは？

弦理論は難解な理論だといわれることがありますが、発想は実に単純です。一言でいうと、「素粒子を大きく拡大してみると、実はひも状をしている」という仮説に基づく理論が弦理論です(図3)。

この仮説に基づく理論のことを弦理論といったり、ひも理論といったり、超対称性とよばれる対称性がある場合には超弦理論といったりします(以下では超対称がある場合でもとくに区別せずに単に弦理論とよぶことにします)。

この理論が誕生したのは1960年代の終わりから1970年代の始めにかけてで、その提唱者の一人は日本人の南部陽一郎^{*3}さんです。南部さんはすごい人で、まだノーベル賞はもらっていないのですが、ノーベル賞を2つくらいあげてもよいのではないかなと思うような、とても先駆的で画期的な理論をいろいろと打ち立ててこられた方です。

さて、粒子ではなくひもを考えると何がうれしいのでしょうか。輪ゴムのように輪になった小さなひもが宇宙を漂っている様子を想像してみてください。このひもには、縦横に伸び縮みしたり、全体が大きくなったり小さくなったりなど、いろいろな振動の仕方があります。その振動の仕方が違うと、それに応じてその性質もいろいろ異なってきます。ひもはとても小さいので遠くから見た

ら粒子のように見えますが、そうすると、いろいろな種類の粒子をたった1つのひもから導き出せるという可能性があるわけです。先ほど、現在知られている素粒子を表にしましたが、たくさん素粒子がありましたね。これらがひもからできていると考えれば、これらの素粒子がたった1つのひもから生まれたものとして表せる可能性があります。これは大変魅力的な可能性です。たった1つのひもから出発したのだったら、これこそ究極の姿だろうというふうに思いたくなりますね。また、先ほど、素粒子間の力を媒介する役目を果たす素粒子というものが登場しましたが、これも同じひもから生じます。つまり、物質と力の起源も統一してしまうという驚くべき可能性があるので(図4)。

弦理論というのは勉強していくと奇跡的なことがいっぱい起こって非常に魅力的な面白い理論です。その一番驚くべきことは、すでにいいましたが、いろいろな種類の素粒子をたった1つの弦で表しうるといことです。それからもう1つ、これは弦理論をもう少し詳しく調べないとわからないことですが、弦理論には重力も自動的に入っています。しかも重力を含んでいて何も矛盾をきたさないまともな理論になっています。実は重力を含んでいて、まともな理論というのは今のところ弦理論だけです。これも弦理論の奇跡の1つといえます。

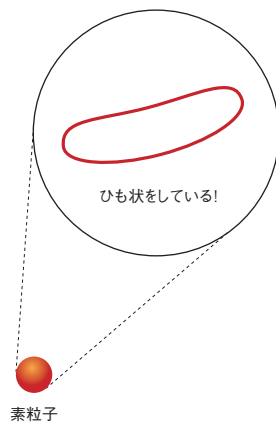


図3 素粒子とひも
この模式図のように、素粒子を拡大してみると実はひも状をしているという仮説に基づく理論が弦理論である。

このような性質があるので弦理論は究極の統一理論の候補だといわれています。人類は最初に紹介したデモクリトスの時代から2000年以上にわたって究極の物質像は何かを考えてきたわけですが、この弦理論はその究極の姿をついにもたらししてくれるのではないかと期待されています。ただ、これはまだ確定しているわけではなくて、本当かどうかはまだ決着がついていません。これからの研究に期待しましょう。



双対性

ところが、これで話はおしまいではなく、またもや、どんでん返しがありました。1997年にフアン・マルダセナ^{*4}という物理学者が驚くべきことをいいました。正確に説明するのはすごく難しいのですが、大雑把にいうと「弦理論と素粒子に基づく理論は実は同じ理論である」という予想を立てました。この予想がもし本当だとすると、究極の物質像の答えは1つではないかも知れ

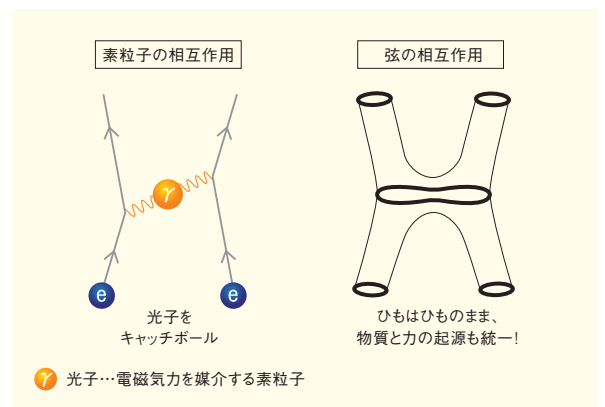


図4 力の起源
2つの素粒子の間に働く力の起源を表した図。左図は2つの電子が光子をキャッチボールしながらお互いに力を及ぼしあう様子を表している。一方、弦理論の場合にこれに対応する図を描いたものが右図である。こちらは、物質を構成する粒子と力を媒介する粒子の間に本質的な区別はなく、ひもがくっついたりちぎれたりすることで力を及ぼしあうことがわかる。

ません。素粒子の理論と弦の理論は、理論の構成の仕方は全然違うけれども、結局どちらも同じ理論なのだとして、どちらか片方が正しいというわけではなく、どちらも究極の物質像となりうる可能性があるというわけです。このように見かけ上全然違う理論が実は同じになるという不思議な性質はいろいろな理論で見つかり、「双対性」という言葉でよばれています。

もう少し具体的に説明しましょう。ちょっと前に、現在の素粒子論では、メソンはクォークと反クォークがくっついてできた状態として構成されるということを行いました。実はこの状態は、弦理論で考えると開いたひもの状態と対応していて、見かけは全然違う構成のしかただけけれども、いろいろ計算してみると、なぜかどちらだと思っても計算結果は同じになるということを予想しているわけです(図5)。

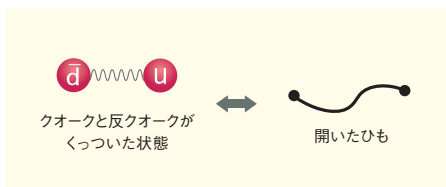


図5 素粒子の理論と弦の理論の間の双対性

素粒子の理論では、 π 中間子などのメソンは左図のようにクォークと反クォークがくっついた状態として記述される。一方、これを右図のように端のある開いたひもとして表すような弦理論で記述しても同じものを表しているという予想がなされ、いくつかの計算結果が確かによく一致しているということが最近わかってきた。

実際そんなことがなりたつのかどうかを示すため、茨城大の酒井忠勝*5君という僕と同期の友達と2人で研究をしました。先ほどメソンの仲間にはいろいろな粒子があるといいましたが、そのうちの ρ メソンとよばれるメソンと a_1 メソンとよばれるメソンの質量の比を計算したところ、その計算結果は1.53ぐらいでした。実験値は1.59ぐらいですので、ぴったり一致はしなかったけれども、かなり近い値が出ました。それから、 π 中間子の大きさ(電荷の広がり具合)を表す量も計算してみると、その計算結果は0.690fmになりました。実験値が0.672fmですので、これもかなり近いですね。ちなみに単位はfm(フェムトメートル)といって、1fmは1000兆分の1メートルというとても小さな長さです。素粒子に基づく理論で計算しても、実験値と近い値が得られることがわかっていますので、双対性の予想のとおり、どうやらどちらの見方をしてもうまくいきそうだと期待できます。

おわりに

このようにして、この世は何でできているのかを考えていった結果、原子論や素粒子の理論を経て、弦理論という理論に行きつきました。この理論はあらゆる物質がたった1種類のひもから構成されるという驚くべき見方を提供し、これこそ究極の物質像になるかと思いきや、もしかしたら、ひもの理論と素粒子の理論は見かけは

違っけれど同じ理論であるという可能性もある、という理解に達しました。

さて、今度こそ、これで話は終わりでしょか。もちろん、終わりではないでしょう。歴史を振り返ってみても、これまで何度も「これが答えかな」という理解に達しては、その後新しいアイデアや実験結果が出てきて、世界観が塗り替えられるということを経験してきました。今後も今の私たちに想像もつかないような、さらなる大どんでん返しがあるに違いありません。というわけで、まだまだ旅は続きそうです。皆さんも、寝る前などに「この世は何でできているのか」について思いを巡らせてみてはいかがでしょうか。

*3 南部陽一郎(1921-)

シカゴ大学・大阪市立大学名誉教授。対称性の自発的破れの概念や強い相互作用におけるカラーの自由度の導入、弦理論の提唱など、多くの先駆的な業績がある。文化勲章(1978)。

*4 J.マルダセナ(1968-)

プリンストン高等研究所教授。AdS/CFT対応とよばれるゲージ理論と重力理論との間の対応関係を予想した。

*5 酒井忠勝(1972-)

茨城大学准教授。

◎参考文献

「物理法則はいかにして発見されたか」

リチャード・ファインマン著／岩波書店刊

「クォーク-素粒子物理はどこまで進んできたか」

南部陽一郎著／講談社刊(ブルーバックス)

「エレガントな宇宙-超ひも理論がすべてを解明する」

ブライアン・グリーン著／草思社刊



驚きの双対性 — 鏡の国のゲン —

菅野浩明 大学院多元数理科学研究科教授



Hiroaki Kanno

1960年生まれ。京都大学理学部卒。京都大学理学博士(1989)。理論物理学国際センター博士研究員、仁科記念財団海外派遣研究員等を経て、1993年広島大学大学院理学研究科助手。同助教授を経て2001年多元数理科学研究科助教授。2004年より現職。

本日は超弦理論のもつ数学的な側面をお話したいと思います。超弦理論が数学に一番大きなインパクトを与えたアイデアとして、双対性の例であるミラー対称性があります。イギリスの数学者ルイス・キャロル(本名はチャールズ・ドジソン)が書いた「鏡の国のアリス」という有名なお話がありますが、それをまねた「鏡の国のゲン」という副題はそのミラー対称性に由来します。

超弦理論と双対性の数学的魅力

まず、次のような問いを考えてみてください。「学問としての数学を特徴づける最も重要な要素は何か?」。この答えは人によって違うと思いますが、たとえば典型的な答えの1つは「数学は論理的に厳密である」というものです。また「数

学における定理は、一度証明されたら未来永劫変わらない絶対不変の真理である」と答える人もいるでしょう。これらはもちろん間違っていないと思うのですが、私が今日のお話で、強調したい点は少し違います。私の考える数学の重要なポイントは、「一見まったく異なるものが結びつくことを発見する『驚き』」です。歴史的に見ると高校で学ぶ微分積分学が、まさにこのような『驚き』の例となっています。微分積分学を知らなければ、曲線の接線を求めるという問題と図形の長さや面積を求める問題は、まったく別の問題だと考えてしまいます。しかし、微分積分学によって接線を計算する微分の問題と面積を求めるという積分の問題が互いに逆の関係にあるという事実が明らかになりました。

このお話のテーマである双対性には、コインの表と裏、昼と夜、フィルムの陰画と陽画といったように対照的なあるいは相補的な2つの概念が登場します。数学における双対性は抽象的で説明が難しいのですが、物理学には次のような例があります。古くから知られているものは電気と磁気の関係です。電気と磁気は一見異なる物理的現象に見えますが、実はそれは同じものの二面性に他なりません。また量子論に現れる双対性として、光の粒子性と波動性があります。光は1つ2つと数えることが可能な粒子という側面と、互いに干渉し合い打ち消したり増幅したりする波という側面をもっています。そのどちらも光のもつ性質であるし、一方だけでは光のもつ性質を完全に理解することはできません。このように双対性を考える場合には、量や概念が必ず2つの組として現れ、それらが中心的役割を担いますが、この2つを入れかえても、理論が何らかの意味で変わらないと見なせるとき、すなわち同じ結果が得られるとき、その理論には双対性があるといえます。

理論に双対性があるとき、その双対性を上手に使うと思わぬ問題が結びつきあい、問題が解ける、それが数学的にみたとときの双対性の『驚き』です。超弦理論のもつ数学的性質で最も特徴的なものは、さまざまなかたちで現れる理論の双対性です。このため超弦理論では、双対性によって微分積分学の場合と同様に一見異なる数学の問題が結びつくことがしばしば起こります。超弦理論は「一見まったく異なるものが結びつくことを発見する『驚き』」を豊かにもつ理論になっているのです。

ミラー対称性がつなぐ2つの世界

ここで少々難しい話になります。実は超弦理論というのは数学的に見ると10次元の空間でないとうまく定式化することができません。しかし相対性理論によれば我々が住んでいるのは、時間が1次元と空間が3次元の4次元の空間です。だから先ほどお話のあった素粒子の理論のように、実際に我々が観測する物理的な状況、すなわち時間1次元、空間3次元の4次元の状況を説明するためには残り6次元が必要になります。この残り6次元の空間の幾何学が超弦理論から4次元の空間の我々の物理学を引き出

すために重要な役割を果たしています。超弦理論のもつ双対性のなかで数学に一番大きなインパクトを与えたのはミラー対称性です。そのミラー対称性について説明してみましょう。

上に説明したように超弦理論では6次元空間を決めることにより4次元の物理が決まります。このとき2つの6次元空間MとWが、ミラー対称性をもっているとは次のようなことを意味します。6次元の空間としてMを使って計算をしても、Wを使って計算をしても4次元空間の物理学に対して同じ結果を与えること、すなわち、互いに鏡で映したような2つの空間MとWがあって、空間Mを用いて計算した結果と空間Wを用いて計算した結果が区別できないことを超弦理論のミラー対称性といいます。

6次元空間というと抽象的でわかりにくいかもしれませんが、少し乱暴ですが人間の体格を例にミラー対称性を説明してみましょう。今、人間の身長(センチメートル単位で計る)と下桁の数値と体重(キログラム単位で計る)の数値を入れかえてしまう魔法の鏡があったとします。これは、体重が気になる人には便利な鏡ですね。このとき、身長180cm、体重50kgのAさんと、身長150cm、体重80kgのBさんが、上で説明した互いに鏡で映した空間MとWの関係に当たります。ここで我々が実際に6次元空間を見ることができないのと同様に、2人は遠く離れたところにいてマイクを通して歌声だけが聴けるとします。この歌声が超弦理論から計算できる4次元空間の物理的結果に当たります。ミラー対称性とはAさんの歌声とBさんの歌声は(2人の姿が直接見えないとすると)まったく区別がつかないことを意味します(図1)。



さて、我々はBさんの歌声が知りたいのですが、マイクがBさんには手が届かない非常に高い位置にあったとします。ここでAさんの出番が来ます。身長の高いAさんはマイクに手が届きます。ミラー対称性からAさんとBさんは同じ歌声をもっているのです。かわりにAさんの歌声を聞かせてもらえばよいわけです。これで問題解決です。

超弦理論のミラー対称性に関する数学でも、これと同じようなことが起こります。超弦理論で空間Mを使っても、Wを使っても4次元で見た計算結果は同じなのですが、一般に空間Mで考える数学の問題は、空間Wではまったく別の数学の問題になります。互いにミラー対称性でつながる2つの空間から得られる物理的な理論は同じだということから、Mで考えた数学の問題が解ければ、対応するWで考えた数学の問題が解け、またこの逆も起こります。このようにして超弦理論のミラー対称性からさまざまな数学的な予想が導かれたり、ミラー対称性を知らないと多分こんな方法は思いつかないであろうといったやり方で難しい問題が解けたりします。



図1 ミラー対称性

ミラー対称性を人間の体格にたとえてみる。身長180cm、体重50kgのAさんと身長150cm、体重80kgのBさんが互いに魔法の鏡で写り合う。2人の姿が見えないときAさんの歌声とBさんの歌声はまったく区別がつかない。

対象を『集まり』でとらえる

ミラー対称性のような超弦理論の双対性は、一見異なる数学的問題を結びつけますが、その際、対象を『集まり』でとらえることが重要になります。ミラー対称性の説明で体格が異なるAさんとBさんの歌声の区別がつかないことをたとえ話としましたが、人間の声も体格や声帯のかたち、口の大きさなどそれをかたちづくる物理学的あるいは生理学的なさまざまな要素が集まった結果として私たちの耳に達していることを思い起こしてください。また、微分積分学にも、この考え方が現れています。微分と積分の関係は、単に1点における接線や1つの図形の面積を考えていただけでは見えてきません。微分の場合には、曲線上の各点での接線を集めて導関数とよばれる関数を考える必要があります。積分については、面積を計算する際、図形のサイズや図形を切る位置などをいろいろかえて面積の変化を表す原始関数とよばれる関数をつくります。空間の座標の関数である導関数や原始関数といった、問題となる対象を集まりととらえた関数をつくと、それらの関数を通して微分と積分の関係がより明確にとらえられるわけです。

次に身近なところから、対象を『集まり』としてとらえることによって思わぬ結びつきが見えてくるという一例を紹介します。それは黄金比とフィボナッチ数列の関係です(図2)。

【黄金比】
 $\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2} = 1.61803398\dots$





【フィボナッチ数列】
 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, …

図2 黄金比とフィボナッチ数列

「黄金比」はユークリッドによってはじめて定義された。線分を2つに分割する際、線分全体と長い方の切片の比が長い方の切片と短い方の切片の比に等しいとき黄金比に分割されたという。黄金比は古くから最も美しい比率であるといわれ、ギリシャのアクロポリスの丘にあるパルテノン神殿をはじめとして多くの芸術作品に取り入れられている。一方、フィボナッチ数列は自然界に多く見られる。たとえば、ひまわりの種は中心から端に向かって螺旋状に並んでいるが、右巻きと左巻きの螺旋の数はいずれも必ずフィボナッチ数列に現れる数になっている。この両者の関係をはじめて指摘したのはケプラーであるといわれている。

『集まり』としてとらえるという考え方に立つと、この2つには密接な関係があるということがわかります。黄金比とは、最も美しいとされている比で、 $1:(1+\sqrt{5})/2$ で表されます。この比でつくられる長方形は美学的にみて大変美しいとされていて、たとえばギリシャのパルテノン神殿はこの比を用いて建築されています。



一方、フィボナッチ数列は、13世紀にイタリアでフィボナッチという商人が考えたウサギの繁殖の問題に現れるのでこの名があります。問題の詳細は省略しますが、数学的に表すと、 n か月後にいるウサギのつがいの数を F_n とすると、漸化式($F_n = F_{n-2} + F_{n-1}$)が成り立ちます。すなわち F_n はその2か月前のウサギのつがいの数と1か月前のウサギのつがいの数を加えることによって決まります。この漸化式とよばれる式によって定まる数列のことをフィボナッチ数列といいます(図3)。

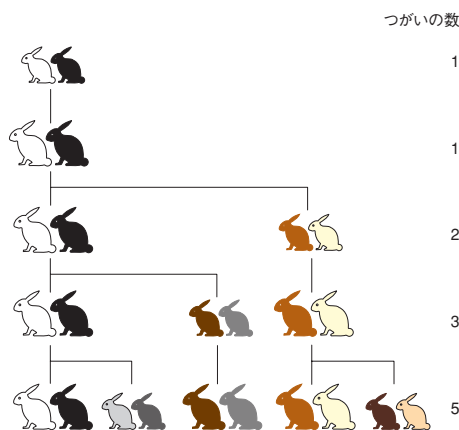


図3 フィボナッチの問題

ある男がウサギのつがいを壁で囲まれた場所に放した。どのつがいても毎月新しいつがいを生み、生まれたつがいは2か月後には次のつがいを生むとすれば、1年間に何つがいのウサギが生まれるだろうか。(算盤の書 12章より)

最初に1、次の月も1という条件のもとに、漸化式に従ってフィボナッチ数列をつくっていくと、1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, …といった数の並びが出てきます。黄金比との関係は次のように、これらの数を『集まり』としてとらえることによってわかります。すなわち、この数の並びを係数とする無限級数をつくり、数を『集まり』としてとらえる関数 $f(x)$ を考えます。さきほどの漸化式を用いると $f(x)$ は2つの分数式の和にして書けることがわかります(数式1)。

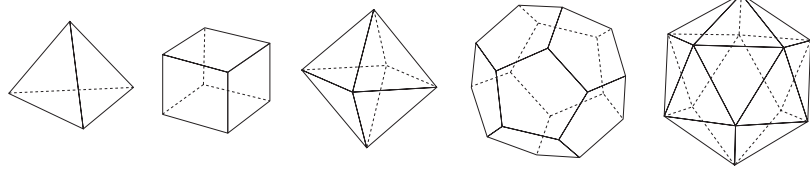
このとき分母に現れる数 ϕ が、まさしく黄金比になっています。このようにフィボナッチ数列に現れる数を1つ1つばらばらに見ると、単なる自然数の並びなのですが、それをひとまとめにして関数 $f(x)$ を計算してみると不思議なことに無理数である黄金比 ϕ が見えてきます。ここで(部分分数分解をする際に)現れた2つの数 ϕ と $\tilde{\phi}$ は2次方程式の解の組ですが、 ϕ と $\tilde{\phi}$ を入れかえても $f(x)$ は全体として符号が変わるだけです。これもある種の双対性といえなくもありません。フィボナッチ数列1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, …は、日常、我々が計算したり、実験で観測したりするデータにたとえられます。その背後には黄金比 ϕ にたとえられる「美しさ」が隠れており、我々がそれをとらえるためにそのペアとなる $\tilde{\phi}$ が必要となっているわけです。

$$\begin{aligned}
 f(x) &= x + x^2 + 2x^3 + 3x^4 + 5x^5 \\
 &\quad + 8x^6 + 13x^7 + 21x^8 \\
 &\quad + 34x^9 + 55x^{10} + \dots \\
 &= \frac{x}{1-x-x^2} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{5}} \left(\frac{1}{1-\phi x} - \frac{1}{1-\tilde{\phi} x} \right) \\
 \phi &= \frac{1+\sqrt{5}}{2}, \quad \tilde{\phi} = \frac{1-\sqrt{5}}{2}
 \end{aligned}$$

数式1 フィボナッチ数列の母関数

フィボナッチ数列の n 番目の数を x^n の係数とする関数(無限級数) $f(x)$ を計算してみると、漸化式を用いて2つの分数式の和に書き表すことができる。このとき分母に黄金比 ϕ が現れる。分母に現れた2つの数 ϕ と $\tilde{\phi}$ は2次方程式の解として得られた組であるが、 ϕ と $\tilde{\phi}$ を入れ換えても $f(x)$ は全体として符号が変わるだけで、これもある種の双対性が見せる。フィボナッチ数列1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, …は、日常、我々がものを数えたり、観測したりするデータにたとえられる。その背後に隠れている「美しさ」＝黄金比 ϕ は、そのペアとなる数 $\tilde{\phi}$ の助けを借りることにより自然数を生み出している。

さきほど、ミラー対称性によって、空間Mで考えた問題が空間Wではまったく別の問題に置きかわるという話をしましたが、実はそのような問題の置きかえをするときも、対象を『集まり』としてとらえる考え方が重要になります。たとえば、空間Mにおいて対象を『集まり』でとらえて定義した関数の性質が、空間Wに映して調べみると美しくわかりやすい性質になっていたりします。なお、同じような考え方をを用いて定義される関数を物理学では分配関数とよんでいます。



幾何学的不変量の計算
 $(\text{面の数}) - (\text{辺の数}) + (\text{頂点の数}) = 2$

図4 オイラーの多面体定理と幾何学的不変量

3次元空間の正多面体は上の5種類しかないことが知られているが、どの正多面体に対しても(面の数)-(辺の数)+(頂点の数)=2が成り立つ。これは今年、生誕300年を迎えたオイラーによる結果である。実は、この等式は角をまるめることで連続的に球面へ変形できるすべての多面体について成り立つ。このように図形を連続的に変形しても変わらない数を幾何学的不変量という(本誌第2号P.16参照)。

超弦理論と数学の新概念

今日お話しした話題に関連して、実際に数学の問題あるいは物理の問題として、現在、どうということが研究されているかについて触れておきます。以下で紹介する2つの問題は、ともにある条件をみだすものを数え上げる問題であるという点が共通しています。

物理学における問題としてはブラックホールのエントロピーを挙げることができます。エントロピーとは乱雑さを表す概念です。たとえば、きれいに整理整頓された机の上よりも、ぐちゃぐちゃになっている机の上のほうがエントロピーが高い状態です。物理学には、余計なエネルギーを加えなければエントロピーは決して減少せず、増加する一方であるという重要な法則があります。机の上は、ほっておくと乱雑になる一方、ということですね。エントロピーというのは物理のありとあらゆる場面に現れますが、ブラックホールという光さえも吸い込んでしまう存在に対しても、エントロピーを考えることができます。ホーキング*博士らは、熱力学的考察に基づいて、ブラックホールのエントロピーは、ブラックホールの表面積、つまり大きさに比例することを示しました。ブラックホールにとってエントロピーが増加する一方、というのは太っていく一方ということの意味していました。

一方、統計力学ではエントロピーとは物理系の状態の数を数えるということによって定義される概念です。いろいろな状態がたくさん混じり合っているほど、エントロピーが高いというわけです。超弦理論を使うと統計力学的に状態の数を数えることによってブラックホールのエントロピーを計算することができます。その結果は熱力学的考察からホーキング博士らによって提唱された公式に一致することが最近わかりました。超弦

理論で、ブラックホールのエントロピーを求めることに成功したのです。

一方、数学では系の状態を数え上げるかわりに図形の数え上げによって幾何学的不変量を定義することができます。一番有名な例として正多面体に関する数え上げがあります。空間の中の正多面体として5種類が知られていますが、いずれの場合も、その面の数から辺の数を引いて頂点の数を足すと必ず2になります(図4)。

同様に与えられた図形から定まる、いろいろな数の適当な組み合わせから不変量をつくることができます。正多面体の場合は、目で見て数えられるのですが、一般には非常に難しい数え上げの問題を使って不変量が定義されています。それらがミラー対称性を使うとまったく別な問題として簡単に求められたりします。これは、現在、私が取り組んでいる研究テーマでもあります。

最後に、超弦理論はことによるとまったく新しい数学上の概念を必要としているのかもしれないということを述べたいと思います。このお話の最初に数学における『驚き』の例として微分積分学をあげましたが、微分積分学の数学的基礎付けには、接線を取る際に無限に近づけるといような極限という新しい概念の導入が必要でした。超弦理論の双対性に関しても同様に数学的に新しい概念が必要なかもしれないのです。宇宙論の通俗的な解説書ではあまり触れられていませんが、宇宙には外側(入れ物)という概念はありません。普通は幾何学というと、平面や空間という入れ物のなかに三角形や球面といった図形を入れて、その性質を調べることがイメージします。しかし宇宙の幾何学を記述するには「入れ物のない幾何学」をつくる必要

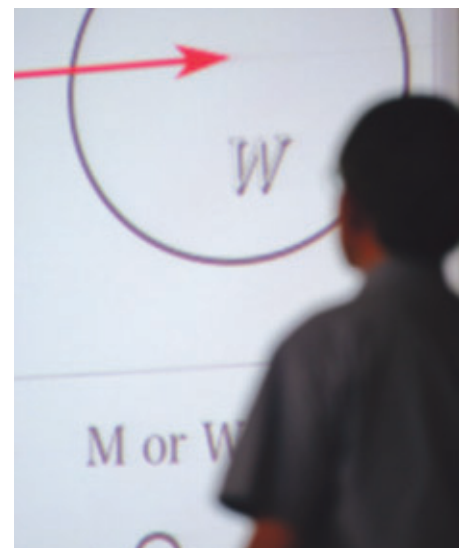
があるのです。これと同じように、これまで我々は幾何学を考えるときには常に点を基本的な概念として考えてきたのですが、超弦理論の数学では「点のない幾何学」をつくる必要があるのではないかと考えられています。超弦理論は数学に対して新しい概念を要求していることを強調して、私の話を閉じたいと思います。ありがとうございました。

* S.ホーキング(1942-)

ケンブリッジ大学ルークス記念講座教授。「ブラックホールの蒸発理論」や相対性理論に量子論を取り入れた「無境界仮説」を提唱した。

◎参考文献

- 「エレガントな宇宙-超ひも理論がすべてを解明する」
 プライアン・グリーン著/草思社刊
- 「フィボナッチのうさぎ-数学探検旅行」
 キース・ボール著/青土社刊
- 「ガリレオの指-現代科学を動かす10大理論」
 ビーター・アトキンス著/早川書房刊



隕石によって供給される 生命出発物質

三村 耕一 地球環境科学専攻准教授

地球生命の起源は？

どのようにして地球に生命体が誕生したのだろうか。現在、最も広く受け入れられている考え方はオパーリン^{*1}説であろう。この説によると地球に生命が発生するには、まず、初期地球（46億から38億年前の地球）に簡単な有機物が供給される必要があるという。そんななか、ミラー^{*2}は還元的な混合気体への放電実験によって、いとも簡単に有機物の合成に成功した。その当時は、この成果によって、地球への有機物供給は完全に説明できたかのように思われた。しかし、その後、初期地球は還元的ではなく酸化的大気組成であったことがわかってくるとともに、酸化

的な気体への放電では有機物は合成されにくいことも明らかになってきた。そこで、注目されるようになったのが“隕石による有機物の供給”である。

隕石^{*3}の中には、炭素質隕石とよばれる多量の有機物を含むものがある。マーチソン隕石(図1)は落下直後に回収されたため、地球での有機物汚染がきわめて少なく、地球外有機物の研究に最適の試料である。これまでにマーチソン隕石から、重量にして約2%程度と少ないものの、生命体をつくるにあたって重要な有機物である脂肪酸、アミノ酸、炭化水素、リン酸など、さまざまな有機物^{*4}が検出されている(図1)。

有機物が供給されるために

さて、隕石中の有機物が地球に供給されるためには、有機物を含む隕石が地球にたくさん落ちてくればそれで良いのだろうか。宇宙空間を移動していた隕石は、高速で地球に衝突する。物体が他の物体に衝突するときには必ず衝撃波が発生し、物体は衝撃圧縮^{*5}されて温度と圧力が急上昇する。一方、有機物は温度と圧力の変化に敏感なため、衝撃により高温・高圧状態になった隕石中では、反応してより複雑なものに変化していくだろう。しかし、さらに激しい圧縮を被ったものは完全に分解して“単なる炭素”(“すす”やダイヤモンド)になってしまう。その場合、隕石に生命体にとって魅力的な有機物がどれだけ多く存在していても、生命体が発生する過程で重要な役割を果たすことはないだろう。そこで我々は、隕石中に存在する有機物が衝撃を経験したとき、どのように変化するのかを探るための衝撃実験を行うことにした(図2)。



Koichi Mimura

1966年茨城県生まれ。名古屋大学大学院理学研究科修了。名古屋大学理学部助手などを経て、2005年より現職。専門は地球化学。

有機物供給の条件とは？

本来なら、隕石に衝撃を与えて、その中のさまざまな有機物がそれぞれどうなるかを調べるのが最善の策であろう。しかし、衝撃実験ではごくわずかの試料しか使用できず、そのわずかな隕石から有機物を分析するのは技術的に困難である。そこで、隕石中に多く存在する有機物の代用物として純粋試薬を使用して、実験を行った。これまでに、生命の起源とも密接に関係すると考えられている多環式芳香族炭化水素 (polycyclic aromatic hydrocarbons: PAHs)^{*6}と脂肪酸について実験を行ってきた。その結果、PAHsと脂肪酸は、低い衝撃圧力では複雑な有機物に変化するが、それぞれ30GPa^{*7}と25GPaを超えると、そのほとんどが分解して“すす”になることがわかった。逆に衝撃圧力が30GPaと25GPa以下であれば、PAHsと脂肪酸は分解されずに地球に供給される。衝突で発生する圧力は、物体の速度と物性によって決まる。よって、PAHsと脂肪酸が隕石を通じて地球に供給されるための制約条件を見積もるには、隕石が地球に衝突する速度と衝撃圧力の関係を算出すればよい。初期地球は広い海に覆われていて、隕石は海に落下した可能性が高いため、隕石と海の衝突を考えた(図3)。

これによると、PAHsと脂肪酸が隕石によって供給されるには、衝突速度がそれぞれ6km/sと5.3km/s以下でなければならない。この速度は、隕石が宇宙から地球にやってくる際の典型的な速度、つまり地球からの脱出速度(11.2km/s)に比べて、ずいぶん小さい。これでは、PAHsも脂肪酸はもちろん、アミノ酸のように脂肪酸よりも分解されやすい有機物は生き残れないように思える。しかし、初期地球は現在よりもはるかに厚い(10気圧以上)大気に覆われており、その大気がブレーキとして働いたため、隕石が地球表面にぶつかる速度は劇的に小さくなることがわかっていて、この減速効果は隕石の地球への軟着陸を可能とし、PAHsと脂肪酸が生き残るための条件を十分に満たすことになるであろう。つまり、隕石によって有機物が地球にもたらされたという仮説は、けっして絵空事ではないのである。

近年の月クレータの研究によれば、初期地球には多量の隕石が衝突していたことがわかってきており、衝突によって複雑に変化した隕石中の有機物が初期地球に供給され、地球生命体の起源物質になったというシナリオはますます魅力的になってきた。かくして我々は、分厚い大気をまとった40億年前の地球のすがたに思いをはせながら、生命の起源を解明すべく研究を続けている。

*1 A.オバーリン(1894-1980)

ソ連の生化学者。1924年の著書『生命の起源』のなかで、「最初に無機物から簡単な有機物が発生し、その有機物が集まってより複雑な有機物が生まれ、これらの有機物から高分子物質ができ、さらにいくつもの大きな分子が集合してコロイドをつくり、それらが変化、発展して生命の誕生に至った」という考え方を発表した。

*2 S.ミラー(1930-2007)

アメリカの化学者。1953年、初期地球大気の組成を模した還元的な気体(H₂, CH₄, NH₃)と水蒸気に火花放電を行い、アミノ酸をはじめとするさまざまな有機物の合成に成功した。現在では、初期地球大気は酸化的な気体(H₂O, CO₂, N₂)であったという考え方が主流である。

*3 隕石

隕石は大きく次の3タイプに分けられる。鉄隕石(主に鉄・ニッケル合金からなる)、石鉄隕石(鉄・ニッケル合金と鉱物からなる)、石質隕石(主に鉱物からなる)。炭素質隕石は石質隕石の1つ。

*4 さまざまな有機物

検出された有機物を存在度の高い順に並べると、不溶性高分子有機物、脂肪酸、スルホン酸、アミノ酸、芳香族炭化水素、脂肪族炭化水素、アルコール、カルボニル化合物、アミン、アミド、窒素を含む複素環式化合物、リン酸となる。

*5 衝撃圧縮

固体または液体中に衝撃波を伝播させ、慣性力により高压状態を実現させること。この圧縮は断熱圧縮であるため、圧力の上昇によって温度も上昇する。

*6 多環式芳香族炭化水素

ベンゼン環がいくつか縮重合してできた化合物。たとえば、ナフタレン、フェナントレンなど。

*7 30GPa

G(ギガ)は10⁹。Pa=10⁻⁵bar。よって、30GPaは約30万気圧である。



図1 マーチソン隕石

1969年、オーストラリアのマーチソンという町に落下した。この隕石は地表に到達する前に空中爆発してバラバラになり、合計100kg程度が回収された。隕石表面のなめらかで黒い部分は、地球大気との摩擦で溶けたもの(フェュージョンクラスト)。内部の白い粒(コンドリュール)は原始太陽系星雲の情報を持っている。(Mr. Strophe提供)



図2 衝撃実験装置

(左) 衝撃実験用の銃。火薬を爆発させて2km/sまで弾丸を加速させることができる。(右) 弾丸を衝突させる前・後の反応容器。試料を反応容器に封入し、その容器に弾丸を衝突させることで衝撃波を試料に作用させる。高速の弾丸が衝突すると、反応容器(ステンレス)の表面が溶けてクレターができる。

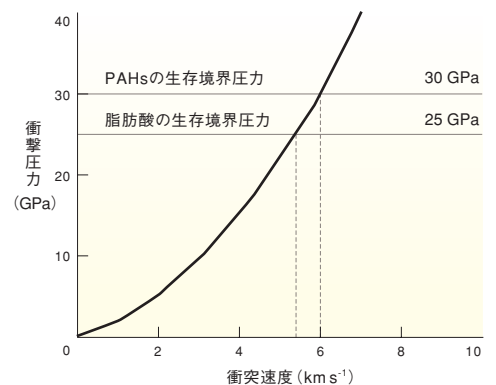
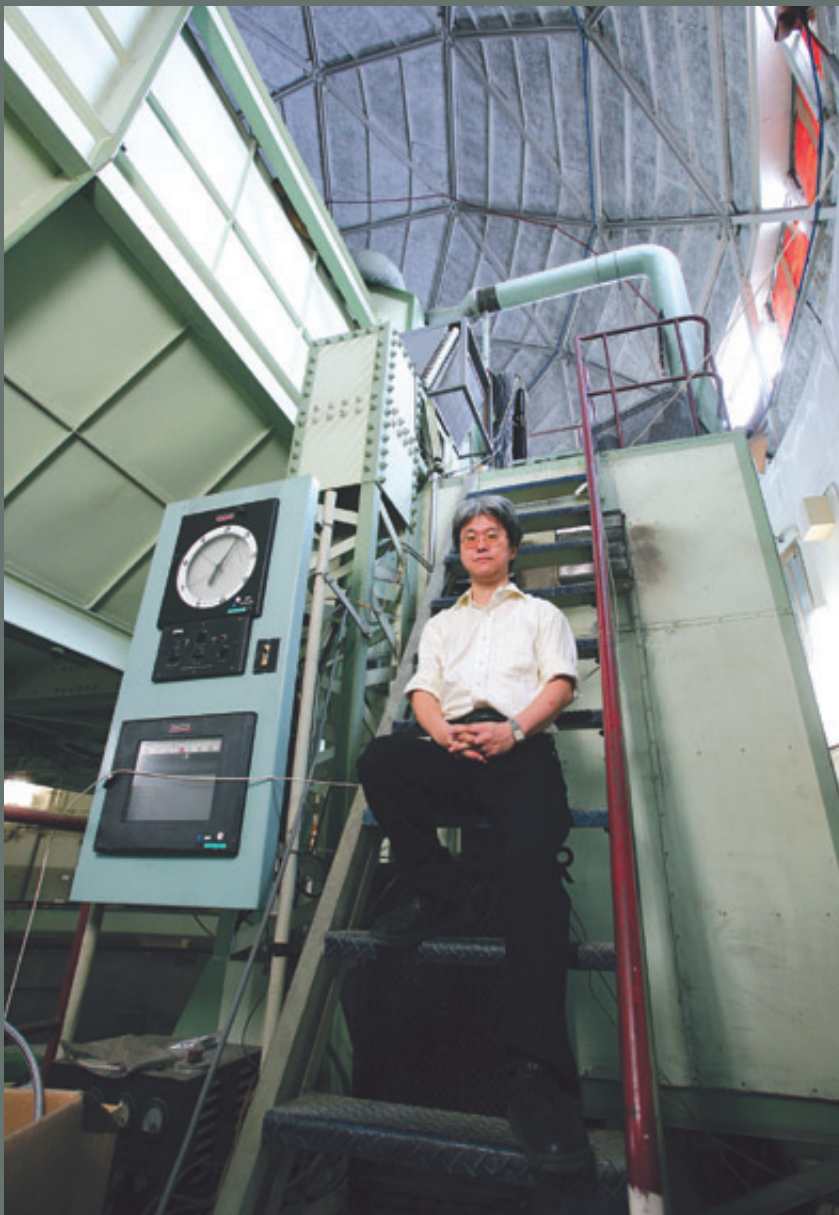


図3 炭素質隕石が海に衝突したときの衝撃速度と衝撃圧力の関係

宇宙と素粒子の交差する 超高エネルギー最前線に挑む

伊藤好孝 太陽地球環境研究所教授



Yoshitaka Itou

1965年名古屋生まれ。95年京都大学大学院理学研究科単位取得退学、同年東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設助手、2000年同助教授を経て、2005年から現職。専門は宇宙線、ニュートリノ、暗黒物質など、宇宙と素粒子の境界分野の実験に取り組む。

「ない」はずのものが「ある」

宇宙線とは宇宙から地球に降り注ぐ放射線で、宇宙のどこかで加速されて飛んでくる高エネルギー陽子が主成分である。宇宙線はかつて素粒子物理学の黎明期を担い、数々の未知の素粒子の発見をもたらした。また宇宙の高エネルギー現象を探る「眼」として、今日のX線天文学やガンマ線天文学の母体となった。そして今日、地上の加速器では研究不可能な高エネルギー物理や未知の素粒子を宇宙に求めて、宇宙線の研究は素粒子物理と宇宙物理にまたがる最前線となっている。

宇宙線はどこまで高いエネルギーのものまで存在しているのだろうか。最近の観測では、 10^{20} 電子ボルト*1という超高エネルギーをもつものが見つかっている(図1)。これは地上の加速器で生成可能なエネルギーの8桁上である。こんな高エネルギーの粒子を生み出す場所が宇宙のどこにあるのか、という疑問もさることながら、ここには別の大問題がある。宇宙には宇宙背景放射とよばれるビッグバンの名残の光子が充滿している。宇宙線のエネルギーが 4×10^{19} 電子ボルト以上になると、この光子と衝突して地球に届くまでにエネルギーを失ってしまうはずなのである。もし観測事実が本当なら、宇宙で何か我々の思いもつかないこと、たとえば相対性理論の破れや、未知の素粒子の反応などが起こっているのかもしれない。この問題は「最高エネルギー宇宙線問題」とよばれ、現代物理学の根幹も揺るがしかねない問題をはらんでいるのだ。これまでいくつかの実験グループが観測結果を発表しているが、 10^{20} 電子ボルト以上の宇宙線が「ある」という結果と「ない」という結果に分かれて論争が続いている。

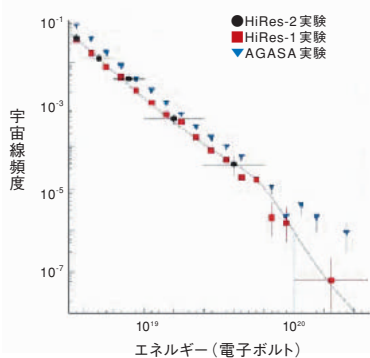


図1 最高エネルギー領域での宇宙線のエネルギー分布

青い下向き三角は日本のAGASA (明野広域空気シャワー観測) 実験、黒丸と赤い四角はアメリカのHiRes (High Resolution Fly's Eye) 実験の結果を表す。AGASAでは明らかに 10^{20} 電子ボルトを超える宇宙線が検出されているが、HiResでははっきりとした兆候は見られない。果たして 10^{20} 電子ボルト以上の宇宙線が飛んできているのかどうかで論争が続いている。

[10^{17} 電子ボルトの陽子と静止陽子の衝突]

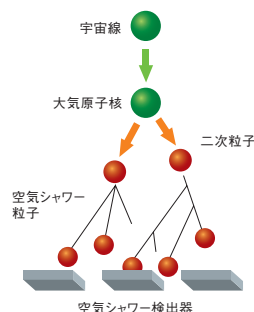
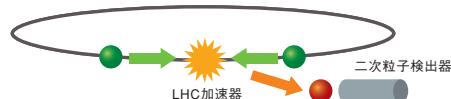


図2 加速器による宇宙線の空気シャワー現象の検証

(左) 宇宙線は大気の原子核中の陽子と衝突してたくさんの二次粒子を生成する空気シャワー現象を起こす。この二次粒子の測定から宇宙線のエネルギーが推定できる。しかしこのような高エネルギーでの陽子の反応はよくわかっていない。(下) 7テラ電子ボルトの陽子の正面衝突をつくりだす加速器LHCは、 10^{12} 乗電子ボルト相当の宇宙線反応を再現する。ちょうど陽子ビームの方向に出る二次粒子が、空気シャワー粒子の成分に対応する。

[7×10^{12} 電子ボルトの陽子同士の衝突]



謎に迫る6番目の実験

けれども宇宙線のエネルギーを測るのはそう単純ではない。このような超高エネルギーの宇宙線は到来頻度が少ないので、数千平方キロメートルにわたる地球大気自身が検出器の一部として利用される。宇宙線が空気と衝突すると、たくさんの二次粒子を撒き散らす「空気シャワー」が起こる。この二次粒子を測定して宇宙線エネルギーが見積もられる。宇宙線エネルギーと空気シャワー中の二次粒子の関係は、過去の加速器実験のデータから調べられているのだが、問題はそれが加速器で得られる程度のエネルギーに限られていることである。はたして我々の宇宙線と空気との反応過程の理解は、 10^{20} 電子ボルトという超高エネルギーでも正しいのだろうか。

我々はこの質問に答えるためにはやはり加速器実験で実証するしかないと考えている。スイスのジュネーブ近郊にある欧州原子核研究機

構 (CERN) は加速器実験のメッカであり、来年から史上最高エネルギーの陽子陽子衝突型加速器LHC*2が稼動する。LHCでは超高エネルギーに加速された陽子と陽子が正面衝突を起こし、最高エネルギー宇宙線まであと少しの 10^{17} 電子ボルト相当の反応が起こる。ここでは素粒子の統一理論の研究のため、日本の素粒子物理学者も多く参加するATLAS実験*3など5つの実験が行われる予定だ。しかし宇宙線の空気シャワーの理解に重要なデータは、通常の素粒子実験が測定を行わない領域である。そこで名大宇宙線グループが中心となって、 10^{20} 電子ボルトの宇宙線のエネルギー再構成が本当に正しいか実証するため、LHC6番目の実験「LHCf」を行う予定である(図2)。前述のATLAS実験から140m離れた加速器の一部に自前の小型検出器を組み込み、LHC加速器の試運転時に

ちょっとデータをとらせてもらおう(図3)。数千人の巨大組織であるLHCの中で総勢20人のミニ実験だが、最高エネルギー宇宙線問題の決着に不可欠のデータと信じて、来年春の本番に向けて奮闘中である。

我々宇宙線研究室では他にも、大マゼラン雲や銀河系の中心部分を毎晩望遠鏡で観測している。重力マイクロレンズ現象*4という非常にまれに起こる星の増光現象を利用して、銀河の暗黒物質や太陽系外の惑星など、通常の観測手段では暗すぎて見つからない天体をその重力の痕跡から探索する目的である。文字通り星の数だけあるデータの中から非常にまれな現象をより分ける作業は、従来の天文学よりむしろ素粒子実験に近いところもある。素粒子と宇宙の交差する領域は、我々宇宙線物理学者が好んで住む場所なのだ。

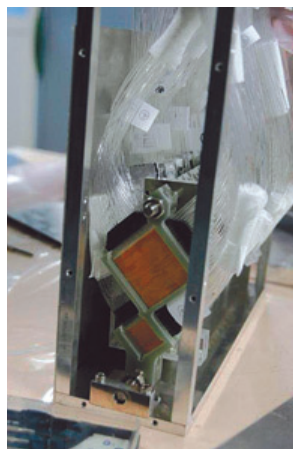


図3 LHCf実験用小型電磁シャワー検出器

(左) 2cm角と4cm角のペアから成り、それぞれ7mmのタングステン板とシンチレーター(放射線が通ると光る物質)を交互に積み重ねてつくられている。光を読みだすファイバーがぎざり並んでいる。LHC加速器の一部の10cmの隙間部分に入れるため、非常にコンパクトにつくられた。(上) 検出器完成を祝って、記念撮影のスタッフ、大学院生の諸氏。

*1 10^{20} 電子ボルト

電子ボルトとは、1個の電子を1Vの電場で加速したときに得られるエネルギーで、1電子ボルトは約 1.6×10^{-19} ジュール相当。 10^{20} 電子ボルトの陽子は1個で約10ジュールものエネルギーをもつことになる。

*2 LHC

Large Hadron Colliderの略で、 7×10^{12} 電子ボルトに加速された陽子同士を正面衝突させる。

*3 ATLAS実験

LHCで実験を行う世界数千人の共同研究者からなるグループ。陽子陽子の衝突点に巨大で複雑な素粒子検出器を設置して素粒子の統一模型の研究を行う。

*4 重力マイクロレンズ現象

2つの星が一直線上に並んだとき、背景の星の光が途中の星の重力で曲げられ、一時的にレンズのように集光する現象。起こる確率は数百万個の星を観測して年間1個たらずである。

星に見る宇宙のロマン

【宇宙物理学Ⅰ／3年前期】 ————— 國枝秀世 素粒子宇宙物理学専攻教授



講義に向かう途中に視線を落とすと、小雨に濡れて鮮やかな薄青紫色を放つ紫陽花が咲いている。このように我々は一年中風情があって美しいものに囲まれている。夜空に輝く星もまた、そのようなものの1つである。誰も一度くらいはこの夜空を見上げて宇宙への憧れを抱いたのではないだろうか。そんな宇宙の神秘に触れることができる講義が「宇宙物理学Ⅰ」だ。

「宇宙」と聞くと、そのイメージの大きさから尻込みしてしまう。実際、初期宇宙のゆらぎから多様な進化が行われてきた。しかし個々の現象を部分的に理解することは十分可能である。

物理学科3年生向けのこの講義は新築の建物の一室で「さあ、はじめようか」という掛け声から始まる。今回の講義は星の誕生や進化、寿命についてであった。黒板の隣にあるスクリーンにヘルツシュプルング・ラッセル図が登場する。この図を見ることで星の明るさから星団の年齢を知ることが可能である。図を見て、主系列の上方に位置する星は主系列の同じ表面温度の星に比べると明るい星である。つまり星そのものが巨大である巨星であり、老年期に入った星であることがわかる。一方、主系列の下方に位置する星は主系列の同じ表面温度の星に比べると暗い星である。このような星のほとんどは白色矮星であり、

核融合反応が停止してその一生を終えようとしている星と判断できる。

扱われている言葉に対する取材者の知識は随分いい加減であやふやである。しかし講義中に用いられる1枚の図を眺め、國枝先生のテンポの良い講義を聴いていると、それだけで大まかなストーリーは見えてくる。心地よい名調子な講義だ。

この他、名前だけ知っていた「超新星爆発」についての話も聞くことができた。太陽の8倍以上の質量がある星は大爆発で一生を終える。國枝先生の話によると、実はこの超新星爆発のプロセスはまだ完全には解明されていないようだ。現時点でさまざまな考え方があふらしく、このあたりの研究分野では5年も経つと今ある説に変わる新しい説が現れるという。まさしく日進月歩の研究現場である。このような最先端の研究状況まで垣間見ることができれば、学生の興味も尽きることがないだろう。

宇宙は今も膨張し広がり続けている。一方で平安時代の貴族の日記にも超新星爆発に関する記述がある。どうやら時代が変わっても我々が夜空を見上げ、宇宙へ憧れる心は不変のようである。
(取材・瀧 真語 多元数理科学専攻博士後期課程2年)



Hideyo Kumieda

1950年生まれ。名古屋大学理学部卒。理博(1982)。名古屋大学理学部助手、助教授、宇宙科学研究所教授を経て、現職。1986年・88年、NASAグレード研究所客員研究員。すざく衛星Project Scientist。

熱意と興味が呼応する講義

【基礎遺伝学Ⅰ／2年前期】——古賀章彦 生命理学専攻准教授

多くの人がメンデルという名をご存じだろう。有名なエンドウマメの交配実験によりメンデルの法則とよばれる遺伝に関する法則を発見した遺伝学の祖である。この遺伝子の概念がのちに認められてから、遺伝子研究が幅広く行われてきた。遺伝子は、生物の遺伝的な形質を規定する因子であり遺伝情報の単位である。そこには無限の可能性が秘められており、人々の関心を引きつけてやまない。最近ではヒトゲノムの全塩基配列が決定され、その結果大量に得られた情報をコンピュータ解析によって処理するバイオインフォマティクスという分野への応用が盛んである。

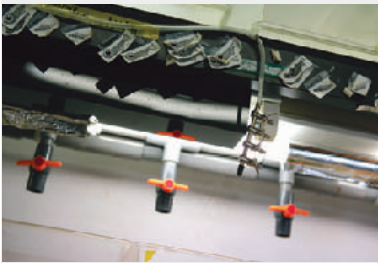
「基礎遺伝学Ⅰ」は生命理学科に配属されたばかりの学部2年を対象とし、分子生物学の基礎の学習を目的とした講義である。4人の先生のオムニバス形式で分担されており、その中で古賀先生が担当されたDNAの変異に関する講義を今回取材した。まず講義室に入ると、先生が学生と談笑している姿を目にした。のちに先生は「早く来過ぎただけ」とおっしゃっていたが、人柄なのであろうか。講義開始前から漂う和やかな雰囲気は新鮮なものであった。そこから始まった1時間半の講義は、分厚い教科書を手にして抱いた堅苦しいイメージに反し、笑いあり真剣な話ありでとてもメリハリが利いていた。穴埋め形式のプリントや

ノートに要点を書き込みながら聴講する学部生たちとともに有意義な時間を過ごすことができた。

講義の導入部分に格別の印象が残った。DNAの変異についてアニメーションを用い携帯電話による情報伝達を例にあげて明朗快活な話が展開された。「まずイメージを植えつけてもらい、さらに具体的な話から抽象的な話へ移るという方法により、学生に理解をより深めてほしい」という、学生のレベルを十分に考慮に入れた工夫がなされていた。また気さくに学生を指名して授業に参加させることで講義に自然と興味を向けさせるなど、教科書の内容を漠然と伝えるだけには終わらない細かな配慮が垣間見えた。先生の熱意に呼応するように学生たちも次第に講義にのめり込んでいく姿を体感できた。

先生は講義中とても楽しそうであり、塩基配列1つの変異でタンパク質への発現がまったく異なる遺伝子の世界の奥深さや面白さを伝えたいという情熱を醸し出していた。これから生物学を専門的に学ぼうとする学生たちは、古賀先生のような素晴らしい指導者との出会いに刺激を受けて高い志を抱くようになるのだろう。そのきっかけとなり得る講義に今回触れることができたのは貴重な体験となった。

(取材・三輪亮佳 物質理学専攻博士前期課程1年)



Akihiko Koga

1957年福岡県生まれ。九州大学大学院理学研究科修了。1996年より現職。専門は生物進化を志向した遺伝学。大学の飼育室でメダカの世話に明け暮れる。ときどき換気扇から迷い込むスズメの世話も。自宅ではオウムと犬の世話。

同窓生から

オール1の落ちこぼれ、教師になる

豊川高等学校教諭

宮本延春 (Masaharu Miyamoto)

私は、多くの人が大学生であるところに働いていた。その理由は、小学生の頃から始まったいじめが原因で学校が嫌いになり、学校嫌いが勉強嫌いへとつながり、高校へ進学することもなく働く道を選択したからである。

オール1の成績を取ったことも一度や二度ではない。また、中学を卒業時の学力は、数学は九九が二の段までしかいえなくて、国語は漢字で書けるのは自分の名前だけ、英語で知っている単語はbookのみという落ちこぼれであった。

社会に出ればいいこともあるかもしれないと淡い期待を抱いていたが、16歳で母を亡くし、18歳で父を亡くす悲劇に見舞われ、一人っ子で親戚つき合いのなかった私は、たった一人で世間の荒波を必死で生きるためだけに生きてきた。さまざまな苦汁を味わい、世の中の厳しさや、人の優しさと触れ合う中で、23歳のとき運命的な出逢いが訪れた。それはアインシュタインとの出逢いであった。初めての出逢いはテレビ番組だったが、その番組をきっかけにして知的好奇心に火がついた。これまで考えたことのない内容に、夢中になって何度も見た。その後、夜間定時制高校に進学し、名古屋大学へと進み、現在は母校の豊川高校で教師として毎日生徒とともに試行錯誤の日々を過ごしている。

昨年は、安部普三官房長官(当時)と再チャレンジについて意見交換する場をいただき、これを機会に現在では教育再生会議の委員に選ばれ、ますます忙しさに拍車がかかってきた。しかし、目の前の生徒を大事にして、自分ができることを誠心誠意務めていきたい。



撮影・井上孝明

キャンパス通信

理学部B館の改修が終了

事務部庶務掛長

丹下稔浩 (Toshihiro Tange)

理学部B館(延べ面積5969m²)は、昭和40~41年にかけて建設され、隣接する理学部A館およびC・D館とともに理学部の教育研究施設として長年使用されてきたが、建設後40年以上経過し老朽化が著しく、教育研究に支障をきたしていた。

また、建物の構造耐震指標であるIs値(Seismic Index of Structure:建築物の地震に対する安全性を数値化したもの)も0.21と低く、耐震性能も問題のある建物であった。そこで平成18年度、耐震補強工事を含めた内外装の全面改修工事を実施した。改修にあたっては、本学の学術憲章(アカデミックプラン)に掲げる「研究と教育の基本目標」に従い、教育研究環境改善と耐震補強(一般的に安全とされるIs値0.6を上まわる0.7を確保)を実施し、分散した実験研究室等を各専攻ごとに移行・集約配置するとともに、弾力的・流動的に利用できる全学共同利用スペースを建物面積の20%確保した。また、研究科や専攻の共用スペース、学生や研究者の交流ラウンジも併せて整備し、施設の効率的・流動的利用を促進できるような平面計画とした。

キャンパスの主要動線上に面する建物北側のデザインは、設備配管・空調室外機置き場としての設備バルコニーを設置し、目隠しを兼ねたタイル張り成型板の縦のラインとアルミルーバーによる横のラインで構成することで、キャンパス内の改修済み建物と調和を図った。

さらに、玄関へのスロープ、自動扉の設置、エレベータの設置などバリアフリーに対応した建物となっている。また、平成19年度には、理学部C・D館の改修工事が行われる。



キャンパス通信

構造生物学研究センターが発足

附属構造生物学研究センター長
前田雄一郎 (Yuichiro Maéda)

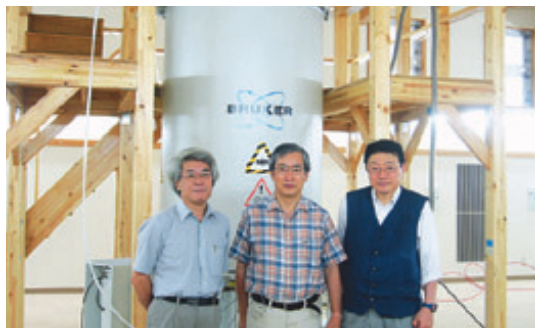
名古屋大学は優れた生物学研究で国際的にもよく知られる。しかし生物学の研究は急速に進歩しており、これからの生物学研究では、「構造生物学」の研究手法を積極的に取り入れていく必要がある。センターを設立するものためである。

それぞれの細胞機能には、それを中心的に担う蛋白質の集合体がある。これまではその集合体を探し出す研究が主であったが、これからはその集合体がどのように機能するかを解明することが必要になる。そのためにはまず蛋白質の詳しい立体構造をX線結晶学の方法を使って知る必要がある。また、これまでは立体構造を見て機能を推定していたが、立体構造の揺れを知ることができれば、機能をより深く理解できると予想される(本誌第12号P.8参照)。

本センターでは、蛋白質結晶構造解析だけでなく、構造の揺れを知るためのNMR法および計算科学、蛋白質の集合体の構造解析や細胞内での集合体の数と位置の測定に威力を発揮するクライオ電子顕微鏡法、など複数の手法の研究開発を行う。これからの生物学研究ではこれから複数の手法を組み合わせて使うことが必要となる。

すでに甲斐荘正恒氏の研究チームが研究拠点を首都大学東京から本センターに移し、国際的にも大きく注目されているSAIL-NMR法の開発研究を開始している。近い将来、試料を超低温に保持するクライオ電子顕微鏡の研究チームの招致を実現したい。

本センターでは、一方では国際的にも最先端の研究手法の開発を行うとともに、既存の生物学の研究室で育った若手研究者が自ら構造生物学の手法を使えるよう教育訓練する。また、名古屋地区の研究・教育の拠点としての役割も担ってゆきたい。



左から近藤孝男理学研究科長、甲斐荘正恒特任教授、前田雄一郎センター長。
背景は800MHz NMR装置。

キャンパス通信

高校生のためのサイエンスカフェを開催

多元数理科学専攻准教授
栗田英資 (Hidetoshi Awata)

大学院理学研究科は、2007年6月16日に名古屋大学野依記念学術交流館において、「高校生のためのサイエンスカフェ in 名大」を開催した。サイエンスカフェとは、従来の講演会などとは異なり、科学の専門家と一般の方が喫茶店などで科学について気軽に語り合うことにより、科学の社会的な理解を深めていこうという新しい試みであり、名古屋大学主催で行われたのは、おそらくこれが初めてだと思う。

今回のテーマは本広報誌の特集で取り上げた超弦理論であった。先立って行われた第13回名古屋大学理学懇話会「超弦理論の数理」では、2名の講師がそれぞれ超弦理論の物理的側面と数学的側面について、一般向けにわかりやすい解説を行った。それをもとにサイエンスカフェでは、超弦理論に取り組む研究者を囲んで、お菓子やソフトドリンクを片手に当日の講演や科学についてあれこれとおしゃべりをした。高校生37名、引率の高校の先生4名が5つのテーブルにわかれ、2人の懇話会の講師を含む6名の理学研究科および多元数理科学研究科の教員、4名の大学院生を相手に、お菓子をつまみながら積極的に超弦理論、素粒子論や宇宙論関係の質問・疑問をぶつけていた。次元とは何か、余次元はどうなっているのか、弦理論と素粒子にもとづく理論との関係はどうなっているのか、超光速で飛べるのか、タイムマシンはつくれるのかなど、質問は多岐にわたり、また、高校生がとても熱心であったため、予定を30分間延長し、1時間半行った。参加された高校生たちにとって理学に対する興味をより深めるための一助となれば幸いである。なお、次回の理学懇話会(11月17日)の後にも高校生を対象にサイエンスカフェを開催する予定となっている。ふるってご参加いただきたい。



研究会・学会スケジュール

第14回名古屋大学理学懇話会「ナノの世界のものづくり」

開催日：2007年11月17日(土)
 開催場所：名古屋大学IB電子情報館大講義室
 主催：名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報委員会
 問い合わせ：名古屋大学理学部庶務掛
 kouhou@sci.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-2394
 http://www.sci.nagoya-u.ac.jp/kouhou/
 ※懇話会終了後、「高校生のためのサイエンスカフェ in 名大」を開催。

第5回火山都市国際会議 Cities on Volcanoes 5

開催日：2007年11月19日(月)～23日(金)
 開催場所：島原復興アリーナ・雲仙岳災害記念館(島原市)
 主催：島原市・日本火山学会
 問い合わせ：木股文昭 名古屋大学大学院環境学研究所
 附属地震火山・防災研究センター 教授
 kimata@seis.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-3040

第4回平田レクチャーシップ 4th Yoshimasa Hirata Memorial Lecture

開催日：2007年11月20日(火)
 開催場所：名古屋大学野依記念物質科学研究館
 主催：平田義正先生追悼記念事業会
 問い合わせ：上村大輔 名古屋大学大学院理学研究科 教授
 uemura@chem3.chem.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-5248
 http://yuki.chem.nagoya-u.ac.jp/hirata/lecture.html

第6回坂田・早川記念レクチャー

開催日：2007年12月15日(土)
 開催場所：名古屋市科学館サイエンスホール(名古屋市)
 主催：名古屋大学大学院理学研究科・名古屋市科学館
 問い合わせ：福井康雄 名古屋大学大学院理学研究科 教授
 fukui@a.phys.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-2837

第3回日中微分幾何学研究集会 The Third Japan-China Conference on Differential Geometry

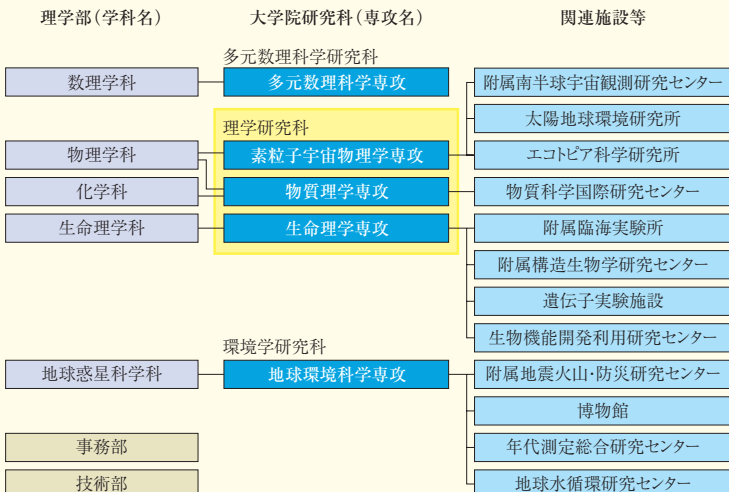
開催日：2008年1月26日(土)～29日(火)
 開催場所：名古屋大学野依記念学術交流館カンファレンスホール
 主催：国際研究集会「第3回日中微分幾何学研究集会」組織委員会
 問い合わせ：小林亮一 名古屋大学大学院多元数理科学研究科 教授
 ryoichi@math.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-2432

第34回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム

開催日：2008年3月3日(月)～5日(水)
 開催場所：名城大学共通講義棟北館(名古屋市)
 主催：フラーレン・ナノチューブ学会
 問い合わせ：篠原久典 名古屋大学大学院理学研究科 教授
 noris@cc.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-2482

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

名古屋大学には、昨年の4月に着任した新米教授である。前任地は、国立天文台という大学共同利用機関で、6年ぶりに大学(その前は京都大学)に帰ってきたことになる。この6年間には法人化もあり、着任以降は大学を取り巻く環境が大きく変わったことを強く実感させられる毎日である。さて、着任と同時に広報委員会の委員に任ぜられ、「理フィロソフィア」の編集に携わることになった。大学の広報誌の常識を破った体裁も内容も上質な冊子に圧倒されつつ、編集作業の手伝いをしている間に1年が過ぎた。ようやく仕事の流れがわかってきたかな、というところで、突然ひょんなことから委員長に任ぜられることになった。あれよあれよという間に、まったく考える暇もないまま、委員長の仕事に取り組みことになり、周囲に多大の迷惑をかけつつ、また支えられて、どうにか今号の発行にこぎ着けた、というのが正直なところである。新米教授が新米委員長を務めるのであるから、何かと問題が起きるかもしれないと思うと、不安も大きい。しかし、幸いなことに、「理フィロソフィア」を育てあげた福井前委員長が、委員として残っていただけることとなり、少しだけ安心している。自己満足に陥ることなく、わかりやすい紙面をめざして編集を進めていくつもりである。今後も読者の皆様には、「理フィロソフィア」ならびに名古屋大学理学部の活動にご注目いただくとともに、時には忌憚のないご意見をお聞かせくだされば幸いである。(杉山)

表紙説明

わずか1兆の1兆の10億分の1cmほどの大きさしかない弦が、すべての物質や力の源になっていると考えるのが弦理論。図は、左下の2つの弦が次第に近づいていったん融合して1つの弦になり、その後離れて右上の2つの弦になるという過程を表す。



理 *philosophia* — No.13 October 2007 2007年10月25日発行

広報委員 近藤孝男(研究科長)
 関一彦(副研究科長)
 大島隆義(評議員)
 栗田英資(数理学科)
 杉山直(物理学科)※委員長
 福井康雄(物理学科)
 飯嶋徹(物理学科)
 岡本祐幸(物理学科)
 斎藤進(化学科)
 杉山伸(生命理学科)
 舩本寛(生命理学科)
 鷲谷威(地球惑星科学科)
 森本正廣(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2008年4月頃発行の予定です。

制作 株式会社電通

・本誌記事、写真等の無断複写、転載を禁じます。
 ・本誌は再生紙および大豆油インクを使用しています。
 (大豆油インクとは、石油系溶剤にかわり大豆油を使用したもの。揮発性有機化合物が大気中へ排出されるのを減少させ、また廃棄物の生分解がはやく、再生紙化も容易で環境にやさしいインクです)

