

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 2006

11

philosophia

特集

「宇宙開闢137億年をさかのぼる」

- 04—X線衛星すざくの見た、星・銀河・銀河団◇國枝秀世
- 08—ビッグバンから銀河が生まれるまで◇杉山 直
- 02—時を語るもの<山崎一雄博士>◇大瀧仁志
- 03—理のエッセイ◇伊藤 繁
- 12—理の先端をいく◇鈴木順三／川岸郁朗
- 16—講義探検◇量子化学II／代数学要論I
- 18—理学部交差点
- 19—研究科長就任に寄せて／近藤孝男

山崎一雄博士 — 化学者の目で古文化財を見つめる

山崎一雄先生は今年95歳、もちろん日本の錯体化学者の中では最長老である。

先生は錯体化学の代表者であるばかりでなく、わが国の考古化学を確立された方であり、法隆寺金堂の壁画保存、正倉院御物の調査、醍醐寺五重塔壁画の調査（このご研究により学士院賞（1960年）が授与されている）など、一般の化学者には見られない高度の文化活動に参加されており、多くの著名な画家、漆芸作家、陶芸家などと深い交流をもっておられた。

われわれが学生時代にはその方面の仕事は学生には与えず、乳鉢で粉末にしたガラスや顔料などの資料を、飯田忠三*さん

が分光分析をされていた。

考古化学に関する先生のお仕事については学士会報別刷「先学訪問」第1号（2005）の井口洋夫*先生との対談が非常に興味深い。先生のご幼少のころや錯体化学に関する先生のお仕事、戦後の名古屋大学の状況等についてはCoord. Chem. Rev., 133, 3-9（1994）の“Interview of Kazuo Yamasaki”にも詳しく書かれている。

先生のご長寿を心から念じている。

（立命館大学・横浜市立大学客員教授
大瀧仁志）

*飯田忠三（1926-）名古屋工業大学名誉教授。
*井口洋夫（1927-）東京大学名誉教授、分子科学研究所元所長。





やまざき かずお
山崎一雄 (1911-)
名古屋大学名誉教授。日本学士院賞 (1960)
日本学士院会員 (1989-)

◆写真の説明

1941年、山崎一雄博士は名古屋帝国大学に着任した。本学が創設されたのはその2年前、1939年のことだった。博士と古文化財との関わりは、それ以前、東京大学理学部で柴田雄次*教授の研究室で助手を務めていたころにさかのぼる。当時、奈良の法隆寺では昭和の改修が進められており、その中で金堂壁画の処置を検討するための壁画保存調査会が設けられた。1940年に博士は柴田雄次教授の助手としてこの調査会の調査員となったが、これが古文化財の自然科学的研究に取り組む端緒となった。当初は壁画の顔料と壁画模写用の絵具の検査を担当していたが、法隆寺に通ううちに、壁画ばかりでなく、彩色、石材、土質などについて化学の立場から意見を求められるようになった。加えて、建築史、美術史、考古学、模写の専門家と知り合ったことが、のちの活動への布石となった。

その後、山崎博士は、正倉院宝物、曜変天目茶碗、醍醐寺五重塔の壁画、高松塚古墳壁画など、さまざまな古文化財の調査に取り組んできた。紫外線、赤外線、X線透過法、X線回折法、ベータ線後方散乱法など、化学分析の手法を用いて、古文化財研究の新たな地平を切りひらいていった。醍醐寺五重塔の壁画の共同研究により、日本学士院賞を受賞している。左ページ中央は醍醐寺五重塔壁画の一部。左下は山崎博士の著書「古文化財の科学」。右下は、1954年ごろの山崎一雄博士。

*柴田雄次 (1882-1980) 東京帝国大学理学部教授を務めた後、1942年より名古屋帝国大学教授理学部長に就任。1962年から70年まで日本学士院院長。



理のエッセイ ©伊藤 繁 物質理学専攻教授

研究、それは「のぞく楽しみ」

宇宙に浮かぶ青い地球、まわりは絶対零度に近い真空。太陽光だけが流れ込み、熱に変わり流れ出る。大気は酸素に満ち、地表は「緑の植物」で覆われる。植物は光エネルギーでH₂Oを分解し廃棄物O₂を吐き出し、CO₂を有機物に変える。我々は、他の生物をたべて有機物を取り込み、O₂で燃やしCO₂をはきだす。美しく調和した、生命あふれる『宇宙船地球号』。この環境を大事にしたいものです。

植物の光合成に働く小さな分子クロロフィルは1兆分の1秒刻みで光を電子の流れに変える「ナノサイズの分子機械」。この分子の世界を、化学、生物そして物理へと分野を移り研究してきた私は、この精妙な仕組みを通していつの間にか「針の穴から天井をのぞく」ように、生命や地球、宇宙のなりたちや進化を考えるようになりました。自然は物理や化学、生物に分かれているわけではないのですね。

「植物はなぜ、緑色?」。植物は赤と青の光を吸収し、いらぬ「緑の光」を反射する、そして「O₂」も捨てる。不思議なことに、太古の地球大気は高CO₂、低O₂だったらしい。O₂を出さない細菌型光合成がまず生まれ、さらにO₂をはき出す光合成が生まれ、大気を変え、O₂を嫌いな生命を絶滅させ、我々の大好きな「緑の地球」にしたらしい。

でも、昆布やワカメは黒褐色、紅藻は赤紫、水中植物(藻類)は多彩な色をもつ。なぜか緑色だけが地上進出した。だから、子孫の地上植物みんな緑色。我々も緑がすき。面白いのは、「生存競争」。どれも「緑」の植物が競うのは、早く伸びる、上に出る、乾燥に耐えるなどの性質。大事な色は変えられない。そういえばダーウインの「フィンチのくちばし」も、「キリンの首の長さ」も、ヒト社会での競争も、どうでもいいことが大事、(似た者どうしの競争では)大事な事は逆に当たり前。

共存する生命は栄え、できないものは滅亡する。偶然もあり、光と光合成のように物理的必然もある。役に立とうが立つまいが、大事は大事。針の穴を精一杯また深め、天井から、なんと小さな穴かとのぞく楽しみをもうしばらく。

Shigeru Itoh

物質理学専攻教授。1947年東京都生まれ。1974年理学博士(東京大学)。ブリストル大学、九州大学、文部科学省岡崎国立共同研究機構を経て、2000年より現職。専門は生物物理、レーザー分光、生物進化。エネルギーを媒介に生命、分子と地球の共進化を探索。

宇宙開闢^{かいびやく}137億年をさかのぼる

飛躍的に解明されつつある宇宙の謎。

とくにこの20年の間には宇宙の起源や現在の姿になるまでのプロセスがつつぎと明らかになってきた。

宇宙はどのように生まれたのか。その構造はどんなものなのか。

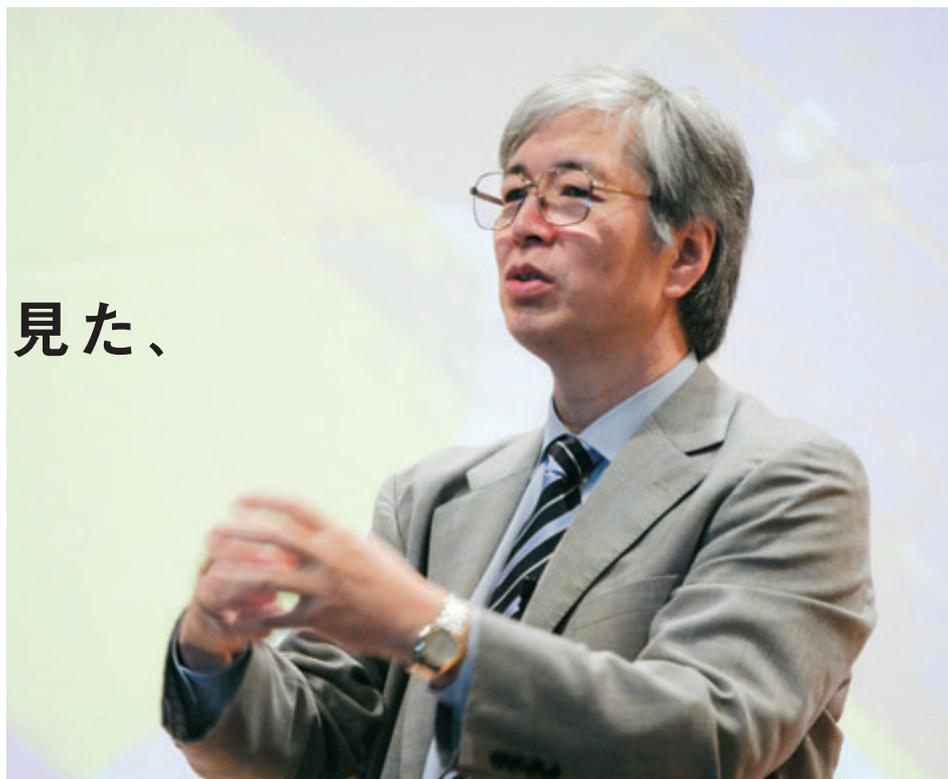
今、もっとも大きな謎は。宇宙物理学の最前線について2人の研究者に語っていただいた。

(2006年5月20日、第11回理学懇話会より)

X線衛星すざくの見た、 星・銀河・銀河団

— 1000兆倍のスケールをたどる —

國枝秀世 附属南半球宇宙観測研究センター教授



Hideyo Kunieda

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ゴダード研究所客員研究員。すざく衛星Project Scientist。

宇宙を見る新しい窓

サブタイトルに「1000兆倍のスケール」という言葉があります。宇宙の距離を示す単位として、我々はよく、地球と太陽の間の距離を物差しにします。大体1億5000万kmあるわけですが、これを「1天文単位」と呼んでいます。光は秒速30万kmですから、およそ500秒、約8分の時間がかかって光は地球にたどりつきます。これに比べて宇宙の大きさは、一番左端のところが宇宙の始まった「ビッグバン」だとすると、そこから始まって、現在我々が住んでいる一番右端のところまで光速で137億年かかっており、137億光年という大きさをもっています。137億年を8分で割ると、宇宙のサイズを天文単位ではかった倍率が出てきます。

1分=60秒、60分=1時間、24時間=1日、365日掛けると、1年間は 3×10^7 秒となり、これに137億を掛けると、 4×10^{17} 秒ということになります。これを先ほどの1天文単位で割ると、 10^{15} 倍ということになります。1兆倍は 10^{12} 、その1000倍が 10^{15} 倍ということで、これがサブタイトルである「1000兆倍のスケールをたどる」という根拠になります。

今日のもう1つのキーワードは、X線天文学です。2002年のノーベル物理学賞は、小柴昌俊*1先生が「ニュートリノ天文学」で受賞されていますが、もう1人受賞者がいました。「X線天文学」で受賞したリカルド・ジャコーニ*2です。2つの新しい天文学がノーベル賞を受賞した理由は、「宇宙

を見る新しい窓を開いた」ことです。ジャコーニは、「新しい窓」であるX線の波長域の観測によって、さまざまな発見をしました。では、なぜX線観測が「新しい窓」といわれたのでしょうか。

可視光だけは地上に100%近く到達するのに対し、赤外線や紫外線は、地上に届くことがありません(図1)。私たちの天文学は、ずっと、可視光だけを頼りに宇宙を観測してきました。1962年、ジャコーニは初めてロケットを打ち上げ大気の外からX線を観測しました。これ以降、ロケットや人工衛星を用いて、可視光以外の波長域でも観測をするようになり、可視光では見たことのない、宇宙の姿が見えてきました。中でもX線エネルギーは、

数100万度から1000万度を超える高温の領域を見るのに適しています。

日本がX線天文衛星を初めて上げたのは1979年のことで「はくちょう」という衛星を打ち上げています。そして1983年に「てんま」、1987年に「ぎんが」、1993年に「あすか」と続き、2005年に5機目のX線衛星である「すざく」の打ち上げに成功しました(図2)。

この衛星の先端に搭載されたX線望遠鏡は名古屋大学とNASAのゴダード研究所が協力してつくったものです。そしてX線望遠鏡のほかには硬X線^{*3}検出器が設置されています。「すざく」の特長は、X線望遠鏡と硬X線の検出器と合わせると、0.2keVから、200~300keVまで、3桁のエネルギー領域を高い感度で観測ができることです。そしてもう一つの特長は、軌道が地球に近いので、空から降ってくる宇宙線の影響が比較的小さいことです。

重さで決まる恒星の運命

ここからが本題です。スケールとしては数光年から数百光年ぐらいのところを対象にしたお話になります。

太陽は地球に一番近い恒星です。可視光で見ていると穏やかな星に見える太陽も、X線で見

ると荒々しい現象が起きている星であることがわかります。このX線は、太陽を取りまく1000万度近い、高温のコロナから放射されています。こうした太陽の莫大な放射エネルギーはもと核融合によるものだと考えられています。

たとえば、水素の原子4個が核融合によってヘリウムの原子1個になります。水素原子1個の重さは1.0078、これは1モルの重さ、1g/molです。それを4個集めて4.0312です。ヘリウムのほうの重さを調べてみると、1モルで4.0026です。核融合のプロセスでは0.028の質量がなくなる「質量欠損」が起きています。これをアインシュタインの「 $E=mc^2$ 」に当てはめると、核融合でエネルギーがつくられていることがわかります。こうした核融合は水素から始まって、ヘリウム、ベリウム、炭素、酸素、硫黄、最後は鉄まで進むと考えられています。

こうした反応は、星の重さによって進み方が変わります。たとえば、太陽質量の8倍よりも軽い星では、重力が弱いので、外層大気は吹き飛ばされてしまい、核融合がとまってしまいます。こういう星ではまわりに星風がまき散らしたシェルが見えてきます。これを「惑星状星雲」とよんでいます。これらの軽い星は爆発も起こさず、内部でできた炭素や酸素が対流で表面に運ばれ、最後は外に吹き出されているということがわかってきました。

それに対し、太陽質量の8倍よりも重い天体は鉄まで核融合が進むことになります。ところが、鉄の原子核に中性子や陽子をくっつけようとすると逆にエネルギーが必要になります。鉄から先では質量欠損がないため、ここで核融合は終わってしまいます。この星の中心では熱の補給がなく、中につぶれざるを得なくなります。これを爆縮といい、鉄のコアが崩壊します。この崩壊が超新星の爆発です。同じ恒星でも、スタート時点の重さによって、その後の運命が分かれてくるということになります。

超新星の爆発として、有名なのが1987年に大マゼラン雲で起きたものです。この時に発生したニュートリノを神岡にあるニュートリノの検出器で観測をして、小柴先生はノーベル賞を受賞されました。

爆縮では、落ちていく重力エネルギーにより、高温高密度になるため、熱を取り込みながら鉄より重い元素の合成が進むことがあります。たとえば、金とか白金などの非常に重い元素がつけられます。星の内部で対流が起きるとそうした元素は外に吹き出てきます。そうしてばらまかれた金や白金を集めて我々は使っているわけです。超新星爆発は、高温ガスをまき散らすことで宇宙にエネルギーを提供するとともに、元素を合成し供給するという2つの役目をもっていることになります。

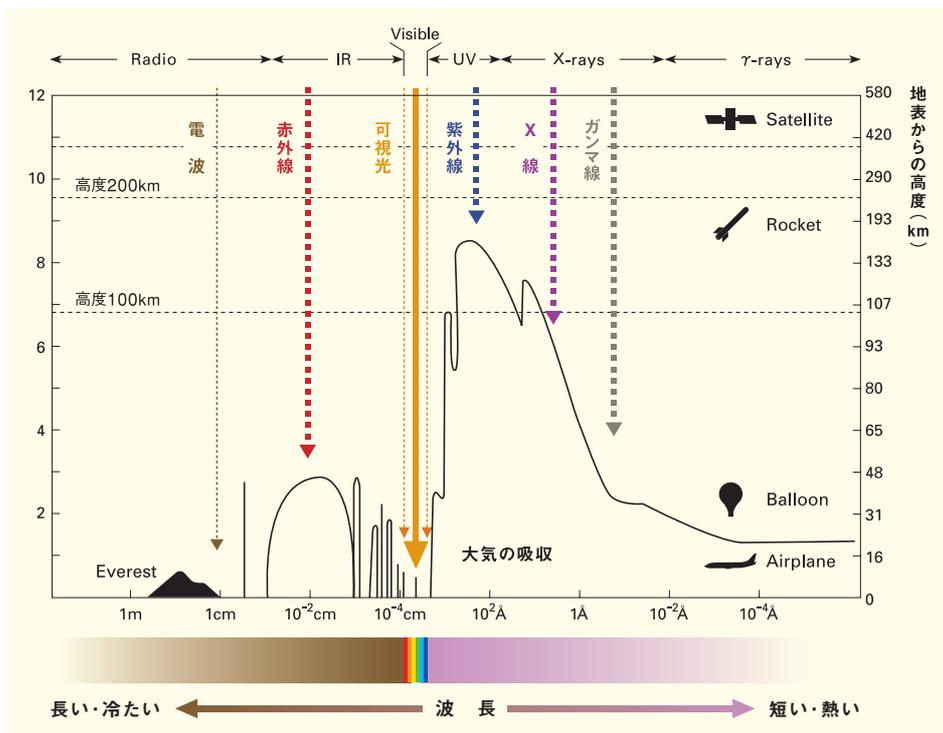


図2 電磁波の大気吸収
縦軸は地表からの高度。横軸は波長。曲線は、宇宙からの電磁波の強度が10分の1になる高度。X線は衛星など、大気の外に出て観測する。



図1 X線天文衛星すざく
5台のX線望遠鏡は名大とNASAゴダード研究所が中心になって製作。2005年7月10日打ち上げ。

*1 小柴昌俊(1926-)
宇宙物理学者。世界で初めて超新星爆発からのニュートリノの観測に成功。さらにニュートリノに質量があることを世界で初めて発見した。2002年ノーベル物理学賞受賞。

*2 R.ジャコビー(1931-)
宇宙物理学者。1962年にロケットによる観測で初めて太陽系外のX線天体の観測に成功した。70年代はX線観測衛星の運用に貢献した。2002年ノーベル物理学賞受賞。

*3 硬X線
X線のうち、波長の短い(エネルギーの大きい)ものを硬X線、波長の長いものを軟X線という。天文学ではおよそ波長1オングストローム(10キロ電子ボルト=10keV)付近を境に使っている。

X線で輝く中性子星とブラックホール

さて、太陽質量の8倍よりも重い天体は、中心のほうがどんどん落ちていくと、陽子の中に電子が取り込まれて、中性子に変わっていきます。すると中性子の性質である縮退圧*4で支えられた中性子ばかりでできた超高密度星になります。これが「中性子星」です。中性子星は、中性子ばかりですから原子核の密度と同じぐらいの密度になっています。密度の単位は 10^{16} kg/l。水が1kg/lですから、水の密度の10の16乗倍という非常に密度の高い星になっています。しかも、半径が10キロぐらいで、太陽程度の質量ですから、表面重力は、地球表面の1000億倍ぐらいの大変、重力の強い星になります。

今の話は太陽質量程度のコアが残った場合のことです。もともと太陽の30倍を越える重い星が超新星爆発を起こすと、太陽質量の数倍以上の重いコアが残ってしまいます。この場合は、縮退圧で支えられなくなってブラックホールになります。ブラックホールは、中性子星よりさらに小さく、強い重力場を持ちます。この重力にうちかって脱出するには、光速に近い速度が必要ですが、これが光速に達する半径をシュバルツシルト半径*5とよびます。この半径の内側ではたとえ光速でまわっても、重力に勝てず、外に出られず、結果として光も出さない「ブラック」な「ホール」ということになります。

こうした中性子星やブラックホールは大変小さ

く、自分自身では光ることがありませんが重力が非常に強いので、落下してくるガスの重力のエネルギーが解放されて、温度が1000万度ぐらいになり、X線を放射します。私たちは、この時のX線を観測して初めてこういうコンパクトな星の存在に気づきます(図3)。

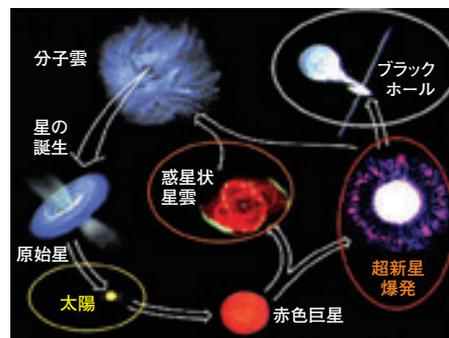


図3 星の進化とX線観測
星間ガスから生まれた星の最期に起こる超新星爆発、その結果できた中性子星、ブラックホール、高温ガスは、X線でもっともよく見える。

銀河中心核にひそむもの

地球は、天の川銀河の中心から少し外れたところにあります。3万光年先の銀河系中心は、銀河の星が円盤状にまわっている中心にあり、さまざまな活動が激しく起きていることがわかってきました。こうした銀河の中心を「銀河中心核」とよびます。ちりやガスで吸収／散乱される可視光に比べ、透過力に優れたX線は銀河中心核を

見透すのに適しています。天の川銀河やアンドロメダ銀河の中心は、ほのかに光っているだけですが、「M87」と呼ばれる銀河の中心核は、非常に明るいことで知られています。その明るさは、通常の恒星の1000億倍ぐらいあるとされています。そしてこのような中心核が明るい銀河は、10個に1個ぐらいの割合であることがわかってきました。

「M87」の中心核近くのガスの輝線放射を調べてみると、観測する場所によって波長が違うことがわかりました。これを「ドップラー効果」によるものだと考えてみましょう。ドップラー効果は、音源や光源が遠ざかるときに波長が長くなり、近づくときに波長が短くなるという現象です。たとえば光速の10%のスピードで走ってくれば、波長が10%縮むということになります。M87の場合、得られた速度差は毎秒500kmでした。一方、2カ所の距離を求めると、50光年程度あり、重力と遠心力のつり合いから、中心天体の質量が求められます。M87の中心核にある天体は太陽の10億倍という非常に重い天体であることがわかってきました。

50光年の半径の中に、約10億個の太陽が詰まっているとしたら、安定な星の集団ではいられず、多分それはブラックホールにならざるを得ないだろうと考えられます。これが激しい活動性をもった銀河中心核にはブラックホールがあるだろうという証拠の1つになっています。もし、星の集団で



*4 縮退圧

スピンの半整数の素粒子は、同一の物理状態をとることが許されない(パウリの排他律)。この法則のために、粒子同士が互いに反発しあって生じる圧力を、縮退圧とよぶ。

*5 シュバルツシルト半径

一般相対性理論によれば、質量 m の物体が半径 $2Gm/c^2$ 以下に収縮するとブラックホールになる。この半径を、重力半径、またはシュバルツシルト半径とよぶ。

なく、ブラックホールなら、その強い重力場があるはずで、そこに落ち込むガスはブラックホール近くで、光速に近い速度で軌道運動するとともに、強い重力場の影響を受けることになります。つまり、ブラックホールに近いところから出てくるX線は時間が遅れて波長が長いほうに、ずれるはずだと考えられます。こうした推論を裏付ける証拠が「あすか」のX線観測によって発見されました。「すざく」でも同じ天体を調べてみると、やはり同じような観測結果が出ました。我々はこれをブラックホールによる非常に強い重力場を検出した直接証拠だと考えています。いわば、強い重力場に「手で触れた」といういい方ができるといいます(図4)。

銀河団全体の質量をはかる

星から始まった我々の道は、銀河の集団である銀河団に至り、その大きさは1億光年から80億光年というスケールになります。銀河団は、10個から1000個ぐらいの銀河が重力的に集団を組んでいるものです。可視光では1個1個の銀河が光っていますが、X線で見ると、1000万度以上の高温のガスからのX線が、銀河団全体から放射されていることがわかりました。すなわち、銀河1個1個の間を埋めるように高温ガスが分布していることになります。しかも、そのガスの質量を推定してみると、可視光で見えている銀河の質量



を足したよりも、はるかに大きな質量があることがわかってきました。

今1000万度以上の高温のガスだという話をしました。こうした高温のガスは運動エネルギーをもっていますから、放っておいたら、外に飛んでいってしまいます。それを抑えておくためには大きな重力が必要です。その必要な重力を調べてみると、銀河とガスの質量だけでは足りないことがわかってきました。つまりX線も出さないし可視光でも光っていない、ほかの手段でも、いまだわから

ないけれども、重力は及ぼす物質、「暗黒物質」がなければならぬことになります。暗黒というのは、いろいろな光の波長で見えないものという意味です。銀河団全体としては、銀河よりもガス、ガスよりも暗黒物質が主役になっています。我々は「すざく」の高い感度を利用して、銀河団の高温ガスの温度、密度の分布、とくに銀河団がどこまで広がっているかをX線で観測することで、銀河団の中の暗黒物質の分布をあぶり出し、暗黒物質の正体に迫っていきたいと考えています。

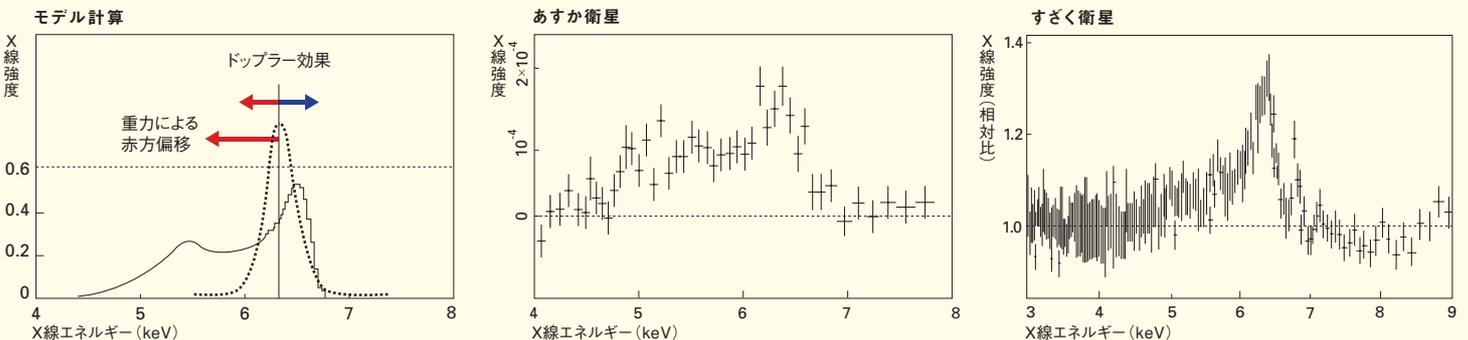


図4 活動的銀河中心核のX線スペクトル

X線の輝線が、高速運動と強い重力場の影響を受けて、広がり、ずれていることを発見。活動的銀河中心核に巨大ブラックホールが存在する証拠と考えられる。

ビッグバンから銀河が生まれるまで

—宇宙観のパラダイムシフトをめぐる—

杉山 直 素粒子宇宙物理学専攻教授



Naoshi Sugiyama

素粒子宇宙物理学専攻教授。1961年生まれ。広島大学大学院理学研究科修了。理学博士。東京大学助手、京都大学助教授、国立天文台教授を経て、2006年より現職。専門は、宇宙論、とくに宇宙マイクロ背景放射の理論的研究。

星の明るさで距離をはかる

ここでは、「宇宙観のパラダイムシフトをめぐる」と題してお話します。20世紀には宇宙について3つのパラダイムシフトが起こりました。1番目のパラダイムシフトは「我々の天の川銀河は、宇宙におけるたった1つの存在ではなかった」というものです。

そのパラダイムシフトを導いたのが、女性天文学者のヘンリエッタ・リーヴィット*1です。小マゼラン星雲にあるケフェウス型変光星を測定した彼女は、「明るいものほど、ゆっくりと変光していく」ということを発見しました。1910年代のことです。周期が長ければ、明るい変光星なのです。この発見によって、銀河系内や他の銀河での変光星の周期を測定することで、その変光星の本当の明るさがわかるようになり、観測される見かけの明るさと比較することで、そこまでの距離が決定できるようになりました。

リーヴィットの発見は、次々と新たな発見を導き

ました。すぐにシャプレー*2が「銀河系の大きさ」をはかることに成功しました。銀河系の中にある球状星団のケフェウス型変光星までの距離をはかることによって、天の川銀河がどれだけの大きさであるかを測定したのです。続いてハッブルが星雲の1つであるアンドロメダ銀河までの距離をはかることに成功しました。その結果は、アンドロメダ銀河までの距離は、天の川銀河の大きさよりもはるかに大きいというものでした。つまり、「アンドロメダ銀河」は天の川銀河の中には入っていないことがわかったのです。

宇宙には無数ともいえるような銀河、星の大集団があって、我々の天の川銀河はその中のワン・オブ・ゼムでしかなかったということがこれで明らかになりました。地動説から天動説への転換にも比肩しうるパラダイムシフトです。

理論と観測が描く膨張宇宙

第2のパラダイムシフトは、「宇宙は膨張しているダイナミックな存在だった」というものです。理論研究としては1920年ごろに、相対性理論に基づく科学的な宇宙モデルが誕生したこと、観測研究としては1915年ごろ初めて「赤方偏移」が測定されたことが大きな契機となりました。

1つ目の契機となった、相対性理論に基づく科学的な宇宙モデルは、アインシュタイン*3が1915年から1916年にかけて相対性理論を発表し、その7年後にアレクサンドル・フリードマン*4が膨張宇宙モデルをつくり上げたことによります。

ニュートン力学では、入れ物である時間・空間は不変だと考えました。それに対してアインシュタインの相対性理論は、入れ物は中身に影響を受けるとしています。中身の重力によって、時間や空間が曲げられるという理論です。宇宙そのものを扱おうと考えれば、どうしても相対性理論が必要になります。重力の働きによって曲がった空間が膨張したり収縮したりする可能性を、フリードマンは見つけ出したのです。

パラダイムシフトを導いた2つ目の契機、それがアメリカのスライファー*5による「赤方偏移」の発見です。

彼は、銀河の中に非常に赤くなっている天体を発見し、それが、ドップラー効果によって光が赤くなっているということに気がつきました。たとえば「ソンプレロ銀河」というメキシコの帽子みたいなきれいな銀河がありますが、これは時速400万キロというすごいスピードで遠ざかっています。観測者から遠ざかる天体の光は赤くなります。つまり宇宙の膨張によって遠くの天体は遠ざかっていくことが引き起こす現象、それが赤方偏移であると解釈できます(図1)。

赤方偏移とは、このようにドップラー効果と考えられますが、一般相対論的には、光が光源から私たち観測者に届くまでの間に空間の膨張によってその波長が伸びてしまう、と解釈できます。宇宙の大きさが現在の半分の時代に放たれた光は、私たち現在の観測者が見ると、2倍に引き延ばされるというわけです。赤方偏移は、 z と表され、観

測者が受け取る伸びた波長から光源が放射した元の波長を引いた値を元の波長で割った値で定義できます。zの値が大きいほど、波長の伸びの割合が大きく、遠方から放射された光、ということになります。宇宙の大きさが半分の時、ちょうどzが1となります。

ドップラー効果を引き起こしているのが宇宙の膨張であるということに気づいたのがハッブル*6です。彼が示した「ハッブルの法則」は、「膨張する宇宙では、遠方の天体は、その距離に比例して速く遠ざかるはずである」というものです。この法則を観測によって示すことで、ハッブルは宇宙が膨張していることを証明したのです。ハッブルは、距離はリーヴィットの方法を、速度はスライファーの方法を用いて測定し、距離と速度が比例することを見いだしました。宇宙は不変な存在ではなく、膨張するダイナミックなものだったのです。ここでもパラダイムの転換が起こりました。



図1 ソンブレロ銀河 (M104)
おとめ座にある銀河で、メキシコの帽子(ソンブレロ)によく似た美しい形をした渦巻き銀河。我々から時速400万キロで遠ざかっている。(ESO/VLT提供)

原初の宇宙を探る

3番目のパラダイムシフトは、「宇宙には始まりがあり、それはとてつもなく熱く、密度の高い状態『ビッグバン』であった」というものです。

このパラダイムシフトは、膨張宇宙と元素の起源を探求する理論的な研究によって、その緒を發しました。その後、宇宙マイクロ波背景放射が偶然に発見された結果、観測的に証明されるに至ったのです。

契機となった理論的研究は1930年代には早くも始まっています。アベ・ジョルジュ・ルメートル*7というベルギーのカトリック教会の神父兼天文学者が、「宇宙卵(コスミック・エッグ)」のアイデアを提案しました。膨張している宇宙の時間を逆回しすると、全部の点が近づいていき、最後はすべての点が1点に集まると考えられます。彼は「宇宙にあるすべての物質が1個の原子になってしまうのではないかと考えたのです。その状態を「宇宙卵」とか「原初アトム」という名前前で呼んでいました。次のステップは、1940年代にジョージ・ガモフ*8によって踏み出されました。彼は、宇宙に存在する大部分の元素である水素とヘリウムの起源を熱い宇宙の始まりに求めたのです。

始まりには熱い宇宙があって、そこではエネルギーが非常に高いために、元素はばらばらな状態で存在していたと、ジョージ・ガモフは考えたわけです。ばらばらな状態から膨張によって冷えていくと、ヘリウムは作られますが、ベリリウムより重い元素はほとんどできないことが計算で示せるのです。それだけではなくガモフは、熱い宇宙では、温度に応じて熱放射すなわち、宇宙に最初に輝いていた光である「原初の光」が満ちあふれていたのではないかと考えました。熱く原初の光に満ちあふれた宇宙、これが宇宙の始まり「ビッグバン宇宙」です。ガモフは、この原初の熱い光が宇宙の膨張によって冷えて、現在では、電波(マイクロ波)で見つかると思われました。

ここまでではあくまでも理論研究です。これを証明する発見はまったくの偶然によるものでした。ベル研究所の研究員だったペンジャス*9とウィルソン*10が、1964年に正体不明の電波(雑音)に悩まされたことが契機になっています。彼らがどうしても消し去ることのできなかつた雑音、それこそが「ビッグバンのシグナル」だったのです。ペンジャスとウィルソンは、その功績によって1978年にノーベル賞を受賞しました。

宇宙には始まりがあり、それは高温高密度のビッグバンと呼ばれるような状態だったのです。第3のパラダイムシフトです。



- *1 H.リーヴィット(1868-1921)
アメリカの天文学者。ケフェウス型変光星の変光周期と明るさに関係があることを発見し、宇宙での距離の新しい測定法を見つけ出した。
- *2 H.シャプレー(1885-1972)
アメリカの天文学者。数十個の球状星団の距離を決定してその分布図を描き、「太陽が銀河系の中心ではない」モデル(シャプレーの銀河系モデル)を提唱した。
- *3 A.アインシュタイン(1879-1955)
ドイツ生まれの物理学者。彼のつくり上げた一般相対性理論は、現代宇宙論誕生のために必要不可欠な理論であった。
- *4 A.フリードマン(1888-1925)
ロシアの数理論理学者。一般相対性理論に基づいた膨張・収縮するダイナミックな宇宙モデルを見つけ出した。
- *5 V.スライファー(1875-1969)
アメリカの天文学者。天体分光観測の草分けで、渦巻き星雲の大部分が赤方偏移していることを発見した。
- *6 E.ハッブル(1889-1953)
アメリカの天文学者。アンドロメダ銀河が、我々の銀河系の外にある島宇宙であることを発見、さらに宇宙が膨張していることも発見した。銀河の形態分類などにもその名を残している。
- *7 A.G.ルメートル(1894-1966)
ベルギー出身のカトリック司祭、天文学者。今日のビッグバン宇宙論のもととなる膨張宇宙論をはじめ提唱した。
- *8 G.ガモフ(1904-1968)
ウクライナ生まれの物理学者。原子物理学者としてスタートし、星の生成や元素合成、さらにはビッグバン宇宙論を考案。後には生化学に転じ、遺伝子暗号について研究を進めた。
- *9 A.ペンジャス(1933-)
アメリカの電波工学者。1964年、R.ウィルソンとともに宇宙背景放射を発見。
- *10 R.ウィルソン(1936-)
アメリカの電波工学者。1964年、A.ペンジャスとともに宇宙背景放射を発見。

赤方偏移をさかのぼる旅へ

宇宙について3つのパラダイムシフトが起こった後、20世紀終盤には、宇宙論観測の時代がやってきました。巨大地上望遠鏡群やスペース望遠鏡などが続々と建設、運用されるようになり、暗い非常に遠方の天体の観測が現実のものとなったのです。

こうした観測手段を駆使することによって非常に微弱な光を放つ遠方の天体を観測することができるようになりました。それにより観測範囲が広がりより巨大な天体や構造を見つけることができます。これが遠方を観測するメリットの1つです。次のメリットは、遠くですから、昔に放たれた光、つまり、過去の宇宙を見ることができるといことです。また、遠方からの光は、赤方偏移が大きくなります。赤方偏移が大きい、すなわちまた小さかった時代の宇宙、つまり、初期の宇宙を見ることがになります。

では、時間と空間、赤方偏移をさかのぼる旅に出ることにしましょう。まず太陽系には惑星があり、その外側には、冥王星もそのメンバーであることが明らかになっているカイパーベルト天体が存在し、さらに外側には「オールト雲」という彗星の巣があると考えられています。太陽系の外側には恒星世界が広がっていますが、そこには数百個の星がゆるやかに集まっている散開星団

や数十万という星がよく混じり合った状態を構成している球状星団があります。星や星団の集団が銀河です。銀河系やアンドロメダ銀河は典型的な渦巻銀河になります。

我々の銀河系の近傍の数百万光年という距離にある、30個ほどの大小の銀河は重力によって互いに結びついており、それを局所銀河群とよびます。50未満の銀河の集団、銀河群に対して、銀河が50個以上集まっている、巨大な構造を銀河団とよびます。たとえば「かみのけ座銀河団」は、1000個以上の銀河の集団です。これは3億光年の距離で、赤方偏移は0.023です。さらに遠方を観測すると、銀河や銀河団は単独で存在しているのではなく、有機的にネットワークを形成していることがわかってきました。宇宙の大規模構造です。その大きさは100億光年に達しており、赤方偏移0.3、30億光年のあたりまでは少なくともその存在が観測によって確認されています。今後、さらに遠方での大規模構造の測定が重要となってきました(図2)。

現在世界中で最も遠方の銀河を探すレースが行われています。現時点での記録は、すばる望遠鏡によって発見された宇宙の誕生から9億年の時代、赤方偏移6.6という値をもっている銀河です。これは宇宙が現在のわずか13%の

大きさの時代に放たれた光を見ていることとなります。しかし、もっとも遠方、最大の赤方偏移を示すのは、じつは天体ではなく、ビッグバンの証拠である宇宙マイクロ波背景放射です。赤方偏移が1000、宇宙が現在の0.1%の大きさの時代に放たれたものです。COBE衛星^{*11}によって、現在の温度は絶対温度2.725Kであるということが明らかにされました。現在は宇宙の膨張(赤方偏移)によって非常に低温となっていますが、放たれた当時は約3000Kという高温な状態にあったこととなります。

宇宙には恒星、惑星系から星団、銀河、銀河群、銀河団、大規模構造、そして宇宙マイクロ波背景放射といった階層的な構造が存在しているのです。

新たなパラダイムシフトの予感

観測を進めることで、宇宙の構造は階層的であり、その形成の歴史が次第に明らかになってきました。それは次のさらなるパラダイムシフトを予感させています。現時点で観測が示唆しているのは、宇宙を支配している成分の大部分が暗黒、目で見ることのできないものであるということです。「暗黒エネルギー(ダークエネルギー)」というのがその1つ、もう1つは、「暗黒物質(ダークマター)」です。

まず、「暗黒エネルギー」ですが、これは宇宙

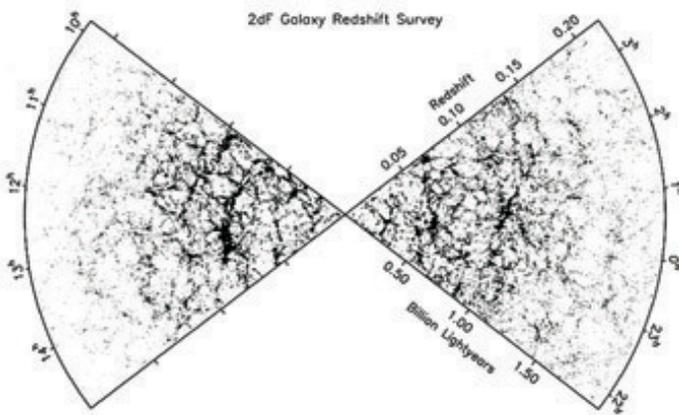


図2 2dF銀河探索計画による宇宙の大規模構造
1つ1つの点が銀河を表し、我々観測者は中心に位置する。銀河のネットワーク構造が見てとれる。

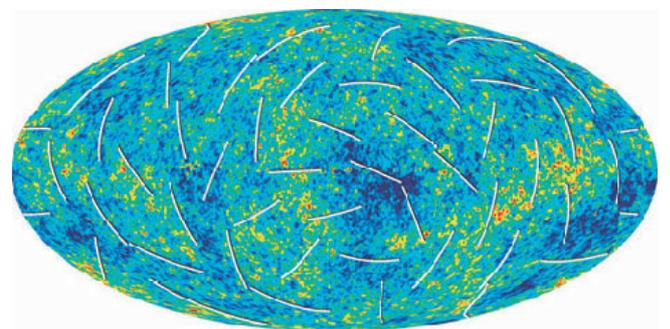


図3 WMAP衛星による宇宙マイクロ波背景放射の全天温度分布
平均的には10万分の1程度の温度分布のゆらぎが存在している。この温度ゆらぎのパターンの典型的なサイズは、宇宙の物質の量や膨張の速度、元素の量などによって物理的に決まっているため、これを測定することで、それらの量を決定することができる。図に重ねてある線は、光の偏り(偏光)で、これにはマイクロ波背景放射が最後に電子と散乱した情報が含まれている。(NASA/WAMPチーム提供)

の膨張を支配していて、膨張を加速させています。通常の物質は宇宙の膨張を遅くさせます。しかし、暗黒エネルギーは反重力として働き、宇宙の膨張を加速させるのです。宇宙の膨張が加速していることが観測によって示されたことで、暗黒エネルギーの存在が明らかになったのです。宇宙の加速は、超新星を用いて、遠方の宇宙までの距離をはかることで明らかになりました。この加速するためのエネルギーを供給しているのが暗黒エネルギーです。

次は暗黒物質です。これは宇宙の物質の大部分を占めています。銀河の回転を調べたり、重力レンズ効果を用いたりすることで、大量の見えない重力源が存在していることが明らかにされてきました。その正体は不明で、我々が知っている普通の元素でないことだけはわかっており、未だ人類が発見していない新粒子がその正体ではないかと考えられており、加速器を用いた実験によって近い将来正体が明らかになるのではないかと期待されています。

これらの暗黒成分がどれだけ宇宙に存在するのかは、宇宙マイクロ波背景放射の温度分布を詳細に測定することで決定できます。温度分布の典型的な大きさを決める物理過程が理論的に完全に明らかになっているからです。それは宇宙の膨張の速さや物質の量、元素の量などによって決まります。ですから、見かけの大きさを測定することで、それらの値を決定できるわけなのです(図3)。

WMAP衛星の観測によって、宇宙全体の物質エネルギーのうち、74%が暗黒エネルギー、22%が暗黒物質で、水素やヘリウムは4%ぐらいしかないことがわかってきました。今後の宇宙論は、暗黒エネルギーや暗黒物質の正体に迫ることが大きなテーマになっていくことになります。

***11 COBE衛星**

宇宙マイクロ波背景放射の温度の決定と空間分布のゆらぎの発見というCOBE衛星の研究成果に対して、2006年ノーベル物理学賞がマーサーとスムートに授与された。

西暦	◎宇宙論上の大きな出来事	西暦	◎世界・日本の動き
1905	アインシュタイン奇跡の年。特殊相対性理論が発表される。	1904	日露戦争
		1911	辛亥革命
1912	リーヴィット、小マゼラン星雲の25個のケフェウス型変光星の明るさ変光の周期に関係があることを発見。	1914	第一次世界大戦勃発
1915	スライファール、15個の渦巻星雲の内少なくとも11個は明確に赤方偏移していることを発見。アインシュタインが一般相対性理論を発表。		
1917	アインシュタインが静的な宇宙モデルを発表。	1917	ロシア革命
1918	シャプレー、球状星団までの距離をリーヴィットの方法で測定し、銀河系の大きさを求める。	1918	第一次世界大戦終結
1920	全米科学アカデミーで「宇宙の大きさ」と題するシャプレーとカーティスによる公開討論会が開かれる。		
1922	ハッブル、アンドロメダ銀河までの距離を測定し、銀河系の外にあることを示した。フリードマンによって宇宙モデルが発表される。	1923	関東大震災
1929	ハッブル、宇宙が膨張していることを発見。	1929	世界大恐慌
1931	ルメートル、宇宙の始まりの状態としての原初アトムを提唱。		
		1939	第二次世界大戦勃発
		1945	第二次世界大戦終結
1948	ガモフ、熱い宇宙の始まりを提唱。		
1965	ペンジャースとウィルソン、宇宙マイクロ波背景放射を発見。	1964	東京オリンピック
1970	この頃からルービンとそのチームが銀河の回転運動を系統的に測定し、暗黒物質の存在を見つけ出す。	1970	大阪万博
1989	COBE衛星が打ち上げられ、宇宙マイクロ波背景放射の温度が2.725Kと求まった。	1989	ベルリンの壁崩壊
1998	遠方の超新星の観測により、宇宙が加速していることが示唆された。	1998	長野オリンピック
2001	WMAP衛星が打ち上げられ、温度分布の微小な揺らぎのパターンの解析から、暗黒エネルギー、暗黒物質の量が詳細に決定された。	2001	9.11テロ

表1 宇宙論のパラダイムシフトの流れ



Yoshikazu Suzumura

1947年三重県生まれ。東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。東北大学理学部助手、名古屋大学理学部助教授を経て2000年より現職。専門は物性理論。場の理論を用いて低次元電子系の量子ゆらぎの解明を進めている。

有機導体における 質量ゼロのディラック粒子の出現

鈴木順三 物質理学専攻教授

超伝導か、絶縁体か

ポリアセチレンが電気を通すという白川秀樹^{*1}博士の研究が話題になって以来一般の人にも知られるようになった有機導体は、炭素を主な構成要素とする有機分子でつくられる金属である。30年以上も前に開始された有機導体の研究はこれまで開催されてきた合成金属の国際会議でも多くの物性研究者の関心事となってきた。この物質は圧力制御により状態が著しく変化することが特徴で、たとえば室温では金属であるが10K程度の低温になると電気抵抗がゼロの超伝導またはこれとまったく反対の絶縁体という状態が現れる。これらの状態の原因として、電子間のクーロン力のほかに次に述べる有機分子に特有の結晶構造が重要である。分子の中で伝導を担う電子はエネルギーがもつとも大きくp波の対称性^{*2}の軌道をもっている。この軌道は等方的ではないので2つの分子の間の電子の軌道の重なりが方向により異なる。したがって電気が特定の方向に流れ低次元導体^{*3}としての性質が現れる。さらにこの軌道の重なりが多様性が通常の固体からは予想できない新奇な物性を示す。このような現象を紹介する。

結晶構造が電気抵抗を決める

イギリスの理論物理学者ディラックが電子に対する相対論的量子力学に従う方程式を発見した。この解の粒子はディラック粒子^{*4}とよばれ、一般に質量をもつ。最近、私たちは高圧下の有機導体の固体を理論的に解析して、質量ゼロのディラック粒子が出現することをはじめて見つけた。

この物質は図1に示すような(BEDT-TTF)₂I₃(Iはヨウ素)の組成をもちBEDT-TTF分子が準2次元的に配列した結晶構造をもっている。常圧では低温において絶縁体であるが、約5000気圧以上の高圧をかけると絶縁体でも金属でもなく、通常の半導体でもない不思議なふるまいを示すことが6年ほど前に実験で見出された。これまでその起源は謎であった。室温から温度を下げていくと、電流の運び手である金属の自由電子の密度が5桁以上激減するにもかかわらず

らず、電気抵抗はほとんど変化しないという不思議なふるまいをする。最近、一方向の圧力下で結晶の格子距離が測定され分子間の電子の軌道の重なり t_A ($A=p1, p2, \dots, c4$)が得られたが(図2)、このように多様な値をもつことが従来の固体とは異なる。私たちは、この値の圧力変化を取り入れてエネルギーを計算した結果、図3に示すような質量がゼロのディラック粒子と同じエネルギー分散をもつ状態が高圧下で安定に存在することを見つけた。図のフェルミ点^{*5}を中心として向かい合わせのコーン状の状態の下半分に電子がつまり、上半分は空

いている。フェルミ点の近くでは電子を下半分から上半分に上げるときに必要なエネルギーはゼロになりうるので、ゼロギャップ半導体^{*6}と見なすことができる。これが上述の実験の電気抵抗の不思議なふるまいの正体であることを明らかにした。

なぜ、いつも存在するのか

複雑な構造をもつ有機物質の結晶中で「質量ゼロのディラック粒子^{*7}」が出現していることはきわめて興味深い。有機物質におけるディラック粒子は、さらに高い圧力下でもフェルミ点の

位置は移動するが存在する。主な原因である図2の $c1, c2$ の2種類の重なりのパラメーターが圧力によりかなり変化しても、図3の状態がいつも存在することは大変不思議なことである。この状態は電荷が空間的に交互に変化する電荷秩序と共存しているため、ディラック粒子は電荷秩序の原因であるクーロン斥力に対しても安定である。この有機導体の磁場下での興味深い輸送現象や、ほかのいくつかの有機半導体でゼロギャップ半導体を示唆する実験が報告され、分子性半導体における「質量ゼロのディラック粒子」の物理の進展が期待される。

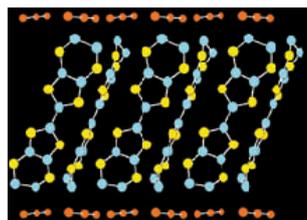
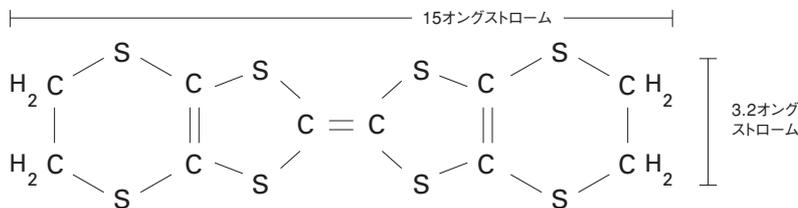


図1 BEDT-TTF分子式と結晶構造

上図:BEDT-TTFの分子式。伝導を担う電子は、p波のうちこの軌道が分子面に垂直方向に伸びた π 電子である。

左図:準2次元的なアルファ(α)型の結晶構造を伝導面に平行にみた図。水色はC、黄色はSで、面の間にヨウ素(赤色)が挟まっている。BEDT-TTF分子の伝導バンドは電子が4分の3充填している。

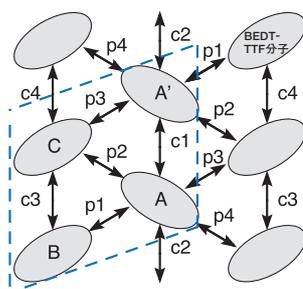


図2 α -(BEDT-TTF)₂I₃の模型

結晶を構成する単位胞内(破線で囲まれた部分)には、4個のBEDT-TTF分子A, A', B, Cが存在する。単位胞内の4個の分子は異なる方向を向いているので8個の伝導電子の軌道の重なり t_A ($A=p1, p2, \dots, c4$)も異なる。

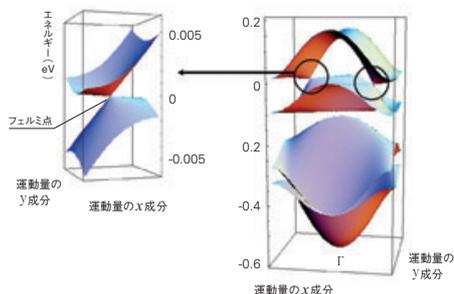


図3 バンドエネルギーとディラックコーン

α -(BEDT-TTF)₂I₃塩のエネルギー(単位はeV)。図2のように分子が規則正しく並んでいるのでエネルギーは運動量(p_x, p_y)を用いて表すことができる(Γ は原点)。電子はエネルギーをゼロにおいたフェルミエネルギー(○印の中の点)までつまっている。フェルミ点の近くでエネルギーが円錐状の形をしているためディラックコーンとよばれ、フェルミ点をはさんで2つの円錐が接している。

*1 白川秀樹(1936-)

筑波大学名誉教授。A.ヒーガー、A.マクダイアミッドとともに導電性ポリマーの発見と開発により2000年ノーベル化学賞を受賞。

*2 p波の対称性

原子のまわりを運動する電子の軌道は、回転を表す角運動量の種類により、回転の方向によらないものをs波といい、方向依存性が大きくなるに従いp, d, f波と名づけられている。最近はこのp, d, f波の電子状態が活発に研究されている。

*3 低次元導体

通常の導体では電気抵抗はほとんど方向によらないが、有機半導体では方向により3桁程度も異なる。このため電子の運動がほとんど1次元方向や2次元方向に限られるので、3次元の導体と区別して低次元導体とよばれる。このような系では、スピンや電荷の揺らぎが大きくなり超伝導の原因にもなると考えられている。

*4 ディラック粒子

P.ディラックは1928年、相対論的な電子の理論として4つの成分をもつ波動関数に対する波動方程式(ディラック方程式)を得た。これはスピンの2分の1の相対論的な自由粒子で、同じ軌道には1つの粒子しか入ることができないという性質がありディラック粒子(フェルミ粒子)とよばれている。このエネルギー E は、 p を運動量、 c を光速、 m を質量として $E^2 = (cp)^2 + (mc^2)^2$ であり、特に質量がゼロの場合は $E = cp$ の関係にある。

*5 フェルミ点

フェルミ粒子である電子は1つのエネルギー単位に上向きスピンと下向きスピンの2つしか占有できない。金属中のアボガドロ数程度の電子を低いエネルギー単位から占有させ、全部つまった最高のエネルギー単位をフェルミ単位という。この単位の粒子の集合は運動量空間において、3次元では面、2次元では線を構成する。今回は2次元であるが、点(フェルミ点)になっているのは質量ゼロの粒子が原因である。

*6 ゼロギャップ半導体

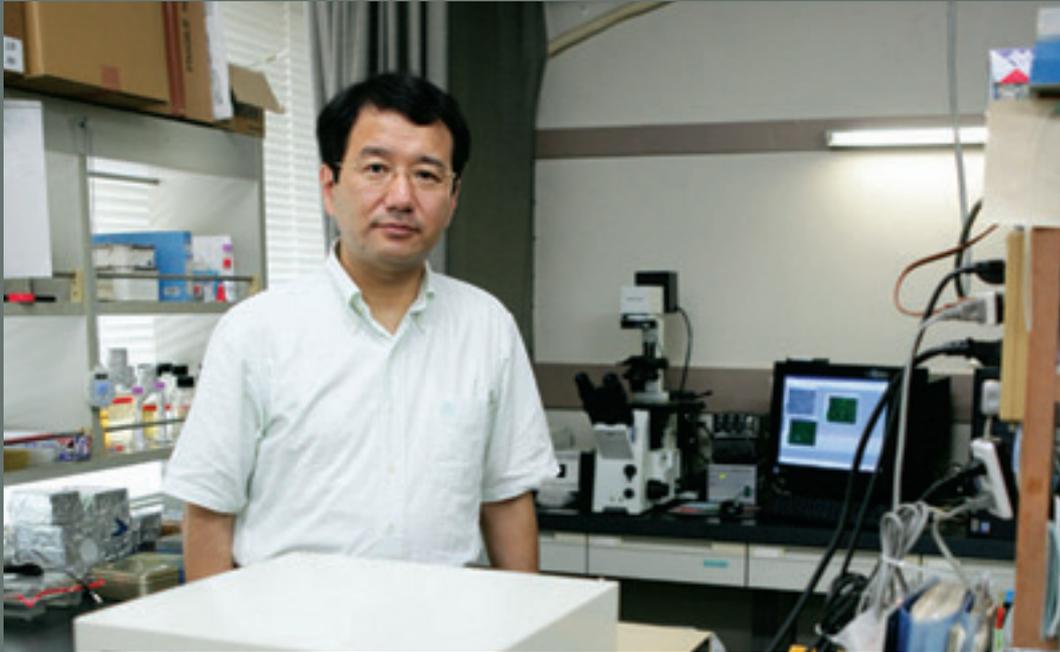
半導体のエネルギー単位には、完全に電子で満たされているバンドと完全に空いているバンドの間にギャップが存在する。絶対零度では絶縁体であるが、高温で電気が流れるので、絶縁体と金属の間にある。このエネルギーギャップがゼロになったものをゼロギャップ半導体と呼び、水銀を含む半導体等でいくつか見つかっている。

*7 質量ゼロのディラック粒子

質量ゼロのディラック粒子は、これまで単層グラファイトにおいて知られているが、これは人工的に作られた2次元系であり、今回のように立体として存在するものではない。

1ミクロンのバクテリアにも五分の魂 — 環境応答のメカニズムを探る —

川岸郁朗 生命理学専攻助教授



Ikuro Kawagishi

1960年大阪府生まれ。東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。エール大学博士研究員、名古屋大学理学部助手を経て、1997年より現職。2005年より高等研究院教員を兼務。専門は、分子生物学・生物物理学。おもに、細菌の感覚応答と運動の仕組みについて取り組んでいる。

バクテリアの示す高度な行動

生物は、常に環境の変化をモニターし、それに対処している。とくにバクテリアの場合、外環境(温度、栄養条件、pH、集団密度など)は大きく変化するので、適切な対処ができなければ生き残れない。このような環境応答は、どのような仕組みで行われているのであろうか。

さまざまな環境応答が知られているが、なかでも、「モデル生物」大腸菌の走化性は、もともと解析が進んでいるものの1つである。走化性とは、菌が、アミノ酸や糖などの栄養物質(誘引物質)に向かって近づき、金属イオンやインドール*などの有害物質(忌避物質)から遠ざかる性質のことである。

菌の泳ぎを顕微鏡で観察してみると、まっすぐ泳いでは方向転換し、またまっすぐ泳ぐことを繰り返している。これを三次元的ランダムウォークという。誘引物質が存在しても、その方向に直進するのではなく、「バイアスのかかったランダムウ

ォーク」をしながら試行錯誤的に近づいていく(図1)。また、大腸菌は長さが約 $5\mu\text{m}$ (ミクロン)と小さいため、細胞の前と後での濃度を比較できるわけではない。実は、空間的に不均一な溶液中を素早く泳ぎまわる(速度毎秒 $10\text{--}20\mu\text{m}$)ことによって生じる、自分のまわりの刺激物質濃度の時間変化を感じている。つまり、菌は少し前に自分がいたところの刺激物質濃度を「記憶」していて、それを現在の濃度と比較して行動を決定しているのである。

高感度多機能センサーの仕組み

一見単純に見える大腸菌のもつ高度な能力に多くの研究者が魅了され、精力的に解析が進められている。その結果、現在では、刺激を受け取るセンサー蛋白質(比喩的にいうと感覚器官にあたる)から細胞内の情報処理系タンパク質群(神経系にあたる)を経て、べん毛モーター(足

にあたる)に至る情報伝達系のすべての蛋白質が知られている(図2)。

私たちは、とくに細胞膜に存在する走化性センサーが刺激を受け取り、細胞内へと伝えるメカニズムに着目して追求してきた。走化性センサーは、低濃度から高濃度までの刺激物質を受容できる高性能ナノ(極微小)センサーであり、温度やpHなども感知する多機能センサーでもある。私たちの研究によって、この走化性センサーがよく似た物質を見分ける仕組みや、温度刺激を受容する仕組み、細胞内に情報を伝える仕組み、刺激を「記憶」する仕組みなど、この蛋白質がもつ高度な機能が徐々に明らかになってきている。

バクテリアにも鼻がある？

それでは、大腸菌の走化性については何もかもわかったのかというとそうではない。むしろ、「個々の分子が集まったときに、生物の行動として重要

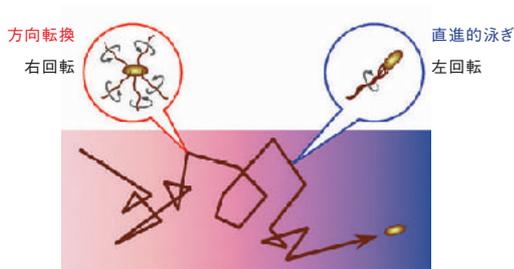


図1 大腸菌の走化性

菌体あたり数本生えているべん毛が左まわりに回転すると、束ねられて推進力が発生し、菌は直進的に泳ぐ。一方、べん毛が右まわりに回転すると、束がほどけて方向転換する。この2種類の泳ぎを繰り返すことにより、菌はランダム・ウォークをする。液体中に刺激物質の濃度勾配がある場合（図では右側が誘引物質濃度が高い）には、菌は、方向転換頻度を調節してランダム・ウォークに偏りをかける（右側に進んだときには方向転換頻度を下げ、左側に進んだときには上げる）。このような試行錯誤的な泳ぎの結果として、菌はよりよい環境へ（図では右側へ）と移動するのである。

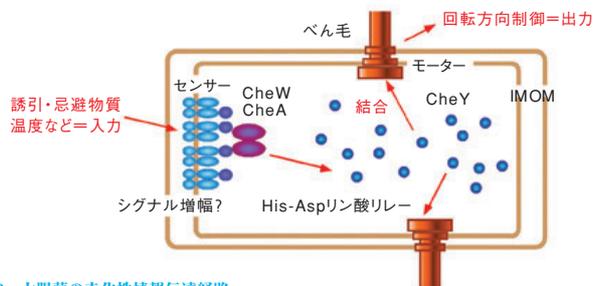
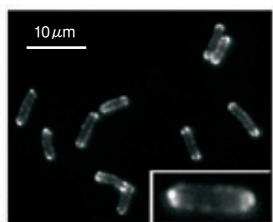


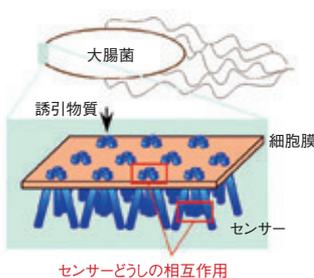
図2 大腸菌の走化性情報伝達経路

走化性センサーは、ヒスチジン酸化酵素CheAおよびアダプター蛋白質CheWと複合体を形成し、細胞の極に局在する。センサーは、外界からの刺激に応じてCheAの活性を制御し、その情報は細胞内情報伝達系（His-Aspリン酸リレー系）を経て、べん毛の根元にあるモーターへと伝えられ、その回転方向が制御される。なお、実際には、一定の刺激が持続すると応答が減衰する。この現象を適応といい、「刺激物質の時間的変化」を感じるために必須の性質である。ここでは省略したが、適応は、センサーの可逆的メチル化を含む負のフィードバック制御経路によって起こる。IM、内膜（細胞膜）；OM、外膜。

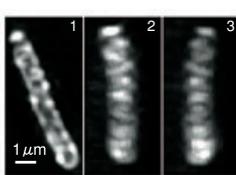
【受容体の極局在を示す蛍光顕微鏡像】



【センサー集団（クラスター）の模式図】



【センサーのらせん状配置を示す蛍光顕微鏡像】



【蛋白質膜挿入装置のらせん状配置と膜タンパク質の局在】

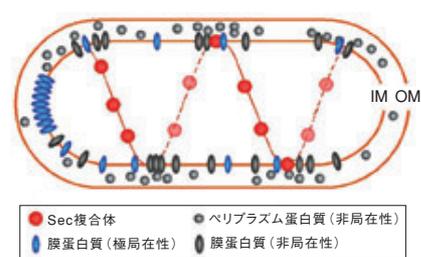


図3 走化性センサーの極局在とクラスターの推定構造

（左）センサーの極局在を示す蛍光顕微鏡像。センサーと蛍光蛋白質をつなげて、センサーをもたない大腸菌変異株に発現させ、蛍光顕微鏡で観察した。どの菌でも、センサーが極に集まっているのがわかる。右下は1つの細胞を拡大したもの。

（右）センサー集団（クラスター）の模式図。走化性センサーは、刺激の有無にかかわらずホモ二量体として存在する。この二量体どうしが細胞質側で相互作用して「二量体の三量体」ユニットを形成し、ユニットどうしがペリプラズム側で相互作用して規則正しい網の目構造をした集団を形成すると推定される。誘引物質のセンサーへの結合やセンサー細胞質側のメチル化修飾は、集団を解離集合させるのではなく、集団内のセンサー二量体どうしの配向を変化させるというのが私たちの提唱しているモデルである。

図4 走化性センサーの極局在メカニズム

走化性センサーは、まず細胞の側面の細胞膜に挿入され、極へと移動することがわかってきた。どのようにして側面から極へと移動するのか、どのようにして極にトラップされるのかについてはまったくわかっていないが、側面ではらせん状に配置することがわかってきた。（左）センサーのらせん状配置を示す蛍光顕微鏡像。走化性センサーと蛍光蛋白質の融合蛋白質を全走化性センサー欠損株中で発現させ、落射蛍光顕微鏡で撮影した画像を計算により三次元再構成した。1、2、3は同じ細胞を異なる角度から見たもの。複合体（蛋白質膜挿入および膜透過装置）も同様の配列を示した。（右）蛋白質膜挿入装置のらせん状配置と膜タンパク質の局在。Sec複合体のらせん状配置と膜蛋白質およびペリプラズム蛋白質（内膜と外膜の間にある）の局在を模式的に示した。

な性質がどのように現れるのか」という根本的な（手強い）疑問は残されたままである。実際、走化性センサーは、細胞膜内ではばらばらに存在しているのではなく、（他の走化性蛋白質とともに）短い棒状の大腸菌細胞の極に局在し、たくさんのセンサー蛋白質が集合している（このような集団を「クラスター」という）ことがわかってきた（図3）。高性能センサーがさらに集積していることから、発見当初「バクテリアにも鼻がある？」と話題になった。

「鼻」はどのように働いているのか

では、この「鼻」=「センサー集団」はどのような仕組みで働くのだろうか。私たちは、走化性蛋白質の局在と情報伝達との関係を探っている。たとえば、走化性蛋白質を蛍光蛋白質とつなげた蛋白質をつくと、生きた細胞のなかで局在の変化を追うことができる。また、センサー集団の構造やその変化を調べるため、化学的処理によ

てセンサー蛋白質どうしをつなげる実験も行っている。どこどこが近くにあるか、その距離が情報伝達の過程でどう変化するのかを調べるのである。これも生きた細胞の中で行うのがミソである。

以上のような解析と他の研究グループの成果を合わせて、センサー集団の働きに関する具体的なイメージがかなり明確になってきた。現在は、このセンサー集団を単離精製して構造解析することが焦点となっている（困難ではあるが）。そして、将来的には「システム」全体の働きを分子の言葉で理解したいものである。

そして細胞というシステムの理解へ

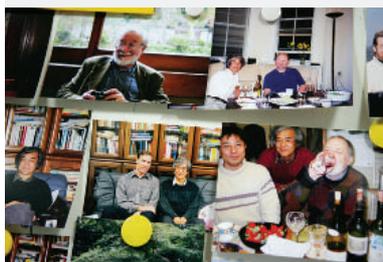
一方、センサーがどのようにして細胞の極に局在するのかについてはほとんど答えられていない。これは、「鼻」を超えて、大腸菌細胞そのものの「なりたち」自体にも関わる大問題である。つまり、細胞膜の機能的・構造的分化について

理解することが、細胞というシステムを理解するうえで必須と思われる。私たちは、センサー蛋白質が、菌体側面の膜に挿入され、やがて極へと移動することを見出した。また、センサーが菌体側面ではらせん状に配置するという驚くべき発見をした（図4）。さらに、蛋白質を膜に挿入する装置（Sec複合体）自体がらせん状に配置しており、センサーはSec複合体とともに局在することも示された。ただ、このようなららせん状配置がどうしてできるのかについてはまったくわからない。また、走化性センサーが、膜挿入後すぐにSec複合体から離れていかないのは不思議である。これらの課題に答えていくことで、細菌細胞膜がどのように組織化されているのかについて迫ってきたい。

* インドール
蛋白質の腐敗などによって生じる有機化合物。不快な臭気を発する（大便の匂い成分に含まれる）が、非常に低濃度の場合は、よい香りがする。

教える場、教えられる場

【量子化学II／3年前期】 ————— 大峯 巖 物質理学専攻教授



大学の副総長を務める大峯教授は、分単位のスケジュールを組む多忙な毎日である。そのような忙しさにもかかわらず、大峯教授は自ら進んで講義をしている。なぜ講義にこだわるのか、尋ねてみるとそこには確固とした信念があった。「講義とは研究者にとって非常に大事なことで、自分を学ぶことにつながる」。つまり、学生から質問を受けることは今まで考えてきたことを原点から見直す機会であり、そして、その姿勢は独りよがりになってしまいがちな研究の打破へ直結するのだという。「教授にとって、講義は『教授する』場であるとともに『教授される』場でもある」と話す。

講義の内容は、「光と分子の相互作用に基づいた、分子の振動・回転スペクトル・反応のダイナミクスについて理解する」といったものだ。現場主義を重んじる大峯教授は、当然のごとく熱心に講義をしている。その難しい内容をいかにわかりやすく説明し、いかに理解させようかという姿は、実際に講義を受けると明らかだ。難しい専門用語を慣れ親しんだ言葉に置き換える。多くの図を用いて視覚的に説明する。例題を使って知識の定着をはかる。そして、ポイ

ントごとにまとめる。またブレイクタイムとして小話を入れることもある。このように、学生の立場を考えた上で講義を展開していた。ところで、大峯教授は大学時代数学を専攻していた。そして大学院で物理・化学を学び、最近では生物をも盛り込んだ研究をしているという。こういった過程において形成された多面的な視点は、講義の展開にも表れているし、これにより教授から学生への一方向な講義にならないことにも寄与していると思われる。

最後にこの講義を通じて、学生には何を学んでほしいかという問いにはこう答えてくれた。「この講義に限らず、すべての講義・研究を通じて、生きる力をつけ成長してほしい。わからないことに当たることで挫折し、努力し立ち向かうことで自信をつけ、それが次なるステップへの活力につながる。学問とは、この繰り返しであり確実なる成長をもたらしてくれる」。非常に重みのある回答に感銘を受け、学問に対し「単なる知識」から「成長への手段」へと認識を改めるとともに、その重要性を感じざるを得なかった。

ひがいでいちぞう
(取材・東出一三 生命理学科4年)



Iwao Ohmine

物質理学専攻教授。1977年ハーバード大学大学院修了。Ph.D. 専門は理論化学。とくに液体のダイナミクス、溶液や生体内の化学反応、液体の結晶化過程などの理論研究（本誌第3号P.4参照）。

数学の魅力、“美しさ”に導かれよう

【代数学要論Ⅰ／3年前期】——伊藤由佳理 多元数理科学専攻講師

授業を受けるまでは、私は、群論という学問は数学特有の学問であると思っていた。「五次方程式の解は導けない」という説をご存じだろうか。数学・物理に携わっていれば、一度は聞いたことがある問題だ。それをどのように証明したのか。係数の選び方で無限個存在する五次方程式をすべて解いて、「解は導けない」と証明しているのではない。この証明を、シンプルかつ矛盾なく行ったのが、ガロアの群論、つまり「群論」である。

伊藤先生が講義される授業は代数学要論Ⅰ。授業の目的は、基本的な代数系の1つである群を理解することである。取材させていただいた回は講義の最後であったため、抽象的事例から具体的な事例（結晶群）が取り上げられていた。群論は、物理・化学でも大切な理論なのである。そのため、工学部・化学科など、数学科以外の学生も受講するという。

伊藤先生に数学の魅力をお聞きすると、「無限にあるような方程式を、1つの理論で誰が見ても矛盾がなく、かつ美しく証明できること」だとおっしゃった。確かに、結晶格子を回転対称操作を施して思いのまま書き出しても、重複なく

すべてを書き出す、という保証はどこにも存在しない。しかし、結晶格子を群として扱くと、3次元の結晶格子は14種類しか存在しないことが証明できる。このように、無秩序な事象から抽象的事例を抽出し、自然科学を“美しく”理解すること、これが数学のすばらしさである。

自然科学の中に眠っている美しさを教える伊藤先生は、笑顔がたえなかった。また、抽象的な定義の後に、必ず具体例を示したり、また毎回でてくる専門用語も丁寧に説明されるので、その定義や専門用語が具体的に何を示すのか、想像をかきたたせてくれる。実際、受講している学生も同じように感じていた。

数学は数式の羅列ではなく、シンプルに書き下した自然科学の秩序であった。その秩序を述べるにはシンプルという美的センスも必要であると先生はおっしゃった。学生に語りかける伊藤先生や、未来の数学者たちの姿を拝見し、群論という日常ではふれることはほとんどない学問から、身近な現象を“美しく”表現する魅力を見出すことができた。

(取材・工藤奈都子 素粒子宇宙物理学専攻博士前期課程2年)



Yukari Ito

多元数理科学専攻講師。名古屋大学理学部数学科卒。東京大学大学院数理科学研究科数理科学専攻博士課程修了。2003年より現職。専門は代数幾何。特異点解消やその幾何学的構造などを研究しており、物理学との関連にも興味をもつ(本誌第6号P.4参照)。

キャンパス通信

南半球宇宙観測 研究センターが発足

附属南半球宇宙観測研究センター助教授
大西利和 (Toshikazu Onishi)

名古屋大学は、優れた宇宙の研究で国際的にもよく知られる。とくに最近、南の空の観測研究が注目されている。このような観測をより強力にすすめるために、4月に理学研究科附属南半球宇宙観測研究センターが発足した。

このセンターには、南米チリのアタカマ高地にもうけられたサブミリ波望遠鏡NANTEN2と、ブラジルでの観測を予定する2台の気球搭載望遠鏡(エックス線と遠赤外線)という、最新鋭装置が所属する。専任の國枝秀世教授と助教授大西利和のほか、山本宏昭研究員が属し、福井康雄理学研究科教授がセンター長を併任する。

南天の観測は、これまでもその重要性は言われてきたが、北天に比べて観測研究が立ち遅れていた。天文学の先進国が北に偏っているためである。

ミリ波望遠鏡「なんてん」が1996年からチリで観測をはじめ、大小マゼラン雲で星を生むガス雲の全貌を解明した。これが世界的な注目を集めて、南天研究の大切さが改めて認識された。マゼラン雲は至近距離(とはいっても約20万光年先だが)にある銀河である。また、ブラックホールがあるとされる天の川銀河の中心部も、やはり南天の射手座にある。

同センターの特色は、今最も注目されるサブミリ波・遠赤外線からX線・ガンマ線という、新しい波長帯の先端研究である。アメリカ・ドイツなどを含む多国間協同研究「サブミリ波とガンマ線による星間物質研究拠点形成」(日本学術振興会・先端研究拠点事業)の推進役も含めて、文字通り「センター」としての活躍が期待される。



近藤孝男理学研究科長(左)と福井康雄センター長

技術部だより

ガラス工作室

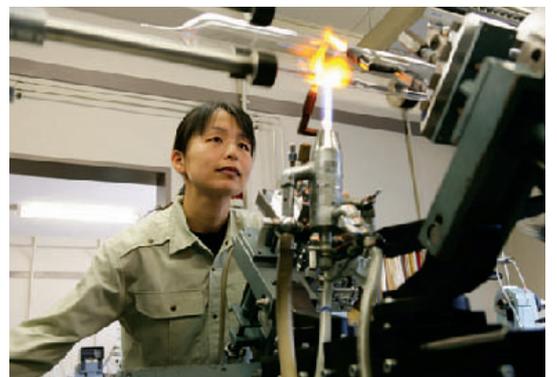
全学技術センター(理学)
夏目秀子 (Hideko Natsume)

理学部A館1階廊下で、“ジャーツ”という音を耳にしたことがあると思う。その音の発生源はガラス工作室である。音が聞こえているときは、大抵、手細工による工作中、バーナーでガラス管を溶かして、伸ばして、つないで…とさまざまなかたちに変化させ、ガラス装置・器具を製作しているのである。全国国立大学法人および企業において、女性ガラス工作技術者は、ごくわずかな存在である。その中の一人として、日々、技術の向上に励んでいる。

ガラス工作室では、修理はもとより、空気にふれさせずに物質を反応させたい、合成した試料の測定をできるだけ簡便にしたいなど実験の目的を達成するため、研究者とともに装置・器具の設計および開発を行い、それを製作するという業務をしている。当工作室の製作した装置・器具により、実験が成功したと聞いたときは大変うれしく、また、やりがいのある仕事であると実感できるときである。

ガラス工作室の設備は、関係者の方々の努力により、国立大学法人の中でもトップクラスである。設備が充実することにより、不可能が可能となった仕事も数多くあり、このような環境でガラス工作に携わることができたのは、非常に光栄である。

設備に加え、さらに必要とされるのは、高度な技術である。ガラス管を溶かすだけなら、誰でもできるのかもしれない。ただの工作ではなく、技術を積み上げ、研究に役立つ“もの”ができるまでには、長い年月がかかるといわれている。その技を習得し、継承していくために、今日もジャーツと音を響かせようと思う。



研究科長就任に寄せて

用と不用の間で

名古屋大学大学院理学研究科長・理学部長

近藤 孝男



早いものでもう研究科長になって7カ月が過ぎた。未だに家内は信じられないようで、こんなことになるとは想定外だという。それはもっともで、研究科長になるとは、僕のこれまでの生き方からするとはなはなしい転向で、いまでもお尻がむずかゆい。

そもそも用不用の価値観から離れて自然の「理」を追求する、という理学の態度は社会の多数を占めることはあり得ない（そんなことになったら大変です）。積極的な意味で理学は少数派が似合っており、そうした意識を共有することで理学の価値観ができていく。高校の頃読んだ伊勢物語に「むかしおとこありけり、そのおとこ身をよなきものに思いなして京にはあらず」というところがあり、妙に記憶に残っている（東下りの段）。僕もこれまでこの態度で生きてきたようで、理学部に入ったことも、研究テーマにしても、大学院の頃熱心だった登山にしても、そうして選択してきた。理学は日本の大学では少数派だし、もちろん大学は社会では少数派なのだけれど、それでも「当局となり体制側の立場」を意識しなければならない今の状況が、なにか落ち着かない原因となっているようだ。つまり、理学研究科長という仕事はどこか自己撞着的なところがあり、ときたま顔をだす潜在意識を押し殺すことに苦勞する。

法人化されて2年、目標・評価に始まって最近の大学院改革と、大学に対する「用」の要求は増大する一方である。理学に対する期待もだんだん大きくなる。それももっともで、理学の獲得する競争的資金の額を見れば、基礎科学に対する社会の期待は、もはや「用不用の価値観から離れて」とはいつていられない状況なのは明らかだ。こんな時期に研究科長がこんな様子でははなはだ心許ないことであるが、やはり理学の心は忘れないようにしたいと思う。

最近あたりを見まわして気づいたのだけれど、理学研究科長が研究科長室にあまり居つかないのは、どうも例外的なようだ。皆さんが寛容で、事務がしっかりしているおかげで、大変有り難いことです。研究科長というのは思ったより大変な仕事なのだけれど、それでも理学研究科長でよかったと思う。やはり、ここは研究の動機とその過程の喜びを皆で共有できるところだ。五里霧中のなかで試行を繰り返す。おぼろげに見えた消えてしまうアイデアを何日も繰り返して追い求める。そうしてあるときばらばらだった断片が結びつき、階段を一つ登ったように視界が開ける。さまざまな分野で日々繰り返されているこうした理学の構成員の営みこそが理学のもっとも大切なものだと思う。

先に述べたように大学の置かれている状況で課題は山積しているが、今我々が何をすべきで、何をすべきではないか、よく考えなければならない。面白い研究がどんどん生まれることが、理学の存在意義であろう。このためにも、ぜひ教員、職員、院生、学生の間でこの理学の喜びを共有し、お互いに刺激し合うことで理学の研究と教育の発展を図りたいと思う。幸い我々は先達の大切にしてきた自由闊達な伝統をもっている。また今年の改修では図書館やラウンジが整備され、理学の各分野が共有する場所が実現する。そこで院生や学生とともに理学の喜びを語り合うことができたらと思う。「理フィロソフィア」もすでに10号を教え、多くの理学の喜びを内外に伝えてきた。いまでもなく、ここには理学の大切にしてきたものが詰まっているが、さらに研究科内外で交流を深め、より多くの理学の喜びを社会に伝えていってほしい。

研究会・学会スケジュール

日本地震学会2006年秋季大会

開催日：2006年10月31日(火)～11月2日(木)
 開催場所：名古屋国際会議場(名古屋市)
 主催：日本地震学会
 問い合わせ：鷺谷 威 名古屋大学大学院環境学研究所 助教授
 sagiya@seis.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-3043

第12回名古屋大学理学懇話会

「生命の『核』を衝く-X線でみるタンパク質の動的構造」
 開催日：2006年12月2日(土)
 開催場所：名古屋大学シンポジオン
 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/

日本分子生物学会2006フォーラム「分子生物学の未来」

開催日：2006年12月6日(水)～8日(金)
 開催場所：名古屋国際会議場
 主催：日本分子生物学会
 問い合わせ：町田泰則 名古屋大学大学院理学研究科 教授
 yas@bio.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-2502

第5回坂田・早川記念レクチャー

開催日：2006年12月16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・名古屋市科学館共催
 問い合わせ：山脇幸一 名古屋大学大学院理学研究科 教授
 yamawaki@eken.phys.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-2862

21世紀COE-物質科学国際研究センター国際会議「分子機能の解明と制御」 the 21st Century COE-RCMS International Conference on "Elucidation and Creation of Molecular Functions."

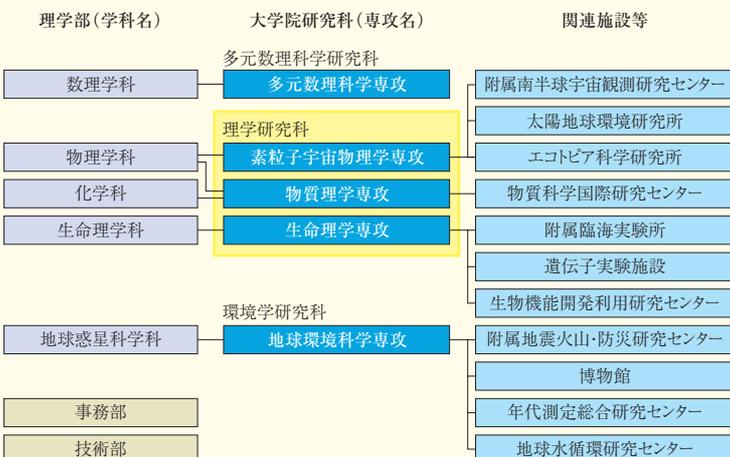
開催日：2007年1月9日(火)～11日(木)
 開催場所：名古屋大学野依記念学術交流館
 主催：21世紀COEプログラム「物質科学の拠点形成:分子機能の解明と制御」
 名古屋大学物質科学国際研究センター
 問い合わせ：山口茂弘 名古屋大学大学院理学研究科 教授
 yamaguchi@mbox.chem.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-2291

数理物理における新たな構造と自然な構成の探究 Exploration of New Structures and Natural Constructions in Mathematical Physics

開催日：2007年3月5日(月)～8日(木)
 開催場所：名古屋大学理学部1号館
 主催：名古屋大学大学院多元数理科学研究科
 国際研究集会「数理物理における新たな構造と自然な構成の探究」組織委員会
 問い合わせ：林 孝宏 名古屋大学大学院多元数理科学研究科 助教授
 hayashi@math.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-2416

組織図

理学部・理学研究科・多元数理科学研究科・環境学研究所(地球環境科学専攻)



編集だより

読者からののがきを読むと、宇宙の特集を要望する声は多い。今回はそれにこたえて、宇宙論の最前線を新任教授のお二人に語ってもらった。エックス線によって、ブラックホールのまわりのドップラー効果まで見えてきたというのは、驚きである。ビッグバンに始まる宇宙開闢の物語を聞くと、「宇宙年齢137億年」など、10年前には想像もできなかった精密な宇宙観に人類が迫っていることを感じさせる。しかし、謎はさらに深まるという。まだ教科書にもほとんど書かれていない「ダークエネルギー」が宇宙のエネルギーの大半を占めるとのこと。専門家にもわからない宇宙の姿の中に、ちっぽけな人類は立ち尽くしているように見える。(福井)

今回はじめて編集作業に加わった。取り上げられた内容を見て、あらためて名大理学部の多士済々ぶりを思った。現在の理学部の活発な研究活動はどこにその起源があるのかと考えるに、1946年6月13日に坂田昌一教授(本誌第2号P.2参照)らを中心に制定された「物理学教室憲章」によって、教授がすべてを支配する講座制から、身分にかかわらずメンバーが自由に研究を議論する研究室制に移行したことが重要だったと私は思っている。そして、生物物理学の大沢文夫教授(本誌第7号P.14参照)らが分子生物学研究施設を立ち上げることによって、この憲章の「研究の自由を尊ぶ考え方・雰囲気」が物理学科から生物学科にも広まり、さらには、理学部全体に広がったのではない。ノーベル賞に輝いた野依良治教授(本誌第1号P.2参照)も20代で自分の研究室をもてたと聞く。実は、文部科学省も講座制廃止の重要性にやっと気づき、従来教授・助教授・助手から教授・准教授・助教へとという制度変更を、来年度から全国一斉に行うことになった。名大理学部は60年先を走ってきたことになる。この制度が骨抜きにならず、名大理学部の自由な雰囲気が全国に広まることを願う。(岡本)

表紙説明

高精度の観測衛星や望遠鏡によって宇宙の歴史や構造などがつぎつぎと解き明かされ、これまではほんやりとしていたその姿がはっきりとした像を結ぶようになってきた。写真は、銀河系の中心部に位置し、巨大なブラックホールがあるとされる射手座の天の川(撮影:藤井旭)。



理 *philosophia* — No.11 October 2006 2006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)
 佐藤正俊(評議員)
 栗田英資(数理学科)
 福井康雄(物理学科)※委員長
 杉山 直(物理学科)
 岡本祐幸(物理学科)
 高木秀夫(化学科)
 森 郁恵(生命理学科)
 古賀章彦(生命理学科)
 鷺谷 威(地球惑星学科)
 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2007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、石油系溶剤に代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)

