

「磁気リコネクション」

横山 央明 (地球惑星科学専攻 准教授)

X線で衛星望遠鏡が撮像した太陽最外層高温大気コロナの写真を見ると多数のループ状構造が見える。動画で見ると、その筋構造が突然変動・増光・飛出する。この増光のうち大きなものはフレアと呼ばれており、最大で10の31乗 erg もの熱・運動エネルギーが数時間程度で発生する。エネルギー源は磁場であり、そのエネルギー解放機構がここで紹介する「磁気リコネクション」で、文字通り訳すと磁場の「つなぎかえ」である。

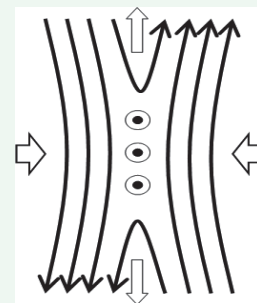
いま空間の左右半分ずつで互いに逆向きの磁力線が充たされていると考えよう。その境界面内では、磁場に直交する電流が流れて両サイドの磁場を維持している。電気抵抗のためこの電流が減衰し熱が発生すると磁場も弱まる。これは、互いに逆向きの磁力線が対消滅して熱になったのだ、とも言える。しかし太陽コロナでは電気抵抗が極端に弱く、エネルギー解

放率が観測よりも十数桁ほど小さくて、これだけではフレアを説明できない。

そこで互いに反対向きの磁力線を左右から局所的に押してやろう (図)。するとその箇所だけに強い電流が流れるので磁力線の対消滅が強くなる。磁力線には端がなく宙ぶらりんになるわけにはいかないので、必ず相手をみつけてつなぎかわる。すると「V」と「逆V」の字の形をした磁力線が間にできる。これらの磁力線は、パチンコのように周囲の流体を上下に弾き飛ばしてしまう。できた空隙に左右から追加の磁力線が押し寄せてきて、また繰り返してつなぎかわる。磁力線はこうして弛緩していき、ガスにエネルギーを与える。その効率が高く、結果としてフレアのエネルギー解放をよく説明することが可能だ。

ここでは、太陽を例にとって説明したが、地球磁気圏尾部擾乱現象や、かに星

雲の放射エネルギーの供給源として、強磁場中性子星マグネターの巨大フレアや、銀河面や銀河団のX線高温ガスの加熱を説明する機構として磁気リコネクションがひろく提唱されている。理学系研究科では、筆者と天文学専攻の常田佐久教授とがおもに太陽への応用から、地球惑星科学専攻の星野真弘教授が地球磁気圏や超新星残骸への応用、物理学専攻の牧島一夫教授が銀河団への応用で研究している。また新領域創成科学研究科では小野靖教授・井通暁准教授がプラズマ実験を行っ



「並列オブジェクト」

米澤 明憲 (情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻 教授)

計算機で実行される大規模ソフトウェアは、システムプログラムと応用 (アプリ) プログラムに大別される。Linux や Windows のような OS がシステムプログラムの代表例であり、粒子系シミュレーションソフトや有限要素法の計算ソフトが応用プログラムの例である。「並列オブジェクト」の概念は、並列計算機やスパコンの上で動かされる大規模な応用プログラムの設計・開発に威力を発揮する。さらに、離散事象の自然なモデル化とその並列計算機上でのシミュレーションを容易にする概念でもある。

「並列オブジェクト」は、大規模ソフトウェア (プログラム) を構築するためのモジュール (部品、パーツ) のひとつである。一般にソフトウェアのモジュール

は、組み合わせやすく、入れ替えが容易で、再利用されやすく、かつ実行効率に問題のない形式でなければならない。「並列オブジェクト」の着想は、大規模な並列・分散型計算機が遠い将来の夢と思われていた、1970年代半ばにおける米澤のMIT博士課程在学時の研究に遡ることができ、その後、日・米・欧で理論・応用などのさまざまな角度から研究が進められてきた。

「並列オブジェクト」は、ソフトウェア開発でもっとも普通に行われている、オブジェクト指向プログラミングにおける、「オブジェクト」の概念を一般化したもので、ひとつの「オブジェクト」に1個のCPUを閉じ込めたものと考えてよい。多数の並列オブジェクトがあればその数だ

けのCPUが使われ、オブジェクト間の情報のやり取りは、オブジェクト間のメッセージ送信で行われるものである。

今では「並列オブジェクト」をもとに、超並列型のスパコン上で稼働する分子動力学の応用プログラム、ネット上の新しいメディアになりつつあるTwitterシステム、Linden Labのセカンドライフシステムなどの大規模先進的ソフトウェアシステムの構築・実装が行われるようになった。現在、計算機はマルチコア、メニコアの時代に入りつつあり、CPUを何十万・何百万個内蔵した計算機を容易に使いこなすためのソフトウェアシステムが求められている。その時、この「並列オブジェクト」の重要性がさらに増すと予想されている。



「暗黒物質」

横山 順一（ビッグバン宇宙国際研究センター 教授）

暗黒物質とは、この宇宙に大量に存在して重力源になることが分かっているものの、さまざまな実験・観測手段によってもいまだに直接検出されていない未知の物質のことである。その正体は、超対称性粒子やアキシオンなどの未知の素粒子か、あるいは質量 $10^{20} \sim 26$ グラムのミニブラックホールであると考えられている。

暗黒物質が存在することは、ツビッキー (F. Zwicky) によってすでに 1933 年に指摘されていた。彼は銀河団中の各銀河が、観測されている天体の重力では支えきれないほど大きな速度分散をもっていることを見だし、これは暗黒物質の重力によって支えられているからだと考えた。

暗黒物質の存在量はさまざまな方法で推定されている。渦巻き銀河の中心からの距離とその位置での回転速度の関係を

表す回転曲線を使うと、回転による遠心力と重力の釣り合いによって、その半径より内側に含まれる質量が推定できる。銀河団内の高温ガスから放射される X 線の観測によって温度が測定されると、ガスの圧力が求められ、圧力と重力の釣り合いから全質量も推定できる。また、暗黒物質の存在量は、後に銀河などの構造に発展する密度ゆらぎやそれに付随した温度ゆらぎの発展に大きく影響するが、それを用いると宇宙マイクロ波背景放射の非等方性の観測から高精度の情報が得られる。2003 年に宇宙背景放射探査機 WMAP によって、宇宙の全エネルギー密度の約 23% を占め、原子（バリオン）の約 5 倍存在することが明らかにされた。

暗黒物質の直接検出としては、宇宙線として飛来する重い粒子を検出しようという実験が世界数カ所で進められてい

る。そのうちの 1 つである米国の CDMS 実験は最近、暗黒物質かもしれない事例が 2 例あった、と報告したが、これをもって暗黒物質を発見したと即断するのは早計である。また軽い候補粒子アキシオンについては、蓑輪眞教授のグループなどによって太陽からの飛来粒子を検出する実験が進められている。いっぽうミニブラックホールが暗黒物質である場合には、初期宇宙にこうしたブラックホールが生成するさい、多量の重力波が放出され、それはスペース重力波干渉計 DECIGO によって容易に検出できることを私たちは最近発見した。この DECIGO はビッグバン宇宙国際研究センターの新たな研究プロジェクトとして、坪野公夫教授のグループを中心に現在検討が進められている。



「前線」

伊賀 啓太（海洋研究所 准教授，地球惑星科学専攻 兼任）

大気の中にはその性質が比較的一様な「気団」があり、これを分けるように、温度や湿度が急変する細長く延びた領域がある。このような気団を隔てる境目を「前線」という。

天気予報の中で前線はよく低気圧とともに登場し、悪天をもたらす原因として知られている。高等学校の地学の教科書には、前線が南北にうねりはじめて寒冷前線と温暖前線を伴った低気圧が発達し、さらに最盛期を迎えて閉塞前線を形成していくという温帯低気圧の一生の解説図が載っていることもあるが、この考え方は 20 世紀初頭にビヤクネス (J. Bjerknes) らによって提唱されたノルウェー学派モデルに基づいたものである。

今なお有用なモデルであるが、その後の気象学の進歩によりいくつかの重要な

点で認識が変わってきた。まず、このモデルでは前線から低気圧が生まれるという過程をたどるが、現在の認識では、水平温度勾配（必ずしも前線のような大きな温度勾配を必要としない）から「傾圧不安定」の仕組みによって低気圧が発達し、前線はそれに伴って形成されるという考え方が基本となっている。また、1980 年代にはシャピロ (M. A. Shapiro) らが低気圧のモデルを提唱したが、このモデルでは温暖前線と寒冷前線は低気圧の近辺で接続しておらず、最盛期以降になっても閉塞前線は形成されない。すべての温帯低気圧に対する形態の認識がこのモデルに置き換わってしまったわけではないが、低気圧に伴う前線の形態に関する認識に大きな変化をもたらし、この見方に基づいた前線の研究は現在も盛ん

に行われている。

ノルウェー学派モデルで考えられたように、前線に伴って擾乱や低気圧が発生する現象を「前線不安定」あるいは「前線波動」とよぶ。温帯低気圧が前線不安定によって発達するとは考えられなくなったが、より小さな規模では前線の不安定性によって発達したと考えられる擾乱・渦・低気圧が見られる。とくに前線上に二次的に発生する低気圧は、時として急速に発達することも多く多くの研究が続けられている。

海洋研究所海洋物理学部門海洋大気物理学分野では、大気の中小規模現象の研究として前線が本質的な役割を果たす現象の研究が進められている。



「3 ステップモデル」

加藤 毅 (化学専攻 准教授)

一般に「 n ステップモデル」は物理化学的な素過程を記述・把握するため、さまざまな分野でそれぞれ固有の意味合いをもって発展・淘汰されてきていると思う。ここで取り上げる「3 ステップモデル」とは、「強光子場科学」の分野で1993年頃に提唱されたものである。

現在では、実験室で発生されるレーザー光の強度 ($\sim 10^{14}$ W/cm², 近赤外波長 ~ 800 nm) が、物質を安定な状態に保つ荷電粒子間のクーロン力の大きさ ($\sim 3.5 \times 10^{16}$ W/cm²) を凌駕しつつある。このような強い光を物質に照射すると、レーザーの周波数 Ω に対して、原子や分子の集団から周波数 $(2n+1)\Omega$ ($n \gg 1$) の高次高調波が発生する (HHG)。物質に光を照射すると、再放出が起きる現象は広く知られており、散乱などの過程が働いたら、放出光は入射光に近い波長をもつ場合が多い。ところが、強いレーザー光を物質に照射すると、はるかに短

波長の軟X線が発生するのである ($n = 25$ とした場合、発生する光の波長は約16 nm)。この現象を古典的な電子運動のイメージで説明するのが「3 ステップモデル」である。

3 ステップモデルによれば、まず、強い光の電場の影響で、電子の感じるポテンシャル曲面が平衡構造のものから大きく変形する。すると、①分子に束縛されている電子は、トンネル効果によって核引力ポテンシャルの束縛から逃れることができる (イオン化)。②イオン化電子は光の電場によって加速され、親イオンから遠ざかるが、光の電場が交番電場であるために、光の半周期内には親イオンに向かって加速される。③運動エネルギーを獲得した電子の親イオンへの衝突。再衝突する電子のもつ最大運動エネルギーを計算すると、 $3.2U_p$ と求められる (U_p は交番電場中での電子の振動運動の平均エネルギー)。この運動エネル

ギーが親イオンとの再結合過程で光として解放されるものと考え、光子エネルギーは $I_p + 3.2U_p$ となる (I_p はイオン化ポテンシャル)。実際、この値は実験的に観測される高調波の最短波長をよく説明する。

3 ステップモデルの延長線上に「分子軌道トモグラフィー」の発展がある。HHG の強度分布などを解析することで、イオン化した電子が元いた場所、すなわち分子軌道を再構成できるという。いっぽう、強光子場中の炭化水素分子においては、分子内の水素原子の分布が電子と同様に分子全体に広がってしまうことが、本研究科化学専攻山内教授らの実験研究から明らかになりつつある。「3 ステップモデル」という考え方を超えて、強い光と物質との相互作用の本質をとらえた、より適切な概念を提出することが求められているように思われる。



「生物の学習・記憶」

飯野 雄一 (生物化学専攻 教授)

学習・記憶と聞いて読者は何をイメージするだろうか。受験を何度もくり抜けてきた世代にとっては、学習＝勉強、記憶＝勉強したことを覚えていること、という連想が起こるかもしれない。もちろんこれは大きく外れてはいない。しかし、脳科学ではもう少し広い定義をする。学習＝過去の経験により行動が変化すること、記憶＝過去の経験による変化が持続していること、というのが一般的な定義である。

では脳神経系でどのような変化が起こっているのだろうか。基本原理としてわかっているのは、学習によって、脳を形成する神経細胞、あるいは神経細胞

と神経細胞がシグナルを伝え合う「シナプス」に変化が起こることである。たとえば、ある神経が活動しやすくなる、あるいはある神経から別の神経にシグナルが伝わりやすくなるといった変化が起こり、その変化が持続するとわかっている。

では、記憶は脳神経系のどこにあるのだろうか。これは最近の研究の中心的課題の一つである。哺乳類のエピソード記憶 (経験した事柄の記憶) では、新たに獲得した記憶がいったん脳の特定の部位 (たとえばヒトでは脳の中心に近いところにある「海馬」) に蓄えられたのち、別の部位 (脳表面の大脳皮質など) に徐々に移っていくということがわかりつつあ

る。また、昆虫の脳では記憶の獲得に関わる部分と読み出しに関わる部分が異なることもわかっている。これらの生物では脳の部位 (神経細胞の大きな集合体) ごときの機能の解析が主であるが、より簡単な生物、例えば線虫では、一つ一つの神経細胞を特定して調べることができるため、どの神経の変化が記憶を担うかといった研究が行われ、たったひとつの神経の変化で行動が逆転する場合があることもわかりつつある。理学系研究科では、生物化学専攻と生物科学専攻でマウスの匂い記憶の機構、ミツバチの視覚記憶の機構、線虫の化学感覚記憶の機構などの研究が進められている。