

連載 理学のキーワード 第17回



「宇宙の夜明け：再電離」

嶋作 一大 (天文学専攻 准教授)

いち日に夜明けがあるように、宇宙140億年の歴史にも夜明けがあった。それが再電離である。宇宙に初代の天体が生まれ、その光が宇宙空間を満たしたとき、再電離が起きた。宇宙が数億歳の頃のできごととされるが、まだ見た者はいない。

生まれて間もない熱い宇宙では、おもな元素である水素は陽子と電子に分かれた電離状態にあった。ところが宇宙は膨張とともに冷え、40万歳の頃、電子が陽子に捕えられて水素原子ができ、宇宙は電氣的に中性になった。光の進路をじゃまする電子が消えたおかげで、宇宙は霧が晴れるように透明になった。

しかし観測によれば、宇宙は遅くとも10億歳になるまでに再び電離し、現在もその状態を保っている。遅くとも、

というのは、観測は再電離の起きた時代までさかのぼれていないのである。これほど過去(すなわち遠方)の観測はきわめて難しい。

宇宙の電離度の情報は当時の天体のスペクトルに刻み込まれている。明るい天体であるクェーサーは電離度の測定に適するが、9億歳という、クェーサーの見つかっているもっとも昔の宇宙でさえ、ほぼ電離してしまっている。銀河は8億歳まで見つかっており、電離度の低下の示唆もあるが、確実ではない。宇宙マイクロ波背景放射に対して宇宙はわずかに不透明だが、これは4億歳頃に宇宙が一瞬で再電離したとすればつじつまが合う。しかし実際は数億年かけて進んだ可能性が高い。

再電離は宇宙の天体の始まりに関係

がある。冷えていくだけの宇宙では再電離は起きない。再電離を起こすには、何らかの天体が、水素原子をばらばらにできる高エネルギーの紫外線を宇宙空間に大量に放射しなければいけない。この謎の天体の正体は、宇宙の初代の銀河で生まれたひじょうに重い星かもしれない。いっぽう、電離した宇宙での星や銀河のできかたは、電離前とは違うらしい。このように宇宙の再電離には、星から銀河・宇宙論まで、多くの分野の関心が交差している。

理学系研究科では、天文学専攻の岡村定矩教授と筆者の研究室が、再電離の謎に迫るべく過去の宇宙を観測している。共同研究している国立天文台の家正則教授は、一連の研究で2008年度の仁科記念賞を受賞した。



「電子顕微鏡」

原野 幸治 (化学専攻 助教)

誰しも、小学校の理科実験で顕微鏡を通して見ることでできるミジンコの姿や、葉の細胞の緻密な構造に胸をときめかせた経験があるであろう。「目には見えない極微の世界を覗き見たい」というのは人間の心の奥底にある願望なのかもしれない。

しかしながら、光学顕微鏡では原理上可視光の波長より短い数百ナノメートル以下の小さい物体を見るができない。そこで、より小さなナノの世界を観察するために開発されたのが、光よりはるかに短い波長をもつ電子線を利用した電子顕微鏡である。電子線が物質に当たると、種々の相互作用により一部の電子は散乱される。電子顕微鏡の一種である透過型電子顕微鏡では、物質を透過してきた電子線が像を形作り、物質の形

状を視覚的にとらえることができる。もちろん装置そのものは光学顕微鏡とは大きく異なり、たとえば光学顕微鏡の場合は光を収束させる時に凹型、凸型のレンズを用いるが、電子顕微鏡の場合は電子線の磁場や電場との相互作用を利用して収束させる。

世界最初の電子顕微鏡はクノール(M. Knorr)とルスカ(E. Ruska)によって1931年に開発され、以降改良を重ねながら、現在では0.1ナノメートル以下の空間分解能が得られるまでになった。今や電子顕微鏡は、化学、生物学、物理学などあらゆる科学分野で必要不可欠なものであり、その観察対象もウイルスやタンパク質といった生体物質から、金属表面の原子レベルの欠陥に至るまで実に幅広い。どの分野

でも対象物のかたちの観察からその物質がもつ性質の根源を解明するという目的は共通しており、科学における視覚的な理解の大切さを示しているといえよう。

ごく最近では、電子顕微鏡により有機分子を一分子ずつ観察し、その動きを追跡することも可能となってきた。理学系研究科化学専攻の中村栄一教授のグループでは、カーボンナノチューブに内包した炭化水素分子がナノチューブ内で回転、並進運動する様子や、チューブ表面の穴を通過する様子を数分にわたる動画としてとらえることに成功している。近い将来、分子が反応する様子を、まるで分子模型を組み立てるがごとくに一分子ずつ取り出して研究できる時代が訪れるのではないだろうか。



「ポジトロニウム」

浅井 祥仁 (物理学専攻 准教授)

ポジトロニウムとは、電子 (e^-) とその反物質である陽電子 (e^+) がクーロン力で束縛している状態であり、基本構造は水素原子と同じであるが、質量が水素原子の約 1000 分の 1 の一番軽い原子である。ポジトロニウムが他の原子と決定的に異なる点は、反物質を含んでいるため短い時間でガンマ線へと消滅してしまう点と、粒子とその反粒子で構成されている為、その量子数は真空やガンマ線と同じであり、パリティ・荷電共役などの基本的な対称性を顕わに調べることができる点である。

電子と陽電子のスピン組み合わせは、スピンがそろった三重項状態 (合成スピン $S = 1$) と反平行の一重項状態 ($S = 0$) があり、それぞれオルソポジトロニウム、

パラポジトロニウムとよばれている。オルソポジトロニウムは荷電共役変換に対して負の固有値をもつため、ガンマ線 2 本への崩壊が禁止され、破格の長寿命 (142.05 ナノ秒) で 3 本のガンマ線に崩壊する。142 ナノ秒は素粒子の世界では長く、寿命を直接測定することが可能である数少ない例であり現在は本研究室において 100 ppm の精度で測定されている。

寿命と並んでポジトロニウムを調べる基本的な量は、2つの状態のエネルギー差 (超微細構造: Hyperfine Structure) である。超微細構造はおもにスピン・スピン相互作用で生じ、スピン平行のオルソポジトロニウムの方が高い。また、オルソポジトロニウムはガンマ線

と同じ量子数なので、仮想ガンマ線への量子的な振動 (87 GHz) をくりかえしている。この二つの効果で超微細構造は 203 GHz と大きい。超微細構造の測定は過去に何度も行われ、最終的に精度 3.5 ppm が得られている。理論研究が最近進んできて 3 次の補正が可能となり、理論値と過去の一連の測定値が一致にずれ、統計的に有為な差異があることが判明した。ひょっとしたら理論計算に入っていない「標準理論を超えた新しい素粒子現象」の効果かもしれない。筆者の研究室と素粒子物理国際研究センターが中心になって、最先端のミリ波技術や超伝導技術を駆使して過去の測定と異なる方法でのこのズレの解明を目指している。



「匂いの好き嫌い」

小早川 高 (生物化学専攻 特任助教)

匂い分子は鼻腔の奥に存在する嗅細胞によって感知される。嗅細胞の先端部分には匂い分子をキャッチする嗅覚受容体という分子が存在している。嗅覚受容体と匂い分子が結合すると、嗅細胞が活性化して電気パルスを発生する。この電気パルスは、脳の嗅球に伝達され、糸球とよばれる神経構造体を活性化させる。脳は鼻腔内の匂い分子の情報を、匂い地図とよばれる糸球の活性化パターンの図形情報に変換した上で認識していると考えられている。しかし、脳が匂い地図の情報を読み解いて匂いの好き嫌いを感じるメカニズムは解明されていない。

私たちは、嗅覚情報を処理する神経回路の中から、自ら狙った神経細胞のみで、ジフテリア毒素が作り出されるように

巧妙にデザインした遺伝子操作マウスを作成した。このマウスでは、ジフテリア毒素が作り出された神経細胞のみが細胞死によって除去され、脳や体の他の組織には直接的な影響が及ばない。

腐敗物や天敵の匂い分子は、背側と腹側の糸球を同時に活性化する性質がある。したがって、背側の糸球を特異的に除去した遺伝子操作マウス(背側除去マウス)であっても、腹側の糸球を使うことで、これらの匂い分子を感知するばかりではなく、微妙な化学構造の違いを識別することができた。しかし、背側除去マウスは、驚くべきことに、腐敗物や天敵の匂い分子を嫌なものあるいは危険なものと感じて忌避行動を示すことがまったくできなかった。ただし、後天的に学習させれば、背側除去マウスであっ

ても匂いに対して忌避行動を示すことができた。逆に、腹側の糸球を除去した遺伝子操作マウスは腐敗物の匂いを嫌なものとして判断して先天的な忌避行動を示した。これらの実験結果から、悪臭を嫌な匂いであると感じるのは、背側の糸球から始まる神経回路の働きによって先天的に決められていることが初めて明らかになった。では、好きな匂いはどうなのかということもすでにわかってきているのだが、近々発表する予定の私たちの論文を見てほしい。これまでは、人によって匂いに対する嗜好性が異なっていることなどから、哺乳類では匂いをどのように感じるのかは後天的に決まるとされてきたのだが、この常識は覆されたのである(理学部ニュース 2008 年 1 月号 P.9 の研究ニュースを参照)。



「セマンティック・ウェブ」 宮尾 祐介 (情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻 助教)

現在の WWW (World Wide Web) は単にデータの集合であり人間がデータを解釈して初めて意味のある情報となるが、セマンティック・ウェブ (Semantic Web) はウェブページにメタデータを付加することでコンピュータが意味情報を解釈・処理することを目指す枠組みである。

セマンティック・ウェブ技術のひとつである RDF (Resource Description Framework) はコンピュータが理解可能な形式でメタデータを記述する枠組みである。たとえば、「源氏物語の作者は紫式部である」という情報を自然言語で表すと「紫式部が源氏物語を書いた」「源氏物語は紫式部によって作られた」などさまざまな表現があり、これらが同一の意味を表していることをコンピュータは理解できない。いっぽう、RDF は

<主語, 述語, 目的語>の3つ組でさまざまな関係を表す。たとえば上の例は<源氏物語, 作者, 紫式部>と表現する。ただし、主語, 述語, 目的語に勝手な単語を使うと結局自然言語と変わらないため、それらに使える単語 (語彙) の共通化・標準化が行われている。

単語を列挙するだけでは意味を記述したとは言えず、単語間の関係を定義する必要がある。セマンティック・ウェブのもうひとつの重要な技術である OWL (Web Ontology Language) は、オントロジー (単語間の関係を定義するもの) を記述するための言語である。たとえば、「紫式部は女性である」という関係がオントロジーに記述されていれば、上の情報と合わせて「源氏物語の作者は女性である」という推論が可能となる。

これらの技術の一部はすでに広く利用されている。たとえば、ブログやニュースサイトの配信に利用されている RSS (RDF Site Summary) は RDF を記述方式として利用している。現在は RDF と OWL による意味記述が研究の中心であるが、将来的にはこれらの意味記述を利用して推論、証明、矛盾検出、信頼性判定などの高度な意味処理を行うことが想定されている。

セマンティック・ウェブはメタデータにより意味処理を実現するアプローチであるが、自然言語処理ではテキストから意味を計算する技術が古くから研究されている。情報理工学系研究科辻井研究室では自然言語処理やオントロジーを利用したテキストマイニングの研究を行っており、その成果として意味に基づく論文検索エンジン MEDIEなどを公開している。



「惑星の気象」 高木 征弘 (地球惑星科学専攻 助教)

太陽系には地球以外にも大気をもった惑星や衛星が多く存在している。惑星探査機の観測などにより、それらの大気中では地球の気象とはまったく異なる、多彩な大気現象が生じていることがわかってきた。木星や土星にみられる縞模様は惑星規模の東西風分布と密接な関係がある。他にも木星の大赤斑や火星の大砂嵐など、不思議な現象には事欠かないが、ここでは地球の兄弟星・金星の気象について紹介したい。

金星大気の主成分は二酸化炭素で地表面気圧は約 92 気圧もある。大量の二酸化炭素がもたらす温室効果により地表面温度は 730 K に達する。高度 45 ~ 70 km に存在する濃硫酸の厚い雲で全球が

覆われているため、地表面や大気下層の様子を外からみることはできない。もっとも興味深いのは大気スーパーローテーションとよばれる特異な大気運動の存在である。これは金星大気が自転と同じ方向に自転よりも速く回転している現象で、雲層上端付近の高度では大気のリターン速度が自転の 60 倍にも達する。

もちろん、大気スーパーローテーションを維持する何らかのメカニズムがなければ、こうした流れは地面摩擦と粘性の作用によって止まってしまう。惑星気象学者の長年の努力にもかかわらず、大気スーパーローテーションの生成・維持メカニズムは不明である。現在、筆者を含む国内外のいくつかの

グループが精力的に研究を進めており、興味深い結果が得られつつある。同様の現象は土星の衛星・タイタンにも存在し、比較惑星気象学的見地からも注目されている。

金星大気を詳しく調べ、スーパーローテーションの謎を解明するため、2010 年に日本の金星探査機 Planet-C が打ち上げ予定である。これは金星版ひまわりともいふべきたいへんユニークな探査機で、波長の異なる複数のカメラで観測することにより、三次元的な大気運動をとらえることができる。地球惑星科学専攻の岩上研究室や吉川研究室は計画実施の中心的役割を担っている。