

# 赤外線のアかりをとらえる「あかり」

尾中 敬 (天文学専攻 教授)

日本初の赤外線天文衛星「あかり」は、2～200 ミクロン（マイクロメートル）という広い波長範囲で天体からの赤外線を観測することを目的とし、本研究科も参加して開発したもので、絶対温度 6 K に冷却された口径約 70 cm の望遠鏡と 2 つの観測装置を搭載している。2006 年 2 月 22 日（水）に宇宙航空研究開発機構・内之浦宇宙観測所から M-V ロケット 8 号機により打ち上げられた後、初期試験を経て、現在「あかり」は定常観測に移り、全天の赤外線の地図やさまざまな天体の赤外線の観測を始めた。「あかり」は、星の誕生から銀河の進化にわたる宇宙の歴史の解明に挑戦する。

赤外線は、塵で隠された生まれたての若い星や、年老いた星、あるいは遠方の赤方偏移した銀河など、広い分野の天文現象の研究に重要な役割をもつ波長帯である。天体からの赤外線を高い感度で検出するために、搭載されている望遠鏡と 2 つの観測装置、すなわち遠赤外線サーベイヤー（FIS）と近・中間赤外線カメラ

（IRC）は、液体ヘリウムと冷凍機により極低温に冷却されている。12 ミクロンから 100 ミクロンの全天の赤外線の地図は、1983 年に米・英・蘭の共同で打ち上げられた赤外線天文衛星 IRAS により初めてもたらされ、天文学の多くの分野の発展に貢献してきた。「あかり」の全天の地図は、20 年間にわたり更新されていなかった IRAS の地図を、波長域の広さ、感度、および解像度において、大幅に改善することを目指している。

「あかり」は打ち上げ後、約 50 日間の初期試験を経て、4 月 13 日に望遠鏡の蓋を開口し、観測を開始した。図に、初期の性能評価期間に観測したおおぐま座にある銀河 M81 の IRC による画像を示す。3 および 4 ミクロンでは、おもに年老いた星からの光を塵による遮蔽なしにとらえ、銀河の中の星の分布が明らかになる。いっぽう、7 および 11 ミクロンでは、銀河中に浮遊する有機物質が星の光を吸収して光っている。また、15 と 24 ミクロンでは、おもに銀河中の塵

粒子からの赤外線が明るく見える。7 ミクロンより長い波長では、銀河中の星間物質の分布、とくに星が生まれている領域が明るく映し出されるため、銀河の腕が、短い波長での画像に比べてはっきり見られる。このように広い波長帯を高い解像度で観測することにより、銀河の中で起きている、星の誕生から年老いた星の挙動までの現象を一度に解明することができる。「あかり」に搭載されている観測装置は、このような多波長の赤外線観測を効率よく行うことができるよう設計されている。今後は多くの観測から、星の誕生の過程や、銀河内の物質進化を明らかにしていきたい。

「あかり」は、宇宙航空研究開発機構（JAXA）のプロジェクトで、搭載されている望遠鏡および観測装置は、名古屋大学、国立天文台、情報通信研究機構、東京大学（理学系研究科および総合文化研究科）などのグループとの協力により開発されたものである。「あかり」の運用とデータ処理には、これら国内の研究機関のほか、欧州宇宙機構（ESA）、英国 Imperial College London, University of Sussex, Open University, オランダ University of Groningen/SRON、および韓国 Seoul National University が国際協力にもとづき参加している。

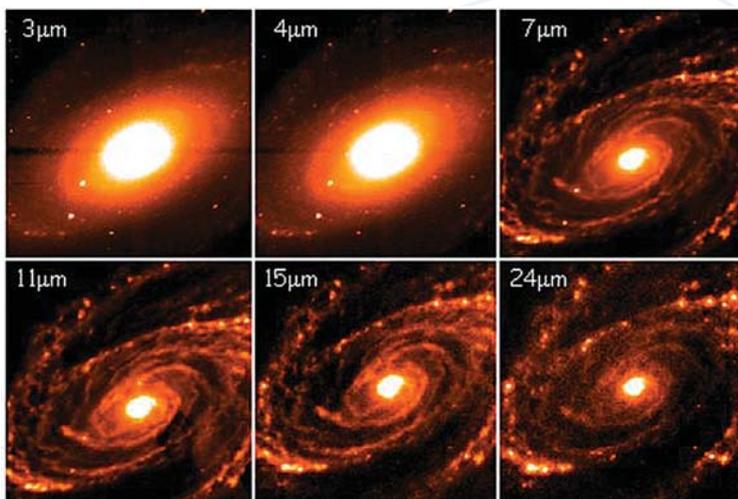


図 1：「あかり」の近・中間赤外線カメラ（IRC）により観測された M81 銀河の約 10' × 10' の赤外線画像。左上より、3, 4, 7, 11, 15, 24 ミクロンの画像（JAXA 提供）。



図 2：4, 7, 15 ミクロンの画像の合成

# からだの繰り返し構造をつくりだす分節時計

武田 洋幸 (生物科学専攻 教授), 堀川 一樹 (生物科学専攻 助手)

生物は時計をもっている。私たちの神経活動などの日内変動(概日時計)が有名である。いっぽう、時計機構は成体だけでなく、からだ作りの過程(発生)にも重要な役割をもつ。脊椎動物の背骨のような繰り返し構造の創出にはリズムを生み出す時計(分節時計)が存在する。最近われわれは、名古屋大学・近藤滋教授(システム生物学)との共同研究により、分節時計の作動原理を解明した。

背骨は、体節とよばれる中胚葉の細胞塊に由来する。発生中の胚では、体節が前から順番に、中胚葉組織(未分節中胚葉)からくびれて切れる(図1A)。その様子は、マウスでは2時間、ゼブラフィッシュでは30分毎に一对と、まるで時計で測ったような正確な周期性をもっている。これまでの研究によると、未分節中胚葉に数千から数万個の「時計細胞」が集まった「分節時計」があり、ヘアリとよばれる抑制性転写因子の発現量が周期的に変動することを利用して、時を刻んでいる(図1B)。ヘアリの変動周期は体節形成の周期と一致している。時計細胞では、ヘアリ転写因子を中心としたネガ

ティブフィードバックループが形成されており、(1)転写がON→(2)ヘアリが一定の濃度に達して、自身の遺伝子の転写がOFF→(3)転写が止まり、自己分解によりヘアリの濃度が低下する→(1)・・・が一定周期で繰り返している(図2A 赤い矢印)。しかし、分節時計が個々の時計細胞を同期させ、正確な時を刻み続ける機構、といったシステムレベルの作動原理は、これまで不明であった。

われわれは、細胞間コミュニケーションを担う膜タンパク質、ノッチ(受容体)ーデルタ(リガンド)に注目した。図2Aで示された細胞間同期の機構が実際に存在するかどうかを、ゼブラフィッシュ胚を用いた細胞移植実験とシミュレーションを組み合わせて検証した。デルタを恒常的に発現する細胞を、正常に振動する分節時計内へ移植すると、移植細胞の周辺で時計が加速された。この

結果はシミュレーションの予測とよく一致した(図2B)。これらの結果は、ノッチーデルタを介した位相同期機構が分節時計内に存在していることを示している。さらに詳細な観察の結果、正常に作動している分節時計であっても、細胞分裂や遺伝子発現の不正確さの影響により、時計細胞間の転写タイミングに「ゆらぎ(ノイズ)」がかなり存在していることが判明した。しかしこれらのノイズもまた、ノッチーデルタを介した位相同期機構により、システムに大きな影響を及ぼさない程度に軽減されていた。このようなノイズ軽減化機構は、ほとんどの遺伝子プログラムにもともと備わっていると考えられ、生物のパターン形成の研究に新しい方向性を示したと考えている。

本研究は、K. Horikawa et al., Nature, 441, 719-723, 2006に掲載されている。  
(2006年6月8日プレスリリース)

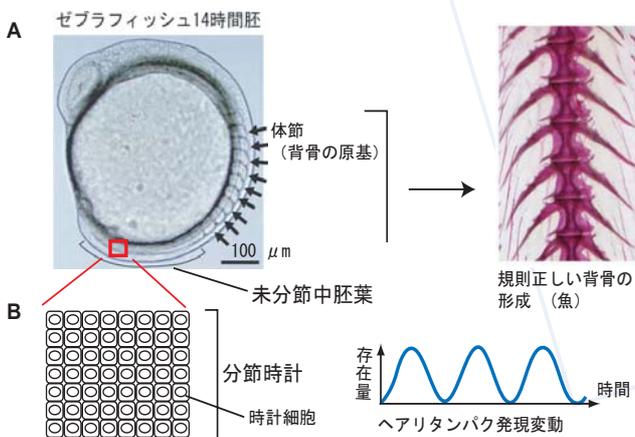


図1：  
A. ゼブラフィッシュにおける体節形成と脊椎骨  
B. 未分節中胚葉内で機能する分節時計

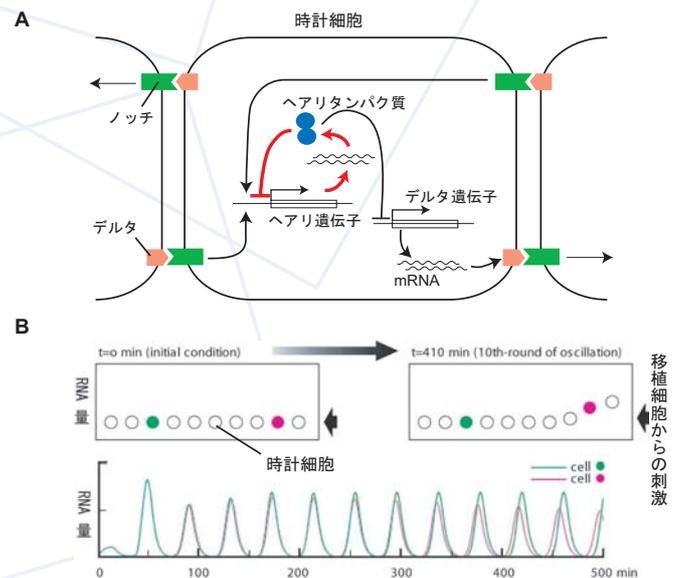


図2：  
A. 時計細胞内に存在する時計機構と、細胞間を共役するノッチーデルタタンパク質  
B. 時計機構とノッチーデルタによる細胞間共役を取り込んだシミュレーション。移植細胞からの刺激により、移植細胞の周辺で時計が加速されることを示している。同じ現象が生体内でも観察された。

# 反陽子質量を 10 桁測定することに成功

— 物質と反物質の質量は何桁まで一致するか —

早野 龍五 (物理学専攻 教授), 堀 正樹 (物理学専攻修了\*)

陽子の質量は電子質量の約 1800 倍。理科の授業で学ぶように、物質の構成要素である陽子と電子の質量比は、自然界の重要な基本定数だ。今回われわれは「光周波数コム (櫛)」という技術を使って、陽子の反粒子である「反陽子」と電子の質量の比率を、 $1836.152674 \pm 0.000005$  という世界最高の精度で決定することに成功した。この実験結果により、物質と反物質の質量が 9 桁まで一致することが確認された。

光周波数コムは、2005 年ノーベル物理学賞の対象になった、光の振動数を精密測定する装置である。われわれはこの光周波数コムを発展させた方法により、反陽子が入った特異な原子の分光を行い、その質量を決定する手法を確立した。

物質と反物質の対称性 (たとえば両者の質量は厳密に等しいかなど) の研究は、素粒子物理学の理論の根幹に関わる重要問題である。CERN 研究所は 1997 年より、日本、ドイツ、イタリア、米国などの協力を得て反陽子減速器<sup>注1)</sup>を建設し、2000 年より反物質研究を推進してきた。

反陽子減速器での主要な研究の一つが、われわれが発見した「反陽子ヘリウム原子」(通常のヘリウム原子の二個の電子の

うち一個を反陽子で置換したもの)の研究である。反陽子ヘリウム原子の中では、反陽子がヘリウム原子核のまわりをまわる軌道に入っている。われわれのこれまでの研究で、この原子に特定の周波数をもった光をあてると、共鳴を起こして反陽子が別の軌道へ飛び移ることが分かってきた。

共鳴周波数の値はスーパーコンピュータを用いた数値計算によって理論的に予言できるが、この際に反陽子と電子の質量比が入力データとして使われる。逆に言えば、共鳴周波数を実験的に測定して、これを理論値と比較することで、反陽子と電子の質量比を求めることができるのである。

今回われわれが CERN で行った実験では、反陽子を減速し、低温低密度のヘリウム標的に打ち込むことで、反陽子ヘリウム原子を生成した。これに光周波数コムを使って生成した、きわめてエネルギーの揃ったレーザー光線を照射した。

光周波数コムは、光学周波数領域に櫛の歯のように規則正しい「目盛り」を入れ、光の振動数を原子時計の精度で直読できるようにする画期的な装置である。この発明により、ヘンシュ (T. W. Hänsch) は 2005 年のノーベル物理学賞を受賞した。

われわれが使用している周波数コムは、加速器実験の過酷な環境でも何ヶ月にもわたって安定稼働するよう、ヘンシュらが設立したメンロ・システムズ (Menlo Systems) 社の協力を得て開発したものである。

今回われわれは、反陽子と陽子の質量が 9 桁まで一致することを示した。これは、物質・反物質対称性検証として最高精度の結果である。今のところ、物質・反物質の質量の違いを定量的に予言する理論はないので、今後どこまで精度を上げれば陽子・反陽子の質量差が検出できるかは分からないが、すでに反陽子質量の測定精度が陽子質量の精度に近づいているのだから、今後は陽子の質量精度の向上も必要であることは明らかである。

いっぽう、9-10 桁という程度で質量の違いが現れることはないという立場に立つならば、反陽子質量精度が、陽子質量精度を凌駕すれば、基礎物理定数表の陽子質量値として、反陽子の値が採用されるかもしれない。事実、すでにわれわれのところに CODATA<sup>注2)</sup> のタスクグループから今回の結果に関する問い合わせが来ている。

本研究は、M. Hori et al., Phys. Rev. Lett., **96**, 243401-1~4, 2006 に掲載されている。

(2006 年 6 月 8 日プレスリリース)

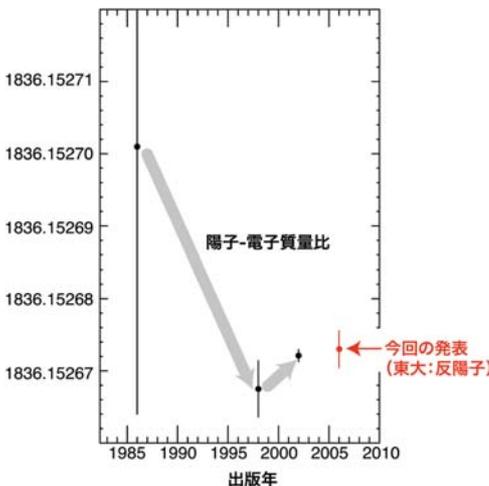


図 1: 陽子-電子質量比 (黒) と反陽子-電子質量比 (赤: 今回) の比較

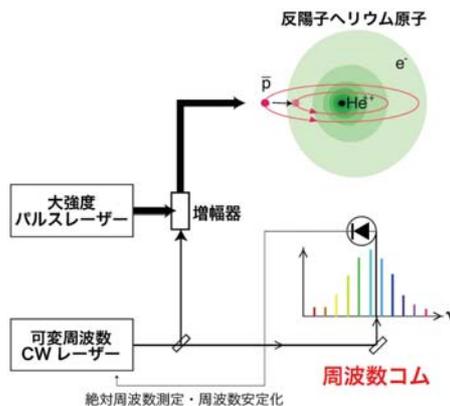


図 2: 周波数コムを用いた反陽子ヘリウム原子の分光

注 1) 反陽子減速器: 世界唯一の低速反陽子発生装置。シンクロトロンで 260 億電子ボルトに加速した陽子を金属標的にぶつけて反陽子を生成し、これをリングで捕獲して 500 万電子ボルトまで減速する。反陽子ヘリウム原子や反水素原子の生成には、「遅い」反陽子が必須である。

注 2) CODATA: 科学技術データ委員会 (Committee on Data for Science and Technology)。CODATA タスクグループでは、1973 年、1986 年、1998 年、2002 年に基礎物理定数の推奨値を発表している。これは、理科年表等に掲載されている数値のもとになっている。

\* 現在は学振 PD, 早野研究室に所属。