

の最も高いスペクトル周波数は、パルスの長さ $\tau$ に反比例するからだ。光子のエネルギーは周波数にプランク定数 $h$ を掛けたものなので、パルスの最も高い光子エネルギーは $E_{\max} \approx h/\tau$ と計算できる。ピコ秒以下からフェムト秒の領域は、 $E \sim 0.1 - 0.01$ 電子ボルト(分子反応の典型的なエネルギースケール)に相当するが、0.15フェムト秒(150アト秒、 $150 \times 10^{-18}$ 秒)以下の領域は原子物理学の分野だ(訳注:電子ボルト(eV)は、電子1個を1ボルトの電圧で加速したときのエネルギー)。これは、水素原子の基底状態にある電子が陽子を一周するのにかかる時間だ。このようなパルスを発生させる方法がいくつか提案されてきた。最近、高次の調和成分を使って、フェムト秒より短いパルスが実験的に観測された。このような1周期以下、あるいは1周期ちょうどのパルスは、(電波から極紫外線領域までの)きわめて広いフーリエスペクトルをもっていて、(黒体放射のような)標準的な超広帯域の発生源から生じたパルスとは、著しく異なる特性をもっている。理想的な条件下では、スペクトル成分の全てが同じ位相になるのだ。このようなスケールの大きい、スペクトルの境を踏み越えたコヒーレンスは、通常の光学分野では決してお目にかかることができない。実際、(例えば太陽光のように)超短パルスは黒体放射に多く見られるものの、それらはいつやって来るかわからないし、どうふるまうかもわからない。ようするに完全にランダムなので役に立たないのだ。パルスの世界では、パルスが足並み揃えてやって来ること(=コヒーレンス)と、制御することができる、という点で、状況が一変する。

原子スケールの地平線のかなたに、重元素のイオンが鎮座している。最も重い安定な原子であるウランを例にとろう。ウランの周囲の電子を1個だけ残して、残りの電子を身ぐるみ剥いでしまった「極限のイオン」を思い浮かべることができる。この最後の電子を取り除くには、(ウランのK殻遷移に近い)110キロ電子ボルトが必要で、これは、さらに短い時間スケールの約 $10^{-20}$ 秒を作り出す。それを超えると、原子・イオン物理学は、「量子の砂漠」へと迷い込んでゆく。なおも短くしていくと、我々は、根元的な興味をもたらす次の領域に遭遇する。量子電磁力学(QED)である。電子の静止エネルギーの2倍のエネルギー(約

1メガ電子ボルト)を要する電子-陽電子対の生成や、強い核反応、たとえば1.2メガ電子ボルトに近い陽子と中性子をつくる重水素の電子壊変、といった分野だ。このような現象は、原子の光イオン化を彷彿とさせるが、QEDでは、5桁以上も高いエネルギー・スケールが基準になっている。その時間スケールもzept秒( $10^{-21}$ 秒)まで縮まる。核反応を解明し、時間分解し、究極的には制御さえできるかもしれない、アト秒以下からzept秒までのパルスを生成制御することが実現可能かどうかも、近年議論されてきた。その構想は、密度の高い円周の中の自由電子に、現在可能な $10^{21}$ W/cm<sup>2</sup>という強度のレーザーを当てるものだ。このような状態を「レーズトロン」(lasetron)と呼ぶ。自由電子は、物質を構成しているナノ粒子の大規模なイオン化とともに、ほとんど瞬時に放出され、 $E \sim 50$ メガ電子ボルト程度のエネルギーにまで加速されるが、こうした電子は、QEDや原子核の領域の光子を生成できるに違いない。

この地平を過ぎると、我々は高エネルギー物理学の領域へと踏み込む。そこでは、巨大な加速器の中で、ほとんど光速に近づいた荷電粒子が、標的核(または逆向きに進んでくる

粒子)と衝突し、新しい素粒子の雲を生み出す。いつの日か、こうした衝突による粒子の生成を、コヒーレントに制御する方法がみつかったら、その放射は、これまでよりずっと速いものになるだろう。たとえば1テラ電子ボルト(100万メガ電子ボルト)の最も高い光子エネルギーをもつパルスは、理想的な条件下では、約 $10^{-27}$ という短さになるだろう。これでもまだ、究極の時間スケール、 $10^{-43}$ 秒には程遠い。だが、思い悩む必要などない。なにしろ、好奇心、いいかえると、あくなき探究心という名のフル回転をつづけるエンジンに駆動され、我々は進み続けるにちがいないから。我々は、ようするに、騙されやすいカモなのだ。 ■

筆者の Alexander E. Kaplan は、ジョンズ・ホプキンス大学の電気・コンピューター工学部(the department of Electrical and Computer Engineering, Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland 21218, USA)に所属している。

#### FURTHER READING

Paul, P. M. *et al. Science* **292**, 1689 (2001).  
Hentschel, M. *et al. Nature* **414**, 509 (2001).  
Zewail A. *Nature* **412**, 279 (2001).  
Kaplan, A. E. & Shkolnikov, P. L. *Phys. Rev. Lett.* **88**, 74801 (2002).  
Greene, B. *The Elegant Universe*, (Random House, New York, 2003).

## news and views

# 宇宙鉱物学：よその太陽系の塵

Steve Desch

塵の円盤で取り囲まれている恒星は、形成中の太陽系なのかもしれない。塵から放射される光の解析から、恒星の周りを回っている彗星あるいは微惑星、さらには惑星までもがここに存在する可能性がでてきた。

原文: *Dust in another solar system*

*Nature* Vol.431(636-637)/7 October 2004; www.naturejpn.com/digest

宇宙鉱物学とは、天文学と鉱物学が組み合わさった新たな分野である。主に中間赤外線(MIR)の波長域(2~30 $\mu$ m)での天体観測によって、多くの場合は原始星のまわりにある、宇宙の塵粒子の大きさ、結晶構造、化学的構造を確定することを目的とする。このような観測で、原始惑星系の円盤における

塵の分布について多くのことが明らかにされる。塵の構造と進化の過程、そして新たに形成されつつある太陽系の岩石物質、つまり最終的に地球のような惑星を形作る物質について、詳しく調べられるのだ。赤外線の検出におけるかなりの技術的進歩が必要であったため、宇宙鉱物学的な観測が可能になったのは

比較的最近のことである。しかし、現在では十分に発達した分野となった。Nature 10/7号 p.660で、岡本美子<sup>1</sup>は、がが座β星(β Pic)をとりまく円盤の空間分解MIRスペクトルによって、岩石物質の帯が存在すること、さらにはその円盤の組成が明らかになったことを示した。これは太陽系や地球のような惑星がいかにして形成されるかというパズルの新しい一片となる。

がが座β星系は若い恒星をとりまく塵の円盤の典型的な例であり、その塵のすべてがより大きな天体から新たに供給されている。塵は微惑星(生まれつつある惑星)間の粉碎衝突によって供給されているか、蒸発しつつある彗星から流れ出しているものである可能性がある。がが座β星の円盤には十分な量のガスがないので、塵粒子の力学は放射圧と重力の間のバランスで決まる<sup>2</sup>。直径1.5 μm以下の小さな塵粒子は、がが座β星の放射によって数十年の内に吹き飛ばされる<sup>3</sup>。しかし、もっと大きな塵粒子はエネルギーを吸収・放射し、その結果、数千年をかけて恒星に向かっていくらせん運動をする(ポインティング-ロバートソン効果<sup>4</sup>)。がが座β星の年齢は誕生後1,200万年であり<sup>5</sup>、この2つの過程のタイムスケールをはるかに超えているので、円盤中の塵は彗星か微惑星から新たに放出される破片で補給されているにちがいない。

この塵の大きさ、結晶構造、化学組成はMIR波長域での観測によって測定できる<sup>6</sup>。小さく暖かい(温度約300K)のケイ酸塩粒子は波長

約10 μmの光を強く放射する。アモルファス(非晶質)の橄欖石、(Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>は特に9.7 μmの光を最も強く放射する。また、結晶質の苦土橄欖石、Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>は11.2 μmを含むいくつかの特定の波長の光を強く放射する。このような発光特性は、半径がλ/2π以下の小さな粒子で最もはっきりと現れる。ここで、λは放射光の波長である。より大きな粒子は、波長域全体でより連続的な黒体からの放射に似た光を放射する傾向がある。岡本<sup>1</sup>は、さまざまな大きさや(アモルファスや結晶といった)鉱物学的特徴をもつ塵粒子について予測されるスペクトルが、がが座β星の円盤の塵から放射される光のスペクトルの観測結果と一致することを示した。

これに先立つ観測では、がが座β星の円盤中の塵が、恒星をまわる別個の帯に集まっていることが示唆されており<sup>7</sup>、これは塵を補給するより大きな天体が全く異なる距離の軌道を回っていることを暗示している。さらに前にWeinbergerら<sup>8</sup>によって観測された塵のMIRスペクトルから、がが座β星のまわり、半径20天文単位(AU)以内に半径10 μm以下の小さなケイ酸塩粒子からの放射が存在すると推測されていた(天文単位、あるいはAUは地球と太陽の平均距離である)。岡本<sup>1</sup>はこのように観測の空間分解能を7.7AUから3.2AUへ改善し、さまざまな特定の鉱物のモデルを作成した。今回のデータでは、小さな非晶質ケイ酸塩粒子を示す9.7 μmの光が、約6.4、16、30AUという特定の半径の領域から週的に強く放射されていることが明らかになった。大きな非晶質ケイ酸塩粒子は(ポインティング-ロバートソン抵抗から予測されるように)、がが座β星の近くに集まっているようである。

結晶質ケイ酸塩粒子もまた、がが座β星の近くに集まっている。これは約1,100K以上で非晶質ケイ酸塩粒子は焼きなまされ(結晶の形に変わる)こと<sup>9</sup>から、恒星の近くではより温度が高いためであると思われる。あるいは、これらの粒子はがが座β星の内太陽系に入ってきた彗星が放出したものかもしれない<sup>10</sup>。がが座β星から放射される紫外線によって容易に分解される一酸化炭素分子が、がが座β星の円盤中に検出されており<sup>3</sup>、彗星の継続的な蒸発によって入れ替わっていることを強く示している。我々の太陽系では、ヘール-ボッ

ブ彗星のような彗星から放出されるケイ酸塩粒子は、結晶である割合が高い(約30%)<sup>11</sup>。

16AUおよび30AUという特定の半径に小さな非晶質粒子が存在することは興味深い。これらの半径は、がが座β星の円盤内に存在するとかねてから推測されていた塵の帯<sup>7</sup>の位置と一致する。岡本<sup>1</sup>はこれらの半径にある塵粒子は非晶質ケイ酸塩であり、十分小さいために絶え間ない補給が必要であることを発見した。これらのデータは、がが座β星の円盤内のこのような半径に彗星か微惑星の帯が存在することを強く示唆している(図1)。しかしながら、岡本<sup>1</sup>が示した解像度の向上したデータによって、半径6.4AUにさらに別の塵の帯が発見されることとなった。著者が言うように、半径16AUと同様に半径6.4AUにも微惑星か彗星の帯が存在する配置は、半径12AUの位置にある羊飼い惑星の重力の影響を示唆している。

これらの帯に非晶質ケイ酸塩が優占的に存在することについては、(我々の太陽系の彗星から推測される状況とは異なり)この半径の領域には結晶質ケイ酸塩が存在しないのか、ケイ酸塩が微惑星内で結晶質から非晶質へ変質したのかもしれない。今後の研究によってこれらの仮説を確認あるいは否定できるだろう。しかし、宇宙鉱物学的な観測によって、がが座β星系や他の太陽系における岩石惑星の形成に関するさらに進んだ刺激的な知見が得られることは明らかである。 ■

Steve Desch はアリゾナ州立大学物理・天文学部 (the Department of Physics and Astronomy, Arizona State University, Tempe, Arizona 85287-1504, USA)に所属している。  
e-mail: steve.desch@asu.edu

1. Okamoto, Y. K. *et al. Nature* **431**, 660–663 (2004).
2. Lecavelier des Etangs, A. *et al. Nature* **412**, 706–708 (2001).
3. Artymowicz, P. *Astrophys. J.* **335**, L79–L82 (1988).
4. Mukai, T. & Giese, R. H. *Astron. Astrophys.* **131**, 355–363 (1984).
5. Zuckerman, B., Song, I., Bessell, M. S. & Webb, R. A. *Astrophys. J.* **562**, L87–L90 (2001).
6. Molster, F. J. & Waters, L. B. F. M. in *Astromineralogy (Lecture Notes in Physics no. 609)* (ed. Henning, T. K.) 121–170 (Springer, Berlin, 2003).
7. Wahhaj, Z. *et al. Astrophys. J.* **584**, L27–L31 (2003).
8. Weinberger, A. J., Becklin, E. E. & Zuckerman, B. *Astrophys. J.* **584**, L33–L37 (2003).
9. Hallenbeck, S. L., Nuth, J. A. III & Nelson, R. N. *Astrophys. J.* **535**, 247–255 (2000).
10. Li, A. & Greenberg, M. *Astron. Astrophys.* **331**, 291–313 (1998).
11. Wooden, D. *et al. Astrophys. J.* **517**, 1034–1058 (1999).

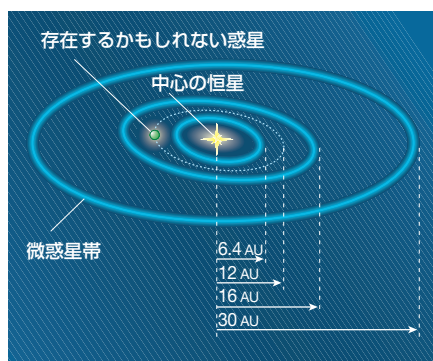


図1 がが座β星をとりまくリング。岡本<sup>1</sup>は、がが座β星をとりまく塵の円盤から放射される中間赤外線波長の光を解析し、塵粒子の大きさと化学組成を明らかにした。著者は、彗星か微惑星(生まれつつある惑星)を含んでいるかもしれない3つの帯が、がが座β星をとりまいておりと示唆している。がが座β星を巡る軌道には惑星さえ存在する可能性がある。