

赤外線分光実験から探る宇宙塵のすがた

大阪大学 茅原 弘毅

「宇宙塵(うちゅうじん)の研究をしています」などと言うと、「宇宙人の研究」と勘違いされることが時々あって、誤解を解くのに一苦労することがあります。そこで「宇宙の人(ひと)ではなくて、塵(ちり)なんですよ」と説明するのですが、それでも多くの皆さんはあまりピンと来ないようです。それほど宇宙塵の存在は一般の方々には馴染みの薄いものなのでしょう。ところで科学に興味のある皆さんなら、天文学の研究といえば、望遠鏡で天体を観測したりコンピュータを使って理論計算をしたりするものだと思っていらっしゃる方も多いと思います。それも事実ですが、宇宙塵を研究するには、実はそれだけでは足りません。実験室で分光測定ということをして得られたデータと、観測データとを付き合わせて様々なことを議論しなければ、宇宙塵の詳しい情報は解らないのです。実験的な手法で天文学の研究をするなんてちょっと不思議だと思われるかもしれませんが、今日は、その一風変わった、実験室で行う宇宙塵に関する天文学についてお話しようと思います。

宇宙塵とはなにか？

宇宙塵を一言で定義すると「宇宙に天然に存在する固体粒子」であるというのが最も差し障りのない表現です。これらは一般には1ミクロンメートル程度以下の微粒子として存在していると考えられています。宇宙塵は進化が進み、内部での核融合が終わりつつある死にかけの恒星の周囲で生まれます。恒星は内部の核融合反応によるエネルギーと、中心に落ちてくるガスの重力エネルギーとの釣り合いで球形をしています。しかし、恒星の進化が進み燃料の水素が枯渇してくると、そのバランスが崩れて、星の外層はプヨプヨと不安定になりガスを噴出します。これは晩期星に特有の現象で、質量放出と呼ばれます。質量放出により噴出したガスは恒星からだんだんと遠ざかりますが、ガスの中には核融合で合成された重元素が含まれているため、冷却されると凝縮(気体から直接固体が生成される)が起こり、さまざまな化合物の固体が形成されます。これが宇宙塵の正体です。そのうち宇宙塵は恒星から遠く離れて、長い間宇宙を漂ったあと、ガスと一緒に重力的に集まり雲を形成します。そして、ガスと塵の雲が特に濃集した部分から星や惑星系が生まれるのです。塵の雲は近くにある星の光を反射したり散乱したりして光って見える事もありますが、通常は背景の光を覆い隠す働きをします。夜空の暗いところで天の川をよく観察すると、天の川の淡

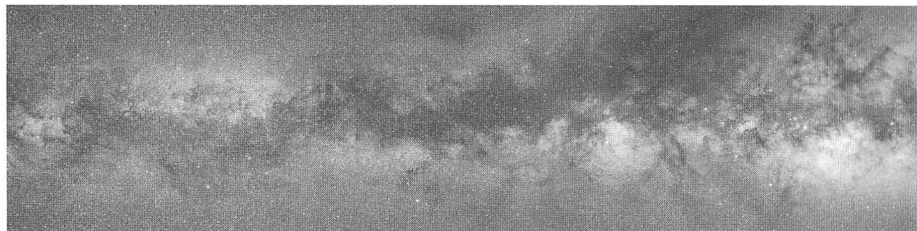


図1 天の川を横切る宇宙塵の帯(NASAのHPより<http://apod.nasa.gov/apod/>)

い光を背景に暗い帯が複雑に絡み合っているのが見えますが、これは、銀河系の円盤に集まった宇宙塵の雲が背景の星の光を遮っているのです(図1)。

宇宙塵の役割

宇宙には私たちが知る限りの全ての元素が存在し、様々な物質をつくっています。宇宙に存在するこのような物質は「星間物質」と呼ばれます。物質は一般に、気体、液体、固体のどれかの状態を取り(物質の三態)、私たちの身の回りにはその全てを見る事ができます。しかし、宇宙空間ではほとんどの物質は気体として存在し、特に固体成分は質量比にして全星間物質のたかだか1%程度しかないと考えられています。固体物質は一般に、光(可視光や紫外線)を吸収して、熱(赤外線)を出すという性質を持っていますが、固体である宇宙塵がもつこの性質は、実は物理学的に非常に重要な意味を含んでいます。少し難しい話になってしまうかもしれませんが、世の中の全ての物理現象は、エネルギーが高い状態から低い状態へと進みます。物理学では、エネルギーが高い状態を不安定、低い状態を安定であるといえます。熱を出すという事はエネルギーを放出して、物理現象を安定な方向に向かわせるということの意味するのです。すなわち、宇宙塵は星形成や惑星形成をはじめとした様々な天体物理現象において、エネルギーを効率よく放出して物理プロセスの進行を促し、系を安定な状態にするためにとても重要な役割をはたしているのです。このように天体現象と密接に関わりあっている宇宙塵の性質を知る事は、様々な天体の形成や進化などの物理過程を詳しく理解する事にもつながるのです。

宇宙塵の観測と実験

宇宙塵はとても遠いところにあるので、実際の宇宙塵そのものを直接採取して分析する事は、数少ない例外を除いてほとんどの場合不可能です。ですから通常のアストロノミの方法と同じように、まずは望遠鏡を使って観測します。前述のように宇宙塵は赤外線をたくさん放出しますので、赤外線が見える装置を使って観測するのですが、赤外線は大部分が地球の大気によって吸収されてしまうため、人工衛星に望遠鏡を搭載したり、大気が薄い高い山の上で観測をします。このとき、分光観測ということを行って「スペクトル」というものを得るとより詳しい情報がわかります。プリズムに光を通すと虹色の光に分かれますね。これを「分光」といいます。横軸に光の色(波長)を、縦軸にそれぞれの色の光の強度をとってグラフにしたものがスペクトルです(図5を参照)。スペクトルからは何色の光がどれだけ含まれているかという情報がわかり、光を出した星の物理化学状態や、宇宙塵のように星の周りにある物質の性質を詳しく調べることができるのです。例えば、宇宙塵を構成する物質の種類、化学組成、結晶構造、温度、塵粒子の形状や大きさなど、様々な情報がスペクトルには含まれています。しかし、観測から宇宙塵の正しい描像を得るためには、観測スペクトルのどの部分がこれらの情報に相当するのかを特定しなくてはなりません。そのためには、実験室でも宇宙塵の候補となりそうな物質の分光測定をしてスペクトルを取得し、これを観測で得られたスペクトルと逐一照合するのです。その過程で、もし観測スペクトルと実験スペクトルが一致したなら、実験室で測定したその物質が、観測された宇宙塵の正体だということになるわけです。とても遠くにあって手にとる事が出来ない宇宙塵の状態も、実験室でな



ら顕微鏡観察をしたり、化学分析をしたり温度を測ったりして、様々な情報を得ることが出来そうですね。でも、そうは言っても、世の中にはとても多くの種類の物質が存在しているので、その中から宇宙塵の候補となる物質を選び出すにはどうすればよいでしょう？ そのためのヒントを次に説明します。

宇宙元素存在度と平衡凝縮論

宇宙塵は宇宙空間でできる物質なのだから、地球上で私たちが目にする物質とは全く違う特別なものだと思う方もいるかもしれませんが、実はそんなことはありません。さきほど、死にかけの晩期星が放出したガスから凝縮して生まれた塵が、最終的には恒星や惑星系の材料になるといいました。宇宙塵は地球を作った材料なのですから、地球上にも似たようなものがあるというのは、良く考えれば実は当たり前なのです。この事は、宇宙の元素組成と平衡凝縮論というもので説明する事が出来ます。宇宙に存在するほとんどの元素は恒星の進化の過程で、恒星内部の核融合によって生まれるのですが、「宇宙元素存在度」(宇宙全体でどの元素がどんな割合で存在しているのかということ)は最も標準的な恒星だと考えられている太陽の元素組成で代表する事が出来ます。これは太陽そのものの観測や隕石の化学分析などから知る事が出来ますが、それによると、宇宙の気体元素はほとんどが水素とヘリウムで、窒素、酸素などが水素のざっと1万分の1くらい量の量で存在しています。一方、たくさん存在する固体元素は炭素、マグネシウム、ケイ素、鉄です。炭素の量を10とすると、その他は1くらい割合で存在しています。しかし宇宙空間では、ほとんどの炭素は酸素と結びついて一酸化炭素分子を形成しますので、実際に固体として存在し宇宙塵の材料になる元素はマグネシウム、ケイ素、鉄です。そして更に1桁程度少なくナトリウム、アルミニウム、カルシウムなどが存在することがわかっています。さて、宇宙元素存在度の化学組成を持った高温のガスが冷却していく過程で、どのような物質がどの温度でどれだけ量できてくるのかを予測する理論が「平衡凝縮論」です(表1)。この理論によると、まずアルミニウムやカルシウムを含んだ酸化物が最初に凝縮します。アルミニウムの酸化物は、ルビーやサファイアの仲間でもコランダムと呼ばれる鉱物です。アルミニウムに加えてマグネシウムも含まれるとスピネルという鉱物になります。更に温度が下がると次にケイ素と様々な金属元素を含んだ酸化物が凝縮します。これらはケイ酸塩(シリケート)と呼ばれ、主に地球の地殻や上部マントルに含まれる石や岩を形成している鉱物です。シリケ

表1: 平衡凝縮で形成される主な鉱物と凝縮温度(全圧: 10^{-3} 気圧)

物質名	化学式	凝縮温度(K)	消失温度(K)
コランダム	Al_2O_3	1758	1513
ペロプスカイト	$CaTiO_3$	1647	1393
スピネル	$MgAl_2O_4$	1513	1362
ディオプサイド	$CaMgSi_2O_6$	1450	
フォルステライト	Mg_2SiO_4	1444	
アノーサイト	$CaAl_2Si_2O_8$	1362	
エンスタタイト	$MgSiO_3$	1349	



イトはケイ素(Si)の周りに4つの酸素(O)が配位した SiO_4 の四面体構造を基本とする骨格構造をもっています。この四面体構造がさまざまに繋がり、あだにいろいろな金属元素が入って多様な化学組成や性質を持った物質が生まれます(図2)。地球を構成する重要なシリケートはマグネシウムやカルシウム、鉄などを含み、総称してカンラン石や輝石などと呼ばれています。そして宇宙塵を構成する主要な鉱物も、これらと同様のシリケートだと考えられているのです。特に、カンラン石はきれいな黄緑色をした鉱物で、8月の誕生石のペリドットという名前で呼ばれている宝石と同じものです(図3)。小さい原石ならばアクセサリー屋さんで安価で手に入れることができますし、もしかすると科学館の売店でも鉱物標本として売っているかもしれません。この他に、還元的な(酸素が少ない)環境では炭素を材料とした、カーボンやグラファイト、ナノメートルサイズのとても小さなダイヤモンドなども宇宙塵の候補物質と考えられています。それにしても身近にある宝石の仲間が宇宙にも存在しているなんてちょっとびっくりしませんか？

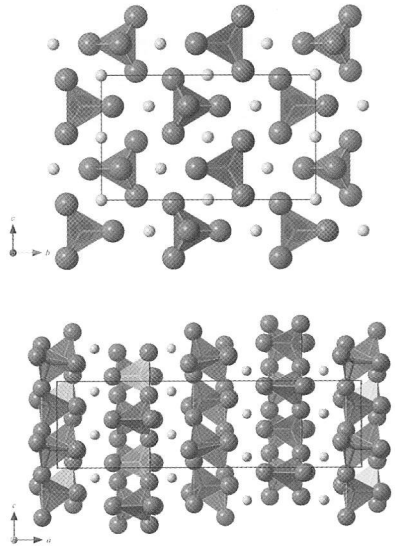


図2 SiO_4 四面体がつくるシリケートの構造の例 (上)フォルステライト(下)エンスタタイト

宇宙塵候補物質の分光測定

宇宙塵の候補物質を特定する事ができてしまえば、その物質を手に入れて、あとはさまざまに条件を変えて実験室で分光測定を行い、スペクトルデータを取得すればよいわけです。筆者が所属する大阪大学には1000度以上の高温を出せるいくつかの炉があり、人工的に鉱物を合成したり、加熱して性質を変化させたりといったことが可能です。また、スペクトルを測定するための分光計と呼ばれる装置を使って、190ナノメートルの紫外線から可視光、近赤外、中間赤外をへて200ミクロンメートルの遠赤外線までの広い波長領域を精度よく測定することができます。他にも電子顕微鏡など様々な分析機器を駆使して、宇宙塵候補物質の合成から分析、分光測定にいたるまで、実験のひと通りを効率よく行うことができるようになっています。さて、多くの宇宙塵候補物質は、地球の上部マントルや隕石に普通に含まれている鉱物ですから、岩石鉱物試料屋さんで購入する事も可能ですが、天然物には不純物が含まれるので、実験室の炉を使用して不純物のないきれいな試料を合成することもあります。ここでは、先ほど



図3 8月の誕生石ペリドット(ウィーン自然史博物館にて筆者が撮影)



出てきたカンラン石と輝石の合成方法を紹介します。カンラン石や輝石は一般にはマグネシウムと鉄を含むシリケートの総称ですが、特にマグネシウムだけを含んだカンラン石はフォルステライト、輝石はエンスタタイトという名前と呼ばれます。フォルステライトの化学式は Mg_2SiO_4 、エンスタタイトは $MgSiO_3$ です。化学式からわかるように、試薬から合成する場合には酸化マグネシウム(MgO)粉末と二酸化ケイ素(SiO_2)粉末を使用し、フォルステライトの場合はこれらを2 mol: 1 mol、エンスタタイトの場合は1 mol: 1 molの割合で混合します。これをよく混ぜて錠剤状に固め、炉の中で1200K程度の温度で12時間から24時間ほど焼成します(図4)。ちなみに、このようにして作られるシリケートは工業的にはセラミクスと呼ばれ、硬くて壊れにくく腐食にも強いなどの性質をもつため、日常生活の様々な場面で活躍している物質です。身のまわりでは陶磁器や歯医者さんで使われる人工歯冠などの材料となっています。宇宙塵がお茶碗や差し歯の材料と似たものだなんてとても意外ですね。さて、このようにして作った試料は、乳鉢の中で粉砕して1ミクロンメートル以下の細かな粉末にします。この粉末を臭化カリウム(KBr)やポリエチレン粉末と一緒に混ぜて濃度をコントロールし、分光計に入れてスペクトルを測定するのです。スペクトルは物質の種類や化学組成、結晶構造、温度などによってデコボコの形(吸収ピーク)が変わり、それを調べる事で物質の性質が特定できます。図5はカンラン石に含まれるマグネシウムと鉄の比率を変えていったときの赤外線波長におけるスペクトルの変化を示しています。

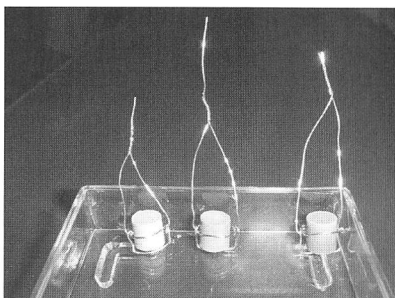


図4 シリケートの試料合成: 材料を直径5 mm長さ8mmくらいの錠剤型に成形しプラチナ線で作ったかごにつるして炉に入れ焼成します

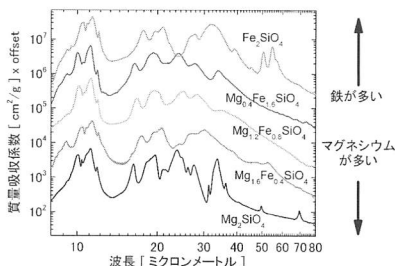


図5 カンラン石の化学組成による赤外スペクトルの変化(Koike et al.2003より)

宇宙鉱物学が解き明かす宇宙塵の正体

最近15年ほどの間に、赤外線天文学の観測技術が著しく進歩し日々新たな発見がなされる中で、実験室での分光測定も進み、観測と照合する事で宇宙塵に関する研究が飛躍的に発展しました。この分野は現在では「宇宙鉱物学」と呼ばれ赤外線天文学の一時代を築きました。実験研究と最新の観測を照合する事により、死にかけの年老いた恒星や若い恒星の周りに「結晶質のシリケート」が、たくさん存在している事がわかりました。以前は、大部分の宇宙塵は結晶質ではないと考えられていたので、これは大きな発見でした。また、これらのシリケートは主にカンラン石や輝石などの結晶鉱物で、地球上ではマグネシウムと鉄の両方を含みますが、宇宙塵では何故かほとんど鉄を含まず、マグネシウムだけを含ん



だフォスフェイトやエンスタタイトである事がわかってきたのです。図6はハワイのすばる望遠鏡で観測した太陽と同程度の質量を持つ若い星のスペクトルを、実験室で得られた宇宙塵候補鉱物のスペクトルと比較したものです。フォスフェイト、エンスタタイト、シリカ、非晶質シリケートという物質のスペクトルを実験室でそれぞれ測定し、これらのスペクトルを適切な比で足し合わせると、観測されたスペクトルのかたちが非常によく再現できている事がわかります。また図7は、フォスフェイトに特徴的な69マイクロメートル付近のピーク位置とピーク幅が温度によってどのように変化するかを示したものです。この吸収ピークの位置と幅の相関関係を実験と観測の両方から求めて比較すると、宇宙塵の温度を決める事ができるのです。図7によると、観測(☆印)と似たような位置にプロットされている実験結果は150Kから50Kくらいの極低温だという事がわかりますね。これが実験から推定される宇宙塵の温度です。このような方法で観測と実験の結果を組み合わせ、星の周りにどんな物質があり、それらがどのような物理化学状態で存在しているのかを解明していくのです。実験室で行う赤外線天文学は、観測や探査と比べると少しだけ地味かもしれませんが、観測データに正しい物理的解釈を与えるためには、なくてはならない重要な研究分野なのです。

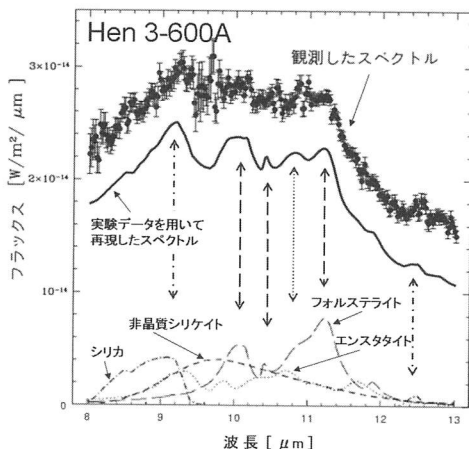


図6 すばる望遠鏡による若い星のスペクトル (Honda et al. 2003より)

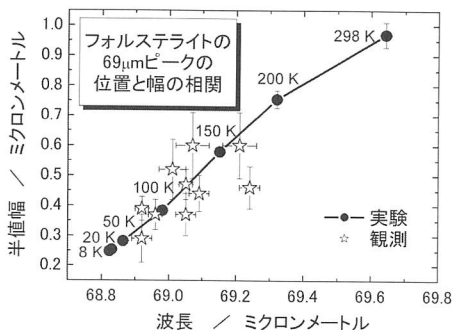


図7 フォスフェイトの吸収ピーク位置と幅の関係



著者紹介 茅原 弘毅(ちはら ひろき)

大阪大学大学院理学研究科 宇宙地球科学専攻 特任研究員
 北海道函館市出身。北海道大学 理学部物理学科 卒業
 大阪大学大学院理学研究科物理学専攻 博士課程修了。博士(理学)
 日本学術振興会特別研究員、京都薬科大学非常勤などを経て現職。
 趣味は美術鑑賞と作品制作(国画会 会友)