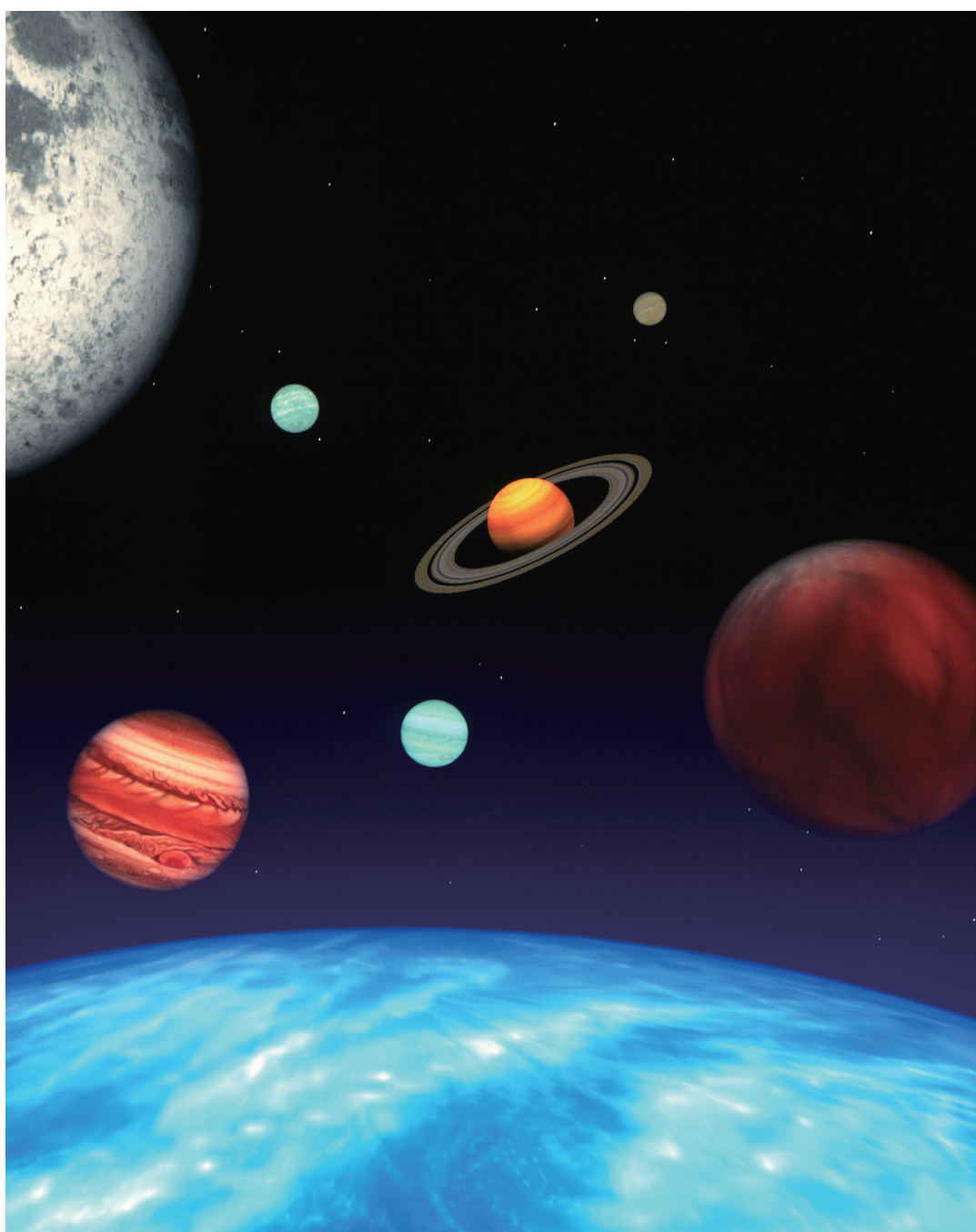


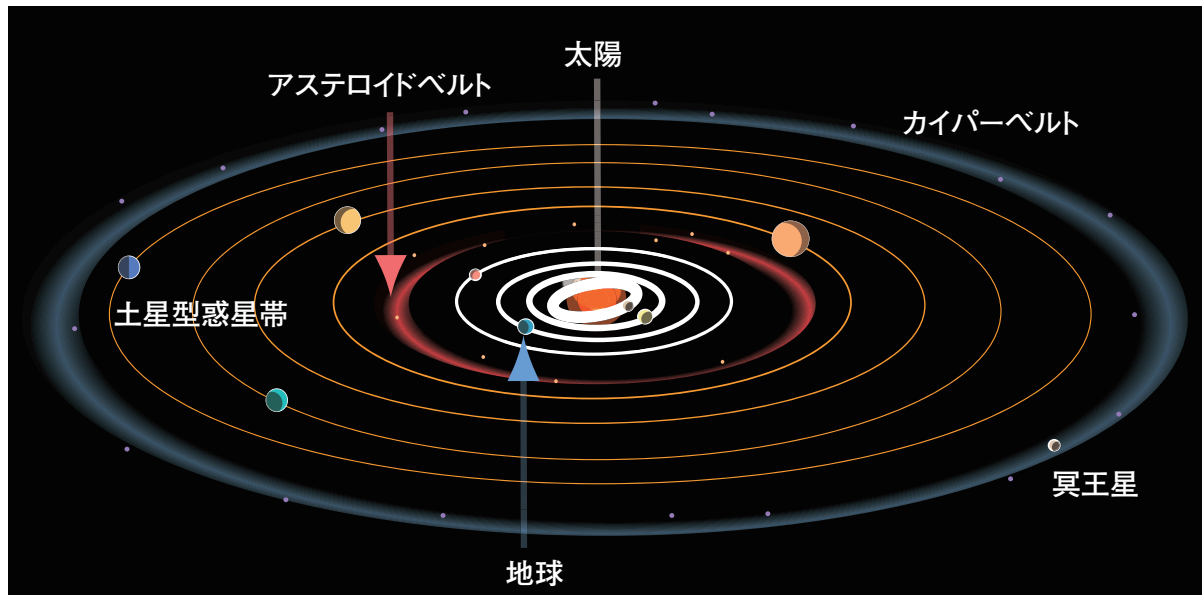
第18章 太陽系

古くから、他の星達と異なる動きをする星達、水星、金星、火星、木星、土星が知られていました。そして天王星と海王星も19世紀までに発見されました。しかしここ数十年で、衛星が太陽系のすべての惑星を訪れ、惑星の様子が明らかになりました。今回は、地球を含めこれら太陽の周りを回る惑星について勉強してみましょう。



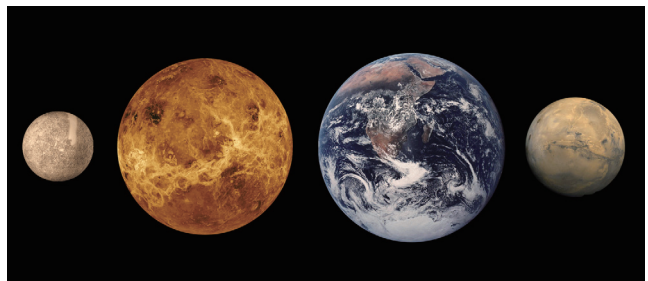
太陽系とは？

現在まで知られている、太陽系は、太陽という一つの恒星と、8つの惑星、惑星を回る165個の月、そして火星と木星の間に位置する多くの小惑星、そしてカイパーベルトに位置する数千個の小惑星によって構成されています。惑星達は、互いに非常に異なる様相をしています。その理由を、太陽系の進化から見ていくのがこの章の目的です。



地球型惑星と土星型惑星

水星、金星、地球、火星は、共通して岩石などでできており、月の数が少ない惑星達です。また、直径も地球と似たサイズです。そのため、これらを**地球型惑星**と言います。一方、木星、土星、天王星、海王星は、気体でできており、直径も地球に比べて大きくなります。そのためこれらを**木星型惑星**と言います。



地球型惑星

左から、水星、金星、地球、火星

小惑星帯

地球型惑星と木星型惑星の間に小惑星帯（アステロイドベルト）があります。このアステロイド帯の小惑星は石のように硬く、大きさが100 mを超えるものを言います。それより小さいのが隕石です。

また、木星型惑星の外には、冥王星などを含む小惑星帯があり、**カイパーベルト**と呼ばれています。カイパーベルトの小惑星は、氷の成分が多く、数キロメートルから千キロメートルの大きさのものもあります。これらの多くが発見されたのは1990年代からです。2000年代に入ると、冥王星よりも大きな物体が相次いで発見され、このため、冥王星を惑星と呼ぶべきかが問題となりました。そして、現在では、冥王星もカイパーベルトの小惑星の一員です。

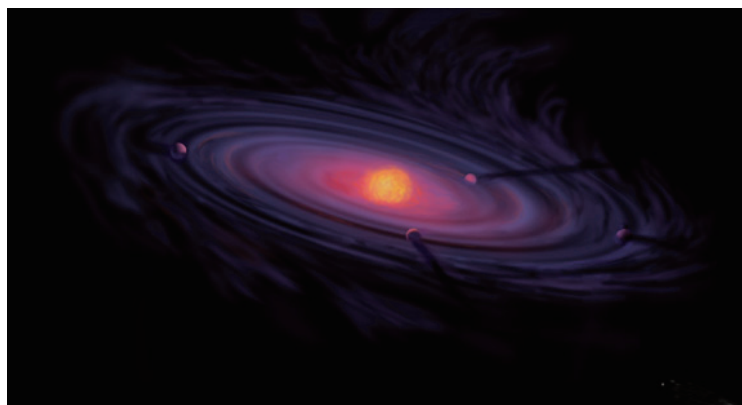
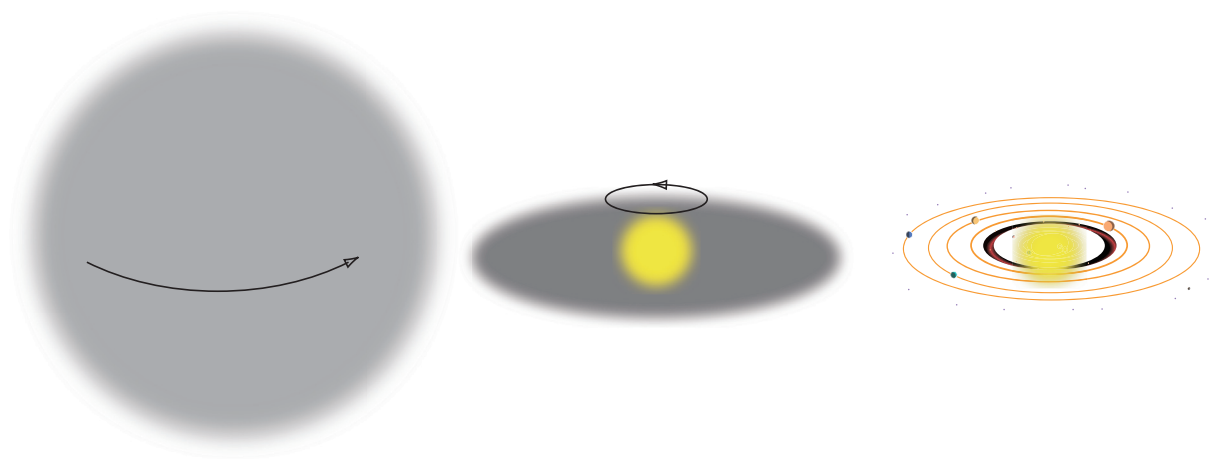
どのようにして太陽系ができたか？

現在までに、太陽系の惑星や小惑星などが調査され、それを元に太陽系がどのようにできたかが研究されてきました。もちろん、太陽系ができたのを見た人はいません。そのため、現在の上古と力の法則により時間を巻き戻す作業が必要です。

1796年にフランスの数学者、ラプラスは太陽系の誕生を数学的に記述してみせました。最初、薄い気体やちりの集まりが、偶然できた密度の高いところは重力が強くなるので他の気体やちりがそこに向かって集まってきます。すると、回転しながら中心部に落ち込むものは回転が加速されていき、全体として回転が速くなっていきます。すると、回転する方向に遠心力でふくれあがったかたちでまとまります。すると重力により密度の大きなところに他の物質は引き寄せられますから、中心部分の円盤状に物質が集まっていき、それらが様々な小惑星を作っていきます。これらの小惑星が衝突や破壊を繰り返して惑星ができていきます。

太陽から近い惑星では、太陽の強い熱により水素やヘリウムは吹き飛ばされ岩石や金属などだけが固まり、地球型惑星ができます。また、太陽風などで吹き飛ばされた物体が、小惑星帯に残りました。

太陽より遠いところでは、太陽からの熱や太陽風の影響が少なくなり、元から多く存在した、水素やヘリウムを多く含む惑星ができました。これが、土星型惑星です。またその外側には、初期の小惑星の衝突や、惑星との接近によってとばされた小惑星がたまり、カイパーベルトを構成したとされています。



地球

地球は、質量 $6 \times 10^{24} \text{kg}$ 、半径 6400km の惑星です。

初期の地球では、地球内部による放射性物質のエネルギーによる火山活動と、多数の隕石の落下により、地球は溶けた状態で始まりました。すると、比重の重い鉄などは中心部に沈み、比重の軽い物質が表面の方に現れます。その後、地球は冷えておよそ7億年後に表面が固まりました。そのため、地球内部の構造も中心に行くにしたがって比重が大きくなっていきます。

地球の内部での構造は、どのように調べられるのでしょうか？地球を掘るにしても現在一番深いところではわずかに12キロメートルまでです。地球を掘るのにも限界があるのです。それではどうすればよいのでしょうか？健康診断でおなかの中を調べるのに超音波診断をすることがあります。これは音波の跳ね返るまでの時間などを調べて内部の構造を見るのです。地球の内部の構造を調べるのにも、音の伝わり方や反射を調べ、それによって内部構造を推定します。

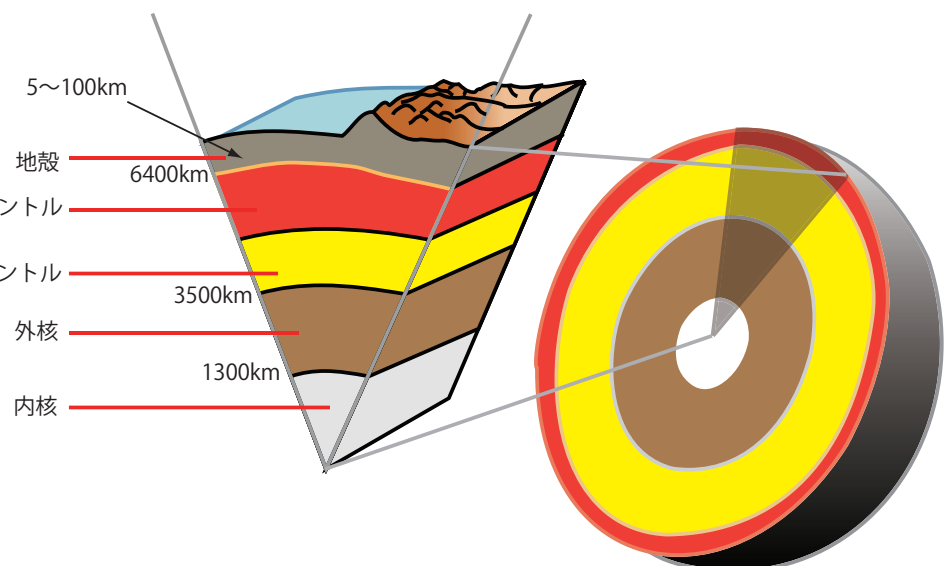
まず、表面近くでは、薄い**地殻**があり、通常私たちが目にするのはこの部分です。その下には**マントル**と呼ばれる部分があり、中心部には**核**があります。

地殻は、平均 50km ほどの厚さですが、地殻のその部分ではすでに温度は 500K ほどにもなります。

マントルは、地球全体の約80パーセントの体積をしめる部分です。この部分は、主にケイ素（シリコン）と酸素とでできている固体です。これらは比重が地殻より重く、地殻はマントルの上に浮いたような状態になっています。そのため地殻には軽い酸化ケイ素や酸化アルミニウムが多く含まれるのです。

中心の核の部分では、重いニッケルや鉄が主成分であると考えられています。つまり一番重いものが沈み込んでいったものと考えられます。これらは高温で溶けて液体になっています。内核は、非常に温度が高いながらも重力で400万気圧にも強く圧縮され、固体になった鉄です。中心部の温度は6000ケルビン近くにも達し、太陽の表面温度と同じくらいになっています。これらの地熱のほとんどは、地球内部の放射性崩壊が原因です。

また中心は地球の自転よりも少し速い速さで回転しています。100年から400年に一周するとい
うゆっくりと
した回転です
が、その原因
ははっきりわ
かっていませ
ん。



宝石

古代より貴重は石は高価でした。しかし、宝石とそれが何でできているかということについては、良く知られていませんでした。これは、宝石が主に鉱物としてではなく、色で判断されていることが多かったためです。例えば、ルビーとスピネルは、色がよく似ています。しかし、鉱物としては全く異なります。長い間、ルビーとレッドスピネルは混同されていたいました。そのため、イギリス王室の戴冠式用の王冠に飾られている「黒太子のルビー」はルビーではなく、スピネルであることがわかっています。また、現在でも水晶に鉄イオンが混じって黄色に発色した、黄水晶は、貴重なトパーズとして売られていることがあります。

サファイアはルビーと同じ鉱物で、酸化アルミニウム(Al_2O_3)です。不純物を含まない酸化アルミニウムは無色透明なのですが、チタンと鉄が混じったものがサファイアでクロムが混入するとルビーとなります。混入の度合いが異なり、宝石としての価値がないものは単にコラントラムと呼ばれて、安い研磨剤として取引されます。

オパールは、 $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 、つまり酸化ケイ素と水からなります。色が海の色をしているのもうなずけますね。水の含み具合で、色が変化します。よく見かけるオパールはガラスのように結晶構造をしていませんが、希少価値のあるオパールは結晶構造をしています。

エメラルドは $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$ 、つまりシリコンとアルミニウムとベリリウムからなる鉱物が基本です。鉱物名はベリル(緑柱石)と呼ばれ、ここからベリリウムが発見されたので、ベリリウムの名前はこれから来ています。この鉱物にクロムが混入するとエメラルド色になります。

希少なもののほどありがたく思うのは人間の性です。大きなダイヤモンドやルビーなどは自然界で作られることは希です。そのため、高価になります。

これら宝石も多くは酸化ケイ素や酸化アルミニウムを基本にできています。酸化ケイ素は地殻に約60パーセント、酸化アルミニウムは約15パーセントです。ケイ素やアルミニウムが地中に豊富に存在することは宝石の組成からものがわかりますね。



ルビー



サファイア



オパール



エメラルド

月

月は、地球の衛星で、半径はおよそ地球の4分の1ほどです。その表面には、数多くのクレーターがあります。これは、隕石の落下によりできたものです。隕石は粉々になり、その落ちた付近の岩石を吹き飛ばしてクレーターが形成されました。多くのクレーターがあることから、かつては隕石が多数落ちたと思われます。

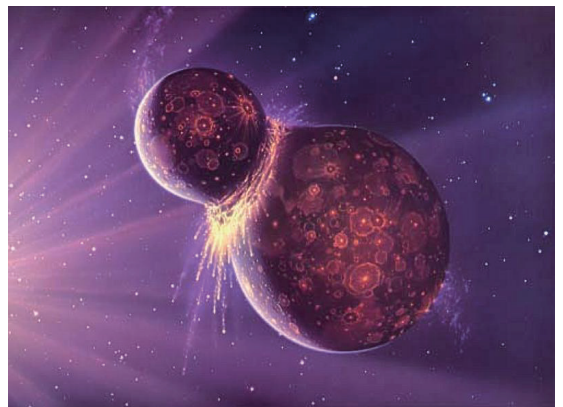
月の表面の重力は地球の6分の1と弱いため、気体はすべて宇宙空間に逃げていってしまいました。このようにして、月には大気はありません。月から持ち帰った石を放射線による年代測定すると、月は今からおよそ40億年前に、非常に多数の隕石が降り注いだ時期があることがわかりました。そしてこれが、太陽系の形成モデルを支持する一つの証拠なのです。このような隕石は、地球にも多数降り注いだことでしょう。地球ではそうしたクレーターは、雨や風によって風化して消えますが、月は大気がありません。そのため、月のクレーターは消えずに残っているのです。

月の質量と、半径から割り出すと、平均の密度は地球に比べて小さくなっています。このため、月にはなぜか地球に比べて鉄やニッケルなどの重い成分が少ないのです。月はおよそ地球のマントルと同じ成分で構成されているのです。また、アポロの持ち帰った石では、酸素の同位体比率が地球のものとほぼ同じであり、地球と同時期にできたものであることを示唆しています。



月はどのようにしてできたか？

月はどのようにしてできたのでしょうか？月の成分と地球のマントル成分の類似から、月は地球と火星ぐらいの惑星が衝突し、そのとき地球表面のマントルなどの成分が飛び散り、それが再び凝縮してできたものであるという説が有力です。これですと、鉄の成分が少ないのと、地球マントルと成分が似ていることを説明できるのです。



月の裏側はなぜ見えないか？

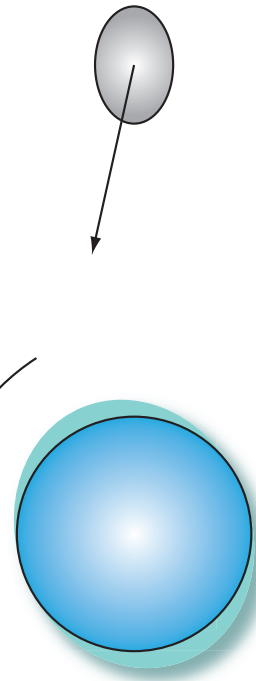
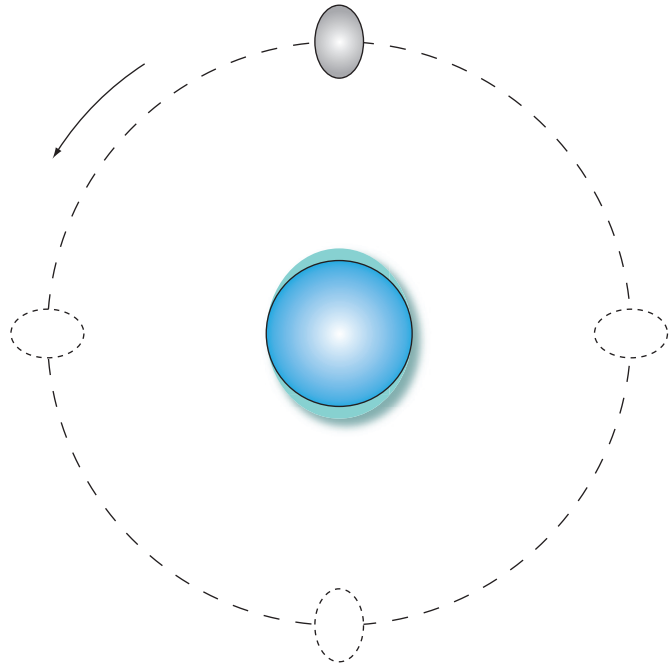
月は絶えず同じ面を地球に向けています。そのために、地球からは月の裏側を見ることはできません。これは、月が地球を一周する間にちょうど1回転しているためです。このようにならうというタイミングは偶然できたことなののでしょうか？

地球の海の満ち引きは、月や太陽からの重力によって引き起こされていることは知っている人は多いでしょう。月に近いところでは月からの重力が大きくなるため海水も引きつけられます。また、月と反対側では地球の月の重力による運動の遠心力に比べて重力が弱いため反対側に海水が引き寄せられます。これを**潮汐力**と言います。

月もまた地球の重力によって潮汐力を受けます。地球に近いところではより地球からの重力によって引きつけられ、地球から遠いところでは、重力よりも遠心力が勝り外側に引っ張られます。このため、月は球形ではなく楕円にひしゃげた形になっているのです。

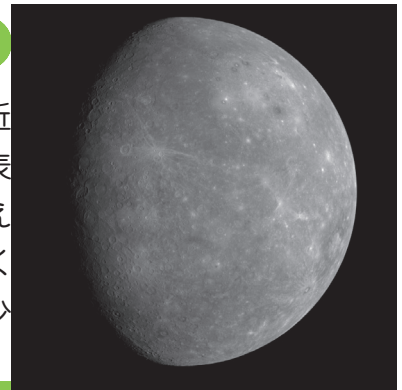
すると、地球に近いところはより強く引かれるため絶えず地球の方向に向こうとします。このために、地球からはひしゃげた部分のある面が見えるのです。

ひしゃげるのは月だけではなく、地球の形も直径にして数センチだけ月の重力によってひしゃげています。つまり、水だけでなく地面にもわずかながら満ち引きがあるのです。月の公転は27日であり、地球の自転は約1日です。このため地球の自転により地球の盛り上がった部分は月の前に出て行きます。この出っ張った部分に引きつけられて月は進行方向に加速します。すると月は地球から遠ざかって行くことになるのです。逆に、地球は月によって自転を妨げられることになるので、地球の自転はゆっくりになっていきます。実際月は地球から年間数センチメートルずつ離れていっているのです。月が誕生したときには、月は現在よりももっと地球の近くを回っていたでしょう。また、月の時点ももっと速かったのですが、潮汐力のため現在のようななったと考えられています。



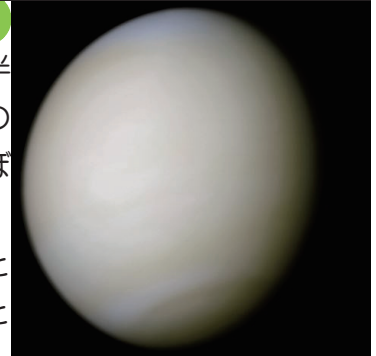
水星

水星の表面は、月と良く似ています。水星は太陽に最も近いので、大気は熱運動で宇宙空間に逃げてしまいました。表面の温度は夜にはマイナス 170℃で、昼には 400℃を超えます。このため非常に過酷な環境にあり、見かけは月によく似ています。あまりに過酷な環境なので興味深いところが少ない惑星です。



金星

金星は、大きさや化学的組成が地球によく似ています。半径は地球よりも少し小さい、6000km であり、質量も地球の 80 パーセントほどです。このことから、地球と金星とはほぼ同じ歴史をたどると考えるのが自然です。



自転の周期は、地球が 1 日なのに対して、金星ではなんと 243 日です。しかも自転の回転の向きは、地球や他の惑星と反対方向です。

通常、熱放射の現象により、光の放出によって温度を調べることができます。ところが金星は厚い雲で覆われていますので、可視光では表面の温度を知ることはできません。しかし、電波は雲を突き抜けられます。これによると、表面の温度はなんと 450℃以上！地上には火山によるクレーターが多数見られることがわかりました。

金星の大気は、95 パーセント以上が二酸化炭素です。そして残りのほとんどが窒素です。雲は最初、地球と同じように水蒸気でできていたと思われていましたが、実は酸素と二酸化硫黄が反応してできた硫酸でした。水の成分がどこにもありません。

それではなぜ地球と金星ではこんなに違うのでしょうか？それでは最初に、両者とも同じ大気の組成であったとしましょう。火山活動によって、地球内部から水と、二酸化炭素と、二酸化硫黄、そして窒素化合物です。

地球では窒素化合物が紫外線にさらされて大気中に窒素が増加していきました。その後、水蒸気は地表が冷えると一緒に海をなしました。そして、二酸化炭素と二酸化硫黄の多くはその海に溶けたのです。それらは、後に生命活動により石灰質の岩石として地中に戻されます。仮に、海や石灰などに含まれる二酸化炭素がそのまま放出されると、98 パーセントが二酸化炭素となり窒素が2 パーセントと計算されます。これは金星とほぼ同じであり、これより地球と金星とはできた初期のころにはほぼ同じ組成であったと推定できます。

金星では、地球と同様に大気中に水蒸気がありましたが、太陽に近く、太陽からの熱により地表が冷えることなく、水蒸気は海になりませんでした。また、金星の自転が遅く、地球のように周りに磁気がありません。そのため、太陽風などの高エネルギーの宇宙線が大気の上空に降り注いでいます。大気中にあった水蒸気は、紫外線などで分解され、水素は軽く宇宙空間に逃げていってしまったと考えられます。二酸化炭素のみが大気中の残されていき、温室効果が加速されました。このように、いったん温室効果ができるとさらに温室効果が強まっていくのを**暴走温室効果**と言います。金星ではまさにこの暴走温室効果が起きたのです。

火星

火星の半径は地球の約半分です。また、自転の周期は、24.6 時間と地球によく似ています。また、自転軸の傾きも地球とほぼ同じなため季節があります。火星には巨大な火山や渓谷、砂漠があります。4000km にも達する渓谷は、19 世紀の天文学者が、火星人の作った運河だと思ったものの一部です。火星は起伏が激しく、中でもオリンポス山は標高 27km の太陽系最高の山です。平均気温はマイナス 43℃で、大気は主成分は金星と同じ二酸化炭素ですが、非常に希薄なのです。



現在の火星の表面は乾いていますが、かつては水を蓄えていたものと考えられています。その証拠に、火星表面のいたるところに水の流れた跡が確認されるのです。また、地中表面から数メートルのところに氷の層があることも一部の科学者が予想しています。また、地下 500 メートルくらいのところに水が蓄えられている可能性も指摘されています。地球にも鉱物を食す微生物がいることから、火星にも微生物がいる可能性があるのです。

火星でも、地球や金星などと同様に、40 億年ほど前には火山活動によって、水蒸気や二酸化炭素などが存在したと思われます。しかし、火星は太陽から遠いため、厚い大気にもかかわらず平均気温は摂氏 0 度となり、生命（バクテリアなど）にとっては極めて快適であったと推測されます。しかし、その後の隕石の落下による衝撃や、重力の力が弱いことなどにより、数十億年の内に大気のほとんどが失われてしまったと考えられます。海に溶けていた二酸化炭素は、水が地中にしみこみ凍結するとともに、地中に閉じこめられてしまいます。二酸化炭素は、冷たいものによく溶ける性質があるため、冷えるにしたがってより地中に閉じこめられていき、冷却が加速してしまいました。大気は薄くなり、地表はより寒くなっていったのです。このように、いったん冷えると水蒸気などの温室効果ガスが失われ、より冷えていく現象を、**逆暴走温室効果**と言います。火星ではこの逆暴走温室効果が起きたのです。

地球とさらに異なるのは、地球よりも少し半径が小さく、そのため地中の熱も早い時期に失われてしまったことです。このため、次章でみるプレートテクトニクスが起らなかったのです。二酸化炭素とプレートテクトニクスの関係は次章で詳しくみていきましょう。

高等生物の生存は不可能ですが、地球に水があればバクテリアなどが生息することができるとは思います。地球と同様に放射線による地熱があり、地中では水があり、そのため、生命の存在も期待されています。

木星

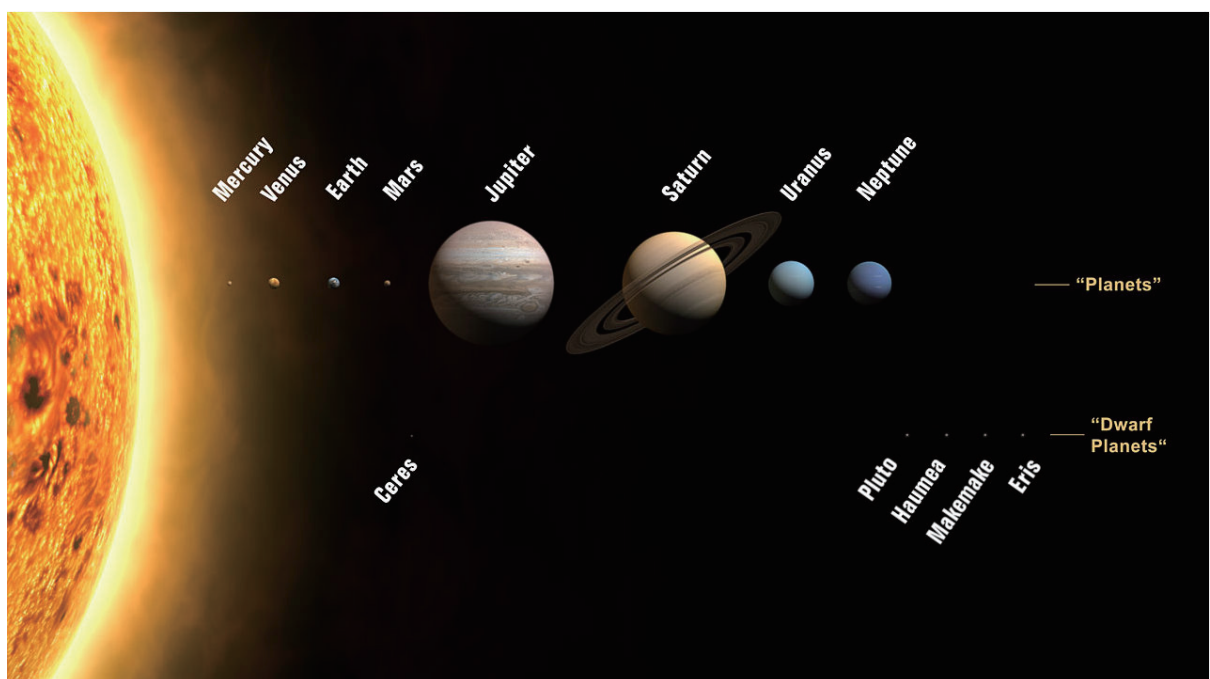
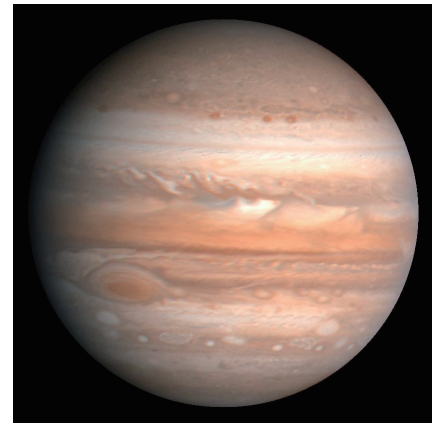
太陽から近い順に、火星まで見てきましたが、木星からそれまでの惑星と大きく変わります。特に木星は太陽系最大の惑星です。質量は地球の約300倍で、半径は約11倍と巨大です。内部の多くは、水素とヘリウムからなる気体です。

大気は荒れており、すさまじい天候です。中でも特徴的なのはハリケーンのような大赤斑です。これは写真のような渦で、地球2、3個分の大きさです。観測されている限り1800年代から存在が確認されています。

大気の構成は、スペクトルの解析によりわかっており、86パーセントが水素で、13パーセントがヘリウムです。内部では激しく気体が循環しているためこの比率は、内部でも変わらないとされています。このように水素とヘリウムが多く含まれるのは、重力が強く、地球などのようにヘリウムや水素を逃がさなかったためと考えられます。

しかし、スペクトルの解析から得られているデータからでは、木星の赤っぽい雲の色は説明できません。これは複雑な化学反応の結果であると考えられていますがはっきりしていません。

木星は質量が小さいため、核融合を起こすことはできません。つまり、恒星になりそこねた星とも言えます。しかし、現在までも少しずつ小さくなっていき、その重力エネルギーを熱として開放し、 4×10^{17} ワットもの熱を発しています。



木星の月

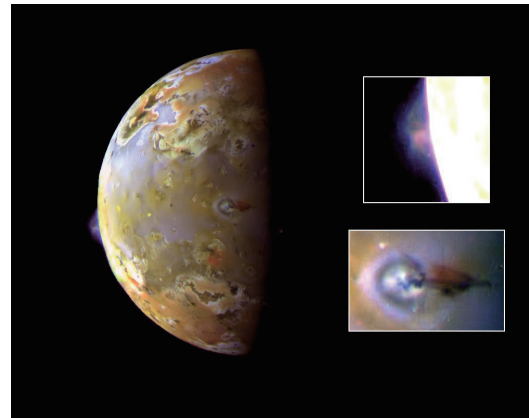
現在までに、木星には63個もの月があると認定されており、そのうち大きいものは16個です。中でも大きな4つ**イオ**、**エウロパ**、**ガニメデ**、**カリスト**は、1610年にガリレオ・ガリレイが発見したものです。そのため、**ガリレオ衛星**と呼ばれています。

これらの衛星は、木星の自転の軸と方向をそろえたようにほぼ円形に回転しており、まるでそれ自身木星を中心とした太陽系のようです。このことは、太陽系の起源と同様にし、木星とその衛星が作られたものと推定されます。ここではもっとも特徴的な、イオとエウロパを見てみましょう。

イオ 最も活発な月

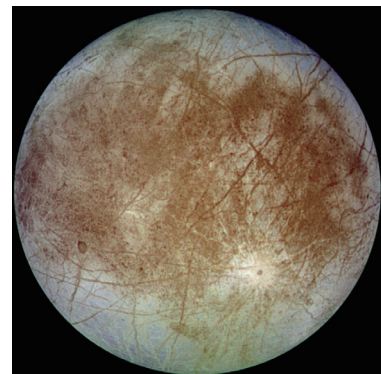
イオは木星に最も近いところにある月です。イオの質量と半径は地球の月とほぼ同じです。もっとも特徴的な点は、現在でも火山活動を盛んにしている点です。いったいこのエネルギーはどこから来ているのでしょうか？実は潮汐力です。

イオは、自転しながら木星の周りを回っています。すると、木星に近いところは木星に強く引かれるので、すこし長ひょろくなってしまう。自転するとその長い部分の位置が変わるので、イオ自身が絶えずもまれたような状態になるのです。そのひしゃげるときに発生する熱により火山活動が行われます。



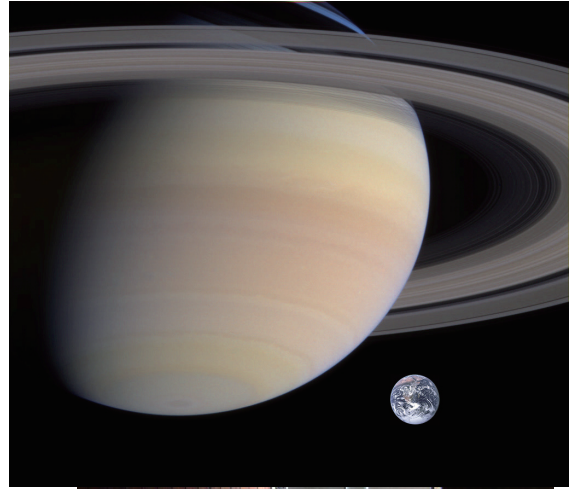
エウロパ 水の月

エウロパの表面は氷で覆われています。潮汐力による熱のため、内部では水になっていると思われます。そのため、エウロパには生命体がいる可能性が指摘されています。地球上のバクテリアはエネルギーに変えられる様々な化学反応を利用しています。このため、地球外の水のあるところなら、太陽光なしで生存することも可能なはずなのです。



土星

土星は天体として最も美しいものの一つでしょう。小さな望遠鏡でも土星の輪を見ることができます。土星の質量は地球の95倍ほどであり、大きさは地球の約10倍です。このため、土星の平均密度は水よりも小さく、そのため、もし土星を水に入れると浮いてしまうでしょう。木星同様、土星も水素やヘリウムが主成分です。木星に比べつと質量が小さいので、重力はさほど強くありません。特に表面の半径は地球の約10倍ですから、質量も約10倍ですから、ニュートンの万有引力の法則により木星表面の重力は地球の10分の1程度しかありません。しかし、地球に比べて太陽から8倍程度遠いので、水素などが太陽のエネルギーによって加熱されて逃げていってしまわないのです。



土星と温泉

土星は比重が0.7なので水に浮く

土星の輪はどのようにしてできたか？

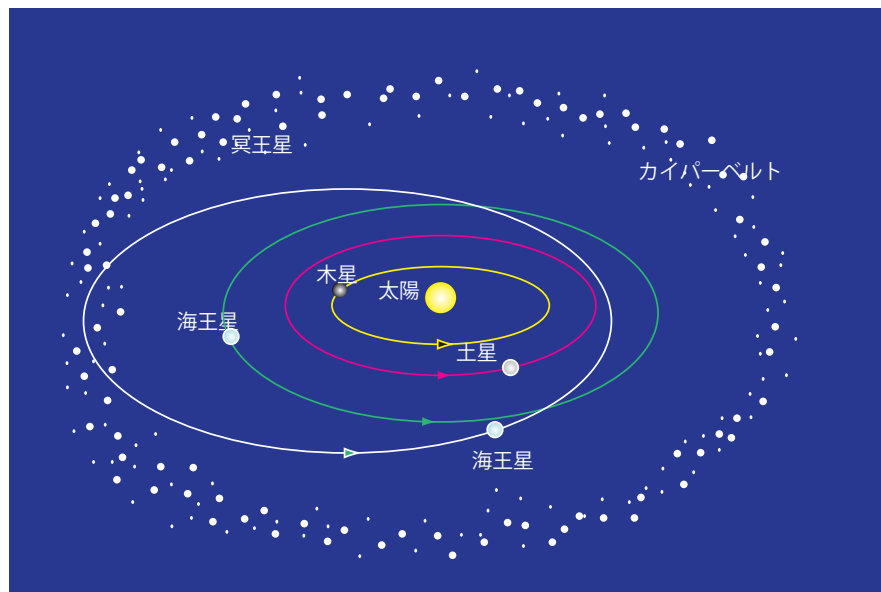
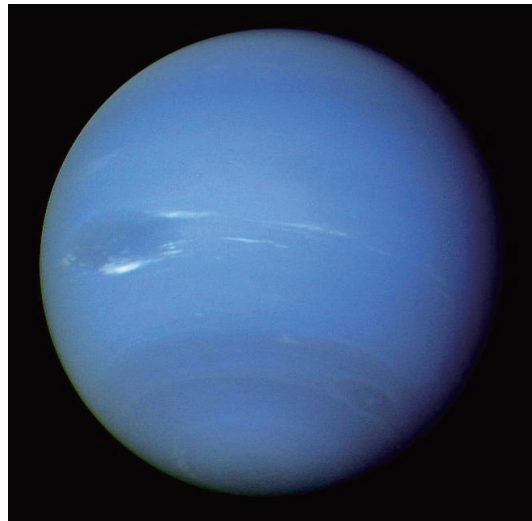
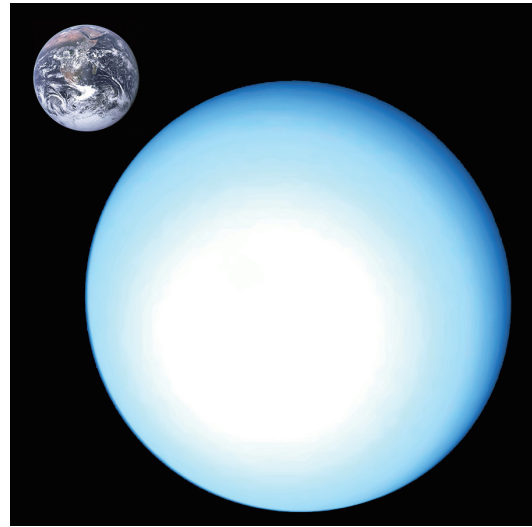
土星の輪は非常に薄く、直径が20万キロに比べて厚さはわずか数十メートル程度です。それではどうして土星に輪があるのでしょうか？土星の輪の成分を解析するとそれは氷です。土星からある程度離れていると、物体にかかる潮汐力は小さく物体は安定です。しかし、土星に近い軌道を回る大きな物体は、潮汐力を受けてひしゃげて壊されてしまいます。特に氷などの物体は欠けたり壊れたりしやすいのです。このため、土星の月の一つが、隕石との衝突など何らかの理由で土星に近づき、潮汐力でバラバラになり、その結果輪を形成したと考えられています。

天王星と海王星

水星、金星、火星、木星、土星は紀元前の時代から知られていました。天王星は、1781年に天文学者のウィリアム・ハーシェルによって発見されました。ハーシェルは、それがぼやけて見えて彗星かと思いましたが、他の星と異なる動きをする惑星であることがわかったのです。名前は、土星の欧米名は、ローマ神話の神、サターンです。そこで、サターンの父親、天王(ウラナス)にちなんで天王星と名前がつけられました。

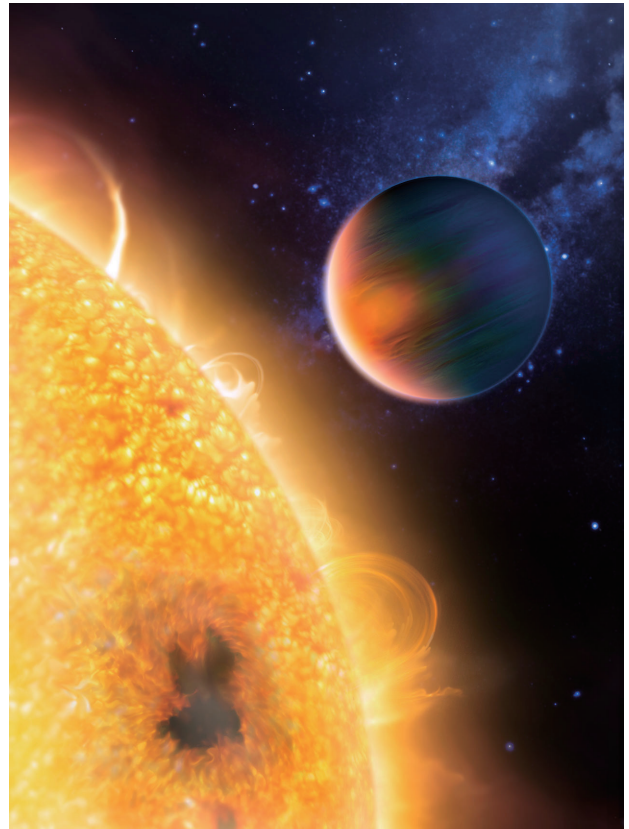
天王星の発見の後、天文学者達は天王星の軌道を調べましたが、ケプラーの法則から予言されるような楕円運動をしていませんでした。これは、天王星の近くにもう一つの惑星があり、この重力の影響で楕円運動からずれると期待されました。1846年に2人の数学者、ジョン・アダムスとルヴェリエがその質量と位置を予言しました。そして、翌年1947年に実際に予言された位置にその惑星が発見されました。ローマ神話の海神にちなんで海王星、ネプチューンと命名されました。天王星はかろうじて肉眼で見ることができますが、海王星は望遠鏡でなければ見ることはできません。驚くべきことに、ガリレオがスケッチした星の中に海王星が含まれていました。もちろんガリレオはそれを単なる星の一つとと思っていましたが。

海王星、冥王星は、土星型惑星同様に主に水素からなり、ヘリウムやメタンも含まれています。大気中のメタンにより、赤い光は吸収され青く見えています。

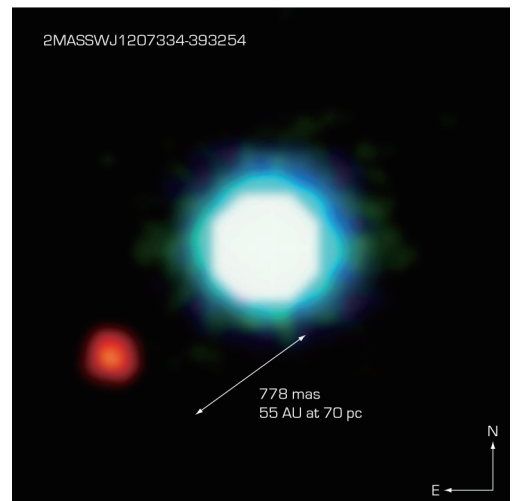


系外惑星と地球型惑星

どんな化学的理論も実験や観測による証明が必要です。太陽系の形成に関する理論も証明されるべきです。太陽系外の惑星の解析は太陽系が典型的な恒星系なのかを知る上でも重要ななのです。太陽系外の惑星を**系外惑星**と言います。しかし、太陽系外の惑星を見つけるには困難がありました。それは、惑星は恒星のように自ら光っているわけではないので、恒星からの光を反射しているだけであり、光度は小さく、数光年は離れたところでは暗くて見えなくなってしまう。また、恒星に非常に近ければ反射した光も強く明るく光るはずですが、恒星と見分けがつくほどの分解能を得るのが困難でした。しかし、もし大きな衛星があると恒星はそれに引かれてわずかに移動します。その移動を観測して、見えない衛星の質量や位置を特定することが考えられました。



このような恒星の移動により 1988 年に初めて系外惑星が確認されました。また、次のような方法でも惑星を発見することができます。恒星の前を惑星が横切るとき、恒星からの光が遮られます。そのため、この明るさの変化を観測して、惑星を見つけることもできるのです。また、恒星の明るさが弱い場合には、直接惑星を見つけることができた場合もあります。以上のような方法により、現在まで 300 以上の系外惑星が確認されています。しかし、これらの方法では比較的大きな惑星は確認できますが、地球のような比較的小さな質量の惑星の特定はできません。また、方法上特徴のある惑星系しか観測できないので、太陽系が標準的な系かどうかについては不明です。さらにその惑星が水を蓄えているのかもわかりません。地球のような惑星がどのくらいあるのかはまだ謎のままです。



通常の恒星では、恒星が明るすぎるため惑星からの光は相対的に弱く、見つけることが困難である。2M1207 は地球から 230 光年離れた褐色矮星で、恒星からの光が弱く、惑星（左下）を直接観測できる。

