

星の光る理由（補足）

by KENZOU

2004年7月17日

< 謎好きアリスさんからの返礼 >

星が輝く理由早速にお答え下さり有り難うございました。星の中に恒星と惑星があることは承知していましたが恒星というのは動かずにじっとしているだけの星で惑星はその構成の周りを回る星だということしか知らなかったです。たまたま太陽がじっとしている星でありながら自らが燃えているのだとばかり思っていました。そして宇宙には輝く星が太陽しかないようにも思い込んでいました。この広い宇宙でそんなことありえないですよ。中学の時の理科の先生に文句が言いたいです。(でもそんなことも知らなかったのはクラスの中でも私だけかも)先生の説明の中に出てくるアリスは私より数倍もスマートな女の子なので彼女の質問に胸がすくと同時にだめだこれじゃ分らないままだあ…。と思うこともあってさらに先生に聞いてみたいと思います。別に恒星は動かない星と限ったことではないのですね。動きつつも核融合反応を起こして輝く星もあるのですか？それとも反応を起こしながら動くことはありえないのですか？いつか恒星もわずかながらその位置を変えているという文を読んだような記憶もありますが…。そもそも星が動くということはどのようなことなのでしょうか？しかもきちんと軌道上を…。そして私の悪い癖が出てしまいました。次から次へと謎を呼ぶ性格…。核融合反応がエネルギーを放出するなら核分裂反応はエネルギーを吸収するのではないのだろうか???といったようなことです。(水は熱すると蒸気になり気体を液体に変えるとき熱を吸収するという原理がありますよね。こんな感じで逆のパターンになるのかなあとか思っていました。)先生に呆れられない事を祈りつつ…。

ということで、以下、新たなご質問に対する回答を試みます。

Q 1 . 星が軌道を描いて動く理由

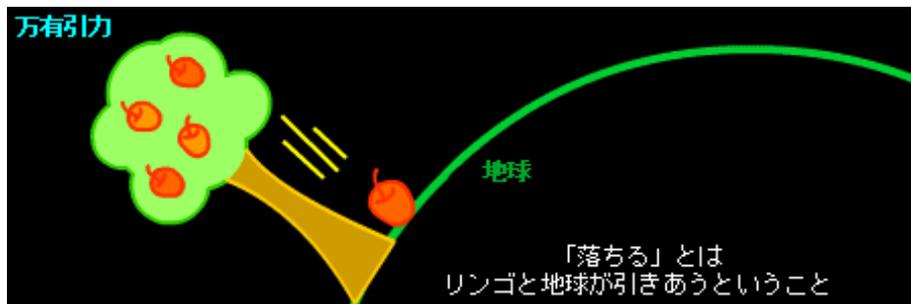
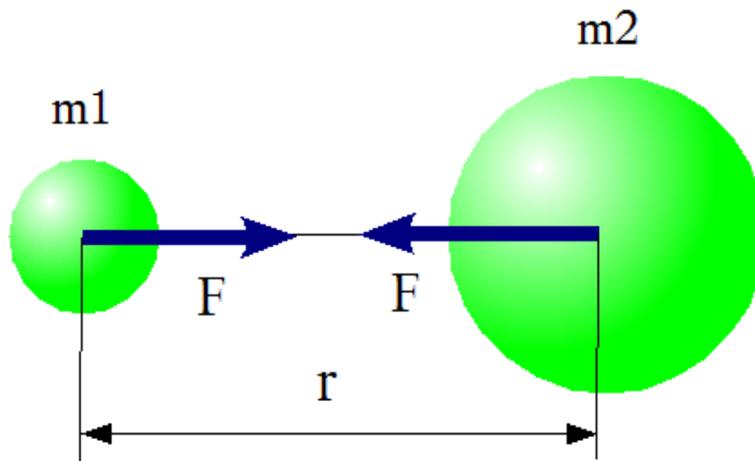
A 1 . ニュートンの万有引力により太陽の回りの惑星は楕円周回運動をする。

イギリスの天才物理学者ニュートンは1665年に万有引力の法則を発見した。りんごが木から落ちるのを見て発見したという逸話で有名ですね。これは、「2物体に働く万有引力の大きさFは、2物体の質量m1、m2の積に比例し、物体間の距離rの2乗に反比例する」というもので、この関係を数式で書くと次のようになる。

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (1)$$

りんごが木から落ちる理由は次の通り。りんごは地球から式(1)の引力を受け、一方、地球もりんごから同じ大きさの引力を受けている。ところで、りんごの重さは地球の重さと

<万有引力の法則>



比べて比較にならないほど軽く、地球のほうが圧倒的にりんごより重い。したがって、軽いりんごは地球の引力で引き寄せられ、一方、地球は非常に重いため動かない。その結果、りんごは地球表面に落ちる。

(http://www.so-net.ne.jp/kagaku/naze/hon/cat_b_2_26.html)

<ニュートンの運動の法則>

ところで、ニュートンの万有引力の法則は、木からりんごが落ちたのを見て、瞬間的に天才ニュートンの頭に閃いたのではもちろんない(話としては面白くないが:笑)。それは次に述べる運動法則とケプラーにより発見されたケプラーの法則の解釈を追求していく中で見いだされた。

ニュートンの運動の法則を紹介しておこう。これは次の3つからできている。

1. 慣性の法則…外から力が作用しなければ、物体の運動の状態はそのまま維持される。
2. 運動の法則…外から力を受けている物体は、その力の向きに加速度¹を生じる。その加速度の大きさは、力 F に比例し、質量 m に反比例する。

$$F = ma$$

¹単位時間当たりの速度の変化率、つまり速度の時間変化のこと。

【注釈】 物体はそれ自体としては速度変化する性質を持たない。したがって、もし物体が速度変化するれば、その原因は物体以外に求めねばならない。つまり、物体以外に求めるこの原因が「力」ということになる。

3. 作用反作用の法則 … 自分が相手から力をうけると、相手も自分から力をうける。

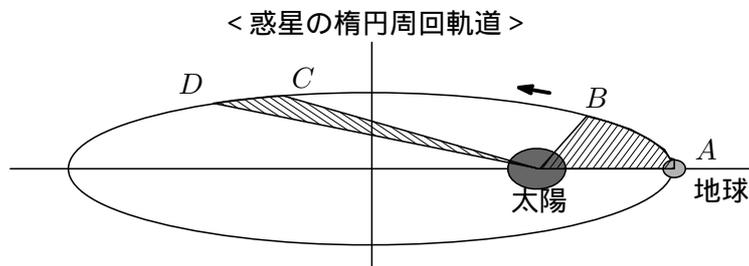
$$F' = -F$$

【注釈】 壁にド～んとぶつかれば、壁から弾き飛ばされますね。これが作用反作用の原理です。つまり、壁にぶつかり壁を押そうとする力と同じ力で壁から押し返されることになる。

<ケプラーの法則 (1619年)>

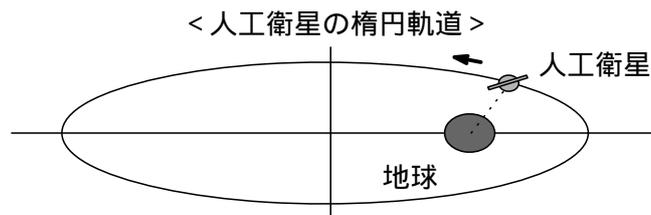
ケプラーはその師匠にあたるデンマークの天文学者ティコ＝ブラーエが残した膨大な観測データをもとに、火星の軌道計算から惑星の運動を記述する法則をまとめ上げた。その法則をケプラーの法則と呼んでいる。

1. 楕円軌道 … 惑星は太陽を一つの焦点とする楕円軌道を公転する。
2. 面積速度一定 … 惑星と太陽を結ぶ線分が一定時間に通過する面積は一定（下図の斜線面積は一定）である（惑星は太陽に接近するほど速く動き、遠ざかるにつれてゆっくり動くということ）。
3. 惑星の公転周期の2乗は軌道の半長径の3乗に比例する。

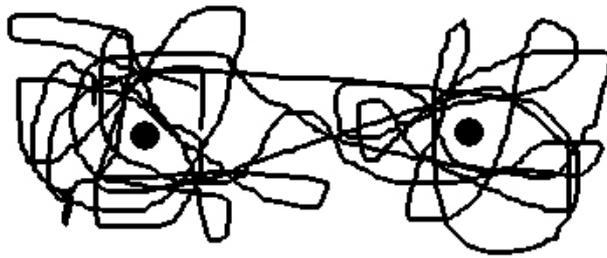


計算の詳細は省略するが、ニュートンの万有引力による惑星の運動方程式を立て、その方程式を解くと見事にケプラーの法則が導出される。つまり、ケプラーの法則、換言すると惑星の運動は万有引力の作用により太陽の周りに楕円周回運動をするということになる。

【蛇足】 地球の周りを回る人工衛星は地球の引力を受けて地球の周りを楕円周回運動している。



さて、いままでは太陽の引力を受けた惑星の運動を調べてきたが、恒星として例外ではない。互いに万有引力を作用しあっている。ただその引力の大きさが無視できるほど小さいか、運動に影響を与えるほど大きいかによって運動が変わるだけである。上の議論では例えば太陽と地球というように2体問題を考えてきたが、“同じ質量”を持つ3つの星が互いに万有引力を作用しあっている場合、その運動はどうなるか、、、実はこの場合にはニュートンの運動方程式が厳密に解けない！つまり、すっきりした運動の軌跡を描かないということが想像できる。例えば2連星の周りをまわる1個の惑星の軌道をコンピュータでシミュレーションすると次のような複雑な軌道となることが示される。



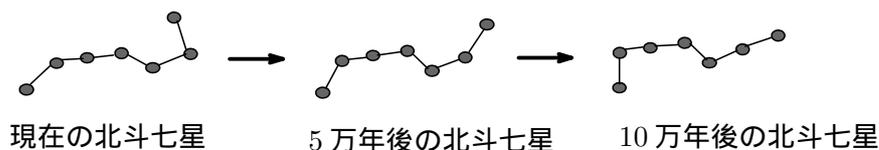
< 2 連星回りの惑星の軌道 (3 体問題) >

Q 2 . 恒星は核融合反応しながら動くのか？

A 2 . その通り。周りの恒星の万有引力を受けて核融合反応しながら動く。

恒星がわれわれよりあまりにも無限遠方にあるため、その動きが極めてわずかしか見え、容易に観測できない。このことから、恒星はあたかも不動の天体のように思われてきたが、決して不動の天体ではない。恒星間の万有引力の作用を受け、複雑な軌跡をたどって動いている²。非常に長い年月の間にはその動きが認められるはずであるが、遺憾ながらそれを観測するには人間の歴史はあまりにも短い。しかし、なん世代にもわたって観測データを積み上げたデータに加え、現代は観測機器が非常に高精度になっており、恒星の何十万年！か先の動きの予測がされている。

< 5 万年、10 万年後の北斗七星の姿 >



²現在、太陽も含めすべての恒星は個々の運動をしながらも全体としては銀河中心のまわりを回転していることが知られている。恒星の動きは毎秒数十 km というスピードであるが、私達から見て、1 年間に角度の 1 秒にも満たない非常にわずかな動きである。

Q 3 . 核融合反応はエネルギー放出、核分裂反応はエネルギー吸収？

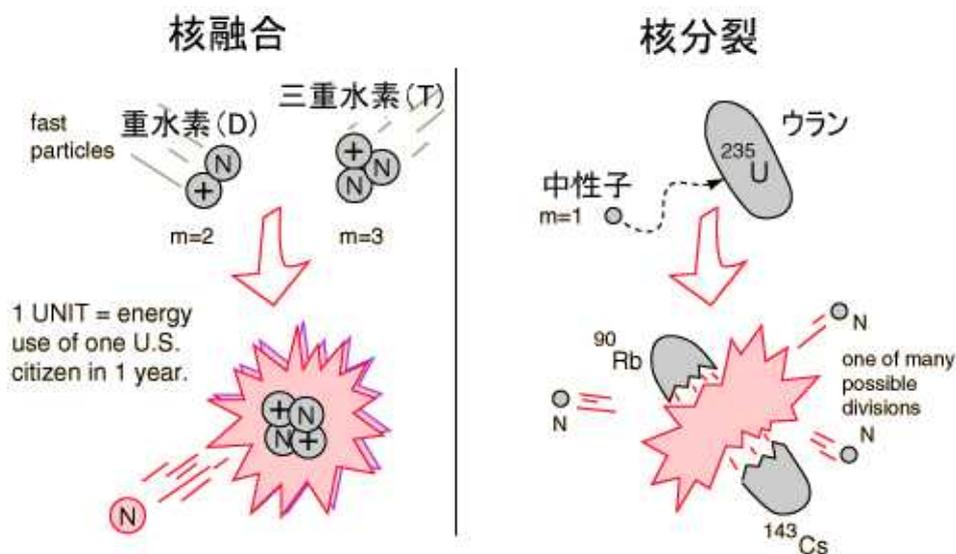
A 3 . Nein. ともに莫大なエネルギーを放出する。

< 質量保存則 >

すべての化学反応では反応物質の質量の合計と生成物質の質量の合計は等しい。これは「質量保存の法則」と呼ばれて居り、近代化学の父・フランスの化学者ラボアジェ（1743～1794）によって発見（1789）された。ラボアジェは、「燃焼とは酸素との結合である」ということを発見している。

例えば、1本の重い木があるとする。この木に火を付けると木は燃え燃えたあとには灰が残る（あたりまえ）。あの重い木がこんな軽い灰になった、どうして質量保存の法則が成り立つのか、と疑問に思うが、質量保存則のいみするところはこういうことである。つまり、木が燃えるといことは、木の成分（主に炭素など）が酸素と結合して2酸化炭素（ CO_2 ）になったり、その他の気体に変化したということで、発生したすべての気体の重さと残った灰の重さ足しあわすと、元の木の重さに等しいということなのである。

< 核反応 >



< 核融合 / 核分裂反応 >

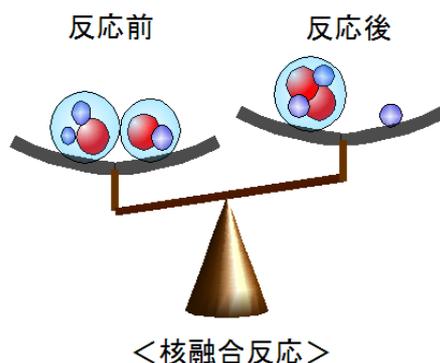
(<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>)

核反応には恒星が燃えている主因の核融合と原子力発電に使われている核分裂の2種類がある。一般に、軽い原子は核融合反応を起こしやすく、重い原子の方は核分裂を起こしやすいといわれている。

核融合反応：重水素と三重水素の軽い原子を勢いよくぶつかって原子核が融合する反応

で、このとき 1 個の中性子と莫大なエネルギーが放出される³。反応前後の質量の差を測ると、反応前後で素粒子の数（陽子、中性子）は等しいが、反応後の質量は反応前に比べてわずかに軽くなっている⁴。この軽くなった分がエネルギーに変わったのである。

核分裂反応：重たい原子、ウランやプルトニウムに中性子や γ 線などの放射線を吸い込ませると、原子核が不安定となって核分裂が起こる。このときに大量の熱エネルギーが発生する。ウランの原子核が核分裂する前後の重さを計ってみると、分裂後の方がわずかに軽くなっており、この軽くなった分がエネルギーに変わったのである。



< $E = mc^2$ の関係 >

アインシュタインは特殊相対性理論の中で、物質の質量（重さ）は、エネルギーに変換することができるという、有名な $E = mc^2$ の式を導いた。左辺の E はエネルギーを表し、右辺の m は物質の質量⁵、 c は光速度を表す。例えば、1 グラムの物質がすべてエネルギーに変わったとして計算すると、光速度は、秒速 30 万キロなので、 $1(\text{g}) \times 300000(\text{km/s}) \times 300000(\text{km/s}) = \text{約 } 90 \text{ 兆 J (ジュール)} = \text{約 } 20,000,000,000,000 \text{ カロリー}$ という莫大なエネルギーになる。核反応により放出される莫大なエネルギーのからくりは、ここにあったのである。

³2g 程度の水素が核融合を起こすと、その発生するエネルギーで大体 40m 四方の深さ 4m のプールの水を瞬間に沸騰できるといわれている。

⁴質量欠損と呼ばれる。これは核力と関係するのであるが、ここではこれ以上立ち入った話はしない。

⁵質量といたり、化学反応のところでは重さといたり統一感がないでもないが、あまりこだわらずにおく（笑い）。