

星の光る理由

by KENZOU

2004年7月11日

< 謎好きアリスさんからのレター >

「また場違いアリスがおじゃまします。いつか先生に宇宙の謎についてお尋ねしたとき、宇宙のすべての星が消えたとしても宇宙は最初のビッグバンの残光によってうっすらと明るいと教えていただきました。そのときまた私の中に一つの疑問が…。そもそも何故星が光るのか？太陽の光の反射だとしても光っていったいどこまで届くのか？私たちが見ている星の輝きはすべて太陽の反射なのか？という疑問です。光や電波熱音などこういったものの伝わり方に非常に興味を感じます。いっぱい質問したいことがあるのですが今日はそのうちの光について教えていただきたいのですが…。光はどこまで進んでも減衰しないのかまた反射して帰って来る時の（帰って来るから私たちに見えるのですよね。）角度の広がりなどが不思議です。とにかく星が光る理由がとても知りたいです。お暇な折に教えていただけたら幸いです。」

毎日暑い日が続きます。今年は特におかしい。梅雨だということにかんかん照りが続き、まさに空梅雨模様¹。暑い日の夜は、たいていクーラーにあたりながらビールを傾けますが、たまにゃあ、夜空を見上げてはてしなく無限に広がる宇宙空間に思いをはせ、ひるがえってなんと人間というのは小さい存在か、と日ごろまったく思いもしない考えに耽るのも一興ですね。。ということで、謎好きアリスさんのご質問「とにかく星が光る理由がとても知りたいです。」にお答えしていこうと思います。

星の種類

夜空を仰ぐと、いろいろな明るさを持った星が輝いていますね。赤い星は火星だとか、望遠鏡で覗くと土星の輪が見えたとか、一番明るい星は1等星とか、学校で星座を習ったときなんかを思い出します。ところで、これらの星は大きく分けて2つのグループに分かれます。一つは「恒星」というグループでもう一つは「惑星」というグループになります。

- 恒星：夜空にたくさん輝いていて星座を作る星のこと。太陽も恒星の一つです。つまり、恒星は燃えている、自ら輝きを発している星ということになります。
- 惑星：地球と同じように「太陽の周りを回っている9つの星」のこと。これは、水星-金星-地球-火星-木星-土星-天王星-海王星-冥王星²で構成されています。お月さんは地球の衛星といわれていますが、夜空に輝く月は太陽の光を反射しているのです

¹と思ったら昨日未明に豪雨と雷が鳴っていました。もう梅雨明けですかね??

²現在、冥王星よりさらに遠い10番目の惑星さがしはじまっているらしいですですね。

ね。赤い星・火星の輝きも太陽光の反射です。このように、惑星の輝きはすべて太陽光を反射しており、自ら輝きを発しているわけではないのです。

・アリス：ふ～ん、そういうことだったのね。。。

・K氏：ナ、ナンダ、nanda～いきなり一体どこからでてきたの？。突然で、ビックリしました、が、こんにちはアリスさん、お久しぶりですね。いろいろといろんな疑問をお持ちであることは風の便りで聞いていますよ。

・アリス：そうなの。考えはじめると夜も寝付けない性質（たち）で、久しぶりにKさんのところへお邪魔し、日ごろの疑問を解いてもらおうかなと思ってやってきたの。

・K氏：(コホンと咳払い一つして)それはようこそ、歓迎します。ところで、今日のテーマは「星はなぜ光るの」というものですが、しばらくお付き合い願いますか。

・アリス：まってました!! 早速はじめてください。

・K氏：はいはい、(余裕を漂わせながら)わかりました。恒星と惑星の違いは今説明しましたね。それでは何故、恒星は輝くのか、さっそくこのテーマに入っていきますよ。

恒星の輝き

恒星の代表格として、太陽を調べてみます。太陽の構造の絵を見てください。絵に描かれている項目を説明すると、

- プロミネンス：太陽の表面から高く吹き出すガスの突出をプロミネンス（紅炎）と呼んでいます。炎のような形、アーチ型、竜巻型などさまざまな形をしています。
- 光球：太陽は全体が高温のガス球で、球状にががやく表面を光球といいます。光球の表面温度は約6000の高温です。ちなみに太陽の中心核の温度は1500万度以上と推定されています。
- 彩層：太陽の光球のすぐ外側を取りまくうすい大気の層で、厚さは大体1万kmくらいといわれています。
- 黒点：黒点は周りより1500～2000度程度温度が低いいため、太陽の表面に黒いシミのように見えます。

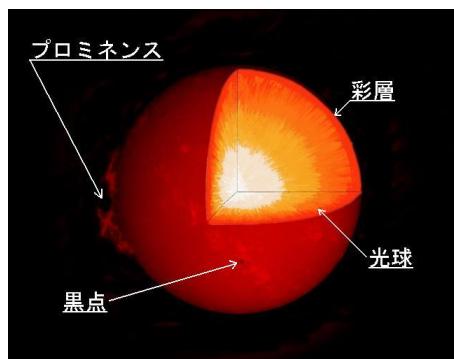


図 1: 恒星：太陽の構造

- ・アリス：つまり太陽は燃えているというわけね。燃えているから輝いている。たしかに、薪を燃やせば明るく輝くわね、それと同じ原理というわけ？
- ・K氏：その通り。なかなか感が冴えていますね。
- ・アリス：ところで、薪が燃えるのは空気があるから燃えるのでしょうか。宇宙空間は空気のない真空だ、と、どこかで聞いたことがあるけど、どうして空気のないところで太陽が燃えるのかしら？
- ・K氏：グツつふぉ～ん。ググググ、、
- ・アリス：あら、どうかされたの？
- ・K氏：いやいや、さっき食べたピーナッツのかけらがのどに詰まっちゃって。。。さて、アリスさんの疑問は当然の疑問ですね。実は、太陽が燃えているのは原子の力で燃えているのです。つまり、恒星の輝きの素、”味の素”ではありませんよ（うけ狙い）、恒星の輝きのもとには原子の力、ということですね。
- ・アリス：（うけ狙いを軽く無視して）なんですか、その原子の力というのは？
- ・K氏：はい、専門的にいうと「核融合反応」というものなのです。核融合反応というと難しく聞こえますが、実は水素やヘリウム³など、軽い原子の原子核が衝突、融合し、1つの重い原子核に変換する反応のことです。この際、膨大なエネルギーが発生しますので、酸素とかは必要ないんです。
- ・アリス：なにか原子爆弾のようなイメージね。最近、放射能漏れなどでよく問題になっている原子力発電も原子の力のエネルギーを利用しているというわけね。
- ・K氏：その通りです。ただ、原爆や原子力発電の場合は「核分裂反応」といって「核融合反応」とは違います。原子力発電は、ウランなど重たい原子を軽い原子に分裂する（これを核分裂反応と呼んでいる）際に発生するエネルギーを利用しているのです。ところで、核融合反応は核分裂反応よりずっと大きなエネルギーがでるのです。
- ・アリス：ふ～ん。え～っと、今までのお話を整理するとこういうことになるかしら。恒星は、水素やヘリウムのような軽い原子の原子核が衝突、融合し、1つの重い原子核に変換する核融合反応で莫大なエネルギーを出している、これが恒星の輝きの素である、と。
- ・K氏：お見事！ピンポ～ン。大変結構なまとめ方です。
- ・アリス：しかし、何か釈然としないわ。
- ・K氏：（オロオロっとしながら）どういう点でしょうか？
- ・アリス：核融合反応で莫大なエネルギーを出すということはよいとして、それと”燃えている”というイメージがイマイチピンとこないのよね。
- ・K氏：（ハンカチで顔を流れ落ちる汗を拭きながら）ふ～つmu、、、そうですね、確か中学の理科の実験なんかで水素と酸素を混ぜ合わせて水を作る実験をやったことがありますね。
- ・アリス：ハイ、そういう実験をやりましたねえ。思い出しました。
- ・K氏：ポーン！と音がして試験管に水滴がつきますが、このポーン！で反応のエネルギーが放出されたのです。暗室でこの反応を見るとうすい色の炎が見えたはずですよ。つまり、”エネルギーの放出”は”燃える”ということと同じ意味にとっていいのです。
- ・アリス：ふ～ん、なにか、煙にまかれたような気がするけど、、、ま、そういうことにして先に進みましょうか。

³夜店や露天では風船にヘリウムガスを入れて、ふわりと浮く風船を売っていますね。
【蛇足】ヘリウムはギリシャ語で太陽を意味する。

・K氏：グっふお～んん！（しきりにハンカチで顔を拭きながら）今日は暑いですねえ、、、この議論もいよいよ熱くなってきましたが、、（一拍おいて）”味の素”ではない、もとい、恒星の”輝きの素”となる核融合反応のことについて、少し専門的な立場からのお話をしてみましよう。ここは適当に聞き流してもらえばいいです。

・アリス：はい、了解しました。ところで、味の素というフレーズがお好きなのね。ギャクとしてはあまり面白くないけど。。

・K氏：（いきおい込んで）え～～っと、グっふおん！（咳払い）核融合反応というのはですね、重水素と三重水素が融合してヘリウムと中性子ができる反応のことです。この反応は、先程の水素と酸素の反応で水ができる場合の1千万倍以上のエネルギーが発生すると言われています。途方もない莫大なエネルギーが発生するのですね。。

・アリス：重水素とか三重水素とか、普段聞きなれない専門用語がポンポンでてきて少し頭がクラクラするワ～。恒星の輝きの素っていうのは、「紙」と「火」のように簡単なものじゃないのね。

・K氏：まっ、まっ、いましばらく我慢してください。核融合反応を少し絵で説明することにしましょう。英語で重水素のことを *Deuterium*、三重水素のことを *Tritium* といいますから、この反応は、それぞれの頭文字をとって *D-T* 反応と呼んだりします。

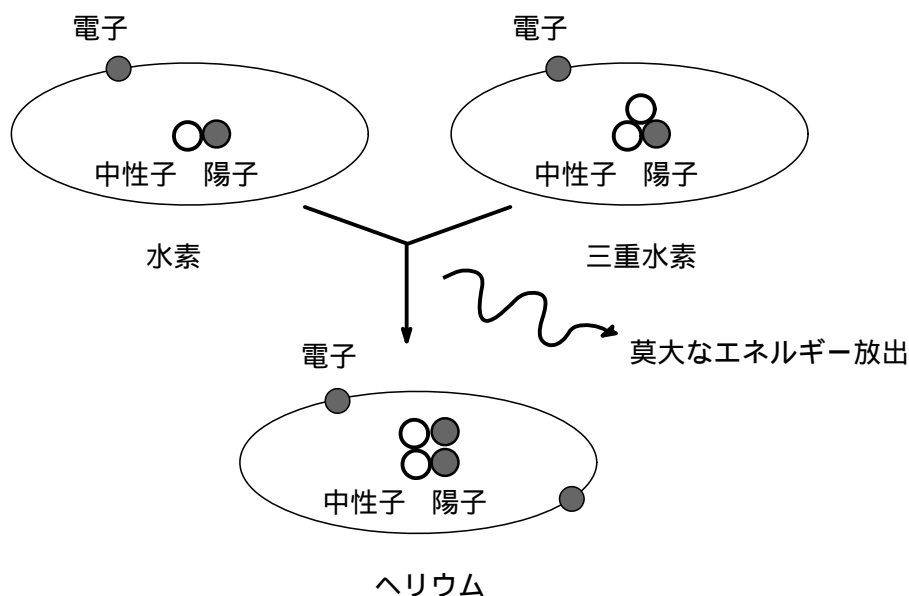


図 2: 核融合反応

水素の原子核は陽子1個と中性子1個できており、その周りを電子1個がクルクルと回っています。三重水素というのは中性子が2個で陽子が1個の合計3個（三重はここからきている）で原子核ができており、その周りを電子1個がクルクルと回っています。つまり、三重水素は普通の水素より中性子が1つ多い勘定になります。水素と三重水素を非常に高圧の下におきますと、互いに引っ付いてきて、最後には原子核が融合しヘリウムができ上がります。この際、莫大なエネルギーを放出します。できたヘリウムを見ると中性子が2個、陽子が2個で、合体前の陽子、中性子の数が合わないですが、実は不足する1

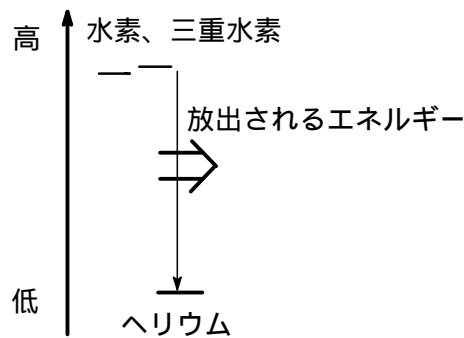


図 3: エネルギーの放出

個の中性はエネルギー放出と同時に外に飛んでいきます。これが $D - T$ 反応のシナリオで、恒星の輝き素の "舞台裏" ということになります。

・アリス：高圧化の下では水素と三重水素が無理やり押し付けられる訳ね。すると互いの原子核が融合したほうがずっとエネルギー的に安定化する。つまり、それ以前に持っていたエネルギーを放出してより低いエネルギー状態に移るといことね。

・K氏：ソッ！そういうことです。ここで、少し疲れましたので *CoffeeBreak* でもしましょうか。



[コーヒーブレイク：原子と原子核について]

原子とは…すべての原子は、中心にある原子核とその周りを回る電子から構成されています。電子はマイナスの電気を持った粒子です。電子は原子核に比べて軽いので、原子の質量のほとんどは、原子核の質量です。原子の大きさは、電子の軌道の直径で表され、 10^{-10} メートル、つまり $\frac{1}{10000000000}$ メートル程度となります。原子核の直径はこの約1万分の1で、 10^{-14} メートル程度です。仮に、甲子園球場を原子の大きさとすれば、その真中に置いたサクランボが原子核の大きさになります。

原子核とは…原子核は、プラスの電荷を持つ陽子と、電氣的に中性な中性子から構成されています。したがって、原子核は陽子の数と等しいプラスの電荷を持っています。このプラスの電荷は、原子核の周りを回っているマイナスの電荷を持つ軌道電子と電氣的に釣り合って、原子全体としては電氣的に中性となっています。(おまけ：原子核の陽子を中性子をしっかり結び付けているものが湯川博士が予言した中間子なのです) ……
CoffeeBreak おわり

恒星の一生

太陽を例にとって恒星の輝きを説明してきましたが、水素の核融合によって放出されるエネルギーで光や熱をだしているというシナリオは太陽以外の恒星一般について言えることなのです。ところで恒星は永遠に輝き続けるわけではありません。燃えている薪は薪木が

燃え尽きれば自然に火が消えるように、恒星も輝きの素となる水素ガスがなくなれば、その輝きも夜空から消えることとなります。そこで、恒星の生まれてから消え去るまで、恒星の一生を概観⁴してみましょう。

・アリス：はい、恒星の一生の話が始まったわけね。どのようなお話の展開になるのか楽しみだわ。

・K氏：はい。ところで風呂の栓を抜くと水は渦を巻きをまきながら流れだしていきまね。このイメージをしばらく浮かべておいてくださいね。

< 原始恒星の誕生 >

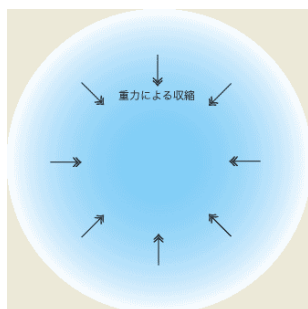


図 4: 引力によるガスの収縮

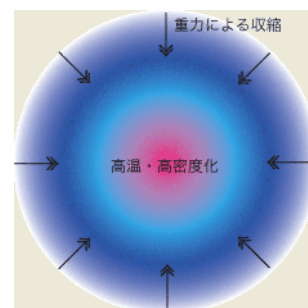


図 5: ガスの収縮

さて、銀河には水や氷、ケイ酸塩（岩石のようなモノ）からなるチリ（宇宙塵と呼ばれる）と水素からなるガスの雲（星間ガスと呼ばれる）が存在しますが、恒星はこうしたチリとガスの雲の中で誕生します。引力により、軽いガスはどんどんチリのほうに引き寄せられ始めます。これが次第に加速してくると、先程の風呂の水の話のように、雲は渦巻き回転し始め、ドンドン回りのガスを引き込んでいきます。引き込まれたガスの原子は、互いにぶつかりあい、原子の速度の飛び回る速度はドンドン速くなっていきます。これが熱エネ

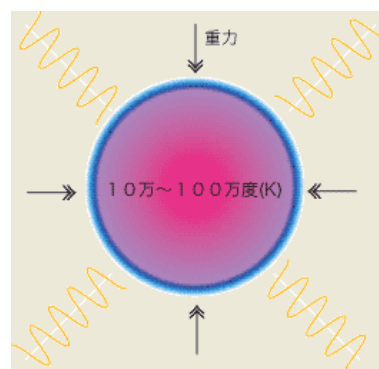


図 6: 原始恒星誕生

⁴<http://www.gw.hep.osaka-cu.ac.jp/vuniv/2004-physics/lecture3.html>

ルギーとなって、雲は次第に熱くなっていきます。雲の中心部は丁度引力の中心部ですから、ドンドン吸い込まれたガスは中心部でギュ〜ッと強烈に圧縮された状態になっていきますね。この結果、雲の中心は非常な高温・高圧状態になり、熱が広がって雲の内部は非常に熱くなっています。これが原始恒星の誕生とされています。この原始恒星はさらにドンドン熱くなり、中心部はいっそう高温・高圧状態となってきます。そしてついに核融合反応が起こり、 $D-T$ 反応により莫大なエネルギーが放出されて、雲は光を放ち始めます。いよいよ一人前の恒星といってもまだまだ駆け出しですが、恒星の誕生の瞬間です。恒星は次第に明るくなりはじめ、原始恒星から大人の恒星へと成長してきます。

< 安定した輝きを放つ壮年期 >

やがて、安定した輝きを放つ星となり、水素はヘリウムに変わる $D-T$ 核融合反応によりドンドン燃焼していき、星は輝き続けます。ちなみに太陽の寿命は 100 億年と言われており、現在は 50 億歳。一番安定している時期にあたっています。

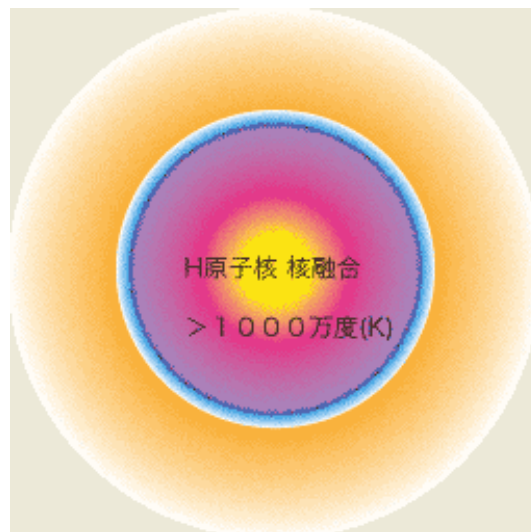


図 7: 恒星の輝き

< 老年期 >

やがて燃料となる水素が使われ尽きると、 $D-T$ 反応も終わり、星の勢いがなくなり、残った物質が重力で引き寄せられ、星は次第に縮んでいきます。ドンドン縮んでいくと中心には凝縮エネルギーが溜まり、最後に超新星と呼ばれる大爆発⁵が起こって、このエネルギーが放出されます。

< 恒星の最後 >

超新星爆発のあと、恒星の中心部にあった物質が中性子星⁶かブラックホールとなり、恒星はその一生を終えることとなります。恒星の一生は質量が大きいほど短く、質量が小さ

⁵ 大きさにより恒星の老年期は異なります。中くらいの恒星は縮んで白色矮星と呼ばれる星になり、最後に光を全く放たない黒色矮星となって一生を終わります。ここの話の恒星は大きいサイズの恒星の一生です。

⁶ 中性子だけでできている星

いほど長いといわれています。

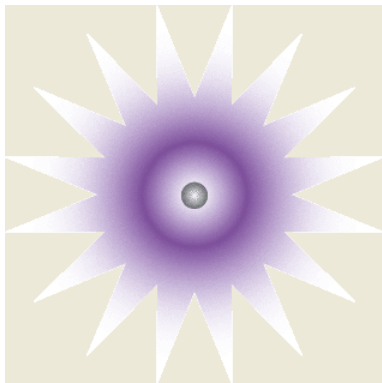


図 8: 超新星爆発

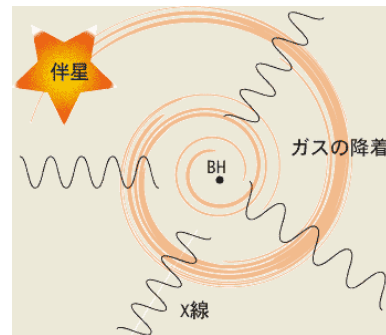


図 9: ブラックホールの生成

・アリス：太陽の寿命があと50億年もあるということで安心したわ。星の一生っていうのは宇宙塵が互いに引き合って集まり、次第に大きな塊になっていく。そうすると重力（引力）により、周りの軽いモノをさらに強力にひきつけていくわけね。これが繰り返されると、塊はドンドン大きくなると同時に、引力の中心となる雲の中心部は相当な高圧状態になっていく。これが高じてくるとしまいに核融合反応が起こり始める。つまり恒星が輝きを放つ瞬間、恒星の誕生というわけね。D-T反応が起こり始めると、莫大な反応熱が発生するから、これが次々と反応を加速させ、ドンドン恒星は明るく輝き、恒星の壮年期を迎えるわけね。しかし燃料となる水素は有限だから最後は燃え尽きてしまう。そうすると急速に縮みはじめて、最後は爆発してその一生を終わるといったシナリオね。

・K氏：(サマリーする手間が省けたとばかりニコニコして) お見事ですわね！ えらい今日は冴えていますわね。まあ、詳しい話はいろいろあるのですが、それをやり始めるとドンドン今日のテーマから離れていきますので、そのような話はまた別の機会にやるとして、アリスさんの疑問は解けましたか？

・アリス：なんとなくわかったような気がするわ。まあ、自分なりにもう一度考えて見ることにするけど、本日は大変お疲れ様でした。しばらく安眠できそうです。

・K氏：(ホツとして) いやあ～、大変長話となり、説明も不十分で、なんとももはや、、、もし、納得できない点がでてきたらいつでもきてくださいわね。(顔の汗を拭きながら) きょうは大変お疲れ様でした。光・電波・熱・音の話題に少しでも触れようかと思いましたが、あまり話が飛び火してもなんですから、この話題は徐々に攻略していくことにしましょう。それではまたお会いできる日を楽しみに、さようなら。