

-物理を学んで広がる世界-
原子から宇宙へ

飯田 洋治

原子核は 1 cm^3 あたり数十億トン

「恐ろしいほどの超高密度！」

聞こえよがしの声が準備室の廊下に響いた。土木科の腕白坊主たちが通りすぎたのだ。この声を聞いて「のってきたな」と、私はほくそ笑んだ。物理の授業の導入「自然の階層性と歴史性」の話をしてきた頃の出来事である。

「恐るべき…」というべきところを「恐ろしいほどの」といったこともあって、この言葉は流行語のように広がった。

授業では学校の運動場をモデルに、太陽系を縮小したり原子を拡大したりして、予想しながらその構造を比較していた。

【質問 1】

もし地球が運動場（半径 50m）のまわりを回っているとしたら、太陽や地球、月の大きさはどれくらいだと思うか予想してみよう。

【質問 2】

もし水素原子が運動場ぐらいの大きさだとしたら、原子核の大きさはどれくらいだと思う？

太陽は直径約 50cm のフィットネスボール 1)、そのまわりを、5mm 程度の地球（BB 弾の直径 6mm）が回り、月は 1mm 程度ということになり、太陽系といってもまるで宇宙の中のごみみたいなもので、後はだだっ広い空虚が広がっているようなイメージが浮かんでくる。

今度は水素原子を拡大してみる。原子核は約 2mm、つまり原子の 10 万分の 1 程度 (10^{-5} とかく) である 2)。運動場のまん中の 1 粒の砂粒という大きさだ。電子の大きさについては、これだけの大き

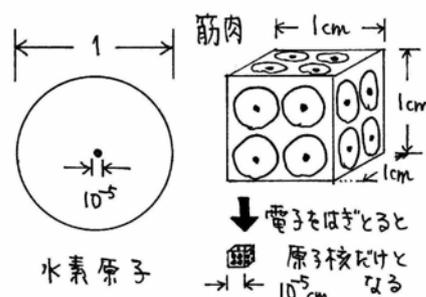
さだと明確に答えられない。粒子であるとともに波でもあるという不思議な性質が出てきてしまうからだ。それでも無理して見当をつけると、運動場ぐらい（原子大の大きさ）の雲のようなもの“電子雲”になって、まるで雲をつかむような話になる。しかも速度によっても電子の大きさが変わるというのだ。

原子核はあまりにも小さい。しかも原子の質量はこの原子核に集中し、まわりの電子はほとんど無視できるほど軽い。こんなに小さな砂粒、原子核が、運動場ほどの原子の質量を担っているのだから、いったい原子核とはどういうものだろう。

【質問 3】

どうしたら原子核の密度を計算できるか。

ここで私のオーダー計算がはじまる。我々の身体を作っている筋肉はほぼ 1 cm^3 あたり 1g の密度である。1g の筋肉に原子がぎっしり詰まっても、原子の内部は電子でかさばっているだけだから、電子をみんなはぎ取ってしまおう。



原子核だけ残るが質量はほとんど変わらずほぼ 1g。この核だけを集めれば、大きさは 10 万分の 1 に縮み、 1 cm^3 の体積は 10 万分の 1 の 3 乗、即ち $(10^{-5})^3 = 10^{-15}$ 倍に縮む。つまり原子核の密度は筋肉の密度の 10^{15} 倍にも跳ね上がる。

$10^{15} \times 1 \text{ g/cm}^3 = 10^{12} \text{ kg/cm}^3 = 10^9 \text{ t/cm}^3$
これは何と 1 cm^3 あたり数十億 t の密度である。10 トン積みダンプカーを日本の

人口だけ持ってきてこれを 1cm^3 に押し縮めたことに相当する。まさに恐るべきというにふさわしい。そういうもので、我々身体の中の原子核ができています。

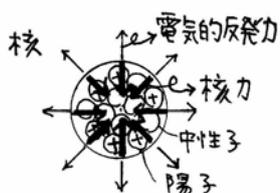
「ちょっと待てよ。我々の身体は水素原子だけではないぞ。炭素や酸素などを一杯含んでいるではないか」

確かにそのとおり。しかし、身のまわりの固体の密度はほとんどが、ほぼ数 g/cm^3 だし、原子核の大きさも水素原子核の数倍程度ということがわかっているので、この計算は概算としてはそれほどでたらめではない。

我々の身体がこんなに高密度な核でできていても少しも不思議に感じないのは、核があまりにも小さく、電子でかさばっている（電子デブ）からなのである。

超高密度の核の崩壊 - 放射能

原子核がこんなに超高密度になっているのは、核力という強い力が働いているからである。通常原子核は+に帯電した陽子と帯電していない中性子がいくつか集まってできている。+と+の陽子どうしの電气的反発力より核力の方がはるか



に強いから原子核はバラバラにならない。核力は核のすぐ近くだけが強くて少し離れると極端に弱くなってしまふ。原子核の中に陽子がどんどん詰まっていけば+どうしの電气的反発力が大きくなって、いつかは核力の壁を通り抜けて核が壊れるようになるにちがいない。

その証拠に陽子の数が 92 のウラン U

より多い原子は天然には存在しない。そればかりか、陽子数 84 のポロニウム Po から U までの原子は核力と電气的反発力のバランスが不安定な核となって自然に壊れ始める。このとき出てくるものが放射能である。α線はヘリウムの原子核で核の破片、β線は高速の電子、γ線は核が壊れる際に出てくる波長の短い電磁波で、核が壊れるときの地震波みたいなものと思えばいい。直接感じることはなくても、放射能とはまさにこの 1cm^3 あたり数十億 t の恐るべき超高密度の世界の崩壊によって出てくる高エネルギー現象だったのである。

原爆 - 超高密度の核エネルギー

大量のユダヤ人虐殺などファシズムの嵐が吹き荒れるまっただ中、1938年ドイツでウランの核分裂が発見された。この発見は科学者たちに大きな衝撃を与えた。もしこれがヒトラーに利用されたら大変なことになると彼らは恐れた。なぜなら、超高密度の核が分裂すれば、そこからは化学反応の数百万倍のエネルギーがでることが予想されたからである。アインシュタインからルーズベルト大統領への書簡に始まり、原爆製造計画（マンハッタン計画）へと発展。1945年、ついに原爆は広島長崎に投下された。

授業では、ここに至るまでの経過を解説し、「このとき科学者のとった態度をどう思うか。科学の成果がこういう形になったことに対してどう考えたらいいか、これからの科学研究はどうあったらいいか」、各人の考えをいろいろ出し合って議論するのも重要な一コマである。

原子力発電は核分裂を利用する点では原爆と同じである。ただ連鎖反応をゆっくり進ませるようにしたことだけが原爆と異なる。当然、分裂生成物は大量の放

射能を放出するが、その処分の方法は全くない。発電すればただけ、放射性廃棄物はたまる一方である。

水爆と太陽

ところで、ごく普通にある物質、たとえば水素ガスは水素原子2つで1つの分子を作っている。運動場モデルでいえば、高校と隣接中学の運動場がくっついて水素分子を作っているみたいなものだ。このとき核と核は遠く離れて接近出来ない。電子配置が核の接近を妨げるし、核と核の電的反発力も接近を妨げるからだ。

この核と核が強力な核力のおよぶ領域に接近したとたん、核は結合し(核融合)、莫大なエネルギーを放出する。しかし電的反発力押し切るだけのスピードがなければ核は核に近づけない。

水爆はこのスピードを得るのに原爆を利用した。そして核と核が衝突できるようにする。つまり原爆のまわりを重水素で包み、核融合を起こさせるようにしたのである。

太陽は質量が大きく、万有引力で自らを押しつぶす。中心部では圧力も大きく水素の原子核は猛烈なスピードになり、核と核が直接衝突し、自然に核融合が起こる。太陽の光と熱の源はまさにこの核融合反応なのである。

もし仮に太陽の光と熱の源が石油石炭で出来ているとすると、4千年で燃え尽きてしまう計算になる³⁾。地球が誕生してから数十億年という証拠があるのだから太陽のエネルギーは核融合でしか説明ができない。こうして、太陽はすでにおよそ五十億年たち、まだ五十億年ほどは燃え続けるということがわかった。

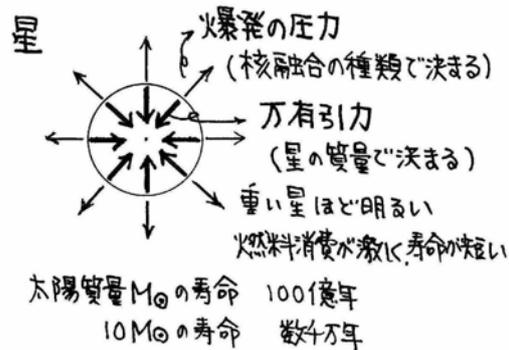
もしも原子がつぶれたら

太陽と同様、星の世界では質量が巨大

なため万有引力の押しつぶしだけで自然に核融合が起きてしまう。核融合が起きれば星はつぶれることをやめる。星の質量が大きくなればつぶれ方は速いし核融合も速く進む。結局、星の質量だけで星の運命はすべて決まってしまう。

星の質量はその中でどんな核融合反応が起きるかを定める。太陽より質量が小さい星では、 $H \rightarrow He$ の核融合。太陽程度の質量になると、星の終末に燃えかすの He が融合しはじめる($He \rightarrow C$)。現在の太陽もやがては He が燃えはじめ、地球を呑み込むほどに膨らむ。すると表面温度は下がって赤色巨星となる。太陽よりさらに数倍も質量が重くなると、 C が再び融合しはじめる。 $C \rightarrow O, N \dots$ 。核融合の種類によって爆発の程度も違ってくる。まさに、星の中こそいろいろな原子の製造工場である。

このように、今輝いている星はすべて、星をつぶそうとする万有引力と、核融合の種類によって決まる爆発の圧力とのかねあいで、星の微妙な安定と星の進化が決まってくる。



どんな星もやがては核燃料をすべて使い尽くす。そしてその質量に応じた星の終末を迎える。爆発の圧力がなくなれば、星は自らの重力でつぶれるしかない。

星がつぶれれば、原子はどんどん縮む。といってもまわりの電子がどんどん狭いスペースの中に閉じこめられるだけだ。

それと共に電子の速度もどんどん速くなる(不確定性原理)。しかしいくら速くなっても光速を越えることはできない。つまり電子はここまでしか縮めない。この大きさをコンプトン波長といい、水素原子の1/100程度(正確には1/137)になる。これが電子の最小値である。

太陽程度の星の終末はちょうど電子でパンパンに張りつめるまでつぶれてその一生を終える。これが白色矮星とよばれる星である。太陽も赤色巨星からやがて白色矮星となって滅びる。

このとき、体積は $(10^{-2})^3=10^{-6}$ 倍程に縮む。(100万分の1倍に縮む)。だから密度は 10^6 倍に膨れあがる。

$10^6 \times 1 \text{ g/cm}^3 = 10^3 \text{ kg/cm}^3 = 1 \text{ t/cm}^3$
つまり、 1 cm^3 あたり数tにもなるほど、電子は縮む。これは乗用車1台を 1 cm^3 に圧縮したことに相当する。

さらに太陽より何倍も重い星の終末はこの電子も押しつぶし、一気に原子核の大きさにまでつぶれる。このとき、まわりの電子と核の陽子はくっついて中性子に変わる。これが中性子星である。これは原子核星と言ってもいいだろう。密度は原子核の密度と同じと考えてよい。つまり、 1 cm^3 あたり数十億tもある恐るべき超高密度の星になってしまう。

中性子星は1967年ヒューイッシュによってパルサー(1.3秒周期の規則的電波源)として発見された。そして、カニ星雲は1054年の超新星の爆発の残骸であり、中心にもものすごい勢いで自転する中性子星があることがわかったのである。

さらにもっと重い星の終末はどうなるのだろうか。原子核も押しつぶしてしまうような重い星の存在も考えられるのだ。これがブラックホールといわれるもので、底なしに重力崩壊していき、何物も外へ出られなくなってしまう。ブラックホー

ルはフィクションの世界ではなく、確かにあると考えられているものである。

「どんどん物質をつぶしていったらどうなるか」、これは星の世界を語る主要なテーマなのである。

物理を学んで広がる世界

このように、目にも見えない極微の原子の世界で成り立つ法則から、巨大な星の世界の法則が見えてくる。授業ノートに生徒は次のような感想を書いた。

『面白かったのは、中性子星と核の密度が同じくらいということ。宇宙は宇宙、核は核と、全然別個のものと思っていたが、核の大きなものが宇宙をつくるなんて…。それに星の滅び方もあんなに夢のあるものだとは思わなかった』

七夕の話など、星や星座にまつわる夢のある話はいっぱいある。星と宇宙にはロマンがある。しかし、物理の視点を取り入れて見ると、世界はさらに深く広がって見えてくる。

注

1) 針穴を通してつくった太陽像と穴から像までの距離の比が、太陽の大きさと太陽までの距離の比(約1:100)になる。

「超簡単!太陽の大きさと距離の比測定」飯田 『いきいき物理わくわく実験2』p58, 日本評論社

2) 実験はラザフォードの実験として有名。

核半径 $r_p = (1.2 \sim 1.5) \times 10^{-15} \text{ m} \sqrt{A}$ A :質量数

3) 石炭1kgの発熱量 $5 \times 10^3 \text{ kcal} = 2.1 \times 10^7 \text{ J}$,
太陽質量 $2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$, 太陽のエネルギー発生率 $3.9 \times 10^{26} \text{ J/sec}$, とし, t年で燃料を使い果たすとすると,

$$3.9 \times 10^{26} \times (365 \times 24 \times 3600 \text{ t}) = 2.0 \times 10^{30} \times 2.1 \times 10^7$$

$$\therefore t = 3.7 \times 10^3 \text{ 年}$$