

# 宇宙と物質

## 第1部：物質 Matter

太陽、恒星、宇宙を理解するには、その構成要素である物質を理解しなければなりません。

ここ地球の表面で、我々人類は物質に取り囲まれて生きています。我々は物質に慣れ親しんでいるため、物質のことは何となく判ったつもりでいます。

しかし、物質を構成する原子は極微の世界に属し、その実体は我々が日常生活で何となく親しんでいる世界の常識では理解が難しい存在です。若干、強引ですが、物質に関する常識を列挙してみましょう。

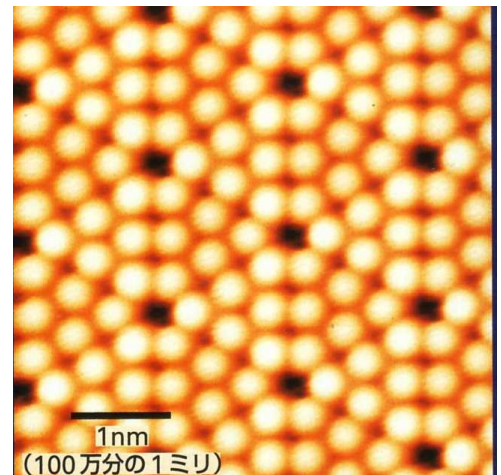
これは数学ではありませんので、前に出た話題ががよく理解できなくても、どこから読んでもそれなりに理解できる博物学のようなテキストです。安心して理解できないところは無理に理解しようとせず、先に読み進んでください。やや足早に説明していますし、私の説明不足のために理解しにくい個所もありますが、とにかく読み継いで、感覚的に結構ですから物質と宇宙の全体像を掴んでください。

### 1. 原子 Atom

物質がこれ以上は分割できない原子で出来ているという概念は英国の物理学者ドルトン(John Dalton) が 1803 年に原子説を発表したのを嚆矢とします。彼は、①同じ元素(Element) の原子は、同じ大きさ、質量、性質を持つ、②化合物(Compound) は、異なる原子が一定の割合で結合して出来る、③化学反応(Chemical Reaction) は、原子と原子の結合の仕方が変化するだけで、新たに原子が生成したり、消滅することはない、と説明しました。

Atom とは、ギリシャ語で TOMOS (切る) に否定子 A を付けて、これ以上は切れない(分割できない) の意を持つ究極の構成単位の筈でした。貴方が日常の感覚から、右図のシリコンの原子の像を見て、原子とは中身までぎっしりと詰まった謂わば組立玩具 LEGO のような実体であろうと思っても不思議はありません。私たちの世界では、それで通用するのです。

現代の優れた観測機器は原子を直接見ることができます。右の写真は STM (Scanning Tunneling Microscope : 走査型トンネル顕微鏡) で撮影したシリコンの表面(111 面 : 結晶の方向を表現する)です。綺麗に原子が並んでいます。原子間距離 (VDW 半径(見かけの半径)の 2 倍) は 420pm(pico-meter :  $10^{-12}$ m)です。



### 原子を見ることはできるのか？

科学者たちは原子の存在を突き止めた。しかし原子はあまりにも小さいため、その姿を直接見ることは現在でも不可能だ。

ただし、原子の表面を画像化することはできる。上の画像は、「走査型トンネル顕微鏡 (STM)」でとらえたケイ素 (Si) 原子の結晶である。1粒1粒がケイ素原子だ。物の形を指でなぞって確かめるのと似たやり方で、この顕微鏡では金属の針で試料(ケイ素の結晶)の表面を“なぞる”。ただし針をくっつけるのではなく、針と試料の間に生じる微弱な電流を利用して、表面の凹凸を測定するのである。

### STM で見たシリコン結晶表面

### 2. 原子核と電子 Atomic Core and Electron

#### 2・1 原子核の発見

1911 年にラザフォード(Ernest Rutherford) が金箔に  $\alpha$  線(アルファ線 : イオン化したヘリウム原子核) を当てる実験をして、向こうへ突き抜けて行く約 8,000 個に 1 個位がこちら側へ跳ね返されてくる現象を発見し、

原子の内部が殆ど空虚であり、実質は極めて小さい領域に集まっているという古典的原子模型を提唱しました。要約すれば、原子核が太陽、電子が惑星の役割をする太陽系のような構造をとるのが原子だ、という訳です。原子は物質の究極の構成単位ではなかったのです。

ご注意！我々の世界の感覚で原子の世界を見てはいけません。この原子模型は太陽系に慣れ親しんだ我々には、大変理解し易くできています。後ほど判りますが、そんなに単純なものではありません。

2・2 原子核の大きさ

さて、実験から得られた原子核の直径は fm (femto-meter :  $10^{-15}$  m) 級、前述のシリコン原子間距離の約 20 万分の 1 ( $5 \times 10^{-6}$ ) です。面積比では凡そ 400 億分の 1 ( $2.5 \times 10^{-11}$ )、体積比では凡そ 1 京分の 1 ( $10^{-16}$ ) です。「空の空なるもの、虚の虚なるもの」、この境地はまさに哲学の世界、宗教の世界ともいうべきで、日常生活の感覚では、とても捉えきれません。

地上で実現できる機械的な手段でシリコン原子を圧縮することなど不可能です。圧力を加える側の物質も、加えられる側の物質も、等しく空虚なのです。微視的(ミクロ) な世界の存在である原子核を取り巻く電子が、隣り合う原子の電子との間で作用し合う電気的な引力や斥力(反発力) である「**電磁気相互作用**」が、我々の巨視的(マクロ) 世界では、物質の強度、硬度などの特性として認識されているのです。

我々の世界では、それぞれの原子は何物を以っても変形も傷つけることも出来ない世界の構成単位として振る舞いますし、そのように考えて支障ありません。

2・3 原子を構成するもの

原子核は正電荷を持つ**陽子(Proton)** と、電気的に中性である**中性子(Neutron)** が「**強い相互作用**」と呼ばれる力で原子核として一体に纏められています。「強い相互作用」とは原子核のような短い距離で働く一種の結合力で、**核子(Nucleon : 陽子と中性子)** が本体から離れようとすると強く引き止める性質を持ちます。水滴の表面張力に似た性質です。

2・4 原子核と電子の数

- (1) 原子核の周囲を原子核の**陽子の数と同数の電子**が取り巻いていて、外部には電気的に中性です。陽子と電子の間に働く力が「**電磁気相互作用**」です。
- (2) 原子の最外殻の電子が奪われると、残った原子は正電荷を帯び、**陽イオン**と呼ばれる状態になります。
- (3) 原子の最外殻に余分な電子が加わると、原子は負電荷を帯び、**陰イオン**と呼ばれる状態になります。
- (4) 極端に運動エネルギーが大きい高温状態などになると、原子の全部或いは殆どの電子が剥ぎ取られ、原子核と電子が原子を作らずにスープのように混じった状態になります。この状態を**プラズマ**といいます。宇宙にある殆どの物質はプラズマとして存在しています。

表 1・2 陽子・中性子・電子の諸元

|       |         | 陽 子                          | 中性子                          | 電 子                          |
|-------|---------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 質 量   | 重量表示    | $1.67262 \times 10^{-27}$ kg | $1.67492 \times 10^{-27}$ kg | $9.10938 \times 10^{-31}$ kg |
|       | エネルギー表示 | 938.272 MeV                  | 939.565 MeV                  | 0.51099 MeV                  |
| 直 径   |         | $10^{-15}$ m                 | $10^{-15}$ m                 | $10^{-18}$ m 以下              |
| 電 荷   |         | $+1.602 \times 10^{-19}$ Q   | 0                            | $-1.602 \times 10^{-19}$ Q   |
| ス ピ ン |         | 1 / 2                        | 1 / 2                        | $\pm 1 / 2$                  |

## 2・5 物質とエネルギーの関係

1905年、アインシュタイン(Albert Einstein)は特殊相対性理論 (Special Theory of Relativity) を発表し、その中でエネルギーEと質量mが等価であるとする関係式を示しました。

$$E=mc^2 \quad \dots\dots\dots (1\cdot2\cdot1\text{式})$$

上式でCは光速(真空中  $2.99792458\times10^8$  m/s) です。原子の世界では、質量がエネルギーに転換したり、エネルギーが質量に転換したりすることが頻繁に起こります。日常の世界では有り得ないことです。

表1・2の「質量」が「重量表示」と「エネルギー表示」してあるのは、そのためです。

1 MeV (Mega electron Volt) のMは  $10^6$ 、eVは1ボルトの電位差で加速した時に電子が獲得するエネルギーを意味します。従って1 MeVとは100万ボルトの電圧で電子を加速した時に電子が得るエネルギーを表しています。

原子1個当たりで発生するエネルギーは、化学反応ではeV級、原子核反応ではMeV級であり、原子力は化学反応の凡そ100万倍程度強力であると思ってください。

核物理学で使用されるエネルギーの単位であり、2頁後に出てくる一般の物理学や工学に使用されるエネルギー単位であるJ(Joule)と比較すると、 $1\text{eV}=1.60217733\times10^{-19}\text{J}$ という小さいエネルギーの単位です。互いの分野は違うとはいえ、尺貫法とメートル法が共に通用しているような状況です。

中性子nは原子核の中に居る時は安定ですが、原子核から単独で飛び出すと平均寿命  $886.7\pm1.9$  s (秒) で陽子pと電子 $e^-$ と反電子ニュートリノ $\nu e^-$ に崩壊します。この現象は数式で次のように書きます。

$$n\rightarrow p+e^-+\nu e^-+0.78\text{MeV} \quad \dots\dots\dots (1\cdot2\cdot2\text{式})$$

中性子の質量から陽子の質量を引くと1.293MeVです。中性子が陽子に転換する時に、このエネルギーが0.51099MeVの電子と反電子ニュートリノ $\nu e^-$ とこれら2種の放出粒子に与える運動エネルギーに転換されたのです。

中性子を崩壊させる時に作用する力は「弱い相互作用 (Weak Interaction)」と呼ばれるものです。これに中性子や陽子を結びつけて原子核を形成させる「強い相互作用 (Strong Interaction)」、「電磁気相互作用 (Electromagnetic Interaction)」、「重力 (Gravitational Interaction)」を合わせた4種の力が、宇宙を構成する全ての力「4大力」なのです。

表1・2にある「電荷」の単位1Q(クーロン)は1A(アンペア)の電流によって1秒間に運ばれる電荷と定義されています。 $-1.602\times10^{-19}\text{Q}$ は1個の電子が持つ電気素量(電荷の最小単位)です。1Qを電気素量で割れば、1Aの電流とは1秒間にある場所を自由電子  $6.242\times10^{18}$ 個が通過することだと判ります。

## 3. 電子軌道と量子力学

### 3・1 電子は決められた軌道しか占めることができない

原子核を取り巻く電子は決まったエネルギーレベルの軌道しか占めることができません。それは量子力学 (Quantum Dynamics) の世界のルールなのです。

古典理論によれば、原子核を取り巻く電子は自由にどのような数値のエネルギーでも取れそうです。しかし、その考え方は日常の世界のものです。古典理論によれば、電子が回転すると電磁波を発生して急速にエネルギーを失うはずですが、量子力学の世界では、原子核を取り巻く電子は、エネルギーを失うことなく離散的な特定のエネルギーレベルの軌道にすることができます。これは電子を粒子ではなく波と考えた時に、

波が軌道を1周して連続できる(定在波：Standing Wave) 軌道を占めれば、エネルギーを失うことがないと理解することができます。

原子核はその周囲の空間に、このような特定エネルギーレベルの軌道が存在し得る電子殻(Electron Shell) と呼ばれる空間を有します。その特定の軌道空間に在る時、その電子のエネルギーレベルは基底状態(Ground State) にあるといえます。

3・2 励起された電子が発する電磁波

本来、基底状態に在るべき電子が、外部から熱エネルギーや電気エネルギーを受け取って、より高いエネルギーレベルに在る時を励起 (Excitation) 状態といえます。励起状態は不安定なので、何れ基底状態との差額の余分なエネルギーを電磁波として放出して、基底状態に戻ります。この時に放出される電磁波は指紋のようにその原子核に特有のエネルギーを有しており、その電磁波(光) を分析することにより、発光している物質を特定することができます (スペクトル分析)。

比較的安定(準安定) な励起状態というものもあり、このエネルギーレベルにある多数の電子群が何かのきっかけで一斉に基底状態に移る場合は、位相が揃った強力な電磁波となります。これがレーザー(Laser：Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) の原理です。

4. 電磁波と光とエネルギー

4・1 電磁波とエネルギーの関係

前章ではいきなり電磁波とエネルギーが等価のものとして現れましたので、簡単に説明します。励起状態から基底状態への復帰のように電子が激しく動くと磁界が誘起され、磁界の変化により電界が誘起され、電界の変化により磁界が誘起されという再帰のプロセスを鎖のように繰り返して電磁エネルギーが空間を光速Cで進行することを電磁波(Electromagnetic Wave) と呼びます。

電磁波は横波(Transversal wave) です。縄跳びの紐を上下方向に軽く揺ると、波形が向こうへと進行しますが、これが横波です。水面(液体と気体の境界面) の波紋も横波です。

音波は縦波(Longitudinal Wave) です。縦波は圧力の密な部分と疎な部分が進行するので、疎密波でもあります。気体と液体の内部には縦波しか伝搬しませんが、固体の内部には縦波と横波が伝搬できます。

表 1・4 に色んな物質中の縦波と横波の進行速度を例示します。

地震の時に先に到達するP波(Primary Wave) は縦波で、少し遅れて到達するS波(Secondary Wave) は横波です。地震で破壊力が大きいのは横揺れのS波です。

表 1・4 物質中の波の進行速度 (速度：m/s)

| 状 態 | 気 体       |            | 液 体   |       | 固 体   |       |
|-----|-----------|------------|-------|-------|-------|-------|
| 物 質 | 空 気       | 水 素        | 水     | 水 銀   | 氷     | 鉄     |
| 比 重 | 0.0012929 | 0.00008988 | 1.00  | 13.6  | 0.917 | 7.86  |
| 縦 波 | 331.45    | 1,269.5    | 1,500 | 1,450 | 3,230 | 5,950 |
| 横 波 | 0         | 0          | 0     | 0     | 1,600 | 3,240 |

備考：比重単位 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup> (g/cm<sup>3</sup>と同じ)

周波数と波長： 電磁波は「振動数 (周波数ともいう：Frequency) ν(ニュー)」を単位とする場合も「波長 (Wave Length) λ(ラムダ)」を単位とする場合もあります。



日常生活で知る電磁波で最も周波数が低いのは、電波時計の標準電波で、約 40kHz を使用しています。海中の潜水艦や地下の鉱山現場への指令には地中や水中に相当の深さまで浸透できる ULF 帯(30Hz～3kHz) が使用されます。地上波デジタル放送の UHF 帯(Ultra High Frequency) は周波数帯域では 300MHz～3 GHz、波長帯域では 10 cm～1 m です。携帯電話も同じ周波数帯域を使用しています。パソコンのクロック周波数も 1～3 GHz が多いです。

赤外線(Infrared Ray) は 0.7 μm～1 mm(1,000 μm) の波長帯域で、ここが通常、電磁波と光の用語の使い分けの境目になります。呼び方がそうになっているだけで、光も電磁波も全く同じ存在です。

可視光線(Visible Ray) は「太陽系」の「12.太陽」にもあったように、波長 300 nm～720 nm (0.3～0. 72 μm) の電磁波です。紫外線(Ultra Violet Ray) は波長 10 nm～400 nm、X線は波長 1 pm～10 nm、γ線(ガンマせん) は凡そ 10 pm より波長が短い電磁波を呼びます。

日常の世界の常識では理解が困難ですが、極微の世界では、粒子は波動の性質をも併せ持ちます。

電磁波の粒子性を光子(Photon) と呼び、1 個の光子が持つ質量はゼロ、エネルギー E は次頁 1・4・1 式になります。

但し、 $h$ (ハー: ドイツ語) は プランク定数( $6.6260755 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ) です。s は秒、J (ジュール) はエネルギーの単位で、毎秒 1 J の仕事をするのがお馴染みの 1 W(ワット) です。

$$E = h \nu = h \times C \div \lambda \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (1 \cdot 4 \cdot 1 \text{ 式})$$

## 4・2 量子の世界の不確定性

この簡単な数式は大変なくせ者です。より小さい物体を見ようとすれば、物体よりも短い波長の光を使用する必要があります。ところが、波長が短くなるとそれに反比例して(周波数に比例して) 1 個の光子の持つエネルギーがどんどん増加すると 1・4・1 式は主張します。相手の物体は小さく軽くなるのに、それを見る光子のエネルギーはそれを跳ね飛ばすほどに強くなり、遂に観測不能の領域に入ります。観測不能とは実証不能ですから、仮説⇒実証という近代科学の正道が使えないことを意味します！

ハイゼンベルグ(Werner Karl Heisenberg)は 1927 年、このことを一般化して「ある二つの物理量の組合せにおいては、測定値にバラツキを持たせずに二つの物理量を測定することはできない」とする**不確定性原理**(Uncertainty Principle) を発表しました。

「粒子の運動量と位置を同時に正確に測ることはできない」という事実に対して、「それは元々決まっていな  
いからだ」と考えるのが量子力学の開祖ボーア(Niels Bohr) などが提唱したコペンハーゲン解釈であり、対してアインシュタインは「決まっているが、人間に判らないだけだ」(隠れた変数理論)と考えました。彼は反論の中で「**神はサイコロを振らない**(Der Alte würfelt nicht.)」という、良く知られた台詞を述べています。現在では彼の理論を支持する科学者は少数派です。

「量子の世界」は日常の世界の常識では理解できない、全くの別世界なのです。しかし、この量子力学から導き出される知見がなければ、原子力、半導体など現実の世界に定着している重要な技術を本質的に理解することはできなくなります。

## 5. 原子の特性を決める最外殻電子数

### 5・1 電子の居場所・電子殻

- (1) 電子は原子核を取り巻く電子殻の空間の各部にある確率で存在し、各部の確率を全空間にわたって積分すると 1 になる、そのような存在です。
- (2) 電子殻はタマネギの皮のように多層構造になります。

- (3) 最内層のK殻には1s軌道には2個の電子が存在できます。
- (4) 2番目のL殻には2s軌道に2個、2p軌道に6個の電子が存在できます。L殻だけで最大8個、K殻と合わせて最大10個の電子が収容できます。
- (5) 3番目のM殻には3s軌道に2個、3p軌道に6個、3d軌道に10個の電子が存在できます。M殻だけで最大18個、K殻とL殻と合わせて最大28個の電子が収容できます。
- (6) 4番目のN殻には4s軌道に2個、4p軌道に6個、4f軌道に14個、4d軌道に10個の電子が存在できます。N殻だけで32個、K殻とL殻とM殻と合わせて最大60個の電子が収容できます。
- (7) 5番目のO殻には50個の電子が収容できます。K殻からO殻までに最大110個の電子が収容できます。
- (8) 数式で表すと、n番目の電子殻に収容できる電子数mは  $m=2n^2$  になっています。
- (9) 基本的には内側の電子殻から電子が埋めて行きますが、M殻の3s、3p軌道が埋められた後に3d軌道でなくN殻の4s軌道が先ず埋められて、その後にM殻の3d軌道が埋められる例外的なことが起こります。これらは**遷移元素(Transition Element)**と呼ばれ、鉄、銅、チタン等多数あります。

## 5・2 物質の性質は最外殻の電子数で決まる

日常の世界で物質が示す物理的や化学的な性質は、原子の占める空間に存在する電子の数、特に一番外側の電子殻(最外殻)の電子数で殆ど決まります。表 1・5・1 はロシアの化学者メンデレーエフ(Dmitrij Mendelejev) が1869年に発表した周期律表(Periodic Table)です。

表 1・5・1 周期律表 (Newton 誌)

|   | 1        | 2        | 3                                                                                               | 4         | 5         | 6         | 7         | 8         | 9         | 10        | 11        | 12       | 13       | 14       | 15       | 16       | 17       | 18       |
|---|----------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 1<br>H   |          |                                                                                                 |           |           |           |           |           |           |           |           |          |          |          |          |          |          | 2<br>He  |
| 2 | 3<br>Li  | 4<br>Be  |                                                                                                 |           |           |           |           |           |           |           |           |          | 5<br>B   | 6<br>C   | 7<br>N   | 8<br>O   | 9<br>F   | 10<br>Ne |
| 3 | 11<br>Na | 12<br>Mg |                                                                                                 |           |           |           |           |           |           |           |           |          | 13<br>Al | 14<br>Si | 15<br>P  | 16<br>S  | 17<br>Cl | 18<br>Ar |
| 4 | 19<br>K  | 20<br>Ca | 21<br>Sc                                                                                        | 22<br>Ti  | 23<br>V   | 24<br>Cr  | 25<br>Mn  | 26<br>Fe  | 27<br>Co  | 28<br>Ni  | 29<br>Cu  | 30<br>Zn | 31<br>Ga | 32<br>Ge | 33<br>As | 34<br>Se | 35<br>Br | 36<br>Kr |
| 5 | 37<br>Rb | 38<br>Sr | 39<br>Y                                                                                         | 40<br>Zr  | 41<br>Nb  | 42<br>Mo  | 43<br>Tc  | 44<br>Ru  | 45<br>Rh  | 46<br>Pd  | 47<br>Ag  | 48<br>Cd | 49<br>In | 50<br>Sn | 51<br>Sb | 52<br>Te | 53<br>I  | 54<br>Xe |
| 6 | 55<br>Cs | 56<br>Ba | 57-71<br>La<br>Ce<br>Pr<br>Nd<br>Pm<br>Sm<br>Eu<br>Gd<br>Tb<br>Dy<br>Ho<br>Er<br>Tm<br>Yb<br>Lu | 72<br>Hf  | 73<br>Ta  | 74<br>W   | 75<br>Re  | 76<br>Os  | 77<br>Ir  | 78<br>Pt  | 79<br>Au  | 80<br>Hg | 81<br>Tl | 82<br>Pb | 83<br>Bi | 84<br>Po | 85<br>At | 86<br>Rn |
| 7 | 87<br>Fr | 88<br>Ra | 89-103<br>Ac<br>Th<br>Pa<br>U<br>Np<br>Pu<br>Am<br>Cm<br>Bk<br>Cf<br>Es<br>Fm<br>Md<br>No<br>Lr | 104<br>Rf | 105<br>Db | 106<br>Sg | 107<br>Bh | 108<br>Hs | 109<br>Mt | 110<br>Ds | 111<br>Rg | 112      | 113      | 114      | 115      | 116      | 117      | 118      |

各格の文字の上の数字は**原子番号**(Atomic Number : 陽子の数)、下の英字は**元素記号**(Atomic Symbol) です。1~20番までを読んでみましょう。1H 水素、2He ヘリウム、3Li リチウム、4Be ベリリウム、5B 硼素、6C 炭素、7N 窒素、8O 酸素、9F フッ素、10Ne ネオン、11Na ナトリウム、12Mg マグネシウム、13Al アルミニ

ユウム、 $^{14}\text{Si}$  シリコン、 $^{15}\text{P}$  燐、 $^{16}\text{S}$  硫黄、 $^{17}\text{Cl}$  塩素、 $^{18}\text{Ar}$  アルゴン、 $^{19}\text{K}$  カリウム、 $^{20}\text{Ca}$  カルシウムです。他の元素は追々説明します。

縦方向の升は**族(Group)**で、 $^1\text{H}$ 、 $^3\text{Li}$ 、 $^{11}\text{Na}$  等は同数の最外殻電子数を持ちます。第1族は最外殻の電子が1個で、電子が取られやすいので1価の陽イオンになりやすいです。

……第14族である $^6\text{C}$ 、 $^{14}\text{Si}$ 、 $^{32}\text{Ge}$  ゲルマニウム……は最外殻の電子が4個であり、4つの原子と結合することができます。例えば炭素Cは4個の水素Hと結合して、メタン $\text{CH}_4$ になります。

……第17族である $^9\text{F}$ 、 $^{17}\text{Cl}$ 、 $^{35}\text{Br}$  臭素……は最外殻の電子が1個足りないため、電子を奪って1価の陰イオンになりやすいのです。

そして、第18族の $^2\text{He}$ 、 $^{10}\text{Ne}$ 、 $^{18}\text{Ar}$ 、 $^{36}\text{Kr}$  クリプトン……は最外殻の全ての席が埋まっているために他の原子と反応しにくい不活性元素なのです。

### 5・3 金属とは

表1・5・1において、空(そら)色の22種の元素以外は全て金属(Metal)です。元素の凡そ5分の4が金属なのです。金属原子は最外殻が重なり合って、通常は特定の原子核に拘束されている最外殻電子の一部が、つながった最外殻を伝って金属全体を自由に移動できる状態になっています。

自由電子による**第1の特性**は、電気を通す**導電性(Conductivity)**です。

**第2の特性**は**展性(Malleability)**です。金を軽く叩くと何処までも伸びて、しまいに太陽光線が通る位の薄い金箔になります。これが展性です。純度の高い金属にはこの性質があります。それは叩かれて原子同士の位置がずれても、直ぐに自由電子が移動して新しい原子間の結合状態を作り出すからです。

鉄も本来は軟らかいのですが、刀の刃は数%の炭素が入った炭素鋼とすることで、鉄の原子団の中に入った異物である炭素が鉄の原子同士が自由に移動するのを妨げて、結果として硬度が上がる現象を上手く利用しているのです。

**合金(Alloy)**とは主金属の原子間に他の物質の原子を均等に分散させて、堅くしたり、軟らかくしたり、高温に耐えるようにしたり、変形しても復元できたり(形状記憶合金)と、望みの特性を持たせるためにすることです。

**第3の特性**は、金属には特有の**光沢**があります。これは入射した可視光の殆どが自由電子によって吸収・再放出されて、金属全体として反射しているように見えるのです。

**第4の特性**は**炎色反応(Flame Reaction)**です。基底状態にある軌道電子は、衝突や電磁波などからエネルギーを受け取ると励起状態に上がり、そのエネルギーを電磁波として放出して基底状態に戻ります。その時に放出する電磁波はその金属特有の波長を有します。

$^{11}\text{Na}$  ナトリウムを例に説明しましょう。比較的低いエネルギーを受け取った場合、3s軌道の電子が3p軌道に移り、やがて589.6 nmの黄色光を放出して元の3s軌道へ戻ります。トンネルなどでよく見るナトリウムランプはこの発光原理を利用しており、電気エネルギーの約40%を黄色の可視光線に変換します。もっと大きなエネルギーを受け取った場合は3s軌道から4p軌道まで上がり、3s軌道へ戻る時には紫外線を放出します。このような放出光はスペクトル(プリズムで分解した7色の帯です)に鋭い輝線として現れ、それらは各金属特有の波長として正確に識別できます。

我々は夏の風物詩である花火で、実は火薬で加熱された金属の炎色反応を鑑賞しているのです。赤はリチウム、紅はストロンチウム、橙はカルシウム、黄はナトリウム、黄緑はバリウム、緑は銅、紫はカリウムの炎色反応です。



表 1・5・2 は周期律表の遷移元素を着色して示したものです。遷移元素は電子数が違うのに、最外殻の電子数が同じなため、物理的性質である融点や、化学的性質である酸素と数種類の化合物を形成できたりする性質が似通っています。

表 1・5・2 周期律表 (遷移元素) (Newton 誌)

|   | 1        | 2        | 3                                                     | 4         | 5         | 6         | 7         | 8         | 9         | 10        | 11        | 12       | 13       | 14       | 15       | 16       | 17       | 18       |
|---|----------|----------|-------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 1<br>H   |          |                                                       |           |           |           |           |           |           |           |           |          |          |          |          |          |          | 2<br>He  |
| 2 | 3<br>Li  | 4<br>Be  |                                                       |           |           |           |           |           |           |           |           |          | 5<br>B   | 6<br>C   | 7<br>N   | 8<br>O   | 9<br>F   | 10<br>Ne |
| 3 | 11<br>Na | 12<br>Mg |                                                       |           |           |           |           |           |           |           |           |          | 13<br>Al | 14<br>Si | 15<br>P  | 16<br>S  | 17<br>Cl | 18<br>Ar |
| 4 | 19<br>K  | 20<br>Ca | 21<br>Sc                                              | 22<br>Ti  | 23<br>V   | 24<br>Cr  | 25<br>Mn  | 26<br>Fe  | 27<br>Co  | 28<br>Ni  | 29<br>Cu  | 30<br>Zn | 31<br>Ga | 32<br>Ge | 33<br>As | 34<br>Se | 35<br>Br | 36<br>Kr |
| 5 | 37<br>Rb | 38<br>Sr | 39<br>Y                                               | 40<br>Zr  | 41<br>Nb  | 42<br>Mo  | 43<br>Tc  | 44<br>Ru  | 45<br>Rh  | 46<br>Pd  | 47<br>Ag  | 48<br>Cd | 49<br>In | 50<br>Sn | 51<br>Sb | 52<br>Te | 53<br>I  | 54<br>Xe |
| 6 | 55<br>Cs | 56<br>Ba | 57-71<br>La Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu | 72<br>Hf  | 73<br>Ta  | 74<br>W   | 75<br>Re  | 76<br>Os  | 77<br>Ir  | 78<br>Pt  | 79<br>Au  | 80<br>Hg | 81<br>Tl | 82<br>Pb | 83<br>Bi | 84<br>Po | 85<br>At | 86<br>Rn |
| 7 | 87<br>Fr | 88<br>Ra | 89-103<br>Ac Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr | 104<br>Rf | 105<br>Db | 106<br>Sg | 107<br>Bh | 108<br>Hs | 109<br>Mt | 110<br>Ds | 111<br>Rg | 112      | 113      | 114      | 115      | 116      | 117      | 118      |

元素名は 21Sc スカンジウム、22Ti チタニウム、23V バナジウム、24Cr クロム、25Mn マンガン、26Fe 鉄、27Co コバルト、28Ni ニッケル、29Cu 銅です。

以下は有名なものだけ挙げると、40Zr ジルコニウム、42Mo モリブデン、47Ag 銀、60Nd ネオジウム、74W タングステン、78Pt 白金、79Au 金、92U ウラニウム、94Pu プルトニウム等になります。

## 5・4 原子の半径

次頁の表 1・5・3 は周期律表の上に原子の半径を高さとする柱を立てたものです。

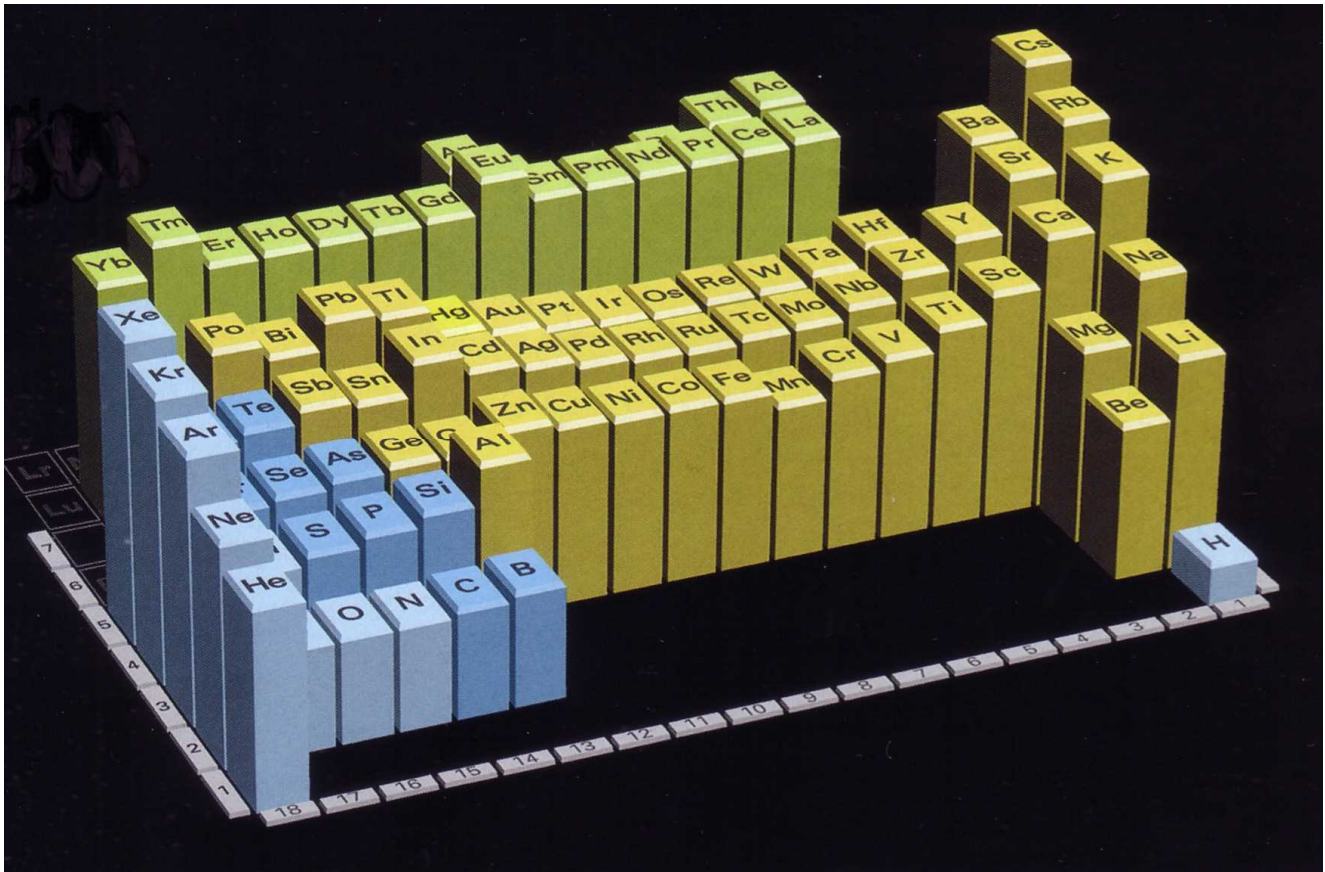
1H 水素(Hydrogen) を基準にしています。水素の原子半径は 25pm、水素分子としての共有結合半径は 37pm、VDW 半径(見かけの半径) は 120pm です。

原子の半径は原子番号順に大きくなるわけではありません。

原子の大きさは電子で決まりますが、原子番号が大きくなると原子核の陽子の数が増えてプラスの電荷が増え、マイナスの電荷を持つ電子の軌道を引きつける力も強くなり、原子半径を小さくします。

電子の配置によって原子核のプラス電荷から受ける力による影響が異なり、表 1・5・3 のような結果になります。水素は寸法が小さいので、ゴム風船に入れてもゴムを形作る原子の間を抜け出て、時間と共に風船が萎み(しぼみ)ます。

表1・5・3 原子の大きさ (Newton 誌)



## 5・5 化学反応

化学反応とは原子の最外殻が収容可能な上限値まで電子を取り込もうとする力が引き起こす反応です。例えば、 $_{11}\text{Na}$  ナトリウムの最外殻の1個の電子を、最外殻に7個の電子を持ち、あと1個で満願だという  $_{17}\text{Cl}$  塩素が奪おうとしてくっついて出来た化合物が塩( $\text{NaCl}$ ) です。

$_{8}\text{O}$  酸素は最外殻に6個の電子を持ち、満願には2個足りないので、最外殻に1個の電子を持つ  $_{1}\text{H}$  水素2個の電子を奪おうとしてくっついて出来た化合物が水( $\text{H}_2\text{O}$ ) です。

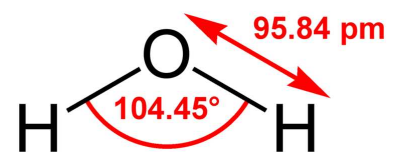
**変わり者の水：** 水は右図のようにある角度で酸素と水素が結合しています。

このため、陽イオンHと、陰イオンOの電荷が微妙に分極しており、電気的  
双極子(Electric Dipole) であるため、 $2.45\text{GHz}$ (波長  $12.2\text{ cm}$ ) の電磁波を加  
えると共振して、電磁波のエネルギーにより加熱されます。

これが電子レンジの加熱の原理です。電子レンジは水を加熱しているのです。  
水分子は電気的  
双極子(外部に正負の電荷を現す) であるため、ある水分子の  
正極側は隣の水分子の負極側を引き寄せます。

このようにして五つの水分子が直線状の列を作る五員体と、環状になる五員環と、六つの水分子が作る六員環があるといひます(韓国科学技術員・金武植教授)。

一般の物質は低温になるほど体積が縮み、比重が高くなります。水は $4^\circ\text{C}$ で最も体積が縮み、比重が重いという変わった特性のため、更に温度が低下して結晶化して氷になると、液体の水の上に浮きます。これは非常に不思議な現象で、このお陰で池の表面に氷が張っても池の底は暖かく、真冬でも金魚が池の底で生き続けています。通常  
の物質のように冷たくなるほど比重が重くなれば、池の底から氷り始める筈です。冰山が



(Wikipedia「水」より)

海に浮いているのも、そのためです。我々が当たり前に思っているこれらの現象も、実は自然界では非常に珍しい現象だと知ってください。

**多才な炭素：**14族の原子の最外殻電子数は4個で、最外殻の満願(8個)まで4個あります。このために、14族の原子はこの4個の空きに他の原子を引きずり込んで埋めようとして、多様な化合物を作り出します。特に<sup>6</sup>C炭素は、元素としては地殻中に僅か0.03%しか存在しない少数派なのですが、約2,000万種の化合物を作ると言われ、最も多才な原子です。また、我々が日常的に目にする生命体や多くの物質を構成する中核的役割を果たしている元素でもあります。

**有機化学 (Organic Chemistry) とは炭素を主役とする化学のことです。**

例えば、メタン(CH<sub>4</sub>)は1本手の水素4個と結合しています。炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)は2本手の酸素2個と結合しています。炭素が特別の位置にあるのは、生物が酸素を取り入れて化学反応によりエネルギーを獲得し、廃棄物としての炭酸ガスを容易に排出できるからです。

同じ14族の原子である<sup>14</sup>Siシリコンも炭素と同じような化学的活性を有しますが、仮に生体に利用されても酸素を使ってエネルギーを取り出した後の廃棄物である珪酸(SiO<sub>2</sub>)が固体であるために体外への排出が難しく、生命活動のサイクルに組むのが難しいために、重要度が低く取り扱われているのです。

炭酸ガスは一気圧下で気体になるのは-78.5℃で常温で気体ですが、珪酸が気体になるのは2230℃です。これ以上の温度の世界があれば、珪素を核とする有機化学の可能性もあり、SFでそのような高温世界が描かれることがあります。

日常の世界で見る化学反応とは、原子が最外殻電子を使って他の原子と結合したり、分離したりする反応のことです。その時に放出されたり、吸収される化学エネルギーは、1原子当たり数eV程度の低いレベルです。後述される原子核反応のエネルギーは1原子当たりMeV級の高いレベルになります。燃料や爆薬などの化学物質の燃焼や爆発に対して、原子炉や原子爆弾の大きさ当たりのエネルギーが化学反応の100万倍程度になるのはそのためです。

## 6. 同位体 Isotope

原子核に目を転じましょう。原子核は陽子と中性子で構成されています。<sup>1</sup>H水素は陽子1個のみ、<sup>1</sup>D重水素(Deuterium)は陽子1個と中性子1個、<sup>1</sup>T三重水素(Tritium)は陽子1個と中性子2個から構成されています。何れも原子番号は1です。記号Hで書く場合は、Dは<sup>2</sup><sub>1</sub>H、Tは<sup>3</sup><sub>1</sub>Hとします。Hの前の小文字2や3は原子量(Atomic Weight)で、原子の水素に対する相対的質量を表します。水素に対する重水素の天然存在比は0.015%、三重水素は10<sup>-18</sup>です。

このように陽子数は同じだが、中性子数が違う原子を同位体といいます。最外殻電子数は同じなので、化学的な挙動は全く同じであり、化学的な工程では分離できませんから、原子核の重さが違う点を利用して物理的に分離します。

同位体の例として、<sup>92</sup>Uウランウム(ウラン)には、<sup>234</sup><sub>92</sub>U(ウラン234)、<sup>235</sup><sub>92</sub>U(ウラン235)、<sup>238</sup><sub>92</sub>U(ウラン238)の3種の同位体があり、天然存在比は0.006%、0.72%、99.275%です。ウラン235は天然に産出する唯一の核分裂核種として、原子力利用において特別な重要性があります。これらウランの同位体は、太陽系の元となった超新星爆発の時に、ほぼ同量ずつ作られたと天体物理学は述べます。

放射性物質には**半減期(Half Value Period)**といって、一定の時間が経過すると残存量が半減する特性があります。半減期はウラン234では2.455×10<sup>5</sup>年、ウラン235では7.038×10<sup>8</sup>年、ウラン238では4.468×10<sup>9</sup>年です。太陽系の誕生から45.5億年、その間にウランは時と共に核分裂反応により崩壊し、現在の存在



比になりました。これが「地球と生物」の最初にあったウラン・鉛法による年代測定の原理です。

ウランの同位元素の物理的分離方法として現在主流なのは、洗濯機の脱水方法と同じ遠心分離法です。ウランガスを中心部から流し込むと、原子量が大きいウラン 238 が遠心力でより外周部へ移動し、原子量が小さいウラン 235 は中心部に残る遠心分離の原理を利用し、このような過程を何百段も重ねて分離しています。

次章で出てくる  $^{26}\text{Fe}$  鉄の同位体にも触れておきましょう。次頁の図 1・7 には鉄の同位体は 20 数種類ありますが、主なものは中性子 28 個で半減期  $3.1 \times 10^{22}$  年で存在比 5.8% の  $^{54}_{26}\text{Fe}$ 、中性子 30 個で安定で存在比 91.72% の  $^{56}_{26}\text{Fe}$ 、中性子 31 個で安定で存在比 2.2% の  $^{57}_{26}\text{Fe}$ 、中性子 32 個で安定で存在比 0.28% の  $^{58}_{26}\text{Fe}$  です。身近な鉄が意外に多くの同位体で出来上がっているのに驚いたでしょう。

7. 核融合反応と核分裂反応 Fusion and Fission Reaction

原子核の質量を核子数(陽子と中性子の合計数) で割った  
核子当たりの質量は、 $^{26}\text{Fe}$  鉄が最も少なく、その前後でより大きくなります。1・2・1 式は  $E = mc^2$  でした。質量はエネルギーなのです。言うことは、鉄は全ての原子の中で、核子当たりのエネルギーが最低ということです。

表 1・7「核子当たり原子質量単位」はその事情を数値で表しています。amu(Atomic Mass Unit)とは $^{12}_6\text{C}$ を基準値 12 として原子質量を表したものです。「核子当たり amu」が Fe 鉄で最小になっており、原子番号(陽子数) が 1 個少ない Mn マンガン、1 個多い Co コバルトが有効桁 5 桁目から鉄より多くなっているのが判ります。

H 水素と鉄との「核子当たり amu」は水素の方が 0.89%、U ウラニウムと鉄とではウラニウムの方が 0.13% 大きくなっています。この一見小さな質量の違いがエネルギーとなって解放されると、日常の世界の常識では理解できないような巨大な原子力エネルギーとなるのです。

特に水素が核融合して He ヘリウムに変換する反応では、質量の 0.71% のエネルギーが解放されます。

水素から始まって原子核が核子を吸収しながら原子番号を増やす核反応を核融合反応(Nuclear Fusion Reaction) といいます。その過程で「核子当たり amu」は少しずつ減少して原子核の外に核子の運動エネルギーや電磁波として放出されます。 $^7_3\text{Li}$  を例に取りますと、この原子核は 3 個の陽子と 4 個の中性子が結合して出来ていますが、その質量は陽子の質量の 3 倍と中性子の質量の 4 倍の和より少なくなっており、その差が結合の過程でエネルギーとして放出されています。この少なくなった分を質量欠損と呼びます。

原子核の核融合反応が鉄まで進行すると、もはや鉄より「核子当たり amu」が低い原子核はないため、エネルギーを外部に放出できる核反応は行き止まりになります。

ウラニウムのような重い原子核が核子を放出しながら原子番号を減少させる核反応を核分裂反応(Nuclear Fission Reaction) といいます。その過程で「核子当たり amu」は少しずつ減少して原子核の外に核子の運動エネルギーや電磁波として放出されます。核分裂反応が鉄まで進行すると、もはや鉄より「核子当たり amu」が低い原子核はないため、エネルギーを外部に放出できる核反応は行き止まりになります。

鉄は原子核反応の終着点なのです。

表 1・7 核子当たり原子質量単位

| 核 種                    | amu       | 核子当たり<br>amu |
|------------------------|-----------|--------------|
| $^1_1\text{H}$         | 1.0078254 | 1.0078254    |
| $^4_2\text{He}$        | 4.0026032 | 1.0006508    |
| $^{12}_6\text{C}$      | 12        | 1.0000000    |
| $^{55}_{25}\text{Mn}$  | 54.93805  | 0.9988736    |
| $^{56}_{26}\text{Fe}$  | 55.93494  | 0.9988382    |
| $^{59}_{27}\text{Co}$  | 58.93320  | 0.9988677    |
| $^{107}_{47}\text{Ag}$ | 106.90509 | 0.9991129    |
| $^{208}_{82}\text{Pb}$ | 207.97663 | 0.9998876    |
| $^{238}_{92}\text{U}$  | 238.05078 | 1.0002134    |

図 1・7 は存在できる原子核における陽子と中性子の数をプロットしたものです。

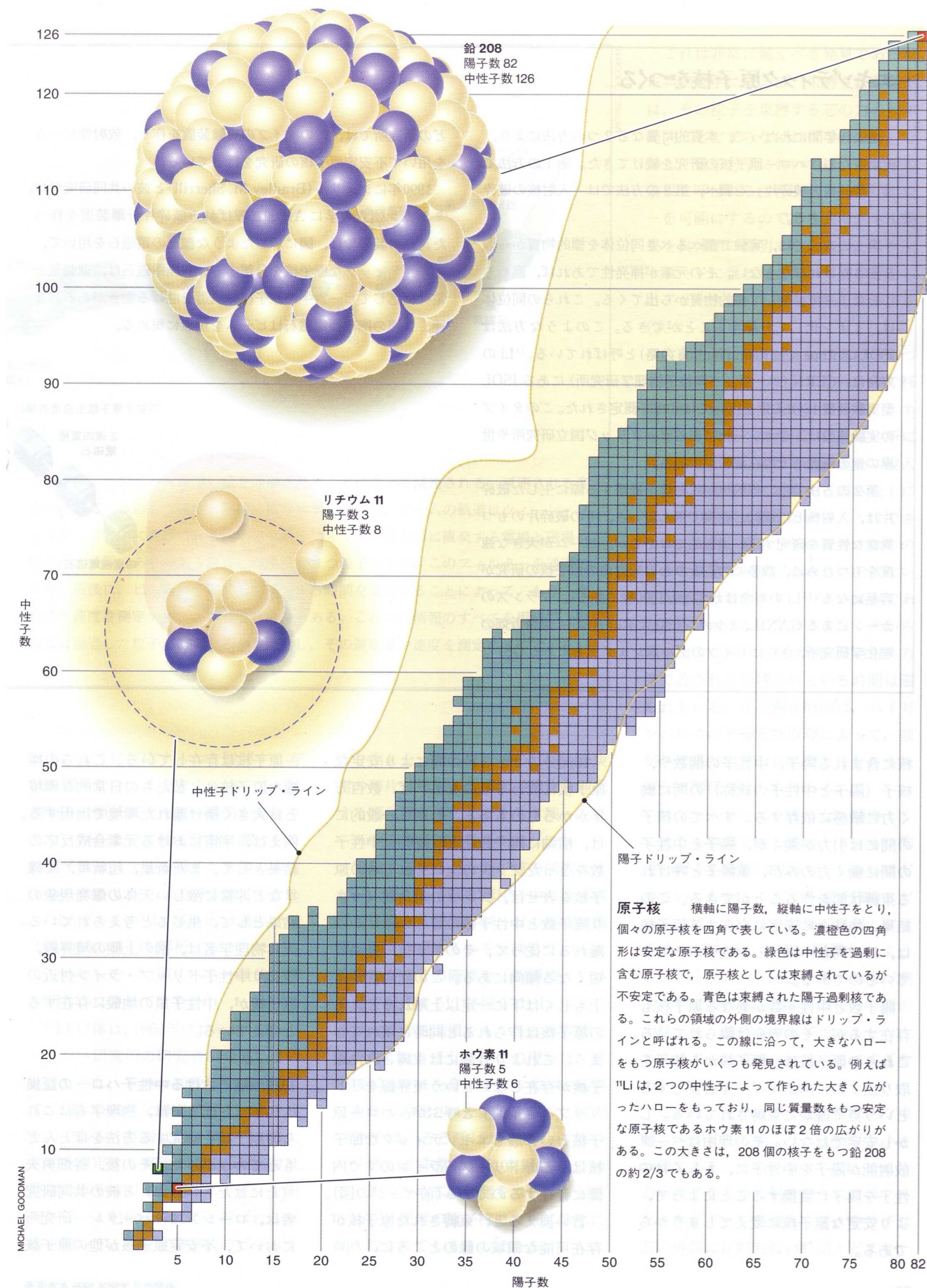


図 1・7 陽子と中性子の存在可能範囲

(「ハローをもつ原子核」 S.M.オースチン&G.F.バーチ／日経サイエンス 1995/8 月 p63)



焦げ茶色のブロックが安定原子で、それ以外は全て半減期を持つ放射性同位体です。縦方向は同じ数の陽子を持つ同位体です。

原子核の世界では、中性子の方が陽子より多い原子が多数派で、原子番号が大きくなると益々中性子の方が多くなります。安定原子の並ぶ斜線から上下に離れるほど、**原子核は不安定**になって半減期が短い放射性同位体になります。

図 1・7 が述べているのは、「同位体の中には、中性子は原子核の中に定着せずに、原子核の周囲にハロー状に滲み出しているものがある」ということです。

図を眺めていれば、何を主張しているのか、おおよそのところは理解できるでしょう。この他、「4 個の中性子が安定に存在する(Nutron Cluster)」というこれまでの理論では理解できない研究発表が最近あり、話題を呼んでいます。

## 8. 核分裂による原子力の利用

**原子炉の原理：** 1979/3/28 の米国のスリーマイル島の、そして 1986/4/26 の旧ソ連のチェルノブイリの原子力発電所の炉心溶融事故以来、原子力発電はすっかり悪者扱いされて来ましたが、地球温暖化が人類の重要関心事となって、最近では温暖化ガス(CO<sub>2</sub> ガス) を発生しないエネルギー源として見直されつつあります。

この機会に、簡単に原子力発電所の心臓部である原子炉の動作原理について説明しましょう。

右上図を見てください。<sup>235</sup><sub>92</sub>U の原子核に低速度の中性子 n が衝突すると、その中性子は原子核の内部に取り込まれて原子核は不安定な <sup>236</sup><sub>92</sub>U となり、直ちに二つの原子核に分裂します。この時に 2、3 個の中性子が発生エネルギーの大部分を貰って原子核から高速で飛びだします。反応式で書くと次のようになります。

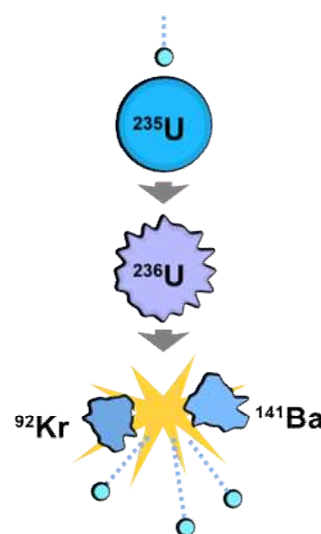
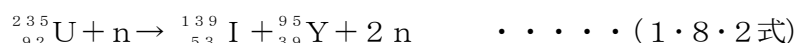
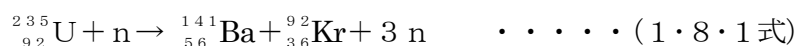


図 1・8・1 ウラン 235 の核分裂反応  
(Wikipedia)



この二つの反応は並行的に一定の確率で発生します。この核分裂反応で発生するエネルギーはウラン原子 1 個当たり約 200MeV( $3.2 \times 10^{-11}$  J : J はジュール) であり、1 g のウランは  $2.56 \times 10^{21}$  個のウラン原子を含むので、1 g のウラン 235 が全部核分裂反応を起こすと、約  $8.2 \times 10^{10}$  J のエネルギーが発生します。一方、火力発電の燃料である重油の発熱量は 11,000kcal/kg( $4.6 \times 10^7$  J/kg) であり、同じ質量ではウラン 235 は重油の  $1.8 \times 10^6$  (180 万倍) のエネルギーを発生させることができます。

発電用原子炉は 1950 年代から実用化され、2009 年初時点で全世界で 438 基が運転され、世界の電力需要の 14% を賄っています。経験を積んだ成熟技術といえるのですが、前述の 1980 年頃の炉心溶融事故の危険な印象が人々に強く定着し、以来、米国、英国、ドイツや北欧諸国では触れてはいけない「人類の禁断の木の実」とされてきました。このため、長期にわたり原子炉の新設がストップした米国では専門メーカーである Westinghouse 社が経営不振に陥り、2006 年に東芝に買収されました。

一方、フランスでは総発電量の 75% を原子力が占めており、対応は国によって様々です。日本も原子力に逆風が吹く時代にもエネルギーの自給率向上を目指して原子力発電の導入に努め、2011 年時点では総発電量の約 30% が原子力発電 (関西電力は約 50%) になっていました。

その結果、地球の温暖化対策で原子力利用に追い風が吹き始めた 2008 年以後、世界の原子炉 3 大メーカーはフランスのアレバ、日本の東芝(傘下に Westinghouse 社) と三菱重工に絞られています。これにロシアと中国と韓国が食い込もうとしています。

日本は原子力発電に関しては、このように優位であったのですが、残念なことに、2011/3/11 の東日本大震災の巨大津波で福島第一原子力発電所の 3 基の原子炉がメルトダウンするレベル 7 の巨大原発事故を起したために、国民の原子力に対する拒絶反応が強くなり、日本国内での原子炉の新設は事実上不可能になりました。一方で 2014 年 5 月現在、「全世界で計画・建設中の商用発電用原子炉は 128 基」です。新興国でのエネルギー需要が急増したために化石燃料が高騰し、自然エネルギーの実用化が期待に満たない現在、原子力なしでは世界のエネルギー需給関係は立ち行かない事情があります。「自国に需要がないが大きな製造能力を持つ日本の原子力産業」が最終的にどのような形に収まるか、貴方が社会人になった頃に評価してください。

原子力発電に用いられる原子炉について説明しましょう。次頁の図 1・8・2「原子炉内部の構造」を見てください。核燃料棒は天然ではウラン 238 に対してウラン 235 が 0.72% のところを遠心分離法で 5 % 程度まで濃縮して酸化物のペレットにして金属棒に装填します。ウラン 238 は高速中性子の吸収断面積が大きく、ウラン 235 は周囲の温度と熱平衡状態にある低速の熱中性子の吸収断面積が大きいという特性の違いがあります。

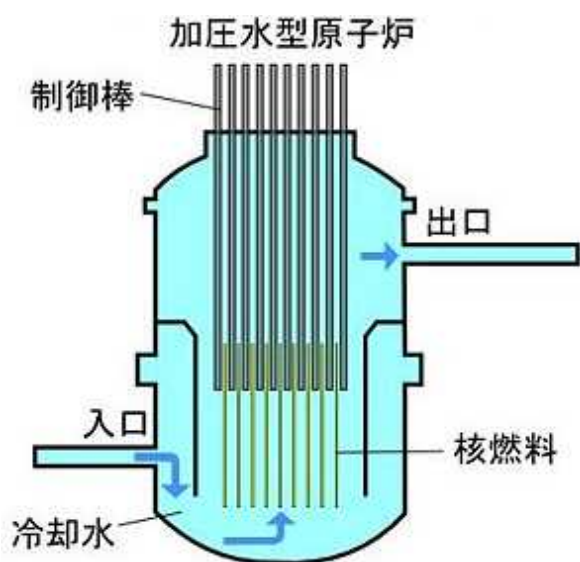


図 1・8・2 原子炉内部の構造

(Wikipedia/原子炉)

核反応で生じた高速中性子はウラン 238 に捕らえられる前に燃料棒の外に出てもらい、水の水素  ${}^1_1\text{H}$  や、重水の水素  ${}^2_1\text{D}$  やヘリウム  ${}^4_2\text{He}$  など軽い原子と衝突させて減速させ(重い原子核と衝突しても同じ早さで跳ね返され、減速できません)、再び燃料棒に戻してウラン 235 に選択的に吸収させて連鎖的反應(Chain Reaction) を安定に続けるのがウラン原子炉の基本原理です。

普通の水( $\text{H}_2\text{O}$ )は軽水と呼んで区別し、若干中性子を吸収する損失がありますが、重水( $\text{D}_2\text{O}$ )は中性子損失が極めて少なく、原子炉を小さく作れます。軍艦の原子炉は高価だが小型の重水炉を使用し、商用の発電用原子炉は大型だが安価な軽水炉を使用します。制御棒は中性子の吸収断面積が特に大きいボロン(B：硼素)等の物質を充填した棒で、核燃料体の中に挿入することにより反応を鎮めて熱出力を制御する役割を持ちます。

図 1・8・2 の炉は Westinghouse 社の加圧水型原子炉で、1 次循環水は加圧して温度を  $300^\circ\text{C}$  程度にしており、熱交換器で 2 次循環水に熱を渡して蒸気にして蒸気タービンを廻して発電します。GE 社(General Electric) は炉内で水蒸気を発生させる沸騰水型軽水炉を製造しますが、原子炉としての動作原理では共通性があります。

原子炉の運転が続くとウラン 235 は消費されますので、計画的に燃料棒は更新されます。使用済み燃料棒は中性子を吸収したウラン 238 が変身したプルトニウム 239 と、残ったウラン 235 を再処理工場で遠心分離法で分離し、濃縮されたウラン 235 は再び燃料棒に再利用します。

プルトニウム 239 も核分裂核種であり、原子爆弾の核爆発物としてよく知られていますが、原子炉の核燃料としても使用できます。核燃料の中にプルトニウムを混入して使用するのをプルサーマルといいます。

高速中性子を減速せずに使って、消費したウラン 235 よりも多くのプルトニウム 239 を産出する構造の炉を高速増殖炉と呼びます。これは 99% 以上もあるウラン 238 を核燃料に転換できる夢の原子炉なのですが、炉内の熱を取り出す冷却材に中性子吸収が少ないナトリウムを使用した実証炉は、フランスでも、日本でも、炉心ではなく、外部配管でナトリウム洩れによる火災が発生し、世界的に実用化が滞っています。



(残念ながら 2014/2 に日本の高速増殖炉「もんじゅ」は運用停止が決定されました)

## 原子炉の構造

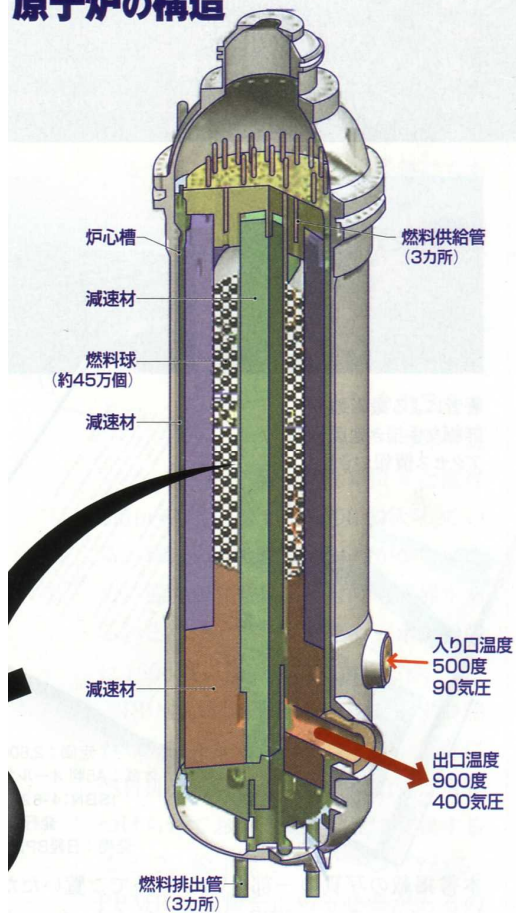


図 1・8・3 PBMR 原子炉

(「技術フロンティア」/日経ビジネス誌 2007/1/8 号 p136~137)

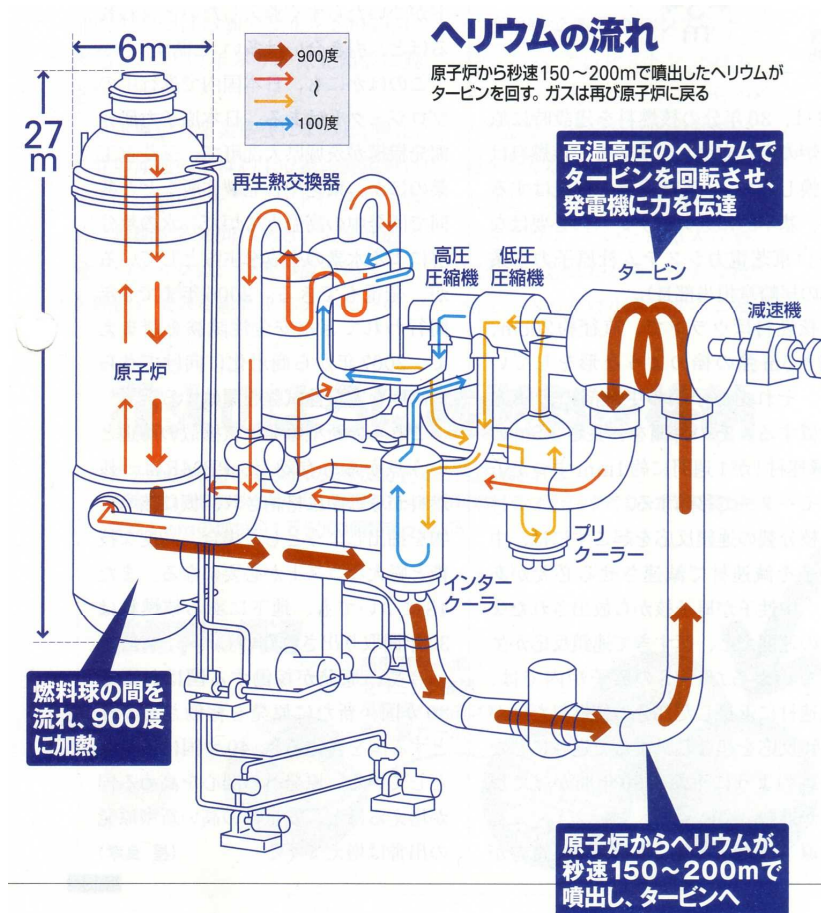


図 1・8・4 PBMR 原子炉の構成

原子炉には各種の方式がありますが、南アで建設中の高温ガス炉を紹介しましょう。

図 1・8・3 の原子炉には直径 6 cm の燃料球が約 45 万個装填されます。各燃料球には直径 0.5 mm の核燃料をセラミックとカーボンで覆った耐熱度 1,600℃ の直径 1 mm の球が約 15,000 個詰まっています。

図 1・8・4 に全体の流れを示しますが、作動気体はヘリウムガスで、出力時は 900℃・400 気圧、ガスタービンを廻すと 500℃、30 気圧になり、水で冷却しながら圧力を 90 気圧に上げて原子炉に戻します。軽水炉の出力は通常 100~150 万 kW ですが、PBMR は 11 万 kW、工期は 3 年と短く、運転を止めることなく燃料球を連続的に交換でき、安全性も高く、開発途上国向けに有望視される方式です。

また、ウランを使用せず、トリウム<sub>90</sub>Th を用いるトリウム溶融塩炉という方式もあり、核爆弾に使われるプルトニウムの生成量が極めて少なく、事故時に Failsafe (自然に安全サイドに落ち着く) であることから注目を集めています、実証例が少ないため、実用化までに時間を要します。

## 9. 核融合利用に向けての歩み

「複数の国で密かに核融合研究が行われている。20 年以内にそのエネルギーを制御して解放する方法が見出されるであろう」。この衝撃的な演説は、1955 年の第 1 回原子力平和利用国際会議の冒頭でインドのバーバ議長が述べたものです。

表 1・7 「核子当たり原子質量単位」を見て気が付いたかもしれませんが、同じ質量なら核融合反応の方が発

生エネルギーが断然多いのです。第2部「宇宙」で明らかになるように、宇宙での核反応の殆どが水素がヘリウムになる核融合反応です。この反応が地上で実用化できれば、人類はエネルギー資源の制約から完全に解放されます。

あれから 60 数年が経ちましたが、人類はまだ夢の原子力エネルギーを手に入れていません。

ZETA、Stellarator、Cusp Machine、Mirror Machine、Heriotron、レーザー爆縮法、ミューオン触媒法、室温核融合。この 60 数年で色んな方式が提案され、実験され、消えて行きました。

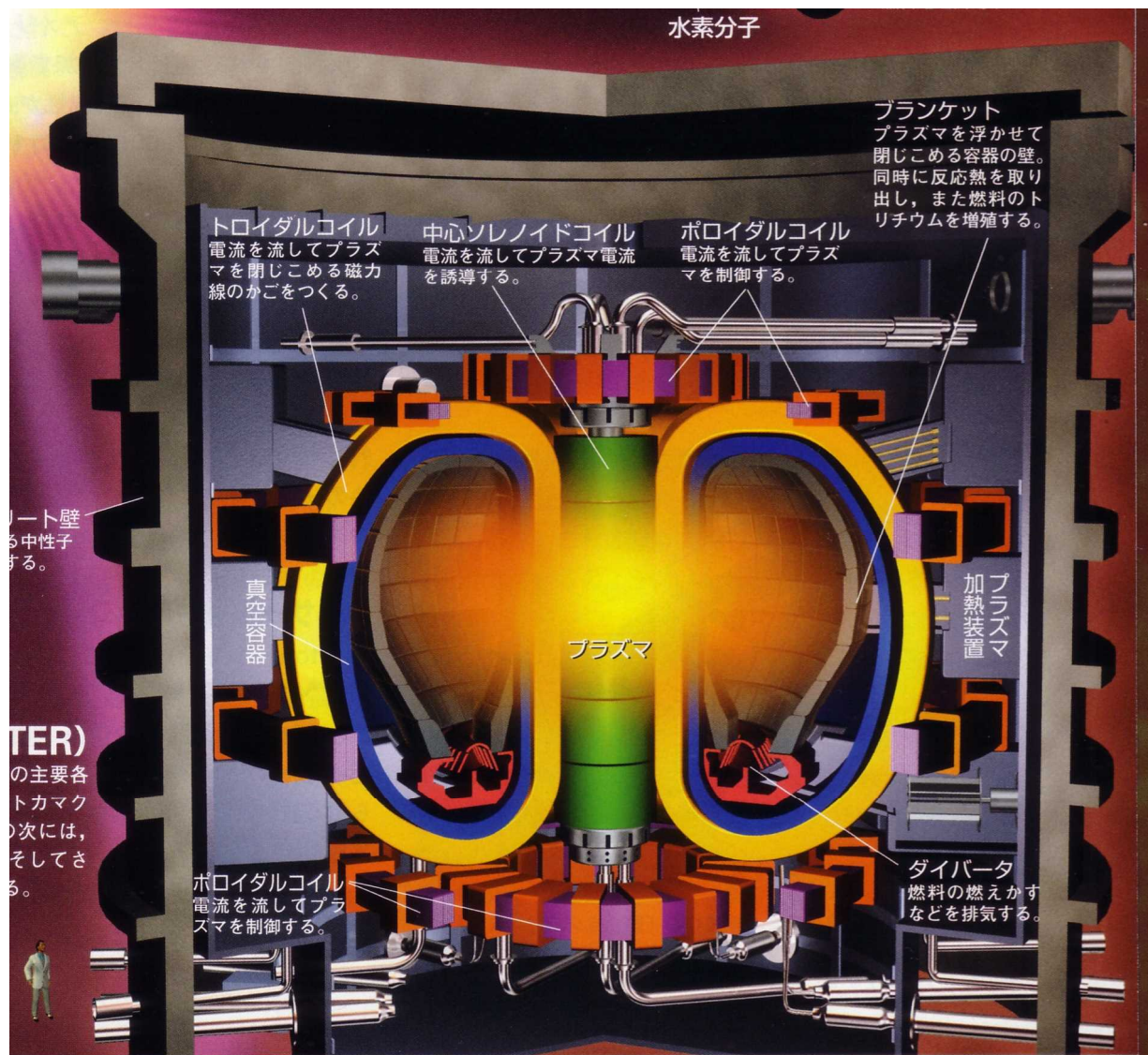


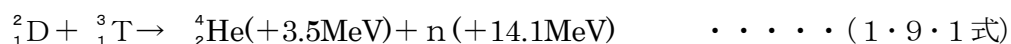
図 1・9 国際熱核融合実験炉 ITER

(「もう一つの太陽を求めて」／Newton 誌 p49)

そして、現在、最有力候補として世界の科学者が共同作業に入っているのが 1968 年に発表されたソ連のトカマクです。初期の素朴な原理に数多くの新しい技術が加わりましたが、基本原理はトカマク方式です。上の図 1・9 は参加各国が費用と部材を持ち寄ってフランスのガダラッシュに建設することが 2005 年に決定した国際熱核融合実験炉 ITER の断面図です。左下の人物と比べ、装置が如何に巨大か実感してください。

本体だけで約 5,700 億円(推定総予算 100 億ユーロ：約 1.6 兆円)と見積もられています。

プラズマ磁気閉込方式で、到達目標温度 3 億度、連続加熱時間 400 秒以上です。核反応は次式です。





事業スケジュールは 2019/11 初プラズマ達成、2027/3 重水素-トリチウム運転開始となっています。  
貴方はこの巨大科学プロジェクトの行く末を見届けられる立場にあります。

太陽、恒星、宇宙を理解するには原子核反応を理解する必要があり、寄り道のようにですが「物質」について概略を説明しました。多分、判りにくかった個所が幾つもあったろうと思います。一通り読んで、おおよそのところが納得できれば、今は充分としましょう。

要約すると、次のようです。

- (1) 日常生活で触れる物質とは、原子の最外殻電子の働きでした。
- (2) 化学反応で解放・吸収されるエネルギーは eV オーダーです。
- (3) 原子の質量は原子核に集まっており、原子核の寸法は無に近いほど小さいです。
- (4) 原子核が融合・分裂して解放するエネルギーは MeV オーダーです。従って、燃料となる物質が同じ重量なら、燃焼・爆発などの化学反応に対して、核分裂反応が発生するエネルギーは数百万倍、核融合反応が発生するエネルギーは数億倍になると考えてください。
- (5) 人類は既に核分裂エネルギーを実用化し、現在、核融合エネルギーの実用化に向けて挑戦しています。

#### 第 1 部で参考にした文献：

挿絵に記載の図書、及び Wikipedia の記事



## 第2部：宇宙 the Universe

物質を形作る原子の内部構造とその核反応が理解できたので、いよいよ物質が極限的な環境の下で生々流転する宇宙の世界に入りましょう。

### 1. 太陽の核反応

#### 1・1 現在の太陽

太陽が誕生してから約 45.5 億年が経過しました。天体物理学の示すところに依れば、その間に太陽は刻々と姿を変えてきましたし、今後も変え続けます。

現在の太陽の組成は大きい順で、①水素 73.46%、②ヘリウム 24.85%、③酸素 0.77%、④炭素 0.29%、⑤鉄 0.16%、等です。

太陽半径の約 20%を占める中心核の圧力は 2,500 万気圧、密度は  $1.56 \times 10^5 \text{ kg/m}^3$ 、温度 1,500 万度です。

温度とは各原子の運動エネルギーの大きさのことです。絶対零度とは各原子の運動エネルギーが最低である状態で、 $-273.15^\circ\text{C}$ です。この温度を零度とし、 $0^\circ\text{C}$ を  $273.15^\circ\text{K}$ とするのがケルビン温度で、原子の運動エネルギーとケルビン温度は完全な比例状態にあるため、物理学で一般的に使用されます。

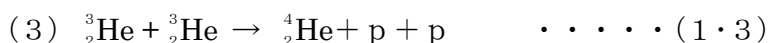
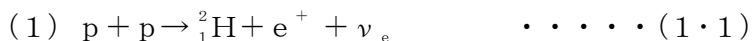
絶対零度は原子の熱振動が最低な状態ですが、量子力学の不確定性原理により、各原子は零点振動をしています。

金属を例にとって温度が上がる過程での原子の振る舞いを説明しましょう。金属の融点(Melting Point) 以下では温度が高くなると各原子は固体である結晶格子の自分の位置に捕らわれていながら激しく振動します。更に温度が上がると、結晶格子を維持しようとする原子の最外殻電子間の結合エネルギーを原子の運動エネルギーが上回り、各原子は勝手に結晶格子から抜け出して金属は溶けて、液体になります。

液体は重力と表面張力で液体としての形を保っていますが、更に温度が上がると、各原子の運動エネルギーが重力と表面張力に打ち勝って、液体の表面から各原子は飛びだして気体(金属蒸気) になります。

更に温度が上がって各原子の運動エネルギーが大きくなると、原子同士が衝突した時に原子核が電子を拘束している電磁気相互作用の力を運動エネルギーが上回り、電子の一部、または、全部をそのあるべき軌道から跳ね飛ばし、宇宙空間のような空虚な空間では再び原子核と電子が再結合できずに別々に存在し続けますし、太陽の中心部のような高密度な空間では原子核と電子は近くに接近しながらも再結合して原子を構成できずにバラバラにスープのような状態になります。これらをプラズマ(Plasma) と呼び、宇宙に存在する原子の大部分がプラズマの状態にあります。

勿論、前述の高温、高圧の条件下で太陽の中心部の原子は全てプラズマとなっています。多数派の水素は陽子 p となっています。 ${}_1^1\text{H}$ 水素がヘリウム  ${}_2^4\text{He}$  になる核融合反応には何通りもの経路があり、太陽中心部の 1,500 万度では、次の陽子・陽子連鎖反応(p-p Chain : (1)→(2)→(3)) が主に発生します。



1・1 式で2つの陽子 p が融合して重水素( ${}_1^2\text{H}$ ) となり、陽電子  $e^+$  とニュートリノ  $\nu_e$  が放出されます。

1・2 式で重水素( ${}_1^2\text{H}$ ) と陽子 p が融合してヘリウム 3 ( ${}_2^3\text{He}$ ) が生成され、ガンマ線  $\gamma$  としてエネルギーが放出されます。

1・3 式でヘリウム 3 ( ${}_2^3\text{He}$ ) 2 個が融合してヘリウム 4 ( ${}_2^4\text{He}$ ) が生成され、2 個の陽子 p が放出されます。

これらの核融合反応は現在は中心核のみで発生しています。エネルギーの大部分はガンマ線 $\gamma$ （波長が極めて短い電磁波）が担っており、これが周囲のプラズマと衝突を繰り返して他にエネルギーを与えながら自分はエネルギーを低下させながら数十万年を掛けて太陽の表面の光球まで上昇してきます。

太陽内部では毎秒 430 万トンの質量が  $3.8 \times 10^{26} \text{ J}$  のエネルギー (TNT 火薬換算  $9.1 \times 10^{16}$  トン) に転換されています。

温度が高くなると反応域の体積が増大してプラズマの密度が下がり、核融合の速度が低く抑えられるというネガティブフィードバック機構により、常時、発生エネルギーが一定のレベルに保たれています。

中心核で発生した熱は太陽半径で 70% の領域までは輻射により熱輸送が行われ(放射層)、その外側では微量イオンによる輻射への不透明度のため対流による熱輸送が主力となります(対流層)。

## 1・2 星の一生…HR図

右図 2・2 は横軸が恒星の絶対温度、縦軸が星が同じ位置に在るとしての明るさでプロットした図表です。主だった恒星の位置を書き込んでいます。

HR 図とはこの図を独立に提唱して研究した二人の天文学者、Hertzsprung と Russell に因んで付けられた呼び名です。

恒星はその一生の主な部分(水素核融合の続く期間)をその質量に応じて HR 図上の主系列上のどこかで過ごし、その終わり(ヘリウム核融合以降)に赤色巨星や青色の場所に移動し、やがて終末を迎えます。

恒星の質量が大きいほど、中心核の温度が高く、密度が大きくなり、結果として核融合の種類も代わり、水素の消費速度も大きくなって、主系列にいる寿命が短くなります。

太陽より中心核が高温になり、2,000 万度を超すと、p-p チェインよりも炭素 C、窒素 N、酸素 O を触媒と

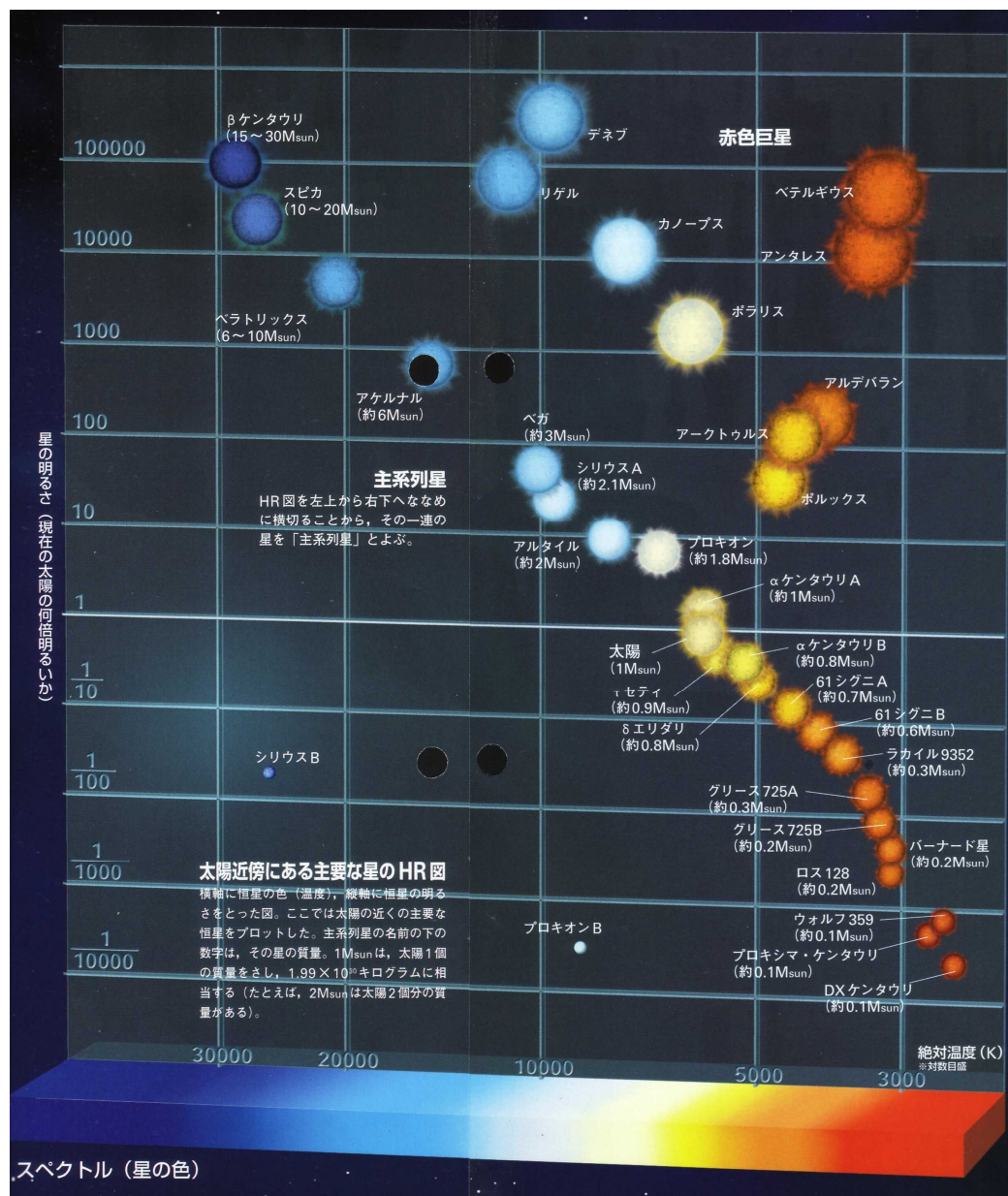
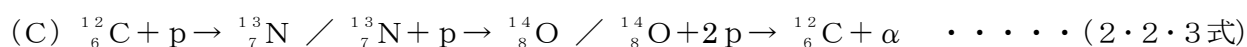
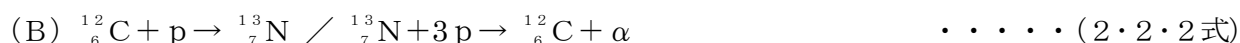


図 2・2 HR 図上の主要星

(「太陽 誕生から死へのシナリオ」 Newton Special p35~36)

した水素核融合 **CNOサイクル**が優勢な反応(太陽では 1.6%のシェア) となります。CNO サイクルは次の 3 タイプがあり、温度が高くなるほど  $C \Rightarrow B \Rightarrow A$  の順で優勢になり、反応速度が速くなります。



### 1・3 これまでの太陽

太陽系には鉄より原子番号が大きい物質が相当量存在するため、それらの物質を作ることができる超新星の爆発の後に残された星間物質より作られたと考えられています。

一旦、近くの明るい恒星の光の圧力による掃き寄せ効果や、重力による星間物質の集結が始まると、星の卵自身の回転による遠心力や磁場の力で星の卵の形は次第に扁平になり、最も密度が高い所を中心にガスの回転円盤が出来上がり、中心部にガス円盤からガスが降り注いで原始太陽が形成されます。

この時期に円盤の軸方向に秒速 10 km の双極分子流という 2 本のジェットが吹き出ます。約 10 万年後にはガス円盤はなくなり、若い太陽が誕生します。同時に惑星系も形成されます。

太陽系の隕石の年齢が 45.5 億年であることから、太陽も地球もほぼ同時期に創成されたと考えられます。

右の図2・3は若い太陽が降着ガスのエネルギーを受け取って段々光度を上げて

HR 図上を左側に上がって行き、ガス円盤が消えて冷却して光度が右下がりになって

行く経過が示されています。やがてガスは自重で収縮して位置エネルギーを熱エネルギーに変え、温度が上昇して約 1,000 万度に達して最初の核融合反応（D-T 反応）が始まり、核反応の発熱により膨張しようとする力と重力によって収縮しようとする力が平衡状態に入り、主系列星としての太陽の一生が始まります。

ここへ来るまでに要する時間は約 1,000 万年です。

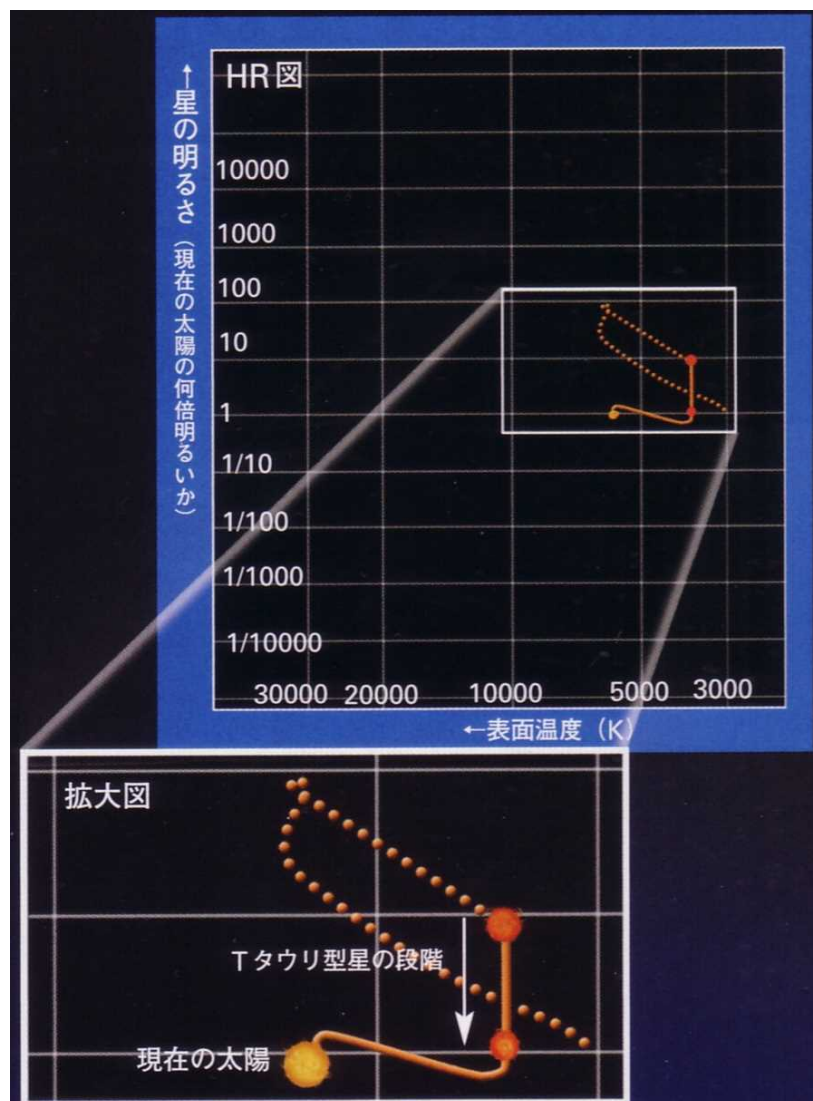


図 2・3 誕生から現在までの太陽図

(Newton Special 「太陽・・」 p43)



図2・4・1 現在の中心核

(Newton Special 以下同じ)



## 1・4 これからの太陽

45.5 億年かけて最初は小さかった中心核が少しずつ大きくなり、放射エネルギーも約 30%増加して今日の太陽になりました。太陽の中心核で 4 個の水素原子核から 1 個のヘリウム原子核が生じる核融合反応が続く限り、太陽は主系列星であり続けます。

図 2・4・1 はこの時期の太陽の中心核の構造を示しており、オレンジ色の球内で核融合反応が起こっており、その外側の黄色の殻は反応が起こっていない水素の層です。

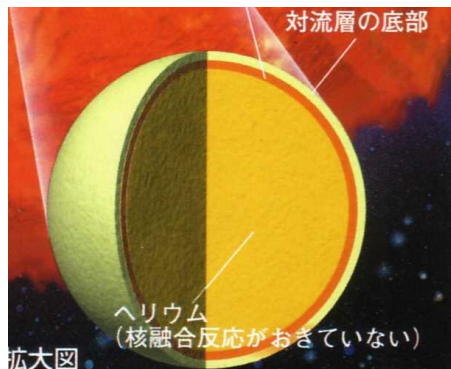


図 2・4・2 63 億年後の中心核

このような主系列上の安定な水素核融合の時期は今後約 60 億年続きますが、

その間にも放射エネルギーは少しずつ上昇します。

やがて中心核の水素が全てヘリウムに置き換わる約 60 億年後に図 2・4・2 のように黄色のヘリウムの中心核の周囲でシェル(殻)状に水素核融合が行われるようになると、63 億年後から 76 億年後にかけてオレンジ色的主系列星時代と較べて直径が 11~170 倍まで膨張する赤色巨星の状態になります。

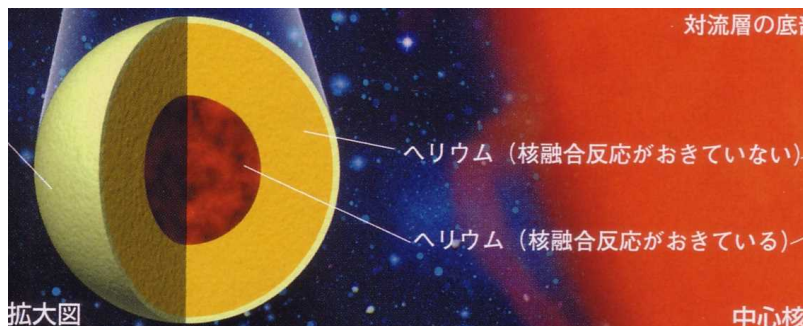


図 2・4・3 76 億年後の中心核

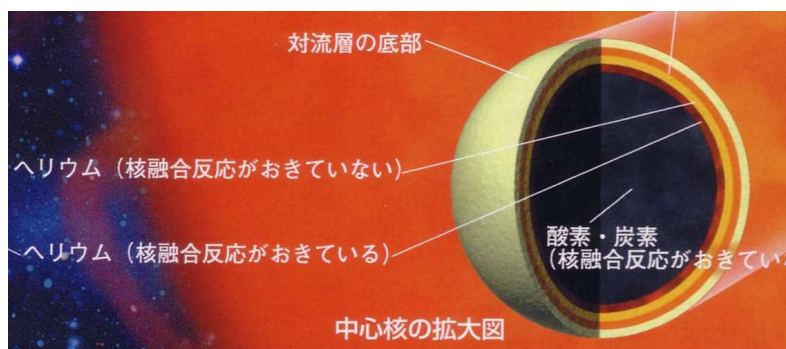


図 2・4・4 77 億年後の中心核

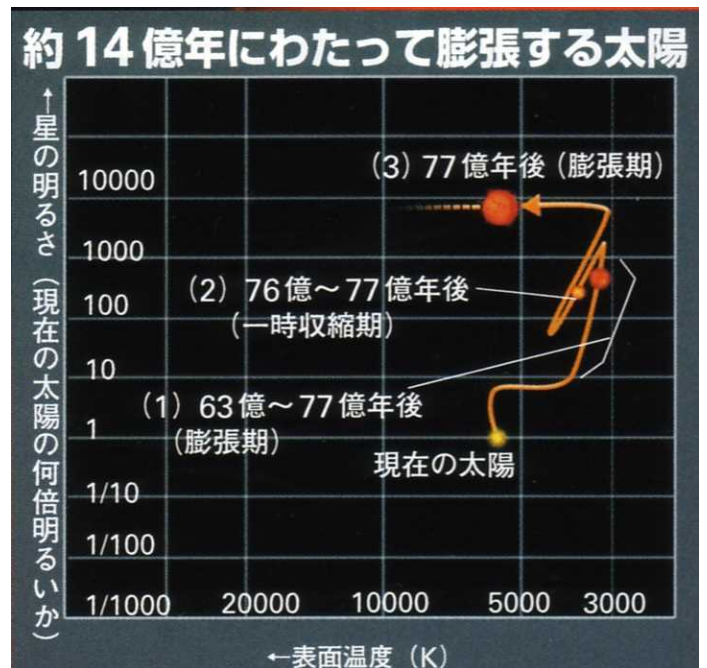


図 2・4・5 HR 図上の赤色巨星期

この間に左図 2・4・3 のように、ヘリウムの中心核は重力の作用で収縮を続け温度が上昇してヘリウムが酸素や炭素に変換する核融合反応が始まり、膨張が一時的に止まって、直径も主系列星時代の約 11~19 倍にまで縮小します。しかし、この安定時期は僅か 1.3 億年しか続きません。

図 2・4・4 の黒色はヘリウム核融合の産物、酸素と炭素です。その外側の赤色のシェルでヘリウム核融合が行われ、その外側に明るいオレンジ色の未反応のヘリウム層があり、その外側に濃いオレンジ色の水素の核融合層があり、その外側は未反応の水素層がある複雑な多層構造になると膨張をして、現在の約 200 倍の直径にまで達し、光球面が地球の公転軌道すれすれまで来ます。この間の事情を、上の図 2・4・5 の HR 図に示しました。



図 2・4・6 HR図上を赤色巨星から惑星状星雲を経て白色矮星へ



図 2・4・7 惑星状星雲キャッツアイ

再膨張時期の燃料消費は急激で、約 0.2 億年で残った核燃料を使い果たしてしまいます。太陽は極めて明るく輝き、猛烈な太陽嵐状態になって質量のおよそ半分を吹き飛ばしてしまい、図 2・4・7 のような惑星状星雲と(望遠鏡の性能が低かった時代に誤って付けた) 呼ぶ明るい恒星が残ります。

表面温度は  $10,000 \rightarrow 20,000 \rightarrow 30,000^{\circ}\text{K}$  と高くなり、図 2・4・6 のように HR 図上を左へ移動します。約 10 万年かけてガスが晴れますが、太陽の質量では、これで核融合反応はお終いです。

その後は段々と冷却して、図 2・4・8 のような構造を持つ**白色矮星**になり、やがて輝きを失って褐色矮星から黒色矮星となり、見かけの存在を消します。

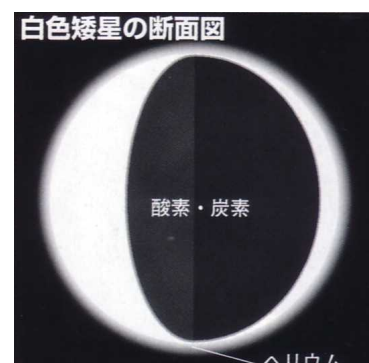


図 2・4・8 白色矮星

## 2. 恒星の一生は質量で決まる

太陽の質量を  $M_{\odot}$  として、恒星の一生がどのようになるかを見てみましょう。

### 2・1 褐色矮星と赤色矮星 Brown Dwarf & Red Dwarf

$0.08M_{\odot}$  以下の質量の星は円盤ガスを吸着して原始星になって、ガスの重力のポテンシャルエネルギーが熱エネルギーに変わって温度が上昇しますが、星が縮んでも中心核の温度が水素核融合の温度に達せず、数百億年にわたって薄赤く光っているだけです。木星を「太陽になり損ねた星」ということがあります、その質量は  $0.001M_{\odot}$  ですから、褐色矮星にはまだ手が届きません。

次に述べる  $0.08M_{\odot}$  以上の星の中にも、質量が小さいものは緩慢な水素核融合しか起こらず、見た目には褐色矮星と変わらないものがあり、赤色矮星と呼びます。両者の違いは、前者はスペクトル線の中に Li リチウムの輝線があり、後者は初期の核融合で使い切ってリチウムの輝線が見当たらないことです。



アメリカ、ジョージア大学のプロジェクトチームは、地球から約 33 光年内の範囲で、新たに 20 個の星を発見した。その内二つは太陽から 23 番目と 24 番目に近い星であった。チリにある口径 90 cm の望遠鏡で、視差を使った距離測定によって求められた。今回の発見を加えると、ここ 6 年間に太陽近くの星が新たに 34 個見つかったことになる。新たに見つかった 20 個の星は、全て赤色矮星(わいせい)であり、肉眼では見ることができない(赤外線で観測する)。赤色矮星は地球から 33 光年以遠でも多く発見されており、銀河系で最も数の多い天体であるという。…… (NOAO Press Release2006/11/14)

## 2・2 白色矮星 White Dwarf

0.08Ms 以上の星は、原始星の収縮による温度と密度の上昇により水素核融合が開始され、図 2・2 上の左上がりの主系列星として輝きます。その内、8 Ms 以下の恒星の最後の姿は白色矮星です。

10Ms の恒星は中心核の温度は 2 倍になり、太陽の 4,700 倍のエネルギーを放射し、表面温度はおよそ 25,000 °K、主系列星として左上方の青白い色で輝き、その寿命は約 2,000 万年です。

0.5Ms 以下の恒星は主系列星としては右下方の赤っぽい色で輝き、表面温度は 4,000~3,000°K、水素核融合を約 1,000 億年以上にわたって継続できますから、まだまだ同じポジションで頑張ります。これらは水素を使い切ってもヘリウム核融合に進むほどには中心核の温度が上らず、最後は白色矮星になる筈です。

質量が大きい場合はヘリウム核融合の後に酸素核融合、炭素核融合と進み、最後の鉄まで進んだところで終わりになります。水素核融合以外の核種の核融合は、太陽の例でも見たように、短期間に激しく反応が進んで赤色巨星になり、核燃料を使い切って、最後は太陽と同じ白色矮星に落ち着きます。

白色矮星の質量には**チャンドラセカール限界(Chandrasekhar Limit)**があり、1.44Ms 以上の白色矮星は存在しません。このことは、8 Ms の恒星でも、最後の激しいエネルギー放出に至るまでに約 80%の質量を空間に放出するという事です。この**星間物質が次の世代の恒星の材料**になります。

この質量範囲の恒星は核融合では鉄までしか進みません。

白色矮星をこれ以上収縮しないように支えている力は、量子力学で電子の縮退圧といわれるものです。

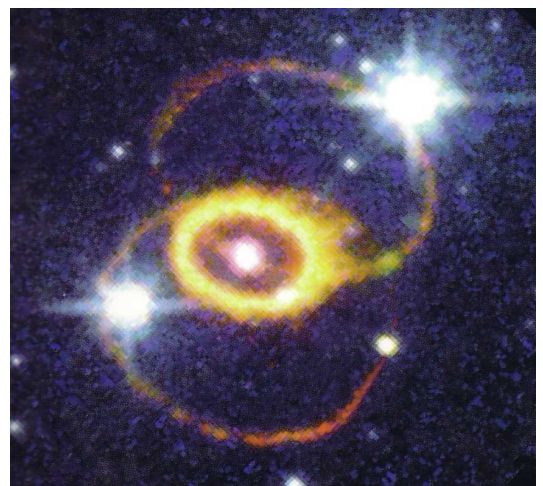


図 2・5・1 超新星 SN1987A

## 2・3 中性子星 Neutron Star

10Ms 以上の質量の恒星では、中心核温度が 15 億°K で酸素からシリコンが、25 億°K でシリコンなどの核融合で鉄が出来ます。更に温度が上昇して 100 億°K を超えると吸熱反応により鉄がヘリウムに分解され始めます。一気に中心核の温度が低下して**重力崩壊**が起こり、重力のポテンシャルエネルギーが急激に解放され、恒星全体が大爆発します。

これが超新星(Supernova)です。

この重力崩壊は凄まじく急激で、次頁の図 2・5・2 の試算例では、中心から 100 kmにある物質が僅か6 ミリ秒で 10 kmまで崩落して、その位置エネルギー(重力のポテンシャルエネルギー)を大部分はニュートリノに、一部は鉄より重いウラン等の物質に変換します。

核分裂反応の原子力エネルギーは、重力崩壊の瞬間に超新星が重力エネルギーを使って作り出した物質によるもののなのです。



図 2・5・2 の円筒は、半径方向は対数目盛の距離で 10/100/1,000 km に区切りがついています。高さ方向は下へ向かって直線目盛りで書かれた時間で、鉄の中心核の重力崩壊が始まって 6 ミリ秒で中性子の縮退限界まで爆縮し、これ以上圧縮できなくなって跳ね返りの衝撃波が外へ向かって進み、その跡に中性子過剰の環境で鉄より原子量大きい核種の元素が生成されます。中心の紫色の核物質だけが中性子星として残り、外側の重い原子核と書かれた層以上は衝撃波により周囲の空間へ吹き飛ばされます。その間、僅かに 12 ミリ秒。強烈な爆発現象です。

太陽系には鉄より重い元素が多いということは、太陽系が原料にした星間ガスがこのような重元素を生成できる超新星爆発の残骸であったことを意味します。

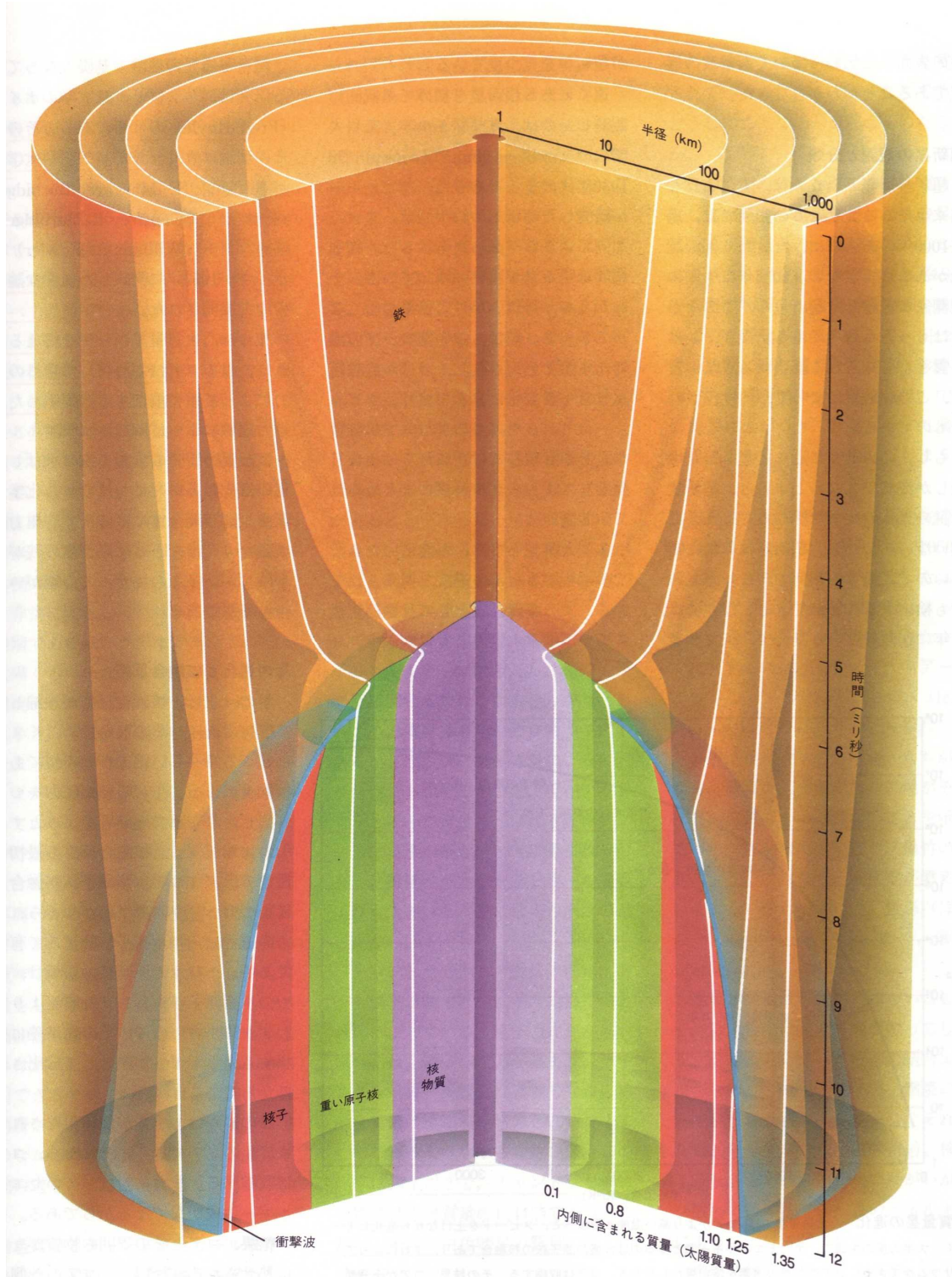


図 2・5・2 重力崩壊と反撥による重元素生成 (日経サイエンス別冊 98「超新星爆発」、p23)

10~20Ms の超新星爆発の跡には、重力崩壊で収縮した直径 10 km ほどの中心核が残ります。これは強力な重力のために電子の縮退圧は圧倒されて電子が原子核に吸収され、殆どが中性子になっている**中性子星**です。中性子星とは重力の圧縮力を量子力学という中性子の縮退圧で支えている星です。極めて重力が強く、表面からの脱出速度は光速の 1/3 にも達します。

2 頁前にあった図 2・5・1 は銀河系近傍では何百年に 1 回しか起こらない超新星爆発が、幸運にも 1987 年に銀河系に近いマゼラン銀河の中で起こり、人類は最先端の観測装置をフル動員してそのデータを蒐集しました。この写真はその超新星 SN1987A の 1995 年時点での写真です。光が地球に到達するより 3 分間早く着いたそのニュートリノをカミオカンデが検出し、その方角や時間的強度変化などの詳しいデータを記録してニュートリノ天文学の道を拓いた(小柴博士のノーベル賞受賞に結実した) 記念すべきイベントでした。

ニュートリノも光も共に光速ですが、重力崩壊ではニュートリノは中心核から光速で出発し、中心核からの衝撃波が星の表面に達して、表面から光が発生しますので、光速と衝撃波の速度差でニュートリノの方が 3 分間早く出発しています。

**オリオン座**の右手の赤い**アルデバラン**という赤色巨星は寿命の末期にあり、現在大量のガスを噴出して形状が瓢箪型になっており、何時超新星になっても可笑しくない状況にあり、カミオカンデは先に到達するニュートロンを検出したら、瞬時に世界中の天文台に速報する態勢を執っています。

**宇宙の標準光源 Ia 型超新星**： 超新星は、そのスペクトルに水素の吸収線が見られない(核融合で水素を使い切ってしまった) I 型と、水素の吸収線が見られる II 型に分類します。I 型の中でもシリコンの吸収線が見られるものを Ia 型と呼びます。Ia 型はあらゆるタイプの銀河に出現しますが、出現率は II 型より少数派

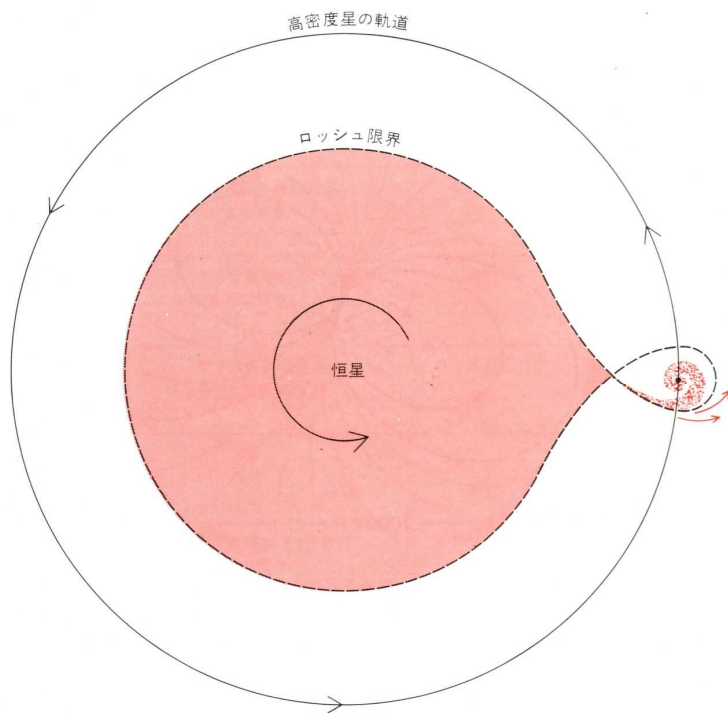


図 2・5・3 連星系の質量吸収機構

(日経サイエンス別冊 25、p83)

に明るいため、宇宙論的距離まで使える標準光源として有用です。

後ほど出てくるダークエネルギーによる宇宙の加速膨張が約 47 億年前から始まったとの研究発表は、多数の Ia 型超新星の観測結果を分析して得られたものです。

なお、SN1987A は II 型の超新星で、一度は赤色巨星に膨張した星が収縮して高温の星になってから爆発する特異な経過を辿っており、原因はマゼラン銀河が小型で進化が遅いため、重元素の比率が低いからでした。

です。

図 2・5・3 に示すように、二つ以上の恒星が連星系をなしている時、相手の恒星が巨星化して**ロッシュ限界**(それより内側では潮汐力により星が破壊される距離)に達するまで膨張すると、溢れ出したガスは全て高密度星に降着するようになります。降り積もったガスによりチャンドラセカール限界まで質量が増加し、高密度星が遂に自分の重力による収縮を電子の縮退圧で支えきれなくなった時に中心核で炭素核融合が暴走して大爆発を起こします。

これは一定の質量(臨界量)まで達すると起こる現象であり、爆発の規模も一定しており、Ia 型超新星のピーク時の絶対等級がほぼ一定であるから、見かけの明るさ(視等級)を測定することで超新星爆発の起こった銀河までの距離を求めることができます。

このように距離測定時の明るさの基準として使える天体を**標準光源**と呼びます。Ia 型超新星は非常



## 2・4 ブラックホール Black Hole

**重量限界なし！**：30Ms 以上になると、超新星爆発の跡にブラックホールが残ります。これは中性子の縮退圧が重力の圧力に負けて中心核が収縮を続け、余りに強力な重力場のため、その表面(時空の地平線)から光が脱出できなくなる存在です。

ブラックホールの周辺に星間物質がある場合は、周囲に降着円盤ができ、その回転の遠心力とブラックホールの重力で釣り合い、そこから少しずつブラックホールに吸い込まれます。その過程で物質が重力のポテンシャルエネルギーを放出して強力な電磁波(主にX線)を放出するので、名前と違って非常に明るく輝きます。



右の図 2・5・4 は乙女座銀河団の中の NGC4261 図 2・5・4 NGC4261 のブラックホールの降着円盤の中心にある直径 800 光年の降着円盤です。  
(Newton ムック 2006/7/20 刊、p87)

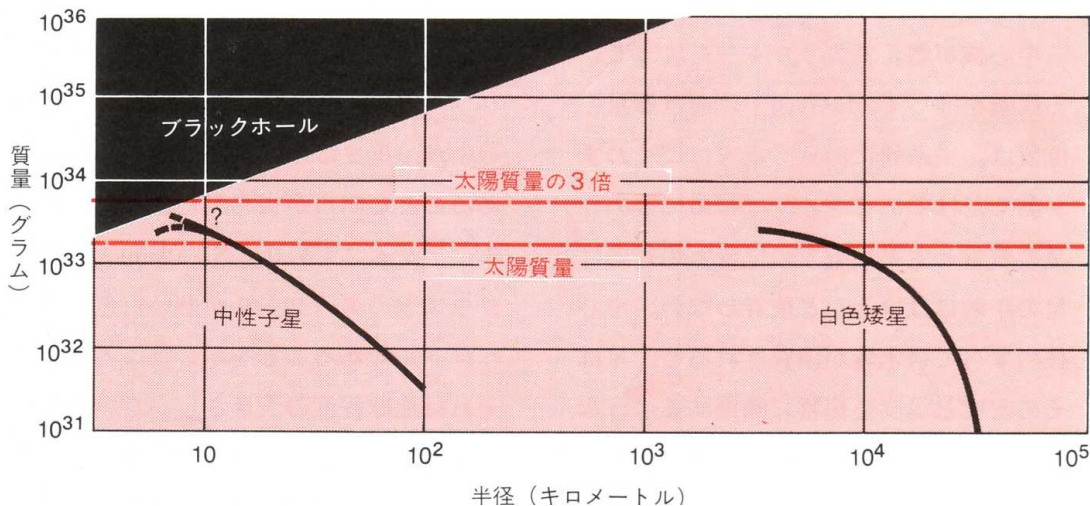


図 2・5・5 白色矮星・中性子星の質量・半径限界

(日経サイエンス別冊 25「超新星と…」、p102)

その形状が天文学者たちが理論的に予想していた通りであったため、彼等が驚喜して迎えた価値ある写真です。

図 2・5・5 に示すように、白色矮星にしる、中性子星にしる、その質量規模に生成メカニズム(縮退圧)

から来る一定の限界がありましたが、ブラ

ックホールにはそのような限界がありません。どこまでも質量が増加できます。

円盤の回転速度から算定して、図 2・5・4 のブラックホールの質量は太陽の 12 億倍で、降着円盤の質量は太陽の 10 万倍です。多くの銀河の中心部には超巨大ブラックホールが潜んでいます。我々の銀河系のそれは、現在は近くに吸引する物質が欠乏しているために休止期に入っています。

図 2・5・4 にも見えている上(下)に出るジェット(双極分子流)は、高速回転するブラックホールの場合(そのような場合が多い)は、噴出量は最大で流入する物質の約 1/4~1/3 に相当し、回転の軸方向に最大で光速の 1/3 に達する速度で噴出します。何でも吸い込んでしまうのではなく、相当量を遠方まで撒き散らし、その銀河系の活性化に役立っているのです。

**核融合より高いエネルギー転換効率**：ブラックホールに物質が落ち込む時には、外部に最大(回転時)で 46% の効率でエネルギーを放出しますから、水素核融合が質量の 0.71% をエネルギーに転換するのとは桁違いのエネルギーが放出されます。

参考までに、中性子星に物質が落ち込む時のエネルギー放出効率は約 10%(回転しないブラックホールも同じ)、白色矮星に落ち込む時は 0.01% です。また、物質・反物質反応(例えば電子・陽電子反応)では、質量の



エネルギー転換率は 100%になります。

ブラックホールは、周囲に何もない空間では光り輝くことは出来ません。この場合は、周囲の空間を重力で歪ませる重力レンズ効果のために遠景が歪むので、存在が判明します。

米航空宇宙局(NASA)ゴダード宇宙飛行センターの研究チームは1日、質量が太陽の 3.8 倍で直径が約 24 kmと、これまでで最小のブラックホールを特定したと発表した。太陽系が属する銀河の祭壇座にあり、二つの星がお互いを廻る連星のうちの一方。……これまで見つかった最小のブラックホールは 6.3 倍だったという。……（日本経済新聞 2008/4/2 夕刊）

## 2・5 パルサー Pulsar

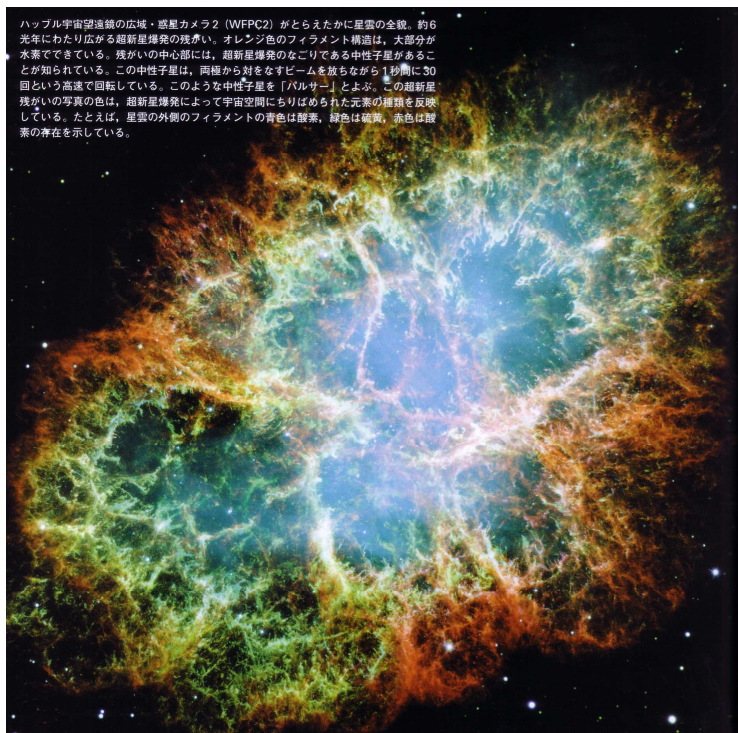


図 2・5・6 蟹星雲 (Newton ムック 2006/7/20)

上の図 2・5・6 の蟹星雲は牡牛座の中にあり、地球からの距離は約 7,000 光年で、その形状から蟹の名があります。

1054 年に爆発した超新星で SN1054、中国の「宋史／天文志」に「客星現る」と記され、1054/7/4 に出現して輝き、1056/4/5 に見えなくなったと記録されています。

日本でも藤原定家の日記「明月記」や、年代記である「一代要記」に記された有名な超新星です。

1969 年にこの星雲の中心部に周期 33 ミリ秒の極端に回転数 (30 回転/秒) が高いパルサー(宇宙の回転燈台)が発見されました。

中性子星である蟹パルサーの周期は年に 0.4% ずつ長くなっており、毎秒約  $8 \times 10^{31}$  J のエネルギーを失いつつあります。地球から観測される赤外線から X 線までの電磁波の強度から推論して、毎秒  $1 \sim 2 \times 10^{31}$  J 程度の光子が放射(太陽の 3 万倍)されており、残りのエネルギーで駆動されていると考えると蟹星雲のガスの加速状態とぴったり一致します。

このエネルギー放射の原理を図 2・5・7 に示します。蟹パルサーの表面の磁場は約  $2 \times 10^{12}$  ガウス(モーターの磁束密度の約 100 万倍)で、外部に広がる磁束は早さが光速を超える光速円筒の外で巻き付いて広がり、

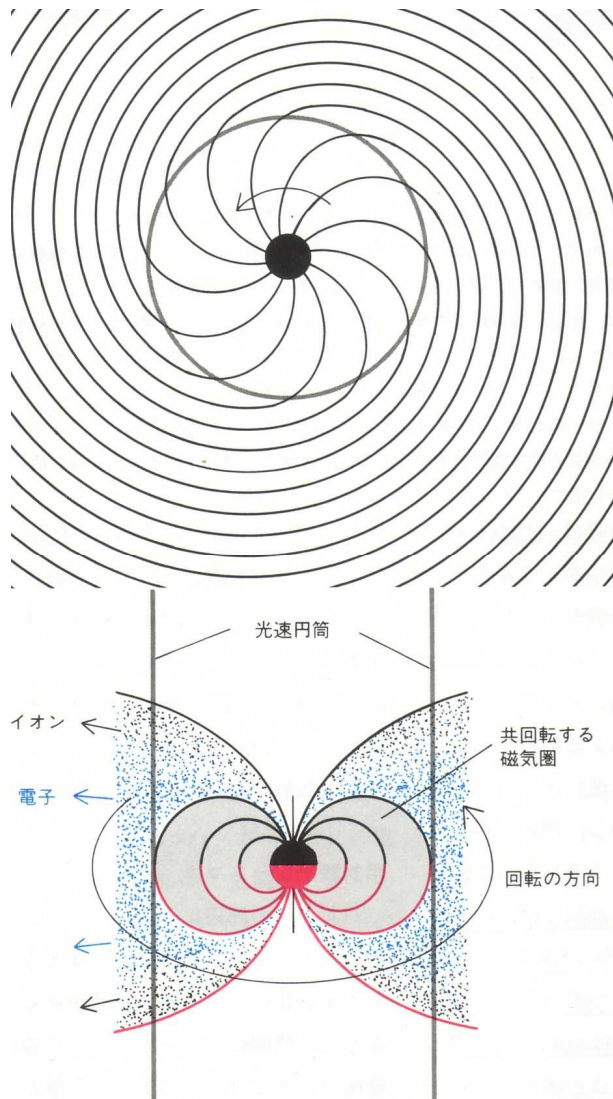


図 2・5・7 粒子加速の仕組み

(日経サイエンス別冊 69、p63)



空間プラズマの電子が加速されてシンクロトロン放射により電磁波を放射しています。

蟹パルサーは電波パルサーに分類されますが、X線パルサーという別種のパルサーもあります。

それは図 2・5・3「連星系の質量吸収機構」に示したように、中性子星が連星の相手からガスを受取り、降着円盤から落ち込んでX線を発生させる場合に、強力な磁界を有する中性子星ではX線に周期的な変動を発生させるものです。この場合、中性子星はガスの回転エネルギーを受け取って自転速度が速くなり、相手の星が死に至った頃には電波パルサーとしての十分な速さに達することができます。

### 3. 銀河系 the Galaxy

太陽系は銀河の中にあり、人類は銀河を外から見ることはできませんから、銀河の全貌を知るのには近くのアンドロメダ星雲などを調べるよりも遙かに難しいのです。それでも、最近の天文学は困難を克服して大分自信をもって銀河系のことを語るできるようになりました。

銀河系の直径は約 10 万光年、恒星の数は約 2,000 億個とされています。右のイラスト図 2・6・1 のように中心に棒状構造(バルジ)があり、回転中心には太陽の 400 万倍の質量を持つブラックホール Sgr A\* が存在します。銀河系の全質量は太陽の 2,000 億倍ですから、ブラックホールの重力だけで銀河系の回転が維持されているわけではありません。後ほど出てくるダークマターを考えないと、銀河系の回転速度などの説明がつきません。

太陽系の居所を確認しましょう。右図のオリオン腕の端の方に居ます。この位置は銀河の中心から約 26,000 光年であり、約 2 億年かけて銀河系を一周するような周回運動をしています。

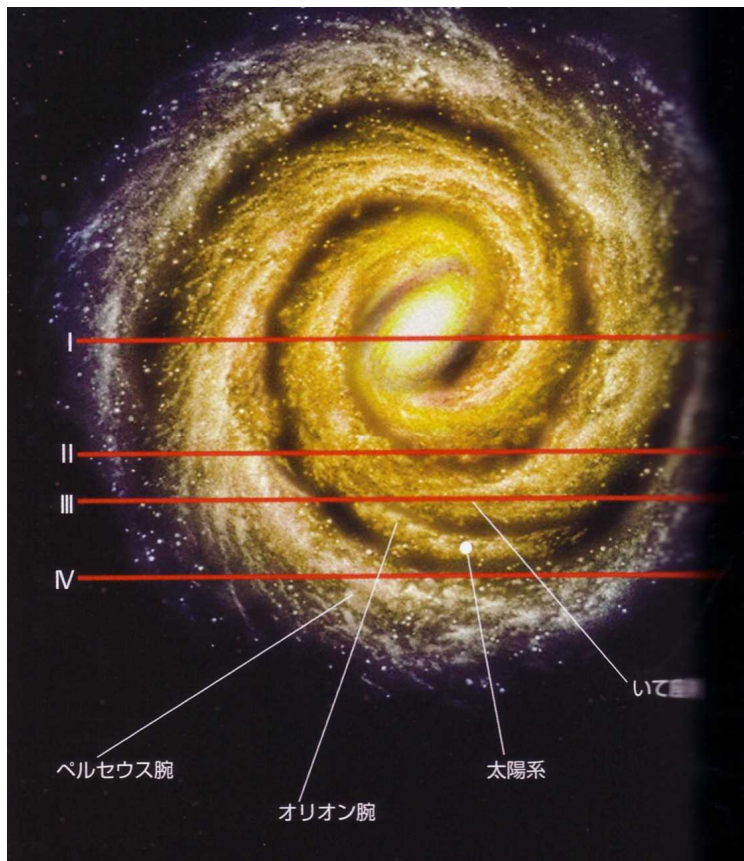


図 2・6・1 銀河系正面図 (Newton ムック 2008/3/15)

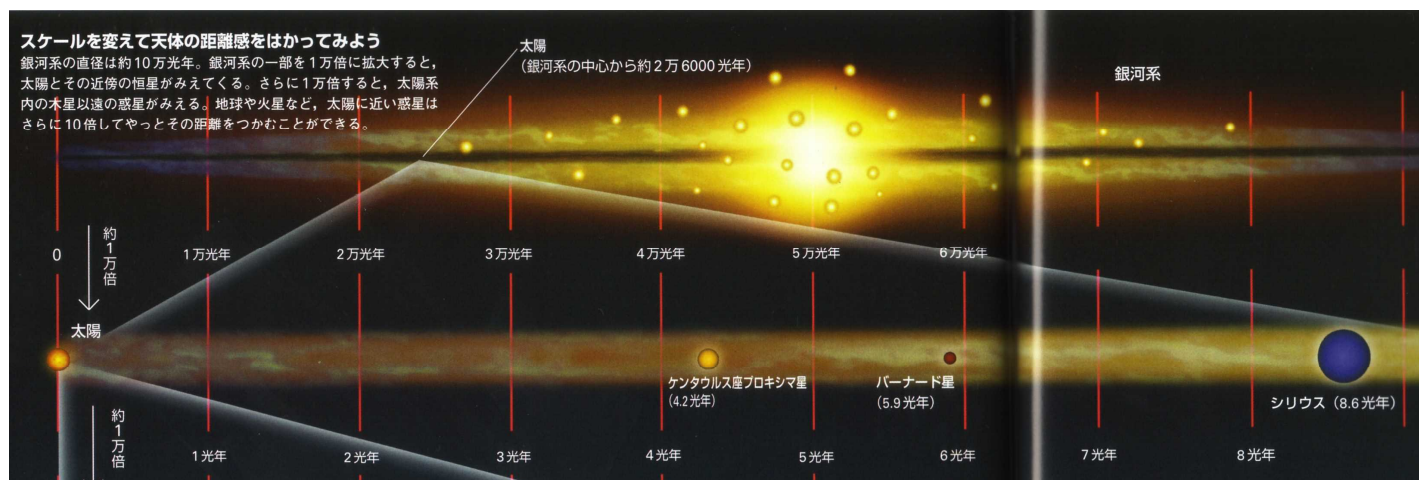


図 2・6・2 銀河系側面図／太陽系の近傍の恒星 (「よくわかる天の川銀河系」 / Newton ムック 2008/3/15)

図 2・6・2 の上半分に銀河系の側面図を示します。太陽系は銀河面を波打つように若干上下動しながら回転

進行してます。

太陽系に最も近い恒星は、4.2 光年の距離に在るケンタウルス座プロクシマ星、次いで 4.4 光年のケンタウルス座アルファ星です。前者(Proxima Centauri) は視等級 11 と暗い赤色矮星で、質量 0.12Ms、表面温度 2,670°K です。(視等級とは見た目の明るさを指数で表わしており、1 等級低いと 10 倍明るくなる)

3 番目の 5.9 光年にあるバーナード星も赤色矮星で視等級 9.57、質量 0.17Ms、表面温度 3,134°K、108 km/s の固有速度を有する「高速度星」で、1 万年後には太陽系から 3.8 光年の位置にまで近づきます。

8.6 光年先には全天で最も明るいシリウス(Sirius: ギリシャ語で“焼き尽くすもの”、中国語で“天狼星”) があり、この星の伴星は白色矮星です。主星シリウスAの視等級は-1.47(非常に明るい)、質量 2.14Ms、直径は太陽の 1.68 倍、表面温度 9,900°K です。伴星シリウスBは 0.98Ms、25,200°K です。

#### 4. 局部銀河群と超銀河団

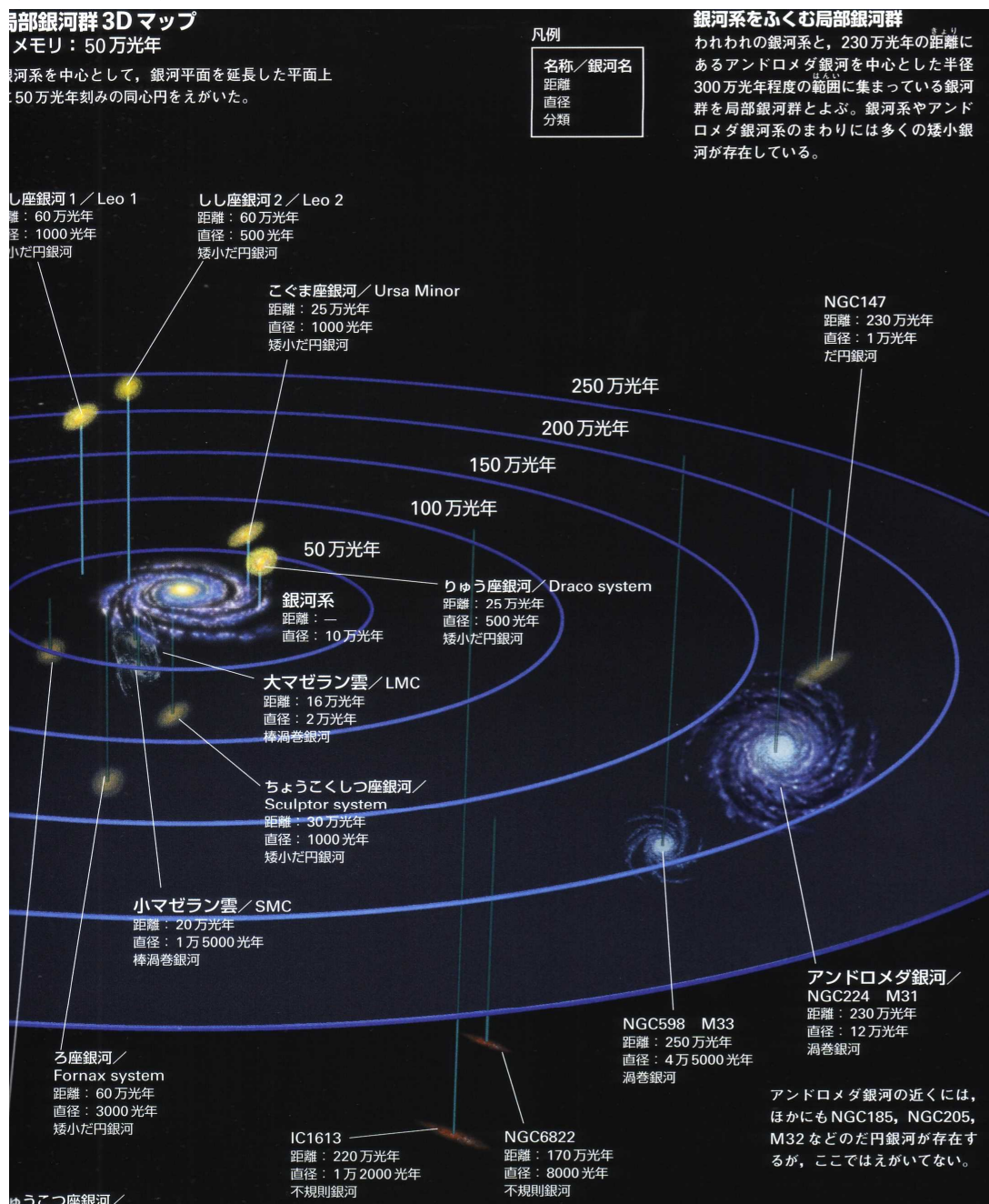


図 2・7・1 局部銀河系 3 D マップ (Newton ムック 2008/3/15)



図 2・7・1 は 230 万光年の彼方にあるアンドロメダ銀河と銀河系が形成する局部銀河群のイラストです。103 億年前、銀河系とアンドロメダ銀河はかなり接近し、その時に互いの引力の作用で両渦巻き銀河から約 40 個の矮小銀河が引き出されて現在の姿があります。現在、両銀河は再び接近しつつあります。

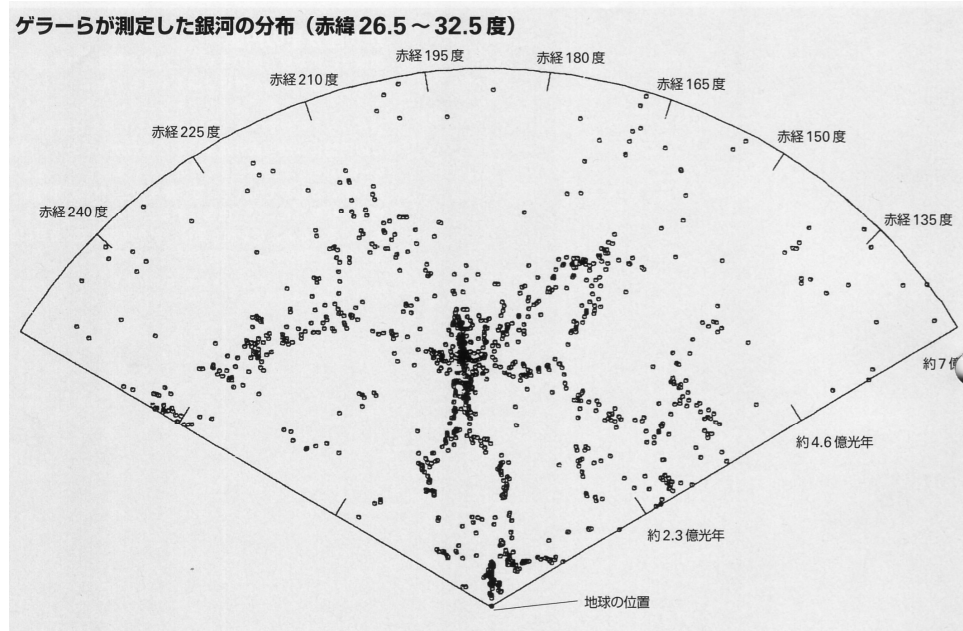


図 2・7・2 は 1986 年、マーガレット・ゲラー等が幅 6 度、高さ 135 度の立体扇形の領域の明るい銀河の距離を全て測定してプロットしたものです。この図には 1,067 個の銀河が記載されています。隣り合った何枚かのこのようなセクターを重ねると宇宙の立体構造が浮かび上がってきます。それは銀河同士が連なった「超銀河団」と、逆に銀河がない「ボイド(超空洞)」で出来た不思議な構造でした。

図 2・7・2 宇宙の大規模構造 (「天文学を塗り替えた 11 枚」/Newton Special)

宇宙の構造は、洗濯の泡のようだったのです。現在、全天に

ついて、この大規模構造を更に詳しく調べるべく、国際的に SDSS(Sloan Digital Sky Survey)プロジェクトが進行中です。

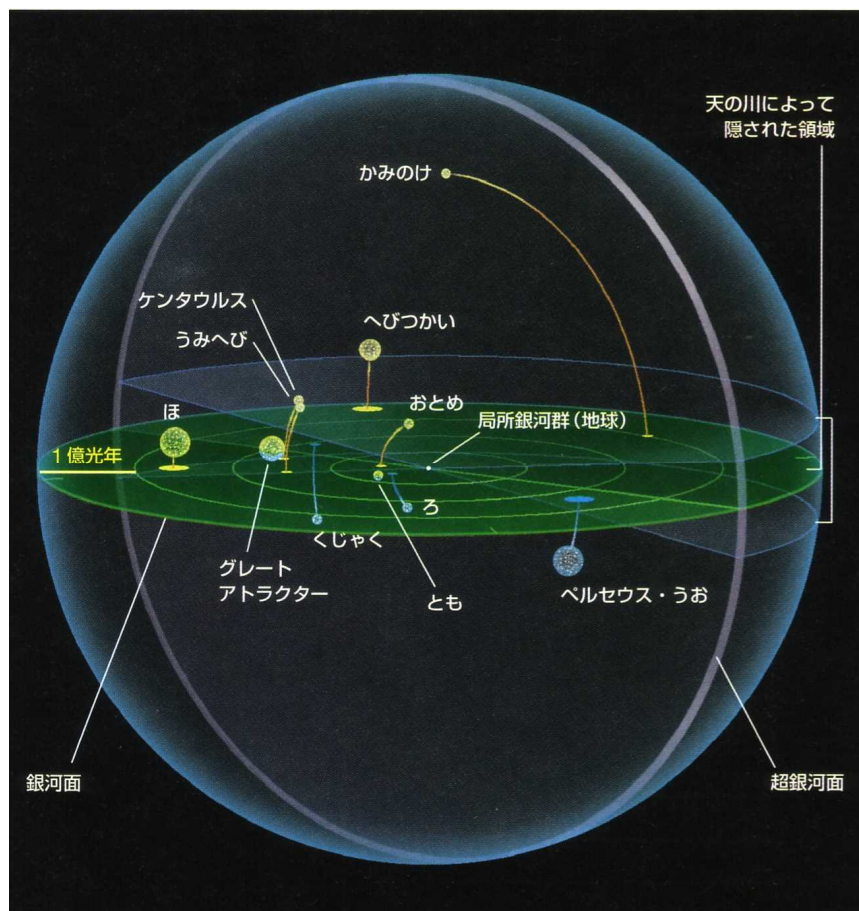


図 2・7・3 は半径 5 億光年の空間内の主だった銀河群を記入しています。「超銀河面」と書かれた平面に銀河系付近の銀河密集面(グレートウォール)が通っています。

図 2・7・3 銀河系近傍の 3D 宇宙地図 (別冊日経サイエンス 140, p45)

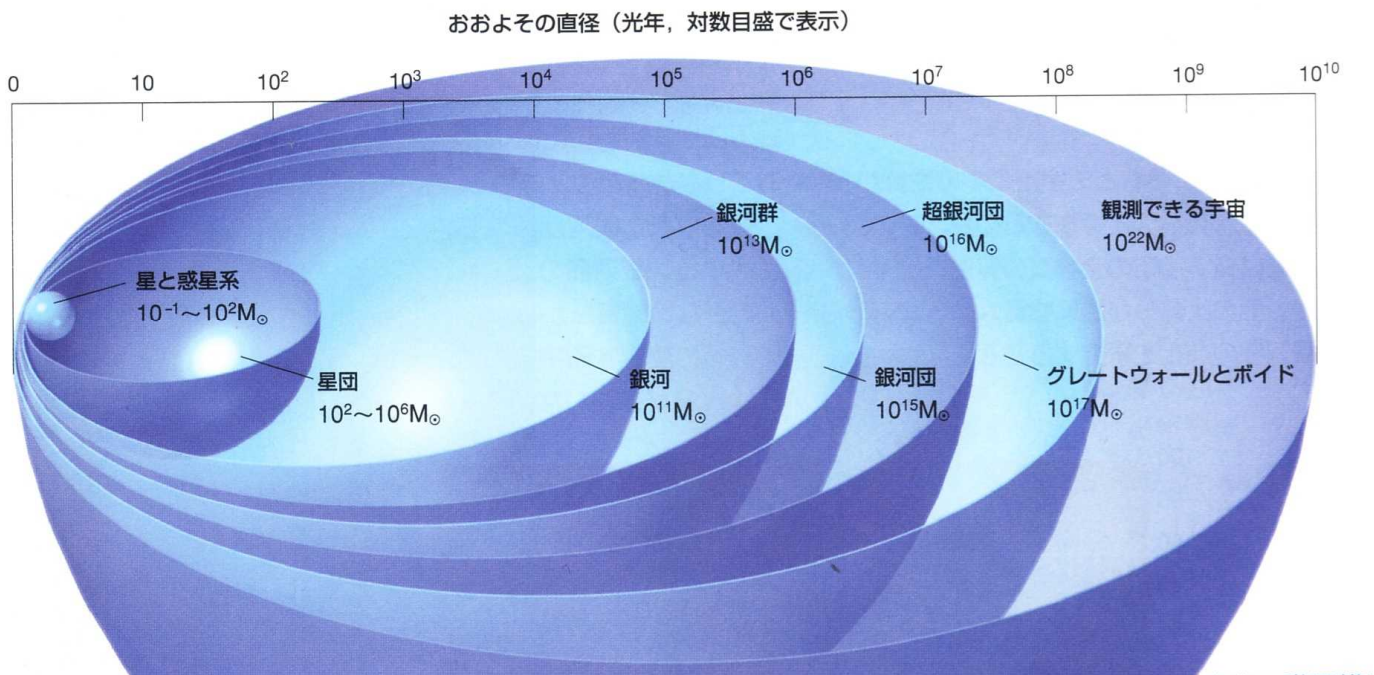


図 2・7・4 宇宙の階層構造（「見えてきた宇宙の姿」／別冊日経サイエンス 140,p34）

図 2・7・4 は宇宙の構造には階層性があることを示した図です。

重力で集まっている最も大きな天体は銀河団で、その質量は太陽質量のおよそ  $10^{15}$  倍です。

超銀河団やグレートウォール(泡の面) など より大きな構造はありますが、これらは重力的には束縛されていません。

## 5. 宇宙論 Cosmology

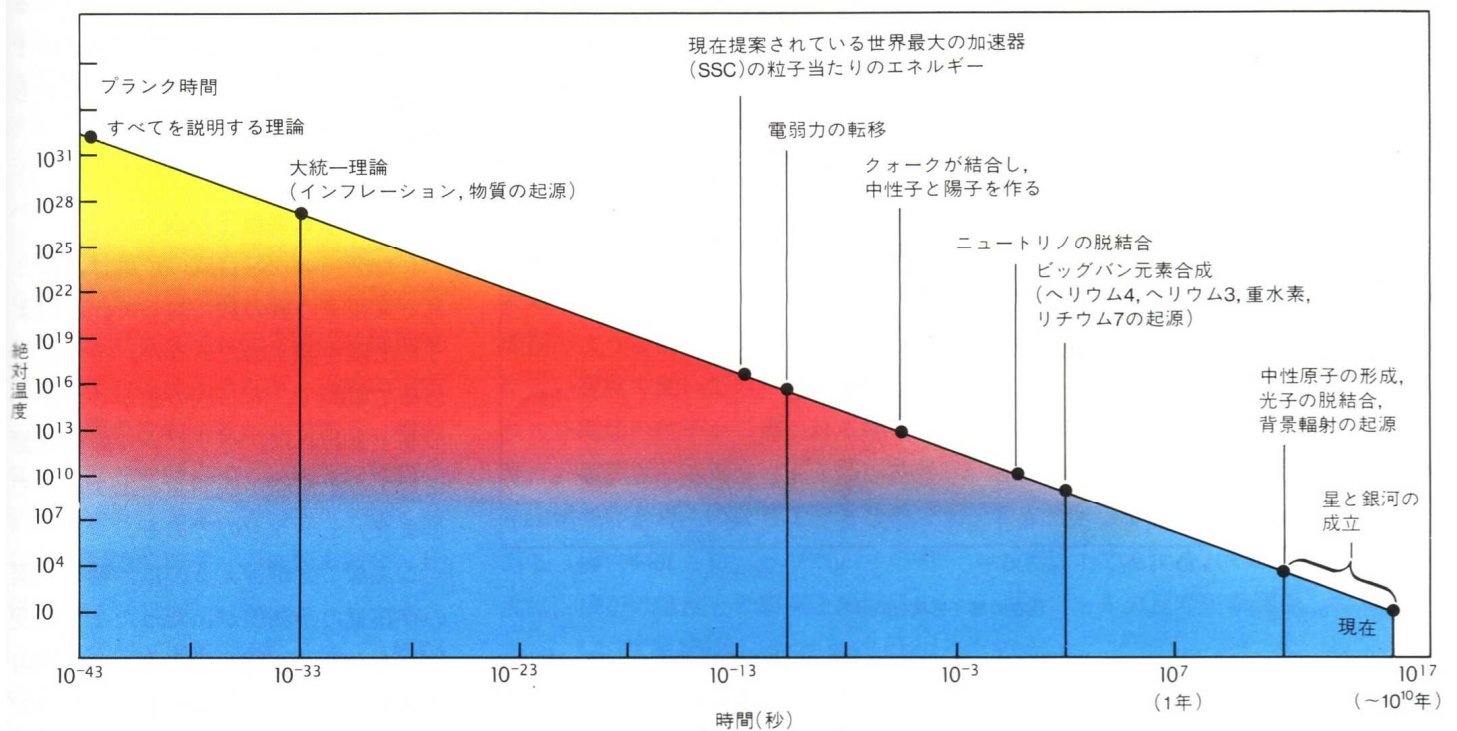


図 2・8・1 宇宙の熱と時間の歴史（日経サイエンス別冊 89,p47）



## 5・1 ビッグバン理論の定着

1927年、ベルギー生まれのカソリック司祭で天文学者ルメートル(Georges H. Lemaître) は一般相対性理論から導き出した結果に基づき、宇宙は原始的原子の爆発から始まったとする理論モデルを提唱(宇宙年齢は100~200億年と予想)しました。

1929年にはウィルソン山天文台のハッブル(Edwin P. Hubble) は我々の銀河系の外にも銀河があり、それらの銀河からの光が赤方偏移(Red-shift)しており、セファイド変光星の変光周期と視等級から銀河までの距離を出し、「地球からの距離に比例して赤方偏移が大きい(遠ざかる速度が早い)」との「ハッブルの法則」を導き出して、「膨張宇宙論」という現代宇宙論の基礎を築きました。

1930~1960年代にかけて、ルメートル説と「確かに遠ざかるが、それを補う物質創造が定常的に行われている」とするホイール(Fred Hoyle)の「定常宇宙説」が論争を繰り広げました。ルメートル理論を揶揄して「ビッグ・バン(Big Bang)」と名付けたのはホイールです。

1948年、ガモフ(George Gamow) はビッグバン理論の研究から、「宇宙マイクロ波背景放射(CMB)」の存在を予言し、「軽元素の存在比率値」を算出します。前者は1964年に発見され、3°Kの黒体スペクトルに一致することが確かめられました。この時点でビッグバン理論が確立しました。また、ビッグバン理論による水素1に対する他の元素比はヘリウム約0.25、重水素約 $10^{-3}$ 、三重水素約 $10^{-4}$ 、リチウム約 $10^{-9}$ ですが、その後の測定値とよく一致しています。

図2・8・1はビッグバン理論による時間経過(秒)と宇宙の温度の低下を示しています。

中央に「電弱力の転移」とあるのは、この温度で「電磁相互作用」と「弱い相互作用」が分離されるとするもので、既に「電弱統一理論(Weinberg-Salam Theory)」として完成し、提唱者は1979年のノーベル賞を受賞しました。

「大統一理論(Grand Unification Theory)」略称GUTは「電磁相互作用」「弱い相互作用」「強い相互作用」を統一しようとするものです。これまでの試みSU(5)理論では陽子の寿命は $10^{30}$ ~ $10^{32}$ 年でしたが、それを検出できる筈のカミオカンデを設置したが陽子の自然崩壊例が得られず、理論に欠陥があると判断されました。その後、急遽ニュートロン天文学用に改造してSN1987Aの測定に成功した幸運な(?)経緯があります。アインシュタインも後半生はこの理論の完成に注力しましたが、結果を出すことができませんでした。つまり、まだ完成していない、人類にとって大変に手強い理論なのです。

CERN(European Organization for Nuclear Research)で2009年末から本格稼働したLHC(Large Hadron Collider)はGUTの進展に役立たせようとする人類の共同プロジェクトです。

「万物理論(Theory Of Everything)」(全てを説明する理論)略称TOEはこれらに「重力」を統合させる理論で、「重力波測定装置」もまだ結果を出していない現状では、理論の構築と検証は大分先になりそうです。あなたは、その完成を見るかも知れません。

## 5・2 ビッグバン理論の説く宇宙進化

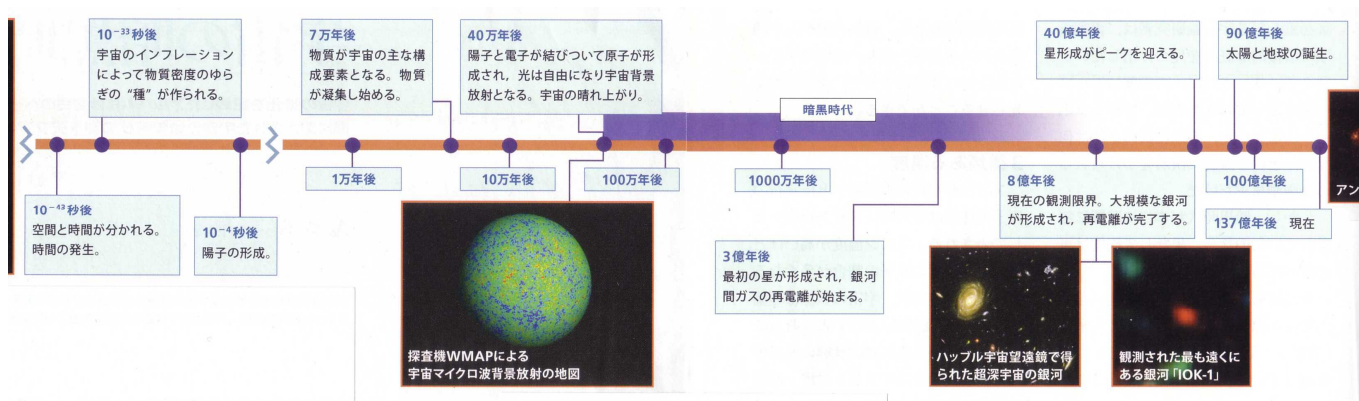


図2・8・2 宇宙の誕生から現在まで(「宇宙の暗黒時代を探る」/日経サイエンス 2007/2 p40~41)



図 2・8・2 はビッグバン理論に基づく宇宙進化論のシナリオです。左から時間を追って説明しましょう。

- (1) ビッグバンの  $10^{-43}$  秒後、(2)  $10^{-33}$  秒後は、まだ議論が落ち着いていない分野なので、説明を差し控えます。空間が光速を超えて指数的に急膨張するインフレーションと呼ばれる時期があったという仮説は、確かに観測結果をよく説明していますが、そのように働いた場の実体が確定されていません。この分野は 20 年後、50 年後の進展を見たいものです。
- (3)  $10^{-4}$  秒後、陽子が生成しますが、放射優勢の時代です。現代の物理学が取り扱える範囲になります。
- (4) 7 万年後、放射優勢の世界から物質優勢の世界への転換点です。
- (5) 40 万年後、陽子が電子を捕らえ、電磁波が電子に邪魔されずに進行できるようになる「晴れ上がりの時代」です。宇宙マイクロ波背景輻射 CMB は当時の超高温度空間で熱平衡状態にあった電磁波が、空間の拡大によるドップラー効果(遠ざかるサイレンの音は低くなる)により波長が長くなった現象です。
- (6) 3 億年後、最初の星々が形成され、星々の放射エネルギーを受けて星間ガスの再電離が始まります。
- (7) 8 億年後、現在の観測天文学で観測可能な限界で、これより前の星の姿は見ることができていません。
- (8) 40 億年後、星の形成のピークの時期です。
- (9) 90 億年後、太陽系の誕生の時期です。
- (10) 現在です。

1989 年の NASA の探査衛星 COBE は CMB(宇宙マイクロ波背景輻射)が  $10^{-5}$  の精度で等方的(全方向で等しい)と結論づけました。2003 年の WMAP 探査機による CMB の揺らぎ( $10^{-6}$  レベル) の全天画像を図 2・8・3 に示します。

これらは現代の宇宙論の強力な検証データです。観測装置や実験装置の高性能化と高精度化、観測データの膨大な蓄積に基づき、宇宙論も長足の進歩を遂げました。

しかし、科学に新しい前進があると、これまで気付かなかった新しい課題が科学の最前線に現れます。

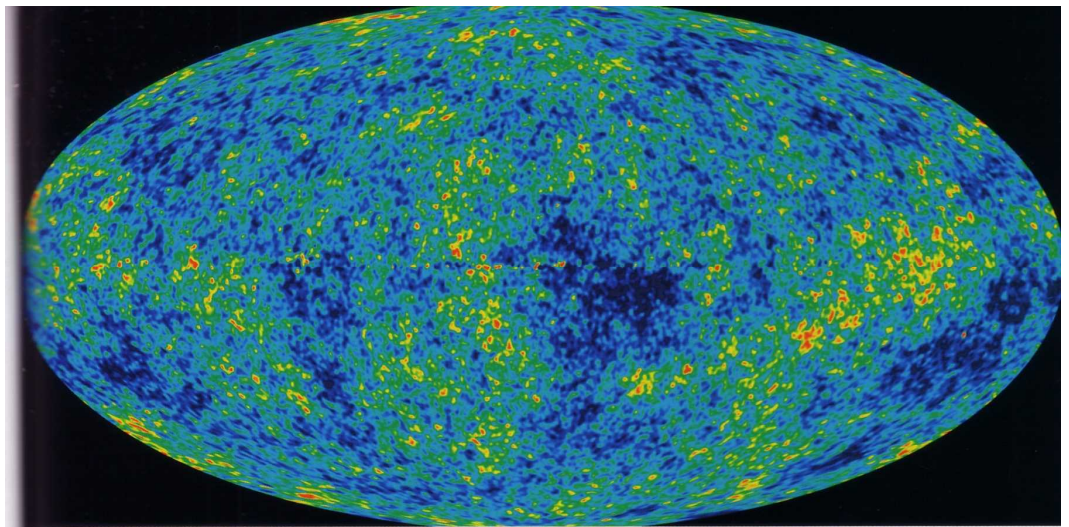


図 2・8・3 WMAP による宇宙マイクロ波背景輻射

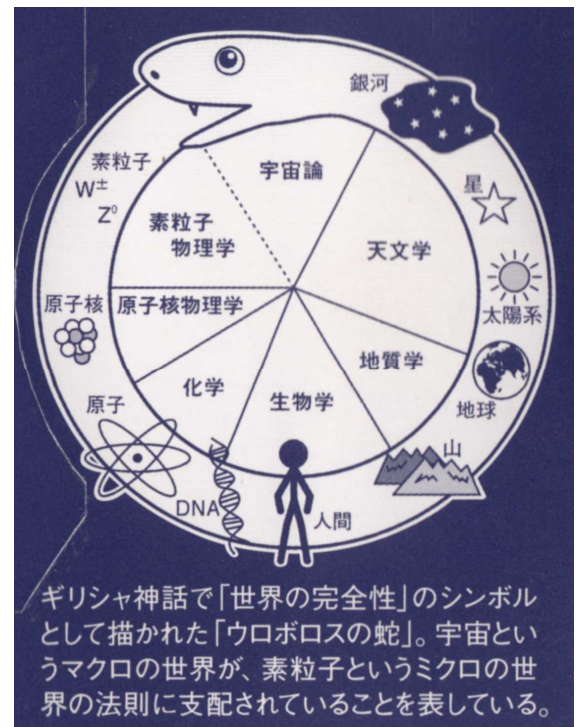
1990 年代から、多数の Ia 型超新星の観測データが集まるに連れて、約 47 億年前頃より宇宙が加速膨張していると考えざるを得ない事象が多数認められるようになりました。これら各種の観測結果を総合して、WMAP を運営した NASA の研究グループは 2003/2/11、次のように発表しました。

- (1) 宇宙の年齢は 137 億年  $\pm$  1 %
- (2) 宇宙空間は限りなく平坦である。
- (3) 宇宙を構成するのは、①普通の物質が 4 %、②ダークマターが 23%、③ダークエネルギーが 73%。

現在、ダークマターの質量による重力レンズ効果を使って、ダークマターの分布図が作成されつつあります。また、前述 **CERN** の国際プロジェクト大型ハドロン衝突加速器 **LHC** によって、その正体についてのヒントが得られる可能性が期待されています。

ここへ来て、極大の世界・宇宙を理解するには極小の世界・物質を理解せねばならぬことが明確になりました。

極大と極小は右図の「ウロボロスの蛇」のように、不可分の関係にあります。このテキストの範囲外になりますが、現在の物理学では原子核の陽子や中性子等の「強い相互作用」を受ける重い粒子であるハドロン(Hadron)を構成するクォーク(Quark)が6種あり、軽い粒子であって「強い相互作用」を受けない電子やニュートリノなど6種のレプトン(Lepton)があり、電磁力の担い手・光子や「強い相互作用」を担う8種のゲールオンなどの力を介在する粒子ボゾン(Boson)が計12種、既に各種の実験装置で発見され研究されています。これらに質量を与えていると考えられるヒッグス粒子を発見するのがLHCの最重要目的となっています。



原子(Atom) がその名のような「分割できないもの」ではなかったように、これらの**素粒子(Elementary Particle)** もこんなに種類が多くては「(物質の)基本になる粒子」との名が泣きます。既に「電磁気相互作用」と「弱い相互作用」の二つは、高温度では同じであったものが温度が下がって別なものとして現れているとする「電弱統一理論」が完成したように、これらの素粒子も恐らくは同じものの異なった側面なのでしょう。数学的に成立する新しい理論が新しい実験装置で検証され、新しい実験装置は未知な現象を発見してそれを解決できる新しい理論を懸命に考え出すという **plan⇒do⇒see⇒check** のサイクルを、約3世紀にわたり、世代を繋いで人類は営々と続けてきました。今回も何らかの新しい発見が、物質や宇宙についての人類の理解を進展させてくれると信じます。

**ダークエネルギー**(暗黒エネルギー)とは負の重力(斥力)を有するエネルギーで、空間自体が有する基本的特性ではないかと想定されています。空間の体積に比例してダークエネルギーが増加すると、ある範囲の空間に含まれる普通の物質やダークマターは一定量なのに、空間が膨張するに連れてダークエネルギーは増えて膨張を加速させます。

量子力学は不確定性の原理により、空間には電子や陽電子に限らずあらゆる粒子のゼロ点振動が充満していると考えます。1948 年、カシミールは真空中の 2 枚の平行な金属板の間隙に存在可能な電磁波のゼロ点振動から、2 枚の金属板の間に発生する力の理論的予想をしました。これは 1998 年に精密な実験が行われ、カシミール効果は 5 % 以内で理論と合致しました。真空空間はゼロ点振動のエネルギーで充満しているのです。まだ、ダークエネルギーが真空エネルギーだとは証明されておらず、対抗理論が二、三ありますが、あなたはその決着を見ることができるでしょう。



前述のように NASA のチームは、①現在の宇宙の膨張速度を表すハッブル定数、②ダークマターによる膨張の減速、③ダークエネルギーによる膨張の加速、の3要素を加えて宇宙の年齢を137億年と推論しています。また、図2・7・2で紹介したSDSSの研究チームが2003/10/30に出した宇宙の年齢は141億年で、誤差範囲で一致していると考えられます。ルメートルは観測データも無い環境の中で、よく100~200億年と正しく予想したんですね。

## まとめ

先にお渡ししたテキスト「太陽系」に続き、このテキストでは原子核や電子の振る舞いを理解するために「第1部：物質」と準備し、「第2部：宇宙」と解説して来ました。

最後になってDark MatterだのDark EnergyだのとSFみたいになってビックリしたのではありませんか。「数学的モデルに適合する仮説を立て」、「観測や実験により仮説を実証する」プロセスを繰り返して、科学・技術は人類の叡智を集積し、現代に到りました。

このような科学・技術の進歩はガリレオやニュートンが活躍した17世紀頃から始まった人類の約4世紀にわたる継続的な事業です。先人の発見・発明の上に次の世代の人たちが新しいより洗練された技術による高精度の観測装置や実験装置を用いて新しい発見・発明を重ねて行く知識の集積の力は素晴らしいものです。

嘗て、ギリシャ時代には哲人たちは思い思いに仮説を立て、それを検証する手段が整備されていないため、各人の言いつばなしで終わり、知識の集積は限られたものでした。

中世には人類の知的活動は宗教的情熱に駆られて神学研究に費やされましたが、これまた実証できる筈のない対象ですから、神学論争は当人たちの熱意は認めるものの、後代に残る遺産はなく、徒労に終わるべき運命にありました。

中世の終わりから近代・現代の人類の科学・技術は、厳しい検証を経た理論や設計だけが生き残るルールが確立しているため、大きく道を誤ることなく、比較的真っ直ぐな進歩をしてきました。

この同じ期間、人類の社会活動はどうだったでしょうか。

西欧社会では君主の私有物扱いであった国が民族という求心力を持った**民族国家**となり、**産業革命**を経て列強による**帝国主義**と植民地獲得競争の時代の**第一次世界大戦**と**第二次世界大戦**、それが終わったと思うと**共産主義**と**民主主義**の覇権闘争「冷たい戦争」をやっと1990年代に終えて、今また、**テロ**の時代、イラクへの民主主義の押しつけの失敗、**バイオ**の進歩に追いつかない**倫理問題**、**地球温暖化危機**の時代へと、何れも容易には解決できない新しい問題が次々現れて、人類はその対応に必死の努力を重ねています。

科学の場合は対立する**仮説は実験・観測により検証され**、同じ対象についての異なった理論が何時までも残ることは稀です。

しかし、社会科学の場合はそうした客観的判断基準が乏しいため、科学の名に値する仮説・検証のプロセスを踏めないことが多い悩みがあり、多分、こちらの方が人類にとって手強い相手なのでしょう。

「汝、己を知れ」(アポロン神殿の入口に刻まれた古代ギリシアの格言)、人類自身を知るのが人類の最大の課題かも知れません。

私は科学・技術は人体でいえば頭脳、社会的活動はそれを支える身体だと思います。身体が健全でないと、頭脳も活動できません。この解決は今後の人類の重要な課題です。

最後に、現代の天文学に計り知れない貢献をしたハッブル宇宙望遠鏡の美しい写真を見ながら、人類の健全な発展を祈って、このテキストを終えましょう。

以 上



ハッブル宇宙望遠鏡

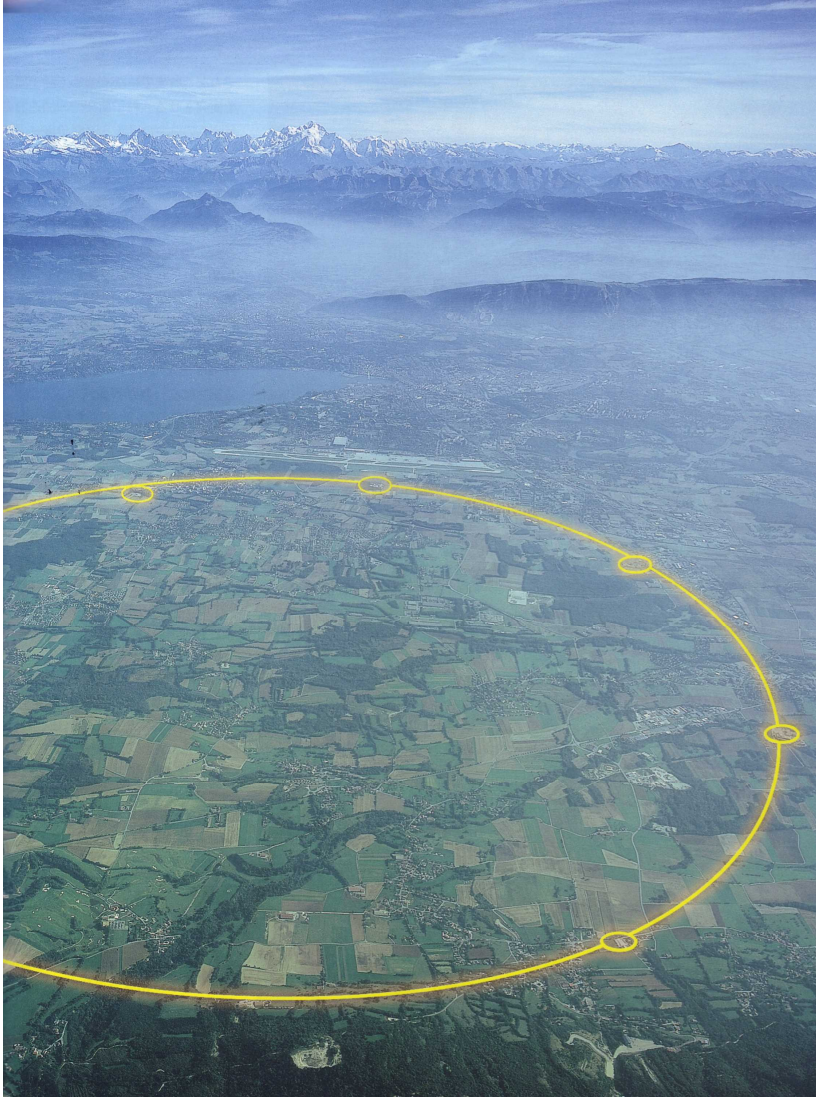
第2部で参考にした文献：

- 別冊サイエンス「新しい宇宙像／星の誕生と死」1973/9/10 刊
- 別冊サイエンス 25「現代の天文学／超新星とブラックホール」1979/6/15 刊
- 別冊サイエンス 69「高エネルギー天文学／X線で見た宇宙」1984/1/31 刊
- 別冊サイエンス 89「宇宙の巨大構造」1989/3/14 刊
- 別冊日経サイエンス 98「超新星爆発とパルサー」1991/4/15 刊
- 別冊日経サイエンス 136「宇宙論の新次元／理論と観測で迫る宇宙の謎」2001/11/19 刊
- 別冊日経サイエンス 140「見えてきた宇宙の姿」2003/4/17 刊
- 別冊日経サイエンス 144「驚異の太陽系ワールド」2004/2/25 刊
- 別冊日経サイエンス 156「宇宙創生期」2007/6/18 刊
- Newton ムック「太陽と恒星」2008/1/15 刊
- Newton ムック「よくわかる天の川銀河系」2008/3/15 刊
- その他、日経サイエンス誌と Newton 誌の論文多数



補 遺 :

## 1. 巨大化する科学の道具



図H1・1 LHCの設置地域 (別冊日経サイエンス 156、p31)

左の図 H1・1 は手前がフランス領、奥はスイス領にかかる CERN(欧州原子核研究機構) の LHC(Large Hadron Collider) が地下約 100m に設置されている地域の俯瞰写真です。中央横長の滑走路はジュネーブ空港、遠景の山々はアルプス山系です。

LHC は 7 TeV に加速した陽子同士の正面衝突で得られる現象の観測装置で、ヒッグズ粒子や超対称性粒子の発見やグルーオンの性質の測定、微細ブラックホールの生成観測等を目的としており、全長 27 km、2009 年末から本格稼働に入っています。現在の世界最強の加速器で、装置だけの建設費が約 35 億ユーロに及び、プロジェクトの全ての費用は恐らく 1 兆円を超すと思われます。

円形加速器としては現代の最後の最強の装置になるでしょう。

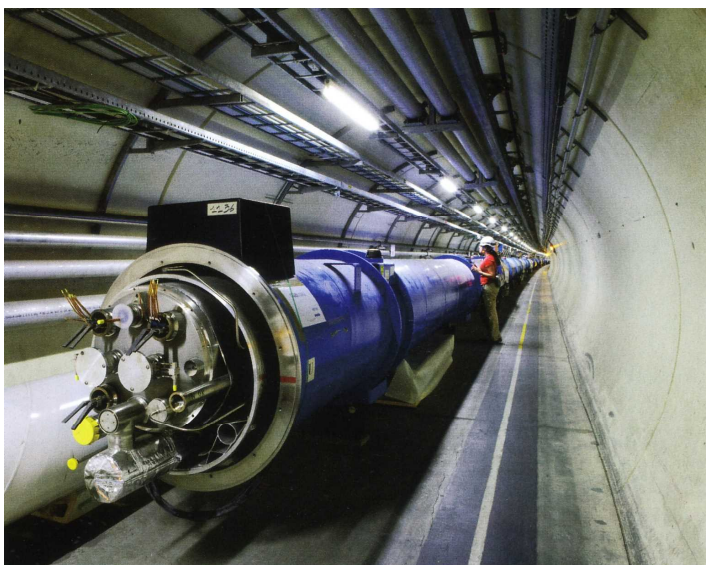
「米国議会は、建設開始から 4 年経った昨年の 10 月、突然、110 億ドル規模の SSC(超伝導・超大型衝突型加速器)計画の中止を決定した。SSC 型の加速器は、円周が大きいほど到達エネルギーが高い。大統一理論で予測されるエネルギー領域に到達するためには、加

速器の円周が 1 兆 km 必要になる。また、量子重力のエネルギー領域に到達するためには、1000 光年の大きさになる必要がある。… 著名な物理学者が、『統一理論は物理の射程外だから、諦めるべきだ。』という意見を提示した。…」

(日経サイエンス 1994 年 4 月号 123p～)

筆者注: Superconducting Super Collider は全長 90 km のレーストラック型超伝導シンクロトロンで陽子を 20 TeV まで加速する計画でした。既に 20 億ドルが投じられ、設置するトンネルは殆ど完成しています。原状回復に 10 億ドル要します。

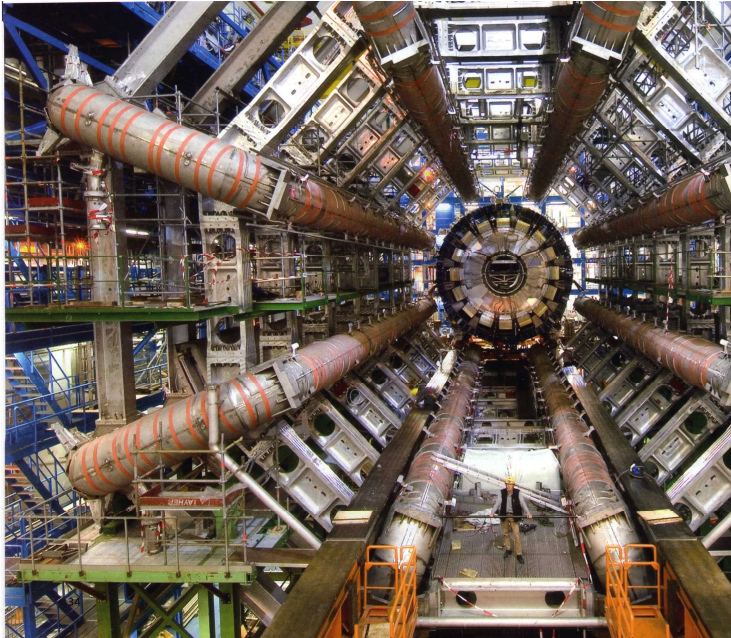
ここに挟んだ文で判ったと思いますが、米国でさえもはや 1 国では賄えないほどに科学の道具の費用が巨大になって来たのです。



CERN 超電導磁石 地下 100m のトンネル内に設置された LHC 超電導磁石。このような電磁石 1700 台が加速器トンネルの曲線に沿って置かれ、2 つの陽子ビームの軌道を曲げる。構造は右ページの図を参照。

図 H1・2 LHC の超伝導磁石 (同上 p32)



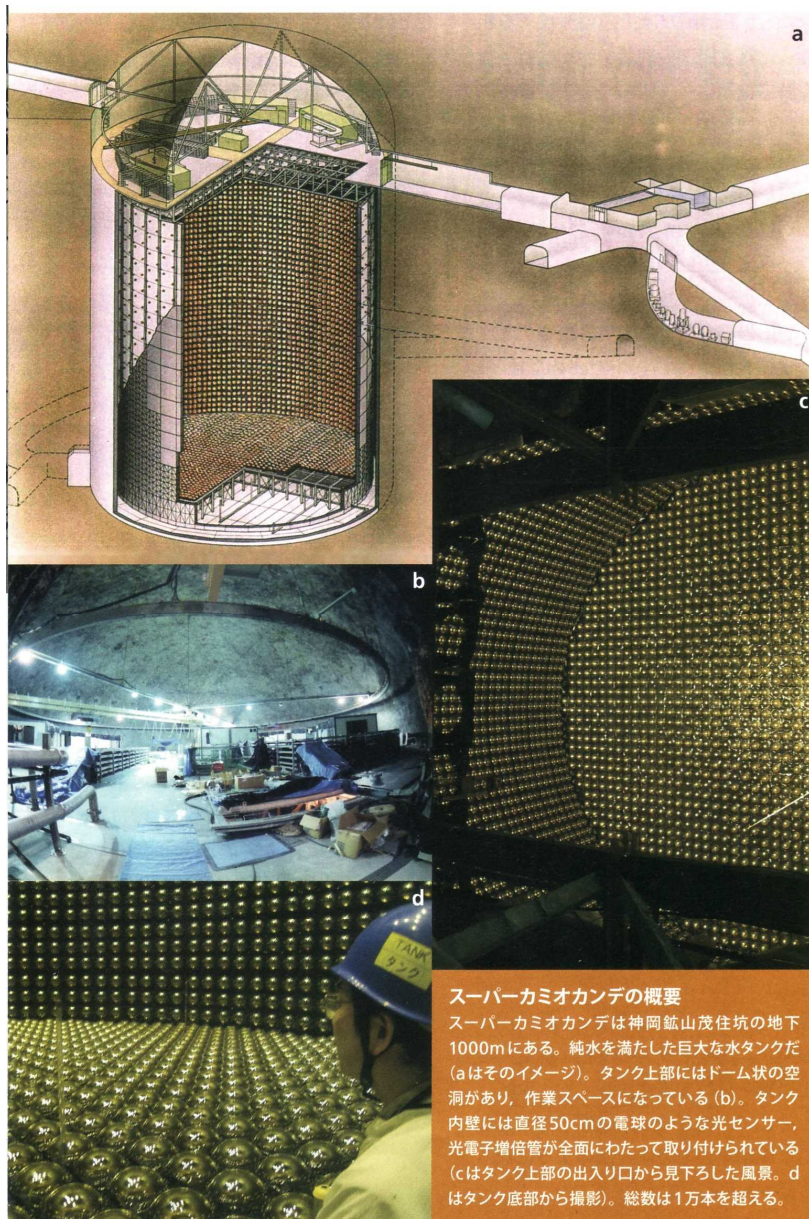


図H1・3 LHC の ATRAS 測定装置 (同上,p34)

左の図 H1・3 は LHC の 4 箇所違った目的用の検出器の一つ、重イオン衝突実験検出器で、地下に 6 階建てビルの空間を占めています。8 本のトロイド磁界用コイルの内部には、飛跡検出器、カロリメーター、ミューオン測定器、シンギャップチェンバー等がぎっしり同心円状に組み込まれます。

量子力学は「短い距離間で働く力ほど質量が大きい(エネルギーが大きい)粒子で担われている」「波長が短いほど、電磁波のエネルギーは大きい」という、極微の世界を探索する人類を阻むかのような厳しいルールがあります。

「力任せの科学の探究には、そろそろ限界が見えてきたのではないか」というのが、関係者の危惧するところです。巨大化する科学の道具は、科学が「収穫逡減の法則」の領域に入りつつあるとの警鐘なのでしょう。もし、LHC が期待通りの成果を出せなかったら、「仮説」→「検証」の環がここで途切れることになり、この先の理論は検証の機会を失います。そうなれば、検証できない仮説がずらりと並んだギリシャ時代に舞い戻ります。更なる科学の発展には、新しい智慧が求められています。



**スーパーカミオカンデの概要**  
スーパーカミオカンデは神岡鉱山茂住坑の地下 1000m にある。純水を満たした巨大な水タンクだ (a はそのイメージ)。タンク上部にはドーム状の空洞があり、作業スペースになっている (b)。タンク内壁には直径 50cm の電球のような光センサー、光電子増倍管が全面にわたって取り付けられている (c はタンク上部の出入り口から見下ろした風景。d はタンク底部から撮影)。総数は 1 万本を超える。

図H1・4 スーパーカミオカンデ (日経サイエンス 2008/05、p104) トリノ振動の発見を発表して、世界的な評価を得ています。





図H1・5 重力波検出装置 (別冊日経サイエンス 136,p78)

左の図 H1・5 は米国のワシントン州とルイジアナ州の2箇所にある LIGO という1辺4kmのレーザー干渉計方式の重力波検出装置です。これが現在世界最高の検出感度を有しますが、典型的な重力波は年数回、 $10^{-21}$ の距離の変化を生じ、これは地球と太陽の距離に対して0.1nmの変化に相当します。

日本にも国立天文台に1辺300mのTAMA300他3基の重力波検出器が稼働しており、その他の国にも類似の取り組みがあり、国際測定ネットワークが構成されています。

(本章は挿絵の図書を参照)

## 2. 惑星軌道の太陽からの距離と公転速度

ドイツの天体物理学者ケプラー(Johannes Kepler : 1571~1630 年)はティコ・ブライエの長年の観測結果を分析して、**ケプラーの法則**を導き出しました。

**第1法則**：惑星は、太陽を一つの焦点とする楕円軌道上を動く。

**第2法則**：惑星と太陽を結ぶ線分が単位時間に描く面積は、一定である。(面積速度一定)

**第3法則**：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。

(楕円軌道の単純な例として) 円軌道の場合の太陽からの距離  $r$  と軌道上の速度  $v$  の関係を導出しましょう。太陽の質量  $M$ 、惑星の質量  $m_p$ 、太陽・惑星間の軌道距離  $r$ 、惑星の軌道上の速度  $v$  とすると、

$$\text{太陽・惑星間の引力 } F_g = G \cdot M \cdot m_p / r^2$$

但し、 $G$ は重力の定数で

$$G = 6.67259 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\text{遠心力 } F_s = m_p \cdot v^2 / r$$

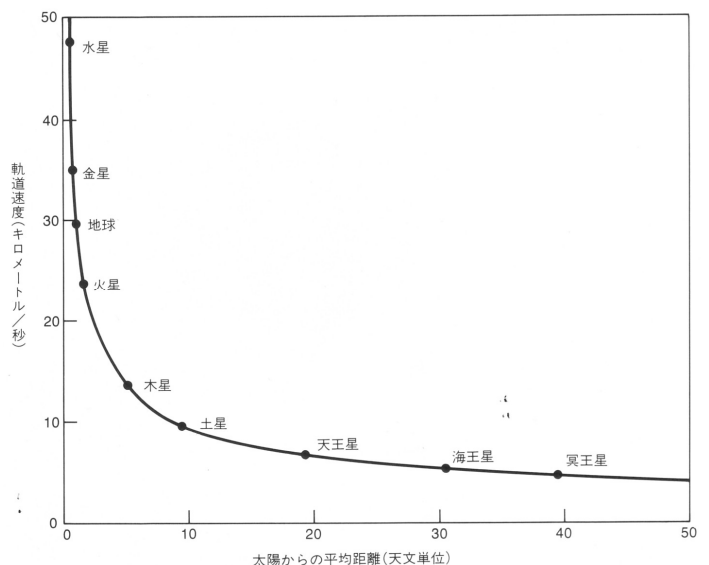
軌道上で引力と遠心力が釣り合っていますから

$$G \cdot M \cdot m_p / r^2 = m_p \cdot v^2 / r$$

両辺から  $m_p$  と  $r$  を一つずつ消して、 $v^2 = G \cdot M / r$

$$\therefore \text{軌道上の速度 } v = \sqrt{G \cdot M / r}$$

質量に関係なく、同じ軌道上の物体は同じ速度で太陽の周囲を巡ります。上の図H2 はその曲線に惑星の名を記入したものです。



図H2 太陽からの平均距離と軌道速度

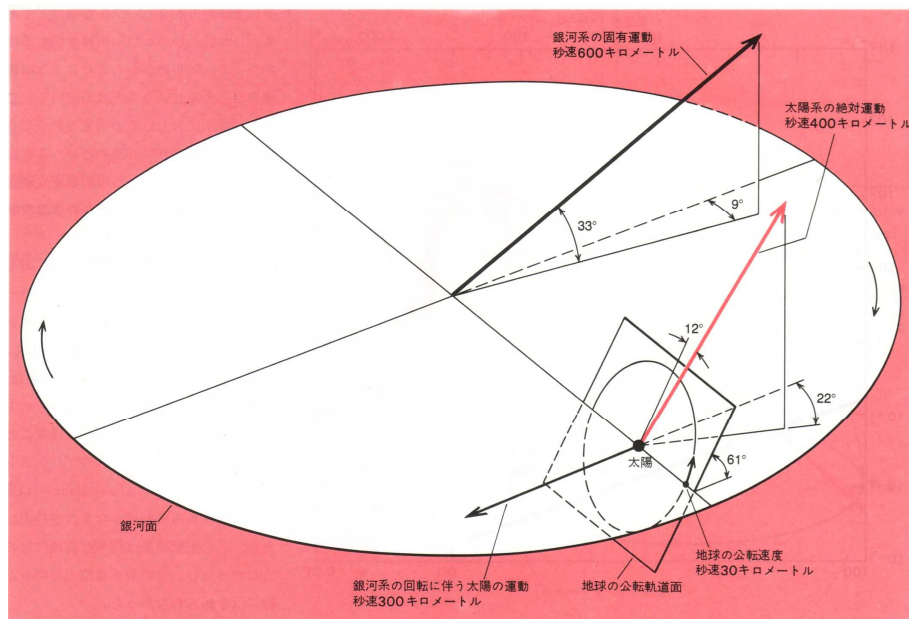
(別冊サイエンス「宇宙の巨大構造」1989/3/14, p54)

## 3. 宇宙に対する太陽系の絶対運動

ビッグバン後にプラズマ状態だった電子が、宇宙の温度が下がって原子核とペアを作って原子となり、空間



に自由電子がいなくなつて電磁波が自由に空間を飛び回れるようになった時期を「宇宙の晴れ上がり」と呼びます。その時期の超高温状態での熱平衡状態の電磁波が宇宙の膨張によるドップラー効果(遠ざかるサイレンの音は低くなる)で現在では3°Kの宇宙マイクロ波背景輻射 CMB になっています。CMB の全天での



図H3 地球の絶対運動 (別冊日経サイエンス 72,p35)

揺らぎは $10^{-6}$ 程度ですが、その揺らぎの僅かな違いを観測して、宇宙全体に対する太陽系の絶対運動を算定したのが、左の図H3です。地球は太陽を巡る軌道を秒速約30 kmで廻っています。太陽系は銀河系中心に対して秒速約300 kmで動いています。

そして3°Kの宇宙輻射の揺らぎから地球の運動を説明するためには、太陽系は図H3の赤ベクトルのように秒速約400 kmで動き、銀河系は黒ベクトルのように秒速600 kmで動いていることとなります。

#### 4. 特殊相対性理論

1887年に行われた Michelson-Morley experiment は「最も有名な、失敗した実験」と言われます。当時は宇宙にはエーテルが充満しており、電磁波はエーテルを媒体とする波動であると考えられていました。アメリカの物理学者マイケルソンとモーリーは、1個のコヒーレント光源(レーザー光線のように光の位相が安定)からの光をハーフミラーで直角2方向に分離して何回も往復させて総距離を大きくし、最後に干渉縞の検出をしました。地球はこの実験が保障する精度以上の速度で運動していますから、同一光源から発進した光波は進行方向と横方向では必ず到着時間の差が位相差として現れるはずですが、従って観測装置を回転させれば、二つの直角経路を通ってきた光波に位相差が発生して、干渉縞が変化する筈です。ところがどの方向で試みても差が出ません。移動体上で実験しても、干渉縞は安定で変化しません。この実験は「エーテルの検出には失敗しました」が「等速運動するどのような系で測っても、光速は同じである → 光速不変」を実証したことになります。(同タイトル Wikipedia を参照)

1905年、アインシュタインは、

- (1) 力学法則はどの慣性系でも同じ形で成立する (相対性原理)
- (2) 真空中の光は光源の状態に関係なく一定である (光速不変の原理)

の二つの原理の上に特殊相対性理論を構築し、20世紀の物理学の改革を先導しました。

この理論に依れば、慣性系Sの速度がゼロの場合はニュートン力学と一致しますが、慣性系Sの速度vが光速Cに接近すると、基準慣性系S<sub>0</sub>の時間t<sub>0</sub>、距離l<sub>0</sub>、質量m<sub>0</sub>に対し、慣性系Sの時間t、距離l、質量mは

$$t = t_0 \cdot (1 - (v^2 / C^2))^{1/2} \quad \dots \dots \dots \text{(H 4・1 式)}$$

$$l = l_0 \cdot (1 - (v^2 / C^2))^{1/2} \quad \dots \dots \dots \text{(H 4・2 式)}$$

$$m = m_0 / (1 - (v^2 / C^2))^{1/2} \quad \dots \dots \dots \text{(H 4・3 式)}$$

となります。この記号法では、「 $\cdot$ 」は掛け算、「 $/$ 」は割り算、「 $( )^{1/2}$ 」は平方根を意味します。  
元の慣性系  $S_0$  から速度  $v$  で移動する慣性系  $S$  を観測すると、時間  $t$  は遅くなり、距離  $l$  は短縮し、質量  $m$  は増加します。更に微分を含む若干の演算操作を行うと、

$$E = mc^2 \quad \dots\dots\dots (1.2.1 \text{ 式})$$

が導き出されます。この式こそ、「**質量はエネルギーのとる一つの形態である**」ことを表現するものです。  
CERN の LHC があれば大規模になっても、見た目の加速陽子の速度は光速(LHC を毎秒約 11,000 回) に近づく(光速の 99.9999991%まで接近) だけですが、その陽子は静止質量の約 7,000 倍の質量になって 7 TeV のエネルギーを担っています。逆方向から来る陽子ビームを数カ所の実験装置の中で交差させて正面衝突する 2 個の陽子が 14TeV のエネルギーで原子核を粉砕され、弾き出されて来る素粒子を観察するのです。

特殊相対性理論は日常の世界でも次のような現象により確認されます。①航空機や GPS 衛星に搭載した原子時計の遅れ、②光速に近い粒子の崩壊までの時間が厳密に理論に従う、③光速に近い電子の軌道を曲げると放射光(シンクロトロン放射) と呼ばれる接線方向の指向性が強い電磁波が生じる、④原子力の原理である、などで実感されます。  
(同タイトル Wikipedia を参照)

高速移動系の時間の遅れ(短縮) を思考実験してみましょう。未来のロケットで 2.8 万光年彼方の銀河中心に旅行するとしましょう。そのための加速プログラムと船内時計の所要時間を示します。

- (1) 中間点まで 1G で加速、以後 1G で減速  $\Rightarrow$  19.78 年
- (2) 全航路 1G で加速  $\Rightarrow$  10.64 年
- (3) 1G で加速、光速の 90%に達したら等速運動し、後 1G で減速  $\Rightarrow$  31,000 年
- (4) 中間点まで 10G で加速、以後 10G で減速  $\Rightarrow$  2.4 年

(Newton 別冊「時間の謎」/ニュートンプレス社 2001/7/10 刊)

## 5. 一般相対性理論

1915 年、アインシュタインは「エレベータのかご室内にいる人には、**重力と加速度の区別がつかない**」点に着目し、古典物理学の金字塔といわれる一般相対性理論を発表しました。特殊相対性理論が等速運動する慣性系についての理論であったのを、加速する慣性系に拡張した理論です。

正確には「**一般相対原理と一般共変性原理と等価原理**を理論基盤とし、**リーマン幾何学**を数学的土台として構築され、**測地線方程式とアインシュタイン方程式**を導き出す理論」ということになります。

ここではニュートンの万有引力は力学的な力ではなく、「**時空連続体の歪み**」として表現されます。

一般相対性理論は次のような現象により実証されます。①重力レンズ効果、②水星の近日点の移動、③重力波、④膨張宇宙、⑤ブラックホール、⑥重力による赤方偏移、⑦重力場での時間の遅れ。

(同タイトル Wikipedia を参照)

## 6. 宇宙がこれまでに消費した水素

これまでの説明でお判りと思いますが、太陽よりも何倍、何十倍と重い星でも、一生の最後には大量の物質を空間に放出し、白色矮星や中性子星になった状態では太陽の質量と余り変わらない程度まで軽くなっています。

放出された物質は星間物質となって再び新しい星を創る材料となります。この過程で水素がヘリウムやより重い物質に変換します。現在は宇宙が出来てから約 137 億年経過していますが、その間にビッグバン当時は



水素 76%、ヘリウム 24%でしたが、図 H6 に見るように、現在は水素が 6 %消費されて 70%となり、ヘリウムは 4 %増えて 28%に、最初は殆どなかったその他の元素が増えてが 2 %になっています。

このような輪廻を繰り返して少しずつ水素が他の物質に変換され、1 兆年後には水素は 20%、ヘリウム約 60%、その他の物質約 20%になり得るとミシガン大学の天文学者アダムズとラフリンが研究成果を発表しています。

(THE FIVE AGES OF UNIVERSE : INSIDE THE PHYSICS OF ETERNITY. Fred C.Adams and Greg Laughlin.Free Press,2000.)

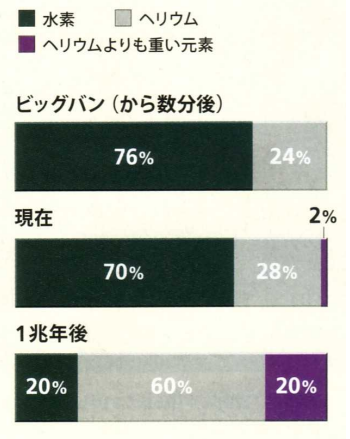


図 H6 水素の転換

## 7. 互いに遠ざかり、見えなくなる宇宙

「暗黒エネルギー」により約 47 億年前に宇宙は再び膨張が加速するモードに入ったことが確認されたのは 1998 年の事でした。

現在の天文学者たちが描いている膨張宇宙論の終末は次のようです。図 H7・1 は 50 億年後の地球から見る宇宙の姿の想像図です。太陽は赤色巨星になりつつあり、アンドロメダ銀河が銀河系に接近します。



図 H7・1 50 億年後の天空

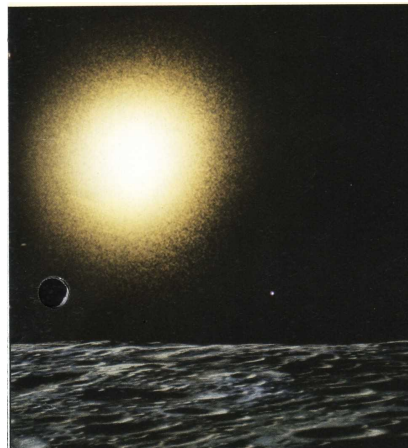


図 H7・2 1,000 億年後の天空

図 H7・2 は 1,000 億年後の地球から見る宇宙の姿の想像図です。銀河系とアンドロメダ銀河は合体し、球状星団に進化しています。地球は外縁部に移動した状態としています。他の銀河は空間の膨張により、全て視界から去りました。更に進んで 100 兆年後には、最後の恒星が燃え尽きて、宇宙は真っ暗になります。

(「宇宙の歴史が消える日」 L.M.クラウス、R.J.シェラー／日経サイエンス 2008/6、p28~29)

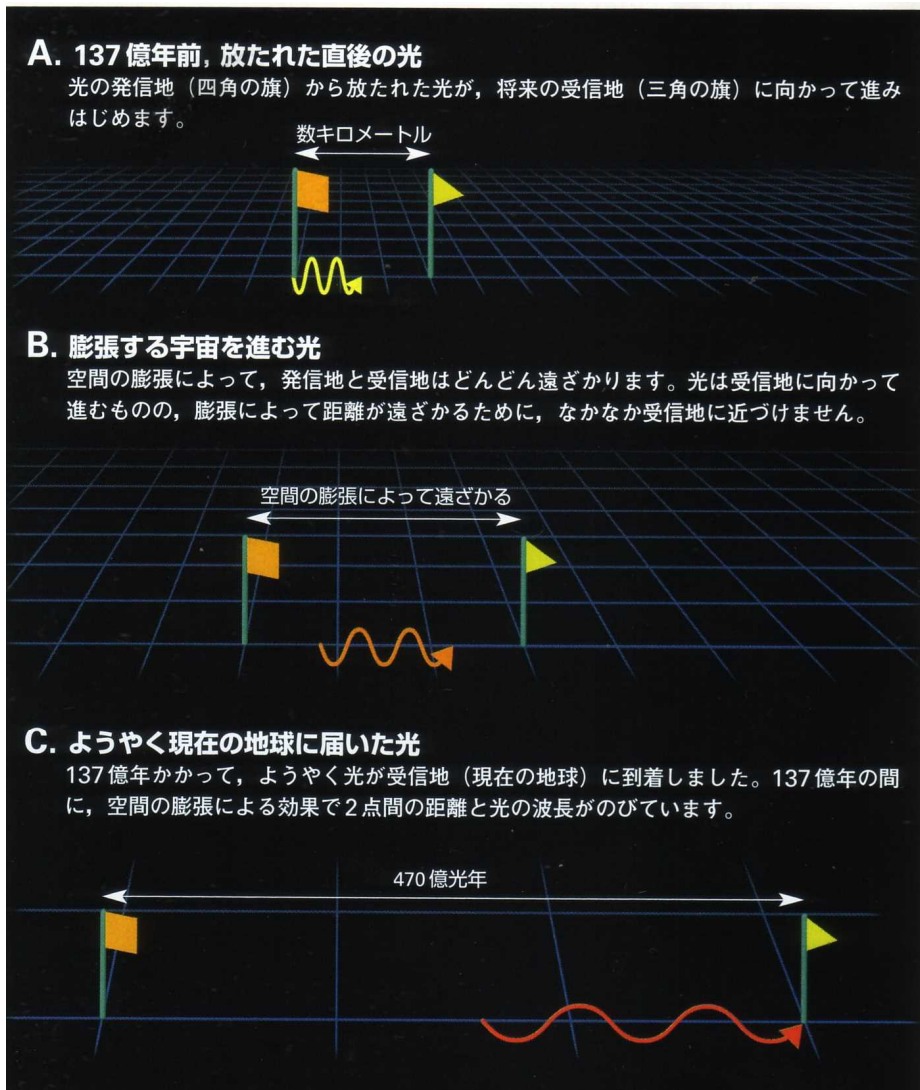
ブッダのいう通り、「この千変万化する場に不変で不滅のものは一つも存在しない」のが現実の世界の、宇宙の真理です。佛教では 56 億 7 千万年の後、弥勒菩薩が世を救うために現れるという弥勒信仰がありますが、現代の天文学が取り扱う 100 兆年後の宇宙とは、更にそれを大きく上回る気宇雄大な超長期的予報ですね。人体を構成する細胞の総数はおよそ 60 兆個、このことから 100 兆年という数の大きさを感じ覚的に掴んでください。

## 8. 我々はどこまで遠くの星を見ることができるのか

宇宙が誕生したのは 137 億年前でした。それなら 137 光年の彼方までなら理論上は見えると考えてよさそうです。ところが違うのです。もっと遠距離まで観測できます。宇宙の膨張により、137 億年前の宇宙の向こう端は、現在は 470 億光年彼方の位置まで移動しています。

理由の詳細は、次頁の図 H8 を参照してください。

空間の膨張速度は光速 C に束縛されません。ダークエネルギーによって、宇宙の膨張速度が加速される場合は、この理由から遠くの星から順繰りに地球から見える限界距離から去り、やがて近くの星しか見えなくなると考えられています。上図 H7・2 はその状況を表わしています。



図H 8. 膨張する空間と光との関係

2011年(平成23年)10月5日

# 宇宙膨張加速を発見

## 3氏にノーベル物理学賞



ソール・パール  
マッ＝AP



ブライアン・シュミット＝AP



アダム・リース＝AP

【パリイ古谷茂久】スウェーデン王立科学アカデミーは4日、2011年のノーベル物理学賞を米カリフォルニア大学バークレー校のソール・パールマッター教授(52)、オーストラリア国立大学のブライアン・シュミット特別教授(44)、米ジョンズ・ホプキンス大学のアダム・リース教授(41)に授与すると発表

授賞式は12月10日にストックホルムで開く。賞金1000万瑞典克朗(約1億1000万円)の半分をパールマッター氏、残りをシュミット、リース両氏に与える。

宇宙はこれまでどう進化した、将来はどうなるか。宇宙が正体不明の力によって、加速しながら膨張を続けていることを観測で確かめた。

超新星は星が寿命を終えるときに光り輝く現象。ピーク時の明るさが一定のタイプの超新星を利用すれば、はるかなたの宇宙と地球との距離を調べられる。

得られたデータを分析した結果、宇宙はますます勢いで加速しながら膨張していることがわかった。宇宙の膨張は以前は減速しつつあると思われていたが、3氏の発見により定説は覆された。このまま膨張が進めば宇宙は冷え込んでいくという。

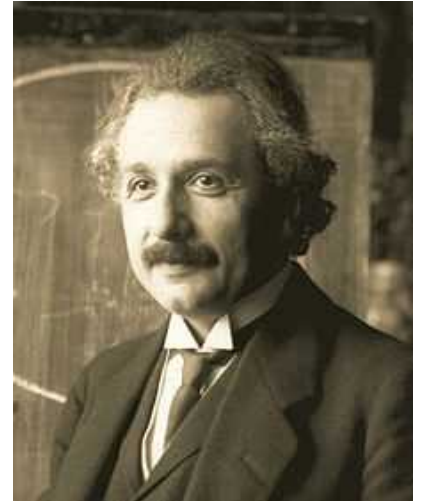
引力に逆らって膨張を加速する原動力は「暗黒エネルギー」と呼ぶ正体不明の力と考えられている。宇宙はこの未知のエネルギーで満ちあふれていると考えられるようになり、研究が進んでいる。

補遺了



## 9. 若い内は認められなかったアインシュタイン

Albert Einstein (1879～1955) はドイツ生まれのユダヤ系の理論物理学者です。特殊相対性理論および一般相対性理論、相対性宇宙論、ブラウン運動の起源を説明する揺動散逸定理、光量子仮説による光の粒子と波動の二重性、アインシュタインの固体比熱理論、零点エネルギー、半古典型のシュレディンガー方程式、ボーズ＝アインシュタイン凝縮などを提唱した業績により、20 世紀最大の物理学者とも、**現代物理学の父**とも呼ばれます。光量子仮説に基づく光電効果の理論的解明によって 1921 年のノーベル物理学賞を受賞しました。特に重力の本質に迫る一般相対性理論に関しては、「あの時(1917 年)に生まれなかったら、我々は今日もまだその理論を待ち続けたであろう」と最高級の賛辞が与えられています。



彼が人類史上の偉大な人物になる兆候は、最初は全くなかったようです。

3 歳まで話せませんでしたし、その後も話すのは不得意でした。数学に関しては傑出した才能を示し、9 歳のときにピタゴラスの定理の存在を知り、その定理の美しい証明を寝る間も惜しんで考え、自力で定理を証明した。12 歳のときユークリッド幾何学の本をもらい独習します。微分学と積分学も、この当時に独学で習得したといわれます。10 代のアインシュタインは教育を受けるため一人でスイスに赴きます。チューリッヒ連邦工科大学を受験して失敗、アーラウのギムナジウムに通うことを条件に、翌年度の入学資格を得ました。早い話、大学受験で 1 年浪人して予備校に通ったのです。1896 年に徴兵を免れるためにドイツ国籍を放棄してスイス国籍を取得し、チューリッヒ連邦工科大学に入学し、高校の理科教師を大量に養成する目的で設けられた 4 年の課程を履修します。彼は大学の講義にはあまり出席せず、自分の興味ある分野だけに熱中し、物理の実験は最低の 1、電気技術では優秀な 6 の成績をとっています。化学の実験中に爆発事故を起こし、学校をパニックに陥れたこともありました。彼は、教師には反抗的で、授業をよく休んでいます。聡明だったが、特別優秀とは評価されていません。

1901 年に学友のミレーバと恋に落ち、未婚のまま娘を設けたが、養育しきれないとの結論で養子に出しています。彼は子供に 1 回も会っていません。2 年後、二人は結婚し、翌年、長男のハンスが生まれます。

1902 年に彼はスイス連邦特許局の 3 級技術専門職(審査官)の仕事に就き、7 年間働きます。仕事は楽しく、熱意を以て取り組みますが、本当に好きな物理学も熱心に研究しています。

1905 年、博士号を取得すべく「特殊相対性理論」に関連する論文を書き上げ、大学に提出します。しかし内容が大学側に受け入れられなかったため、急遽代わりに「分子の大きさの新しい決定法」という論文を提出し、受理されています。この論文は「ブラウン運動の理論」に発展しました。彼 26 歳のこの年は「奇跡の年」として知られています。彼は「光量子仮説」「ブラウン運動の理論」「特殊相対性理論」に関連する五つの重要な論文を立て続けに発表しているからです。ニュートンもペストで大学が休校となって故郷に避難した 24 歳の 1 年半くらいで、生涯に掛けて発表することになる殆どの研究を並行的に行っており、物理学者として著名な二人の共通点を感じます。物理学における人生の旬は 20 代半ばなのでしょう。スポーツ選手の最盛期と良く似ています。要するに、人間の体力と気力と知力のピークがこの辺りにあるのでしょう。

ところで、物理学者たちは特許庁の審査官などの意見に本気で耳を傾けてくれません。彼の発表した論文には有益な情報がふんだんに入っていましたが、彼の論文はこの頃には殆ど注目を引きませんでした。

彼は大学講師の職に応募して断られ、次に高校教師の職に応募して断られ、審査官の仕事が続けます。

八方塞がりに見えますが、本人は自分の研究が何れ認められるとの強い自負があったと思います。

1907 年に特殊相対性理論の肝  $E=mc^2$  を発表し、一般相対性理論の鍵になる「加速度と重力は区別がつかない」との着想を得ます。

1909 年、特許局を辞し、チューリッヒ大学の助教授となります。この年には彼の生涯で初となる名誉博士号がジュネーヴ大学より授与されています。1910 年、プラハ大学の教授、1911 年、ソルベー会議に招待され、

同年プランクにより、ベルリンのカイザー・ヴィルヘルム物理学研究所の所長に推薦されました。経歴描写は此処までにしておきます。彼は押しも押されもせぬ物理学会の第一人者となりますし、研究も続けますが、自分が最初に途を拓いた量子論では非主流の理論に分け入り、現在も進展がない「統一場の理論」（「万物理論（Theory Of Everything）」）を生涯のテーマとしたため、1917年の一般相対性理論以後には、目立ったアウトプットは出ていません。彼の現役の研究者としての盛りは1920頃に終わったのだと思います。

数学や物理の重要な成果は20代の若い人たちから、バイオ関係は30～40代の壮年の人たちから、考古学や博物学や社会学の重要な成果は50～60代の高齢の研究者から出るケースが多く、その他の学問分野にもそれぞれに最高の仕事ができる適齢期があるようです。

1919年にミレーバと離婚し、1921年には「光電効果の発見」によりノーベル賞を受賞し、その賞金は離婚契約書通り、ミレーバに譲られています。

有名人となった彼は、多くの有益な社会的活動や平和運動などにも時間を割いています。ナチスからは国家反逆者の烙印を押され、アメリカ大統領へ原爆開発のマンハッタン計画を勧めるアピール文書に署名し、**TIME** 誌からは「今世紀の人」に選ばれるなど、物理学の根幹を書き換えたアインシュタインの功績は強調し過ぎることはありません。1955年4月、彼はプリンストン病院に入院し、手術を勧められるが拒否し、76歳の生涯を閉じました。

（Wikipedia／アインシュタイン、他）

補遺 了