

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

核融合研究の進展と宇宙のプラズマ

上原 和也 小山 孝一郎 下山 学

2007年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

核融合研究の進展と宇宙のプラズマ

上原 和也*¹ 小山 孝一郎*² 下山 学*³

Development of thermonuclear fusion research on the earth and the fusion in the universe

By

Kazuya UEHARA*¹, Koh-ichiro OYAMA*², Manabu SHIMOYAMA*³

Abstract: Development of thermonuclear fusion research on the earth and the fusion in the universe are reviewed. In this report, the principle of nuclear fusion is explained and the recent activities of the tokamak aiming thermonuclear fusion research are described. The problems towards the thermonuclear fusion research are considered and hot high beta plasma observed in the Jovian magnetosphere is discussed in connection with these problems. As for the fusion in the universe, the nuclear fusion in the sun is explained including other fusion reaction to yield the large mass elements. The hot plasma in the big-bang universe theory is given and the metaphysical meaning that the mankind will manufacture the artificial star is discussed raising the hypothesis of the Maxwell demon.

Keywords: thermonuclear fusion research in the earth, plasma in the universe, tokamak, hot high beta plasma, Jupiter, nuclear fusion in the sun, big-bang hot universe theory

概 要

地上の熱核融合炉研究と宇宙の核融合について述べる。この報告では最近のトカマクの研究を中心とした地球上での熱核融合炉開発の現状が述べられ、問題点も明らかにされる。これに関連して、木星の磁気圏で見つかっている高ベータプラズマの存在が中性子の出ないD-He³核融合反応の実現との関連で触れられる。宇宙のプラズマでは太陽における核融合と他の恒星での重い元素生成による核融合が論ぜられ、ビッグバン宇宙論における高温プラズマについても触れられる。

1. 地球上の核融合

原子力の平和利用で重い原子核の核分裂反応によるエネルギーの取り出しは原子力発電所で既に実用化され、現在日本の電力の30%近くが原子力発電所で供給されている。しかし、核分裂の際に生じる高レベルの放射性廃棄物の処理が問題となっている。次に、この核分裂で出てくる高速中性子を再び反応させて新たな核燃料が生成出来る高速増殖炉（Fast Breeding Reactor, FBR）を利用する原子力発電所が検討されている。この後、核融合を利用する原子力発電所が、今後30～50年

* 1 Japan Atomic Energy Agency 本論文は宇宙科学研究本部に於ける講演（2004年7月14日）を一部加筆してまとめたものである。
* 2 Tokyo Metropolitan University
* 3 JAXA/ISAS

後には登場するものと期待されている。核融合反応では重水素のような軽い原子核が融合して少し重いトリチウムやヘリウムの原子核が生成され、その際の質量欠損が運動エネルギーとして解放されることを利用する。このような反応は原子核同志のクーロン力に打ち勝って核力の及ぶところまで原子核同志を近づけなければ生じないので、気体の温度を極めて高温まで上げる必要がある。気体が数十万度以上になると、大部分の原子が原子核と電子とに分離した“電離状態”になる。電子を失った原子核はイオンと呼ばれ、イオンと電子とが共存するこのような状態はプラズマと呼ばれる。ここでは高温プラズマを用いた地球上での核融合達成の基礎と現状とを述べる。

1.1 クーロンポテンシャルとトンネル効果

質量 m_1 , m_2 の2個の粒子が衝突して質量 m_i ($i=3, 4 \dots$) の粒子に変わる時、反応前後のエネルギーの差がアインシュタインの関係式により運動エネルギー Q として解放される。

$$Q = m_1 c^2 + m_2 c^2 - \sum_i m_i c^2 \quad (1)$$

但し、 c は光速である。衝突する粒子の密度を n_1 , n_2 相対速度を v , 反応断面積を σ とすれば単位体積当たりの反応率 R_{fusion} は

$$R_{\text{fusion}} = n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle \quad (2)$$

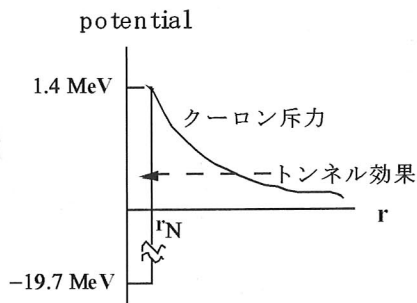


図1 原子核とトンネル効果

で与えられる。図1は核融合に際しての原子核のポテンシャルと距離 r の関係を示したものである。クーロン力は斥力であり、原子核の半径位置 ($r_N=10^{-15}\text{m}$) でポテンシャルの大きさは $Z_1 Z_2 e^2 / 4\pi\epsilon_0 r_N = 1.4 \text{ MeV}$ である。但し、 Z_1 , Z_2 は2個の粒子の原子番号、 e は電荷素量、 ϵ_0 は真空の誘電率である。このエネルギー以上のものでないとクーロン障壁を乗り越えられない。しかし量子力学によればトンネル効果で突き抜ける確率がある。これは、ロシア生まれの G. Gamow が星の核融合反応の研究で始めて定式化した。図1のようなポテンシャルでの2粒子のシュレディンガー方程式は波動関数を F , エネルギーを E として

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2\mu} \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r}\right) \psi = E \psi \quad (3)$$

ただし、 $\mu = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ 。この解は、極座標を使って次のようになる¹⁾。

$$\psi = v^{-1/2} \Gamma(1 + i\eta) e^{-\eta r / \xi} e^{ikz} F(-i\eta, 1, ik\xi) \quad (4)$$

但し、 $v = \hbar k / \mu$, $k = \sqrt{2mE} / \hbar$, $\eta = \mu Z_1 Z_2 e^2 / 4\pi\epsilon_0 \hbar^2$ (Sommerfeld パラメータと呼ばれる), Γ はガンマ関数, F は合流型超幾何関数である。 ξ は r を放物線座標に変えた時の $\xi = r - z$ である。反応断面積 σ_{coulomb} は

$$\sigma_{\text{coulomb}} = |\psi|^2 = \frac{2\eta\pi}{v(e^{2\eta\pi} - 1)} = \frac{1}{\sqrt{E}} \exp\left(-\frac{2\pi Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar v}\right) \propto \exp\left(-\frac{a}{E^{1/2}}\right) \quad (5)$$

但し、 $a = (2\mu)^{0.5} Z_1 Z_2 e^2 / 4\pi\epsilon_0 \hbar$ は比例定数である。この場合の $\exp(-2\pi Z_1 Z_2 e^2 / 4\pi\epsilon_0 \hbar v)$ は Gamow の因子と呼ばれ、原子核反応の支配的な項になっている。クーロン障壁を乗り越えても実際に核反応をするとは限らないので、核反応を起こす確率 σ_{nucleous} を考慮して実際の断面積は、

$$\sigma = \frac{\sigma_{\text{coulomb}} \sigma_{\text{nucleous}}}{v} = \frac{S}{E} \exp\left(-\frac{a}{E^{1/2}}\right) \quad (6)$$

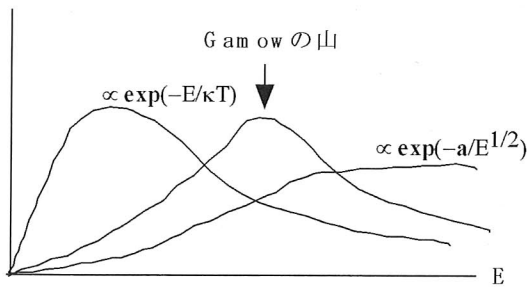


図2 核融合断面積のガモフの山

で与えられる．ここで， S はクーロン障壁の効果を除いた核反応の効果を表すもので，天体物理学的因子（Astrophysical factor）と呼ばれ，実験値から求められる．(6)式を使って，実際の核融合反応率は

$$\langle\sigma v\rangle = \frac{4S}{\sqrt{2\pi\mu}(kT)^{3/2}} \int \exp\left(-\frac{E}{kT} - \frac{a}{E^{1/2}}\right) dE \quad (7)$$

但し， T はプラズマの温度， k は Boltzmann 定数である．この積分の様子を示したのが図2である． $\exp(-E/kT)$ と $\exp(-a/E^{1/2})$ のピークの山がガモフの山と呼ばれる²⁾．

1.2 ローソン条件

地球上で利用可能な核融合反応は次のようなものである．重水素 D ，3重水素（トリチウム） T ，ヘリウム3 He^3 が核反応を起こして

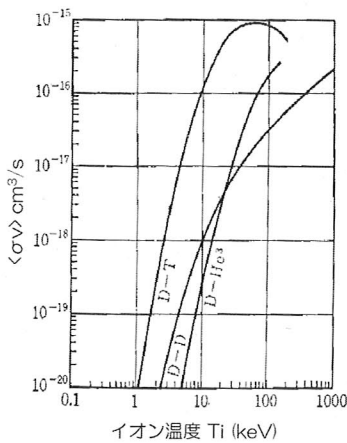


図3 核融合反応率 $\langle\sigma v\rangle$ とイオン温度 T_i

の反応により有意なエネルギーが生成元素の T ， He^3 ， He^4 ，陽子 p ，中性子 n の運動エネルギーとして解放される．図3は(7)式の核融合の反応率 $\langle\sigma v\rangle$ を(8)～(11)式の反応についてイオンの温度 T_i に対して示したもので，最も，楽な DT 反応でイオン温度 60 keV (約7億度)位で $\langle\sigma v\rangle=10^{-15} \text{ cm}^3/\text{s}$ となる (1 eVは温度換算で約11600度)．最終的にはトリチウム (T) の出ない DD 反応を目指すにしても，最初は DT 反応が取り上げられる．この時のプラズマの密度は 10^{20} m^{-3} 以上必要である．宇宙のプラズマから見ると，この密度はそれほど高くない．太陽中心では温度は1500万度 (1293 eV) 程度だが，密度は $10^{25} \text{ m}^{-3} \sim 10^{31} \text{ m}^{-3}$ もある．太陽では重力という強力な閉じ込め機構が働いているので，非常に密度の濃いプラズマが閉じ込められて，温度が低くても核融合が持続している．核融合が持続するために投入されるエネルギーの総和は核融合反応を含めて出てくるエネルギーの η 倍で $P_L + P_b = \eta (P_L + P_b + P_T)$ である．但し， η は発電効率で $\eta < 1$ である．この内訳はプラズマ粒子として失われるもの ($P_L = 3nT/\tau_E$)，放射として失われるもの ($P_b = \alpha n^2 T^{1/2}$)があり，核融合出力は $P_T = (n^2/4)\langle\sigma v\rangle Q_T$ である．これを書き換えるとプラズマの密度を n ，温度を T (eV)，閉じ込め時間を τ_E (sec) として，

$$n\tau_E = \frac{3T}{1 - \eta} \frac{Q_T \langle\sigma v\rangle - \alpha T^{1/2}}{4} \quad (12)$$

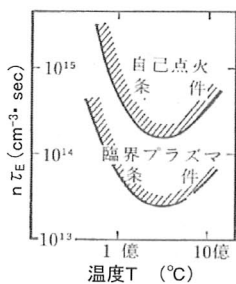


図4 自己点火条件と臨界条件

となる．ここで， Q_T は上述の(8)～(11)式の括弧内のエネルギーの総和である．これを核融合のローソンの条件という．通常の熱エネルギーの発電効率は $\eta = 1/3 \sim 1/2$ である．これを $n\tau_E$ と T_i についてグラフ化すると図4のようになる． $P_L + P_b$ のエネルギーは全て外部入力与えられる．この値と P_T との比が $Q (= P_T / (P_L + P_b))$ 値で， $Q=1$ の時は投入したパワーが核融合パワーとして出てくる状態である (臨界条件 (Break even) という)．自己点火条件 (外からエネルギーを投入しなくても核融合でエネルギーがどんどん得られる状態) は $Q=\infty$ で生成された α 粒子 (He^3, He^4 の原子核) がプラズマ内でプラズマを加熱してエネルギー損失を補う³⁾．

このような核融合は星 (恒星) の中で起こっているが，地球上では不幸にして水素爆弾の中で初めて起こった．水素爆弾は外周に原子爆弾の燃料であるウランやプルトニウムを置き，中心に

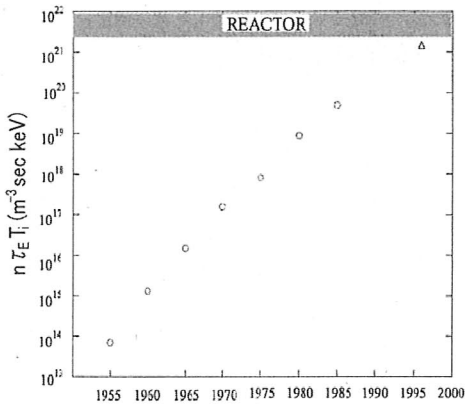


図5 核融合積 $n\tau_E T_i$ の年次毎の進歩⁴⁾

核融合の燃料である重水素やトリチウムを配して、原子爆弾の爆発的なエネルギーで核融合反応を瞬間的に起こしたものである。このように、瞬間的に温度を上げてしまうと、エネルギーの取り出し方は無制御状態となってしまう。人類がエネルギーを平和利用的に取り出すには、徐々に温度を上げて制御出来る形で反応を持続させる必要がある。これが地上での核融合が制御熱核融合と呼ばれる所以である。地上の制御熱核融合では恒星のように重力を使うことは出来ない。ここでは、高温プラズマを磁場を用いて閉じ込めて核融合反応を起こさせる方式（磁気核融合という）について取り上げる。核融合を起こすには図4に示すように、プラズマの密度 n と閉じ込め時間 τ_E それに温度 T_i を上げて斜線の上の領域に持ってくれば良い。図4の温度は $^{\circ}\text{K}$ で目盛っているが 1 eV は上述したように $11600\text{ }^{\circ}\text{K}$ である。図4の縦軸の $n\tau_E$ と横軸の T_i との積の値 $n\tau_E T_i$ （核融合積という）で今までに達成された実績を見ると、図5に示すように、40年前の1970年代は $n\tau_E T_i$ の値は非常に小さいが（ $n\tau_E T_i = 10^{17}\text{ m}^{-3}\text{ s keV}$ ）、年を追って向上しているのがわかる。あと一息で臨界条件（図5では、REACTORの表示。 $Q=1$, $n\tau_E T_i = 5 \times 10^{21}\text{ m}^{-3}\text{ s keV}$ ）を達成できる⁴⁾。この結果は旧ソ連で1965年頃、サハロフとアルチモビッチ等によって開発されたトカマクという実験装置で主に得られているものである。

1.3 トカマク

トカマクはドーナツ状の真空容器（トーラス）にトロイダルコイルによるトロイダル磁場 B_t 、プラズマ電流によるポロイダル磁場 B_p の組み合わせで、網状の籠になったような磁気面の中に高温プラズマを閉じ込めているもので、磁気核融合装置のトップランナーである。プラズマ電流はトーラス状に巻かれたポロイダルコイルに非定常的な電流を流し電磁誘導で発生させる。閉じた磁気面の中では基本的にはプラズマは外に逃げ出すことはない。高温プラズマを保持する為には、高温プラズマを真空容器から離し磁場中に閉じ込めなければならない。その為には磁場の圧力 $B^2/2\mu_0$ によって、プラズマを押し込め、プラズマ電流 j とプラズマの圧力 p とバランスする平衡状態を作る。平衡の式は

$$j \times B = \nabla p, \quad \mu_0 j = \nabla \times B \quad (13)$$

と与えられる。ただし、 μ_0 は真空中の透磁率である。この2つの式を積分した時出て来る磁場の圧力 $B^2/2\mu_0$ とプラズマの圧力 p の比

$$\beta = \frac{nT}{B^2/2\mu_0} \quad (14)$$

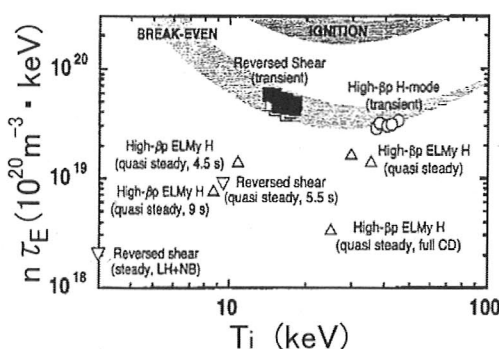


図6 JT-60 U の核融合実験⁵⁾

をベータ値と呼んでいる。これは、磁場でどれくらい的高温プラズマを閉じ込めているかの目安になる。図5の実験では $\beta = 0.01$ くらいである。この値が高いと小さな磁場で大きなエネルギーのプラズマを閉じ込めていることになる。核融合出力 P_T はベータ値の二乗に比例する。プラズマが生成されたばかりの状態では温度はそれほど高くないので高速のイオンビームや高周波（電磁波）を投入してイオンビームとプラズマとの衝突過程や電磁波のプラズマ中への減衰過程でプラズマを加熱し、温度を上げる方式がとられる。図6は日本原子力研究開発機構のJT-60 Uというトカマク型実験装置で最近まで得られている結果である（ $1\text{ m}^3 = 10^6\text{ cm}^3$ なので図4と同じ比較で見るとは 10^6 倍すれば良い）。縦軸は $n\tau_E$ 、横軸はイオン温度 T_i である。これらの結果はあとで説明するが、負磁気シア（Reverse Shear）という放電で得られたデータで Breakeven 臨界（ $Q_{DT}^{\text{equ}} = 1.25$ ）に達している。しかし、この放電は重水素（D）を用いた DD 反応で、もし、トリチウム（T）を使っていたら（10）式の反応が起こり、臨界に達し $Q (=Q_{DT})$ が1を越えて1.25になるであろうという意味である。実際は、外部から $P_L + P_b$ に相当する外部入力を7.6 MWも投入しているのに核融合出力 P_T は43 kWくらいしか得られていない。即ち、 $Q = Q_{DD} = 5.6 \times 10^{-3}$ である。

この時の条件は、 $B_p=4.3\text{ T}$ 、プラズマ電流 $I_p=2.61\text{ A}$ 、密度は $4.3 \times 10^{19}\text{ m}^{-3}$ 、 T_i は 16.8 keV (1億9千万度) であった⁵⁾。

1.4 5億2千万度のプラズマ

図7の放電は密度が低くて臨界には達していない ($Q_{DT}^{equi} = 0.21$) が、イオン温度 T_i が非常に上がった放電である。密度が少ないということは粒子の数が少ないから、温度が良くあがる。Hモードでイオン温度で 45.0 keV のプラズマが得られている。これは温度換算で5億2千万度である。これは、現在地球上で得られている最も高い温度とされ、この記録はギネスブックに認定されている。

1.5 JET と TFTR での DT 核融合

JT-60 U では、トリチウム操作の装置を付けていないので DT 反応はできないが、外国では DT 反応を既に行っている。イギリスのカラムにあるヨーロッパ共同体 (EC) の JET (Joint European Torus) とアメリカのプリンストン大学の TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) は人類史上初めての DT 反応を成功させている。JET では $P_T = 16\text{ MW}$ 、TFTR では $P_T = 11\text{ MW}$ の実際の核融合出力が達成されている。それぞれの Q 値は $Q_{DT} = 0.82$ (JET), $Q_{DT} = 0.62$ (TFTR) である⁶⁾。発電装置をつければ十分電気が発生するであろう。日本の JT-60 U では、 $D + D \rightarrow T + p$ の核融合反応でトリチウムが生成され、実際に真空容器に付着しているのが観測されている⁷⁾。

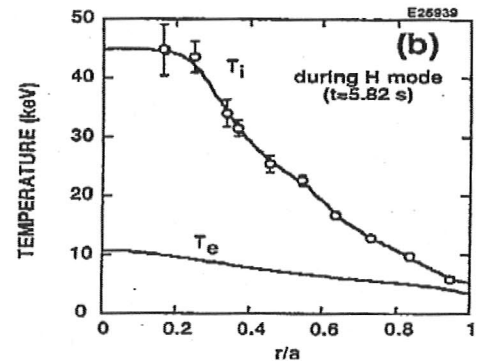


図7 JT-60 U の5億2千万度のプラズマ⁵⁾

2. 問題点と展望

このようにトカマクによる核融合はあと1歩の所まで来ており、次世代装置として自己点火条件 ($Q=50$) をめざす国際熱核融合炉 (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER) の建設も計画されている⁸⁾。しかし、地上での核融合炉実現に向けて問題がないわけではない。これについて問題点と展望とを以下に述べる。

2.1 古典拡散と異常拡散

要は、余りの高温になるプラズマをどう閉じ込めるかである。高温プラズマが逃げ出して壁に当たると容器が溶け出してしまい、これがコアのプラズマの中に混入するとプラズマは冷えてしまう。閉じた磁力線に巻き付いたイオンや電子は粒子同志の衝突によってしか離れられないと考えられていた。プラズマが磁場を横切って逃げることを拡散又は輸送という。この衝突による輸送を古典拡散という。通常のプラズマでは古典拡散が期待されるが、トーラスのプラズマではドーナツ状をしているのでこの効果により古典 (classical) 拡散の10倍くらい早い輸送がある。これを新古典拡散という。サイクロトロン半径を ρ 、拡散係数を D 、衝突周波数を ν とすると、輸送のスピードを表す拡散係数は古典拡散では $D_{\text{classical}} = \rho^2 \nu$ となる。これはサイクロトロン半径の距離を、1回の衝突時間で進むぐらいのスピードである。容器の大きさを a とするとプラズマの閉じ込め時間は $\tau_E = a^2 / D_{\text{classical}}$ となる。すると、 $\rho \propto B^{-1} T^{1/2}$ だから $\tau_E \propto B^2 T^{1/2}$ となって、古典拡散や新古典拡散に従う限りは、磁場 B や温度が高い程プラズマは良く閉じ込められ、温度は簡単に上げられ、非常にコンパクトな大きさの装置の核融合炉が出来るはずであった。ところが実際は、高温プラズマはこの新古典拡散よりもはるかに早く逃げしており、しかも温度が高い程プラズマの閉じ込めは劣化していることがわかった。これを異常拡散という。この異常拡散の理論は最初 David Bohm が唱えたので Bohm 拡散とも呼ばれる。異常拡散では拡散係数は $D_{\text{Bohm}} \propto T/B$ で、大きさはサイクロトロン半径の距離を、最大で1回のサイクロトロン周期 (磁力線の周りを電子が1回転する時間) で進んでしまうぐらいのスピードである。サイクロトロン周期は衝突周期より遥かに速いので、これは古典拡散に比べて非常に大きい (速い)。Bohm 拡散では、 $\tau_E = a^2 / D_{\text{Bohm}} \propto B^{0.5} P^{0.5}$ となって、入力パワー P の増加とともに閉じ込め時間は劣化してしまう。したがって、温度は簡単に上げられないので高い温度を得る為には、規模の大きな核融合装置になってしまう⁹⁾。これは、磁場の不均一性に起因するプラズマの不均一性や、加熱によって速度分布関数に変化して、乱流的な不安定性 (波) が発生し、波の電場と磁場の相互作用によってプラズマが速く運ばれているのだとされている。トカマクでは、プラズマ電流を上げると閉じ込めが良くなるので大きなプラズマ電流を流している。

2.2 Hモードと負磁気シア

問題は磁気核融合装置で、不安定性を押さえられるかであるが、1982年ドイツのトカマクで通常のプラズマより2～3倍閉じ込め時間の良いHモードというプラズマが生成された¹⁰⁾。このHモードでは、周辺でプラズマが回転（或いは流れが存在）することによって、不安定性が抑制されていることがわかった。Hモードが定常的に出来ている時は閉じ込めは良いが、Edge Localized Modes (ELMs) という不安定性が発生している時にはプラズマに貯えられている膨大な熱が磁力線の唯一の接点であるダイバーター板に解放される。この部分は磁力線が開いているので、直接プラズマがダイバーター板を直撃して、この熱は膨大なものになる。これに耐えられるダイバーター板の素材はまだ開発途上にある。通常のプラズマやHモードプラズマの電流分布は釣り鐘型であるが、電流分布を中空（ホロー）にすると、安全係数 $q=(r/R)(B_t/B_p)$ の空間勾配の指標である磁気シア $s=(r/q)(dq/dr)$ という値が負になる領域が存在し、負磁気シアプラズマと呼ばれる。但し、 r はトーラスの小半径、 R は大半径である。負磁気シアプラズマでは、中心近くまでもプラズマが回転しており、閉じ込めがHモードからさらに1.5倍くらい改善される。図6～図7のプラズマはこのような、Hモードや負磁気シアで達成されたものである¹¹⁾。

しかし、負磁気シアのプラズマは非常に過渡的で、達成されても殆んどが次に述べる崩壊不安定性 (Disruption) で終わっている。

2.3 崩壊不安定性 (Disruption)

臨界に達する程のプラズマを生み出したJT-60の鳥瞰図を見ると、赤い真空容器とトロイダルコイルを囲むように、黄色い星形トラスという、巨大な金属の支えがある。これは、トカマクプラズマで崩壊不安定性 (Disruption) が起きた時、真空容器が壊れないように支えているのである。トカマクでは巨大なプラズマ電流が突然消えることがある。3 MA (300万アンペア) くらいの電流がほんの20 msecで突然切れる。これは磁気面が局所的に閉じてしまうような成長する不安定性が発生してプラズマの平衡がとれなくなったような時に起こるが、この時に導体である真空容器に磁束の変化が生じ、真空容器中にうず電流が発生して、この電流と磁場との巨大な電磁力が真空容器に働く。この力はトンオーダーの力になる。同時に、プラズマが持っているエネルギーが熱の形で解放されて、これが真空容器の壁に当たると、キログラムオーダーの金属が蒸発してしまう程のものである。つまり、トカマクでは閉じ込め磁場の生成が非常に不安定であるということである。これを制御する手立ては今のところ確立していないが、プラズマ電流を電磁誘導ではなく高周波で駆動して¹³⁾不安定性を抑制するように電流分布を外部的にコントロールできれば、この不安定性から逃れられるであろう。ポロイダルを外部コイルで作るヘリカル型の装置ではこのような心配はないとされている¹²⁾。

2.4 木星回りの回転プラズマ

木星の磁気圏では、ダイポール磁場が形成され、この領域にトーラス状に、低密度の高温プラズマが生成されていることが、1992年にスペースクラフトのUlyssesの観測で確認された。このプラズマは木星の衛星のイオの火山活動により上空に噴出した気体が磁気圏内の電子と衝突電離して生成されたと考えられている¹³⁾。図8の点線はイオの軌道を示している。面白いことは、木星の自転と共に、このプラズマは高速に回転をしており、トカマクの高閉じ込め状態であるHモードや負磁気シアのプラズマに非常に良く似ている。プラズマ密度は $10^2 \sim 10^3 \text{ m}^{-3}$ と低いがイオン温度が30 keV (3億5千万度)もある。ダイポール磁場は10 nTしかないのにベータ値は0.1～0.2と極めて高い。この磁場を地球上の核融合実験に模擬すれば良いというアイデアが浮かぶ。このような実験は既に行われていて、流れているプラズマは平衡がうまくとれることが示されている¹⁴⁾。このようなダイポール磁場を用いて次に述べるD-He³を燃料とする核融合装置や、惑星間有人飛行の為の核融合ロケットの推進にも利用できるという提案もある¹⁵⁾。また、トーラス形ではなく、少し工夫され

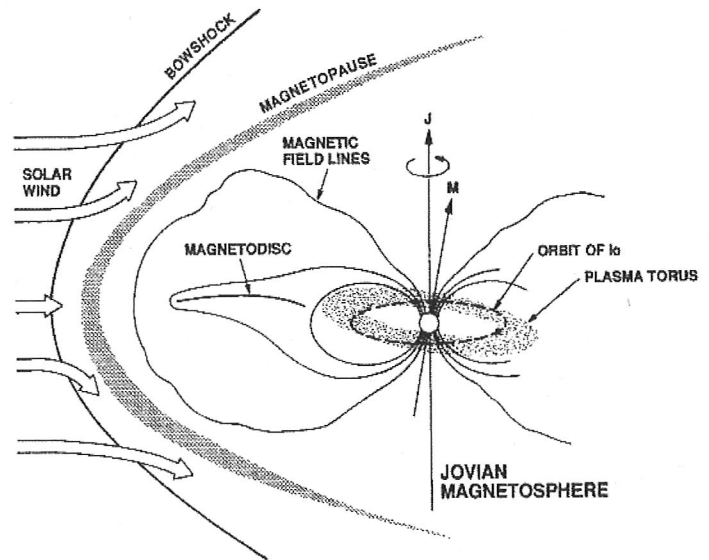


図8 木星の磁気圏にある高 β プラズマ

た球状の磁場配位（トルネード磁場）では、ダイポール磁場と類似の閉じた磁場配位が実現して、不安定性が抑制されて、輸送は古典拡散になるとされている。これの基礎的な実験が宇宙科学研究本部で行われている¹⁶⁾。

2.5 D-He³核融合

D-D, D-T核融合では中性子やトリチウムが大量に発生して真空容器が低レベルではあるが放射化してしまう。この放射化された廃棄物の処置は現在の核分裂による原子力発電所の高レベルの廃棄物よりは楽だが、厄介なものである。さらに、核融合反応で出てくる中性子は(8)～(11)式に示されるようにMeVオーダーでエネルギーが格段に高いので、容器や加熱装置を直撃すると大変な負荷になる。(11)式のD-He³反応は中性子を伴わない核融合反応で、He⁴や陽子によってエネルギーが取りだせる。しかし、この反応を起こすには、図3を見てわかるようにD-T核融合よりさらに厳しい温度条件が必要である。燃料としてのHe³は地球上には存在しないが、月に多量に存在することがアポロ10, 14, 15号が月から持ち帰った岩石の分析からわかっている。このHe³は太陽コロナから発生したもので、磁気流体乱流に於ける磁気音波でMeVオーダーまで加速され太陽風となって運ばれ月の岩石中に数万年かけて侵入したものと考えられている。この岩石中のHe³はベーキングで吐き出されることが地上での実験で確認されている。これを地球上の核融合の燃料に使うとなると、月から地球に運搬することになるが、九州東海大学の御手洗教授は、月と地球間に人工衛星を飛ばしてHe³を運ぶ方法を提案している。図9がその計算結果である¹⁷⁾。月面で人類が活動するようになった頃にはrf加熱で分離回収する方法があることが筆者によって提案されている¹⁸⁾。

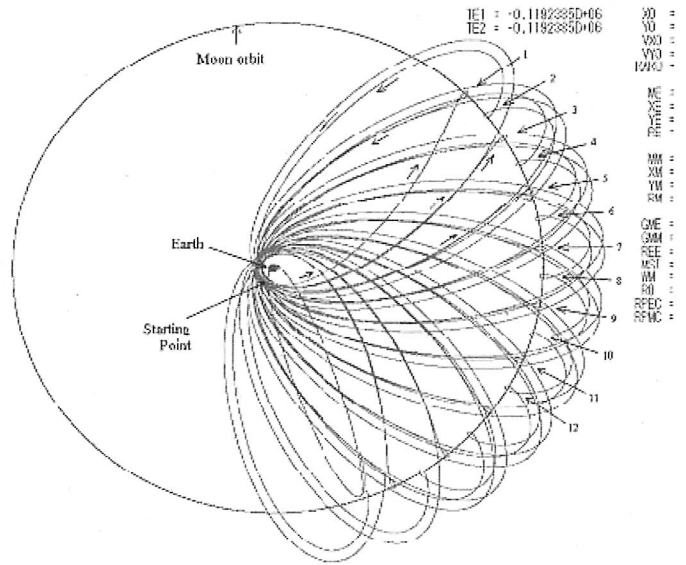


図9 月と地球間に人工衛星を飛ばしてHe³を運ぶ方法

3. 宇宙の核融合

このような、核融合反応は宇宙の恒星の中では頻雑に起こっている現象である。人間を含めて身近にあるものから、太陽系、宇宙までのあらゆる物質が、宇宙の原初から存在するものではなく、宇宙のどこかで作られたと考えられている。太陽や赤色巨星や白色矮星などの恒星に此の魔法の炉があり、水素、ヘリウム等の、軽い元素から重い元素まで全ての物質が核融合反応や超新星の爆発で作られたものと考えられる。

3.1 太陽の核融合

太陽が何故このようなエネルギーを放出しているかの解明は20世紀の初頭になされ、その研究の萌芽はAtkinsonやHoutermansに見られるが¹⁹⁾、本格的な解明はWeizsacker²⁰⁾やBethe²¹⁾等によって明らかにされた。(余談であるが、Betheはユダヤ系のドイツ人でナチから逃れるためにその後アメリカのコネル大学に落ち着いた。同じドイツ人のWeizsackerは皮肉にもナチの高官の息子であったという。ベルリン崩壊前の西ドイツの大統領は彼の兄(哲学者)だった。)1938年ジョージワシントン大学でGamowが主催した物理学者と天文学者と議論するワークショップがきっかけで、Betheは星のエネルギー源についての理論を作った。太陽の核融合反応は次の2つである。



このP-P chainでは水素が重水素になる核融合で、コアの中心温度が1500万度(=1.3 keV)くらいで(7)式の反応率は $\langle\sigma v\rangle=10^{-43} \text{ cm}^3\text{sec}^{-1}$ と非常に小さく、核融合はゆっくと100億年も続く($t=1/|n\langle\sigma v\rangle|=4.5 \times 10^9$ 年、密度 $n=10^{25} \text{ cm}^{-3}$)反応である。P-Pチェーンでは弱い相互作用による β 崩壊の反応($p \rightarrow n + \text{e}^+ + \nu_e$)で電子ニュートリノ ν_e が生成される。



図10 同僚と加速器の中を自転車で行く H. A. Bethe²²⁾

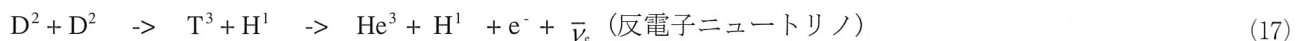
ニュートリノは1930年 Wolfgang Pauli が β 崩壊の反応の過程において、エネルギー保存則を救うものとして提案した質量ゼロの未知の素粒子であるが、これが後にニュートリノと呼ばれることになった。電磁力（クーロン力）が光子，強い相互作用（核力）が中間子（メソン）を媒介にして反応が進むのに対して，弱い相互作用は W, Z ボソンの交換を媒介にしている。W, Z ボソンは自発的対称性の破れによって大きな質量を持ち（Higgs 機構という），存在出来る時間が短いので非常に短距離でしか相互作用が出来ない。従って，殆ど反応が進まず，非常に遅い反応である。最初に述べた，地上の核融合では，重水素イオンはクーロン斥力に打ち勝って核力（強い相互作用）のポテンシャルに捕らえられるが，トンネル効果によって温度の低いものでも核力に捕らえられるので断面積は大きい。図3より $\langle\sigma v\rangle = 10^{-15} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$ で地上での核融合反応の反応はほんの10秒足らずで終わる ($t=1/|\ln\langle\sigma v\rangle| = 10$ 秒，密度 $n = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$)。しかし，この強い相互作用と弱い相互作用の違いが，地上と太陽の核融合の違いであり，実際，太陽で，(15) 式の p-p chain で出来た重水素 D^2 が (8), (9) 式の反応が起こってヘリウムに変換されてしまうと，この反応は非常に速いので，すぐに水素は無くなってしまふ。非常に遅い太陽の核融合反応で水素が十分に残っていることが，地球上の太古からの全ての生物のエネルギー源を幸運にも支えているのである。我々の存在はまさに幸運な核物理学の偶然に支えられているのである²³⁾。CNO サイクルは太陽では，温度がより高い時に起きているが，太陽よりも2倍くらい重いシリウス星座の主星では主要なエネルギー源になっているとされている。

3.2 ニュートリノの検出²⁴⁾

太陽の核融合反応では (15), (16) 式によりニュートリノが発生するが，Davis は，太陽からやって来るニュートリノを実験的に検出した。しかし，上述の理論より少ないことがわかった。それで，太陽では核融合反応が間欠的にしか起こっていないのではないかなどの大きな謎となったが，これは最近になって，ニュートリノに質量がありニュートリノ振動を起こして別のニュートリノになっていることで説明された。太陽から出る電子ニュートリノ ν_e はニュートリノ振動によりミューニュートリノ ν_μ に変換しているとされている。このようなニュートリノ振動は宇宙線を起原とする大気中のニュートリノについて検出されている。大気中のミューニュートリノ ν_μ はタウニュートリノ ν_τ に変換する。

地上の原子炉に於いても，ニュートリノが発生し，別の β 崩壊の反応 ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ (反電子ニュートリノ)) で，1分あたり約6個の反電子ニュートリノが放出されている。柏崎や敦賀にある原子力発電所から生成されたニュートリノは神岡町のスーパーカムランドにおいて観測され，ニュートリノ振動を裏づける反電子ニュートリノの消失が観測されている。また，低エネルギーのニュートリノを長い距離走らせると，小さい質量差でもニュートリノ振動が検出出来ることから，陽子加速器でニュートリノを作り数百キロメートル走らせて，カミオカンデで観測する実験が計画されている。K2K 実験と称されるものは筑波の高エネルギー物理学研究所からカミオカンデまでの250 km の区間をミューニュートリノ ν_μ を飛ばすもので，既に実験が行われている。T2K 実験と称されるものは東海村の日本原子力研究開発機構の陽子加速器 J-PARK からカミオカンデまでの290 km の区間を，電子ニュートリノ ν_e を飛ばしニュートリノ振動によりタウミューニュートリノ ν_τ に変換する実験で，2009年に計画されている。

ところで，地上の核融合ではニュートリノは生成されているのであろうか。DD 核融合では，



の反応で反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ が生成される。これは， T^3 が radioactive で β 崩壊するからである。 T^3 は He^3 に変わったその時，反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ を出す。 T^3 の半減期は12年であり，反応エネルギー Q_T が18.6 keV 程しかないので，これはゴミみたいなものである。トリチウムはヘリウム3に崩壊して安定となるので，反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ は1つだけの放出

である²⁶⁾。

3.3 恒星の核融合

宇宙では、恒星の中の核融合反応で最初に水素が作られ、次々に重い元素が作られている。従って我々の宇宙では水素が一番たくさんある。次に多いのがヘリウムである。この反応 ($H \rightarrow He \rightarrow Li \rightarrow \dots \rightarrow Fe$) は恒星の中で鉄まで進む。Bethe はノーベル賞講演で、太陽の3倍の質量を持つ星である御車座のカペラという2重星の進化について述べている。2つの星はそれぞれが赤色巨星で、核融合がリチウムLiまで進んできており、中心部では1億度にも達しているという。鉄よりもさらに重い元素は超新星爆発によって膨張して行くガス物質内で中性子を捕獲して急速に (rapid, r 過程) 作られるものと、恒星内部で緩慢に (slow, s 過程) 作られるものの二種類ある。中性子が過剰になったら β 崩壊して原子番号をあげることで、核反応が進み次々と重い元素が作られている。

3.4 ビッグバン以後

宇宙がビッグバンで誕生して t 秒後の宇宙の半径 R とその密度 ρ 、温度 T は重力ポテンシャルを含んだエネルギー保存則と、 ρ は T の4乗に比例するという黒体放射の公式、および膨張宇宙は断熱膨張でエントロピーは保存されるという法則を使うと、 $RT = \text{一定}$ ということが導かれ、さらにこれらの式から

$$\rho t^2 = 10^6 \text{ (gsec}^2/\text{cm}^3) \quad (18)$$

$$T^2 t = 10^{20} \text{ (K}^2\text{sec)} \quad (19)$$

というパラダイムが導かれる。この式から、 $t = 1 \sim 100$ 秒後の宇宙では $T = 10^9 \text{ K} \sim 10^{10} \text{ K}$, $\rho = 10^6 \sim 10^2 \text{ g/cm}^3$ となるから、確かに宇宙の初期は高温 (1億度 \sim 10億度) で高密度であった。ガモフは最初中性子と陽子が同数存在していたとして、中性子はベータ崩壊して数は減少し、陽子と反応して重陽子となり、核融合反応でヘリウムとなりつぎからつぎへと重い元素が作られていくというシナリオをつくった。これが有名なガモフの熱い宇宙の理論である。さらに詳しく時間を追ってのべると

[1] ハドロンの時代: $t < 10^{-4} \text{ sec}$, $T > 10^{12} \text{ K}$ (1兆度以上)

この時代は、陽子、中性子、ガンマ線、ハドロンおよびその反粒子、さらにはクォーク、反クォークが宇宙に充満していた時代である。宇宙の温度は上限があるということが導かれる (この温度は $2 \times 10^{12} \text{ K}$ (2兆度) とされている)。

[2] レプトンの時代: $10^{-4} \text{ sec} < t < 1 \text{ sec}$, 10^{10} K (100億度) $< T < 10^{12} \text{ K}$ (1兆度)

ハドロンと反ハドロンは対消滅して姿を消し、莫大な電磁波が残る (これは現在迄の時間かかって 3° K 迄に冷えた放射となって残っている)。陽子、中性子、ガンマ線、ミュー中間子、電子、陽電子、2つのニュートリノ (電子ニュートリノ、ミューニュートリノ) のみとなる。また、ミュー中間子対、電子対が数多く存在していた。温度が下がると、ミュー中間子は消滅してミューニュートリノは他の粒子と相互作用しなくなり、独立した存在になる。

[3] 放射の時代: $1 \text{ sec} < t < 10^6$ (100万) 年, $3 \times 10^3 \text{ K}$ (3千度) $< T < 10^{10} \text{ K}$ (100億度)

温度がさらに下がると、電子と陽電子は対消滅して、電子の数が減り、 $T < 10^9 \text{ K}$ (10億度) で陽電子は姿を消し、ニュートリノは全く独立した存在になる。さらにガンマ線が陽子と電子に比べて優位になる。レプトンの時代の終わりから、この時代の初期にかけての特徴はヘリウムの生成である。さらに、この時代の終わりになると放射の優位はくずれ、陽子が多数を占めるようになる。先程示した JT-60 U の5億2千万度という温度は、この話からすると、 $t = 369$ 秒 (6分9秒) 後のこの時代である。

[4] 星の時代: $t > 10^6$ (100万年以降) 年, 3 K (マイナス270度) $< T < 3 \times 10^3 \text{ K}$ (3千度)

さらに温度が下がると、陽子、電子が結合して原子、分子が形成され、物質と放射との相互作用がなくなり、互いに独

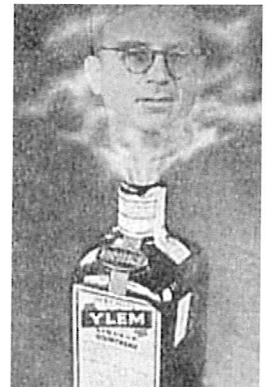


図12 魔法のビン「イレム」から出てくる Gamow²⁷⁾

立した系となる。ガンマ線の洪水は消え、物質が優位を占める。これらの物質が集合して、銀河、星は出来たと考えられる。このガモフの理論は宇宙の初期に物質が反物質よりわずかに多く存在したと仮定しなければならぬ。さもないと対消滅して現在の宇宙には全く物質が存在しないことになる。ハドロンの時代に相転移が起こるという理論でもこの困難は回避できるが、スウェーデンの宇宙物理学アルフベンは物質と反物質とを絶縁するライデンフロストなるものが存在すれば良いとしている。

4. お わ り に

無生物社会では孤立系においては熱は高温から低温に流れ、逆の流れは決して存在しない。則ちビッグバン以来宇宙が獲得したエネルギーは宇宙の膨張と共に乱雑な粒子の衝突、若しくは場による加速によって膨張で広がった空間の各所に、くまなくまんべんにエネルギーを配分してきている。局所的な高温部分は、分子の乱雑な動きによって等方化され温度は低くなるのである。かくして大宇宙の温度はいつしか均一の温度に達するであろう。その温度は宇宙が極めて広大なためマイナス二百数度と極めて低い。則ち宇宙は凍結してしまうのである。ボルツマンはこの状態を熱的宇宙の死と名づけた。このこのような大局的なエネルギーの流れに抗して存在するのがエントロピーを捨てることも出来ると言われる生物である。即ち、生物は等方化に向う温度移動に待ったをかけている。生物はランダムではないプロセスを自らの意志で作ることが出来、不可逆な熱の流れに抗することができるようになっている。生物のこのような作用は、分子運動論的にはマクスウェルの悪魔の役割と符合している。マクスウェルの悪魔は熱力学第2法則（又はエントロピー増大則）を打ち破り、低温の物体の持つ熱エネルギーをさらに高温の物質に移せることの出来る仮想的な存在である。このようなものが、もしあるとすればそれを最も巧妙に行っているのは万物の霊長たる人類であろう。今や、人類は核融合で人工の星を作ろうとさえしている。この人工の星の熱源さえもやがては、宇宙に広がって等方化される運命にあるが、この熱源をいくつも人類は作ることができる。それはマクスウェルの悪魔の仕種とおなじものではなからうか。

参 考 文 献

- 1) L. I. Schiff, *Quantum Mechanics*, McGraw-Hill Book Company, Inc., Eq (20.12) 1955 (邦訳 井上健, 「量子力学」吉岡書店 1957)
- 2) G. Gamow, *Zeits f. Physik* 51, 204 (1928)
- 3) 宮本健郎, 核融合のためのプラズマ物理, 岩波書店, p. 4, 1976 年
- 4) J. Wesson, *Tokamaks*, Oxford University Press, 2003 (邦訳 伊藤早苗他, 「トカマク概論」九州大学出版会 2003)
- 5) S. Ishida *et al.*, *Nucl. Fusion* 39, 1211 (1999)
- 6) 電気学会技術報告第 934 号, 2003
- 7) K. Masaki *et al.*, *J. Nuclear Materials* 313–316, 514 (2003)
- 8) 若谷誠宏他, 日本物理学会誌, 54, 417 (1999)
- 9) K. Uehara *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 64, 757 (1990)
- 10) F. Wagner *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 49, 1408 (1982)
- 11) T. Fujita *et al.*, *Nucl. Fusion* 38, 207 (1998)
- 12) K. Uo, *Plasma Phys.* 13, 243 (1971)
- 13) E. J. Smith *et al.*, *Nature*, 257, 1503 (1992)
- 14) 吉田善章他, 日本物理学会講演概要集, 松山大学, 61, 29 pUD-1 (2006)
- 15) 長谷川晃, *パリテイ*, 7, 42 (1992)
- 16) 定本嘉郎他, スペースプラズマ研究会, p. 27, 平成 12 年度
- 17) 御手洗修, プラズマ核融合学会第 20 回年会予稿集, 27 aA 04, 2003
- 18) 上原和也他, 核融合研究, 69, 1550 (1993)
- 19) R. d'E Atkinson and F. G. Houtermans, *Zeits f. Physik* 54, 626 (1929)
- 20) K. F. von Weizacker, *Zeits f. Physik* 39, 633 (1938)
- 21) H. A. Bethe, *Phys. Rev.* 55, 103 (1939)
- 22) <http://bethe.cornell.edu/about.html>

- 23) M. Chown, *The Magic Furnace*, Sara Menguc Literary Agent, 1999 (邦訳 糸川洋, 「僕らは星のかけら」SB 文庫 2005)
- 24) 小柴昌俊他, 日本物理学会誌, 58, 313 (2003)
- 25) <http://www-rcn.icrr.u-tokyo.ac.jp/kajita/>
- 26) 井上邦雄, Private Communication via e-mail
- 27) F. Reines, *Cosmology, Fusion & Other Materials*, George Gamow Memorial Volume, Colorado Association University Press, 1972
(邦訳 山口嘉夫他, 「ジョージガモフーその業績と思い出」共立出版株式会社 1972)

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-06-004

発行 平成 19 年 3 月 31 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

URL : <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 (株) 東京プレス

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記をお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

TEL : 029-868-2079 FAX : 029-868-2956

© 2007 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。



本書は再生紙を使用しております。

This document is provided by JAXA.