INTRODUCTION TO PLASMA PHYSICS (I)

プラズマ物理入門 (第 1 回)

Kazuo TAKAYAMA and Akira TONEGAWA*

Institute of Research & Development, Department of Physics, School of Science, Tokai University
1117 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259-12 JAPAN Tel:0463(58)1211 Ext.5305*

今回の号から 4 回シリーズで、「プラズマ物理入門」と題して、プラズマに関する講座を連載することになりました。学生の方や、これからプラズマに関連した仕事を始めようという方々に、興味を持って読んで頂けるような講座にしたいと思っています。今回は

1. プラズマとは
2. プラズマの研究はなぜ必要か？
3. 隣接分野のプラズマ現象

という構成になっています。本文がある程度、原理の話とか多少教科書的になるかも知れませんが、広範囲の分野でのプラズマの役割が理解できると思います。

1. プラズマとは

普通の気体、例えば水素ガスはたくさんの水素分子の集まりで、これらの分子がお互いに何度も衝突しながら不規則に走り廻っていることはよく知られています。今どんな高温にも耐え何物も通さない理想的な容器があるとしてこれに水素ガスを詰め、温度をどんどん上昇させるとどんな変化が起こるかを見ることにします。

高温になると分子や原子は壊れるようになります。常温から温度が上がるにつれてお互いに衝突する水素分子の速さはどんどん増加し衝突は次第に激しさを加えて行きます。水素分子は水素原子が 2 個結合した物で原子間の結合力は分子力と呼ばれています。温度が非常に高くなると水素分子は激しく揺さぶられて 2 個の原子に分解し始めます。水素分子がほとんど分子に分解する温度は約 5 万度です。

さらに温度が上がると今度は水素原子が壊れ始めます。水素原子の構造は、水素原子核（陽子とも呼ばれます。）を中心としてその周りをめぐる軌道電子とから成っています。電子は負の電気を帯びていますが、陽子は同じ量の正電気を持っているから原子は全体として電氣的に中性です。したがって水素原子は激しく揺さぶられると陽子と電子とに分離します。水素原子が完全に陽子と電子とに分かれるのは約 1.5 万度です。ここに水素ガスは電氣的に中性だった粒子の集まりから、正電気を帯びた陽子、負

電気を帯びた電子の集まりにかわりました。これが水素プラズマです。

水素以外の元素では原子や分子の構造が複雑で何段階にも分かれて壊れます。原子は正電気を帯びた原子核とこの電気を中和するだけの何個かの軌道電子から構成されています。（原子は電氣的に中性ですから、特にこれを強調して中性原子と呼ぶ場合があります。）ゆえに原子が 1 個でも軌道電子を失えば、残りは正電気を帯びた粒子となります。これをイオンと呼びます。イオンと電子とに分離する過程は電離過程と呼ばれています。

図 1 原子構造と電離過程

完全に軌道電子を失ったイオンは裸の原子核です。場合によっては分子を作ったままでその原子の一部が壊れることがあります。これを分子イオンと呼びます。どれにしても高温で分子や原子はイオンと電子とに分離します。そしてイオンと電子とがバラバラに運動している状態をプラズマ状態と呼びます。それは次のように定義できます。

プラズマとは正電気を帯びたイオンと負電気を帯びた電子との集まりで全体として電氣的に中性なものです。普通の気体は中性粒子の集まりでしたから、それがイオンと電子の集まりとなっても全体としてに注意してください。元素の種類に電氣的に中性

図2 中性原子から構成された
普通の気体の状態

図3 プラズマの構成

なこよって異なりますが大体5万度～15万度の間で物質は完全に電離したプラズマになります。

超高温になると原子核も壊れる；

プラズマ状態になった物質の温度をさらに上げるとどうなるでしょうか？。プラズマ中のイオンは裸の原子核となり、原子核や電子間の衝突は非常に激しくなります。数億度に達すると原子核反応が起き始め、百億度以上の超高温になると原子核はもはや安定ではなくなります。そして原子核の構成粒子である陽子・中性子と電子との混合状態になりもはやプラズマと呼べなくなります。したがってプラズマは次のようにも表現できます。

プラズマとは中性原子がイオンと電子とに解離する温度（約数万度）と原子核がなお安定である極限の温度（約100億度）との中間の温度を持つ物質です。

つぎにプラズマを冷却する場合を考えますと、温度が下がるにしたがってイオンは電子と再び結合して中性原子再結合を防げば（たとえばプラズマをとります。しかし温度を下げると同時に何等かの手

段でイオンと電子との希薄にしてイオンが電子となかなか出合わないようにする。）低温でもなおイオンと電子との集まりの状態を保ちます。ゆえに特別な場合には物質は低温でもプラズマ状態となることもあります。

(1) プラズマの例

(イ) 放電管中の不完全なプラズマ；

広告用ネオン管等では封入されたガスのごく一部が電離しています。中性粒子が大部分で小数のイオンと電子とが混ざっている状態です。これは不完全なプラズマで不完全電離気体と呼ばれています。

(この意味で完全なプラズマは完全電離気体と呼ばれることもあります。) また不規則に動き廻っているイオンの平均エネルギーと電子のそれとは違っていることもあります。温度は不規則に走り廻る粒子の運動エネルギーの平均値を示す目安ですからこの場合イオンの温度と電子の温度とは違っています。

(ロ) 太陽コロナ；

太陽大気の外側のコロナと呼ばれる所は、約100万度の温度で完全なプラズマです。

(ハ) プラズマの模型；

金属は図のようにほとんど動かないイオンの間を電子が自由に走り廻っています。イオンの温度が低い点で気体のプラズマとは違っていますが、やはりイオンと電子との集まりという点でよく似た性質を持つので金属を固体プラズマと呼ぶことがあります。そして水銀や溶けたナトリウム等をプラズマの模型と考える場合があります。

図4 金属内の固体プラズマ

表1 不完全なプラズマの例 (1 cm³中の電子数は同体積中のイオン数に等しい。電離度は電子数を中性原子数で割った値。)

	気体の種類	1 cm ³ 中の中性原子数	電離度	電子温度	イオン温度
広告用ネオン管 neon	5×10^{12}	$3.7 \times 10^{-4} \sim 1.8 \times 10^{17}$	1.4×10^{-4} $\sim 2.8 \times 10^{-5}$	25,000度	1,500度
アーク放電 空気	1×10^{14}	5×10^{18}	2×10^{-5}	6,500度	6,500度
水銀灯 水銀	1×10^{15}	5×10^{18}	2×10^{-4}	6,500度	6,500度

(2) プラズマの性質

プラズマはイオンと電子との集まりですから普通の気体とは全く違った性質を示します。個々のイオンや電子は電気を帯びた粒子ですからお互いに引き合ったり反発したりします。電気的な力すなわちクーロン力のためプラズマは複雑な振る舞いをします。以下にその簡単な性質を挙げます。

図5 イオンと電子間のクーロン力

(イ) 電気をよく通すこと；

普通の気体は中性原子の集まりですから内部に電流は流れません。これに反しプラズマは電気を帯びた粒子の集まりですから電気はよく通じます。

(ロ) 電場で加速されること；

電場をかけると図のようにイオンと電子とは互いに逆の方向に走り出し、その運動エネルギーが増加します。この原理でプラズマの加熱法がいろいろ考えられています。

図6 電場中のイオンと電子の運動

(ハ) 磁場と強く結合；

プラズマに磁場をかけると図のようにイオンと電子とは磁場に巻き付いて螺旋運動をします。この性質から高温プラズマの磁場による閉じ込めの着想が生まれました。

図7 磁場中のイオンと電子の運動

(ニ) 電磁波を発射すること；

プラズマからは強い電磁波が発射されます。これはプラズマ中の電子がイオンに近付いて強く引かれて軌道を曲げたときや上のように磁場の周りを螺旋運動するときに電磁波を発射するためです。

図8 電子の運動による電磁場の発射

2. プラズマの研究は何故必要か。

核融合エネルギーを利用するためにはプラズマを体系的に研究しなければならないことが明らかになりました。核融合エネルギーの利用は人類の将来のエネルギー問題を根本的に解決すると予想されます。それを実現するためには核燃料で数億度の超高温プラズマを作りその中で起こる熱核融合反応の制御に成功しなければなりません。これを目標とする核融合研究がここ数十年大規模に進められてきました。しかしこの途中でプラズマ科学の内容が不十分なことが分かり、その体系を作り上げながら目標に向かわねばならないことが明かとなりました。

プラズマは核融合以外にも広い技術的応用を持つと予想されています。核融合エネルギーの利用は困難ですから将来のこととし、プラズマを利用して発電の効率を上げることが研究され始めました。これは直接発電と呼ばれ、エネルギー源は水力・石炭・原子力（核分裂エネルギー）等を使用しこれを電氣的エネルギーに転換するところでプラズマを用い、普通の発電機より効率を上げようとするものです。この他燃料量の割合に大きい推進力を出すというプラズマ・エンジン等いろいろの開発研究が進められています。プラズマ研究の発展にしたがって将来も豊かな応用を生み出すに違いありません。

プラズマ科学はそれ自身重要な分野として発展する大きな可能性を宿しています。プラズマ科学はプラズマの物理的な性質を究めるプラズマ物理学と、プラズマを作る技術を開発するプラズマ工学とから成り、この二つは密接に結びつき隣接分野の研究と共に急速に発展しています。プラズマ物理学は十分に体系化されず独立の領域として育ち始めた若い学問です。プラズマは気体とも液体とも固体とも異

なる性質を持つためそれは第4物性の物理学とも呼ばれています。今までにあった専門分野と並んで重要な分野として成長することが期待されています。

プラズマ科学はまた宇宙科学等隣接分野に重要な寄与をするであろうと期待されています。プラズマ科学の急速な発展は核融合を契機としていますが、隣接分野に天体物理学の寄与も見逃せません。むしろ発展の素地を作ったものは天体のプラズマ現象の研究成果であったといわれています。したがって、プラズマの研究成果はまた逆に、電離層、太陽電波、宇宙線の起源等の問題をめぐって宇宙科学に、プラズマ加速器の開発研究によって原子核物理学と隣接分野に重要な寄与をなすものと考えられています。

3. 隣接分野のプラズマ現象

太陽からの電波；

日光の他に太陽から時折強い電波が発射される現象が観測されています。その原因は太陽の外側コロナ付近のプラズマにあると推定されています。その機構は簡単でなくプラズマ中の電子が1団となって運動しながら強い電波を出すものもあるようです。その本質の解明は今後の発展を待たねばなりません。

宇宙線の起源；

宇宙線のような高エネルギーの粒子が何故発生するのか、これを解くのは非常にむづかしい仕事です。銀河や星の表面の磁場が関係しているようです。銀河内の星と星との間の空間は希薄なプラズマに充たされていてその中に浸み込んでいる磁場が宇宙粒子を加速するといわれています。また太陽や、それよりもっと巨大な星の表面にある磁場が激しく運動して宇宙線を発生させるとの説も有力です。宇宙線の加速機構から着想を得て地上のプラズマの加熱法が考え出され、あるいは銀河内の様々な形の磁場内の宇宙線の振る舞いをつきとめるために地上での"モデル"実験が試みられていること等は興味あることです。

電離層；

地球大気の上層には空気の一部が電離してイオンと電子とに分かれている電離層と呼ばれる領域があります。ここにもプラズマの関連する現象はたくさんありますが、ロケットによる電離層の直接観測に地上のプラズマ実験の手段が活用され成果を収めています。電離層から外へ惑星間空間に飛び出す研究の進展につれてこのような関係は一段と深まると予想されています。

以上の3例以外にも天体のプラズマ現象はたくさん見られます。その研究成果は地上の研究に大いに役立ち、また強い刺激を与えてきました。しかし多くの問題は未解決です。それに決定的な答を与えるのに地上の研究成果が大きな寄与をするであろうと考えられています。

プラズマ加速器；

地上の隣接分野に目を移してプラズマを利用した加速器の研究を眺めてみます。現在まで各種の加速器が建設されてきましたが、加速器は常により高いエネルギーを、より強いビームを出すことが要求されてきました。この二つの条件を充たすのは次第に困難と なってきました。これを克服するためプラズマが多数の粒子の集まりであることを利用してそれを加速して強いビームを得ようとする加速器、またプラズマが強い磁場を作る可能性に着目してこの強磁場を利用して高エネルギーを得ようとする加速器の開発が試みられています。これらは高温プラズマ発生装置と共通した問題を抱えていて、お互いに助け合いながら発展するものであろうと予想されます。

著者紹介

高山 一男

理学博士

専門：プラズマ物理・核融合

1946年 東京文理大理学部物理学科卒

同大学院特別研究生

1951年 電電公社・電気通信研究所研究員

1961年 名古屋大学プラズマ研究所教授

1973年 同研究所所長

1980年 東海大学教授

1993年 同大名誉客員教授、現在に至る

日本のプラズマ物理学の先駆者であり、現在までプラズマの基礎から核融合・先端技術を含む応用まで幅広い研究を行なっている。所属学会は日本物理学会、高温学会、放電学会、電気学会など。