

宇宙空間プラズマ実験用高密度プラズマ発生装置

久保治也・矢守章
伊藤富造・河島信樹

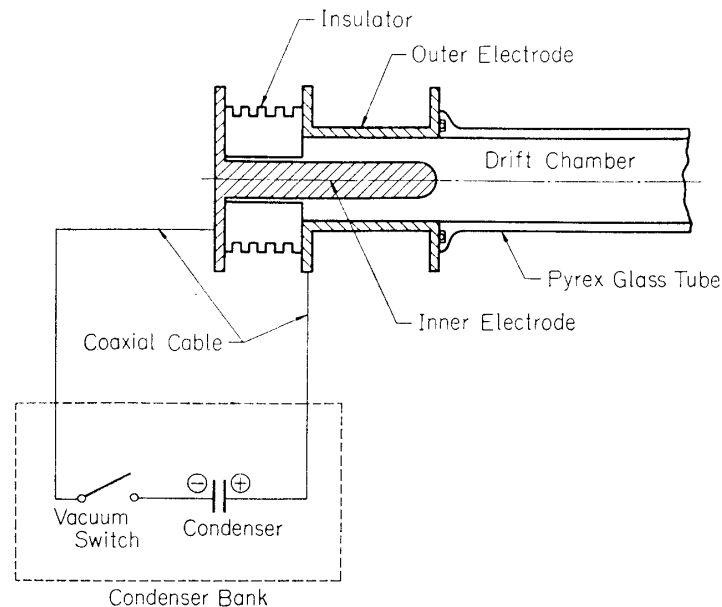
まえがき

宇宙空間のプラズマ現象を実験室で行なうには一般に非常に高密度のプラズマと強磁場が要求される。高密度プラズマ流を得る為の装置としては核融合研究で開発されたプラズマ銃が広く使われている。プラズマ銃はプラズマを作る領域と実験領域がはなれているためにプラズマのじょう乱が少なく静かなプラズマ流を得ることができる利点をもっている。プラズマ銃には同軸型、円錐型、誘導型、Ti-washer型などがあるが、ここでは同軸型を採用した。本論文では、この同軸型プラズマ銃の説明とこれを使って行なったいくつかの実験についてその概要を報告する。

1. 同軸型プラズマ銃

1.1 同軸型プラズマ銃の概要

プラズマ実験室で使用しているプラズマ銃は同軸型プラズマ銃 (Coaxial Plasma Gun) といわれる型のものである。このプラズマ銃によるプラズマ打し出し機構の原理は次のとおりである。第1図に示すように、一对の同心円筒状の電極をもち、この電極間に流れる放電電



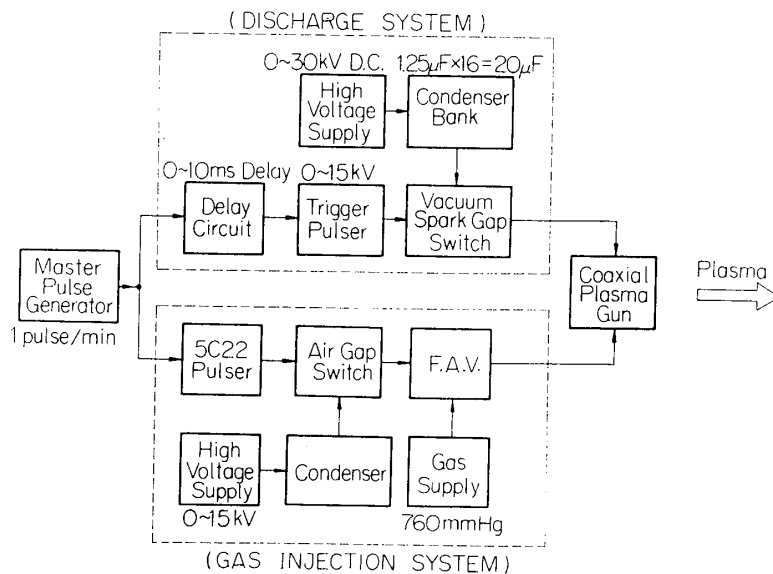
第1図 同軸型プラズマ銃の概略図

流が作る磁場により $I \times B$ のローレンツ力がプラズマに作用して高速度に加速する。電極間の距離を大きくすると、電流の Path が長くなりプラズマに不安定が生じるが、プラズマ銃の耐圧は大きくなる。このプラズマ銃は電極間の圧力が 10^{-6} (Torr) で約 30(kV) の耐圧をもっている。

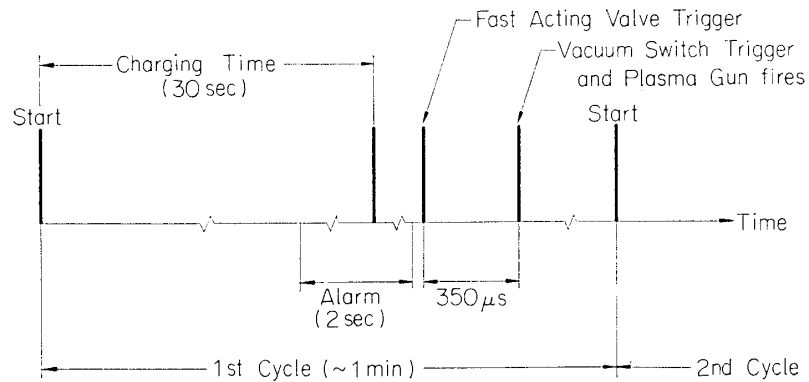
プラズマ銃の主要な寸法は次のとおりである。

内部電極外径……………49mm ϕ	外部電極の長さ……………160mm
外部電極内径……………152mm ϕ	材質……………銅
内部電極の長さ……………250mm	

プラズマ銃は機能上二つの部分に分けて考えられる。つまり一つはプラズマとなるべきガスを電極間に放出させる部分、もう一つはその放出されたガスを放電、加速する部分である。プラズマ銃を二つの部分に分けたブロック・ダイアグラムを第2図に示す。真空スイッチはコンデンサにたくわえられているエネルギーを8本の同軸ケーブル(10C2V)でプラズマ銃に注入するものであるが、ギャップ間の真空度がよすぎると放電がつきにくいので、大体 10^{-4} (Torr) 程度にして使用する。本装置の運転方式は手動式、自動式の二方式があるが、第3図に自動式の場合の Time Sequence を示す。自動式の場合にはタイマ、リレーなどによりプラズマが大体一分間に一回の割合で連続して作られる。プラズマ銃の運転の Mode は二種類ある。すなわち Fast Mode と Slow Mode である。Fast Mode は中性ガス放出の時間とプラズマ銃放電の時間間隔が短い場合(100~200 μ s)で、まだプラズマ銃中に中性ガスが十分に拡散していないときにプラズマ銃を放電した場合である。このときにできるプラズマは密度が低く、エネルギーは高く、速度も速い。Slow Mode は時間間隔が長く(~300 μ s)、再現性のよいプラズマ流が得られる。今までこの装置は主として Slow Mode で使った。時間間隔は 350(μ s) のときが実験的に調べたところでは再現性が一番よかった。



第2図 ブロックダイアグラム

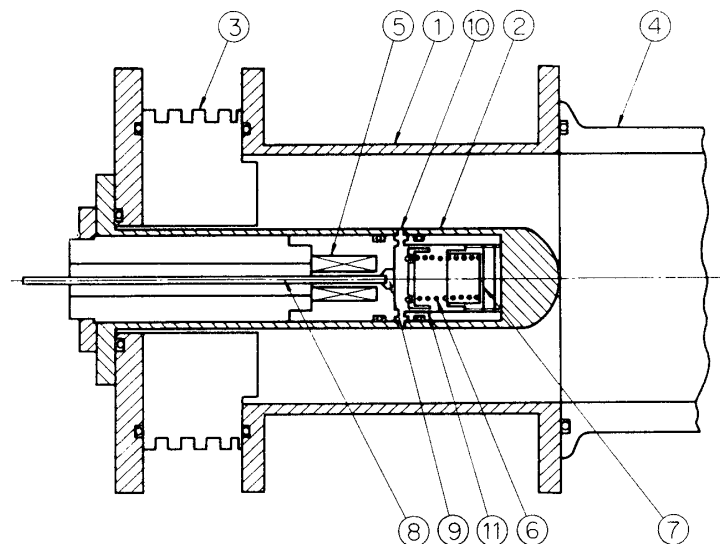


第 3 図 Typical Time Sequence

1.2 各部の構造

1) プラズマ銃

プラズマ銃はガス放出のための F・A・V・と放出されたガスを放電させる内外両電極でできている。③は放電領域に放出されるガスにより放電がプラズマ銃の後部で集中的に生じること（ガスがプラズマ銃の後部にたまる傾向があり、そのため他の部分より放電しやすくなる。）を防いでいる。この絶縁物のため最初に放電のおこる領域はある程度制限されほぼ放電領域へのガスの放出孔付近に集中しているものと思われる。③の材質はアクリルである。

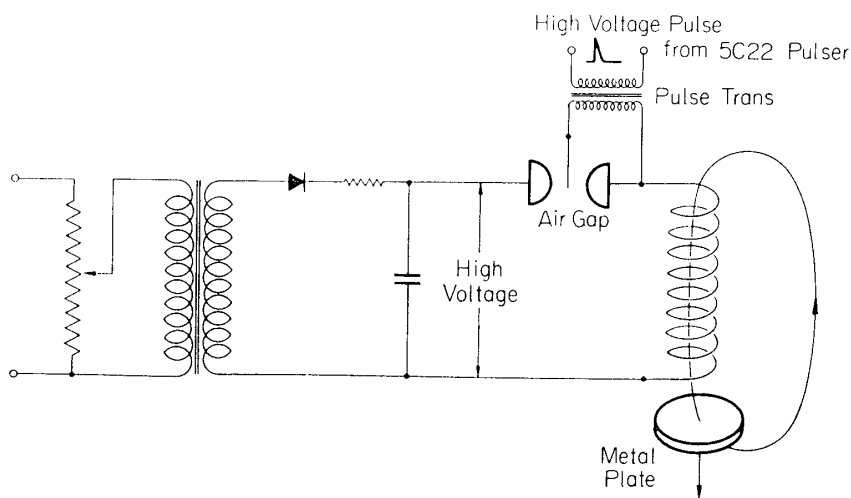


第 4 図 Cross-Sectional View of the Coaxial Plasma Gun

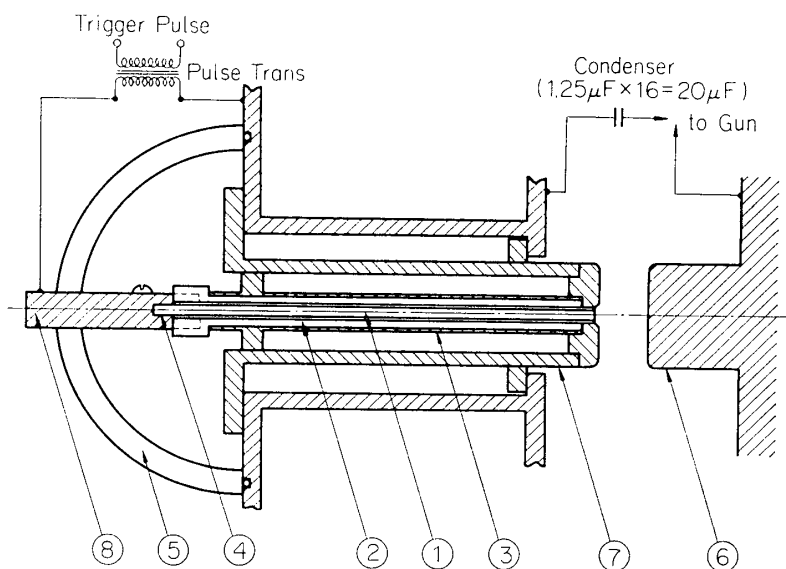
- | | | |
|--------------------|--------------------|------------------|
| ① Outer Electrode | ② Inner Electrode | ③ Insulator |
| ④ Pyrex Glass Tube | ⑤ Driving Coil | ⑥ Spring |
| ⑦ Stopper | ⑧ Teflon Tube | ⑨ Plenum Chamber |
| ⑩ Gas Exit | ⑪ Disk (aluminium) | |

2) F・A・V・ (高速度ガスバルブ)

F・A・V・には機械的なものと電磁的なものがあるが、この装置で使用しているのは後者の方である。第5図にその略図を示す。コンデンサに充電しておいた高圧を気中ギャップを通してコイルに導く、そのとき瞬間的に大電流が流れ、それが作る磁束により金属板に渦電流が流れる。この渦電流とコイル電流との反発力で金属板が急激に動く。F・A・V・を作動させると第4図の⑨プレナム・チェンバーにためられていたガスがガス放出孔をへて電極間に放出される。



第5図 F・A・V・の原理図



第6図 Vacuum Spark Gap Switch

- | | | |
|---------------|-------------|-------------|
| ① Trigger Pin | ② Insulator | ③ Conductor |
| ④ Teflon Tube | ⑤ Glass | ⑥ Electrode |
| ⑦ Electrode | ⑧ Conductor | |

ッチはトリガー・ピンを電極に対して負の極性にした方が正にしたときに較べてはるかに良好である。テフロン・チューブが蒸発してトリガー・ピンが電極に接触するようになるともはや真空スイッチはその働きをなくし、プラズマはできなくなる。プラズマ生成の連続運転においてその限界を決めるものはこのテフロン・チューブの蒸発によるトリガー・ピンと電極の接触である。現在1分間に1回の割合でプラズマを作ると大体1000回連続運転できる。次に④のプラズマ銃自身のばらつきであるがこれは次のような方法で軽減できる。プラズマ銃内の放電が起きる前にプラズマ銃内部の一部でトリガー放電を起こさせる。このためにはプラズマ銃の内部にトリガー・ピンを入れて電極との間に高圧パルス印加してやればよい。このほかに簡単にできるものとして、外部電極の一部より内部電極に向かって金属棒を入れて放電を始める場所を決めるという方法がある。現在このプラズマ銃では15mmφの黄銅棒を両電極間の中央くらいまで突き出して使用しているが、再現性は入れない前に比べてかなり改善された。Fast Modeでプラズマ銃を運転するときには放出されたガスがプラズマ銃中を十分に満たしてないので、②のガス分布のばらつきもきいてくるのでより再現性が悪くなる。

2. 実 験

この装置を使った1, 2の実験の結果について述べる。

2.1 Cometのシミュレーション実験

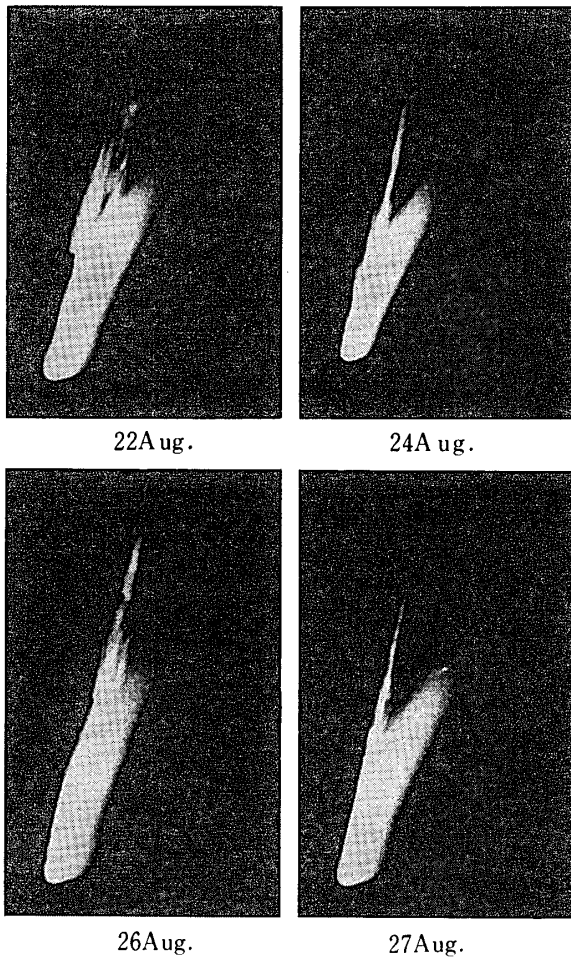
1) Cometの概要

太陽より吹き出す太陽風 (Solar Wind) の主成分はプロトンで、太陽より1A・Uの所で速度が300~700(km/s)、密度は3~20(個/cm³)といわれている。Space Probeを使っての太陽風観測により多くの事実が明らかにされたが、Space Vehicleを黄道面に対して大きな角度で軌道に乗せるのが困難なためおのずと観測範囲が制限される。Cometはいろいろな天球緯度で観測されるので、Space Probeでは得られない情報がCometの観測より得られる。そういう意味でCometは惑星間空間のProbeとして興味ある天体である。

CometはNucleus, Coma, Tailよりできている。Nucleusは直径が10~20(km)あり、DustやC, N, Oといったものより構成されている。Comaは直径が10⁵~10⁶(km)あり、CN, C₂, C₃, CH, NH, OHといった中性のガス分子よりできている。TailはBredikhinによると次の三種類に分けられる。

- TYPE-I ……太陽と反対方向に直線状にのびていて、おもにCO⁺, N₂⁺, CO₂⁺といったイオンより構成されている。
- TYPE-II ……わん曲して幅が広い。おもにDustおよび中性分子より成っている。
- TYPE-III ……わん曲の特に著しいもの。

第7図にCometの一例を示す。このCometはMrkos 1957 dといわれるもので、パロマー山で撮影された。



第 7 図 Comet Mrokos 1957 d



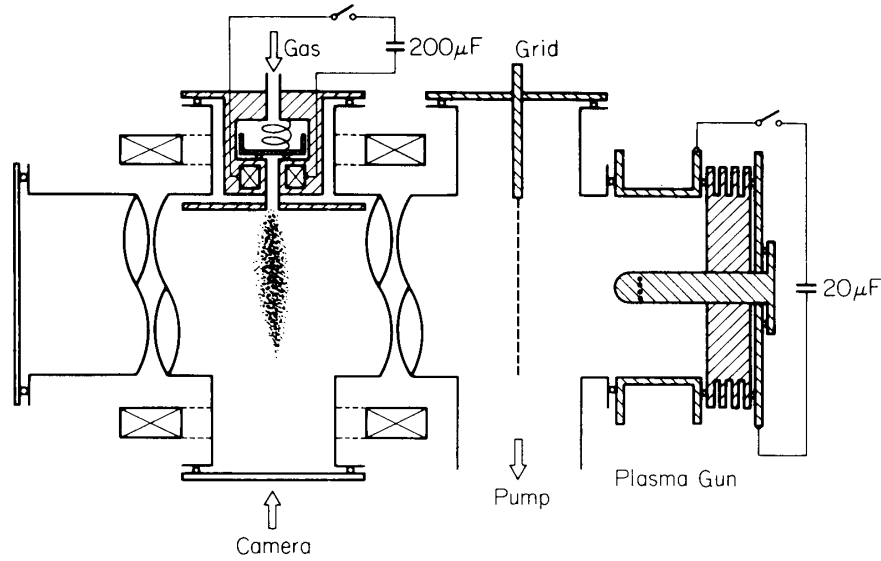
第 8 図 Comet Morehouse

2) 問題点

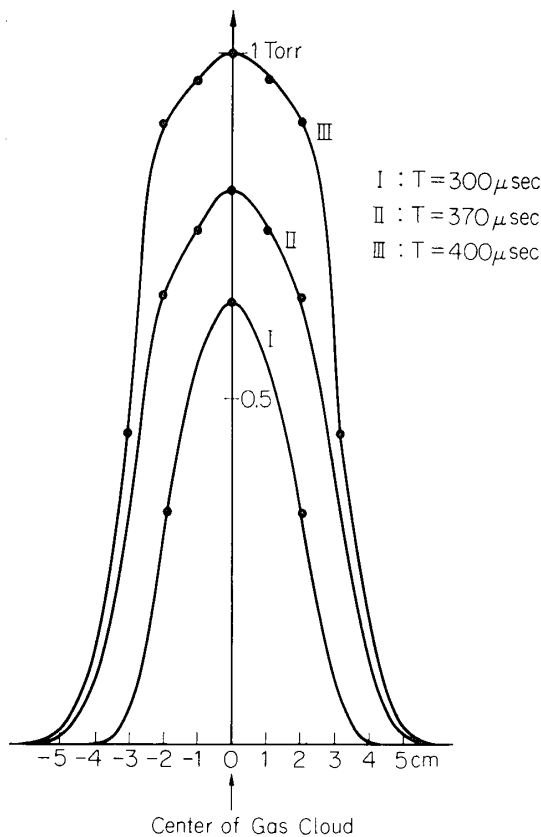
TYPE-I については、太陽風が中性ガス塊と相互作用をし、中性ガスを電離、加速して形成されるものと考えられている。しかし、電離、加速のメカニズム自身は現在のところ解明されていない。Photo Ionization, Charge Exchange の考えでは電離の割合が少なすぎる。また加速については太陽重力の $10^2 \sim 10^3$ 倍という大きな加速が得られているが、太陽風との相互作用、惑星間空間の磁場との相互作用がきくと考えられる。しかし、まだ結論は出されていない。

また通常、TYPE-I の Tail は簡単な形ではなく、第 8 図に見られるように数本のフィラメントよりなる Ray Structure をもっている。いかなる条件下でこのような Ray Structure ができるのかということが、本実験をやる上において興味ある点である。

TYPE-II, TYPE-III の加速のメカニズムは太陽のふく射圧で説明されるが、構成している Dust の本体は何であるのか現在のところわかってない。



第9図 実験装置



第10図 中性ガス分布図

T: F·A·V・作動後の時間

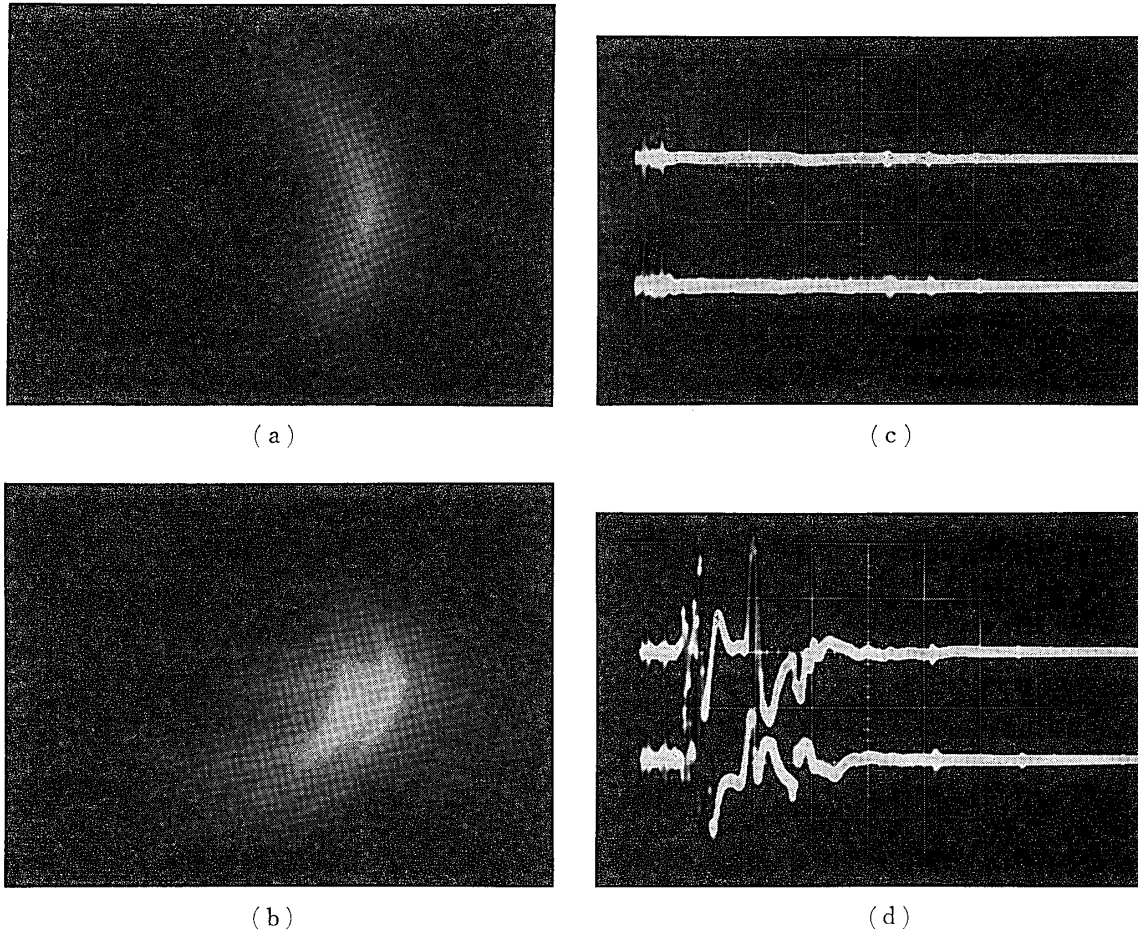
3) 実験装置および実験方法

実験装置の概略図を第9図に示す。プラズマが生成される時間とタイミングをとり、容量 $200(\mu\text{F})$ のコンデンサの放電により $F \cdot A \cdot V$ を働かせて中性ガス（炭酸ガス、水素、ヘリウムを使用）を高真空中に放出させる。この放出された中性ガスとプラズマとの相互作用をガス放出孔前方にある直径約 $10(\text{cm})$ の窓より観測する。放出前の中性ガスの圧力は一気圧で、放出後数百 μs の間円柱状のガス雲を放出孔前面で形成するが、時間経過に従い拡散していく。Fast Ionization gauge で測定した中性ガス圧の空間分布を第10図に示す。

プラズマは水素プラズマでパラメータは前に述べたとおりである。プラズマの持続時間は $60(\mu\text{s})$ であるが、この時間はプラズマがこの実験の特徴的な長さを通る時間よりはるかに長いので、この実験は定常状態にあるといえる。

4) 実験結果

第11図に炭酸ガス塊とプラズマ流との相互作用の時間積分写真を示す。(a) はプラズマ



第 11 図 プラズマ流と中性ガス塊の相互作用の時間積分写真およびプラズマ流の磁場信号 (dB/dt)

(a) と (c); プラズマ銃口の前方にグリッドをおいたときの静かなプラズマ流
 (b) と (d); グリッドの無いときの乱れた電場, 磁場をもっているプラズマ流
 (c) と (d); Upper Trace; プラズマ流に垂直な磁場信号

13 gauss/ μ sec/div

Lower Trace; プラズマ流に平行な磁場信号

7 gauss/ μ sec/div

Sweep ; 10 μ sec/div

プラズマ流は写真の右側よりくる。

銃の前方約 25(cm) にグリッドを置いてプラズマ流を作ったときで, (b) はグリッドを取り除いた場合である。プラズマ流は前にも述べたとおり turbulent な電場, 磁場をもっている。グリッドを置くとプラズマの電場が短絡され turbulent な電場, 磁場が減衰して静かなプラズマ流が得られる。プラズマ流中に二つの磁気プローブを入れてプラズマの流れに平行および垂直な磁場の成分を測定した。プラズマ流が静かなときは第 11 図 c に示すようにほとんど信号は得られてないが, プラズマ流が乱れたときは第 11 図 d に示すように turbulent な磁場の信号が得られた。

第 11 図 a の場合のプラズマ流は静かなプラズマ流である。この場合は写真よりわかるように放物線状のはっきりした shock front が円柱状のガス塊の前面に見られる。光っている部分はプラズマ流によって励起および電離されたガス塊である。乱れたプラズマ流と中性ガス塊との相互作用の時間積分写真を第 11 図 b に示す。この場合最も興味ある点は第 11 図 a では見られないフィラメント状の Ray Structure が存在していることである。この現象は中性ガス塊として水素、ヘリウムを使ったときにも観測された。また、この Ray Structure は実験ごとに違っている。

以上の実験より turbulent な磁場をもっているプラズマ流と中性ガス塊の相互作用ではフィラメント状の Ray Structure をもつことがわかる。

5) 結 論

太陽風は太陽で作られた磁場をもっている。その値は $5\sim 10(\gamma)$ でこれはこのシミュレーション実験における磁場の値 100 (ガウス) をスケールダウンした値 $1(\gamma)$ に比べて大きい。それで太陽風中の磁場が Comet の Ray Structure 形成に大きな役割を果しているものと思われる。

もう一つ大切なことは磁場は空間的に乱れているばかりでなく、時間的にも乱れていることである。このような時間的に変化する磁場が Comet の近傍にも存在するであろう。この Comet の近傍の時間的に変化する磁場の time scale と、実験室における磁場の変化の time scale について考える。実験室および宇宙空間における物理量の対応関係を第 2 表に示す。この実験のガス塊直径を $10^{-4}(\text{km})$ と考え、Comet の Coma の直径を $10^5(\text{km})$ とすると $k_L=10^{-9}$ となる。太陽風の速度を $4\times 10^{-7}(\text{cm/s})$ とすると、 $k_v=5\times 10^{-1}$ となる。

実験室における磁場の時間的変化は大体 $dB/dt\sim 10^{13}(\gamma/s)$ である。これを第 2 表に従って宇宙空間に換算すると、 $dB/dt\sim 4\times 10^{-5}(\gamma/s)$ となる。いま宇宙空間において $\delta B\sim 1(\gamma)$ とすると、 $\delta t\sim 10(\text{hr})$ となる。これは第 7 図 Comet の Tail の Ray Structure の変化の time scale と大体同じである。ゆえにこの実験は Comet Tail の時間変化に関しても、かなりよいシミュレーションを行なっているものと思われる。

第 2 表

	宇宇宙間	実 験 室
長 さ	$k_L \cdot L$	L
速 度	$k_v \cdot v$	v
時 間	$\frac{k_L \cdot t}{k_v}$	t
磁 場	$\frac{k_v \cdot B}{k_L}$	B
dB/dt	$\left(\frac{k_v}{k_L}\right)^2 \frac{dB}{dt}$	$\frac{dB}{dt}$

2.2 中性ガス塊とプラズマ流との相互作用に関する実験

1) 概要

中性ガス塊とプラズマ流の相互作用は Comet のシミュレーションとしても興味あるが、プラズマ物理的には相互作用自体が非常に興味あるものである。特にここでは shock の形成過程について述べる。

2) 実験

実験装置、中性ガス圧分布、プラズマのパラメータは前述の 2.1 の 3) に書いているものと同じである。中性ガス塊用の F・A・V・は 1(kV) に充電されていて、プラズマ銃の F・A・V・の作動と同期して働く。なお、使用した中性ガスは炭酸ガス、水素、ヘリウム、空気である。

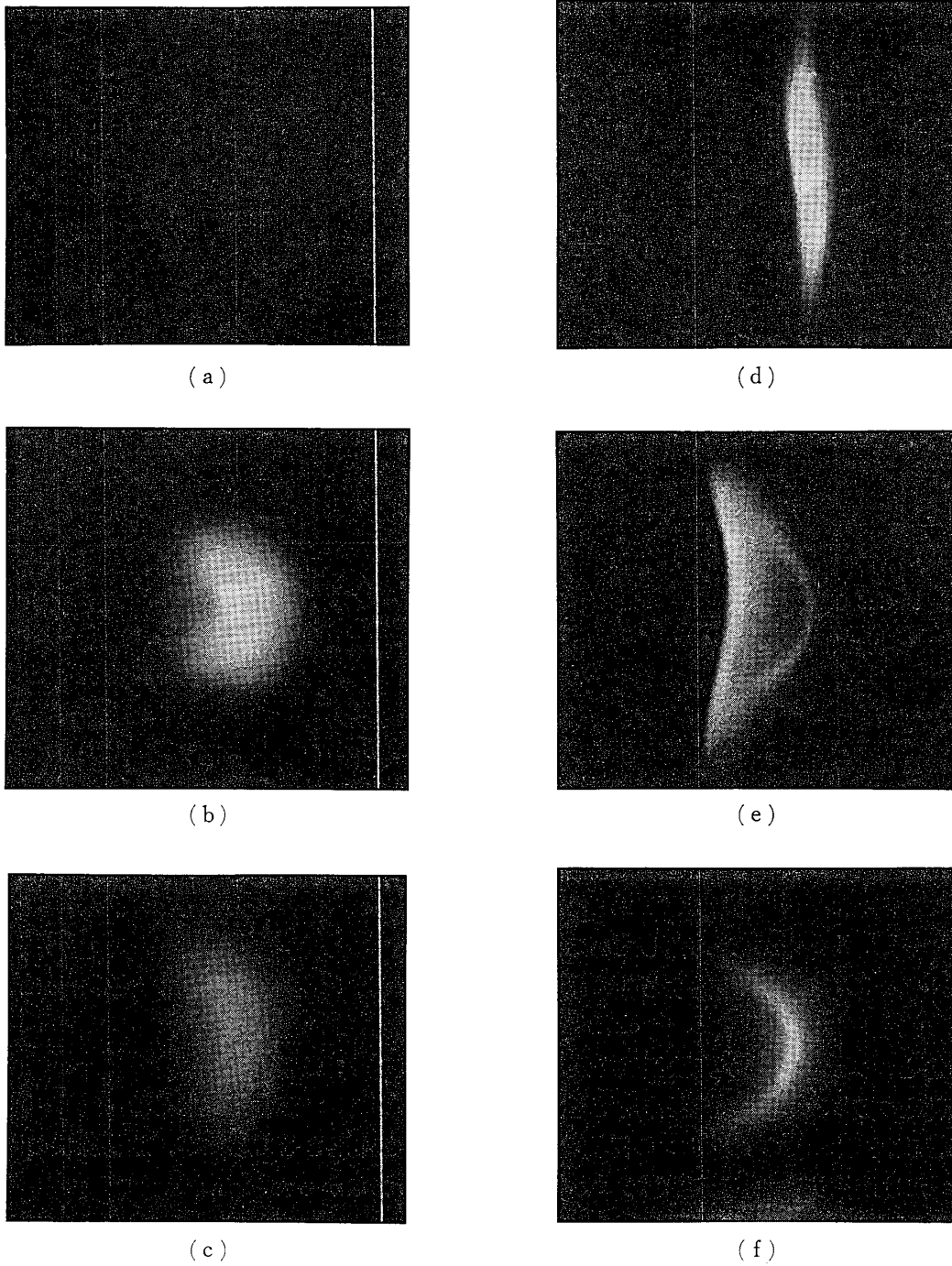
プラズマ銃と実験領域の距離は約 1(m) で、プラズマ銃放電後水素プラズマ流はグリッドがあるときで 18(μ s) 後実験領域に到達する。

3) 実験結果

静かな水素プラズマ流と炭酸ガス塊の相互作用の時間分解写真を第 12 図に示す。プラズマ銃放電後 τ (μ s) においていかなる現象が起こっているかを露出時間 1(μ s) の Kerr Cell シャッターを用いて観測した。なお、プラズマ流は写真の右側よりくる。

- $\tau=0$ (μ s)……相互作用は観測されない。
- $\tau=5$ (μ s)……中性ガス放出孔を中心にして半円状に光っている。これは先駆電子による中性ガスの電離および励起によるものである。
- $\tau=15$ (μ s)……電離した炭酸ガスの密度が減少しているため、光の強度が小さくなっている。
- $\tau=30$ (μ s)……真直ぐに突き立った shock front が観測されている。この shock front の動く速度は 5×10^5 (cm/s) でプラズマ流の速度の $\sim 1/10$ である。ダブルプローブで測定したこのときの実験領域におけるイオン密度の分布を第 13 図に示す。第 12 図 d と第 13 図を比較すると、光っている部分のイオン密度が他の場所よりずっと大きいことがわかる。
- $\tau=40$ (μ s)…… $\tau=30$ (μ s) において観測された真直ぐな shock front はガス塊の核へと動いていく。その際第 9 図に示す様にガス塊は Camera の方向に対して十分拡散していないので、第 14 図のような密度分布をなしている。ただしこの図は中性ガス塊の軸とプラズマ流の流れに対して直角な方向、つまり第 9 図において紙面に対し直角な方向より見た場合である。

それで、第 14 図の shock front a-b-c の内 a-b は shock front の前面のガス密度が大きいので止められてしまうが、b-c は shock front の前面のガス密度が小さいのでその運動量をあまり失わず shock front c は c' へと動き、さらに中心部をも通り過ぎていく。このことは第 9 図の Camera の方向を変え、第 9 図において紙面に



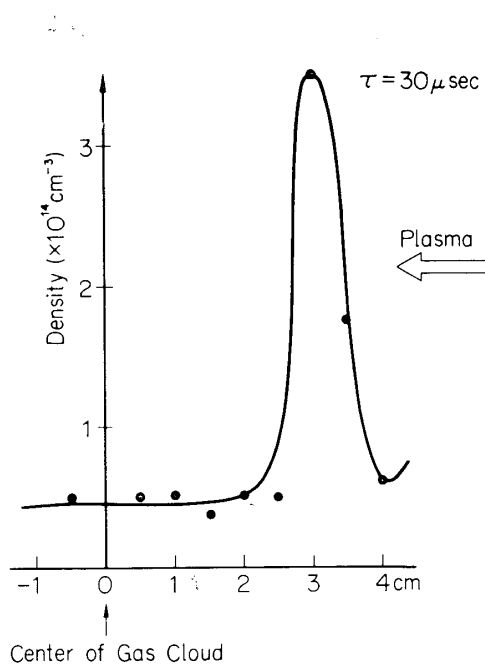
第 12 図 静かなプラズマ流と中性ガス塊の相互作用の時間分解写真

(a) $\tau = 0 (\mu\text{sec})$ (b) $\tau = 5 (\mu\text{sec})$

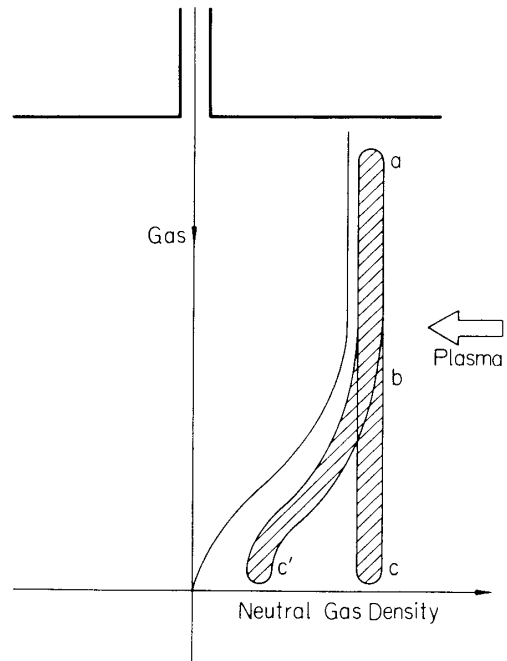
(c) $\tau = 15 (\mu\text{sec})$ (d) $\tau = 30 (\mu\text{sec})$

(e) $\tau = 40 (\mu\text{sec})$ (f) $\tau = 55 (\mu\text{sec})$

τ ; プラズマ銃放電後の時間
 プラズマ流は写真の右側より来る。



第 13 図 イオン密度



第 14 図 プラズマ流と中性ガス塊の軸とに垂直な方向より見た図

直角な方向より観測して確かめられた。

第 12 図 e の放物線状の shock front は第 14 の a-b に相当し、直線状の shock front は第 14 図の c' に相当する。Camera よりガス放出孔をみた場合、その上下のガス密度が一様であれば、第 12 図 e の shock front は真直ぐになるが、実際はその密度に変化があるのでわん曲している。

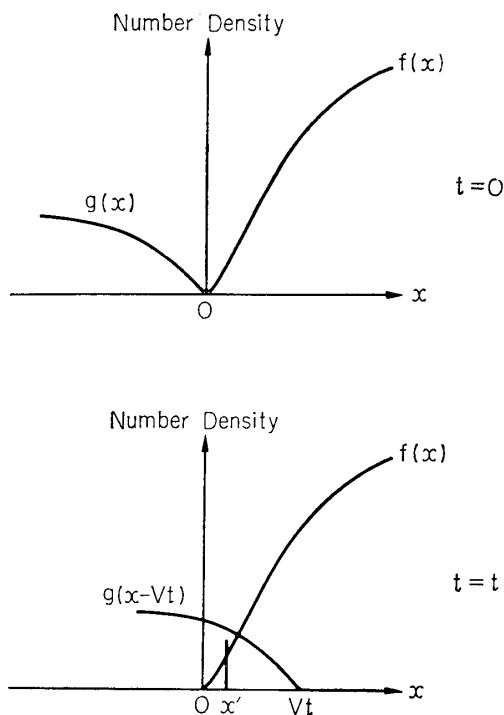
- $\tau = 55 (\mu s)$ ……移動する shock front は Camera の視界より消え、定常的な放物線状の shock front だけが観測されている。

このあと、プラズマ流が実験領域を通過して、shock front は消えていく。

固体とプラズマ流との相互作用でも真直ぐな shock front が観測されるかどうか調べるため、直径 4 (cm) のデルリンの円柱棒にプラズマ流を作用させてみたが、放物線状の shock front だけが観測され、真直ぐな shock front は見られなかった。

4) 討論および結論

真直ぐな shock front はなぜ中性ガス塊とプラズマ流の相互作用のときに表われて、固体との相互作用の場合には表われないのであろうか。また定常的な放物線状の shock front がいかなる過程をへて形成されるのであろうか。プラズマ流と中性ガス塊との相互作用の初期には真直ぐな shock front ができるが、まずこの真直ぐな shock front の形成を「雪かきモデル」で説明してみよう。簡単のために一次元で考える。イオン密度 $g(x - Vt)$ ions/cm³, イオンの質量 M , 速度 V (cm/s) のプラズマ流が密度分布 $f(x)$ (molecules/cm³), 分子の質



第 15 図 プラズマ流と中性ガス塊の相互作用の概念図

量 m の中性ガス塊と時刻 $t=0$ で相互作用を始めるとする。

プラズマ流は中性ガスの一部を電離し、電離されたガスをかき集める。イオンと中性分子との衝突面積はイオンとイオンとの衝突断面積よりもはるかに小さいので、イオンとイオンとの衝突だけを考えればよい。そうすると電離され、かき集められたガスが得る運動量はプラズマ流が失った運動量に等しい。

時刻 t において、かき集められた電離されたガスと運動量を失ったままのプラズマ流が第 15 図の $x=x'$ の位置にあるとすると、この場所 x' にあるものが真直ぐな shock front である。いま衝突の前後で分布関数は変わらないものとする、真直ぐな shock front の様子は下記の方方程式で表わされる。

$$M(V-v) \int_{x'}^{Vt} g(x-Vt) dx = mva \int_0^{x'} f(x) dx \tag{1}$$

ここに、

- | | | | |
|-----------------|--------------|--------------|-----------------|
| $g(x-Vt)$ | プラズマ流のイオン密度 | $f(x)$ | 中性ガスの粒子密度 |
| M | イオンの質量 | m | 中性ガス粒子の質量 |
| V | プラズマ流の速度 | v | shock front の速度 |
| α | 中性ガスの電離される割合 | | |

である。

(1) 式より

$$v = V \cdot \frac{1}{\frac{m}{M} \alpha \frac{\int_0^{x'} f(x) dx}{\int_{x'-Vt}^0 g(x) dx} + 1} \tag{2}$$

(2) 式が真直ぐな shock front の速度である。水素プラズマ流と炭酸ガス塊との相互作用の場合には、実験から $V=6 \times 10^6(\text{cm/s})$ のとき $v=5 \times 10^5(\text{cm/s})$ という一定の shock front の速度を得た。したがって (2) 式の v が一定になるためには (3) 式が成立しなければならない。

$$\frac{\int_0^{x'} f(x) dx}{\int_{x'-Vt}^0 g(x) dx} = \text{const.} \tag{3}$$

いま簡単のため $f(x)=ax$, $g(x)=-bx$ を仮定すると (3) 式を満足する. 実験から $a \cong 10^{16}/3$, $b \cong 10^{14}/60$ であり $M=1$, $m=44$ など必要な数値を (2) 式に代入すると $\alpha \sim 10^{-3}$ を得る. これは中性ガスの 0.1(%) が電離されることを意味し, 中性ガスの密度が $\sim 10^{16}$ particles/cm³ であるので, 電離されるものは $\sim 10^{13}$ particles/cm³ となる. 第 13 図のイオン密度とこの値を比べてみると, この値は一けた小さい. これは shock front はかき集められてきたガスの電離したイオンと, 運動量を失ったプラズマのイオンが一諸になったもので, その場所で電離されたイオン密度より大きな値をもつことは当然なことであろう. それで $\alpha \sim 10^{-3}$ という値はもっともらしい.

プラズマ流が固体と相互作用する場合, プラズマ流の衝突により固体より飛び出たイオンがプラズマ流によりかき集められていくが, そのイオンの密度が小さいのでたとえ真直ぐな shock front が形成されても, その shock front の速度は (2) 式よりわかるようにプラズマ流の速度と大体同じになる. その上, shock front のイオン密度がプラズマ流のイオン密度と大差がないので, 光の強度も shock front の部分が特に大きい訳ではない. それで固体とプラズマ流の相互作用においては真直ぐな shock front は観測されず, プラズマ流が円柱状の固体本体に止められてできる放物線状の shock front しか観測されない.

中性ガスとプラズマ流との相互作用においてはプラズマ流は中性ガスを電離し, 電離されたガスをかき集めて真直ぐな shock front を形成するが, その真直ぐな shock front がガス塊の核の方へと動いていくに従い, ガスの密度が増大するので, 止められて放物線状の shock front を形成するのである.

1969 年 12 月 20 日 宇宙科学