

フランス通信

——レーザー・プラズマの研究——

大阪大学工学部 横山 昌弘

§ 1 まえがき

筆者は1967年4月より一年間フランスの Saclay 原子力研究所でレーザー・プラズマの研究をする機会にめぐまれたので、その際に見聞したフランスにおけるレーザー・プラズマの研究のうち、主として Saclay 及び Fontenay-aux-Roses 原子力研究所の現状について述べることにする。

§ 2 Saclay 及び Fontenay-aux-Roses 原子力研究所

フランスの原子力研究所はすべてフランス原子力委員会 Commissariat A l'Energie Atomique 略称 C. E. A に属し、第2次大戦後フランスの原子力の急速な開発をめざして創設され、主要な研究センターだけでも Saclay, Fontenay-aux-Roses, Grenoble, Cadarache 等があげられる。このうちで Saclay はパリ南方の効外約 20km の島の中にあり、Fontenay-aux-Roses は同じく約 10km の所にある。図1はこれらの原子力研究所の所在地略図を示す。

プラズマの研究はこの2つの研究所で行なわれており、Saclay には Dr. Consoli の指導する Service d'Ionique Générale があり、筆者はここでレーザー・プラズマの研究に従事した。Fontenay-aux-Roses には Dr. Hubert の主宰す

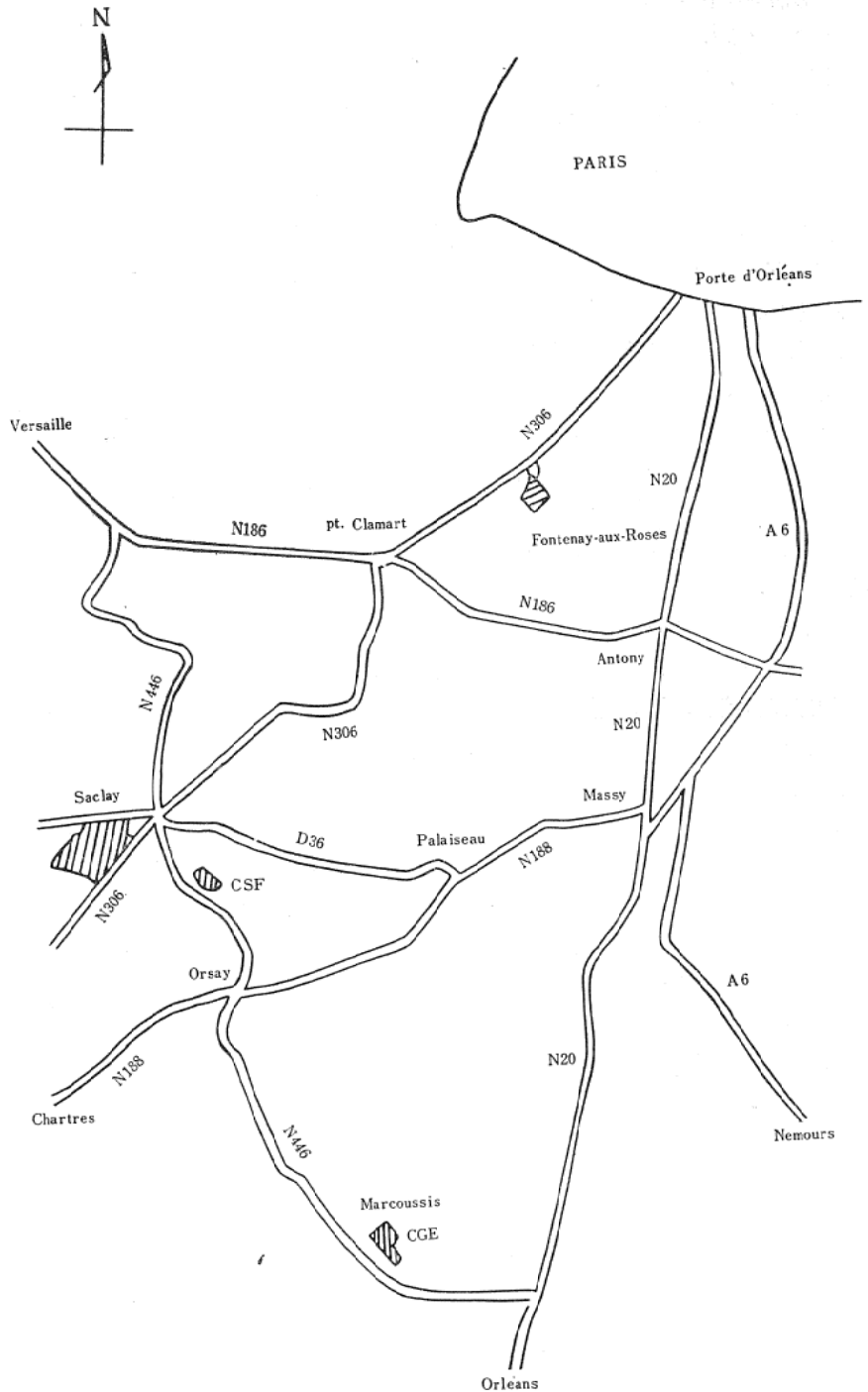


図1 Saclay 及び Fontenay-aux-Roses 研究所所在地

る Service de Recherches sur la Fusion Contrôlée がある。共にこの2つの Services は C. E. A. の Département de Physique du Plasma et de la Fusion Contrôlée に属し、その責任者は M. Trocheris である。現在のフランスの原子力委員長は Dr. F. Perrin である。Saclay の所員は約5,000名、外部研究員を加えると

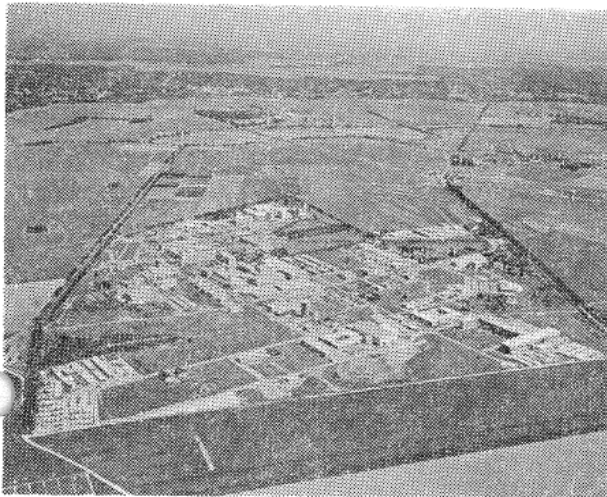


図2 Saclay 原子力研究所

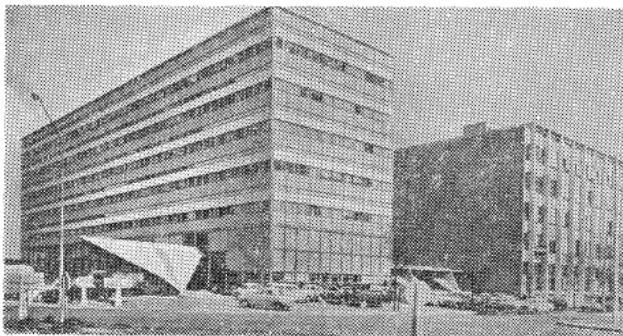


図3 Fontenay-aux-Roses 原子力研究所

10,000名で、Fontenay-aux-Roses の所員は約2,000名であるといわれている。図2は Saclay 研究所、図3は Fontenay-aux-Roses 研究所を示す。Saclay の研究所に隣接して Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires, I. N. S. T. N. という一種の原子力教育機関の建物があり、Saclay と連繫して原子力の研究と教育の二面的役割を有機的にはたしている。

§ 3 フランスのレーザー

フランスには Compagnie Générale d'Electricité, C. G. E. という会社があり、パリー郊外 Saclay の近くの Marcoussis にあるこの基礎研究所で世界最大の出力を誇るガラスレーザーを開発している。

この研究所の所員はレーザー関係のみで約200人であるからその規模の大きさが分かる。C. G. E. でのガラスレーザーの発展段階は図4に示すように2つの方向に分かれている。Qスイッチ方式は現在まで回転プリズム・カーセルであるが Pockels cell がこれにとってかわろうとしている。プリズムで30ns. カーセルで5ns. Pockels cell で4ns のパルス巾が得られており、Pockels cell では1ns まで可能である^{1,2)}。図5に回転プリズムとカーセルを用いた大出力ガラスレーザーを示す。冷却にはいずれも Cr_2O_3 溶液を用いている。

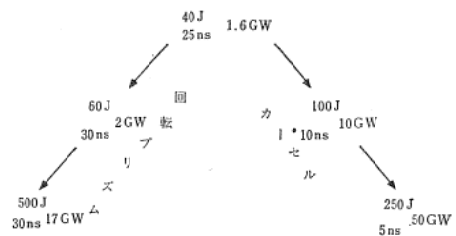
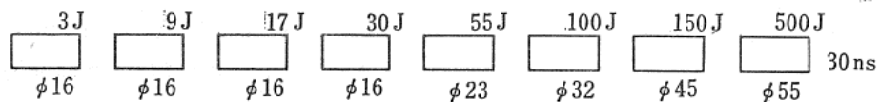
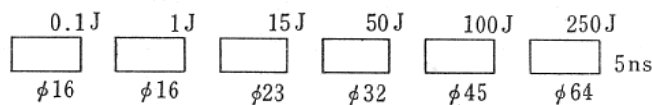


図4 C. G. E. 大出力ガラスレーザーの発展



(a) 回転プリズム17GWガラスレーザー



(b) カーセル50GWガラスレーザー

図5 C. G. E. 大出力ガラスレーザー

今の所、最大の出力を誇るガラスレーザーは10段増中器つき50GWであるが、現在更に大出力をめざして、1000GW (テラ・ワット) レーザーの開発が行なわれている。オーストラリアでも同様な計画が進行中とのことである。この様な大出力レーザーでは発振器のガラスロッドの質が特に重要で、そのロッドのえらび出しの比率は約10対1程度である。C. G. E. では発振器用のガラスロッドをその質によって分類し、grade No. 1, No. 2, No. 3 と名づけており、1GW 程度の出力レーザーでは No. 2, No. 3 を用い、それ以上の出力を要求される場合 No. 1 を用いる。それ故 No. 1 の価格は No. 3 に比べて約10倍高く、No. 2 は約1.5倍である。この大出力レーザーの応用としては KDP 等を用いた non-linear optics への応用、又は固体重水素を用いた核融合反応プラズマの研究への応用等が考えられている。

この他、同研究所では Nd glass の mode-locked laser により 3~10ps. 数 mJ のレーザーパルスが得られており、dye を用いると更に狭まいパルスが得られている。更に、回転プリズムの他に cavity の外に KDP スイッチングを組合わせて 1ns のレーザーパルスを得ている。この方式では double カーセルよりもはるかによい homogeneity が得られる。

C. G. E. のルビーレーザーには一段の 2~10shots/sec の high repetition rate のレーザーがある。この出力は 6943 Å で 1J. KDP を用いた 2nd harmonics の 0.347 μ で 100mJ である。このレーザーは回転プリズムを用いてその回転速度は 800rot/sec である。このルビーレーザーの応用としては地上の 3 基地よりの人工衛星のためのレンジファインダーに用いることと、更にこれよりも高出力のもので人工衛星を照らし、宇宙空間の background より人工衛星を識別することが考えられておりすでに実用化されている。

ガラスレーザーの他の一つの応用としては、高性能の optics を用い 3~5 μ のマイクロホールをあけること、又は巾 20 μ 長さ 10mm のスリットをつくるこななどが実用段階に入っている。

この他、C. G. E. は出力 1000W の CO₂ レーザーで知られている。この CO₂ レーザーは溶接用としてその用途が広い³⁾。事実 He-Ne ガスレーザー及び液体レーザー⁴⁾ 管のブリコスター窓の融着には小型の CO₂ レーザーが用いられている。大出力のものは高圧ポンベの溶接等に用いられているようである。又長さ 3m 位の D. C 励起の CO₂ レーザーに回転ミラーによって Q スイッチ発振に成功している。ピークパワーは 25KW, 100ns より小さい発振パルスが得られている。将来は saturable dye, SF₆, による Q スイッチが考えられている。

C. G. E. がガラスレーザーを主として製作しているのに対し、C. S. F. Compagnie Générale de Telegraphie Sans Fil という会社ではルビーレーザー、ガスレーザー、半導体レーザーなどを製作している。この会社のルビー・レーザーは Q スイッチ方式として transmission 25~31% の non-linear glass を使用しているのが特徴である。出力は 2 段レーザーで 1~2J, 30ns 程度の安定したパルスを簡単に得ることができる。

この他 C. S. F. では delay line を利用したルビーの短形波ポンピングで通常発振の出力 50J のルビーレーザーがある。これは微少溶接に用いる目的で Q スイッチはかけておらず pulse duration は max 10ms で 1shot/3sec のくりかえしである。

更に C. S. F. では GaAs 半導体レーザーに 75KC と 7.5MC の A. M. をかけ 9100 Å の赤外光を用いて物体よりの反射光の位相から距離測定に用いることに成功している。測定精度は夫々 1km ± 1m, 4m ± 1cm である。

A₊ レーザーについては C. S. F. が seal off 型であるのに対し、C. G. E. では flow system をとっており、このためレーザー管の寿命は C. G. E. の方がはるかに長い。C. G. E. の A₊ レーザーの出力は 15W, C. S. F. の出力は最大 5W である。

§ 4 Saclay でのレーザー・プラズマの研究

Saclay 研究所では上に述べた C. G. E. ガラスレーザー、C. S. F. ルビー・レーザー及び He-Ne, A₊ ガスレーザー等を用いてプラズマの研究が行なわれている。

Dr. Consoli のひきいる Service d'Ionique Générale は約 80 名の科学者、技術者がいる。この研究室の特色は Grad M. F. を利用したプラズマ加速で知られており、大別して

- 1) Wave-Plasma interaction
- 2) Diffusion, Microinstability
- 3) プラズマ診断
- 4) 理論
- 5) 技術開発

の 5 つのグループに分けられる。

第 1 のグループには low frequency のものでは 1~5MC, 300KW, 150 μsec の回転磁界によってプラズマを閉じ込め安定化する実験とイオン電子の space charge acceleration の実験などがあり、high frequency のものでは 1.2~10G. C. の static な磁界中の電子サイクロトロン共鳴によるプラズマ加速の実験がある。

之等のうちで代表的な ICARE という実験について述べる^{5,6)}。これは Ionization dans Cavité Resonance の

略称で、1MW の大出力の RF エネルギーと $n_e > n_c$ の電子密度での static な磁界中の電子サイクロトロン共鳴によるプラズマ加速の研究と TE₁₁₂ mode の single resonance structure 中のプラズマビームのトラッピングの研究を目的としている。その実験装置を図6に示す。プラズマはアルミナロッド・ターゲット上にレーザーで作られる。このプラズマが膨張して $\omega_{H.F.} = \omega_{ce}$ の共鳴領域に入り加速される。R.F. エネルギーは周波数1250 MC, 100 μ s の duration で max パワー1MW のクライストロンから1秒ごとに供給される。レーザーは1.6 GW, 25ns の C.G.E. Qスイッチ・ガラスレーザーである。磁界の grad は26ガウス/cm で、装置の back pressure は約 2×10^{-7} Torr である。プラズマの電子密度は2mm, 4mm マイクロ波干渉計で、電子温度はX-線で測定する。イオンエネルギー測定には静電アナライザーを用いる。

プラズマに入射したエネルギーと反射、透過したエネルギーの測定から、RF エネルギーはほぼプラズマに吸収されていることが分かっている。即ちプラズマに印加された RF エネルギーによってイオンエネルギーが10~100 倍増大していることが明らかとなっており、静電アナライザーを用いて max イオンエネルギーとして最

大20KeV が測定されている。現在は液体 He 温度に冷却した solid deuterium ターゲットによりプラズマを作り、加速を行なった後の中性子の検出を計画中である。

更にこの他、レーザーで作られたプラズマの Heating と Cooling の実験がある。プラズマは1J. 30ns C.S.F. non-linear glass Qスイッチルビレーザーを用いて、カーボンターゲット上又は Ar 水素等の気体を breakdown して作られる。Basov の理論⁷⁾ が示すようにレーザーによるプラズマ加熱はプラズマ生成の初期に予想されるので、プラズマの密度と強度の build-up と decay をレーザープラズマの初期に測定する必要がある。それ故プラズマの診断には5ns, gain 35,000 の時間分解を有する2段イメージコンバーターを用いる。これはストリークのための RCA 4449 tube と光電増幅のための EEV tube を組合わせたものである。図7にその実験装置を示す。

プラズマの密度測定はスタルク巾を利用して行こう。ターゲットプラズマの場合、1気圧の水素を封入した場合に、レーザーでプラズマが生成されてより500ns の間で H_{β} 線 ($\lambda 4861 \text{ \AA}$) のスタルク巾は約200ns の所で最大となる。半値巾 200 \AA が得られており、これは電子密度 $10^{18} e/cm^3$ に対応している⁸⁾。気体の breakdown に

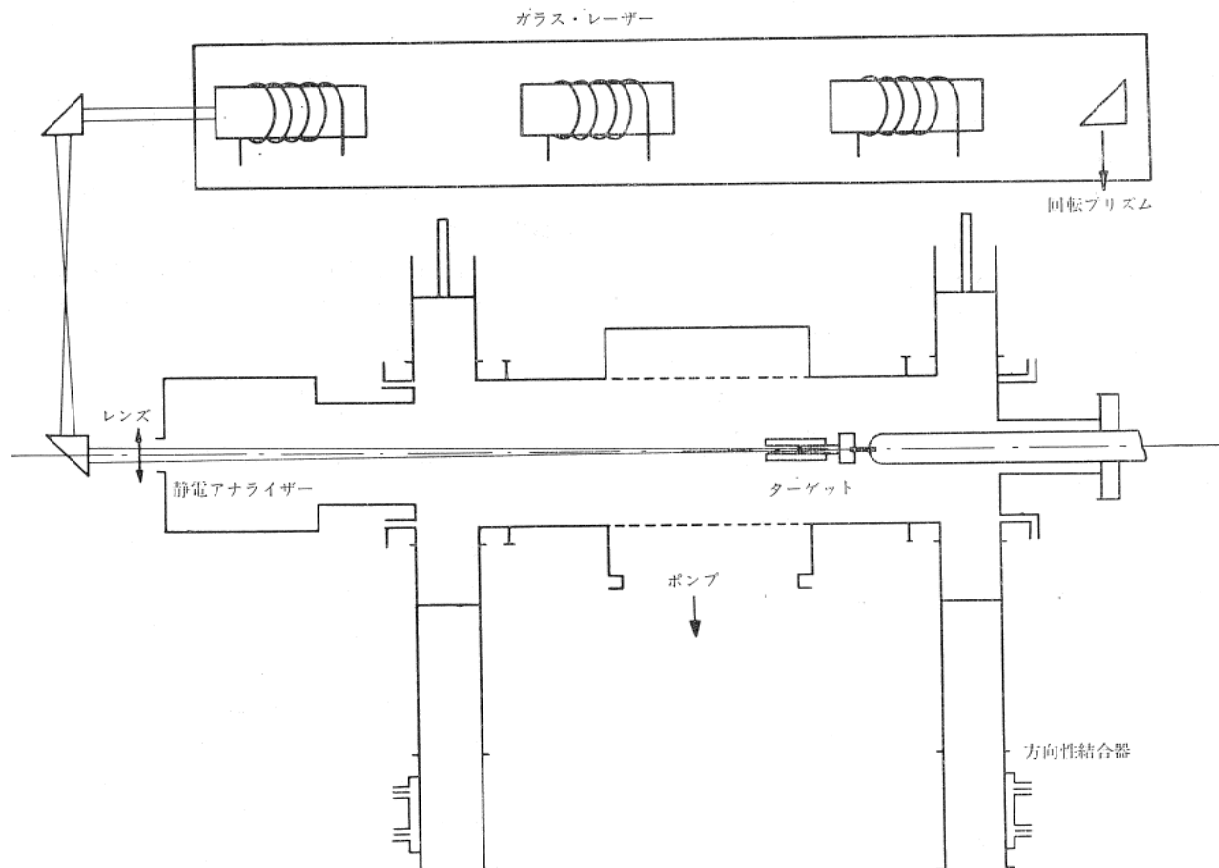


図6 ICARE 実験装置

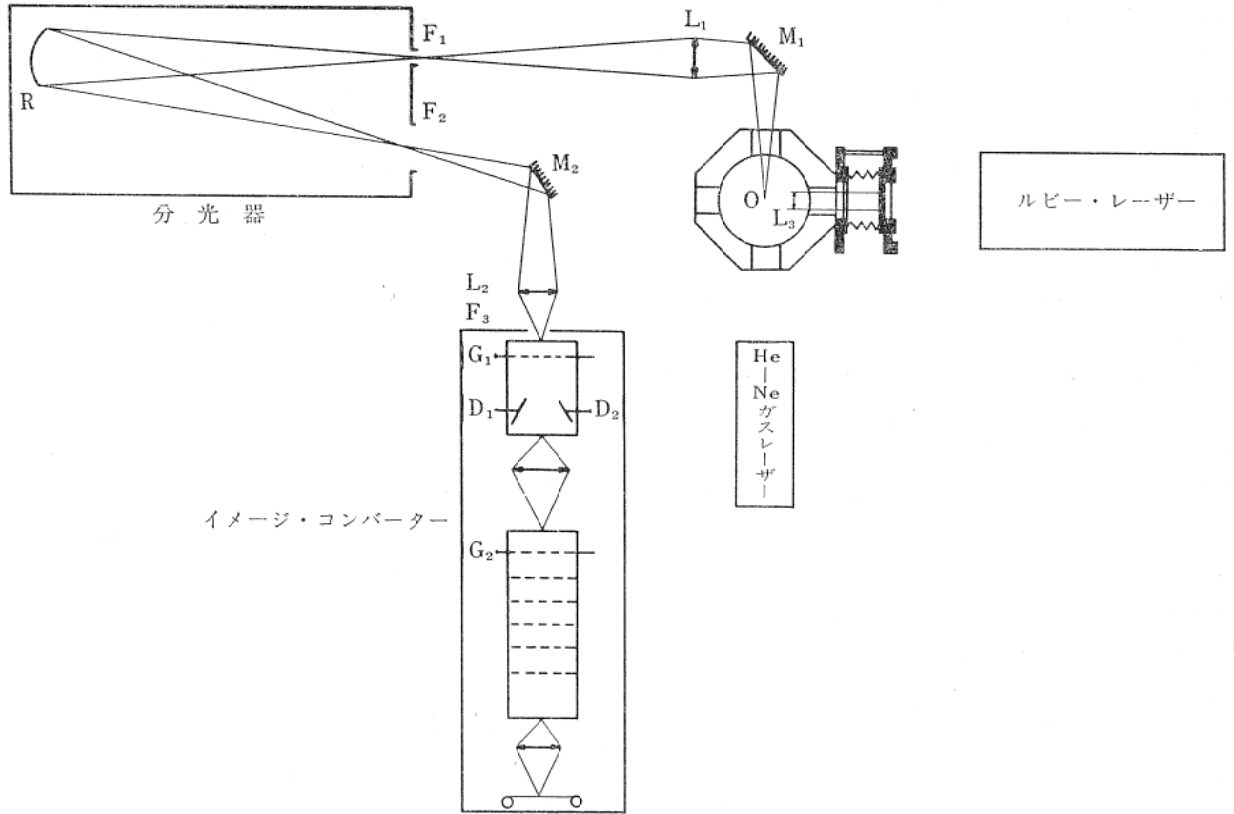


図7 高時間分解高感度レーザー・プラズマ実験装置

よるプラズマの場合、 A_r 一気圧の時 A_r II 4806 Å のスタルク巾よりプラズマの中心部で $n_e = 3 \times 10^{18} \text{e/cm}^3$, r をプラズマの半径とした時中心より $\frac{r}{2}$ の所で $n_e = 1.5 \times 10^{18} \text{e/cm}^3$ が得られている。温度はスペクトル線強度比より $I_{4806}/I_{4609} = 9\text{eV}$, $I_{4348}/I_{4609} = 7\text{eV}$ が測定されている。その他、強度についてはスタルクシフト d とスタルク巾 w の比 d/w より $T_e = 8\text{eV}$ が得られており、その一致はよい⁹⁾。水素一気圧の場合、スタルク巾より求めた電子密度は $n_e = 10^{17} \text{e/cm}^3$ で H_β 線と 100\AA 巾の Continuum の強度比より求めた強度は $T_e = 14\text{eV}$ である。図8は A_r 300mmHg の場合、 A_r II 4806 Å 線のスタルク巾より求めた電子密度と、 A_r II 4806 Å 線と A_r II 4609 Å 線のスペクトル線強度比より求めた電子温度の時間変化を示す。この図で時間ゼロはプラズマの build-up と一致する。

更に、プラズマよりの光の 10ns, 30ns, 100ns ストリーク写真よりプラズマの膨張速度を求め、これよりプラズマの径方向の膨張を時間に対してプロットしたものを図9に示す。detonation wave theory¹⁰⁾ によると波動の伝播距離 x は時間 t に対して、

$$x \propto t^{\frac{3}{5}}$$

で与えられ、一方 blast wave theory^{11,12)} によると

$$x \propto t^{\frac{2}{5}}$$

で表わされる。図9の実験結果は夫々直線部分の傾斜 0.65及び0.39を与えるから、約20ns までのプラズマの膨張は laser radiation supported detonation wave で、それ以後はプラズマは blast wave 型で膨張することが分かる⁹⁾。

第2の diffusion, microinstability のグループの実験には DAPHNIS がある。これは Diffusion Accélééré des Protons d'Hydrogène et d'Azote Ionisés の略称で、目的は drift instability のみが予想される高密度の静かなプラズマを作り、磁力線を横切る粒子の拡散を研究することである。macroscopic instability を除くために測定はすべて定常状態でおこなう。図10にその実験装置を示す。プラズマは径方向の直流電界をもつ同軸ソースを用いて作り、測定チェンバー内に磁力線に沿って自由に拡散するようにしてある。プラズマは 8KG の磁界の時に $3 \times 10^{12} \text{e/cm}^3$ の密度で、電子温度は 15eV, イオン温度は 1eV である。診断には Langmuir probe 8mm マイクロ波干渉計等を用いるが磁界に垂直方向の拡散係数 D_\perp が Bohm 係数の $\frac{1}{10}$ であることが分かっている。

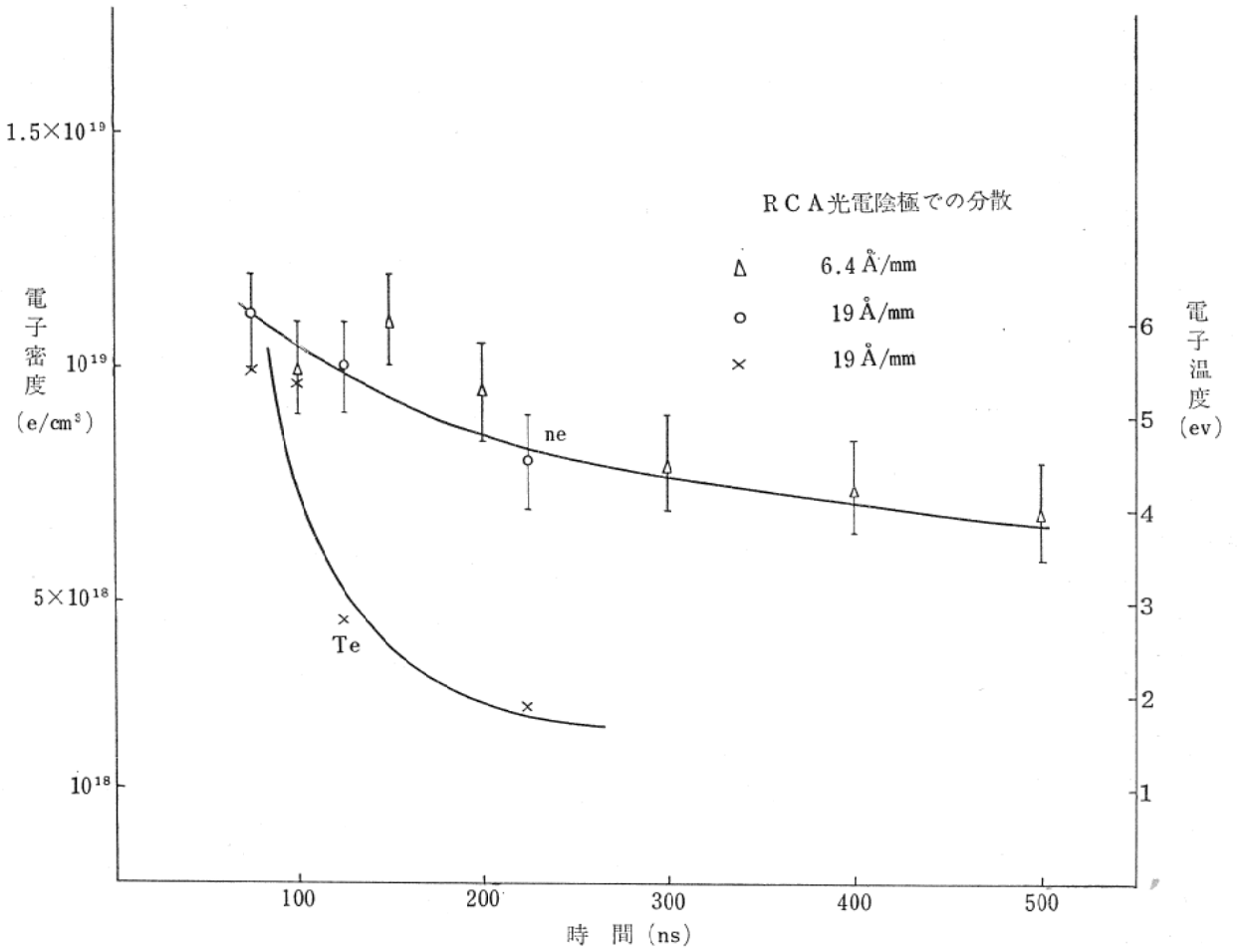


図8 電子密度及び電子温度の時間変化

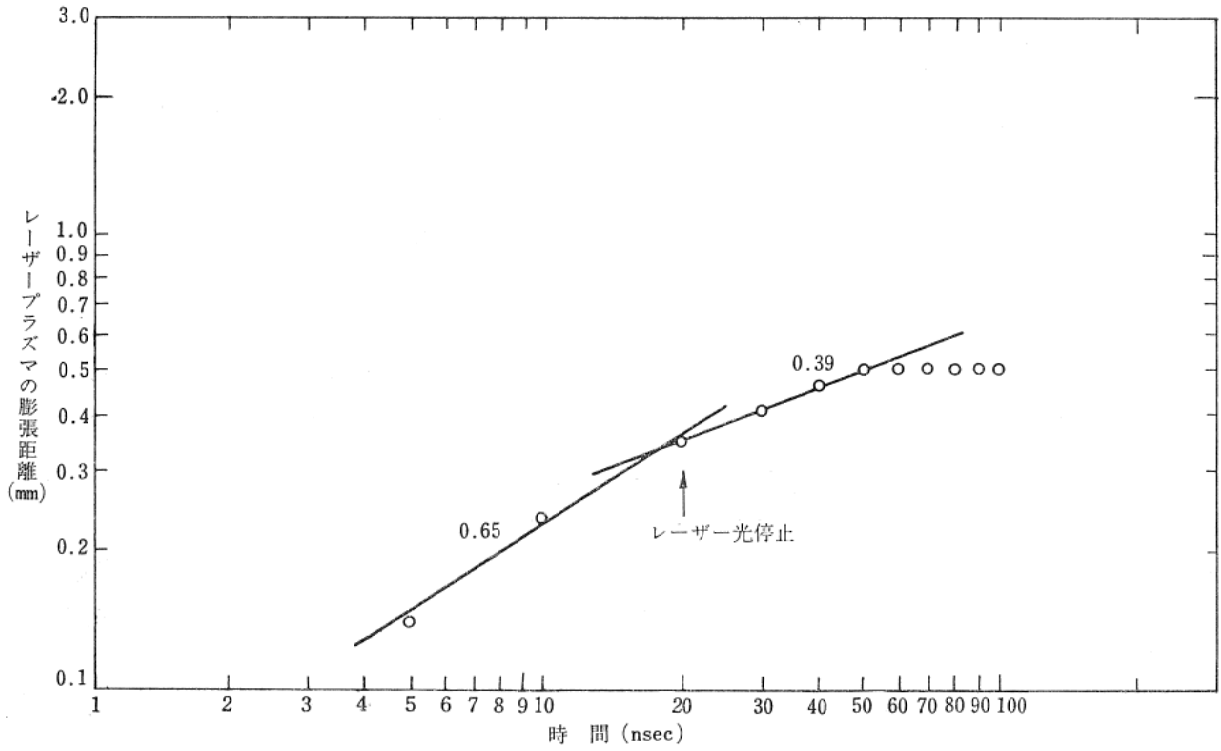


図9 プラズマの膨張距離対時間の関係

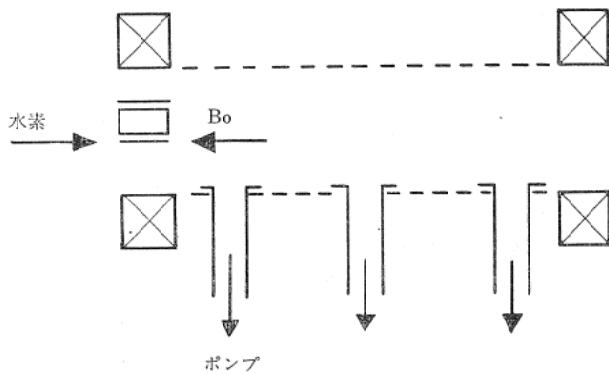


図10 DAPHNIS 実験装置

この実験ではこの他、プラズマ柱内に発生している不安定性をしらべるため相関計を用いて密度と電位の空間的、時間的相関関数を測定している。

この他にこのグループには PUMA という end loss をなくすため閉じた磁界配置で静かなプラズマを作る実験とか、IRIS という波動と粒子間のエネルギー交換を研究する実験等がある。

第3のグループにはQスイッチ・ルビー・レーザーで作られたプラズマによる2mm, 4mm マイクロ波のトムソン散乱¹³⁾の実験がある。これは銅又はNiで作られた2個のstigmaticレンズとsemi transparentミラーを用いた2組のファブリー・ペロー干渉計からなっている。このcavityは約10,000のQをもっている。第1のファブリー・ペローによって35W, 4mmカルシノトロンよりのマイクロ波をcavityの中央に焦点を結ばせる。第2のファブリー・ペローにより、cavityの中央に30MWルビーレーザーで空気中又は、希有ガス中に作られたプ

ラズマより90°方向に散乱されたマイクロ波を検知する。この装置の特徴はhigh Q cavityであるため予想される周波数のシフトを検出する充分のselectivityがあることである。勿論散乱されたマイクロ波のエネルギーは非常に小さいので干渉計は 10^{-11} Wの検出感度を有するスーパーヘテロダイン増巾器に結合されている。4mmマイクロ波の場合、プラズマパラメーター α は λ_D をデバイ長さ、 ψ を散乱角、 λ を入射レーザー波長とすると、

$$\alpha = \lambda / 4\pi\lambda_D \sin \frac{\psi}{2} \approx 100$$

であるから、イオンにもとづく散乱スペクトルを検出できる。これまでに得られた実験結果によると空気の場合、breakdownより200 μ sあとで2~3eVのイオン温度が測定されている¹⁴⁾。

この他には、電子ズームを利用した光電スペクトロメーターの実験がある。これはファブリー・ペロー干渉計で生じた干渉輪を径方向に走査してスペクトルプロフィールを記録する装置で図11にその概要を示す。装置はファブリー・ペロー干渉計、電子ズームで倍率 γ を可変にしうるImage Intensifier I.C., circular slit F, 検出器D, オシロスコープよりなる。sampling techniqueを用いることによりプラズマのスペクトル線のfast evolutionを記録し得る特徴がある。

この他にプラズマ中の磁界をFaraday-effectを利用して測定する装置がある。装置は高輝度のランプ、ポラライザー、Verdet 常数の大きなガラスプローブ、P.M.よりなる。そしてこのP.M.の出力電流から磁界の強さが得られるようになっている。測定の領域は $5 \times 10^{-2} \sim$

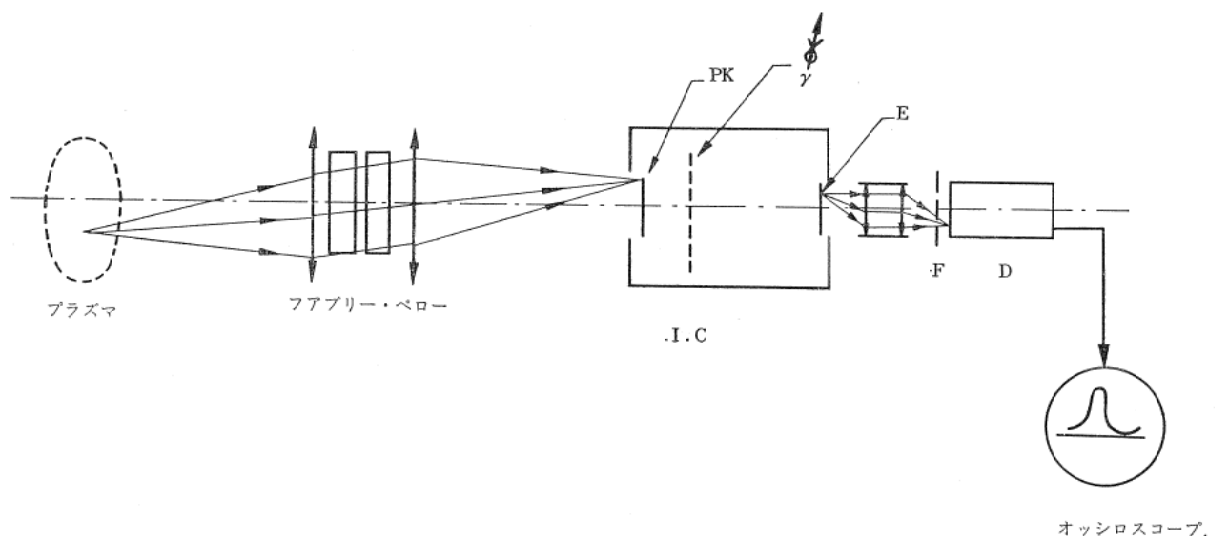


図11 電子ズーム光電スペクトロメーター

20,00ガウス, 10cps~30MC である。

更に, ガスレーザー・ルビレーザーを用いたホログラフィーの実験がある。現在までの所 He-Ne ガスレーザー (4mW) 及び Ne-Xe ガスレーザー (0.1W) を用いて, 対象とフィルムの距離5cm, 10 μ s の震出時間でホログラムを得ている。

又, この Service とは別に, Dr. Manus の Service des Interactions Electroniques では C. G. E. Q スイッチルビレーザーによる気体電離の研究がなされている。使用ガスは水素とセシウムである。目的は多重光量子による電離断面積を実験的に測定し理論¹⁵⁾との対比をすることにある。測定にはパルス電圧を印加した charge collector を用い, 電子によるシグナルは光電効果による誤差が大きいことを考慮してイオンシグナルのみをとりあげ, レーザー出力によるコレクター電流の変化を測定する。使用レーザーは1J 30MW である。

この他の実験として He afterglow 中の再結合の研究がある。これは3cm マイクロ波の導波管の中にプラズマを入れ, propagation 法によって再結合をしらべる。電子密度 $10^9 \sim 10^{13} \text{e/cm}^3$ で再結合は中性 He 原子の関与した3体衝突であることが分かっている。又別に, ヘリカル He ランプを用いたセシウムの optical pumping の実験がある。この目的はレーザー発振ではなく, セシウムの population inversion を得ることにある。密度は $10^9 \sim 10^{11} \text{e/cm}^3$, T_e が約5000°K である。

§ 5 Fontenay-aux-Roses でのレーザープラズマの研究

ここにはプラズマ部門として, Dr. Hubert のひきいる Service de Recherches sur la Fusion Contrôlée があり, 核融合反応をめざして研究を行こなっている。この研究室の所員数は全部で150名位である。

ここの代表的な装置は DECA II で, induction gun で作られた重水素プラズマを磁界の中に断熱的に圧縮閉じ込めを行こなう。1Kev の平均エネルギー高温プラズマの lifetime は単一のミラー配置で50 μ s, magnetic well configuration で200 μ s である。マイクロ波干渉計, UV 分光, 中性ビームの減衰より測定した密度は $10^{13} \sim 3 \times 10^{14} \text{e/cm}^3$ である。図12にその実験装置を示す。現在新らしい DECA III が建設中である。

更に Bille-en-Tête という装置がある。これは2つのプラズマガンを用いてプラズマをうち出して衝突させ, 種々の D. C. 磁界を印加してトラップされたプラズマの安定性をしらべること及び, 衝撃波又はイオンサイクロトロン共鳴加熱の方法を研究することに用いられている。プラズマガンより打ち出された粒子の総数は $10^{17} \sim 4 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ で速度は $3 \times 10^6 \sim 5 \times 10^7 \text{cm/sec}$ である。プラズマが磁気容器内で衝突したあとの密度は $5 \times 10^{12} \sim 10^{14} \text{e/cm}^3$ と測定され, 温度は $T_i = 100 \text{eV}$, $T_e = 15 \text{eV}$ が得られている。トロイダル型のものとしては Harmonica という装置がある。これには2つの型があり, 円型トロイダルのもの, 8の字型のものがある。いずれもプラズマの平衡と安定性を研究の目的としている。使用ガスは H₂, D₂ He の $P = 10^{-2} \text{mmHg}$ で軸に沿っての電流と磁界は夫々 $I_s \leq 20 \text{KA}$ 及び $B_s < 16.5 \text{KG} \sim 50 \text{KG}$ である。

この他に EPPE-STATOR という装置がある。これは tubular plasma を hard-core configuration の磁界の中に閉じ込めるもので EPPE は直線型, STATOR はトロイダル型である。前者は $B_z = 12 \text{KG}$, $n_e = 2.5 \times 10^{15} \text{e/cm}^3$, $T_e = T_i = 45 \text{eV}$ lifetime 250 μ s である。この装置では He-Ne ガスレーザー干渉計の3.39 μ 赤外線密度測定が行なわれ, $P = 10^{-2} \text{mmHg}$ の水素で $n_e = 10^{14} \sim 10^{15} \text{e/cm}^3$ が測定されている。

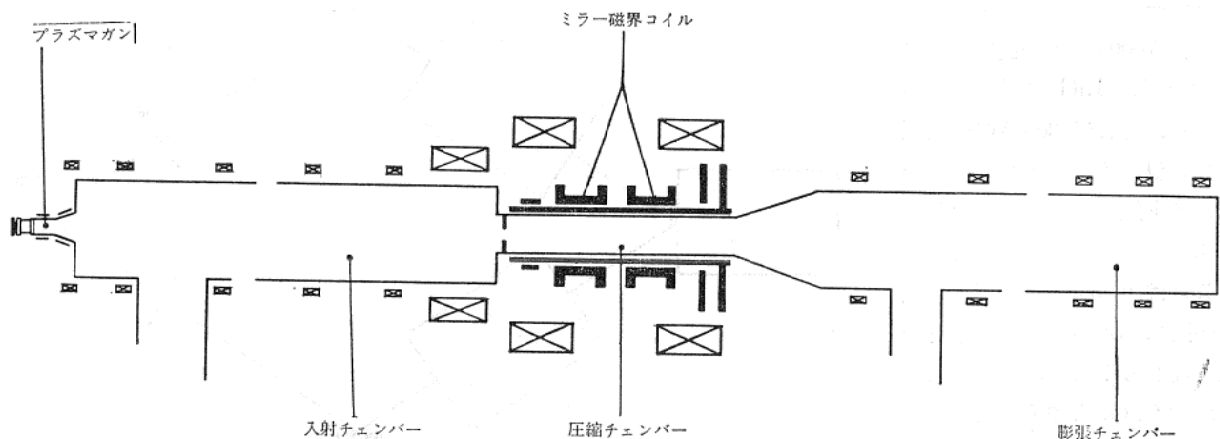


図12 DECA II 実験装置

このレーザー干渉計は SABLIER というコニカル直線放電プラズマにも用いられ、 $P=1\text{mmHg}$ の水素で電離度 5%, $n_e=10^{16}\text{e/cm}^3$ の範囲を測定している。密度測定チェックには水素の H_α 線のスタルク巾を利用している。

ビーム・プラズマ相互作用の研究には EOS というイオンビームを用いた実験と ECLAIR という電子ビームを用いた実験とがある。EOS の原理はプラズマ中に一つ又は、2つの相対するイオンビームを通過させて不安定を励起する。実験には 10KG の磁界で 7KeV, 30 mA の H_2^+ イオンビームを用いる。実験結果によれば、イオンサイクロトロン周波数の高調波の振動が励起されており、この振動はほぼ磁界に垂直に伝播することが分かっている。ECLAIR の原理は磁力線に平行に相対する 2つの電子ビームを用いる。1KG の磁界で 2.5KeV, 30mA の電子ビームを用いている。 $\omega_{ce}/2$ 又はその高調波の周波数の不安定性の機構がしらべられて大振巾の定在波の励起が観測されている。

レーザープラズマの研究には次のようなものがある。先ず 30MW, 1J の回転プリズムルビーレーザーによる、 A_r 窒素質の気体の breakdown の実験がある^{16,17}。チャンバー内の気圧は 50気圧まで変化できる。気体のレーザーによる breakdown の機構については、これまで逆制動輻射によると考えられてきたが、最近では多重光子効果説が有力になってきている。しかしここでは球ギャップ間に、threshold の 1/100~1/200 のレーザーを focus して 2 次電子を比例計数管を用いて検出し、電離の前駆現象を観測し、多重光子説を否定する実験を企てている。

レーザープラズマの第 2 の実験は 3 相, 1000V の静電界により 20μ の直径の LiH 粒子を真空中に保持し、それに 30MW の回転プリズム Q スイッチ・ルビーレーザーの光を照射してプラズマ化し、そのふるまいを分光学的にしらべる。これは次の同じプラズマの磁界中の閉じ込めのための予備実験のようなものである。

それは C. G. E. 3 段 40J, 30ns ガラスレーザーの 1.06μ をあて生じたプラズマを一様磁界又はミラ

ー磁界中に閉じ込める実験である。プラズマの診断には 2mm マイクロ波の反射, P.M. プロブ, 分光器, UV detector charge collector を用いる。現在までの所 charge collector の波形に 3つのピークが観測されており、第 1 のピークは UV 輻射によるもの、第 2, 第 3 のピークは水素又は Li イオンによるものではないかと考えられており、質量分析器を用いることを計画している。将来は磁界をテニスボール型にすることを計画している。

更にこの他、GW レーザーの電磁界による atomic bound electron の virtual interaction の実験がある。ガラスレーザーで Hg vapor 中に virtual interaction をおこさせ、 0.1MW/cm^2 で $1/100\text{\AA}$ 程度と予想されるシフトを多チャンネル・ファブリー・ペロー干渉計で検出することを企てている。

§ 6 Limeil でのレーザー・プラズマの研究

C. E. A. には Saclay, Fontenay-aux-Roses の研究所の他に、パリ郊外の Limeil に Centre d'études de Limeil という軍事部門の研究所があり、この Service Physique Générale でレーザー・プラズマの研究が大

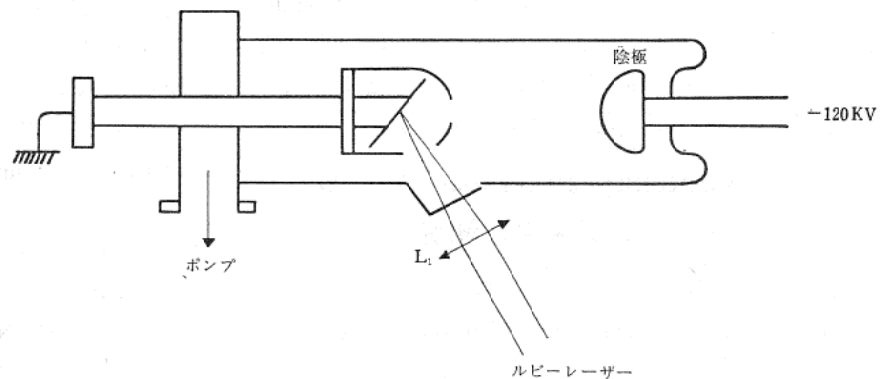


図13 レーザー・プラズマ加速装置

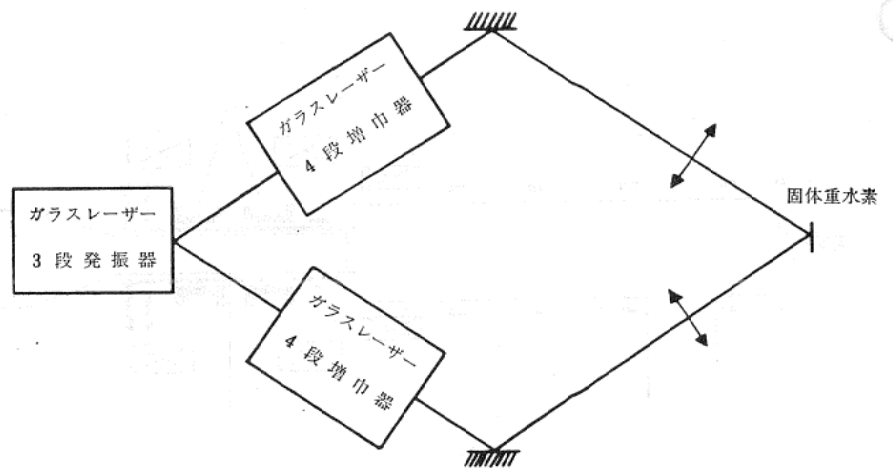


図14 レーザー・プラズマ核融合実験装置

規模に行なわれている。ここでは水爆の開発が行なわれているため、研究所の訪問は許されていないが知り得た所では次のような研究が行なわれている。

最大エネルギー 0.8J, 40ns の回転プリズム・ルビーレーザーの光をカーボン M_0 ターゲット上に焦点を結ばせプラズマ粒子の空間角度分布をフェラデーコレクターでしらべ、その他、静電アナライザー、UV スペクトロメーター、ロゴウスキーコイル、ルビーレーザー干渉計などによって、最大イオンエネルギー 1.5KeV 電子密度 $10^{17} \sim 10^{18} \text{e/cm}^3$ を観測している^{18,19)}。

第2の実験では重水素のターゲットにルビーレーザーの光を照射し、生じた重水素イオン (D_2^+ , D^+) を 120KV で加速し中性子の発生を観測している。その実験装置を図13に示す。その結果 6×10^7 中性子/パルスの emission を確認している。

最近では核融合をめざして固体重水素ペレットを用いて図14のような装置で研究を進めている。いずれもレーザーは C. G. E. ガラスレーザーで 70J, 15ns の出力である。

この他、Solid Be ターゲットにレーザーでプラズマをつくり、このプラズマにガスレーザーの光を直角にあて、その吸収の時間変化を測定して、プラズマの吸収係数を求めこれより電子密度又は電子温度を測定する実験が行なわれている。この方法は特に continuum の多く出る高温高密度プラズマの診断に有効であろうと思われる。

レーザー光の散乱によるプラズマの診断は 20KJ, 5 ~ 8 μ s の直線ピンチプラズマに 100KG, 1.5 μ s のカスプ磁場を印加し、2J, 30ns の Korad Pockels cell ルビーレーザー光を直角にあて、その各々に 90° の方向の散乱光を観測することによって行なわれている。使用ガスは $D_2 \cdot 10^{-1}$ Torr, $n_e = 10^{15} \sim 10^{17} \text{e/cm}^3$, $T_e = 1 \sim 20 \text{eV}$ でプラズマパラメーターは $\alpha = 1$ の状態である。

将来はさらに 100KJ の hard core pinch plasma を用いて、 $n_e = 10^{19} \text{e/cm}^3$, $T_e = 1 \text{KeV}$, 20ns で 90° の散乱の時 $\alpha = 1.5$, 5° の前方散乱の時 $\alpha = 3 \sim 4$ の状態が期待されている。さらにレーザーを YAG, CW レーザー, CO₂ レーザーを用いこれに変調をかけ散乱に用いることが計画されている。この他、レーザーで作られたプラズマによる入射レーザー光の散乱光をフェブリー・ペロー干渉計でしらべ、トムソン散乱のスペクトル分布を観測する実験も企てられている他、multi-mode ルビーレーザーを用いたホログラフィーによるプラズマの診断も計画されている。

この研究所での laser produced plasma 研究の目的は、きれいな水爆のトリガーに用いることと核融合反応

にあり、散乱、吸収、干渉、ホログラフィー等を新しい診断法として各種のプラズマに適用している。

§ 7 結 論

現在フランスでは研究室で増巾器つき 2 段レーザーがひろく使用されていて、single stage レーザーをみかけることはまずない。そしてその製品は C. G. E. が圧倒的で、C. S. F. がこれにつづいている。この様に世界一のレーザーを誇る C. G. E. が存在していることは、フランスでのレーザーを用いる研究が他国に比らべて一段と有利な立場にたっていることになる。イタリアの Frascati ではプラズマの研究者がプラズマの研究に用いる大出力レーザーを彼等自身で開発せねばならないという事情にあり、そのために cryogenic deuterium pellet の実験が大幅に立ちおくらせている。このことは又日本にもあてはまることであろう。

レーザーを用いたプラズマの研究はよく知られている様にプラズマの生成に用いることと、診断に用いることとに大別されている。プラズマの生成はアメリカでは、Korad のルビーレーザーが進歩しているため主としてルビーレーザーを用いているのに対し、フランスではガラス・レーザーが主流である。そして大出力を用いる方向に進んでいるが cryogenic pellet の保持の技術的困難のために各国とはほぼ同じレベルにあると考えられる。診断法では干渉を利用した方法はもはやマイクロ波と同様に一般化されて利用されている。ルビーレーザーによる散乱を利用する診断法は核融合大型装置に適用する方向に進みつつある。

フランスの研究について言えることは、Saclay でみるかぎり研究所側と製作会社側の研究協力体制が非常に緊密なことである。会社側のスタッフがパートタイムではあるが研究所にきて、ある研究グループに属して働いていることは珍しいことではない。このことは技術者についても同様であり、会社側の研究に対する協力は相当なもので、これは恐らく C. E. A. の巨大な組織と 54 億フラン/年という予算的バックをぬきにしては考えられないであろう。地理的にみても Saclay, Fontenay-aux-Roses の 30km 以内には実に無数の研究所、製作会社があり、人的物的の交流にはことかかない。更に Saclay での研究体制そのものが大学と異なり組織的研究が推進できるという強味がある。

更に多くのドクターコースの学生がパリー大学及びフランス全国より Saclay, Fontenay-aux-Roses に来て、夫々のドクターの研究テーマで研究をおこなっている。そしてその際すべての学生が C. E. A. より給料をもらって研究に参加している。外国よりの科学者も数多く研

究に参加しており、特に EURATOM より C. E. A. との公式交換協定によって科学者が多数派遣されてきている。

フランスでは最近 Saclay と Fontenay-aux-Roses に分かれていたプラズマ部門を今から3年後1971年を目標として Grenoble に集中移転し、独立のプラズマ研究所を新たに設立することを計画している。それ故ここ数年でフランスのプラズマ研究に大きな変化が予想される。

参 考 文 献

- 1) J. Ernest et al, Phys. Letters 22, 147 (1966)
- 2) C. G. E. Division Technique, MF/AL-No. 67-68, No. 67-69
- 3) M. Nakatuska, K. Toyoda and C. Yamanaka. Oyo Butsuri 37, 60 (1968)
- 4) G. Yamaguchi, C. Yamanaka et al, Japan J. Appl. Phys. 7, 179 (1968)
- 5) P. Briand, T. Consoli et al, Phys. Letters 25A, 631

- (1967)
- 6) T. Consoli, L. Slama et al, C. R. Acad. SC. Paris 265. 900 (1967)
- 7) N. G. Basov and O. N. Krokhin, Soviet Physics J. E. T. P. 19, 123 (1964)
- 8) C. Cesari, M. Yokoyama et al, IGN/RT 552 (1967)
- 9) C. Cesari, M. Yokoyama et al, IGN/RT 574 (1968)
- 10) S. A. Ramsden and P. Savic, Nature 4951, 1217 (1964)
- 11) G. Taylor, Proc. Roy. Soc. A201, 159 (1950)
- 12) N. Tsuchimori, T. Yamanaka and C. Yamanaka, Japan J. Appl. Phys. 7, 84 (1968)
- 13) Y. Izawa, M. Yokoyama and C. Yamanaka, J. Phys. Soc. Japan 23, 1185 (1967)
- 14) D. Bize, T. Consoli et al, 8th Int. Conf. Phen. Ion. Gas (Wien) p.527 (1967)
- 15) Y. Gontier et M. Trahin, Rapport CEA-R 3192
- 16) C. Breton, R. Papoular et al, Le Journal de Phys. 26, 490 (1965)
- 17) V. Chalmeton, R. Papoular, C. R. Acad. Sc. Paris 264, 213 (1967)
- 18) P. Langer et al, IEEE, QE-2, 499 (1966)
- 19) P. Langer et al, CEA/DAM/R/CEL/PG, DO-020, Mai, 1967