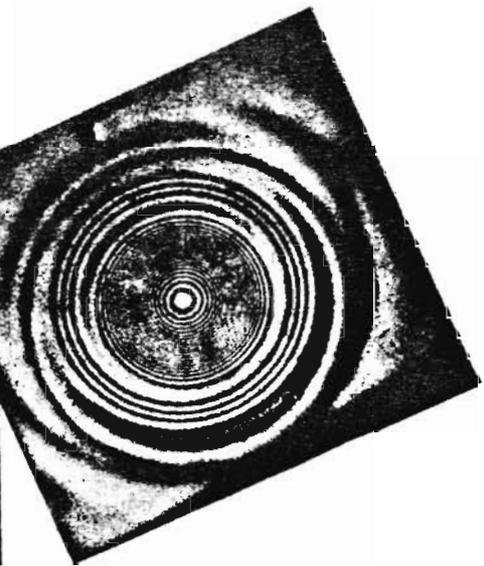
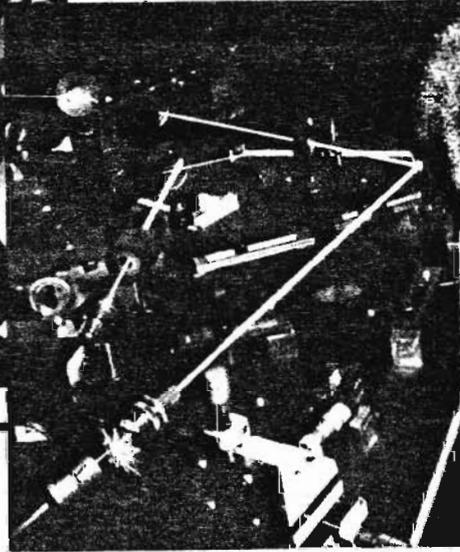




LES



LASERS

LE POMPAGE NON OPTIQUE

LES familiers des techniques radio savent que les générateurs d'ondes cohérentes sont toujours constitués des éléments essentiels suivants :

- un milieu, ou un circuit amplificateur (tube, transistor) ;
- un moyen de fournir de l'énergie à cet amplificateur (l'alimentation) ;
- un résonateur (circuit accordé, cavité résonante).

Le laser étant un générateur d'ondes cohérentes, possède ces trois éléments ; le rayonnement qu'il émet sur de faibles longueurs d'ondes (0,1 à 20 μm) ne peut s'obtenir pratiquement qu'à partir de milieux atomiques (atomes, ions, molécules) ; ces milieux sont susceptibles d'émettre par fluorescence à des fréquences particulières, déterminées par des transitions discrètes entre niveaux d'énergie électroniques, atomiques ou moléculaires ; au contraire, les émissions aux fréquences radio ou radar proviennent le plus généralement de l'interaction entre des électrons libres et un champ électromagnétique.

Le résonateur d'un laser est également spécial ; la petitesse des longueurs d'ondes optiques impose de recourir à une structure particulière : l'interféromètre de Fabry et Pérot.

Enfin, l'alimentation du milieu amplificateur consiste à fournir à ce milieu de l'énergie appro-

prisée pour établir et maintenir une « différence de population » positive entre un niveau supérieur d'énergie et un niveau inférieur d'énergie. Cette fourniture d'énergie est appelée « pompage ».

Le physicien français A. Kastler a imaginé le « pompage optique », qui permet, par un procédé optique, de pomper complètement les systèmes électroniques situés sur un certain niveau d'énergie, et de les porter sur un niveau supérieur.

DES BOMBARDEMENTS D'ELECTRONS

Il y a certes bien d'autres modes de pompage : ainsi, le pompage au moyen de faisceaux d'électrons de gaz semble être un moyen efficace d'obtention d'émissions sur de basses longueurs d'ondes, dans le proche ultraviolet.

L'excitation, par faisceaux d'électrons, a initialement servi aux lasers fonctionnant dans le spectre visible ou infrarouge ; W.-R. Bennett, en 1965, proposait l'emploi d'un faisceau d'électrons pour le pompage de lasers à hélium II ; les travaux récents de R.-T. Hodgson, R.-W. Dreyfus ont montré que les faisceaux d'électrons sont à même de pomper, dans l'ultraviolet, des lasers à hydrogène moléculaire, et à azote ; l'équipe soviétique de

N.-G. Basov a abouti à des résultats analogues avec du xénon.

Dans les expériences de Hodgson et Dreyfus, le gaz, à basse pression (10 à 50 torrs) (*) est bombardé au moyen d'un canon à électrons ; l'impulsion que celui-ci émet durant 3 ns contient des électrons de 400 kilo-électrons-volts. Le faisceau est contraint, grâce à un solénoïde pulsé, à se propager suivant l'axe du tube contenant le gaz, sans diverger. Le laser à azote génère un faisceau ultraviolet à la longueur d'onde de 0,3371 μm ; le laser à hydrogène a délivré un faisceau sur la plus courte longueur d'onde obtenue jusqu'alors, 0,1161 μm .

LES LASERS ELECTRIQUES A HAUTE PRESSION

Les lasers précédents sont caractérisés :

- par de faibles pressions,
- par une décharge électronique longitudinale.

Le fonctionnement de lasers à la pression atmosphérique, ou au-dessus de celle-ci, conduit à une augmentation de la puissance spécifique délivrée. Allan E. Hill a, par exemple, étudié, en 1970, un laser longitudinal à gaz carbonique, associé à d'autres gaz, fonctionnant au voisinage de la pression atmosphérique. A.-J.

Beaulieu, également en 1970, a développé une technique de pompage électronique transversal de lasers à gaz à pression atmosphérique, et cette technique a été reprise en raison de sa simplicité, par de nombreux chercheurs, tant à l'étranger qu'en France (Laboratoires de Marcoussis) : ces lasers sont qualifiés par le vocable T.E.A. (Transversely Excited Atmospheric Pressure Lasers).

René Dumanchon, aux Laboratoires de Marcoussis a obtenu, ainsi, des impulsions laser de 130 J durant 2 μs avec un laser électrique T.E.A. pulsé, utilisant 20 litres de gaz carbonique à la pression atmosphérique. Jack Dougherty travaille sur des techniques de préionisation : un faisceau pulsé d'électrons de grande énergie et injecté dans la région active du laser à gaz pour y produire des électrons par ionisation ; ces électrons sont accélérés dans un champ électrique continu jusqu'à obtention d'une « inversion de population » dans le mélange de gaz carbonique, d'azote et d'hélium ; les premiers résultats de Dougherty montrent que cette technique permet de pomper de grands volumes gazeux, ce qui n'était guère le cas jusqu'alors.

De nombreux chercheurs ont tenté d'améliorer les performances des lasers T.E.A., par des mélanges de fluides, par des détentes aérodynamiques ou au

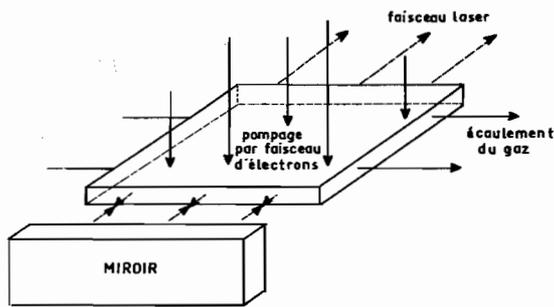


Fig. 1

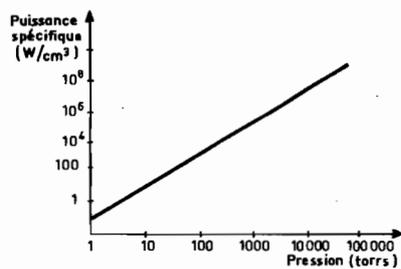


Fig. 2

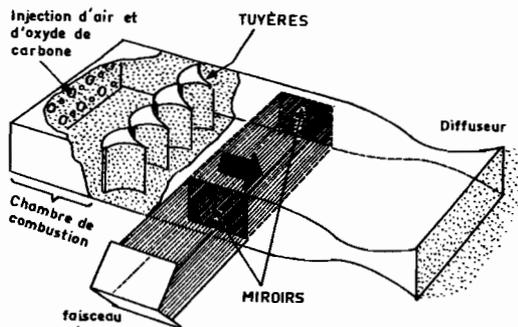


Fig. 3

TABLEAU I
Lasers atomiques T.E.A.

Gaz donnant l'effet laser	Gaz d'appoint	Pression partielle du gaz d'appoint avec adjonction d'hélium éventuellement (torrs)*	Longueurs d'ondes des lasers micromètres	Evaluation de la puissance du laser
Hélium	NH ₃	65	2,060	faible
Oxygène atomique	O ₂	75	0,845	faible
Néon			1,15	faible
Néon			1,20	faible
Néon			1,25	faible
Néon			1,52	faible
Néon	Ne	120	3,39	forte
Chlore	NOCl	250	1,59	moyenne
Argon		100	1,27	faible
Argon		760	1,79	forte (0,4 kW)
Argon	Ar	100	2,21	forte
Argon			2,39	forte
Argon			5,80	moyenne
Argon			7,29	moyenne
Krypton	Kr	760	2,52	forte
Krypton			3,07	forte
Xénon	Xe	250	2,03	forte (0,4 kW)
Xénon			3,51	moyenne (0,1 kW)
Xénon			3,65	forte (0,5 kW)

* Le torr correspond à 1 mm de mercure.

moyen de réactions chimiques. Dans tous les cas :

— on peut découpler les processus d'excitation du fluide et d'émission laser ;

— l'écoulement des fluides permet d'évacuer l'énergie inutilisable (chaleur dissipée) dans la cavité où se crée l'effet laser : dans un laser statique, sans écoulement fluide, cette énergie perdue influence ses performances. Un laser « dynamique » devrait donc délivrer de fortes puissances continues, ou encore des impulsions à très grande cadence.

LES LASERS DECLENCHEES PAR UNE DECHARGE ELECTRIQUE DANS UN GAZ SOUS PRESSION

Parmi les gaz les plus couramment utilisés, le gaz carbonique (CO₂) permet de réaliser des lasers. En U.R.S.S., N.-G. Basov, a étudié récemment l'influence de la pression du gaz sur la puissance spécifique des lasers T.E.A. à CO₂ ; il a montré qu'avec du gaz à une pression égale à 60 atmosphères, un laser T.E.A. peut émettre des impulsions dont la durée est de quelques nano-secondes (soit quelques millièmes parties de la micro-seconde) ; en outre, il peut être accordé sur une plage de fréquences relativement large.

D'autres gaz ont été bien entendu soumis aux investigations des chercheurs. N.-G. Basov, par exemple, estime qu'un laser T.E.A. à xénon sous 10 à 20 atmosphères devrait générer de puissants faisceaux dans l'ultraviolet avec un rendement atteignant 50 % ; cependant, plusieurs phénomènes rendent difficile le déclenchement d'un tel laser à xénon : en particulier, il se produit une photo-ionisation des molécules excitées, due au rayonnement laser.

Certains gaz, tels le HF (hydrogène fluoré) ou le N₂O, sont également susceptibles de délivrer de très fortes puissances ; des travaux récents sur l'oxyde de carbone (CO) permettent de penser qu'il sera ici également possible d'atteindre des puissances très élevées et d'excellents rendements (en théorie : 80 % de rendement), dans la plage de longueurs d'ondes comprise entre 5,2 et 5,7 μm. Des émissions laser intenses ont été observées, dans le spectre infrarouge (entre 2,7 et 3,8 μm) avec des substances fluorées (fluorure de deutérium DF), soumises à des réactions chimiques, celles-ci pouvant être engendrées par une décharge électronique. D'autres mélanges chimiques réactifs sous l'action d'une telle décharge ont été étudiés : par exemple, du NF₃

ou du N_2F_4 , mélangé avec de l'hydrogène (H_2), du méthane (CH_4), de l'acide chlorhydrique (HCl) ou du gaz naturel ; du tétrafluorure de carbone (CF_4) mélangé avec de l'hydrogène ou du méthane ; ou encore de l'hexafluorure de soufre (SF_6) mélangé avec de l'hydrogène. Dans certains cas, on ajoute de l'hélium pour obtenir un rayonnement laser encore plus intense.

LE LASER AERODYNAMIQUE

La détente d'un gaz chaud dans une tuyère est un mode de pompage conduisant aux fortes puissances : sur ce principe fonctionne le laser dynamique, dans lequel un gaz, suffisamment chauffé (pour que ses molécules soient excitées en vibration), subit une détente rapide ; l'effet de cette détente est de « geler » la température d'un mode de vibration au voisinage de la température du gaz ; il existe également dans ce gaz en détente, une température « moléculaire » de vibration, plus basse que les précédentes, et qui pourrait être dénommée « température statique de vibration ».

Cette température de vibration est une image de physicien : il n'est pas possible de la mesurer en mettant simplement un thermomètre dans le gaz. Il existe néanmoins d'autres techniques qui fournissent une mesure de cette température spéciale. Pour le physicien, il existe une correspondance entre l'énergie de la molécule qui se met à vibrer et sa « température ». La température de la molécule ne peut se mesurer qu'en la faisant vibrer ; cette notion de température des molécules — ou de température d'électrons — conduit, par exemple dans un plasma, à des niveaux extrêmement élevés (des millions de degrés !), alors que, dans son ensemble, le gaz peut être relativement chaud ($1\ 000\ ^\circ C$), sans atteindre ces niveaux.

Le laser dynamique possède, en conséquence, dans la zone de détente, deux températures différentes de vibration, conduisant à une inversion de population entre ces deux niveaux puisque la plupart des molécules sont « gelées » à la température la plus élevée, dans la détente rapide. Il y a donc émission d'un effet laser lors de la transition des molécules entre le niveau haut et le niveau bas de températures. Figure 3

Dans un laser aérodynamique fonctionnant en cycle ouvert, le fuel et le comburant (l'air en gé-

néral) sont injectés dans une chambre de combustion ; on ajoute au mélange de l'azote pour disposer d'une température « totale » (celle mesurée par un thermomètre classique) relativement basse. Le mélange chauffé contient du gaz carbonique, de l'eau en vapeur et de l'azote : il traverse de petites tuyères, dans lesquelles il se détend, et sa température « statique » est ramenée à une valeur proche de la température ambiante. Cette température « statique » du gaz correspond à son énergie calorifique proprement dite, alors que la température « totale » correspond à l'énergie totale du gaz en mouvement, à savoir, la somme de l'énergie calorifique et de l'énergie cinétique du gaz.

Dans la chambre de combustion, la vitesse du mélange est relativement faible, donc son énergie cinétique est faible ; il s'ensuit que les températures « totale » et « statique » du gaz sont voisines. Au contraire dans les tuyères

le gaz est accéléré et son énergie cinétique augmente en conséquence : comme la température « totale » est constante au cours de la détente, il en résulte que la température « statique » diminue au fur et à mesure que le gaz s'accélère dans les tuyères.

Si le gaz est suffisamment accéléré, sa température « statique » sera ramenée au niveau de la température ambiante.

Dans ces conditions, les molécules de gaz carbonique se mettent à vibrer suivant deux modes, correspondant d'une part à la température « totale », et d'autre part à un niveau de température plus proche de la température « statique » du gaz. Avec un débit de gaz de $13,5\ kg/s$ et une tuyère dont la section de sortie est 20 fois plus grande que la section minimale en son col, on est parvenu à produire un faisceau laser de $60\ kW$. La pression des gaz entrant dans la tuyère atteint au moins 40 atmosphères (*) ; quant au col de la tuyère, sa hauteur

est comprise, selon le cas, entre $0,2$ et $0,4\ mm$. Enfin, la température totale du gaz est supérieure à $1\ 000\ ^\circ C$, voire $1\ 500\ ^\circ C$.

LASER M.H.D.

Les générateurs magnétohydrodynamiques (en abrégé : M.H.D.) sont également susceptibles d'initier l'effet laser.

Un générateur M.H.D. est constitué également d'une chambre de combustion et d'une tuyère de détente des gaz ; ceux-ci sont légèrement ionisés, de sorte que les températures moléculaires, ou électroniques, sont beaucoup plus élevées que la température « totale » du gaz. Le gaz traversant la tuyère est soumis à un champ magnétique : les particules ionisées, se déplaçant dans le gaz, et subissant l'effet de ce champ magnétique, voient leur trajectoire déviée vers les parois de la tuyère ; finalement, des électrodes sont placées sur les parois

TABLEAU II
Lasers moléculaires T.E.A.

Gaz donnant l'effet laser	Gaz d'appoint	Pression du gaz d'appoint avec adjonction d'hélium éventuellement (torrs)	Longueurs d'ondes des lasers micromètres	Evaluation de la puissance du laser
HF	SF_6	100	12,67	faible
HF			13,19	moyenne
HF			13,78	faible
HF			14,44	forte
HF			15,17	faible
HF			2,78-3,00	faible
HF		400	2,76-3,09	très forte (40 kW)
HF		100	2,82-3,05	faible
DF	SF_6	10 à 300	3,8	forte
CO	CO	200	5,21 à 5,72	forte
N_2	N_2	250	1,04-1,05	forte (0,2 kW)
N_2			1,23-1,25	moyenne
N_2			3,64-3,65	moyenne
H_2O			7,60-9,57	faible
H_2O			27,97	forte
CO_2	CO_2	450	9,28-9,31	moyenne
CO_2			9,54-9,57	moyenne
CO_2			10,26-10,30	moyenne
CO_2		760	10,52-10,63	très forte (96 kW)
N_2O	N_2O	300	10,48-10,55	moyenne
N_2O			10,77-10-86	très forte (6 kW)
SiO_2	SiO_2	2	140-215	faible

de la tuyère, pour recueillir les particules chargées, et générer un courant électrique.

Un générateur M.H.D. peut, bien entendu, alimenter un laser : les chercheurs du Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.) ont réalisé un tel système ; il est constitué d'un écoulement M.H.D. d'hélium,ensemencé de césium, juxtaposé à un laser à gaz carbonique. Le césium fournit les électrons d'excitation du laser. Ce type de laser est à deux niveaux de températures : la température électronique est associée au niveau de température supérieure du laser, tandis que le niveau inférieur est lié à la température du gaz. Les premiers essais ont montré qu'en raison des dissipations de chaleur par effet Joule, le niveau inférieur se trouve relativement peuplé, et les performances du laser s'en trouvent diminuées.

Le laser M.H.D. est encore l'objet de recherches fondamentales, et les premiers résultats du M.I.T. méritent d'être approfondis avant de conclure quant à l'intérêt de cette classe de laser.

UN LASER HYBRIDE POUR L'U.S. AIR FORCE

L'U.S. Air Force semble s'intéresser depuis peu à un type de laser chimique, fonctionnant en impulsions, et qualifié d'hybride. Un prototype de laser hybride a été mis au point par les laboratoires de recherches de Hughes ; il délivre, à l'état actuel, des impulsions de 17 mJ, durant approximativement une milliseconde. L'adjectif « hybride » signifie que ce laser associe à la fois les techniques des lasers chimiques et les techniques de pré-ionisation adoptées dans certains lasers à pompage électronique.

Le laser hybride de Hughes a été développé par Jerald V. Parker et Ronald R. Stephens : de l'hydrogène fluoré HF et de l'hélium sont mélangés, puis injectés dans une chambre à électrodes ; un rayonnement externe ultraviolet y génère des électrons libres, tandis qu'un champ électrique produit, dans la chambre, une région uniforme de décharges avant que les électrons libres ne se lient aux molécules fluorées ; la décharge dissocie ces dernières et initie de la sorte une réaction chimique, d'où résulte un rayonnement laser sur une longueur d'onde comprise entre 3 et 4 μm .

Dans le laser de Hughes, le rendement global atteint un niveau élevé (65 %). La puissance spécifique du rayonnement laser est elle-même très élevée puisqu'elle atteint 90 kW, pour un débit de 1 kg/s de gaz. La chambre de décharge a pour dimensions, 1 x 1 x 15 cm ; le laser

fonctionne à la pression de 120 torrs ; enfin, la vitesse d'écoulement du gaz est égale à 5 m/s.

L'étape suivante du développement du laser hybride pourrait être l'emploi de gaz moins nocifs que ceux utilisés jusqu'alors : le tétrafluorure de chlore serait utilisable, en tant que « fuel propre » pour laser hybride.

LE LASER A POMPAGE NUCLEAIRE

En 1970, deux chercheurs de Radioptics, Inc : Kalman Held et Leonard R. Solon, inventèrent un dispositif capable de convertir un rayonnement nucléaire en énergie laser. Une bouffée de particules, émises par une source nucléaire, frappe, selon cette invention, un « phosphore » qui émet un rayonnement ; ce dernier sert au pompage d'un laser. En principe, une telle structure, apparemment simple, doit permettre le développement de lasers portables, compacts, contenant leur propre alimentation.

A la structure précédente, il est possible d'adjoindre des transducteurs intermédiaires chargés de la conversion de tout type de particules nucléaires. Ainsi, des neutrons provenant d'un réacteur seraient injectés initialement dans une matrice de fibres contenant de l'uranium 235 ; on produirait de la sorte des fragments de fission, absorbés par la couche de phosphore déposée sur les fibres, et rayonnant l'énergie de pompage d'un laser.

La structure du dispositif peut être de nouveau modifiée afin d'utiliser simultanément des rayonnements de neutrons et de particules gamma. Cette technique aura alors l'avantage de générer des particules ionisantes (particules alpha, protons issus de fragments de fission) par suite de réactions de fission « neutron-alpha » et « neutron-proton ». On aurait alors là le moyen d'obtenir une énergie de pompage suffisante, même avec de faibles volumes de matériaux de pompage.

Le « phosphore », cité dans le brevet de Held et Solon, est décrit comme « un matériau ayant les propriétés d'absorber tout faisceau ionisant et émettant un rayonnement électromagnétique dans le spectre ultraviolet, visible ou infrarouge ». Par exemple, les halogénures alcalins, tels l'iode de sodium, l'iode de césium ou de lithium sont, ici, considérés comme des phosphores ; il en va de même des scintillateurs organiques tels que les cristaux d'anthracène et de stilbène, ou des scintillateurs plastiques, comme le polyvinyltoluène, le polystyrène...

Les « phosphores » liquides peuvent être constitués d'un solvant (le toluène), de substances telles que le p-terphenyl ou le

diphénylhexatriène ; ou encore du phénylcyclohexane avec du p-terphenyl.

Quant aux gaz pouvant être utilisés dans le brevet de Held et Solon, citons : le xénon, l'argon, l'hélium et le néon.

Selon les inventeurs, le laser nucléaire pourrait émettre au moins 30 000 Joules d'énergie lumineuse.

UN LASER A BOMBE A ?

L'une des voies de développement des lasers est l'extension de leur domaine d'utilisation vers les faibles longueurs d'ondes : la mise au point d'un laser à rayons X suscite un intérêt considérable dans les laboratoires.

D'une manière générale, on provoque l'émission de rayons X en bombardant, avec des électrons fortement accélérés, une anticathode métallique. Les raies obtenues, qui correspondent à des transitions entre les couches électroniques profondes des atomes du métal de l'anticathode, mettent en jeu des énergies mille fois plus importantes que celles du spectre optique.

Dès 1967, M.-A. Duguay et R.-M. Rentzepis, des Bell Telephone Laboratories, avaient suggéré la possibilité d'obtenir un laser à rayons X (*), en excitant simplement par des photons, les couches profondes du cuivre. On n'a cependant pas trouvé de sources suffisamment puissantes pour mettre en œuvre ces idées.

L'an passé, J.-G. Kepros, E.-M. Eyring et F.-W. Cagle Jr., de l'université d'Utah, auraient réalisé effectivement le premier laser à rayons X, avec de la gélatine Knox ordinaire, mélangée avec une solution de sulfate de cuivre ; le gel, placé entre deux verres de microscope, forme un sandwich très fin. Ce gel est ensuite pompé optiquement avec un laser à neodyme qui fournit des impulsions de 30 Joules, durant 20 ns. Il se produit alors une émission cohérente de rayons X. Cependant, la puissance de pompage (1,5 GW) est un million de fois plus faible que la puissance estimée par Duguay et Rentzepis, pour obtenir une émission laser X. L'opinion générale des spécialistes est pessimiste : en physique, les miracles sont rares, et ce serait vraiment un miracle que d'avoir obtenu avec une si faible énergie de pompage, un laser à rayons X.

B. Lax, directeur du National Magnet Laboratory au Massachusetts Institute of Technology, a récemment affirmé que seule l'énergie issue d'une bombe atomique est suffisante pour générer une émission laser dans le spectre des rayons X ; il en est même venu à se demander si le premier laser à rayons X n'a pas été

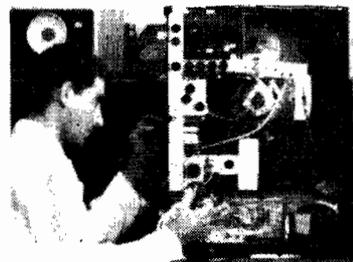
réalisé dès 1945, dans l'explosion de la première bombe atomique à Alamogordo. Selon ses calculs, Lax estime en outre que pour qu'une cible, en béryllium ou en carbone, puisse émettre des rayons X mous, il faudrait pouvoir éclairer un spot de 30 à 100 μm sur cette cible, avec une impulsion laser de 10^{12} W. Enfin, pour ne présenter aucune possibilité d'ambiguïté, le gain du laser X doit être d'au moins 30 : celui de J. Kepros et de ses collaborateurs de l'université d'Utah n'avait qu'un gain de 0,01'.

Selon B. Lax, ce n'est que d'ici 2 à 3 ans qu'on réalisera effectivement un laser à rayons X mous ; il faudra attendre 5 années pour fabriquer le premier laser à rayons X durs.

Marc FERRETTI

(*) Le torr, unité de pression chère aux spécialistes du vide, équivaut à un millimètre de mercure. C'est donc la 1/760^e partie de la pression atmosphérique.

MAITRISE DE L'ELECTRONIQUE



COURS PROGRESSIFS
PAR CORRESPONDANCE
**L'INSTITUT FRANCE
ELECTRONIQUE**
24, rue Jean-Mermoz - Paris (8^e)
Ecole privée d'enseignement à distance

FORME **l'élite** DES
RADIO-ELECTRONICIENS
MONTEUR • CHEF MONTEUR
SOUS-INGENIEUR • INGENIEUR
TRAVAUX PRATIQUES
**PREPARATION AUX
EXAMENS DE L'ETAT**
(FORMATION
THEORIQUE)
PLACEMENT
Documentation **HRB**
sur demande

BON (à découper ou à recopier; Veuillez m'adresser sans engagement la documentation gratuite, (cujus 4 timbres pour frais d'envoi). **HRB22**

Jeune école
NOM _____
ADRESSE _____

infra

AUTRES SECTIONS D'ENSEIGNEMENT : Dessin Industriel, Aviation, Automobile