

La révision de la théorie nucléaire

À Noël, Lise Meitner rendit visite à un ami dans l'Ouest de la Suède ; son neveu Otto Frisch, physicien à l'Institut Niels Bohr, les rejoignit. Tous deux considéraient le noyau comme une goutte, mais ils comprirent alors que la goutte était animée de vibrations et prête à se scinder en deux. Otto Frisch comprit que la tension superficielle d'un noyau aussi gros que celui de l'uranium était très faible. Lise Meitner calcula de tête le défaut de masse et en déduisit une estimation de l'énorme énergie libérée lors de la fragmentation du noyau. Tous les éléments d'une nouvelle théorie se mettaient en place. La communauté des physiciens adopta le terme de « fission » que proposaient Lise Meitner et Otto Frisch, et Niels Bohr utilisa leurs travaux comme point de départ pour généraliser la théorie que les deux découvreurs avaient ébauchée.

La découverte du baryum par Otto Hahn et Fritz Strassmann fut publiée en janvier 1939 ; Lise Meitner et Otto Frisch publièrent leur interprétation quelques semaines plus tard. Contrairement à ce qui s'était réellement passé, la découverte de la fission n'apparut pas comme le fruit d'une coopération entre physiciens et chimistes, et l'on pouvait désormais croire que la fission avait été découverte par des chimistes, les physiciens s'étant contentés d'interpréter le phénomène.

Au cours des semaines qui suivirent la découverte, Otto Hahn profita de la situation. Il savait que Lise Meitner avait dû émigrer et qu'elle avait pleinement participé à la découverte, mais il ne pouvait pas le dire, car il craignait pour sa personne et pour sa carrière : il avait peur que l'on ne découvre que Fritz Strassmann et lui avaient continué à travailler avec Lise Meitner après son départ de Berlin. Il décida que la découverte de la fission résultait des seules expériences chimiques qu'il avait réalisées avec Fritz Strassmann en décembre 1938. En février 1939, il écrivit à Lise Meitner : « Nous n'avons pas fait de physique et nous nous sommes contentés de faire des séparations chimiques jusqu'à isoler le baryum. » Il qualifia la fission de « don du ciel » qui les protégerait, lui et son institut.

Toutefois Otto Hahn n'aurait pas eu besoin de renier Lise Meitner et la



5. DANS LES ANNÉES 1920, Lise Meitner, professeur et chef du département de physique de l'Institut de chimie Kaiser Wilhelm, devint une spécialiste renommée de physique nucléaire. Cette photographie, prise en 1920 au cours d'une visite de Niels Bohr à Berlin, rassemble plusieurs de ses plus proches collègues et amis ; près de la moitié ont reçu un prix Nobel. Au premier rang, de gauche à droite : Otto Stern (prix Nobel en 1943), James Franck (1925), Niels Bohr (1922) ; le deuxième en partant de la droite est Gustav Hertz (1925). À la droite de Lise Meitner et derrière elle, Otto Hahn (1944) et George de Hevesy (1943).

physique pour que le « miracle » se produise. Au printemps 1939, les militaires allemands s'intéressèrent de près aux applications potentielles de la nouvelle découverte et, dès l'été 1939, Otto Hahn et son institut étaient protégés.

La mise au point de la bombe atomique confirma l'importance de la fission, et Otto Hahn devint célèbre. Dans l'Allemagne de l'après-guerre, il fut une personnalité renommée, couronné par un prix Nobel, considéré comme un Allemand qui n'avait pas cédé aux nazis, qui n'avait pas construit de bombe. Pourtant, il fut injuste avec Lise Meitner : pas une seule fois dans ses nombreuses publications, ni dans ses interviews, ni dans ses mémoires, ni dans ses autobiographies, il ne mentionna la place prépondérante de Lise Meitner dans l'équipe de Berlin ni leur collaboration après son exil. Il mourut à Göttingen en 1968, à 89 ans.

En Suède, durant la guerre, Lise Meitner occupa une fonction très modeste. D'après ses amis, elle aurait eu le prix Nobel si elle avait émigré dans un autre pays. En 1943, elle fut invitée à Los Alamos pour travailler sur la bombe atomique, mais elle refusa. Après la guerre, elle fut brièvement célébrée aux États-Unis et en

Angleterre, où elle symbolisait – à tort – une réfugiée juive ayant échappé aux nazis en emportant le secret de la bombe atomique. Elle était réservée et détestait la publicité. Elle ne rédigea aucune autobiographie et n'autorisa personne à écrire une biographie. En 1960, elle quitta Stockholm pour Cambridge, en Angleterre, où elle mourut en 1968, quelques jours avant son 90^e anniversaire. Elle disparut près de 30 ans avant que ses travaux ne soient enfin reconnus.

Ruth LEWIN SIME est professeur de chimie à l'Université de Sacramento.

Lise MEITNER, *Looking Back*, in *Bulletin of the Atomic Scientists*, vol. 20, pp. 1-7, novembre 1964.

Otto R. FRISCH, *What Little I Remember*, Cambridge University Press, 1979.

Fritz KRAFFT, *Im Schatten der Sensation : Leben und Wirken von Fritz Strassmann*, Verlag Chemie, Weinheim, 1981.

Ruth LEWIN SIME, *Lise Meitner : A Life in Physics*, University of California Press, 1996.

Elisabeth CRAWFORD, Ruth LEWIN SIME et Mark WALKER, *A Nobel Tale of Postwar Injustice*, in *Physics Today*, vol. 50, n° 9, pp. 26-32, septembre 1997.

L'acoustique picoseconde

HUMPHREY MARIS

À l'aide d'ultrasons de très haute fréquence, on teste les connexions des circuits intégrés.

Depuis quelques décennies, les ingénieurs apprennent à construire des objets miniatures. Les circuits intégrés, par exemple, sont fabriqués à partir de minces couches de silicium que l'on enrichit d'impuretés judicieusement placées, afin de provoquer l'effet transistor ; au-dessus du semi-conducteur ainsi dopé, une succession de couches métalliques et de couches isolantes assurent les connexions des transistors. Certaines de ces couches ont une épaisseur de seulement dix milliardièmes de mètre. La qualité et l'efficacité de ces circuits et les performances des systèmes où ces circuits sont incorporés, dépendent de l'épaisseur et de la régularité des diverses couches.

L'épaisseur des couches est généralement comprise entre cinq nanomètres (ou milliardièmes de mètre) et quelques micromètres. Pour les couches les plus minces, l'épaisseur doit être connue à moins d'un dixième de nanomètre, c'est-à-dire moins que la taille d'un atome. Les mesures d'épaisseur, excessivement difficiles, se font par des techniques qui détruisent les échantillons : on les coupe perpendiculairement à la surface des couches, et on observe par la tranche.

Pour obtenir des épaisseurs précises, la plupart des fabricants contrôlent en permanence les conditions de fabrication comme la température, l'hygrométrie et la pression, sacrifiant périodiquement des composants afin de les analyser en cours de fabrication.

En 1985, afin d'étudier le comportement des électrons dans des matériaux semi-conducteurs, nous avons envoyé une brève impulsion lumineuse sur un film métallique déposé à la surface d'un échantillon ; puis, quand nous avons envoyé une seconde impulsion lumineuse, nous avons constaté que la surface réfléchissait la lumière de façon périodique, au cours du temps ; nous avons ainsi découvert que la surface vibrait et qu'elle était parcourue par des

ondes de pression de longueur d'onde égale à 50 nanomètres environ. Personne n'avait envisagé que des ondes sonores de fréquence aussi élevée et de durée aussi brève puissent être émises.

Une technique naturelle

Après cette découverte, nous avons mis au point une technique qui utilise ces émissions extraordinairement brèves pour étudier les structures microscopiques, tels les films métalliques des composants électroniques.

Notre technique reprend le principe de l'écholocation des chauve-souris. En 1912, l'ingénieur Hiram Maxim, connu pour ses avions et son invention de la mitrailleuse, proposa que les chauve-souris détectent les insectes volants à l'aide d'ondes de pression inaudibles pour l'oreille humaine ; il supposa que ces ondes étaient des ondes de basses fréquences, produites par les battements de leurs ailes. Toutefois de telles ondes, avec leur grande longueur d'onde, sont diffractées par les petits objets, et non réfléchies : la théorie de Maxim expliquait mal comment les chauve-souris captent les très faibles échos réfléchis par leurs proies.

En 1920, à l'Université de Cambridge, Hamilton Hartridge proposa alors que les ondes émises soient des ultrasons, c'est-à-dire à des ondes de pression à des fréquences supérieures à celles des sons les plus aigus perceptibles par l'oreille humaine. Puis, en 1938, à Harvard, George Pierce et Donald Griffin détectèrent ces émissions. Depuis ces études, les zoologistes ont enregistré les ondes inaudibles émises par de nombreux animaux, tels les dauphins et certains oiseaux. Même des insectes utilisent ce principe : les gerris, les tourniquets et les autres gyrins qui glissent à la surface des eaux douces utilisent la réflexion des ondes produites lors de leur déplacement sur l'eau pour localiser les objets.

Le sonar des chauve-souris est remarquablement perfectionné. Les déplacements de l'animal décalent la fréquence de l'écho reçu par rapport à celle du signal émis en raison de l'effet Doppler, le même effet qui change la hauteur du son d'une ambulance quand elle s'éloigne d'un observateur, après s'en être approché rapidement : la chauve-souris utilise ce décalage pour déterminer la direction et la vitesse de ses proies (le même effet permet aux policiers de détecter les excès de vitesse des automobilistes). En outre, à l'intérieur de chacune des séquences émises, la chauve-souris varie la fréquence du son. Cette modulation aide l'animal à analyser le signal reçu et à identifier sa proie, en déterminant sa forme, sa taille, la fréquence de battement de ses ailes.

Pour déterminer sa distance à un insecte, la chauve-souris doit achever l'émission du signal ultrasonore avant que l'écho ne revienne. Comme la vitesse du son dans l'air est égale à 330 mètres par seconde, les ultrasons ne mettent qu'un cinquantième de seconde pour atteindre un insecte situé à une distance de 3,30 mètres et revenir. Lorsqu'un insecte est ainsi détecté, la chauve-souris émet des séquences d'ultrasons de plus en plus courtes (jusque moins d'une milliseconde), afin de localiser l'insecte à mieux qu'un mètre près.

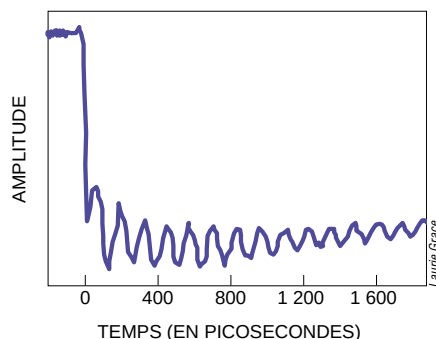
Les mesures d'épaisseur des très petites structures métalliques sont encore plus difficiles, car la vitesse du son dans l'aluminium atteint 6 000 mètres par seconde : l'aller et retour d'une onde sonore à travers une couche métallique d'un cent millionième de mètre dure seulement trois billionnièmes de seconde. Pour effectuer des mesures sonar sur de tels objets, nous avons dû trouver un moyen de créer des impulsions ultrasonores qui durent moins d'un billionième de seconde.

Pour transmettre des sons dans les liquides ou dans les solides, les phy-

siciens utilisent généralement des transducteurs piézo-électriques, composés de cristaux, tel le quartz, dont le volume change quand on leur applique une tension électrique. L'application d'un courant électrique alternatif fait vibrer ces cristaux à la fréquence du courant. Ainsi, depuis les années 1920, les physiciens produisent des sons de fréquences comprises entre 100 kilohertz et 1 000 mégahertz, pendant des durées qui peuvent être inférieures à un millionième de seconde. À l'aide de telles ondes, on teste des matériaux de quelques millimètres d'épaisseur seulement : les performances sont bien insuffisantes pour l'analyse des circuits intégrés.

Toutefois des progrès effectués par les spécialistes des lasers nous ont donné les moyens de mettre en œuvre notre idée. Les lasers se sont considérablement perfectionnés, depuis le premier, qui fut construit en 1960 par Theodore Maiman, des Laboratoires de recherche *Hughes* : ce système com-

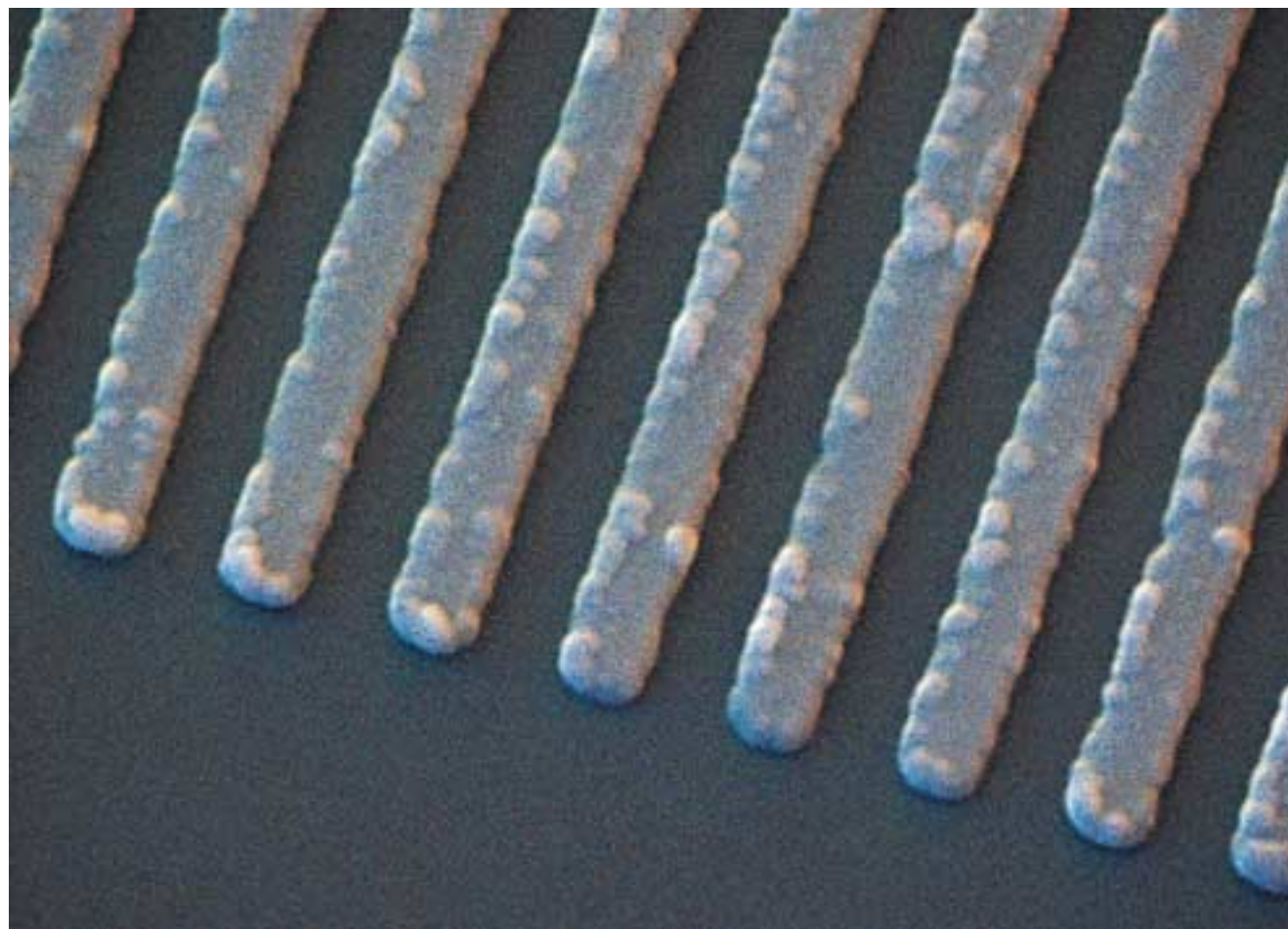
portait des flashes qui excitaient des atomes de chrome d'un cylindre de rubis ; la désexcitation de ces atomes amplifiait la lumière qui traversait le rubis. Ce laser émettait de la lumière rouge sous la forme d'impulsions qui duraient moins d'un millièm de seconde. Le laser à rubis de Maiman fut suivi de lasers à gaz, de lasers à colorants et de lasers à état solide (il existe même un laser où le matériau actif est la gélatine, mangeable après utilisation). Depuis le début des années



1980, certains lasers émettent des impulsions lumineuses qui durent moins d'un cent millionième de millionième de seconde (10^{-14}) : le train d'ondes lumineuses ne comprend que cinq longueurs d'onde et s'étend sur trois micromètres.

Dans notre laboratoire, nous utilisons la lumière d'un laser à impulsions pour former des ondes de pression : nous focalisons le faisceau du laser sur une couche très mince, à la surface d'un matériau qui absorbe les photons (ou «grains de lumière»). L'énergie des photons est transmise aux électrons, qui se déplacent sur de courtes distances dans le matériau en dissipant de l'énergie. La température de la surface du matériau augmente alors brusquement de quelques degrés, provoquant une dilatation : une onde de compression, parfois une seule compression, se propage alors dans le matériau.

Les impulsions ultrasonores ainsi produites durent parfois une picoseconde seulement (10^{-12} seconde) et



David Scharf

1. CE NANOXYLOPHONE produit des sons à des fréquences de 8 gigahertz, soit 24 octaves au-dessus du *do* central du piano. Il est composé de petites lamelles d'or de moins de 150 atomes d'épaisseur. La courbe supérieure montre la variation de l'amplitude du son

émis. Les ingénieurs de l'industrie micro-électronique utilisent des ondes de fréquences encore supérieures, durant quelques picosecondes (ou millionièmes de millionième de seconde), pour tester la qualité des circuits intégrés.