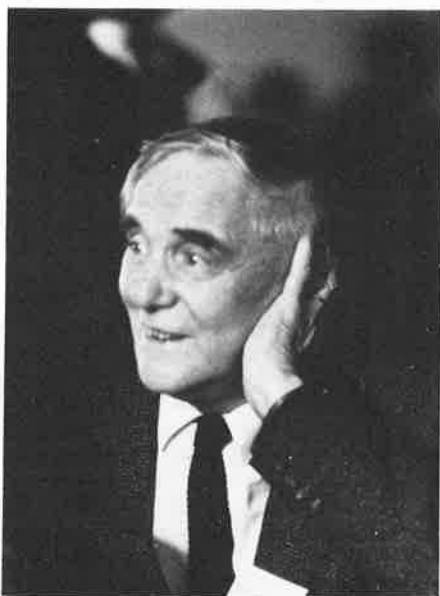


Piotr Kapitza et les basses températures

par Józef Hurwic

(Université de Provence, Centre de Saint-Charles, 33, place Victor-Hugo, 13331 Marseille Cedex 3)



P. L. Kapitza.

La moitié du prix Nobel de physique, pour l'année 1978, a été attribuée au physicien soviétique Piotr Kapitza (Kapitsa) pour ses découvertes concernant les basses températures (la deuxième moitié ayant été décernée aux deux Américains, Arno A. Penzias et Robert W. Wilson, pour leurs travaux dans un domaine tout à fait différent, notamment pour leur découverte de la radiation cosmique micro-onde d'arrière-fond). C'est la première fois que ce grand prix récompense un chercheur d'un âge si avancé (Kapitza a déjà plus de 84 ans), d'ailleurs pour des travaux relativement très anciens. On peut supposer que l'Académie Royale de Suède a voulu, de cette façon, réparer son oubli d'il y a plusieurs années.

Piotr Leonidovitch Kapitza (1), fils d'un général tsariste (ingénieur militaire), est né le 8 juillet 1894 (le 26 juin, suivant le calendrier julien utilisé à l'époque en Russie), à Kronstadt, près de Saint-Petersbourg, ancienne capitale de la Russie, aujourd'hui Leningrad. Son père a participé à la construction de la forteresse de Kronstadt; sa mère a été une pédagogue connue et collectionneuse d'objets de folklore. Après des études au lycée, dans sa ville natale, Kapitza entre à la Faculté électro-mécanique de l'École polytechnique de Petrograd (c'est le nom que portait, entre 1914 et 1924, l'ancien Saint-Petersbourg). Kapitza sort de cette école en 1918. Sa formation technique l'aidera beau-

coup dans ses futures recherches. Étudiant, il commence son travail de recherche sous la direction d'un des plus grands physiciens soviétiques, le professeur Abram Fedorovitch Ioffé. Kapitza n'est pas son seul élève ayant obtenu le prix Nobel. Lev Davidovitch Landau (Landaou), prix Nobel de physique en 1962, et Nicolaï Nicolaévitch Siemionov, prix Nobel de chimie en 1956, étaient également des disciples de Ioffé.

Pour la première fois, en 1913, un article, sur la graisse de baleine et de certains grands poissons de la mer, est signé Kapitza. Ses premières publications scientifiques portent la date de 1916. Parmi ses travaux précoces mérite d'être mentionnée surtout une publication avec Siemionov (2). Les deux chercheurs ont proposé l'expérience permettant de déterminer le moment magnétique des atomes dans un faisceau atomique, expérience réalisée l'année suivante par les physiciens allemands, O. Stern et W. Gerlach.

En 1921, Ioffé avait eu la possibilité d'envoyer Kapitza en mission, à Cambridge, en Angleterre. Le jeune chercheur russe devient vite un proche collaborateur du célèbre Ernest Rutherford. Rutherford, pour sa part, fut non seulement lui-même un lauréat du prix Nobel (de chimie en 1908) mais créa également toute une lignée de prix Nobel. Parmi ses collaborateurs on peut énumérer les prix Nobel suivants : en chimie Frederick Soddy (1921) et en physique Niels Bohr (1922), James Chadwick (1935), James Douglas Cockcroft (1951). Et maintenant cette équipe vient d'être rejointe par Kapitza.

La collaboration de Kapitza avec Rutherford a duré de 1921 à 1934. Jusqu'en 1932 Kapitza a travaillé dans le Cavendish Laboratory à Cambridge, en devenant adjoint au directeur du département des recherches magnétiques.

Le Cavendish Laboratory et le Laboratoire Curie à Paris étaient, à l'époque, les plus grands centres des recherches nucléaires du monde. Il est donc naturel que Kapitza ait également consacré à ce domaine ses premières années de séjour à Cambridge. Entre autres, il a étudié le passage des particules α à travers l'air et le CO_2 , sujet préféré de l'école de Rutherford, les propriétés des particules β etc. Dans ses recherches sur les traces des particules α il plaçait la chambre à brouillard dans un champ magnétique (3). C'est cette méthode qui a permis, en 1932, à C. D. Anderson de découvrir les positons dans les rayons cosmiques.

Ces recherches nucléaires exigeaient l'application de champs magnétiques très intenses. Kapitza élabore donc surtout la méthode de leur obtention. Il abandonne la voie normalement utilisée par augmentation des dimensions des électro-aimants à noyaux de fer. La saturation du noyau limite en effet l'intensité du champ. C'est pourquoi Kapitza élimine complètement le noyau et essaye d'obtenir un courant électrique suffisamment fort. Dans ce but il construit d'abord une simple batterie d'accumulateurs avec une petite résistance interne qui, au cours d'une décharge complète pendant quelques microsecondes, permet d'obtenir des champs assez forts dans un petit volume (4). Puis (5), surmontant différents obstacles techniques, en profitant de sa compétence d'ingénieur, il construit un générateur spécial qui, utilisant le court-circuit, donne des champs atteignant 320 kilogauss dans un volume de 2 cm³, pendant une très courte fraction de seconde.

Kapitza étudie ensuite les différentes propriétés de la matière dans les champs magnétiques très intenses. C'est ainsi qu'il a constaté le dédoublement Zeeman de certaines raies spectrales (6). Il a constaté que la résistance électrique de certains métaux (polycristallins), dans des champs magnétiques très forts, augmente linéairement avec son intensité (tandis que dans des champs ordinaires l'augmentation est quadratique par rapport à l'intensité du champ) (7). Cette relation porte aujourd'hui le nom de loi de Kapitza. Le cuivre, l'argent et l'or sont les métaux qui obéissent le mieux à cette loi. Parmi les différentes propriétés des corps, étudiées par Kapitza, dans des champs extrêmement forts, on peut également mentionner la magnétostriktion de diamagnétiques (8).

Les recherches sur les champs magnétiques intenses ont conduit Kapitza à s'intéresser aux très basses températures, c'est-à-dire aux autres conditions extrêmes de la matière. Dans les années 1932-1934 il occupe le poste de directeur du Royal Society Mond Laboratory à Cambridge où il travaille dans ce domaine. En utilisant son talent de physicien expérimentateur et en même temps d'ingénieur, il construit des dispositifs permettant, par la méthode de détente adiabatique, la liquéfaction de grandes quantités d'hydrogène et ensuite d'hélium.

La difficulté fondamentale de la méthode de liquéfaction de l'hydrogène, élaborée déjà en 1898 par Dewar, réside dans l'utilisation d'un hydrogène extrêmement pur. Même une pureté de 99,5 % est ici insuffisante parce que les impuretés, par exemple l'air, à la température de l'hydrogène liquide, se solidifient et bloquent les étroits tuyaux du régénérateur. Pour éliminer cet obstacle, Kapitza (9) utilise deux circuits. Dans le premier, qui est fermé et contient l'hydrogène chimiquement pur, celui-ci se liquéfie de façon habituelle. Dans le deuxième circuit, c'est de l'hydrogène technique, auparavant refroidi par de l'azote liquide, qui circule et, par échange thermique avec l'hydrogène du

premier circuit, se refroidit jusqu'à la liquéfaction. Les impuretés solidifiées, plus lourdes que l'hydrogène liquide, précipitent et, par conséquent, n'empêchent pas la circulation de l'hydrogène dans le deuxième circuit.

De façon encore plus élégante Kapitza a supprimé les difficultés de la liquéfaction de l'hélium (10). L'hélium a été pour la première fois liquéfié, en 1908, par Heike Kamerlingh-Onnes en utilisant l'effet Joule-Thomson. Cette méthode est basée sur les écarts de la loi des gaz parfaits et ne donne l'abaissement de la température que lorsque le gaz se trouve au-dessous du point d'inversion. Pour l'hélium il se situe aux environs de 50 K. Un pré-refroidissement, à l'aide de l'hydrogène liquide, est donc nécessaire. L'hélium liquide restera le monopole du laboratoire cryogénique de Kamerlingh-Onnes, à Leyde, durant quatorze ans après la première liquéfaction. Mais le rendement de son procédé représentait seulement 1 % de ce qu'on pouvait obtenir par la détente adiabatique dans un cylindre avec un piston, comme cela a été réalisé par Georges Claude pour la liquéfaction industrielle de l'air. Cette méthode exige l'application d'un lubrifiant utilisable à ces basses températures. Claude a utilisé l'air liquide lui-même comme lubrifiant. L'application de l'hélium liquide, en tant que lubrifiant, n'est pas possible parce que ce liquide possède une tension superficielle extrêmement faible et que toute autre substance, à la température de l'hélium liquide, se trouve à l'état solide. Alors, Kapitza a décidé d'éliminer simplement la nécessité d'utiliser le lubrifiant en laissant un petit espace entre le piston et la paroi du cylindre. Mais dans ce cas, on a une fuite de gaz. En augmentant la rapidité du déplacement du piston Kapitza réduit alors la fuite du gaz de sorte qu'elle reste pratiquement sans influence sur le rendement. C'est le gaz qui joue ici le rôle de lubrifiant. En surmontant plusieurs obstacles techniques, Kapitza a construit un liquéfacteur à l'hélium, très simple et efficace. Il n'exige même pas le pré-refroidissement à l'aide de l'hydrogène liquide; il suffit d'azote liquide. Le premier liquéfacteur, construit par Kapitza, produisait 2 litres d'hélium par heure en utilisant 3 litres d'azote par heure.

En 1934, après l'un de ses séjours annuels en U.R.S.S., pour passer les vacances avec sa mère, Kapitza se vit refuser, par les autorités soviétiques, de retourner en Angleterre (1). Il reste donc définitivement en U.R.S.S. Le gouvernement soviétique rachète intégralement ses installations du Mond Laboratory, et établit pour lui des conditions exceptionnelles de recherches en créant, par décret du 28 décembre 1934, l'Institut des problèmes physiques de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S., à Moscou, dont il devient le directeur. L'Institut fut organisé principalement pour les travaux dans les champs magnétiques très intenses et aux très basses températures (11). Ici Kapitza améliore remarquablement la technique de liquéfaction des gaz, fait ses recherches les plus importantes dans le domaine des basses températures et surtout découvre, en 1938, la superfluidité de l'hélium 4, qui lui vaut maintenant le prix Nobel.

L'analyse thermodynamique conduit Kapitza à la conclusion que c'est la turbine d'expansion qui doit créer les conditions les plus avantageuses pour retirer la chaleur d'un gaz comprimé, mais seulement dans la liquéfaction à grande échelle, ce qui est le cas pour la production de l'air liquide. Il a donc, dans ce but, construit une turbine (12), dans laquelle l'air se déplace dans la direction radiale de la périphérie vers le centre. Tandis que dans les autres installations de l'époque, comme d'ailleurs dans le célèbre dispositif de Linde de 1895, l'air devait être initialement comprimé jusqu'à 200 atm, dans l'appareillage de Kapitza il suffit seulement de 4-5 atm. Ce principe de turbines de faible pression est aujourd'hui habituellement utilisé dans l'industrie de l'oxygène. La turbine expérimentale de Kapitza a atteint le rendement record de 83 % en fournissant 30 kg d'air liquide par heure. Elle représente un extraordinaire exploit technique : diamètre 8 cm, masse 250 g, vitesse de rotation 40 000 tours par minute. Pour comparaison, Kapitza indique que le compresseur qui fournit l'air à cette turbine (500 à 1 000 m³/h⁻¹) pèse 3 t et exige une puissance de 50-80 kW. Ces recherches ont beaucoup contribué au développement de la sidérurgie soviétique.

Mais le sujet fondamental des travaux de Kapitza à Moscou, dans les années trente, est surtout l'étude des propriétés de l'hélium liquide. Ce produit, qui au début a été utilisé seulement comme agent refroidissant, est devenu lui-même un objet de recherches.

Ce liquide, contrairement à tous les autres liquides, ne se solidifie à aucune température sous la pression de sa vapeur saturante. Ses phases liquide et gazeuse ne peuvent coexister. L'hélium possède donc un diagramme de phases particulier : sa courbe de vapeur saturante ne rencontre pas la courbe de l'équilibre solide-liquide, c'est-à-dire que dans ce cas il n'existe pas de point triple solide-liquide-vapeur (figure 1). Dans les années 1927-1928 Willem Hendrik Keesom et Mieczyslaw Wolfke à Leyde, en mesurant la constante diélectrique de l'hélium liquide en fonction de la température, ont constaté une discontinuité sur la courbe représentant cette relation aux environs de 2,2 K. En 1932 W. H. Keesom avec K. Clusius ont retrouvé cette discontinuité sur la courbe figurant la capacité calorifique spécifique en fonction de la température (figure 2). A cause de la ressemblance de la courbe avec la lettre grecque λ , on appelle cette température (la valeur plus précise : 2,172 K) point λ . Au point λ l'hélium (⁴He) liquide, sous la pression de sa vapeur saturante (37,80 Torr) subit une transformation de seconde espèce (sans la chaleur latente) : au-dessus de ce point l'hélium est dit hélium I et au-dessous, hélium II. L'hélium I est un liquide ordinaire tandis que l'hélium II manifeste plusieurs anomalies. L'effet surprenant est son énorme conductivité thermique : d'après les mesures de W. H. Keesom effectuées avec sa fille A. P. Keesom (13), elle est environ un million de fois plus grande que celle du cuivre. Cette propriété suggère une importante viscosité. Mais c'est Kapitza qui a montré, qu'au

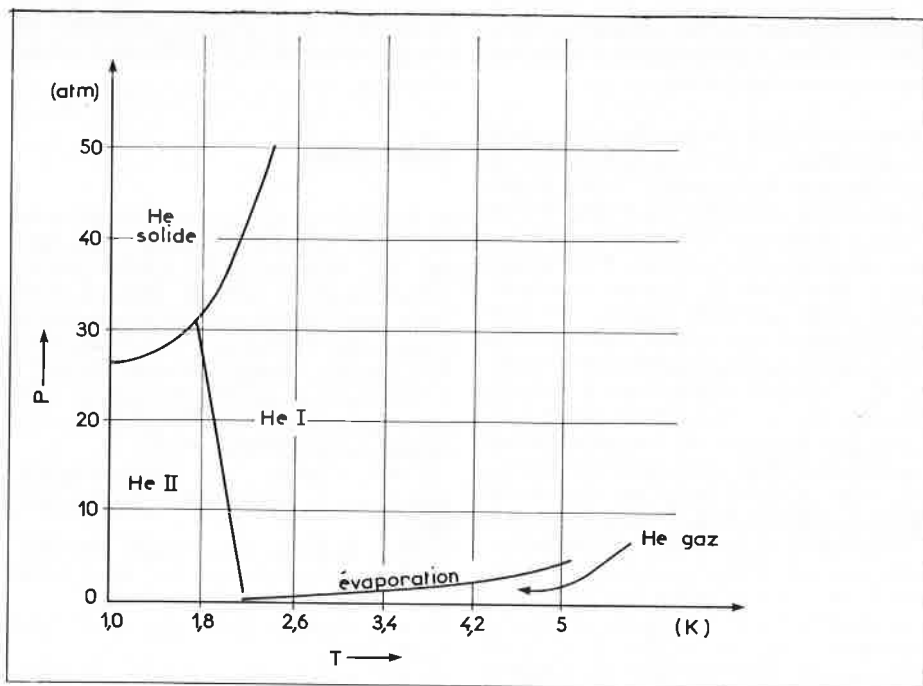


Figure 1. Diagramme de phases de l'hélium 4.

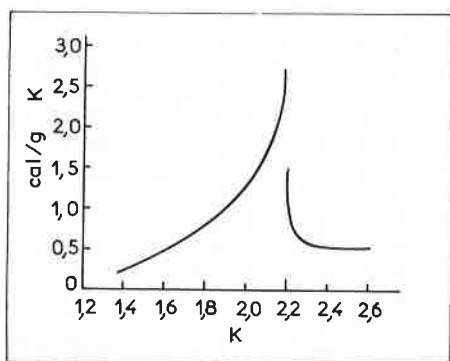


Figure 2. Capacité calorifique spécifique de l'hélium 4 liquide en fonction de la température.

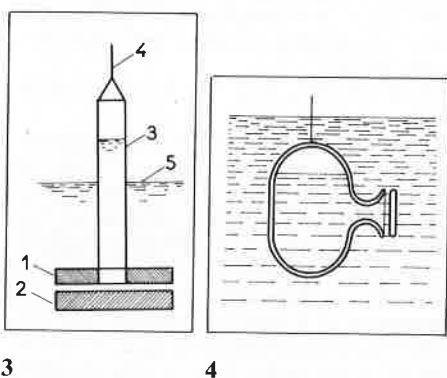


Figure 3. L'hélium 4, après passage sans frottement entre les plaques de verre poli 1 et 2 (en un temps très court) pénètre dans le tube 3, suspendu par le filament 4 et immergé dans le réservoir 5.

Figure 4. Une autre version de l'expérience présentée sur la figure 3.

contraire, l'hélium II possède une viscosité presque nulle (14). Il a constaté que l'hélium-II s'écoule presque sans aucune résistance dans les capillaires très étroits (dont le rayon est inférieur à un micromètre) et pénètre à travers une fente très étroite entre les deux plaques de verre polies (figures 3 et 4). Sa viscosité dans ces conditions (mouvement laminaire) est de plusieurs dizaines de milliers de fois inférieure à celle de l'hélium I. La grande conductivité thermique de l'hélium II n'est donc qu'apparente et la rapide transmission de la chaleur, dans ce cas, provient de la convection. Kapitza a réalisé plusieurs excellentes expériences très convaincantes qui ont confirmé cette explication (15). Les études suivantes de Kapitza sur la conductivité thermique (16), l'ont amené à la conclusion que l'hélium II doit être considéré comme étant composé de deux liquides dont l'un est sans viscosité et l'autre est normal, visqueux et, par conséquent, emporté par un corps en mouvement. Kapitza, en étudiant ensuite les effets thermomécanique et mécanocalorique, a établi que l'entropie de l'hélium superfluide est nulle. En observant les phénomènes critiques dans l'hélium II, il a découvert le saut de température à la frontière entre l'hélium et le solide, traversée par la chaleur. Tout ceci représente uniquement une partie des recherches de Kapitza sur la superfluidité. Leurs résultats ont permis à Landau d'élaborer, dans les années 1940-1941, la première théorie quantique de la superfluidité qui a valu également un prix Nobel à son créateur.

L'atome de ^4He , composé du noyau comportant un nombre pair de nucléons ($2p + 2n$) et du cortège électronique possédant 2 électrons, a un spin total nul. Il représente donc un boson. L'ensemble des atomes de ^4He , à la température proche du zéro absolu, n'obéissant pas alors au principe d'exclusion de Pauli, peuvent tous être décrits par une seule fonction d'onde. Ils

peuvent donc tous se retrouver dans un seul et même état quantique fondamental, c'est-à-dire subir la condensation Bose-Einstein. Cette situation entraîne l'état de la superfluidité dans lequel l'hélium 4 ne manifeste aucune viscosité. En réalité, une certaine agitation thermique, qui subsiste même aux températures extrêmement basses, expulse une partie des atomes de l'état fondamental. Ces atomes forment le liquide visqueux.

L'atome de ^3He , composé d'un nombre impair de fermions, est un fermion. Alors, dans l'ensemble de tels atomes, en vertu du principe de Pauli, il ne peut y avoir deux atomes dans le même état et, par conséquent ils occupent différents états excités. C'est pourquoi on a cru pendant longtemps que seul l'hélium 4 pouvait devenir superfluide.

En 1957 trois physiciens américains, J. Bardeen, L. H. Cooper et J. R. Schrieffer, ont publié la théorie de la supraconductivité qui leur valut le prix Nobel en 1972. Pour John Bardeen c'était le deuxième prix Nobel; il avait obtenu son premier prix en 1956 (avec W. Shockley et W. H. Brattain) pour ses recherches sur les semiconducteurs et sa mise au point des transistors. La théorie BCS a expliqué la supraconductivité par la « superfluidité » du « fluide électronique ». Or les électrons sont des fermions, et comme tels ils ne peuvent pas donner la condensation de Bose-Einstein. Mais la théorie BCS montre que, dans certaines conditions, les électrons d'un métal peuvent s'associer en paires (de Cooper) qui sont des bosons. Pourquoi donc le même processus ne peut-il se produire avec des atomes de l'hélium 3 en provoquant sa superfluidité ? C'est seulement quinze ans plus tard, que D. D. Osheroff, R. C. Richardson et D. M. Lee, à Cornell University aux États-Unis, ont découvert l'hélium 3 superfluide (17).

En 1974, dans la même université, A. W. Yanoff et J. D. Reppy ainsi que simultanément J. C. Wheatley et ses collaborateurs dans une autre université américaine (California University à La Jolla) ont observé l'écoulement facile de l'hélium 3 à travers des pores de l'ordre du micromètre. On a même constaté l'existence de deux phases superfluides de l'hélium 3 : phase A au-dessous de 2,7 mK et phase B au-dessous de 2,1 mK, prévue par la théorie BCS. Pour expliquer la formation de la phase A il fallait corriger un peu la théorie. Mais jusqu'à aujourd'hui il n'y a aucune théorie complètement satisfaisante. La physique de l'hélium 3 débute à peine. On peut encore ajouter que, dans ce domaine, les chercheurs français, surtout une équipe de l'Université Paris-Sud à Orsay, ont obtenu des résultats intéressants.

Revenons à Kapitza. Après la deuxième guerre mondiale, son attention est attirée par la possibilité de génération d'oscillations électromagnétiques de haute fréquence (HF) et de grande puissance et la transformation de leur énergie en d'autres formes. Les résultats de ces recherches ont été publiés dans les années 1962-1964.

A cause de son esprit libre et indépendant, on appelle souvent Kapitza le Don Quichotte

de la science soviétique (1). Il refusa, par exemple, de participer à la réalisation du programme nucléaire (militaire) soviétique, ce qui lui a coûté, en 1946, son poste de directeur de l'Institut des problèmes physiques. Il resta plusieurs années en disgrâce et ne fut rétabli dans ses fonctions qu'en 1955, à l'arrivée de la déstalinisation. A plusieurs reprises, il n'a pas craint de manifester son opposition envers les autorités.

D. ter Haar, pour commémorer le 70^e anniversaire de Kapitza, a recueilli ses publications, sous forme de trois volumes, en anglais (articles originaux anglais et articles russes en traduction anglaise) portant le titre : *Collected papers of P. L. Kapitza* (18). Les deux premiers volumes contiennent tous ses travaux de recherches jusqu'en 1964 inclus, au total 58 articles. Mais, en dépit de son âge avancé, Kapitza aujourd'hui encore, poursuit ses recherches. Parmi les sujets de ces recherches, les études de la fusion thermonucléaire occupent une place particulière.

Dans un article de 70 pages publié, selon la décision du Présidium de l'Académie des Sciences d'U.R.S.S., dans un journal soviétique de physique expérimentale et théorique (19), Kapitza rend compte des résultats de recherches thermonucléaires menées par tout un collectif de physiciens, sous sa direction, depuis 1950. Les problèmes qu'il fallait résoudre, étaient les suivants : le confinement et la stabilisation du plasma, son chauffage, l'obtention d'une importante densité (pour assurer un taux raisonnable des réactions de fusion) et surtout le maintien d'une telle situation assez longtemps pour pouvoir contrôler la fusion. Les autres chercheurs ne pouvaient réaliser que des fusions « impulsives ». L'équipe dirigée par Kapitza se pencha sur les problèmes de construction des générateurs HF de grande puissance fonctionnant en régime continu. En 1950, elle réalise un générateur (planotron) de quelques kW travaillant sur une longueur d'onde de 10 cm. Le rayonnement de ce « planotron » dirigé vers une boule de quartz de 10 cm de diamètre remplie d'hélium sous pression de 10 Torr provoquait une décharge sphérique durant quelques secondes. En 1958, utilisant un générateur plus puissant (migotron) on a renouvelé l'expérience avec un résonateur sphérique rempli d'hélium, d'argon, d'air, de deutérium ou d'hydrogène léger, dans lequel on entretenait des oscillations continues de $\lambda = 19$ cm. Après plusieurs années d'un travail laborieux, on a obtenu des colonnes stables de plasma de forme ellipsoïdale auxquelles on pouvait communiquer, en continu, une puissance atteignant 40 kW. L'examen des propriétés de telles colonnes et les études théoriques ont été menés simultanément. On a constaté que la colonne est composée de deux régions : d'un plasma dense, chaud, totalement ionisé, entouré d'un plasma froid partiellement ionisé. Pour diminuer les pertes de chaleur du plasma, surtout par les électrons plus mobiles que les ions, on a placé la colonne de plasma dans un champ magnéti-

que (longitudinal). Les informations concernant la fusion thermonucléaire dans ces colonnes sont plutôt modestes.

Dans un mémoire suivant (20), publié aussi conformément à la décision du Présidium de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S., Kapitza présente le calcul et le projet détaillé d'un réacteur thermonucléaire possible à colonne libre de plasma de deutérium. Il est évident que la production de l'énergie thermonucléaire dans une telle colonne est proportionnelle à son volume alors que les pertes thermiques augmentent avec sa surface, d'où l'intérêt d'augmenter le rapport volume/surface, c'est-à-dire les dimensions. Tandis que le volume des colonnes étudiées expérimentalement ne dépassait pas 10 cm^3 , ce volume dans le projet du réacteur de Kapitza est de quelques m^3 . La puissance (de 21 MW) de ce réacteur doit compenser largement la puissance nécessaire pour le maintien du champ magnétique de 10 kOe et la puissance perdue par radiations et autres. La puissance récupérée à l'aide d'un circuit d'eau de refroidissement serait de 9 MW et même plus. La longueur d'onde du générateur HF serait de 13 m. Le résonateur aurait 15 m de longueur et 14 m de diamètre. Les résultats expérimentaux accumulés sur la colonne libre de plasma rendent une telle construction tout à fait réaliste.

Kapitza ne se limite pas à ses recherches. L'horizon de ses intérêts est beaucoup plus vaste. Dans le 3^e volume de « *Collected papers* » (18) on trouve 31 articles sur différents sujets. A côté de publications de diffusion de la science se trouvent des articles sur l'organisation de la recherche, sur l'importance sociale et économique de la science, sur les relations entre la théorie, l'expérience et la pratique, etc. ainsi que des articles épistémologiques-historiques sur Isaac Newton, Benjamin Franklin, Mikhaïl Lomonosov, Lord Rutherford, Niels Bohr, Paul Langevin. En 1977, Kapitza a publié un livre très intéressant et attrayant sur la recherche scientifique et ses applications (22). Étant partisan d'une large et valable diffusion de la science, Kapitza avec deux autres célèbres physiciens soviétiques, Lev Artsimovitch et Igor Tamm (prix Nobel de physique en 1958), ont publié, dans un quotidien russe (21), sous le titre « Sur la course, à la légère, aux sensations scientifiques », un article dans lequel ils protestent contre l'accès, dans la presse soviétique, aux gens incompetents qui induisent le grand public en erreur en ce qui concerne les découvertes scientifiques. Ces remarques sont d'ailleurs également applicables aux mass média français. Kapitza s'intéresse aussi à l'art. Il maintient des relations amicales avec l'écrivain Alekseï Tolstoï, le compositeur Sergheï Prokofiev, des peintres, des metteurs en scène etc.

En dehors du prix Nobel, Kapitza a obtenu deux fois le prix Staline, les médailles Franklin et Faraday ainsi que plusieurs autres distinctions honorifiques. Il est membre de la Royal Society, de l'Académie des Sciences de

l'U.R.S.S. et de nombreuses Académies des sciences étrangères et de différentes sociétés savantes.

Bibliographie

- (1) Les données biographiques ont été tirées de : E. V. Chpolsky, *Uspekhi fiz. Nauk*, 1954, **54**, 505; Biografitchesky Slovar deiatelei iestestvoznania i tekhniki, Moskva 1958; Isaac Asimov's Biographical Encyclopedia of Science and Technology, New York 1972; A. S. Borovik, *Romanov, Priroda*, 1979, n° 1, p. 93; ainsi que de différents articles de la presse quotidienne et hebdomadaire et de certains renseignements privés.
- (2) P. L. Kapitza et N. N. Semenov, *Zhurn. russ. fiz.-khim. obchetch., fiz. otd.*, 1922, **50**, 159.
- (3) P. L. Kapitza, *Proc. Camb. phil. Soc.*, 1923, **21**, 511; *Proc. Roy. Soc.*, 1924, **A 106**, 602.
- (4) P. L. Kapitza, *Proc. Roy. Soc.*, 1924, **A 105**, 691.
- (5) P. L. Kapitza, *Ibid.*, 1927, **A 115**, 658.
- (6) P. L. Kapitza et H. W. B. Skinner, *Nature*, 1924, **114**, 273; *Proc. Roy. Soc.*, 1925, **A 109**, 224.
- (7) P. L. Kapitza, *Ibid.*, 1929, **A 123**, 292; *Metallwirtsch.*, 1929, **19**, 443; The change of resistance of metals in magnetic fields, in : *Leipziger Vorträge*, S. Hirzel, Leipzig 1933.
- (8) P. L. Kapitza, *Nature*, 1929, **124**, 53.
- (9) P. L. Kapitza et J. D. Cockcroft, *Ibid.*, 1932, **129**, 224.
- (10) P. L. Kapitza, *Ibid.*, 1934, **133**, 708; *Uspekhi fiz. Nauk*, 1936, **16**, 145.
- (11) P. L. Kapitza, *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. fiz.*, 1937, **3**, 265; *Vestnik Akad. Nauk SSSR*, 1943, **6**, 75.
- (12) P. Kapitza, *Zhurn. tekhn. Fiz.*, 1939, **9**, 99.
- (13) W. H. Keesom et A. P. Keesom, *Physica*, 1936, **3**, 359.
- (14) P. Kapitza, *Nature*, 1938, **141**, 74.
- (15) P. L. Kapitza, *Zhurn. eksper. i teor. Fiz.*, 1941, **11**, 1; *Usp. fiz. Nauk*, 1944, **26**, 133.
- (16) P. L. Kapitza, *Zhurn. eksper. i teor. Fiz.*, 1941, **11**, 581.
- (17) R. Combescot, *La Recherche*, 1978, **9**, 1064.
- (18) *Collected papers of P. L. Kapitza*; Edited and with Introduction by D. ter Haar, Pergamon Press, Oxford-London-Edinburgh-New York-Paris-Frankfurt. Volume I (1916-1934) 1964; Volume II (1938-1964), 1965; Volume III, 1967. Toutes les publications citées dans cet article ont été consultées en original sauf lorsqu'elles sont difficilement accessibles en France. Dans ces cas, on a fait appel, pour la période allant jusqu'en 1964, aux « *Collected papers of P. L. Kapitza* ».
- (19) P. L. Kapitza, *Zhurn. eksper. i teor. Fiz.*, 1969, **57**, 1801.
- (20) P. L. Kapitza, *Ibid.*, 1970, **58**, 377.
- (21) L. A. Artsimovitch, P. L. Kapitza et I. E. Tamm, *Pravda*, N° du 22 novembre 1959.
- (22) P. L. Kapitza, *Eksperiment, teoria, praktika*, Moskwa 1977.