NOTICE des TRAVAUX SCIENTIFIQUES

Franck Laloë

(décembre 1996)

CONTENU

PARTIE SCIENTIFIQUE

Plan et résumé: page 13 Analyse des travaux de recherche: pages 15 à 42 Adresse professionnelle: Laboratoire Kastler Brossel, Département de Physique de l'ENS, 24 rue Lhomond, 75005 Paris. Tel 01 47 07 54 13

Adresse el: laloe at physique.ens.fr

Adresse personnelle: 62 bd. Arago, 75013 Paris, tel 01 43 31 45 55

Né le 28 Mai 1940 à Rabat (Maroc).

CURRICULUM VITAE

Octobre 1960 à Octobre 1962 : Elève de l'Ecole Polytechnique.

Octobre 1962 à Octobre 1963 : Stage dans l'équipe de M. Bernard au Centre National d'Etudes des Télécommunications.

Octobre 1963 à Octobre 1968 : Attaché de Recherches au C.N.E.S. Licences de Physique et de Mathématiques.

D.E.A. de Physique Théorique (Physique Atomique et Statistique).

Doctorat de 3ème cycle.

Janvier 1968 à Octobre 1968 : Attaché de Recherche au C.N.R.S.

Octobre 1968 à Octobre 1971 : Maître Assistant à la Faculté des Sciences (Université Paris 6).

Doctorat d'Etat en 1970.

Prix Aimé Cotton de la Société Française de Physique.

Retour au C.N.R.S. en tant que Chargé en 1971. Membre fondateur de l'équipe de rédaction de "Images de la physique", participation à cette équipe jusqu'en 1976 (ensuite remplacé par S. Libermann).

Janvier 1972 : Maître de Recherches au C.N.R.S.

Janvier à Juin 1975 : Séjour de 6 mois à Londres à Imperial College dans l'équipe du Professeur D.Bradley.

Juillet 1975 : Retour au laboratoire de l'Ecole Normale Supérieure.

Mars à Octobre 1978 : Séjour aux USA dans l'équipe du Professeur D.Kleppner (MIT).

Juillet 1978 : Directeur de Recherche au C.N.R.S.

Avril 1980 : Lancement et organisation du premier colloque "SPOQS" (spin polarized quantum systems) au centre du CNRS à Aussois. Depuis, 4 de ces conférences ont eu lieu en Europe et aux USA.

Juin-Juillet 1982 : Séjour à Sussex University (Brighton) dans l'équipe de M.G. Richards.

1984-1990: Président de la Commission des Publications Françaises de Physique.

1987 : Vice Président du Comité des Publications du Ministère de la Recherche et de la Technologie.

1988 : "Prix fondé par l'Etat" de l'Académie des Sciences; coorganisateur du congrès SPOQS III à Torino (Italie).

1989-1992: Coéditeur de Europhysics Letters

1989-1993: Membre du Conseil Supérieur des Bibliothèques; participation aux commissions de politique documentaire de la Bibliothèque de France. Membre du groupe de travail sur la BDF chargé d'un rapport pour le Président de la République.

Responsable de la partie scientifique du DEA de Musique et musicologie du vingtième siècle (H. Dufourt responsable), en collaboration entre l'ENS, l'EHESS et l'IRCAM.

1990: création de la Commission des Droits de l'Homme de la Société Française de Physique; président de cette commission.

Membre du conseil Scientifique de l'IRCAM.

Séjour de deux mois au Kamerlingh Onnes Laboratorium de Leyde (Pays Bas).

1993 -1996: Vice-président du Conseil Supérieur des Bibliothèques. Coo-organisateur de la (première) conférence BEC 93 à Levico-Terme (Italie).

1994: Président de la Commission des Publications de la Société Européenne de Physique (EPS); membre du Comité de Coordination du Haut Conseil de l'Information Scientifique et Technique.

1995-98: "Associate Editor" de Physical Review Letters (fondements de la mécanique quantique).

1996-98: Président du "Comité des Publications et de la Communication Scientifique" du Ministère de l'Enseignement Sup. et de la Recherche.

1997: Vice-chairman de la conférence "Bose-Einstein Condensation" à Castelvecchio Pascoli.

1998: Participation pendant plusieurs mois au programme "Bose-Einstein Condensation" de l'Institut de Physique théorique de Santa-Barbara (Californie). (ne sont pas mentionnés dans cette liste de nombreux séjours courts, de quelques semaines au plus, dans des universités étrangères)

Thèmes de Recherche

Pompage optique, orientation nucléaire dans ³He, gaz quantiques polarisés à basse température. Théorie quantique du transport. Mécanique statistique des gaz dilués dégénérés; condensation de Bose Einstein et superfluidité dans les gaz. Acoustique musicale, effets de dynamique non linéaire, chaos et localisation acoustique.

Fondements de la mécanique quantique (de nombreuses participations à des rencontres transdisciplinaires entre physiciens et historiens des sciences, philosophes, médecins, compositeurs et musicologues, sociologues, etc..).

Prix Scientifiques

Prix Aimé Cotton de la SFP, Prix fondé par l'Etat de l'Académie des Sciences

Thèses dirigées (un astérisque indique une direction partielle)

Milica Pavlovic, Michèle Leduc (*), René Barbé, Elisabeth Giacobino (**), Michel Pinard, Carl-Gustave Aminoff, Valérie Lefèvre, Pierre-Jean Nacher, Lucile Julien(*), Christian Maganza, Geneviève Tastevin(*), Vincent Gibiat, Noël Grand (*), Peter Grüter, Markus Holzmann (*), Pierre Villain (*); direction d'un grand nombre de stages de courte durée, de magistère, de DEA ou stages d'option de l'Ecole Polytechnique.

Publications scientifiques

- THESE de 3ème CYCLE, Paris 1967: "Mise en évidence d'une orientation électronique dans les états excités de ³He créés dans une décharge, lorsque l'état fondamental est orienté"
- C. COHEN-TANNOUDJI et F. LALOE: "Modification de la matrice polarisation d'un faisceau lumineux lors de la traversée d'une vapeur atomique soumise au pompage optique", J. de Phys. <u>28</u>, 505 (1967) (1ère partie); J. de Phys. <u>28</u>, 722 (1967) (2ème partie)
- F. GROSSETETE, F. LALOE, C. COHEN-TANNOUDJI et J. BROSSEL: "Mise en évidence d'une orientation électronique dans les états excités de ³He obtenue à partir d'une orientation nucléaire dans l'état fondamental", C.R.A.S. <u>265 B</u>, 1247 (1967)
- F. LALOE, M. LEDUC et P. MINGUZZI: "Etude de l'influence sur les propriétés de dispersion et d'absorption d'une vapeur de ²⁰¹Hg, des modulations de l'orientation et de l'alignement dans l'état fondamental des atomes", C.R.A.S. <u>266 B</u>, 1517 (1968). "Etude de l'influence des caractéristiques d'un faisceau lumineux détecteur sur les signaux d'absorption et de dispersion modulée d'une vapeur de ²⁰¹Hg", C.R.A.S. 267 B, 328 (1968)
- F. LALOE: "Etude d'une nouvelle méthode permettant d'orienter et d'aligner les divers niveaux excités de ³He", C.R.A.S. <u>267 B</u>, 208 (1968)
- C. COHEN-TANNOUDJI, J. DUPONT-ROC, S. HAROCHE et F. LALOE: "Detection of the static magnetic field produced by the oriented nuclei of optically pumped ³He gas", Phys. Rev. Letters <u>22</u>, 758 (1969)
- F. LALOE, M. LEDUC et P. MINGUZZI: "Relation entre l'état angulaire d'une vapeur atomique soumise au pompage optique et ses propriétés d'absorption et de dispersion", J. de Phys. <u>30</u>, 277 (1969) (1ère partie), J. de Phys. <u>30</u>, 341 (1969) (2ème partie)
- M. PAVLOVIC et F. LALOE: "Etude de l'influence du découplage hyperfin sur l'orientation et l'alignement électroniques obtenus, à partir d'une orientation nucléaire, dans divers niveaux excités de ³He", C.R.A.S. 268, 1436 (1969)
- M. PAVLOVIC et F. LALOE: "Description d'une nouvelle méthode de mesure des structures hyperfines de niveaux atomiques axcités ; application à certains niveaux 1D de 3 He", C.R.A.S. $\underline{268}$, 1485 (1969)
- M. PAVLOVIC et F. LALOE: "Etude d'une nouvelle méthode permettant d'orienter, par pompage optique, des états atomiques excités. Application à la mesure de la structure hyperfine de niveaux 1D de 3 He, J. de Phys. $\underline{31}$, 173 (1970)

- C. COHEN-TANNOUDJI, J. DUPONT-ROC, S. HAROCHE et F. LALOE: "Diverses résonances de croisement de niveaux sur des atomes pompés optiquement en champ nul. Application à la mesure des champs faibles", Communication au Colloque International sur les Champs Magnétiques Faibles d'Intérêt Géophysique et Spatial, Paris 20-23 Mai 1969, Revue de Phys. Appliquée <u>5</u>, 102 (1970)
- THESE D'ETAT, Paris 1970: "Etude des signaux de détection lumineuse dans une expérience de pompage optique. Orientation dans une décharge de niveaux atomiques excités", Ann. de Phys. <u>6</u>, 5 (1971)
- M. LEDUC, F. LALOE et J. BROSSEL: "Pompage optique du 21 Ne", C.R.A.S. $\underline{271}$, 342 (1970)
- M. LEDUC et F. LALOE: "Détection de l'orientation des ions ³He⁺ produite par pompage optique dans une décharge", Optics Communications <u>3</u>, 56 (1971)
- J. DUPONT-ROC, M. LEDUC and F. LALOE: "New value for the metastability exchange cross section in Helium", Phys. Rev. Letters <u>27</u>, 467 (1971)
- M. LEDUC, F. LALOE et J. BROSSEL: "Mesure du rapport entre les moments magnétques du niveau 2^3S_1 de ⁴He et du niveau fondamental de ³He", J. de Phys. <u>33</u>, 49 (1972)
- J. DUPONT-ROC, M. LEDUC et F. LALOE: "Contribution à l'étude de l'échange de métastabilité dans l'Hélium", J. de Phys. <u>34</u>, 961 (1973) (1ère partie); J. de Phys. <u>34</u>, 977 (1973) (2ème partie).
- A. NOEL, M. LEDUC et F. LALOE: "Orientation de niveaux excités du ²¹Ne par pompage optique dans une décharge", C.R.A.S. <u>274</u>, 77 (1972)
- R. BARBE, M. LEDUC et F. LALOE: "Dépolarisation du niveau métastable 2^3S_1 de ⁴He par collisions quasi-résonnantes avec le néon ; influence de la température", C.R.A.S. $\underline{274}$, 645 (1972)
- R. BARBE, M. LEDUC et F. LALOE: "Magnetic Resonance with Inhomogeneous R.F. Fields", Lett. Nuov. Cim. <u>8</u>, 915 (1973)
- C. COHEN-TANNOUDJI, B. DIU et F. LALOE: "Mécanique quantique", Livre d'enseignement, publié par Hermann en 1973 (version française) et par Wiley en 1977 (version anglaise)
- R. BARBE, M. LEDUC et F. LALOE: "Résonance magnétique en champ de radiofréquence inhomogène", Partie théorique : J. de Phys. <u>35</u>, 699 (1974); Vérification expérimentale : mesure du coefficient de self diffusion de ³He: J. de Phys. <u>35</u>, 935 (1974).
- R. BARBE, F. LALOE et J. BROSSEL: "Very long ³He nuclear relaxation times at 4K using cryogenic coatings", Phys. Rev. Letters, <u>34</u>, 1488 (1975)
- M. PINARD, C.G. AMINOFF et F. LALOE: "Double Michelson mode selector and pressure scanning of a cw single mode dye laser", Appl. Phys. <u>15</u>, 371 (1978)

- M. PINARD, C.G. AMINOFF et F. LALOE: "Velocity selective optical pumping and Doppler-free spectroscopy", Phys. Rev. <u>A 19</u>, 2366 (1979)
- M. PINARD, M. LEDUC, G. TRENEC, C.G. AMINOFF et F. LALOE: "Efficient cw single mode dye laser with double or triple Michelson interferometer", Appl. Physics, <u>19</u>, 399 (1979)
- C. LHUILLIER et F. LALOE: "L'hélium 3 polarisé : un nouveau fluide quantique ?", J. de Phys. <u>40</u>, 239 (1979)
- L. JULIEN, J.P. DESCOUBES et F. LALOE: "Optical pumping of metastable 5S Oxygen", J. Phys. <u>B 12</u>, L-769 (1979)
- M. PINARD et F. LALOE: "The role of the Pauli principle in spin exchange collisions", J. de Phys. <u>41</u>, 769 (1980); "The role of the Pauli principle in metastability exchange collisions", J. de Phys. <u>41</u>, 799 (1980)
- L. JULIEN, M. PINARD et F. LALOE: "Hyperfine structure and isotope shift of the 640.2 and 626.6nm lines of neon", J. de Phys. 41, L-479 (1980)
- C. LHUILLIER et F. LALOE: "Quantum properties of spin-polarized ³He", J. de Phys. <u>41</u>, C7–51 (1980)
- M. LEDUC, G. TRENEC et F. LALOE: "Nuclear polarization of a ³He gas by laser optical pumping", J. de Phys. <u>41</u>, C7–75 (1980)
- F. LALOE: "Cadre général de la mécanique quantique; les objections de Einstein, Podolsky et Rosen", J. de Phys. <u>42</u>, C2,1 (1981)
- L. JULIEN, M..PINARD et F. LALOE: "Double velocity selection with optical pumping", Phys. Rev. Letters <u>47</u>, 564 (1981)
- C. LHUILLIER et F. LALOE: "Transport properties in a spin-polarized gas", I et II: J. de Phys. <u>43</u>, 197 et 225 (1982)
- M. PINARD, L. JULIEN et F. LALOE: "Pompage optique doublement sélectif en vitesses", J. de Phys. <u>43</u>, 601 (1982)
- V. LEFEVRE-SEGUIN, P.J. NACHER et F. LALOE: "Relaxation nucléaire de ³He↑ dans un champ magnétique inhomogène", J. de Phys. <u>43</u>, 737 (1982)
- V. LEFEVRE-SEGUIN, P.J. NACHER, C. LHUILLIER et F. LALOE: "Le second coefficient du viriel de H atomique; effet des variables internes", J. de Phys. <u>43</u>, 1199 (1982)
- P.J. NACHER, M. LEDUC, G. TRENEC et F. LALOE: "Polarisation nucléaire de ³He gazeux par pompage optique laser", J. de Physique Lett. **43**, L-525 (1982).
- M. PINARD, L. JULIEN et F. LALOE: "Détection de la rotation Faraday produite par un gaz placé dans un interféromètre de Michelson", J. Physique <u>44</u>, 589 (1983)
- M. HIMBERT, V. LEFEVRE-SEGUIN, P.J. NACHER, J. DUPONT-ROC, M. LEDUC, et F. LALOE: "Nuclear polarization through optical pumping of gaseous ³He below 1K", J. Physique Lett. <u>44</u>, L-523 (1983)

- V. LEFEVRE-SEGUIN, P.J. NACHER, J. BROSSEL, W.N. HARDY et F. LALOE: "Relaxation nucléaire de ³He gazeux sur $\rm H_2$ solide", J. Physique <u>46</u>, 1145 (1985)
- F. LALOE: "Quel usage les physiciens font-ils de la mécanique quantique ?", Fundam. Scientiae $\underline{5}$, 17 (1984)
- P.J. NACHER, G. TASTEVIN, M. LEDUC, S.B. CRAMPTON and F. LALOE: "Spin rotation effects and spin waves in gaseous ³He↑", J. Physique Lett. <u>45</u>, L-441 (1984); "Observation of spin waves in gaseous ³He↑", Conférence LT-17 (Elsevier, 1984), p. C-12
- C. DEPOLLIER, J. KERGOMARD, J.C. LESUEUR et F. LALOE: "Propagation des ondes dans les tuyaux sonores percés de trous latéraux irréguliers", Revue Cethedec, <u>79</u>, 67 (1984)
- M. LEDUC, S.B. CRAMPTON, P.J. NACHER et F. LALOE: "Nuclear polarization in gaseous ³He by optical pumping", Nuclear Science Applications <u>2</u>, 1 (1984)
- "Nuclear polarization of ³He gas at and below 4.2K by room temperature laser optical pumping", Proceedings of the SANIBEL Conference, and of the TRIUMF meeting in Vancouver.
- G. TASTEVIN, P.J. NACHER, M. LEDUC et F. LALOE: "Direct detection of spin waves in gaseous ³He[↑]", J. Physique Lett. <u>46</u>, L-249 (1985)
- F. LALOE, P.J. NACHER, M. LEDUC and L.D. SCHEARER: "Laser optical pumping of ³He", Proceedings of the workshop on polarized ³He beams and targets for nuclear physics, Princeton (1984)
- C. LHUILLIER et F. LALOE: "Spin oscillations in polarized gases", Phys. Rev. Lett. <u>54</u>, 1207 (1985)
- F. LALOE, M. LEDUC, P.J. NACHER, L. NOVIKOV: "Optical pumping of ³He nuclei", Soviet Physics Uspekhi <u>147</u>, 433 (1985); traduction: <u>28</u>, 941 (1985)
- C. MAGANZA, R. CAUSSE et F. LALOE: "Bifurcations, period doublings and chaos in clarinetlike systems", Europhys. Lett. <u>1</u>, 295 (1986); Conference ICA (Toronto) 12, p. K-4.
- M. LEDUC, J.M. DANIELS, F. LALOE: "A new infrared tunable laser (LNA) for optical pumping in Helium", Conference CLEO 86 (San Francisco). Mêmes auteurs plus P.J. NACHER, "Infrared tunable lasers for helium three optical pumping", Montana workshop "Polarized targets and beam sources" (June 86).
- C. DEPOLLIER, J. KERGOMARD et F. LALOE : "Localisation d'Anderson des ondes dans les réseaux acoustiques unidimensionnels aléatoires", Ann. de Physique <u>11</u>, 457 (1986)
- S. STRINGARI, M. BARRANCO, A. POLLS, P.J. NACHER et F. LALOE: "Spin polarized 3 He: liquid gas equilibrium", J. Physique (1987) $\underline{48}$, 1337 (1987) et coll. $\underline{C2}$, 101 (1987)

- M. LEDUC, P.J. NACHER, D. BETTS, J.M. DANIELS, G. TASTEVIN et F. LALOE: "Nuclear polarization and heat conduction changes in gaseous ³He", Europhysics Letters <u>4</u>, 59 (1987).
- G. TASTEVIN, P.J. NACHER, L. WIESENFELD, M. LEDUC et F. LALOE, "Obtaining polarized liquid ³He from optically oriented gas", J. Physique (brèves comm.) <u>49</u>, 1 (1988).
- F.LALOE, "La polarisation des spins nucléaires: une cause microscopique d'effets macroscopiques", Volume en l'honneur du Prof. A. GOZZINI "Interaction of Radiation with Matter" Scuola Normale Superiore (Pise, 1987).
- F. LALOE, "La transformée de Wigner libre, évolution dans une collision", J. Physique **50**, 1851 (1989).
- G. TASTEVIN, P.J.NACHER et F. LALOE "Une équation cinétique pour les gaz quantiques", J. Physique **50**, 1879 (1989); "Dynamique des gaz quantiques (particules discernables sans spin", J. Physique **50**, 1907 (1989); ""Kinetic theory of quantum gases: beyond the Boltzmann equation", Contribution à la conférence SPOQS III, Torino (Italie), S. Stringari ed., World Scientific (1989)
- P.J. NACHER, G. TASTEVIN et F. LALOE "Kinetic theory for quantum gases", Annalen der Physik 48, 149 (1991).
- F. LALOE and W.J. MULLIN "On the Snider equation" J. Stat. Phys., **59**, 725 (1990).
- V. GIBIAT et F. LALOE "Acoustical impedance measurements using the two microphone three calibration method", JASA, 88, 2533 (1990); "Mesures d'impédance, de fonction de réflexion et d'harmonicité d'instruments à vent", J. Physique Coll. C2, 51, 825 (1990).
- C. G. AMINOFF, C. LARAT, M. LEDUC et F. LALOE "Optical pumping of Helium with arc lamp excited LNA lasers, Revue de Physique Appliquée, **24**, 827 (1989).
- D.S. BETTS, F. LALOE and M. LEDUC, "Properties of strongly spin-polarized helium three gas" in Progress in Low temperature Physics, D.F. Brewer ed., vol. XII, Elsevier (1989).
- G. VERMEULEN, M. ELBEL and F. LALOE, "Sound velocity in spin-polarized quantum gases", Z. Phys. D 15, 13 (1990).
- W.J. MULLIN, F. LALOE and M.G. RICHARDS, "Longitudinal relaxation times for dilute quantum gases", J. Low Temp. Phys., **80**, 1 (1990); conférence LT19 à Brighton, Physica B, **165**, 725 (1990).
- P.J. NACHER, G. TASTEVIN et F. LALOE, "A kinetic equation for quantum gases, spin and statistics", J. Physique, 1, 181 (1991).
- F. LALOE, "Dilute degenerate gases" in "Bose Einstein Condensation", ed. by A. Griffin, D.W. Snoke and A. Stringari, Cambridge University Press (1995).

- N. GRAND, J. GILBERT et F. LALOE, "Influence des non linéarités sur les caractéristiques d'oscillation des instruments à vent", J. Physique C5-585 (1994).
- P. GRUTER et F. LALOE, "Ursell operators in statistical physics I: generalizing the Beth Uhlenbeck formula", J. Physique I France 5, 181 (1995); II: microscopic properties of a dilute quantum gas, Journal de Physique I 5, 1255 (1995).
- F. LALOE, "Correlating more that two particles in quantum mechanics", Current Science, 68, 1026 (1995).
- A.E MEYEROVICH, S. STEPANIANTS and F. LALOE, "Statistical Quasi Particles in Transverse Dynamics", Phys. Rev. B; **52**, 6808 (1995); "Spin dynamics in spin polarized Fermi gases", Journal of Low Temp. Physics **101**, 803 (1995); symposium on quantum fluids, Cornell University, June 1995; "Fermi liquid effects in spin polarized gases", ESF conference on quantum liquids, Trieste Italy, April 95.
- W. MULLIN, W. SNIDER and F. LALOE, "Analysis of certain binary collision approximation closures of the BBGKY hierarchy", Physica A, **218**, 155 (1995).
- P. GRUTER, F LALOE, A.E. MEYEROVICH et W. MULLIN: "Ursell operators in statistical physics III, thermodynamic properties of a dilute gas", à paraître au Journal de Physique (1997).
- P. GRUTER et F. LALOE, "Ursell operators in statistical physics IV, Bose Einstein condensation and superfluidity in dilute gases", en préparation.
- N. GRAND, J. GILBERT et F. LALOE, "Oscillation threshold of woodwind instruments", Acoustica 83, 137 (1997).
- P. GRUTER, D. CEPERLEY, F. LALOE "Critical Temperature of Bose-Einstein condensation of hard spheres gas", Phys. Rev. Lett. **79**, 3549 (1997).

Articles dans des revues non-spécialisées

F. LALOE: "La mécanique quantique: 50 ans de fidélité d'une grande dame" et "La mécanique quantique à l'ordinaire des physiciens", Science et Avenir, n° spécial, (1984)

Contribution à l'ouvrage collectif "Le monde quantique", Editions du Seuil, Collection Points.

- S. et F. LALOE: "La clarinette", Pour la Science, mai 1985.
- P.J. NACHER, M. LEDUC, C. LHUILLIER et F. LALOE : "Pompage optique laser, orientation nucléaire et ondes de spin dans ³He gazeux", Bulletin de la SFP, Juillet 1985.
- F. LALOE : "Le maser à hydrogène, une stabilité qui vient du froid", La Recherche, Sept. 1986.
- F. LALOE et J. FREED: "Spin polarized gases", Scientific American, April 1988 et Pour La Science Juin 1988.
- F. LALOE : "La mécanique quantique et ses drôles de corrélations", La Recherche, Novembre 1986.
- F. LALOE "Quel usage les scientifiques font ils actuellement du patrimoine documentaire écrit ?", intervention au congrès de la FFCB a Roanne, Octobre 1993.
- F. LALOE "Preparing for a phase change", Europhysics News, March 1995, p. 35
- F. LALOE "Mister Chauvin was French, wasn't he?", La Recherche No 275, **26**, 362, Avril 1995
- F. LALOE Colloque "Défis et Complexités du troisième millénaire", "Complexité scientifique et choix démocratiques, le point de vue d'un chercheur du CNRS", mars 1996, Editions Passages.
- F. LALOE "Superfluidity in gases, is particle number conservation symmetry spontaneously broken?", Europhysics News 27, 174 (sept. 1996).
- F. LALOE "Les publications en physique, impact des nouvelles technologies", Colloque à la Maison des Sciences de l'Homme de Poitiers; Bulletin de la SFP, 107, 12 (décembre 1996); Physikalische Blätter, Heft 5 (mai 1997)
- F. LALOE "The impact of electronic publishing on the physics community; the point of view of a physicist", contribution au proceedings de colloque de Stockholm organisé par Academia Europaea (Portland Press)

Brevets:

"Sélection de modes laser par un double interféromètre de Michelson", ANVAR, 1980.

"Magnétomère à hélium pompé par laser", no 8 606 776, ANVAR, 1987.

"Clarinette accordable en temps réel", en collaboration avec l'IRCAM, 1996.

Analyse des travaux de recherche

Plan et résumé

1. Pompage optique classique, p.15

1.1Signaux de détection optique

Théorie générale des signaux de détection dans une expérience de pompage optique.

1.2 Transferts d'orientation par les spins nucléaires.

Une méthode permettant d'orienter ds niveaux atomiques excités et de détecter commodément l'orientation nucléaire dans un gaz de ³He.

1.3 Echange de métastabilité et de spin.

Etude du rôle précis du principe de Pauli.

1.4 Orientation d'autres espèces.

Ion hélium, néon, molécules.

1.5 Magnétométrie.

Utilisation d'un magnétomètre à rubidium pour la détection directe de la polarisation nucléaire de 3He .

2. Extensions du pompage optique, p.19

2.1 Effets de sélection en vitesses.

Des effets de saturations croisées entre faisceaux laser qui ne demandent pas de grandes intensités.

2.2 Pompage optique à basse température, études de relaxation et d'adsorption.

Le contrôle de la relaxation par dépôt d'enduits tels que l'hydrogéne solide sur les parois internes des cellules en verre.

3. Effets d'indiscernabilité dans les gaz orientés à basse température, p.22

3.1 Equation de transport quantique.

Une équation de transport générale qui permet de traiter les effets liés aux spins et ceux provenant de l'indiscernabilité des atomes; travail fait avec C. Lhuillier.

3.2 Laser infrarouge, conduction calorifique.

La mise au point d'un laser infrarouge permettant de polariser l'hélium trois; travail fait avec M. Leduc.

3.3 Ondes de spin et conductivité.

Des nouvaux modes oscillants se propageant dans les gaz dilués, comme le son, mais concernant les spins.

3.4 Polarisation de l'hélium trois liquide.

Transferts de polarisation vers la phase liquide à partir du gaz polarisé par un laser.

3.5 Equilibre liquide-vapeur.

Les modifications diverses que peut produire la polarisation nucléaire sur les diagrammes d'équilibre liquide vapeur.

4. Gaz quantiques dégénérés, p.28

4.1 Equation de transport généralisée.

Réconciliation de l'équation de transport avec la seconde correction du viriel à l'équilibre.

4.2 Méthode des opérateurs d'Ursell.

Une généralisation opératorielle des méthodes d'agrégats en mécanique statistique. La formule de Beth Uhlenbeck généralisée, la longueur d'Ursell, les corrélations entre particules dans des gaz dégénérés.

5. Acoustique, p.32

5.1 Bifurcation et chaos acoustique.

Adaptation au domaine de l'acoustique de phénomènes de dynamique nonlinéaire comme le scénario de Feigenbaum de doublements de période successifs.

5.2 Localisation d'Anderson

L'effet du désordre sur la propagation des ondes acoustiques dans des réseaux irréguliers.

5.3 Impédances acoustiques, rôle, mesure, calculs

Différents outils théoriques et expérimentaux pour caractériser le rôle du résonnateur dans un auto-oscillateur acoustique.

5.4 Diverses réalisation pratiques.

Modification d'instruments de musique à l'IRCAM.

6. Fondements de la mécanique quantique, p.38

6.1 Le déterminisme, la localité.

Le débat autour du théorème de Bell. Activité en tant qu'éditeur de PRL.

6.2 Symétries

L'invariance de jauge en théorie de Schrödinger, les algèbres de Lie et le groupe de Poincaré.

7. Projets, p.36

7.1 Condensation de Bose Einstein dans les gaz

Application de la méthode des opérateurs d'Ursell pour mettre au point une théorie de la condensation de Bose Einstein dans les gaz dilués. Calculs par la méthode de Monte Carlo.

7.2 Hydrodynamique superfluide, brisure spontanée de symétrie.

Une approche qui permettrait de justifier, au lieu de postuler, le modèle à deux fluides.

7.3 Acoustique

La conception assistée par ordinateur de cavités acoustiques.

Les lignes qui suivent donnent une description des travaux de recherche que j'ai pu mener au cours des années, thème de recherche par thème de recherche, partant de la physique du pompage optique classique et allant vers la mécanique statistique, les basses températures, avec un détour vers l'acoustique. Ces travaux ont ainsi touché à des spécialités assez variées, dont certaines ne sont peut être pas représentées dans la commission du CNRS dont je dépends. Par exemple, la mécanique quantique fondamentale rélève peut être autant de la commission de physique théorique tandis que l'acoustique figure explicitement dans les attributions d'une commission du département SPI. En revanche, mon sujet de recherche principal en ce moment, l'étude de la condensation de Bose Einstein dans un gaz dilué, est beaucoup plus central pour cette commission, et c'est même un sujet ou l'activité de recherche des physiciens atomistes tend actuellement à croître.

Les principaux thèmes de recherche que j'ai abordés sont décrits succinctement ci dessous, à peu près dans l'ordre historique, bien que certains regroupements logiques aient été effectués.

1 Pompage optique classique

A l'époque ou j'ai commencé la recherche, le point de départ de la plupart des travaux dans le domaine était la thèse de Claude Cohen Tannoudji, qui avait donné une théorie générale du processus de pompage optique réglant définitivement un certain nombre de questions; de plus elle introduisait des idées très nouvelles sur les déplacements lumineux. Comme probablement tous les autres débutants en thèse, j'ai donc commencé par l'étudier à fond (plusieurs mois) pour en maîtriser tous les aspects. Ainsi, les travaux qui sont décrits ci dessous peuvent être vus comme dans la ligne directe de la voie ouverte par cette thèse, ainsi que celle de Jean Claude Lehmann sur la polarisation nucléaire et le rôle du couplage hyperfin dans son obtention dans le cycle de pompage optique.

1.1 Signaux de détection optique

La méthode du pompage optique est basée sur le fait que le moment cinétique des photons peut être transféré vers les atomes, en tous cas dans certaines circonstances favorables. Inversement, les atomes modifient les propriétés de la lumière qui les irradie, en modifiant par exemple sa direction de propagation ou sa polarisation. Les travaux de A. Gozzini avaient permis de mettre en évidence le rôle des l'effets Faraday paramagnétique, issu de la dispersion pure d'une vapeur atomique orientée. Aucun cadre théorique général ne permettait cependant de faire le catalogue général de tous les types de signaux optiques attendus dans les

différents cas, en y incluant les effets de population, d'orientation, et d'alignement des atomes. Cela a donc été le but de ce premier travail, initié comme je l'ai déjà rappelé par Claude Cohen Tannoudji, travail qui a permis non seulement de retrouver dans un cadre unique les effets connus, mais aussi d'en prévoir d'autres. Certains (en particulier les signaux liés à la détection dispersive le l'alignement des atomes) ont fait l'objet de vérifications expérimentales ultérieures, avec M. Leduc et P. Minguzzi, d'autres (comme l'échange d'énergie entre un faisceau non résonnant tombant entre deux composantes hyperfines d'un alcalin soumis à la résonance magnétique hyperfine) pas encore. Ce travail a également été utile de façon générale pour la suite des expériences de pompage optique, par exemple dans notre groupe pour la calibration des mesures de polarisation nucléaire de l'hélium trois.

1.2 Transferts d'orientation par les spins nucléaires

L'inertie des spins nucléaires, dont l'état n'est pas modifié dans la plupart des processus atomiques (absorption rapide d'un photon, collision de durée très courte), découle simplement de leur faible couplage au monde extérieur. On parle parfois de la "règle de Wigner" pour désigner cet effet. L'idée de base de mon sujet de thèse, proposée par C. Cohen Tannoudji et J. Brossel, était d'utiliser cette inertie comme un moyen d'orienter de nombreux niveaux atomiques excités dans une décharge, à condition évidemment qu'une orientation nucléaire ait préalablement été créée dans l'état fondamental. Le cas le plus favorable pour l'étude de ce processus était l'hélium trois. Je me suis ainsi attaché à la réaliser sur le plan pratique et, après réalisation d'un montage approprié, cette idée a effectivement conduit à des expériences couronnées de succès, qui ont permis par exemple de mesurer des structures hyperfines de niveaux excités de l'hélium trois. Mais surtout, elle a conduit tout naturellement à la mise au point d'une méthode de mesure en continu de la polarisation dans le niveau fondamental de cet atome soumis au pompage optique, basée sur l'utilisation d'un modulateur de polarisation. La méthode, très commode, est en fait toujours utilisée actuellement, par les laboratoires monde entier qui font du pompage optique de cet atome, que ce soit pour la fabrication de cibles polarisées ou d'échantillon polarisés à des fins de physique médicale.

Au passage également, on peut signaler la mise au point d'une nouvelle méthode de mesure précise des coefficient de diffusion de l'aimantation dans un gaz, celle de résonance en champ de radiofréquence inhomogène. Initialement mystérieuses, les courbes dites "en casque à pointe" se sont ainsi transformées en un outil d'étude des propriétés de transport dans un gaz, utile pour l'étude ultérieure des ondes de spin. Toutefois, à ma connaissance, elles n'ont pas été utilisées depuis.

1.3 Echange de métastabilité et de spin

L'échange de métastabilité est à l'origine de la polarisation par pompage optique du niveau fondamental de l'hélium trois. Il est en effet exclu, pour des raisons de longueur d'onde inaccessible, d'avoir optiquement accès directement au niveau fondamental. Ainsi la méthode maintenant classique de Colegrove, Schearer et Walters passe par le niveau métastable et les transfert de polarisation permis par les collisions d'échanger de métastabilité. Curieusement cependant, la théorie de ce phénomène contenue dans la littérature était inexacte, entrainant par exemple des erreurs dans l'estimation de la valeur de la section efficace elle-même pouvant atteindre un facteur 2. Avec Jacques Dupont Roc, nous avons clarifié ce problème et mis au point une théorie correcte, pour la vérifier ensuite expérimentalement en détail (comparaison des largeurs collisionnelles des différents niveaux hyperfins). Ce travail a été utile pour rétablir plusieurs facteurs numérique dans la comparaison théorie expérience, et intervient l'ajustage du potentiel phénoménologique hélium métastable-hélium fondamental. Il a été repris pendant des années par le groupe de Zhitnikov à Leningrad, qui l'a étendu systématiquement aux basses températures et à des mélanges isotopiques.

L'échange de spin entre alcalins dans le fondamental est un type de collision assez similaire sur le plan conceptuel, relevant de traitement théorique du même type. Il était bien connu mais, à mon avis, les traitement qui en étaient donnés n'étaient pas satisfaisants, car ils ne distinguaient pas correctement entre les effets liés aux échanges d'électrons de type covalents entre atomes de ceux qui sont réellement dûs au principe de Pauli, allant même parfois jusqu'à attribuer aux seconds ce qui revient au premiers. Nous avons ainsi effectué un travail de mise au point, qui peut être considéré comme un peu académique puisqu'il est motivé plus par un désir de compréhension détaillée du rôle de l'indiscernabilité entre particules (antisymétrisation) que par la recherche d'effets nouveaux. Mais il a permis de simplifier l'écriture des équations et, surtout, c'est au cours de la rédaction de ce travail, pendant un séjour au MIT, que je me suis rendu compte que l'absence d'effets d'échange de spin pour deux atomes fondamentaux tenait à une annulation subtile d'une intégrale angulaire; la même compensation ne devrait pas se maintenir pour une direction de collision donnée. C'est la base de ce qui plus tard été appelé "effet de rotation des spins identiques". Ainsi, l'annulation ne devait pas se produire dans tout processus faisant intervenir une moyenne angulaire différente; en d'autres termes, c'est de là qu'est venue l'idée que "quelque chose devait osciller dans la diffusion de spin à basse température", intuition qui s'est concrétisée dans l'observation d'ondes de spin dans un gaz des années plus tard.

1.4 Orientation d'autres espèces

Il était naturel à ce stade d'explorer les autres espèces atomiques, moléculaires, ou ioniques, qui pourraient être orientées et observées de façon similaire. Dans un certain nombre de cas, des résultats positifs ont pu être obtenus.

1.4.1 Ion hélium

L'ion hélium est, comme l'atome d'hydrogène, un atome élémentaire, encore qu'il soit nettement plus petit. Effectivement, et par échange de charge cette fois, nous avons montré qu'il peut être orienté dans une décharge; nous avons pu effectuer une mesure de sa structure hyperfine (mais connue auparavant avec une précision meilleure). La section efficace des collisions d'échange de charge a également été mesurée, ainsi que diverses propriétés de la diffusion ambipolaire des ions et électrons couplés entre eux. L'ion hélium possède évidemment une simplicité qui confère à ses propriétés un caractère fondamental et qui en font un candidat de choix pour des expériences de haute précision. Toutefois la largeur trop grande des raies de résonance magnétique que nous avons obtenues ne permettait pas d'atteindre une précision suffisante pour ce type d'expérience.

1.4.2 Néon

Le néon possède un isotope de spin 3/2, le ²¹Ne, qui est rare mais cependant accessible en petites quantités. Des expériences nous ont permis de montrer qu'un polarisation du niveau fondamental pouvait être créée par pompage optique, puis transférée à divers niveaux excités. Initialement menées avec des lampes à décharge ordinaires, ces expériences ont ensuite été reprises avec le laser à colorant de Michel Pinard, évidemment dans de bien meilleures conditions d'intensité et de directivité de la source lumineuse.

1.4.3 Autres gaz rares, molécules

Nos tentatives d'orientation nucléaire sur l'Argon, le Krypton, et le Xénon n'ont jamais été couronnées de succès, car les signaux de résonance étant extrêmement petits, peut être même absents. En revanche, il a été possible de montrer que les raies moléculaires He_2 étaient sensibles à la polarisation nucléaire présente dans la décharge qui les crée, et que l'on pouvait même prévoir une disparition de certaines d'entre elles pour une polarisation nucléaire totale. Ces expériences ont été menées en collaboration avec Jack Vanderlinde (Vancouver), mais dans ces conditions de rapport signal/bruit peu favorables. Le pompage optique des gaz rares lourds, un peu oublié pour un temps, redevient d'actualité dans le cadre le l'imagerie médicale des poumons, et de la détection en temps réel des échanges gazeux qui s'y produisent avec le sang. Il se trouve en effet qu'un gaz comme le xénon donnent lieu à des échanges bien plus efficaces que l'hélium.

1.5 Magnétométrie

Au moment de la fin de ma thèse, Jacques Dupont Roc, Serge Haroche et coll. avaient mis au point un magnétomètre à Rb d'une sensibilité remarquable, utilisant le fait que les raies de résonance magnétique dans l'état fondamental pouvaient devenir extrêmement fines en l'absence de gradient magnétiques. Ce type d'expérience demandait la conception et l'utilisation de blindages magnétiques en mu-métal de haute qualité, technique difficile mais qui avait été bien maitrisée par eux à cette occasion. L'idée m'est alors venue de procéder à une détection directe de l'orientation des atomes d'hélium trois dans l'état fondamental, qui donnait lieu à un champ de l'ordre du micro-gauss qui devrait être raisonnablement détectable. L'expérience, presque aussitôt montée, a permis de non seulement mettre en évidence l'effet recherché, mais de "suivre" la polarisation nucléaire dans de très bonnes conditions, par exemple en précession libre lente sur des temps pouvant atteindre des dizaines d'heures! C'était la première fois que ce type de détection était utilisé en pompage optique. C'était aussi notre première incursion dans le domaine des temps de relaxation nucléaires très longs, qui devait être l'objet de travaux assez poussés dans notre groupe dans les années ultérieures.

Nous avons même fait à l'époque des tentatives de détection de champs magnétiques d'origine vivante, comme celui du coeur d'une grenouille. Hélas les constantes de temps trop longues inhérentes à notre détection se sont avérées rédhibitoires. De fait, les progrès spectaculaires des magnétomètres SQUID font que notre technique est restée d'utilisation limitée aux laboratoires de recherche. Ce n'est que des années plus tard que j'ai appris que des méthodes semblables étaient utilisée par la NAVY américaine pour la réalisation de "magnétomètres dormants" à hélium trois, posés au fond des mers pour la détection de sous marins!

2 Extensions du pompage optique

Au début des années 70, la plupart des membres du laboratoire de Spectroscopie Hertzienne se trouvaient directement sous l'impact de la "révolution des lasers accordables"; notre groupe, alors déjà riche de quelques étudiants en thèse, n'échappait pas à la règle. Nous nous sommes donc lancés comme bien d'autres groupes dans l'utilisation des lasers à colorants, puis à centres colorés dans les cristaux. C'est ainsi que nous avons mis au point les méthodes de pompage optique sélectif en vitesses, qui sont brièvement décrites ci dessous. Mais, pour nous, c'est assurément une voie plus originale qui a constitué l'extension essentielle des méthodes du pompage optique: les basses températures, qui devaient plus tard nous conduire vers l'étude des effets de statistique quantique dans les gaz dilués.

2.1 Effets de sélection en vitesses

Il faut d'abord dire que cette période a demandé la mise au point de lasers monochromatiques, stables, et accordables, qui n'étaient à cette époque pas disponibles commercialement; la tâche n'était pas si facile. A l'exemple des chercheurs du laboratoire Aimé Cotton, puis d'autres équipes du LKB, nous nous sommes donc attachés à construire les outils dont nous avions besoin, ce qui a pris du temps. A une certaine période, avoir un laser monomode balayable continûment, sans sauts de mode, était une performance, surtout si la puissance était conséquente! Avec Michel Pinard et Carl Aminoff, nous avons d'ailleurs mis au point une technique de sélection de modes originale, basée sur l'utilisation d'un double interféromètre de Michelson, puis une autre de balayage par pression d'un laser continu. Toutes deux nous ont rendu de grands services. Ces techniques ont même été adoptées pour un temps assez court dans des laboratoires à l'étranger, mais très vite celle des lasers en anneau s'est avérée plus performante; c'est elle qui est mise en oeuvre dans les lasers monomodes commerciaux actuels. Pour finir, nos efforts sur ce plan ont donc été utiles à court terme, voire indispensables, mais pas à long terme.

La source lumineuse ainsi réalisée a servi à des expériences diverses, en particulier à des expériences de pompage optique sélectif en vitesses, où l'on peut obtenir des raies de saturation non linéaire non élargies par effet Doppler avec des puissances bien plus faibles qu'en absorption saturée classique. En fait, et tout à fait indépendamment du laboratoire de A. Schawlow (prix Nobel 1991), nous mettions au point des outils très similaires a ce que qu'il appelait ""polarization spectroscopy" ou encore "polarization labeling of molecular states", mais nous l'appelions "VSOP method" (Velocity Selective Optical Pumping). Un autre travail a été consacré à l'étude du niveau métastable 5S de l'oxygène que, avec Lucile Julien, nous avons réussi à polariser et à observer par résonance magnétique. Avec le recul du temps, il faut reconnaître que ces méthodes, nombreuses et variées, souvent élégantes, ont disparu des préoccupations des physiciens. En fait, un peu à l'inverse de ce beaucoup d'entre nous pensions à l'époque, l'apparition des nouveaux lasers n'a pas suffi à renouveler le domaine du pompage optique; ce n'est que des années plus tard que le renouveau véritable est apparu, avec les méthodes de refroidissement laser (dont certaines ont une filiation marquée avec les traditions du pompage optique).

Parmi les expériences qu'on peut qualifier d'élégantes on peut probablement mettre celle de "double sélection en vitesse" que nous avons réalisée. Dans cette expérience le croisement d'un effet de déplacements lumineux avec un effet de transitions optiques réelles nous permettait d'observer une raie fine attribuable à des atomes dont deux composantes de la vitesse sont nulles, un peu comme dans un jet (qui aurait cependant une grande dispersion de la troisième composante de la vitesse).

2.2 Pompage optique à basse température; études de relaxation de d'adsorption

Aller vers les basses températures était à l'époque une idée beaucoup moins courante en physique atomique qu'elle ne l'est actuellement, à cause du succès des méthodes de refroidissement laser. Nous n'avions alors évidemment aucune idée de ces dernières et, de façon beaucoup classique, nous ne pensions qu'à des techniques de refroidissement dans des cryostats, comme le font couramment les physiciens du solide par exemple. Nos raisons d'aller dans ce domaine inexploré du pompage optique n'étaient pas seulement fondées sur le désir d'en étendre les applications et d'en repousser les frontières. Elles se fondaient également sur notre intérêt pour la physique des collisions simples (donc calculables ab initio) comme l'échange de métastabilité, et sur la remarque élémentaire qu'on peut couvrir un domaine de variation relative de l'énergie de collision bien plus grand en abaissant la température qu'en l'augmentant. Nous voulions ainsi exploiter le fait unique que, travaillant sur l'hélium, nous pouvions étudier un gaz qui reste stable jusqu'à quelques degrés Kelvin. Mais, surtout, à cette époque, nous commencions à être intrigués par plusieurs aspects du traitement théorique du transport dans les gaz; les méthodes théoriques disponibles, directement dérivées des théories générales mises au point en physique de la matière condensée, très influencées par des approches de type champ moyen, nous semblaient insuffisantes. Enfin, l'idée de se placer dans des conditions où les tensions de vapeur saturante des impuretés sont très faibles nous semblait utile pour faire des études de relaxation nucléaire sur des surfaces propres (gaz rares solidifiés par exemple).

C'est avec l'arrivée de René Barbé dans notre groupe que les cryostats à hélium y ont fait leur apparition; il était déjà familier avec leur utilisation, et même si officiellement j'étais son directeur de thèse, c'est lui qui était notre véritable mentor sur ce plan. Au delà des difficultés techniques posées par des cryostats optiques à large ouverture (le laser à 1,08 micron n'était pas encore disponible!), le réel "défi" des basses températures, pour nous, était de contrôler la relaxation des spins nucléaires sur la paroi. Ce n'est en effet que tout récemment que Jacques Dupont Roc, Pierre Jean Nacher et Geneviève Tastevin ont montré la puissance des méthodes basées sur l'utilisation du Césium, technique qui a représenté une véritable petite révolution dans notre domaine. De fait, je me souviens que des tentatives en ce sens (mettre un getter a césium en appendice à une cellule à hélium) ont été faites à l'époque, mais assez timidement et parmi bien d'autres essais; elles étaient stimulées par des indications assez vagues du groupe Texan qui avait inventé le pompage optique dans l'hélium. Il n'en est donc alors rien résulté de probant, de sorte que nous nous sommes dirigés vers une autre idée qui semblait, à l'époque, beaucoup plus élégante et prometteuse: enduire les parois internes de la cellule de verre avec des "enduits" de gaz rares solides. Quelques mois plus tard est venue l'idée de l'hydrogène moléculaire, dont les protons sont très proches de sorte qu'il ressemble en fait beaucoup à un atome d'hélium plus léger (mais aussi plus polarisable). Au cours de la thèse de René Barbé, nous avons ainsi pu montrer que tous les gaz rares donnaient des résultats excellents pour l'obtention de temps de relaxation longs, le meilleur étant le plus léger (néon en l'occurrence), toutefois moins favorable que l'hydrogène moléculaire, et le moins bon le xénon. A la termpérature de l'hélium liquide, le temps de relaxtion obtenu était de 5 ordres de grandeur supérieur à sa valeur sur le verre nu!

Encouragés par ce succès, nous avons continué avec la thèse de Valérie Lefèvre, qui s'était donné comme objectif de mesurer les dépendances en température des temps de relaxation, et d'en déduire l'énergie microscopique d'absorption de l'atome d'hélium trois sur des surfaces simples. Ce programme a pu être rempli de façon satisfaisante, puisque par exemple les mesures de cette thèse ont bien convergé avec les résultats de calculs numériques variationnels menés par Claire Lhuillier. La raison pour laquelle cette voie de recherche n'a pas été poussée plus loin est le mauvais contrôle que nous avions du film d'hydrogène solide. Extrêmement mobile et se déplaçant aisément en présence d'un gradient de température, sensible parfois à des cycles de recuit, peut être même spongieux pensaient certains, il n'avait en fait ni la simplicité ni la reproductibilité qui aurait permis de d'aller beaucoup au delà de qui avait été fait. Nous avons donc préféré nous contenter d'utiliser ces "enduits cryogéniques" pour des expériences dont le but n'était pas leur étude en elle-même.

Toutefois, notre groupe se trouvait déjà ainsi à la croisée de la physique atomique et des basses températures, avec un intérêt plus fort pour la mécanique statistique que traditionnellement en physique des gaz dilués. Mais nous ne sommes pas restés les seuls, car ce domaine commençait déjà à s'étendre sous l'influence des premiers résultats de J. Walraven et I. Silvera sur la stabilisation de l'hydrogène atomique, entraînant dans le monde entier un intérêt croissant pour l'étude des gaz froids polarisés. Pendant une dizaine d'années, hydrogène et l'hélium polarisé ont été compagnons dans les congrès, et pour nous source de collaborations fructueuses avec d'autres laboratoires.

3 Effets d'indiscernabilité dans les gaz orientés à basse température

A l'époque de la thèse de René Barbé, la situation théorique concernant les équations de transport dans les gaz quantiques dilués était en fait très peu satisfaisante, mais curieusement personne ne semblait être vraiment conscient du problème. Par exemple, même les travaux d'un physicien aussi reconnu que V. Emery sur le sujet étaient inexacts, comme on pouvait s'en rendre compte en remarquant que les équations qu'il écrivait ne préservaient pas toujours l'hermiticité de l'opérateur densité. C'est qu'en fait la question est plus délicate qu'il n'y paraît. Historiquement, dans les premiers travaux sur les propriétés de transport

dans l'hélium trois, en particulier la diffusion de spin (peut être plus facile à mesurer par RMN que viscosité ou conduction calorifique), très naturellement les expérimentateurs avaient comparé leurs résultats à des formules théoriques contenant la section efficace symétrisée. Ils pensaient ainsi tenir compte correctement de l'indiscernabilité des particules, et à première vue la procédure paraissait saine. Mais il se trouvait que l'accord avec la théorie était obtenu avec une certaine difficulté. Cette dernière a été résolue plus tard, précisément par V. Emery, qui a montré pourquoi il se trouve que le cas de la diffusion de spin est complètement à part: la section efficace qui intervient ne doit pas être symétrisée (alors que c'est essentiel pour la conduction calorifique par exemple). C'était un pas en avant considérable dans la compréhension, mais l'analyse théorique était inachevée, et surtout présentait des incohérences sérieuses déjà mentionnées plus haut.

Le problème général de l'étude des effets d'indiscernabilité dans un gaz quantique à basse température semblant réellement intéressant, j'ai proposé à Claire Lhuillier, qui venait de terminer sa thèse sur un tout autre sujet, de venir rejoindre notre groupe, en élargissant nos investigations à divers aspects tels que changement de toutes les propriétés de transport sous l'effet de la polarisation nucléaire, du second coefficient du viriel, voire même changement de l'énergie de liaison du liquide. Avec la puissance d'analyse qui la caractérise, elle a rapidement su transformer des idées générales, restées au niveau des potentialités, en une série de résultats précis et quantitatifs, y incluant même par exemple des considérations sur les solutions de hélium trois dans l'hélium quatre liquide. C'est d'ailleurs à cette époque que j'ai réussi à intéresser Philippe Nozières à ces mêmes questions, ce qui l'a conduit à développer avec Bernard Castaing toute une série de considérations générales plus thermodynamiques que les nôtres, plus dans la ligne de la tradition de la physique de la matière condensée. Quelques mois plus tard, leur article et le nôtre paraissaient côte à côte dans le Journal de Physique, et proposaient toute une série d'expériences dont un bon nombre ont effectivement été réalisées depuis. En particulier, Castaing et Nozières introduisaient dans leur article l'idée une méthode complètement différente de la nôtre (le pompage optique) pour créer la polarisation nucléaire dans l'hélium trois liquide: la méthode de fusion rapide qui prendra rapidement le nom de "méthode de Castaing Nozières". Pour notre groupe, cette ouverture vers une autre communauté de physiciens a été un apport très bénéfique, et notre intégration rapide dans ce nouveau milieu nous a permis d'être invités à des congrès comme les grandes conférences LT.

3.1 Equation de transport quantique

Mais les incertitudes concernant le détail des propriétés de transport, et le rôle exact de l'indiscernabilité des particules, subsistaient. J'ai donc proposé à Claire Lhuillier de l'étudier, afin de régler une fois pour toutes cette question; nous voulions être capables de calculer de façon systématique, au lieu de devoir deviner

au coup par coup, quelle section efficace, symétrisée ou non, correspondait à chaque quantité physique mesurable. De plus, le problème de savoir si, réellement, "quelque chose oscillait dans la diffusion de spin" (cf. § 1.3) nous paraissait peut être pouvoir être abordé à cette occasion. Mais j'avoue que je ne savais pas très bien par où prendre le problème, n'ayant en tête que des approches trop microscopiques, ou phénoménologiques, du transport dans les fluides. C'est Claire Lhuillier qui nous a montré que l'approche correcte du problème était de passer par l'écriture d'une nouvelle équation cinétique, qui allait d'ailleurs être notre outil de travail théorique pour des années. La vérité m'oblige à admettre que je n'ai pas tout de suite compris en détail la justification du point de départ de ses calculs, et pourquoi ils étaient exacts (car il l'étaient assurément!); la raison est qu'ils étaient basés sur la méthode semi intuitive de Snider, dont la justification est délicate (d'ailleurs ce dernier a admis plus tard les limites de son approche, et nous avons publié deux articles sur ce sujet, dont un commun); cela m'a conduit, pendant un été passé au laboratoire, à en développer une autre approche, indépendante, plus rigoureuse à mon avis, en tous cas plus proche de celle qui avait été utilisée pour l'étude des collisions d'échange de spin. Au bout de ce travail est apparue, non seulement une confirmation des prédictions de Claire Lhuillier, en particulier sur la "diffusion de spin oscillante" (nous ne parlions pas encore d'ondes des spin), mais également d'autres effets comme un couplage, d'origine purement quantique et statistique, entre courant de chaleur et gradient de polarisation. Inutile de dire que l'équation générale de transport "LL" (ainsi qu'elle a souvent été nommée) permettait de prédire, dans chaque cas, quelle section efficace intervenait, avec ou sans symétrisation, de façon parfaitement claire et systématique. Le programme était donc pleinement rempli.

Ce travail fait avec Claire a été, de tous les travaux théoriques auquel j'ai participé, probablement celui qui m'a donné le plus de satisfaction intellectuelle, par le caractère achevé du résultat final. Lors de nombreux séminaires, il a fallu défendre cette théorie, dont certains aspect inattendus choquaient les théoriciens, en particulier ceux de l'école russe. Les débats ont parfois été même assez vifs; parfois on nous a rétorqué que, si ces effets quantiques de statistique existaient dans les gaz dilués, ce serait évidemment déjà mentionné dans les grands ouvrages d'enseignement: nous devions donc nécessairement nous tromper. Bien sûr, lorsque les expériences sont venues confirmer les prédictions, ces objections ont été levées. Mais j'avoue que, des années plus tard, c'est avec grande satisfaction que j'ai découvert que l'équation LL figurait explicitement, avec une discussion détaillée de ses propriétés et de l'effet de rotation des spins identiques, dans le chapitre sur le transport d'un ouvrage (américain) d'enseignement de mécanique statistique.

3.2 Laser infrarouge; conduction calorifique

A cette époque, la collaboration était très proche avec Michèle Leduc, avec qui je partageais en quelque sorte la direction de notre groupe. Elle avait accepté de relever un autre défi très difficile, celui d'obtenir expérimentalement des polarisation nucléaires importantes dans l'hélium trois par pompage optique. Il fallait pour cela mettre au point un laser infrarouge, de longueur d'onde $\lambda=1,08\mu$, qui par malchance n'était accessible par aucun type de laser connu. Il fallait également faire des expériences propres dans un domaine où des chiffres nettement exagérés concernant les polarisation obtenues étaient fréquents. Le travail a pris des années, et progressivement d'une collaboration étroite il est devenu l'oeuvre de Michèle seule, chacun d'entre nous se spécialisant dans un domaine; il est clair que, sans ses multiples talents de physicienne et ses idées, je n'aurais pas été capable de réaliser la percée expérimentale et de susciter l'enthousiasme des jeunes pour faire vivre le groupe, et de faire progresser le sujet.

Les premiers lasers que nous avons essayé sont des lasers à colorant, ce qui était naturel étant donné notre bonne expérience de ces appareils, en tous cas pour le visible. Mais, pour atteindre les longueurs d'onde requises, il a fallu recourir aux lasers à modes bloqués, afin d'abaisser les seuils. Grâce à des collaborations multiples, notre groupe a réussi à être le premier à réussir le pompage optique laser de l'hélium, et nos résultats ont été présentés par M. Leduc à la première conférence SPOQS (spin polarized quantum systems) que j'organisais dans le centre du CNRS à Aussois. Déjà, les polarisations étaient nettement supérieures à celles obtenues avec des lampes classiques, mais hélas les colorants étaient très instables. Un ami américain (Daniel Kleppner je crois) m'ayant conseillé d'aller voir Linn Mollenauer aux Bell Laboratories, nous avons collaboré avec lui dans la réalisation de lasers à centres colorés. Les résultats ont été meilleurs, mais les problèmes d'instabilité des matériaux étaient toujours sévères; de plus le prix de l'appareillage était très élevé. Puis M. Leduc a, lors d'une conversation avec des chimistes, entendu parler d'un corps, appelé LNA, qui pourrait être le milieu laser adéquat (le laser LNA est en fait très proche du laser à Néodyme habituel, mais la matrice différente déplace les raies de fluorescence des ions néodyme). C'est ce laser qui a permis de passer le seuil psychologique des 50% de polarisation nucléaire, et de réaliser de nombreuses expériences. Depuis, les améliorations constantes ont continué, et ce sont maintenant des lasers à LNA de petites dimensions et de faible coût, directement pompés par des lampes à décharge, qui se trouvent dans notre laboratoire. Il sont également utilisés dans plusieurs laboratoires étrangers, principalement pour la production de cibles nucléaires polarisées, mais aussi dans des buts de magnétométrie (dans ce dernier cas toutefois, les diodes laser à semi conducteur, qui sont disponibles depuis peu, fournissent une source lumineuse presque idéale).

3.3 Ondes de spin et conductivité

La première utilisation des polarisations nucléaires ainsi obtenues a été la mise en évidence des effets prévus théoriquement concernant le transport quantique dans l'hélium trois à basse température: modification de la conduction calorifique et ondes de spin (en ce qui concerne la viscosité, nous n'avons pas trouvé de schéma expérimental suffisamment simple pour le mettre en oeuvre). Pour les ondes de spin, le groupe de Cornell University (L. Levy, D. Lee - prix Nobel 1996 pour ses travaux sur l'hélium trois liquide - et J Freed) travaillant sur l'hydrogène polarisé a remarqué notre article au Journal de Physique et, stimulé par ces calculs, a aussitôt lancé des expériences qui lui ont permis d'obtenir des résultats similaires (pour un système bosonique cependant); le hasard a fait qu'ils ont été obtenus de façon à peu près simultanée. L'honnêteté me force même à ajouter que le rapport signal sur bruit de leurs expériences les rendait plus spectaculaires que les nôtres; il se trouve que l'hydrogène polarisé se prête mieux à ce type d'expérience que l'hélium trois. Mais nos résultats étaient très réels également, ils ont été très bien accueillis par tous nos collègues, et nous ont permis de rester dans le peloton de tête des groupes travaillant sur les gaz quantiques polarisés.

En ce qui concerne la conduction calorifique, les expériences ont également été couronnées de succès et nous ont permis de confirmer de façon indubitable nos prédictions. Reprises ensuite par d'autres personnes du groupe, dont G. Vermeulen qui nous avait rejoint, elles ont permis d'obtenir un bon accord avec les prédictions théoriques, en particulier des oscillations de la variation de conduction calorifique qui avaient été caculées par C. Lhuillier. Ces expériences ont toutefois été faites à une époque où nous n'utilisions que les enduits d'hydrogène solide comme moyen de contrôler la relaxation nucléaire sur les parois, de sorte qu'il fallait toute l'habileté de Pierre Jean Nacher et des autres membres du groupe pour maîtriser l'ensemble de l'expérience. Si elles devaient être refaites, l'utilisation des verres césiés, maintenant classique, permettrait l'obtention plus aisée de résultats plus spectaculaires.

3.4 Polarisation de l'hélium trois liquide

Les expériences décrites ci dessus utilisaient une technique mise au point au cours de la thèse de P.J. Nacher, et perfectionnée en collaboration avec S. Crampton au cours de sa visite dans notre groupe, celle des "doubles cellules". Elle consiste à utiliser une cellule sphérique à température ambiante pour effectuer le pompage optique et bénéficier de la rapidité de l'échange de métastabilité qui transfère la polarisation du fondamental (la constante de temps devient près de 1.000 fois plus longue à la température de l'hélium liquide). Une autre cellule, à basse température, sert aux mesures, et le transfert de polarisation entre les deux cellules est assuré par la diffusion gazeuse dans un long tube les reliant. Il est nécessaire, pour éviter les effets dévastateurs de la relaxation nucléaire sur du

verre nu à basse température, de recourir ici aussi aux enduits d'hydrogène solide déposés sur les parois internes.

Dans un second temps, cette technique nous a permis de créer une goutte d'hélium trois liquide fortement polarisé. Ainsi nous avons pu montrer que la méthode de fusion rapide de Castaing Nozières n'était pas la seule à permettre la polarisation du liquide, dans un domaine de températures plus élevées. Un avantage de notre méthode est de pouvoir s'adapter à un fonctionnement en régime permanent, alors que la fusion rapide donne toujours des écahntillons très loin de l'équilibre. En revanche, il est clair que les échantillons créés par pompage optique sont toujours beaucoup plus petits.

3.5 Equilibre liquide-vapeur

Un autre aspect de l'hélium polarisé qui était déjà mentionné dans l'article initial avec Claire Lhuillier est l'effet de la polarisation nucléaire sur le diagramme de phase d'équilibre liquide-vapeur. L'origine de l'effet est purement quantique et liée à la statistique de Fermi: sous l'effet de la polarisation nucléaire, le niveau de Fermi de la phase dense augmente, ce qui modifie la densité de la vapeur en équilibre (en fait, la situation est plus compliquée, en particulier parce que les polarisation des deux phases peuvent être différentes). Des expériences ont été envisagées, mais en l'absence de prédictions précises sur la forme des diagrammes, il était difficile concevoir un schéma expérimental. Une collaboration avec des physiciens nucléaires a alors été mise au point, d'une part un groupe de Barcelone (M. Barranco) qui maîtrisait bien les calculs d'énergie dans les systèmes de fermions, d'autre part avec celui de S. Stringari à Trento. De mon côté j'étais chargé de la partie analytique, en fait graphique puisqu'il s'agissait de bien comprendre quel type de construction géométrique permettait de prédire l'allure des différents diagrammes dans le cas général. Fait par courrier électronique principalement, le travail a rapidement progressé et à conduit à un calcul et à une classification des différents cas possibles en quelques semaines.

Tracés en fonction d'un paramètre mal connu pour le moment (l'effet de la polarisation nucléaire sur l'énergie de liaison du liquide), les diagrammes sont maintenant disponibles et présentent toute une variété de cas possibles. Des efforts expérimentaux ont été faits dans notre groupe, en particulier par Geneviève Tastevin, pour les observer expérimentalement, et des résultats préliminaires intéressants ont été obtenus. Cependant la difficulté des expériences est telle (mesure de la pression, contrôle de la température) que le chapitre n'est pas clos pour le moment. Les expériences récentes de G. Vermeulen, qui sont décrites dans le rapport annuel du CRTBT de Grenoble, où il obtient une surpolarisation de liquide par une méthode purement thermodynamique de type distillation fractionnée, sont également de la même veine.

4 Gaz quantiques dégénérés

Vers 1990, un certain changement de personnes s'était produit ou allait bientôt se produire dans le groupe. Claire Lhuillier, a été nommée professeur à Paris VI et a rejoint un autre laboratoire de cette université, qu'elle dirige d'ailleurs en ce moment. Michèle Leduc songeait à rejoindre le domaine, très actif, du refroidissement laser. Il m'a alors semblé bon de laisser la direction de notre groupe de pompage optique à basses températures à Pierre-Jean Nacher, afin de lui donner l'occasion de montrer ses talents de façon plus indépendante, sans l'ombre constante de l'ancien patron de thèse. De plus, à part le regret d'une collaboration moins étroite, ce n'était pas du tout pour moi un sacrifice, car de nombreux problèmes théoriques m'intéressaient suffisamment pour que je m'éloigner un peu des expériences de basse températures. De mon côté je me suis alors revenu aux équations de transport, c'est à dire aux prolongements de notre travail théorique antérieur avec Claire Lhuillier, en tentant de l'étendre vers les gaz plus denses.

4.1 Equations de transport généralisée

Une première remarque qui m'avait beaucoup frappé était que l'équation LL de transport permet, comme toute équation de transport, de calculer la pression (elle apparaît explicitement dans les équations de type Navier Stokes, elles mêmes conséquences de l'élimination des variables rapides dans l'équation de transport). Or la pression ainsi obtenue était celle du gaz parfait: elle ne contenant pas les seconde corrections du viriel que pourtant nous avions étudiées par ailleurs! C'était une limite du domaine d'application de l'équation qui pouvait paraître inattendue. Je me suis donc attaché à résoudre cette contradiction.

Après plusieurs tentatives et de grands efforts pour essayer de dominer une littérature abondante (on dit parfois que deux les sujets qui ont donné lieu a le plus de travaux en physique sont d'une part, l'argument EPR et le théorème de Bell, de l'autre l'équation de Boltzmann et ses divers avatars!), je me suis dirigé vers une voie qui me semblait originale. Elle consiste à écrire l'équation de transport, non pas en fonction de la fonction de distribution à une particule comme c'est presque toujours le cas, ni même en fonction de celle à deux particules, mais d'une quantité hybride, la "transformée de Wigner libre". Cette dernière rend compte des propriétés physiques des particules seulement lorsqu'elles sont éloignées des autres; on peut considérer, si on veut, quelle donne une description asymptotique de la distribution à deux particules pour les grandes distances relatives; pour la partie de la distribution qui dépend des particules "en train d'interagir", elle peut être obtenue en écrivant qu'elle suit adiabatiquement la transformée libre. Il se trouve qu'effectivement, une approche systématique permet d'écrire une équation de transport pour la transformée libre, et qu'une étude soignée (mais techniquement un peu lourde) conduit à retrouver, dans le cas particulier de l'équilibre, la fameuse formule de Beth Uhlenbeck pour la seconde correction du viriel. Au prix de deux ans environ de travail, le résultat recherché a donc été obtenu. Mais la méthode est suffisamment lourde, mettant en jeu des calculs complexes (même à l'équilibre thermique), pour qu'on puisse se poser des question sur son utilisation dans les conditions générales. Surtout, l'absence de lien précis avec les équations de la hiérarchie BBGYK est peu satisfaisante. Il reste cependant que le formalisme doit contenir des éléments sains puisque, au bout du calcul dans le cas de l'équilibre, des simplifications se produisent et tous les "bons" résultats sont obtenus à partir d'ingrédients qui en sont réellement indépendants.

A long terme, le but serait d'arriver à une aussi bonne compréhension de l'hydrodynamique d'un gaz superfluide que de celle d'un gaz non dégénéré, ce qui implique de comprendre microscopiquement le processus qui permet l'apparition de nouvelles variables lentes à la température critique (modèle à deux fluides). C'est à ce prix qu'on pourra dire qu'il existe une véritable théorie des gaz quantiques superfluides. Pour le moment on se contente de postuler que, dès qu'un condensat apparaît, des écoulements sans viscosité deviennent possibles; en d'autre termes on fait le postulat qu'il existe un lien absolu entre superfluidité et condensation de Bose Einstein. Mieux comprendre cette question est un projet que je ne quitte pas de vue, mais avant de l'aborder il m'a semblé utile de revenir à un problème en principe moins difficile, celui des propriétés des gaz dilués dégénérés à l'équilibre.

4.2 Méthode des opérateurs d'Ursell

C'est dans ce but que, avec Peter Grüter, étudiant en thèse, je me suis penché sur une extension de la méthode des fonctions d'Ursell, chapitre bien connu des livres de mécanique statistique. Le but était de trouver une généralisation permettant de l'appliquer au cas de gaz partiellement, voire fortement, dégénérés. L'approche théorique que nous avons mise au point est décrite ci dessous. Au début, j'ai pensé que notre méthode était complètement originale, mais au bout de quelques mois je me suis rendu compte que Lee et Yang avaient autrefois développé des idées semblables ("binary collision approximation"), et leur avaient même consacré plusieurs articles dans Physical Review. Ils n'utilisaient toutefois pas tout à fait le même formalisme, en particulier pas systématiquement les sommations d'opérateurs, de sorte que leurs calculs sont en général plus compliqués (sommations diagrammatiques), parfois moins explicites, en tous cas différents. Surtout, il ne couvrent pas tous les cas que nous avons traités ensuite, notamment notre étude des fonctions de corrélation binaire et du rôle de la longueur d'Ursell.

4.2.1 Idée générale, formule BUG

Les avantages de travailler en termes d'opérateurs d'Ursell plutôt que en théorie des perturbations du potentiel lui même sont assez nombreux. Par exemple, on

n'a jamais à craindre de divergence pour des potentiels infinis (coeurs durs par exemple), alors qu'il faut en théorie des perturbations recourir aux resommations de Galitskii ou de Belayev pour éliminer ces divergences; ici, d'emblée, toutes les expressions restent finies. La raison en est que l'objet élémentaire qui traduit l'effet des interactions dans ce cadre est le second opérateur d'Ursell U_2 , qui exprime une sorte d'équilibre boltzmannien local, et qui tout naturellement reste fini. De plus, les cycles d'échange apparaissent très directement, et on garde trace des particules qui sont concernées, alors que c'est évidemment impossible dès qu'on utilise la seconde quantification; par cet aspect et par d'autres, la méthode des opérateurs d'Ursell est en fait un peu le pendant analytique des méthodes numériques de Monte Carlo quantique. Enfin, il se trouve la sommation sur la longueur des cycles est techniquement sans difficulté. Ainsi, beaucoup d'effets physiques sont contenus dans des formules de structure assez simple, comme la formule de Beth Uhlenbeck Généralisée (formule BUG); cette dernière devait, pour des fermions par exemple, permettre d'aller jusqu'a des températures de l'ordre de la température de Fermi divisés par 5 ou 10, alors que la formule BU ordinaire cesse d'être valable à environ 10 fois la température de Fermi. Les résultats sont obtenus par des calculs qui restent assez légers, sans théorie diagrammatique ou resommations subtiles. Notre approche permet également de bien voir quels sont les "canaux de condensation" qui peuvent conduire le gaz à une condensation de particules pour des bosons, de paires pour des fermions. Le phénomène d'appariement BCS apparaît ainsi assez simplement, sans avoir besoin de trouver une fonction d'onde variationnelle dont la forme n'est pas évidente (il a fallu longtemps à Bardeen, Cooper et Schrieffer pour la trouver!).

4.2.2 Longueur d'Ursell

L'approche des opérateurs d'Ursell donne un rôle privilégié à une longueur qui ne coincide pas nécessairement avec la longueur de diffusion, qui habituellement caractérise les propriétés des collisions binaires à basse énergie; nous avons appelée cette nouvelle quantité la longueur d'Ursell. En fait, pour des bosons, nous avons pu montrer que la distinction reste académique, car les deux longueurs restent en fait très proches dans les cas intéressants. En revanche, pour des fermions, il en va tout autrement. Il peut y même avoir inversion de signe: dans un gaz où la sphère de Fermi est bien formée, par exemple, des interactions réelles en coeurs durs peuvent résulter dans des interactions effectives de caractère attractif! Comme cette attraction effective concerne surtout les fermions qui, à la surface de la sphère de Fermi, ont des impulsions opposées, nous les avons liés à une sorte de précurseur du phénomène de condensation de paires BCS. Cependant, le fait que nous n'ayons pas vu appaitre dans ce formalisme (en tout cas pour le moment) l'expression exponentielle bien connue de la température de condensation BCS jette toutefois un doute sur cette interprétation; aussi ne l'avons nous avancée qu'avec quelques précautions (Roger Balian, en particulier, est sceptique concernant la justesse cette conjecture). Même s'ils ne permettent effectivement pas d'approcher cette température de transition, nous résultats couvrent néanmoins tout un domaine de température où d'autres formalismes ne sont pas valables, et prédisent des interactions binaires effectives inédites entre particules.

4.2.3 Opérateurs densité réduits

Un autre avantage du formalisme des opérateurs d'Ursell est que, à chaque stade des calculs, les opérateurs réduits à une ou deux particules sont obtenus dans un processus à peu près automatique. C'est, bien sûr, surtout intéressant dans le cas des opérateurs à deux particules, qui doivent rendre compte des corrélations très fortes à courte distance créées par la répulsion entre atomes, chose dont toute théorie basée sur l'utilisation d'une forme quelconque de champ moyen est incapable (sauf avec des ajustements ultérieurs "à la main"). De fait, nous avons considéré un peu les coeurs durs comme l'archétype d'interaction qu'il convenait de traiter correctement, et nous avons montré en détail que nos formules possédaient effectivement dans ce cas toutes les propriétés physiquement requises: elles contiennent donc à la fois les corrélations statistiques liées à l'indiscernabilité des particules (trou ou bosse d'échange selon qu'il s'agit de fermions ou de bosons), ainsi que les corrélations dynamiques qui peuvent devenir dominantes lorsque la distance relative entre particules devient de l'ordre de leur taille. A notre connaissance il n'existe pas de formule semblable (qui croise les deux effets de façon générale) dans la littérature..

4.2.4 Changements de phase

Les changements de phase de nature purement statistique comme la transition superfluide sont bien sûr un sujet particulièrement attirant; mais, paradoxalement, il n'est pas exagéré de dire que la physique actuelle ne contient pas de théorie détaillée de la transition superfluide, même dans un gaz. Certes, à suffisamment basse température, la théorie de Bogolubov devient applicable, mais près du point de transition ce n'est pas le cas. Nous n'avons pas, pour le moment, réussi à donner une approche cohérente de la condensation de Bose Einstein dans un gaz, question qui semble techniquement très délicate. Dans le formalisme des opérateurs d'Ursell, je pense que l'origine des difficultés est maintenant bien identifiée, et le travail pour aller plus loin est en cours. Ce qui est clair, comme déjà mentionné plus haut, est que le formalisme permet de traiter sur le même pied toute une série de processus de condensation, de paires, de triplets, ou d'objets plus grands ou plus complexes, ce qui est déjà un résultat.

bosons Pour nous guider, et pour obtenir plus rapidement des résultats précis, nous avons fait appel à des calculs numériques, par la méthode de Monte Carlo quantique. Le premier problème abordé est tout simplement d'évaluer l'effet

sur la température critique (à densité constante) de l'introduction d'interactions répulsives (coeurs durs). En fait, beaucoup de physiciens pensent encore que la question est triviale, et qu'il est évident que la température doit être abaissée; au delà de la croyance générale selon laquelle des interactions répulsives ne peuvent que tendre à masquer les effets quantiques, ce qui est d'ailleurs souvent vrai, l'argument principal résulte probablement d'une interpolation des résultats connus pour deux densités qui sont très différentes, puisqu'on passe en fait du gaz parfait jusqu'au liquide dense. Dans des ouvrages bien connus, on prédit également un abaissement de température par exemple basés à partir de la méthode Hartree Fock (augmentation de la masse effective conduisant à un abaissement de la température critique). Malgré ces indications, et collaboration avec l'équipe de David Ceperley à Urbana Champaign, Peter Grüter et moi même avons considéré que la guestion méritait une étude numérique précise de ce problème. En fait les résultats, préliminaires, des calculs, montrent que c'est juste l'opposé que se produit: dans un gaz dilué, les interactions répulsives ont pour effet d'augmenter la température critique! Il se produit ainsi un changement de régime fort intéressant et tout à fait inattendu. Nous attribuons physiquement l'effet d'augmentation à une uniformisation de la densité du système, où les interactions réduisent les fluctuations de densité pathologiques du gaz parfait, ce qui rend ensuite plus aisé le développement d'un très grand cycle d'échange. Les résultats de cette étude devraient être publiés en 1997.

fermions Les calculs numériques pour les fermions sont rendus très difficiles par les oscillations des fonctions d'onde, qui produisent constamment des contributions s'annulant mutuellement et rendent les calculs très lourds, en fait souvent impossibles. Nous serions très désireux de voir numériquement les effets précurseurs de la divergence de la longueur d'Ursell, mais la façon de le faire n'est pas évidente. Mais on peut espérer que les efforts théoriques considérables sur les fermions résultant de la découverte des supraconducteurs à haute température permettent cependant des progrès dans ce domaine.

5 Acoustique

Un intérêt personnel vif pour la musique est peut être à l'origine de cette activité en acoustique. Mais en fait, il y a d'autres raisons derrière ce choix: s'intéresser à un domaine de physique légère est une façon commode de garder une activité expérimentale sans avoir à vaincre les difficultés imposées par les expériences bien plus lourdes de basses températures. Le domaine de recherches est en fait parfait pour la formation au travail de laboratoire de jeunes étudiants, qui en quelques semaines peuvent maîtriser les divers aspects du montage et se sentir indépendants. De plus, il est intéressant de participer à des activités de "transfert", que ce soit intellectuel (adaptation à un autre domaine des grandes idées

de la physique du chaos, par exemple), ou industriel (amélioration des instruments de musique). Une application de type médicale de ces études est même envisagée, mais il y a aussi des applications purement musicales comme celles qui sont actuellement en cours de développement à l'IRCAM; au passage, je mentionne mon appartenance au Conseil Scientifique de cet organisme, ce qui me facilite beaucoup l'intégration dans le milieu des scientifiques de la musique (le nom de Jean Claude Risset, également chercheur au CNRS, vient immédiatement à l'esprit).

5.1 Bifurcation et chaos acoustique

Dans les années 80, bénéficiant de la proximité du groupe de Libchaber et Maurer à l'ENS, il était naturel de m'intéresser au transfert vers l'acoustique musicale des outils conceptuels et techniques mis au point par les physiciens dans le cadre de l'hydrodynamique en général. En fait, on peut voir un instrument de musique à vent comme un système hydrodynamique complexe produisant, par auto-oscillation, des ondes dans le fluide dans lequel in baigne (l'air). Il m'a fallu un certain temps avant d'avoir l'impression de maitriser la théorie des instruments à vent, ou dominent des noms comme A. Benade (hélas maintenant décédé), de Schumacher, ou les physiciens du laboratoire d'acoustique du Mans. Cette tâche accomplie, je me suis aperçu que l'on pouvait simplifier grandement les modèles habituellement utilisés, mis au point plutôt dans un esprit de modélisation des détails que de compréhension physique générale. Dans certains cas, il est ainsi apparu que les équations de fonctionnement d'une clarinette pouvaient même se ramener à une simple itération non linéaire, à la Pasta Ulam. Il en découlait la prédiction que le scénario de Feigenbaum, de doublement de période successifs menant au chaos, devait s'appliquer. En d'autres termes, il devrait être possible avec un tuyau acoustique court d'entendre des sons descendant par sauts successifs d'octave en octave, puis d'atteindre le chaos acoustique! L'idée était alors tentante de monter une expérience pour le vérifier en détail. Ayant proposé le sujet à l'IRCAM, j'ai pu recruter un étudiant, Christian Maganza, qui a travaillé dans le cadre d'une co-direction effective entre René Caussé et moi même.

Heureusement, l'idée s'est avérée juste, et le montage réalisé a permis d'observer presque tout l'ensemble des prévisions théoriques, provoquant au passage une certaine surprise parfois de la part des acousticiens peu habitués au propriétés physiques introduites par les non linéarités; la plus inattendue était sans doute celle de prédire des oscillations sur des fréquences qui ne correspondent à aucune résonance de la cavité acoustique. Mais, depuis, cette expérience a été répétée et variée dans des laboratoires divers (il y a des spécialistes du chaos acoustique en Allemagne, aux USA et au Japon) et ces idées sont devenues plus classiques en acoustique musicale.

5.2 Localisation d'Anderson

Une autre application naturelle d'idées plus connues en physique théorique qu'en acoustique était la localisation d'Anderson. Piloté sur le plan théorique dans ce domaine par Bernard Souillard, je me suis donc lancé dans son calcul et son observation expérimentale en acoustique, cette fois en collaboration avec le laboratoire du Mans (J. Kergomard, C. Depollier). Il s'agissait donc d'étudier la propagation des ondes acoustiques dans des réseaux plus ou moins réguliers, de mesurer la longueur de localisation par des mesures d'amortissement des ondes, et d'effectuer des simulations numériques chaque fois que c'etait possible pour comparer théorie et expérience. Au cours de plusieurs thèses faites dans leur université, des réseaux acoustiques variés ont ainsi été construits de toute une série d'expériences menées avec succès. Elles ont trouvé des applications en acoustique musicale (comparaison entre la longueur de localisation et la taille de l'instrument) ou autres (conception de silencieux pour les voitures).

5.3 Impédance acoustique, rôle, mesure, calculs.

L'impédance acoustique d'un instrument à vent subit des variations particulières (résonnantes) aux fréquences qui sont susceptibles d'osciller, comme tout physicien qui comprend ce qu'est un circuit auto-oscillant prédirait facilement. Avec N. Grand et J. Gilbert, nous nous sommes cependant intéressés à aller un peu plus loin dans la compréhension du phénomène, et nous avons effectué une étude théorique des régimes d'oscillations des équations non linéaires du mouvement, en particulier près du seuil. Notre théorie, en cours de publication, permet de prédire les positions des seuils d'oscillation et les fréquences correspondantes, ainsi que les effets d'entraînement de fréquence, par exemple par un autre pic d'impédance. Elle donne également des informations sur la nature de la bifurcation associée à l'apparition des oscillations; curieusement, il semble que le cas des "bifurcations inverses" se présente fréquemment, alors qu'on aurait pu imaginer que les bifurcations directes seraient plus ou moins la règle. Nous comprenons ainsi relativement bien le rôle physique de la courbe qui donne les variations de l'impédance du résonateur en fonction de la fréquence.

En parallèle, nous nous sommes intéressés à la mesure de cette même quantité, en module et en phase. Des impédancemètres divers ont en fait été réalisés dans divers laboratoires (Le Mans, l'IRCAM par exemple), mais il se trouve qu'aucun d'eux n'a pris la peine de mettre au point un appareillage suffisamment simple pour sortir du cadre de la recherche et être utilisé par des non-spécialistes, et surtout hors d'un environnement protégé acoustiquement (c'est à dire hors d'une chambre sourde). Ce travail a été fait en deux étapes distinctes, la première étant une partie de la thèse de Vincent Gibiat. Plutôt que de recourir comme on le fait habituellement à l'introduction en série d'une impédance acoustique forte, qui réduit beaucoup le niveau acoustique et rend aussitôt nécessaire l'utilisation d'une

chambre sourde, l'idée principale a été de garder un large conduit acoustique; les propriétés sont initialement mesurées de façon générale (sans faire d'hypothèse sur sa géométrie ou sur l'influence des modes locaux que peuvent par exemple introduire les microphones de mesure) avec plusieurs impédances de référence. La méthode porte le nom de TMTC (two microphones, three calibrations) et peut être vue comme une double pesée généralisée. Dans un cadre tout différent, la mesure des propriétés acoustiques des matériaux de construction, elle a été reprise et améliorée par J.F. Allard au laboratoire d'acoustique du Mans, et grâce à lui les lettres TMTC apparaissent maintenant dans certains ouvrages d'acoustique appliquée.

Mais, du point de vue de l'acoustique instrumentale, où il s'agit de mesurer des résonances étroites (ce n'est pas le cas pour les matériaux de construction!), la méthode pose des problèmes de stabilité thermique des calibrations qui la rendent quelque peu malcommode à utiliser, en tous cas hors d'un laboratoire. Aussi nous fallait il mettre au point un autre dispositif. Après réflexion, je me suis décidé pour un principe un peu nouveau de mesure, basé sur l'excitation d'une membrane élastique (téflon, ou même du Scotch!) par un équipage de haut parleur, et j'en ai lancé la réalisation à l'occasion de plusieurs stages de normaliens au laboratoire. Le résultat est que nous disposons maintenant d'un impédancemètre commode et rapide, permettant l'acquisition d'une courbe d'impédance en environ une minute (au lieu d'une demi heure environ à l'IRCAM) dans un environnement sonore normal. Cet instrument, dont un exemplaire reste au laboratoire et un autre est en cours de tests chez un réparateur d'instruments, est en cours d'amélioration.

En parallèle, un programme de calculs numérique des impédances acoustiques, dans une approximation quasi unidimensionnelle, a été mis au point. L'essentiel du mérite de ce travail revient à un normalien, Paul Zinn Justin, mais dans ce cas également un relais entre plusieurs stagiaires a été organisé. Nous sommes maintenant à un stade intéressant où des comparaisons systématiques entre théorie et expérience sont possibles; j'en parlerai plus bas.

5.4 Diverses réalisation pratiques

Un peu pour mémoire, car il s'agit là plus d'un travail technique que scientifique, mentionnons divers travaux, la plupart du temps faite dans le cadre de l'IRCAM, et parfois soutenus pas la Direction de la Musique et de la Danse du Ministère de la Culture. Un des sujets en est par exemple la mise au point d'un système acoustique permettant l'accord en temps réel (pendant le jeu) de divers types de clarinettes; les quarts de ton en particulier présentent un intérêt tout particulier en musique contemporaine. Un couplage avec les logiciels de suivi de partition est envisagé, et nous espérons pour cela le soutien de la division recherche de la Direction de la Musique. Le prolongement d'instruments existant est aussi en cours: "clarinette double basse" et "bassetcello". Il est espéré que ces nouveaux instruments soient utilisés par les compositeurs pour la création de nouvelles

oeuvres, mais il est encore trop tôt pour savoir si ce sera le cas. Des présentations sont prévues à l'IRCAM.

6 Fondements de la mécanique quantique

Au cours des années, je suis devenu "spécialiste" d'un domaine qui n'a pourtant jamais véritablement été mon sujet de recherche principal, les fondements de la mécanique quantique. Malgré mon intérêt très réel pour le sujet, je dois avouer d'emblée que je n'ai jamais décidé d'acquérir cette réputation. C'est plutôt un concours de circonstances qui a créé une situation de fait, un peu d'ailleurs comme ma "spécialisation" dans les publications, l'information scientifique, et les bibliothèques.

6.1 Le déterminisme, la localité

A nouveau, le point de départ a probablement été le livre rédigé avec Claude Cohen-Tannoudji et Bernard Diu. Certes, pour finir, nous avons décidé d'éviter soigneusement d'aborder les problèmes liés aux fondements dans notre ouvrage. Mais il n'empêche que nous avons eu à cette occasion des discussions nombreuses, par exemple sur le sens à donner au mot "complémentarité" (que pour finir nous avons presque systématiquement évité!), ou sur les inégalités de Bell, avec lesquelles j'ai eu à cette occasion un premier contact. Puis est venu le projet de thèse de Alain Aspect, qui proposait de faire des expériences (maintenant bien connues), à une époque où ce genre de physique avait en France assez mauvaise presse. L'amitié aidant, nous nous sommes beaucoup appuyés l'un sur l'autre pour d'abord comprendre, puis promouvoir ce domaine, alors qu'il était plutôt considéré comme mal famé. Il a fallu montrer aux collègues qu'en fait il contenait en fait des travaux réellement intéressants et novateurs, ce qui a occasionné pour moi de nombreux séminaires, parfois un peu agités. Je me souviens même de l'un d'entre eux, donné dans un laboratoire à l'X, ou la passion était telle que j'ai dès le début été empêché d'exposer ce que j'avais préparé! Alain et moi même nous sommes avons beaucoup interagi scientifiquement à cette époque, et avons clarifié nos idées lors de très nombreuses discussions.

Puis un renouveau significatif de l'intérêt pour le sujet s'est manifesté dans la communauté des physiciens, et comme peu de gens y avaient réellement consacré du temps, un "spécialiste" comme moi était très sollicité. Je n'ai jamais compté les exposés que j'ai fait en Europe et aux USA sur le sujet, mais il y en a eu des dizaines et des dizaines. De plus, hors du milieu universitaire, un grand nombre de revues d'introduction au domaine m'ont été demandées, le public allant de philosophes à des médecins ou, quelquefois, des journalistes. En revanche, je n'ai publié qu'un seul article de recherche sur le sujet (je ne compte pas un article général à "La Recherche", ainsi que toute une petite constellation de

textes généraux dans des revues non scientifiques). J'y proposais une méthode permettant de créer par une opération de mesure les "états GHZ", de corrélations quantique maximale, qui sont devenus fameux dans le domaine des fondements à cause de leurs propriétés quantiques encore plus spectaculaires que celles des "états de Bell"; or il n'est pas impossible que des schémas de ce type soient mis en oeuvre dans un avenir pas trop lointain dans le groupe de Zeilinger, dans une version un peu différente et plus réaliste basée sur l'utilisation de la conversion paramétrique à deux photons.

Ce sont probablement les échanges de lettres avec Tony Leggett et, peut être, David Mermin, qui sont à l'origine de ma nomination comme Editeur de Physical Review Letters dans le domaine de la mécanique quantique fondamentale . J'avoue que, de toutes les tâches éditoriales que j'ai jamais eues, celle là est la plus délicate et la plus difficile à cause de la nature même de ce type de recherche, ainsi que de ses connexions diverses historiques ou philosophiques. Comme Physical Review ne traite plus du sujet (par décision éditoriale), je me trouve être le seul éditeur de l'APS qui couvre cette spécialité. Ainsi cette activité me donne un point de vue très panoramique sur l'ensemble des activités dans le domaine; je vois les manuscrits qui sont écrits sur le sujet pratiquement dans le monde entier, ce qui est assurément intéressant. Etant donné l'ampleur considérable du travail requis, je ne pense cependant pas aller au delà du mandat minimal de trois ans!

6.2 Symétries

Dans la même veine, on peut mettre l'étude des symétries fondamentales en mécanique quantique. Au cours de la rédaction de l'ouvrage publié chez Hermann, le problème des symétries avait déjà été très largement discuté entre coauteurs et fait l'objet, de notre part, d'un certain travail. Au niveau de l'ouvrage, il s'agissait surtout des translations et des rotations, mais j'ai également fait un effort tout particulier pour l'invariance de jauge. Le complément en question discute en effet l'invariance de jauge de l'équation de Schrödinger et son lien avec l'invariance classique bien plus en profondeur qu'aucun autre ouvrage, du moins à ma connaissance (la plupart des livres de référence se contentent en effet de montrer que, moyennant le changement habituel de la fonction d'onde, l'équation du mouvement garde la même forme générale). Nous avons ajouté beaucoup de chair à ce schéma squelettique, surtout par une discussion des observables physiques ou non-physiques et de leurs propriété de changement de jauge. C'est à mon avis un des points forts originaux de notre ouvrage commun.

Ce premier contact avec les symétries, conjugué avec l'écoute de deux remarquables séminaires de J.M. Levy Leblond, m'a encouragé à continuer dans cette voie. J'ai ainsi proposé de prendre la partie "symétries" du cours de mécanique quantique du DEA de physique atomique et statistique. Au cours des années j'ai accumulé le matériau permettant la rédaction de deux polycopiés sur les groupes continus et les algèbres de Lie en mécanique quantique, vus du point

de vue fondamental (par contraste avec la classification des spectres en physique moléculaire ou du solide, qui sont intéressants mais plus techniques). En particulier j'ai développé un cours que je crois original sur la façon dont apparaissent en mécanique quantique, en termes de générateurs infinitésimaux, la masse et le spin des systémes physiques élémentaires, soit en relativité de Galilée (représentations projectives), soit einsteinienne; les idées essentielles sont bien sûr prises dans l'article célèbre de Wigner sur le sujet. Ces polycopiés m'ont demandé des mois de travail à temps complet mais, vingt ans après, j'ai la satisfaction de voir qu'il sont toujours utilisés régulièrement par les étudiants des deux DEA qui se déroulent rue Lhomond; chaque année ils demandent le retirage d'un certain nombre d'exemplaires qu'ils achètent à la bibliothèque. Il a d'ailleurs été question de le transformer en livre à plusieurs reprises, mais j'ai reculé devant le travail mis en jeu.

7 Projets

Mes projets sont, comme on pouvait s'y attendre, dans le prolongement des activités de recherche actuelles puisque plusieurs d'entre elles ont précisément été conçues comme une étape. Mais l'évolution rapide des expériences dans le domaine du refroidissement évaporatif des alcalins peut faire apparaître des résultats qui modifient cette activité d'une façon imprévisible.

7.1 Condensation de Bose Einstein dans les gaz

Mon projet principal est l'étude théorique détaillée de la condensation de Bose Einstein dans un gaz dilué. Malgré l'importance conceptuelle du phénomène, et comme je l'ai déjà mentionné, sa théorie détaillée reste à faire en général (par exemple, la méthode de Bogolubov est une méthode de basse température, puisqu'on suppose que la population du niveau fondamental est largement dominante). Or, conceptuellement, c'est un phénomène physique à la fois simple et fondamental, un peu l'archétype de toute transition de phase. On sait d'ailleurs à quel point les discussions de Eintein et de Ehrenfest sur le sujet (dans le cadre du gaz parfait) ont joué un rôle crucial dans la compréhension du lien entre limite thermodynamique d'une part et apparition de singularités dans l'expression mathématique du grand potentiel d'autre part. Les théories de type champ moyen (par exemple l'approximation de Popov que Stringari et Pitaevskii utilisent dans un article publié tout récemment à PRL) sont évidemment l'approche la plus naturelle; mais, dans un gaz dilué, on ne s'attend pas à ce qu'une théorie de type soit particulièrement bien adaptée, surtout au voisinage de la transition, principalement à cause du caractère transitoire des collisions entre atomes.

En fait, le lien précis entre condensation de Bose Einstein et superfluidité n'est pas clair; on voit parfois même écrit que, dans un gaz, il n'est pas exclu que les deux transitions soient distinctes. Une autre question qui se pose à mon avis, bien qu'elle soit parfois considérée comme "hérétique", est de savoir si la propriété d'accumulation d'une fraction finie des atomes dans un seul état quantique (état à une particule) est un phénomène qui subsiste réellement en présence d'interactions. C'est un peu un postulat, dans l'esprit de la voie tracée par le fameux article de Penrose et Onsager, qui ont introduit la notion d' "Ordre Non Diagonal à Longue Distance" (ODLRO). Mais après tout rien n'exclut des situations plus compliquées, comme des populations des niveaux les plus bas qui divergent à la limite thermodynamique comme une puissance du volume plus faible que 1. De fait, dans le gaz parfait, c'est bien ce qui se produit pour le premier niveau excité, dont la population diverge comme le volume a la puissance 2/3! Qu'en comportement semblable se produise pour un gaz non parfait dès le niveau fondamental est précisément ce que tendent à indiquer mes calculs, dans leur état inachevé actuel. De facon générale, l'espoir est de comprendre l'origine physique le la "rigidité" du condensat, qui est au fond une sorte de cristal à la fois dans l'espace des positions et des moments, dont la structure est telle qu'il lui est interdit de donner lieu à toute dissipation (il se déforme de façon uniquement adiabatique sous l'effet des contraintes externes, un comme un solide monocristallin déformé sans rupture).

Le programme est ambitieux, peut être trop. A plusieurs reprises, j'ai cru l'avoir presque rempli, à partir de la méthodes des opérateurs d'Ursell qui a précisément été mise en oeuvre dans ce but. J'en suis pour le moment à bien comprendre l'origine des difficultés et j'espère ainsi être capable de les surmonter. Mais il est également possible que ce programme me conduise à un échec, ou qu'un autre traite le problème plus rapidement et mieux que moi. Mon impression est cependant que l'enjeu en vaut la peine et que le risque doit être pris, d'autant plus que les simulation numériques récentes déjà mentionnées plus haut ont donné des résultats inattendus et intéressants.

La mise en oeuvre des méthodes de Monte Carlo quantique, en collaboration avec Werner Krauth et Bill Mullin (UMass), avec qui je travaille depuis longtemps, est un de mes projets actuels. Nous en avons beaucoup parlé récemment, et Werner a bien voulu communiquer l'intégralité de son code à Bill, tout en nous en expliquant l'idée générale. Il faut dire que le programme est unique en ce sens qu'il est optimisé pour des gaz dilués, contrairement à ceux qui existaient auparavant qui étaient conçus pour les systémes denses. Ainsi il devient possible de faire des calculs sur des systémes contenant 10.000 particules au lieu de quelques dizaines! Un facteur favorable est la similarité entre les méthodes de Monte Carlo quantiques et bien des aspects de la méthode des opérateurs d'Ursell, en particulier dans la mise en évidence du rôle des longs cycles d'échange. Cette circonstance favorable devrait me permettre de contribuer à l'orientation générale de ces recherches, un peu comme dans le cadre de certaines collaborations passées avec C. Lhuillier ou de celles sur les diagrammes d'équilibre liquide vapeur de l'hélium polarisé. Au delà de la condensation de Bose Einstein dans un gaz

dilué, de l'étude de l'influence du potentiel (partie répulsive et attractive) et des corrélations entre particules, il serait intéressant d'étudier la possibilité de mettre en évidence numériquement la divergence de la longueur d'Ursell, mentionnée plus haut.

Enfin, l'étude analytique des divers canaux de condensation (paires, triplets, objets plus complexes), rendue possible par nos méthodes, et abordée dans la thèse de Peter Grüter, me semble un sujet particulièrement intéressant à développer. Je voudrais donc y revenir dès que possible. Un espoir ténu est qu'un lien puisse exister avec la théorie des supraconducteurs à haute température.

7.2 Hydrodynamique superfluide, brisure spontanée de symétrie

Les phénomènes hors d'équilibre, qui sont en fait ceux par lesquels notre groupe est venu à ce type de sujet, présentent un certain nombre de questions qui restent ouvertes et relativement peu étudiées, malgré leur importance. A mon sens, comprendre véritablement la superfluidité impliquerait être capable de faire, en dessous de la température critique, la même progression logique que pour un fluide classique, depuis le microscopique jusqu'aux équations de Navier Stokes. En l'occurrence, il faudrait partir d'une équation de transport (encore inconnue) et, par la séparation des variables lentes et rapides, démontrer la présence d'un seuil en températures en dessous duquel le nombre de ces variables lentes augmente. Cela conduirait à établir, par exemple, la validité du modèle à deux fluides (ou plus), au lieu d'en faire une hypothèse féconde certes, mais sans fondement microscopique précis. Le seul article que je connaisse qui aille dans cette direction est le travail ancien de Kirkpatrick et Dorfmann, mais à ma connaissance ce programme n'a pas été véritablement rempli. Je me rends probablement maintenant mieux compte de sa difficulté qu'il v a quelques années, et la prolongation de l'équation LL vers les systèmes condensés, un instant envisagée, me semble un but peut être plus lointain. Je le mentionne toutefois, car s'il se rapprochait grâce à la mise au point des études du paragraphe précédent, je ne manquerais pas d'y consacrer mes efforts.

Un autre enjeu est une meilleure compréhension de la relation entre superfluidité et brisure spontanée de symétrie. Anderson a introduit l'idée que la transition superfluide s'apparente à la transition ferromagnétique, la brisure de symétrie n'étant pas celle l'invariance selon le groupe des rotations, mais celle de la loi de conservation du nombre de particules; ainsi apparaît une "fonction d'onde macroscopique", aussi bien dans la superfluidité de l'hélium quatre que la transition BCS des supraconducteurs. Cette idée est considérée comme l'explication physique fondamentale de la superfluidité par bien des théoriciens de la matière condensée. Or les physiciens atomistes, ainsi que les numériciens qui travaillent sur la transition superfluide, ont quelques difficultés à donner à cette idée le statut

d'explication physique, ne voyant pas très bien pourquoi brsuquement les interactions commenceraient à violer cette loi de conservation fondamentale, encore moins quel processus microscopique peut lui correspondre. Ils préfèrent y voir un artifice de calcul, peut être commode dans certains cas, mais pas fondamental. J'ai d'ailleurs publié récemment un petit article au bulletin de l'EPS a ce sujet, qui résume la controverse conceptuelle qui oppose deux écoles de pensée. Or je pense que l'approche des opérateurs d'Ursell devrait apporter une contribution utile à ce débat, et je me propose donc de la pousser en ce sens, un peu dans l'esprit des travaux récents de Javanainen et Dalibard sur ce sujet.

7.3 Acoustique

Comme par le passé, l'acoustique devrait être pour moi une activité occasionnelle, se déroulant un peu au rythme des stages ou des candidats à une thèse à l'IRCAM. Mais je tiens à cette activité, parfois très appliquée, dont certains aspects me semblent prometteurs, de sorte que tant que cela sera possible je ne compte pas l'abandonner.

7.3.1 Conception de cavités acoustiques assistée par ordinateur

Le programme de Paul Zinn Justin fournit les premiers éléments d'un vieux rêve: la conception assistée par ordinateurs d'instrument de musique à vent. Si ces derniers sont effectivement constamment modifiés par les fabricants, c'est par des méthodes entièrement empiriques, faites de tests de petites modifications successives, qui interdisent évidemment les "grands sauts" vers des géométries très différentes. Personne ne sait par exemple si la disposition, très irrégulière, des trous sur une clarinette ou un hautbois résulte d'un hasard historique ou d'une nécessité (intuitivement, j'opterais personnellement pour la première pos-Tester des dispositions très différentes, qui demandent de prendre en considération un nombre élevé de dispositions géométriques différentes, est évidemment exclu si, pour chaque essai, il faut fabriquer un nouvel instrument, ou le modifier, par le découpage et la perce du bois. Maintenant que les différents outils techniques (programme, impédancemètre) sont rassemblés pour une autre approche, je voudrais aborder la méthode de conception assistée d'instruments par ordinateur. Sa mise en oeuvre devrait conduire à la fabrication et l'essai d'un instrument. En cas de succès, même modéré, ce serait une petite révolution dans le domaine de la facture instrumentale.

De façon plus générale, on aborde ainsi le "problème inverse" dont se sont préoccupés récemment certains mathématiciens ("peut on entendre la forme d'un tambour?"), mais vu du point de vue du circuit sélectif en fréquences qui se trouve dans une boucle de réaction; je pense arriver à intéresser des stagiaires mathématiciens à cette étude.

7.3.2 Applications médicales, réalisations pratiques

Un application de l'impédancemètre acoustique qui fonctionne au laboratoire serait le test non invasif de la trachée ou des conduits auditifs. Des contacts avec un médecin ont été pris, mais aucun essai n'a encore été fait. Au sein du LKB, ce sujet pourrait se regrouper de façon harmonieuse avec les études sur les applications médicales de l'hélium polarisé.

Conclusion

Les idées de prolongement des travaux en cours ne manquent pas, le problème est de les réaliser! Heureusement pour moi, j'ai souvent trouvé des collègues et amis qui avaient des qualités complémentaires des miennes pour faire avancer le travail, car je ne prétends pas que je pourrais pas seul mener un programme de cette nature. S'il s'avère que le couvrir dans sa totalité est trop ambitieux, je serais déjà satisfait s'il devait au moins partiellement être rempli.