

Fluides et superfluides de fermions ultrafroids

Directeurs de thèse : Philippe Sindzingre & Hadrien Kurkjian¹

¹Laboratoire de Physique Théorique de la Matière Condensée, Sorbonne Université, CNRS, Paris

(Thèse théorique sur les gaz quantiques et la matière condensée)

Contact

Hadrien Kurkjian
page perso : <https://www.lptmc.jussieu.fr/users/kurkjian>
courriel : hadrien.kurkjian@cnrs.fr
tél : 06 77 94 83 04

Philippe Sindzingre
<https://www.lptmc.jussieu.fr/users/phsi>
sindzingre@lptmc.jussieu.fr

Résumé

À basse température, la matière entre dans un régime où ses propriétés telles que son diagramme de phase, ses modes d'excitations ou ses processus de relaxation sont régis par le comportement quantique des particules, notamment par leur statistique, bosonique ou fermionique. Ceci donne lieu à des phénomènes radicalement différents de la matière classique, comme la supraconductivité ou la condensation de Bose-Einstein. Dans les gaz ou les liquides constitués de particules fermioniques (tels que des atomes, des électrons ou des nucléons), on peut décrire les phénomènes de transport dans la phase normale à l'aide la théorie de Landau, qui prédit notamment que des ondes sonores se propagent en l'absence de collisions, chose impossible d'un gaz classique. Pour la phase superfluide ou supraconductrice, dans laquelle les fermions forment un condensat de paires, on ne dispose pas d'équivalent de la théorie de Landau pour décrire les phénomènes de transport, pourtant plus riches que dans la phase normale. L'objectif de la thèse sera donc de développer une telle approche mésoscopique de la dynamique d'un superfluide de fermions, pour pallier la lourdeur des approches entièrement microscopiques. Nous nous servirons de notre formalisme pour décrire les modes d'excitation spécifiques à la phase superfluide, tels que le second son ou le mode d'amplitude/"Higgs", tout au long de la transition du régime faiblement à fortement collisionnel. Nos résultats seront directement comparables à des observations expérimentales faites sur des gaz d'atomes froids fermioniques dans des pièges laser. Ces expériences sur les gaz quantiques offrent des conditions privilégiées en termes de maîtrise expérimentale et de simplicité conceptuelle et sont donc un atout considérable pour explorer les propriétés fondamentales de la matière quantique.

Contexte scientifique

Les gaz, liquides et superfluides de fermions comptent parmi les plus répandus des systèmes quantiques à N corps. On les retrouve dans de multiples contextes expérimentaux, des gaz quantiques à la matière condensée, de la matière nucléaire au plasma quark-gluon. Ils demeurent en même temps un défi théorique, car, en dépit de décennies de recherche, de nombreuses questions restent en suspens notamment, sur le régime d'interaction forte, ou sur la dynamique loin de l'équilibre.

Les atomes froids permettent de préparer de tels systèmes fermioniques dans des conditions extrêmement flexibles : on peut régler la température, le régime d'interaction, la géométrie du piège, et on dispose de multiples protocoles d'excitation et d'observation. Ces gaz sont aussi des systèmes d'une remarquable simplicité conceptuelle : les atomes, parfaitement isolés de leur environnement et exempts d'impuretés, interagissent directement via des interactions de contact. Ce cadre expérimental privilégié permet de focaliser l'attention théorique sur des questions fondamentales de physique à N corps.

Ces dernières années, une attention particulière s’est portée sur les propriétés dynamiques des gaz de fermions, leur spectre d’excitation (quasiparticules et modes collectifs), et leur évolution loin de l’équilibre. En lien étroit avec les observations expérimentales, nous avons prédit le comportement des ondes sonores dans la phase normale [1], et celui des modes d’amplitude (alias modes de « Higgs ») dans la phase superfluide [2, 3]

Nous avons notamment développé un formalisme théorique [4] permettant de décrire de manière exacte les propriétés de transport d’un gaz en interaction faible, qui s’avère en excellent accord avec les observations expérimentales du groupe de Yale [1]. Plutôt que de rendre trivial l’effet des collisions en introduisant un temps de relaxation *ad hoc*, comme on le fait presque systématiquement pour résoudre l’équation de transport de la théorie des liquides de fermions [5], nous traitons les collisions entre quasiparticules de manière exacte, ce qui nous permet de décrire chaque étape de la transition du régime faiblement collisionnel au régime hydrodynamique. Cependant, notre formalisme est encore restreint au régime d’interaction faible et à la phase normale. Ce sont ces limitations que je souhaite dépasser dans le cadre de cette thèse.

Objectif de la thèse

L’objectif principal de cette thèse sera de bâtir une “théorie de Landau des superfluides de fermions”, autrement dit d’étendre la théorie des liquides de fermions à la phase superfluide. En effet, la phase superfluide comme la phase normale possède des quasiparticules, qui à basse température se concentrent au voisinage du minimum de dispersion. Cependant, leur relation de dispersion est gappée en raison de l’appariement entre fermions de spin opposé. Pour pouvoir construire un équivalent de la théorie de Landau, il faudrait donc lui ajouter un champ d’appariement en plus de l’habituelle densité de quasiparticules.

Une telle approche permettrait de décrire les modes collectifs et les phénomènes de transport collisionnel de façon simple et quantitative (au moins en régime de couplage faible). En effet, on dispose pour l’instant dans la phase superfluide soit de l’hydrodynamique (à un ou deux fluides), qui est une théorie mésoscopique, forcément limitée dans la gamme de phénomènes qu’elle est capable de décrire, soit des approches microscopiques (comme la RPA, ou les fluctuations gaussiennes...), qui peuvent être assez lourdes, et dans le même temps assez imprécises puisqu’elles négligent les collisions entre quasiparticules. Une théorie semi-phénoménologique à la Landau constituerait donc un entre-deux fort utile.

Un phénomène que j’aimerais particulièrement décrire avec cette approche est la dynamique au voisinage et à la traversée de la transition de phase normal/superfluide. Dans ce régime, il doit exister un mode de basse énergie relié aux oscillations de la fraction condensée minoritaire (ou carrément absente à $T > T_c$) au sein de la fraction normale majoritaire. L’hydrodynamique à deux fluides, prédit l’existence d’une telle branche phononique, le second son. Cependant, rien ne dit qu’un gaz d’atomes froids soit dans le régime hydrodynamique à la température de transition, contrairement aux supraconducteurs où les collisions entre électrons et impuretés garantissent le régime hydrodynamique. On peut ainsi imaginer qu’il existe une transition hydrodynamique-faiblement collisionnel pour le second son. Plus généralement, disposer d’une théorie de Landau de la phase superfluide (en s’assurant qu’elle coïncide avec la théorie habituelle des liquides de fermions dans la limite normale) permettra de décrire les phénomènes de transition de phase dynamique [6], et d’explorer des effets originaux, comme la stabilisation dynamique de la phase superfluide à $T > T_c$. À plus basse température, on se servira de notre nouvelle approche pour comprendre ce qu’il advient du mode d’amplitude dans le régime hydrodynamique (il n’a été décrit jusqu’ici que par des approches non collisionnelle et intégrables [7, 3]), et on se demandera si des ondes de spin peuvent se propager dans un superfluide de paires en partie désapparié.

Pour construire cette théorie “de Landau” des superfluides de fermions dans un cadre bien contrôlé, on se concentrera dans un premier temps sur le régime de couplage faible. Là, les fonctions interactions entre quasiparticules sont connues et peuvent être traitées perturbativement. À la différence de la phase normale, des processus $1 \leftrightarrow 3$, où un fermion déjà désapparié vient briser une paire de Cooper, sont possibles. Ces processus qui ne conservent pas le nombre de quasiparticules promettent de complexifier nettement l’équation de transport. Pour s’assurer de la validité de l’approche obtenue, on pourra la comparer avec une théorie microscopique de type “RPA étendue”, où la dynamique des opérateurs quartiques est traitée dans une approximation markovienne et intégrée à la dynamique de la densité et du champ d’appariement.

Tout au long de la thèse, on gardera un œil sur les systèmes fermioniques analogues aux gaz d’atomes neutres, tels que les gaz d’électrons [8] ou les liquides de fermions relativistes [9].

Calendrier prévisionnel

Dans la continuité du stage de M2 proposé sur la même thématique, la première année de thèse sera consacrée à étendre le formalisme déjà existant pour la phase normale au régime d'interaction forte. Il s'agit à la fois d'un préalable à la description de la phase superfluide, et d'une occasion de suivre des observations expérimentales au-delà du régime d'interaction faible. On poussera donc la description du régime "liquide de fermions" (c'est-à-dire de la phase normale dans le régime quantique dégénéré) au second ordre en la force des interaction. À cet ordre, la relation de dispersion des quasiparticules devrait acquérir une masse effective et des interactions entre quasiparticules de même spin devraient apparaître. Il s'agit donc d'un scénario plus complexe, notamment pour la résolution de l'équation de transport, mais à la phénoménologie plus riche. On cherchera notamment à voir si les expériences sont capables de mesurer la masse effective des quasiparticules, ou la viscosité du gaz.

Afin que le ou la doctorante évolue au plus près de la recherche expérimentale, un séjour long dans le groupe de Yale est prévu vers le début de la deuxième année de thèse.

Aspects sociaux et écologiques

En accord avec la charte adoptée par le LPTMC, le ou la doctorante, et plus encore le directeur de thèse, s'engagent à limiter au maximum l'empreinte carbone de la thèse. S'agissant d'une thèse de physique théorique avec peu de calcul numérique, il s'agit principalement de réduire les émissions liées aux déplacements professionnels. On organisera donc d'éventuelles collaborations transcontinentales (par exemple avec le groupe de Yale) sous forme d'un ou deux séjours longs (>2 mois) plutôt que d'allers-retours multiples. Pour diffuser leur travail, le ou la doctorante, et plus encore le directeur de thèse privilégieront les conférences européennes accessibles en train.

Références

- [1] S. Huang, T. Repplinger, Y. Ji, H. Kurkjian, and N. Navon. Emergence of sound in an ultracold Fermi gas. à paraître, 2024.
- [2] P. Dyke, S. Musolino, H. Kurkjian, D. J. M. Ahmed-Braun, A. Pennings, I. Herrera, S. Hoinka, S. J. J. M. F. Kokkelmans, V. E. Colussi, and C. J. Vale. Higgs oscillations in a unitary Fermi superfluid. arXiv :2310.03452, 2023.
- [3] H. Kurkjian, S. N. Klimin, J. Tempere, and Y. Castin. Pair-Breaking Collective Branch in BCS Superconductors and Superfluid Fermi Gases. *Phys. Rev. Lett.*, 122 :093403, March 2019.
- [4] T. Repplinger, S. Huang, Y. Ji, N. Navon, and H. Kurkjian. Fermi liquid regime of an ultracold atomic gas. à paraître, 2024.
- [5] P. Nozières and D. Pines. *The theory of quantum liquids*. W.A. Benjamin, New York, 1966.
- [6] P. Dyke, A. Hogan, I. Herrera, C. C. N. Kuhn, S. Hoinka, and C. J. Vale. Dynamics of a Fermi Gas Quenched to Unitarity. *Phys. Rev. Lett.*, 127 :100405, August 2021.
- [7] E. A. Yuzbashyan, M. Dzero, V. Gurarie, and M. S. Foster. Quantum quench phase diagrams of an s -wave BCS-BEC condensate. *Phys. Rev. A*, 91 :033628, March 2015.
- [8] K. Yamada. *Electron Correlation in Metals*. Cambridge University Press, 2004.
- [9] T. Matsui. Fermi-liquid properties of nuclear matter in a relativistic mean-field theory. *Nuclear Physics A*, 370(3) :365–388, 1981.