

# Simuler des particules relativistes avec des fermions dans un piège quadrupolaire.

**Daniel Suchet<sup>1</sup>, Mihail Rabinovic<sup>1</sup>, Thomas Reimann<sup>1</sup>, Frederic Chevy<sup>1</sup>, Christophe Salomon<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Laboratoire Kastler Brossel*  
*daniel.suchet@polytechnique.org*

Depuis l'émergence de la théorie cinétique, le passage de la réversibilité microscopique à l'irréversibilité macroscopique a toujours été un sujet de débats enflammés au sein de la communauté scientifique [1,2] et reste un champ ouvert de réflexion [3].

La physique des atomes froids, parce qu'elle permet un contrôle sans précédent des propriétés des systèmes étudiés, offre de nouveaux outils pour explorer les théories fondamentales, en particulier pour la physique statistique et la thermodynamique. Ainsi, il a été possible d'atteindre des températures négatives [4] ou de clarifier le rôle de l'intégrabilité dans la dynamique de systèmes à une dimension [5].

Une des questions les plus intrigantes reste la relaxation de systèmes intégrables dans lesquels des quantités conservées contraignent fortement la dynamique. C'est en particulier le cas des systèmes unidimensionnels ou des ensembles de particules sans interaction, où l'énergie de chaque particule doit être conservée au cours du mouvement. Il a été proposé de décrire de tels systèmes par des ensembles de Gibbs généralisés [6], récemment observés expérimentalement [7].

Nous avons étudié théoriquement, numériquement et expérimentalement [8] la relaxation d'un gaz sans interaction confiné dans un piège non linéaire caractérisé par une énergie potentielle  $(x, y, z) \propto \sqrt{x^2 + y^2 + 4z^2}$ .

Bien que l'absence de collisions interdise au gaz d'atteindre un équilibre de Boltzmann, nous montrons que le système atteint une distribution stationnaire quasi-thermique, que nous caractérisons par sa température cinétique, c'est-à-dire la largeur de sa distribution d'impulsion (figure 1). Cette situation diffère profondément de celle observée dans un piège harmonique, où les particules oscillent éternellement en obéissant au théorème de Kohn [9]. Nous montrons que la température stationnaire est fortement contrainte par la conservation de l'énergie, le théorème de viriel et la microréversibilité.

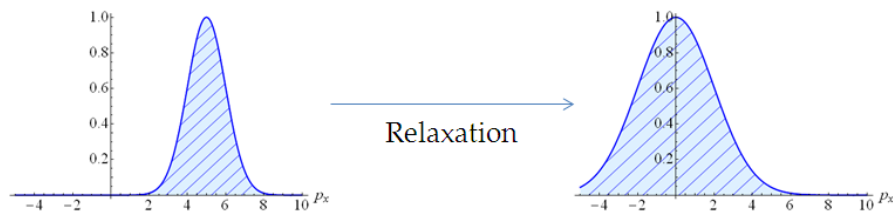


Figure 1 : Après un quench en impulsion, les particules relaxent vers une distribution stationnaire quasi thermique.

Surprenamment, bien que le potentiel soit non séparable et soit censé coupler les

différentes directions du mouvement, la dynamique suivant l'axe de symétrie du piège s'avère être très faiblement reliée à celle du plan transverse et leurs températures ne s'équilibrent pas. En revanche, la température est bien uniforme au sein du plan transverse malgré l'absence d'interactions.

Nous montrons qu'avec une transformation canonique, nos résultats permettent la simulation analogique particules relativistes sans masse piégées dans un potentiel harmonique et généralisent ainsi la physique d'électrons à 2D dans le graphène [10] ou dans des matériaux 3D tels que HgCdTe or HgMnTe [11]. Nous montrons que, contrairement au cas non relativiste, des particules sans masse n'oscillent pas indéfiniment lorsqu'elles sont éloignées du centre d'un piège harmonique, mais que le centre de masse finit au contraire par s'arrêter, tandis que l'énergie apportée initialement au système se traduit par un étalement de la distribution.

- [1] J. Loschmidt ; *Über das Wärmegleichgewicht eines Systems von Körpern mit Rücksicht auf die Schwere*, Sitzungsber. Kais. Akad. Wiss. Wien, Math. Naturwiss. Classe **73** (1876), 128-142 ; et : **75** (1877), 67.
- [2] E. Zermelo ; *Über einen Satz der Dynamik und der mechanischen Wärmetheorie*, Wied. Ann. **57** (1896), 793.
- [3] HD Zeh. *The Physical Basis of the Direction of Time*, Springer, New York, 2007.
- [4] S. Braun, J. P. Ronzheimer, M. Schreiber, S. S. Hodgman, T. Rom, I. Bloch, and U. Schneider, *Negative absolute temperature for motional degrees of freedom*, Science, **339**(6115), 2013
- [5] T. Kinoshita, T. Wenger, and D. S. Weiss. *A quantum Newton's cradle*. Nature, **440** (7086), 2006
- [6] M. Rigol, V. Dunjko, V. Yurovsky, and M. Olshanii. *Relaxation in a completely integrable many-body quantum system: an ab initio study of the dynamics of the highly excited states of 1d lattice hard-core bosons*, Physical review letters, **98**(5), 2007.
- [7] T. Langen, S. Erne, R. Geiger, B. Rauer, T. Schweigler, M. Kuhnert, W. Rohringer, I. E. Mazets, T. Gasenzer, and J. Schmiedmayer, *Experimental observation of a generalized gibbs ensemble*. arXiv:1411.7185, 2014.
- [8] D. Suchet, M. Rabinovic, T. Reimann, C. Salomon, F. Chevy, *Quasi-thermalization of spinless fermions in a quadrupole trap; Analogue simulation of non-interacting relativistic particles in a harmonic potential*, to be submitted.
- [9] W. Kohn. *Cyclotron resonance and de haas-van alphen oscillations of an interacting electron gas*, Phys. Rev. **123** (1242), 1961.
- [10] A. K. Geim and K. S. Novoselov, *The rise of graphene*. Nature materials, **6**(3), 2007.
- [11] M. S. Zholudev F. Teppe W. Knap V. I. Gavrilenko N. N. Mikhailov S. A. Dvoretzskii P. Neugebauer C. Faugeras A-L. Barra G. Martinez M. Orlita, D. M. Basko and M. Potemski. *Observation of three-dimensional massless Kane fermions in a zinc-blende crystal*, Nature Physics, **10** (233), 2014.