

Les fermions de la matière noire tiède quantique et la gravitation déterminent les structures observées des galaxies

La matière noire (DM) est la principale composante des galaxies. La mécanique quantique est une pierre angulaire de la physique décrivant des systèmes microscopiques jusqu'aux systèmes macroscopiques comme les liquides quantiques He^3 , les étoiles naines blanches et les étoiles à neutrons. Une étude menée par une équipe de chercheurs CNRS l'Observatoire de Paris, l'Université Pierre et Marie Curie, et du INFN-Milano Bicocca, suggère pour la première fois que la mécanique quantique est également responsable des structures de galaxies à l'échelle des kiloparsecs et ci-dessous: près du centre de la galaxie, dessous 10 – 100 pc, les *effets quantiques* sont importants pour la matière noire tiède, c'est à dire pour les particules de matière noire avec des masses de l'échelle du keV. Une nouvelle approche pour déterminer l'structure des galaxies et un ensemble de résultats en accord remarquable avec les observations découlent de cette étude: (i) Les galaxies naines compactes apparaissent comme des objets macroscopiques quantiques soutenues par la pression quantique des fermions de la matière noire contre la gravité. (ii) Un cadre théorique *analytique* quantique de la physique atomique est mis en oeuvre pour déterminer la structure des galaxies décrivant depuis les galaxies naines les plus compactes jusqu'aux galaxies les plus diluées et étendues (spirales, elliptiques). Les masses des galaxies, tailles des halos, densité de l'espace des phases, dispersion de vitesses obtenues en résultent entièrement compatibles avec les observations. (iii) Fait intéressant, une *masse minimale* et *dispersion de vitesse minimale* sont trouvées pour des objets dominés par la matière noire, qui à son tour implique une masse minimale universelle $m_{min} = 1,9$ keV pour la particule de la matière noire.

La matière noire ("dark matter", DM) est le principal composant des galaxies, en particulier des galaxies naines. La DM froide (CDM) est formée de particules très lourdes, qui sont très lentes (vitesse quasi nulle), et que produit une sur-abondance énorme de petites structures, sous-structures ou "satellites" dessous de ~ 50 kpc jusqu'à de très petites échelles ~ 0.005 pc. Cela constitue, comme on le sait, l'un des failles majeures de la CDM, (ou de la CDM + baryons), (aussi connu comme le "problème satellites CDM"). Au contraire, la DM tiède ("warm DM", WDM) est formée par des particules ayant des masses dans les échelles intermédiaires, l'échelle du keV, qui ont des vitesses élevées et qui produisent des structures dans la gamme d'échelles $\lesssim 50$ kpc en accord avec les observations: Dans la formation des structures avec matière noire tiède, les sous-structures au dessous de l'échelle ~ 50 kpc ne sont naturellement pas formées. Pour toutes les échelles plus grandes que 50 kpc, WDM donne les mêmes résultats que CDM et est d'accord avec les observations aussi bien galactiques que cosmologiques: structures à petite échelle ainsi que les grandes structures et les observations des anisotropies du CMB (fond du rayonnement cosmique micro-onde).

Les observations astronomiques montrent que les profils de densité de galaxies DM ont des coeurs, c'est-à-dire des profils qui sont plats au centre. Au contraire, les simulations de N -corps CDM présentent des profils de densité 'cuspidés', avec un comportement typique 'cusped' $1/r$ près du centre de la galaxie $r = 0$. Les simulations classiques N -corps WDM présentent des coeurs, mais avec des tailles beaucoup plus petites que les coeurs observés. Une nouvelle approche de ce problème et sa solution, a été récemment trouvée par l'équipe grâce à la mécanique quantique.

Les Fermions fournissent toujours une pression non nulle de nature quantique due à l'action combinée du principe d'exclusion de Pauli et le principe d'incertitude de Heisenberg. Les effets quantiques des fermions WDM excluent la présence de singularités dans les profils de densité de galaxies pour WDM et agrandissent les tailles classiques de profils parce que leurs effets de nature *repulsive et non-locale* agissent au-delà des petites échelles du pc, et ainsi le 'lissage' du profil de densité dans les régions centrales a un effet sur tout l' halo de la galaxie.

L'équipe a développé une approche physique *analytique* pour les structures de galaxies qui prend compte de la nature quantique des fermions WDM et détermine le potentiel gravitationnel et l' *équation d'état* des galaxies de façon auto-consistante. La *gamme complète* de situations physiques des galaxies est couverte: des galaxies naines compactes (qui correspondent à la limite extrême des fermions quantiques dégénérés) jusqu'aux galaxies les plus grandes, spirales et elliptiques (décrites dans le régime dilué classique et semi-classique). Dans ce cadre, des résultats obtenus par l'équipe sont les suivants:

- Une famille de solutions pour les galaxies paramétrée par la valeur du potentiel chimique à l'origine $\nu(0)$ ou de façon équivalente, par la densité de l'espace des phases à l'origine $Q(0)$: Grandes valeurs positives de $\nu(0)$, ou $Q(0)$, correspondent aux galaxies les plus compacts alors que les grandes valeurs négatives de $\nu(0)$ donnent les

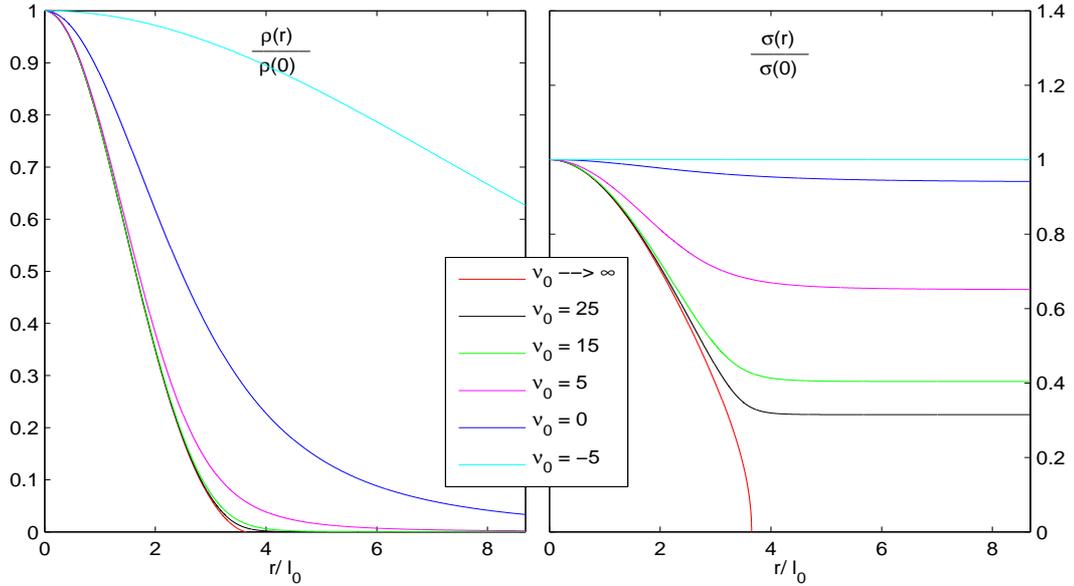


FIG. 1: Les profils de densité et les profils de vitesses obtenus, $\rho(r)/\rho_0$ et $\sigma(r)/\sigma(0)$, pour différentes valeurs de potentiel chimique à l'origine ν_0 . Grandes valeurs positives de ν_0 correspondent aux galaxies compactes, tandis que les valeurs négatives de ν_0 correspondent au régime classique (non quantique) ou dilué décrivant les galaxies spirales et elliptiques. Et entre les deux régimes se trouvent toutes les galaxies intermédiaires. Tous les profils de densité présentent des coeurs. Les tailles des coeurs r_h sont en accord avec les observations, depuis les galaxies compactes où $r_h \sim 35$ pc jusqu'aux galaxies spirales et galaxies elliptiques où $r_h \sim 0.2 - 60$ kpc. Le plus grand et positif est ν_0 , le plus petite est la taille du coeur. La taille plus petite est dans le cas des fermions dégénérés $\nu_0 \rightarrow +\infty$ (galaxies naines compactes).

galaxies diluées (galaxies intermédiaires et grandes spirales et elliptiques). En approchant le régime dilué, les tailles, masses et dispersions de vitesse des galaxies sont de plus en plus grandes. Leurs valeurs maximales sont limitées par les conditions initiales fournies par le spectre de puissance primordial.

- Tous les profils de densité obtenus présentent des coeurs en accord avec les observations. Leurs tailles r_h sont en accord avec les observations, depuis les galaxies compactes où $r_h \sim 20$ pc jusqu'aux galaxies spirales et elliptiques où $r_h \sim 0,2 - 60$ kpc. Plus grand et positif est le potentiel chimique $\nu(0)$, plus petite est la taille du coeur. Le minimum se pose dans le cas dégénéré $\nu(0) \rightarrow +\infty$ (galaxies naines compactes). La Fig. 1 montre les profils théoriques obtenus pour la densité et les vitesses.

Le panneau de gauche de la fig. 2 montre la densité de l'espace de phases (sans dimension) $\hbar^3 Q(0)/(\text{keV})^4$. Les valeurs observées sont également représentées. Le panneau de droite de la fig. 2 montre les masses obtenues des halos des galaxies. Un bon accord est trouvé dans **toute** la gamme des masses et tailles galaxies pour les particules de matière noire WDM avec masse m autour de 2 keV. Les barres d'erreur des données d'observation ne sont pas représentés, mais ils sont au moins environ 10-20 %.

- Une *masse minimale* des galaxies et une *dispersion de vitesse minimale* apparaissent. Cela implique une masse minimale m_{min} pour la particule de matière noire WDM. Cette masse minimale est une valeur *universelle*, quelqu'il soit le modèle de physique de particules décrivant la particule WDM du keV, parce que cette valeur repose uniquement sur l'état dégénéré de fermions, qui est universel quel que soit le régime non-dégénéré. Ces résultats, avec la taille du halo et la masse observée des galaxies compactes fournissent également l'indication que la masse m des particules WDM est approximativement autour de 2 keV. Des données observationnelles plus précises des galaxies compactes feront cette estimation plus précise.

Pour **conclure**, il est très remarquable que, dans le contexte de la matière noire tiède, la description quantique fournie par ce cadre semi-classique, (matière noire tiède quantique et gravitation classique), est capable de reproduire une telle grande variété de galaxies, comme le montrent les figures 1 et 2. Les masses et tailles obtenues de galaxies, et les dispersions de vitesse sont entièrement compatibles avec les observations pour tous les différents types de galaxies,

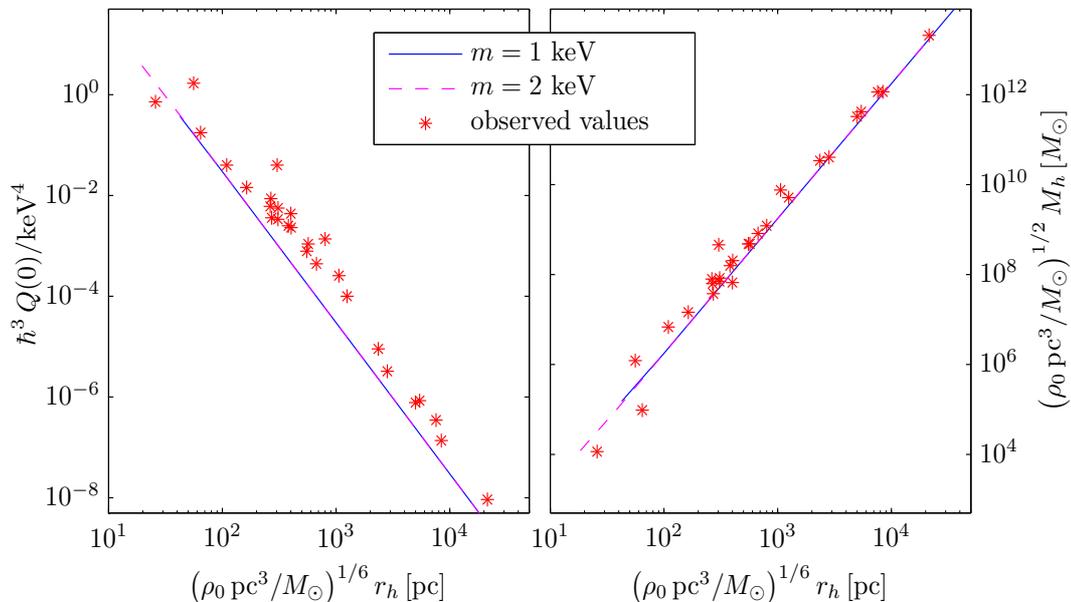


FIG. 2: Le panneau de gauche montre la densité de l' espace des phases (sans dimensions) $\hbar^3 Q(0)/(\text{keV})^4 = (m/\text{keV})^4$ obtenue pour les fermions de matière noire de masse $m = 1$ et 2 keV en fonction du logarithme ordinaire du produit $\log_{10}\{r_h [\text{pc}^3 \rho_0/M_\odot]^{1/6}\}$ en parsecs. Les étoiles rouges * sont les valeurs observées de $\hbar^3 Q(0)/(\text{keV})^4$. Les valeurs observées Q_h à partir des dispersions des vitesses des étoiles sont en fait les limites supérieures pour Q_h de la matière noire et donc la courbe théorique est légèrement en dessous d'eux. Le panneau de droite affiche les masses des galaxies obtenus $(M/M_\odot)\sqrt{M_\odot/[\rho_0 \text{ pc}^3]} = 0.82296 \cdot 10^5 (m/\text{keV})^4$ WDM pour les fermions de masse $m = 1$ et 2 keV par rapport au produit $r_h [\text{pc}^3 \rho_0/M_\odot]^{1/6}$ en parsecs. Les étoiles rouges * sont les valeurs observées de $(M/M_\odot)\sqrt{M_\odot/[\rho_0 \text{ pc}^3]}$.

comme le montrent les figures 1, 2. Les fermions de la matière noire tiède traités avec la mécanique quantique, comme il se doit, sont capables de reproduire les coeurs galactiques observés et leurs tailles. En outre, les simulations numériques de matière noire tiède produisent des structures adéquates en accord avec les observations pour les échelles \gtrsim kpc.

Les baryons ne sont pas encore inclus dans la présente étude. Elle se justifie pleinement car d'une part les galaxies compactes naines sont composées aujourd'hui 99,99 % de matière noire, et d'autre part dans les grandes galaxies, la fraction de baryons peut atteindre des valeurs allant de 1 - 3%. Etant donné que la matière noire tiède fermionique (WDM) produit par elle-même des galaxies et des structures en accord avec les observations pour tous les types de galaxies, des masses et de tailles, l'effet de l'inclusion des baryons devrait être par conséquent une petite correction à ces résultats de pure matière noire tiède (WDM), cohérent avec le fait que la matière noire est en moyenne six fois plus abondante que les baryons.

Référence

Fermionic warm dark matter produces galaxy cores in the observed scales because of quantum mechanics
C. Destri, H. J. de Vega, N. G. Sanchez, arXiv:1204.3090,
New Astronomy, in press.

Available online :

<http://fr.arxiv.org/abs/1204.3090>

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1384107612001200>

Pour en savoir plus sur le sujet:

The mass of the dark matter particle from theory and observations,
H. J. de Vega, P. Salucci, N. G. Sanchez,
New Astronomy **17**, 653 (2012).

Cosmological evolution of warm dark matter fluctuations I: Efficient computational framework with Volterra integral equations,

H. J. de Vega, N. G. Sanchez, Phys. Rev. **D85**, 043516 (2012)

Cosmological evolution of warm dark matter fluctuations II: Solution from small to large scales and keV sterile neutrinos,

H. J. de Vega, N. G. Sanchez, Phys. Rev. **D85**, 043517 (2012)

Contact

Norma G. Sanchez (Directeur de Recherche CNRS, Observatoire de Paris-LERMA CNRS UMR 8112)

Héctor J. de Vega (Directeur de Recherche CNRS, UPMC-LPTHE CNRS UMR 7589, and affilié Observatoire de Paris-LERMA)