

MORDEHAI MILGROM

AUTEUR DE
LA THÉORIE MOND



© P. Henarejos/C&E Photos

“AUJOURD’HUI, JE SAIS QUE LA MATIÈRE NOIRE N’EXISTE PAS”

Si les galaxies ne tournent pas rond, c’est que les lois de la gravitation sont fausses ! C’est en tout cas l’idée que défend l’astrophysicien israélien Mordehai Milgrom depuis trente ans. Entretien vérité avec le père de Mond, la théorie révolutionnaire qui explique l’Univers sans une once de matière noire.

Propos recueillis par David Fossé

“**E**N trente ans, personne ne m’a jamais dit en face que ma théorie n’avait aucun sens. C’est peut-être à cause de ma taille !” Mordehai Milgrom, plutôt grand en effet, a le sens de l’humour. Celui qui vient à quiconque a prêché dans le désert pendant des décennies, sans doute... Inventeur en 1983 d’une théorie de la gravitation modifiée, Mond ⁽¹⁾, proposée comme une alternative à l’existence de matière noire, le chercheur israélien a passé l’essentiel des années 1980 et 1990 à tenter d’y convertir ses collègues, sans convaincre. Toutefois, les choses changent depuis une petite dizaine d’années. Tandis que la découverte de l’insaisissable matière noire se fait attendre, de plus en plus d’astronomes se laissent séduire par l’idée qu’il faille modifier la deuxième loi de Newton (lire encadré p. 70) pour expliquer la dynamique des galaxies. Comment est née cette vision “milgromienne” de l’Univers, quelles en sont les promesses ? De sa voix grave et amicale, Mordehai “Moti” Milgrom nous raconte son histoire de Mond.

Ciel & Espace : En 1983, vous avez osé proposer de modifier les lois de la gravitation, établies depuis plusieurs siècles. Quelles étaient vos motivations ?

Mordehai Milgrom : Je voulais expliquer la rotation des galaxies, un sujet qui me tenait à cœur depuis mon année sabbatique à l’Institute for Advanced Study (Princeton) en 1978. À l’époque, j’étais spécialisé dans l’astrophysique des hautes énergies. Je voulais me reconverter dans un autre domaine et, justement, on commençait à prendre conscience de cette bizarrerie à propos des galaxies : il semblait qu’elles tournaient trop vite dans leurs régions externes. Au lieu de décliner, la vitesse de révolution des étoiles en fonction de la distance restait stable au-delà d’un certain rayon galactique. L’explication habituelle invoquait l’influence d’une masse cachée, invisible — une matière “noire”. Ce n’était pas une mauvaise idée, mais elle ne me satisfaisait pas. Pourquoi toutes les galaxies devaient avoir la même rotation, le même comportement malgré leur passé différent ? Je voulais creuser une autre piste.

Vous avez tout de suite songé à une modification des lois de Newton ?

M. M. : Oh non, la solution ne m’est pas tombée du ciel pendant que je regardais les étoiles ! J’ai

testé plusieurs idées de façon systématique. Je me suis dit : “Les lois de la dynamique fonctionnent très bien dans le Système solaire. Elles semblent moins bien fonctionner pour une galaxie. Quelles sont donc les propriétés qui diffèrent de l’un à l’autre et qui pourraient expliquer le problème ?” J’ai commencé par faire une liste : il y a la taille, la masse, etc. J’ai d’abord essayé de modifier les lois de la dynamique en fonction de la taille, mais cela ne marchait pas. J’ai alors essayé en travaillant sur le moment cinétique ⁽²⁾. Cela a semblé marcher un temps, et puis non, ce n’était pas la bonne voie. Et puis, sur ma liste, il y avait aussi l’accélération gravitationnelle, qui est beaucoup plus faible dans les galaxies que dans le Système solaire. J’ai cherché une loi qui permette de s’écarter de la dynamique standard lorsqu’on est à une faible accélération. J’ai trouvé quelque chose qui fonctionnait, et je n’en ai parlé à personne.

Vous travailliez dans le secret ?

M. M. : Oui. Un peu parce que je ne voulais pas passer pour un cinglé avec mon histoire de modification de la gravitation, et un peu aussi pour ne pas me faire piquer l’idée ! Rentré en Israël, j’ai peaufiné cette théorie pendant plusieurs mois, ne pensant qu’à ça, tout le temps. J’avais un carnet près de mon lit, où je notais des idées qui me venaient la nuit. Je travaillais sur le canapé,



© R. Gendler/HST/C&E Photos

Si les galaxies spirales (ici M94) tournent si vite, est-ce parce qu’elles sont composées pour l’essentiel de matière invisible, d’un genre nouveau, ou parce que les lois de la gravitation y sont modifiées ?

DATES CLÉS

1972 Thèse en physique des particules à l’Institut Weizmann (Israël).

1978 Commence à s’intéresser à la dynamique des galaxies, à l’occasion d’une année sabbatique à l’Institute for Advanced Studies (États-Unis).

1983 Publication de Mond, sous la forme de trois articles dans *The Astrophysical Journal*.

2004 Publication par le physicien Jacob Bekenstein d’une version relativiste de Mond. L’intérêt pour la théorie décolle.

“La théorie Mond fonctionne, mais nous ne savons pas encore pourquoi”



© P. Henarjose/C&E Photos

allongé sur le tapis, avec mes filles, partout. Et je classais soigneusement tout cela dans des dossiers étiquetés “Système solaire”, “galaxies”, “amas de galaxies”... J’ai fini par écrire trois articles, que j’ai envoyés à cinq astrophysiciens, pour avis, avant de les soumettre à des revues en 1981.

Qui étaient ces cinq heureux élus ?

M. M. : Edwin Salpeter, Scott Tremaine, John Bahcall et Jerry Ostriker, que j’avais rencontré à Princeton, et aussi Jacob Bekenstein. Salpeter a plutôt bien réagi, a fait des suggestions. Il m’a aussi dit qu’il n’était peut-être pas pertinent de publier trois articles d’un coup, qu’il valait mieux écrire un papier court, avec l’idée principale, pour ne pas trop faire de bruit... Bref, il me conseillait la prudence. Je pouvais me décrédibiliser. Mais moi, j’étais très confiant ! Pour tout vous dire, avec le recul, je ne comprends pas trop pourquoi. On en savait si peu comparé à aujourd’hui... Scott m’a aussi posé des questions précises. Bahcall a fait quelques objections, auxquelles j’ai répondu (voir “Aller plus loin”). Ostriker m’a reproché de n’en avoir pas parlé lorsque j’étais à Princeton. Jacob Bekenstein, lui, a été séduit.

Il m’a rejoint rapidement. Il savait ce que c’était que de ne pas être pris au sérieux. Au début des années 1970, il avait fait une découverte surprenante à propos des trous noirs, à laquelle personne ne croyait et que Stephen Hawking, finalement, avait confirmé. Quoi qu’il en soit, j’étais naïf. J’étais persuadé qu’une fois mes articles publiés, tout le monde se ruerait pour travailler sur Mond. Ça n’a pas été le cas. J’ai même eu beaucoup de difficultés à faire paraître mon travail, refusé par les revues *Nature*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* et *Astronomy & Astrophysics* !

Comment a réagi la communauté scientifique après la publication de vos articles dans *The Astrophysical Journal* ?

M. M. : Trois ans après la parution de mes premiers papiers sur Mond, j’ai été invité à une grande conférence à Princeton sur la matière noire. Il y avait donc des signes d’intérêt au début. Mais pas l’engouement que j’espérais. Peu à peu, en fait, j’ai commencé une longue traversée du désert.

Une traversée du désert qui a duré près de vingt ans... Comment avez-vous gardé confiance pendant toutes ses années ?

M. M. : J’ai toujours pensé qu’il y avait du vrai dans Mond, et que ce fond de vérité finirait par devenir évident aux yeux de tous. Par ailleurs, je n’étais pas seul. Jacob Bekenstein, qui s’est joint à moi dès le début, a grandement contribué à Mond au fil des années. C’est d’ailleurs lui qui a finalement fait “décoller” la théorie en 2004, en en proposant sa première version relativiste. Jusqu’alors, c’était l’une des critiques principales contre Mond : elle n’était valable que dans le

ALLER PLUS LOIN

LE DOCUMENT EXCLUSIF

La copie de la réponse de Mordehai Milgrom à l’un de ses premiers critiques, l’astrophysicien John Bahcall, datée du 4 avril 1982 : www.cieletespace.fr/node/10645

LA NOUVELLE VISION DE MOND

Tous les lycéens le savent, la force de gravitation qui s’exerce sur un objet est égale au produit de sa masse par l’accélération qu’il subit. Autrement dit : $F = m \times a$. C’est la deuxième des lois du mouvement énoncées par Isaac Newton au XVII^e siècle, appelée aussi principe fondamental de la dynamique.

À la fin des années 1970, les astronomes se sont rendu compte que cette équation centrale de la physique classique ne fonctionnait pas pour les régions externes des galaxies, sauf à imaginer qu’ils en sous-estimaient la masse, suggérant ainsi la présence de masse cachée (ou matière noire). Mais en 1983, Mordehai

Milgrom propose une autre piste. Pour lui, il n’y a pas de masse cachée dans les galaxies. Simplement, la loi de Newton doit être modifiée en deçà d’une certaine accélération a_0 . L’étude des courbes de rotation des galaxies lui permet de calculer que a_0 vaut environ 10^{-10} m/s². Il réécrit la deuxième loi de Newton ainsi :

$$F = m \times \mu(a/a_0) \times a$$

avec $\mu(a/a_0) = 1$ si $a \gg a_0$
et $\mu(a/a_0) = a/a_0$ si $a \ll a_0$

Aujourd’hui encore, la raison pour laquelle cette loi très simple, sans racines théoriques profondes, décrit parfaitement la rotation de galaxies fort différentes demeure mystérieuse.



© Nasa/ESA/STScI/AURA/C&E Photos

Malgré ses succès, Mond ne parvient pas à expliquer complètement le mouvement des galaxies dans les amas.

cadre de la physique classique, “newtonienne”, alors que l’Univers était “einsteinien”. Et la troisième chose qui m’a aidé à tenir, c’est cette réflexion de Galilée selon laquelle “la science n’est pas une démocratie”, et que par conséquent l’opinion de plusieurs n’est pas nécessairement plus valable que celle d’un seul.

Si Mond a été largement ignoré par les astronomes dans les années 1980 et 1990, n’est-ce pas aussi parce qu’à cette époque ils avaient encore l’espoir de trouver la matière noire sous forme d’étoiles, de naines brunes... Bref, sous forme d’objets astrophysiques “classiques” ?

M. M. : Certainement. Je me souviens d’ailleurs que j’étais en visite à Meudon lorsque le premier Macho⁽³⁾ a été découvert. J’avoue que ça m’a un peu remué ! On a finalement admis au bout de quelques années qu’il n’y en avait pas assez pour rendre compte de la masse cachée. Mond tenait le coup. Et puis, les mesures de vitesse de rotation confirmant sa pertinence se sont accumulées. Pour les galaxies spirales, mais aussi pour les naines sphéroïdales, les galaxies elliptiques...

Aujourd’hui, comment réagissez-vous aux rumeurs de détection imminente de matière noire, que les astrophysiciens cherchent désormais sous forme de particules exotiques, tant par des moyens spatiaux que par des expériences en laboratoire ?

M. M. : Ces rumeurs n’ont plus aucun effet sur

moi. Nous avons accumulé tant de données que je suis beaucoup plus confiant dans Mond qu’il y a dix ou vingt ans ! Ce qui m’embête quand même dans ces annonces, qui se déballonnent toujours, c’est qu’elles redonnent périodiquement de l’espoir à ceux qui cherchent la matière noire. Du coup, elles retardent leur conversion à Mond... C’est dommage, car je suis persuadé que lorsque l’on se penche sérieusement sur cette théorie et sur les données, on est forcément séduit. D’ailleurs, la plupart des gens qui travaillent aujourd’hui sur Mond ont commencé en écrivant des articles contre Mond.

Mond n’explique pourtant pas tout. Par exemple, depuis les travaux de Bekenstein en 2004, quatre nouvelles versions relativistes en ont été publiées. Or, elles ne peuvent pas toutes être vraies... N’est-ce pas un peu trop ?

M. M. : Non, cela signifie que nous n’avons pas encore compris pourquoi la recette de Mond fonctionnait si bien. En effet, aucune des cinq versions de la théorie ne donne le fin mot de l’histoire. C’est pour cela que nous avons besoin de nouvelles têtes, d’idées neuves. Mais Mond n’a pas besoin de tout expliquer pour mériter d’être prise au sérieux. Après tout, la relativité générale elle-même a ses limites, de même que le modèle standard de la physique des particules.

Mond, pour moi, c’est un peu comme les lois de Kepler. Pour expliquer sa pertinence, j’utilise

“La modification de la gravitation et l’existence de l’énergie sombre semblent étroitement liées”

souvent une comparaison avec les systèmes planétaires : on en découvre aujourd’hui une grande variété, dont il aurait été impossible de dire à l’avance l’agencement, la masse des planètes sur orbite, etc. Tous, pourtant, obéissent aux lois de Kepler. Mond, c’est la même chose pour les galaxies : elles ont des histoires individuelles très différentes, faites de fusions ou non, de collisions mineures ou majeures. Cependant, à la fin, elles se comportent toutes de la même façon, selon Mond, comme si la loi de la gravitation était modifiée en deçà d’un certain seuil.

Pour les amas de galaxies toutefois, votre recette semble échouer. Que répondez-vous à ceux qui soulignent que Mond ne parvient pas à expliquer le mouvement des galaxies dans les amas ?

M. M. : Dans les amas, on dirait qu’il y a dix fois plus de masse invisible que de masse visible, et Mond ne peut pas expliquer une telle différence, c’est vrai. Mais il en explique une bonne part. Si l’on tient compte de Mond, le désaccord entre la masse visible et la masse nécessaire au mouvement des galaxies n’est plus que d’un facteur 2. Mond élimine donc l’essentiel du problème. Où est le reste de la masse cachée ? Certains pensent qu’elle est contenue dans les neutrinos. Pour ma part, je pense qu’il s’agit de matière plus ordinaire,

que l’on n’a pas encore su détecter. Il faut savoir qu’une bonne partie des baryons [*particules de la matière ordinaire, NDLR*] fabriqués au moment du big bang manquent à l’appel, on ne sait pas où ils sont ! Il suffirait qu’une fraction de ces baryons manquants soit dans les amas de galaxies pour régler le facteur 2 de désaccord... Il pourrait s’agir par exemple de nuages de gaz compacts.

Il y a aussi un souci en cosmologie...

M. M. : En effet, pour le moment il faut de la matière noire pour expliquer la texture du fond diffus cosmologique — ce rayonnement issu du big bang —, et aussi pour expliquer la formation des grandes structures de l’Univers. Mais je ne vois pas pourquoi une théorie relativiste de Mond n’y parviendrait pas un jour.

Après tout, Mond explique le comportement de centaines de galaxies différentes, dont la physique est beaucoup plus compliquée que celle de l’Univers pris dans son ensemble — même si les cosmologistes sont persuadés du contraire !

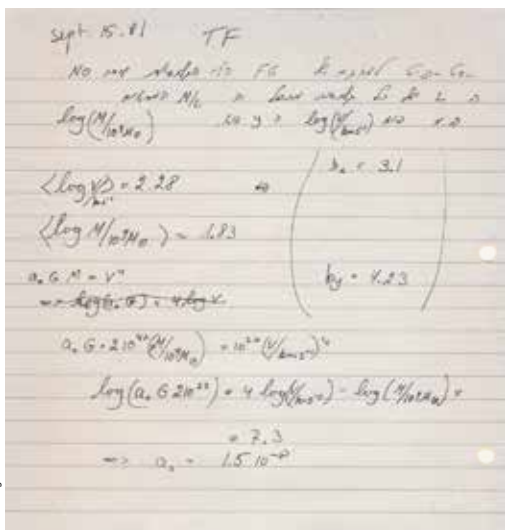
Les cosmologistes ont aussi besoin d’énergie sombre pour expliquer l’Univers, notamment l’accélération de son expansion. Quel est son statut dans le cadre de Mond ?

M. M. : Mond et l’énergie sombre semblent étroitement liés. En tout cas, il existe une relation mathématique simple entre la valeur de a_0 , la constante qui est au cœur de Mond (voir encadré), et la valeur de la constante cosmologique, ce terme ajouté par Einstein dans ses équations et dont on pense aujourd’hui qu’il décrit le mieux l’énergie sombre. C’est fascinant parce que a_0 est lié à la dynamique locale, dans une galaxie ou un amas de galaxies, tandis que la constante cosmologique est une propriété de l’ensemble de l’Univers. À terme, cette connexion entre dynamique locale et propriété globale de l’Univers sera peut-être le plus important résultat de Mond.

Après trente années de recherche, qu’est-ce qui vous paraît finalement le plus solide dans l’hypothèse Mond ?

M. M. : Ce dont je suis certain aujourd’hui, c’est que la matière noire n’existe pas, que sa présence apparente est une illusion due à une dynamique modifiée, que cette modification concerne l’accélération, et qu’enfin elle agit en deçà d’un seuil a_0 dont la valeur est bien cernée. J’appelle cela Mond, je le résume dans une formule, mais attention ce n’est pas une théorie figée ! Mond est un cadre théorique. La forme finale de la théorie et son sens profond restent à trouver.

- (1) *Mond est l’acronyme de Modified newtonian dynamics, c’est-à-dire : dynamique newtonienne modifiée.*
- (2) *Le moment cinétique est une mesure de la quantité de rotation d’un objet.*
- (3) *Macho : acronyme de Massive Astronomical Compact Halo Object. Ces astres compacts et sombres ont été l’une des hypothèses envisagées pour résoudre l’énigme de la matière noire.*



Le 15 septembre 1981, sur son carnet de notes, Moti Milgrom calcule la valeur de la constante a_0 (ici en cm/s^2) — le seuil en deçà duquel la loi de Newton pour la gravitation doit être modifiée.