



**HAL**  
open science

## Lumière et obscurité : de Sénèque à l'astronomie moderne

Cécile Merckel, Benoît Famaey, Jonathan Freundlich

► **To cite this version:**

Cécile Merckel, Benoît Famaey, Jonathan Freundlich. Lumière et obscurité : de Sénèque à l'astronomie moderne. *Alliage : Culture - Science - Technique*, 2024, 84. hal-04754187

**HAL Id: hal-04754187**

**<https://hal.science/hal-04754187v1>**

Submitted on 25 Oct 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

## **Lumière et obscurité : de Sénèque à l'astronomie moderne**

Cécile Merckel,  
Docteure en Sciences de l'Antiquité,  
UR 3090 – Centre d'Analyse des Rhétoriques Religieuses  
de l'Antiquité,  
Université de Strasbourg.  
Benoit Famaey,  
Directeur de recherche CNRS,  
et Jonathan Freundlich,  
Maître de conférences,  
UMR 7550 — Observatoire astronomique de Strasbourg.

La démarche scientifique moderne accorde au résultat des expériences et à leur reproductibilité un statut central dans la mise en place de modèles théoriques. Les expériences permettent à la fois d'inspirer le développement de modèles et de tester des modèles existants. L'astronomie et la cosmologie ont un statut particulier à cet égard, puisqu'il n'est pas possible de *mettre en place* un dispositif expérimental : c'est presque exclusivement grâce à la lumière qui nous parvient des confins de l'Univers que nous pouvons tenter d'en explorer les mécanismes. Mais si les Anciens n'avaient accès qu'à la lumière visible à l'œil nu, les lunettes astronomiques, puis les télescopes à miroirs et les capteurs électroniques permettent aujourd'hui non seulement d'apercevoir des objets célestes invisibles à l'œil nu, mais aussi de couvrir l'ensemble du spectre lumineux au-delà de la lumière visible, des ondes radio aux rayons gamma en passant par les micro-ondes, l'infrarouge, l'ultraviolet et les rayons X. Le *dispositif expérimental*, qui n'est autre que l'Univers lui-même, est néanmoins déjà en place et nous met dans une attitude passive à cet égard, la partie active du travail de l'astronome consistant à la fois en une augmentation de la perception (grossissement, couverture de l'ensemble du spectre lumineux) et en une modélisation théorique. Paradoxalement peut-être, c'est en partie et précisément grâce à ce statut particulier, mais aussi grâce à l'impérieuse admiration pour la voûte étoilée dont la littérature et la poésie se nourrissent, que l'Astronomie est devenue la première des proto-sciences, avec la mise en place des premiers véritables modèles, tels qu'on entend aujourd'hui la signification de ce mot, et avec des débats qui restent d'une grande actualité quant à leur interprétation ontologique.

On peut définir un modèle en sciences comme une représentation simplifiée, souvent formalisée mathématiquement, d'un processus ou d'un système complexe. Tout modèle met en place un certain nombre d'hypothèses qui permettent, en principe, à la fois de rendre compte des phénomènes observés et de faire des prédictions, mais aussi éventuellement d'interpréter les observations en conférant un statut ontologique aux hypothèses invoquées. Il y a là quelque chose de *démiurgique*, dans la mesure où, en donnant consistance aux hypothèses, on crée une nouvelle réalité dans laquelle on se pense et on pense le Monde. Les Anciens, et en particulier Aristote dans sa *Physique*<sup>1</sup> et Simplicius dans son commentaire d'Aristote,<sup>2</sup> séparaient toutefois la démarche de l'*astronome mathématicien*, qui cherche les hypothèses permettant de rendre compte des phénomènes (de « *sauver les apparences* »)<sup>3</sup> du mieux possible sans se soucier de

---

<sup>1</sup> Aristote, *Physique*, II, 2.

<sup>2</sup> Simplicius, *Commentaire sur la Physique d'Aristote*, II, 2.

<sup>3</sup> Pierre Duhem, *Sauver les apparences. Sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée*, Paul Brouzeng (introduction), Paris, Vrin, coll. « Bibliothèque des textes philosophiques », 2004 [1908].

la réalité de ces hypothèses, de la démarche du *physicien*, qui veut percer la nature des choses. Même si Aristote tente dans son traité *Du ciel* de raisonner en physicien sur les objets célestes, malgré l'expérience limitée qu'on peut en avoir,<sup>4</sup> la démarche de l'astronome mathématicien semble porter plus particulièrement sur les phénomènes parfaits et immuables du monde céleste supralunaire, et celle du physicien sur les corps désordonnés du monde sublunaire. Le philosophe Proclus de Lycie restreindra ainsi explicitement le physicien au monde sublunaire, estimant que la raison humaine ne peut avoir qu'une image approchée des corps célestes et en aucun cas en saisir l'essence,<sup>5</sup> ce qui sera par la suite repris au Moyen-Âge et à la Renaissance par des savants comme Maïmonide<sup>6</sup> et Osiander.<sup>7</sup>

Cette dichotomie s'explique en partie par l'importance que les Anciens confèrent à la dimension éthique de toute science<sup>8</sup> : les théories scientifiques antiques s'adossent toutes à un système philosophique, donc à un *modèle* philosophique d'explication du monde. En tant que telles, elles sont toutes liées, dans une plus ou moins grande mesure, à l'éthique puisque connaître le fonctionnement du monde permet d'agir de manière droite et vertueuse.<sup>9</sup> Si l'on prend l'exemple de la lumière, on observe que chez les Anciens, la question n'est pas tant de connaître la nature et l'origine de la lumière que de savoir *comment* on voit.<sup>10</sup> Ces théories posent toutes la question de la perception et de la fiabilité des sens, en particulier de la vue, pour appréhender le monde et celle du caractère faillible de notre jugement.<sup>11</sup>

Dans le paysage stoïcien, Sénèque, philosophe du 1<sup>er</sup> siècle ap. J.-C., présente une particularité : il est philosophe, certes, mais aussi directeur de conscience. Il a donc le souci du *progrediens*, du progressant en sagesse qu'il doit former — qui souvent, à l'instar de Lucilius<sup>12</sup> à qui sont adressées les *Questions naturelles*, se trouve assez démuné face aux grandes considérations cosmiques —, et il met le discours scientifique à la portée du non-scientifique. Il place donc le curseur de l'éthique encore plus loin dans son discours scientifique.<sup>13</sup> Dans les

---

<sup>4</sup> Marie-Noëlle Ribas, « Aristote, père de l'astrophysique scientifique », *Revue d'Histoire des Sciences*, vol. 71, n° 1, 2018, p. 5-24.

<sup>5</sup> Proclus, *Commentaire sur le Timée*, I.

<sup>6</sup> Maïmonide, *Le guide des égarés, traité de Théologie et de Philosophie*, II, 24.

<sup>7</sup> Copernic, *Des révolutions des sphères célestes*, préface d'Osiander.

<sup>8</sup> Voir par exemple Cicéron, *Secondes Académiques*, I, 4, 15 et *Tusculanes*, V, 10.

<sup>9</sup> Cicéron insiste sur le caractère conjectural des recherches sur la Nature dans *Premières académiques*, II, 39, 122. S'agissant de la finalité du monde et des « choses divines », nous devons convenir que nous traitons surtout d'hypothèses raisonnables, l'essentiel demeurant la finalité morale de la pensée. Voir Platon, *Timée*, 29b-d.

<sup>10</sup> On distingue trois grandes tendances : les atomistes et leur théorie des *eidola* : la lumière est un simulacre, une émanation d'atomes qui se dégage de l'objet et qui vient toucher notre œil ; Euclide et les pythagoriciens : la lumière vient de l'œil et vient frapper les objets ; une théorie « mixte » chez Aristote et Platon, fondée sur deux feux concomitants : l'un qui vient de l'œil, l'autre qui vient des objets. Voir par exemple Bernard Maitte, *La lumière*, Paris, Seuil, 1981.

<sup>11</sup> Platon exprime une méfiance à l'égard des données des sens (*Phédon*, 65a-66a ; 78c-79d), mais il considère aussi que c'est à partir des problèmes posés par le sensible que la pensée développe les outils qui amènent le savoir, en permettant à l'esprit d'aller du monde sensible au monde intelligible (*Timée*, 47a-47c). Le monde sensible reste une porte d'entrée vers la connaissance du monde intelligible : la perception est un appel à chercher au-delà des sens, d'une certaine manière. Aristote, quant à lui, est plus radical contre la sensation (*Métaphysique*, III, 5, 1009a-1011a), qui « ne nous dit le pourquoi de rien » (*Métaphysique*, I, 1, 981b) ; or la connaissance des causes est l'objet premier de la science pour Aristote, qui se fonde sur des démonstrations rationnelles. Les stoïciens reconnaissent une validité de la sensation, en ce qu'elle constitue une première étape nécessaire à la connaissance (voir aussi ce que disent les épicuriens : par exemple Épicure, *Lettre à Hérodote*, 146-147 et Lucrèce, *De la nature*, IV, 469-521), et surtout, il n'y a de connaissance que des réalités sensibles dans le système stoïcien.

<sup>12</sup> Il s'agit du même Lucilius que celui à qui sont adressées les *Lettres*.

<sup>13</sup> Sur ce point, voir James Scott, "The Ethics of the Physics in Seneca's 'Natural Questions'", *The Classical Bulletin*, vol. 75, n° 1, 1999, p. 55-68 ; Piergiorgio Parroni, « Le *Naturales Quaestiones* fra scienza e morale », dans Piergiorgio Parroni (dir.), *Seneca e il suo tempo*, Rome, Salerno, 2000, p. 433-444 et Gisela Stahl, « Die *Naturales Quaestiones* Senecas. Ein Beitrag zum Spiritualisierungsprozeß der römischen Stoa », *Hermes*, vol. 92, 1964, p. 425-454.

*Questions naturelles*,<sup>14</sup> Sénèque classe les phénomènes naturels en sept livres et propose une confrontation des différentes théories qui les expliquent — ce qui en fait une source importante concernant la pensée antique sur les astres. Il ne s’agit pas seulement d’une doxographie : Sénèque inscrit son traité de physique dans une démarche parénétiq ue, intégrant de nombreux passages à portée morale.<sup>15</sup> La primauté de l’éthique sur la physique se traduit également par le fait que le philosophe sacrifie parfois la précision scientifique sur l’autel de l’éducation à la vertu,<sup>16</sup> comme en témoignent certains propos qui semblent contradictoires parfois sur l’origine de la lumière, qui semble venir des astres selon certains passages<sup>17</sup> ou des yeux selon d’autres.<sup>18</sup>

Sénèque consacre le livre I des *Questions naturelles* aux « Phénomènes atmosphériques lumineux » et parmi ceux-ci, il évoque les halos lumineux qui entourent les astres :

Quand on jette une pierre dans un bassin, on voit l’eau s’écarter en formant de nombreux cercles, dont le premier est très étroit, le suivant plus large, les autres toujours plus grands, jusqu’à ce que la force d’impulsion s’amortisse et se perde dans la surface plane et immobile de l’eau. Nous pouvons penser qu’il se passe quelque chose d’analogue dans l’air. Quand il s’est épaissi, les coups qu’il reçoit lui deviennent sensibles. Frappé par la lumière du soleil, de la lune ou de n’importe quel astre, il s’écarter en formant des cercles. Car un corps fluide, l’air, et, d’une manière générale, tout objet dont un choc peut altérer la forme, prend nécessairement celle du corps qui les frappe. Or, toute lumière est ronde ; donc l’air aussi, frappé par la lumière, prendra cette même forme. Tel est le motif qui a fait donner au phénomène le nom d’aire chez les Grecs, parce que l’aire à battre le blé est ordinairement circulaire. Aires ou couronnes, nous ne devons pas croire qu’elles se forment dans le voisinage des astres : elles en sont même fort éloignées, quoiqu’elles paraissent les entourer comme d’une couronne. C’est près de la terre que sont produites ces images, que l’œil, trompé par sa faiblesse habituelle, croit placées directement autour de l’astre même<sup>19</sup>.

En bon pédagogue, Sénèque procède ici par analogie : il s’appuie sur des images faisant référence à des éléments observables sur Terre, dans le quotidien — ce qui se passe dans l’eau, la circularité de l’aire à battre le blé — pour expliquer un phénomène céleste. Le recours à l’image permet ici d’activer un schème qui va permettre de penser le non-visible à l’œil nu par le biais de phénomènes visibles par le commun des mortels. Nous ne sommes pas loin du procédé de l’hypotypose, tel qu’il est utilisé par Kant.<sup>20</sup> En termes kantien s, plutôt que de proposer une hypotypose schématique<sup>21</sup> de ce que constitue le halo — c’est-à-dire faire la liste des propriétés physiques du halo, liste qui serait très abstraite —, Sénèque propose une hypotypose symbolique, qui permet à l’esprit de transposer, par le biais de l’image, les caractéristiques d’une réalité visible à une réalité invisible, ou, du moins, difficilement perceptible par l’esprit humain. L’image devient un véritable outil de représentation des réalités astronomiques, outil d’autant plus nécessaire que le philosophe insiste sur la « faiblesse habituelle » de l’œil humain,<sup>22</sup> qui le conduit à des interprétations erronées. L’image constitue en quelque sorte un outil rhétorique qui vient pallier la faiblesse anatomique de la vue.

L’objectif principal de Sénèque est de prouver à Lucilius l’absolue rationalité du cosmos. En effet, connaître le dieu unique qui régit l’univers et qui, dans le stoïcisme, est un dieu immanent, c’est connaître les phénomènes naturels et donc s’approcher de la sagesse. Or la

<sup>14</sup> Nous nous appuyons sur le texte établi par Paul Oltramare : Sénèque, *Questions naturelles*, Paul Oltramare (trad. et éd.), Paris, Les Belles Lettres, coll. « Collection des Universités de France », 1929, 353 p.

<sup>15</sup> Voir par exemple *Questions naturelles*, I, 15, 8-17, 9 et VI, 1-3.

<sup>16</sup> Voir Francesca Romana Berno, “Exploring appearances: Seneca’s scientific works”, dans Shadi Bartsch & Alessandro Schiesaro (eds.), *The Cambridge Companion to Seneca*, New York, Cambridge University Press, 2015, p. 82-92.

<sup>17</sup> Voir par exemple *Questions naturelles*, I, 2, 2 (voir *infra*).

<sup>18</sup> Voir par exemple *Questions naturelles*, I, 3, 7-8.

<sup>19</sup> Sénèque, *Questions naturelles*, I, 2, 2-3 (trad. Oltramare modifiée).

<sup>20</sup> Emmanuel Kant, *Critique de la faculté de juger*, §59.

<sup>21</sup> Voir Cicéron, *Topique*, 83.

<sup>22</sup> Voir aussi *Questions naturelles*, I, 3, 9.

finitude humaine empêche de voir et de comprendre l'intégralité du plan divin. Quand des phénomènes insolites se produisent (par exemple, l'apparition d'une comète), ils créent de la peur — systématiquement liée à la peur de la mort —, parce qu'on ne les comprend pas et qu'ils ne répondent pas aux règles régissant les phénomènes observés fréquemment. La peur entraîne alors la superstition, qui est une méconnaissance du dieu et qui éloigne la sagesse. Or, dans le livre sur les tremblements de terre, Sénèque affirme qu'une chose est insolite pour nous « parce que nous saisissons la nature non par la raison mais par les yeux ».<sup>23</sup> Ainsi, en s'appuyant sur la raison, on envisage les potentialités du plan divin, et l'on n'est plus surpris par l'insolite. Ici s'affirme la dimension éthique de la science : l'insolite doit être un aiguillon pour nous inciter à la recherche rationnelle des causes<sup>24</sup> pour éviter la peur.<sup>25</sup>

Ainsi, l'affirmation de la rationalité absolue du cosmos stoïcien conduit Sénèque non seulement à mettre en lumière les lois immuables de la Nature, grâce auxquelles tous les phénomènes trouvent leur explication, mais aussi à s'appuyer sur ce que l'on peut considérer comme des *modèles* d'explication du monde. Le passage suivant, qui porte sur la nature des comètes et leur différence avec les astres, est éclairant :

À ces questions se rattache celle de savoir si la terre reste immobile, le monde circulant autour d'elle, ou si elle tourne dans le monde immobile. En effet, des savants ont affirmé que la nature nous emporte à notre insu, que ce n'est pas le ciel qui se lève et qui se couche, mais nous-mêmes qui nous couchons et nous levons relativement à lui. Un problème digne de nos méditations, c'est de savoir quelle est notre situation dans la nature, si notre demeure est la plus inerte ou la plus rapide, si le dieu fait rouler l'univers autour de nous, ou nous autour de l'univers. Il serait d'ailleurs nécessaire d'avoir le tableau de toutes les comètes qui sont apparues dans le passé. Il n'est pas encore possible, à cause de leur rareté, de connaître leur course, ni de savoir si leur retour est périodique et si un ordre déterminé les ramène à jour fixe. L'observation de ces corps célestes n'est pas ancienne et s'est introduite récemment en Grèce<sup>26</sup>.

Ce passage pose la question du *modèle* global d'explication de l'univers (« À ces questions se rattache celle de savoir si la terre reste immobile, le monde circulant autour d'elle, ou si elle tourne dans le monde immobile »). On sent poindre ici l'opposition future entre géocentrisme et héliocentrisme, dont Sénèque a ici l'intuition. La définition du modèle d'explication de l'univers constitue le préalable pour *comprendre* le phénomène insolite des comètes — rappelons que le verbe *comprehendere* signifie « prendre avec », c'est-à-dire aussi *intégrer dans un système*. Le texte évoque également une autre difficulté des Anciens : le recul par rapport aux phénomènes : « Il serait d'ailleurs nécessaire d'avoir le tableau de toutes les comètes qui sont apparues dans le passé. Il n'est pas encore possible, à cause de leur rareté, de connaître leur course, ni de savoir si leur retour est périodique et si un ordre déterminé les ramène à jour fixe. L'observation de ces corps célestes n'est pas ancienne ». Dans l'Antiquité, comme le scientifique ne se fonde que sur l'observation, il est dépendant du temps et manque de recul pour connaître la fréquence et la régularité (ou non) des comètes. C'est cette faiblesse de l'homme, être fini et mortel, qui fait naître l'insolite.

La solution proposée par Sénèque pour pallier cette faiblesse est de se référer à son modèle d'explication du monde, qui est le modèle stoïcien, selon lequel tout est rationnel, régulier et fixé à l'avance par une Cause première. Dans ce système, les comètes ne peuvent qu'être des astres réguliers. Cependant, il n'y a aucune preuve de cette affirmation apportée par l'observation. Par conséquent, Sénèque va déduire la régularité des comètes *uniquement* grâce

---

<sup>23</sup> Sénèque, *Questions naturelles*, VI, 3, 2.

<sup>24</sup> Sur la science comme connaissance par les causes, voir aussi Aristote, *Métaphysique*, I, 3 et 10 ; IV, 1 et 2 ; VII, 4 ; XI, 7 ; *Physique*, II, 3, 5, 7 et 8 ; *Seconds analytiques*, II, 11-12 et *De la génération et de la corruption*, II, 9-10.

<sup>25</sup> Voir par exemple *Questions naturelles*, II, 59.

<sup>26</sup> Sénèque, *Questions naturelles*, VII, 2-3, 1 (trad. Oltramare modifiée).

au système théorique stoïcien, et non par l'observation. Ce tour de force est d'autant plus louable que Sénèque affirme cette régularité en allant à l'encontre de la théorie aristotélicienne qui fit foi de son temps et pendant plusieurs siècles.

Chez Sénèque, il s'agit bien de *sauver les apparences* pour sauver le système stoïcien, mais il y a là aussi l'affirmation optimiste qu'une véritable connaissance de la nature des choses est possible, grâce à l'affirmation préalable de l'existence du plan divin rationnel et de l'absolue rationalité du monde, selon les principes stoïciens.

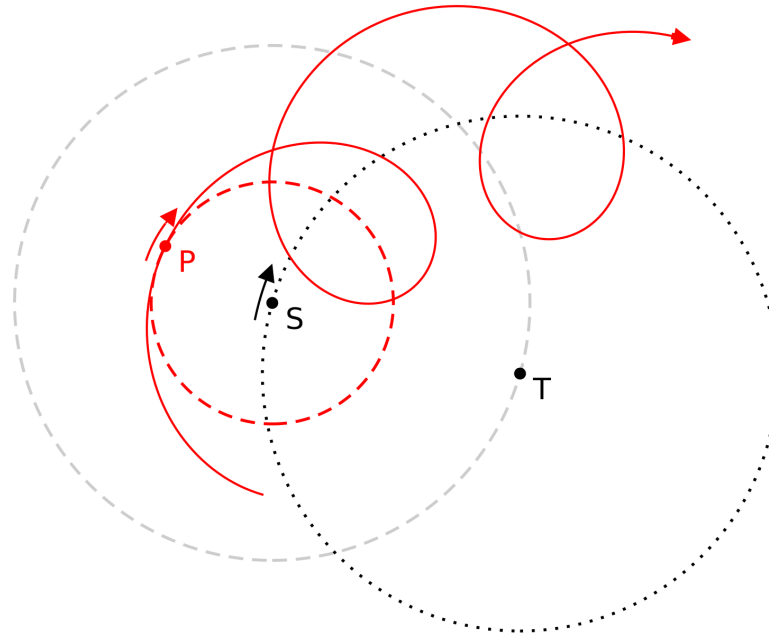
Dans le passage cité plus haut, Sénèque nous invite à une certaine humilité sur la question fondamentale du mouvement des astres et de notre position au sein du cosmos. De l'Antiquité à la Renaissance, cette question a suscité un vif débat sur le statut des hypothèses mises en œuvre dans les modèles astronomiques : s'agit-il de rendre compte des phénomènes sans se soucier de la réalité de ces hypothèses, suivant la démarche de l'astronome mathématicien, ou de proposer un discours sur la nature des choses en leur conférant un statut ontologique, suivant la démarche du physicien qui peut comporter un caractère démiurgique en donnant consistance aux hypothèses avancées ?

C'est probablement Anaximandre de Milet qui proposa au IV<sup>e</sup> siècle avant notre ère un premier modèle rendant compte du mouvement des astres supposant un univers sphérique centré autour de la Terre. Comme l'esquisse Platon dans les *Lois*,<sup>27</sup> l'objectif des astronomes antiques était pour la plupart de géométriser le mouvement des astres en n'utilisant que des mouvements circulaires uniformes plutôt que d'invoquer des astres errants aux mouvements aléatoires. Une tâche relevée par son contemporain Eudoxe de Cnide, qui proposa un modèle dit des « *sphères homocentriques* », où les astres sont portés par des sphères concentriques emboîtées les unes dans les autres. Le mouvement d'une sphère peut entraîner la rotation d'une autre, et le mouvement d'une planète peut ainsi dépendre de quatre de ces sphères concentriques. Si ce modèle permet d'expliquer la rétrogradation des planètes, c'est-à-dire le fait qu'elles semblent parfois reculer avant de reprendre leur course, il suppose que les planètes sont à des distances fixes de la Terre, or leur luminosité n'est pas constante. L'introduction d'*épicycles*, c'est-à-dire de cercles dont le centre tourne autour de la Terre au lieu d'être la Terre elle-même (Figure 1), permet de rendre compte de la variation de la distance entre la Terre et une planète donnée. Après plusieurs siècles d'observations et de développements conceptuels, l'*Almageste* de Ptolémée,<sup>28</sup> au II<sup>e</sup> siècle de notre ère, propose un modèle géocentrique relativement complexe qui deviendra la référence pour rendre compte et prédire le mouvement des astres de l'Antiquité jusqu'à la fin du Moyen-Âge. Dans ce modèle, la Terre est supposée immobile au centre de l'univers tandis que les mouvements des astres sont décrits à l'aide d'un ou de plusieurs épicycles. La complexité du modèle vient notamment du fait que le cercle *déférent* décrit par le centre d'un épicycle peut avoir son centre décalé par rapport à la Terre (il s'agit alors d'un *excentrique*), et que le mouvement du centre de l'épicycle peut ne pas être uniforme (Ptolémée suppose toutefois qu'il existe un point particulier par rapport auquel la vitesse angulaire du centre de l'épicycle est constante, le point *équante*).

---

<sup>27</sup> Platon, *Lois*, VII, 822.

<sup>28</sup> Traduction française de l'*Almageste* de Ptolémée par Pierre Paquette, disponible en ligne sur : <https://ecliptiqc.ca/Almageste.php> (consulté le 2 juillet 2023).

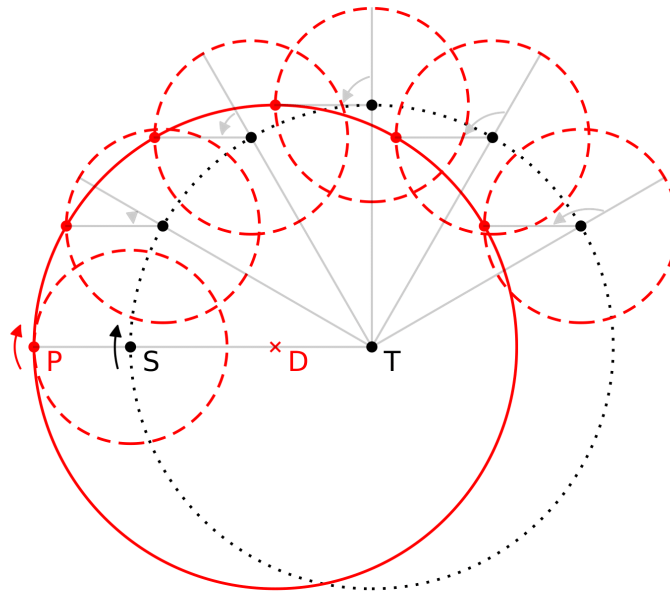


**Figure 1.** Dans le modèle géocentrique de Ptolémée, le mouvement d'une planète (P) par rapport à la Terre (T) est décrit par un épicycle dont le centre (S) suit une trajectoire circulaire autour de la Terre le long du cercle déférent. La courbe rouge indique le mouvement de la planète par rapport à la Terre, le cercle pointillé rouge l'épicycle, et le cercle pointillé noir le cercle déférent. Cette situation pourrait toutefois tout aussi bien être décrite en supposant que la Terre et la planète orbitent toutes deux autour de S, comme indiqué par le cercle pointillé gris.

Toutefois, le mouvement d'une planète peut être décrit par différentes combinaisons d'orbites circulaires. Par exemple, quand la période de révolution associée à un épicycle est identique à celle de son centre par rapport à la Terre, cet épicycle peut être remplacé par un seul cercle excentrique (Figure 2). De ce fait, il fut réalisé relativement tôt, et notamment par Aristarque de Samos au II<sup>e</sup> siècle avant notre ère, que le mouvement du Soleil pouvait tout aussi bien être décrit en le supposant immobile et la Terre en rotation autour de lui, et c'est ainsi que Sénèque peut, au I<sup>er</sup> siècle de notre ère, se faire l'écho d'un tel modèle. Mais l'équivalence entre épicycle et excentrique, connue au moins depuis Hipparque au II<sup>e</sup> siècle avant notre ère, pose plus généralement la question du statut des hypothèses avancées par les astronomes : si plusieurs combinaisons permettent de rendre compte d'un phénomène, laquelle correspond à la nature des choses ? Cela permet aussi plus facilement d'imaginer ces hypothèses comme des « *fictions* » mathématiques sans réalité propre, des artifices qui permettent uniquement de rendre compte des phénomènes : c'est ce que font Ptolémée et la plupart des penseurs grecs. Cette défiance vis-à-vis des hypothèses astronomiques subsiste et fait l'objet de débats en Orient et en Occident jusqu'à la Renaissance. Lorsque l'ouvrage présentant le modèle héliocentrique de Copernic est publié en 1543, la préface d'Osiander<sup>29</sup> se situe dans cette tradition, en précisant que le fait de mettre le Soleil immobile au milieu du cosmos n'est qu'une hypothèse mathématique parmi d'autres et que l'astronomie ne peut pas pénétrer la nature des corps célestes. Mais quelques dizaines d'années plus tard, l'ère passe au réalisme, avec l'exigence que les hypothèses astronomiques portent sur la nature des choses et ne soient pas que des artifices mathématiques. C'est ainsi que Giordano Bruno, Kepler puis Galilée affirmèrent que l'hypothèse héliocentrique de Copernic était seule conforme avec la réalité.

<sup>29</sup> Nicolas Copernic, *Des révolutions des sphères célestes*, préface d'Osiander.

D'après Duhem,<sup>30</sup> leur réalisme n'était pas justifié dans la mesure où ils transformaient une hypothèse en certitude à une époque où le modèle héliocentrique de Copernic ne permettait pas de décrire fondamentalement mieux les mouvements célestes que le modèle géocentrique de Ptolémée. Mais ce réalisme avait peut-être pour origine l'intuition, qui allait prendre tout son sens avec la théorie de la gravitation de Newton, selon laquelle il n'y avait pas de distinction fondamentale entre le monde sublunaire et le monde céleste.



**Figure 2.** La trajectoire d'une planète (P) décrite par cercle excentrique (cercle rouge, de centre D) peut tout aussi bien être décrite par un épicycle (cercle rouge pointillé, de centre S en rotation autour de T) dont la période orbitale est égale à celle de son centre.

L'absence de distinction entre le monde sublunaire et le monde céleste est en effet le cœur même de la loi de la gravitation universelle de Newton : la *force* qui fait tomber la pomme est la même que celle qui régit le mouvement des astres. Cette force introduite par Newton est un concept abstrait qui permet de modéliser ce qui déforme un objet ou en change le mouvement, et Newton se garde bien de lui donner une consistance ontologique : dans la lignée des Anciens, il la voit plutôt comme une fiction mathématique.<sup>31</sup> Elle permet toutefois de lier quantitativement la vitesse à laquelle tombe la pomme ou celle à laquelle se déplacent les astres à la masse qui les attire. La découverte de Neptune par Le Verrier en 1846 fut l'un des grands succès du modèle de Newton : l'addition d'une nouvelle planète permettait d'expliquer les anomalies observées dans la trajectoire d'Uranus, à savoir que cette dernière planète semblait être accélérée sur une partie de son orbite par rapport à ce qui était attendu de l'attraction du

<sup>30</sup> Pierre Duhem, *Sauver les apparences. Sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée*, op. cit.

<sup>31</sup> Isaac Newton, *Correspondence*, II, 253 (1692/1693), cité par Ducheyne, "Newton on Action at Distance", *Journal of the History of Philosophy*, vol. 52, n° 4, 2014, p. 675-701 : « Tis inconceivable, that inanimate brute Matter, should (without ye mediation of something else which is not material), operate upon & affect other matter without mutual contact; as it must if gravitation in the sense of Epicurus, be essential & inherent in it. And this is one reason why I desired you not to ascribe innate gravity to me. that gravity should be innate inherent & essential to matter so yt one body may act upon another at a distance through a vacuum without the mediation of any thing else & by & through which their action and force may be conveyed from one to another is to me such an absurdity that I beleive no man who has in philosophical matters any competent faculty of thinking can ever fall into it. Gravity must be caused by an agent acting constantly according to certain laws, but whether this agent be material or immaterial is a question I left to ye consideration of my readers ».



Soleil et des autres planètes connues et ralentie sur une autre partie de son orbite. Cette planète fut rapidement observée là où elle était attendue et nommée Neptune : le mouvement d'Uranus avait permis de découvrir une masse auparavant *invisible*, et ce grâce au modèle de Newton. Porté par le succès de cette découverte, Le Verrier tenta ensuite d'expliquer une anomalie dans le mouvement de Mercure par une nouvelle planète hypothétique, qui aurait été très proche du Soleil et aurait été nommée Vulcain. Cette planète fut cherchée sans succès pendant des décennies : c'est la théorie de la relativité générale d'Einstein qui permet aujourd'hui d'expliquer l'anomalie dans le mouvement de Mercure sans faire appel à une quelconque nouvelle planète. Cette anomalie était donc plutôt le signe des limites du domaine de validité du modèle de Newton, désormais englobée et supplantée par la relativité générale. Dans ce nouveau cadre, qui n'a pas encore été mis en défaut à ce jour, la gravitation n'est d'ailleurs plus décrite comme une force, mais comme une propriété intrinsèque de l'espace-temps, qui se courbe en présence de masses : Newton avait raison de ne pas donner une consistance ontologique à son concept de force gravitationnelle !

L'un des plus grands mystères auxquels nous faisons actuellement face dans notre compréhension de l'Univers est celui de ce que l'on appelle la *matière noire*. Les galaxies comme la Voie Lactée sont des « univers-îles » formés d'étoiles, de gaz et de poussières qui sont liés par la gravitation, tout comme la Lune est liée à la Terre et la Terre au Soleil. La vitesse à laquelle ces différentes composantes orbitent dans une galaxie est donc liée à la masse qui les attire. Or, lorsqu'on mesure les vitesses de rotation à grande distance du centre des galaxies, celles-ci sont constantes et bien plus grandes qu'attendu d'après la théorie de la gravitation au vu de la matière visible (Figure 3).<sup>32</sup> Pour expliquer ces vitesses, on suppose la présence d'une masse invisible dans un halo relativement diffus, la « matière noire ». De nombreuses hypothèses ont depuis lors été formulées quant à sa nature, mais force est de constater qu'à ce jour, celle-ci nous échappe encore. La matière noire a toutefois permis de rendre compte (ou, du moins, de « sauver les apparences ») de nombreux phénomènes au-delà de l'échelle des galaxies, notamment dans le cadre du lentillage gravitationnel des amas de galaxies, de la formation des grandes structures de l'univers, ou encore pour expliquer l'aspect du « fond diffus cosmologique », la lumière la plus ancienne de l'Univers dans laquelle nous baignons. Les petites fluctuations de ce fond diffus ne peuvent d'ailleurs pas s'expliquer sans la présence d'une composante de matière découplée du plasma primordial, qui ne représenterait pas moins de 85 % de la matière dans l'Univers. Cela signifie que la matière noire ne peut pas être de même nature que la matière « ordinaire », car elle doit être découplée très tôt du plasma primordial qui a donné lieu à l'émission du fond diffus. L'introduction de cette masse invisible pour rendre compte de phénomènes observés rappelle la résolution de l'anomalie de l'orbite d'Uranus par Le Verrier : la théorie de la gravitation, dans ce cas-ci la relativité générale, permettrait de révéler l'existence de « réalités » astronomiques qui semblent échapper à toute autre forme de détection non-gravitationnelle. Rappelons-nous à cet égard de Sénèque qui insistait sur la « *faiblesse habituelle* »<sup>33</sup> de l'œil humain et sur la nécessité de l'image comme outil de représentation des réalités astronomiques, rôle que joue le modèle dans la cosmologie moderne.

---

<sup>32</sup> D. H. Rogstad, I. A. Lockhart, & M. C. H. Wright, "Aperture-synthesis observations of HI in the galaxy M83", *Astrophysical Journal*, vol. 193, 1974, p. 309-319. M. S. Roberts & R. N. Whitehurst, "The rotation curve and geometry of M31 at large galactocentric distances", *Astrophysical Journal*, vol. 201, 1975, p. 327-346. Vera C. Rubin, W. Kent Ford, Jr. & Norbert Thonnard, "Extended rotation curves of high-luminosity spiral galaxies. IV. Systematic dynamical properties, Sa → Sc", *Astrophysical Journal*, vol. 225, 1978, p. L107-L111. Albert Bosma, *The distribution and kinematics of neutral hydrogen in spiral galaxies of various morphological types*, thèse de doctorat de l'Université de Groningen, 1978. S. M. Faber & J. S. Gallagher, "Masses and mass-to-light ratios of galaxies", *Annual Reviews in Astronomy and Astrophysics*, vol. 17, 1979, p. 135-187.

<sup>33</sup> Sénèque, *Questions naturelles*, I, 2, 3.

Mais en l'absence de détection indépendante de ses effets gravitationnels (Neptune avait rapidement pu être observée après la prédiction de Le Verrier), on ne peut exclure que la différence entre vitesses attendues et mesurées dans les galaxies puisse aussi être le signe des limites du domaine de validité de la relativité générale, comme ce fut le cas de l'anomalie dans le mouvement de Mercure pour la théorie de la gravitation de Newton. C'est ainsi que Mordehai Milgrom proposa, dès 1983, une modification de la dynamique dans le régime des très faibles accélérations permettant de se passer de matière noire dans les galaxies.<sup>34</sup> Dans un tel modèle, c'est la matière noire qui est reléguée au rang de fiction permettant de sauver les phénomènes. De façon surprenante, plusieurs corrélations entre la distribution de matière ordinaire et le champ gravitationnel des galaxies semblent s'expliquer naturellement dans le cadre de ce paradigme, alors qu'elles sont difficiles à comprendre en présence de matière noire. On observe par exemple une très forte corrélation entre la masse de matière ordinaire et la vitesse de rotation à grande distance du centre des galaxies spirales,<sup>35</sup> ainsi qu'entre la densité de matière ordinaire des galaxies et la forme de leur courbe de rotation dans les parties centrales,<sup>36</sup> deux observations qui s'expliquent bien dans le cadre de la théorie de Milgrom, où c'est uniquement la matière ordinaire (qui serait alors la seule à exister) qui fixe l'attraction gravitationnelle, mais qui requiert un lien très fort entre matière ordinaire et matière noire dans le cadre standard, ce qui est loin d'aller de soi.

Néanmoins, la théorie de Milgrom pourrait poser au moins autant de problèmes qu'elle n'apporte de solutions.<sup>37</sup> Par exemple, elle ne permet pas de rendre compte de la totalité de la masse manquante dans les amas de galaxies, et il faut donc quand même recourir à de la matière invisible. De plus, l'effet de lentillage gravitationnel permet de mettre en évidence des cas, comme dans l'amas dit « du boulet », où la distribution de masse totale ne coïncide pas avec la masse de matière ordinaire, ce qui s'explique bien dans le cadre du modèle de matière noire mais plus difficilement en gravité modifiée.<sup>38</sup> Toujours dans les amas de galaxies, les galaxies « ultra-diffuses » ne semblent pas obéir aux prédictions de la théorie de Milgrom en se comportant comme si elles étaient isolées.<sup>39</sup> Enfin, bien qu'on s'attende à ce que les effets d'une modification de la gravitation soient faibles dans le Système Solaire, ces effets pourraient en principe être détectables, or ils n'ont pas encore été détectés.<sup>40</sup> Finalement, pour rendre compte du fond diffus cosmologique, il semble que la modification de la dynamique à l'œuvre dans les galaxies doive, à ces échelles cosmologiques, se comporter *comme* une composante de matière découplée du plasma primordial, c'est à dire comme de... la matière noire, ce qui est loin d'aller de soi.

Toutefois, pour voir dans la matière noire une hypothèse sur la nature des choses, et non un simple sauvetage des apparences, il faudrait la détecter de manière plus directe que par son action gravitationnelle, et cette détection nous échappe depuis plus de quatre décennies. Par

---

<sup>34</sup> Mordehai Milgrom, "A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis", *Astrophysical Journal*, vol. 270, 1983, p. 365-370.

<sup>35</sup> Stacy McGaugh, Jim Schombert, Greg Bothun & Erwin de Blok, "The baryonic Tully-Fisher relation", *The Astrophysical Journal*, vol. 533, n° 2, 2000, p. 99-102.

<sup>36</sup> Amir Ghari, Benoit Famaey, Chervin Laporte & Hosein Hagi, "Dark matter-baryon scaling relations from Einasto halo fits to SPARC galaxy rotation curves", *Astronomy & Astrophysics*, vol. 623, 2019, p. 1-23.

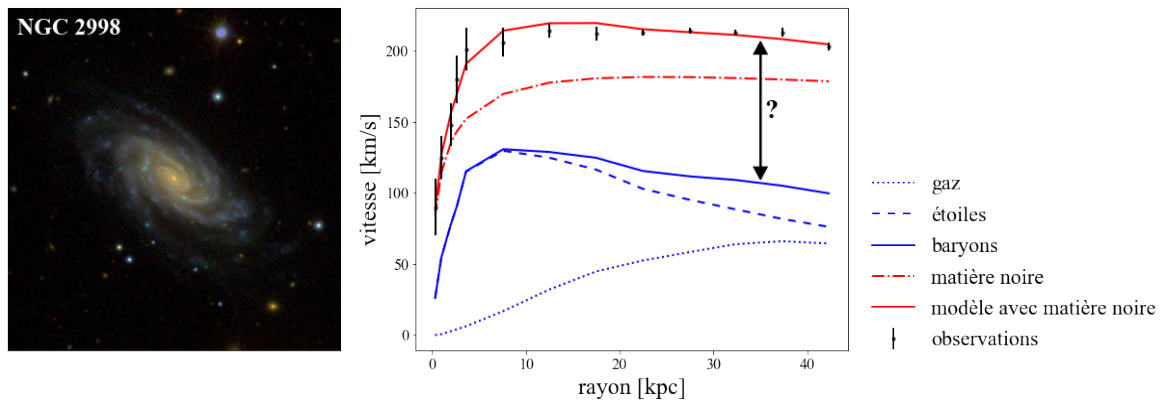
<sup>37</sup> Benoit Famaey & Stacy McGaugh, "Modified Newtonian Dynamics (MOND): Observational phenomenology and relativistic extensions", *Living Reviews in Relativity*, vol. 15, n° 1, 2012, 159 p.

<sup>38</sup> Douglas Clowe *et al.*, "A direct empirical proof of the existence of dark matter", *Astrophysical Journal Letters*, vol. 648, n° 2, 2006, p.109-113.

<sup>39</sup> Jonathan Freundlich *et al.*, "Probing the radial acceleration relation and the strong equivalence principle with the Coma cluster ultra-diffuse galaxies", *Astronomy & Astrophysics*, vol. 658, 2022, 29 p.

<sup>40</sup> Luc Blanchet & Jérôme Novak, "External field effect of modified Newtonian dynamics in the Solar System", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 412, n° 4, 2011, p. 2530-2542. Aurélien Hees, Benoit Famaey, Garry W. Angus & Gianfranco Gentile, "Combined Solar System and rotation curves constraints on MOND", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 455, n° 1, 2016, p. 449-461.

ailleurs, il semble probable que la relativité générale d'Einstein soit un jour dépassée par une nouvelle théorie, potentiellement sous-tendue par des hypothèses encore moins intuitives que les notions de force, d'espace-temps et de particules auxquelles nous avons été habitués, ce que l'on nomme aujourd'hui « matière noire » pouvant peut-être y trouver une place différente de ce que l'on entend par ces mots aujourd'hui.



**Figure 3.** La courbe de rotation observée de la galaxie spirale NGC 2998 peut être expliquée en ajoutant les contributions du gaz, des étoiles, et d'un halo sphérique de matière noire. La matière visible, dite « baryonique », qui comprend le gaz et les étoiles, ne permet pas à elle seule de rendre compte des vitesses de rotation mesurées. La modification de la gravitation de Milgrom peut, quant à elle, rendre compte de cette observation sans matière noire. Crédits : SDSS pour l'image de la galaxie, Lelli et al. (2016) pour la courbe de rotation observée<sup>41</sup>.

Depuis Sénèque et les Anciens, l'étude des objets célestes n'a cessé de susciter des interrogations fondamentales sur la nature de l'Univers. Pour rendre compte de la rotation des galaxies, la plupart des astronomes supposent aujourd'hui l'existence d'une matière noire invisible, mais il est aussi possible d'invoquer une modification de la gravitation pour tenter de rendre compte de ces phénomènes. Laquelle des deux options correspond le mieux à la nature des choses, si tant est que l'on puisse approcher la nature des choses ? Ajouter une masse invisible ne semble pas si étonnant lorsqu'on prend conscience de l'étroitesse de ce que l'on peut voir à l'œil nu, comparé à l'ensemble du spectre lumineux et à ce que nous permettent de voir les instruments astronomiques actuels. Tout comme chez Sénèque, l'image constitue un outil rhétorique qui vient pallier la faiblesse anatomique de la vue, nos modèles sont des outils rationnels qui jouent le même rôle, nous révélant le « secteur sombre » de l'Univers. Toutefois, nos modèles attribuent toujours *de facto* un statut ontologique à leurs constituants, d'une manière qu'on pourrait qualifier de *démiurgique*, pouvant en retour affecter nos propres perceptions. Ces constituants jouissent d'une existence propre *au sein* du modèle explicatif, mais en l'absence de détection indépendante (par exemple une détection non-gravitationnelle dans le cadre de l'hypothèse de la matière noire, formulée précisément pour rendre compte des phénomènes à partir d'une loi de la gravitation fixée), l'histoire des sciences nous apprend qu'il est souvent prématuré d'en tirer des conséquences sur la nature des choses. De même qu'Eudoxe et Ptolémée voulaient sauver les apparences du mouvement des astres en ne faisant appel qu'à des sphères et des cercles, et de même que Le Verrier voulait expliquer l'anomalie dans le mouvement de Mercure tout en gardant le modèle de Newton, nous pourrions faire erreur en voulant expliquer les courbes de rotation des galaxies et l'ensemble des phénomènes que l'on attribue aujourd'hui à la « matière noire » en restant dans le cadre de la relativité

<sup>41</sup> Federico Lelli, Stacy McGaugh & James Schombert, "SPARC: Mass models for 175 disk galaxies with Spitzer photometry and accurate rotation curves", *The Astronomical Journal*, vol. 152, n° 6, 2016, p. 152-157.

générale.<sup>42</sup> La gravité modifiée et la matière noire pourraient ainsi être toutes deux des hypothèses vouées à être supplantées par un changement de point de vue digne de la révolution copernicienne. Cela ne fait qu'une quarantaine d'années que ce concept de matière noire a vu le jour et, comme le disait déjà Sénèque à Lucilius au I<sup>er</sup> siècle de notre ère :

Le temps viendra où le jour, ainsi qu'une étude poursuivie pendant un temps plus long, tirera vers la lumière ces phénomènes qui sont maintenant dans l'ombre. Une seule vie ne suffirait pas à de si vastes recherches, à supposer qu'elle se donnât tout entière à la connaissance du ciel [...]. Aussi ces sujets seront-ils développés par de longues successions de chercheurs. Un jour, notre postérité s'étonnera que nous ayons ignoré des faits si clairs.<sup>43</sup>

Plus généralement, l'histoire de l'astronomie nous rappelle la question du statut ontologique des hypothèses avancées par les modèles. Faut-il y voir uniquement des fictions mathématiques, ou des réalités concrètes ? Pouvons-nous atteindre quelque chose de la nature des choses, ou devons-nous nous contenter de sauver les phénomènes ? Tout comme l'enjoignait le stoïcien Sénèque, ces questions nous appellent à une certaine humilité vis-à-vis de ce qui échappe à notre compréhension du monde et de notre capacité même à atteindre la nature des choses.

### **Bibliographie :**

- ARISTOTE, *Métaphysique*, I, 1, 981b ; I, 3 et 10 ; III, 5, 1009a-1011a ; IV, 1 et 2 ; VII, 4 ; XI, 7.  
ARISTOTE, *Physique*, II, 2 ; II, 3, 5, 7 et 8.  
ARISTOTE, *Seconds analytiques*, II, 11-12.  
ARISTOTE, *De la génération et de la corruption*, II, 9-10.  
BLANCHET, Luc & NOVAK, Jérôme, "External field effect of modified Newtonian dynamics in the Solar System", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 412, n° 4, 2011, p. 2530-2542.  
BERNO, Francesca Romana, « Exploring appearances: Seneca's scientific works », dans Shadi Bartsch & Alessandro Schiesaro (eds.), *The Cambridge Companion to Seneca*, New York, Cambridge University Press, 2015, p. 82-92.  
BOSMA, Albert, *The distribution and kinematics of neutral hydrogen in spiral galaxies of various morphological types*, thèse de doctorat de l'Université de Groningen, 1978.  
CICERON, *Premières académiques*, II, 39, 122.  
CICERON, *Secondes Académiques*, I, 4, 15  
CICERON, *Topique*, 83.  
CICERON, *Tusculanes*, V, 10.  
CLOWE, Douglas *et al.*, "A direct empirical proof of the existence of dark matter", *Astrophysical Journal Letters*, vol. 648, n° 2, 2006, p.109-113.  
COPERNIC Nicolas, *Des révolutions des sphères célestes*, 1543.  
DUCHEYNE, Steffen, « Newton on Action at Distance », *Journal of the History of Philosophy*, vol. 52, n° 4, 2014, p. 675-701.  
DUHEM, Pierre, *Sauver les apparences. Sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée*, Paul Brouzeng (introduction), Paris, Vrin, coll. « Bibliothèque des textes philosophiques », 2004 [1908], 158 p.

---

<sup>42</sup> Comme le disait Jim Peebles en 2015 au sujet de la matière noire : « The exploration of its nature is now led by direct and indirect detection experiments, to be complemented by advances in the full range of cosmological tests, including judicious consideration of the rich phenomenology of galaxies. The results may confirm ideas about dark matter already under discussion. If we are lucky, we also will be surprised once again. » Phillip James Edwin Peebles, "Dark matter", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112, n° 40, 2015, p. 12246-12248.

<sup>43</sup> Sénèque, *Questions naturelles*, VII, 25, 4 (trad. pers.).

- ÉPICURE, *Lettre à Hérodote*, 146-147.
- FABER, S. M. & GALLAGHER, J. S., “Masses and mass-to-light ratios of galaxies”, *Annual Reviews in Astronomy and Astrophysics*, vol. 17, 1979, p. 135-187.
- FAMAHEY, Benoit & MCGAUGH, Stacy, “Modified Newtonian Dynamics (MOND): Observational phenomenology and relativistic extensions”, *Living Reviews in Relativity*, vol. 15, n° 1, 2012, 159 p.
- FREUNDLICH, Jonathan *et al.*, “Probing the radial acceleration relation and the strong equivalence principle with the Coma cluster ultra-diffuse galaxies”, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 658, 2022, 29 p.
- GHARI, Amir, FAMAHEY, Benoit, LAPORTE, Chervin & HAGHI, Hosein, “Dark matter-baryon scaling relations from Einasto halo fits to SPARC galaxy rotation curves”, *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 623, 2019, p. 1-23.
- HEES, Aurélien, FAMAHEY, Benoit, ANGUS, Garry W. & GENTILE, Gianfranco, “Combined Solar System and rotation curves constraints on MOND”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 455, n° 1, 2016, p. 449-461.
- KANT, Emmanuel, *Critique de la faculté de juger*, §59.
- LELLI, Federico, MCGAUGH, Stacy & SCHOMBERT, James, “SPARC: Mass models for 175 disk galaxies with Spitzer photometry and accurate rotation curves”, *The Astronomical Journal*, vol. 152, n° 6, 2016, p. 152-157.
- LUCRECE, *De la nature*, IV, 469-521.
- MAÏMONIDE, *Le guide des égarés, traité de Théologie et de Philosophie*, II, 24.
- MAITTE, Bernard, *La lumière*, Paris, Seuil, 1981, 380 p.
- MCGAUGH, Stacy, SCHOMBERT, Jim, BOTHUN, Greg & BLOK, Erwin de, “The baryonic Tully-Fisher relation”, *The Astrophysical Journal*, vol. 533, n° 2, 2000, p. 99-102.
- MILGROM, Mordehai, “A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis”, *Astrophysical Journal*, vol. 270, 1983, p. 365-370.
- PARRONI, Piergiorgio, « *Le Naturales Quaestiones* fra scienza e morale », dans Piergiorgio Parroni (dir.), *Seneca e il suo tempo*, Rome, Salerno, 2000, p. 433-444.
- PEEBLES, Phillip James Edwin, “Dark matter”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112, n° 40, 2015, p. 12246-12248.
- PLATON, *Lois*, VII, 822.
- PLATON, *Phédon*, 65a-66a ; 78c-79d.
- PLATON, *Timée*, 29b-d ; 47a-47c.
- PTOLEMEE, *Almageste*, Pierre Paquette (trad.), disponible en ligne sur : <https://ecliptiqc.ca/Almageste.php> (consulté le 2 juillet 2023).
- PROCLUS, *Commentaire sur le Timée*, I.
- RIBAS, Marie-Noëlle, « Aristote, père de l’astrophysique scientifique », *Revue d’Histoire des Sciences*, vol. 71, n° 1, 2018, p. 5-24.
- ROBERTS, M. S. & WHITEHURST, R. N., “The rotation curve and geometry of M31 at large galactocentric distances”, *Astrophysical Journal*, vol. 201, 1975, p. 327-346.
- ROGSTAD, D. H., LOCKHART, I. A., & WRIGHT, M. C. H., “Aperture-synthesis observations of HI in the galaxy M83”, *Astrophysical Journal*, vol. 193, 1974, p. 309-319.
- RUBIN, Vera C., FORD, W. Kent, Jr. & THONNARD, Norbert, “Extended rotation curves of high-luminosity spiral galaxies. IV. Systematic dynamical properties,  $S_a \rightarrow S_c$ ”, *Astrophysical Journal*, vol. 225, 1978, p. L107-L111.
- SCOTT, James, « The Ethics of the Physics in Seneca’s “Natural Questions” », *The Classical Bulletin*, vol. 75, n° 1, 1999, p. 55-68.
- SENEQUE, *Questions naturelles*, Paul Oltramare (trad. et éd.), Paris, Les Belles Lettres, coll. « Collection des Universités de France », 1929, 353 p.
- SIMPLICIUS, *Commentaire sur la Physique d’Aristote*, II, 2.

STAHL, Gisela, « Die *Naturales Quaestiones* Senecas. Ein Beitrag zum Spiritualisierungsprozeß der römischen Stoa », *Hermes*, vol. 92, 1964, p. 425-454.