

# Extension de la méthodologie des programmes de recherche scientifique d'Imre Lakatos

Nicolae Sfetcu

23.11.2019

Sfetcu, Nicolae, « Extension de la méthodologie des programmes de recherche scientifique d'Imre Lakatos », SetThings (23 novembre 2019), URL = <https://www.setthings.com/fr/extension-de-la-methodologie-des-programmes-de-recherche-scientifique-dimre-lakatos/>

Email: [nicolae@sfetcu.com](mailto:nicolae@sfetcu.com)



Cet article est sous licence Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International. Pour voir une copie de cette licence, visitez <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

Une traduction partielle de Sfetcu, Nicolae, "Epistemologia gravitației experimentale – Raționalitatea științifică", SetThings (1 august 2019), MultiMedia Publishing (ed.), ISBN: 978-606-033-234-3, DOI: 10.13140/RG.2.2.15421.61925, URL = <https://www.setthings.com/ro/e-books/epistemologia-gravitatiei-experimentale-rationalitatea-stiintifica/>

<b>MÉTHODOLOGIE DE LAKATOS - RATIONALITÉ SCIENTIFIQUE .....</b>	<b>2</b>
<b>L'EXTENSION NATURELLE DE LA MÉTHODOLOGIE DE LAKATOS.....</b>	<b>6</b>
<b>PROGRAMMES BIFURQUÉS .....</b>	<b>7</b>
<b>PROGRAMMES UNIFICATEURS .....</b>	<b>8</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>10</b>

## Méthodologie de Lakatos - Rationalité scientifique

La relativité générale et la mécanique quantique sont des *paradigmes au sens de Kuhn*.<sup>1</sup> Les deux coexistent simultanément. Mais dans le schéma de Kuhn, il n'existe aucune situation dans laquelle deux paradigmes simultanés coexistent pacifiquement. Le paradigme de Kuhn est défini principalement d'un point de vue sociologique.<sup>2</sup> En ce sens, la « famille » des relativistes coexiste pacifiquement et simultanément avec la « famille » des théoriciens de la physique quantique, pendant près de cent ans, sans grande interaction entre eux. Dans les universités, les deux paradigmes sont enseignés. En outre, les deux paradigmes ont une caractéristique commune : la revendication de la totalité, l'universalité. Les théoriciens quantiques considèrent que le rôle de l'observateur et l'interprétation statistique correspondante ne sont correctement décrits que dans la théorie quantique. En même temps, les partisans de la théorie (métrique) de la relativité générale considèrent que l'interaction gravitationnelle est universelle et doit être représentée par espace-temps géométrique incurvé, qui influence à son tour la gravité.

Les deux paradigmes ci-dessus sont essentiellement incompatibles du point de vue du système d'observation.<sup>3</sup> Malgré l'incompatibilité, les deux paradigmes sont traditionnellement appliqués dans différents domaines, à savoir la macrophysique et la microphysique. Les deux paradigmes ne présentent pas d'anomalies décisives et sont extrêmement efficaces et respectés. En outre, il n'y a pas de concurrence entre les deux paradigmes. Il s'avère que *cette situation actuelle en physique n'est pas compatible avec le schéma de Kuhn pour la structure des révolutions scientifiques*.

Lakatos a proposé une méthodologie pour étudier l'évolution de la science par le biais de programmes de recherche, une combinaison de la falsifiabilité de Popper, des révolutions scientifiques de Kuhn et de la tolérance méthodologique de Feyerabend.<sup>4</sup> Le concept de Lakatos prend en compte un certain nombre de théories incluses dans un programme de recherche, dans lequel chaque nouvelle théorie découle de l'ajout de clauses auxiliaires (ou de réinterprétations sémantiques) des théories existantes pour expliquer certaines anomalies. Une telle nouvelle théorie est théoriquement progressive si elle a un contenu empirique excessif par rapport aux théories existantes (si elle prédit un fait nouveau), et est empiriquement progressive si certaines de ces prédictions sont confirmées (elle produit de nouveaux faits). Une nouvelle théorie est progressive à la fois théorique et empirique, autrement dégénéré. Il est considéré « scientifique

---

<sup>1</sup> Thomas S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, 3rd edition (Chicago, IL: University of Chicago Press, 1996).

<sup>2</sup> Kuhn, 10.

<sup>3</sup> Jürgen Audretsch, « Quantum Gravity and the Structure of Scientific Revolutions », *Zeitschrift Für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 12, n° 2 (1 septembre 1981): 322-39, <https://doi.org/10.1007/BF01801202>.

<sup>4</sup> Imre Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes: Volume 1: Philosophical Papers* (Cambridge University Press, 1980).

» s'il est au moins théoriquement progressif. Une théorie de la série est « falsifiée » lorsqu'elle est remplacée par une théorie au contenu plus corroboré.

Il n'y a pas de limite de temps pour l'évaluation finale d'un programme ; Pour lui, ni les « réfutations » de Popper ni les « crises » de Kuhn ne sont pas applicables. Un nouveau programme de recherche (un nouveau concept scientifique, par exemple) bénéficie d'une certaine tolérance méthodologique. Les expériences « cruciales » ne peuvent être considérées comme décisives « qu'après une longue rétrospective » : « La découverte d'une incohérence - ou d'une anomalie - ne devrait pas arrêter immédiatement le développement d'un programme : il peut être rationnel de mettre l'incohérence dans une certaine mise en quarantaine, et continuer avec l'heuristique positive du programme. » Ainsi, les ellipses de Kepler ont été reconnues comme une preuve cruciale pour Newton et contre Descartes cent ans après le *Principia* de Newton.<sup>5</sup> Et le comportement anormal du périhélie de Mercure est connu depuis des décennies comme une anomalie dans le programme de Newton, mais seule l'élaboration de la théorie d'Einstein en a fait une « réfutation » du programme de recherche de Newton.

Pour Lakatos, l'histoire de la science est une histoire des programmes de recherche concurrents (« paradigmes »), mais n'inclut pas nécessairement les périodes kuhniennes de science normale, permettant ainsi la coexistence simultanée de théories concurrentes même si la nouvelle théorie a, pendant une période pouvant durer des décennies, un pouvoir heuristique inférieur.

L'heuristique est un concept central de la philosophie de Lakatos. Il nous indique les voies de recherche à éviter (heuristiques négatives) et les voies à suivre (heuristiques positives), en définissant le « cadre conceptuel » (et, par conséquent, le langage). L'heuristique négative nous interdit de nous diriger *modus tollens* vers le « noyau dur » du programme. À l'aide d'heuristiques positives, on peut articuler ou même inventer des « hypothèses auxiliaires » qui forment une ceinture de protection autour de ce noyau, qui doivent résister aux tests et qui doivent être ajustées et même remplacées pour défendre le noyau.

Alors que les progrès théoriques (tels que décrits par Lakatos) peuvent être immédiats, les progrès empiriques peuvent ne pas être vérifiés longtemps, et une longue série de « réfutations » peut survenir dans un programme de recherche avant que les hypothèses auxiliaires croissantes, avec un contenu approprié, ou la revue des faux « faits », faire du programme une réussite. L'heuristique positive ignore les exemples réels, les données « disponibles », étant basée sur les « modèles » prédéterminés des chercheurs du programme de recherche, qui peuvent être modifiés et même remplacés lors de la poursuite du développement du programme. Dans cette évolution, les « réfutations » n'ont aucune pertinence, elles sont prévisibles et surmontées par la stratégie de recherche.

---

<sup>5</sup> Isaac Newton, « *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, I Ed. », The British Library, 1687, <https://www.bl.uk/collection-items/newtons-principia-mathematica>.

Selon Lakatos, « Cette méthodologie offre une reconstruction rationnelle de la science. Le mieux est de la présenter en contraste avec la falsifiabilité et le conventionnalisme. »<sup>6</sup> L'histoire des sciences est l'histoire des programmes de recherche plutôt que des théories, ce qui justifie en partie l'idée que l'histoire des sciences est l'histoire des cadres conceptuels ou du langage scientifique. « Un programme avance théoriquement si la nouvelle théorie résout l'anomalie et est vérifiable indépendamment en faisant de nouvelles prédictions, et il avance empiriquement si au moins une de ces nouvelles prédictions est confirmée. Un programme peut progresser, à la fois théoriquement et empiriquement, même si toutes les théories qu'il produit sont rejetées. Un programme dégénère si ses théories successives ne sont pas théoriquement progressives (car elles ne prédisent pas de nouveaux faits) ou empiriquement (car les nouvelles prédictions sont réfutées) ». <sup>7</sup>

Les modèles dans les programmes de recherche sont des ensembles de conditions idéalisées mais de plus en plus proches de la réalité, et éventuellement des théories observationnelles, utilisées au cours du programme pour contribuer à son développement. Les réfutations de ces modèles sont prévues dans la stratégie de développement (heuristiques positives), sont non pertinentes et « digérées » par le modèle suivant. Ainsi, « les difficultés d'un programme sont plutôt d'ordre mathématique qu'empirique ». Les réfutations des modèles sont plutôt des vérifications (corroborations) de l'approximation du modèle de réalité, de son pouvoir heuristique. Selon la méthodologie, les premiers modèles sont tellement idéalisés qu'ils ne correspondent peut-être pas du tout à la réalité.

Selon Barry Gholson et Peter Barker, la méthodologie de Lakatos suggère que les programmes de recherche évoluent d'un état initial qui ressemble à l'instrumentalisme à un état mature qui ressemble au réalisme. Dans le programme de recherche de Newton, Lakatos indique notamment que la première théorie d'un programme peut être tellement idéalisée qu'elle ne représente rien (le signe distinctif de l'instrumentalisme). <sup>8</sup> Le remplacement de la théorie par de nouvelles théories successives au fur et à mesure de l'avancement du programme transforme le modèle initial en un candidat de plus en plus plausible à la réalité. Une partie importante du programme heuristique consiste en des recommandations pour l'incorporation de nouvelles caractéristiques, absentes dans la théorie initiale, mais nécessaires pour les représentations dans le monde réel. Ainsi, les caractéristiques instrumentales et réalistes du programme de recherche Lakatos sont incompatibles avec les catégories mutuellement exclusives présentées par les empiristes logiques. <sup>9</sup>

---

<sup>6</sup> Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 110.

<sup>7</sup> Nicolae Sfetcu, « Reconstructia Ratională a Stiintei Prin Programe de Cercetare » (2019), <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.24667.21288>.

<sup>8</sup> Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 50-51.

<sup>9</sup> Barry Gholson et Peter Barker, « Kuhn, Lakatos, and Laudan: Applications in the history of physics and psychology », *American Psychologist* 40, n° 7 (1985): 755-69, <https://doi.org/10.1037/0003-066X.40.7.755>.

Lakatos décrit un programme de recherche comme suit :

« Il consiste en une série de théories en développement. De plus, cette série a une structure. Il a un noyau dur, tel que les trois lois du mouvement et la loi de la gravité dans le programme de recherche de Newton, et possède une heuristique, qui inclut un ensemble de techniques de résolution des problèmes. (...) Enfin, un programme de recherche comporte une large ceinture d'hypothèses auxiliaires à partir desquelles nous établissons les conditions initiales. (...) J'appelle cette ceinture une ceinture de protection car elle protège le noyau dur des réfutations : les anomalies ne sont pas considérées comme des réfutations du noyau dur, mais des hypothèses de la ceinture de protection. (...) la ceinture de protection est constamment modifiée, élargie ou compliquée, tandis que le noyau dur reste intact. »<sup>10</sup>

---

<sup>10</sup> Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 179.

## L'extension naturelle de la méthodologie de Lakatos

Les programmes de recherche permettent de développer des théories plus complexes. Barry Gholson et Peter Barker estiment que les termes peuvent être appliqués aux théories individuelles et aux programmes.<sup>11</sup> Si cela s'applique aux théories d'un programme de recherche, j'estime qu'elles deviennent à leur tour des programmes de recherche, que l'on peut appeler des *sous-programmes de recherche*.

Contrairement aux révolutions scientifiques de Kuhn, Lakatos a supposé que l'existence simultanée de plusieurs programmes de recherche fût la norme. La science est actuellement confrontée à une situation aussi inhabituelle : deux théories incompatibles, mais toutes deux acceptées par la communauté scientifique, décrivent la même réalité de deux manières différentes. La mécanique quantique régit les phénomènes de petites dimensions de la physique des particules élémentaires, à des vitesses bien inférieures à la vitesse de la lumière et des énergies élevées, et la relativité générale traite le macro-univers, à des vitesses proches de la vitesse de la lumière et des petites énergies. Ainsi, un problème de sous-détermination en physique s'est posé. La gravitation quantique tente de compléter la révolution scientifique en physique amorcée au XIXe siècle, en vue de l'unification de toutes les forces fondamentales, en fusionnant les deux cadres de la physique quantique et de la relativité générale. Les efforts des physiciens dans cette tentative ont abouti à une grande variété d'approches, de techniques et de théories, dont les plus connues sont la théorie des cordes et la gravité quantique à boucles. Mais l'évolution dans cette direction est très lente et semée d'incertitudes et de conflits.

Le problème de la sous-détermination implique que plus d'une théorie est compatible avec des données empiriques. La sous-détermination peut être relative aux données actuellement disponibles (transitoire ou sous-détermination scientifique), auquel cas les théories peuvent différer en termes de prédictions non vérifiées, ou de sous-détermination entre théories ou formulations théoriques concernant toutes les données possibles (une « sous-détermination permanente »), quand toutes leurs prédictions sont identiques. Une sous-détermination permanente disparaît (sans signification réelle) dans le cas de l'approche instrumentiste si les théories ne sont individualisées que par leur contenu empirique.<sup>12</sup> Mais si nous supposons que les formulations des théories alternatives décrivent différents scénarios, la sous-détermination doit être considérée comme réelle.

Quine affirme que deux théories logiquement incompatibles peuvent être à la fois compatibles avec les données<sup>13</sup> mais que, s'il existe une correspondance entre les formulations théoriques, elles ne décrivent pas en fait des théories différentes, ce sont des variantes différentes de la

---

<sup>11</sup> Gholson et Barker, « Kuhn, Lakatos, and Laudan ».

<sup>12</sup> Keizo Matsubara, « Realism, Underdetermination and String Theory Dualities », *Synthese* 190, n° 3 (2013): 471–489.

<sup>13</sup> Willard V. Quine, « On Empirically Equivalent Systems of the World », *Erkenntnis* 9, n° 3 (1975): 313–28.

même théorie (« reconstruction des prédicats »). Matsubara affirme que les formulations peuvent représenter deux théories alternatives vraies malgré la similitude structurelle, car il existe des différences sémantiques pertinentes qui sont perdues dans la cartographie de la théorie formalisée de manière logique ou mathématique.<sup>14</sup>

Les programmes de recherche peuvent en même temps concurrencer des théories uniques, des théories uniques entre eux ou des programmes de recherche entre eux. On peut parler d'une « **unité de recherche** » en tant que théorie singulière ou d'un programme de recherche.

### **Programmes bifurqués**

Barry Gholson et Peter Barker déclarent que la méthodologie de base de Lakatos n'est pas un moyen efficace de « représenter la métaphysique sous-jacente identifiée par les kuhniens et les popperiens »<sup>15</sup> en raison de l'existence simultanée de plusieurs théories de type Lakatos qui illustrent le même ensemble d'engagements fondamentaux. Selon eux, le programme de recherche consiste en une série de théories successives qui forment des chaînes, mais jamais de groupes ou de familles de théories liées pouvant être en concurrence.

À mon avis, c'est une fausse déclaration. Lakatos n'a jamais nié de telles séquences. De plus, on peut être développé naturellement dans la méthodologie de Lakatos une telle théorie des groupes, appelée par eux « clusters ». Plus tard, Laudan a développé cette idée d'une série de chaînes théoriques incluses dans une seule entité historique déterminée par la dominance d'un certain ensemble d'engagements métaphysiques.<sup>16</sup> Dans certains cas, des théories contradictoires peuvent être développées sur la base des mêmes engagements fondamentaux.

La méthodologie de Lakatos n'exclut pas ces situations, mais elles peuvent résulter d'une manière très naturelle si l'on considère que ces théories partent du même noyau dur (des mêmes heuristiques négatives) mais utilisent une stratégie de développement différente (des heuristiques positives). J'appelle ces théories « **bifurcations** », respectivement **théories bifurquées** ou même **programmes bifurqués** dans une approche à long terme.

Lakatos lui-même note qu'un programme de recherche peut être bifurqué à un moment donné:

« Mais nous ne devons pas oublier que deux théories spécifiques, bien que mathématiquement (et observationnelles) équivalentes, pourraient être incorporées dans différents programmes de recherche rivaux et que le pouvoir heuristique positif de ces programmes pourrait être différent...

---

<sup>14</sup> Matsubara, « Realism, Underdetermination and String Theory Dualities ».

<sup>15</sup> Gholson et Barker, « Kuhn, Lakatos, and Laudan ».

<sup>16</sup> L. Laudan, *Progress and its Problems: Toward a Theory of Scientific Growth* (University of California Press, 1977).

(un bon exemple est la preuve d'équivalence entre l'approche de Schrödinger et celle de Heisenberg en matière de physique quantique). »<sup>17</sup>

### **Programmes unificateurs**

Immédiatement après 1900, la quantification de Planck remettait en question toute la physique classique. Jusque-là, la physique s'était développée en appliquant, en élargissant, en modifiant ou en réinterprétant les théories physiques établies existantes, dans une chaîne unidimensionnelle. Mais la physique - en particulier la mécanique newtonienne et l'électrodynamique Maxwell-Lorentz - n'était plus valide selon les résultats de Planck. Une nouvelle théorie était nécessaire, mais cela ne pouvait plus être obtenu par l'extension ou la modification des théories physiques existantes, car elles semblaient fondamentalement fausses. Ainsi, Einstein a été obligé d'inventer une nouvelle théorie fondamentale, essayant d'unifier les théories actuelles. C'est ainsi que la relativité restreinte est apparue, par nécessité.

Par la suite, l'unification de toutes les forces, par une approche quantique de la relativité générale, est devenue la principale préoccupation de la gravité quantique.<sup>18</sup> Il existe des précédents à cet égard: de la théorie électromagnétique classique et la mécanique classique, deux nouvelles théories unificateures indépendantes ont émergé, la relativité restreinte et la mécanique quantique; de la relativité restreinte et la mécanique quantique, a résulté la théorie quantique des champs; et à l'heure actuelle, on espère parvenir à une nouvelle théorie unificatrice, à partir de la relativité générale (une généralisation de la relativité restreinte) et de la théorie quantique des champs. Ces théories unificatrices combinent les théories à partir desquelles elles se sont formées dans un nouveau cadre commun.

Dans la méthodologie de Lakatos, à propos de ces théories unificatrices, on peut affirmer qu'elles appartiennent à un nouveau programme de recherche avec des heuristiques négatives et positives différentes de celles des **programmes de recherche unifiés**, mais que la théorie correspondante est réduite aux théories unifiées sous certaines conditions. J'appelle un tel programme un « **programme unificateur** » (« **unificateur** ») résultat du concept d'unification.

Pour être accepté, un programme unificateur doit avoir une plus grande puissance heuristique (théorique ou expérimentale) que ses programmes composants.

Ainsi, par la théorie des cordes, on tente d'unifier la théorie générale de la relativité d'Einstein avec la mécanique quantique, de manière à maintenir le lien explicite avec la théorie quantique et la description à énergie réduite de l'espace-temps dans la relativité générale. Aux basses énergies, il donne naturellement naissance à la relativité générale, aux théories de jauge, aux champs scalaires et aux fermions chiraux. La théorie des cordes intègre plusieurs idées qui ne

---

<sup>17</sup> Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 33-34.

<sup>18</sup> Claus Kiefer, « Quantum Gravity — A Short Overview », in *Quantum Gravity: Mathematical Models and Experimental Bounds*, éd. par Bertfried Fauser, Jürgen Tolksdorf, et Eberhard Zeidler (Basel: Birkhäuser Basel, 2007), 2, [https://doi.org/10.1007/978-3-7643-7978-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-7643-7978-0_1).



disposent pas encore de preuves expérimentales, mais qui permettraient à la théorie d'être considérée comme un candidat unificateur pour la physique au-delà du modèle standard.<sup>19</sup>

Matsubara apprécie la méthodologie de Lakatos dans l'interprétation d'Hacking, mais il note également le manque de fusion des différents programmes de recherche dans la méthodologie de Lakatos, donnant comme exemples de théories unifiées la mécanique ondulante de Schrodinger et la mécanique matricielle de Heisenberg.<sup>20</sup> Il envisage également la possibilité d'une fusion des idées issues de la théorie des cordes et de certains de ses concurrents, telles que la gravitation quantique à boucles.

En raison de la complexité et de la grande diversité des phénomènes cosmologiques, les scientifiques construisent des modèles basés sur des programmes de recherche individualisés, en fonction du phénomène spécifique (phénomènes spécifiques aux trous noirs, par exemple), en prenant comme noyau dur les principes de la relativité générale ou la mécanique quantique. Par la suite, ces programmes de recherche tentent de s'unifier au sein des programmes de recherche unificateurs, tels que les trous noirs, ou même plus large, pour les singularités gravitationnelles ou spatio-temporelles. Pour chaque phénomène, il existe plusieurs programmes de recherche alternatifs, qui ne sont finalement reconnus que ceux qui ont un pouvoir heuristique plus élevé, mais il existe souvent des groupes de chercheurs plus petits qui n'abandonnent même pas les alternatives ayant un pouvoir heuristique plus faible.

Les programmes de recherche unificateurs peuvent être développés simultanément avec les programmes qui seront unifiés (et dans ce cas, on peut parler de programmes unifiés en tant que « **sous-programmes de recherche** »), ou plus tard, en choisissant parmi plusieurs programmes ceux qui conviennent le mieux avec le programme unificateur. C'est un moyen largement utilisé ces dernières années. Lorsqu'un concept évolue longtemps au travers de programmes de recherche indépendants, sans un programme unificateur pour les inclure, nous ne parlons pas de la méthodologie d'un programme de recherche donné, mais d'une reconstruction rationnelle de la science à laquelle ces programmes indépendants sont en concurrence.

---

<sup>19</sup> David Tong, *String Theory* (University of Cambridge, 2009), <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/string/string.pdf>.

<sup>20</sup> Keizo Matsubara, *Stringed Along Or Caught in a Loop?: Philosophical Reflections on Modern Quantum Gravity Research* (Filosofiska Institutionen, Uppsala universitet, 2012).

## Bibliographie

- Audretsch, Jürgen. « Quantum Gravity and the Structure of Scientific Revolutions ». *Zeitschrift Für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 12, n° 2 (1 septembre 1981): 322-39. <https://doi.org/10.1007/BF01801202>.
- Gholson, Barry, et Peter Barker. « Kuhn, Lakatos, and Laudan: Applications in the history of physics and psychology ». *American Psychologist* 40, n° 7 (1985): 755-69. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.40.7.755>.
- Kiefer, Claus. « Quantum Gravity — A Short Overview ». In *Quantum Gravity: Mathematical Models and Experimental Bounds*, édité par Bertfried Fauser, Jürgen Tolksdorf, et Eberhard Zeidler, 1-13. Basel: Birkhäuser Basel, 2007. [https://doi.org/10.1007/978-3-7643-7978-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-7643-7978-0_1).
- Kuhn, Thomas S. *The Structure of Scientific Revolutions*. 3rd edition. Chicago, IL: University of Chicago Press, 1996.
- Lakatos, Imre. *The Methodology of Scientific Research Programmes: Volume 1: Philosophical Papers*. Cambridge University Press, 1980.
- Laudan, L. *Progress and its Problems: Toward a Theory of Scientific Growth*. University of California Press, 1977.
- Matsubara, Keizo. « Realism, Underdetermination and String Theory Dualities ». *Synthese* 190, n° 3 (2013): 471–489.
- . *Stringed Along Or Caught in a Loop?: Philosophical Reflections on Modern Quantum Gravity Research*. Filosofiska Institutionen, Uppsala universitet, 2012.
- Newton, Isaac. « Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, I Ed. » The British Library, 1687. <https://www.bl.uk/collection-items/newtons-principia-mathematica>.
- Quine, Willard V. « On Empirically Equivalent Systems of the World ». *Erkenntnis* 9, n° 3 (1975): 313–28.
- Sfetcu, Nicolae. « Reconstructia Ratională a Stiintei Prin Programe de Cercetare », 2019. <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.24667.21288>.
- Tong, David. *String Theory*. University of Cambridge, 2009. <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/string/string.pdf>.