

# Teste și anomalii ale teoriilor clasice ale gravitației non-relativiste

Nicolae Sfetcu

03.07.2019

Sfetcu, Nicolae, "Teste și anomalii ale teoriilor clasice ale gravitației non-relativiste", SetThings (3 iulie 2019), URL = <https://www.setthings.com/ro/teste-si-anomalii-ale-teoriilor-clasice-ale-gravitatiei-non-relativiste/>

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



Acest articol este licențiat Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International. Pentru a vedea o copie a acestei licențe, vizitați <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>.

<b>TESTE ALE TEORIILOR GRAVITAȚIEI .....</b>	<b>2</b>
<b>TESTE PROPUSE DE NEWTON .....</b>	<b>2</b>
<b>TESTE ALE TEORIILOR GRAVITAȚIEI.....</b>	<b>5</b>
<b>ANOMALII ALE GRAVITAȚIEI NEWTONIENE .....</b>	<b>7</b>
<b>PUNCTUL DE SATURAȚIE ÎN GRAVITAȚIA NEWTONIANĂ.....</b>	<b>8</b>
<b>BIBLIOGRAFIE.....</b>	<b>11</b>

## Teste ale teoriilor gravitației

### Teste propuse de Newton

În prima ediție a Principiei, Newton a considerat că experimentele cu **pendulul** i-ar permite să descifreze diferitele tipuri de forță de rezistență și variația lor cu viteza. Recunoaște eșecul acestor experimente, în edițiile a doua și a treia, apelând apoi la căderea verticală a obiectelor cu forțele de rezistență datorate inerției mediului. Intenția sa era ca celelalte tipuri să fie abordate folosind diferențele dintre observații și această lege.<sup>1</sup> Dar și această abordare a fost greșită, întrucât nu există o specie distinctă de forță de rezistență, ci doar un rezultat al interacțiunii cu mediul inerțial și vâscos. Această interacțiune fiind foarte complexă, Newton nu a putut deduce o lege pentru forța de rezistență, a determinat doar empiric relații pentru corpuri de diferite forme.<sup>2</sup>

Newton susține în legea gravitației proporționalitatea strictă a "cantității de materie" cu greutatea, dar experimentele pendulului indică doar faptul că masa inerțială este proporțională cu greutatea.<sup>3</sup> Masa unui obiect este o caracteristică intrinsecă a acestuia, în timp ce greutatea este o caracteristică extrinsecă, depinzând de câmpurile gravitaționale generate de alte obiecte. Experimentele cu pendulul sunt descrise în detaliu în Cartea III, Propoziția 6, unde Newton afirmă: "Toate corpurile gravitează spre fiecare dintre planete și, la orice distanță dată de centrul oricărei planete, greutatea oricărui corp, indiferent de planeta respectivă, este proporțională cu cantitatea de materie pe care corpul o conține,"<sup>4</sup> și apoi descrie experimentele sale.<sup>5</sup>

Newton afirmă, în contradicție cu viziunea carteziană, că fiecare dintre proprietățile universale și esențiale pentru materie - și anume extensie, mobilitate, duritate, impenetrabilitate și masă - este cunoscută "numai prin simțuri". Dar, din afirmația sa că proprietățile materiei sunt cunoscute "numai prin experimente", rezultă că Newton nu acceptă o viziune naiv-empirică, ci mai degrabă o concepție sofisticată dublă a epistemologiei materiei,<sup>6</sup> negând viziunea carteziană că putem determina proprietățile universale ale materiei doar *a priori* sau numai prin rațiune, și susținând că sunt necesare experimente ghidate de concepte în teoria fizică pentru a determina proprietățile materiei: "Aceasta [masa] poate fi întotdeauna cunoscută

---

<sup>1</sup> Isaac Newton, „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, III Ed.”, *Science* 177, nr. 4046 (1726): 749, <https://doi.org/10.1126/science.177.4046.340>.

<sup>2</sup> L. D. Landau și E. M. Lifshitz, *Fluid Mechanics: Volume 6*, 2 edition (Amsterdam u.a: Butterworth-Heinemann, 1987), 31–36, 168–79.

<sup>3</sup> Newton, „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, III Ed.”, 701, 806–9.

<sup>4</sup> Newton, 806.

<sup>5</sup> Newton, 806–7.

<sup>6</sup> Andrew Janiak, *Newton as Philosopher* (Cambridge University Press, 2010).

din greutatea unui corp, deoarece - făcând experimente foarte precise cu pendulele - am găsit că este proporțională cu greutatea."<sup>7</sup> Conceptul de materie al lui Newton a implicat o respingere fundamentală a filosofiei mecaniciste. Experimentele cu pendulul sunt descrise, de asemenea, în Propoziția 24 din Cartea 2, în al corolarele cinci și șapte.

În experimentele cu pendulul, comparând numărul de oscilații ale bobilor pendulului solid și ale pendulului gol, Newton a încercat să determine modul în care un eter care nu acționează numai pe suprafața unui corp ci și pe părțile sale interioare, afectează aceste pendule. Așa a ajuns Newton să creadă că nu există eter și a favorizat ideea din Prefața *Principiilor*, a universalității gravitației.<sup>8</sup>

Pentru a discuta efectele care disting mișcarea absolută de mișcarea relativă, Newton apelează la experimentul de gândire al "**găleții de apă**", descris într-un paragraf cu privire la "efectele care disting mișcarea absolută de mișcarea relativă". Newton afirmă aici că "mișcarea circulară reală și absolută a apei... poate fi măsurată prin această încercare."<sup>9</sup> Suspended o găleată de apă cu o frânghie și răsuciți mult găleata într-o direcție; apoi lăsați frânghia să își revină. Găleata se rotește acum, iar suprafața apei va fi inițial plată, dar în raport cu găleata se rotește. Prin frecare cu găleata care se rotește, apa începe treptat să se rotească și ea, echilibrând în cele din urmă viteza găleții, astfel încât mișcarea față de găleată să ajungă treptat zero. Dar, pe măsură ce rotația relativă a apei față de găleată scade, "efortul său de a se retrage de pe axa mișcării" crește în mod corespunzător. Newton observă că accelerația (de exemplu, rotația) este detectabilă empiric prin prezența efectelor inerțiale, chiar și în absența unei schimbări a relațiilor obiect. De asemenea, Newton susține, contrar lui Descartes, că nu putem înțelege mișcarea adevărată a apei din găleată ca fiind o schimbare a relațiilor dintre apă și un corp înconjurător (în acest caz, găleata). Relația dintre apă și găleată rămâne aceeași, în ciuda faptului că apa are mișcare adevărată, așa cum este indicat de prezența efectelor inerțiale. Deci, mișcarea adevărată a unui corp nu poate fi înțeleasă în termeni de schimbări în relațiile sale cu alte obiecte. Spațiul absolut ne permite să surprindem ceea ce este adevărata mișcare, conform lui Newton.<sup>10</sup>

Pentru Newton, se pare că forța centrifugă este criteriul și măsura rotației absolute. El definește rotația absolută ca fiind cea care produce un astfel de efect, criticând definiția lui Descartes a "mișcării în sensul filosofic" ca mișcare a unui corp în raport cu corpurile

---

<sup>7</sup> Newton, „*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, III Ed.”, 404.

<sup>8</sup> Newton, 382–83.

<sup>9</sup> Isaac Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, II Ed., 1713, 21, <https://www.e-rara.ch/zut/338618>.

<sup>10</sup> Janiak, *Newton as Philosopher*.

învecinate. Experimentul arată că efectul dinamic este independent de mișcarea relativă dintre apă și găleată.<sup>11</sup> Newton demonstrează în final că, deoarece depinde de forțe fizice identificabile, definiția lui poate fi aplicată în mod consecvent chiar și în absența corpurilor de referință observabile, pentru că dacă două corpuri legate de un cordon sunt singure într-un univers altfel gol, tensiunea pe cablu încă oferă un criteriu și o măsură a cantității de mișcare circulară adevărată.<sup>12</sup>

Un alt experiment de gândire al lui Newton a presupus **două corpuri legate de un cordon**,<sup>13</sup> care se rotesc în jurul centrului lor de greutate comun, în lipsa altor corpuri care să poată influența mișcările lor. "Efortul de a se retrage de pe axa mișcării ar putea fi cunoscut din tensiunea cordonului, și astfel cantitatea de mișcare circulară ar putea fi calculată." Respectiv, rotația absolută a unui corp nu este numai independentă de rotația sa în raport cu corpurile contigue, ci este independentă și față de orice rotație relativă.

Potrivit lui Ernst Mach, la două sute de ani după Newton, dacă Newton a neglijat corpurile învecinate, a referit toate mișcările la "stelele fixe". Dar dacă putem deduce din legile lui Newton cum se vor comporta corpurile în absența stelelor fixe, nu putem deduce dacă, în aceste circumstanțe, ele vor rămâne valabile oricum. Pentru Einstein, sub influența lui Mach, argumentul lui Newton ilustrează "defectul epistemologic" inerent al fizicii newtoniene.<sup>14</sup>

În Propunerile 26-29, Cartea 3, din *Principia* 1687,<sup>15</sup> Newton a dezvoltat un tratament special al influenței forței gravitaționale a Soarelui asupra **mișcării Lunii** în jurul Pământului. Tycho Brahe descoperise o variație bi-lunară a vitezei lunare după ce a dispărut o eclipsă lunară așteptată. În mod remarcabil, Newton nu a considerat mișcarea reală a Lunii, despre care se știe că este aproximată de modelul lui Horrocks de o elipsă de precesie cu Pământul într-un singur focar. El a considerat un model idealizat în care Luna se rotește într-o orbită circulară în jurul Pământului în absența perturbației solare. A calculat schimbarea orbitei din cauza acestei perturbații și a obținut rezultate care erau în acord cu observația lui Brahe. Acesta a fost unul dintre marile triumfuri ale teoriei gravitaționale a lui Newton, dezvoltat în continuare de Euler,<sup>16</sup> și de G Hill.<sup>17</sup>

---

<sup>11</sup> Newton, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, II Ed., 21.

<sup>12</sup> Newton, 22.

<sup>13</sup> I. Bernard Cohen și George E. Smith, *The Cambridge Companion to Newton* (Cambridge University Press, 2006), 44.

<sup>14</sup> Cohen și Smith, *The Cambridge Companion to Newton*.

<sup>15</sup> Isaac Newton, „*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, I Ed.”, The British Library, 1687, <https://www.bl.uk/collection-items/newtons-principia-mathematica>.

<sup>16</sup> Leonhard Euler, *Sol et Luna I: Opera Mechanica Et Astronomica Vol 23*, ed. Otto Fleckenstein, 1956 edition (Basileae: Birkhäuser, 1956), 286–289.

<sup>17</sup> G. W. Hill, „The Collected Mathematical Works of G. W. Hill”, *Nature* 75, nr. 1936 (decembrie 1906): 284–335, <https://doi.org/10.1038/075123a0>.

Teoria lui Newton a avut cel mai mari succes când a fost folosită pentru a prezice existența lui **Neptun** pe baza mișcărilor lui Uranus, care nu puteau fi explicate prin acțiunile celorlalte planete. Calculele lui John Couch Adams și Urbain Le Verrier au prezis poziția generală a planetei, iar calculele lui Le Verrier au condus pe Johann Gottfried Galle la descoperirea lui Neptun.<sup>18</sup>

Teoria gravitației lui Newton este mai bună decât teoria a lui Descartes deoarece teoria lui Descartes a fost refutată (s-a dovedit a fi falsă) în explicarea mișcării planetelor. Teoria lui Newton a fost la rândul ei refutată de periheliul anormal al lui Mercur. Chiar dacă elipsele kepleriene au respins teoria carteziană a vârtejurilor, numai teoria lui Newton ne-a determinat să o respingem; și chiar dacă periheliul lui Mercur a respins gravitația newtoniană, numai teoria lui Einstein ne-a făcut să o respingem. O refuzare nu face decât să indice nevoia urgentă de a revizui actuala teorie, dar nu este un motiv suficient pentru a elimina teoria.

### **Teste ale teoriilor gravitației**

În mod obișnuit, "laboratorul" testelor gravitaționale a fost corpurile cerești, sistemele astrofizice. Dar astfel de teste sunt perturbate de efecte non-gravitaționale. Cel mai utilizat astfel de "laborator" a fost sistemul solar. De curând, oamenii de știință s-au concentrat pe observarea pulsarilor binari pentru verificarea teoriilor gravitaționale, prin observațiile privind variațiile perioadei orbitale, furnizând astfel dovezi indirecte pentru emisia de radiație gravitațională.

Dar experimentatorul nu poate "aranja laboratorul" după nevoile sale, și nici declanșa anumite evenimente atunci când are nevoie de ele. Însă actuala dezvoltare tehnologică începe să permită experimente pure de laborator. Astfel s-a ajuns la construcția detectorilor rezonanți (oscilatori armonici) cu niveluri foarte scăzute de disipare. În cadrul acestor teste de laborator, un tip de experimente este cel pentru verificarea efectelor gravitaționale post-newtoniene. În acest scop, o masă de dimensiuni de laborator este pusă în mișcare (prin rotație sau vibrație) astfel încât să producă în vecinătatea ei un "câmp gravitațional post-newtonian" (câmpuri gravitaționale de tip newtonian produse de energie cinetică sau de presiune). Mișcarea masei este modulată astfel încât semnalul post-newtonian dorit să conducă în mod rezonant oscilațiile detectorului și experimentatorul să monitorizeze modificările rezultate în mișcarea detectorului.<sup>19</sup>

---

<sup>18</sup> John Couch Adams, „On the Perturbations of Uranus (1841-1846). | StJohns”, 1846, 265, <https://www.joh.cam.ac.uk/w16-manuscripts-john-couch-adams-perturbations-uranus-1841-1846>.

<sup>19</sup> Carlton Morris Caves, „Theoretical investigations of experimental gravitation” (phd, California Institute of Technology, 1979), <http://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:03152016-161054898>.

Prin aceste experimente se pot examina numai anumite tipuri de efecte post-newtoniene. Unele efecte post-newtoniene (precum efectele gravitationale neliniare) sunt complet neglijabile. Dar este posibil să se verifice influențele gravitaționale ale vitezei și presiunii. În aceste experimente post-newtoniene se încearcă eliminarea "zgomotului newtonian", efectele câmpul gravitațional newtonian al sursei de laborator care sunt mult mai mari decât cele mai mari efecte post-newtoniene.

## Anomalii ale gravitației newtoniene

Legea lui Newton a gravitației este suficient de precisă pentru scopuri practice. Abaterile sunt mici când cantitățile adimensionale  $\phi/c^2 \ll 1$  și  $(v/c)^2 \ll 1$ , unde  $\phi$  este potențialul gravitațional,  $v$  este viteza obiectelor studiate și  $c$  este viteza luminii.<sup>20</sup> În caz contrar, trebuie utilizată relativitatea generală pentru a descrie sistemul. Legea lui Newton a gravitației este limita gravitațională a relativității generale în condițiile specificate mai înainte.

În privința legii lui Newton, există încă preocupări teoretice actuale: nu există încă un consens privind medierea interacțiunii gravitaționale (dacă există sau nu acțiune la distanță). De asemenea, teoria lui Newton implică o propagare instantanee a interacțiunii gravitaționale, altfel ar apare o instabilitate a orbitelor planetare.

Teoria lui Newton nu a putut explica precesiunea exactă a periheliului orbitelor planetelor, în special pentru planeta Mercur, care a fost detectată mult după ce a murit Newton.<sup>21</sup> Diferența de 43 arcsecunde pe secol apare din observațiile celorlalte planete și din precesia observată cu telescoape avansate în secolul 19.

Deflecția unghiulară a razelor de lumină datorită gravitației, calculată prin utilizarea teoriei lui Newton, este jumătate din deflecția observată de astronomi. Relativitatea generală prezice valori mult mai apropiate de cele observaționale.

În galaxiile spiralate, orbitarea stelelor în jurul centrelor lor pare să nu respecte cu exactitate legea lui Newton de gravitație universală. Astrofizicienii au introdus unele ipoteze ad-hoc pentru punerea de acord a acestui fenomen cu legile lui Newton, presupunând existența unor cantități mari de materie întunecată.

Newton însuși a fost incomodat de conceptul de "acțiune la distanță" pe care îl implicau ecuațiile sale. În 1692, în a treia scrisoare adresată lui Bentley, el a scris: "Un corp care poate acționa asupra altuia la distanță, prin vid, fără medierea a altceva, de și prin care acțiunea și forța lor pot fi transmise una după alta, pentru mine este o absurditate atât de mare încât, cred, niciun om care are în materie filosofică o capacitate de gândire competentă nu ar putea să creadă vreodată în ea."<sup>22 23</sup>

---

<sup>20</sup> Charles W. Misner, Kip S. Thorne, și John Archibald Wheeler, *Gravitation* (W. H. Freeman, 1973), 1049.

<sup>21</sup> Max Born, *Einstein's Theory of Relativity*, Revised edition edition (New York: Dover Publications Inc., 1962), 348.

<sup>22</sup> I. Bernard Cohen, „Isaac Newton's Papers & Letters on Natural Philosophy and Related Documents”, *Philosophy of Science* 27, nr. 2 (1960): 209–211.

<sup>23</sup> Nicolae Sfetcu, *Isaac Newton despre acțiunea la distanță în gravitație - Cu sau fără Dumnezeu?* (MultiMedia Publishing, 2018), <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.24577.97122>.

Newton nu a reușit să emită o teorie fenomenologică, care să fie confirmată experimental, despre cum acționează gravitația, deși a sugerat două ipoteze mecanice în 1675 și 1717. În Scholium General în cea de-a doua ediție a *Principia* din 1713, spunea: "Nu am reușit încă să descopăr cauza fenomenelor acestor proprietăți ale gravitației și nu nascocesc ipoteze... Este suficient că gravitația există într-adevăr și că acționează în conformitate cu legile pe care le-am explicat și că ajută din plin la explicarea tuturor mișcărilor corpurilor cerești."<sup>24</sup>

### **Punctul de saturație în gravitația newtoniană**

La sfârșitul secolului 20 și începutul secolului 21, deveniseră evidente contradicțiile dintre mecanica newtoniană și electrodinamica lui Maxwell (dintre invarianța galileeană și ideea constanței vitezei luminii). O soluție propusă inițial a fost conceptul de eter. Einstein a respins această soluție, interpretând teoriile lui Newton și Maxwell ca fiind atât de fundamentale, fiecare cu modelul său rival, încât singura rezolvare a fost dezvoltarea unei noi teorii unificatoare, cu alt nucleu dur și o euristică pozitivă specifică: relativitatea specială.

Nicholas Maxwell<sup>25</sup> discută șase discrepanțe ale mecanicii newtoniene evidențiate de Einstein<sup>26</sup> (care ar putea fi denumite anomalii în cadrul programului lui Lakatos), și anume:

1. arbitraritatea cadrelor de referință inerțiale și conceptul de spațiu absolut;
2. două legi fundamentale distincte, (a) legea mișcării ( $F = ma$ ) și (b) expresia forței gravitaționale ( $F = Gm_1m_2/d^2$ );
3. arbitraritatea lui (b) fiind dat (a), existând o infinitate de posibilități la fel de bune pentru (b);
4. posibilitatea ca legea forței să fie determinată de structura spațiului și eșecul de a exploata această posibilitate;
5. caracterul ad-hoc al egalității masei inerțiale cu cea gravitațională; și
6. caracterul nenatural al energiei fiind împărțit în două forme, cinetică și potențială.

Einstein explică de ce eșuează încercările de rezolvare a anomaliilor prin ipoteze ad-hoc, și concluzionează: "În consecință, revoluția începută de introducerea câmpului nu a fost finalizată. Apoi s-a întâmplat ca, la începutul secolului ... o a doua criză fundamentală să apară",

---

<sup>24</sup> Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, II Ed.

<sup>25</sup> Nicholas Maxwell, „The Need for a Revolution in the Philosophy of Science”, *Journal for General Philosophy of Science* 33, nr. 2 (1 decembrie 2002): 381–408, <https://doi.org/10.1023/A:1022480009733>.

<sup>26</sup> Albert Einstein, „Autobiographische Skizze”, în *Helle Zeit — Dunkle Zeit: In memoriam Albert Einstein*, ed. Carl Seelig (Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1956), 27–31, [https://doi.org/10.1007/978-3-322-84225-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-322-84225-1_2).



criza generată de începuturile teoriei cuantice, prima fiind dualismul particule/câmpuri în fizica clasică.<sup>27</sup>

În plus, programul clasic al lui Lorentz a fost progresiv până în 1905 - anul în care Einstein și-a publicat teoria relativității speciale.

Nugayev afirmă că programul de cercetare susținut de Einstein a fost mult mai larg, incluzând relativitatea, teoria cuantică și mecanica statistică, pentru unificarea mecanicii și a electrodinamicii.<sup>28</sup>

Majoritatea explicațiilor privind victoria programului lui Einstein de cercetarea asupra celui al lui Lorentz fac referire la experimentul Michelson-Morley.<sup>29</sup> Elie Zahar<sup>30</sup>, pe baza metodologiei lui Lakatos,<sup>31</sup> afirmă că teoriile eterice ale lui Lorentz și teoriile speciale și generale ale relativității lui Einstein au fost dezvoltate în programe diferite concurente. Conform lui Zahar, programul lui Lorentz a fost înlocuit de programul de relativitate al lui Einstein abia în 1915 prin explicarea precesiei periheliului lui Mercur. Doar odată cu dezvoltarea TGR programul lui Einstein a prezis observații care nu puteau fi derivate din cel al lui Lorentz.<sup>32</sup>

Nugayev, argumentând împotriva extensiei lui Zahar a metodologiei lui Lakatos, își propune să explice succesul programului de cercetare al lui Einstein asupra celui al lui Lorentz printr-o extindere diferită a metodologiei lui Lakatos, inclusiv diferită de cea propusă de mine. Astfel, pentru două teorii diferite care încearcă să explice aceleași date experimentale, procesul aplicării comune a celor două teorii pentru rezolvarea unei probleme va fi numit "cruce", în timp ce acestea vor fi numite "teorii încrucișate". Setul de afirmații care descrie relațiile dintre încrucișări va primi numele de "teorie transversală".<sup>33</sup> Nugayev abordează și el ideea unei teorii pe care eu am numit-o "unificatoare", atunci când teoriile trec, prin "contradicții încrucișate". Nugayev numește noua teorie "globală". Conform acestuia, ar exista două moduri logice de elaborare a teoriei globale: "reducționist" și "sintetic".

Nugayev afirmă că nucleeele dure ale lui Lakatos sunt obținute prin convenție. Aici nu sunt de acord cu el. Nucleul dur este stabilit de însuși inițiatorul programului de cercetare care

---

<sup>27</sup> Einstein, 27–31.

<sup>28</sup> R. M. Nugayev, „The History of Quantum Mechanics as a Decisive Argument Favoring Einstein Over Lorentz”, *Philosophy of Science* 52, nr. 1 (1985): 44–63.

<sup>29</sup> Gerald Holton, „Einstein, Michelson, and the «Crucial» Experiment”, *Isis: A Journal of the History of Science* 60 (1969): 132–97.

<sup>30</sup> Elie Zahar, „Why Did Einstein’s Programme Supersede Lorentz’s? (II)”, *British Journal for the Philosophy of Science* 24, nr. 3 (1973): 223–262.

<sup>31</sup> Imre Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes: Volume 1: Philosophical Papers* (Cambridge University Press, 1980).

<sup>32</sup> Nugayev, „The History of Quantum Mechanics as a Decisive Argument Favoring Einstein Over Lorentz”.

<sup>33</sup> Nugayev.

stabilește și strategia de dezvoltare a programului în funcție de euristica negativă. Nucleul dur este ceea ce acesta dorește să rămână neclintit, fiind absolut convins că este corect. În momentul în care ar modifica nucleul dur, practic ar renunța la acel program de cercetare și ar începe un alt program.

## Bibliografie

- Adams, John Couch. „On the Perturbations of Uranus (1841-1846). | StJohns”, 1846. <https://www.joh.cam.ac.uk/w16-manuscripts-john-couch-adams-perturbations-uranus-1841-1846>.
- Born, Max. *Einstein's Theory of Relativity*. Revised edition edition. New York: Dover Publications Inc., 1962.
- Caves, Carlton Morris. „Theoretical investigations of experimental gravitation”. Phd, California Institute of Technology, 1979. <http://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:03152016-161054898>.
- Cohen, I. Bernard. „Isaac Newton's Papers & Letters on Natural Philosophy and Related Documents”. *Philosophy of Science* 27, nr. 2 (1960): 209–211.
- Cohen, I. Bernard, și George E. Smith. *The Cambridge Companion to Newton*. Cambridge University Press, 2006.
- Einstein, Albert. „Autobiographische Skizze”. În *Helle Zeit — Dunkle Zeit: In memoriam Albert Einstein*, ediție de Carl Seelig, 9–17. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1956. [https://doi.org/10.1007/978-3-322-84225-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-322-84225-1_2).
- Euler, Leonhard. *Sol et Luna I: Opera Mechanica Et Astronomica Vol 23*. Ediție de Otto Fleckenstein. 1956 edition. Basileae: Birkhäuser, 1956.
- Hill, G. W. „The Collected Mathematical Works of G. W. Hill”. *Nature* 75, nr. 1936 (decembrie 1906): 123. <https://doi.org/10.1038/075123a0>.
- Holton, Gerald. „Einstein, Michelson, and the «Crucial» Experiment”. *Isis: A Journal of the History of Science* 60 (1969): 132–197.
- Janiak, Andrew. *Newton as Philosopher*. Cambridge University Press, 2010.
- Lakatos, Imre. *The Methodology of Scientific Research Programmes: Volume 1: Philosophical Papers*. Cambridge University Press, 1980.
- Landau, L. D., și E. M. Lifshitz. *Fluid Mechanics: Volume 6*. 2 edition. Amsterdam u.a: Butterworth-Heinemann, 1987.
- Maxwell, Nicholas. „The Need for a Revolution in the Philosophy of Science”. *Journal for General Philosophy of Science* 33, nr. 2 (1 decembrie 2002): 381–408. <https://doi.org/10.1023/A:1022480009733>.
- Misner, Charles W., Kip S. Thorne, și John Archibald Wheeler. *Gravitation*. W. H. Freeman, 1973.
- Newton, Isaac. „Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, I Ed.” The British Library, 1687. <https://www.bl.uk/collection-items/newtons-principia-mathematica>.
- . *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, II Ed.*, 1713. <https://www.e-rara.ch/zut/338618>.
- . „Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, III Ed.” *Science* 177, nr. 4046 (1726): 340–42. <https://doi.org/10.1126/science.177.4046.340>.
- Nugayev, R. M. „The History of Quantum Mechanics as a Decisive Argument Favoring Einstein Over Lorentz”. *Philosophy of Science* 52, nr. 1 (1985): 44–63.
- Sfetcu, Nicolae. *Isaac Newton despre acțiunea la distanță în gravitație - Cu sau fără Dumnezeu?* MultiMedia Publishing, 2018. <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.24577.97122>.
- Zahar, Elie. „Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's? (II)”. *British Journal for the Philosophy of Science* 24, nr. 3 (1973): 223–262.