

# Teste clasice și moderne ale teoriilor relativiste ale gravitației

Nicolae Sfetcu

10.07.2019

Sfetcu, Nicolae, "Teste clasice și moderne ale teoriilor relativiste ale gravitației", SetThings (10 iulie 2019), URL = <https://www.setthings.com/ro/teste-clasice-si-moderne-ale-teoriilor-relativiste-ale-gravitatiei/>

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 CLASICE .....</b>	<b>6</b>
<b>PRECESIA PERIHELIIULUI LUI MERCUR .....</b>	<b>6</b>
<b>DEVIEREA LUMINII.....</b>	<b>7</b>
<b>DEPLASAREA GRAVITAȚIONALĂ SPRE ROȘU .....</b>	<b>8</b>
<b>TESTE MODERNE .....</b>	<b>9</b>
<b>ÎNTÂRZIAREA SHAPIRO.....</b>	<b>9</b>
<b>DILATAREA GRAVITAȚIONALĂ A TIMPULUI .....</b>	<b>10</b>
<b>TRAGEREA CADRELOR ȘI EFECTUL GEODETIC .....</b>	<b>11</b>
<b>TESTE ALE PRINCIPIULUI DE ECHIVALENȚĂ .....</b>	<b>13</b>
<b>TESTE ALE SISTEMULUI SOLAR.....</b>	<b>17</b>
<b>BIBLIOGRAFIE .....</b>	<b>19</b>

Cu ajutorul formalismului PPN se confruntă teoriile gravitației cu rezultatele experimentelor din sistemul solar. Parametrul  $\gamma$  din acest formalism evidențiază deformarea luminii și întârzierea luminii. Prin calcule în conformitate cu PPN se obține *deformarea luminii* în raport cu liniile drepte locale, comparativ cu tije rigide; din cauza curburii spațiului în jurul Soarelui, determinată de parametrul  $\gamma$ , liniile locale drepte sunt îndoite în raport cu liniile drepte asimptotice departe de Soare. Dezvoltarea interferometriei radio de bază foarte lungi (VLBI) a îmbunătățit măsurarea deformării luminii, permițând observații VLBI transcontinentale și intercontinentale ale quasarilor și radio galaxiilor pentru a monitoriza rotația Pământului.<sup>1</sup> Satelitul de astrometrie optică Hipparcos a condus la o îmbunătățire a performanțelor.<sup>2</sup>

Testele de *întârziere a luminii* se bazează pe un semnal radar trimis peste sistemul solar de-a lungul Soarelui către o planetă sau satelit, și care la revenirea pe Pământ suferă o întârziere suplimentară non-newtoniană. Irwin Shapiro a descoperit acest efect în 1964. Țintele folosite includ planete precum Mercur sau Venus, ca reflectoare pasive ale semnalelor radar ("radar pasiv"), și sateliți artificiali, precum Marinarii 6 și 7, Voyager 2, Viking Mars, și nava spațială Cassini către Saturn, folosite ca transmițători activi ai semnalelor radar ("radar activ").<sup>3</sup> Kopeikin a sugerat, în 2001, să se măsoare întârzierea luminii provenită de la un quasar în momentul trecerii de planeta Jupiter,<sup>4</sup> măsurându-se astfel viteza interacțiunii gravitaționale. În 2002 s-au efectuat măsurători precise ale întârzierii Shapiro.<sup>5</sup> Dar mai mulți autori au subliniat că acest efect nu depinde de viteza propagării gravitației, ci doar de viteza luminii.<sup>6</sup>

Explicarea *anormaliilor periheliului orbitei lui Mercur* a rămas mult timp o problemă nesoluționată jumătate de secol de la anunțul lui Le Verrier în 1859. Au fost testate mai multe ipoteze ad-hoc pentru a explica această neconcordanță cu teoria, inclusiv existența unei noi planete Vulcan lângă Soare, un inel de planetoizi, un

---

<sup>1</sup> S. S. Shapiro et al., „Measurement of the Solar Gravitational Deflection of Radio Waves using Geodetic Very-Long-Baseline Interferometry Data, 1979--1999”, *Physical Review Letters* 92, nr. 12 (26 martie 2004): 121101, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.121101>.

<sup>2</sup> François Mignard și F. Arenou, „Determination of the ppn parameter with the hipparcos data”, 1997.

<sup>3</sup> Clifford M. Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”, *Living Reviews in Relativity* 17, nr. 1 (decembrie 2014): 4, <https://doi.org/10.12942/lrr-2014-4>.

<sup>4</sup> Sergei M. Kopeikin, „Testing the Relativistic Effect of the Propagation of Gravity by Very Long Baseline Interferometry”, *The Astrophysical Journal* 556, nr. 1 (2001): L1–5, [https://www.academia.edu/18481905/TESTING\\_THE\\_RELATIVISTIC\\_EFFECT\\_OF\\_THE\\_PROPAGATION\\_OF\\_GRAVITY\\_BY\\_VERY\\_LONG\\_BASELINE\\_INTERFEROMETRY](https://www.academia.edu/18481905/TESTING_THE_RELATIVISTIC_EFFECT_OF_THE_PROPAGATION_OF_GRAVITY_BY_VERY_LONG_BASELINE_INTERFEROMETRY).

<sup>5</sup> E. B. Fomalont și S. M. Kopeikin, „The Measurement of the Light Deflection from Jupiter: Experimental Results”, *The Astrophysical Journal* 598, nr. 1 (20 noiembrie 2003): 704–11, <https://doi.org/10.1086/378785>.

<sup>6</sup> Fintan D. Ryan, „Gravitational waves from the inspiral of a compact object into a massive, axisymmetric body with arbitrary multipole moments”, *Physical Review D* 52, nr. 10 (15 noiembrie 1995): 5707–5718, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.5707>.

moment quadrupolar solar, și o abatere de la pătratul invers în legea gravitației, dar toate aceste presupuneri au eșuat. Relativitatea generală a rezolvat într-un mod natural această problemă.

O altă clasă de experiențe la nivelul sistemului solar pentru gravitație verifică *principiul puternic de echivalență* (PPE). Încălcarea PPE poate fi testată prin încălcarea principiului slabei echivalențe pentru corpurile gravitaționale care conduc la perturbații în orbita Pământ-Lună, localizarea preferată și efectele cadrului preferat în constanța gravitațională măsurată local care ar putea produce efecte geofizice observabile, și posibilele variații ale constantei gravitaționale asupra timpului cosmologic.<sup>7</sup>

De asemenea, Nordtvedt<sup>8</sup> a afirmat că multe teorii metrice despre gravitație prevăd că corpurile masive încalcă *principiul slabei echivalențe* (căderea cu accelerații diferite, în funcție de energia lor gravitațională). Dicke<sup>9</sup> constată că acest efect ("efectul Nordtvedt") are loc în teorii cu o constantă gravitațională variabilă spațial, precum gravitația scalar-tensorială. Efectul Nordtvedt nu este sesizat în rezultatele experimentelor de laborator, pentru obiecte de dimensiuni de laborator. Analizele datelor nu au găsit dovezi, în cadrul incertitudinii experimentale, pentru efectul Nordtvedt.<sup>10</sup> În TGR, efectul Nordtvedt dispare.<sup>11</sup>

Unele teorii încalcă principiul slabei echivalențe prin prezicerea faptului că rezultatele experimentelor gravitaționale locale pot depinde de viteza laboratorului în raport cu cadrul mediu de repaus al universului (*efectele cadrului preferat*, corespunzătoare parametrilor PPN  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  și  $\alpha_3$ ) sau de localizare a laboratorului în raport cu un corp gravitațional din apropiere (*efecte de localizare preferată*, unele fiind guvernate de parametrul PPN  $\xi$ ).<sup>12</sup> Efectele constau din variații și anizotropii în valoarea măsurată local a constantei gravitaționale care conduc la apariția unor valori

---

<sup>7</sup> Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

<sup>8</sup> Kenneth Nordtvedt, „Equivalence Principle for Massive Bodies. I. Phenomenology”, ResearchGate, 1968, 1014–16,

[https://www.researchgate.net/publication/243706608\\_Equivalence\\_Principle\\_for\\_Massive\\_Bodies\\_I\\_Phenomenology](https://www.researchgate.net/publication/243706608_Equivalence_Principle_for_Massive_Bodies_I_Phenomenology).

<sup>9</sup> P. G. Roll, R. Krotkov, și R. H. Dicke, „The equivalence of inertial and passive gravitational mass”, *Annals of Physics* 26 (1 februarie 1964): 26, 442–517, [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(64\)90259-3](https://doi.org/10.1016/0003-4916(64)90259-3).

<sup>10</sup> James G. Williams, Slava G. Turyshev, și Dale H. Boggs, „Progress in Lunar Laser Ranging Tests of Relativistic Gravity”, *Physical Review Letters* 93, nr. 26 (29 decembrie 2004): 261101, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.261101>.

<sup>11</sup> Kenneth Nordtvedt, „The Relativistic Orbit Observables in Lunar Laser Ranging”, ResearchGate, 1995, 51–62, 114,

[https://www.researchgate.net/publication/223758280\\_The\\_Relativistic\\_Orbit\\_Observables\\_in\\_Lunar\\_Laser\\_Ranging](https://www.researchgate.net/publication/223758280_The_Relativistic_Orbit_Observables_in_Lunar_Laser_Ranging).

<sup>12</sup> Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

anormale ale pământului și variații ale ratei de rotație a Pământului, contribuții anormale la dinamica orbitală a planetelor și a Lunii, auto-acelerații ale pulsurilor, și momentele anormale ale Soarelui care ar determina orientarea aleatorie a axei sale de rotație față de ecliptic.<sup>13</sup>

Cele mai multe teorii care încalcă principiul slabei echivalențe prezic o variație a constantei gravitationale newtoniene măsurată local, în funcție de timp.

Alte teste pentru verificarea teoriilor gravitaționale se bazează pe *gravitomagnetism* (materia în mișcare sau rotativă produce un câmp gravitațional suplimentar analog câmpului magnetic al unei sarcini în mișcare sau al unui dipol magnetic). Efectele relativiste care pot fi măsurate implică sistemul Pământ-Lună și sistemele pulsarilor binari.<sup>14</sup>

Experimentele cu ajutorul *giroscopului* încearcă să detecteze această precesie a cadrelor sau efectul Lense-Thirring. Altă modalitate de a testa tragerea de cadre este măsurarea precesiei planurilor orbitale ale corpurilor care se învârt pe un corp rotativ, măsurând precesia relativă.<sup>15</sup> Sistemul Pământ-Lună poate fi considerat un "giroscop", cu axa perpendiculară pe planul orbital.

O valoare non-zero pentru oricare dintre parametrii PPN  $\zeta_1$ ,  $\zeta_2$ ,  $\zeta_3$ ,  $\zeta_4$  și  $\alpha_3$  ar duce la o încălcare a *conservării* momentului sau a celei de-a treia legi a lui Newton în sistemele gravitaționale. Un test pentru a treia lege a lui Newton pentru sistemele gravitaționale a fost efectuat în 1968 de Kreuzer, în care atracția gravitațională a fluorului și a bromului a fost comparată cu o precizie de 5 părți din 105. Un test la nivel planetar a fost raportat de Bartlett și van Buren.<sup>16</sup> O altă consecință a încălcării conservării impulsului este o auto-acelerație a centrului de masă al unui sistem binar stelar.

Formalismul PPN nu mai este valabil pentru câmpurile gravitaționale puternice (stele neutronice, găuri negre), dar în unele cazuri se pot face aproximații post-newtoniene. Sistemele în câmpuri gravitaționale puternice sunt afectate de emisia de radiații gravitaționale. De exemplu, mișcarea orbitală relativistă (fuziunea sau colapsarea sistemelor binare de stele neutronice sau găuri negre în faza finală) poate fi

---

<sup>13</sup> Clifford M. Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*, Revised edition (Cambridge England ; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993).

<sup>14</sup> K. Nordtvedt, „Gravitomagnetic interaction and laser ranging to Earth satellites”, *Physical Review Letters* 61, nr. 23 (5 decembrie 1988): 61, 2647–2649, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.2647>.

<sup>15</sup> John C Ries et al., „Prospects for an Improved Lense-Thirring Test with SLR and the GRACE Gravity Mission”, f.a., 7.

<sup>16</sup> D. F. Bartlett și Dave Van Buren, „Equivalence of active and passive gravitational mass using the moon”, *Physical Review Letters* 57, nr. 1 (7 iulie 1986): 21–24, 57, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.21>.

detectată prin o rețea de observatoare cu unde de interferență gravitațională cu interferometru laser, dar analiza se face folosind tehnici diferite.

În observarea generării și deplasării undelor gravitaționale se pot folosi doar doi parametri: impulsul de masă și momentul unghiular. Ambele cantități sunt măsurabile, în principiu, prin examinarea câmpului gravitațional extern al corpurilor fără nicio referire la interiorul lor. Damour<sup>17</sup> numește aceasta ca fiind o "ștergere" a structurii interne a corpului.

O altă modalitate de a verifica acordul cu TGR este prin compararea fazei observate a orbitei cu faza teoretică a modelului în funcție de timp.

Observarea undelor gravitaționale poate oferi mijloacele de a testa previziunile generale relativiste pentru polarizarea și viteza undelor, pentru amortizarea radiațiilor gravitaționale și pentru gravitația câmpului puternic, folosind detectori de unde gravitaționale cu interferometru sau cu banda rezonantă. Interferometrele laser cu bandă largă sunt deosebit de sensibile la evoluția fazelor undei gravitaționale, care transporta informații despre evoluția fazei orbitale.

O altă posibilitate implică unde gravitaționale de la o mică masă care orbitează în spirală într-o gaură neagră.<sup>18</sup>

Una dintre problemele luate în considerare de fizicieni în testarea TGR în câmp puternic este posibilitatea de contaminare cu o fizică incertă sau complexă. De exemplu, la câteva secunde după Big Bang fizica este relativ clară, dar unele teorii ale gravitației nu reușesc să producă cosmologii care să îndeplinească chiar și cerințele minime privind nucleosinteza big-bang sau proprietățile fondului cosmic de microunde.<sup>19</sup> Dar, în cadrul unor incertitudini modeste, se poate evalua diferența cantitativă dintre predicții și alte teorii în condiții de câmp puternic comparându-se cu observațiile.<sup>20</sup>

---

<sup>17</sup> T. Damour, „The problem of motion in Newtonian and Einsteinian gravity.”, în *Three Hundred Years of Gravitation*, 1987, 128–98, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1987thyg.book..128D>.

<sup>18</sup> Ryan, „Gravitational waves from the inspiral of a compact object into a massive, axisymmetric body with arbitrary multipole moments”, 52, 5707–5718.

<sup>19</sup> Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*, cap. 13.2.

<sup>20</sup> Clifford M. Will, *Was Einstein Right?: Putting General Relativity To The Test*, 2 edition (New York, NY: Basic Books, 1993).

## Teste clasice

Albert Einstein a propus<sup>21</sup> trei teste ale relativității generale, numite ulterior **testele clasice ale relativității generale**, în 1916:

1. precesiunea periheliului orbitei lui Mercur
2. devierea luminii de către Soare
3. deplasarea spre roșu gravitațională a luminii.

Pentru testările gravitaționale, se folosesc întotdeauna efectele indirecte ale gravitației, de obicei particule care sunt influențate de gravitație. În prezența gravitației, particulele se deplasează pe liniile geodezice curbate. Sursele de gravitație care cauzează curbura spațiu-timpului sunt corpuri materiale, în funcție de masa lor. Dar în relativitate masa relaționează cu energia prin prin formula  $E = mc^2$ , și energia cu impulsul, conform relativității speciale.

Ecuatiile lui Einstein dau relația dintre geometria spațială și proprietățile materiei, folosind geometria riemanniană, proprietățile geometrice fiind descrise de o funcție numită metrică. În relativitatea generală, metrica și tensorul de curbură Riemann iau valori definite în fiecare punct din spațiu-timp. Conținutul de materie definește o mărime numită tensorul energie-impuls  $T$ . Aceste cantități sunt legate între ele prin ecuațiile lui Einstein, în care tensorul de curbură Riemann și metrica definesc o altă mărime geometrică  $G$ , numită tensorul Einstein, care descrie unele aspecte ale modului în care spațiu-timpul este curbat. *Ecuatia lui Einstein* afirmă astfel că

$$G = (8\pi G/c^4) \cdot T,$$

unde mărimea  $G$  măsoară curbura iar mărimea  $T$  măsoară cantitatea de materie.  $G$  este constanta gravitațională a gravitației newtoniene, și  $c$  este viteza luminii din relativitatea specială. Fiecare din mărimile  $G$  și  $T$  sunt determinate de mai multe funcții ale coordonatelor spațiu-timp, rezultând astfel mai multe ecuații, în fapt. Fiecare soluție a acestor ecuații descrie o anumită geometrie a spațiu-timpului.

### Precesia periheliului lui Mercur

---

<sup>21</sup> A. Einstein, „The foundation of the general theory of relativity”, în *The Principle of Relativity. Dover Books on Physics. June 1, 1952. 240 pages. 0486600815, p. 109-164, 1952, 769–822, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1952prel.book..109E>.*

Urbain Le Verrier a descoperit, în 1859, că precesia orbitală a planetei Mercur nu corespunde cu teoria: elipsa orbitei sale se rotește (precesând) puțin mai repede, diferența fiind de aproximativ 38 (corectat ulterior la 43) arcsecunde de rotație pe secol.<sup>22</sup> Au fost propuse câteva ipoteze ad-hoc, precum praful interplanetar, oblația neobservată a Soarelui, o lună nedetectată de Mercur sau o nouă planetă numită Vulcan. Întrucât nicio ipoteză nu a confirmat, s-a presupus că legea gravitației lui Newton este incorectă, încercându-se modificarea legii, dar noile teorii intrau în contradicție cu alte legi. În relativitatea generală, această precesie se explică prin gravitație mediată de curbura spațiului, în acord cu observația.

### **Devierea luminii**

Predicția devierii luminii a fost confirmată inițial prin observarea luminii stelelor (quasarilor) deviată în timp ce trece de Soare.<sup>23</sup> În formalismul PPN, devierea luminii este evidențiată prin parametrul  $\gamma$ , care codifică influența gravitației asupra geometriei spațiului.<sup>24</sup>

Devierea luminii de către un obiect masiv a fost prezisă încă din 1784 de Henry Cavendish, și Johann Georg von Soldner în 1801, pe baza calculelor din gravitația newtoniană. Această predicție a fost confirmată de Einstein în 1911, corectând valoarea curburii în 1915 pe baza relativității generale.<sup>25</sup> Prima observație a devierii luminii a fost efectuată de Arthur Eddington în timpul eclipsei totale a soarelui din 29 mai 1919, simultan în Sobral, Brazilia și São Tomé și Príncipe pe coasta de vest a Africii.<sup>26</sup>

Devierea luminii în cazul general relativist este observată doar pentru un observator staționar care vede calea luminii în raport cu un corp gravitațional. Einstein a înțeles, folosind PEE, că masa sau chiar energia din formula lui Einstein ar urma căi geodezice în spațiu-timp, în raport cu un observator în repaus cu corpul gravitațional. Acest rezultat evidențiază esența PEE, arătând că gravitația și accelerația nu pot fi

---

<sup>22</sup> U. Le Verrier, *Lettre de M. Le Verrier à M. Faye sur la théorie de Mercure et sur le mouvement du périhélie de cette planète*, in *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* (Paris : Gauthier-Villars, 1859), 379–383, <http://archive.org/details/comptesrendusheb49acad>.

<sup>23</sup> Daniel Kennefick și Jürgen Renn, *Astronomers Test General Relativity: Light-bending and the Solar Redshift*, in *Albert Einstein - Chief Engineer of the Universe: 100 Authors for Einstein Essays*, 2005, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2005alei.book.....R>.

<sup>24</sup> Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

<sup>25</sup> Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

<sup>26</sup> Matthew Stanley, „An Expedition to Heal the Wounds of War” The 1919 Eclipse and Eddington as Quaker Adventurer”, *Isis* 94, nr. 1 (1 martie 2003): 57–89, <https://doi.org/10.1086/376099>.

diferențiate una de alta, într-o regiune mică. Shapiro et al.,<sup>27</sup> a raportat curbarea de către soare a undelor radio emise de surse radio extragalactice, între 1979 și 1999.

### **Deplasarea gravitațională spre roșu**

Desplasarea gravitațională spre roșu apare când radiația electromagnetică de la o sursă aflată într-un câmp gravitațional este observată dintr-o regiune cu un potențial gravitațional mai mare. Este un rezultat direct al dilatării timpului gravitațional. Într-un test de confirmare a acestui efect, recepția luminii trebuie să fie amplasată la un potențial gravitațional mai mare. Dacă observatorul are un potențial gravitațional mai mic decât sursa va observa o deplasarea gravitațională spre albastru.

Einstein a prezis efectul din principiul echivalenței în 1907, afirmând că poate fi măsurat în liniile spectrale ale unei stele pitice albe care are un câmp gravitațional foarte mare. Prima măsurare precisă a unei pitice albe a fost făcută de Popper în 1954.<sup>28</sup>

Global Positioning System (GPS) trebuie să țină seama de deplasarea spre roșu gravitațională în sincronizare.<sup>29</sup> Fizicienii au analizat datele GPS pentru a confirma alte teste.<sup>30</sup> Alte teste de precizie sunt satelitul Gravity Probe A, lansat în 1976, și experimentul Hafele-Keating care a folosit ceasuri atomice în avioanele de navigație.<sup>31</sup>

---

<sup>27</sup> Shapiro et al., „Measurement of the Solar Gravitational Deflection of Radio Waves using Geodetic Very-Long-Baseline Interferometry Data, 1979--1999”.

<sup>28</sup> N. S. Hetherington, „Sirius B and the Gravitational Redshift: An Historical Review”, ResearchGate, 1980, 246–52, [https://www.researchgate.net/publication/234478409\\_Sirius\\_B\\_and\\_the\\_gravitational\\_redshift\\_An\\_historical\\_review](https://www.researchgate.net/publication/234478409_Sirius_B_and_the_gravitational_redshift_An_historical_review).

<sup>29</sup> GPS este testat continuu prin compararea ceasurilor atomice la sol și la bordul sateliților care orbitează, pentru corelarea cu efectele relativiste, cf. lui NeilNeil Ashby, „Relativity in the Global Positioning System”, *Living Reviews in Relativity* 6, nr. 1 (28 ianuarie 2003): 1, <https://doi.org/10.12942/lrr-2003-1>.

<sup>30</sup> Ashby, „Relativity in the Global Positioning System”.

<sup>31</sup> S Schiller, „Gravitational Physics with Optical Clocks in Space”, 2015, 31.



## Teste moderne

Dicke și Schiff au stabilit un cadru pentru testarea relativității generale,<sup>32</sup> inclusiv prin experimente de nul și apelând la fizica explorării spațiului, electronicii și materiei condensate, precum experimentul Pound-Rebka și interferometria laser. Testele de lentilă gravitațională și întârzierea temporală a luminii sunt puse în evidență prin parametru  $\gamma$  al formalismului PPN, egal cu unu pentru relativitatea generală și cu valori diferite în alte teorii. Misiunea BepiColombo are drept unul din obiective testarea teoriei generale a relativității prin măsurarea parametrilor  $\gamma$  și  $\beta$  ai formalismului PPN.<sup>33</sup>

### Întârzierea Shapiro

Întârzierea gravitațională (întârzierea Shapiro), conform căreia semnalele luminoase necesită mai mult timp pentru a trece printr-un câmp gravitațional decât în absența aceluși câmp, a fost testată cu succes.<sup>34</sup> În formalismul PPN, întârzierea gravitațională este evidențiată prin parametrul  $\gamma$ , care codifică influența gravitației asupra geometriei spațiului.<sup>35</sup>

Irwin I. Shapiro a propus acest test devenit "clasic", prezicând o întârziere relativistă la întoarcerea semnalelor radar reflectate pe alte planete. Folosirea planetelor Mercur și Venus ca ținte înainte și după ce au fost eclipsate de Soare a confirmat teoria relativității generale.<sup>36</sup> Ulterior s-a folosit sonda Cassini pentru un experiment similar.<sup>37</sup> Măsurarea parametrului  $\gamma$  PPN este afectată de efectul gravitomagnetic cauzat de mișcarea orbitală a Soarelui în jurul baricentrului

---

<sup>32</sup> L. I. Schiff, „On Experimental Tests of the General Theory of Relativity”, *American Journal of Physics* 28, nr. 4 (1 aprilie 1960): 340–343, <https://doi.org/10.1119/1.1935800>.

<sup>33</sup> C. Brans și R. H. Dicke, „Mach's Principle and a Relativistic Theory of Gravitation”, *Physical Review* 124, nr. 3 (1 noiembrie 1961): 925–935, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.124.925>.

<sup>34</sup> Irwin I. Shapiro, „Fourth Test of General Relativity”, *Physical Review Letters* 13, nr. 26 (28 decembrie 1964): 789–791, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.789>.

<sup>35</sup> Irwin I. Shapiro et al., „Fourth Test of General Relativity: New Radar Result”, *Physical Review Letters* 26, nr. 18 (3 mai 1971): 1132–1135, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.26.1132>.

<sup>36</sup> Shapiro et al., 1132–1135.

<sup>37</sup> Sergei M. Kopeikin și Edward B. Fomalont, „Gravimagnetism, Causality, and Aberration of Gravity in the Gravitational Light-Ray Deflection Experiments”, *General Relativity and Gravitation* 39, nr. 10 (1 octombrie 2007): 1583–1624, <https://doi.org/10.1007/s10714-007-0483-6>.

sistemului solar. Interferometria de bază foarte lungă a permis corecțiile acestui efect în câmpul deplasării lui Jupiter<sup>38</sup> și Saturn.<sup>39</sup>

### **Dilatarea gravitațională a timpului**

Gravitația influențează scurgerea timpului. Procesele apropiate de un corp masiv se desfășoară mai lent.<sup>40</sup> Deplasarea gravitațională spre roșu a fost măsurată în laborator<sup>41</sup> și utilizând observațiile astronomice.<sup>42</sup> Dilatarea timpului gravitațional în câmpul gravitațional al Pământului a fost măsurată folosind ceasuri atomice,<sup>43</sup> fiind verificată ca efect secundar al funcționării Sistemului Global de Poziționare (GPS).<sup>44</sup> Testele în câmpuri gravitaționale mai puternice apelează la observarea pulsarilor binari.<sup>45</sup> Toate rezultatele sunt în concordanță cu relativitatea generală, dar și cu alte teorii în care principiul echivalenței este valabil.<sup>46</sup>

Dilatarea gravitațională a timpului coexistă cu existența unui cadru de referință accelerat, cu excepția centrului unei distribuții concentrice a materiei în care nu există un cadru de referință accelerat, deși se presupune că și aici timpul este dilatat.<sup>47</sup> Toate fenomenele fizice suferă în astfel de cazuri aceeași dilatare a timpului, în conformitate cu principiul de echivalență. Dilatarea timpului poate fi măsurată pentru fotonii care sunt emiși pe Pământ, se curbează în apropierea Soarelui, se reflectă pe Venus și revin pe Pământ de-a lungul unei căi similare. Se observă că viteza luminii în vecinătatea Soarelui este mai mică decât  $c$ . Fenomenul a fost măsurat experimental utilizând ceasuri atomice pe avioan, unde dilatările de timp apar și datorită diferențelor de înălțime mai mici de 1 metru, și au fost verificate experimental în laborator.<sup>48</sup> Alte

---

<sup>38</sup> Kopeikin și Fomalont, 1583–1624.

<sup>39</sup> Ed Fomalont et al., „Recent VLBA/VERA/IVS Tests of General Relativity”, *Proceedings of the International Astronomical Union* 5, nr. S261 (aprilie 2009): 291–295, <https://doi.org/10.1017/S1743921309990536>.

<sup>40</sup> Charles W. Misner, Kip S. Thorne, și John Archibald Wheeler, *Gravitation* (W. H. Freeman, 1973).

<sup>41</sup> R. V. Pound și G. A. Rebka, „Apparent Weight of Photons”, *Physical Review Letters* 4, nr. 7 (1 aprilie 1960): 186, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.4.337>.

<sup>42</sup> M. A. Barstow et al., „Hubble Space Telescope Spectroscopy of the Balmer Lines in Sirius B”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 362, nr. 4 (1 octombrie 2005): 1134–1142, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09359.x>.

<sup>43</sup> Hans C. Ohanian și Remo Ruffini, *Gravitation and Spacetime* (Norton, 1994).

<sup>44</sup> Ashby, „Relativity in the Global Positioning System”.

<sup>45</sup> Michael Kramer, „Millisecond Pulsars as Tools of Fundamental Physics”, în *Astrophysics, Clocks and Fundamental Constants*, ed. Savely G. Karshenboim și Ekkehard Peik, Lecture Notes in Physics (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004), 33–54, [https://doi.org/10.1007/978-3-540-40991-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-40991-5_3).

<sup>46</sup> Ohanian și Ruffini, *Gravitation and Spacetime*.

<sup>47</sup> Einstein a derivat aceste efecte folosind principiul echivalenței încă din 1907, cf. Albert Einstein, „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogene Folgerungen, in Volume 2: The Swiss Years: Writings, 1900-1909 Page 432 (468 of 692)”, 1907, 411, <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol2-doc/468>.

<sup>48</sup> Pound și Rebka, „Apparent Weight of Photons”, 186.

modalități de testare sunt prin experimentul Pound-Rebka, observațiile spectrelor pitice albe Sirius B, și experimentele cu semnalele de timp trimise către și de la solul lui Marte cu Viking 1.

### **Tragerea cadrelor și efectul geodetic**

În relativitatea generală, apsidele orbitelor (punctul de pe orbita corpului cel mai apropiat față de centrul de masă al sistemului) vor precesa, formând o orbită diferită de o elipsă, de forma trandafirului. Einstein a prezis această mișcare. S-au observat precesii relativiste pentru toate planetele care permit măsurători exacte de precesie (Mercur, Venus și Pământ),<sup>49</sup> și în sisteme pulsare binare unde este mai mare cu cinci ordine de mărime.

Un sistem binar care emite unde gravitaționale pierde energie. Astfel, distanța dintre cele două corpuri orbitale scade, ca și perioada lor orbitală. La nivelul sistemului solar efectul este dificil de observat. El este observabil pentru un pulsar binar apropiat, de la care se primesc impulsuri radio de frecvență foarte precisă, permițând măsurători ale perioadei orbitale. Stelele neutronice emit cantități mari de energie sub formă de radiații gravitaționale. Prima observație a acestui efect se datorează lui Hulse și Taylor, folosind un pulsar binar PSR1913+16 descoperit în 1974. Aceasta a fost prima detectare, indirectă, a undelor gravitaționale.<sup>50</sup>

Relativitatea direcției are mai multe efecte relativiste,<sup>51</sup> precum precesiunea geodezică: direcția axei unui giroscop în cădere liberă în spațiu curbat se va schimba în comparație cu direcția luminii primite de la stelele îndepărtate.<sup>52</sup> Pentru sistemul Lună-Pământ, acest efect a fost măsurat cu ajutorul laserului reflectat pe Lună,<sup>53</sup> și mai nou cu ajutorul maselor de testare la bordul sondei Gravity Probe B.<sup>54</sup>

Aproape de o masă rotativă, există efecte gravitometrice sau de tragere a cadrelor. În cazul găurilor negre rotative, orice obiect care intră în ergosferă se rotește. Efectul poate fi testat prin influența lui asupra orientării giroscopelor în cădere

---

<sup>49</sup> Ohanian și Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, 406–7.

<sup>50</sup> R. A. Hulse și J. H. Taylor, „Discovery of a pulsar in a binary system”, *The Astrophysical Journal Letters* 195 (1 ianuarie 1975): L51–L55, <https://doi.org/10.1086/181708>.

<sup>51</sup> Roger Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, Reprint edition (New York: Vintage, 2007).

<sup>52</sup> Ohanian și Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, sec. 7.8.

<sup>53</sup> Kenneth Nordtvedt, „Lunar Laser Ranging - a comprehensive probe of post-Newtonian gravity”, *arXiv:gr-qc/0301024*, 7 ianuarie 2003, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0301024>.

<sup>54</sup> C. W. F. Everitt et al., „Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity”, *Physical Review Letters* 106, nr. 22 (31 mai 2011): 221101, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.221101>.

liberă.<sup>55</sup> Au fost efectuate teste folosind sateliții LAGEOS,<sup>56</sup> cu sonda Mars Global Surveyor din jurul lui Marte,<sup>57</sup> confirmând predicția relativistă.

Primul efect de tragere a cadrelor a fost derivat în 1918, de Josef Lense și Hans Thirring și este cunoscut ca *efectul Lense-Thirring*. Ei au prezis că rotația unui obiect masiv ar distorsiona metrica spațiu-timp, făcând orbita unei particule de test din apropiere să preceseze. Pentru a-l detecta, este necesar să examinăm un obiect foarte masiv sau să construim un instrument foarte sensibil. *Tragerea liniară a cadrelor* apare prin aplicarea principiului RG la impulsul linear. Este foarte dificil de verificat.<sup>58</sup> *Creșterea masei statice* este un alt efect, o creștere a inerției unui corp atunci când alte mase sunt plasate în apropiere. Einstein afirmă că derivă din aceeași ecuație a relativității generale. Este un efect mic, dificil de confirmat experimental.

S-au făcut mai multe propuneri, costisitoare, inclusiv în 1976 de Van Patten și Everitt,<sup>59</sup> pentru o misiune spațială specială care să măsoare precesia Lense-Thirring a unei perechi de nave spațiale care să fie plasate în orbite polare terestre cu aparate fără tragere. În 1986 Ciufolini a propus lansarea unui satelit geodezic pasiv pe o orbită identică cu cea a satelitului LAGEOS. Testele au început să fie realizate prin utilizarea sateliților LAGEOS și LAGEOS II în 1996.<sup>60</sup> Precizia testelor este controversată. Nici experimentul Gravity Probe B nu a atins precizia dorită.<sup>61</sup>

În cazul unor stele care orbitează în apropierea unei găuri negre supermasive, tragerea cadrelor ar trebui să determine planul orbital al stelei să preceseze în jurul axei de rotație a găurii negre, efect care ar putea fi detectat în următorii prin monitorizarea astrometrică a stelelor din centrul galaxiei Calea Lactee.<sup>62</sup>

Jeturile relativiste pot furniza dovezi pentru tragerea cadrelor.<sup>63</sup> Modelul gravitomagnetic dezvoltat de Reva Kay Williams prezice particulele de energie înaltă

---

<sup>55</sup> Ohanian și Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, sec. 4.7.

<sup>56</sup> Lorenzo Iorio, „An Assessment of the Systematic Uncertainty in Present and Future Tests of the Lense-Thirring Effect with Satellite Laser Ranging”, *Space Science Reviews* 148, nr. 1–4 (decembrie 2009): 363–381, <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9478-1>.

<sup>57</sup> Lorenzo Iorio, „On the Lense-Thirring test with the Mars Global Surveyor in the gravitational field of Mars”, *Open Physics* 8, nr. 3 (1 ianuarie 2010): 509–513, <https://doi.org/10.2478/s11534-009-0117-6>.

<sup>58</sup> Albert Einstein, „The Meaning of Relativity”, Princeton University Press, 1921, <https://press.princeton.edu/titles/484.html>.

<sup>59</sup> R. A. Van Patten și C. W. F. Everitt, „Possible Experiment with Two Counter-Orbiting Drag-Free Satellites to Obtain a New Test of Einstein’s General Theory of Relativity and Improved Measurements in Geodesy”, *Physical Review Letters* 36, nr. 12 (22 martie 1976): 629–632, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.36.629>.

<sup>60</sup> Iorio, „An Assessment of the Systematic Uncertainty in Present and Future Tests of the Lense-Thirring Effect with Satellite Laser Ranging”, 363–381.

<sup>61</sup> Everitt et al., „Gravity Probe B”.

<sup>62</sup> Ohanian și Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, sec. 7.8.

<sup>63</sup> Pentru un observator îndepărtat jeturile par uneori să se miște mai repede decât lumina, dar asta o iluzie optică care nu încalcă principiile relativității.

emise de quasari și de nuclee galactice active, extracția razelor X și  $\gamma$  și a perechilor  $e^-e^+$  relativiste, jeturile colimate în jurul axei polare, și formarea asimetrică a jeturilor.

### Teste ale principiului de echivalență

La începutul secolului 17 Galileo a elaborat un principiu asemănător cu cel al echivalenței când a arătat experimental că accelerația unui corp datorată gravitației este independentă de cantitatea sa de masă. Kepler a evidențiat principiul echivalenței prin un experiment de gândire, ce s-ar întâmpla dacă luna ar fi oprită pe orbită și ar cade spre Pământ.

Principiul echivalenței a jucat istoric un rol important în legea gravitației. Newton l-a luat în considerație încă din paragraful de deschidere al *Principiilor*. Einstein s-a bazat și el pe acest principiu în cadrul relativității generale. Principiul de echivalență stipulat de Newton afirmă că "masa" unui corp este proporțională cu "greutatea" sa (**principiul slabei echivalențe**, PSE). O definiție alternativă a PSE este că traiectoria unui corp în absența forțelor este independentă de structura și compoziția sa internă. Un test simplu al PSE este compararea accelerației a două corpuri de de compoziție diferită într-un câmp gravitațional extern. Alte experimente, de înaltă precizie, includ de la experimentele cu pendulul ale lui Newton, Bessel și Potter la măsurătorile clasice ale echilibrului de torsiune al lui Eotvos,<sup>64</sup> Dicke,<sup>65</sup> și Braginsky.<sup>66</sup> Există mai multe proiecte de îmbunătățire a valorilor măsurate cu ajutorul sateliților.

**Principiul echivalenței lui Einstein** (PEE) este mai puternic și mai cuprinzător, afirmând că PSE este valid, și rezultatele experimentelor non-gravitaționale locale sunt independente de viteze cadrelor de referință corespunzătoare și de locul și momentul în care se desfășoară. Independența de cadrul de referință este denumită invarianța Lorentz locală, iar independența de structura și compoziția sa internă este denumită invarianță de poziție locală.

Relativitatea specială a beneficiat de o serie de experimente care au contribuit ulterior la acceptarea TGR:

---

<sup>64</sup> Roland V. Eötvös, Desiderius Pekár, și Eugen Fekete, „Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität”, *Annalen der Physik* 373 (1922): 11–66, 68, <https://doi.org/10.1002/andp.19223730903>.

<sup>65</sup> R. H. Dicke, *Gravitation and the universe.*, 1969, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1969grun.book.....D>.

<sup>66</sup> V. B. Braginsky și V. I. Panov, „Verification of the equivalence of inertial and gravitational mass”, *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics* 34 (1972): 34, 463–466, <https://istina.msu.ru/publications/article/4687588/>.

- experimentul Michelson-Morley și experimentele echivalente ulterioare,<sup>67</sup>
- Ives-Stillwell, Rossi-Hall, alte teste ale dilatării timpului,<sup>68</sup>
- independența vitezei luminii de viteza sursei, folosind surse stelare binare cu raze X, și pioni de înaltă energie,<sup>69</sup>
- izotropia vitezei luminii.<sup>70</sup>

În ultimii ani, oamenii de știință au început să caute încălcări aparente ale invarianței Lorentz rezultate din anumite modele de gravitație cuantică. O modalitate simplă, concretizată în formalismul  $c_2$ , presupune că interacțiunile electromagnetice suferă o ușoară încălcare a invarianței Lorentz prin schimbarea vitezei radiației electromagnetice  $c$  în raport cu viteza limitativă a particulei de testare a particulelor,<sup>71</sup> încercându-se să se selecteze un cadru de repaus universal preferat, posibil al radiației cosmice de fundal.<sup>72</sup> Prin experimentele de tip Michelson-Morley se verifică viteza luminii; experimentul Brillet-Hall<sup>73</sup> a folosit un interferometru laser Fabry-Perot; în alte experimente, frecvențele oscilatoarelor cavității electromagnetice în diferite orientări au fost comparate între ele sau cu ceasurile atomice, în funcție de orientarea laboratorului.<sup>74</sup>

Principiul invarianței poziției locale poate fi testat prin experimentul de deplasare gravitațională spre roșu. Primele astfel de experimente au fost seria Pound-Rebka-Snider din anii 1960 - 1965 care au măsurat schimbarea de frecvență a fotonilor cu radiații gama. Cel mai precis test standard pentru deplasarea spre roșu a fost experimentul cu rachete Vessot-Levine din iunie 1976.<sup>75</sup> Un experiment de deplasare spre roșu "nul" efectuat în 1978 a testat dacă rata relativă a două ceasuri diferite depinde de poziție. Cele mai recente experimente au folosit tehnicile de răcire și

---

<sup>67</sup> A. Brillet și J. L. Hall, „Improved laser test of the isotropy of space”, *Physical Review Letters* 42 (1 februarie 1979): 42, 549–552, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.42.549>.

<sup>68</sup> F. J. M. Farley et al., „The Anomalous Magnetic Moment of the Negative Muon”, *Il Nuovo Cimento A (1965-1970)* 45, nr. 1 (1 septembrie 1966): 45, 281–286, <https://doi.org/10.1007/BF02738104>.

<sup>69</sup> T. Alväger et al., „Test of the second postulate of special relativity in the GeV region”, *Physics Letters* 12, nr. 3 (1 octombrie 1964): 12, 260–262, [https://doi.org/10.1016/0031-9163\(64\)91095-9](https://doi.org/10.1016/0031-9163(64)91095-9).

<sup>70</sup> null Krisher et al., „Test of the Isotropy of the One-Way Speed of Light Using Hydrogen-Maser Frequency Standards”, *Physical Review. D, Particles and Fields* 42, nr. 2 (15 iulie 1990): 42, 731–734.

<sup>71</sup> Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

<sup>72</sup> C. H. Lineweaver et al., „The Dipole Observed in the COBE DMR 4 Year Data”, *The Astrophysical Journal* 470 (1 octombrie 1996): 470, 38–42, <https://doi.org/10.1086/177846>.

<sup>73</sup> Brillet și Hall, „Improved laser test of the isotropy of space”, 42, 549–552.

<sup>74</sup> Paul L. Stanwix et al., „Test of Lorentz Invariance in Electrodynamics Using Rotating Cryogenic Sapphire Microwave Oscillators”, *Physical Review Letters* 95, nr. 4 (21 iulie 2005): 040404, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.040404>.

<sup>75</sup> R. F. C. Vessot et al., „Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser”, *Physical Review Letters* 45, nr. 26 (29 decembrie 1980): 45, 2081–2084, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.45.2081>.

captare a laserului și de fixare a atomilor, pentru a obține o stabilitate extremă a ceasurilor și au comparat tranziția hiperfină Rubidium-87,<sup>76</sup> tranziția cvadrupol electric ionic mercur-199,<sup>77</sup> tranziția atomică cu hidrogen 1S-2S,<sup>78</sup> sau o tranziție optică în Ytterbium-171,<sup>79</sup> împotriva tranziției hiperfine la nivelul solului în Cesium-133.<sup>80</sup>

Principiul echivalenței Einstein face parte din nucleu dur al programului de cercetare al lui Einstein, întrucât existența PEE implică gravitația ca un fenomen în "spațiu-timp curbat". Rezultă că singurele teorii ale gravitației care pot încorpora pe deplin PEE sunt cele care satisfac postulatele "teoriilor metrice ale gravitației", respectiv:<sup>81</sup>

1. Spațiutimp are o valoare simetrică.
2. Traiectoriile corpurilor care cad liber sunt geodezice ale acestei metrice.
3. În cadrele de referință locale care cad liber, legile non-gravitaționale ale fizicii sunt cele scrise în limbajul relativității speciale.

În 1960, Schiff a elaborat ipoteza că orice teorie completă, auto-consecventă a gravitației care întruchipează PSE întruchipează în mod necesar PEE (valabilitatea PSE în sine garantează valabilitatea invarianțelor Lorentz locală și a poziției). În acest caz rezultă, pe baza ipotezei conservării energiei, că experimentele Eotvos sunt baze empirice directe pentru PEE. Prima încercare reușită de a dovedi conjectura lui Schiff mai formal a fost făcută de Lightman și Lee,<sup>82</sup> folosind un cadru numit "formalismul  $TH\epsilon\mu$ " care include toate teoriile metrice ale gravitației și multe teorii non-metriche, care folosește rata de cădere a unui corp "testat" format din particule încărcate interacționând.

---

<sup>76</sup> H. Marion et al., „A Search for Variations of Fundamental Constants using Atomic Fountain Clocks”, *Physical Review Letters* 90, nr. 15 (18 aprilie 2003): 90, 150801–1–4, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.150801>.

<sup>77</sup> S. Bize et al., „Testing the stability of fundamental constants with the 199Hg+ single-ion optical clock”, *Physical Review Letters* 90, nr. 15 (18 aprilie 2003): 90, 150802–1–4, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.150802>.

<sup>78</sup> M. Fischer et al., „New Limits to the Drift of Fundamental Constants from Laboratory Measurements”, *Physical Review Letters* 92, nr. 23 (10 iunie 2004): 92, 230802–1–4, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.230802>.

<sup>79</sup> E. Peik et al., „New limit on the present temporal variation of the fine structure constant”, *Physical Review Letters* 93, nr. 17 (18 octombrie 2004): 93, 170801–1–4, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.170801>.

<sup>80</sup> Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

<sup>81</sup> Will.

<sup>82</sup> A. P. Lightman și D. L. Lee, „Restricted Proof That the Weak Equivalence Principle Implies the Einstein Equivalence Principle”, *Physical Review. D, Particles Fields* 8, nr. 2 (1973): 8, 364–376, [http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig\\_q=RN:5098997](http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:5098997).

Dovezile empirice care susțin principiul de echivalență Einstein afirmă că singurele teorii ale gravitației care au speranța de a fi viabile sunt teoriile metrice sau, eventual, teorii care sunt metrice în afara cuplajelor non-metriche de ordin foarte slabe sau de scurtă durată (ca în teoria corzilor).<sup>83</sup>

Pot exista și alte câmpuri gravitaționale în afară de cele metrice, cum ar fi câmpurile scalare sau vectoriale, care mediază modul în care materia și câmpurile non-gravitaționale generează câmpuri gravitaționale și produc metrica; dar odată determinată metrica, numai aceasta acționează înapoi în maniera prescrisă de PEE. Astfel, se pot împărți toate teoriile metrice ale gravitației în două clase fundamentale: "pur dinamic" și "anterior geometrice."<sup>84</sup> În o "teorie metrică pur dinamică" câmpurile gravitaționale au structura și evoluția determinate de ecuațiile de câmp diferențial parțial cuplate. O teorie "anterior geometrică" conține "elemente absolute", câmpuri sau ecuații a căror structură și evoluție sunt date *a priori* și sunt independente de structura și evoluția celorlalte domenii ale teoriei. Relativitatea generală este o teorie pur dinamică.

**Principiul puternic al echivalenței** (PPE) prevede că: PSE este valabil pentru toate corpurile, și rezultatul oricărui experiment local de testare este independent de viteza aparatului și de locul și de momentul experimentului.

Față de PSE, PPE include surse gravitaționale (planete, stele) și experimente care implică forțe gravitaționale (experimente Cavendish, măsurători gravimetrice). Rețineți că PSE include pe PEE ca un caz special în care forțele gravitaționale locale sunt ignorate. Dacă PSE este strict valabil, trebuie să existe un singur câmp gravitațional în univers, metrica  $g$ , dar nu există nicio dovadă riguroasă a acestei afirmații pînă în prezent.

Principiul echivalenței Einstein poate fi testat, pe lângă testele PSE, prin căutarea variației constantelor fără dimensiuni și a rapoartelor de masă.

Principiul puternic de echivalență implică faptul că gravitația este geometrică prin natură și nu conține câmpuri suplimentare asociate. Astfel, PPE spune că o măsurătoare a unei suprafețe de spațiu plat este absolut echivalentă cu orice altă suprafață de spațiu plat din orice altă parte a universului. Teoria relativității generale a lui Einstein este singura teorie a gravitației care satisface principiul puternic de echivalență.

---

<sup>83</sup> Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

<sup>84</sup> Will.



PPE poate fi testat prin căutarea unei variații a constantei gravitaționale  $G$  a lui Newton, sau a variației masei particulelor fundamentale. Acestea ar rezulta din abateri de la legea forței gravitaționale din relativitatea generală, în special abateri de la proporționalitatea invers-pătratică, explicabile prin existența forței a cincea. Alte efecte căutate sunt efectul Nordtvedt, o "polarizare" a orbitelor sistemului solar datorită accelerației gravitaționale de autogenerare cu o rată diferită de materia normală, căutat prin experimentul Lunar Laser Ranging. Alte teste includ studierea deflecției radiației de la surse radio depărtate de soare măsurată cu interferometrie de bază foarte lungă, sau măsurarea schimbării de frecvență a semnalelor către și de la nava spațială Cassini.

Teoriile cuantice ale gravitației, precum teoria corzilor și gravitația cuantică în bucle, prevăd încălcări ale principiului slabei echivalențe. În prezent, testele principiului slabei echivalențe au un grad de sensibilitate astfel încât nedesoperirea unei încălcări este la fel de profundă ca și descoperirea unei încălcări. Descoperirea încălcării principiului echivalenței ar oferi un ghid important spre unificare.<sup>85</sup>

Un formalism al legilor nongravitaționale ale fizicii în prezența gravitației care să încorporeze posibilitatea cuplării nonmetrice (nonuniversale) și metrice este formalismul TH conceput de Lightman și Lee.<sup>86</sup> Acesta permite previziuni cantitative pentru rezultatele experimentărilor.

### **Teste ale sistemului solar**

Mediul dinamic al spațiu-timpului din jurul Pământului permite efectuarea de teste ale teoriilor gravitaționale, cu sateliți geodezici ca mase de test. Un exemplu sunt sateliții LAGEOS, lansați scopuri geodezice și geodinamice, și pentru studiile fizice fundamentale. Sateliții LAGEOS sunt folosiți ca țintă pentru impulsurile laser trimise de la stațiile de la sol, pentru a calcula distanța instantanee (tehnica "laser laser range" (SLR)). Determinarea a orbitei sateliților necesită modele pentru dinamica sateliților, pentru procedurile de măsurare și pentru transformările cadrelor de referință.<sup>87</sup> Modelele iau în considerație geopotențialul, perturbațiile lunisolare și planetare, presiunea radiației solare și albedoul Pământului, efectele Rubin-cam și Yarkovsky-

---

<sup>85</sup> James Overduin et al., „The Science Case for STEP”, *Advances in Space Research* 43, nr. 10 (15 mai 2009): 1532–1537, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.02.012>.

<sup>86</sup> Lightman și Lee, „Restricted Proof That the Weak Equivalence Principle Implies the Einstein Equivalence Principle”, 8, 364–76.

<sup>87</sup> Friedrich W. Hehl et al., „General relativity with spin and torsion: Foundations and prospects”, *Reviews of Modern Physics* 48, nr. 3 (1 iulie 1976): 393–416, <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.48.393>.

Schach, coordonatele stațiilor SLR, încărcarea oceanelor, parametrii de orientare a pământului și procedura de măsurare.<sup>88</sup> Modelele includ și corecțiile generale relativiste în formalismul parametrizat post-newtonian (PPN).<sup>89</sup> Testele efectuate confirmă prezicerile relativității generale (precesiunea Schwarzschild, efectul Lense-Thirring) și exclud o teorie alternativă (potențialul NLRI/Yukawa).

---

<sup>88</sup> Emil T. Akhmedov et al., „Experimental Tests of Quantum Gravity and Exotic Quantum Field Theory Effects”, ResearchGate, 2014, [https://www.researchgate.net/publication/274948108\\_Experimental\\_Tests\\_of\\_Quantum\\_Gravity\\_and\\_Exotic\\_Quantum\\_Field\\_Theory\\_Effects](https://www.researchgate.net/publication/274948108_Experimental_Tests_of_Quantum_Gravity_and_Exotic_Quantum_Field_Theory_Effects).

<sup>89</sup> Kenneth Nordtvedt Jr. și Clifford M. Will, „Conservation Laws and Preferred Frames in Relativistic Gravity. II. Experimental Evidence to Rule Out Preferred-Frame Theories of Gravity”, *The Astrophysical Journal* 177 (1 noiembrie 1972): 775–792, <https://doi.org/10.1086/151755>.

## Bibliografie

- Akhmedov, Emil T., Stephen James Minter, Piero Nicolini, și Douglas Singleton. „Experimental Tests of Quantum Gravity and Exotic Quantum Field Theory Effects”. ResearchGate, 2014.  
[https://www.researchgate.net/publication/274948108\\_Experimental\\_Tests\\_of\\_Quantum\\_Gravity\\_and\\_Exotic\\_Quantum\\_Field\\_Theory\\_Effects](https://www.researchgate.net/publication/274948108_Experimental_Tests_of_Quantum_Gravity_and_Exotic_Quantum_Field_Theory_Effects).
- Alväger, T., F. J. M. Farley, J. Kjellman, și L. Wallin. „Test of the second postulate of special relativity in the GeV region”. *Physics Letters* 12, nr. 3 (1 octombrie 1964): 260–62. [https://doi.org/10.1016/0031-9163\(64\)91095-9](https://doi.org/10.1016/0031-9163(64)91095-9).
- Ashby, Neil. „Relativity in the Global Positioning System”. *Living Reviews in Relativity* 6, nr. 1 (28 ianuarie 2003): 1. <https://doi.org/10.12942/lrr-2003-1>.
- Barstow, M. A., Howard E. Bond, J. B. Holberg, M. R. Burleigh, I. Hubeny, și D. Koester. „Hubble Space Telescope Spectroscopy of the Balmer Lines in Sirius B”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 362, nr. 4 (1 octombrie 2005): 1134–42. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09359.x>.
- Bartlett, D. F., și Dave Van Buren. „Equivalence of active and passive gravitational mass using the moon”. *Physical Review Letters* 57, nr. 1 (7 iulie 1986): 21–24. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.21>.
- Bize, S., S. A. Diddams, U. Tanaka, C. E. Tanner, W. H. Oskay, R. E. Drullinger, T. E. Parker, et al. „Testing the stability of fundamental constants with the 199Hg+ single-ion optical clock”. *Physical Review Letters* 90, nr. 15 (18 aprilie 2003): 150802. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.150802>.
- Braginsky, V. B., și V. I. Panov. „Verification of the equivalence of inertial and gravitational mass”. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics* 34 (1972): 463–66. <https://istina.msu.ru/publications/article/4687588/>.
- Brans, C., și R. H. Dicke. „Mach’s Principle and a Relativistic Theory of Gravitation”. *Physical Review* 124, nr. 3 (1 noiembrie 1961): 925–35. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.124.925>.
- Brillet, A., și J. L. Hall. „Improved laser test of the isotropy of space”. *Physical Review Letters* 42 (1 februarie 1979): 549–52. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.42.549>.
- Damour, T. „The problem of motion in Newtonian and Einsteinian gravity.” În *Three Hundred Years of Gravitation*, 128–98, 1987. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1987thyg.book..128D>.
- Dicke, R. H. *Gravitation and the universe.*, 1969. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1969grun.book.....D>.
- Einstein, A. „The foundation of the general theory of relativity”. În *The Principle of Relativity. Dover Books on Physics. June 1, 1952. 240 pages. 0486600815*, p. 109–164, 109–64, 1952. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1952prel.book..109E>.
- Einstein, Albert. „The Meaning of Relativity”. Princeton University Press, 1921. <https://press.princeton.edu/titles/484.html>.
- . „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogene Folgerungen, in Volume 2: The Swiss Years: Writings, 1900-1909 Page 432 (468 of 692)”, 1907. <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol2-doc/468>.
- Eötvös, Roland V., Desiderius Pekár, și Eugen Fekete. „Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität”. *Annalen der Physik* 373 (1922): 11–66. <https://doi.org/10.1002/andp.19223730903>.
- Everitt, C. W. F., D. B. DeBra, B. W. Parkinson, J. P. Turneare, J. W. Conklin, M. I. Heifetz, G. M. Keiser, et al. „Gravity Probe B: Final Results of a Space

- Experiment to Test General Relativity”. *Physical Review Letters* 106, nr. 22 (31 mai 2011): 221101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.221101>.
- Farley, F. J. M., J. Bailey, R. C. A. Brown, M. Giesch, H. Jöstlein, S. van der Meer, E. Picasso, și M. Tannenbaum. „The Anomalous Magnetic Moment of the Negative Muon”. *Il Nuovo Cimento A (1965-1970)* 45, nr. 1 (1 septembrie 1966): 281–86. <https://doi.org/10.1007/BF02738104>.
- Fischer, M., N. Kolachevsky, M. Zimmermann, R. Holzwarth, Th Udem, T. W. Haensch, M. Abgrall, et al. „New Limits to the Drift of Fundamental Constants from Laboratory Measurements”. *Physical Review Letters* 92, nr. 23 (10 iunie 2004): 230802. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.230802>.
- Fomalont, E. B., și S. M. Kopeikin. „The Measurement of the Light Deflection from Jupiter: Experimental Results”. *The Astrophysical Journal* 598, nr. 1 (20 noiembrie 2003): 704–11. <https://doi.org/10.1086/378785>.
- Fomalont, Ed, Sergei Kopeikin, Dayton Jones, Mareki Honma, și Oleg Titov. „Recent VLBA/VERA/IVS Tests of General Relativity”. *Proceedings of the International Astronomical Union* 5, nr. S261 (aprilie 2009): 291–95. <https://doi.org/10.1017/S1743921309990536>.
- Hehl, Friedrich W., Paul von der Heyde, G. David Kerlick, și James M. Nester. „General relativity with spin and torsion: Foundations and prospects”. *Reviews of Modern Physics* 48, nr. 3 (1 iulie 1976): 393–416. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.48.393>.
- Hetherington, N. S. „Sirius B and the Gravitational Redshift: An Historical Review”. ResearchGate, 1980. [https://www.researchgate.net/publication/234478409\\_Sirius\\_B\\_and\\_the\\_gravitational\\_redshift\\_An\\_historical\\_review](https://www.researchgate.net/publication/234478409_Sirius_B_and_the_gravitational_redshift_An_historical_review).
- Hulse, R. A., și J. H. Taylor. „Discovery of a pulsar in a binary system”. *The Astrophysical Journal Letters* 195 (1 ianuarie 1975): L51–53. <https://doi.org/10.1086/181708>.
- Iorio, Lorenzo. „An Assessment of the Systematic Uncertainty in Present and Future Tests of the Lense-Thirring Effect with Satellite Laser Ranging”. *Space Science Reviews* 148, nr. 1–4 (decembrie 2009): 363–81. <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9478-1>.
- . „On the Lense-Thirring test with the Mars Global Surveyor in the gravitational field of Mars”. *Open Physics* 8, nr. 3 (1 ianuarie 2010). <https://doi.org/10.2478/s11534-009-0117-6>.
- Kennefick, Daniel, și Jürgen Renn. *Astronomers Test General Relativity: Light-bending and the Solar Redshift, in Albert Einstein - Chief Engineer of the Universe: 100 Authors for Einstein Essays*, 2005. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2005alei.book.....R>.
- Kopeikin, Sergei M. „Testing the Relativistic Effect of the Propagation of Gravity by Very Long Baseline Interferometry”. *The Astrophysical Journal* 556, nr. 1 (2001): L1–5. [https://www.academia.edu/18481905/TESTING\\_THE\\_RELATIVISTIC\\_EFFECT\\_OF\\_THE\\_PROPAGATION\\_OF\\_GRAVITY\\_BY\\_VERY\\_LONG\\_BASELINE\\_INTERFEROMETRY](https://www.academia.edu/18481905/TESTING_THE_RELATIVISTIC_EFFECT_OF_THE_PROPAGATION_OF_GRAVITY_BY_VERY_LONG_BASELINE_INTERFEROMETRY).
- Kopeikin, Sergei M., și Edward B. Fomalont. „Gravimagnetism, Causality, and Aberration of Gravity in the Gravitational Light-Ray Deflection Experiments”. *General Relativity and Gravitation* 39, nr. 10 (1 octombrie 2007): 1583–1624. <https://doi.org/10.1007/s10714-007-0483-6>.
- Kramer, Michael. „Millisecond Pulsars as Tools of Fundamental Physics”. În *Astrophysics, Clocks and Fundamental Constants*, ediție de Savely G.

- Karshenboim și Ekkehard Peik, 33–54. *Lecture Notes in Physics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-40991-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-40991-5_3).
- Krisher, null, null Maleki, null Lutes, null Primas, null Logan, null Anderson, și null Will. „Test of the Isotropy of the One-Way Speed of Light Using Hydrogen-Maser Frequency Standards”. *Physical Review. D, Particles and Fields* 42, nr. 2 (15 iulie 1990): 731–34.
- Le Verrier, U. *Lettre de M. Le Verrier à M. Faye sur la théorie de Mercure et sur le mouvement du périhélie de cette planète*, in *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*. Paris : Gauthier-Villars, 1859. <http://archive.org/details/comptesrendusheb49acad>.
- Lightman, A. P., și D. L. Lee. „Restricted Proof That the Weak Equivalence Principle Implies the Einstein Equivalence Principle”. *Physical Review. D, Particles Fields* 8, nr. 2 (1973): 364–76. [http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig\\_q=RN:5098997](http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:5098997).
- Lineweaver, C. H., L. Tenorio, G. F. Smoot, P. Keegstra, A. J. Banday, și P. Lubin. „The Dipole Observed in the COBE DMR 4 Year Data”. *The Astrophysical Journal* 470 (1 octombrie 1996): 38. <https://doi.org/10.1086/177846>.
- Marion, H., F. Pereira Dos Santos, M. Abgrall, S. Zhang, Y. Sortais, S. Bize, I. Maksimovic, et al. „A Search for Variations of Fundamental Constants using Atomic Fountain Clocks”. *Physical Review Letters* 90, nr. 15 (18 aprilie 2003): 150801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.150801>.
- Mignard, François, și F. Arenou. „Determination of the ppn parameter with the hipparcos data”, 1997.
- Misner, Charles W., Kip S. Thorne, și John Archibald Wheeler. *Gravitation*. W. H. Freeman, 1973.
- Nordtvedt, K. „Gravitomagnetic interaction and laser ranging to Earth satellites”. *Physical Review Letters* 61, nr. 23 (5 decembrie 1988): 2647–49. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.2647>.
- Nordtvedt, Kenneth. „Equivalence Principle for Massive Bodies. I. Phenomenology”. ResearchGate, 1968. [https://www.researchgate.net/publication/243706608\\_Equivalence\\_Principle\\_for\\_Massive\\_Bodies\\_I\\_Phenomenology](https://www.researchgate.net/publication/243706608_Equivalence_Principle_for_Massive_Bodies_I_Phenomenology).
- . „Lunar Laser Ranging - a comprehensive probe of post-Newtonian gravity”. *arXiv:gr-qc/0301024*, 7 ianuarie 2003. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0301024>.
- . „The Relativistic Orbit Observables in Lunar Laser Ranging”. ResearchGate, 1995. [https://www.researchgate.net/publication/223758280\\_The\\_Relativistic\\_Orbit\\_Observables\\_in\\_Lunar\\_Laser\\_Ranging](https://www.researchgate.net/publication/223758280_The_Relativistic_Orbit_Observables_in_Lunar_Laser_Ranging).
- Nordtvedt, Kenneth, Jr., și Clifford M. Will. „Conservation Laws and Preferred Frames in Relativistic Gravity. II. Experimental Evidence to Rule Out Preferred-Frame Theories of Gravity”. *The Astrophysical Journal* 177 (1 noiembrie 1972): 775. <https://doi.org/10.1086/151755>.
- Ohanian, Hans C., și Remo Ruffini. *Gravitation and Spacetime*. Norton, 1994.
- Overduin, James, Francis Everitt, John Mester, și Paul Worden. „The Science Case for STEP”. *Advances in Space Research* 43, nr. 10 (15 mai 2009): 1532–37. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.02.012>.
- Peik, E., B. Lipphardt, H. Schnatz, T. Schneider, Chr Tamm, și S. G. Karshenboim. „New limit on the present temporal variation of the fine structure constant”. *Physical Review Letters* 93, nr. 17 (18 octombrie 2004): 170801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.170801>.

- Penrose, Roger. *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. Reprint edition. New York: Vintage, 2007.
- Pound, R. V., și G. A. Rebka. „Apparent Weight of Photons”. *Physical Review Letters* 4, nr. 7 (1 aprilie 1960): 337–41. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.4.337>.
- Ries, John C, Richard J Eanes, Byron D Tapley, și Glenn E Peterson. „Prospects for an Improved Lense-Thirring Test with SLR and the GRACE Gravity Mission”, f.a., 7.
- Roll, P. G., R. Krotkov, și R. H. Dicke. „The equivalence of inertial and passive gravitational mass”. *Annals of Physics* 26 (1 februarie 1964): 442–517. [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(64\)90259-3](https://doi.org/10.1016/0003-4916(64)90259-3).
- Ryan, Fintan D. „Gravitational waves from the inspiral of a compact object into a massive, axisymmetric body with arbitrary multipole moments”. *Physical Review D* 52, nr. 10 (15 noiembrie 1995): 5707–18. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.5707>.
- Schiff, L. I. „On Experimental Tests of the General Theory of Relativity”. *American Journal of Physics* 28, nr. 4 (1 aprilie 1960): 340–43. <https://doi.org/10.1119/1.1935800>.
- Schiller, S. „Gravitational Physics with Optical Clocks in Space”, 2015, 31.
- Shapiro, Irwin I. „Fourth Test of General Relativity”. *Physical Review Letters* 13, nr. 26 (28 decembrie 1964): 789–91. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.789>.
- Shapiro, Irwin I., Michael E. Ash, Richard P. Ingalls, William B. Smith, Donald B. Campbell, Rolf B. Dyce, Raymond F. Jurgens, și Gordon H. Pettengill. „Fourth Test of General Relativity: New Radar Result”. *Physical Review Letters* 26, nr. 18 (3 mai 1971): 1132–35. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.26.1132>.
- Shapiro, S. S., J. L. Davis, D. E. Lebach, și J. S. Gregory. „Measurement of the Solar Gravitational Deflection of Radio Waves using Geodetic Very-Long-Baseline Interferometry Data, 1979–1999”. *Physical Review Letters* 92, nr. 12 (26 martie 2004): 121101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.121101>.
- Stanley, Matthew. „An Expedition to Heal the Wounds of War” The 1919 Eclipse and Eddington as Quaker Adventurer”. *Isis* 94, nr. 1 (1 martie 2003): 57–89. <https://doi.org/10.1086/376099>.
- Stanwix, Paul L., Michael E. Tobar, Peter Wolf, Mohamad Susli, Clayton R. Locke, Eugene N. Ivanov, John Winterflood, și Frank van Kann. „Test of Lorentz Invariance in Electrodynamics Using Rotating Cryogenic Sapphire Microwave Oscillators”. *Physical Review Letters* 95, nr. 4 (21 iulie 2005): 040404. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.040404>.
- Van Patten, R. A., și C. W. F. Everitt. „Possible Experiment with Two Counter-Orbiting Drag-Free Satellites to Obtain a New Test of Einstein’s General Theory of Relativity and Improved Measurements in Geodesy”. *Physical Review Letters* 36, nr. 12 (22 martie 1976): 629–32. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.36.629>.
- Vessot, R. F. C., M. W. Levine, E. M. Mattison, E. L. Blomberg, T. E. Hoffman, G. U. Nystrom, B. F. Farrel, et al. „Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser”. *Physical Review Letters* 45, nr. 26 (29 decembrie 1980): 2081–84. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.45.2081>.
- Will, Clifford M. „The Confrontation between General Relativity and Experiment”. *Living Reviews in Relativity* 17, nr. 1 (decembrie 2014): 4. <https://doi.org/10.12942/lrr-2014-4>.

- . *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*. Revised edition. Cambridge England ; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993.
- . *Was Einstein Right?: Putting General Relativity To The Test*. 2 edition. New York, NY: Basic Books, 1993.
- Williams, James G., Slava G. Turyshev, și Dale H. Boggs. „Progress in Lunar Laser Ranging Tests of Relativistic Gravity”. *Physical Review Letters* 93, nr. 26 (29 decembrie 2004): 261101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.261101>.