

Teste gravitaționale ale relativității generale

Nicolae Sfetcu

08.07.2019

Sfetcu, Nicolae, "Teste gravitaționale ale relativității generale", SetThings (8 iulie 2019), URL = <https://www.setthings.com/ro/teste-gravitational-ale-relativitatii-generale/>

Email: 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/>.

TESTE PROPUSE DE EINSTEIN..... 8

BIBLIOGRAFIE..... 11

Clifford M. Will descrie, în *Theory and Experiment in Gravitational Physics*,¹ apariția unei noi ere pentru relativitatea generală, de testare și verificare la niveluri de precizie foarte ridicate.

În 1959, oamenii de știință de la Lincoln Laboratories din Massachusetts au bombardat planeta Venus cu impulsuri de unde radio transmise de pe Pământ, sperând să detecteze ecoul undelor reflectate. Nu au detectat niciun ecou. La o analiză ulterioară au sesizat un ecou pe 14 septembrie, acesta fiind primul ecou radar înregistrat de pe o planetă.

În 1960, astronomii Thomas Matthews și Allan Sandage și colegii de la Mount Palomar au folosit un telescop pentru a înregistra o placă fotografică câmpului stelar din jurul sursei radio 3C48. Se așteptau să găsească un grup de galaxii, dar la locația exactă a sursei radio a fost observat un obiect ca o stea dar cu un spectru neobișnuit și o luminositate variabilă cu frecvența de 15 minute.² Acesta a fost primul quasar observat.³

Experimentul Pound-Rebka (1960), a verificat principiul echivalenței și deplasarea spre roșu gravitațională, și a demonstrat utilitatea tehnologiei cuantice (ceasuri atomice, măsurători cu laser, gravimetre supraconductoare, detectoare cu unde gravitaționale) în experimentele gravitaționale de înaltă precizie.⁴

Radiațiile înregistrate de la Venus au făcut din sistemul solar un laborator pentru testarea gravitației relativiste.⁵ Programul spațial interplanetar dezvoltat la începutul anilor 1960, și descoperirea în 1964 a efectului relativist de întârziere,⁶ au oferit teste noi și exacte ale relativității generale. Până în 1974, sistemul solar a fost singura modalitate pentru teste de înaltă precizie a relativității generale.

În dezvoltarea relativității generale, Einstein a fost condus de criterii teoretice de eleganță și simplitate. Teoria sa s-a confruntat inițial cu "trei teste clasice": deplasarea anormală a periheliului lui Mercur, deflecția luminii de către Soare, și deplasarea spre roșu gravitațională a luminii.

Pe la sfârșitul anilor 1950 s-a sugerat că deplasarea spre roșu gravitațională a luminii nu este, totuși, un test real al relativității generale., fiind o consecință pură a principiului

¹ Clifford M. Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*, Revised edition (Cambridge England ; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993).

² Thomas A. Matthews și Allan R. Sandage, „Optical Identification of 3C 48, 3C 196, and 3C 286 with Stellar Objects.”, *The Astrophysical Journal* 138 (1 iulie 1963): 30–56, <https://doi.org/10.1086/147615>.

³ Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

⁴ R. V. Pound 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>.

⁵ W. B. Smith, „Radar observations of Venus, 1961 and 1959”, *The Astronomical Journal* 68 (1 februarie 1963): 15–21, <https://doi.org/10.1086/108904>.

⁶ Irwin I. Shapiro, „Fourth Test of General Relativity”, *Physical Review Letters* 13, nr. 26 (28 decembrie 1964): 789–91, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.789>.

echivalenței și nu testa ecuațiile de câmp ale teoriei gravitaționale. Schiff a sugerat că experimentul Eotvos este de mai mare precizie decât deplasarea spre roșu gravitațională a luminii, pe care a înlocuit-o ca importanță, experimentul Eotvos verificând în ce măsură corpurile de compoziție diferită au aceeași accelerație.⁷

Ulterior au fost propuse alte teste pentru relativitatea generală, precum efectul Lense-Thirring, perturbarea orbitală datorată rotației unui corp, și efectul de Sitter, o mișcare seculară a perigeului și a nodului orbitei lunii,^{8 9} însă perspectivele de a le detecta erau încă slabe.¹⁰

Altă zonă de testare prin observare a relativității generale a fost cosmologia, prin predicția privind explozia primordială numită "Big Bang" și expansiunea ulterioară a Universului, dar până la sfârșitul anilor 1950 observațiile cosmologice nu puteau distinge între diferitele teorii ale gravitației.¹¹

Între timp a apărut o "proliferare" de teorii alternative de gravitație concurente ale relativității generale. În 1960 existau cel puțin 25 de astfel de teorii alternative.¹²

Conform lui Will, până în 1960 relativitatea generală era susținută empiric de un test de precizie moderată (schimbarea periheliului, aproximativ 1%), un test de precizie scăzută (deformarea luminii, aproximativ 50 %), un test neconcludent (deplasarea gravitațională spre roșu) și observațiile cosmologice care nu puteau distinge între diverse teorii. Aceasta a fost ceea ce Lakatos a denumit "perioada staționară". Din cauza confirmărilor sale experimentale limitate, relativitatea generală a fost chiar înlăturată din fizica de bază.¹³

Perioada dintre 1960 și 1980 a fost perioada de maturitate a relativității generale: s-au dezvoltat noi metode de testare de mare precizie care au inclus teste noi, precum precesiunea giroscopică, întârzierea luminii și "efectul Nordtvedt" în mișcarea lunară, utilizând inclusiv observații astrofizice și sateliții artificiali.

⁷ L. I. Schiff, „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>.

⁸ Josef Lense și Hans Thirring, „Über den Einfluß der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie”, *Physikalische Zeitschrift* 19 (1918): 156–63, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1918PhyZ...19..156L>.

⁹ W. de Sitter, „On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences. Second paper”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 77 (1 decembrie 1916): 77, 155–84, <https://doi.org/10.1093/mnras/77.2.155>.

¹⁰ Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

¹¹ G. J. Whitrow și G. E. Morduch, „Relativistic theories of gravitation : A comparative analysis with particular reference to astronomical tests”, *Vistas in Astronomy* 6 (1965): cap. 14, [https://doi.org/10.1016/0083-6656\(65\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0083-6656(65)90002-4).

¹² C. DeWitt, *Experimental relativity, in Relativity Groups and Topology. Lectures Delivered at Les Houches During the 1963 Session of the Summer School of Theoretical Physics*, Second Printing edition (Gordon & Breach, 1965), 165–313.

¹³ Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

Nicolae Sfetcu: Teste gravitaționale ale relativității generale

Datorită proliferării teoriilor alternative, era nevoie de un cadru teoretic cât mai bun pentru compararea verificărilor diferitelor experimente, pentru a clasifica teoriile și pentru a compara predicțiile lor cu rezultatele experimentărilor într-un mod sistematic.

Anul	Rezultate experimentale sau observaționale	Rezultate teoretice
1960	Anizotropia Hughes-Drever a masei	Lucrările lui Penrose despre spinori
	Experimentul Pound-Rebka a deplasării gravitaționale spre roșu	Precesiunea giroscopică (Schiff) Teoria Brans-Dicke
1962	Descoperirea surselor de radiații X non-solare	Formula Bondi pentru pierderea de masă
	Descoperirea deplasării spre roșu a quasarelor	Descoperirea metricii Kerr
1964	Experimentul Eotvos, Princeton	Întârzierea în timp a luminii (Shapiro)
	Experimentul Pound-Snider a deplasării gravitaționale spre roșu	Teoremele singularităților în relativitatea generală
	Descoperirea fondului de microunde 3K	
1966	Detectarea aplatizării solare	Producerea de elemente în Big Bang
	Descoperirea pulsarilor	
1968	Măsurători cu radar planetare pentru întărirea timpului	Efectul Nordtvedt și cadrul PPN timpuriu
	Lansarea lui <i>Mariners 6</i> și <i>7</i>	
	Acquisition of lunar laser echo	
	First radio deflection measurements	
1970	CygXI: a black hole candidate	Efecte de cadru referat
	<i>Mariners 6</i> and <i>7</i> time-delay measurements	Cadrul PPN rafinat
		Creșterea ariei găurilor negre în relativitatea generală
1972	Experimentul Eotvos, Moscova	
1974	Descoperirea pulsarilor binari	Evaporarea cuantică a găurilor negre
		Radiația gravitațională dipolară în teorii alternative
1976	Experimente de deplasare gravitațională spre roșu cu rachete	
	Testul lunar al efectului Nordtvedt	

Rezultate ale întârzierii timpului obținute cu *Mariner 9* și
Viking

- 1978 Măsurători ale scăderii perioadei orbitale ale pulsarului
binar SS 433
- 1980 Descoperirea lentilelor gravitaționale

Tabelul 2.2 O cronologie a testelor pentru verificarea teoriei relativității generale în perioada 1960-80.
Sursa: Clifford M. Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics*¹⁴

Robert Dicke a efectuat mai multe experimente de nulitate de înaltă precizie pentru confirmarea teoriilor gravitației.¹⁵ Dicke ajunge la concluzia că experimentele gravitaționale pot fi împărțite în două clase

1. una care testează bazele teoriei gravitației (de ex., principiul echivalenței): experimentul Eotvôs, experimentul Hughes-Drever, experimentul de deplasare gravitațională spre roșu, etc.), verificând că gravitația este un fenomen de spațiu-timp curbat (descriș printr-o "teorie metrică" a gravitației). Relativitatea generală și teoria lui Brans-Dick sunt exemple de teorii metrice ale gravitației.
2. a doua clasă care testează teoriile metrice ale gravitației: formalismul parametrizat post-newtonian, sau PPN, inițiat de Kenneth Nordtvedt, Jr.,¹⁶ și extins și îmbunătățit de Will.¹⁷ PPN ia în considerație viteze mici și câmpuri slabe (limita post-newtoniană) a teoriilor metrice, pe baza unui set de 10 parametri reali. PPN s-a folosit pentru analiza experimentelor gravitaționale ale sistemului solar, pentru descoperirea și analiza de noi teste ale teoriei gravitației, precum efectul Nordtvedt, efectele de cadru preferate și efectele localizării preferate și pentru a analiza și clasifica teoriile metrice alternative de gravitație ajungând să fie instrumentul teoretic standard pentru aceste experimente, căutări și studii.

Pe la mijlocul anilor 1970, multe teorii alternative de gravitație erau onfirmate de experimentele la nivelul sistemului solar, dar nu și la nivel cosmologic. În 1974, Joseph Taylor

¹⁴ Will.

¹⁵ DeWitt, *Experimental relativity, in Relativity Groups and Topology. Lectures Delivered at Les Houches During the 1963 Session of the Summer School of Theoretical Physics*, 165–313.

¹⁶ Kenneth Nordtvedt, „Equivalence Principle for Massive Bodies. II. Theory”, *Physical Review* 169, nr. 5 (25 mai 1968): 1017–25, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.169.1017>.

¹⁷ C. M. Will, „Theoretical Frameworks For Testing Relativistic Gravity. Ii. Parametrized Post-Newtonian Hydrodynamics, And The Nordtvedt Effect.”, *Astrophys. J.* 163: 611-28(1 Feb 1971)., 1 ianuarie 1971, 163, 611–28, <https://doi.org/10.1086/150804>.

și Russell Hulse au descoperit pulsarul binar,¹⁸ ale cărui pulsații extrem de stabile au fost monitorizate radiotelescopic, permițând măsurarea precisă a parametrilor astrofizici. În 1978 a fost măsurată rata de schimbare a perioadei orbitale a sistemului, care a fost confirmată de relativitatea generală dar nu și de cele mai multe teorii alternative.

În **experimentul Michelson-Morley**, Michelson a pornit de la un experiment pentru a testa teoriile contradictorii ale lui Fresnel și Stokes despre influența eterului.^{19 20} Stokes credea inițial că cele două teorii sunt echivalente observațional, ambele teorii explicând aberația luminii. Michelson a susținut că experimentul său din 1881 a fost un experiment crucial care a demonstrat teoria lui Stokes. Lorentz a arătat că Michelson "a interpretat greșit" faptele, și calculele lui Michelson au fost greșite. Michelson, împreună cu Morley, au decis să repete experimentul "la intervale de trei luni și astfel să evite orice incertitudine,"²¹ concluzia lor fiind de respingere a explicației lui Fresnel. Lorentz a pus la îndoială și noul experiment: "semnificația experimentului Michelson-Morley constă mai degrabă în faptul că ne poate învăța ceva despre schimbările în dimensiuni." În 1897 Michelson a făcut un nou experiment, concluzionând că rezultatul experimentului a fost unul "improbabil" și a decis că în 1887 a greșit: teoria lui Stokes trebuia respinsă, și cea a lui Fresnel trebuia să fie acceptată.

Fitzgerald, independent de Lorentz, a produs o versiune testabilă care a fost respinsă de experimentele lui Trouton, Rayleigh și Brace întrucât era progresivă teoretic, dar nu empiric, teoria lui Fitzgerald fiind considerată *ad-hoc* (că nu există "nici o dovadă independentă" [pozitivă] pentru ea).²² Einstein, ignorând aceste experimente, dar stimulat de criticile lui Mach de mecanică newtoniană, a ajuns la un nou program de căutare progresivă,²³ care "a prezis" și a explicat rezultatul experimentului Michelson-Morley, dar a prezis și o gamă imensă de fapte nedescoperite anterior, care au obținut coroborări dramatice. Astfel, după numai douăzeci și cinci de ani mai târziu, experimentul Michelson-Morley a ajuns să fie văzut ca experiment

¹⁸ R. A. Hulse 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>.

¹⁹ A Fresnel, „Lettre a Francois Arago sur L’Influence du Mouvement Terrestre dans quelques Phenomenes Optiques, in *Annales de chimie et de physique - 98 Years available - Gallica*”, 1818, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/cb343780820/date.r=Annales+de+chimie+et+de+physique.langEN>.

²⁰ George Gabriel Stokes, *On Fresnel’s Theory of the Aberration of Light* (London, 1846), 76–81.

²¹ Hendrik A. Lorentz, „Considerations on Gravitation”, în *The Genesis of General Relativity*, ed. Michel Janssen et al., Boston Studies in the Philosophy of Science (Dordrecht: Springer Netherlands, 2007), 1038–52, https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4000-9_13.

²² Joseph Larmor, *On the ascertained Absence of Effects of Motion through the Aether, in relation to the Constitution of Matter, and on the FitzGerald-Lorentz Hypothesis*, 1904, 624.

²³ Karl Raimund Popper, *The Logic of Scientific Discovery* (Psychology Press, 2002).

crucial, considerat ca fiind "cel mai mare experiment negativ din istoria științei,"²⁴ ²⁵ demonstrând toleranța metodologică susținută de Lakatos.

În acest context, un semnal tipic al degenerării unui program este proliferarea "faptelor" contradictorii. Folosind o teorie falsă ca o teorie interpretativă, se poate obține - fără a comite o "greșeală experimentală" - propuneri contradictorii faptice, rezultate experimentale inconsecvente.²⁶ Michelson însuși a fost frustrat de inconsecvența "faptelor" rezultate din măsurătorile sale.

Carlton Morris Caves propune șase posibile experimente de laborator pentru gravitația non-newtoniană: trei folosesc o balanță de torsiune ca detector, și alte trei folosesc un cristal dielectric de înaltă sensibilitate.²⁷ Ideea lui Caves este de a demonstra că tehnologia va face în curând posibilă o nouă clasă de experimente, exclusiv de laborator. Concluzia lui Caves este că niciunul dintre aceste experimente nu ar fi ușor de realizat, cauza fiind limitele tehnologiei actuale. Dar majoritatea sunt fezabile în viitorul apropiat.

Efectele puternice ale gravitației sunt observate astrofizic (pitice albe, stele neutronice, găuri negre), caz în care se folosesc, ca teste experimentale, stabilitatea piticelor albe, rata spin-down a pulsarilor, orbitele pulsarilor binari, existența unui orizont al găurii negre, etc.

Recent au fost dezvoltate o serie de teste cosmologice pentru teoriile legate de materia întunecată, folosindu-se pentru constrângeri rotația galaxiei, relația Tully-Fisher, viteza de rotație a galaxiilor pitice, și lentilele gravitaționale.

Pentru teoriile legate de inflația cosmică, cel mai strict test este prin măsurarea dimensiunii undelor în spectrul radiației cosmice de fundal cu microunde.²⁸

Pentru teoriile legate de energia întunecată, pot fi folosite ca teste rezultatele strălucirii supernovei și vârsta universului.

Există diferențe mari de predicții între relativitatea generală și fizica clasică, precum dilatarea timpului gravitațional, lentila gravitațională, deplasarea spre roșu gravitațională a luminii, etc. Și există multe teorii relativiste ale gravitației, bifurcate sau independente, dar teoria generală a relativității lui Einstein a confirmat toate predicțiile și este cea mai simplă dintre astfel de teorii.

²⁴ J. D. Bernal, *Science in History* J. D. Bernal, 3rd edition (M.I.T Press, 1965).

²⁵ Imre Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes: Volume 1: Philosophical Papers* (Cambridge University Press, 1980).

²⁶ Lakatos.

²⁷ Carlton Morris Caves, „Theoretical investigations of experimental gravitation” (phd, California Institute of Technology, 1979), <http://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:03152016-161054898>.

²⁸ Funcția potențial, care este crucială pentru determinarea dinamicii inflației, este pur și simplu postulată, și nu derivată dintr-o teorie fizică subiacentă.

Teste propuse de Einstein

Einstein afirmă, în *Teoria relativității - Relativitatea specială și relativitatea generală*,²⁹ că teoriile evoluează prin decalarea bazate pe observații, sub forma unor legi empirice, din care se obțin legile generale. Un rol important îl joacă intuiția și gândirea deductivă în acest proces. După stadiul inițial, investigatorul dezvoltă un sistem de gândire ghidat de date empirice, construit logic din ipoteze fundamentale (axiomele). "Adevărul" unei teorii rezultă din corelarea ei cu un număr mare de observații unice. Pentru aceleași date empirice pot exista mai multe teorii care diferă între ele.

Einstein vorbește, în *Teoria relativității- Relativitatea specială și relativitatea generală*, de predicția confirmată a relativității generale pentru mișcarea *periheliului lui Mercur*, cu o precizie mult mai mare decât cea prezisă de legea gravitației universale a lui Newton.³⁰

O altă predicție confirmată discutată de Einstein este *devierea luminii* de un câmp gravitațional, care admite un test experimental prin intermediul înregistrării fotografice a stelelor în timpul unei eclipse totale a soarelui, astfel: stelele din vecinătatea soarelui sunt fotografiate în timpul unei eclipse solare. A doua fotografie a acelorași stele este făcută când soarele este situat într-o altă poziție pe cer, cu câteva luni mai devreme sau mai târziu. Prin comparația pozițiilor stelelor, acestea ar trebui să apară deplasate radial spre exterior. Societatea Regală Britanică și Societatea Astronomică Regală a efectuat aceste teste prin două expediții, pe Sobral (Brazilia) și insula Principe (Africa de Vest), confirmând predicția.

Deplasarea liniilor spectrale către roșu a fost de asemenea prezisă de relativitatea generală și discutată de Einstein în aceeași carte, dar atunci când a fost scrisă această carte încă nu se confirmase cu siguranță. Se efectuaseră experimente pe benzile de cianogen, dar rezultatele nu au fost concludente în acea perioadă. Einstein propunea o verificare a deplasării medii ale liniilor spre marginea mai puțin refractabilă a spectrului, prin investigații statistice ale stelelor fixe.

În a doua ediție a cărții *Teoria relativității- Relativitatea specială și relativitatea generală*,³¹ Einstein afirmă că în dezvoltarea teoriei sale pentru "problema cosmologică" s-a bazat pe două ipoteze:

²⁹ Albert Einstein, *Teoria relativității: Relativitatea specială și relativitatea generală* (Nicolae Sfetcu, 2017), <https://books.google.ro/books?id=aMtNDwAAQBAJ>.

³⁰ Einstein.

³¹ Einstein.

1. Există o densitate medie a materiei în întreg spațiul, care este peste tot aceeași și diferită de zero.
2. Mărimea ("raza") spațiului este independentă de timp.

Ipotezele s-au dovedit a fi conforme cu teoria generală a relativității după introducerea unui termen ipotetic la ecuațiile câmpului ("termenul cosmologic al ecuațiilor câmpului"). Ulterior, Einstein a ajuns la concluzia că se poate păstra ipoteza (1) fără a apela la acel termen, dacă cineva se poate renunța la ipoteza (2) respectiv ecuațiile inițiale ale câmpului admit o soluție în care "raza lumii" depinde de timp (expansiunea spațiului), admițând astfel expansiunea spațiului.

Hubble, printr-o investigație a nebuloaselor extra-galactice, a confirmat că liniile spectrale emise au arătat o deplasare spre roșu proporțională cu distanța dintre nebuloase.

O importanță deosebită a avut, pentru Einstein, abordarea epistemologică a experimentelor de gândire. Aceste experimentele, prin modul cum au fost elaborate, au oferit o nouă înțelegere a fenomenelor puse în discuție.

La șaisprezece ani, Einstein și-a imaginat ce s-ar întâmpla dacă **se urmează un fascicul de lumină cu viteza luminii**.³² Experimentul este mai dificil decât pare la prima vedere. Einstein era, în acea perioadă, în căutarea unui "principiu universal" care ar putea duce la cunoașterea adevărată. Experimentul începe cu situația ipotetică de a urmări o undă de lumină cu viteza c . În acest caz al magnitudinii egale a vitezelor, "surferul" va observa o undă de lumină "înghețată", cu radiația de lumină ca un câmp electromagnetic static oscilant spațial, și proprietățile undei ar dispărea. Dar acest câmp independent de timp nu există, pentru că nu este în concordanță cu teoria lui Maxwell. Concluzia lui ar fi că un observator nu poate atinge niciodată viteza luminii, ipoteza sfiind falsă prin *modus tollens* în logica clasică. Einstein a afirmat că acest experiment conține un paradox întrucât cele două ipoteze incluse (constanța vitezei luminii și independența legilor (deci și constanței vitezei luminii) de alegerea sistemului inerțial (principiul relativității speciale)) sunt "reciproc incompatibile (în ciuda faptului că ambele luate separat se bazează pe experiență)"

În septembrie 1905, Einstein a încercat să extindă principiul relativității la sistemele de referință accelerate introducând un principiu fizic nou și puternic în 1907, "principiul echivalenței" (legile fizicii iau aceeași formă într-un sistem uniform de accelerare a coordonatelor ca într-un sistem care se găsește în repaus față de un câmp gravitațional omogen),

³² Albert Einstein, „Autobiographische Skizze”, în *Helle Zeit — Dunkle Zeit: In memoriam Albert Einstein*, ed. Carl Seelig (Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1956), 9–17, https://doi.org/10.1007/978-3-322-84225-1_2.

cu o valoare euristică foarte mare.³³ El a argumentat acest principiu prin "**experimentul de gândire al ascensorului**", considerat uneori drept cel mai important experiment de gândire al lui Einstein. Einstein presupune un cadru de referință accelerat cu o accelerație constantă în direcția x , și un al doilea cadru în repaus într-un câmp gravitațional omogen care conferă tuturor obiectelor o accelerație în aceeași direcție x . Observațional, nu există nicio distincție între cele două cadre. Toate corpurile sunt accelerate la fel în câmpul gravitațional. Astfel, principiul echivalenței permite înlocuirea unui câmp gravitațional omogen printr-un sistem de referință uniform accelerat. Această ipoteză a echivalenței fizice exacte a celor două cadre are două consecințe teoretice importante: nu putem vorbi despre o accelerație absolută a sistemului de referință, și căderea egală a tuturor corpurilor într-un câmp gravitațional.

³³ Abraham Pais, *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford ; New York: Oxford University Press, 2005), 179–80.

Bibliografie

- Bernal, J. D. *Science in History J. D. Bernal*. 3rd edition. M.I.T Press, 1965.
- Caves, Carlton Morris. „Theoretical investigations of experimental gravitation”. Phd, California Institute of Technology, 1979.
<http://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:03152016-161054898>.
- DeWitt, C. *Experimental relativity, in Relativity Groups and Topology. Lectures Delivered at Les Houches During the 1963 Session of the Summer School of Theoretical Physics*. Second Printing edition. Gordon & Breach, 1965.
- 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.
- . *Teoria relativității: Relativitatea specială și relativitatea generală*. Nicolae Sfetcu, 2017. <https://books.google.ro/books?id=aMtNDwAAQBAJ>.
- Fresnel, A. „Lettre a Francois Arago sur L’Influence du Mouvement Terrestre dans quelques Phenomenes Optiques, in Annales de chimie et de physique - 98 Years available - Gallica”, 1818.
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/cb343780820/date.r=Annales+de+chimie+et+de+physique.langEN>.
- 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>.
- Lakatos, Imre. *The Methodology of Scientific Research Programmes: Volume 1: Philosophical Papers*. Cambridge University Press, 1980.
- Larmor, Joseph. *On the ascertained Absence of Effects of Motion through the Aether, in relation to the Constitution of Matter, and on the FitzGerald-Lorentz Hypothesis*, 1904.
- Lense, Josef, și Hans Thirring. „Über den Einfluß der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie”. *Physikalische Zeitschrift* 19 (1918).
<http://adsabs.harvard.edu/abs/1918PhyZ...19..156L>.
- Lorentz, Hendrik A. „Considerations on Gravitation”. În *The Genesis of General Relativity*, ediție de Michel Janssen, John D. Norton, Jürgen Renn, Tilman Sauer, și John Stachel, 1038–52. Boston Studies in the Philosophy of Science. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4000-9_13.
- Matthews, Thomas A., și Allan R. Sandage. „Optical Identification of 3C 48, 3C 196, and 3C 286 with Stellar Objects.” *The Astrophysical Journal* 138 (1 iulie 1963): 30.
<https://doi.org/10.1086/147615>.
- Nordtvedt, Kenneth. „Equivalence Principle for Massive Bodies. II. Theory”. *Physical Review* 169, nr. 5 (25 mai 1968): 1017–25. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.169.1017>.
- Pais, Abraham. *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford ; New York: Oxford University Press, 2005.
- Popper, Karl Raimund. *The Logic of Scientific Discovery*. Psychology Press, 2002.
- 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>.
- 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>.
- 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>.

- Sitter, W. de. „On Einstein’s theory of gravitation and its astronomical consequences. Second paper”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 77 (1 decembrie 1916): 155–84. <https://doi.org/10.1093/mnras/77.2.155>.
- Smith, W. B. „Radar observations of Venus, 1961 and 1959”. *The Astronomical Journal* 68 (1 februarie 1963): 15. <https://doi.org/10.1086/108904>.
- Stokes, George Gabriel. *On Fresnel’s Theory of the Aberration of Light*. London, 1846.
- Whitrow, G. J., și G. E. Morduch. „Relativistic theories of gravitation : A comparative analysis with particular reference to astronomical tests”. *Vistas in Astronomy* 6 (1965): 1–67. [https://doi.org/10.1016/0083-6656\(65\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0083-6656(65)90002-4).
- Will, C. M. „Theoretical Frameworks For Testing Relativistic Gravity. Ii. Parametrized Post-Newtonian Hydrodynamics, And The Nordtvedt Effect.” *Astrophys. J.* 163: 611-28(1 Feb 1971)., 1 ianuarie 1971. <https://doi.org/10.1086/150804>.
- Will, Clifford M. *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*. Revised edition. Cambridge England ; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993.