

DE LA TEORIA RELATIVITĂȚII GENERALE LA OBSERVAREA GĂURILOR NEGRE

Augustin Cristian SERAFIN^{*}

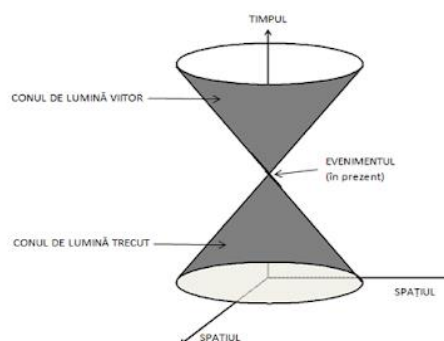
Keywords: general relativity theory, quantum of space-time, light cone, black holes, gravitational lenses.

După elaborarea teoriei relativității restrânse, analizând căderea liberă a corpurilor în câmpul gravitațional, Albert Einstein formulează în anul 1915 teoria relativității generale sau, altfel spus, teoria gravitației. Punând în acord căderea liberă în câmp gravitațional cu legile teoriei relativității restrânse (principiul de echivalență), care abandonează ideea de timp absolut și stabilește că toate legile fizicii sunt aceleași în toate Sistemele de referință inerțiale, arată că timpul nu este complet separat și independent de spațiu ci se combină cu acesta formând ceea ce se numește quantum spațiu-timp. În această nouă abordare nu există o distincție reală între coordonatele spațiale și coordonata de timp - spațiu cvadridimensional (Minkovskian). Abordarea matematică este una complexă care duce, în final, la renumitele ecuații ale lui Einstein, ecuații diferențiale cu derivate parțiale și a căror rezolvare duce la o multitudine de soluții în funcție de condițiile inițiale impuse.

Din punct de vedere fizic, acest model de spațiu cu patru dimensiuni poate fi tratat cu ajutorul unui con de lumină care are originea în timpul prezent și care se numește conul de lumină al evenimentului. Astfel, față de un eveniment prezent, putem considera conul de lumină viitor (viitorul absolut al evenimentului) sau conul de lumină trecut (trecutul absolut).

În acest mod putem afirma că orice eveniment din interiorul conului de lumină va urma o traiectorie reprezentată în interiorul lui deoarece, în acord cu teoria relativității restrânse, nimic nu poate depăși viteza luminii, care este constantă.

Astfel, gravitația este o consecință a faptului că spațiu-timpul nu este plan - el este curbat, sau "înfășurat", de distribuția masei și energiei în el. Corpurile urmează corpul cel mai apropiat printr-o traiectorie dreaptă într-un spațiu curbat, linie numită geodezică. Orbitele planetelor în jurul Soarelui nu mai sunt date de forțele de atracție (din teoria lui Newton) ci de mișcarea lor pe geodezicele spațiului curbat din jurul Soarelui.



Consecințe ale teoriei relativității generalizate

Consecințele teoriei gravitației sunt multiple și cu implicații directe în ceea ce privește cunoașterea și existența Universului. Unele aspecte au fost observate imediat, altele s-au dezvoltat ca teorii și au fost observate mult mai târziu, iar altele așteaptă dezvoltarea tehnicii pentru a putea fi pe deplin clarificate.

Dilatarea temporală gravitațională

Pornind de la principiul de echivalență, se observă că gravitația influențează scurgerea timpului astfel încât acesta trece mai încet lângă un corp masiv ca Pământul. Ceasul măsoară timpul mai încet la suprafața Pământului față de o anumită altitudine. Același fenomen se observă și din calcul, cu ajutorul transformărilor Lorenz la viteze apropiate de viteza luminii, acolo unde efectele gravitaționale se manifestă la fel, datorită creșterii masei. Einstein a explicat acest fenomen prin celebrul "paradox al gemenilor", fenomen măsurat, la scară mult mai mică odată cu ieșirea în Spațiu.

^{*} Fizician-chimist, profesor Palatul Copiilor Sibiu.

Deplasarea frecvenței luminii (Deplasarea spre roșu gravitațională)

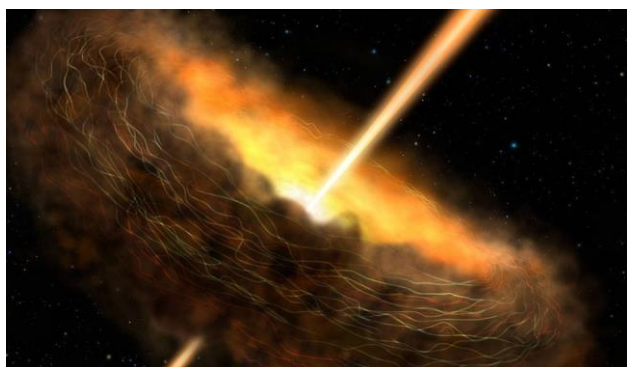
Evenimentele care se desfășoară în apropierea unui corp cu masa foarte mare au viteză mai mică decât cele care se desfășoară mai departe de acesta. Acest efect se datorează dilatării temporale gravitaționale și a spațiului, care este din ce în ce mai curbat cu cât apropierea este mai mare. Efectul a fost prezis de teoria relativității generale și apoi observat la razele de lumină care trec prin apropierea stelelor. Efectul a fost numit deplasarea spre roșu gravitațională a luminii și constă în faptul că lumina care vine din direcția unui corp masiv, cum ar fi un pulsar binar este deplasată spre roșu, adică spre frecvențe mai mici (lungimi de undă mai mari), datorită măririi vitezei odată cu îndepărtarea de corpul care produce curbarea spațiu-timpului.

Întârzierea gravitațională

Lumina în mișcarea ei prin Univers este deviată atunci când trece prin apropierea unui corp masiv (stele, pulsari, quasari) deoarece ea se va deplasa de-a lungul geodezicii spațiu-timpului dată de masa acelui corp. Această geodezică se numește geodezică luminoasă sau geodezică nulă și ea este generalizarea invarianței vitezei luminii în teoria relativității restrânse.

Pentru un observator aflat în afara conului de lumină, adică în afara efectului gravitațional al corpului pe lângă care trece lumina, aceasta este deviată dar, totodată, are nevoie de un timp mai îndelungat pentru a se propaga în acel câmp gravitațional. Acest efect este numit efectul Shapiro sau întârziere gravitațională.

Unde gravitaționale



Aceste unde au fost propuse, conceptual, în anul 1905, de către fizicianul Henri Poincaré, și apoi prezise de către Albert Einstein în cadrul teoriei relativității generale. Mai mult, în anul 1918, Einstein publică un articol despre undele gravitaționale (Gravitationswellen).

Undele gravitaționale sunt similare undelor electromagnetice și reprezintă perturbații în curbura spațiu-timp, fluctuații care se propagă cu viteza luminii. Aceste unde ar fi datorate gravitonilor, particule ce acționează între particulele corpurilor și care produc efecte măsurabile, așa cum este deplasarea Pământului pe orbită în jurul Soarelui sau atracția gravitațională. Aceste unde sunt foarte slabe și foarte greu de detectat, chiar și sub formă de radiație gravitațională.

În data de 17 martie 2014 a fost identificată pentru prima dată radiația gravitațională, ca unde asociate inflației cosmice din radiația cosmică de fond. Observarea a fost făcută de un grup de astronomi de la Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics.

În 11 februarie 2016, echipa de cercetători de la LIGO (Observatorul interferometru laser de unde gravitaționale) a anunțat că a reușit să detecteze undele gravitaționale provenite în urma ciocnirii a două găuri negre, situate la o depărtare de aproximativ un miliard de ani lumină de sistemul nostru solar.

Colapsul gravitațional. Singularități. Găuri negre

Odată cu apariția teoriei relativității generalizate și a ecuațiilor lui Albert Einstein au avut loc o serie de încercări de rezolvare a lor și de explicare a fenomenelor pe care acestea le preziceau în sens fizic. Astfel, au apărut o serie de modele cosmologice general-relativiste, toate în teorie și bazate pe soluții ale ecuațiilor lui Einstein.

O primă rezolvare este dată imediat după apariția teoriei, de către **Karl Schwarzschild, în anul 1919**, și soluția (matricea Schwarzschild) reprezintă raza limită dintre două sau mai multe corpuri fără ca unul din ele să sufere modificări datorită acțiunii gravitaționale a celuilalt corp. De fapt, soluția reprezintă abilitatea masei de-a curba spațiul-timpul. Soluția prevedea, de fapt, apariția

unei găuri negre care ar fi în interiorul acestei raze, iar suprafața razei acționează ca un orizont de evenimente.

În formă simplă, această rază se poate calcula cu relația $R=2GM/c^2$, unde R este raza Schwarzschild, G este valoarea gravitației, M - masa corpului și c - viteza luminii. Această rază este de aproximativ 7.8 milioane de km pentru galaxia noastră, de 3 km pentru Soare sau de aproximativ 9 mm în cazul Pământului.

În anul **1963 - Roy Keer** (Noua Zeelandă) a descoperit un set de soluții ale ecuațiilor relativității generalizate care descriau găurile negre rotitoare. Aceste găuri negre "Keer" se rotesc cu viteză constantă, dimensiunea și forma lor depinzând numai de masa și viteza lor de rotație. Dacă rotația este zero, gaura neagră este perfect rotundă și soluția este identică cu soluția Schwarzschild.

Primele explicații fizice ale fenomenelor care se produc la apariția corpurilor masive în Univers sunt expuse de fizicianul relativist **Roger Penrose, în anul 1965.**

"Orice corp care suferă un colaps gravitațional trebuie să formeze în cele din urmă o singularitate".

Există, deci, un set de evenimente într-o regiune a spațiu-timpului din care nu se poate ieși pentru a ajunge la un observator aflat la distanță. Limita sa se numește **orizontul evenimentelor** și el coincide cu traiectoriile razelor de lumină care nu au reușit să iasă din gaura neagră. Orizontul evenimentelor, limita găurii negre, este "marginea unei umbre - umbra unui sfârșit iminent". Dacă razele de lumină care formează orizontul evenimentului, limita găurii negre, nu se pot apropia niciodată una de alta, aria orizontului evenimentului poate rămâne aceeași sau se poate mări cu timpul dacă în gaura neagră ar cădea materie sau radiație.

În anul **1928, Subrahmanyan Chandrasekhar** (matematician indian) a calculat că există o limită pentru respingerea datorată principiului de excluziune. Teoria relativității limitează diferența maximă între vitezele particulelor de materie din stea la viteza luminii. Aceasta înseamnă că atunci când o stea ajunge destul de densă, respingerea cauzată de principiul de excluziune ar fi mai mică decât atracția gravitațională. Această masă se numește limita Chandrasekhar și ea este calculată la o valoare de 1,43 mase solare (aproximativ $2,85 \times 10^{30}$ kg).

Pe baza acestei limite s-a stabilit că o stea, după ce își epuizează combustibilul, va suferi un colaps gravitațional și se va transforma într-o **pitică albă** sau într-o stea neutronică de tip "Landau" dacă masa ei rămâne sub limita Chandrasekhar.

În anul **1939, Oppenheimer, Tolman și Volkoff** au stabilit limita la care o stea neutronică colapsează gravitațional și se transformă într-o gaură neagră. Ei au calculat că această limită se situează la aproximativ 2,17 mase solare ale stelei neutronice. Ultimii pulsari descoperiți arată că această limită poate fi extinsă până la aproximativ 3 mase solare ale stelei neutronice (care ar proveni dintr-o stea cu masa de 15-20 de ori mai mare decât Soarele). Astfel, se poate stabili că orice stea neutronică cu masă mai mare decât această limită va colapsa gravitațional și se va transforma într-o singularitate.

Observații și descoperiri astronomice care validează teoria relativității generale

În **1963, Marten Schmidt - Observatorul Palomar din California** a descoperit colapsul gravitațional al unei întregi regiuni centrale a unei galaxii (câmpul gravitațional era mult prea mare pentru a fi al unei singure stele) și care prezintă o deplasare spre roșu fiind numită **quasar**.

În **1967, Jocelyn Bell - Cambridge** a descoperit obiecte din spațiu care emiteau impulsuri regulate de unde radio, pe care le numește **pulsari**. Este prima descoperire a unei stele neutronice rotative.

În **1972, Charles Thomas Bolton, Louise Webster și Paul Murdin** descoperă Sistemul Cygnus X-1 o puternică sursă de raze X, aflată la aproximativ 6000 de ani lumină în galaxia noastră. Steaua este de 6 ori mai mare decât Soarele și se găsește în apropierea unui companion nevăzut care prin exercitarea gravitației atrage materie de pe suprafața stelei și care datorită încălzirii puternice emite radiație X. Din calculele bazate pe teoria relativității generale reiese că corpul nevăzut ar trebui să fie o gaură neagră. Din acel moment și până în prezent au fost studiate mai multe sisteme binare asemănătoare, toate confirmând posibilitatea existenței de găuri negre.

În noiembrie 2011 a fost raportată prima observație directă a unui disc de acreție pentru un quasar în jurul unei posibile găuri negre supermasive și care întărea ideea că în centrele galaxiilor ar trebui să se găsească găuri negre supermasive.

În 2012 este observat cel mai apropiat pulsar de noi și anume PRS JO437-4715, aflat la circa 500 de ani lumină.

În 2014 și 2019 sunt observați doi pulsari cu mase care depășesc limita de 2,2 mase solare, ceea ce a determinat reexaminarea ei și extinderea acesteia până la aproximativ 3 mase solare.

În aprilie 2017, telescopul spațial Hubble și telescopul Chandra (observator în domeniul razelor X) și-au orientat câmpul vizual spre centrul unei galaxii foarte mari, aflată la circa 55 de milioane de ani lumină de noi, numită **galaxia M 87**, și au obținut imagini ale discului de jeturi de materie incandescentă din jurul centrului galactic. În acel moment, toată atenția s-a îndreptat spre acea presupusă gaură neagră masivă și, după doi ani, au venit și primele imagini.

10 aprilie 2019 este ziua marelui anunț făcut de cercetătorii de la Smithsonian Astrophysical Observatory din Cambridge, SUA, cu privire la obținerea primelor imagini a găurii negre din centrul galaxiei M 87. Obținerea imaginilor s-a realizat cu ajutorul a opt radiotelescoape care au colectat datele făcând observări pe lungimea de undă de 1,3 mm a spectrului electromagnetic.

Rezultatul a constatat în obținerea imaginii orizontului evenimentului găurii negre care apare ca un disc de acreție (vârtejul de materie incandescentă din gazul interstelar ce intră sub influența gravitațională a unei găuri negre - temperaturi de milioane de grade Celsius).

Masa găurii negre a fost estimată la aproximativ 6,5 miliarde de mase solare și imaginile confirmă teoria relativității generalizate în condițiile extreme din vecinătatea găurilor negre.



Imaginile nr. 1 și nr. 2 Gaura neagră din Galaxia M 87
Comparăție cu dimensiunile Sistemului Solar

Lentila gravitațională

Datorită curburii spațiu-timpului și a devierii luminii atunci când trece prin apropierea unui corp masiv, aceasta suferă un fenomen de refracție asemănător trecerii prin medii diferite. Acest fenomen a fost prevăzut de la începutul apariției teoriei relativității generale chiar de către Albert Einstein, care l-a denumit lentilă gravitațională.

La trecerea luminii provenită de la un corp luminos îndepărtat pe lângă un corp suficient de masiv pentru a modifica liniaritatea spațiului, un observator va vedea imaginea distorsionată a corpului care emite lumina sau chiar mai multe imagini.

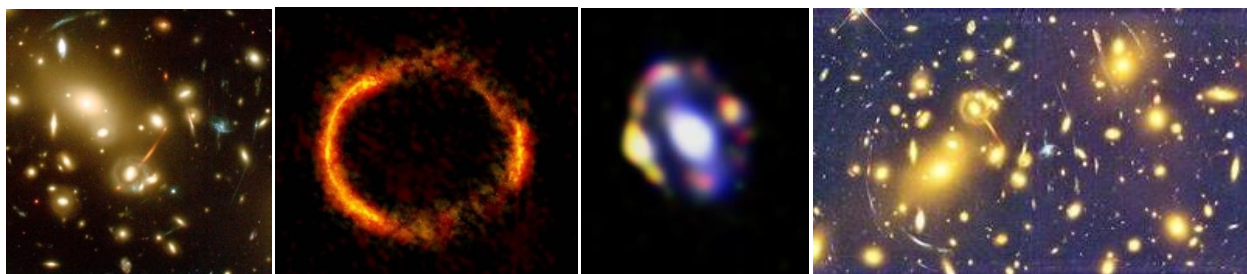
În funcție de configurație, scară și distribuție de masă, pot apărea două sau mai multe imagini: un inel luminos, denumit inel Einstein, sau inele parțiale, denumite arce luminoase. Primul inel Einstein a fost observat în 1979, iar din acel moment au fost observate câteva sute de astfel de fenomene astronomice.

Curbura spațiu-timpului nu este uniformă ci ea este mai accentuată în apropierea corpului masiv (rază mai mică) și din ce în ce mai aplatizată cu cât ne îndepărtăm (rază mai mare), astfel, lumina în devierea ei va avea un parcurs asemănător trecerii printr-un con de sticlă. Unii fizicieni relativiști au comparat acest fenomen cu privitul prin piciorul unui pahar de sticlă. Trebuie menționat și faptul că o apropiere mai accentuată de corpul masiv modifică mai mult viteza luminii

(o scade), producând atât deplasarea spre roșu (scăderea frecvenței), cât și o modificare a refringentei (creștere a indicelui de refracție), fenomen care face ca imaginea observată să aibă o densitate luminoasă diferită (crește de la interiorul inelului spre exteriorul lui) și o accentuare a roșului în inel.

Lentilele gravitaționale au dus la crearea unei întregi ramuri a astronomiei observaționale utilizată pentru a detecta prezența corpurilor masive nevăzute din Univers (pulsari, quasari, găuri negre), precum și detectarea prezenței și distribuției materiei întunecate. De asemenea, ele pot fi utilizate ca un "telescop natural" pentru observarea galaxiilor îndepărtate și pentru a observa expansiunea spațiului. Lentila gravitațională a fost utilizată pentru obținerea valorii constantei Hubble, sub forma unei metode și estimări independente de celelalte metode. Evaluări statistice ale datelor obținute cu ajutorul lentilelor gravitaționale furnizează informații valoroase asupra comportamentului și structurii galaxiilor îndepărtate.

Prin observarea galaxiilor îndepărtate, utilizând lentile gravitaționale, se poate determina gradul de distorsionare a luminii și astfel se pot elabora hărți ale distribuției masei întunecate în Univers. Lentila gravitațională nu ne ajută să spunem ce este materia întunecată, dar ne spune unde se găsește.



Imaginile nr. 3 - 6 *Galaxii și lentile gravitaționale*

Bibliografie:

Stephen W. Hawking, *Scurtă istorie a timpului. De la Big-Bang la găurile negre*, 1994, Editura Humanitas, București.

<https://www.researchgate.net/>

<https://scientia.ro/>

FROM THE THEORY OF GENERAL RELATIVITY TO THE OBSERVATION OF THE BLACK HOLES

The beginning of the twentieth century was marked by two new theories in physics, which completely changed the scientific view on the development of events in time and space and on the structure of matter: - general relativity theory and quantum theory. The general theory of relativity surprised by the fact that it was based only on the principle of equivalence with the theory of restricted relativity and considered space and time as a whole in a mathematical interdependence (the quantum of space-time), without being tested experimentally. After more than 100 years, the theory is still verified by observations current ones such as gravitational lenses, gravitational waves or even black holes.