

Key words: big bang, cosmology, Planck units, string theory, quantum loop gravity

Înțelegerea evoluției Universului a progresat spectaculos în ultimele decenii, în special din cauza dezvoltării unor teorii convingătoare ale gravitației cuantice. Detectarea recentă a undelor gravitaționale, recompensată rapid cu Premiul Nobel pentru fizică, reprezintă, de asemenea, un indiciu al noilor orizonturi care se deschid în domeniul astronomiei observaționale.

Vom încerca să schițăm evoluția înțelegerii gravitației, de la Newton până astăzi, și impactul ei asupra înțelegerii universului. După o scurtă prezentare a teoriei newtoniene a gravitației, vom analiza impactul pe care marile descoperiri ale sec. XX, teoria cuantică și teoria relativității, le-au avut asupra astrofizicii și cosmologiei. Ne vom opri apoi la variantele cele mai promițătoare ale gravitației cuantice, supuse unor investigații extrem de active: teoria corzilor (string theory) și gravitația cuantică cu bucle (quantum loop gravity) - ambele denumiri sună relativ neobișnuit în românește. Vom vedea care sunt deosebirile de esență între cele două teorii, cum răspund ele la întrebările cele mai tulburătoare referitoare la univers (Ce a fost înaintea Big Bang-ului? Există un singur univers sau mai multe?) și în ce măsură observațiile și măsurătorile astronomice și astrofizice pot decide care teorie este corectă - sau cel puțin care teorii sunt greșite.

Teoria newtoniană a gravitației se bazează pe legea atracției universale, care postulează că între două mase aflate la distanța d se exercită o forță de atracție dată de relația [1]:

$$F = (Gm_1m_2)/d^2$$

Sub aspect principial, legea are două neajunsuri evidente: (1) interacția se propagă instantaneu (efectul atracției unei mase care se mișcă brusc pe Pământ ajunge instantaneu pe Jupiter, sau în orice alt punct, oricât de îndepărtat); (2) interacția, întotdeauna atractivă, va produce, după un timp suficient de îndelungat, colapsarea întregii materii din Univers. Newton era perfect conștient de aceste neajunsuri, dar nu avea nici o posibilitate de a le înlătura. Sub aspect practic, legea a cunoscut un succes uriaș, reușind să explice toate observațiile astronomice din sistemul solar, de la apariția sa (1687) până în 1859, când Urbain Le Verrier a constatat o infimă abatere de la predicțiile acesteia: semiaxa mare a elipsei pe care se mișcă planeta Mercur nu este fixă, cum rezultă din calcule, ci are un avans de circa 40 de secunde de arc pe secol (denumit avans de periheliu, [2]). Anomalia nu s-a putut explica în cadrul mecanicii newtoniene, de exemplu presupunând existența unei mici planete învecinate sau o ușoară turtire (oblatness) a Soarelui.

Merită menționat că, prin această lege, este introdusă în fizică prima constantă universală, $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$.

Teoria cuantică se naște odată cu secolul trecut - în 1900, prin descoperirea faptului că energia radiației electromagnetice de frecvență f nu poate lua valori arbitrare, ci doar multipli ai unei cuante având valoarea de $E = hf$, unde $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ este o constantă universală, numită constanta lui Planck. Cuantificarea a fost introdusă de Planck în scopul descrierii corecte a energiei emise de un corp fierbinte, mai exact pentru înlăturarea unor mărimi infinite care apar în teoria clasică a radiației ("catastrofa ultravioletă"). Teoria cuantică a fost folosită de Bohr pentru a explica stabilitatea și spectrul radiației emise de atomul de hidrogen. Ulterior, Luis de Broglie a postulat caracterul dual, ondulatoriu și corpuscular al materiei, iar Schroedinger, Heisenberg, Born și Dirac au pus bazele mecanicii cuantice, capabilă să descrie practic toate fenomenele microcosmosului.

Teoria relativității speciale a fost propusă de Einstein în 1905. Considerând că viteza de propagare a luminii în vid este viteza maximă cu care se poate propaga un semnal, Einstein a arătat că mărimea lungimilor și a intervalelor de timp sunt dependente de starea de mișcare (considerată

* IFIN-HH și Catedra UNESCO a FHH

uniformă) a sistemelor de referință în care sunt măsurate. În deceniul următor, Einstein a elaborat teoria relativității generale, în care a arătat că spațiul și timpul - mai exact, spațiul-timp - este dependent de distribuția maselor. În fapt, masele curbează spațiul-timp, iar curbura spațiului-timp influențează mișcarea maselor. De exemplu, o rază de lumină (sau, în terminologie corpusculară, un foton) care trece în apropierea unei stele, nu se propagă în linie dreaptă, ci pe o traiectorie ușor curbată, din cauza atracției exercitate de stea. Prin teoria relativității este introdusă în fizică o nouă constantă universală, viteza luminii în vid, $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. În relativitatea generală, interacția se propagă cu viteză finită, dar problema singularității rămâne: neexistând nici o forță repulsivă care să se opună atracției gravitaționale, universul va colapsa, după un timp suficient de îndelungat, într-o singularitate de densitate infinită. Întrucât omul are o masă foarte mare, comparată cu masele atomice, și se deplasează cu viteze foarte mici, comparate cu viteza luminii, atât mecanica cuantică, cât și teoria relativității sunt extrem de contra-intuitive. Totodată, atât teoria cuantică, cât și cea relativistă - în special relativitatea generală - folosesc formalisme matematice incomparabil mai complicate decât fizica tradițională. Consecința este că atât fizica cuantică, cât și cea relativistă sunt greu de înțeles, și cu atât mai greu de înțeles sunt teoriile care le combină.

Inițial, teoria cuantică, aparent o teorie a microcosmosului, și relativitatea generală, sau teoria gravitației, aparent o teorie a macrocosmosului, nu păreau să aibă prea multe în comun. Totuși, Planck a observat încă de la început că, din constantele universale G , h și c se pot construi o mărime cu dimensiuni de lungime, una cu dimensiuni de masă și una cu dimensiuni de timp, anume [3]:

$$L_P = (hG/2\pi c^3)^{1/2} = 1.6 \times 10^{-35} \text{ m, lungimea Planck}$$

$$M_P = (hc/2\pi G)^{1/2} = 2.2 \times 10^{-8} \text{ kg, masa Planck}$$

$$T_P = (hG/2\pi c^5)^{1/2} = 5.4 \times 10^{-44} \text{ s, timpul Planck}$$

Putem presupune că lungimea Planck indică scala la care fenomenele gravitaționale și cele cuantice sunt comparabile ca importanță. Este o scală în care electronul este un gigant, având circa 10^{20} lungimi Planck. Este, de asemenea, interesant faptul că raportul dintre vârsta universului și timpul Planck, dintre masa universului și masa Planck, dintre dimensiunea universului și lungimea Planck sunt aproximativ egale - valoarea lor fiind de circa 10^{60} . Aceste coincidențe par să indice că abordarea simultană a relativității generale (gravitației clasice) și a teoriei cuantice poate oferi cheia pentru înțelegerea problemelor fundamentale ale cosmologiei, una dintre ele fiind descrierea fazelor timpurii ale universului, în special a big bang-ului.

Gravitația cuantică

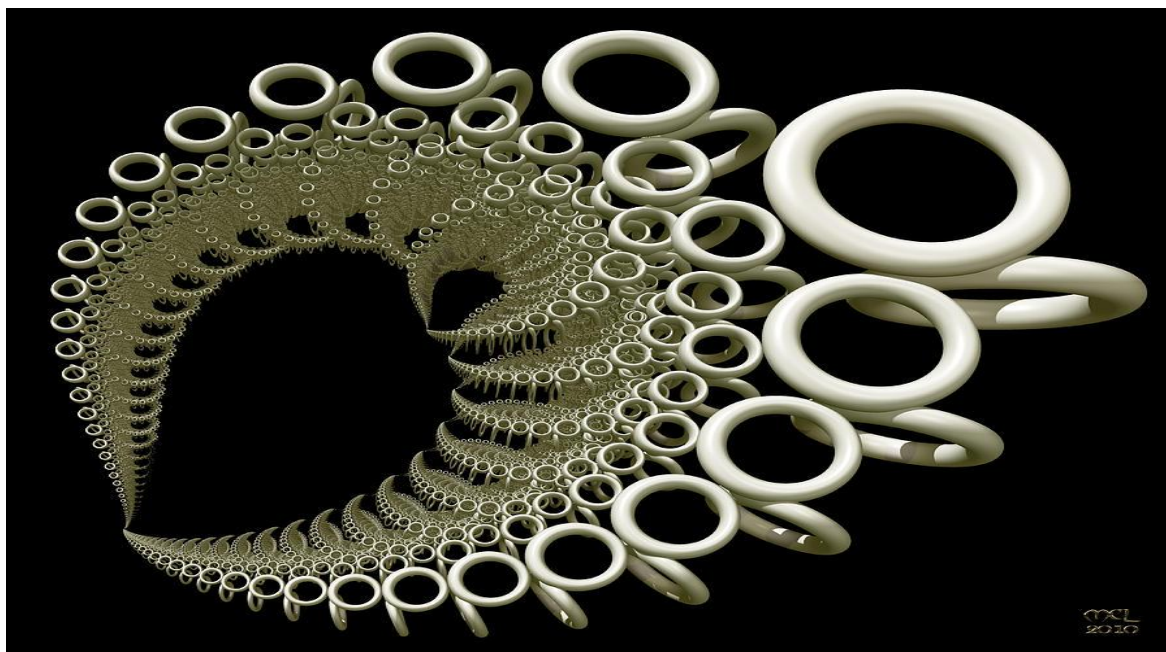
Există mai multe speranțe legate de înlăturarea dificultăților cosmologiei prin folosirea fizicii cuantice în studiul gravitației. În fizica cuantică apar forțe repulsive, atunci când mai multe particule identice, similare electronilor, protonilor sau neutronilor (numite, generic, fermioni) sunt confinate într-un spațiu mic. Acest efect este responsabil, de exemplu, de așezarea electronilor din atom în pățuri succesive: ei nu se pot apropia prea mult unii de alții. Forțele repulsive, de natură cuantică, par singurele care se pot opune gravitației și pot împiedica colapsarea universului într-o stare de densitate infinită (singulară). Totodată, pare rezonabil să căutăm un mecanism prin care singularitățile asociate Big Bang-ului pot fi înlăturate, așa cum a înlăturat Planck singularitatea asociată radiației electromagnetice a unui corp fierbinte.

Teoriile cuantice ale gravitației nu reprezintă nicidecum preocupări recente, dar evoluția lor din ultimele decenii oferă motive de optimism pentru cosmologie. Din multitudinea de teorii relevante, teoria corzilor (string theory) și gravitația cuantică cu bucle (quantum loop gravity) par a fi cele mai promițătoare.

Teoria corzilor oferă un răspuns simplu la întrebarea: cât de departe se poate merge cu divizarea materiei? Atomul este format din electroni și nucleu, nucleul este format din protoni și neutroni, aceștia sunt formați din cuarci, dar unde ne oprim? Răspunsul este: particula ultimă, coarda (string-ul), se poate diviza, dar tot în coarde. Dincolo de coarde, oscilații confinate în spații foarte mici, nu există nimic [4].

Dificultatea principală a teoriei corzilor constă în numărul foarte mare de soluții aparent echivalente ale ecuațiilor teoriei, între care este deocamdată imposibil de ales soluția fizică.

Gravitația cuantică cu bucle aplică cuantificarea nu numai materiei, ci și spațiului-timp. Acesta este oarecum asemănător unei spume extrem de fine. Spațiul e țesut din obiecte unidimensionale descrise matematic de bucle. Imaginile acestuia, propuse în lucrări de popularizare trebuie privite cu maximă prudență.



"Atomi de spațiu"

Numărul buclelor este enorm: într-un metru cub de spațiu vid, el este aproximativ egal cu numărul cuburilor având latura egală cu lungimea Planck, deci circa 10^{100} . Structura atomizată a spațiului-timp împiedică reducerea la zero a dimensiunii domeniului spațial în care se poate concentra materia, și atingerea unor densități infinite - în alți termeni, împiedică apariția singularităților. După ce ajunge în starea de densitate maximă, spațiul discret se poate întoarce pe dos ca o mănășă, și universul își poate continua evoluția. Forțele repulsive ale gravitației cuantice evită singularitatea, salvează spațiul-timp de distrugere și fac posibilă existența unei lumi înainte de Big Bang. Aspectul universului în primele momente de după Big Bang pot păstra amintirea acestei lumi anterioare.

Alte întrebări fundamentale ale cosmologiei țin de fizica găurilor negre. Gaura neagră este doar o regiune extrem de densă, sau o zonă de ramificare a spațiului-timp prin care apare un univers-fiică? Acest univers-fiică are, la rândul său, găuri negre care generează alte universuri-fiică, și tot așa? Cunoașterea acestor universuri pare principial imposibilă. Există totuși posibilitatea ca, la separarea noilor universuri, "constantele universale" (constanta gravitației a lui Newton, constanta lui Planck, viteza luminii) să se modifice ușor, o anumită cantitate de informație să răzbată astfel din gaura neagră, și detectarea unor mărimi fizice ori fenomene descrise de noile "constante universale" să ofere un indiciu indirect al existenței noilor universuri.

Deocamdată, motivul pentru care fizicianul alege una sau alta dintre aceste două teorii este pur subiectiv. Pentru teoria corzilor, esențială este materia - sub aspect matematic, proprietățile de simetrie ale funcțiilor de undă care descriu particulele. Pentru gravitația cuantică cu bucle, esențial este spațiul, a cărui structură este considerată mai importantă pentru înțelegerea universului decât proprietățile materiei. Motivul se află așadar dincolo de fizică - este metafizic. Faptul că observațiile astronomice vor decide cândva între aceste două teorii ar putea fi un exercițiu de metafizică experimentală, concept introdus de Abner Shimony [5]. Studiul cosmologiei ne conduce, astfel, la aspectele fundamentale ale cunoașterii.

Cele două teorii dau predicții cosmologice ușor diferite, referitoare la fazele timpurii ale universului, despre care ne vorbesc, în principal, datele obținute din studierea (1) radiației cosmice de fond (fondului cosmic de microunde); (2) cartografierea galaxilor; (3) determinarea distanței la care se află stelele care explodează cu violență maximă; (4) undelor gravitaționale și (5) neutrinilor.

Mărirea preciziilor acestor observații cu câteva ordine de mărime - sarcină extrem de dificilă, dar nu fantezistă - ar putea facilita răspunsul la întrebările fundamentale: Cum arată universul înainte de Big Bang? Toate fenomenele sunt descrise folosind aceleași "constante universale", sau nu? Există un singur univers, sau mai multe?

Notă. O excelentă introducere în cosmologia modernă este cartea lui Martin Bojowald [6], din care autorul articolului de față a preluat mai multe idei.

Bibliografie:

[1] Ch. Kittel: *Mecanica. Cursul de fizica Berkeley*, vol. 1, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981.

[2] [https://en.wikipedia.org/wiki/Mercury_\(planet\)#Advance_of_perihelion](https://en.wikipedia.org/wiki/Mercury_(planet)#Advance_of_perihelion).

[3] https://en.wikipedia.org/wiki/Planck_units.

[4] L. Susskind: *Peisajul cosmic. Teoria corzilor și iluzia unui plan inteligent*, Editura Humanitas, București, 2014.

[5] https://en.wikipedia.org/wiki/Abner_Shimony.

[6] M. Bojowald: *Ce a fost înainte de Big Bang? O istorie completă a Universului*, Editura Humanitas, București, 2016.

OBSERVATIONAL ASTRONOMY AND COSMOLOGICAL THEORIES

The understanding of the evolution of the Universe made great progress in the last few decades, mainly because of the developing of several successful theories of quantum gravity (the most interesting ones being the string theory and the loop quantum gravity) and because of the new experimental tools of investigation; the detection of the gravitational waves is the most spectacular example.

The paper presents shortly the Newtonian theory of gravity, its great achievements but also its weaknesses, and the way in which the relativity and the quantum theory improve its content. So, the main difficulties of the Newtonian theory are the instantaneous propagation of the interaction and the lack of a repulsive force, which could prevent the collapse of the whole Universe, due to the gravitational attraction, into a state of infinite density - an unphysical situation.

The relativity removes the first difficulty - the gravitation interaction propagates with a finite velocity (the speed of light), but a repulsive force, able to prevent the singularity, is still missing, even in its most general form, when the masses are present and the space-time is curved. However, the Planck units, introduced by the father of quantum physics just simultaneously with his theory of black body radiation, suggests that the quantum aspects of gravity becomes relevant at extremely small distances and times. In the loop quantum gravity, the space-time is quantized, as a 4-dimensional foam with cells having approximately the dimension of a Planck distance, and the singularity of the big bang is removed. In all quantum theories, there is a repulsive force, of quantum origin.

There is an essential difference between the loop quantum gravity and the string theory: for the first one, the main ingredient is the structure of space; for the second one - the symmetries of the fundamental interactions and elementary particles. We could expect that the experimental measurement of neutrinos flux, of the distribution of galaxies, of the anisotropy of the cosmic background radiation and of the gravitational waves will indicate, in the next few decades, the correct theory of gravitation and the correct cosmology, or at least will eliminate many of the incorrect ones. This endeavor claims the increase of the precision of measurements with several orders of magnitude - a very difficult, but still achievable goal.