

PARADOXUL LUI HAWKING

Roman Chirilă

roman.chirila@ici.ro

Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Informatică - ICI București

Rezumat: Din momentul în care se formează, o gaură neagră începe să radieze energie, numită radiație Hawking, pierzând astfel din masa ei. Această radiație Hawking nu conține nicio informație legată de substanța materială din interiorul găurii negre și odată cu evaporarea găurii negre se pierde și toată informația legată de aceasta. Paradoxul lui Hawking (sau paradoxul informației dintr-o gaură neagră) sugerează faptul că informația fizică ar putea să dispară definitiv dintr-o gaură neagră, prin dizolvarea mai multor stări fizice într-o aceeași singură stare. Este știut faptul că radiația Hawking este complet independentă de materia care intră în gaura neagră, dar dacă această materie era într-o stare cuantică pură, transformarea acesteia într-o stare mixtă a radiației Hawking ar distruge informația despre starea cuantică inițială. Pe de altă parte, conform mecanicii cuantice, informația completă despre un sistem este încifrată în funcția ei de undă până la colapsarea acesteia. Evoluția funcției de undă este determinată de un operator unitar, iar caracterul unitar al operatorului implică faptul că informația din perspectivă cuantică se conservă. Acest fapt reprezintă cea mai strictă formă a determinismului cuantic. Paradoxul lui Hawking derivă din faptul că el încalcă acest determinism cuantic și prezintă această formă de paradox fizic.

Lucrarea de față prezintă aspecte de fizică ale acestui paradox al pierderii de informație dintr-o gaură neagră, fiind discutate și conflictele cu legi ale fizicii cuantice, care afirmă faptul că o informație nu poate fi niciodată distrusă.

Cuvinte cheie: găuri negre, paradox, determinism cuantic, radiație Hawking.

Abstract: Once a black hole forms, it starts losing mass by radiating energy, called Hawking radiation. This Hawking radiation contains no information about the matter inside the black hole and once the black hole evaporates, all information is lost. The Hawking paradox (or the black hole information paradox) suggests that physical information could permanently disappear in a black hole, allowing many physical states to devolve into the same state. It is well known that the Hawking radiation is completely independent of the material entering the black hole but if the material entering the black hole were a pure quantum state, the transformation of that state into the mixed state of Hawking radiation would destroy information about the original quantum state. On the other hand, according to the quantum mechanics, the complete information about a system is encoded in its wave function up to when the wave function collapses. The evolution of the wave function is determined by a unitary operator, and unitarity implies that information is conserved in the quantum sense. This is the strictest form of quantum determinism. The Hawking paradox is controversial because it violates the quantum determinism and presents a physical paradox.

The present paper presents the physical aspects of the black hole loss information paradox but the conflicts with the laws of quantum physics, which say that such information can never be completely wiped out, are also discussed.

Key words: black holes, paradox, quantum determinism, Hawking radiation.

1. Introducere

În anii 1970, Stephen Hawking a demonstrat că găurile negre nu sunt în totalitate „negre”, ci emit foarte lent o radiație care ar provoca evaporarea lor treptată, până la dispariție. Dacă ar dispărea o gaură neagră, atunci întreaga informație despre steaua al cărui colaps a dus la formarea găurii negre ar dispărea și ea. Acest fapt contrazice principiul conform căruia informația nu poate fi distrusă [1].

După aproximativ treizeci de ani de argumentare cum că găurile negre înghit și distrug tot ceea ce intră în ele, inclusiv lumina, Hawking pare să recunoască acum faptul că a greșit. Găurile negre par să scape informația conținută în ele, astfel încât odată evaporată întreaga gaură neagră, toată informația conținută dispăre și ea. Alți fizicieni au încercat să rezolve acest paradox, tratând găurile negre din perspectiva teoriei stringurilor, în care universul nostru ar fi constituit nu din particule punctiforme, ci din mici corzi care vibrează. În acest caz, odată cu radiația Hawking ar fi emisă și informația despre interiorul găurii negre [2], [3].

Concepția actuală cu privire la găurile negre susține că acestea sunt formate din două părți: un *orizont al evenimentelor* și o *singularitate*. Această singularitate, care este un fel de miez al găurii negre, prezintă o asemănare absolut uluitoare cu Big Bang-ul, explozia inițială din care a decurs întreg scenariul de formare a universului nostru. Din această perspectivă, găurile negre reprezintă

regiuni în care spațiul și timpul se sfârșesc, legile fizicii își pierd valabilitatea, iar materia este complet dezintegrată. Dacă am înțelege exact mecanismul intim prin care încetează timpul să mai existe, poate că atunci am înțelege și cum a început să existe timpul la momentul Big Bang-ului. Această problemă a reușit să-l incite pe savantul britanic, de la preocuparea unui cercetător de excepție până la ambiția obsedantă de a găsi o descriere matematică absolut completă a găurilor negre și, implicit, a începutului acestui univers, de a găsi o teorie a totului (theory of everything), care să poată explica totul: cum a început timpul, cum s-a născut spațiul, cum a decurs totul și cum vor decurge toate în continuare, în acest univers în care locuim și noi. Eforturile sale l-au condus în cele din urmă pe Stephen Hawking să descopere celebra ecuație a entropiei găurilor negre:

$$S = \frac{c^3 A}{4\hbar G}$$

O ecuație simplă, elegantă, în care apar simboluri din mai toate capitolele importante ale fizicii. Iată, avem G – constanta gravitațională newtoniană, dar avem și c – constanta luminii din relativitatea einsteiniană, apoi avem $\hbar = h / 2\pi$ – constanta lui Planck, din halucinanta mecanică a cuanticii și S – entropia, din termodinamică și statistică. Capitole atât de diferite din fizică sunt strânse într-o singură ecuație, fascinantă până la perplexitate pentru cel care încearcă să-i descopere profunzimea cognitive și semnificațiile profunde, confirmând reputația de geniu a lui Hawking. O ecuație atât de simplă și de elegantă nu poate să nu fie și adevărată, pentru că ea arată că există o unitate profundă și pronunțată în natură, că există o neverosimilă transparență între micro și macro, între cele văzute și cele doar intuite, că există un fascinant echilibru al întregului eșafodaj pe care noi îl numim univers, doar din precaritate.

Această relație, care a făcut din Hawking figura celui mai influent fizician de după Einstein, a adus cu sine premisele unui paradox care îi pot umbri prestigiul său științific. Până la această relație, se credea că o gaură neagră este ceva rece și etern. Acum, S înseamnă entropie, deci agitație, căldură, fierbere, deci radiație... Adică, o gaură neagră va radia căldură, până ce, în cele din urmă, va dispărea! Și cu ea, va dispărea și toată informația conținută. Acesta este miezul paradoxului lui Hawking pe care urmează să-l discutăm. Pierderea de informație are consecințe dintre cele mai dramatice: prin pierderea de informație, dispar părți din univers, dispare predictibilitatea, cauza și efectul se decuplează, iar trecutul și viitorul își pierd semnificația lor actuală; odată cu pierderea de informație, se pot evapora bucăți din viețile noastre, amintirile noastre, care tot informații sunt, dispar pur și simplu, tot ce-am iubit, tot ce-am văzut, tot ce-am trăit se pot evapora pentru totdeauna. Acest paradox lovește în miezul realității noastre înconjurătoare, în miezul vieții noastre, în miezul și esența metafizică a universului nostru.

Pentru că nu putem trimite sonde în interiorul unei găuri negre, pentru a vedea ce se întâmplă cu adevărat acolo, cercetătorii sunt nevoiți să se bazeze doar pe teorie pentru a determina acest lucru. Teoria singularității suferă, deci, de ceea ce a ajuns să fie cunoscut sub numele de „paradoxul pierderii informației”, și anume ideea că găurile negre par să distrugă informația din interiorul lor. Acest paradox i-a făcut pe fizicieni, inclusiv pe Stephen Hawking, să se gândească la soluții alternative sau chiar la unele modificări ale teoriilor existente.

Pentru a înțelege mai bine intimitățile acestui paradox al pierderii de informație, vom defini, pe scurt, principalele caracteristici ale găurilor negre, fără a avea pretenția exhaustivității tratării acestora.

2. Definiții prealabile

Găurile negre se formează prin colapsul stelelor de masă mare într-o supernovă, la sfârșitul vieții lor. După formare, gaura neagră poate continua să se dezvolte, absorbind masă din vecinătatea ei. Prin absorbția de stele, sau prin contopirea cu alte găuri negre, se pot forma găuri negre uriașe, super-masive, cu masa de milioane de ori mai mare decât cea a Soarelui. În momentul de față, există o puternică tendință spre consens asupra acceptării ideii conform căreia în centrul majorității galaxiilor se află o gaură neagră super-masivă. Drept exemplu, există dovezi solide ce indică existența unei găuri negre de peste patru milioane de mase solare în centrul Căii Lactee [4].

Prin urmare, o gaură neagră reprezintă un obiect astronomic limitat de o suprafață în interiorul căreia câmpul gravitațional este foarte puternic, astfel încât nimic nu poate scăpa din interiorul acestei suprafețe, cunoscută și sub denumirea de *orizontul evenimentului*. Gaura neagră are în centrul ei o regiune numită *singularitate*.

La suprafața limită, gravitația este atât de mare, încât nicio rază (sau particulă) de lumină din interiorul găurii nu are energie suficientă pentru a ieși afară. La această suprafață limită, deplasarea gravitațională spre roșu este infinit de mare, iar viteza de ieșire este egală cu viteza luminii, așa încât raza suprafeței limită este egală cu raza traiectoriei circulare, numită *raza Schwarzschild*.

Radiația Hawking. Vom vedea în cele ce urmează cum emit găurile negre așa-numita radiație Hawking, proces care poate duce la evaporarea acestora. Durata în care o gaură neagră dispăre prin evaporare depinde de masa acesteia; cu cât masa găurii negre este mai mică, cu atât evaporarea ei este mai rapidă. Găurile negre de la acceleratorul LHC (Large Hadron Collider) ar urma să dispară practic instantaneu, dată fiind micimea găurilor negre formate [5].

Radiația Hawking, este radiația emisă de găurile negre datorită efectelor cuantice. Istoria descoperirii este foarte interesantă și este legată și de numele lui Jacob Bekenstein, cel care a propus formula pentru entropia găurii negre și, implicit, pentru existența unei temperaturi asociate acesteia. Temperatură înseamnă emisie de radiație, deci o gaură neagră ar emite radiație! Hawking a demonstrat că găurile negre emit radiație ca și cum ar fi corpuri negre cu o temperatură invers proporțională cu masa. În acest context, merită să-i menționăm și pe fizicienii sovietici Yakov Zell'dovich și Alexander Starobinsky care, în 1973, când Hawking a vizitat Uniunea Sovietică, l-au informat despre descoperirea lor legată de emisia spontană de radiație, datorită efectelor cuantice, de către găurile negre aflate în rotație [6].

Pe scurt, procesul de emisie de radiație de către o gaură neagră, care a căpătat numele de *radiație Hawking*, este următorul: în apropierea orizontului evenimentelor, ținând cont de mecanica cuantică, se formează perechi de particule virtuale, particulă-antiparticulă. În mod normal aceste particule virtuale nu pot fi detectate, însă contribuie la așa-numita energie a vidului cuantic. Câmpul gravitațional al unei găuri negre joacă însă un rol extrem de important în transformarea uneia dintre particule, din particulă virtuală în particulă reală, practic expulzând-o din gaura neagră. Această particulă care a scăpat din gaura neagră reprezintă radiația Hawking. Perechea ei, ce ar avea o energie negativă, contribuie la scăderea masei găurii negre, deci la procesul de evaporare. Evident că dacă gaura neagră absoarbe alt material (particule, stele, planete, alte găuri negre etc.), evaporarea este compensată, sau poate să devină neglijabilă (de exemplu în cazul găurilor negre cu masă mare).

Așa cum am menționat anterior, temperatura unei găuri negre este invers proporțională cu masa acesteia. Deci, cu cât o gaură neagră este mai mică, cu atât este mai fierbinte. Radiația emisă depinde de temperatură și, deci, implicit, timpul în care o gaură neagră dispăre depinde de temperatură, deci de masa găurii negre.

Găurile negre cu masa de câteva ori cât masa Soarelui au un timp de evaporare mult mai mare decât vârsta Universului, care este circa 13,7 miliarde de ani de la Big Bang. De exemplu, o gaură neagră cu masa egală cu cea a Soarelui nostru ar dispărea prin evaporare în circa 2×10^{67} ani! Mai trebuie ținut cont și de faptul că astfel de găuri negre nu sunt izolate, ci absorb în continuare materie și energie. Una dintre sursele de energie este așa-numitul fond cosmic de microunde, care are o temperatură de circa 2,7 K.

Găurile negre cu masa de circa 100 miliarde de kg ar avea un timp de evaporare de circa 3 miliarde de ani. Astfel de găuri negre s-ar fi putut forma, chiar dacă mecanismul nu este încă clar, la puțin timp după Big Bang și se numesc *găuri negre primordiale*. Găurile negre care au masa în jur de 20 tone trăiesc aproximativ o secundă [5].

Găurile negre care s-ar putea forma la LHC nu pot avea masa mai mare decât energia totală a protonilor care dau naștere acestei găuri negre, deci masa lor ar fi cel mult $2,4 \times 10^{-23}$ kg (pentru o energie totală de 14 TeV) [5]. Aceste găuri negre dispar în fracțiuni infime de secundă prin emisie de radiație Hawking, deci nu pot înghiți LHC-ul și nici Pământul, așa cum se speriașe opinia publică înaintea primului experiment la LHC. Cel mult, putem observa radiația Hawking emisă de

aceste găuri negre minuscule, ceea ce ar fi cu adevărat senzațional.

Orizontul evenimentelor este o graniță în spațiu-timp unde viteza de evadare pentru o masă oarecare atinge și apoi ar trebui să depășească viteza luminii, făcând evadarea practic imposibilă. Aceasta face ca observarea unor evenimente din afara acestui orizont (sau orice alt fel de comunicație) să devină imposibilă, de aici și denumirea de orizontul evenimentului [7].

Singularitatea gravitațională reprezintă un punct cu un volum care tinde către zero și o masă care tinde către infinit. Altfel spus, singularitatea gravitațională este un punct de concentrație infinită și cu o forță gravitațională imensă. Se presupune că găurile negre ar avea în centrul lor o singularitate gravitațională, atrăgând prin gravitație absolut tot ce se află împrejur, inclusiv lumina. În astfel de puncte, legile fizicii își pierd valabilitatea [8].

Soluția Schwarzschild, deseori numită **metrica Schwarzschild**, este o soluție exactă, statică, sferic simetrică a ecuațiilor relativității generalizate a lui Einstein, ce prezintă câmpul gravitațional al unei găuri negre sau al unui obiect cosmic (asteroid, planetă, stea, galaxie, grup de galaxii) nerotațional, care posedă masă. Există două soluții Schwarzschild, o soluție internă și una externă. Soluția internă prezintă câmpul gravitațional din interiorul corpului.

Metrica Schwarzschild poartă numele fizicianului Karl Schwarzschild care a publicat-o într-un articol din 1915, care a urmat prompt publicării de către Albert Einstein a teoriei relativității generalizate, și care, în mod tragic, a avut loc cu foarte puțin timp înaintea morții lui Schwarzschild.

În coordonate Schwarzschild (sau sferice), aceasta depinde de coordonata radială (r) și de coordonata unghiulară (θ). Parametrul cel mai important al acestei soluții este raza Schwarzschild, a cărei formulă este dată de expresia de mai jos:

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

unde, G - constanta gravitațională; M - masa corpului central (sursei); c - viteza luminii.

În cazul sistemelor de tip insular (corpurilor sau obiecte cosmice), raza Schwarzschild este mai mică decât raza sistemului (corpului). Aceasta nu reprezintă altceva decât o măsură în unități de lungime a masei sistemului (corpului). În cazul colapsului gravitațional a obiectului cosmic, raza Schwarzschild devine raza găurii negre nou create. Acest parametru reprezintă raza din jurul găurii negre de unde nici o particulă elementară cunoscută (incluzând fotonii, adică lumina, dar excluzând gravitonii, care nu au fost încă detectați) nu mai poate evada. Pentru Pământ, raza Schwarzschild este egală aproximativ cu 1 cm, iar pentru Soare este de aproximativ 3 km [9].

Cu cât este mai mare masa găurii negre, cu atât este mai mică temperatura și intensitatea radiației Hawking. În tabelul de mai jos sunt redate câteva exemple ale acestei dependențe, pentru câteva mase de găuri negre corespunzând razei Schwarzschild (care exprimă dimensiunea găurii negre sferice) și temperatura radiației emise, exprimată în grade Kelvin [10]:

Mass	Schwarzschild Radius	Temperature (°K)
Solar Mass	3 Kilometers	1 tenth of a millionth Kelvin
Mass of the Earth	9 millimeters	0. 02 Kelvin
Mass of the Moon	1/10 millimeters	1. 7 Kelvin
1/10 Mass of the Moon	1/100 millimeters	17 Kelvin
1/100 Mass of the Moon	1 millionth of a meter	170 Kelvin
1/1000 Mass of the Moon	1/10 millionth of a meter	1700 Kelvin
1/2000 Mass of the Moon	1/20 millionth of a meter	3300 Kelvin
1/5000 Mass of the Moon	1/50 millionth of a meter	8400 Kelvin

3. Termodinamica găurilor negre

Dacă găurile negre nu ar avea entropie, ar fi posibil să se încalce legea a doua a termodinamicii prin aruncare de masă în gaura neagră. Prin urmare, singura modalitate de a satisface a doua lege a termodinamicii este de a admite că găurile negre au entropie. Creșterea entropiei găurii negre se compensează prin reducerea entropiei obiectului care a fost înghițit.

Pornind de la teoremele demonstrate de Stephen Hawking, Jacob Bekenstein a presupus că entropia găurii negre este proporțională cu suprafața orizontului evenimentului împărțită la suprafața Planck. Bekenstein a sugerat că $(\frac{1}{2} \ln 2)/4\pi$ este constanta de proporționalitate, afirmând că, dacă respectiva constantă nu are exact această valoare, trebuie să fie totuși foarte aproape de ea.

În anul următor, Hawking a demonstrat că găurile negre emit radiație termică Hawking [6], care corespunde unei anumite temperaturi (temperatura Hawking) [6]. Folosind relația termodinamică dintre energie, temperatură și entropie, Hawking a fost capabil să confirme presupunerea lui Bekenstein și a stabilit constanta de proporționalitate la $\frac{1}{4}$ [12]:

$$S_{BH} = \frac{kA}{4l_p^2}$$

în care A este suprafața orizontului evenimentului, calculată cu formula $4\pi R^2$, k este constanta Boltzmann, iar $l_p = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}}$ este lungimea Planck. (Indicele BH vine fie de la "Black Hole", sau de la "Bekenstein-Hawking"). Entropia găurii negre este proporțională cu suprafața orizontului său de evenimente, A . Observația principală care a condus la *principiul holografic* este faptul că entropia găurii negre este, de asemenea, entropia maximă care poate fi obținută prin limita Bekenstein [11]. De obicei, această limită este dată de relația:

$$S \leq \frac{2\pi kRE}{\hbar c},$$

iar pentru o gaură neagră, *limita Bekenstein* devine o egalitate:

$$S = \frac{kA}{4}.$$

Legile mecanicii găurii negre sunt similare cu legile termodinamicii, fiind descoperite de către Brandon Carter, Stephen Hawking și Bardeen James. Le vom reda în cele ce urmează, pe scurt, fără a dezvolta prea mult subiectul:

Principiul zero: gravitația la suprafață k este constantă pe întreaga suprafață a găurii negre.

Principiul întâi: Schimbarea de masă este legată de modificările suprafeței, momentului cinetic și ale încărcării electrice: $\delta Mc^2 = \frac{1}{8\pi} \frac{c^2}{G} k\delta A + \Omega\delta L + V\delta Q$

Principiul al doilea: δA este pozitiv în orice transformare care implică găuri negre: $\frac{dA}{dt} \geq 0$ [12].

Principiul al treilea: Imposibilitatea de a obține $k = 0$ (gaură neagră extremă) printr-un proces fizic.

Hawking și Page au arătat că termodinamica găurii negre nu cuprinde doar pe cea a găurii

negre, că orizonturile de evenimente cosmologice au, de asemenea, o entropie și temperatură.

Mai mult, Gerard't Hooft și Leonard Susskind au folosit legile termodinamicii ale găurii negre ca să aducă argumente pentru un *principiu holografic* general al naturii, care susține că teorii consistente ale gravitației și mecanicii cuantice au loc la dimensiuni foarte mici. Deși nu este încă pe deplin înțeles, principiul holografic este esențial pentru teorii cum ar fi corespondența AdS / CFT [13].

4. Conservarea informației

Conservarea informației derivă din teoria cuantică a câmpului, prin teorema lui Liouville. Teoria cuantică a câmpului este valabilă pentru ambele sensuri ale timpului, prin urmare și conservarea entropiei (sau a informației) nu depinde de sensul timpului. Dacă vom presupune că teoria cuantică a câmpului este adevărată, atunci informația nu poate fi nici creată și nici distrusă [14]. Stările cuantice pure ale unui sistem rămân stări pure, iar combinația probabilistică de stări pure va păstra același set de probabilități [15].

Drept consecință, conservarea informației constituie un principiu fundamental în știință, fiind în același timp unul dintre cele mai importante elemente ale vieții umane cotidiene și ale înțelegerii universului [16].

Clasic vorbind, o stare fizică este specificată de o funcție de distribuție într-un spațiu multidimensional al fazelor pentru toate gradele sale de libertate. Această distribuție evoluează conform teoremei lui Liouville, care conservă volumul din spațiul fazelor și conduce, astfel, la conservarea entropiei sau a informației, în formalismul dinamicii hamiltoniene. Informația clasică este stocată, procesată și transmisă în acord cu legile fizicii clasice. În paralel, informația cuantică urmează legile mecanicii cuantice. Fie pentru o stare pură descrisă de o funcție de undă, fie pentru o stare mixtă descrisă de o matrice de densitate, conținutul informației cuantice [17] este măsurat prin entropia von Neumann [18]. În fizica cuantică, informația prezintă o specificitate aparte, în sensul că informația cuantică nu poate fi nici copiată (clonată) [19], [20] și nici ștersă [21].

Teorema lui Liouville constituie pentru fizică o teoremă fundamentală legată de descrierea evoluției dinamice a stării unui sistem format dintr-un număr foarte mare de corpuri, considerate punctiforme și alcătuind un sistem de puncte materiale.

Teorema lui Liouville afirmă faptul că pentru un domeniu arbitrar D din spațiul fazelor, alcătuit din totalitatea punctelor $(p, q) \in D$ care reprezintă stările mecanice ale sistemului la un moment inițial t , evoluția temporală a acestor stări, potrivit ecuațiilor canonice ale lui Hamilton, este de așa natură încât volumul domeniului D' , format din pozițiile punctelor $(p', q') \in D'$, considerate la un moment ulterior t' , este egal cu volumul domeniului D . Cu alte cuvinte, *volumul în spațiul fazelor este un invariant al mișcării pe traiectoria de fază*. Este o consecință a ecuațiilor canonice ale lui Hamilton, respectiv a ecuației lui Liouville, din el decurgând o serie de constatări importante pentru fundamentarea teoretică a mecanicii statistice [22].

Această teoremă a lui Liouville are și alte enunțuri. Iată, de pildă, unul dintre acestea: volumul în spațiul fazelor este un invariant al mișcării pe traiectoria de fază. Sau: volumul din spațiul fazelor se conservă de-a lungul traiectoriei punctului reprezentativ.

Iată, mai explicit: fie un domeniu arbitrar D în spațiul fazelor; se consideră totalitatea punctelor $(p, q) \in D$ ca reprezentând stări mecanice ale sistemului la un moment inițial t ; se urmărește evoluția acestor stări, conform ecuațiilor canonice; fie $(p', q') \in D'$ pozițiile punctelor considerate la un moment ulterior t' ; atunci, volumul domeniului D' este egal cu volumul domeniului D . Toate aceste formulări sunt echivalente [23].

În acest caz, elementul de volum la momentul t se scrie, în funcție de elementul de volum la momentul inițial t_0 , prin relația:

$$dp(t)dq(t) = \frac{\partial(p, q)}{\partial(p_0, q_0)} dp_0 dq_0$$

unde, $\mathfrak{J} = \frac{\partial(p, q)}{\partial(p_0, q_0)}$ este jacobianul transformării de coordonate. Pentru a arăta că volumul elementar pe traiectoria de fază rămâne constant, în tot timpul evoluției sistemului, trebuie demonstrat că jacobianul transformării este unitar, adică $\mathfrak{J} = 1$, ceea ce se și demonstrează în lucrările de specialitate [23], [24], [25]. Astfel, în final, se obține relația:

$$dp(t)dq(t) = dp_0 dq_0 = \text{constant}$$

Cu alte cuvinte, pentru orice moment de timp al evoluției sistemului, volumul în spațiul fazelor se conservă, rămâne neschimbat.

5. Versiunea lui Matt Strassler

Paradoxul lui Hawking intră în conflict cu două capitole mari și importante ale fizicii: teoria cuantică și relativitatea generalizată [26].

Teoria cuantică: aceasta nu poate prezice cu precizie ceea ce se va întâmpla cu evoluția unui sistem, ci doar probabilitatea cu care se produce un anumit eveniment. Suma acestor probabilități de a se produce diferite evenimente posibile este egală cu unu. Deci, una dintre consecințele mecanicii cuantice este aceea că informația nu se poate pierde niciodată și nici nu poate fi copiată cu adevărat, fără distrugerea originalului. În principiu, deci, putem afla modul cum a pornit un sistem, adică starea lui inițială, din informația completă despre cum a terminat acesta, adică din starea lui finală.

Relativitatea generalizată: aceasta nu este altceva decât teoria lui Einstein despre gravitație, în care forța de gravitație poate fi gândită ca o deformare a spațiului și timpului. Teoria relativității generalizate nu este o teorie cuantică. Cu ajutorul ecuațiilor acestei teorii se poate determina cu precizie ceea ce se întâmplă cu un sistem în evoluția sa, nu doar probabilitatea cu care se întâmplă. Înțelegerea treptată a fenomenelor cosmice din perioada 1915 și 1958 a condus la concluzia că obiecte cosmice uriașe formează găuri negre. În vecinătatea acestora, gravitația devine extrem de puternică, astfel încât această gravitație curbează în mod dramatic textura spațiu-timp. Acest fapt face ca toate obiectele aflate în apropierea acestor găuri negre, sau care traversează orizontul de evenimente al unei găuri negre, să fie înghițite de către această gaură neagră. Drept consecință, informația care cade în interiorul orizontului de evenimente nu mai poate scăpa niciodată, ...din perspectiva relativității generalizate.

Paradoxul informației a apărut, după ce Stephen Hawking a demonstrat prin anii 1974-1975 faptul că găurile negre înconjurate de un câmp cuantic radiază particule (radiația Hawking), pierzând, astfel, energie, masă, micșorându-se treptat, pentru ca în final să dispară complet. Atunci când o gaură neagră dispăre, unde se duce informația din ea? Dacă informația dispăre odată cu gaura neagră, acest lucru contrazice teoria cuantică. Dar poate că informația se întoarce împreună cu radiația Hawking, nu? Problema este că informația conținută într-o gaură neagră nu poate ieși de acolo. Prin urmare, singura modalitate prin care informația poate trece în radiația Hawking este cea prin care aceasta ar putea fi cumva "copiată". În acest caz, avem două "exemplare" ale informației, una în interiorul găurii negre și alta în afara ei, ceea ce contrazice din nou teoria cuantică. Evident, cel mai simplu ar fi să afirmăm faptul că teoria cuantică este incompletă și că fizica găurilor negre ne obligă să o dezvoltăm, să o îmbunătățim, să o extindem în aceeași manieră în care și Einstein a extins legile lui Newton în teoria sa a relativității. Exact acest lucru l-a crezut și Hawking vreme de trei decenii. Dacă informația este copiată, atunci rezultă că teoria cuantică trebuie modificată!

Complementaritatea – salvarea teoriei cuanticii: nu teoria cuantică, ci teoria relativității ar trebui schimbată, au susținut unii fizicieni, care în 1992 au și propus un model teoretic numit "complementaritate" [27] (Leonard Susskind) prin care se sugera faptul că informația putea exista

în ambele locuri, atât în interiorul găurii negre cât și în exteriorul acesteia, fără a contrazice teoria cuantică. Concret, observatorii care sunt în afara găurii negre vor observa informația că se acumulează la orizontul evenimentelor, iar apoi “zboară” afară prin radiația Hawking. Observatorii care intră în gaura neagră vor observa informația fixată acolo, în interior. Cum cele două categorii de observatori nu pot comunica între ei, atunci nu există nici paradox!

Cu toate acestea, propunerea discutată este self-contradictorie și presupune ca o serie de lucruri ciudate să fie adevărate, printre acestea numărându-se așa zisa *holografie* [28], [29] o idee dezvoltată de Gerard't Hooft și Susskind. Ideea centrală a acestei propuneri constă în aceea că fizica spațiului tridimensional din interiorul găurii negre, unde gravitația își are rolul său, poate fi înlocuită, printr-o misterioasă transformare, cu fizica orizontului bidimensional, descris de ecuații bidimensionale, care nu conțin deloc gravitația! Complementaritatea presupune faptul că tot ceea ce se întâmplă în interiorul unei găurii negre poate fi descris la fel de bine ca și cum totul ar fi în afara găurii negre. Și se pare că acest lucru nu este imposibil, după cum a fost demonstrat în anii 1990 și 2000 cu teoria stringurilor, care conține o versiune cuantică a relativității generalizate și care prezintă această proprietate în anumite condiții.

Astfel, în anul 1998, Juan Martin Maldacena a presupus că în anumite circumstanțe, teoria stringurilor (un autentic candidat la teoria legilor naturii din universal nostru) este de fapt echivalentă cu o teorie cuantică fără gravitație și cu mai puține dimensiuni. Această relație este cunoscută sub denumirea de corespondent “AdS/CFT”, sau câmp/string (coardă) [30].

Succesul holografiei a însemnat un credit suplimentar ideii de complementaritate. În plus, relația de corespondent câmp/string a permis printr-un argument solid faptul că găurile negre mici se pot forma și se pot evapora în teoria stringurilor printr-un proces care poate fi descris corespunzător de teoria cuantică a câmpului și care, ca toate procesele din teoria cuantică, poate conserva informația. Până prin 2005, însuși Hawking a îmbrățișat acest punct de vedere, care, asemeni complementarității propuse, sugera faptul că informația din găurile negre nu poate fi pierdută și, prin urmare, cea care trebuie modificată nu este teoria cuantică ci relativitatea generalizată.

Zidul de foc (Firewall): există, totuși, insuficiențe în propunerea legată de complementaritate. Evaporarea unei găurii negre constituie un proces atât de complicat încât nu avem la ora actuală ecuații de teoria cuantică pentru complementaritate, care ar putea să descrie procesul de evaporare. În încercarea de a găsi astfel de ecuații, o serie de teoreticieni (Polchinski, Almheiri, Marolf, Sully)[31] au descoperit faptul că însăși complementaritatea conține o self-contradicție, care se manifestă pe la jumătatea evaporării unei găurii negre. Argumentul este extrem de rafinat teoretic și implică acea corelare cuantică (quantum entanglement) pe care însuși Einstein a caracterizat-o ca fiind “spooky” (sinistră, înfricoșătoare), dar care se utilizează la calculatoarele cuantice. Pe scurt, s-a constatat că pe undeva, pe la mijlocul drumului, a trecut atât de multă informație din gaura neagră în radiația Hawking, încât informația rămasă pe orizontul evenimentelor nu mai este suficientă pentru ca holografia să reprezinte interiorul găurii negre. În consecință, în loc ca observatorul extern să intre în gaura neagră prin acel inofensiv orizont al evenimentelor, acum ne trezim că acest observator descoperă faptul că nu mai există niciun interior al găurii negre și că acest drum l-a parcurs doar pentru a fi “prăjit” de un zid de foc care plutește chiar deasupra orizontului de evenimente. Prin urmare, pe măsură ce o gaură neagră se evaporă, complementaritatea însăși degenerază într-un foarte serios paradox. Astfel, în timp ce un observator extern vede procesul de evaporare desfășurându-se fără pierdere sau copiere de informație, un observator din interior se lovește grav de un ceva situat la orizont, un ceva numit “zid de foc”, unde, culmea, era de presupus că nu există nimic! Evident, acest fapt contrazice așteptările relativității generalizate într-un mod destul de grav. Ceea ce am obținut este că în loc să intre în interiorul găurii negre, obiectele care intră sunt evaporate în preajma orizontului. Prin urmare, se impune, ca o primă concluzie, o modificare drastică a relativității generalizate!

Paradoxul revine! Iată-ne, deci, am ajuns de unde am plecat, fără să găsim o soluție la paradoxul informației găurilor negre de la care am plecat. La prima vedere, teoria cuantică și complementaritatea par a fi în regulă, în schimb relativitatea generalizată impune modificări substanțiale, deloc neglijabile, ceea ce teoria stringurilor nu pare a o promite prin exemplul

holografiei. În schimb, corespondența câmp / string sugerează faptul că teoria cuantică poate descrie procesul de formare și evaporare a unei găuri negre, în condițiile conservării informației. Deci, poate cumva complementaritatea să fie înlocuită prin *alt-ceva*, sau ea nu este decât un argument în plus care creează acest paradox, în esență greșit?

Foarte mulți oameni de calibrul încearcă rezolvarea acestei probleme. Există nenumărate propuneri și sugestii despre care nu se vorbește, media face referiri doar la Hawking, datorită faimei sale. Toate propunerile, însă, suferă de același păcat: lipsa ecuațiilor, care să descrie în detaliu ipotezele de lucru și modalitatea concretă prin care se poate ieși din acest cerc de foc al paradoxului. Printre cei care au propus o soluție pentru această problemă a fost și Hawking.

Soluția lui Hawking: Hawking a propus și el propria sa versiune de ieșire din paradox, dar tot una calitativă, fără ecuații și care, în viziunea specialiștilor, pare a fi incompletă și poate chiar greșită. Hawking spune că deși exteriorul găurilor negre devine simplu destul de repede, interiorul acestora devine foarte complex. Dar sistemele complexe prezintă haos, ceea ce le face imprezicibile. În viziunea lui Hawking, tocmai complexitatea destabilizează orizontul evenimentelor și, astfel, permite informației să se scurgă spre exterior, ceea ce contrazice propriile sale teorii anterioare despre găurile negre, conform cărora găurile negre, rezultate în urma colapsului gravitațional al stelelor masive, distrug orice intră în ele, împiedicând lumina și chiar informația să mai scape de acolo. Prin urmare, aceste găuri negre nu mai sunt chiar “negre”, ci “găuri gri”, sau “stări gravitaționale metastabile”, sau “găuri aparent negre” și care au un interior în general haotic care permite informației să se scurgă. Astfel, Hawking evită problema zidului de foc, care implica o modificare drastică a relativității generalizate, înlocuind-o cu posibile și rezonabile modificări și completări ale acesteia, mult mai puțin drastice decât în cazul zidului de foc.

Soluția lui Hawking ridică și ea o serie de probleme. De pildă, zidul de foc apare abia pe la jumătatea evaporării unei găuri negre, nu la sfârșitul ei. Deci, gaura neagră este încă foarte mare, atunci când se presupune că informația ar începe să se scurgă, ceea ce face destul de dificilă acceptarea soluției lui Hawking, mai ales în lipsa unor ecuații matematice concrete. Nu este de așteptat ca o problemă veche de circa 40 de ani să se rezolve prea curând. Și, cum se întâmplă adesea, în astfel de cazuri, soluția va veni, probabil, de la un tânăr despre care nimeni nu a auzit încă, sau poate de la o persoană care încă nici nu s-a născut. Pentru moment, majoritatea informațiilor de bază despre găurile negre rămân valabile, iar astrofizicienii caută să descopere în continuare spectaculoasele găuri întunecate ca centre ale galaxiilor din univers.

6. Versiunea Rovelli - Vidotto

Doi astrofizicieni, Carlo Rovelli și Francesca Vidotto, sugerează faptul că în centrul găurilor negre există o structură numită stea Planck și nicidecum o singularitate. Această concluzie ar avea drept consecință imediată faptul că găurile negre vor returna la un moment dat universului toate informațiile pe care le-au acumulat în interiorul lor [32].

Fiecare gaură neagră, deci, conține resturile cuantice ale stelei din care s-a format, iar aceste stele pot reveni la viață, odată ce gaura neagră se evaporă. Cercetătorii le denumesc *stele Planck* și cred că pot răspunde astfel la problema ridicată de paradoxul pierderii de informație dintr-o gaură neagră. În plus, această idee ar putea reconcilia mecanica cuantică și teoria relativității generalizate.

Se presupune că găurile negre s-au creat odată cu sfârșitul unei vieți ale unei stele mari, atunci când presiunea internă a stelei este insuficientă pentru a rezista propriei gravitații iar steaua intră în colaps, sub acțiunea propriei sale greutate. Majoritatea cercetătorilor cred că, odată ce nimic nu mai poate stopa acest colaps, se va forma în cele din urmă o singularitate, adică o regiune în care sunt atinse densități infinite de materie, iar teoria relativității generalizate își pierde predictibilitatea. Dar din moment ce legile fizicii nu mai sunt valabile într-o astfel de regiune cu densitate infinită, atunci *cine* poate spune ce s-ar putea întâmpla în interiorul unei găuri negre?

Astfel, Carlo Rovelli de la Universitatea din Marseille din Franța și Francesca Vidotto de la Universitatea Radboud din Olanda au încercat să răspundă la această întrebare, explorând ideea conform căreia universul, care se presupune că a început odată cu Big Bang-ul, s-a mărit datorită

efectelor gravitaționale, adică o „implozie uriașă” a precedat fazei de expansiune ulterioară. *Efectele gravitaționale cuantice produc o forță efectivă repulsivă, astfel că materia nu s-a restrâns într-o singularitate, dar a putut atinge o stare compactă maximă*, spune Vidotto. Într-un mod similar, universul va imploda, atunci când densitatea energetică a materiei ajunge la scala Planck, cea mai mică dimensiune posibilă din fizică, având ca efect ulterior o re-expansiune a universului, moment în care universul s-ar putea restrânge din nou, și așa mai departe, înainte și înapoi, în cicluri eterne.

Ideea unei stele Planck își are originea deci într-o controversă pe marginea teoriei Big Bang, controversă cauzată de o altă teorie, care susține că atunci când urmează să se producă în mod inevitabil un eveniment de tip Big Crunch, în loc să se genereze o singularitate va rezulta ceva mai real, ceva la scară Planck. Atunci când se întâmplă acest lucru, va avea loc un "ricoșeu" care va genera o nouă expansiune a universului, pentru ca apoi acesta să colapseze din nou, și așa mai departe.

O idee similară a fost propusă și pentru soarta materiei din implozia unei stele aflate la finalul vieții. Cercetătorii spun că efectele cuantice, similare cu acelea ce previn ca un electron să fie atras de nucleul unui atom, ar putea opri acest colaps al unei stele înainte de a se reduce la un singur punct, sau singularitate. Steaua ar deveni un obiect super-dens, apoi s-ar putea extinde din nou, printr-un proces de evaporare al găurii negre și ar exploda într-un final. Astfel, extrapolând, este foarte posibil ca tot ceea ce ar intra într-o gaură neagră, ar putea fi eliberat ulterior.

De altfel, nu demult, Roger Penrose era de părere că noua sa teorie a cosmologiei *ciclice* [33] duce la concluzia conform căreia găurile negre vor consuma în cele din urmă toată materia din univers. Conform teoriei sale, când totul va fi consumat, tot ce va rămâne va fi energie, ceea ce va duce la următorul Big Bang și la noi cicluri cosmice. Dovezile descoperite de Sir Roger Penrose de la Universitatea din Oxford și de Profesorul Gurzadyan Vahe de la Universitatea de Stat din Erevan, Armenia arată faptul că universul are o *ciclicitate eternă*. Ceea ce au descoperit cei doi astrofizicieni, prin analiza datelor de la Planck Space Observatory nu sunt altceva decât niște cercuri concentrice în microundele cosmice, în fapt ecourile unor Big Bang-uri anterioare.

Rovelli și Vidotto se întreabă de ce nu s-ar putea întâmpla acest lucru și în cazul găurilor negre. În acest fel, în loc ca în centrul acestora să existe o singularitate, ar putea mai degrabă fi vorba acolo de o structură Planck, adică o stea, care ar face ca relativitatea generalizată să își păstreze valabilitatea ecuațiilor sale și, deci, să se poată aplica din nou. În această situație, o gaură neagră și-ar reduce masa în timp, lent, ca urmare a radiației Hawking, pe măsură ce gaura neagră se contractă, iar steaua Planck din interiorul său ar crește tot mai mare, pe măsură ce tot mai multe informații ar fi absorbite în interiorul găurii negre.

Această nouă idee propusă de Rovelli și Vidotto va fi supusă, fără îndoială, unei analize amănunțite în cadrul comunității de astrofizicieni, care se va concretiza probabil cu o dezbatere între cei care, pe de o parte, vor considera că ideea prezenței unei stele Planck în centrul găurilor negre oferă un răspuns la paradoxul informației și, pe de altă parte, cei care vor considera că această idee este neverosimilă [34].

Mai mult, cercetătorii susțin faptul că, din moment ce o gaură neagră se evaporă și se restrânge, limitele sale vor ajunge, la cele ale unei stele Planck. La acest moment, nu va mai exista un orizont al găurii negre, deci toată informația din această gaură neagră poate *evada* cu ușurință. *Steaua Planck ne-ar permite să înțelegem evaporarea găurilor negre, etapa finală a vieții acestora, fără paradoxuri. Paradoxurile nu sunt parte a naturii; acestea sunt semne ale cunoștințelor noastre incomplete*, susține Vidotto, iar Rovelli îl completează, afirmând că *informația nu este niciodată prea concentrată și poate „evada” odată cu implozia unei stele*.

Această *evadare* a informației, estimează acesta, va genera radiații cu lungimea de undă de aproximativ 10^{-14} cm, care corespunde razelor gama. Ceea ce este foarte posibil, pentru că astronomii au observat deja stele Planck, care au emis informații în spațiu sub forma unor evenimente extrem de luminoase, denumite *explozii de raze gama*. Dacă această reprezentare științifică se va confirma experimental, atunci centrul găurilor negre va reprezenta un salt cuantic în înțelegerea naturii universului nostru [35].

7. Versiunea lui Abhas Mitra

Astrofizicianul indian Abhas Mitra, șeful catedrei de Astrofizică Teoretică de la Bhabha Atomic Research Centre (BARC) din Mumbai, India, a pus sub semnul întrebării teoria lui Hawking, într-un articol științific de-al său [36], devenind astfel "astrofizicianul anti-găuri negre", cum l-a caracterizat revista *Nature*.

Mitra afirmase faptul că aceste găuri negre nu sunt de fapt găuri negre, ci cu totul altceva. Eu am susținut în urmă cu peste un deceniu că soluțiile de găuri negre din relativitatea generalizată a lui Einstein corespund masei nule și, deci, nu se pot forma niciodată. Acest lucru implică faptul că așa numitele găuri negre nu sunt decât găuri gri, sau cvasi-găuri negre, afirma Mitra, exact ceea ce afirmă acum și Hawking [37]. De fapt, în articolul său, Mitra a arătat clar că găurile negre nu se pot forma niciodată. Așa numitele găuri negre observate de către astronomi sunt de fapt Obiecte care Colapsează Etern (ECO-uri). Aceste mingi de foc sunt atât de fierbinți încât chiar și neutronii și protonii se topesc acolo. Întâmplător, Soarele nostru este și el o astfel de minge de foc care topește atomi – spune Mitra.

Pe scurt, Mitra susținea faptul că teoria lui Hawking este greșită și că generează numai paradoxuri. Evident, această afirmație a lui Mitra i-a iritat pe partizanii lui Hawking, deși în anul 2004, cu ocazia celei de-a 17-a Conferințe Internaționale despre "Relativitatea Generală și Gravitatie" de la Dublin, Stephen Hawking și-a prezentat noua sa teorie, pe care a numit-o *Paradoxul Informației pentru Găurile Negre*. Chiar dacă inițial, prin anul 1975, Hawking afirmase faptul că dintr-o gaură neagră nu mai scapă nimic, nici lumina, nici informația, singurul lucru care îi trădează prezența fiind radiația Hawking, după provocarea pe care i-a lansat-o astrofizicianul indian Abhas Mitra, Hawking a admis la Dublin că găurile negre pot lăsa informația să iasă. Iar noile sale cercetări ar putea ajuta să rezolve paradoxul informației din găurile negre. Culmea este că exact același lucru fusese afirmat de către cercetătorul indian, încă din anul 2000, dar nimeni nu-l băgase în seamă. Atunci, el scria că găurile negre nici nu pot exista, deoarece formarea și existența lor ar contrazice teoria relativității generalizate a lui Einstein. *Găurile negre generează un alt paradox, paradoxul zidului de foc, care provine din afirmația conform căreia orizontul evenimentelor se transformă de fapt într-o regiune cu energie foarte puternică, un autentic zid de foc, care ar distruge prin ardere orice obiect din apropierea sa. Deși acest zid de foc respectă regulile cuanticii, el încalcă totuși teoria relativității generalizate* – a spus Mitra.

Paradoxal sau nu, majoritatea cercetătorilor a respins concluziile lui Mitra. Deși Mitra a invitat mai mulți teoreticieni ai găurilor negre, incluzându-i pe Hawking și Jayant Narlikar din India, să-i comenteze critic articolul, nimeni nu a răspuns invitației sale. Singurul cercetător care a laudat lucrarea lui Mitra a fost relativistul Pankaj Joshi, de la Institutul de Cercetări Fundamentale Tata, din Mumbai.

Colegii lui Mitra au început să-l evite. În final, autoritățile BARC l-au mutat pe Mitra de la catedra de fizică teoretică, sub un pretext oarecare (dezvăluire făcută de Deepak Goyal, un ziarist independent din Kolkata, India, care atrăgea atenția asupra faptului că Mitra nu este singurul cercetător indian care a fost ostracizat de lumea științifică, doar pentru că a contrazis teorii "acceptate oficial", pentru ca ulterior să se dovedească faptul că subiectul avusese dreptate).

Ironia, spunea Mitra, este că persoana care acum a îndrăznit să demonstreze că nu poate exista nici o gaură neagră a fost complet ignorată de academicieni și de presă. (...) Lucrarea mea din anul 2000 a rămas neschimbată. Această lucrare a fost total ignorată de către fizicienii din domeniu, în schimb cele două pagini scrise recent online de către Hawking, afirmând același lucru ca și mine, a devenit pentru media o știre internațională de senzație – a mai spus Mitra.

În final, Hawking a admis la Dublin, că nu există practic găuri negre "în sens absolut". În esență, spunea Hawking la Dublin, "noile" găuri negre nu sunt un fel de devoratoare totale de materie, dimpotrivă, ele continuă să emită radiație mult timp. Or, asta era chiar ceea ce scrisese Mitra în articolul său, cu peste zece ani în urmă. *Ultimul articol al lui Hawking încearcă să rezolve paradoxul zidului de foc, avansând ideea conform căreia colapsul gravitațional produce doar un orizont aparent și nu un orizont al evenimentelor, care nu este altceva decât tot o marcă a găurii*

negre. El afirmă faptul că absența orizontului evenimentelor echivalează cu faptul că nu există găuri negre în sensul în care acestea erau văzute în mod obișnuit, până acum. Inițial, Hawking afirmase că găurile negre distrug totul, inclusiv informația, ceea ce contrazice legile fizicii cuantice, conform cărora informația nu poate fi niciodată complet distrusă.

Acesta este "paradoxul informației" pe care îl lansase chiar Stephen Hawking. Numai că și acest concept este anulat de Mitra, care scria în articolul său că de vreme ce nu se poate forma și nu poate exista o gaură neagră în sensul strict, ci eventual doar Obiecte care Colapsează Etern (ECO-uri), atunci nu există nici "paradoxul informației". Astfel, aceste ECO-uri rezolvă deopotrivă atât paradoxul informației, cât și paradoxul zidului de foc – conchide Mitra.

Ideile lui Mitra i-au inspirat pe fizicienii americani Stanley Robertson și Darryl Leiter, care au confirmat în anul 2002 faptul că presupusele găuri negre au câmpuri magnetice intense, așa cum prezisese Mitra și prin urmare nu sunt găuri negre, deoarece găurile negre nu pot avea câmp magnetic. Atunci, ce mai rămâne, până la urmă, din această victorie a lui Abhas Mitra? Poate doar ziua în care mitologia găurilor negre să fie acceptată, iar manualele și enciclopediile lumii să consemneze faptul că, în realitate, celebrele găuri negre imaginate de către Stephen Hawking nici măcar nu există! [38].

Soluția lui Hawking la acest paradox? Eliminarea orizontului de evenimente care generează de fapt paradoxul. Fizicianul consideră că ideea trebuie regândită. În locul unei limite clare dincolo de care lumina nu mai poate scăpa, Hawking propune un *orizont aparent* care își schimbă forma în funcție de fluctuațiile cuantice din interiorul găurii negre, așadar o zonă nu foarte bine definită, o zonă "gri". De aici, ideea că formațiunile numite în mod obișnuit găuri negre ar fi mai curând "gri", în sensul că sunt lipsite de o limită foarte clar definită a influenței lor, o graniță care să marcheze locul dincolo de care ceea ce se întâmplă nu mai poate afecta un observator extern. Dacă zona aflată imediat dincolo de orizontul aparent este un *haos de informație*, atunci un asemenea orizont nu încalcă nici legile relativității generale, nici pe cele ale dinamicii cuantice.

Dar teoria lui Hawking nu este acceptată de toți specialiștii, unii susținând că, de fapt, fizicianul britanic nu face, astfel, decât să înlocuiască "zidul de foc" cu un "zid de haos", ceea ce nu ar rezolva problema.

8. Concluzii

Există, oare, speranța ca radiația Hawking să ne permită să reconstituim informația despre obiectele care au format și care au fost înghițite de către gaura neagră? Nu, categoric nu, deoarece această radiație are aceeași natură, indiferent de tipul materiei care a căzut în gaura neagră respectivă.

Radiația Hawking este formată pur și simplu din particule virtuale, care au fost aruncate afară din gaura neagră, dincolo de orizontul evenimentelor, de către câmpul gravitațional, și nu există motive să credem că această radiație transportă informația despre obiectele care au căzut în gaura neagră.

Acest paradox a generat o intensă activitate în rândul comunității de fizicieni teoreticieni în ultimii 20-30 de ani. Cei care provin din rândul celor care se ocupă cu studiul relativității generale, printre care Stephen Hawking și Kip Thorne, sunt tentați să creadă că informația este într-adevăr pierdută.

Cei care provin din rândul celor care studiază particulele elementare și teoria cuantică a câmpului, de exemplu John Preskill, au tendința să creadă că informația nu este pierdută și că înțelegerea gravității cuantice ne va demonstra cum este posibil acest lucru. Din punctul lor de vedere, găurile negre nu suferă de amnezie, ci au o memorie de invidiat!

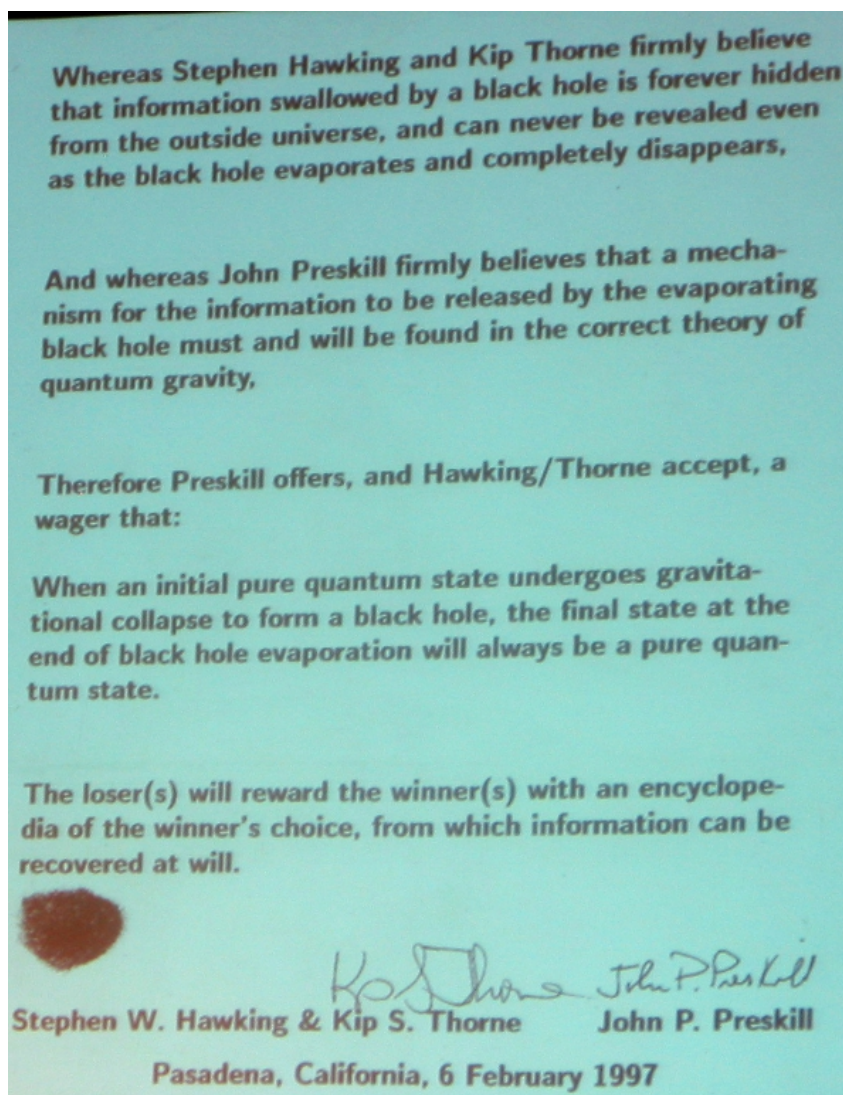
Pariul lui Hawking. În 1997 Hawking și Thorne au pus pariu cu Preskill legat de pierderea informației dintr-o gaură neagră. Hawking și Thorne susțineau că informația se pierde, în timp ce Preskill era convins că teoria relativității cuantice va demonstra că informația nu se pierde și că poate fi recuperată în momentul evaporării găurii negre.

Pariul a fost semnat pe 6 Februarie 1997 (vezi fotocopia alăturată) și prevedea că acela care pierde va oferi câștigătorului/câștigătorilor o enciclopedie la alegerea acestuia. La circa 7 ani de la semnarea pariului, în 2004, în mod destul de neașteptat, Hawking a admis cum că ar fi pierdut pariul și l-a onorat, oferindu-i unui Preskill destul de sceptic în a accepta victoria enciclopedia pe care acesta a ales-o: *Total Baseball: The Ultimate Baseball Encyclopedia, 8th edition*. Thorne nu a acceptat pierderea pariului, deoarece din punctul lui de vedere situația este încă indecisă [39].

Ce l-a convins însă pe Hawking să admită pierderea pariului? De ce Hawking a acceptat pierderea pariului?

Ceea ce l-a convins pe Hawking că ar fi pierdut pariul și că informația se conservă în cadrul unei găuri negre are legătură cu structura spațio-temporală și entropia acesteia. Fără a intra în detalii analitice ale problemei, având în vedere complexitatea subiectului, vom încerca să oferim doar câteva posibile explicații de natură calitativă.

Entropia unei găuri negre, deci și cantitatea de informație (numărul de microstări compatibile cu o macrostare, în acest caz gaura neagră) depinde de *suprafața* orizontului evenimentelor și nu de *volumul* acesteia, cum poate ne-am fi așteptat. Printre altele, acest fapt duce la enunțarea așa-numitului *principiu holografic*, formulat de Gerard t'Hooft și Leonard Susskind, conform căruia toată informația găurilor negre este conținută pe *suprafața* găurii negre, exact ca și în cazul hologramelor.



Copie a pariului dintre Stephen Hawking și Kip Thorne, iar pe de altă parte, John Preskill
Credit: John Baez (fotocopie după [39])

Să ne întoarcem însă la găurile negre și informația acestora. În 1997, fizicianul Juan Maldacena a revoluționat o posibilă modalitate de înțelegere a gravitației cuantice cu un exemplu de aplicație a principiului holografic. Maldacena a găsit o echivalență între teoria super-gravitațională în 5 (cinci) dimensiuni într-un spațiu care conține o energie a vidului negativă (un astfel de spațiu se numește anti - de Sitter) și o teorie cuantică a câmpului în 4 (patru) dimensiuni care nu conține gravitația. Orice se întâmplă în cadrul uneia dintre cele două teorii are un echivalent precis în cealaltă. Sunt așa-numite teorii duale: arată diferit, dar au același conținut.

În această situație, dacă ne imaginăm (și este exact ceea ce a făcut Hawking) o gaură neagră în spațiul cu 5 (cinci) dimensiuni pe care l-a considerat Maldacena, procesele care se petrec cu gaura neagră, inclusiv emisia de radiație, au un echivalent în teoria cu patru dimensiuni, teoria cuantică a câmpului, în care nu avem gravitație. În teoria fără gravitație, informația se conservă, așa cum se întâmplă în teoriile fără gravitație. Deci, prin echivalența găsită de Maldacena rezultă că și în cazul găurii negre din spațiul 5-dimensional informația se conservă.

De ce, totuși, acest argument nu l-a convins însă și pe Thorne dacă este așa de clar cum pare? Thorne nu este convins de argumentul indirect folosit de Maldacena, deoarece acesta nu spune nimic despre modul în care informația se păstrează în emisia de radiație de către gaura neagră. Thorne vrea să fie sigur că gaura neagră nu suferă de amnezie și ceea ce Maldacena a demonstrat pare că nu-l convinge pe deplin [39].

Astfel, paradoxul pierderii de informație dintr-o gaură neagră, sau paradoxul lui Hawking este departe de a fi rezolvat. Se avansează idei noi, modele matematice ingenioase, există partizani ai punctului de vedere Hawking, dar există și adversari înverșunați, care afirmă faptul că găurile negre nici nu există, iar modul de abordare este greșit, ceea ce a condus la acest dramatic paradox. Dacă cei din urmă câștigă, pentru Hawking ar fi un dezastru: moștenirea sa științifică ar fi practic nulă. Și, totuși, este greu de crezut că Hawking a lucrat timp de câteva decenii și a putut să păcălească întreaga comunitate științifică, în tot acest timp! Foarte posibil, însă, ca acest paradox să derive dintr-o incompletă și o insuficientă cunoaștere a unor aspecte științifice pe care viitorul le va rezolva cu certitudine. Iar Hawking (n. 1942) va rămâne, în acest caz, o amintire luminoasă în domeniul astrofizicii, cel care a dezvoltat ideile relativității generalizate ale lui Einstein, născut la trei sute de ani de la moartea lui Galileo Galilei (d. 1642), fiind, poate, o întrupare a spiritului galileian, animat, în felul său, de aceeași sete de cunoaștere a universului.

BIBLIOGRAFIE

1. **HAWKING, S.:** The Hawking Paradox. Discovery Channel, 2006, The: Discovery, Inc.
2. **JENNY, H.:** <http://www.newscientist.com/article/dn6151-hawking-cracks-black-hole-paradox.html#.VUxcDY6qpHw>, July, 2004.
3. **SAMIR, D. M.:** The information paradox: A pedagogical introduction, Submitted on 5 Sep 2009, arXiv: 0909.1038.
4. http://ro.wikipedia.org/wiki/gaura_neagra.
5. <http://www.scientia.ro/blogul-catalina-oana-curceanu/1782-cum-se-evapora-gaurile-negre-prin-radiatia-hawking.html>
6. **HAWKING, S.:** A Brief History of Time, Bantam Books, 1988.
7. http://ro.wikipedia.org/wiki/orizont_de_evenimente.
8. http://ro.wikipedia.org/wiki/singularitate_gravitationala.
9. http://ro.wikipedia.org/wiki/Solutia_Schwarzschild.
10. http://www.einstein-online.info/elementary/quantum/evaporating_bh.

11. **BOUSSO, R.:** The Holographic Principle. *Reviews of Modern Physics*, 2002, 74 (3): 825–874.
12. **MAJUMDAR, P.:** Black Hole Entropy and Quantum Gravity, 1998, ArXiv: General Relativity and Quantum Cosmology. Bibcode: 1999InJPB..73..147M.
13. http://ro.wikipedia.org/wiki/termodinamica_gaurii_negre.
14. **LANDAUER, R.:** Information is Physical, *Phys. Today* 44, 23 (1991).
15. <http://van.physics.illinois.edu/qa/listing.php?id=24045>.
16. **BAOCHENG, ZHANG; QING-YU, CAI; MING-SHENG, ZHAN; LI, YOU:** Information conservation is fundamental: recovering the lost information in Hawking radiation - http://www.gravityresearchfoundation.org/pdf/awarded/2013/Zhang_Cai_Zhan_You_2013.pdf.
17. **NIELSEN, M. A.; CHUANG, I. L.:** *Quantum Computation and Quantum Information*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.
18. **SUSSKIND, L.; LINDESAY, J.:** *Black Hole, Information and the String Theory Revolution*, World Scientific Publishing Co. Ltd., Danvers, USA, 2005.
19. **WOOTTERS, W. K.; ZUREK, W. H.:** A single quantum cannot be cloned, *Nature* 299, 802 (1982).
20. **PENROSE, R.:** *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and The Laws of Physics*, Oxford Univ. Press, 1989 (Rhône-Poulenc science book prize in 1990); *Mintea noastră cea de toate zilele. Despre gândire, fizică și calculatoare*, Editura Tehnică, 1996, 2001.
21. **PATI, A. K.; BRAUNSTEIN, S. L.:** Impossibility of deleting an unknown quantum state, *Nature* 404, 164 (2000).
22. http://ro.wikipedia.org/wiki/Teorema_lui_Liouville_mecanica_statistica.
23. **CIOBANU, GHE.:** *Termodinamică și fizică statistică*. Editura Tehnică, București, 2004.
24. **LANDAU, L. D.; LIFSHITZ, E. M.:** *Statistical Physics*. Pergamon Press, 1980.
25. **ȚIȚEICA, Ș.:** *Elemente de mecanică statistică*. Editura Tehnică, București, 1956.
26. <http://profmattstrassler.com/articles-and-posts/relativity-space-astronomy-and-cosmology/black-holes/black-hole-information-paradox-an-introduction>.
27. **SUSSKIND, L.:** String theory and the principle of black hole complementarity, *Physical Review Letters* 71(15), 1993: 2367–2368. arXiv:hep-th/9307168.
28. **SUSSKIND, L.:** The world as a hologram, *Journal of Mathematical Physics* 36(11) 1995: 6377–6371. arXiv:hep-th/9409089. Bibcode:1995JMP....36.6377S. doi:10.1063/1.531249.
29. **STEPHENS, C. R.; 'T HOOFT, G.; WHITING, B. F.:** Black hole evaporation without information loss. *Classical and Quantum Gravity* 11(3) 1994 621. arXiv: gr-qc/9310006. Bibcode: 1994CQGra..11..621S. doi:10.1088/0264-9381/11/3/014.
30. **MALDACENA, J. M.:** The Large N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity, *Adv. Theor. Math. Phys* 2, pp. 231–252, 1998. arXiv:hep-th / 9711200. Bibcode 1998AdTMP...2..231M.
31. **POLCHINSKI, J.; ALMHEIRI, A.; SULLY, J.; MAROLF, D.:** *Astrophysics: Fire in the hole*, July, 2012.
32. **ROVELLI, C.; VIDOTTO, F.:** Planck Stars, arXiv:1401.6562 – 8, Feb 2014.
33. **PENROSE, R.:** *What Came Before the Big Bang? Cycles of Time*, Vintage Books, 2011.
34. **YIRKA, B.:** <http://www.scientia.ro/stiri-stiinta/85-univers/html> - Septembrie, 2014.
35. **SAVU, M.:** <http://www.techcafe.ro/news/paradox-rezolvat/Septembrie>, 2014.

36. **ABHAS, M.:** BARC, Theory Division, Non-occurrence of trapped surfaces and Black Holes in spherical gravitational collapse: An abridged version, arXiv:astro-ph/9910408v5, 22 Oct 1999.
37. <http://www.dnaindia.com/scitech/report-indian-physicist-abhas-mitra-resolved-black-hole-paradox-much-before-stephen-hawking-19595375>, February 2014.
38. http://www.revistamagazin.ro/content/view/9799/20/George_Cusnarencu, 25 octombrie 2012.
39. <http://www.scientia.ro/blogul-catalina-oana-curceanu/1785-ce-se-intampla-cu-informatia-intr-o-gaura-neagra.htm>.