
Loop Quantum Gravity ed i buchi neri esplosivi

So if you feel you are in a black hole, don't give up - there's a way out.

Stephen Hawking

Simone Speziale

Perimeter Institute for Theoretical Physics, CPT Marseille

I buchi neri sono tra gli oggetti più affascinanti che popolano l'universo. Secondo la teoria della relatività generale classica, questi oggetti sono eterni e possono solamente crescere nel tempo. Hawking è stato il primo a mostrare come, prendendo in considerazione effetti quantistici, tale scenario possa cambiare verso un buco nero che lentamente evapora via, a causa delle radiazioni termiche quantistiche. Questo fenomeno teorico, ancora da osservarsi, pone domande concettuali e tecniche cruciali -tra queste anche il famoso *paradosso dell'informazione del buco nero*- alle quali una teoria della gravità quantistica deve rispondere. In questo articolo presenterò due diverse ipotesi per rispondere a queste domande: una più conservativa, basata su equazioni di Einstein modificate e buchi neri *non singolari*, ed una più speculativa, basata sulla Loop Quantum Gravity e buchi neri esplosivi, la quale parimenti può implicare interessanti conseguenze osservabili.

Introduzione

Giusto in tempo per il centenario della teoria della relatività generale di Einstein, le onde gravitazionali sono state osservate dai due interferometri laser americani coordinati dal consorzio LIGO/Virgo. Questo risultato straordinario ha perfettamente confermato, ancora una volta, le predizioni di Einstein. La difficoltà dell'osservazione, la ragione per cui c'è voluto così tanto tempo, risiede nell'estrema debolezza della gravità se comparata alle altre forze: in questo momento, anche se tutta la Terra sta attirando verso il terreno il gesso che tengo in mano, mi basta un minuscolo sforzo per resistere questa attrazione usando l'energia chimica dei miei muscoli, in ultima analisi, di origine elettromagnetica. Per la stessa debolezza, un'altra straordinaria predizione della relatività generale, cioè il rallentamento del tempo con l'aumento del campo gravitazionale, ha dovuto aspettare fino agli anni settanta per la conferma sperimentale, con la costruzione dei primi satelliti GPS. Nello stesso periodo arrivò anche la prima osservazione indiretta delle onde gravitazionali: una coppia orbitale di stelle di neutroni, con un forte campo magnetico, fu os-

servata perdere energia e rallentare esattamente al ritmo previsto dalla relatività generale qualora quell'energia fosse stata portata via sotto forma di onde gravitazionali. L'osservazione diretta di quelle onde non era possibile al momento, poichè non avevamo una strumentazione abbastanza sensibile. Ora la abbiamo, grazie a LIGO e Virgo, e l'era dell'ascolto dell'universo attraverso le onde gravitazionali è appena iniziata, con l'imminente costruzione di ulteriori interferometri laser in tutto il mondo.

Anche i buchi neri sono stati predetti usando la teoria di Einstein molto prima della loro osservazione. Già tre mesi dopo la pubblicazione delle equazioni della relatività generale, Schwarzschild ne trovò la più semplice soluzione, statica e a simmetria sferica. Questa soluzione descrive la deformazione dello spazio-tempo attorno ad una stella o ad un pianeta, ed introduce correzioni piccole ma cruciali alla descrizione di Newton della gravità. In particolare, porta ad una correzione alla precessione del perielio di Mercurio e alla deviazione della luce, le due conferme immediate della relatività generale, ed include il rallentamento del tempo, un effetto chiamato *red-shift* (spostamento verso il rosso) gravitazionale. È importante notare che il red-shift gravitazionale ed il rallentamento del tempo ad esso associato possono diventare via via sempre più marcati, più il campo gravitazionale è intenso. Se una stella di massa M collassa in una regione (sferica per semplicità) di raggio inferiore al valore critico $r_s = 2GM/c^2$, l'effetto del campo diventa infinito, cioè il tempo rallenta all'infinito! Questo red-shift infinito implica a sua volta un red-shift infinito di qualsiasi onda di propagazione, in modo che nulla, nemmeno la luce, può emergere dalla regione all'interno della superficie di raggio r_s , ragionevolmente chiamata *orizzonte degli eventi*: un osservatore esterno non ha accesso agli eventi che accadono all'interno di questa superficie.

Inizialmente considerata solo un'astrazione teorica, la nozione di tali *buchi neri* diventò evidenza sperimentale con l'osservazione di sorgenti di fortissimi campi gravitazionali completamente invisibili, e deducibili solo attraverso gli effetti che inducono sulla materia circostante.

La prima di tali osservazioni risale al 1964 ed

è stata la sorgente di raggi-X Cygnus X1, la cui produzione ora sappiamo essere causata dalla materia che cade in un buco nero e proveniente da una stella gigante che orbita attorno ad esso [1]. Da allora abbiamo scoperto un gran numero di buchi neri, in intervalli di massa che vanno da poche masse solari a mostri dell'equivalente di cento milioni di Soli. Abbiamo anche delle loro foto! Si veda ad esempio questa famosa immagine del telescopio KECK, che mostra il centro della nostra galassia: le orbite fortemente ellittiche di poche stelle sono state ricostruite su un periodo di 15 anni, tutte ruotando intorno a un oggetto oscuro la cui massa si aggira sull'ordine di un milione di Soli. La conferma osservativa dell'esistenza

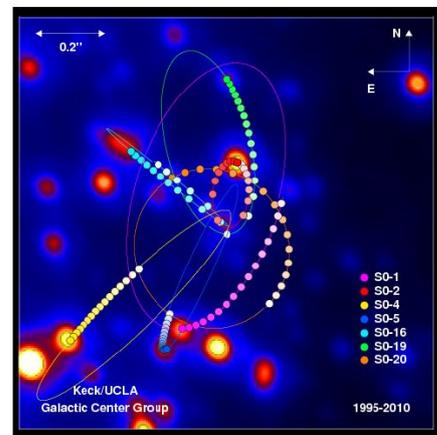


Figura 1: Sequenza di foto prese al centro della nostra galassia, che permette di ricostruire le orbite di alcune stelle su un periodo di circa 15 anni. Dalle orbite si ricostruisce il baricentro comune, la cui massa è stimata nell'ordine del milione di soli.

dei buchi neri, anche se limitata alla regione al di fuori dell'orizzonte degli eventi, stimola domande e pensieri teorici su cosa ci sia oltre: cosa succede veramente all'orizzonte degli eventi? Cosa succede dentro? Dal punto di vista matematico, queste domande possono essere risolte usando la relatività generale. La teoria ci dice ad esempio che un astronave che cade in un buco nero, attraverserà l'orizzonte degli eventi in un tempo finito e senza essere distrutta o subire condizioni gravitazionali estreme. Guardando indietro però, verso la direzione

di provenienza, vedrebbe l'evoluzione del suo universo visibile accelerare esponenzialmente, come in un movimento accelerato su un video, e occupare una parte sempre più ristretta del suo campo di visione. Passato l'orizzonte degli eventi, la forza di attrazione gravitazionale continua ad aumentare senza limiti, finché gli effetti delle maree diventano così intensi da distruggere l'astronave dell'osservatore e lo stesso osservatore: nella teoria di Einstein, la forza gravitazionale diventa infinita al centro del buco nero, punto finale di tutte le traiettorie possibili per un buco nero sferico. Ma è questo davvero quello che succede all'interno di un buco nero? Torneremo su questa domanda in seguito.

In ogni caso, questa strana regione interna con la sua singolarità che si annida nel buio non influenza l'applicazione fisica della relatività generale ai fenomeni astrofisici, poiché la singolarità è nascosta dall'orizzonte degli eventi e quindi causalmente disconnessa dal nostro universo. In effetti, scienziati come Hawking, Penrose e molti altri che hanno contribuito allo sviluppo della teoria classica dei buchi neri e della relatività generale, hanno congetturato che *tutte* queste singolarità siano nascoste dai loro orizzonti degli eventi. Questa è nota come la *congettura cosmica di censura*, supportata dalla prova matematica che i collassi gravitazionali formano i propri orizzonti degli eventi attorno alle loro rispettive singolarità. Inoltre, Hawking ha dimostrato che un orizzonte degli eventi non può mai diminuire di dimensioni, ma solo aumentare, via via che nuova materia cade nel buco nero, dimostrando così che i buchi neri sono *eterni*, nella teoria della relatività generale classica.

Poco dopo aver provato questo teorema, Hawking si rese conto che effetti quanto-meccanici avrebbero potuto violare una delle sue ipotesi, in particolare, la positività dell'energia. Si pensi per esempio alle anti-particelle o all'effetto tunnel quantistico: effetti quanto-meccanici potrebbero portare alla perdita di massa per un buco nero e quindi al suo restringimento. Ora, l'inclusione di effetti quanto-meccanici nella teoria della relatività generale è una questione molto delicata: il fondamento stesso

della meccanica quantistica e della teoria quantistica dei campi (la sua estensione ai sistemi con infiniti gradi di libertà) richiede uno spazio-tempo di Minkowski fisso e piatto, con le sue associate isometrie, come nella relatività speciale. Al contrario, lo spazio-tempo della relatività generale è dinamico, non fisso e non ha le isometrie di Minkowski.

Torneremo su questo punto di seguito, ma, come passo intermedio, è possibile considerare la teoria quantistica dei campi su un punto fisso ma con spazio-tempo curvo, purché stazionario. Questo scenario è fortemente approssimato perché ignora effetti non-lineari della dinamica delle equazioni di Einstein, ma può fornire un ambiente più semplice per testare idee ed effetti fisici quando l'energia relativista della materia è poca. In questa configurazione approssimativa, Hawking è stato in grado di trarre una conclusione stupenda: gli effetti quantici porterebbero ad un buco nero dal quale fuoriesce energia; la perdita assume la forma di una radiazione termica di particelle quantistiche ad una temperatura T_H data da

$$T_H = \frac{\hbar}{8\pi GM},$$

dove M è la massa del buco nero.

Intuitivamente, questo effetto può essere inteso come una versione gravitazionale della polarizzazione del vuoto di Schwinger: il vuoto di un campo quantistico è brulicante di coppie virtuali particella-antiparticella e se noi applichiamo un campo elettrico abbastanza forte, per esempio mediante un condensatore, le coppie possono trasformarsi in particelle reali, separate le une dalle altre in quanto attratte dalle due piastre opposte del condensatore (l'energia per eccitare le particelle reali dal vuoto viene fornita dal condensatore stesso).

Nell'effetto Hawking, è la forza del red-shift gravitazionale vicino all'orizzonte degli eventi a polarizzare il vuoto e l'energia ad essa associata -che serve a creare particelle reali- viene sottratta al buco nero stesso. Ciò che è sorprendente nel risultato di Hawking è la natura perfettamente termica della radiazione quantistica: un buco nero si comporta esattamente come un corpo nero in termodinamica.

Il fatto che il risultato di Hawking trascuri

aspetti non-lineari della dinamica vuol dire che la sua teoria non ci dice come cambia il buco nero quando viene emesso un quanto di questa radiazione. In mancanza di risultati dinamici, possiamo basarci il comportamento termodinamico del buco nero -supportato inoltre da molte altre proprietà scoperte grossomodo nello stesso periodo (come la famosa entropia di superficie)- e usare la legge di Stefan-Boltzmann per stimarne il tasso di perdita di massa associata con l'emissione di radiazione di Hawking. Questa da

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{\hbar c^6}{G^2 M^2}.$$

Se non ci sono importanti correzioni di ordine superiore o di tipo non-perturbativo, possiamo immaginare che questa equazione sia valida attraverso tutta l'evoluzione del buco nero. In questo caso otteniamo che il buco nero evapora completamente in un tempo finito dato dalla formula

$$\tau_H \sim \frac{G^2 M^3}{\hbar c^6}.$$

Ne segue che tenendo in considerazione effetti quantistici, neanche i buchi neri sono eterni!

Bisogna sottolineare che questa predizione non è assolutamente in contraddizione con l'osservata esistenza di buchi neri: per buchi neri macroscopici questo tempo è di molto maggiore dell'età dell'universo stesso.

Ad esempio, la vita di Hawking di un buco nero di massa pari a quella del sole è di 10^{67} anni! Solo per i buchi neri microscopici questo tempo di vita finito è sufficientemente corto da poter essere testato; tuttavia, sebbene la loro esistenza sia stata suggerita da alcuni teorici, buchi neri microscopici non sono mai stati osservati. Inoltre, la stessa radiazione di Hawking non è osservabile astrofisicamente: per un buco nero di massa solare $T_H 10^{-8} K$, questa è più piccola della radiazione del fondo cosmico (che è nelle microonde, intorno a $2.7 K^1$).

Anche senza prove dirette, la radiazione di Hawking è stata ottenuta in un'abbondanza di modi diversi negli anni passati, e pochissimi dubbi risiedono sulla solidità di questo risultato teorico. Da un punto di vista teorico, la radiazione di Hawking pone una serie di sfide straordinarie, che

vanno di pari passo con la questione della singolarità centrale. Infatti, se classicamente possiamo invocare la Congettura della Censura Cosmica e supporre che tutte le singolarità siano nascoste ad osservatori fuori dai buchi neri, per i quali quindi la relatività generale si applica senza il problema delle singolarità di curvatura, il risultato di Hawking sull'evaporazione dell'orizzonte degli eventi riporta nuovamente la singolarità al centro della discussione. Per affrontare questo problema, potrebbe quindi essere necessario andare oltre la relatività generale ed oltre le approssimazioni usate da Hawking, e costruire una teoria quantistica della gravità completa.

L'applicazione della meccanica quantistica a sistemi relativistici in generale richiede quindi andare oltre le attuali basi della fisica teorica, ed la gravità quantistica è considerata da molti il *Santo Graal* della fisica teorica. Questa ricerca ha affascinato le menti più brillanti da oltre 80 anni e un gran numero di proposte creative sono state avanzate. Mentre nessuna di queste idee ha portato a previsioni sperimentali coerenti che potrebbero essere verificate, dall'interrogarsi su questa domanda è sbocciato in un intero campo di ricerca che produce regolarmente importanti progressi nella fisica teorica in generale, oltre che nella matematica e nei fondamenti della meccanica quantistica. In questo campo, il più sviluppato ed il più seguito approccio è certamente la teoria delle stringhe. Questo approccio però soffre del fatto che le fondamenta stesse della teoria richiedono l'esistenza della supersimmetria tra bosoni e fermioni, e di dimensioni spaziali nuove rispetto alle 3 osservate, e una quantità sempre maggiore di prove sperimentali sta escludendo queste possibilità.

Un approccio completamente diverso, che non richiede dimensioni extra né supersimmetria, ma si concentra invece sulla natura dinamica dello spaziotempo nella relatività generale, è offerto dalla *Loop Quantum Gravity* (LQG) [3]. Questa strada, percorsa da Abhay Ashtekar, Lee Smolin e Carlo Rovelli sarà discusso più in dettaglio qui sotto.

Riassumendo, i buchi neri e la radiazione di Hawking forniscono un perfetto banco di prova per qualsiasi teoria candidata a spiegare

¹Molta sforzi compiuti per verificare la radiazione di Hawking sono basati sui così detti *sistemi analoghi* [2]

la gravità quantistica. In particolare, possiamo selezionare tre domande chiave che dovrebbero essere affrontate da questa teoria:

- Il problema dinamico: la formula di evaporazione di Hawking è valida sempre, cioè il buco nero evapora completamente?
- Il problema della singolarità: se evapora completamente, cosa succede alla singolarità centrale? rimane 'nuda'? svanisce?
- Il paradosso dell'informazione: poichè la radiazione di Hawking è perfettamente termica, se la singolarità è assente, cosa succede all'informazione della materia caduta nel buco nero? È persa, o è recuperabile in linea di principio?

La situazione con le singolarità della curvatura in relatività generale è reminescente di un analogo problema affrontato dai fisici teorici all'inizio del XX secolo, vale a dire l'instabilità classica degli atomi. Secondo la teoria di Maxwell dell'elettromagnetismo, gli elettroni che ruotano attorno ai nuclei carichi dovrebbero emettere radiazioni, perdendo così momento angolare e collassando inevitabilmente sul nucleo. In altre parole, il potenziale classico ha una singolarità ad $r_C = 0$. La soluzione a questo problema si è trovata includendo gli effetti quantistici: il principio di indeterminazione introduce un'efficace pressione quantistica che impedisce all'elettrone di essere localizzato nel centro con uno slancio nullo.

Anche in assenza di una teoria completa di gravità quantistica, molti ricercatori congetturano che qualcosa di simile accadrà anche nel caso gravitazionale. Gli effetti della gravità quantistica alla scala di Planck cambieranno le equazioni di Einstein, introducendo una sorta di pressione efficace che blocca il collasso gravitazionale. I teoremi di singolarità di Hawking e Penrose potrebbero essere violati mediante una semplice modifica alle equazioni di Einstein.

C'è una vasta letteratura di idee e risultati su queste domande e loro variazioni sul tema. Di seguito, presenterò brevemente due diverse ipotesi su cui ho lavorato: buchi neri non singolari [9, 10] e buchi neri esplosivi [11]. Le due ipotesi condividono lo stesso principio cardine, cioè che la teoria della gravità quantistica risolva la

singolarità centrale, ma differiscono nella realizzazione dettagliata della questione e nelle conseguenze fisiche che ne scaturiscono. In caso di buchi neri non singolari, la pressione quantistica arresta il collasso verso uno stato all'incirca stazionario, ma il buco nero appare ancora un buco nero dall'esterno, sebbene non più singolare nel suo centro. A questo punto la radiazione di Hawking entrerebbe in gioco, facendo evaporare via lentamente il buco nero, e quindi esponendo finalmente il nucleo interno e possibilmente permettendo il recupero dell'informazione nascosta durante il collasso.

Nel caso di buchi neri esplosivi, invece, la pressione quantistica è così forte che porta ad un *rimbalzo* del collasso gravitazionale, trasformando il buco nero in un 'buco bianco', con l'emissione di energia del tutto affine ad una gigantesca esplosione stellare. L'effetto quantico rilevante in questo scenario è un processo di tunneling, e la radiazione di Hawking viene trattata come un effetto secondario e puramente dissipativo. Vediamoli in più dettaglio.

Buchi neri non-singolari

Molte teorie candidate a spiegare la gravità quantistica predicono modifiche alle equazioni di Einstein. Le modifiche possono essere organizzate in una serie di potenze nel parametro L di gravità quantistica (idealmente proporzionale alla lunghezza di Planck $l_P = \sqrt{\hbar G/c^3}$),

$$R_{\mu,\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{16\pi G}{c^4} [L^0 T_{\mu\nu} + L^1 \dots + L^2 \dots + \dots].$$

Ad esempio un tipico caso di studio lo si ha quando i termini aggiuntivi contengono prodotti del tensore di Riemann $R_{\mu\nu\rho\sigma}$. Questo tipo di modifiche invalida i teoremi di singolarità, ed è possibile trovare soluzioni di buchi neri non-singolari. Per essere interessanti, tali soluzioni devono soddisfare tre criteri:

- devono sembrare un buco nero al di fuori dell'orizzonte degli eventi, per essere compatibili con la relatività generale nel regime semi-classico e con le osservazioni;
- devono essere regolari ovunque, in particolare non avere una singolarità centrale;

(iii) devono avere tutti gli invarianti di curvatura sub-Planckiani in magnitudine ovunque, cioè

$$R < l_P^{-2}, \quad R_{\mu\nu\rho\sigma} R^{\mu\nu\rho\sigma} < l_P^{-4},$$

e così via.

Il terzo criterio è necessario per giustificare l'uso di una metrica classica e regolare per descrivere gli effetti della gravità quantistica. Il punto qui è che nulla garantisce che una descrizione metrica della gravità quantistica sia possibile alla scala di Planck. La teoria delle stringhe e la loop quantum gravity, ad esempio, sostengono che questo non è possibile, e una nozione di spazio-tempo completamente diversa debba emergere oltre quella scala. Pertanto la descrizione in termini di una metrica regolare e non-singolare del buco nero ha senso solo se quelle scale non sono superate. Queste condizioni rendono lo studio di metriche non-singolari di buco nero che soddisfino (i - iii) interessante di per se, indipendentemente dai dettagli della teoria fondamentale sottostante. In particolare, è possibile dimostrare che una metrica non-singolare a simmetria sferica che assomiglia ad un buco nero da lontano, deve avere per forza un secondo orizzonte degli eventi all'interno del primo, rendendo così la posizione centrale una regione di tipo tempo. Il nuovo orizzonte degli eventi interiore ha proprietà opposte a quelle dell'orizzonte degli eventi esteriore: è una superficie di *blue-shift* infinito, ed una regione di accumulazione per le geodetiche, si veda l'immagine sotto. Mentre questa è una proprietà piuttosto generica dei buchi neri non singolari, i suoi dettagli dipendono naturalmente dalla metrica precisa utilizzata. Il caso di studio più sviluppato in letteratura è stato introdotto circa dieci anni fa da Hayward [4] (si veda anche [5]): la sua struttura a cono di luce è mostrata in Figura 2 a destra, in confronto a quella di Schwarzschild mostrata nel pannello di sinistra.

Vediamo la presenza di un secondo orizzonte, che agisce come una superficie di accumulazione per la materia. La regione centrale della metrica non ha singolarità, ma ha un valore finito della curvatura inversamente proporzionale a L in (4), in modo tale che se noi disattivassimo le modifi-

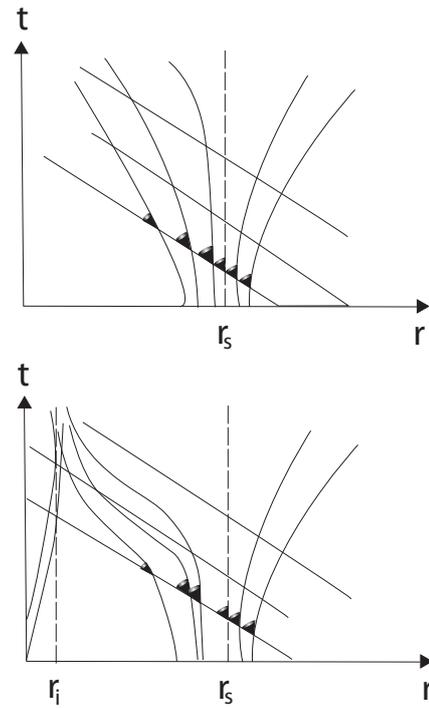


Figura 2: *Struttura causale di un buco nero in relatività generale (a sinistra), e di un buco nero non singolare motivato da teorie modificate della gravità per prendere in considerazione effetti quantistici. Nel caso classico, i coni luce si restringono all'avvicinarsi all'orizzonte degli eventi, e niente può uscirne. Tutte le traiettorie causali terminano nella singolarità centrale. Nel caso non-singolare, la materia non termina il suo percorso al centro, dove la curvatura è adesso finita, ma su un secondo orizzonte che agisce come superficie di accumulazione.*

che delle equazioni di Einstein, ovvero prendessimo il limite $L \rightarrow 0$, recupereremmo la singolarità centrale. Con una regione centrale non singolare, la situazione fisica di questo nuovo buco nero è simile a quello che succede al centro di una stella, dove un osservatore potrebbe rimanere statico in caduta libera (assunto che non bruci!). Che cosa succede se cerchiamo di affrontare gli enigmi dell'evaporazione in questo contesto? Possiamo supporre che la massa del buco nero evapori nel tempo secondo la legge di Hawking (2), ed osservare cosa succede allo spazio-tempo risultante. Poiché l'orizzonte interno agisce come una superficie di accumulazione, tutta la materia che cade all'interno -per formare il buco nero- si accumula su di esso. L'orizzonte esteriore evapora lentamente per la radiazione di Hawking, men-

tre la materia continua ad accumularsi su quello interno. Supponendo che l'evaporazione Hawking continui imperterrita, ad un certo punto l'orizzonte degli eventi esterno si ricongiungerà all'orizzonte interno: i due si fonderanno insieme e scompariranno lasciando la regione centrale esposta. Poichè non c'è più una singolarità nel centro, questa evoluzione è perfettamente compatibile con la Congettura della Censura Cosmica. Inoltre, risponde al paradosso della perdita di informazione molto semplicemente: l'informazione sull'argomento caduto non è affatto persa, ma nascosta dall'orizzonte degli eventi, e torna disponibile una volta che l'orizzonte degli eventi è scomparso².

Questa immagine qualitativa è convincente, fornisce un modo semplice ed elegante di rispondere sia alla risoluzione della singolarità sia al paradosso dell'informazione, ma per il momento non è mai stata supportata da calcoli convincenti. La difficoltà consiste nel trovare una teoria quantistica della gravità coerente che confermi questo scenario e ne descriva i dettagli. In particolare, la teoria deve contenere gli effetti non-lineari trascurati da Hawking, e poter risolvere le equazioni (4) con la modifica specifica inclusa, e con $T_{\mu\nu}$ sul lato destro calcolato come valore aspettato del campo quantistico sulla metrica di Hayward: questo calcolo è estremamente difficile e non abbiamo ancora una risposta esplicita. Ciò nonostante, calcoli preliminari fanno sorgere il seguente potenziale problema: a causa della superficie di accumulo, tutte le informazioni vengono rilasciate contemporaneamente, quando l'orizzonte degli eventi completa la sua evaporazione. Questa versione sarebbe associata a un'enorme esplosione di energia molto più grande della massa del buco nero stesso, e quindi incompatibile con conservazione energetica canonica. È possibile che una forma speciale dei termini extra in (4) possa essere trovata, in modo tale che lo scenario sopra riportato sia coerente con la conservazione dell'energia, ma questo non lo sappiamo ancora.

In conclusione, l'ipotesi di buchi neri non singolari è piuttosto allettante per la sua semplice riso-

luzione del paradosso della perdita di informazione, ma deve essere ancora migliorata prima che possa essere fornita una sostanziale evidenza teorica.

Tunnel quantistici e buchi neri esplosivi

Tra le alternative, un'idea più speculativa è stata recentemente avanzata da Carlo Rovelli ed il suo gruppo di ricerca [6, 7, 8, 11][6-8, 11]. L'idea di base è che quando la densità energetica della materia collassante raggiunge la densità di Planck (i.e. $\rho_P = c^5/\hbar G^2 \sim 10^{96} \text{ kg/m}^3$), la gravità quantistica induce una pressione repulsiva così forte non solo da fermare il collasso, come nel caso del buco nero non singolare, ma tale da far *rimbalzare* la materia che collassa, innescando così un'esplosione e suggellando la fine della fase di buco nero.

Indicazioni per questo scenario piuttosto esotico vengono dalla *Loop Quantum Cosmology* (LQC), un'applicazione della Loop Quantum Gravity a semplici modelli cosmologici. In questo contesto, una vasta costruzione di modelli mostra che l'uso della dinamica della LQC rimpiazza la singolarità iniziale del Big Bang, la quale viene sostituita da un *Big Bounce*: l'universo non proviene da una singolarità iniziale, ma da una antecedente fase di contrazione, rimbalzata in avanti una volta raggiunta la densità critica di Planck [12]. Lo scenario di Rovelli estende questa possibilità dalla cosmologia al collasso gravitazionale. A partire dall'esterno, la fase esplosiva del buco nero innescata dalla gravità quantistica assomiglia ad una metrica di *buco bianco*, la soluzione opposta a un buco nero, in cui tutta la materia è espulsa dall'orizzonte (per questo detto 'bianco'); per questo motivo, questo scenario viene spesso chiamato *transizione buco nero-buco bianco*.

Si noti che questo processo è classicamente impossibile: le due traiettorie della materia (il collasso e la fase esplosiva), o equivalentemente le due metriche (buco nero e buco bianco) non sono collegati da alcuna soluzione classica delle equazioni di Einstein. Lo scenario è basato sul ben noto effetto di tunneling quantistico: due configurazioni classicamente separate possono essere connesse da effetti quantistici. L'esempio

²Tecnicamente, quello che succede è che la radiazione termica di Hawking emessa nei primi istanti viene purificata dalla radiazione uscente dopo l'evaporazione completa dell'evento degli orizzonti.

più famoso è il decadimento radioattivo di un isotopo instabile: una particella quantistica confinata al nucleo può avere una probabilità non nulla di sfuggire alla sua barriera di potenziale. La domanda chiave è stimare questa probabilità del tunneling, e quindi, la vita media dell'isotopo.

Come in tutte le impostazioni relativistiche, la nozione di tempo in gravità quantistica dipende dall'osservatore. Per capire quale sia la durata di vita rilevante discussa nel nostro contesto, consideriamo l'immagine del fenomeno di tunneling riportata in Figura 3 dal punto di vista di un osservatore esterno al buco nero. Dal suo punto di vista, questi non può vedere la materia che cade nell'orizzonte degli eventi e raggiungere la densità di energia planckiana. Quindi, quello che vede è la materia precipitare verso l'orizzonte degli eventi, ma rallentando via via sempre più (per il fenomeno del red-shift discusso nell'Introduzione di questo articolo), fino ad un certo punto in cui ipoteticamente il tunneling si verifica, e la materia rimbalza ed esce di nuovo dal buco, ora bianco (la traiettoria completa della materia è riprodotta nella Figura 3): si noti che l'osservatore esterno conclude che gli effetti quantistici non-perturbativi che causano il rimbalzo devono avvenire sulla scala dell'orizzonte, il punto δ in Figure 3, dove t_S ed r_S sono le coordinate radiali e temporali del osservatore esterno e T è la durata di vita osservata del buco nero.

È il valore previsto per questa vita media misurata dall'esterno che è cruciale affinché la pittura dei buchi neri esplosivi abbia un senso. In particolare, dovrebbe essere più breve del tempo (estremamente lungo) necessario per la radiazione di Hawking a far evaporare il buco nero: il tunneling e l'esplosione ad esso associata dovrebbero verificarsi prima della completa evaporazione. In altre parole, si tratterebbe di un fenomeno non-perturbativo che non poteva essere previsto nello schema perturbativo di Hawking. Si noti che in questa immagine la radiazione di Hawking ha un ruolo secondario, simile ad altri effetti dissipativi in fisica, e nonostante influenzi l'evoluzione del buco nero, non è la causa principale del tempo di vita finito del buco nero.

Questo scenario condivide con la teoria dei buchi neri non singolari il punto chiave di un centro regolare, senza una singolarità, ed un meccani-

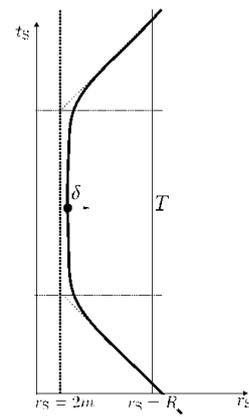


Figura 3: Traiettoria ipotetica di un collasso gravitazionale interrotto da effetto tunnel quantistico, risultante in un'esplosione descritta dalla metrica di buco bianco nel futuro della metrica di buco nero.

simo analogo per la purificazione della radiazione di Hawking una volta scomparso l'orizzonte degli eventi. Tuttavia, mentre nella pittura del buco nero non singolare è la radiazione di Hawking che fa evaporare l'orizzonte completamente, in questa immagine alternativa è il fenomeno non-perturbativo di tunneling quantistico che interviene prima e fa esplodere il buco nero.

L'altra differenza cruciale tra i due scenari è che, nella teoria del buco nero non-singolare, manifestazioni forti della gravità quantistica sono attese solo vicino al centro del buco nero, mentre, nella teoria del buco nero che esplose, l'osservatore esterno vede forti effetti di gravità quantistica già all'orizzonte degli eventi, una idea più radicale e più controversa.

I calcoli necessari a testare questo tipo di scenario possono essere fatti in linea di principio con qualsiasi approccio alla gravità quantistica che sia sufficientemente sviluppato per affrontare questo problema. La LQG ha raggiunto questo livello, e recentemente abbiamo lavorato in una collaborazione guidata di Rovelli [11] per preparare il terreno per questo calcolo. Per capire come questo rimbalzo possa essere possibile, è necessario conoscere alcuni dettagli semplici inerenti la LQG. In questa descrizione della gravità quantistica, la maglia dello spazio-tempo è fatto da una collezione di *atomi di spazio*, alla stregua degli atomi con cui è fatta la mia lavagna. Tali

atomi di spazio avrebbero le dimensioni vertiginosamente ridotte di 10^{-35} metri, e sarebbe quindi impossibile rilevarli direttamente: il loro comportamento collettivo è indistinguibile dallo spazio-tempo continuo, liscio della relatività generale e teoria dei campi quantistici. Solo quando la densità della materia raggiunge i valori di Planck, è possibile iniziare ad interagire con i singoli atomi di spazio. Il calcolo che abbiamo impostato mostra che, raggiunta la densità di Planck, vi è un trasferimento di energia dalla materia collassante nel buco nero agli atomi dello spazio. Questi ultimi, in precedenza silenti in uno stato coerente che descrive una geometria liscia del buco nero, assorbono abbastanza energia per fare scattare l'effetto tunnel ed riarrangiarsi in una nuova configurazione, uno stato coerente che descrive adesso il buco bianco: l'energia viene riconsegnata alla materia, e l'evoluzione classica sotto la metrica del buco bianco viene ripristinata. Il punto difficile è calcolare l'ampiezza di probabilità quantistica effettiva per questo fenomeno cinematico, per capire se è possibile. Ma a causa della complessità della nostra formula, ancora non sappiamo rispondere a questa domanda. Tuttavia, possiamo già anticipare alcune interpretazioni del risultato.

Supponendo per semplicità la simmetria sferica e la simmetria dell'inversione temporale, la vita del buco nero può dipendere solamente dalla sua massa M e può esserne a priori una qualsiasi funzione. Tuttavia, ci sono limiti rigorosi che possono essere derivati dalla teoria e dagli esperimenti. Tempi di vita proporzionali ad M o $M \log M$, per esempio, sono incompatibili con le osservazioni: buchi neri astrofisici di diverse masse solari subirebbero il fenomeno di tunneling in pochi secondi, al contrario della loro stabilità osservata e comprovata. Se il calcolo della LQG prevede un tempo di vita che è troppo breve, il meccanismo può quindi essere escluso. D'altra parte, una durata di vita proporzionale ad M^3 o più significherebbe che il buco nero evaporerebbe sotto la radiazione di Hawking prima che il fenomeno di tunneling ragionevolmente si verifici, rendendo il fenomeno non interessante, e spostando l'interesse alla teoria dei buchi neri non-singolari. Quindi, gli unici risultati interessanti sarebbero tempi di vita dell'ordine di M^2 .

Reintroducendo le unità fisiche, questo significa

$$\tau \sim \sqrt{\frac{G^3}{\hbar c^7}} M^2.$$

Si noti che l'effetto dipende dall'inverso della radice quadrata di \hbar , il che indica che questo non può essere un fenomeno perturbativo, come previsto.

L'aspetto più interessante di questa possibilità è che apre una nuova finestra per la fenomenologia della gravità quantistica: se l'ipotesi del fenomeno di tunneling per il buco nero si rivela vera, i buchi neri potrebbero effettivamente esplodere e tali esplosioni potrebbero essere osservabili nei telescopi!

Questa è una vera novità, perchè gli effetti della gravità quantistica sono tipicamente così piccoli da essere virtualmente invisibili. Ad esempio, sappiamo che la legge di Newton viene modificata alle scale piccole con loops di gravitoni, in maniera molto simile a quanto avviene alla legge di Coulomb. Tuttavia, mentre le modifiche alla legge di Coulomb si verificano su scale dell'ordine di 10^{-15} metri, e sono state abbondantemente testate con alta precisione, le modifiche alla legge di Newton si verificano alle scale ridicole di 10^{-35} metri, largamente inaccessibili ai nostri test sperimentali, che raggiungono al massimo i 10^{-18} metri: per fare un paragone, è come se stessimo cercando di identificare la posizione di Roma sull'atlante usando un righello delle dimensioni di una galassia! Per questo motivo si dice spesso che la gravità quantistica è fuori del dominio sperimentale, e quindi un argomento di ricerca puramente di fisica teorica e di matematica.

D'altra parte, un tempo di vita proporzionale ad M^2 implica che buchi neri primordiali, di massa all'incirca lunare, potrebbero essere oggetti in esplosione oggi ed emettere segnali rilevabili [8]. Una componente del segnale atteso che risulterebbe da tale esplosione potrebbe essere simile ai *fast radio bursts* recentemente osservati [13], e questa intrigante eventualità è stata presentata anche al grande pubblico [14].

Il fenomeno di tunneling quantistico per i buchi neri potrebbe quindi essere una previsione della gravità quantistica verificabile, e il nostro gruppo di ricerca continua a lavorare al fine di svilupparlo ulteriormente.



- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Cygnus_X-1
- [2] Black-hole analogue works like a laser, Physics World, Oct 15, 2014
[<http://physicsworld.com/cws/article/news/2014/oct/15/black-hole-analogue-works-like-a-laser>]
- [3] C. Rovelli, *Quantum gravity*, Cambridge University Press, (2004).
- [4] S. A. Hayward, *Formation and evaporation of regular black holes*, Phys. Rev. Lett. **96**:31103, (2006).
- [5] V. P. Frolov, *Information loss problem and a 'black hole' model with a closed apparent horizon*, arXiv:1402.5446, (2014).
- [6] H. M. Haggard and C. Rovelli, *Quantum-gravity effects outside the horizon spark black to white hole tunneling*, Phys. Rev. D **92**(10):104020, (2015).
- [7] C. Rovelli and F. Vidotto, *Planck stars*, Int. J. Mod. Phys. D **23** (12):1442026, (2014).
- [8] A. Barrau and C. Rovelli, *Planck star phenomenology*, Phys. Lett. B **739**:405, (2014).
- [9] T. De Lorenzo, C. Pacilio, C. Rovelli and S. Speziale, *On the Effective Metric of a Planck Star*, Gen. Rel. Grav. **47**(4):41, (2015).
- [10] T. De Lorenzo, A. Giusti and S. Speziale, *Non-singular rotating black hole with a time delay in the center*, Gen. Rel. Grav. **48**(3):31, (2016).
- [11] M. Christodoulou, C. Rovelli, S. Speziale and I. Vilenky, *Realistic Observable in Background-Free Quantum Gravity: the Planck-Star Tunnelling-Time*, Phys.Rev. D **94**(8):084035, (2016).
- [12] Big Bang et gravitation quantique, Pour la science, avril-juin 2014 [<http://www.pourlascience.fr/ewb/pages/a/article-big-bang-et-gravitation-quantique-32826.php>]
- [13] Keane E. et al., Nature 530, 453-456 (25 February 2016).
- [14] Les sursauts radio rapides: des explosions d'étoiles de Planck?, Futura sciences 2015, janvier 2015
[<http://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/trou-noir-sursauts-radio-rapides-explosions-etoiles-planck-56875>]



Simone Speziale: è nato a Roma nel 1978, e si è laureato in fisica teorica alla Sapienza nel 2002. Ha conseguito un dottorato in cotutela tra Cambridge e La Sapienza seguito da un postdoc al Perimeter Institute for Theoretical Physics in Canada. Dal 2008 è ricercatore CNRS nel laboratorio di fisica teorica di Marsiglia, Francia. Si occupa principalmente di gravità quantistica, relatività generale classica e fisica matematica.