

Black Holes: la luce che gravita

Costantino Sigismondi

prof.sigismondi@icra.it

(ICRA/Sapienza Università di Roma e ITIS G. Ferraris, Roma)

Submitted March 26th 2024, revised & accepted April 3rd

Abstract The Schwarzschild radius is implicit in the Newton equations, but the general physics framework did not accept the light gravitating, until the 1919 total solar eclipse of Eddington. The new spacetime vision of gravity, introduced by Einstein, and the progressive understanding of the stellar physics, also in hyperdense conditions, where the exclusion principle applies, culminated in the black hole's introduction of 1967-1971 by Wheeler and Ruffini. Black holes of stellar masses, and galactic black hole from millions solar masses to billions, have been observed since then, with increasing resolution. The theories on their states, energetics and evolution are paralleling their observations in the multimessenger era of astronomy.

Sommario Il raggio di Schwarzschild è implicito nelle equazioni di Newton, eppure questa soluzione alle equazioni Einstein ebbe bisogno della consapevolezza che anche la luce gravitasse, e questo fu possibile solo dopo l'eclissi totale solare di Eddington del 1919. La nuova visione spaziotemporale della gravitazione introdotta da Einstein, insieme alla migliore conoscenza della fisica stellare (fusione nucleare) e delle condizioni dove vige il principio di esclusione di Pauli alle altissime densità, culminarono con l'introduzione del buco nero come oggetto astrofisico da parte di Wheeler e Ruffini (1967-1971). Buchi neri di massa stellare e da milioni a miliardi di masse solari sono stati osservati fin da allora con crescenti dettagli. Le teorie dei loro stati, della loro energetica ed evoluzione si sviluppano in parallelo alle osservazioni multi-banda e di onde gravitazionali.

Keywords: Black Holes, Gravitation, History, Light, AGN.

Introduzione: le equazioni di Newton in Relatività In Cosmologia, nel 1991, alla Sapienza, c'era un capitoletto che gradii molto: *l'Universo di Milne*, in cui si mostravano semplicemente i tre casi: aperto, piatto e chiuso, spiegati con le equazioni di Newton. Tuttavia non bisogna dimenticare che la Cosmologia fisica nasce con Einstein¹ quando mostra che tutta la massa dell'Universo ne determina la curvatura dello spaziotempo. Quindi l'uso del formalismo Newtoniano, molto più semplice e limitato, rispetto a quello tensoriale della Relatività Generale, presuppone le basi su cui riposa la Relatività Generale stessa. La prova osservativa dello spostamento

¹ P. J. E. Peebles, *Principles of Physical Cosmology*, Princeton (2020).

delle stelle fisse dell'ammasso delle Iadi, che erano di sfondo durante l'eclissi totale di Sole del 29 maggio 1919, rese la teoria di Einstein più evidente rispetto alla spiegazione geometrica dell'avanzamento del perielio di Mercurio, i cui dati erano già stati studiati a fondo da Le Verrier, a partire da quando scoprì Nettuno (1846).

Se calcoliamo la velocità di fuga da un corpo di massa M , otteniamo $v=(2GM/R)^{1/2}$

La velocità dipende solo dalla distanza R dal centro di massa del corpo, come afferma anche il teorema di Gauss, applicato al caso della Gravitazione.

Se imponiamo questa velocità pari a c , la velocità della luce (*celeritas*, in Latino, da cui c) otteniamo la distanza $R_s=2GM/c^2$, che è il raggio di Schwarzschild² (1916) del buco nero statico, futuro a quel tempo.

Premesse Newtoniane John Michell (1724-1793)³ scrisse nel 1783 sulle "stelle oscure" che –con un raggio 500 volte quello del Sole (ed una massa 500x500x500 volte)- non avrebbero permesso alla luce di sfuggire. Michell, che insegnò a Cambridge, era amico di Cavendish, e progettò la bilancia di torsione, con cui fu misurata la costante G di gravitazione universale. La sua idea sulle stelle oscure tornò a galla negli anni '70 del novecento, quando le osservazioni dei buchi – sempre indirette- come aveva correttamente predetto Michell diventarono realtà. Michell aveva aderito alla teoria corpuscolare della luce di Newton (1704) e poteva considerarne la gravitazione, ma l'essere il fotone di massa nulla come sappiamo oggi, ci riporta fuori da quella fisica ancora intuitiva benché deduttiva, *after the Principia* fissati da Newton (1687).

La velocità della luce nel secolo di Galileo la sua propagazione è ritenuta istantanea, finché Roemer⁴ non prova altrimenti nel 1676 con le eclissi dei satelliti di Giove. Lo stesso Cassini, che aveva fatto le osservazioni analizzate da Roemer non ne accetta le conclusioni.⁴

E poiché la **Natura non facit saltus** è stato difficile pensare a stati della materia tanto densi e compatti, in cui la massa potesse essere

² Karl Schwarzschild trovò questa soluzione per le equazioni Einstein mentre combatteva al fronte la Grande Guerra. [Karl Schwarzschild - Wikipedia](#)

³ [John Michell - Wikipedia](#)

⁴ <https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/159488/1/693190.pdf> (2019).

confinata nel suo raggio di Schwarzschild, tant'è vero che anche nell'idea di Michell il corpo doveva essere molto grande, ma implicitamente a densità costante. Globuli oscuri furono scoperti negli anni '40 del novecento da Bok,⁵ ma la loro è opacità di origine molecolare. La possibilità di vedere un oggetto nero su sfondo nero è nulla, eccetto quando passa davanti ad un oggetto luminoso e succede qualcosa, come per i MACHO,⁶ dove avviene il microlensing gravitazionale,⁷ ma fin'ora non ci sono stati casi del genere, eccetto per le grandi galassie cD dominanti il centro degli ammassi.⁸ Hubble Space Telescope ha osservato la stella di neutroni errante più vicina a noi (200 anni luce), mentre James Webb Space Telescope una stella di neutroni dentro il resti di SN 1987 A.⁹

Gli stati ultracondensati della materia stellare presentano valori di densità che non sono sperimentabili nei nostri laboratori. La situazione di una stella in cui gli elettroni sono "degeneri"¹⁰ o addirittura lo diventano i neutroni, sono comprensibili solo da un punto di visto teorico. Le stelle sono autogravitanti, e la pressione termica contrasta la forza di auto-gravità che tende a farle collassare su se stesse. Quando la "combustione" nucleare non contrasta più la gravità, l'intera struttura si comprime finché la pressione degli elettroni degeneri, che non possono occupare lo stesso stato quantico per il principio di esclusione di Pauli, non si oppone. La stella diventa una nana bianca, con densità 10^6 volte quella dell'acqua. Nana perché ha le dimensioni della Terra, bianca perché la sua superficie è molto calda.¹¹ Quando la gravità è ancora maggiore il collasso procede e gli elettroni si combinano con i protoni dando luogo ai neutroni, circa 2000 volte più massicci degli elettroni. Se la loro pressione degenerare potrà contrastare la gravità, si ha una stella di neutroni, che ha dimensioni attorno ai 10 km e densità 10^{14} volte quella dell'acqua.

⁵ [Globulo di Bok - Wikipedia](#)

⁶ [MACHO Project - Wikipedia](#)

⁷ [Gravitational lens - Wikipedia](#)

⁸⁸ [Type-cD galaxy - Wikipedia](#)

⁹ <https://esawebb.org/news/weic2404/> e [Introduction to Astronomy](#)

¹⁰ [Materia degenera - Wikipedia](#)

¹¹ [Sirio B - Wikipedia](#)

Il primo a teorizzarla fu Oppenheimer nel 1939,¹² mentre Jocelyn Bell ne osservò il lampo periodico nella prima pulsar scoperta (1967) CP1919, ribattezzata con humor inglese, LGM-1, piccolo omino verde-1, per la regolarità del segnale.¹³ Naturalmente dalla prima osservazione alla comprensione di ciò che era stato visto sono passati decenni, e ancora oggi si sta lavorando molto nella direzione di comprendere a pieno la fisica e la formazione di questi oggetti estremi. Secondo Oppenheimer e Volkov le stelle di neutroni possono avere origine da progenitori di $2.57 M_{\odot}$, se invece c'è rotazione il limite si spinge a $3.2 M_{\odot}$,¹⁴ secondo Ruffini e Rhoades (1974). Oltre questa massa iniziale il collasso simmetrico porta inevitabilmente al Black Hole.¹⁵

Come si osservano i Buchi Neri occorre valutarne indirettamente la massa per distinguerli da altri oggetti pur molto densi,¹⁶ così Cygnus X1 è stato il primo buco nero nella Galassia ad essere stato identificato: è una sorgente binaria a raggi X, prodotti dalla caduta di materiale proveniente dalla stella compagna verso il buco nero, attraverso il lobo di Roche. La produzione di raggi X avviene per Bremmstrahlung termica, in ossequio alla legge elettromagnetica che “ogni carica elettrica accelerata irraggia”.¹⁷ Quindi, per semplicità, se vediamo raggi X sono in gioco alte energie, e quindi, facilmente è l'energia cinetica di caduta libera verso l'oggetto centrale che si sta trasformando in raggi X, la massa di questo $>3.2 M_{\odot}$, garantisce che è un buco nero. **Buchi neri galattici** costituiscono i Nuclei Attivi di Galassia, AGN, dove le emissioni luminose e di raggi X sono tali da renderli gli oggetti con la maggiore luminosità continua dell'Universo. Prima di addentrarci in un elenco di corpi cosmici, riflettiamo sulla rapidità con cui i buchi neri “mangiano”.

La dieta dei buchi neri è determinata dal teorema di Gauss infatti l'effetto gravitazionale di una massa, fuori di essa, è lo stesso che se fosse concentrata tutta nel suo centro, in pratica –gravitazionalmente-

¹² [Tolman–Oppenheimer–Volkoff limit - Wiki](#) [contributi Opp. in astrofisica](#)

¹³ [Jocelyn Bell - Wikipedia](#)

¹⁴ Rhoades e Ruffini, [Phys. Rev. Lett.](#) **32**, 324 (1974).

¹⁵ Ruffini e Wheeler, [Physics Today](#) **24**, 30 (Jan 1971).

¹⁶ Leach e Ruffini, [Astrophys. J.](#) **180** L15 (1973)

¹⁷ La “radiazione di frenamento” è, qui, di accelerazione verso il buco nero.

il Sole si comporta con noi, come fosse un buco nero, cioè non ci “risucchia”. Essendo tanto piccoli i buchi neri stellari hanno pochissima opportunità di incrociare altri oggetti e “mangiarli”, quindi vengono nutriti soltanto in sistemi binari, di cui già facevano parte prima di evolvere a buco nero; la stella compagna espandendosi invade lo spazio di competenza del buco nero, attraverso il lobo di Roche, e lo nutre piano piano.

Nei buchi neri galattici, invece, abbiamo masse da milioni a miliardi di masse solari, e la loro formazione pone non pochi problemi teorici. Infatti se un buco nero è conseguenza dell’evoluzione stellare, e diventa estremamente piccolo, è difficile dargli da mangiare. D’altro canto, però, già sono stati osservati buchi neri che spiraleggiano attorno a stelle di neutroni, con eventi di onde gravitazionali che disperdono nello spazio l’energia equivalente a qualche massa solare, in pochi istanti. Questo fa capire che, effettivamente, anche la “carica gravitazionale” accelerata irraggia, e questo accade solo con momenti di quadrupolo delle masse in gioco. Quindi un accrescimento progressivo da parte di materia orbitante può avvenire per graduale perdita di energia di un moto orbitale, o per emissione di onde gravitazionali, o per emissione di onde elettromagnetiche (raggi X). A proposito di Phoenix A* che è il buco nero più massiccio fin’ora trovato, al centro dell’ammasso di galassie della Fenice,¹⁸ questo ha una massa di $10^{11} M_{\odot}$, che *sarebbe* appena sotto il limite teorico per il nostro Universo di $2.7 \cdot 10^{11} M_{\odot}$. Si accresce di $60 M_{\odot}$ all’anno ed è ritenuto di origine cosmologica.¹⁹

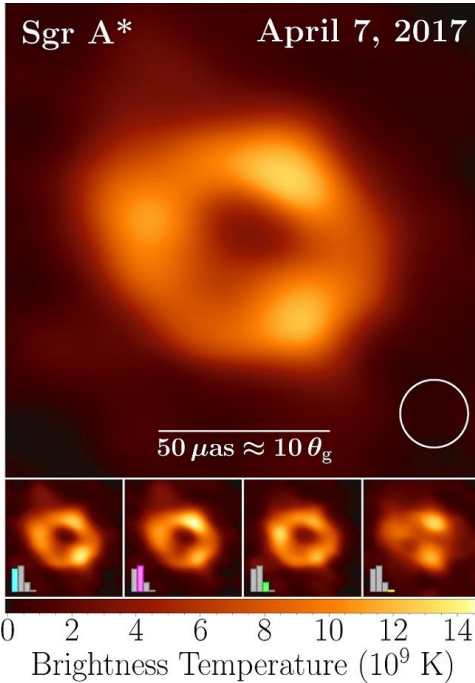


Fig. 1 Phoenix A*, immagine di un artista.¹⁸

¹⁸ [Phoenix Cluster - Wikipedia](#)

¹⁹ [The Biggest Black Hole In The Universe - WorldAtlas](#)

L'Orizzonte degli eventi²⁰ ha dato il nome all'EHT,²¹ la collaborazione internazionale fare interferometria radio VLBI.²² Appare nero, ma la luce che gravita intorno, attraverso il forte effetto di lente gravitazionale,²³ ci rimanda immagini di oggetti che sono dietro. Al limite se ci trovassimo nell'ultima orbita stabile, guardando avanti nell'orbita, riceveremmo i fotoni della nostra nuca.



La dimensione dell'orizzonte degli eventi è confrontabile con il raggio di Schwarzschild R_s , e per i buchi neri supermassicci SMBH²⁴ da $10^6 M_\odot$ vale $3 \cdot 10^6$ km. La loro distanza è da 20000 (Sgr A*) a vari milioni di anni-luce (gli altri). Ogni anno luce è quasi 10^{13} km, quindi l'angolo visuale sotteso da tale orizzonte è $3/2 \cdot 10^{-11} \text{ rad} = 3 \mu\text{as}$ [micro-arcosecondi]. Il raggio gravitazionale angolare θ_g è metà di R_s .²⁵

Fig. 2²⁶ Disco di accrescimento "lensed" del buco nero supermassiccio nella nostra Galassia: Sgr A* visto in varie λ [nm]. La temperatura di brillantezza radio è quella di corpo nero.²⁷

²⁰ [Orizzonte degli eventi - Wikipedia](#)

²¹ [Event Horizon Telescope - Wikipedia](#)

²² [Interferometria a lunghissima base - Wikipedia](#)

²³ [Lente gravitazionale - Wikipedia](#)

²⁴ [Buco nero supermassiccio - Wikipedia](#)

²⁵ [gravitational radius \(astrophysicsformulas.com\)](#)

²⁶ [Focus on First Sgr A* Results from the Event Horizon Telescope - The Astrophysical Journal Letters - IOPscience](#)

²⁷ [Brightness temperature - Wikipedia](#)

La Radiazione Hawking²⁸ si tratta di un argomento ancora dibattuto tra i teorici, comunque mi rifaccio all'approccio di Alberto Masani²⁹ che lega al principio di indeterminazione la possibilità di fuga dal buco nero. Per maggiore semplicità studiamo una sola dimensione: consideriamo $\Delta x \approx R_s$ l'indeterminazione quantistica sulla posizione di una particella nel buco nero; il prodotto di indeterminazione $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$ segue il principio di Heisenberg.³⁰ Allora l'incertezza sul momento definito classicamente $p = mv$, $\Delta p = m \cdot \Delta v \geq h/4\pi/R_s$. Questo impone un limite inferiore alla velocità della particella dentro il buco nero. L'effetto tunnel quantistico,³¹ sul quale è basata -tra l'altro- la fusione nucleare, dove si supera la barriera di potenziale tra due protoni positivi anche a temperature "basse", prevederebbe la probabilità di una velocità $> c$,³² capace di sfuggire al buco nero. Un'altra visione di questo fenomeno, sfrutta la creazione virtuale di coppie, come e^+e^- oppure p^+p^- , nei pressi dell'orizzonte degli eventi. L'energia delle particelle virtuale ΔE , può essere grande a piacere, purché "esistano" in un tempo Δt , talché $\Delta E \cdot \Delta t \leq h$. Questa applicazione del principio di Heisenberg garantisce che queste particelle virtuali non siano osservabili, ma se una cade nel buco nero l'altra può partire verso l'esterno, e così il buco non è nero in assoluto.³³ Questa descrizione fa capire semplicemente come un buco nero piccolo sia più veloce ad "evaporare" di uno grande. I tempi di decadimento dei buchi neri sarebbero dell'ordine di 10^{60} anni, molti ordini di grandezza maggiori dell'età dell'Universo $13.8 \cdot 10^9$ anni.

²⁸ Parte della *Termodinamica dei Buchi Neri*, C. Sigismondi, Liceo Morgagni, Roma 1998.

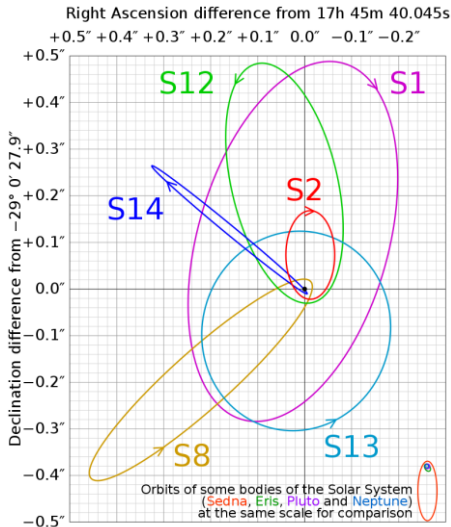
²⁹ A. Masani, *Astrofisica*, Editori Riuniti, 1984.

³⁰ [Principio di indeterminazione di Heisenberg - Wikipedia](#)

³¹ [Quantum tunnelling - Wikipedia](#)

³² Tale probabilità è proporzionale a $e^{-(E/EB)}$ con EB energia della barriera, nel caso nostro il fattore di proporzionalità sarebbe $e^{-v/c}$; se matematicamente ciò può funzionare, va ricordato che la teoria della Relatività si basa sul principio che la velocità della luce c è la massima in fisica. Da ciò la diatriba ancora non chiusa sulla radiazione di Hawking.

³³ [Black hole thermodynamics - Wikipedia](#) la radiazione di Hawking sarebbe di particelle senza massa. Il discorso qui è molto semplificato. [Hawking radiation - Wikipedia](#)



Conclusioni EHTC ha prodotto l'immagine di SGR A*,³⁴ che era stato studiato da 25 anni, con VLT,³⁵ per valutarne la massa a partire dalla velocità delle stelle che ci orbitano attorno (fig. 3). S4714³⁶ impiega 12 anni e raggiunge al pericentro 24000 km/s, mentre S2 è la meglio studiata, e ha compiuto un'orbita in 30 anni.³⁷ La massa del "nostro" buco nero supermassiccio è stata perciò valutata pari a

$4.154 \pm 0.014 \cdot 10^6 M_{\odot}$, con le leggi di Newton. Sedna,³⁸ la cui orbita è rappresentata in basso a destra, gira attorno al Sole in 11 mila anni, S2, di simile orbita, in 30 attorno a quel buco nero. Le masse centrali delle due orbite sono in rapporto $(11000/30)^2$ applicando la formula della velocità di fuga; questo valore è prossimo a 10^6 .

Riassumendo i temi principali toccati in questa breve introduzione ai Buchi Neri, tenuta a Roma il 26-27 marzo, a studenti e docenti della scuola secondaria, voglio sottolineare che: i buchi neri "mangiano" in modo molto parco, a causa della loro minima sezione d'urto; quello che "mangiano" viene accelerato a velocità prossime a c , ed emette principalmente radiazioni X per Bremsstrahlung.³⁹ Perciò attorno al buco nero si può osservare con EHT un disco di accrescimento deformato dalla lente gravitazionale centrale. La massa del buco nero la si valuta con la velocità orbitale e le dimensioni delle orbite. La lentezza con cui un buco nero si accresce

³⁴ [Astronomers Unveil Strong Magnetic Fields Spiraling at the Edge of Milky Way's Central Black Hole | Event Horizon Telescope](#) (2024-3-27)

³⁵ [Very Large Telescope | ESO](#)

³⁶ F. Peißker et al., *ApJ* **899** 50 (2020). ([pdf \(iop.org\)](#))

³⁷ <https://www.nature.com/articles/s41598-022-18946-7> (Chan et al., 2022)

³⁸ [90377 Sedna - Wikipedia](#)

³⁹ [Bremsstrahlung - Wikipedia](#)

lascia aperto il problema della formazione dei buchi neri supermassicci al centro delle galassie, in particolare dei più grandi, come Phoenix A* nella galassia cD al centro dell'ammasso di galassie della Fenice. Un altro tempo caratteristico verrebbe dalla teoria della radiazione di Hawking, per cui i buchi neri non sarebbero strettamente tali, ma quantisticamente avrebbero la possibilità di emettere radiazione: in 10^{60} anni potrebbero evaporare...

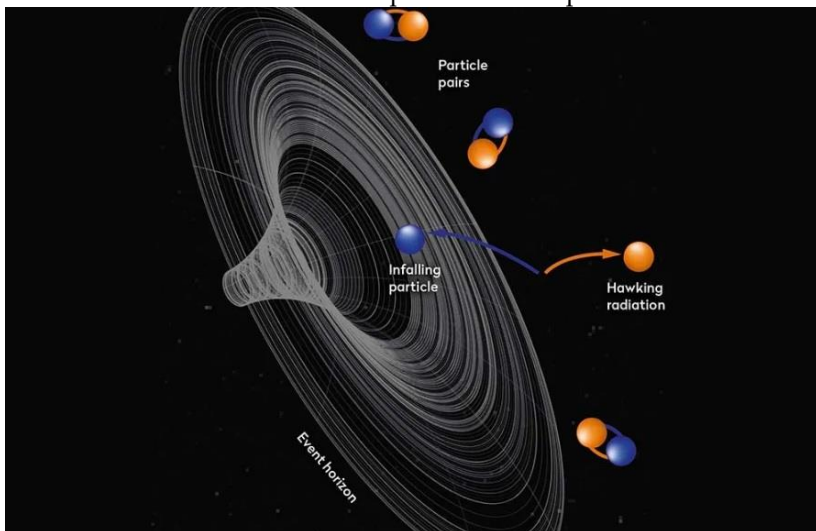


Fig. 4 Schema esplicativo della radiazione di Hawking.⁴⁰

La possibilità di vederne uno nella fase finale dell'evaporazione, la più luminosa, durante l'intera esistenza dell'Universo è di 10^{-50} ...

Infine un'annotazione statistica sulla popolazione dei buchi neri conosciuti: abbiamo buchi neri di massa stellare (alcune $M_{\odot}$),⁴¹ spiegati come l'esito dell'evoluzione stellare di stelle massicce e abbiamo buchi neri supermassicci galattici⁴² situati al centro di massa delle galassie e degli ammassi di galassie (da milioni a miliardi di $M_{\odot}$). Non si conoscono buchi neri di masse intermedie,⁴³ né si può accettare facilmente l'esistenza di minibuchi neri,⁴⁴ per comprimere i

⁴⁰ [Hawking radiation explained in simple terms - BBC](#)

⁴¹ [2110.15607.pdf \(arxiv.org\)](#)

⁴² [2206.07357.pdf \(arxiv.org\)](#)

⁴³ [COSA-SONO-I-BUCHI-NERI astronomiamo](#) ottimo articolo, in Italiano.

⁴⁴ [Compressione gravitazionale in una dimensione - NASA/ADS](#)

quali sarebbe necessaria un'energia enorme.

Come studiare questo articolo che nasce come sintesi da alcune conferenze? L'argomento è "in divenire", non si può esaurire con lo studio del testo scritto con la prospettiva dell'Astronomia X, digerita in un centro di ricerca di Fisica Teorica, in particolare proprio Astrofisica Relativistica (ICRA). I vari link di wikipedia e non, sono continuamente aggiornati per includere le pubblicazioni più recenti, che aggiungono, spesso, informazioni tutt'affatto marginali alla questione generale, come è il caso della collaborazione internazionale dell'Event Horizon Telescope (EHTC).

Per questo una lettura veloce può dare un'infarinatura a chi già conosce la Fisica (studente di dottorato), che potrà approfondire per suo conto le indicazioni fornite e i vari link.

Chi, invece, è alle prime armi, deve intuire che c'è sia un principio di autorità da rispettare, fidandosi, sia evitare di credere in tutto ciò che è scritto sul web... il dibattito sulla *Radiazione di Hawking*, per esempio, mostra che la questione è tutt'altro che risolta a livello degli specialisti. Quindi ogni definizione su questo tema, pur semplificata, dovrebbe conservare la natura ipotetica, evitando di darla per certa e verificata. La vicenda storica che ha espresso sia Newton che Michell, che Laplace, Einstein e Schwarzschild mostra come l'uso di formalismi più semplici è possibile solo quando nuovi paradigmi sono pienamente acquisiti, e questo non è ancora il caso della termodinamica dei buchi neri, mentre può esserlo per la gravitazione della luce, dati i passaggi storici messi in evidenza, che hanno determinato anche la scelta del titolo di questo articolo.

Ciò è sintomatico del processo scientifico, che è sempre in divenire.

Referenze consigliate

Che cosa sono i buchi neri ([link](#), vis. 2024)

Teoria della Relatività (Treccani Ragazzi, [link](#), 2006)

Compressione gravitazionale in una dimensione (Ruffini e Sigismondi, 2017, [link](#))

Hawking radiation explained in simple terms (C. Stuart, 2024, [link](#))