

L'ombra del buco nero in M87

Francesco De Paolis, Gabriele Ingrosso, Achille Nucita

Dipartimento di Matematica e Fisica "Ennio De Giorgi", Università del Salento, & INFN, Sez. di Lecce

In questa comunicazione vorremmo discutere alcuni aspetti riguardanti l'identificazione di un buco nero da parte dell'Event Horizon Telescope. Questo evento ha destato grande interesse mediatico, e sono state fornite molte informazioni confuse, se non addirittura erronee, su ciò che è stato osservato.

Non è mai una buona idea scommettere contro Einstein. Il compimento del primo secolo dalla Teoria della Relatività Generale (RG) ha portato a due scoperte epocali (la rivelazione delle onde gravitazionali e la prima immagine dell'ombra di un buco nero, appunto) che hanno confermato l'esistenza dei buchi neri, entità astrofisiche sulla cui reale esistenza lo stesso Einstein nutriva seri dubbi.

I buchi neri sono la predizione fondamentale della RG come formulata da Einstein nel 1915. A dire il vero, Einstein non si preoccupò di trovare una soluzione alle sue famose equazioni del campo gravitazionale, cosa che venne fatta nel 1916 da Karl Schwarzschild. Quest'ultimo dimostrò un'interessante proprietà dei buchi neri: essi sono caratterizzati da un orizzonte degli eventi, ovvero da una sorta di membrana unidirezionale dello spazio-tempo dalla quale niente, nemmeno la luce, può fuoriuscire.

In questi giorni è stato annunciato (in una serie di conferenze stampa contemporanee) il risultato dell'analisi delle osservazioni interferometriche condotte tramite l'Event Horizon Telescope (EHT) verso la galassia M87 [1]. I dati nella banda radio hanno permesso di osservare per la prima volta, direttamente ed inequivocabilmente, la regione dello spazio nelle immediate vicinanze di quello che è il buco nero super-massiccio contenuto nel centro della galassia.

Che i buchi neri esistessero nei centri delle galassie lo sapevamo già per altre osservazioni indirette, ma il risultato di EHT è importante di per sé in quanto è non solo una (ulteriore) conferma della RG ma anche la prima osservazione diretta di un buco nero. Tra l'altro, l'immagine ottenuta è anche quella con più alta risoluzione angolare mai prodotta essendo la Full Width Half Maximum (o FWHM, da intendere come un indice della capacità di risoluzione angolare di un telescopio) di EHT pari a circa 20 micro arcosecondi. Per confronto, il limite di diffrazione di un telescopio avente diametro pari alla base equivalente di EHT ($\simeq 12000$ km) per la lunghezza d'onda di $\simeq 1$ mm è dello stesso ordine di grandezza. La risoluzione angolare ottenuta corrisponde a riuscire a leggere i titoli di un giornale posto sulla Luna!

Cerchiamo di capire cosa è stato effettivamente



Figura 1: Fotografia del buco nero ricostruita dalla collaborazione EHT [1].

osservato e come.

Nel caso di un buco nero non ruotante (o buco nero di Schwarzschild), la singolarità centrale è circondata da un orizzonte degli eventi di raggio $R_S = 2R_g$ dove il raggio gravitazionale $R_g = GM/c^2$ è la grandezza scala caratteristica del buco nero di massa M . Quando il buco nero è osservato ad una distanza infinita appare circondato da una regione sferica avente un raggio (noto come raggio di cattura dei fotoni) $R_c = \sqrt{27}R_g$. Il raggio di cattura dei fotoni (che è ovviamente maggiore del raggio dell'orizzonte degli eventi del buco nero non ruotante) segna un vero punto di non ritorno per i fotoni. In particolare, i fotoni che passano ad un parametro di impatto $b \geq R_c$ possono raggiungere l'osservatore all'infinito mentre i fotoni che impattano a $b < R_c$ sono catturati dal buco nero. Il raggio R_c è anche detto raggio della fotosfera (per maggiori dettagli si vedano le referenze [2, 3, 4]). Nel caso di una sorgente di radiazione elettromagnetica uniformemente estesa e luminosa posta dietro il buco nero, l'osservatore vedrebbe l'ombra del buco nero di dimensioni pari a R_c [5, 6]. A partire dal 1979 sono state condotte simulazioni numeriche via via più sofisticate (culminate con quelle visibili nel film *Interstellar* prodotte dal gruppo guidato dal premio Nobel Kip Thorne) considerando che la sorgente di radiazione sia un disco di accrescimento esteso che circonda il buco nero visto da un osservatore lontano. Nel caso di un disco geometricamente spesso che circonda il buco nero la combinazione dell'ombra del buco nero e dell'immagine del disco deformato per effetto del lensing gravitazionale produce un'ombra assieme ad un anello luminoso.

Nel caso dei buchi neri rotanti (detti di Kerr

in quanto descritti dalla metrica dello spazio-tempo derivata per la prima volta da Roy Kerr), il momento angolare di spin deforma la fotosfera e quindi anche la forma dell'ombra in funzione non solo dello spin del buco nero ma anche dall'angolo sotto cui viene osservato il disco di accrescimento. Deformazioni equivalenti appaiono anche nel caso di un buco nero carico elettricamente.

Sin dagli inizi del secolo scorso è noto che M87 possiede una struttura *filiforme* associata con il suo nucleo. Oggi questa struttura è riconosciuta essere un *jet* che, emergendo dal nucleo (come dimostrato da osservazioni VLBI -Very Long Baseline Interferometry- a risoluzione via via crescente), si estende sino a svariati migliaia di anni luce di distanza. Lo scenario che si delinea per il nucleo di questa galassia è quindi quello di un buco nero centrale circondato da un disco di accrescimento (geometricamente spesso e otticamente sottile) dal quale emerge un jet relativistico. Non vi è però ancora un consenso unanime sulle modalità di formazione di questo jet ma i due modelli più accreditati sono 1) un flusso di materia dominato dal campo magnetico e alimentato dall'energia rotazionale del buco nero o 2) esso si forma dalla collimazione (dovuta sempre al campo magnetico) di un vento di materia che ha origine nel disco di accrescimento.

Le osservazioni di EHT, un insieme di otto telescopi (alcuni a loro volta costituiti da diverse antenne) che lavorano utilizzando la tecnica dell'interferometria a lunghissima base, hanno permesso di confermare brillantemente la tesi secondo la quale il nucleo di M87 contiene un buco nero centrale. Colpisce infatti la grande somiglianza tra l'immagine ottenuta da EHT e quanto aspettato in base alla RG.

La sorgente compatta osservata mostra un anello luminoso che circonda un'area meno brillante (l'ombra del buco nero). Questa struttura ricorda l'emissione predetta [6] da un disco di plasma caldo che circonda un buco nero. In particolare, i fotoni emessi all'interno del raggio della fotosfera possono ancora sfuggire e raggiungere l'osservatore. Non ci si aspetta quindi di avere una parte centrale dell'immagine caratterizzata, ad esempio, da un disco completamente nero ma un contrasto di luminosità (relativamente all'emissione circostante proveniente dal disco di

accrescimento e dal jet) che per il buco nero in questione è risultato pari a circa il 10%.

La grandezza fisica misurata sperimentalmente in questo caso è la dimensione del diametro della regione di emissione (a forma di anello) che risulta pari a $\simeq 11\theta_g = 42$ micro arcosecondi, (con $\theta_g = R_g/D$ e $D = 16.8 \pm 0.8$ megaparsec) che si trova appena oltre l'ombra del buco nero di dimensione angolare $2\sqrt{27}\theta_g \simeq 39.5$ micro arcosecondi. Per confronto l'orizzonte degli eventi del buco nero in questione ha un diametro di $\simeq 16$ micro arcosecondi. Una volta misurato θ_g si può stimare la massa del buco nero $M = (6.5 \pm 0.7) \times 10^9$ masse solari.

Un buco nero può catturare materia attraverso un processo di accrescimento. La materia, cadendo verso di esso, si riscalda ed emette radiazione elettromagnetica includendo le onde radio raccolte da EHT. Nel caso specifico, le osservazioni X mostrano che il buco nero in M87 è meno luminoso rispetto a quanto atteso per un accrescimento sferico alla Bondi. Quindi, o l'efficienza di accrescimento è particolarmente (e inusualmente) bassa o l'accrescimento avviene secondo differenti modalità, ad esempio quelle descritte dal modello ADAF (advection dominated accretion flow). Le osservazioni passate hanno mostrato che la sorgente compatta emette nella regione della lunghezze d'onda dei millimetri (come osservato anche da EHT) consistentemente con quanto aspettato per un accrescimento ADAF in cui il disco *intrappola* la maggior parte della radiazione che è trasportata verso il buco nero centrale. Lo spettro osservato per un accrescimento di materia di tipo ADAF intorno ad un buco nero va dalle radio frequenze sino ai raggi Gamma dipendendo dalle particelle coinvolte. Nel caso della banda radio e dei raggi X duri (maggiori di 3 keV) la radiazione è prodotta da elettroni attraverso meccanismi di sincrotrone, bremsstrahlung e Compton inverso.

L'ultima caratteristica dell'immagine ripresa da EHT è l'asimmetria nella luminosità dell'anello che può essere spiegata dal fatto che la radiazione emessa dal plasma in rotazione (e diretta verso l'osservatore) è amplificata per effetto Doppler.

Queste osservazioni presentano uno scenario del buco nero in M87 e dell'ambiente circostante straordinariamente consistente con quan-

to predetto dalla GR e dai modelli di magnetoidrodinamica relativistica tramite i quali sono state simulate le immagini teoriche confrontate poi con le osservazioni reali.

Non possiamo concludere senza menzionare che quanto detto da alcuni "detrattori" di questa scoperta, cioè che non sarebbe una scoperta perchè "era ovvio che un buco nero dovesse essere così", o che "il progresso nasce dagli esperimenti che possiamo fare nei nostri laboratori", è assolutamente fuori luogo. La cosiddetta foto del buco nero (che poi è qualcosa di molto più complesso di una semplice fotografia) ha la stessa valenza di altre scoperte epocali quali quelle del bosone di Higgs e delle onde gravitazionali (che hanno portato a due premi Nobel!). In qualche modo lo sapevamo già che dovevano esistere, ma la scoperta ha dato una prova indipendente della correttezza delle teorie alla base (il Modello Standard delle particelle elementari e la RG). È vero poi che la fisica è una scienza sperimentale, ma il concetto di "esperimento" deve essere allargato includendo l'osservazione dello spazio: l'Universo ci fornisce un laboratorio immenso in cui testare le nostre teorie.



- [1] K. Akiyama, et al. (The EHT Collaboration), *ApJ*, 875, L1 (2019).
- [2] F. De Paolis, M. Giordano, G. Ingrosso, L. Manni, A.A. Nucita, F. Strafella, *Ithaca*, N. 5, (2015).
- [3] A.F. Zakharov, F., De Paolis, G. Ingrosso, A. A. Nucita, *New Astronomy Reviews*, 56, 2 (2012).
- [4] A.F. Zakharov, F., De Paolis, G. Ingrosso, A. A. Nucita, *A&A*, 442, 795 (2005).
- [5] J. M. Bardeen, in *BlackHoles* (edited by C. De Witt & B.S. De Witt (NewYork Gordon & Breach), 215 (1973).
- [6] H. Falcke, F. Melia, E. Agol, *ApJ* 528, L13 (2000).



Francesco De Paolis, Gabriele Ingrosso, Achille Nucita: sono componenti del gruppo di Astrofisica del Dipartimento di Matematica e Fisica "Ennio De Giorgi" dell'Università del Salento e si occupano sia di analisi di grandi moli di dati che di problematiche legate all'astrofisica teorica.