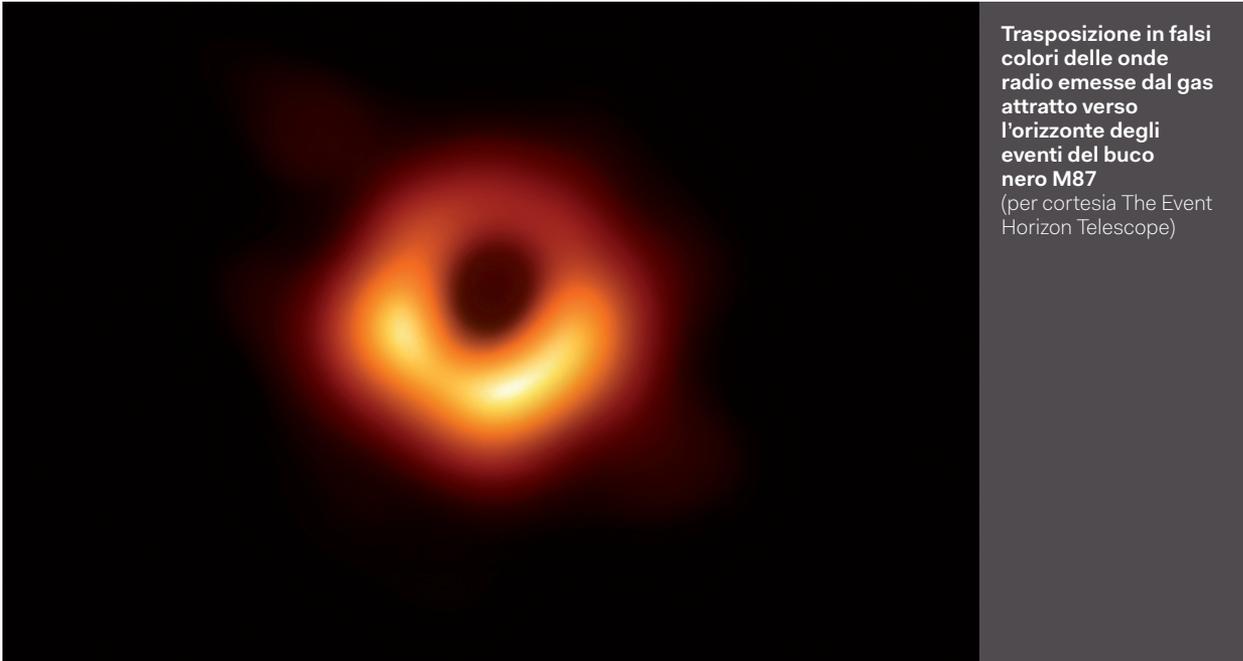


## Scienze naturali e matematiche



**Trasposizione in falsi colori delle onde radio emesse dal gas attratto verso l'orizzonte degli eventi del buco nero M87**  
(per cortesia The Event Horizon Telescope)

Il 10 aprile 2019 il progetto internazionale Event horizon telescope (EHT) ha rilasciato la prima immagine dell'orizzonte degli eventi di un buco nero, quello al centro della galassia M87. Si tratta di un risultato storico con cruciali conseguenze per la fisica e l'astronomia.

### Fotografare l'invisibile: la prima immagine di un buco nero

di Fabio Pacucci

**L'**Universo è un luogo sconfinato, contenente un numero inimmaginabile di corpi celesti: da piccoli asteroidi a immensi ammassi di galassie, da familiari pianeti rocciosi a stravaganti stelle di neutroni. In tale moltitudine cosmica non esistono corpi celesti più misteriosi dei buchi neri.

Immaginati come una mera soluzione delle equazioni della relatività generale nel 1915, furono necessari decenni per convincersi della loro esistenza e 104 anni per fotografarli direttamente, grazie alla storica impresa dell'Event horizon telescope (EHT). Per comprendere cos'è un buco nero è necessario il concetto di

velocità di fuga: la velocità minima necessaria affinché un oggetto (per esempio: un razzo) abbandoni il campo gravitazionale di un corpo celeste. La velocità di fuga dalla Terra è circa 11,2 km/s (40.000 km/hr) e, in generale, aumenta all'aumentare della massa del corpo celeste e al diminuire delle sue dimensioni (a parità di massa). Un

buco nero è talmente massiccio e compatto da possedere una velocità di fuga maggiore della velocità della luce, indicata con  $c$ . La superficie dove la velocità di fuga è uguale a  $c$  viene denominata orizzonte degli eventi: è impossibile ottenere informazioni relative a eventi che avvengono oltre tale orizzonte. Nessun oggetto materiale può viaggiare a  $c$ , quindi niente può sfuggire, nemmeno la luce. I buchi neri si formano quando, in stelle molto massicce (almeno 20-25 volte la massa del Sole), l'esaurimento del combustibile nucleare innesca un processo di collasso gravitazionale. Essi si categorizzano in buchi neri di massa stellare, fino a qualche decina di volte quella del Sole, e buchi neri supermassicci, caratterizzati da masse milioni o miliardi di volte superiori e localizzati al centro delle galassie, inclusa la nostra.

I buchi neri sono oggetti paradossali: pur non emettendo radiazione dall'orizzonte degli eventi (la celebre radiazione di Hawking è completamente trascurabile per i buchi neri qui trattati), risultano visibili da distanze cosmiche. Il loro campo gravitazionale è infatti talmente intenso da influenzare significativamente l'ambiente circostante. Le orbite di corpi celesti che passano vicino a un buco nero sono fortemente modificate, rivelando la presenza di un oggetto massiccio e oscuro. Inoltre, il gas presente nella regione di influenza del buco nero è accelerato a velocità enormi e inizia a spiraleggiare attorno all'orizzonte degli eventi, formando un disco di accrescimento. La temperatura del gas può raggiungere milioni di gradi ed emettere enormi quantità di radiazioni. I buchi neri supermassicci e in fase attiva, ossia con un accrescimento di materia in atto, possono essere rilevati a miliardi di anni luce di distanza. Prima della storica immagine dell'EHT potevamo osservare i buchi neri in modo *indiretto*, tramite

i loro effetti sull'ambiente circostante. Pur non osservando direttamente il buco nero sapevamo che solo tale oggetto poteva creare degli effetti così rilevanti. Osservare un buco nero in maniera *diretta* significa risolvere regioni contenute, dalle dimensioni paragonabili all'orizzonte degli eventi: un buco nero di massa solare ha un orizzonte dal raggio di circa 3 km. Per osservare l'orizzonte di un buco nero supermassiccio è necessario risolvere dimensioni angolari di circa 20 secondi d'arco: serve un telescopio che permetta di leggere un quotidiano

posizionato sulla Luna. Questo è l'obiettivo del progetto EHT: creare un telescopio in grado di osservare direttamente l'orizzonte degli eventi di un buco nero. Il progetto EHT, avviato formalmente nel 2009, è costituito da una rete di radiotelescopi molto distanti fra loro e progettati per osservare simultaneamente la stessa regione di cielo. Questa tecnica è detta VLBI (*Very long baseline interferometry*, o interferometria a lunghissima base) e permette di ottenere una risoluzione molto elevata. La 'base' è la distanza massima fra coppie di radiotelescopi, in questo caso



Il network dei radiotelescopi ETH (credit esa)

## Fotografare l'invisibile: la prima immagine di un buco nero

### Identificazione dei buchi neri, una breve storia

L'esistenza dei buchi neri è una delle predizioni fondamentali della teoria della relatività generale formulata da Albert Einstein nel 1915. Prima della relatività il concetto di buco nero fu descritto in termini di fisica newtoniana. La notizia della possibile esistenza di tali corpi fece la comparsa per la prima volta nella letteratura scientifica in un lavoro di John Michell del 1783 e, indipendentemente, in un lavoro di Pierre-Simon Laplace del 1795. Invocando la natura corpuscolare della luce, Michell e Laplace conclusero che un corpo definito da un raggio limite e opportuna massa sarebbe risultato incapace di emettere alcun segnale

luminoso e, dunque, sarebbe apparso completamente nero. Oggi sappiamo che la derivazione precedente non è esatta, poiché per buche di potenziale gravitazionale tanto profonde da verificare la condizione velocità di fuga=velocità della luce, la fisica newtoniana cessa di essere valida e diviene necessaria una descrizione in termini della teoria della relatività generale di Einstein.

La prima soluzione delle equazioni di Einstein che descrive un buco nero fu trovata dall'astronomo tedesco Karl Schwarzschild nel 1916, e trasmessa in circostanze rocambolesche e drammatiche (fu resa nota con una lettera da lui scritta dal fronte russo,

poco prima della morte); per molto tempo si pensò che non avesse significato fisico. Nel 1939, invece, Robert Oppenheimer e Hartland Snyder mostrarono con calcoli teorici che una nube di gas, contraendosi a causa dell'attrazione gravitazionale, forma un buco nero. Questo fu il primo meccanismo di formazione di buchi neri preso in considerazione. Soltanto negli anni Sessanta le osservazioni astronomiche e gli studi teorici dimostrarono che la vita di una stella di massa sufficientemente grande può culminare in una esplosione e nel successivo collasso della sua parte più interna. Il termine *buco nero* fu coniato nel 1967 da John Wheeler.

paragonabile al diametro della Terra. Costruire un interferometro 'grande quanto la Terra' è imperativo per osservare l'orizzonte di buchi neri supermassicci vicini a noi: per esempio, quello al centro della nostra galassia, nominato Sagittarius A\*, e quello al centro della galassia M87. Il primo dista 25.000 anni luce e ha una massa di 4 milioni di volte quella del Sole, il secondo dista 55 milioni di anni luce e ha una massa di quasi 7 miliardi di volte quella del Sole. Poiché il raggio dell'orizzonte aumenta con la massa del buco nero, i due orizzonti hanno una dimensione angolare simile se osservati da Terra. Il 10 aprile 2019 è stata rilasciata l'immagine del buco nero al centro della galassia M87, insieme a 6 articoli scientifici di supporto. Quest'osservazione è stata resa possibile grazie a una rete di 8 radiotelescopi sparsi per il globo, dagli Stati Uniti alla Spagna, dalle Hawaii al Cile. Difficoltà tecniche hanno per il momento precluso l'osservazione di Sagittarius A\*.

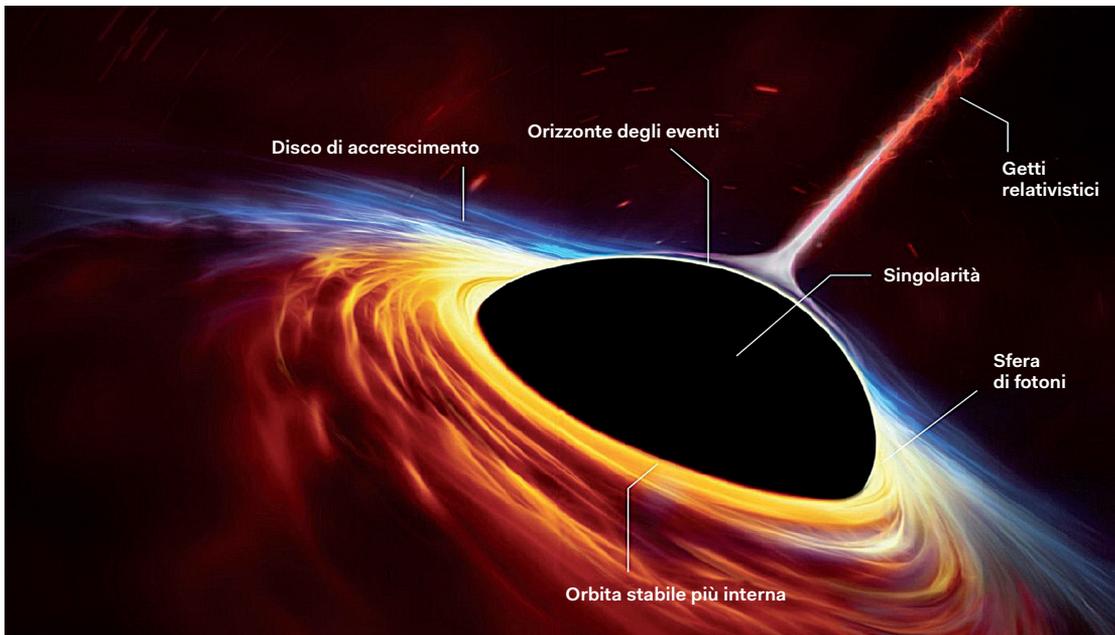
L'immagine del buco nero è stata definita la 'foto del secolo', una rivoluzione scientifica di portata

epocale. Come dichiarato da Shep Doeleman, astronomo a Harvard e capo del progetto EHT, l'immagine mostra per la prima volta una «uscita a senso unico dal nostro Universo». Si vede un anello brillante e asimmetrico che circonda una regione oscura, contenente l'ombra dell'orizzonte degli eventi. L'orizzonte non emette radiazione e quindi non può essere osservato direttamente. Tuttavia, fotografato sullo sfondo di una regione brillante si mostra come una regione oscura, un'ombra. La regione brillante è costituita da gas a elevatissima temperatura. L'asimmetria nell'anello di luce è dovuta al fatto che il gas presente nella regione più brillante si muove verso la nostra direzione e sembra più luminosa a causa dell'effetto Doppler, similmente al fischio di un treno che si avvicina. Il bordo interno dell'anello luminoso non è l'orizzonte degli eventi, ma la *photon sphere*, o sfera di fotoni: una superficie dove la gravità è talmente intensa da obbligare anche i raggi di luce a curvarsi. La maggior parte dei fotoni giunti in questa regione cade velocemente verso l'orizzonte degli eventi, il cui diametro è circa

2,5 volte più piccolo rispetto a quello della sfera di fotoni.

È impossibile esagerare l'importanza di quest'osservazione. Per la prima volta abbiamo osservato direttamente un orizzonte fisico, una superficie oltre la quale nessun tipo di informazione può giungerci. L'orizzonte degli eventi non rappresenta una *unicum*: anche il bordo dell'Universo osservabile è un orizzonte di natura simile e, come tale, insuperabile.

Quest'immagine rappresenta inoltre una nuova conferma della teoria della relatività generale di Albert Einstein. Essa prevede infatti che l'ombra dell'orizzonte degli eventi sia circolare, mentre un'ellitticità sarebbe un chiaro segno che la teoria non è valida in regimi di gravità così intensi. Entro gli errori di misura, l'ombra dell'orizzonte di M87 risulta circolare, confermando la teoria di Einstein nel regime di campo gravitazionale più intenso mai testato. Questa conferma arriva a 100 anni esatti dal primo test della relatività generale, effettuato da Arthur S. Eddington e colleghi durante l'eclisse solare del 1919. Quest'immagine fornisce anche una misura di massa estremamente



Rappresentazione artistica di un buco nero supermassiccio in rapida rotazione, circondato da un disco di accrescimento. Il sottile disco di materiale rotante è composto dai resti di una stella simile al Sole che è stata squarciata dalle forze mareali del buco nero

## GLOSSARIO

— **Singolarità.** Al centro di un buco nero, regione di densità infinita in cui è collassata la materia. Arrivano qui materia ed energia catturate dal buco nero. Si ritiene che la previsione prodotta dalla relatività generale della densità infinita possa indicare la rottura della stessa teoria nelle condizioni in cui gli effetti quantistici diventano importanti.

— **Orizzonte degli eventi.** La superficie che circonda la singolarità, oltre la quale materia ed energia non possono sfuggire alla gravità del buco nero. È il punto di non ritorno, che definisce la 'parte scura' del buco nero.

— **Sfera di fotoni.** Regione sferica al di fuori dell'orizzonte degli eventi nella quale la forza di gravità del buco nero è sufficientemente forte da piegare le traiettorie dei fotoni in orbite vincolate, così da proiettare verso gli osservatori esterni un anello brillante che circonda una zona scura.

— **Getti relativistici.** Getti di particelle e radiazioni proiettati dai poli di un buco nero a velocità prossime a quella della luce. Questi getti possono estendersi per migliaia di anni luce nello spazio e sono prodotti nel processo di assorbimento di materia del buco nero.

— **Orbita stabile più interna.** La parte più interna del disco di accrescimento, l'ultima zona dove la materia può orbitare in sicurezza senza il rischio di oltrepassare la soglia di non ritorno.

— **Disco di accrescimento.** Disco di materia gassosa ad altissima temperatura e a elevatissima velocità intorno al buco nero, che emette radiazione elettromagnetica consentendo di rivelarne la localizzazione. Parte di questa materia è destinata a varcare l'orizzonte degli eventi, mentre un'altra parte può essere proiettata verso l'esterno formando i getti relativistici.

accurata: il mostro al centro di M87 possiede una massa pari a 6,5 miliardi di volte quella del Sole. La 'foto del secolo' ha rivoluzionato la nostra conoscenza dei buchi neri, gli oggetti più misteriosi dell'Universo. Il progetto EHT

continua e punta ad aggiungere nuovi telescopi alla rete, al fine di migliorarne la risoluzione angolare. Dal futuro potremo aspettarci l'immagine del buco nero al centro della nostra galassia e immagini più definite di ulteriori orizzonti. Le

future immagini saranno ancora più dettagliate e spettacolari, ma nessuna avrà l'impatto emotivo e mediatico della prima immagine. Nell'aprile del 2019, infatti, per la prima volta abbiamo osservato direttamente l'infinito.