

LA PRIMA FOTO DI UN BUCO NERO

Questo testo è tratto da una risposta da me data su Quora alla seguente domanda:

Guardando la foto del buco nero, rifletto: non è sferico, ma pare più una "ciambella"; ha un asse di rotazione con dei "poli"? Ci è andata bene che fosse in asse? O da ogni alto punto di osservazione dell'universo lo si vede così?

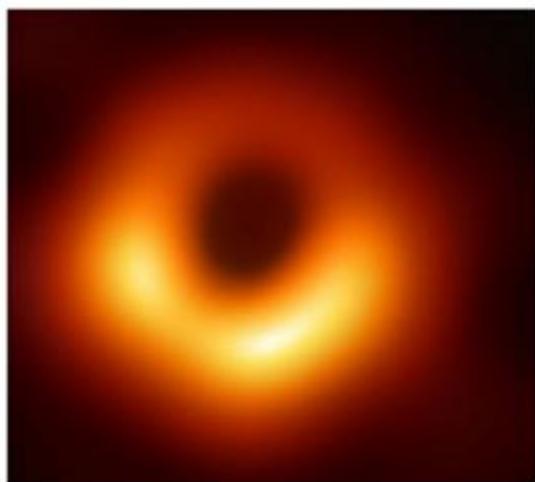


Fig.1
La "foto del secolo"

Molti mi hanno fatto la stessa domanda (chissà perché proprio a me, che non mi sono mai occupato di buchi neri), e quindi moltissimi se la devono essere posta. Chi ha posto la domanda non chiede come mai esista una massa di gas incandescente intorno al buco nero, ma perché, se c'è una massa di gas incandescente intorno al buco nero (il cosiddetto "accretion disk", disco di accrescimento, che dovrebbe essere qualcosa di simile agli anelli di Saturno) essa compare nella foto come vista di fronte e non di taglio. Sarebbe come se vedessimo Saturno e i suoi anelli in visione quasi perfettamente zenitale.

Questa sembra essere un'improbabile coincidenza, tanto più che non era quello che ci si aspettava, considerando che precedenti fotografie tratte dal satellite Chandra (2005),



Fig 2a



Fig 2b

mostravano semmai un disco messo di traverso rispetto all'osservatore. La foto di Chandra è a sinistra, mentre la 2b è una "concezione di artista", di autore anonimo, di proprietà della NASA, presentata dallo Irish Times il giorno prima della conferenza annunciata dalla National Science Foundation (10 aprile 2019), in cui si sapeva che sarebbe stata presentata la foto ormai famosa. L'artista appunto elaborava sul concetto di Chandra e in base a quello che si sapeva del "jet" nella galassia M87 (1). (l'inizio del jet è debolmente visibile diretto verso nordest nella foto 2a).

Perché dunque, se la materia cade dal disco (messo più o meno di taglio), l'anello poi lo vediamo perpendicolarmente, in visione zenitale?

1. Lo EHT (Event Horizon Telescope = Telescopio dell'orizzonte degli eventi)

- (<https://www.media.inaf.it/2019/04/10/prima-foto-buco-nero/> in italiano; con legame ai sei articoli fondamentali pubblicati sul giornale Astrophysical Journal Letters, per gli amici ApJL). Forse è interessante vedere come appare un articolo di un giornale scientifico.
- <https://eventhorizontelescope.org/> in inglese; con legame ai sei articoli fondamentali pubblicati sul giornale Astrophysical Journal Letters. Questi ultimi sono caratteristici articoli di ricerca.
- https://en.wikipedia.org/wiki/Event_Horizon_Telescope in inglese. Esiste anche un'edizione italiana, assai più modesta. I dati più interessanti la fotografia sono nel penultimo periodo della sezione dedicata a Messier 87 .

Lo EHT, ad onta del nome, non è in senso stretto **un telescopio**, ma un **progetto** che coinvolge un insieme di telescopi appartenenti a diverse organizzazioni di diversi paesi o gruppi di Paesi. Dal sito proprio di EHT, e dall'omonimo sito su Wikipedia (edizione inglese) si riceve molta, ma, soprattutto dal primo, disordinata informazione. L'idea base fu concepita dal radioastronomo tedesco Heino Falcke nel 1993 e sviluppata nell'Event

Horizon Telescope (Telescopio dell'Orizzonte degli Eventi) dall'astrofisico americano Sheperd Doeleman, il suo attuale direttore. Le immagini e gli aspetti teorici del progetto sono stati sviluppati anche nel progetto Black Hole Cam, finanziato dall'UE, guidato da Falcke stesso, Michael Kramer e Luciano Rezzolla (italiano, ascrivito all'Università Goethe di Frankfurt).

Lo EHT non è fisicamente un telescopio, né un insieme di telescopi, ma un **progetto** inizialmente basato su otto radiotelescopi, a cui stanno collaborando circa sessanta organizzazioni e istituti. Altri se ne aggiungono strada facendo e almeno due istituti sono italiani.

Queste organizzazioni gestiscono un certo numero di radio-telescopi. Ma molti tra questi radiotelescopi sono costituiti da molteplici antenne. Per esempio il progetto ALMA (Atacama Large Millimeter Array, collaborazione internazionale che include l'Unione Europea, gli Stati Uniti, il [Canada](#), il Giappone, la Corea del Sud, Taiwan e il Cile) ne conta 66.

La tecnica è quella della VLBI (Interferometria a **base** molto ampia) **(2)**, opportunamente adattata e completamente digitalizzata (alcuni tra i più vecchi radiotelescopi iscritti al progetto inizialmente usavano ancora tecnologia analogica).

II. I colori.

In primo luogo, come deve essere ormai noto, i colori della "foto" sono una creazione dei radioastronomi. Le onde elettromagnetiche ricevute dai vari radiotelescopi del programma EHT (Event Horizon Telescope), dalle cui osservazioni parziali è stata ricostruita la famosa foto, non sono visibili dall'occhio umano e quindi non hanno colore. Peggio ancora, hanno – finora - **un'unica lunghezza d'onda, cioè 1.3 mm**. I radioastronomi hanno costruito un'arbitraria scala di colori, ma, in base a quanto comunicato nelle varie conferenze stampa, *la scala di colori non riflette le lunghezze d'onda, e quindi, in certo senso, dei colori, bensì l'intensità della radiazione*. Per far ciò, sono stati scelti colori appropriati. Immagino lunghe videoconferenze tra i vari radio-osservatori per accordarsi sui più adatti. Alla fine si deve esser deciso che un buco nero con colori in gradazioni di verde o viola non era quello che il pubblico si aspettava: sono pronto a scommettere che se i radioastronomi avessero optato per una scala di colori basata sul verde, sarebbero stati tempestati di domande di spiegazioni, mentre nessuno, che io sappia, ha chiesto perché il gas sia rosso e giallo. È incandescente e va bene così. Però un pignolo potrebbe dire: "Ma la legge di Wien dice che il colore è legato alla temperatura del gas. Si può spiegare come mai quel gas appaia essere alla temperatura di 3500-5000 gradi? Tanto più che la teoria ci dice che la temperatura di quel gas, soprattutto il più vicino all'ombra del BH dovrebbe essere di milioni di gradi?" A questo, però, la risposta l'ho data: il colore non ha nulla a che vedere con la temperatura del gas.

III. Elaborazione della foto.

Non c'è nulla di male né di insolito in tutto questo. Come usano fare la NASA, gli Astrofisici e gli Astronomi, i "prodotti" destinati al pubblico sono "trattati". Nessun astronomo si sogna di dare i dati "crudi" in pasto al pubblico. Per lo EHT si tratterebbe di una serie di hard disk contenenti infinite sfilze di numeri, milioni di gigabyte. L'elaborazione di questa mole di dati è durata due anni di lavoro di un piccolo esercito di scienziati e tecnici all'opera in due centri calcolo, rispettivamente al Max Planck Institute for Radio Astronomy e allo Haystack Observatory del MIT. La "foto" è stata elaborata, non solo per mettere insieme i vari contributi, non solo per colorarla, ma anche per renderla accettabile al pubblico. Si ricorderanno forse le belle foto dei pilastri di polvere, i "Pilastri della creazione" (1995): quello sfondo blu scuro ci sta benissimo, ma credo che sia un'invenzione o almeno un'esagerazione dell'ufficio PR della NASA.

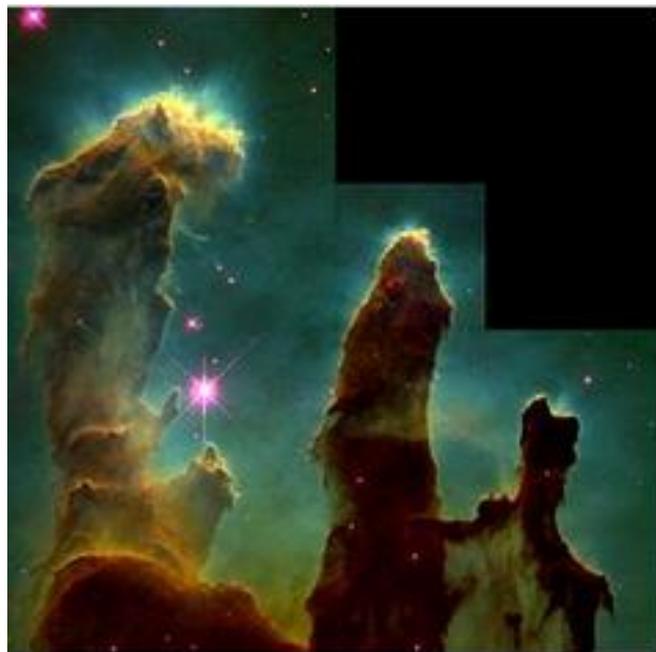


Fig.3

The Pillars of Creation = Pilastri della creazione (Nebulosa dell'Aquila)

Non è che si inventi proprio tutto: si parte da foto autentiche, si accentuano certe caratteristiche e se ne riducono altre. Una tenuissima sfumatura blu poteva esistere su sfondo nero, ed è stata intensificata per rendere alla foto quella bellezza (da fondo marino) che ha. E la macchia rossa verso la cima del pilastro di centro? Qualcosa c'era certamente, ma dovrebbero mostrarmi le foto originali per convincermi che il rosso era così intenso. Se il lavoro è fatto bene, il pubblico va in estasi. Se è fatto male, si grida al "complotto dei

poteri forti”, che sono anche quelli che ci fanno credere che la terra sia sferica, mentre tutti sappiamo che è piatta.

Ma, andando a vedere, se dopo vent’anni queste foto sopravvivono nella memoria, è perché lo meritano: si tratta di una collaborazione di artisti con la natura, come i quadri dei pittori impressionisti, macchiaioli, divisionisti eccetera, che non volevano riprodurre fotograficamente la realtà. Per ora lasciamo correre la fantasia. Un giorno avremo l’arida realtà, proprio come con l’esplorazione della Luna, argentea dea delle nostre notti, affascinante fino a che non ci siamo andati.

III. La vista perpendicolare al disco.

I problemi sono (i) quello di spiegare perché il disco sia in visione zenitale o quasi, e (ii) perché la radiazione emessa appaia di minore intensità (cioè rossa!) nella metà superiore e maggiore intensità (cioè bianco-gialla) nella metà inferiore.

La comune versione data dopo la pubblicazione della foto è che effettivamente la visione è quasi zenitale per pura coincidenza. L’angolo tra l’asse di rotazione e la linea di vista è stimato a 17 gradi. Il disco ruoterebbe in senso orario e la parte inferiore verrebbe verso di noi. L’intensità della radiazione da essa emessa sarebbe aumentata per effetto relativistico, mentre lo stesso effetto diminuirebbe la radiazione dalla parte superiore che si allontana da noi.

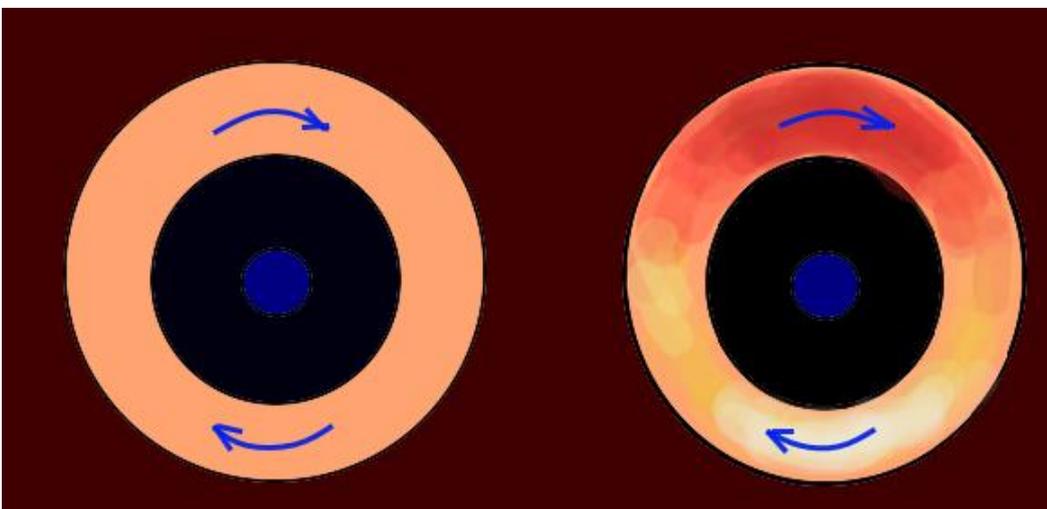


Fig. 4: Visione “semiclassica” di un disco rotante in senso orario in visione zenitale, a sinistra, e inclinato di circa 17 gradi a destra (17 gradi equivalgono a una contrazione del diametro di circa 5%) per cui si avrebbe una parte (inferiore) che muove verso di noi, e una superiore che si allontana. Il buco nero (in blu – ma dovrebbe essere ancora più nero del nero circostante) avrebbe un raggio circa 2.5 volte inferiore a quello dell’ “ombra”. Questa è più o meno la versione ufficiale, che assume che si sia osservato un “buco nero di Kerr” (3), il caso considerato più probabile.

Subito sorge la domanda se una così piccola inclinazione sia sufficiente a produrre un così importante effetto nell'intensità della radiazione ricevuta o se una rielaborazione della figura sia stata invocata. Si ricordi però sempre che abbiamo a che fare con altissime velocità, situazioni in cui si applica la teoria della relatività e i fenomeni risultanti non sono quelli a cui siamo avvezzi.

D'altra parte è quasi universalmente accettato che anche se il disco di accrescimento fosse messo di taglio, la curvatura della luce per effetto gravitazionale ci permetterebbe di vedere il disco intero circondare l'ombra del buco nero. In questo caso, però, si dovrebbe vedere il disco di accrescimento di taglio, eventualmente anche lui col suo effetto dovuto al senso di rotazione del disco.

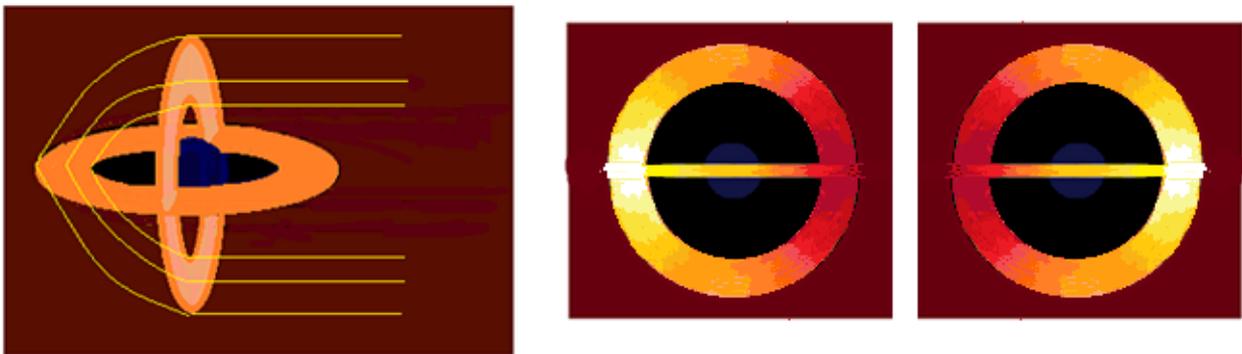


Fig. 5: Illustrazione di un caso estremo di osservazione, in cui il disco di accrezione si presenta di taglio e nondimeno lo vediamo circondare l'ombra del buco nero.

A sinistra: vista laterale, in cui, per non complicare troppo il disegno, non si è illustrato l'effetto della rotazione. I raggi luminosi, curvati dal campo gravitazionale (**“gravitational lensing=lente gravitazionale”**), permettono di vedere il retro del disco che forma un'immagine verticale della metà superiore del disco di accrezione. Si forma anche un'immagine virtuale del disotto del retro del disco, dando luogo alle due immagini di destra (con vista sempre frontale) e immagine del **“relativistic beaming = effetto relativistico sull'irraggiamento”**(4), che in realtà è sul disco di accrescimento come in Fig.4. L'immagine centrale corrisponde a una rotazione in senso anti-orario, quella di destra a una rotazione in senso orario. Una striscia equatoriale dovrebbe essere visibile. Ma non la si vede nella “foto del secolo”.

In conclusione, in rete (ivi incluso l'articolo V pubblicato su ApJL) si trovano confermate, grazie ai due meccanismi di **“gravitational lensing”** e **“relativistic beaming”**, tentativamente, entrambe le ipotesi fatte da chi ha posto la domanda. Esse possono essere messe d'accordo dicendo che sì, guardando da qualsiasi direzione si vedrebbe una “ciambella”, ma in questo caso la vista – casualmente - da direzione quasi zenitale permette di vedere la vera immagine del disco, senza striscia centrale del disco messo di taglio, e con immagine reale del relativistic beaming.

NOTE

(1) M87.

M87 (scoperta nel 1781) è l'ottantasettesimo oggetto catalogato da Charles Messier nel 1784. Si trattava di 103 oggetti (nell'edizione 1774) poi portati a 110. Lo scopo iniziale era creare un sussidio per gli astronomi, che a quel tempo si occupavano soprattutto di calcolare le orbite delle comete. Gli oggetti del catalogo di Messier erano invece fissi nel cielo e il catalogo doveva evitare agli astronomi di prendere uno di questi oggetti per una cometa. Questo errore lo aveva fatto Messier stesso confondendo la nebulosa del Granchio (Crab Nebula) con la cometa di Halley. Aveva, letteralmente, preso un granchio. Per vendicarsi, catalogò la nebulosa del Granchio come M1. Ebbe la mano felice: M1 negli anni 1960-1980 fu uno degli oggetti più studiati del cielo. Per la cronaca, M87 (Galassia ellittica gigante) è nota come NGC 4486 e, come sorgente radio, porta il nome di Virgo A, essendo la più potente sorgente radio ("A") della costellazione della Vergine.

(2) VLBI

(L'immagine di una sorgente radio o anche ottica in un normale telescopio deve contenere onde luminose che raggiungono l'antenna simultaneamente: la VLBI mira a sincronizzare antenne lontane, emulando così un telescopio di assai maggiore apertura. Telescopi distribuiti sulla superficie terrestre così possono efficacemente emulare un'antenna con apertura pari alla Terra intera. La "baseline" massima è quindi circa 12000 km. Una formula approssimata facile da ricordare è

$$\lambda/D = \theta$$

(lunghezza d'onda/ diametro del telescopio o baseline = θ , angolo minimo "risolubile", in radianti: due punti a questa distanza angolare non appaiono più come un sol punto. Per il buco nero di M87, misurato con lunghezza d'onda di 1.33 mm con baseline di 12000 km (diametro terrestre) si divide 1.33 mm/12000 km, $\theta = 1.1 \cdot 10^{-10}$ radianti = $2.26 \cdot 10^{-5}$ arcsec, circa 20 microsecondi di arco, la cifra normalmente data dagli sperimentatori).

VLBI (it.wikipedia, introduzione)

La Very Long Baseline Interferometry (VLBI) (Interferometria a Base Molto Ampia) è una tecnica di interferometria astronomica utilizzata in radioastronomia.

In VLBI un segnale emesso da una radiosorgente, quale un quasar, viene raccolto da più radiotelescopi dislocati sulla Terra. Viene quindi calcolata la distanza tra i radiotelescopi del sistema rilevando la differenza di tempo del segnale sorgente in arrivo ai diversi telescopi. Questo consente

di effettuare l'osservazione di un oggetto tramite molti radiotelescopi la cui risultante è una **combinata simultanea**, emulando così un telescopio di **dimensioni pari alla massima distanza tra i telescopi del sistema**.

I dati ricevuti da ogni antenna del sistema includono i tempi di arrivo sincronizzati con un orologio atomico locale, come un maser all'idrogeno. In un secondo momento, i dati sono combinati con quelli provenienti dalle altre antenne che hanno registrato lo stesso segnale radio, producendo l'immagine risultante. La risoluzione ottenibile utilizzando la tecnica interferometrica è proporzionale alla frequenza di osservazione. La tecnica VLBI consente una distanza tra i telescopi molto maggiore di quella possibile con l'interferometria convenzionale, che richiede che le antenne siano fisicamente collegate tramite cavo coassiale, guida d'onda, fibra ottica o altro tipo di trasmissione cablata. L'incremento della distanza tra i telescopi è possibile nella VLBI grazie allo sviluppo della tecnica di imaging chiamata *closure phase*, sviluppata da Roger Jennison negli anni 1950, che consente al sistema VLBI di produrre immagini con una risoluzione ben superiore.

Osservo che si sono anche sperimentati **satelliti artificiali** per estendere la base. Il satellite giapponese HALCA (1997-2005) riuscì a estendere la baseline terrestre fino a tre raggi terrestri, 18000 km. Il satellite russo Spektr-R (Radioastron) ha funzionato dal 2011 al 2019, con una baseline massima di 350000 km. Per quanto ne so, nessun satellite ha partecipato al programma EHT).

(3) Ci sarebbero quattro possibili tipi di buchi neri, identificati a seconda del nome di chi li studiò.

1) Non ruotanti, non elettricamente carichi: Black Hole di Schwarzschild

<https://www.youtube.com/watch?v=zUyH3XhpLTo>

(semplice presentazione – in inglese – fatta subito prima del 10 aprile, data della presentazione della foto del secolo).

2) Ruotanti, non carichi: **Black Hole di Kerr** (il più probabile, in quanto è difficile immaginare la formazione di un BH in base a materiale privo di momento angolare)

Si veda: <https://www.youtube.com/watch?v=fu3645D4ZII>

3) Non ruotanti, carichi: Black Hole di Reissner-Nordstrom (un BH che possiede una carica elettrica è considerato meno probabile).

4) Ruotanti e carichi: Black Hole di Kerr-Newman (un BH che possiede una carica elettrica è considerato meno probabile).

(4) Relativistic beaming, detto anche *Doppler beaming*, termine che preferisco non usare, perché può confondere le idee. L'effetto Doppler agisce normalmente sulle **frequenze** della radiazione emessa da una sorgente in moto. In questo caso, in moto relativistico, il *Doppler beaming* anche aumentando o diminuendo l'**intensità** del fascio luminoso.

(un BH che possiede una carica elettrica è considerato meno probabile).