

Quanti petabyte occorrono per vedere un buco nero?

Elisabetta Liuzzo^{1,2}, Kazi Rygl^{1,2}

¹INAF- Istituto di Radioastronomia, ²Italian ALMA Regional Centre

Abstract. Il 10 aprile scorso il Consorzio dell' Event Horizon Telescope (EHT) ha pubblicato la prima immagine dell'ombra del buco nero supermassiccio al centro della galassia M87. In questo lavoro, mostriamo come l' EHT sia riuscito in questa impresa. Discutiamo inoltre il percorso dei dati scientifici di volume di ~ 4 PB dagli osservatori fino all'immagine finale di soli qualche MB. Riportiamo poi i principali risultati astrofisici di tale scoperta e finiamo con illustrare i lavori in corso e futuri.

Keywords. buco nero, orizzonte degli eventi, galassia attiva, M87, Event Horizon Telescope

Introduzione

I buchi neri sono gli oggetti astrofisici più estremi previsti dalla Relatività Generale (RG, Einstein 1915). Si tratta di corpi celesti con un campo gravitazionale molto intenso caratterizzati da una superficie, chiamata l'orizzonte degli eventi, oltre la quale, né la materia né i fotoni possono sfuggire (e quindi arrivare a noi), il che limita l'informazione che possiamo avere di tali regioni centrali. Al di fuori dell'orizzonte degli eventi, i fotoni vengono attratti e deviati per l'intenso campo gravitazionale che deforma fortemente lo spazio-tempo, tramite il fenomeno di lensing gravitazionale (Luminet 1979). Secondo la RG, l'emissione di tali fotoni ha forma di ciambella con al centro un buco, cioè assenza di segnale (l'ombra) attorno all'orizzonte degli eventi.

Storicamente, le osservazioni dei buchi neri sono state indirette, ovvero tramite lo studio degli effetti che questi provocano sugli oggetti che vi ruotano attorno (Genzel et al. 2010). Per lungo tempo, l' anello di fotoni che circonda l'ombra del buco è stato impossibile da rilevare. Infatti esso è di emissione così debole e su scale angolari così piccole da essere osservabile solo tramite strumenti che lavorano in banda millimetrica e che usano tecniche di interferometria a lunga base (Falcke et al. 2000). Negli ultimi 20 anni, diversi sforzi sono stati fatti per costruire uno strumento del genere. Questi sono culminati nella creazione dell' Event Horizon Telescope (EHT) che nel 2017 è stato così potente e sensibile da riuscire ad osservare due buchi neri supermassicci con le dimensioni dell'orizzonte degli eventi più grandi: quello della nostra Galassia Sagittarius (Sgr) A* e di M87, galassia a 55 milioni di anni luce da noi.

1. EHT: un telescopio grande come la Terra

L'astrofisica studia l'Universo attraverso i telescopi il cui potere risolutivo dipende proporzionalmente dal diametro dell'antenna ed inversamente dalla lunghezza d'onda a cui osserva. EHT opera nella banda millimetrica ed è stato ideato da una collaborazione internazionale

di più di 200 membri con l'obiettivo di produrre immagini dei buchi neri su scale dell'orizzonte degli eventi. Si tratta di un telescopio 10 volte più sensibile dei suoi predecessori e con una risoluzione incredibile, equivalente a quella che occorre per distinguere una pallina da tennis sulla Luna.

Per raggiungere questi dettagli estremi, EHT utilizza la tecnica dell'interferometria a lunga base (VLBI), cioè antenne dislocate nel mondo che sintetizzano un telescopio grande come la Terra. La prima immagine di un buco nero pubblicata lo scorso aprile deriva dalla campagna EHT del 2017 condotta da 8 telescopi in 6 siti geografici diversi (Fig.1) che hanno osservato a 1.3 mm con una larghezza di banda di 4 GHz e un rate di registrazione dei dati di 32 Gbps tramite tecnologia Mark 6 VLBI (Whitney et al. 2013). Le attuali capacità di EHT sono ora 64 Gbps, 10 volte maggiori dei tradizionali interferometri a lunga base, a testimonianza che EHT è uno strumento in continua evoluzione e miglioramento. Il più sensibile componente di EHT è l'Atacama Large Millimetre/submillimetre Array (ALMA) situato in Chile. Senza il suo contributo, non sarebbe stato possibile raggiungere il dettaglio e la sensibilità per poter risolvere l'anello (Fig. 2).

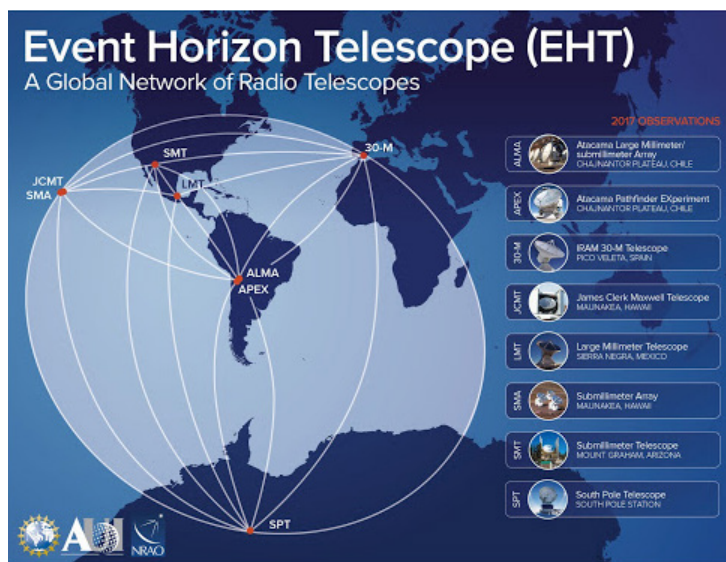


Fig. 1
Distribuzione geografica delle antenne EHT che hanno partecipato alla campagna osservativa del 2017.

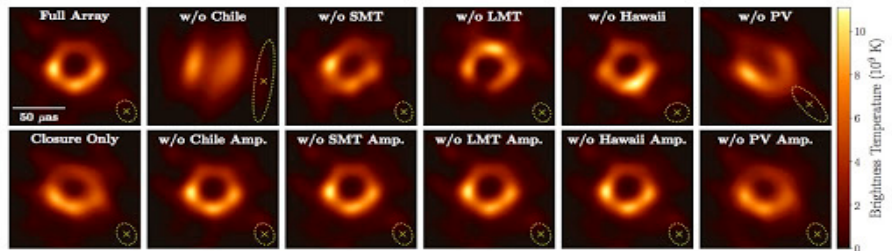
1.1. Quanti dati?

Le osservazioni EHT richiedono la gestione di una notevole quantità di dati. Ciascun antenna osserva simultaneamente lo stesso oggetto celeste ed i dati vengono registrati su hard disk. Durante la campagna del 2017, le 8 antenne hanno prodotto circa 4 PB di dati in totale per le 5 giorni osservativi.

Trattandosi di PB, i dati sugli hard disk vengono fisicamente spediti (e non trasferiti tramite internet) ai due correlatori (al Max Planck Institute for Radio Astronomy e al MIT Haystack Observatory) di tipo DIFX (Deller et al. 2011) dove vengono tra loro combinati (allineati in tempo) e mediati in tempo e frequenza raggiungendo dimensioni dell'ordine di 10-100 GB per sorgente per giorno.

Fig. 2

Da sinistra a destra, immagini del buco nero di M87 ottenute usando tutte le antenne EHT e via via sottraendo un'antenna (EHT Collaboration 2019d). Senza ALMA (pannello w/o Chile) l'anello non è distinguibile.



Terminata la correlazione, i dati vengono passati ai gruppi di lavoro che si occupano della loro calibrazione. L'emissione della sorgente registrata dai singoli telescopi non è tale e quale quella emessa dalla sorgente, ma risulta distorta per gli effetti dell'atmosfera (che varia da sito a sito) e per gli errori strumentali. Queste distorsioni devono essere corrette proprio in questa fase. Qui un'ulteriore media dei dati è effettuata ottenendo pacchetti di ~1 GB per sorgente per giorno.

L'ultima fase, detta di imaging, è quella che dai dati ripuliti produce l'immagine finale (~ MB per sorgente) attraverso operazioni matematiche che implicano anche trasformate di Fourier inverse.

1.2 Come è stata prodotta l'immagine?

EHT è uno strumento rivoluzionario che osserva con una sensibilità e risoluzione angolare senza precedenti. Per le sue caratteristiche (per es. antenne di diametro diverso poste in siti con climi differenti, PB di dati prodotti) ha necessitato lo sviluppo di software innovativi sia per la calibrazione che imaging (EHT collaboration 2019c, d). Questo ha richiesto del tempo: infatti tra l'osservazione (aprile 2017) e la pubblicazione (aprile 2019) della prima immagine di un buco nero ci sono voluti 2 anni.

Per assicurare l'affidabilità dei risultati ottenuti, è stato scelto anche un approccio metodologico particolare. Sono stati formati 3 gruppi di lavoro indipendenti (~10 persone ciascuno) per la fase di calibrazione e 3 per la parte di imaging che hanno lavorato separatamente senza interazione, per evitare possibili influenze umane sul processamento dei dati. Ciascun gruppo di lavoro ha sviluppato i propri strumenti di analisi: indipendentemente dai metodi usati, i risultati sono tra loro in accordo, come mostra Fig.3 per l' imaging.

Il nostro contributo è stato quello di contribuire allo sviluppo della pipeline di calibrazione rPICARD (Janssen et al. 2019), scritta in python che utilizza CASA (McMullin et al. 2007), il software più recente ed innovativo usato per la riduzione dei dati radioastronomici, in cui sono state recentemente implementate le funzioni (tra cui l'algoritmo fringefit, van Bemmelen et al. 2019 in prep.) per il processamento dei dati che usano la tecnica interferometrica a lunga base, quali quelli EHT.

2. La prima immagine di un buco nero: la galassia M87

La prima immagine pubblicata dal Consorzio EHT lo scorso aprile, precisamente 2 anni

Fig. 3

Immagine del buco nero di M87 prodotta dai gruppi di lavoro che si sono occupati dell'imaging (EHT collaboration 2019d). La sbarra a sinistra indica la scala angolare e il cerchio in basso a destra rappresenta la risoluzione angolare dell'osservazione.



dopo le osservazioni, è stata quella del buco nero supermassiccio al centro della galassia M87. Si tratta dell'immagine in banda millimetrica a più alta risoluzione angolare mai realizzata (20 micro-arcosecondi). In Fig.3, in arancione sono rappresentate le zone che emettono, in nero quelle in cui vi è assenza di segnale. L'emissione è chiaramente a forma di anello. Si tratta di plasma molto caldo ($T > 10^9 \text{K}$) e magnetizzato che ruota attorno al buco nero centrale nel disco di accrescimento (alcune simulazioni sono in accordo con contributo emissivo anche da parte dei getti). Questo plasma incandescente emette per meccanismo di sincrotrone e possiede al suo interno zone di maggiore brillantezza rispetto alle altre (in giallo), indicando la presenza di particelle che si muovono a velocità prossime a quelle della luce. La forma di questo anello è dovuta alla curvatura dello spazio-tempo, il lensing gravitazionale, per la presenza della massa enorme del buco nero centrale, e circonda la famosa ombra del buco nero.

L'immagine costituisce la prima prova diretta dell'esistenza dei buchi neri ed ha permesso di testare la validità della RG rispetto alle teorie alternative anche in ambienti dai campi gravitazionali estremi.

La dimensione dell'anello ha permesso di stimare la massa del buco nero di M87 con grande precisione: $6.5(\pm 0.7) \times 10^9$ masse Solari (EHT Collaboration 2019f). L'anello non è poi perfettamente simmetrico: la sua ellitticità rivela che il buco nero di M87 appartiene alla famiglia dei buchi neri rotanti detti di Kerr (EHT Collaboration 2019e). Infine, la forma ad anello dell'emissione esclude che si tratti di un buco nero nudo o un wormhole (EHT Collaboration 2019a).

3. Conclusioni

Se il 10 aprile scorso il Consorzio EHT ha pubblicato la prima immagine di un buco nero, quello della galassia M87, ora il lavoro in corso ha l'obiettivo di produrre il primo video di un buco nero, quello della nostra Galassia, Sgr A*. Questo è stato osservato insieme a M87 nel 2017, ma, poiché estremamente variabile e in una zona del cielo con mezzo interstellare particolarmente denso, i dati richiedono un'analisi innovativa che dovrebbe concludersi entro qualche mese.

EHT è uno strumento in continua evoluzione che vuole spingersi ad osservare sempre con più elevato dettaglio. Nuovi telescopi sono stati (e verranno) inseriti nell'array e ricevitori a più alta frequenza (345 GHz) sono in via di sviluppo. Infine, lo scorso agosto, il Con-

sorzio EHT ha sottoscritto un ESA Voyage 2050 White Paper (Gurvits et al. 2019) per la costruzione di un'antenna radio da inviare nello Spazio, il che costituirebbe l'ultima frontiera in termini di risoluzione angolare dell'interferometria a lunga base nel millimetrico.

Riferimenti bibliografici

Deller A.T., Brisken W.F., Philips C.J., et al 2011, DiFX-2: A More Flexible, Efficient, Robust, and Powerful Software Correlator, *PASP*, 123, 275

EHT Collaboration, 2019a, First M87 Event Horizon Telescope results. I. The shadow of the Supermassive Black Hole, *ApJ* 875, L1

EHT Collaboration, 2019b, First M87 Event Horizon Telescope results. II. Array and Instrumentation, *ApJ* 875, L2

EHT Collaboration, 2019c, First M87 Event Horizon Telescope results. III. Data Processing and Calibration, *ApJ* 875, L3

EHT Collaboration, 2019d, First M87 Event Horizon Telescope results. IV. Imaging the Central Supermassive Black Hole, *ApJ* 875, L4

EHT Collaboration, 2019e, First M87 Event Horizon Telescope results. V. Physical Origin of the Asymmetric Ring., *ApJ* 875, L5

EHT Collaboration, 2019f, First M87 Event Horizon Telescope results. VI. The Shadow and Mass of the Central Black Hole, *ApJ* 875, L6

Einstein A., 1915, *Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften*, Berlin

Falcke, H. Melia, F., & Agol, E. 2000, Viewing the Shadow of the Black Hole at the Galactic Center, *ApJL*, 528, L13

Janssen M., Goddi C., van Bemmelen I., et al., 2019, rPICARD: A CASA-based calibration pipeline for VLBI data, *A&A* 626, A75

Genzel R., Eisenhauer F., Gillessen S., 2010, The Galactic Center massive black hole and nuclear star cluster, *Reviews of Modern Physics*, vol. 82, Issue 4, pp. 3121-3195

Gurvits L.I., Paragi Z., Casasola V., et al 2019, TeraHertz Exploration and Zooming-in for Astrophysics (THEZA): ESA Voyage 2050 White Paper, arXiv:1908.10767

Luminet, J.-P, 1979, Image of a spherical black hole with thin accretion disk, *A&A*, 75, 228

McMullin J.P., Waters B., Schiebel D., et al., 2007, *CASA Architecture and Applications*, ASP Conference Series Vol. 376, Tucson, Arizona.

Whitney A.R., Beaudoin C.J., Cappallo R., et al. 2013, Demonstration of a 16 Gbps Station-1 Broadband-RF VLBI System, *PASP*, 125, 196

Contenuto del text box:

Anche l'Italia ha delle grandi antenne radio: due con diametro di 32m (a Medicina e Noto) ed una di 64m (in Sardegna). Queste antenne vengono anche utilizzate con la stessa tecnica di interferometria a lunga base nel European VLBI Network (www.evlbi.org). Le

condizioni climatiche non permettono alle antenne italiane di osservare alle lunghezze d'onda del EHT (1mm).

Autrici



Elisabetta Liuzzo - elisabetta.liuzzo@inaf.it

Lavora come ricercatrice all'INAF-IRA a Bologna. E' membro dell' EHT Consortium ed ha contribuito alla pubblicazione nell'aprile scorso della prima immagine del buco nero di M87, partecipando al gruppo di lavoro per la calibrazione dei dati. I suoi interessi scientifici riguardano l'analisi dei getti relativistici di nuclei galattici attivi extragalattici tramite osservazioni interferometriche ad altissima risoluzione angolare, usando strumenti di nuova generazione. Ha pubblicato ad oggi una 80 di articoli su riviste internazionali, partecipato ad altrettanti congressi sia in qualità di invited speaker che di organizzatore scientifico.

Kazi Rygl - kazi.rygl@inaf.it

Kazi Rygl e' laureata nel 2006 in Astronomia presso l'Università' di Amsterdam, ed ha conseguito il suo dottorato nel 2010 all'Università' di Bonn. Oggi lavora come ricercatrice all'Istituto di Radioastronomia dell'INAF a Bologna. E' membro dell'Event Horizon Telescope Consortium ed ha contribuito alla pubblicazione nell'aprile scorso della prima immagine del buco nero di M87, partecipando al gruppo di lavoro per la calibrazione dei dati. I suoi interessi scientifici riguardano formazione stellare nella nostra Via Lattea e le galassie vicine tramite osservazione interferometriche ad altissima risoluzione spaziale combinandoli con dati di satelliti ad altre lunghezze d'onda. Ha pubblicato ad oggi circa 90 di articoli su riviste internazionali, e partecipato a molti congressi, sia in qualità di invited speaker che di organizzatore scientifico.

