

## PREMIO NOBEL PER LA FISICA

Assegnato a  
Reinhard Genzel, Andrea Ghez e Roger Penrose

di Davide Maino\*

*Specchi modulari e ottica adattativa sono le tecnologie avanzate che hanno permesso a due dei tre vincitori del premio Nobel per la fisica 2020 di studiare accuratamente la dinamica delle stelle che orbitano attorno al centro della Via Lattea e di ottenere una forte indicazione della presenza di un buco nero super-massiccio. Una scoperta che può fornire un interessante ulteriore test della Relatività Generale.*

\* Professore di Fisica Sperimentale presso l'Università degli Studi di Milano – Sezione Fisica dei Plasmi e Astrofisica.



C'è un fattore che accomuna i due astrofisici Andrea Mia Ghez (1965-...) e Reinhard Genzel (1952-...). E non è solo il premio Nobel per la fisica che hanno recentemente vinto - assieme a Roger Penrose (1931-...) - grazie ai loro studi sulle regioni centrali della nostra galassia. Questo fattore è l'entusiasmo, entusiasmo e passione per il loro lavoro. D'altro canto non si può lavorare per oltre 20 anni a un progetto senza essere trainati da un entusiasmo che è lo specchio del desiderio di conoscenza. Ed è una cosa contagiosa: ascoltando le loro *Nobel Lecture* non si può non essere coinvolti, trascinati,

letteralmente presi dal racconto di una grande avventura. Ho voluto sottolineare subito questo aspetto che mi pare fondamentale in generale, ma in particolare nella ricerca scientifica quando letteralmente si esplora l'ignoto.

Andrea Mia Ghez, newyorkese di nascita ma californiana di adozione, e il tedesco Reinhard Genzel sono a capo dei due più importanti gruppi di ricerca per lo studio delle regioni centrali della Via Lattea e negli anni sono stati in grado di coinvolgere e formare

decine di giovani scienziati nella ricerca della colossale entità che ne abita il centro. Non parliamo qui di buchi neri di origine stellare, ultimo stadio della vita di stelle con massa superiore a quattro volte quella del Sole, ma di oggetti di una taglia decisamente differente. Le osservazioni astronomiche sia nel range del visibile, ma soprattutto agli estremi dello spettro elettromagnetico cioè nelle onde radio e nei raggi X, mostrano come il centro di molte galassie osservate, specialmente quelle denominate *nuclei galattici attivi*, è abitato da un oggetto esotico: un buco nero super-massiccio la cui massa varia da qualche milione a decine di miliardi di volte la massa del Sole. Come questi oggetti si siano formati, quale sia la loro storia e le loro caratteristiche, sono



Reinhard Genzel, Andrea Ghez e Roger Penrose

tutte questioni ancora aperte di cui, per molte di esse, non abbiamo ancora un'idea precisa. Per questo è fondamentale andare a scandagliare con sempre maggiore dettaglio le regioni centrali della nostra galassia. Da un lato, infatti, occorre acquisire l'evidenza sperimentale che anche la Via Lattea ospita un buco nero super-massiccio al suo centro (anche se per fortuna non particolarmente attivo) e dall'altro, essendo questo il buco nero più vicino a noi, esso diventa uno strumento privilegiato per cogliere le caratteristiche salienti di questi esotici oggetti e del loro legame con la galassia ospitante.

### Buchi neri super-massicci

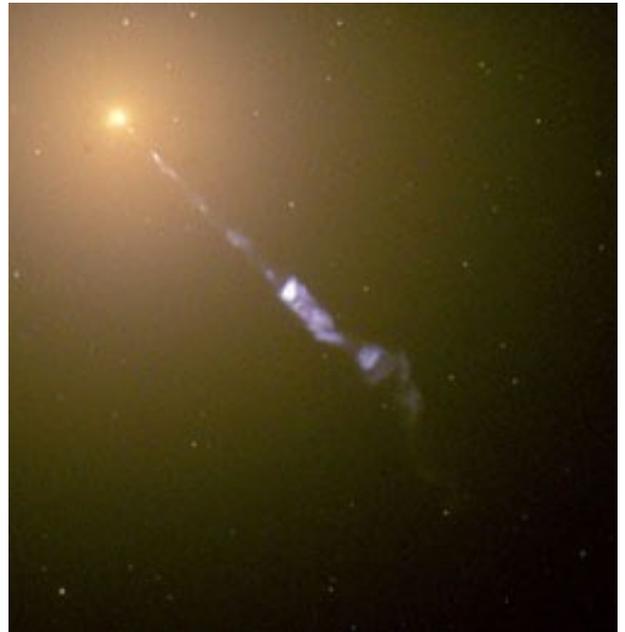
Come però studiare un oggetto che, il nome stesso lo dice, è nero cioè non emette radiazione direttamente rivelabile (se si esclude la teoricamente prevista ma non ancora osservata radiazione di Hawking) e la cui gravità è talmente intensa che neanche la luce con la sua imbattibile velocità è in grado di sfuggirne? Per rispondere a questa domanda è importante introdurre il concetto di raggio di Schwarzschild. Nel 1916 Karl Schwarzschild nella sua derivazione della soluzione delle equazioni di Einstein per il campo gravitazionale di un oggetto a simmetria sferica (una stella per esempio) lo introdusse per la prima volta: esso risulta direttamente proporzionale alla massa dell'oggetto, cioè più grande è la massa dell'oggetto più grande è il suo raggio di Schwarzschild. Un buco nero è definito come un oggetto che ha dimensioni inferiori al suo raggio di Schwarzschild. Per esempio se fossimo in grado di comprimere la Terra entro un raggio di circa 1 cm essa diventerebbe un buco nero.

La figura mostra il getto che si estende per quasi 5000 anni-luce (!) emesso dal nucleo della galassia M87 (l'oggetto brillante in alto a sinistra). Lo studio dell'energia e dei tempi scala della sua variabilità mostrano che questa si origina da una regione le cui dimensioni sono più piccole del sistema Solare e che l'unico meccanismo in grado di produrre una così grande quantità di energia è la conversione in radiazione dell'energia gravitazionale associata a un buco nero super-massiccio.

Quindi ci sono chiare evidenze dell'esistenza di buchi neri nei centri di galassie esterne principalmente indirette.

Per dimostrare che anche al centro della Via Lattea ci sia effettivamente un buco nero occorre da un lato trovare evidenze di un'intensa attrazione gravitazionale e dall'altro che questa si concentra in una regione estremamente piccola. Da un punto di vista teorico basterebbe quindi poter disporre di osservazioni della regione centrale della nostra galassia in cui siano chiaramente osservabili e tracciabili i moti di alcune stelle orbitanti intorno al buco nero. Disponendo, infatti, della loro orbita e della velocità con cui questa è percorsa si può immediatamente con un semplice conto da matricola di fisica risalire alla massa che ne è responsabile.

Nella pratica le cose sono molto più complesse. Il Sole, infatti, si trova a circa 27000 anni luce dal centro della galassia che alle lunghezze d'onda del visibile risulta fortemente oscurato da tutto il mezzo interstellare (principalmente nubi di gas e polveri) che ci impedisce una visione diretta. Tuttavia esso risulta accessibile a lunghezze d'onda leggermente più grandi cioè nell'infrarosso. Occorre a questo punto disporre di un elevato *potere risolutivo* (cioè della capacità di un telescopio di cogliere dettagli minuti) in quanto dobbiamo poter raccogliere informazioni da una regione confrontabile con il Sistema Solare a una distanza di 27000 anni luce. Per questo sia il gruppo guidato da Andrea Ghez sia quello di Reinhard Genzel hanno utilizzato i più grandi telescopi disponibili: i due telescopi del *Keck Observatory* alle Hawaii dal diametro di 10 metri



Getto emesso dal nucleo della galassia M 87



Una galassia simile alla Via Lattea

per il team californiano e i telescopi - classe 8 metri - dell'*European Southern Observatory* in Cile per il gruppo tedesco.

Ma non è ancora fatta. Occorre includere nel gioco una componente fondamentale per la vita dell'uomo, ma che per lo studio dell'Universo è una vera e propria spina nel fianco: l'atmosfera della Terra. Infatti un fotone, il messaggero luminoso che ci arriva dal centro della galassia percorre un viaggio di 27000 anni praticamente indisturbato e negli ultimi 30 micro-secondi incontra l'atmosfera terrestre da cui viene significativamente deflesso. Inoltre l'atmosfera della Terra non è stabile ma presenta dei *moti turbolenti* su tempi molto rapidi. Il fotone non solo è deflesso, ma questa deflessione cambia rapidamente e in maniera casuale impedendo l'acquisizione di una immagine nitida.

È così che 25 anni fa Andrea Ghez propose di utilizzare l'appena costruita *Near Infra-Red Camera* (NIRC) del *Keck Observatory* per fare qualcosa per cui non era stata pensata: effettuare immagini ultra-veloci (cercando in qualche modo di averla vinta sulla turbolenza dell'atmosfera) che poi sarebbero state sovrapposte (anche qui con modifiche non banali al software di gestione dello strumento). L'idea, per usare un eufemismo, non venne accolta nel migliore dei modi, ma questo non fermò Andrea: per lei un rifiuto non è mai motivo per deprimersi ma occasione per chiarire ancora meglio a se stessa la propria idea e quindi poter convincere gli altri della sua validità scientifica. La storia ci insegna che l'idea ha funzionato: non fu comunque affatto banale e immediato venire a capo dell'enorme quantità di dati prodotta, ma alla fine Andrea ne uscì vincitrice.

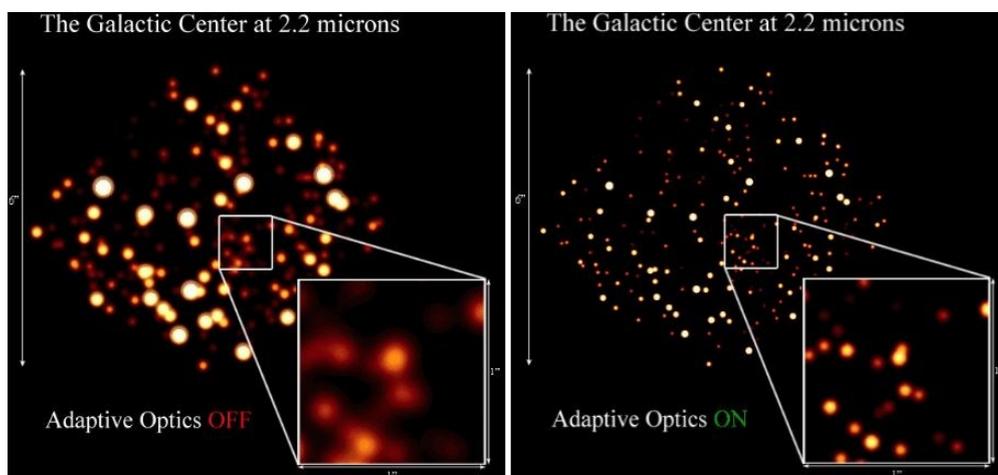
### Specchi modulari e ottica adattativa

Entrambi i gruppi beneficiarono in maniera sostanziale di un ulteriore avanzamento tecnologico in campo astronomico. I moderni telescopi non sono composti da un unico enorme specchio primario. Esso, infatti, risulterebbe estremamente pesante, soggetto a significativi stress meccanici e pertanto molto delicato. Risulta vincente costruire grandi superfici riflettenti in maniera modulare, tipicamente con moduli di forma esagonale perché è quella che meglio permette di tassellizzare una superficie, che risulta pertanto di più facile costruzione e gestione. Inoltre la modularità dello specchio permette di realizzare un'*ottica adattiva*. Se immaginiamo l'atmosfera terrestre come uno specchio deformante, potremmo costruire uno specchio «rovesciato» in modo da correggere la deformazione. Per questo ogni singolo modulo che compone lo specchio primario di un telescopio moderno è sostenuto da pistoni che ne possono modificare opportunamente l'orientazione per compensare la turbolenza dell'atmosfera.

Per compensare in maniera efficace occorre disporre di una sorgente brillante chiamata stella guida: la deformazione dello specchio è quella che permette la più nitida immagine della stella guida. E se non c'è una stella brillante in prossimità dell'oggetto da osservare? Ne viene creata una *ad-hoc*: nella parte alta della mesosfera (a circa 90 km di quota) sono presenti atomi di sodio che possono essere eccitati con conseguente emissione di radiazione luminosa da un fascio laser di opportuna lunghezza d'onda. La

«stella» così prodotta risulta in generale sufficientemente brillante, anche se la sua luminosità non è facilmente determinabile a priori dipendendo sia dalla potenza del fascio laser sia dalla, non nota, distribuzione degli atomi di sodio.

Grazie all'ottica adattiva è stato possibile monitorare e seguire le traiettorie di diverse centinaia di stelle in prossimità del centro della galassia per un periodo di più di 25 anni (inizialmente il progetto di Ghez sarebbe dovuto durare solo 3 anni). Il risultato è stato strabiliante: non solo si è potuto costruire le traiettorie delle stelle del centro, ma tramite un'analisi spettrale si è potuto ricavare anche la loro velocità.



Il centro della Via Lattea nell'infrarosso, senza (sinistra) e con (destra) l'ottica adattiva funzionante.

Dai moti di queste stelle è stato possibile ricavare la massa responsabile del loro moto: 4,31 milioni di volte la massa del Sole. Inoltre la stella denominata S0-2 è stata osservata per più di un'intera orbita: essa, infatti, risulta avere un periodo di circa 16 anni. Recentemente (2018) è passata alla minima distanza dell'oggetto che è responsabile del suo moto, una distanza di solo 14 miliardi di chilometri, poco più grande del Sistema Solare. Abbiamo quindi una massa 4 milioni di volte il nostro Sole confinata in un volume dell'ordine di quello del Sistema Solare. Decisamente una forte indicazione della presenza di un buco nero super-massiccio nella nostra Via Lattea.

Ma questo, dice Genzel nella sua *Nobel Lecture*, è solo l'inizio. Questa scoperta apre a una serie di domande nuove che, dice Ghez, sono fondamentali nella ricerca più ancora delle risposte, così come lo è stata la competizione tra i due gruppi.

### Conseguenze

L'eccitazione per la scoperta è tanta soprattutto per le conseguenze che questa già da ora porta con sé. Per esempio un oggetto così massiccio e compatto può essere usato come test della Relatività Generale. In particolare l'osservazione spettrale della radiazione emessa dalla stella S0-2 ha permesso di verificare che questa in prossimità del buco nero subisce un fenomeno di «stiramento» verso lunghezze d'onda più lunghe (redshift) dovuto all'elevata velocità della stella: 25 milioni di chilometri all'ora, circa il 3% della velocità della luce! Nessuna teoria della gravità attualmente in nostro possesso è in grado di spiegare questo fenomeno se non la Relatività Generale di Einstein.

Si apre quindi una nuova era di ricerca in cui abbiamo la possibilità di continuare a fare domande alla realtà perché si sveli, se non tutto almeno in un suo aspetto particolare. Ed è questo un gioco a cui misteriosamente la realtà non si sottrae. L'entusiasmo di persone come Ghez e Genzel, il loro interesse per la realtà, per capire come essa sia fatta veramente e non solo per confermare una propria idea, personalmente mi conquista: è ancora possibile incontrare dei veri maestri.

*Davide Maino*

*(Professore di Fisica Sperimentale presso l'Università degli Studi di Milano – Sezione Fisica dei Plasmi e Astrofisica. È fra i responsabili scientifici del Data Processing Center di LFI, la parte italiana della strumentazione di bordo situata sul satellite europeo Planck)*

