

Spigolature astronomiche★

A cura di Annibale D'Ercole

INAF · Osservatorio di astrofisica e scienza dello spazio di Bologna (OAS)

L'immagine del buco nero nella galassia M87

Annibale D'Ercole

ALCUNE galassie producono *jet* estremamente collimati che si originano nel centro galattico. Il materiale espulso raggiunge velocità vicine a quella della luce ($c = 300.000 \text{ km/s}$) e i *jet* possono arrivare ad essere molto estesi. È questo il caso della grande galassia ellittica M87, posta alla distanza di 55 milioni di anni luce, che contiene diverse centinaia di miliardi di stelle ed esibisce un *jet* lungo almeno 5000 anni luce (FIG. 1b).

Le straordinarie energie in gioco hanno indotto gli astronomi a ritenere che il "motore" all'origine di questo fenomeno sia un buco nero supermassiccio di diversi miliardi di masse solari. Come vedremo tra poco, il gas nei dintorni del buco nero non cade verso di esso seguendo una traiettoria radiale diretta, ma spiraleggiando in modo da creare il cosiddetto *disco di accrescimento*. Tuttavia, non tutto il gas del disco viene ingoiato dal buco nero; circa il 15% viene proiettato lungo la direzione dell'asse di rotazione formando due *jet* (FIG. 1a). È interessante notare che nella fotografia in FIG. 1b compare solo il *jet* diretto verso di noi, ma non quello opposto, come ci si aspetterebbe guardando la FIG. 1a. In realtà, questo *jet* è presente ma è reso invisibile dal cosiddetto *effetto Doppler relativistico* che intensifica la luminosità delle sorgenti luminose in avvicinamento e riduce drasticamente quella delle sorgenti in allontanamento quando si muovono con velocità vicine a quella della luce. Più tardi incontreremo ancora (e approfondiremo parzialmente) questo effetto discutendo del disco di accrescimento.

* Questa rubrica si propone di presentare in modo sintetico e, per quanto possibile, autoconsistente argomenti che stanno alla base della conoscenza astronomica, spesso trascurati nella letteratura divulgativa, in quanto ritenuti di conoscenza generale oppure troppo difficili o troppo noiosi da presentare ad un pubblico non specialistico. Questi "fondamenti di astronomia", volutamente trattati in uno spazio limitato, possono essere letti a due livelli; eventuali approfondimenti per i lettori che desiderino ampliare la conoscenza dell'argomento vengono esposti in carattere corsivo e incorniciati. Si suggerisce questa rubrica, quindi, a studenti dei vari tipi e livelli di scuole. Le *Spigolature astronomiche* si possono trovare anche in rete, nel sito Web del «Giornale di Astronomia», <http://giornaleastronomia.difa.unibo.it/giornale.html>.

Gli astronomi si sono impegnati per anni per individuare il buco nero all'origine del *jet* nel centro di M87. Nell'aprile di quest'anno i loro sforzi si sono concretizzati nella realizzazione dell'immagine divulgata da tutti i media e che pure noi riproduciamo (FIG. 1c). Essa è stata ottenuta grazie al telescopio EHT (Event Horizon Telescope) che consiste, in realtà, nell'impiego coordinato di svariati radiotelescopi (ne accenneremo più in là). Si tenga presente che il diametro della "ciambella" rossa visibile nell'immagine – rappresentante il disco di accrescimento – è di soli $\approx 0,01$ anni luce. Questa disparità di dimensioni rispetto al *jet* rende evidente le enormi difficoltà tecniche che gli scienziati dell'EHT hanno dovuto superare per visualizzare quest'oggetto. L'interpretazione dell'immagine non è banale; in ciò che segue cercheremo di capirne meglio il significato.

Iniziamo dando una definizione, sia pure semplificata, di buco nero. Si tratta di un oggetto massiccio talmente compatto da possedere una forza di gravità capace di trattenere persino la luce. Più precisamente, è possibile associare ad ogni corpo il concetto di raggio di Schwarzschild $R_s = 3(M/M_\odot) \text{ km}$ (si veda il livello avanzato), dove M è la massa del corpo e M_\odot quella del Sole. Con una certa approssimazione possiamo definire buco nero qualunque corpo con dimensioni inferiori a R_s (data la definizione di R_s , per diventare un buco nero il Sole, che ha un raggio di 700.000 km, dovrebbe venire compresso in una sfera con un raggio inferiore a 3 km). È possibile allora immaginare un'ideale superficie sferica con raggio R_s che circonda il buco nero denominata *orizzonte degli eventi*: qualunque oggetto all'interno del volume delimitato da questa superficie – ossia che si trovi a distanze dal centro inferiori o pari a R_s – non è in grado di attraversare tale orizzonte a causa dell'estrema forza attrattiva presente, e rimane legato gravitazionalmente al buco nero. Questo vale anche per la luce: i raggi luminosi eventualmente prodotti all'interno della superficie degli eventi e diretti verso l'esterno vengono deflessi e "risucchiati" verso il centro, rimanendo invisibili ad un osservatore esterno.

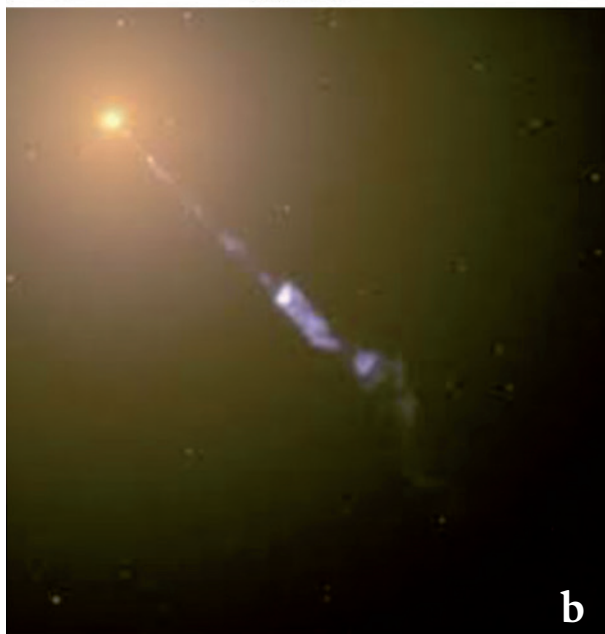
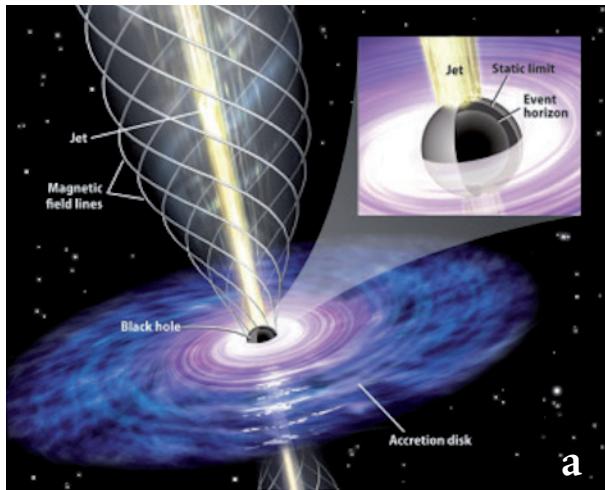


FIG. 1. Pannello a: rappresentazione della formazione di *jet* da parte di un buco nero. Il gas attratto dal buco nero si muove verso di esso spiraleggiando lungo il disco di accrescimento. Man mano che il gas si addensa vicino al buco nero, la pressione e il campo magnetico crescono al punto da "spruzzare" parte del gas lungo la direzione di minor resistenza, ossia verticalmente, lungo l'asse di rotazione. Si formano così *jet* altamente collimati che si muovono a velocità vicine a quella della luce. Pannello b: la galassia ellittica M87. L'alone luminoso è dovuto alle centinaia di miliardi di stelle della galassia troppo distanti per poter apparire individualmente come singoli puntini luminosi. È chiaramente visibile il *jet* di M87 che si origina nel centro galattico e si estende verso di noi per circa 5000 anni luce. Pannello c: l'immagine ottenuta dal telescopio EHT. È visibile il disco di accrescimento che circonda la regione centrale nera detta "ombra del buco nero" (si veda il testo). Le misurazioni sono state eseguite alla lunghezza d'onda di 1,3 mm, ben al di fuori dello spettro visibile (0.0004 – 0.0007 mm). Per questo motivo gli astronomi hanno colorato artificialmente l'immagine con tonalità proporzionali all'intensità di emissione (dal rosso cupo per le regioni meno luminose al rosso vivo e poi al bianco per quelle più luminose).

cia di avvicinamento" il gas diventa sempre più caldo e luminoso. In conclusione, ciò che si può riuscire ad osservare direttamente non è il buco nero in sé, ma il disco gassoso che lo circonda. L'esistenza del buco nero è testimoniata dalla presenza di un'area circolare scura da cui non giunge alcuna radiazione e che si staglia contro lo sfondo luminoso dato dal gas in accrescimento (il "buco" della "ciambella" di FIG. 1c). Contrariamente a quanto si sarebbe portati a credere, le dimensioni della "silhouette" del buco nero sono maggiori di quelle dell'orizzonte degli eventi: ad un osservatore distante il disco scuro appare avere un raggio pari a $2,6R_s$, anziché R_s . Tale disco viene detto "ombra" del buco nero; la sua magnificazione è dovuto alla forte distorsione dei raggi luminosi a causa della gravità (si veda il livello avanzato) e rappresenta un indubbio aiuto per i "cacciatori" di buchi neri.

Più tardi vedremo come dall'analisi dell'ombra è possibile ricavare utili informazioni sul buco nero. Prima, però, passiamo ad esaminare le peculiarità presenti nell'immagine del disco di accrescimento per via della teoria della relatività generale.

Consideriamo Saturno e i suoi anelli circolari come rappresentativi di un sistema classico, un sistema, cioè, dove la gravità esercitata dal pianeta è debole e i raggi luminosi emessi dagli anelli si propagano in linea retta. Immaginiamo inoltre di osservare il sistema da un punto di vista leggermente al di sopra del piano individuato dagli anelli. Naturalmente, una parte degli anelli è nascosta dal pianeta, ma è facile ricostruire il loro aspetto ellittico (dovuto alla prospettiva). Nel caso di un disco rotante attorno ad un buco nero le cose sono assai diverse. In questo caso è possibile vedere la parte superiore della porzione posteriore del disco nella sua totalità, indipendentemente dall'angolo di vista. L'immagine di questa porzione viene deformata ed indirizzata verso l'osservatore dall'effetto distorcente esercitato dalla gravità sul percorso dei raggi luminosi. Ancora più sorprendentemente, l'osservatore è in grado di visualizzare anche il lato inferiore del disco. I

Da quanto appena detto, risulta impossibile fotografare un buco nero! Tuttavia i buchi neri non sono isolati, ma attraggono a sé gas strappato a nubi interstellari o a stelle nelle vicinanze. Come abbiamo anticipato poc'anzi, questo gas si avvicina al buco nero spiraleggiando sul disco di accrescimento fino ad essere fagocitato definitivamente (con l'eccezione, come abbiamo visto, di una piccola quota che viene convogliata lungo i *jet*). Durante questa "mar-

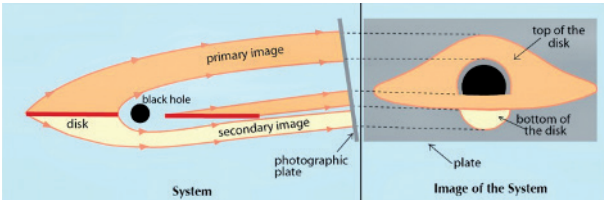


FIG. 2. Distorsione della luce vicino a un buco nero circondato da un disco luminoso circolare. Il sistema è osservato a grande distanza ad un angolo di 10° rispetto al piano del disco. I raggi luminosi vanno ad impressionare una lastra fotografica (posta a destra del buco nero). Sia il disco che la lastra sono rappresentati “di taglio”, rispettivamente, da due segmenti orizzontali rossi e da uno obliquo grigio. Nel riquadro a destra è rappresentato il sistema come appare sulla lastra fotografica. A causa della curvatura dei raggi luminosi dovuti alla forte gravità del buco nero, il disco non appare di forma ellittica, a causa della prospettiva, come risulterebbe se circondasse una stella ordinaria o un pianeta. La radiazione emessa dalla parte superiore del disco “alle spalle” del buco nero, benché “coperta” da quest’ultimo, è completamente visibile, sebbene distorta, a causa dell’“aggiramento” dell’ostacolo da parte dei raggi luminosi. Questo meccanismo vale anche per la radiazione emessa dal lato inferiore del disco, che forma quindi un’immagine secondaria (in giallo chiaro nella figura).

raggi luminosi – che normalmente si dirigerebbero in basso, allontanandosi dall’osservatore – vengono curvati e, dopo aver aggirato il buco nero, danno luogo ad un’immagine secondaria, una rappresentazione deformata del lato inferiore del disco (FIG. 2). Va sottolineato che ben poca radiazione può provenire dalla regione compresa tra il raggio interno del disco pari a $3R_s$ e l’orizzonte degli eventi. Infatti, l’orbita spiraleggiante quasi circolare del gas nel disco può essere mantenuta fino ad una distanza critica pari a tre raggi di Schwarzschild (si veda il livello avanzato). A distanze inferiori dal buco nero il disco è instabile, e il gas cade oltre l’orizzonte degli eventi così rapidamente da non avere tempo di emettere una grande quantità di radiazione.

È interessante notare che, a causa dell’elevata gravità, si generano un’infinità di immagini del disco perché i raggi luminosi possono percorrere un numero qualunque di giri attorno al buco nero prima di sfuggire alla sua morsa ed essere osservati da un astronomo distante. L’immagine primaria mostra il lato superiore, l’immagine secondaria quello inferiore, la terza immagine mostra di nuovo il lato superiore, e così via (FIG. 3). Tuttavia, le immagini di ordine superiore non sono interessanti perché sono deboli e molto vicine al bordo dell’ombra (FIG. 4).

Per avere un’idea realistica di come ci si aspetta che appaia la luminosità di un disco di accrescimento attorno ad un buco nero, è necessario tener conto delle sue proprietà fisiche come la temperatura e la rotazione. L’intensità della radiazione emessa è tanto maggiore quanto maggiore è la temperatura, e quest’ultima dipende dalla distanza radiale dal buco nero ed è più alta nelle sue vicinanze; infatti, il gas si comprime man mano che si concentra verso il buco nero e di conseguenza la sua temperatura aumenta (com’è facile verificare quando, gonfiando le ruote della bicicletta, notiamo che la pompa si scalda a causa della compressione dell’aria al suo

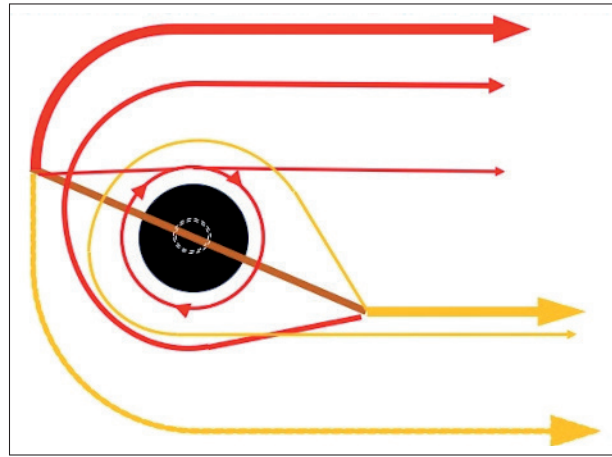


FIG. 3. Formazione di immagini di diverso ordine. La sfera nera rappresenta l’ombra del buco nero (con raggio $2,6R_s$), mentre il cerchio tratteggiato (con raggio R_s) indica l’orizzonte degli eventi. La linea diagonale marrone che li attraversa schematizza il disco di accrescimento visto di taglio. Le frecce rappresentano raggi luminosi diretti verso un osservatore posto a destra. I raggi più spessi danno luogo all’immagine principale, quelli intermedi (più curvati) all’immagine secondaria, e quelli più sottili all’immagine del terzo ordine (si veda la FIG. 4). Si noti che questi ultimi sono quelli più distorti perché, passando più vicino al buco nero, compiono un intero giro attorno ad esso prima di raggiungere l’osservatore. Il raggio rosso più in alto e quello giallo più in basso sono equivalenti ai raggi illustrati nel pannello di sinistra della FIG. 2.

interno). Pertanto, la luminosità del disco non può essere uniforme, ma è massima nelle regioni centrali vicine all’ombra del buco nero, dove la temperatura può arrivare a miliardi di gradi.

Un secondo effetto che influenza la luminosità del disco è dato dal cosiddetto *redshift*, ovvero la variazione in frequenza cui è sottoposta la radiazione emessa. Vi sono due tipi di *redshift*. Uno è dovuto al campo gravitazionale che riduce la frequenza e dunque l’intensità della radiazione emessa;¹ l’altro è dovuto all’effetto Doppler (di cui abbiamo accennato all’inizio) che intensifica la radiazione se la sorgente si muove verso l’osservatore, e la indebolisce in caso contrario.² Quest’ultimo effetto si verifi-

¹ Quando lanciamo un oggetto nello spazio, esso è contrastato dalla gravità della Terra e riduce la sua energia cinetica – e dunque la sua velocità – per riuscire a svincolarsi dall’energia di legame gravitazionale del pianeta. Anche un fotone “in fuga” perde energia, ma la sua velocità rimane $c = 300.000 \text{ km/s}$, giacché questa sua caratteristica è una costante della natura; in realtà l’energia di un fotone è proporzionale alla sua frequenza ν : $E = h\nu$, dove h rappresenta la costante di Plank. Pertanto un fotone in allontanamento da un pianeta o da una stella riduce la sua energia riducendo la propria frequenza: in questo consiste il *redshift* gravitazionale.

² L’effetto Doppler relativistico dà luogo al fenomeno del *beaming*. Una sorgente sferica che irradia isotropicamente (cioè in tutte le direzioni in ugual misura) si rende visibile ad un osservatore distante solo grazie ad una minima parte della sua luminosità, ossia quella inviata proprio in direzione dell’osservatore stesso. Se la stessa sorgente si muove a velocità relativistiche, l’emissione diventa altamente anisotropa e la radiazione viene (quasi) tutta convogliata in avanti, lungo la direzione del moto; la sorgente si comporta come una torcia elettrica. Se il moto è in direzione dell’osservatore, la sorgente gli appare molto più luminosa. Al contrario, le sorgenti in allontanamento possono ridurre la loro luminosità apparente fino a diventare inosservabili (come succede per uno dei *jet* di M87).

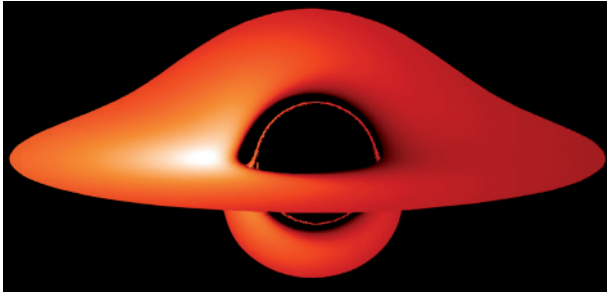


FIG. 4. Simulazione al computer mediante *ray tracing* dell'aspetto di un disco di accrescimento attorno a un buco nero, come appare ad un osservatore distante. La figura è analoga al pannello destro di FIG. 2, ma con importanti dettagli in più. Sono presenti due sottili archi a ridosso dell'ombra del buco nero, circondandola: si tratta dell'immagine del terzo ordine del disco (dovuta ai raggi più sottili mostrati in FIG. 3). Inoltre, la scala di colore adottata per il disco non è uniforme ma si estende dal rosso cupo delle regioni meno luminose al rosso vivo e al bianco per quelle più luminose. Si veda il testo per i dettagli.

ca a causa della rotazione del disco che, nei pressi del buco nero, può raggiungere velocità prossime a quella della luce. Con riferimento alla FIG. 4 (ottenuta tramite modelli elaborati al computer), il senso di rotazione è tale per cui le regioni sulla sinistra dell'immagine si muovono verso l'osservatore e quelle sulla destra invece recedono. In quest'ultime regioni l'attenuazione luminosa dovuta all'effetto Doppler si aggiunge a quella dovuta al *redshift* gravitazionale, e questo spiega la bassa luminosità di questa zona. Nelle regioni di sinistra, invece, l'effetto Doppler prevale sul *redshift* gravitazionale, e l'intensità luminosa risulta maggiore.

Quanto abbiamo detto finora si riferisce ad un buco nero non rotante. In realtà i buchi neri ruotano vigorosamente, com'è testimoniato dai *jet* lanciati lungo l'asse di rotazione (FIG. 1a) e che traggono la loro energia proprio da tale rotazione. Tuttavia, le considerazioni generali esposte fin qui possono comunque ritenersi valide anche in caso di buchi neri rotanti, sia pure con qualche differenza. Ad esempio, nel caso di un buco nero rotante l'orbita stabile più interna ha un raggio inferiore a $3R_s$, e il bordo interno del disco va a lambire l'orizzonte degli eventi. Inoltre, l'ombra del buco nero non appare perfettamente circolare.

E veniamo finalmente a commentare l'immagine divulgata lo scorso aprile (FIG. 1c). A prima vista può sembrare deludente, una sorta di alone sfocato, una ciambella disomogenea che non rassomiglia alle belle immagini ottenute al computer (FIG. 4). Questo è dovuto al fatto che l'attuale tecnologia, sia pure spinta al massimo come nel caso dell'EHT, non permette immagini più nitide (benché l'aver individuato l'ombra del buco nero attorniato dal disco di accrescimento sia già di per sé un risultato straordinario). Tuttavia, sono previste nei prossimi anni osservazioni dotate di maggiore risoluzione spaziale (si veda più sotto).

In ogni caso, è già possibile estrarre numerose informazioni dall'immagine attuale. Innanzi tutto es-

sa rappresenta la prima prova *diretta* dell'esistenza dei buchi neri e costituisce un'ennesima conferma della teoria della relatività generale. Dalle dimensioni dell'ombra si è poi ricavato $R_s = 1.87 \times 10^{10}$ km e, conseguentemente, una massa del buco nero pari a $6.5 \times 10^9 M_\odot$ (si ricordi la relazione tra M e R_s data più sopra). Inoltre, l'ombra presenta una leggera asimmetria che devia dalla perfetta circolarità per meno del 10%; questo indizio indica che il buco nero ruota, giacché un buco nero non rotante è supposto avere un'ombra circolare.

È noto, poi, che il *jet* di M87 risulta inclinato di un angolo di 17° verso destra (cioè verso ovest) rispetto alla nostra linea di vista; dal momento che il disco è ortogonale al *jet*, risulta anch'esso inclinato nella stessa direzione e con lo stesso angolo. Sappiamo altresì, da quanto discusso più sopra, che le regioni del disco che si muovono verso di noi a causa della rotazione appaiono più luminose per via dell'effetto Doppler. Queste regioni sono posizionate nella metà inferiore del disco; data la prospettiva appena descritta, possiamo dunque concludere che il disco ruota in senso orario. I modelli teorici mostrano poi che, se il buco nero ruotasse in senso opposto al disco, le regioni più luminose si troverebbero nella metà superiore del disco stesso, in contrasto con quanto osservato; pertanto il disco e il buco nero sono corotanti.

Inoltre, dato il piccolo angolo di inclinazione, noi vediamo il disco quasi "di faccia", una prospettiva ben diversa da quella del modello in FIG. 4, dove il disco è visto quasi "di taglio"; pertanto il "lobo" inferiore che appare in questa figura non è visibile in M87 perché viene coperto dalla parte anteriore del disco.

Infine, i modelli al computer compatibili con le osservazioni mostrano che il buco nero "divora" ogni anno una quantità di materia pari a 900 volte quella della Terra.

Non possiamo concludere questo livello base senza accennare all'enorme sforzo tecnologico e organizzativo resosi necessario per ottenere l'immagine in FIG. 1c. Il telescopio EHT è uno strumento non meno rimarchevole degli oggetti che osserva. Grazie alla collaborazione di 200 ricercatori, EHT non adopera un singolo radiotelescopio, ma utilizza una rete di numerose antenne situate dalla Groenlandia al Polo Sud e dalle Hawaii alle Alpi francesi (FIG. 5). L'elevato numero di antenne è dovuto al fatto che, ovviamente, il segnale intercettato è tanto maggiore quanto più numerosi sono i radiotelescopi i cui dati vengono sincronizzati tramite orologi atomici, e questo permette anche una maggiore risoluzione spaziale. Successivamente, mediante una tecnologia d'avanguardia e strumenti matematici complessi, gli scienziati combinano i dati provenienti da tutti i telescopi ottenendo un'immagine la cui risoluzione dei dettagli spaziali è simile a quella che si otterrebbe con un singolo telescopio del diametro della massima distanza tra



FIG. 5. Rete degli 8 radiotelescopi posti in 4 continenti che costituiscono l'EHT. Operano alla lunghezza d'onda (radio) di 1,3 mm

le antenne utilizzate³ (≈ 10.000 km). Questo consente all'EHT di raggiungere una risoluzione angolare di 20 micro secondi d'arco ($1 \mu\text{as} = 10^{-6}$ arcsec) sufficiente a distinguere una pallina da ping pong posta sulla Luna, e adeguata a risolvere il disco di accrescimento che sottende un angolo di circa 50 μas . Immagini dotate di maggiore risoluzione spaziale potranno essere ottenute il prossimo anno, riducendo la lunghezza d'onda di osservazione dall'attuale $\lambda = 1,3$ mm a $\lambda = 0,8$ mm, e aggiungendo più radiotelescopi (si veda la nota 3). In un futuro più distante potranno essere utilizzati radiotelescopi orbitanti attorno alla Terra.

Prima di esaminare ciò che accade nei pressi di un buco nero, è utile richiamare alcune nozioni di fisica classica valide per descrivere le traiettorie di una

³ A causa della natura ondulatoria della luce, quando un raggio luminoso incontra un ostacolo, esso viene parzialmente deviato tramite il fenomeno della *diffrazione*. Un fronte luminoso che attraversa la lente di un cannocchiale o venga riflesso dallo specchio di un telescopio o dalla parabola di un radiotelescopio viene "disturbato" dai bordi di questi oggetti e non riesce a riprodurre correttamente sul piano focale una sorgente puntiforme come una stella, che appare invece come una "macchiolina" con un diametro maggiore del reale detto *diametro di diffrazione*. È chiaro allora che due stelle che sulla sfera celeste sono separate da una distanza angolare inferiore al diametro di diffrazione non saranno risolte spazialmente e appariranno sul piano focale come un oggetto unico. Il diametro (angolare) di diffrazione è dell'ordine di λ/D , dove λ è la lunghezza d'onda della radiazione osservata e D il diametro della lente o della parabola di un radiotelescopio. L'EHT sfrutta una complessa tecnica detta VLBI (Very Long Baseline Interferometry) in base alla quale D è dato dalla massima distanza tra i radiotelescopi, riducendo drasticamente il diametro di diffrazione e aumentando in pari misura la risoluzione spaziale, ovvero la capacità di individuare dettagli in una sorgente estesa come il disco di accrescimento.

particella o di un piccolo oggetto (p.e. un asteroide) nei pressi di un attrattore gravitazionale (p.e. la Terra o il Sole) la cui gravità, non particolarmente intensa, può essere descritta secondo la classica formula newtoniana.

Si consideri un oggetto di massa m che si muove verso l'attrattore di massa $M \gg m$ provenendo da una grande distanza. Com'è noto, la sua energia totale E è data dalla somma dell'energia potenziale⁴ $U = -GMm/r$ (dove G è la costante gravitazionale e r è la distanza dell'oggetto dal centro dell'attrattore) e dell'energia cinetica $T = 0,5mv^2$ (dove v è la velocità dell'oggetto). Durante il tragitto T e U variano, ma l'energia totale $E = T+U$ non cambia. U , con il suo segno negativo, rappresenta l'energia gravitazionale che lega m a M . Per riuscire a svincolare l'oggetto dalla morsa gravitazionale dell'attrattore e spostarlo a distanza formalmente infinita è necessario fornirgli un'energia positiva che sia superiore al modulo di U (cioè $|U|$, il valore di U preso col segno più). Se, pertanto, l'energia cinetica è $T > |U|$, e quindi $E = T+U > 0$, l'oggetto si avvicinerà all'attrattore ma riuscirà poi allontanarsi indefinitamente. Se, al contrario, si ha $E < 0$, l'oggetto è destinato a rimanere "agganciato" all'attrattore e ad orbitargli attorno.

È possibile approfondire in parte questi concetti senza addentrarsi nelle complesse equazioni che regolano il problema dei due corpi che stiamo considerando. Innanzi tutto notiamo che è sempre possibile scomporre la velocità in una componente radiale v_r ed una componente ortogonale a questa: le due componenti sono legate dall'usuale relazione $v^2 = v_r^2 + v_\perp^2$ dettata dal teorema di Pitagora (si veda il pannello superiore di FIG. 6). Sottolineiamo poi che c' è anche un'altra grandezza che rimane costante lungo tutta la traiettoria: il momento angolare⁵ $\ell = mrv_\perp$. Questo ci permette di riscrivere l'energia totale nel seguente modo (in quel che segue abbiamo posto che la massa della particella sia unitaria, p.e. $m = 1$ g oppure $m = 1$ kg, a seconda del sistema di unità scelto; pertanto le energie e il momento angolare devono intendersi per unità di massa):

⁴ Per i lettori con qualche nozione di analisi matematica ricordiamo che l'energia potenziale di una particella di massa m posta alla distanza r_0 da un attrattore di massa M rappresenta l'energia necessaria per portare tale particella all'infinito, ossia il lavoro compiuto lungo tale tragitto contro la forza di gravità F_g . Per un piccolo spostamento dr il lavoro compiuto (Forza \times spostamento) è $d\mathcal{L} = -F_g dr$ (il segno meno è dovuto al fatto che lo spostamento è verso l'esterno mentre la forza è diretta verso il centro). Per calcolare il lavoro fino all'infinito è necessario calcolare l'integrale

$$\int_{r_0}^{\infty} d\mathcal{L} = - \int_{r_0}^{\infty} \frac{GMm}{r^2} dr = - \frac{GMm}{r_0}$$

⁵ Un classico esempio di conservazione del momento angolare è dato dalla pattinatrice che, avvicinando le braccia al corpo (riducendo r) aumenta la velocità di rotazione su se stessa (v_\perp) perché il prodotto rv_\perp rimane costante.

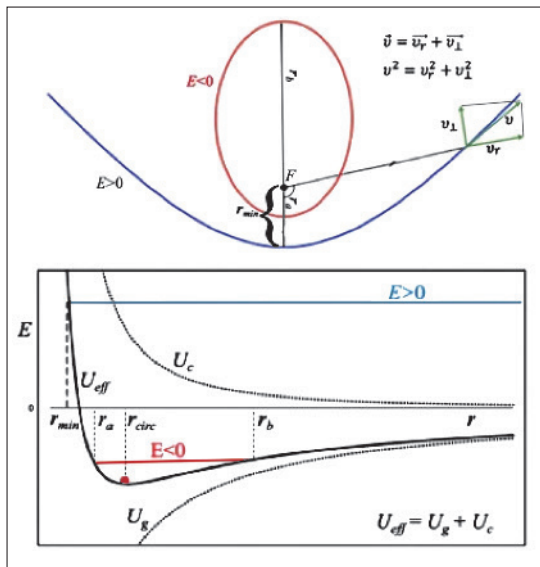


FIG. 6. Pannello superiore: possibili traiettorie di un oggetto sottoposto all'azione gravitazionale di un attrattore posto in F . Se l'oggetto è dotato di energia negativa non riesce a svincolarsi dall'attrattore e vi ruota attorno seguendo un'orbita ellittica. Se invece è dotato di energia positiva, pur risentendo dell'azione gravitazionale dell'attrattore che ne deflette la traiettoria, riesce ad allontanarsi indefinitamente, ed è slegato gravitazionalmente dall'attrattore stesso. Pannello inferiore: a dispetto delle apparenze, l'interpretazione di questa figura è alquanto semplice. La linea spessa nera rappresenta l'andamento radiale del potenziale efficace U_{eff} ed è dato dalla somma del potenziale gravitazionale U_g e centrifugo U_c , entrambi raffigurati dalle curve punteggiate. La linea rossa rappresenta l'energia totale negativa di un oggetto "intrappolato" all'interno della buca di potenziale e costretto a muoversi lungo un'orbita che lo porta a distanze dall'attrattore comprese tra r_a e r_b (si veda il pannello superiore). La pallina rossa in fondo alla buca rappresenta un oggetto con la minima energia (a parità di momento angolare) che rimane sempre a distanza r_{circ} dall'attrattore, e la cui traiettoria è dunque circolare. La linea blu rappresenta invece l'energia totale positiva di un oggetto che è in grado di allontanarsi indefinitamente, ma non può avvicinarsi all'attrattore a distanze inferiori di r_{min} a causa della barriera centrifuga (si veda il pannello superiore). Si noti che le linee rossa e blu sono orizzontali perché l'energia di un oggetto rimane costante lungo la traiettoria, e quindi non dipende da r . I lettori più accorti avranno notato che nel pannello superiore $r_{min} > r_a$. Questo significa che l'oggetto che percorre la traiettoria blu ha un momento angolare maggiore rispetto a quello orbitante lungo l'ellisse; se infatti avesse un momento angolare uguale si avrebbe $r_{min} < r_a$, come si vede nel pannello inferiore.

$$E = \frac{1}{2}v^2 - \frac{GM}{r} = \frac{1}{2}v_r^2 + \frac{1}{2}v_t^2 - \frac{GM}{r}, \quad (1)$$

$$= \frac{1}{2}v_r^2 + \frac{1}{2}\frac{\ell^2}{r^2} - \frac{GM}{r} = \frac{1}{2}v_r^2 + U_{eff}$$

dove il potenziale effettivo è definito come

$$U_{eff} = \frac{1}{2}\frac{\ell^2}{r^2} - \frac{GM}{r}. \quad (2)$$

Dunque il potenziale effettivo cui è sottoposta la particella è composto dall'usuale termine attrattivo (negativo) dovuto alla gravità, e da un termine

repulsivo (positivo) dovuto alla forza centrifuga che insorge al ruotare della particella attorno all'attrattore. Data la diversa dipendenza da r , man mano che la particella si avvicina all'attrattore quest'ultimo termine prevale e impedisce alla particella di raggiungere $r = 0$ (eccetto il caso in cui la particella si avvicini lungo una traiettoria perfettamente radiale, nel qual caso il momento angolare è nullo e la barriera centrifuga è assente). Nel caso in cui l'energia totale sia positiva l'oggetto proveniente da grandi distanze si avvicina fino ad una distanza r_{min} per poi allontanarsi di nuovo a grandi raggi senza cadere sull'attrattore, a meno che questo non abbia un raggio maggiore di r_{min} . Se invece l'oggetto ha un'energia $E < 0$, esso rimane intrappolato nella buca di potenziale e segue un'orbita ellittica muovendosi da una distanza minima r_a ad una massima r_b ; neanche in questo caso l'oggetto cade sulla superficie dell'attrattore, a meno che quest'ultimo non abbia un raggio maggiore di r_a . La FIG. 6 illustrante l'andamento radiale di U_{eff} e i diversi tipi di traiettorie risulta particolarmente utile per chiarire i concetti appena esposti.

Passiamo ora ad esaminare cosa succede agli oggetti in orbita nei pressi di un buco nero. Prima di farlo, però, è necessario definire il concetto di raggio di Schwarzschild che caratterizza ogni oggetto gravitante. Consideriamo il caso in cui una particella sia posta sulla superficie dell'attrattore, e dotata quindi di un'energia potenziale $U = -GMm/R$, dove R è il raggio dell'attrattore stesso. Per poter lanciare la particella nello spazio senza che faccia più ritorno, è necessario – per quanto detto più sopra – fornirle un'energia cinetica $T \geq |U|$, ossia una velocità $v \geq (2GM/R)^{0.5}$, detta velocità di fuga (si noti che questa velocità non dipende da m , ma solo da M : per la Terra essa vale circa 11 km/s). Risulta chiaro che se l'attrattore è particolarmente compatto (se cioè R è molto piccolo) la velocità di fuga può crescere fino a raggiungere o superare c , la velocità della luce. Data la definizione di velocità di fuga, questo avviene se l'attrattore ha un raggio pari o inferiore a $R_s = 2GM/c^2 \sim 3(M/M_\odot)$. Questo raggio è detto raggio di Schwarzschild. Da oggetti con dimensioni inferiori a R_s nulla può fuoriuscire – neanche la luce – perché la velocità di fuga è superiore a c , la massima velocità raggiungibile in natura. Per questo motivo questi oggetti sono detti buchi neri.

È facile verificare che alla distanza del raggio di Schwarzschild abbiamo $GMm/R_s = 0,5mc^2$, ossia l'energia potenziale di una particella calcolata classicamente è dell'ordine dell'energia associata alla sua massa secondo la nota formula di Einstein $\epsilon = mc^2$. Questo fatto ci segnala che i fenomeni nei dintorni di un buco nero avvengono in regime relativistico e non possono essere descritti dalla gravità newtoniana, ma piuttosto dalla teoria della relati-

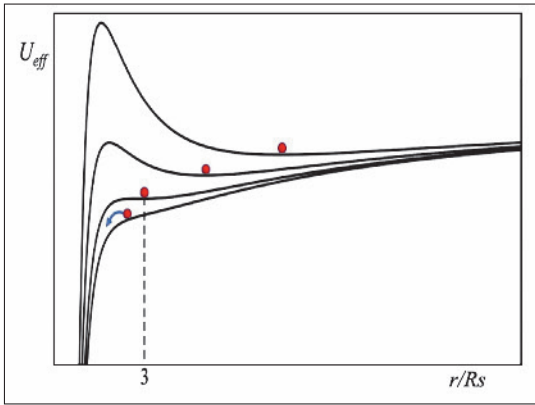


FIG. 7. Profili radiali del potenziale effettivo di un buco nero per valori decrescenti del momento angolare (a partire dall'alto). Come nel caso classico, le palline rosse indicano oggetti con la minima energia possibile, e dunque posti nel fondo (locale) della buca di potenziale e dotati perciò di orbite circolari. Il terzo profilo è dato dall'ultimo possibile valore di ℓ che dà luogo ad un'orbita circolare stabile con $r = 3R_s$. Ad ℓ minori non esistono orbite stabili (si consideri l'ultimo profilo di U_{eff} dove manca una "buca" in cui poter collocare stabilmente una pallina senza che questa rotoli giù verso il centro). A differenza del caso classico, manca una barriera centrifuga che tenda ad infinito, ma è presente solo un picco di altezza limitata. Dunque, particelle con energia sufficiente possono superare il picco e cadere nel buco nero. In conclusione, il buco nero è in grado di catturare sia particelle dotate di momento angolare con alta energia, sia particelle con basso (ma non nullo) momento angolare.

vità generale di Einstein. Noi ovviamente ci asterremo dal farlo, ma daremo direttamente il risultato finale che è assai simile al risultato classico – si veda l'eq. (1) – se si esclude la presenza di un terzo termine nella espressione di U_{eff} (in realtà in questo caso i concetti di energia totale e distanza radiale andrebbero utilizzati con maggiore cautela, ma noi non lo faremo in questa sede)

$$U_{\text{eff}} = \frac{1}{2} \frac{\ell^2}{r^2} - \frac{GM}{r} - \frac{GM\ell^2}{c^2 r^3}.$$

Come si vede, anche questo nuovo termine è legato al momento angolare, ma, contrariamente al primo, è preceduto dal segno negativo e contribuisce quindi ad esercitare un'attrazione come il termine gravitazionale. Per una comprensione intuitiva di questo comportamento – opposto a quello repulsivo classico – dobbiamo considerare che l'energia legata al moto rotatorio attorno al buco nero contribuisce ad aumentare la massa della particella secondo la solita formula $\varepsilon = mc^2$, e questo aumenta la gravità che agisce su di essa.

La FIG. 7 mostra l'andamento radiale di U_{eff} nel caso relativistico per diversi valori di ℓ . Un paragone con la FIG. 6 illustra il ruolo giocato dal termine attrattivo relativistico collegato al momento angolare. Ora la barriera centrifuga non si erge fino all'infinito per r che tende a 0, ma si limita a raggiungere un picco che è tanto minore quanto mino-

re è ℓ . Questo fa sì che, contrariamente al caso classico, oggetti in avvicinamento con alta energia (superiore al picco di U_{eff}) sono in grado di raggiungere $r = 0$ anche se dotati di momento angolare. Un secondo aspetto che merita di essere evidenziato è che oggetti con un momento angolare inferiore ad un determinato valore critico (ma comunque diverso da zero) non sono in grado di orbitare stabilmente attorno al buco nero ma vengono risucchiati inevitabilmente da quest'ultimo. Dalla FIG. 7 impariamo che l'ultima orbita circolare stabile ha un raggio pari a $3R_s$. Orbite circolari con $r < 3R_s$ sono instabili e la particella precipita rapidamente verso il buco nero.

Quanto detto finora per l'orbita di una particella materiale vale qualitativamente anche per la traiettoria di un fotone. In questo caso, tuttavia, l'orbita circolare più vicina possibile ha raggio $1,5R_s$ invece che $3R_s$. Inoltre, quest'orbita è instabile e il fotone, dopo aver compiuto uno o più giri lungo essa, l'abbandona e spiraleggia verso il centro oppure verso l'esterno. La sfera ideale di raggio $1,5R_s$ centrata sul buco nero viene detta "sfera di luce" o "sfera fotonica".

Tutto questo ha importanti conseguenze dal punto di vista osservativo. Un fotone che si trovi ad una distanza compresa nell'intervallo $R_s < r < 1,5R_s$ è destinato a spiraleggiare nel buco nero (se si esclude il caso, statisticamente poco probabile, che la sua traiettoria abbia una direzione sostanzialmente radiale). Di conseguenza, l'area di sfera celeste occultata dal buco nero non è semplicemente un disco di raggio R_s , come si sarebbe portati a credere, ma è dovuta alla sfera di luce le cui dimensioni appaiono inoltre magnificate ad un osservatore distante, a causa della distorsione dei raggi luminosi ad opera della gravità del buco nero (tutto questo è illustrato in FIG. 8). I calcoli mostrano che l'area di sfera celeste coperta dal buco nero è un disco di raggio $2,6R_s$. Questa zona scura da cui non può provenire alcuna radiazione è detta "ombra" del buco nero (naturalmente, se vi sono sorgenti luminose tra il buco nero e l'osservatore, esse saranno visibili a quest'ultimo).

Questo punto è importante per l'interpretazione dell'immagine del buco nero divulgata di recente. Questa immagine mostra un buco nero su cui si sta riversando non una singola particella ma una gran quantità di gas catturato dall'ambiente circostante. E in verità ciò che si osserva non è il buco nero – il quale, per definizione, è invisibile – ma proprio questo gas che spiraleggia verso di lui lungo un disco di accrescimento. Per quanto abbiamo detto, la zona scura centrale non indica l'orizzonte degli eventi ma l'ombra del buco nero.

Concludiamo questa nota attirando l'attenzione sul meccanismo di accrescimento di gas da parte del buco nero. A causa del momento angolare che

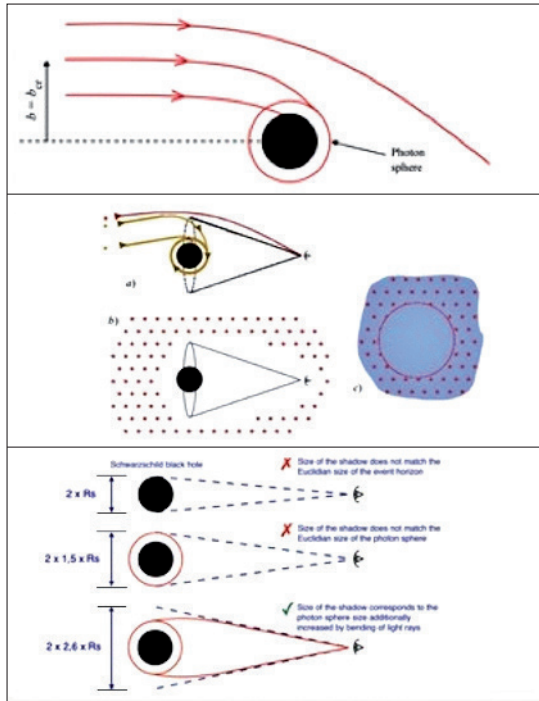


FIG. 8. Fenomeno della “sfera di luce” (o “sfera fotonica”) e dell’“ombra” del buco nero. Pannello superiore: immaginiamo un fascio di raggi luminosi in viaggio verso il buco nero. I raggi con un parametro di impatto (il segmento b nella figura) maggiore di un certo valore $b_{cr} = 2,6R_s$ sono in grado, pur deviando dalla loro traiettoria originale, di allontanarsi dal buco nero. I raggi con $b < b_{cr}$ sono indotti a spiraleggiare attorno al buco nero fino a precipitare oltre l’orizzonte degli eventi (evidenziato dal disco nero). I fotoni con $b = b_{cr}$ assumono un’orbita circolare intorno al buco nero che definisce la cosiddetta sfera di luce con raggio $1,5R_s$. Quest’orbita, tuttavia, è instabile e i fotoni sono destinati ad allontanarsi definitivamente o a cadere oltre l’orizzonte degli eventi. Pannello intermedio: illustrazione di un cono di vista all’interno del quale è precluso per l’osservatore distante l’arrivo di raggi luminosi emessi alle spalle del buco nero (la luce proveniente dalle stelle gialle non raggiunge l’osservatore: il raggio giallo superiore entra in orbita lungo la sfera di luce, mentre quello inferiore l’attraversa e cade direttamente nel buco nero). Come si vede, il disco oscuro che appare all’osservatore ha dimensioni maggiori dell’orizzonte degli eventi perché i raggi che attraversano la sfera di luce sono destinati ad essere inghiottiti dal buco nero. Il pannello in basso riassume questi concetti evidenziando che tale disco ha un diametro maggiore non solo dell’orizzonte degli eventi, ma anche della sfera di luce, a causa della distorsione dello spazio (e relativa deflessione dei raggi luminosi). Questo disco oscuro è detto ombra del buco nero.

questo gas ragionevolmente possiede, la caduta non avviene radialmente ma, come abbiamo già sottolineato, il gas ruota attorno al buco nero formando un disco di accrescimento. È istruttivo considerare il fatto che, in linea di principio, a causa della con-

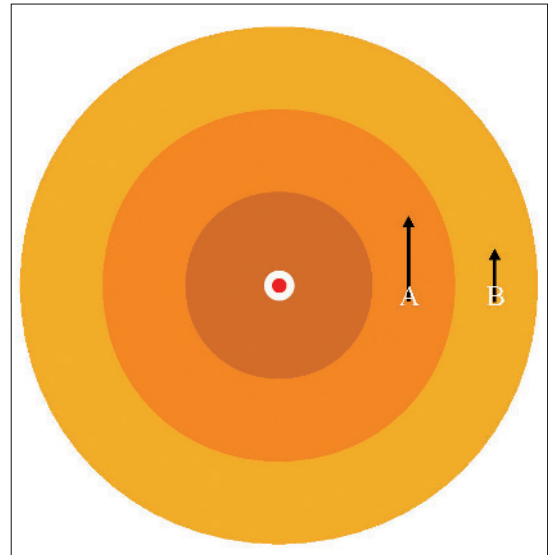


FIG. 9. Meccanismo di trasferimento del momento angolare che permette al gas di cadere nel centro. Immaginiamo di dividere il disco di accrescimento in un numero di anelli concentrici. L’anello A ruota più velocemente dell’anello B. L’attrito (ossia la viscosità) tra i due tende a far rallentare A ed accelerare B. Pertanto, l’anello A si stringe verso il centro mentre l’anello B tende ad espandersi, a meno che non venga rallentato da un anello C, a sua volta rallentato da un anello D, e così via (si veda il testo).

servazione del momento angolare, il gas non potrebbe cadere nel centro (in base a quanto detto a commento dell’eq. (2)). Immaginiamo di dividere idealmente il disco in una serie di anelli concentrici; ognuno di questi anelli ruota in maniera stabile giacché per ognuno la forza di gravità è bilanciata da quella centrifuga, proprio come accade con le orbite planetarie attorno al Sole. Ora, proprio come avviene per i pianeti, gli anelli più distanti ruotano più lentamente.⁶ Tuttavia, il gas possiede una sua viscosità dovuta alla presenza di turbolenze e campi magnetici. Questa viscosità agisce da attrito e gli anelli più interni rallentano perché frenati da quelli esterni più lenti con cui sono a contatto (FIG. 9). La riduzione di velocità porta ad una riduzione della forza centrifuga e ad una conseguente prevalenza di quella gravitazionale; ogni elemento di gas, pertanto, spiraleggia attorno al buco nero fino a cadervi dentro.

⁶ Per un pianeta in orbita stabile attorno al Sole (assunta circolare per semplicità), l’accelerazione gravitazionale e quella centrifuga si bilanciano: $GM/r^2 = v^2/r$. Si ottiene pertanto $v \propto r^{0,5}$, a dimostrazione di quanto affermato nel testo, ossia che i pianeti più distanti si muovono più lentamente.

Annibale D’Ercole si è laureato in Fisica all’Università di Roma “La Sapienza”. Astronomo associato presso l’INAF · Osservatorio di astrofisica e scienza dello spazio di Bologna (OAS), si occupa di simulazioni numeriche di idrodinamica, applicate alle nebulose e al gas interstellare delle galassie. È autore di numerosi articoli divulgativi pubblicati presso questa e altre riviste.