

Unità didattica 3

L'anatomia di un Buco Nero

Dalla fantascienza alla realtà

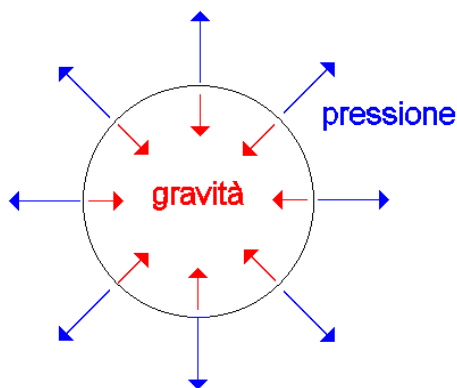
I Buchi neri sono gli oggetti più enigmatici dell'universo ma stranamente sono anche gli oggetti celesti che più affascinano il pubblico. Molto spesso gli scrittori di fantascienza hanno inserito i buchi neri nei loro romanzi o nella sceneggiatura di un film, perché, erroneamente, li consideravano una porta per un altro universo o un'altra dimensione.

Lasciamo perdere la fantascienza, vediamo che cos'è un buco nero.

Naturalmente una completa descrizione di un buco nero è possibile solo attraverso la teoria della Relatività generale formulata nel 1915 dal fisico Albert Einstein, ma prima di addentrarci in una descrizione così complicata cerchiamo di capire perché esistono i buchi neri.

Il buco nero è una stella collassata, l'affermazione sembra assurda perché noi siamo abituati a vedere le stelle brillare nel cielo, anche il Sole è una stella ma non è un

buco nero. Che cosa caratterizza una stella come il Sole?



Una stella è una sfera di gas incandescenti mantenuta in equilibrio dalla forza di gravità che tende a comprimerla e dalla pressione esercitata dal gas stesso verso l'esterno e che tende ad espandere la stella. Questo equilibrio è mantenuto dalle reazioni nucleari al

centro della stella che forniscono l'energia necessaria affinché i gas rimangano caldi a sufficienza per contrastare la forza di gravità. Questo succede perché la pressione di

un gas è proporzionale alla temperatura e inversamente proporzionale al volume occupato:

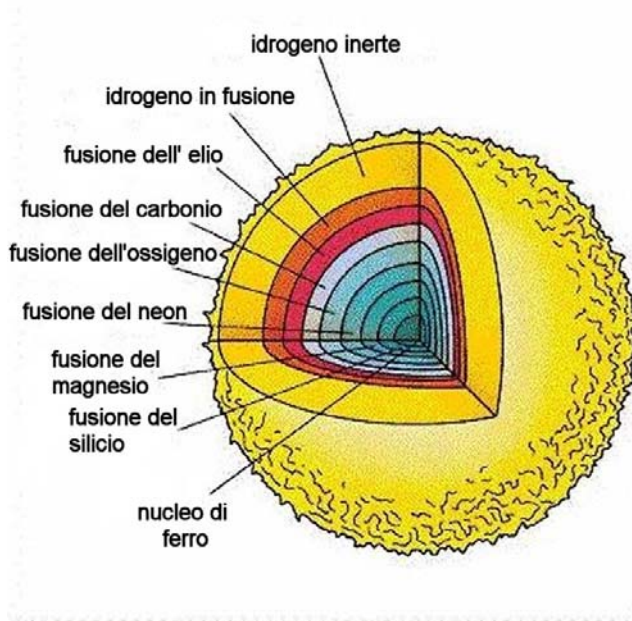
$$P = k \frac{T}{V}$$

Dove P è la pressione, V il volume del gas e T la temperatura e k la costante dei gas. Quindi la sfera di gas si comprime sotto l'azione della forza gravitazionale fino a quando la combinazione tra la riduzione di volume e l'aumento di temperatura del gas provocano una pressione in grado di equilibrare l'azione gravitazionale. Il sistema diventa stabile e lo sarà finché ci sarà combustibile all'interno della stella in grado da mantenere il tasso di produzione energetico necessario. Il combustibile di una stella è l'idrogeno, ma cosa succede se la stella esaurisce questo combustibile?

Nel nucleo prevale la forza di gravità e collassa su se stesso fino al raggiungimento delle temperature necessarie alla realizzazione di altre reazioni nucleari più energetiche, ad esempio la fusione dell'elio in carbonio; la principale conseguenza è un cambiamento delle condizioni di equilibrio della stella che si trasforma in una gigante rossa. Il nucleo di una stella del genere diventa degenere, cioè la pressione del gas non dipende più dalla temperatura (e quindi dalla reazione che avviene) ma dalla densità con una legge tipica:

$$P = kd^a$$

Qui d è la densità del gas mentre a è detto coefficiente politropico e indica rispetto a quale esponente della densità si ha proporzionalità tra pressione e densità del gas. In queste condizioni il parametro più importante è la massa della stella, infatti stelle di taglia solare terminano la loro esistenza in una nebulosa planetaria con al centro una nana bianca residuo del nucleo stellare mentre, stelle più massicce sono destinate a produrre elementi sempre più complessi attraverso una catena di reazioni che avvengono nel nucleo; prima attraverso la fusione dell'ossigeno in neon poi con fusione del neon in magnesio che successivamente fonderà producendo silicio.



La struttura della stella diventa una struttura a gusci con elementi sempre più pesanti verso il centro della stella; ogni elemento fonde in un elemento più pesante che precipita verso il centro. La stella è diventata una supergigante, al suo centro avviene la fusione del silicio nel ferro. Il ferro è l'elemento più stabile, quello con la maggior energia di legame, quindi qualsiasi evento di fusione o fissione del ferro sarà endoenergetico¹

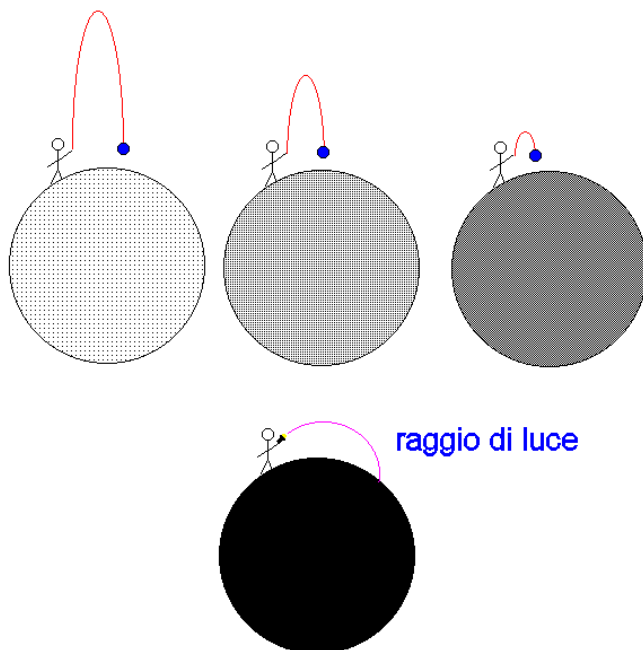
sottraendo energia alla struttura della stella. Esaurito il silicio la stella si comprime, il ferro però non può fondere spontaneamente, i nuclei di ferro si spaccano e assorbono energia al sistema che viene compresso dalla gravità. Negli strati esterni tale compressione favorisce un tasso di reazioni così elevato da produrre una notevole quantità di energia che fa esplodere la stella, è l'evento di supernova.

Ma a noi interessa il nucleo, infatti se il nucleo della stella ha una massa inferiore a 3,12 quella del sole ma superiore a 1,4 masse solari la pressione dovuta ai neutroni residui riesce a contrastare la gravità quanto la stella raggiunge le dimensioni di qualche decina di km, nasce così una stella di neutroni come la pulsar nella nebulosa del Granchio o Geminga nella costellazione dei Gemelli. Il limite di 3,12 masse solari, studiato dagli astrofisici Volkov e Oppenheimer rappresenta un limite in cui nessuna pressione è in grado di contrastare la forza di gravità e il collasso prosegue all'infinito. Nasce il buco nero!

¹ Una reazione è endoenergetica quando richiede la fornitura di energia per avvenire

Le stelle nere di Michell e Laplace

Sebbene soltanto da poco più di tre decenni l'uomo è riuscito ad osservare il cielo nei raggi X e gamma l'idea balzana di buco nero è piuttosto vecchia. Nel 1784 John Michell arrivò alla conclusione che riducendo le dimensioni della Terra i sassi lanciati verso l'alto avrebbero raggiunto una quota più bassa. Michell ipotizzò l'esistenza di stelle così piccole che anche la luce sarebbe stata costretta a tornare



sulla superficie e per tale motivo le chiamò stelle nere. La stella nera di Michell non è l'attuale buco nero, infatti Michell visse più di un secolo e mezzo prima di Einstein e riteneva che un oggetto con velocità superiore a quella della luce² potesse fuggire da una stella nera.

Contemporaneamente il fisico francese Laplace, utilizzando le leggi di gravitazione universale di Isaac Newton, arrivò matematicamente alle stesse conclusioni dimostrando

come la velocità di fuga da un corpo celeste crescesse con la riduzione del raggio di quest'ultimo:

$$v_f = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Dove R è il raggio e M è la massa. Laplace notò che se un oggetto avesse avuto un raggio inferiore a:

² Oggi sappiamo che nessuna forma di energia, quindi anche la materia, non può muoversi con una velocità superiore in modulo a quella della velocità della luce nel vuoto.

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

detto raggio di Schwarzschild, la luce non sarebbe stata in grado di sfuggire da esso.

Esercizio 1

L'alunno compili la tabella calcolando la velocità di fuga dai seguenti corpi celesti facendo uso della formula ricavata da Laplace ($G=6,667 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$)

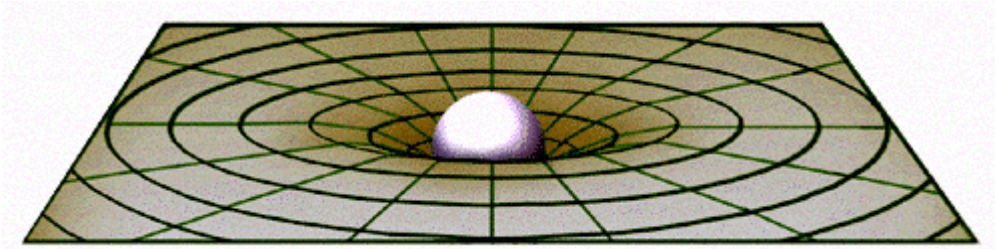
Astro	Massa	raggio	Velocità di fuga
Sole	$2 \times 10^{30} \text{ kg}$	$6,96 \times 10^8 \text{ m}$	
Terra	$5,9 \times 10^{24} \text{ kg}$		11200 m/s
Deneb	$5 \times 10^{31} \text{ kg}$	$2,8 \times 10^{10} \text{ m}$	
Giove	$2 \times 10^{27} \text{ kg}$	$6 \times 10^7 \text{ m}$	
Antares	$3 \times 10^{31} \text{ kg}$	$2,1 \times 10^{11} \text{ m}$	
Nana Bianca	$2 \times 10^{30} \text{ kg}$	$1 \times 10^7 \text{ m}$	
Stella di neutroni		$2 \times 10^4 \text{ m}$	$1,5 \times 10^8 \text{ m/s}$

Esercizio 2

L'allievo calcoli il raggio di Schwartzschild dei seguenti corpi celesti ($G=6,667 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$, $c=3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$):

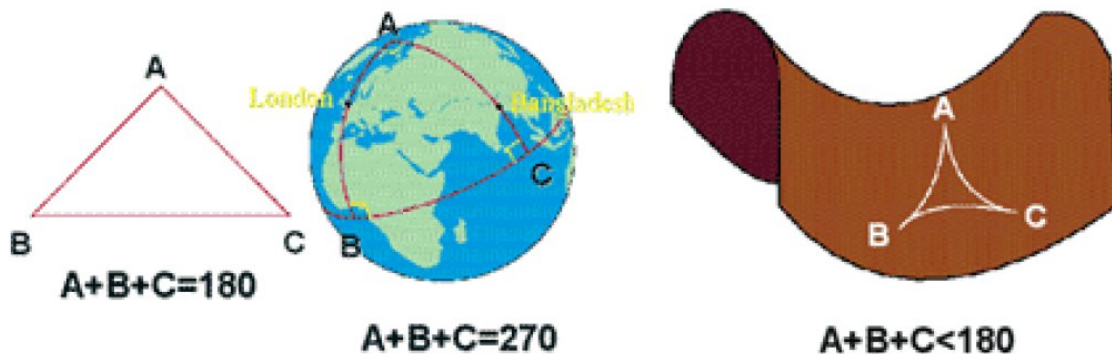
astro	massa	Raggio di Schwartzschild
Sole	$2 \times 10^{30} \text{ kg}$	
Terra	$5,9 \times 10^{24} \text{ kg}$	
Deneb	$5 \times 10^{31} \text{ kg}$	
Giove	$2 \times 10^{27} \text{ kg}$	
Antares	$3 \times 10^{31} \text{ kg}$	
Nana Bianca	$2 \times 10^{30} \text{ kg}$	
Stella di neutroni	$3,2 \times 10^{30} \text{ kg}$	
Centro galattico	$5 \times 10^{38} \text{ kg}$	
Luna	$3 \times 10^{22} \text{ kg}$	

Einstein ci viene in soccorso



Nel 1915 il fisico tedesco Albert Einstein formulò la teoria della Relatività Generale, la più completa teoria della gravitazione attualmente disponibile. In quegli anni, mentre in Europa imperversava la prima guerra mondiale, il giovane scienziato fisico tedesco Carl Schwartzschild, prima di prendere servizio al fronte, lesse gli articoli di Einstein ed intuì che la nuova teoria avrebbe modificato notevolmente le nostre idee a riguardo delle stelle nere³.

In breve la teoria della relatività generale affermava che l'universo era costituito da una struttura chiamata spaziotempo. Quando lo spaziotempo è piatto il teorema di Pitagora è verificato perché i coefficienti dei quadrati di un triangolo rettangolo sono unitari, uno spaziotempo siffatto è detto spaziotempo di Minkowsky in onore al matematico russo che per primo lo ha studiato.

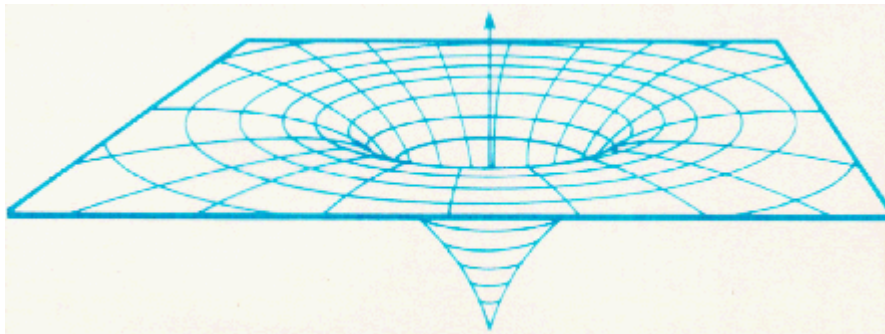


In uno spaziotempo curvo il teorema di Pitagora non è più verificato, consideriamo infatti un triangolo, come sappiamo dalla geometria elementare di Euclide la somma degli angoli interni è di 180° , quindi un triangolo rettangolo ha un solo angolo retto ed una sola ipotenusa; in uno spazio curvo, come la superficie della Terra, possiamo costruire anche un triangolo con tre angoli retti. In pratica se la curvatura è positiva il

³ Il termine buco nero venne proposto soltanto nel 1969 da sir John Archibald Wheeler.

triangolo presenterà una somma degli angoli interni maggiore di 180° mentre in uno spazio a curvatura negativa, come la superficie di una sella di cavallo, la somma degli angoli interni sarà inferiore a 180° .

L'ipotesi di Einstein, che poi si verificò veritiera, è che l'energia, e quindi anche la massa⁴, incurvano lo spaziotempo. Per chiarire le idee possiamo immaginare lo spaziotempo come una membrana elastica, se su di essa posiamo una palla di metallo la membrana si incurva sotto l'azione del peso esercitato dalla sfera di metallo. Tra i postulati della relatività ve ne è uno che afferma che nessuna informazione e nessuna forma di energia può trasmettersi attraverso lo spazio tempo ad una velocità superiore a quella della Luce. Quindi se una stella collassa oltre il raggio di Schwarzschild diventerà inaccessibile per qualunque osservatore esterno; in pratica mentre prima il raggio di Schwarzschild caratterizzava le dimensioni di una stella nera ora è il raggio di una sfera immaginaria all'interno della quale nulla è accessibile dall'esterno. Un osservatore posto all'interno del raggio di Schwarzschild riceverà informazioni su tutto ciò che avviene all'esterno, mentre un osservatore esterno non potrà sapere nulla di ciò che avviene all'interno.



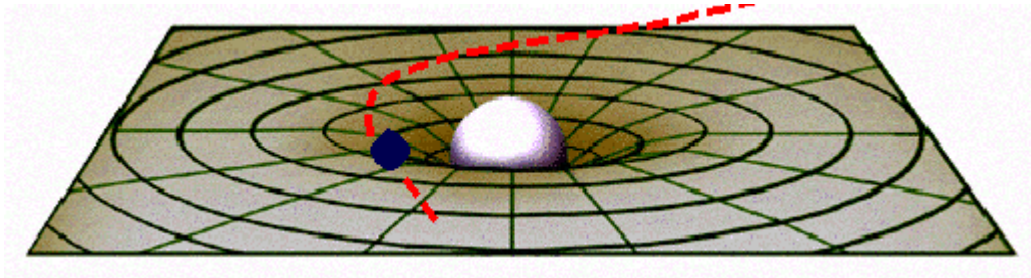
In realtà il buco nero, così nel 1968 sir John Arcibald Wheeler battezzò le stelle completamente collassate, ci da qualche informazione: in primo luogo all'esterno risentiamo dell'attrazione gravitazionale del buco nero dalla quale possiamo ricavare informazioni sulla sua massa; inoltre possiamo misurare anche il momento angolare perché il buco nero si trascina con se nella rotazione lo spaziotempo circostante.

Torniamo alla nostra idea di membrana, per fissare meglio le nostre idee su un buco nero leghiamo la nostra membrana su un telaio da cucito e muniamoci di uno spillo.

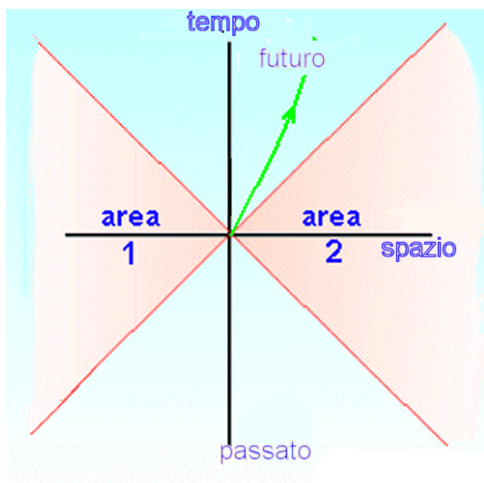
⁴ La massa è una particolare forma di energia: $E=mc^2$

Ora buchiamo al centro la membrana e tiriamo verso il basso lo spillo in modo che la capocchia sferica dello spillo faccia pressione sulla membrana producendone una curvatura. Se aumentiamo la forza ad un certo punto la membrana cede e si lacera lasciando passare la capocchia dello spillo: abbiamo fatto un buco nero! Esatto un buco nero è una lacerazione dello spaziotempo.

L'universo a membrana



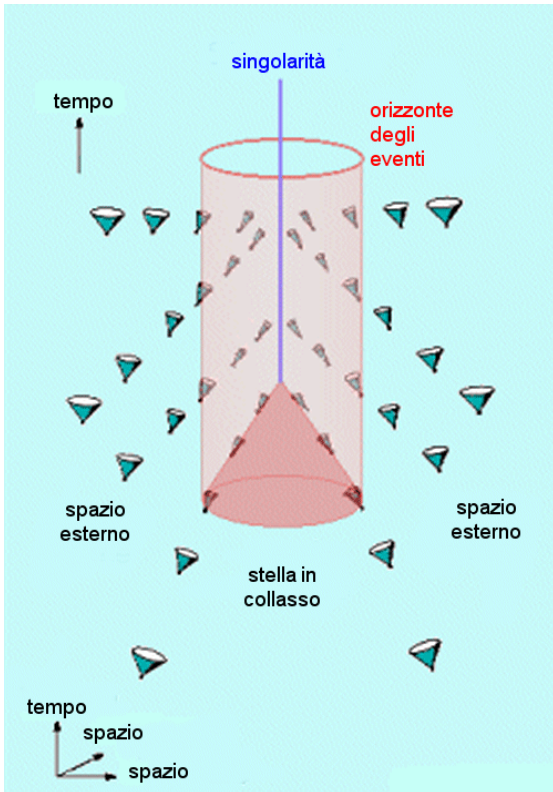
Sembra strano, ma l'universo è costituito da una membrana che si piega sotto l'azione dell'energia, è la curvatura di questa membrana che obbliga le masse a seguire un certo moto nello spazio. Nell'equazione di Einstein c'è in relazione la curvatura che, definisce lo stato del moto delle masse, con le masse stesse che producono la curvatura. In pratica le masse producono un fenomeno che gestisce il moto delle sorgenti stesse. In realtà non solo le masse sono soggette alla curvatura,



ma anche la luce e il tempo. Prendiamo in considerazione il diagramma a lato, nell'origine è posta una sorgente luminosa, tutte le velocità vengono confrontate con quella della luce. Un raggio di luce percorre esattamente le bisettrici dei quattro quadranti costruendo due coni, il cono del passato in cui sono contenuti tutti gli eventi passati dei quali un osservatore posto sulla sorgente ha potuto a venirne a conoscenza e il cono del futuro contenente tutti gli eventi futuri.

Un'astronave che parte dalla sorgente non può uscire da tale cono perché non può superare la velocità della luce. Gli osservatori posti nella regioni arancione non sono a conoscenza della sorgente perché non è passato tempo a sufficienza affinché la luce

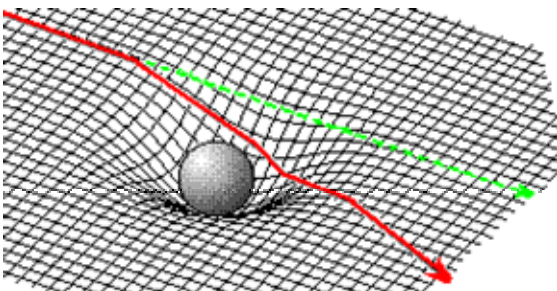
emessa dalla sorgente potesse raggiungere questi osservatori. Avvicinandosi al raggio di Schwarzschild di un buco nero i coni di luce diventano sempre più stretti a causa del rallentare dello scorrere del tempo.



Anche lo spazio si incurva orientando i coni di luce verso il centro del buco nero, sul raggio di Schwarzschild, detto anche orizzonte degli eventi perché tutti gli eventi interni ad esso sono inaccessibili per un osservatore esterno, la parete esterna del cono è verticale indicando che ogni oggetto in moto su tale orizzonte è destinato a cadere sul buco nero.

Poiché la direzione dei coni di luce è differente in prossimità del buco nero rispetto a quelli in lontananza dobbiamo aspettarci che anche la luce sia costretta a muoversi seguendo la curvatura dello spaziotempo, ciò ha come

effetto che un raggio di luce radente ad una massa subisce una deflessione.



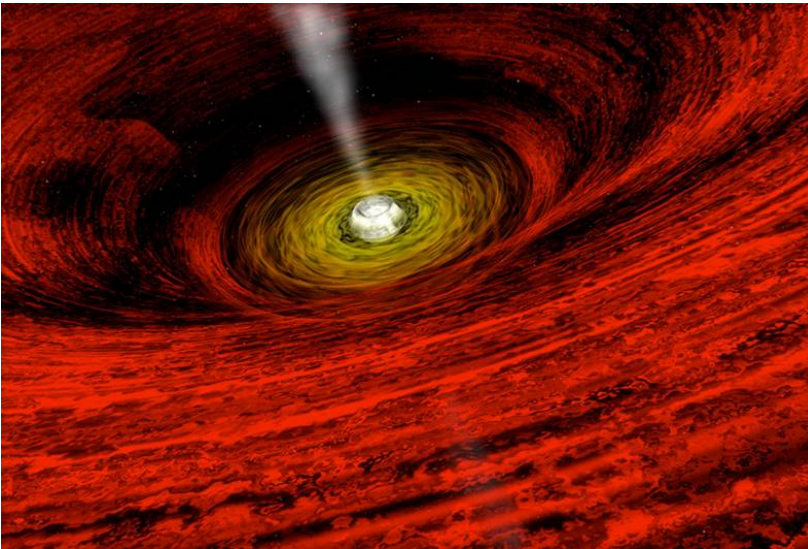
Tale intuizione permise ad Einstein di proporre un esperimento in cui si cercava di misurare la deflessione dei raggi luminosi delle stelle radenti al Sole, l'esperimento venne effettuato nel 1918 dal Brasile

dall'astrofisico Sir Arthur Eddington che osservò lo scostamento previsto da Einstein durante un'eclissi totale di Sole.

Buchi neri elusivi contro scienziati furbi

Ma i buchi neri sono proprio neri? Non potendo viaggiare nel cosmo fino a distanze così elevate come è possibile studiare un buco nero se questo non emette radiazione da renderlo osservabile a grandi distanze?

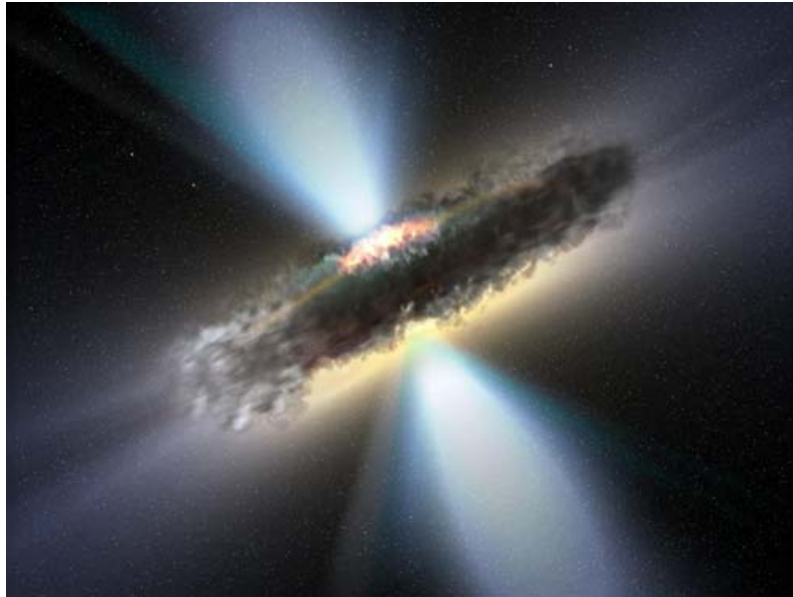
Sebbene i buchi neri siano gli oggetti più elusivi del cosmo gli scienziati non si sono dati per vinti. Studi teorici piuttosto complessi hanno permesso di concludere che i buchi neri sono oggetti rotanti perché nascono dal collasso di un corpo rotante; questa struttura comporta che il materiale cade all'interno percorrendo una spirale. Il gas, cadendo a spirale, forma un disco caldo detto disco di accrescimento. È dall'emissione dal disco di accrescimento che gli astrofisici possono stanare il “mostro” centrale che è la causa del disco stesso.



Il gas, mentre precipita verso l'interno, rilascia la sua energia potenziale e si riscalda per attrito, nella parte esterna possiamo avere temperature di qualche migliaio di °K mentre nelle regioni centrali la temperatura sale fino a

milioni e centinaia di milioni di gradi rendendo questi dischi di accrescimento forti emettitori di raggi X e gamma. È dall'osservazione del cielo nei raggi X e gamma che possiamo rintracciare i buchi neri, soprattutto quelli presenti al centro delle galassie e in sistemi binari.

Un mostro al centro delle galassie



Nella primavera del 1963 l'astronomo tedesco Maarten Schmidt stava svolgendo un semplice attività di catalogazione stellare, in particolare si stava dedicando ad un gruppo di stelle nella costellazione della Vergine che erano potenti radiosorgenti.

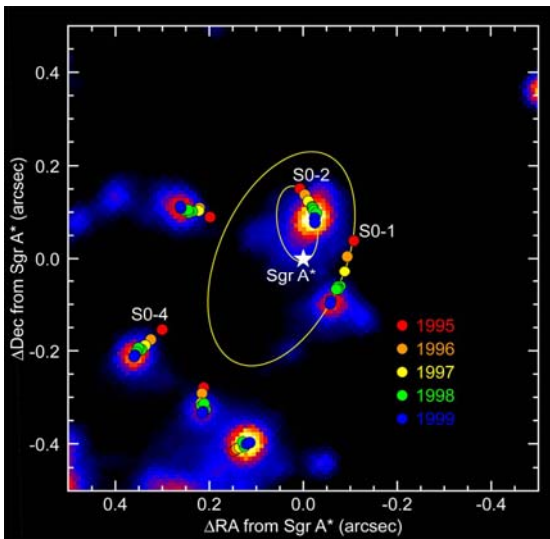
L'analisi spettrale condotta dal gruppo di Schmidt sulla stella 3C273 permise di individuare gli assorbimenti della serie di Lyman dell'idrogeno a frequenze molto spostate verso il rosso riconoscendo l'oggetto come extragalattico. Questo oggetto era lontanissimo, a circa 3 miliardi di anni luce, eppure era anche molto luminoso. La sua emissione intrinseca fu stimata a partire dalle osservazioni corrispondere a quella prodotta da 1000 galassie come la nostra! Ma che cosa aveva scoperto Schmidt?

Dopo la scoperta di Schmidt venne puntato il grande telescopio di Mount Palomar (il più grande del mondo allora) per ottenere un'immagine dettagliata dell'oggetto in questione e con grande sorpresa gli astronomi osservarono un getto ottico che partiva dal centro verso l'esterno fino a diversi kiloparsec.

Schmidt aveva scoperto un quasar, una galassia primordiale dell'universo. Oggi i quasar sono stati profondamente studiati anche col telescopio spaziale e si è scoperto che fanno parte di un'ampia e numerosa famiglia, quella dei Nuclei Galattici Attivi.

Ma cosa sono i nuclei galattici attivi? Si tratta di giganteschi buchi neri di taglia compresa tra 1 milione di volte la massa del Sole e qualche miliardo di volte la massa del Sole, essi inghiottono tutto ciò che transita all'interno della loro sfera di influenza gravitazionale. La loro forza è tale da comprimere parte del gas presente nel disco di accrescimento e collimarlo in due getti perpendicolari che sono visibili chiaramente come due lobi di gas radioemittenti o getti di raggi X e gamma. Le galassie quiescenti hanno anche loro buchi neri supermassicci che però non si stanno alimentando,

questo è la situazione attuale della Via Lattea.



Ma come è stato possibile trovare il buco nero al centro della nostra galassia? È stato osservato il moto orbitale di stelle vicine al buco nero. Dalle velocità misurate e dai periodi orbitali misurati è stata ricavata la massa dell'oggetto centrale.

Infatti il periodo dipende dalla massa centrale secondo la legge:

$$T = \sqrt{\frac{4\pi^2}{GM} r^3}$$

Dove r è la distanza della stella dal buco nero mentre M è la massa del buco nero centrale ($G=6,667 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$) mentre per la velocità abbiamo la seguente legge:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

Esprimendo le distanze in unità astronomiche, i periodi in anni e le masse in unità di masse solari si ha $G = 4\pi^2$ quindi le formule diventano:

$$T = \sqrt{\frac{r^3}{M}} \quad v = 2\pi \sqrt{\frac{M}{r}}$$

Esercizio 3

Compila la seguente tabella riguardante alcune stelle in orbita attorno ad un buco nero:

Massa del buco nero	periodo	velocità	Distanza
$10^7 M_{\odot}$	13 anni		
	70 anni		10000 u.a.
$10^8 M_{\odot}$			5000 u.a.
$10^6 M_{\odot}$	25 anni		
$10^9 M_{\odot}$			8000 u.a.
$10^5 M_{\odot}$	80 anni		
$10^2 M_{\odot}$			50 u.a.