

SCIENZA E FANTASCIENZA

Il dato come indizio

Firenze, 7-8 maggio 2025

SEZIONE TESINE BIENNIO

Menzione d'onore

Viaggio nel mistero dei buchi neri

Studenti

Bencivenni Sara - Ferrucci Tommaso - Panci Elia

Muricci Leonardo - Mariani Leonardo

Classi 2B – 2F

Istituto Tecnico Industriale ISIS Valdarno

San Giovanni Valdarno (AR)

Docente Coordinatore

Granchi Simona

Accurato e ben organizzato lavoro di approfondimento sui buchi neri, con domande appropriate e attenzione ai riscontri osservativi; non è stato tuttavia immaginato nessun tipo di esperimento. Interessante, comunque, l'aver privilegiato la conoscenza diretta dell'attività sperimentale per la rivelazione delle onde gravitazionali, culminata con la visita all'interferometro Ego-Virgo. Significativa l'analisi di come i buchi neri sono presentati nei film di fantascienza, con una classificazione delle affermazioni ivi presenti in vere, plausibili e false.

Relazione del Docente

Il tema di questa edizione, che ritenevo molto complesso e difficile da tradurre in un percorso con gli studenti è stato, con mia sorpresa, accolto dagli studenti con molto entusiasmo ed interesse.

Il fatto di creare un ponte tra scienza e fantascienza ha risvegliato in loro la curiosità di esplorare argomenti di cui avevano sentito parlare ma che non avevano mai avuto la possibilità di approfondire.

Da qui è nato il desiderio di dedicarsi allo studio e alla scoperta dei Buchi neri.

Non nego il tentativo di dissuaderli da questa scelta pensando al fatto che, essendo tutti studenti del biennio, non disponevano di gran parte delle conoscenze fisiche necessarie per affrontare questo tema, ma ho ceduto alla scelta per tre motivi: il loro entusiasmo, il fatto che il tema potesse suscitare tante domande che avrebbero stimolato la discussione, l'analisi e il ragionamento e infine il fatto che i buchi neri si inquadrassero bene nel tema del Convegno. Infatti è solo grazie al dato che è stato possibile liberare i buchi neri dall'alone fantascientifico per riconsegnarli alla scienza.

Avendo scelto di provarci il lavoro ha avuto inizio.

Il gruppo è costituito da 5 studenti provenienti da due classi diverse, che hanno imparato a conoscersi, a collaborare e a confrontarsi.

Come è comprensibile, il lavoro non ha previsto una fase sperimentale di raccolta ed elaborazione dei dati provenienti da misure, ma si è concentrato sulla ricerca in rete su alcuni aspetti.

Innanzitutto, hanno iniziato a raccogliere informazioni sull'evoluzione della conoscenza intorno a questo misterioso corpo celeste, come loro lo hanno definito; inoltre conoscere i principi basilari sul concetto del diagramma spazio-tempo, sui concetti di dilatazione del tempo e dello spazio che non sono grandezze invarianti; raccogliere informazioni su come dalla legge della Relatività Generale di Einstein del 1915, che dimostra matematicamente la possibilità dell'esistenza di buchi neri, sia stato possibile verificarla sperimentalmente.

A questo percorso si è aggiunta la ricerca sui metodi e i sistemi sempre più tecnologicamente raffinati che hanno consentito e consentono di "fotografare" i buchi neri presenti nell'universo e quindi i ragazzi hanno cercato di capire come funziona un radiotelescopio e un interferometro di onde gravitazionali.

Su questo aspetto, la conoscenza e l'interesse sono stati arricchiti dalla visita dell'interferometro di onde gravitazionali Ego-Virgo di Cascina di Pisa in cui i ragazzi hanno potuto osservare come sono fatti i segnali di onde gravitazionali provenienti dalla coalescenza di due buchi neri, hanno preso coscienza di quanto lavoro ci sia dietro ogni piccola conquista scientifica, della necessità dall'accuratezza dei materiali, della cura nella progettazione e nel dimensionamento delle varie parti del sistema di misura, nella ricerca continua per ottimizzare le caratteristiche meccaniche, elettroniche e informatiche. Sono stati particolarmente colpiti dall'importanza della collaborazione tra i vari gruppi di ricerca e tra le varie figure professionali: ingegneri, tecnici e ricercatori universitari.

La parte finale del lavoro ha riguardato la rappresentazione dei buchi neri in due importanti film di fantascienza, su cui gli studenti hanno fatto un'originale analisi delle informazioni raccolte.

In base a ciò che avevano imparato, hanno innanzitutto individuato le caratteristiche con

cui i buchi neri vengono descritti nei due film e poi le hanno classificate in “vere” e cioè coerenti con la scienza, “plausibili” e cioè possibili da un punto di vista teorico ma non ancora verificate e infine “false” e cioè non compatibili con scienza.

Gli studenti sono stati innanzitutto supportati su come si raccolgono le informazioni e sulla valutazione delle fonti, dopo di che hanno organizzato il loro lavoro, in modo molto autonomo, scegliendo gli aspetti da approfondire, suddividendolo e condividendolo tra di loro.

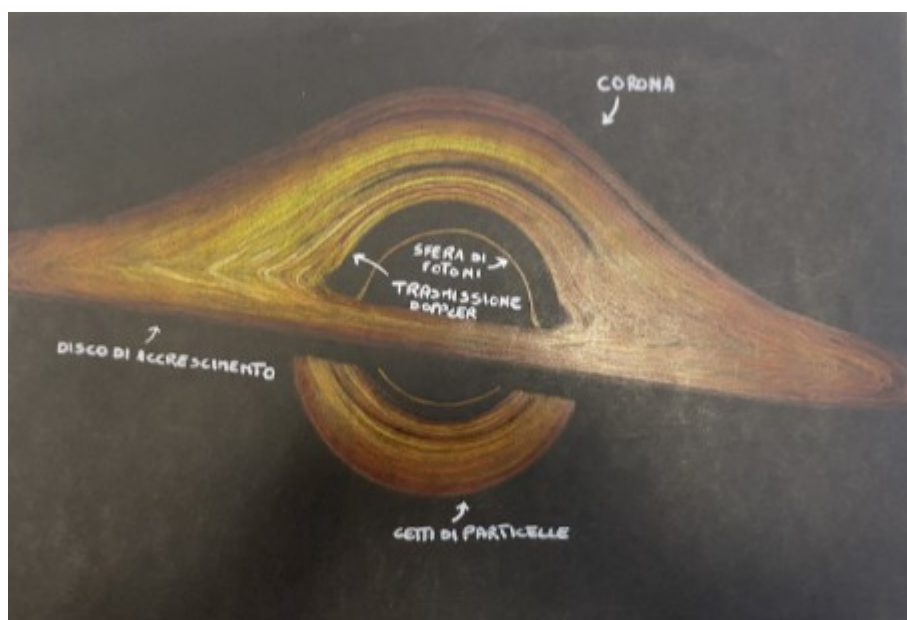
Infine hanno redatto e strutturato il loro elaborato, nel tentativo di comunicare quanto imparato, ma anche ciò che è stato stimolato in loro: hanno infatti dedicato l'ultimo paragrafo alle loro domande sui buchi neri, avendo colto la loro rilevanza per la conoscenza dell'Universo.

Purtroppo per il poco tempo a disposizione e per la mancanza di conoscenze adeguate sull'argomento, in quanto lontano dal percorso curricolare, la qualità del lavoro ne ha risentito, nonostante l'impegno e la determinazione degli studenti.

L'esperienza ha però promosso la loro capacità critica nella ricerca delle informazioni, la loro capacità organizzativa, di cooperazione e di investigazione, non dando mai niente per scontato, ma soprattutto ha suscitato curiosità e passione.

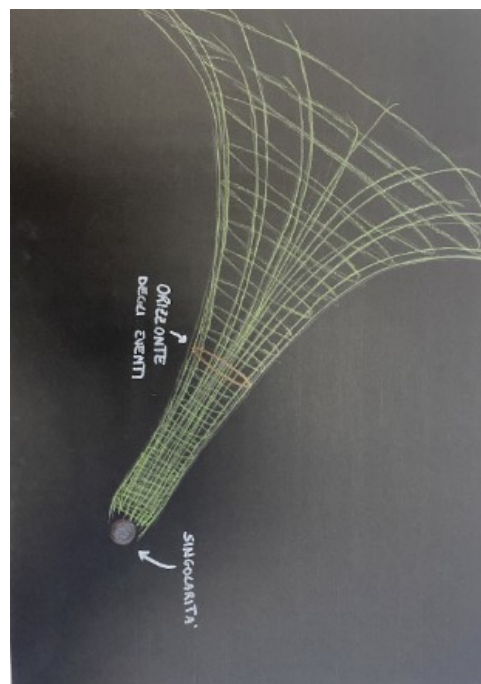
Scienza e Fantascienza il dato come indizio

VIAGGIO



***nel
MISTERO...***

***...dei
BUCHI NERI***



INDICE

1. Premessa	4
2. Cosa è un buco nero	4
2.1. Storia di una scoperta fantastica	4
2.2. Come è fatto: le sue parti principali	6
2.3. Come si forma	9
2.4. Come si calcola la massa di un buco nero	10
3. Se a un buco nero niente può scappare, come facciamo a rilevare la sua presenza?	11
3.1. Il radiotelescopio	12
3.2. Interferometro di onde Gravitazionali	13
3.2.1. Interferometro Virgo	14
3.2.2. Struttura e funzionamento	15
4. Cosa accade se cado dentro un buco nero?	18
5. Una storia non solo scientifica: I buchi neri nei film di fantascienza	18
5.1. Star trek: il futuro ha inizio	18
5.2. Interstellar	20
6. Domande aperte	23
7. BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA	23

1. Premessa

Abbiamo scelto di partecipare all'evento ScienzaFirenze "Scienza e Fantascienza il dato come indizio", perché il tema di questo anno ci ha affascinato molto. Purtroppo nel nostro percorso curricolare non si trattano argomenti che hanno a che fare con la fantascienza e quindi questa ci è sembrata una bella occasione da cogliere.

Confrontandoci, abbiamo scelto il tema dei buchi neri, perché ci appassionava il fatto di poter conoscere meglio questo misterioso corpo celeste. Questo si collega anche al tema del concorso, in quanto i buchi neri, che inizialmente erano stati ipotizzati solo attraverso la formula matematica della Relatività Generale di Einstein del 1915, sono stati confermati solo quando è stato acquisito un dato sperimentale e cioè la rilevazione effettuata dall' EHT (Event Horizon Telescope), che ha fatto la prima foto al buco nero M87 nel 2019. Questo argomento è stato tanto interessante quanto difficile, sia perché abbiamo dovuto cimentarci su molti concetti fisici che non fanno parte del nostro percorso, sia per l'organizzazione del materiale, sia perché molte questioni e domande sono ancora aperte e da verificare anche per gli astrofisici più qualificati.

Il percorso ha però suscitato in noi molta curiosità e ci ha fatto capire quanto sia importante non lasciare mai niente di intentato e quanto sia importante la collaborazione tra i vari gruppi di ricerca e tra i vari ambiti scientifici.

Inoltre grazie a questo percorso abbiamo potuto visitare anche l'interferometro Ego-Virgo a Cascina di Pisa, che insieme a l'interferometro Ligo in America, ha rilevato per la prima volta le onde gravitazionali, grazie alle quali è anche possibile rilevare la fusione di due buchi neri.

Vedere come è realizzato un interferometro, vedere quanto siano importanti tutte le innovazioni tecnologiche, vedere i segnali rilevati a distanza di anni luce dall'universo nella realtà e non solo leggendo sui libri o in internet, ci ha appassionato maggiormente in questa ricerca.

2. Cosa è un buco nero

In questa parte è descritto come la scienza sia arrivata alla conferma dell'esistenza dei buchi neri, sono descritte le loro principali caratteristiche, che ad oggi sono state conosciute e come questi si formano.

2.1. Storia di una scoperta fantastica

La teoria dei buchi neri ha radici antiche [1], ma è stata formalizzata e resa

parte integrante della fisica moderna da Albert Einstein. Nel 1915, Einstein pubblicò la sua teoria della Relatività Generale, una rivoluzionaria descrizione della gravità che sostituiva la teoria di Newton. Questa teoria, espressa dall'equazione di cui limitiamo a scrivere la formula

$$(1) \quad R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

descrive la curvatura dello spazio-tempo in funzione della densità di materia, dell'energia e della pressione e prevedeva, tra le sue soluzioni, l'esistenza di oggetti così massicci che nulla, nemmeno la luce, poteva sfuggire alla loro attrazione gravitazionale. Un passo fondamentale verso la scoperta dei buchi neri fu compiuto da Karl Schwarzschild, un astronomo tedesco che, durante la Prima Guerra Mondiale, lavorò sulle equazioni di Einstein. Nel 1916, mentre era al fronte, Schwarzschild sviluppò quella che sarebbe diventata la "soluzione di Schwarzschild". Questa soluzione matematica descrive uno spazio-tempo curvo intorno a un oggetto massiccio di forma sferica. In essa, il buco nero è statico e isotropo, ossia presenta una distribuzione di materia sferica, simile a quella del Sole, ma concentrata in una zona infinitamente più piccola [2]. Questo lavoro aprì la strada alla comprensione dei buchi neri. Anche se la teoria dei buchi neri trova le sue radici nella Relatività generale di Einstein, l'idea di oggetti così massicci da intrappolare la luce era già stata suggerita da John Michell, un fisico inglese, nel 1783, ben prima della pubblicazione della teoria di Einstein. Michell propose l'esistenza di "stelle oscure", che avrebbero potuto avere una gravità così intensa da impedire alla luce di sfuggire [1]. Fino agli studi di Einstein e Schwarzschild, i buchi neri erano considerati una mera soluzione matematica alle equazioni della Relatività. La loro esistenza concreta si è affermata solo nel 1939, quando Tolman, Oppenheimer e Volkoff dimostrarono che una stella, alla fine del suo ciclo vitale, subisce un collasso gravitazionale. Se la sua massa è superiore a tre volte quella del Sole (3 masse solari), la stella si comprime al di sotto dell'orizzonte degli eventi.[3]

Nel 1963, Roger Penrose, uno dei vincitori del Premio Nobel per la Fisica nel 2020, dimostrò che l'orizzonte degli eventi rappresenta una superficie che obbliga ogni cosa che lo attraversi a dirigersi verso il suo centro, verso una singolarità con densità infinita, dando origine a un buco nero.

Il primo segno tangibile dell'esistenza di un buco nero fu ottenuto nel 1970 dal fisico italiano Riccardo Giacconi, che vinse il Premio Nobel per la Fisica nel 2002. Giacconi identificò una sorgente di raggi X nella costellazione del Cigno, chiamata Cygnus X-1, che apparteneva a un sistema stellare binario in cui le due stelle orbitano molto vicino l'una all'altra. [3]

L'emissione di raggi X avviene quando il gas, strappato dalla stella

normale del sistema, viene catturato dal compagno compatto. Attratto da un vortice rotante a velocità prossime a quella della luce, il gas viene compresso e riscaldato a temperature dell'ordine di milioni di gradi, emettendo così raggi X.

La conferma è avvenuta nel 2019, dall'Event Horizon Telescope (EHT) che riuscì a fotografare per la prima volta un buco nero al di fuori della nostra galassia, chiamato M87. Successivamente, sono stati rilevati altri buchi neri, tra cui il Sagittarius A* nella nostra galassia. Negli ultimi anni, la possibilità di individuare buchi neri è notevolmente migliorata grazie alla scoperta delle onde gravitazionali. Queste onde hanno arricchito la nostra comprensione dell'Universo, e con essa, anche dei buchi neri.

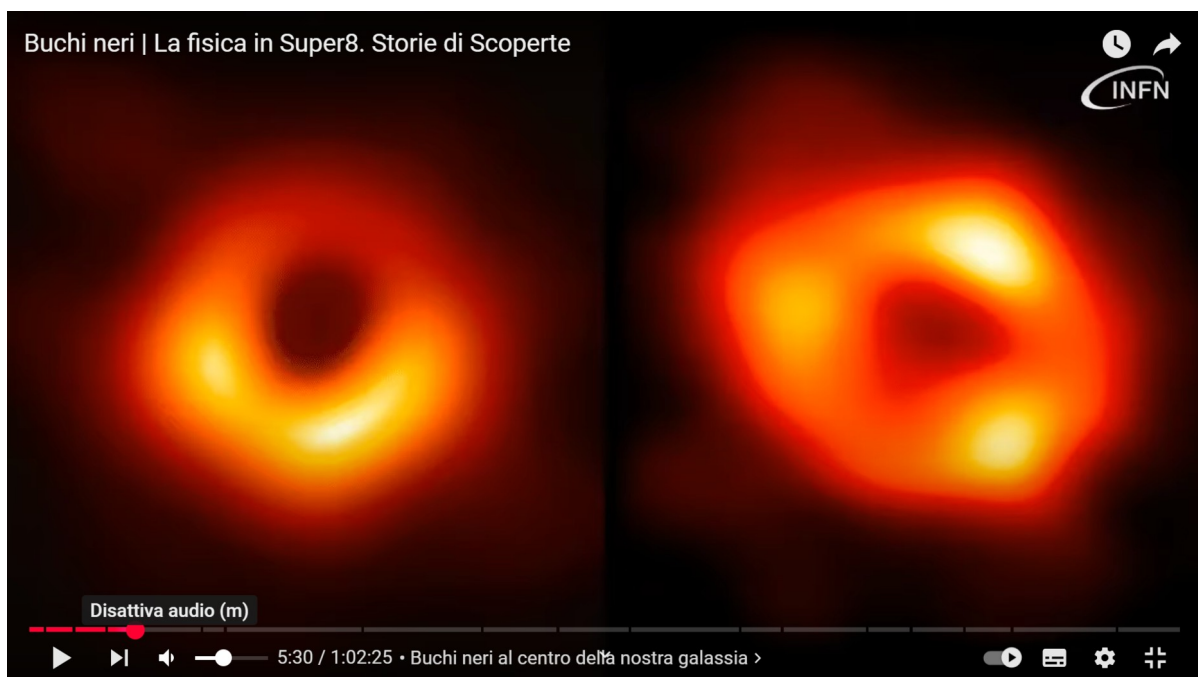


Fig.1. Foto del buco nero M87 sulla sinistra e del buco nero Sagittarius A*

2.2. Come è fatto: le sue parti principali [4]

Le parti principali di un buco nero, come è riportato nel sito della NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) sono quelle descritte di seguito:

- l'**orizzonte degli eventi** può essere pensata come una superficie limite del buco nero oltre la quale la velocità necessaria per uscirne supera le velocità della luce, cioè la massima velocità possibile. Quindi qualsiasi cosa supera l'orizzonte degli eventi è destinata a rimanerci dentro, perfino la luce. Poiché la luce non può uscire, i buchi neri non la emettono e né la riflettono.

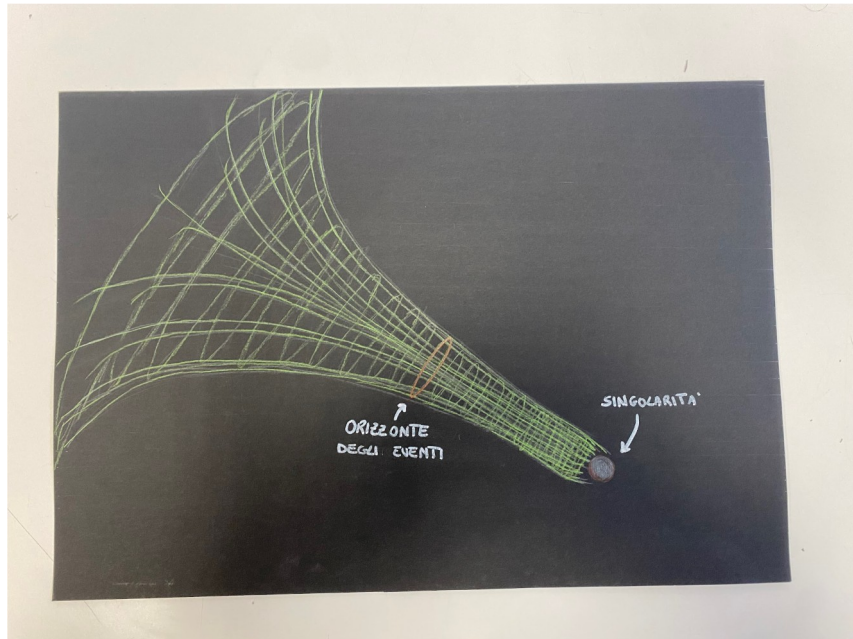


Fig. 2 Disegno rappresentante lo schema di un buco nero. L'orizzonte degli eventi è l'anello rappresentato in rosso. Il disegno è stato realizzato manualmente da Elia Panci

- il **disco di accrescimento**, cioè la fonte di luce dei buchi neri. I quali crescono o consumando materia, con un processo che gli scienziati chiamano accrescimento, o fondendosi con altri buchi neri. Un buco nero di massa stellare accoppiato a una stella può estrarre gas da essa, e un buco nero supermassiccio fa lo stesso dalle stelle che si avvicinano troppo. Il gas si deposita in un disco caldo, luminoso e in veloce rotazione. La materia si fa gradualmente strada dalla parte esterna del disco verso il suo bordo interno, dove cade nell'orizzonte degli eventi. I buchi neri isolati che hanno consumato la materia che li circonda non possiedono un disco di accrescimento e possono essere molto difficili da trovare e studiare. Se potessimo vedere da vicino un disco di accrescimento noteremmo che ha una forma buffa, questo perchè il campo gravitazionale del buco nero deforma lo spazio-tempo, il tessuto dell'universo, e la luce deve seguire questo percorso distorto.



Fig.3 alterazione dello spazio-tempo.

Gli astronomi chiamano questo fenomeno *lente gravitazionale*. La luce che arriva dalla parte superiore del disco, dietro il buco nero sembra formare una gobba sopra di esso. La luce da sotto il lato più lontano del disco prende un percorso diverso, creando un'altra gobba sotto. Le dimensioni e le forme delle gobbe cambiano quando le osserviamo da diverse angolazioni e non vediamo affatto gobbe quando vediamo il disco esattamente di fronte.

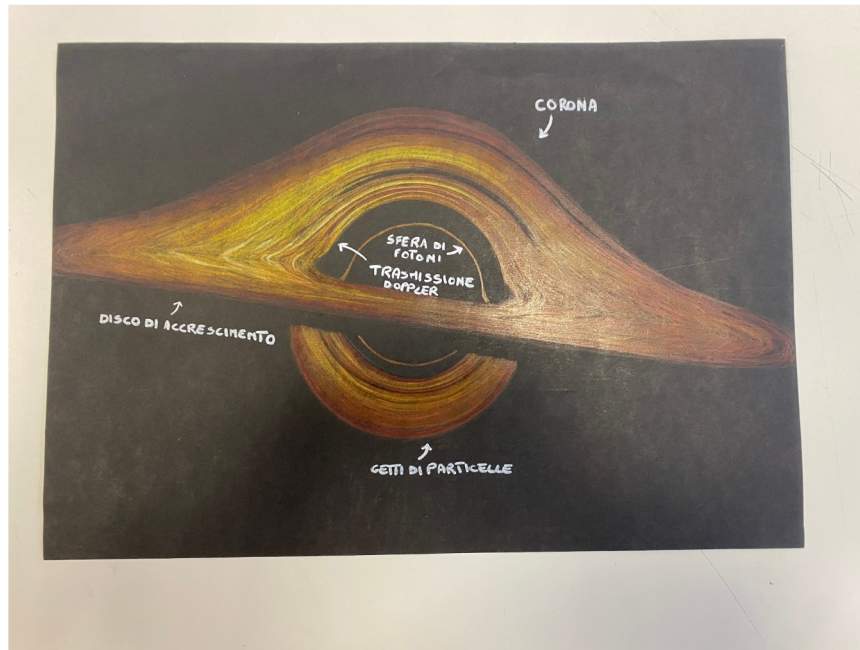


Fig. 4 Raffigurazione di un buco nero con descrizione delle sue parti, disegno di Elia Panci.

- l'**ombra degli orizzonti degli eventi** si forma perché lo spazio-tempo fa sì che la luce venga raddrizzata tramite la lente gravitazionale. Questo effetto insieme al catturamento della luce crea una zona molto scura che viene chiamata ombra dell'orizzonte degli eventi, ed è circa il doppio della superficie del buco nero.
- la **sfera di fotoni** è formata da anelli di luce che appaiono sul bordo dell'ombra del buco nero. Questi anelli sono in realtà immagini multiple, altamente distorte del disco di accrescimento. Qui, la luce del disco orbita effettivamente attorno al buco nero più volte prima di sfuggire. Gli anelli più vicini al buco nero diventano più sottili e più deboli.
- la **corona** è l'ambiente fisico più estremo dell'universo. Forti campi magnetici che attraversano il disco di accrescimento interno si estendono al di fuori di esso, creando una tenue, turbolenta nube di miliardi di gradi. Le particelle nella corona orbitano attorno al buco

nero a velocità prossime alla velocità della luce. È una fonte di raggi X con energie molto più elevate di quelle emanate dal disco di accrescimento, ma gli astronomi stanno ancora cercando di capirne l'estensione, la forma e altre caratteristiche.

- i **getti di particelle** si verificano vicino al bordo interno del disco di accrescimento. Una piccola quantità di materiale diretto verso il buco nero può improvvisamente essere reindirizzata in una coppia di getti che si allontanano da esso in direzioni opposte. Questi getti sparano particelle a una velocità prossima a quella della luce, ma gli astronomi non capiscono appieno come funzionano. I getti dei buchi neri supermassicci possono raggiungere lunghezze di centinaia di migliaia di anni luce. Nei casi in cui i getti si inclinano verso la nostra linea di vista, potremmo rilevare facilmente solo quello che è diretto verso di noi a causa dell'effetto Doppler. Questo processo rende il getto vicino notevolmente più luminoso, ma attenua notevolmente il getto posteriore.
- **singolarità:** La Relatività Generale prevede che il centro stesso di un buco nero contenga un punto in cui la materia viene schiacciata fino a raggiungere una densità infinita. È la destinazione finale per qualsiasi cosa cada nell'orizzonte degli eventi. La singolarità è possibile da un punto di vista matematico, ma al momento gli astronomi non possono definirla fisicamente. La previsione di una singolarità può segnalare i limiti della relatività, dove gli effetti quantistici non inclusi nella teoria diventano importanti in una descrizione più completa della gravità.

2.3. Come si forma [2]

Per formare un buco nero è necessario concentrare una grande quantità di massa in uno spazio molto piccolo e il modo più semplice è sicuramente il fenomeno che si chiama **collasso gravitazionale**, che si verifica quando della materia non in pressione si auto attrae. Questo accade ad esempio nelle ultime fasi di vita di una stella: quando finisce il bruciamento dell'idrogeno e degli altri elementi chimici la stella inizia a compattarsi e la materia che la costituisce è molto concentrata, tale da collassare. Questo si era già capito anni dopo la scoperta della Relatività Generale, Chandrasekhar e poi anche Oppenheimer capirono che il collasso di una stella che ha finito la sua vita può portare alla formazione di un buco nero o di una stella di neutroni che è la forma di materia più densa che esiste in natura prima della formazione di un buco nero. Se però la stella di neutroni supera la pressione di degenerazione dei neutroni si forma un buco nero. Questo implicherebbe che la massa tipica dei buchi neri, fosse

dell'ordine della massa delle stelle, in realtà si osservano buchi neri molto più grandi con una massa pari a milioni di volte la massa del Sole. Queste sono buchi neri che stanno al centro delle galassie. Come è possibile? Come già detto sopra, ciò che sta attorno al buco nero viene via via inglobato accrescendo le sue dimensioni e addirittura se due buchi neri si incontrano ne formano uno unico più grande. Questo processo continuo di accrescimento può generare buchi neri molto massicci. Questi sono meccanismi ancora ipotetici ma molto probabili.

Per quanto riguarda invece i buchi neri primordiali e cioè i buchi neri piccoli formati nell'universo antico, sembra che si siano formati in conseguenza di discontinuità di densità nello spazio.

2.4. Come si calcola la massa di un buco nero [5]

Fino ad oggi gli scienziati calcolano la massa di un buco nero, con complessi calcoli matematici, basati sull'osservazione e la misurazione di alcuni parametri dei pianeti e delle stelle che vi orbitano intorno.

Ma uno studio pubblicato recentemente da Timothy Davis e dai suoi colleghi dello European Southern Observatory su Nature, presenta un nuovo sistema per stimare la massa dei corpi celesti.

Davis con il suo team si sono concentrati sui movimenti delle masse di monossido di carbonio all'interno di una galassia e lo hanno modellizzato al computer, hanno poi inserito nella simulazione diversi buchi neri fino a quando non hanno osservato nel gas un comportamento uguale a quello in natura.

Successivamente hanno modificato all'interno del modello il parametro da scoprire, cioè la massa del buco nero, fino a quando non hanno trovato il comportamento desiderato nei parametri noti, cioè la massa di CO.

Questo sistema di calcolo ha permesso al team di quantificare in 450 masse solari il peso del buco nero supermassivo al centro della galassia NGC4526, nella costellazione della Vergine.

3. Se a un buco nero niente può scappare, come facciamo a rilevare la sua presenza?

A questo punto, però, nasce una domanda fondamentale: "Se i buchi neri esistono, come possiamo osservarli, dato che, per definizione, neanche la luce può sfuggire alla loro attrazione?" La risposta, come suggeriva il reverendo Mitchell quasi 150 anni fa, è che possiamo osservarli indirettamente, attraverso gli effetti che causano nell'ambiente circostante, a causa della deformazione dello spazio-tempo [3].

Per rilevarli non possiamo quindi basarci sul fatto che emettano dei segnali, vista la loro elevata gravità che tutto trattiene. Possiamo vedere il sole e le stelle anche se sono molto lontani, ma non direttamente i buchi

neri, quindi è necessario usare dei metodi indiretti. Questi si basano sugli effetti gravitazionali dei buchi neri, cioè sulla loro capacità di deformare lo spazio intorno a sé. Ad oggi esistono diversi metodi. Uno è quello di andare a rilevare la velocità delle stelle che ruotano in una parte dello spazio [2]. Attraverso la misura della velocità di rotazione delle stelle, è possibile calcolare quant'è il campo gravitazionale e quindi la massa che genera quel campo.

Cosa succede? in certe situazioni si osserva che le stelle sono molto veloci e con orbite molto strette attorno a un punto che non si vede. La massa calcolata e che determina questo moto risulta molto grande e concentrata in un piccolo spazio tale quindi da ipotizzare la presenza di un buco nero! Questa è una tecnica che è stata usata anche recentemente da Reinhard Genzel e Andrea Ghez e per la quale hanno vinto il premio Nobel 2020. Non hanno esattamente dimostrato che c'è un buco nero ma hanno dimostrato che l'oggetto al centro della nostra galassia è estremamente denso da non potere che avere come soluzione l'esistenza di un buco nero.

Un altro modo è quello invece di sfruttare le onde gravitazionali: quando due buchi neri si scontrano, hanno un fenomeno di coalescenza, cioè ruotano uno intorno all'altro fino a quando risentendo l'uno dell'attrazione dell'altro diventano un solo oggetto e in questo processo vengono emesse onde gravitazionali. Qualche anno fa, come descritto più avanti, le collaborazioni dell'Interferometro Virgo italiano e quello Ligo americana, hanno rilevato e misurato le onde gravitazionali che arrivano da questo collasso di due buchi neri.

Un'altra tecnica è, quella del cosiddetto lensing gravitazionale, che sfrutta il fatto che la luce viene deflessa dalla massa [2]. Se abbiamo una sorgente, come ad esempio una galassia o una stella e se tra la sorgente e l'osservatore è frapposto un buco nero, la luce non colpisce dritta l'osservatore ma subisce una deflessione come in una lente producendo un aumento o una riduzione di luminosità.

Poi ci sono altri metodi, come per esempio il metodo che sfrutta il fatto che la materia che sta attorno al buco nero risentendo della sua gravità viene attratta generando dei moti rotatori molto veloci. Quando un buco nero sta attivamente inghiottendo materia si trasforma in un nucleo galattico attivo. La materia rotante comincia ad emettere radiazione fornendo informazioni sulla presenza di un buco nero.

Di seguito, riportiamo degli accenni su alcune caratteristiche del radiotelescopio e una descrizione dell' interferometro di onde gravitazionali

3.1. Il radiotelescopio [6-8]

I radiotelescopi sono strumenti fondamentali per osservare l'universo, catturando onde radio con lunghezze d'onda tra 1 cm e 30 m provenienti da stelle, galassie e altri oggetti cosmici. Questi segnali, invisibili ai telescopi ottici, ci permettono di studiare fenomeni che altrimenti non potremmo vedere. Un radiotelescopio è composto da un'antenna parabolica, che raccoglie le onde radio, e da un sistema elettronico che le analizza. La sua precisione dipende dalla qualità del riflettore, che deve essere quasi perfetto per funzionare bene.

Esistono due tipi principali di radiotelescopi: quelli con un'unica grande antenna, che concentra il segnale in un punto, e i radiointerferometri, che usano più antenne sparse per simulare un telescopio gigante, migliorando la nitidezza delle immagini. Tra i radiotelescopi più famosi ci sono quello di Arecibo, a Portorico, con un'antenna di 300 metri, e quello di Effelsberg in Germania, con un'antenna di 100 metri che può muoversi per puntare diverse zone del cielo.

Uno dei progetti più avanzati è l'*Event Horizon Telescope (EHT)*, una rete di radiotelescopi sparsi in tutto il mondo che lavorano insieme come un unico strumento gigante. Grazie a questa tecnologia, l'EHT è riuscito a osservare direttamente un buco nero supermassiccio, denominato M87. Questo buco nero ha una massa enorme, circa 6,5 miliardi di volte quella del Sole, ed è circondato da un disco di gas e polvere che ruota intorno a esso. Parte di questo materiale, invece di cadere nel buco nero, viene espulso via a velocità incredibili, formando, come abbiamo detto, un "getto" di particelle che si estende per migliaia di anni luce.

L'EHT ha permesso di studiare questo getto con un dettaglio mai visto prima, rivelando come si forma e come viene accelerato. Le osservazioni hanno confermato che il getto è prodotto dall'interazione tra il buco nero e il materiale che lo circonda, aiutandoci a capire meglio questi fenomeni estremi. Inoltre, l'EHT ha fornito la prima immagine diretta della zona vicina all'orizzonte degli eventi del buco nero.

Questa scoperta è un enorme passo avanti nella nostra comprensione dei buchi neri e del loro ruolo nell'universo. I radiotelescopi, e in particolare progetti come l'EHT, continuano a spingere i confini della scienza, mostrandoci dettagli sempre più precisi su oggetti e fenomeni che prima potevamo solo immaginare.

3.2. Interferometro di onde Gravitazionali [9-14]

L'interferometro (Fig.6) è uno strumento utilizzato per la rilevazione delle

onde gravitazionali, Questo strumento è sensibile all'interferenza di due fasci luminosi, ottenuti inviando la luce prodotta da un laser di una determinata lunghezza d'onda su uno beam splitter (divisore di fascio). I due fasci viaggiano successivamente lungo due bracci fra loro ortogonali e poi riflessi indietro da due specchi, fino a convergere sullo stesso punto di uno schermo, dove può essere osservata la loro interferenza: poiché il cammino dei due fasci luminosi non è mai identico, la fase relativa dei raggi che raggiungono lo schermo non è più la stessa e questo sfasamento produce il fenomeno dell'interferenza. Questo fenomeno fisico è legato alla natura ondulatoria della luce e si verifica quando due onde si incontrano come nel caso dei due raggi laser. Possiamo avere interferenza costruttiva, quando le valli e le creste delle due onde coincidono o distruttiva quando alla cresta di una corrisponde la valle dell'altra, come mostrato in Fig.7

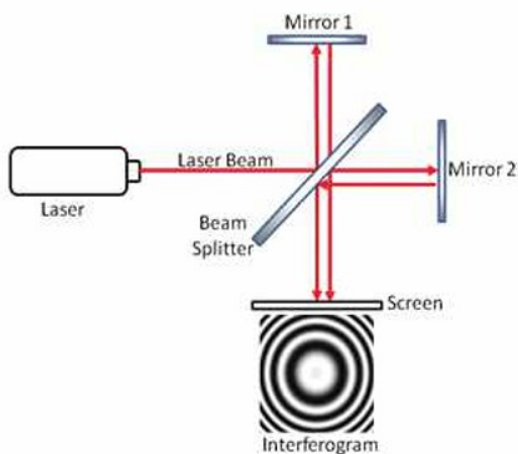


Fig.6: Struttura base di un interferometro

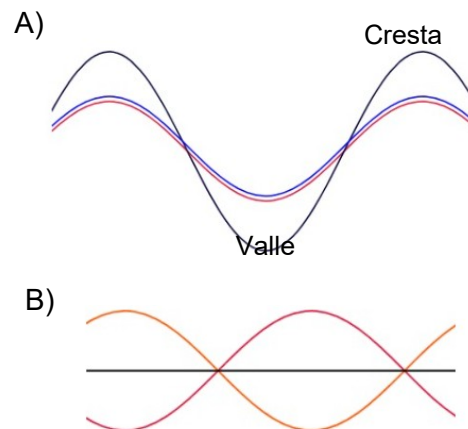


Fig.7: A) Interferenza costruttiva, B) interferenza distruttiva

Al mondo esistono 7 interferometri di onde gravitazionali : LIGO Hanford (USA), LIGO Livingston (USA) i quali sono funzionanti; GEO (Germania) il quale essendo molto piccolo ha una sensibilità molto bassa e raramente rileva dei dati, ma è comunque utilizzato per testare le evoluzioni tecnologiche che verranno apportati anche agli altri interferometri; VIRGO (Italia) tuttora funzionante, che nonostante sia più piccolo degli interferometri americani ha una sensibilità molto simile dovuta all'uso di molteplici specchi tecnologicamente avanzati; LIGO India (India) al momento in costruzione ma che presto collaborerà alle rilevazioni con gli altri interferometri e KAGRA (Giappone). Quest'ultimo ha la particolarità di essere collocato 200 metri sotto il monte Ikenojama, nel Giappone centrale. è stato danneggiato da un terremoto nel Gennaio del 2024 ed ancora non è stato ripristinato.

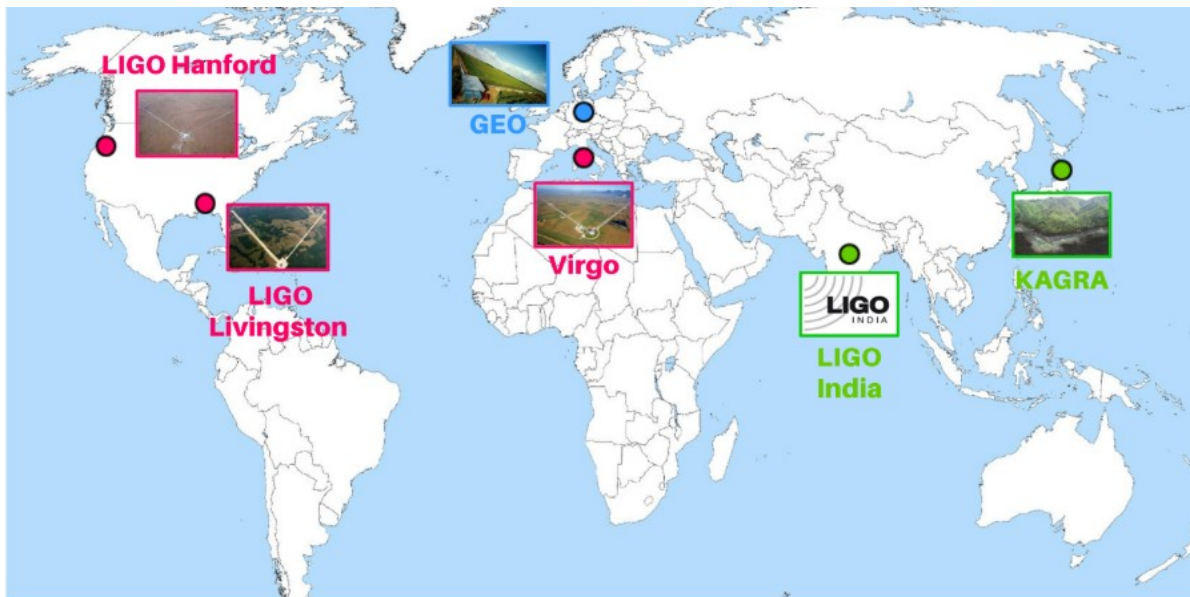


Fig.8 : Interferometri nel mondo. Immagine ripresa dalla presentazione di Julia Favaro, Ego-Virgo

In particolare, di seguito è descritto l'interferometro Ego Virgo che è l'interferometro di riferimento in Europa e che abbiamo avuto la possibilità di visitare.

3.2.1. *Interferometro Virgo [9-14]*

Ego Virgo è un interferometro progettato per la rilevazione delle onde gravitazionali, situato vicino a Pisa, in Italia. Fa parte di una rete globale di interferometri, tra cui il più noto LIGO negli Stati Uniti, e insieme a essi ha contribuito alla scoperta delle onde gravitazionali, ipotizzate da Albert Einstein nella sua teoria della relatività generale. Ha iniziato le sue operazioni scientifiche nel 2007 e ha partecipato attivamente alla rilevazione di eventi astrofisici significativi. Un momento chiave è stata la rilevazione della fusione di due buchi neri nel 2015, che ha segnato la prima osservazione diretta delle onde gravitazionali. Da allora, Virgo ha contribuito a numerose altre osservazioni di eventi cosmici, come la fusione di stelle di neutroni.



Fig.9: Vista EGO Virgo dall'alto



Fig.10: Foto del braccio ovest dell'interferometro Virgo, realizzata durante la visita

3.2.2. Struttura e funzionamento [9-14]

Virgo è un interferometro a bracci lunghi, con bracci che si estendono per 3 km ciascuno, disposti a forma di "L". I bracci sono costituiti da tubi sottovuoto per ridurre le interferenze atmosferiche e migliorare la sensibilità delle misure. La configurazione a bracci lunghi consente di misurare variazioni minime nella lunghezza dei bracci causate dal passaggio delle onde gravitazionali; all'interno di ciascun braccio è presente un tubo a vuoto, che contiene il percorso del laser ed è mantenuto a un vuoto ultra-spinto (10^{-9} mbar) per eliminare l'interferenza dell'aria e le pareti sono costituite da una struttura in cemento che riduce le vibrazioni esterne, come quelle dovute a movimenti del terreno o attività umane. Altri sistemi che aumentano la sensibilità di questo strumento sono gli specchi ad altissima riflettenza (superiore al 99,999%) e il sistema di sospensione (superattenuatore) che tiene sospesi gli specchi super riflettenti e li isola dalle vibrazioni e dal rumore sismico. Questo permette

di ottenere una sensibilità estremamente elevata, in grado di rilevare variazioni di lunghezza dell'ordine di frazioni di una lunghezza d'onda della luce (circa 10^{-21} metri)

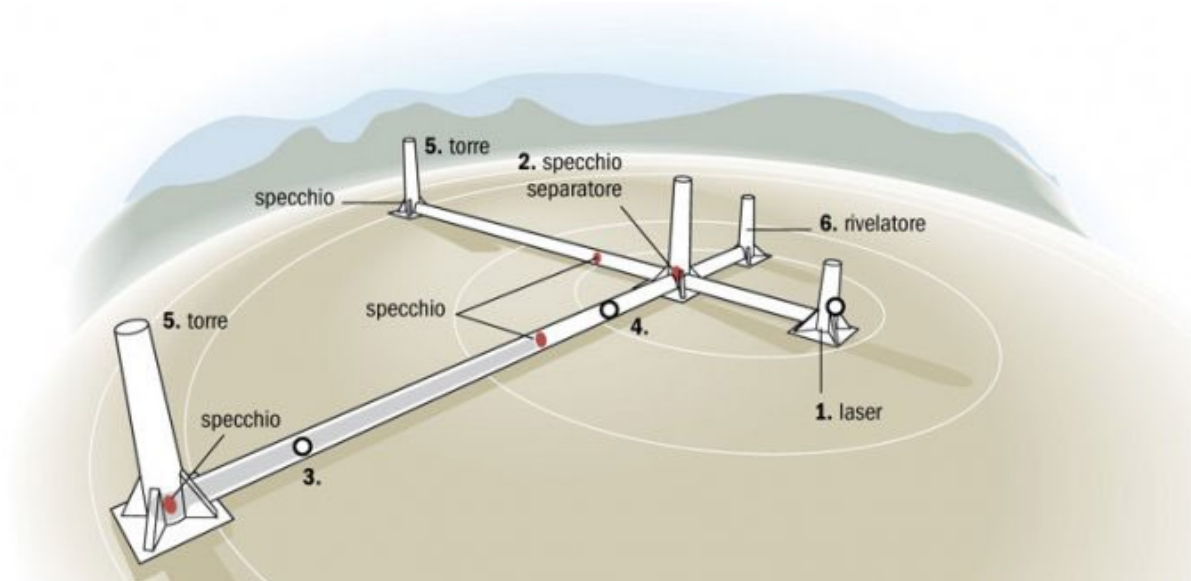


Fig.11: Schema della struttura dell'interferometro Virgo

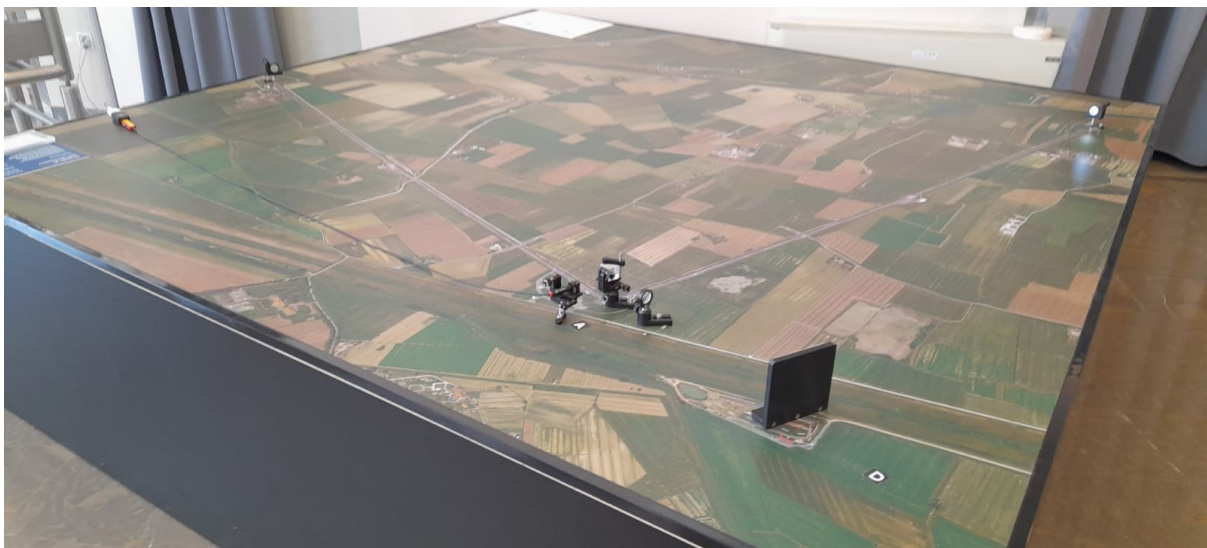


Fig.12: Modellino in scala che riproduce l'interferometro VIRGO, presente nell'ingresso della stanza centrale della struttura

Come detto sopra, il funzionamento di un interferometro gravitazionale si basa sull'uso di un laser che emette un fascio di luce coerente e monocromatico, diretto verso uno specchio semitrasparente, chiamato beam splitter. Questo componente svolge un ruolo cruciale nel sistema ottico dell'interferometro, poiché divide il fascio luminoso in due parti identiche, inviandole lungo due bracci perpendicolari tra loro. Ogni fascio di luce percorre il proprio braccio fino a raggiungere uno specchio

altamente riflettente, posizionato all'estremità del braccio stesso. Qui la luce viene riflessa e torna indietro lungo lo stesso percorso, fino a ricombinarsi nuovamente nel beam splitter. Quando i due fasci si sovrappongono, il fenomeno dell'interferenza ottica genera un pattern che può essere osservato e analizzato da un rivelatore posto all'uscita dell'interferometro. In condizioni normali, cioè in assenza di perturbazioni esterne, la lunghezza dei bracci rimane costante e il pattern di interferenza è stabile e prevedibile. Tuttavia, quando un'onda gravitazionale attraversa l'interferometro, essa provoca una distorsione dello spazio-tempo, alterando la lunghezza dei bracci in modo leggermente diverso per ciascun asse. Questo effetto è estremamente piccolo, dell'ordine di una frazione del diametro di un protone, ma sufficiente a modificare il pattern di interferenza della luce. L'analisi di queste variazioni consente di dedurre informazioni fondamentali sulla sorgente dell'onda gravitazionale, come la sua intensità, frequenza e direzione di provenienza.



Fig.13: Control room per acquisizione delle onde gravitazionali



Fig.14: Specchio per il raggio laser



Fig.15: Sistema di pendoli inversi

4. Cosa accade se cado dentro un buco nero? [15 - 16]

Se un'astronauta si avvicinasse a un buco nero e confrontasse il tempo con un osservatore distante, noterebbe che sono in due "tempi diversi". Il tempo dell'astronauta rallenterebbe e questo avrebbe anche come conseguenza che l'osservatore non potrebbe mai vedere l'astronauta cadere dentro il buco nero: l'osservatore che è distante, lo vedrebbe avvicinarsi ma non lo vedrebbe mai cadere dentro. Lui però, che sta cadendo nel buco nero, superato l'orizzonte degli eventi, subirebbe una gravità sempre più intensa e subirebbe quella che si chiama *spaghetizzazione*. Infatti verrebbe stiracchiato sempre più fino a diventare uno spaghetti lungo e stretto, finché, cadendo sulla singolarità, si distruggerebbe

5. Una storia non solo scientifica: I buchi neri nei film di fantascienza

I buchi neri non hanno suscitato molto interesse solo nel campo scientifico ma anche in quello fantascientifico, stimolando la creatività di molti

scrittori e registi.

Solo la possibilità che potesse esistere una cosa del genere ha aperto un oceano di domande e dubbi.

Per capire come la fantascienza si sia interessata a questo aspetto e come abbia intuito o distorto alcune delle passate e future conoscenze scientifiche sui buchi neri, abbiamo scelto di studiare due dei più noti film di fantascienza che esistano, ovvero “Star Trek” e “Interstellar,”. Due film che abbiamo scoperto essere abbastanza visionari sui buchi neri.

Di seguito riportiamo una breve trama dei due film e una tabella in cui sono state evidenziate le informazioni relative ai buchi neri contenute nei due film. Le informazioni sono state, da noi suddivise in tre classi: VERE, PLAUSIBILI e FALSE.

Le informazioni VERE sono quelle che la scienza, ad oggi, ha verificato sperimentalmente; le PLAUSIBILI sono quelle che riguardano questioni aperte e magari possibili da un punto di vista teorico ma non verificato e le FALSE quelle incongruenti sia da un punto di vista teorico che sperimentale.

5.1. Star Trek, il futuro ha inizio

Il film è stato ideato nel 2009, dallo statunitense Jeffrey Jacob Abrams, nato il 26 Giugno del 1966 e noto regista, creatore di molti noti film, tra cui Mission Impossible III [17]. La storia del film si svolge in un lontano futuro dove due ragazzi Kirk e Spoke si ritroveranno a dover collaborare per la salvezza dell’universo. Nell’anno 2233, la nave stellare della federazione dei pianeti USS viene improvvisamente attaccata da una gigantesca nave romulana uscita fuori da un buco nero creatosi pochi istanti prima e il comandante della USS viene chiamato sulla gigantesca nave dal comandante Nero per trovare un accordo, ma viene ucciso e l’attacco continua. Il tenente capitano George Kirk ordina all’equipaggio di mettersi in salvo, compresa sua moglie incinta, mentre lui si sacrifica lanciandosi contro la nave di Nero per dare la copertura alle navette di salvataggio. Dopo alcuni anni, viene chiesto al giovane Spoke di studiare all’accademia della scienza vulcaniana, ma lui rinuncia e si arruola all’accademia della flotta stellare. Negli stessi anni il figlio di Kirk durante una rissa in un bar incontra il comandante della USS, che dopo avere interrotto la rissa gli ricorda l’impresa compiuta dal padre e lo convince ad arruolarsi all’accademia della flotta stellare. I due ragazzi, pur essendo rivali si ritroveranno a dover collaborare per la salvezza dell’universo [18]

5.2. Interstellar

Il film è del 2014 ed è stato diretto da uno dei migliori e visionari registi al mondo, ovvero Christopher Edward Nolan, nato a Londra il 30 Luglio del 1970. La sua carriera iniziò con un grande successo, la saga del “Cavaliere oscuro” e poi nel 2024 Oppenheimer che gli ha procurato 7 premi Oscar tra cui quello del miglior film e del miglior regista [19].

Il film riguarda le vicende dello scienziato Cooper, ex pilota della Nasa, che ha un grande legame con sua figlia Murph. Nella seconda metà del ventesimo secolo l'ex pilota della Nasa si è ridotto a dover coltivare campi di grano. Un giorno mentre Cooper si trovava con la figlia, Murph, si ritrovano dentro ad un istituto segreto della Nasa, dove viene proposto a Cooper di partecipare all'esplorazione spaziale per trovare un pianeta ideale per lo sviluppo e il continuo della specie umana. Murph prega suo padre di rimanere mostrandogli ciò che gli voleva dire il “fantasma” della sua camera. Cooper non la ascolta e parte per la missione. Nell'esplorazione seguendo le indicazioni fornite dal capo del progetto, gli astronauti esplorano i tre pianeti potenzialmente abitabili che orbitavano attorno ad un buco nero. Alla fine delle esplorazioni, in viaggio di ritorno verso la terra, il carburante si esaurisce e Cooper cerca di usare la gravità del buco nero come “fionda di lancio” per acquisire velocità. Il tentativo fallisce e viene risucchiato all'interno del buco nero. Oltrepassato l'orizzonte degli eventi si ritrova in uno spazio che riconosce essere lo sviluppo temporale della camera di sua figlia Murph. Da lì Cooper cercherà di interagire con la figlia trasformandosi nel “fantasma” di cui la figlia gli aveva parlato prima di partire per la missione. Da qui riuscirà a mettersi in contatto con la figlia e a ritornare sulla terra, dove la ritroverà molto più vecchia di lui [20].

TABELLA 1 : Le informazioni sui BUCHI neri nei Film di Fantascienza

FILM	DATI E INFORMAZIONI		
	VERE	PLAUSIBILI	FALSE
STAR TREK	1. Il buco nero da Star Trek viene descritto come un tunnel spazio-tempo (ed è effettivamente così). questo corpo celeste può assorbire solidi, come per esempio un intero pianeta, e anche l'energia di una supernova. 2. il buco nero assorbe tutto ciò che gli passa vicino e gira con un senso antiorario.	1. Nel film vediamo che se due persone entrano in un buco nero, una per volta, alla loro uscita chi è entrato per primo dovrà aspettare circa 25 anni prima che possa vedere l'altro; viene recitato che un secondo per chi si trova dentro al buco nero sono circa 25 anni per quello fuori (questo dato lo mettiamo tra le cose plausibili perché sappiamo che un buco nero deforma anche il tempo, ma non siamo ancora in grado di definire a quanto possa equivalere un secondo dentro ad un buco nero). con il buco nero "creato" dal film, è possibile viaggiare nel tempo (un dato ancora realmente non possibile da verificare). 2. Attorno al buco nero troviamo una specie di nube grigia che ruota intorno ad esso	1. Secondo il film di Star Trek un buco nero può essere creato da una materia rossa facendone esplodere una goccia. 2. Come mostrato nel film, una volta creato il buco nero questo dopo un po' scompare (l'intervallo di tempo che passa dalla creazione allo svanimento del buco nero viene fatto volontariamente dagli sceneggiatori per rispettare la trama e svolgere un determinato compito per la quale una volta finito non sarebbe più utile). 3. Una volta entrati nel buco nero si può o non si può uscire completamente intatti: a volte le cose o le persone entrano ed escono senza farsi nulla, altre volte le cose o le persone entrano, si distruggono e non escono più. 4. La velocità all'interno del buco nero è maggiore a quella della velocità della luce ! Noi sappiamo invece che la massima velocità raggiungibile è proprio quella della luce.

			5 La struttura del buco nero, vista da fuori ha una forma piatta, come se avesse solo due dimensioni
INTERSTELLAR	1. Secondo questo film (e anche in ciò che conosciamo noi oggi) man mano che ci avviciniamo al buco nero la deformazione del tempo aumenta, ovvero che il tempo scorre più lentamente vicino al buco nero. 2. Secondo la teoria del film è possibile usare il disco di accrescimento come “fionda di lancio” per acquisire velocità e scappare dalla gravità del buco nero: noi sappiamo infatti che è impossibile scappare da un buco nero un volta entrati nell’orizzonte degli eventi, ma non dal disco di accrescimento. 3. la struttura del buco nero di Interstellar è come la conosciamo noi oggi.	1. Secondo Interstellar, intorno al buco nero, 1.25 secondi corrispondono ad un giorno sulla terra e sul disco di accrescimento, 30 secondi corrispondono a circa 51 anni sulla terra. Come per Star Trek, inseriamo questi dati come plausibili perchè ancora non siamo in grado di definire la deformazione del tempo vicino al buco nero, ma sappiamo che sono deformati nel verso descritto dai due film. 2. è possibile interagire, dall’interno del buco nero, con la terra del passato attraverso la gravità; quindi la gravità può attraversare le dimensioni compreso il tempo. 3. secondo il film in buco nero è un passaggio per andare da una parte all’altra dell’universo, ovvero la teoria degli Wormhole, un ateoria sin ora solo verificata matematicamente.	1. I tre pianeti potenzialmente abitabili di Interstellar orbitano attorno ad un buco nero: sappiamo che ciò è impossibile perchè il buco nero attrae e risucchia qualsiasi corpo, che gli passi al di sotto di una certa distanza. 2. All’interno del buco nero, come la teoria suggerisce, avviene l’effetto della spaghetizzazione, ma nel film gli esseri viventi, come il protagonista non subiscono nessuna deformazione. 3. Una volta entrati nel buco nero si può vedere flesh di luce molto potenti, frammenti solidi tipo sabbia e polveri, e le turbolenze gravitazionali sono molto elevate.

6. Domande aperte

Alle molte domande che restano senza risposta si sono aggiunte alcune

nostre, che sono emerse in questo lavoro di scoperta dei buchi neri.

- 1) E se un unico buco nero potesse risucchiare l'intero universo?
- 2) E se un buco nero fosse il passaggio per andare da un universo all'altro?

Questa domanda è venuta fuori dalle varie teorie del dottor Poplawski [16], che propongono una teoria affascinante: la materia all'interno di un buco nero potrebbe comprimersi fino a raggiungere un punto in cui non può più essere compattata ulteriormente. Questo "seme" è estremamente piccolo, ma pesa quanto un miliardo di soli! Ma questa cosa è possibile? Secondo Poplawski, il processo di compattazione si ferma quando i buchi neri si avvolgono su se stessi. Questo accade in un modo incredibilmente rapido, quasi alla velocità della luce, provocando una rotazione che causa una distorsione enorme. Non solo ciò porta a una compressione estrema, ma grazie a questo, il buco nero si "avvita" su se stesso. In alcuni casi, questa compressione potrebbe persino sfociare in una esplosione, dando vita a un evento che potrebbe essere paragonato al Big Bang, o come lo chiama Poplawski, al "Big Bounce". Poplawski suggerisce anche un'idea ancora più affascinante: potrebbe esserci un "ingresso a senso unico" in un buco nero che funge da canale tra due universi distinti. Questo scenario implica che, se entrassimo in un buco nero situato nel cuore della Via Lattea, potremmo finirne in un altro universo, dove le particelle che ci compongono potrebbero essere ricombinate in forme completamente nuove.

7. BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA

[1] Passione e astronomia: <https://www.passioneastronomia.it/chi-ha-scoperto-i-buchi-neri>

[2] Prof. Nicolao Fornengo: "La fisica in Super 8: storie di scoperte" [LA FISICA IN SUPER8. STORIE DI SCOPERTE - Istituto Nazionale di Fisica Nucleare](https://www.infn.it/la-fisica-in-super-8-storie-di-scoperte)

[3] Simona Romaniello, "La storia dei buchi neri attraverso le scoperte dei Nobel per la Fisica" <https://it.pearson.com/aree-disciplinari/scienze-matematica/articoli/buchi-neri-da-nobel.html>

[4] NASA, "Black Hole Anatomy" <https://science.nasa.gov/universe/black-holes/anatomy/#event-horizon>

[5] FOCUS, SPAZIO, "Come si pesa un buco nero" <https://www.focus.it/scienza/spazio/come-si-pesa-un-buco-nero-09022013-7844#:~:text=Triloni%20di%20triliardi%20di%20chili,NGC%204526%20nella%20costellazione%20della%20Vergin>

- [6] Treccani, Radiotelescopio
[https://www.treccani.it/enciclopedia/radiotelescopio_\(Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/radiotelescopio_(Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica)/)
- [7] Media Inaf, “Là dove nasce il getto del buco nero di M87”
<https://www.media.inaf.it/2023/04/26/getto-m87-vlbi/>
- [8] NASA, “Black Hole Anatomy”
<https://science.nasa.gov/universe/black-holes/anatomy/#event-horizon>
- [9] Frontiers, “Dall'esperimento di Michelson e Morley alla rilevazione delle onde gravitazionali Costruire e comprendere un interferometro di Michelson”
https://indico.ego-gw.it/event/62/contributions/1380/subcontributions/15/attachments/810/1419/Michelson_interferometer_FINAL_ITA.pdf
- [10] Ego Virgo, “Dector” <https://www.virgo-gw.eu/science/detector/>
- [11] INFN-Roma “interferometro”
https://lab2go.roma1.infn.it/lib/exe/fetch.php?media=fisica:schededidattiche:interferometro_copia_con_correzioni.pdf
- [12] Università degli studi di Trieste, Dipartimento di Fisica, Virgo – Osservatorio Europeo di Onde Gravitazionali
<https://df.units.it/it/ricerca/ambiti/gruppi/24247>
- [13] INFN, Virgo/Einstein Telescope <https://www.to.infn.it/attivita-scientifica/fisica-astroparticellare/virgo-einstein-telescope/>
- [14] Presentazione di Julia Favaro e Alessandro Fiorentino (studenti Università di Pisa e guide EGO VIRGO)
- [15] Geopop, “Cosa succederebbe se cadessimo verso un buco nero?”
<https://www.geopop.it/cosa-succederebbe-se-cadessimo-in-un-buco-nero/>
- [16] Michael Finkel, “ E se vivessimo in un buco nero?”, National Geographic, <https://www.nationalgeographic.it/spazio/e-se-vivessimo-un-buco-nero#:~:text=Fisici%20come%20il%20dottor%20Poplawski,di%20un%20miliardo%20di%20Soli.>
- [17] Wikipedia, “J.J. Abrams”:https://it.wikipedia.org/wiki/J._J._Abrams
- [18] Wikipedia, “Star Trek”:
[https://it.wikipedia.org/wiki/Star_Trek_\(film_2009\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Star_Trek_(film_2009))
- [19] Wikipedia, “Cristopher Nolan”:
https://it.wikipedia.org/wiki/Christopher_Nolan
- [20] Wikipedia, “Star Trek”:<https://it.wikipedia.org/wiki/Interstellar>