



# INFORMATICA MUSICALE

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CATANIA**  
**DIPARTIMENTO DI MATEMATICA E INFORMATICA**  
**LAUREA TRIENNALE IN INFORMATICA**  
**A.A. 2018/19**  
**Prof. Filippo L.M. Milotta**

**ID PROGETTO:** 0B

**TITOLO PROGETTO:** Acustica e buchi neri

**AUTORE 1:** Papa Emanuele

**AUTORE 2:** Garofalo Donato

## Indice

<b>1. Obiettivi del progetto .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Riferimenti Bibliografici .....</b>	<b>3</b>
<b>3. Argomenti Teorici Trattati .....</b>	<b>4</b>

## 1. Obiettivi del progetto

Il presente progetto si vuole occupare di mettere in evidenza il legame esistente tra due mondi in apparenza sconnessi, ma che vedremo essere in realtà molto vicino tra loro.

I due mondi protagonisti del progetto sono il mondo del suono ed il mondo della fisica dei buchi neri, in cui da un lato vi sono i fenomeni sonori che riguardano applicazioni della fisica meccanica, mentre dall'altro lato vi sono i fenomeni della fisica quantistica e relativistica riguardante i buchi neri.

L'obiettivo principale del progetto riguarda la visualizzazione delle connessioni che esistono tra il mondo dell'acustica e quello relativistico dei buchi neri. Nella prima parte, l'obiettivo è stato quello di mostrare i concetti che stanno alla base dei buchi neri e della loro reale creazione, da cui l'impressione generale è quella che non possa esistere una reale connessione tra queste due branche della fisica, tuttavia si è osservato come un suono possa, almeno da un punto di vista teorico, generare un buco nero, mettendo in luce le reali limitazioni pratiche nella realizzazione di quest'ultimo. Successivamente basandosi su un articolo di lessicologia, la connessione tra l'acustica e i buchi neri si fa, almeno in parte, più netta, infatti mediante la spiegazione del funzionamento dell'ugello di Laval si è osservato che parte dei fenomeni che si presentano in prossimità dei buchi neri sono comparabili al comportamento del fluido all'interno dell'ugello, sul quale vengono a verificarsi alcuni dei fenomeni più affascinanti del suono.

## 2. Riferimenti Bibliografici

1. <https://www.youtube.com/watch?v=Bvp5LTUfHek>

Questo video esplicita in maniera elementare i concetti alla base della creazione di un buco nero mediante un suono.

2. [http://www.lescienze.it/news/2002/09/01/news/buchi\\_neri\\_acustici-589215/](http://www.lescienze.it/news/2002/09/01/news/buchi_neri_acustici-589215/)

Questo articolo di giornale spiega le interconnessioni tra l'acustica e i buchi neri

3. [https://it.wikipedia.org/wiki/Buco\\_nero](https://it.wikipedia.org/wiki/Buco_nero)

Uno tra i link su cui basarsi per capire le dinamiche e i concetti che stanno alla base dei buchi neri

## 4. Argomenti Teorici Trattati

Ad oggi, i buchi neri sono uno tra gli elementi più misteriosi attualmente conosciuti.

In astrofisica si parla di buchi neri come corpi celesti che possiedono un campo gravitazionale così intenso, capace di non lasciar sfuggire né quantità di materia, né radiazione elettromagnetica.

la spiegazione a tale fenomeno è data dal fatto che la velocità di fuga, ovvero velocità minima che un oggetto deve avere in una certa posizione per potersi allontanare indefinitamente da un campo a cui è soggetto, è superiore alla velocità della luce, ed essendo che quest'ultima rappresenta un limite invalicabile, allora nulla che entra può uscire.



*Figura 1 - IMMAGINE IDEALE DI UN BUCO NERO*

La nascita di un buco nero è un evento, la cui causa principale è dovuta al collasso gravitazionale.

Tuttavia, almeno teoricamente, è possibile attribuire la natura di questi fenomeni a cosiddetti fenomeni esotici.

Inizialmente consideriamo la prima possibilità. Verso la fine del proprio ciclo vitale nella stella il 90% dell'idrogeno viene trasformato in elio e si arrestano le reazioni nucleari, che tendevano ad equilibrare le forze gravitazionali. Queste ultime allora prevalgono e comprimono la massa della stella verso il suo centro.

A questo punto la densità diventa sufficientemente elevata tale per cui, la stella, tende a comprimersi ed espandersi più volte espellendo materia. Le stelle più piccole tendono ad arrestare tale processo, diventando nane bianche che, nel corso del tempo si spengono, portando alla formazione di grossi pianeti.

In questo stadio la forza gravitazionale viene equilibrata dalla pressione di degenerazione, che è un fenomeno quantistico che subiscono i corpi a densità molto elevate.

In pratica, uno dei postulati più importanti della meccanica quantistica, che prende il nome di principio di esclusione di Pauli, ci dice che gli elettroni presenti negli atomi di una sostanza non possono avere lo stesso stato quantico, tuttavia ad altissime densità gli atomi tendono ad uniformarsi, quindi ad essere descritti dagli stessi numeri quantici, allora per non andare incontro a ciò, gli atomi esercitano una pressione, chiamata pressione di degenerazione che fa sì che, non venga violato il principio.

Nel resto dei casi le reazioni portano alla formazione del ferro, in un processo che richiede energia, quindi le reazioni nucleari cessano totalmente, facendo sì che nulla possa più contrastare il collasso gravitazionale.

Quindi la stella subisce una forte contrazione che viene arrestata dalla pressione di degenerazione dei componenti atomici, che provoca una gigantesca esplosione.

Se la massa è molto piccola e la pressione di degenerazione contrasta la forza gravitazionale, allora si raggiunge un equilibrio che porta alla formazione di una stella di neutroni, altrimenti si crea un buco nero.

Ma come già detto in precedenza, esistono altri metodi che portano alla loro formazione.

Uno tra questi ci dice che anche una quantità arbitrariamente piccola di materia, se compressa da una gigantesca forza esterna, potrebbe in teoria collassare e generare un orizzonte degli eventi molto piccolo la

cui dimensione, sarebbe inferiore al raggio di Schwarzschild, un valore che dipende dalla massa della materia presa in considerazione. La gigantesca forza esterna che potrebbe portare alla formazione di un buco nero potrebbe essere un suono ad altissima intensità.

Il suono è per definizione un insieme di onde meccaniche longitudinali che vengono prodotte dalle vibrazioni degli oggetti. Tali vibrazioni si propagano attraverso sostanze che possono essere allo stato



*Figura 2 - ANDAMENTO ARMONICO DELLE ONDE SONORE*

solido, liquido o gassoso che prendono il nome di mezzi di propagazione. Quando un oggetto vibra, infatti, esso trasmette tali vibrazioni a ciascuna delle particelle che compongono il mezzo, le quali vengono spostate dalla posizione iniziale, trasmettendo energia alle particelle ad essa adiacenti, facendo sì che il suono venga trasmesso.

Tale propagazione, avviene attraverso un moto sinusoidale, che spinge e comprime il mezzo su cui si sta propagando il suono.

Inizialmente, le vibrazioni comprimono il mezzo, ma man mano la zona compressa inizia

ad allontanarsi dalla fonte e si allenta, generando una zona di bassa pressione.

Tale processo si ripete più e più volte, fino a quando l'onda non smette di propagarsi, generando zone di alta pressione, caratterizzata dalla maggior presenza delle particelle che costituiscono il mezzo, e zone di bassa pressione, in cui le particelle del mezzo sono presenti in minor quantità.

Maggiore sarà l'intensità del suono, maggiori saranno le particelle presenti nella zona di alta pressione e minori saranno quelle presenti nella zona di bassa pressione.

Tuttavia si arriverà ad un punto in cui nella zona di alta pressione la temperatura delle particelle risulterà elevatissima, mentre nella zona di bassa pressione ci sarà il vuoto e non si potrà più parlare di suono, ma di onda d'urto, che è un fenomeno completamente diverso dal suono e spiegato da leggi fisiche differenti, tuttavia si potrà continuare a parlare teoricamente di suono equivalente all'onda d'urto, ossia il suono che si sarebbe ottenuto se non avessimo avuto tali limitazioni fisiche.

Detto ciò, un suono ad intensità elevatissima, farebbe sì che nella zona di alta pressione, il suono eserciterebbe una forza gigantesca alle particelle che compongono il mezzo, le quali raggiungerebbero una densità tale da deformare lo spazio tempo e creare una serie di singolarità che si propagherebbero a distanze elevatissime.

Ciò che si otterrebbe non è un "semplice" buco nero, ma una scia infinita di buchi neri di forma allungata che si presenterebbe ogni qual volta si manifestino le zone di alta pressione nella propagazione del suono.

Per fare ciò, sarebbe necessario realizzare un'onda di 1100 dB, la quale dai seguenti calcoli, avrebbe:

Intensità:

$$SIL = 10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right)$$

$$1100 = 10 \log_{10} \left( \frac{I}{10^{-12}} \right)$$

$$110 = \log_{10}(I) + 12$$

$$98 = \log_{10}(I)$$

$$I = 10^{98} \frac{W}{m^2}$$

---

*Dal calcolo per l'ampiezza sonora in decibel SIL (sound intensity level), invertendo la formula, abbiamo calcolato l'intensità dell'onda da 1100 dB.*

*In cui  $I_0$  è la soglia minima di udibilità.*

---

Pressione:

$$SPL = 10 \log_{10} \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right)$$

$$1100 = 20 \log_{10} \left( \frac{p}{25 \cdot 10^{-6}} \right)$$

$$55 = \log_{10}(p) + 4,6$$

$$50,4 = \log_{10}(p)$$

$$p = 10^{50,4} p_a$$

---

*Dal calcolo per l'ampiezza sonora in decibel SPL (sound pressure level), invertendo la formula, abbiamo calcolato la pressione che esercita l'onda da 1100 dB sul mezzo in cui si propaga. In cui  $p_0$  è la soglia minima di udibilità per un tono puro a 1000 Hz.*

---

Tuttavia tale suono presenta un'intensità mostruosa, infatti, se convertissimo in un istante tutta la materia presente nel nostro universo in energia, interamente convertita in suono, si giungerebbe alla produzione di un suono la cui intensità è approssimabile a 10 seguito da 71 zeri, che è un'intensità enorme, ma neanche

minimamente paragonabile a quella necessaria alla realizzazione di un buco nero, infatti servirebbero miliardi di miliardi di universi affinché si raggiunga quella cifra. La relazione tra i buchi neri e le leggi dell'acustica si estende anche alla spiegazione di alcuni dei fenomeni che riguardano i buchi neri e al funzionamento in via generica di quest'ultimi.

Lo studio dei buchi neri dovuti al collasso gravitazionale può essere studiato mediante delle analogie con i buchi neri acustici di cui abbiamo appena parlato.

Nella realtà fisica in cui viviamo oggi non è semplice fare uno studio accurato sui buchi neri gravitazionali, questo avviene poiché non è possibile operare direttamente con questi oggetti fisici, infatti nessun essere umano e nessuna macchina costruita oggi dall'uomo è in grado di avvicinarsi ad un buco nero.

La sua forza gravitazionale ha una intensità talmente elevata che non permette di raggiungere un buco nero a distanze molto ravvicinate.

Dunque sorge il problema di come poter studiare queste realtà fisiche ed i fenomeni ad esso associati; per ovviare a questo problema è possibile realizzare degli oggetti, che sfruttando i fenomeni acustici, riescono ad imitare il funzionamento di un buco nero gravitazionale; un oggetto che possiede tali proprietà viene definito buco nero acustico. Quindi lo studio dei buchi neri gravitazionali e di tutti i fenomeni ad esso associati si riconduce allo studio dei buchi neri acustici, tutto ciò è possibile per un semplice fatto di analogia tra i due fenomeni.

Nel 1974 fu pubblicato un articolo di Stephen Hawking in cui egli dimostrava che utilizzando la descrizione quantistica della luce, i buchi neri emettono una radiazione termica costante, fu proprio questo risultato ad aprire una nuova visione di studio dei buchi neri ed in particolare ad indurre un metodo di studio basato sull'analogia con i fenomeni acustici. In particolare si sfruttano le analogie che esistono fra la propagazione della luce e quella del suono in un fluido, infatti gli esperimenti suggeriscono che a distanze molto piccole lo spazio-tempo possa comportarsi come un fluido.

È possibile realizzare un buco nero acustico utilizzando un ugello di Laval. Quest'ultimo è un dispositivo composto da una condotta cilindrica che presenta una strozzatura realizzata per accelerare il fluido a una velocità supersonica assicurandosi che rimanga regolare.

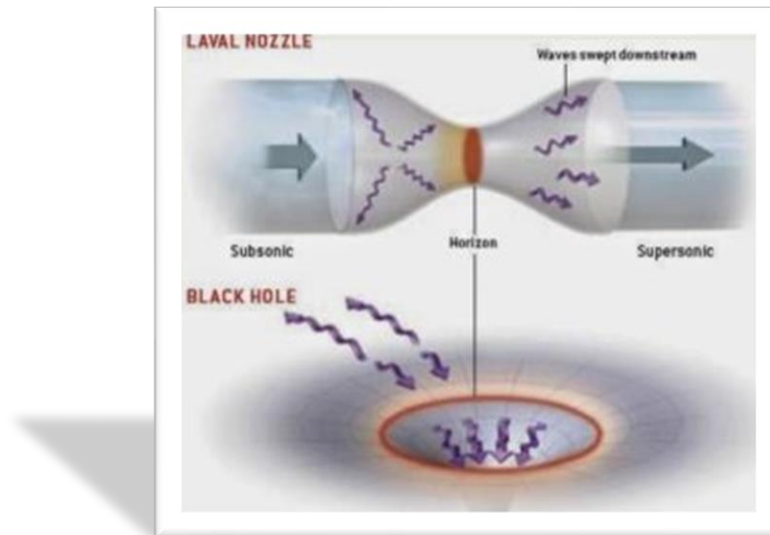


Figura 3 - UGELLO DI LAVAL

Come notiamo in figura, nell'ugello di Laval, il fluido prima di oltrepassare la strozzatura presenta una velocità subsonica in cui la velocità del moto del fluido è minore rispetto alla velocità del suono.

Nel passaggio tra la regione a sinistra e la regione a destra della strozzatura, cioè dopo aver oltrepassato la strozzatura il fluido presenta una velocità supersonica, in cui la velocità del moto del fluido è maggiore rispetto a quella del suono, senza provocare deflagrazione sonora, come succede solitamente al superamento della barriera del suono.

Per deflagrazione sonora si intende la liberazione rapida e irrefrenabile di energia in cui la velocità del fluido è dell'ordine di pochi centimetri o metri al secondo.

Per capire meglio il fenomeno che avviene bisogna restringersi all'istante in cui avviene il passaggio del fluido all'interno della strozzatura;

In questo passaggio bisogna considerare l'equazione di continuità per la meccanica dei fluidi secondo cui

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Dove:

$A_1$  = sezione condotta

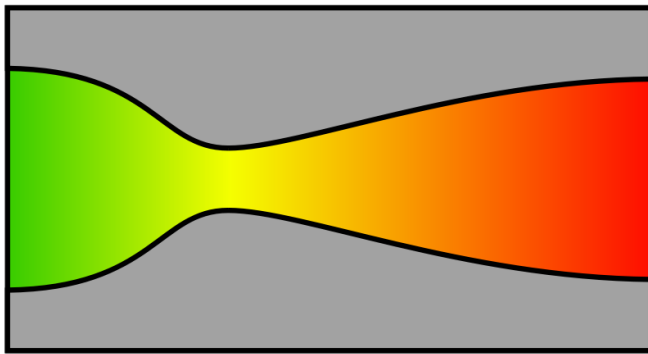
$v_1$  = velocità del fluido nel momento in cui attraversa la condotta di sezione  $A_1$

$A_2$  = sezione condotta

$v_2$  = velocità del fluido nel momento in cui attraversa la condotta di sezione  $A_2$



Quindi, alla luce di questa equazione, è possibile notare che, in regime subsonico un fluido che attraversi un condotto le cui sezioni diminuiscono deve necessariamente aumentare la velocità affinché l'equazione sopra rimanga verificata; Infatti se supponiamo che il fluido in regime subsonico attraversi un condotto



cilindrico con sezione  $A_1$  e velocità  $v_1$ , allora dopo aver oltrepassato la strozzatura la sezione diminuisce diventando  $A_2 < A_1$ , quindi la sua velocità deve necessariamente aumentare, fino a raggiungere un regime supersonico, altrimenti l'equazione di continuità non è soddisfatta.

A questo punto le onde sonore non possono più propagarsi all'indietro nel fluido.

— Flusso —→

Figura 4 - UGELLO DI LAVAL E VERSO DEL FLUSSO DEL FLUIDO

La geometria acustica associata a questo flusso è molto simile a quella di un buco nero, questo si può verificare analizzando le traiettorie seguite dalle onde sonore che si sviluppando durante questo fenomeno. Da diversi esperimenti si è verificato che nella regione in cui il flusso è supersonico, le onde sonore si propagano con verso uguale a quello di scorrimento del fluido e quindi sono trascinate a valle, come le onde luminose nella regione interna di un buco nero. La zona supersonica bisogna immaginarla in analogia alla regione interna di un buco nero, in tale regione la velocità di fuga risulta superiore alla velocità della luce, e poiché la velocità della luce è un limite insuperabile, nessuna particella di materia e tantomeno nessuna onda luminosa può allontanarsi da quella regione.

La zona di frontiera di questa regione, cioè il confine tra la regione subsonica e la regione supersonica in cui avviene l'aumento di velocità del fluido, si comporta come l'orizzonte degli eventi di un buco nero: infatti in questa zona si verifica una separazione delle onde in due classi, quelle che possono risalire a monte e quelle che non possono risalire a monte e quindi tornano indietro a valle.

Invece la regione subsonica la si deve pensare in analogia alla parte dello spazio in cui si può entrare all'interno di un buco nero, in questa regione nello spazio le onde luminose sono attratte verso il buco nero mentre altre particolari onde luminose possono sfuggire ad esso mentre nel buco nero acustico si crea lo stesso fenomeno poiché ci sono onde sonore che sono trascinate a valle mentre solo alcune onde sonore riescono a tornare indietro.

Inoltre nella regione subsonica le onde che risalgono controcorrente perdono energia allontanandosi dall'orizzonte, come fanno i fotoni sottoposti al fenomeno di red shift gravitazionale.

Quindi in definitiva l'ugello di Laval, con il quale si può creare un buco nero acustico, possiede le stesse proprietà di un buco nero gravitazionale, e quindi è uno dei dispositivi più efficaci per la descrizione dei fenomeni fisici che avvengono in questi oggetti gravitazionali.