

TESI

I FENOMENI ONDULATORI

**ONDE ELETTROMAGNETICHE
ONDE ACUSTICHE: LA MUSICA**



Lorenzo Monacelli, Liceo Scientifico A. Avogadro, Roma, V H, a.s. 2010/2011

Indice generale

| | |
|--|----|
| Introduzione..... | 3 |
| Le onde..... | 4 |
| PARTE 1..... | 6 |
| LE ONDE ELETTROMAGNETICHE..... | 6 |
| La luce..... | 6 |
| Il modello corpuscolare..... | 6 |
| Il modello ondulatorio..... | 7 |
| L'effetto fotoelettrico..... | 8 |
| Il modello dualistico corpuscolare-ondulatorio..... | 8 |
| Lo spettro della radiazione luminosa..... | 9 |
| La velocità della luce..... | 12 |
| PARTE 2..... | 18 |
| LE ONDE SONORE..... | 18 |
| Acustica..... | 18 |
| Classificazione del suono..... | 19 |
| Il fenomeno degli armonici..... | 20 |
| La scala pitagorica..... | 21 |
| La scala tolemaica o zarliniana o naturale..... | 23 |
| Il sistema ben temperato o temperamento equabile di Bach..... | 25 |
| La fuga..... | 26 |
| Il clavicembalo ben temperato..... | 26 |
| Fuga n 1 (completa)..... | 27 |
| Fuga n 11 (esposizione)..... | 28 |
| La sonata..... | 29 |
| Mozart, sonata in re maggiore k381..... | 29 |
| Beethoven sonata n 32 op 57 "Appassionata"..... | 30 |
| Le influenze che la musica ha avuto nella cultura occidentale..... | 33 |
| Schopenhauer e la musica..... | 34 |
| Nietzsche e la polemica con Wagner..... | 35 |
| La musica e arte nel 900..... | 36 |
| Musica e letteratura nel 900..... | 37 |
| La pioggia nel pineto..... | 37 |
| CONCLUSIONE..... | 40 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 41 |

Introduzione

Chi di noi non si è fermato almeno una volta a osservare le onde del mare infrangersi sulla riva e non è rimasto incantato lì, ad ammirare questo capolavoro della natura? Le onde si ripetono, una dopo l'altra, senza mai arrestarsi. Eppure ogni onda è diversa dalla precedente, ogni suono emesso si distingue dall'altro, bloccando il nostro sguardo sull'infinito mare, estasiati nel sublime matematico kantiano.

Tutte le onde trasportano energia ma non materia, anche se le onde del mare sembrano suggerirci il contrario. Per questo motivo sono il mezzo più semplice per la comunicazione e lo scambio di informazione. Parliamo tra di noi, ma in realtà, stiamo producendo onde che trasferiscono energia attraverso l'aria. Queste onde a contatto con il timpano lo mettono in vibrazione, e l'apparato uditivo trasforma l'energia che ci arriva in impulsi elettrici da inviare al nostro cervello, che li interpreta.

La luce stessa, la nostra più preziosa fonte di informazione, è un'onda. Studiare le onde ci aiuta a capire come possiamo sfruttarle a nostro vantaggio, per comunicare, per vedere, per agire.

In questo testo si analizzeranno essenzialmente due tipologie di fenomeni legati alle onde: le onde elettromagnetiche (parte 1) e le onde acustiche (parte 2).

Nella prima sezione sono affrontati i problemi di natura fisica della luce, della sua descrizione secondo un corretto modello matematico, e di come la luce, anzi, tutto lo spettro elettromagnetico, ci è utile per vedere e osservare lo spazio.

Nella seconda sezione parlerò di acustica, del legame profondo alla radice tra fisica e musica, per approfondire in che modo la musica abbia profondamente inciso la nostra storia, in particolare quella del diciannovesimo e del ventesimo secolo.

Nel capitolo introduttivo saranno brevemente esposte le caratteristiche generiche delle onde, specialmente in quei fenomeni che rivestono grande importanza per comprendere le onde elettromagnetiche e le onde acustiche (il fenomeno dei battimenti e dell'interferenza).

Le onde

Un'onda è un trasferimento di energia senza spostamento di materia. Può propagarsi attraverso un mezzo materiale, dove prende il nome di onda materiale, o attraverso il vuoto; in questo caso è un'onda elettromagnetica.

Ogni punto materiale attraverso cui l'onda si propaga può essere soggetto ad uno spostamento che corrisponde ad un'oscillazione¹ di un punto attorno a se stesso. Se un materiale è composto da due onde di pari intensità e frequenza che si muovono nella stessa direzione ma in due versi opposti si formano onde stazionarie, limitate in una definita zona spaziale e a cui non è legato alcun trasporto di energia². Nelle onde stazionarie si formano zone in cui la vibrazione è più intensa, i ventri, e zone in cui la vibrazione è nulla, i nodi.

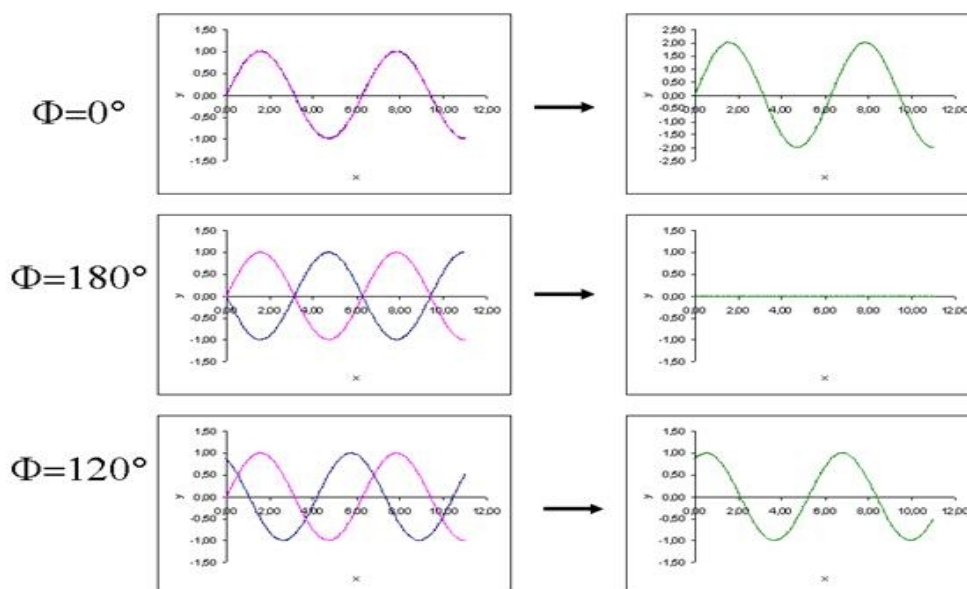
Di particolare interesse sono le onde armoniche periodiche. In queste onde ogni punto materiale è soggetto ad un'oscillazione che corrisponde ad un moto armonico. La posizione di ogni punto al variare del tempo è ben descritta dalla seguente equazione:

$$y = A \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t + \varphi_0\right) = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

Dove φ esprime la fase dell'onda, ω esprime la pulsazione del moto armonico.

L'interferenza

La sovrapposizione di due onde può creare disturbi nella trasmissione dell'onda. In generale si ha un'interferenza costruttiva se gli effetti delle onde si rafforzano, un'interferenza distruttiva se si annullano a vicenda.

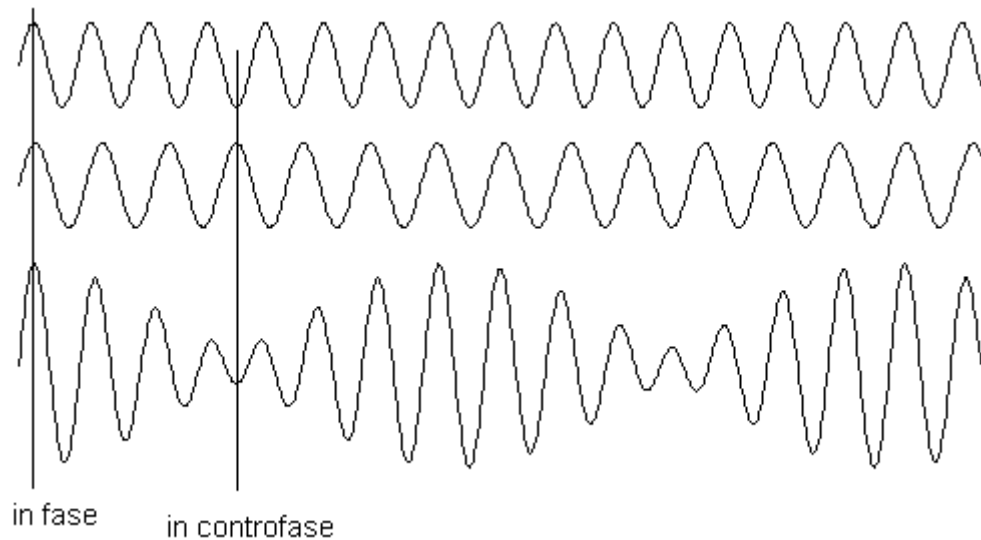


1 In un'oscillazione lo spazio percorso in un intervallo di tempo superiore alla durata dell'oscillazione è sempre nullo, pertanto questa constatazione non entra in contrasto con quanto affermato prima, e cioè che all'interno di un'onda non c'è spostamento di materia.

2 Sono onde stazionarie il vibrare di una corda, o le onde che generano suoni.

I battimenti.

Il fenomeno è un fenomeno tipicamente osservabile per le onde acustiche, dove acquisisce una particolare importanza per l'accordatura degli strumenti musicali, ma riguarda tutti i fenomeni ondulatori, almeno in teoria. Avviene quando sovrapponiamo due onde con frequenze molto vicine tra loro (f^1 e f^2). Ipotizzando che le onde partano in fase, avremo all'inizio una interferenza totalmente costruttiva, pertanto l'intensità dell'onda sarà doppia. Conclusa il primo ciclo le due onde si troveranno leggermente sfasate di $(f^1 - f^2)Hz$. Dopo un tempo T pari a $1 / (f^1 - f^2)$ le due onde saranno in controfase, in interferenza distruttiva. Trascorso di nuovo il tempo T torneranno in fase. Questo fenomeno produce oscillazioni di intensità che sono percepibili dall'orecchio umano tanto più le frequenze sono vicine tra loro.



PARTE 1

LE ONDE ELETTROMAGNETICHE

La luce

Uno dei più comuni esempi onda elettromagnetica è la luce.

La natura fisica della luce venne descritta nella storia da due importanti modelli, il modello corpuscolare, che vede tra i suoi più convinti sostenitori Newton, e il modello ondulatorio, tornato alla ribalta verso la fine dell'ottocento.

I primi studiosi della natura fisica della luce furono i filosofi del rinascimento (Telesio, Campanella e Bruno).

Le caratteristiche più evidenti della luce sono la sua propagazione in linea retta³ e la riflessione, che avviene con un angolo di incidenza uguale all'angolo di riflessione.

Il modello corpuscolare

Il primo modello fisico usato per descrivere le caratteristiche della luce prevedeva che fosse formata da tante particelle piccolissime e velocissime. I primi esempi di questa teoria risalgono addirittura a Lucrezio.

Questo modello spiega molto bene la propagazione in linea retta della luce e anche la riflessione. Il modello corpuscolare presume che la luce abbia una velocità finita. Il primo a tentare di calcolare la velocità della luce fu Galileo, ma l'imprecisione del suo esperimento non gli permise di avere dati accurati. La prima misura relativamente accurata fu fatta da Roemer, che studiò un'anomalia nelle eclissi dei pianeti medicei.

Le prime difficoltà di questo modello si incontrano con il fenomeno della rifrazione⁴ della luce. Il modello corpuscolare la spiega sostenendo che i corpuscoli, attratti dal materiale più denso accelerano subendo una deviazione lungo la normale. Secondo il modello corpuscolare la luce viaggia più velocemente nei materiali più densi. Il fenomeno della diffrazione⁵ viene spiegato sostenendo che la luce, attratta dalle pareti del foro, viene parzialmente deviata producendo contorni d'ombra sfocati.

Il modello corpuscolare entra definitivamente in crisi però con il fenomeno dell'interferenza⁶. Il

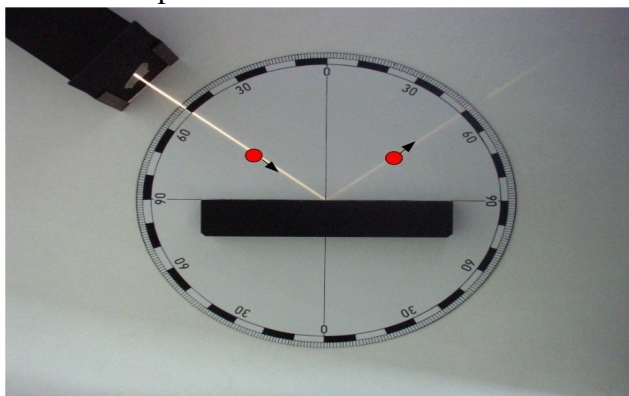
3 Questo è valido solo se si prendono in considerazione le leggi della Fisica classica escludendo la relatività generale di Einstein.

4 La rifrazione è un fenomeno secondo cui la, nel passare da un mezzo meno denso ad uno più denso subisce una deviazione che la fa avvicinare alla normale secondo la legge di rifrazione: $\sin(i) / \sin(r) = n_1 / n_2$ con i = angolo di incidenza, r = angolo di rifrazione, n_1 e n_2 sono gli indici di rifrazione dei due materiali.

5 La diffrazione è quel fenomeno per cui un raggio di luce fatto passare attraverso un foro produce contorni sbiaditi.

6 L'interferenza della luce è un fenomeno che avviene quando la luce passa attraverso due fenditure vicine proiettando su un piano posto più indietro una serie di motivi di luci e ombre alternate.

finale colpo di grazia a questo modello arrivò dalla misura della velocità della luce fatta da Foucault, infatti questa dimensione era troppo grande per giustificare le deviazioni ottenute dall'interferenza e la rifrazione. La misura che Foucault riprodusse nei diversi materiali trasparenti dimostrò poi che la velocità della luce nei materiali più densi fosse minore rispetto a quelli meno densi, in contrasto con il modello corpuscolare.



Il modello ondulatorio

Secondo il modello ondulatorio la luce è una particolare onda che si propaga all'interno di un mezzo materiale⁷. La principale differenza con il modello corpuscolare sta nel fatto che qui l'onda non trasferisce più materia, ma solo energia. Il comportamento della luce soddisfa parzialmente questo modello. Spiega perfettamente la propagazione in linea retta, la riflessione, la rifrazione, la diffrazione e soprattutto l'interferenza: infatti le zone di ombra che si proiettano sulla parete sono spiegate dalla sovrapposizione di una cresta e una valle d'onda. Inoltre questo modello prevede che nel passare da un mezzo materiale meno denso ad uno più denso la luce rallenti. Nel 1873 il fisico Maxwell riuscì a derivare le perturbazioni nel campo elettrico e magnetico delle onde elettromagnetiche. Scoprì quindi che la velocità delle onde elettromagnetiche nel vuoto fosse sempre uguale ad una costante⁸, che chiamò 'c'. Essendo il valore 'c' molto vicino a quello calcolato da Foucault per la velocità della luce si suppose che anche la luce fosse un'onda elettromagnetica.

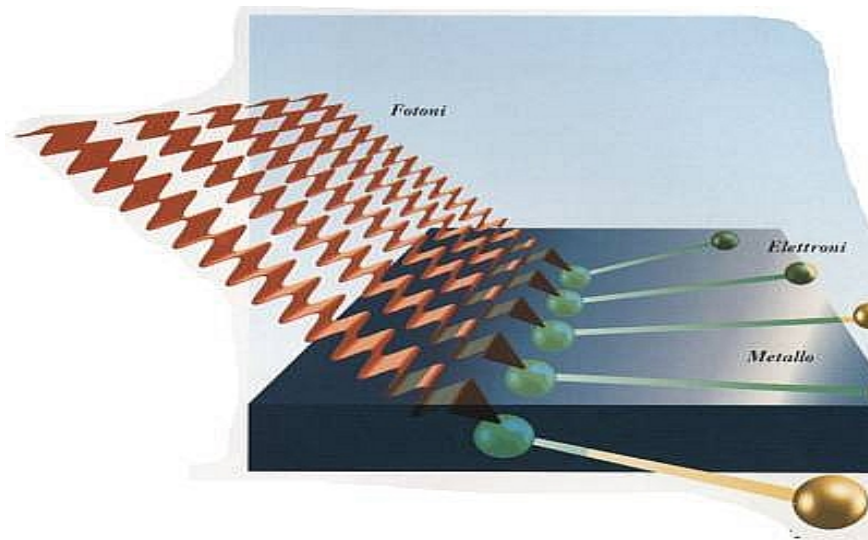
Ma proprio quando sembrava di aver finalmente compreso il modello della luce tutto il sistema fu messo in crisi da una nuova incredibile scoperta.

L'effetto fotoelettrico

L'effetto fotoelettrico è una particolare proprietà della luce nel far emettere elettroni ad un oggetto irradiato. Il modello ondulatorio presupponeva che all'aumentare dell'intensità luminosa aumentasse l'energia dei singoli elettroni espulsi dal materiale irradiato, mentre invece ad aumentare era solo il numero di elettroni emessi. Per spiegare questo fenomeno fu usato nuovamente il modello corpuscolare, causando la definitiva caduta del modello ondulatorio.

⁷ In realtà la luce è un'onda elettromagnetica che si propaga anche nel vuoto.

⁸ Questa scoperta aprì la strada alla teoria della relatività di Einstein.



Il modello dualistico corpuscolare-ondulatorio.

Questo modello fu introdotto da Albert Einstein nel 1905. Il fisico tedesco suppose che la luce fosse composta da corpuscoli chiamati fotoni aventi un'energia quantizzata: $U = h \cdot \nu$, dove h è la costante di Planck e ν la frequenza della luce. Ma la frequenza è una caratteristica delle onde, non dei corpuscoli. Pertanto la luce, e con lei tutta la radiazione elettromagnetica, è contemporaneamente onda e corpuscoli, la cui natura è descritta da un modello dualistico atto a spiegare tutti i fenomeni e gli effetti sopracitati.

Un'altra scoperta sconvolgente fu fatta qualche anno più tardi, nel 1929 dal fisico Bohr, il quale estese questo modello a tutte le particelle fondamentali, dimostrando con esperimenti pratici che anche l'elettrone dà luogo alla diffrazione.

Lo spettro della radiazione luminosa

Prima abbiamo affermato che la luce visibile è solo una piccola parte della radiazione elettromagnetica. Questo avviene perché i nostri occhi possono percepire solo determinate frequenze della radiazione luminosa. Le radiazioni a frequenza leggermente inferiore del visibile sono chiamate radiazioni infrarosse (di cui noi siamo sorgenti), quelle a frequenze leggermente superiori sono chiamate radiazioni ultraviolette, tanto dannose per la nostra pelle se sottoposta a un'esposizione prolungata. Lo spettro elettromagnetico completo è una potente arma per indagare lo spazio (e non solo).

L'intervallo delle frequenze va da circa 10^2 Hz, caratteristica delle onde hertziane, ai raggi γ , che hanno frequenze superiori a 10^{18} Hz.

Lo spettro viene suddiviso per convenzione in sette diverse bande: *onde radio o hertziane, microonde, infrarosso, visibile, ultravioletto, raggi X, raggi γ* .

Spesso nella suddivisione si accavallano le varie frequenze, questo perché i nomi delle bande sono stati dati in base agli strumenti usati per rivelarle o agli usi che se ne sono fatti, come per le onde ad alta frequenza. È sempre la frequenza che determina le proprietà fisiche di un'onda elettromagnetica. Questo perché nel passaggio da un mezzo materiale ad un altro, e quindi al variare della velocità della luce, la frequenza rimane invariata, mentre cambia la lunghezza d'onda.

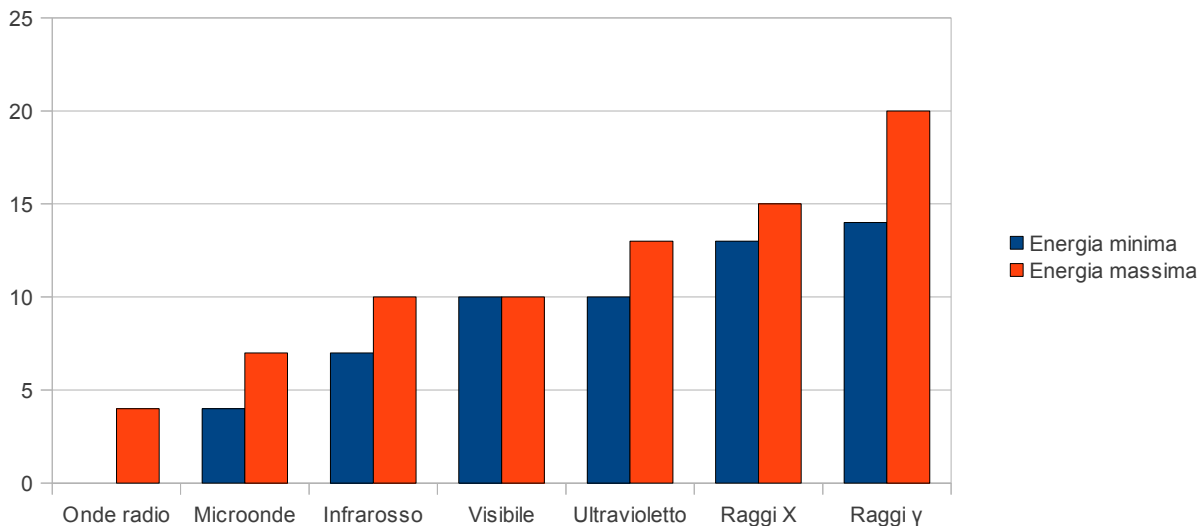
Nel provenire dallo spazio questa radiazione viene fortemente filtrata dall'atmosfera, ecco una delle necessità di costruire satelliti per poter osservare lo spazio senza distorsioni dovute all'effetto dell'atmosfera. Non è un caso che il nostro occhi ha sviluppato una maggiore sensibilità alla luce “visibile”, infatti questa è la radiazione che viene trasmessa con più facilità dalla nostra atmosfera.

I nostri occhi sono in grado di percepire una piccola parte della radiazione elettromagnetica. La restante parte può essere percepita da uno strumento.

Secondo l'equazione analizzata nel paragrafo precedente, che consente di ricavare l'energia dei quanti di luce, l'energia di un onda è direttamente proporzionale alla frequenza. Onde a frequenza maggiore, come i raggi X e γ hanno un'energia maggiore (e sono pertanto le più pericolose per la nostra salute).

Per il grafico ho usato una scala logaritmica prendendo come 0 il punto ad energia $U = 10^{-10} eV$
I valori pertanto sono disposti secondo la formula:

$$y = \log_{10}\left(\frac{x}{10^{-10}}\right)$$

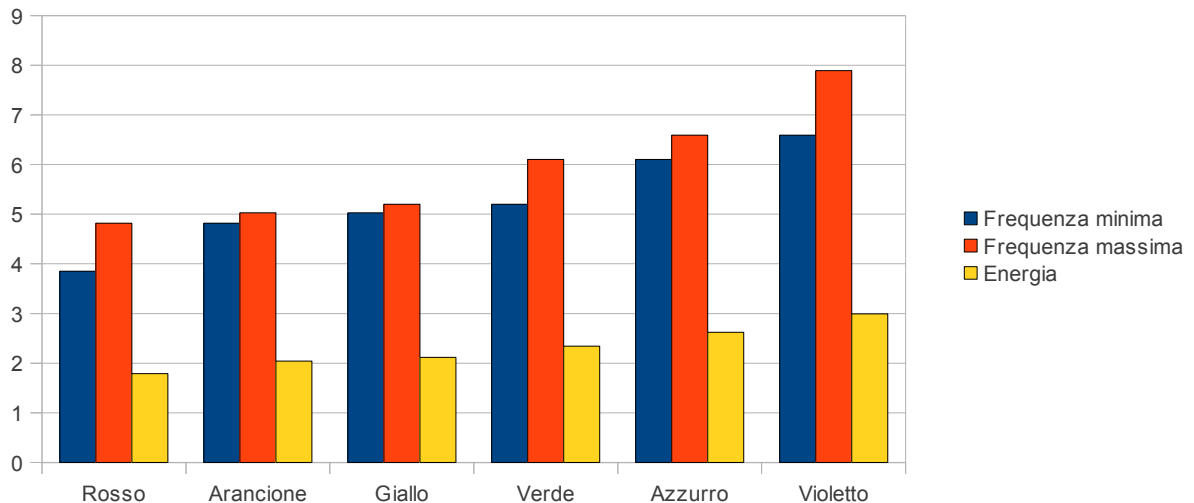


Le onde radio non hanno energia minima. Dal grafico si evince come la luce visibile rappresenti un intervallo strettissimo di energie e di frequenze, per maggior chiarezza saranno disposte su un grafico lineare. Si noti come il valore minimo di energia dei Raggi γ sia minore del valore massimo di energia dei Raggi X. Questo produce un accavallamento.

Il seguente grafico raffigura solo la porzione dello spettro del visibile. I valori sono rappresentati rispettando le funzioni:

Frequenza: $y = \frac{x}{10^{14}} Hz$ Energia: $y = x eV$

Ogni tipo di onda permette di studiare oggetti che hanno un ordine di grandezza della loro lunghezza d'onda. Per studiare la struttura di un atomo non possiamo infatti utilizzare la luce visibile, ma dobbiamo utilizzare particolari strutture chiamate acceleratori di particelle.



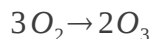
L'onda hertziana è l'onda elettromagnetica a energia minore. Per questa sua caratteristica non può dare origine a processi singoli osservabili, pertanto la descrizione classica del modello ondulatorio si adatta molto bene a questo genere di onde. Sono prodotte da circuiti elettrici oscillanti e vengono utilizzate principalmente nelle trasmissioni radiofoniche e televisive. Ecco perché si parla anche di onde radio o radiofrequenze.

Le microonde sono utilizzate principalmente da apparecchiature radar e anche loro si adattano abbastanza bene al modello ondulatorio con qualche eccezione dovuta a particolari processi molecolari che emettono radiazioni a questa frequenza (maser)

L'onda infrarossa viene emessa dalla vibrazione termica spontanea dei corpi caldi. L'energia dei quanti di infrarosso è sufficiente a causare la vibrazione delle molecole che colpisce causando un aumento della temperatura del corpo irradiato.

La luce visibile ha un arco molto stretto di frequenze. Viene emessa da corpi molto caldi (incandescenti) o da scariche elettriche in un gas (lampade). A questa radiazione è sensibile la maggior parte degli animali. La principale sorgente di luce visibile arriva dall'involucro esterno del nostro sole, dove l'agitazione termica degli atomi ad una temperatura di circa 6000 K emette luce in uno spettro con un picco nel visibile. Gli effetti della luce sono ben spiegabili con il modello ondulatorio, anche se per alcuni particolari fenomeni (come l'effetto fotoelettrico) occorre ricorrere alla meccanica quantistica.

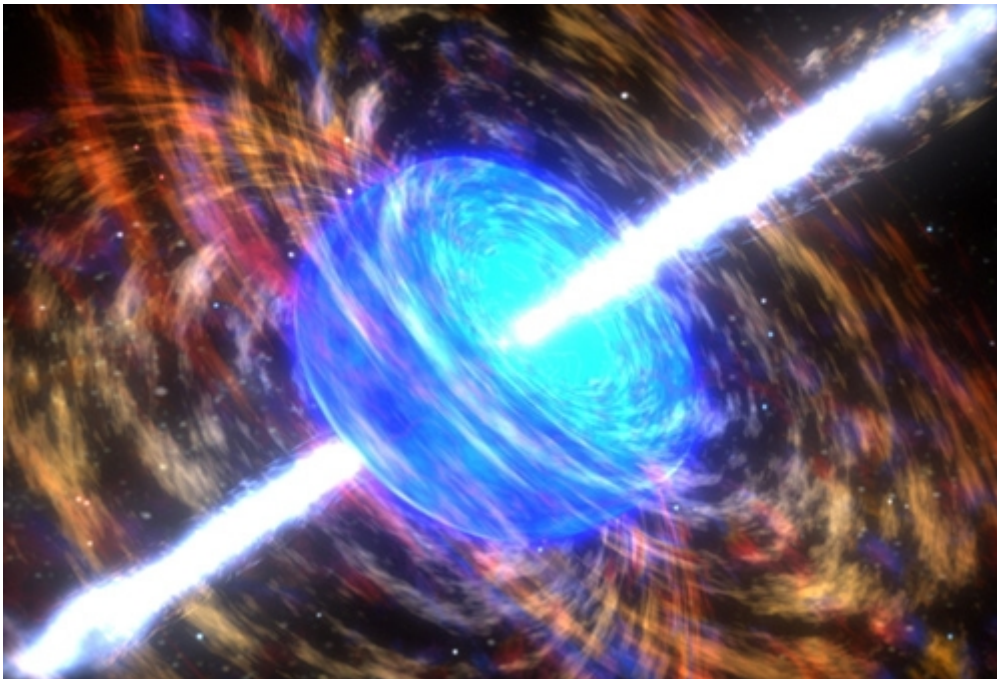
La radiazione ultravioletta viene emessa da atomi eccitati ad altissime temperature. L'uso scientifico di questa radiazione è per lo studio delle strutture atomiche (la lunghezza d'onda arriva all'ordine del nanometro). La principale fonte di emissione ultravioletta è il nostro sole. La radiazione proveniente dal sole contribuisce a ionizzare gli strati superficiali della nostra atmosfera originando la ionosfera. L'assorbimento della radiazione avviene tra i 20 ed i 30 km dalla superficie terrestre, dove si verificano le condizioni ideali per la formazione dell'ozono secondo la formula chimica:



Questa trasformazione profondamente endotermica è resa possibile dall'apporto massiccio di energia proveniente dalla radiazione ultravioletta. L'assottigliamento dello strato di ozono nell'atmosfera ha gravi conseguenze per la vita sulla terra, infatti la radiazione ultravioletta risulta letale se ricevuta in grandi quantità. I responsabili della diminuzione dell'ozono sembrano essere i clorofluorocarburi (CFC), immessi nell'atmosfera dall'incenerimento della plastica, dall'uso di spray e dagli impianti frigoriferi. L'esposizione della pelle alle radiazioni ultraviolette controllata procura l'abbronzatura, risultato della produzione di melanina come reazione difensiva del nostro corpo.

I raggi X sono emessi in due modi differenti. Il primo consiste nell'accelerazione degli elettroni, il secondo come radiazione naturale di alcuni atomi eccitati. Sono usati per le radiografie per la loro differente interazione con i vari tessuti del corpo umano, e in particolare quello osseo. Proprio per questa capacità di interazione e l'elevata energia di ogni quanto di luce sono molto dannosi per l'organismo e vengono utilizzati nelle terapie per eliminare le cellule tumorali, non senza rischi. I loro impiego per lo studio delle strutture cristalline dei minerali ne ha rivelato la natura ondulatoria (subiscono infatti la diffrazione) anche se il modello principale per descrivere il comportamento di quest'onda è il modello corpuscolare.

I raggi γ sono emessi principalmente nelle reazioni di decadimento degli atomi, processi atomici e subatomici, ma anche tutti i fotoni con energia superiore a circa 100 keV. I raggi γ prodotti nei processi atomici possono raggiungere un'energia nell'ordine del MeV, mentre quelli generati da processi subatomici possono raggiungere in pratica qualunque energia. I raggi γ prodotti in laboratorio raggiungono i 10^2 GeV, mentre quelli generati dalla radiazione cosmica arrivano oltre i 10^{12} eV. A causa della elevatissima energia sono pericolosissimi per gli organismi viventi, pertanto si deve maneggiare con estrema cura le sorgenti di questi raggi, in particolare gli atomi radioattivi. Sono testimoni di eventi molto violenti che avvengono nello spazio, come i γ -ray burst delle stelle di neutroni. Possono essere usati per terapie anti-tumorali come i raggi X. La loro lunghezza d'onda è così piccola da non poter essere misurata con gli strumenti di cui disponiamo, pertanto è applicabile unicamente il modello corpuscolare per questa radiazione.



1: *Gamma ray burst*



Illustrazione 2: Immagine di un gatto osservato alla luce infrarossa

La velocità della luce

Dalle equazioni di Maxwell si può ricavare la velocità delle onde elettromagnetiche in qualsiasi mezzo materiale. Essa è pari a:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\kappa_e \cdot \kappa_m}}$$

Poiché $\sqrt{\kappa_e \cdot \kappa_m} > 1$ e $\epsilon_0 \cdot \mu_0$ è una costante, il valore massimo raggiungibile dalla radiazione elettromagnetica è c :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = 2.99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Questo valore è, con un'approssimazione molto buona pari a $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$: l'errore relativo è pari a

$$E_r = \frac{0,002 \cdot 10^8}{3.000 \cdot 10^8} < 1 \text{‰}$$

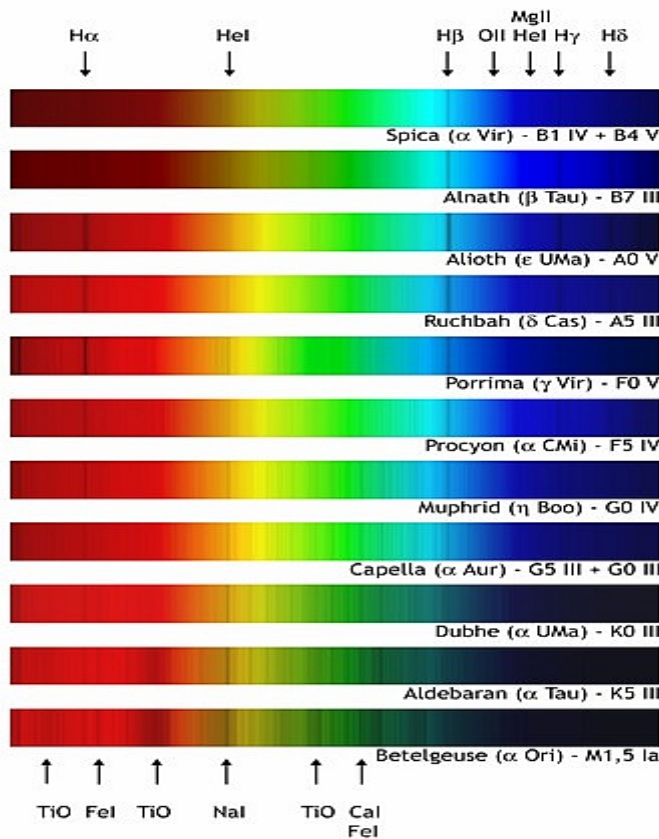
A questo risultato teorico si è giunti dopo una serie di esperimenti pratici che vedono in Galileo il loro iniziatore. Se la misura effettuata dal fisico non fu accurata⁹ il primo dato rilevante fu ottenuto dall'astronomo Roemer che calcolò la differenza del tempo che impiegava Io a essere eclissato da Giove se la terra si trovava nel punto più vicino o lontano dal gigante gassoso nel suo moto di rivoluzione. Il valore ottenuto da Roemer fu di $c = 2,143 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, un valore approssimato ma nel giusto ordine di grandezza. Le successive misurazioni migliorarono la precisione del risultato ottenuto da Roemer. Una grande rivoluzione fu il metodo di Frizeau¹⁰ che consentì di misurare la

9 Galileo tentò di misurare la velocità della luce calcolando la differenza del tempo da quando veniva acceso un falò su una collina e quando questo falò veniva avvistato. Ma la velocità della luce è talmente elevata che il rapporto tra il ritardo dovuto all'imprecisione della strumentazione (l'occhio umano) e il tempo impiegato dalla luce è talmente alto da falsare totalmente il risultato.

10 La luce percorre un percorso alla fine del quale è posto uno specchio. Pertanto la luce percorre complessivamente un percorso di lunghezza pari a $2h$. Frizeau interpose una ruota dentellata che ruota con velocità angolare ω tale che la luce passi solo attraverso le fessure sia all'andata che al ritorno. Detto $\Delta\Phi$

velocità della luce direttamente dalla Terra. Il metodo fu poi perfezionato da Foucault che ottenne la misura di c con un approssimazione inferiore allo 0,001% e riuscì a misurare anche la velocità della luce nei vari materiali. Attualmente la velocità della luce viene calcolata misurando con grande precisione frequenze e lunghezze d'onda da cui ricavare poi la velocità, che risulta essere il prodotto tra i due valori. L'approssimazione attuale è nell'ordine di 1 m/s.

L'uso della luce per osservare lo spazio



I differenti spettri luminosi consentono di indagare lo spazio molto bene. Irradiando un particolare materiale con una luce a spettro completo (Su tutte le lunghezze d'onda) possiamo ricavare dall'analisi dello spettro interessanti informazioni. L'intervallo del visibile ci indicherà il colore dell'oggetto, radiazioni a frequenze maggiori ci daranno informazioni sulla struttura molecolare (ultravioletto) sugli atomi (raggi X) e sulle strutture subatomiche (raggi γ). Più i raggi sono ad alta energia maggiore è l'informazione che portano. I raggi infrarossi ci portano informazioni sulla temperatura dell'oggetto, microonde e onde radio sono usate per superare eventuali ostacoli (come la nebbia o le nuvole, usati nei radar terrestre, ma anche per guardare all'interno della pesante atmosfera di alcuni pianeti del sistema solare. Particolare importanza assume l'indagine spettroscopica: infatti è stato dimostrato come ciascun composto chimico o elemento assorba solo determinate frequenze riflettendone altre. Questo fenomeno consente di capire quali elementi costituiscono il cosmo e si è potuto stabilire la composizione delle stelle e delle nebulose. L'analisi dello spettro degli elementi si esegue con un particolare telescopio che isola differenti

l'intervallo angolare tra due fessure e n il numero di denti della ruota si ha la relazione: $\frac{\Delta\phi}{\omega} = \frac{2h}{c}$ da cui segue

$$c = \frac{2 \cdot n \cdot h \cdot \omega}{\pi}$$

valori di lunghezze d'onda a seconda della rotazione dell'oculare. Unendo i dati di tutte le lunghezze d'onda è possibile ottenere una sequenza di strisce colorate separate da bande nere a seconda dell'elemento che sta producendo luce. Gli spettri di emissione, così chiamati perché basati sull'analisi spettroscopica della luce emessa da un gas incandescente (possibilmente rarefatto). Lo spettro ad emissione può essere di tre tipologie differenti:

1. Gli spettri a righe sono generati da righe di colore separate da bande di nero. Sono rilevati da particolari atomi a pressione non molto elevata
2. Gli spettri a bande sono insiemi di righe colorate che formano bande più fitte di colore alternate a bande nere. Sono caratteristici di particolari strutture molecolari
3. Gli spettri continui sono formati da bande molto grandi di colore quasi ininterrotte, prodotte da solidi o liquidi portati ad incandescenza e dipendono dalla loro temperatura.

Gli spettri a righe o a bande sono caratteristici degli elementi che li formano, tanto che ogni atomo o molecola ha il suo spettro univoco che dipende da caratteristiche quantistiche degli atomi. Questo ci permette di rilevare quali sostanze compongono l'oggetto dello studio anche a distanze astronomiche.

Accanto agli spettri ad emissione esistono gli spettri di assorbimento. Questo si ottiene osservando i solchi nello spettro scavati da un particolare gas attraverso cui passa una luce con spettro continuo. Anche gli spettri di assorbimento possono essere a righe o a bande e sono caratteristiche univoche dei gas che li compongono.

L'analisi spettrale del Sole risulta simile a quella della luce bianca (a spettro continuo), con alcuni solchi scavati dagli elementi che lo compongono. Attraverso questo sistema si può dedurre il fatto che il sole sia una stella di seconda generazione, per la presenza, seppur minima, al suo interno di atomi più pesanti dell'elio, dovuti alla esplosione di una supernova. L'uso della spettroscopia è risultata particolarmente utile per lo studio del pianeta Venere, grazie alla missione a direzione italiana dell'INAF¹¹ Venus Express.

11 Istituto Nazionale AstroFisica.

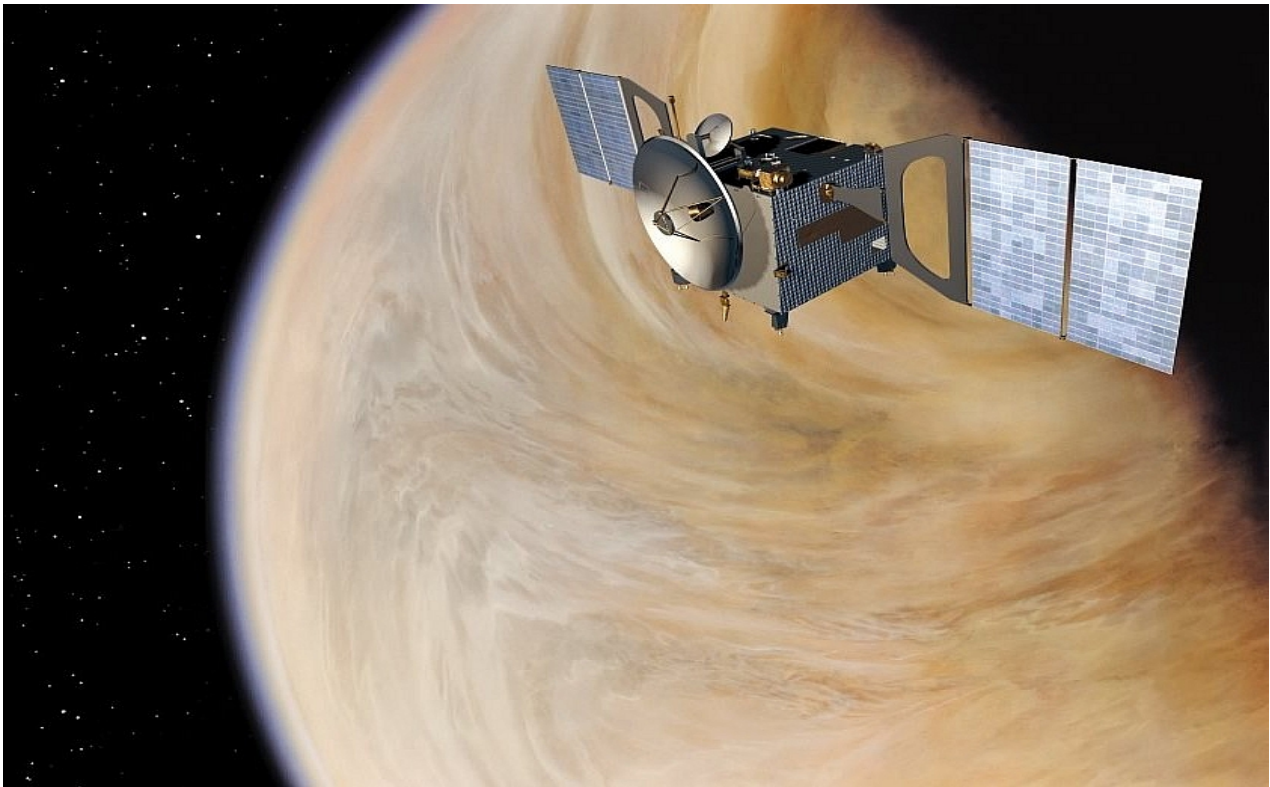


Illustrazione 3: Il satellite Venus Express in orbita attorno a Venere

Il pianeta è circondato da una fittissima coltre di nubi che impedisce ai normali telescopi del visibile di osservare la superficie di Venere (ma che è anche responsabile del suo suggestivo colore rosato). L'analisi dei diversi spettri ha consentito però di superare questa difficoltà. Attraverso l'infrarosso infatti si è riusciti a capire quali zone delle nuvole fossero più spesse e misurare la temperatura superficiale del pianeta realizzando un'altimetria molto dettagliata. L'analisi dell'atmosfera con l'ultravioletto ha permesso di aumentare il contrasto delle nuvole evidenziando un enorme vortice al polo che ruota ben 60 volte più veloce del moto di rotazione del pianeta e di cui la causa rimane ancora oggi un mistero. La velocità misurata di questi venti superano i 400 km/h. Sulla sua superficie tramite un'analisi combinata di microonde, onde radio e infrarosso è stato scoperto un vulcano, la cui ultima eruzione è avvenuta soltanto 250000 anni fa (un valore relativamente basso se si prendono in considerazione i tempi geologici dei pianeti).

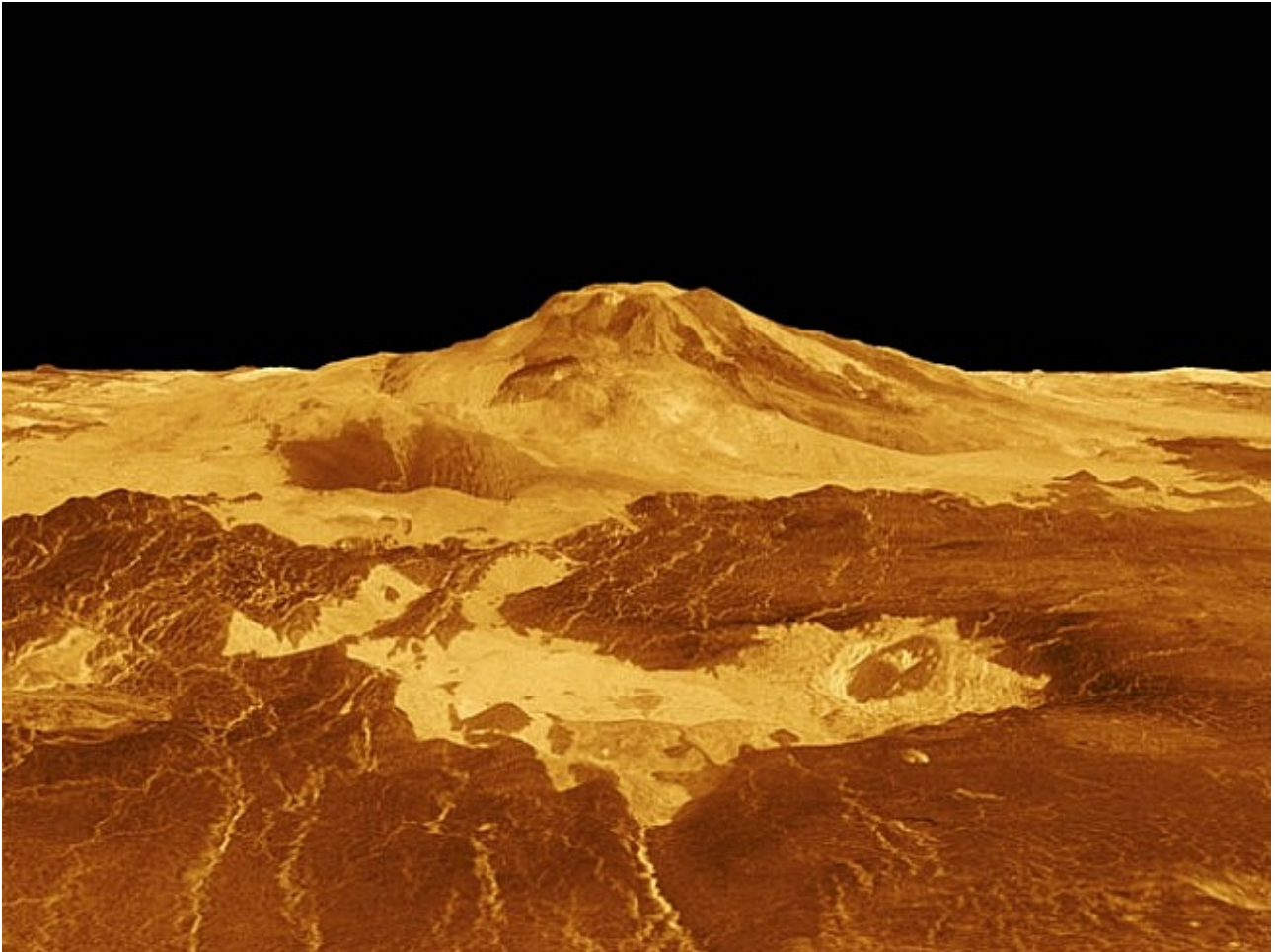


Illustrazione 4: Ricostruzione del vulcano di Venere rilevato dalla missione ESA Venus Express

Purtroppo per gli studi (ma per fortuna per la nostra salute) l'atmosfera terrestre non lascia filtrare le onde più energetiche come raggi X e raggi γ o le microonde. Per poter osservare queste onde occorre allontanarsi dall'atmosfera attraverso i satelliti. I primi mezzi per vincere questa difficoltà furono dei razzi impiegati nel dopoguerra (che potevano prendere misurazioni poco atturate per tempi irrisori, circa 5 minuti), presto rimpiazzati da palloni sonda stratosferici (che potevano raccogliere informazioni per pochi giorni) ai moderni satelliti (che restano in orbita parecchi anni). Attraverso l'analisi della luce visibile si osservano stelle, nebulose e galassie. Molto più spettacolare appare l'universo osservato con gli occhi dell'alta energia (raggi X e γ) emessi principalmente per il fenomeno del sincrotrone¹². Le principali sorgenti di questi raggi sono stelle di neutroni e buchi neri supermassivi, costituenti del centro delle galassie. Nell'infrarosso osserviamo enormi nubi di gas caldo, e si coglie anche qualche stella e galassia.

Le principali fonti spaziali di raggi γ sono le particelle cariche che collidono con nubi di gas molto calde. Altre sorgenti importanti sono i Pulsar¹³ e buchi neri.

L'analisi dell'universo nell'alta energia ha portato alla scoperta di nuove forme degenerate della materia, come la nana bianca, osservata ai raggi γ per la prima volta accanto a Siro, o la stella di neutroni, una sfera dalle dimensioni piccolissime (con un diametro paragonabile alla città di Roma) ma dalla massa paragonabile a quella di una stella.

Il grande rimpicciolimento di questi corpi causa un aumento della velocità di rotazione per la conservazione del momento angolare:

¹² Accelerazione di protoni ed elettroni lungo le linee di forza di campi magnetici molto forti

¹³ I pulsar sono stelle di neutroni molto attive che hanno emissioni variabili con picchi molto forti.

$$L = m \cdot r^2 \cdot \omega$$

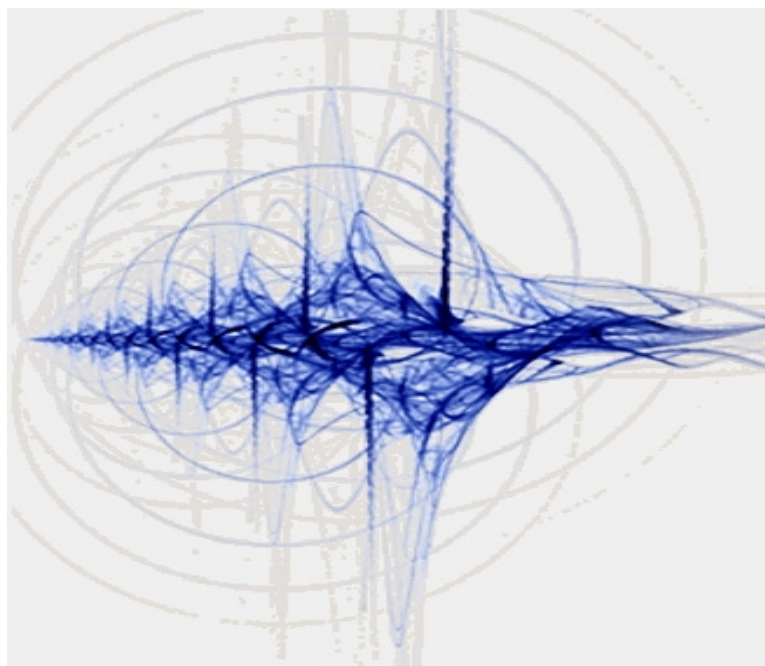
Dove m è la massa della stella (che diminuisce leggermente), r è il raggio che diminuisce in maniera molto considerevole (dalle dimensioni di una supernova a quelle di una città), pertanto dovendo L rimanere invariato questo provoca un aumento della velocità angolare ω veramente impressionante. A questo aumento di velocità corrisponde un aumento del campo magnetico. Ecco che la stella di neutroni diventa un naturale acceleratore di particelle ed emettitore di raggi γ .

Una forma ancor più degenerata di materia è rappresentata dal buco nero. Il buco nero arriva ad avere una massa così alta concentrata in un unico punto di dimensioni nulle (e quindi una densità infinita). Il campo gravitazionale generato da un buco nero ha un limite all'interno del quale la stessa radiazione luminosa viene risucchiata dentro. Probabilmente il buco nero emette enormi quantità di luce, ma questa sua caratteristica impedisce alla luce di abbandonarlo rimanendo sempre imprigionata all'interno del suo immenso campo gravitazionale. Siamo in grado di vedere i buchi neri solo se sono formati da coppie di stelle. Se il buco nero si genera quando la sua compagna è ancora giovane, e per un fortuito caso l'esplosione della supernova da cui il buco nero si forma non divide il sistema binario come avviene nella maggior parte dei casi allora l'immensa gravità del buco nero risucchia il gas della stella ancora giovane formando un anello di gas incandescente attorno alla voragine gravitazionale. Questo gas accelerato all'inimmaginabile arriva a emettere radiazioni a frequenze alte (raggi X e γ). Spesso due buchi neri si scontrano originando un nuovo buco nero chiamato supermassivo. Il nucleo galattico è verosimilmente formato da sistemi di buchi neri supermassivi, anche perché in quella zona dello spazio è concentrata la parte più antica della nostra galassia. Le stelle presenti nel bulbo sono di prima generazione, pertanto non hanno all'interno i materiali per poter originare i pianeti. Non vi sono sistemi solari al centro della nostra galassia.

PARTE 2

LE ONDE SONORE

Acustica



Le onde sonore sono onde longitudinali prodotte dalla vibrazione di un corpo solido e si propagano attraverso un mezzo materiale, principalmente un gas. La perturbazione prodotta dal corpo vibrante genera nell'aria zone di compressione e zone di rarefazione lungo la direzione di propagazione del suono. Questa oscillazione dell'aria viene captata dal nostro timpano che la ritrasmette agli ossicini dell'orecchio che la traducono in un impulso elettrico che giunge al nostro cervello. L'onda sonora può acquisire diverse velocità a seconda del mezzo materiale in cui si diffonde, qui di seguito è riportata una tabella delle principali velocità nei mezzi:

| Mezzo materiale | Temperatura (°C) | Velocità (m/s) |
|--------------------|------------------|----------------|
| Aria | 0 | 332 |
| Acqua | 15 | 1450 |
| Piombo | 20 | 1230 |
| Ferro | 20 | 5130 |
| Granito | 20 | 4000 |
| Gomma vulcanizzata | 0 | 54 |



Lo schuttle mentre supera la barriera della velocità del suono

Classificazione del suono

Un suono si classifica per intensità, timbro e altezza.

L'altezza di un suono ci indica quanto questo sia acuto o grave. Dipende frequenza, tanto maggiore è la frequenza tanto più acuto è il suono prodotto. Nella notazione musicale si usano alcune frequenze di riferimento, come i 440 Hz del La centrale, o gli 880 Hz del La cantato da un diapason¹⁴. L'orecchio umano può percepire solo determinate altezze sonore, che rientrano in un preciso intervallo che è compreso tra i circa 20 Hz ai circa 20.000 Hz.

Poiché il nostro orecchio ha una percezione logaritmica della frequenza, per misurare l'altezza di un suono si ricorre a un operazione matematica di semplificazione del suono.

$$p = 69 + 12 \cdot \log_2 \left(\frac{f}{440 \text{ Hz}} \right)$$

Con questa trasformazione otteniamo ottave di dimensione 12 e al Do centrale è assegnato il valore di 60.

L'intensità sonora rappresenta l'energia che attraversa un'area in un certo intervallo di tempo. Indica quindi quanta energia trasporta l'onda sonora e si misura in W / m^2 .

$$I = \frac{E}{A \cdot \Delta t}$$

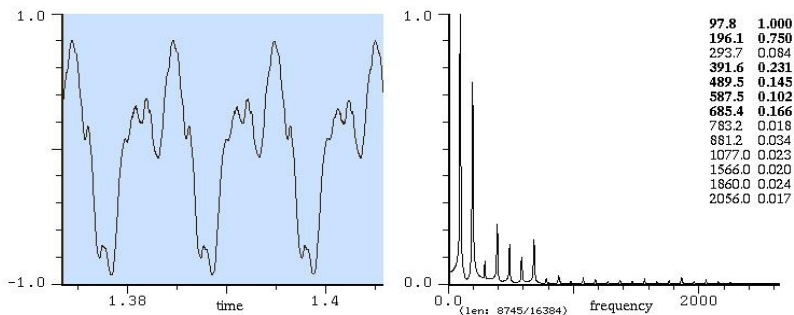
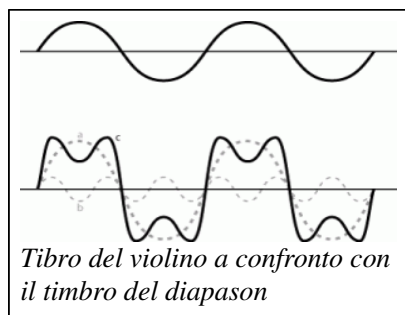
Anche nella percezione dell'intensità sonora il nostro orecchio non è lineare, per percepire un suono due volte più forte di un altro occorre che in realtà esso sia ben 10 volte più intenso. Così è stato introdotto un sistema per ovviare a questo inconveniente, il decibel. Il livello d'intensità sonora (db) si calcola con una scala logaritmica a partire dall'intensità acustica prendendo come riferimento una intensità minima pari alla soglia di udibilità.

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

In questa formula I è l'intensità acustica misurata con il metodo precedente, I_0 è la minima intensità percepibile dall'orecchio umano ($10^{-12} W / m^2$). Livelli d'intensità sonori sopra i 100 db (e quindi 10^{10} volte maggiori della soglia d'udibilità) possono danneggiare l'orecchio in maniera irreversibile.

¹⁴ Un diapason è uno strumento che emette un suono fisso che viene usato per accordare gli strumenti musicali.

Sono generalmente onde periodiche e la loro struttura matematica è data dalla sovrapposizione di



diversi armonici¹⁵ a diverse intensità.

Il timbro è l'ultima importante caratteristica di un suono periodico. È ciò che ci consente di distinguere il suono di un clarinetto a quello di un violino, quello di un tamburo da quello di un pianoforte. Il timbro dipende dalla particolare conformazione dell'onda acustica.

Queste evidenti differenze sono dovute alle diverse tecniche usate per suonare gli strumenti. Strumenti a corda strofinata come violino e violoncello producono onde con timbri simili.

Questo avviene perché oltre al suono fondamentale vengono prodotti dallo strumento numerosi altri suoni che sono in rapporto con il fondamentale di un numero intero. Ognuno di questi suoni genera una piccola perturbazione sulla vibrazione della corda (o della canna d'aria per gli strumenti a fiato, della membrana per gli strumenti a percussione) che ne modifica l'andamento. A seconda della particolare conformazione fisica dello strumento o una particolare tecnica d'esecuzione variano sia il numero di armonici prodotti che la loro intensità.

Il fenomeno degli armonici

Quando produciamo una nota ben definita assieme ad essa è possibile ascoltare una successione di suoni secondari che si generano contemporaneamente, sono gli armonici. Lasciata libera di muoversi una corda vibrerà producendo due nodi all'estremità, il caso più semplice rimane quello che la corda produca un solo ventre al centro e compia perciò oscillazioni semplici. In questo stato viene generato il primo armonico o nota fondamentale, è così chiamato perché il più sonoro che prevale su tutti gli altri. Se però poniamo un dito al centro della corda prima di farla vibrare costringiamo il sistema ad avere un nodo al centro. Dovendosi formare altri due nodi alle estremità della corda la nuova vibrazione avrà due ventri e tre nodi, pertanto la lunghezza d'onda è stata dimezzata, la frequenza raddoppia e sentiremo il secondo armonico, che si trova esattamente un'ottava sopra l'armonico fondamentale. La grande caratteristica dell'armonico è che abbiamo modificato l'altezza del suono senza intervenire né sulla lunghezza della corda, né sulla tensione e né sullo spessore. Ponendo il dito ad $1/3$ della corda otteniamo quattro nodi sulla corda (due alle estremità, uno ad $1/3$ e uno a $2/3$) dividendo per tre la lunghezza d'onda e triplicando la frequenza. Ascolteremo un suono che è 3 volte più alto dell'armonico fondamentale e $3/2$ del secondo armonico: ascolteremo una tredicesima (una quinta più un'ottava). Continuando con questo procedimento possiamo ottenere tutti gli armonici. Gli armonici sono alla base del meccanismo della scala naturale e di molte tecniche di esecuzione, infatti è mettendo in evidenza gli armonici di pochissimi suoni fondamentali che gli ottoni¹⁶ producono tutti i suoni della scala musicale, nonché

¹⁵ Torneremo in seguito sul concetto degli armonici

¹⁶ Si classificano ottoni gli strumenti a fiato che hanno una particolare imboccatura detta a bocchino. Il

trovano curiosi impieghi nella musica contemporanea, per consentire al musicista di raggiungere frequenze molto alte, altrimenti difficilmente raggiungibili.

La scala pitagorica

Il primo matematico a studiare l'acustica e la produzione del suono fu il siracusano Pitagora, che condusse degli studi sull'emissione sonora delle corde in vibrazione. Egli notò che la lunghezza della corda era inversamente proporzionale alla frequenza del suono prodotto. In particolare nel caso di una corda la lunghezza d'onda del suono fondamentale o primo armonico è pari al doppio della lunghezza. Conoscendo la velocità del suono nell'aria è possibile ricavarsi anche la frequenza:

$$\lambda = 2 \cdot l$$

$$v = \frac{v}{\lambda}$$

$$v = \frac{332 \text{ m/s}}{2 \cdot l}$$

$$v = \frac{166}{l} \cdot \text{Hz}$$

Pitagora dimostrò che dimezzando la lunghezza della corda raddoppia la frequenza. Egli suddivise questo intervallo musicale in otto gradi chiamandolo pertanto l'ottava. Riducendo la lunghezza della corda di $\frac{2}{3}$ ottenne l'intervallo di quinta, e riducendola di $\frac{3}{4}$ ottenne l'intervallo di quarta.

Procedendo con questo sistema suddivise tutta l'ottava secondo il sistema Pitagorico, in uso fino a tardo cinquecento e soppiantato solo dall'avvento della tonalità nel seicento.

Il problema che preoccupò la maggior parte dei filosofi greci antichi riguardò proprio la suddivisione dell'ottava. Si optò per una soluzione eptafonica¹⁷. Ancora una volta la tradizione vuole che sia stato Pitagora (il filosofo-mago non ha lasciato nulla di scritto) il primo a definire matematicamente questi intervalli, procedendo con un metodo che consiste nella successione delle quinte. Partendo da un suono fondamentale (ad esempio un Do) alzandolo di una quinta otteniamo la quinta (sol), che alzato di un'altra quinta (re) diventa una nona. Abbassando il suono ottenuto di un'ottava otteniamo un intervallo di seconda (do – re). Questo intervallo lo possiamo calcolare:

$$\text{Do-Re} = \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{9}{8}$$

$$\text{Do-Re} = 5^a + 5^a - 8^a = 2^a$$

materiale di cui sono fatti non è una caratteristica distintiva, contrariamente a quanto vorrebbe far pensare il nome: il sassofono, ad esempio, pur essendo di ottone è uno strumento ad ancia della famiglia dei clarinetti, viene classificato come un legno!

17 La scala musicale antica nella sensibilità occidentale è quella eptafonica, che consiste in una divisione dell'ottava in sette intervalli differenti. A partire dalla seconda metà dell'ottocento sono state riscoperte e introdotte nella cultura occidentale altre suddivisioni dell'ottava, come quella pentafonica (di tradizione cinese) o esafonica (chiamata anche scala di Debussy per l'uso caratteristico che ne fece nelle sue composizioni il musicista francese).

Allo stesso modo possiamo procedere: dal re prendiamo altre due quinte e arriviamo al mi (a partire dal Do dovremo salire per quattro quinte e scendere di due ottave), pertanto:

$$\text{Do-Mi} = \left(\frac{3}{2}\right)^4 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{81}{64}$$

per ricavare il Fa possiamo scendere di una quinta dal do e risalire di un ottava:

$$\text{Do-Fa} = \frac{2}{3} \cdot 2 = \frac{4}{3}$$

Si noti come il valore dell'intervallo di quarta così ricavato corrisponda esattamente all'intervallo di quarta misurato e sperimentato fisicamente dallo stesso Pitagora.

Procedendo con lo stesso sistema i greci riuscirono a isolare perfettamente i rapporti tra le frequenze dei suoni della scala eptatonica, rendendo così possibile costruire strumenti musicali misurando attraverso precisi rapporti matematici la lunghezza delle corde della cetra, delle canne dei tubi del flauto di pan, delle distanze tra i fori praticati nell'aulos. Riassumendo in uno schema tutti i rapporti che corrono tra le varie note della scala pitagorica possiamo fare importanti osservazioni:

| Nome della nota | Rapporto con la nota precedente | Rapporto con il Do | Intervallo con la nota precedente | Intervallo con il do |
|-----------------|---------------------------------|--------------------|-----------------------------------|----------------------|
| Do | 1 | 1 | Unisono | Unisono |
| Re | $\frac{9}{8}$ | $\frac{9}{8}$ | Tono | Seconda maggiore |
| Mi | $\frac{9}{8}$ | $\frac{81}{64}$ | Tono | Terza maggiore |
| Fa | $\frac{243}{256}$ | $\frac{4}{3}$ | Semitono | Quarta giusta |
| Sol | $\frac{9}{8}$ | $\frac{3}{2}$ | Tono | Quinta giusta |
| La | $\frac{9}{8}$ | $\frac{27}{16}$ | Tono | Sesta maggiore |
| Si | $\frac{9}{8}$ | $\frac{243}{128}$ | Tono | Settima maggiore |
| Do | $\frac{243}{256}$ | 2 | Semitono | Ottava giusta |

Come si può notare gli intervalli tra una nota e la successiva possono essere solo di due tipi: il tono o il semitono. Le prime regole armoniche partono proprio dalla catalogazione dei vari intervalli fratta dai pitagorici. Furono i primi a classificare gli intervalli in base alla semplicità o complessità delle frazioni che li componevano. Furono definiti consonanti e gradevoli all'ascolto gli accordi con frazioni semplici, come l'ottava, la quinta e la quarta giuste. Esaminando gli intervalli tra le varie note della scala notarono come esistessero due differenti tipi di terze e seste. Misurando re-fa ad esempio si accorse che il suo valore era minore di do-mi, pertanto prese il nome di terza minore, il cui rapporto è:

$$\frac{9}{8} \cdot x = \frac{4}{3} \quad 3^a_{min} = \frac{8 \cdot 4}{9 \cdot 3} = \frac{32}{27}$$

Rispetto alla terza maggiore la terza minore risultava più gradevole all'ascolto. Gli accordi di terza

minore, sesta maggiore, terza maggiore e sesta minore¹⁸ sono

L'intervallo di tono potrebbe a prima vista apparire più semplice di quello di terza minore e sesta maggiore, ma suonando contemporaneamente due suoni molto vicini come frequenza tra loro questi generano il fenomeno dei battimenti¹⁹, che rendono l'accordo sgradevole.

La scala pitagorica restò applicata fino alla fine del 1500 d. C. quando il teorico Gioseffo Zarlino riesumò la scala Tolemaica, sviluppata nel II d. C.

Per l'impiego che ne fecero i musicisti fino alla nascita della polifonia la scala pitagorica era l'ideale, due intervalli fondamentali, tono e semitono con cui si ricavano tutti gli altri. Tuttavia quando nacque la polifonia gli accordi di terza maggiore e terza minore risultarono poco consonanti, pertanto i primi cantori che intonavano terze e seste correggevano istintivamente l'intervallo con un rapporto più semplice ($\frac{5}{4}$ e $\frac{6}{5}$) per le terze minore e maggiori. Questo accorgimento fu sufficiente fin quando gli strumenti presero una parte sempre più importante nell'attenzione dei compositori.

La scala tolemaica o zarliniana o naturale.

Il grande sviluppo degli strumenti durante la fine del rinascimento e nell'inizio del barocco pose l'accento sulle dissonanze che emergevano dalla scala pitagorica. Due personaggi importanti di questo periodo che si concentrarono a trovare una soluzione per questi problemi furono il Glareano e Gioseffo Zarlino. Il Glareano nella sua opera principale il *dodekakordon* introdusse ai modi classici ecclesiastici²⁰ quattro nuovi modi: il modo eolio (la nostra scala minore naturale), l'ipoeolio, ionico (la nostra scala maggiore) e l'ipoionico. L'eolio e lo ionico soppiantarono rapidamente tutti gli altri modi, per via della loro grande duttilità e possibilità di essere riproposti su qualunque grado della scala.

Contemporaneamente Gioseffo Zarlino scoprì il fenomeno degli armonici da cui ricavò le basi principali per lo sviluppo della tonalità.

Ricavò i rapporti musicali tra gli intervalli dal rapporto gli armonici di un unico suono fondamentale. Prendendo il do armonico fondamentale ottenne:

- 1) il secondo armonico è il do dell'ottava superiore (in rapporto 2 con il fondamentale)
- 2) il terzo armonico è il sol (in rapporto 3 con il fondamentale)
- 3) il quarto armonico è il do di due ottave sopra (in rapporto 4 con il fondamentale)
- 4) il quinto armonico è il mi (in rapporto 5)
- 5) il sesto è il sol (in rapporto 6)

La terza maggiore Mi-Sol la si può ricavare pertanto come rapporto tra quinto e quarto armonico, e cioè come $\frac{5}{4}$ mentre il rapporto di terza minore è quello tra sesto e quinto: $\frac{6}{5}$.

Questi rapporti sono molto più semplici di quelli utilizzati dal sistema pitagorico pertanto i suoni risultano consonanti. Allo stesso modo la sesta maggiore (sol-mi) si ottiene tra il terzo e il quinto

¹⁸ L'intervallo di sesta minore si ottiene analogamente a quello di terza minore. Essendo complementare alla terza maggiore (forma con questo un'ottava intera) lo otteniamo moltiplicando l'ottava (2) con

l'inverso dell'intervallo di terza maggiore. Risulta $\frac{128}{81}$, più complesso di quello di sesta maggiore.

¹⁹ Il fenomeno dei battimenti è illustrato nella sezione sulle onde generali.

²⁰ Il canto gregoriano e tutta la modalità, tecnica compositiva in voga fino all'inizio del barocco, era basata su otto modi, o successioni di note principali: dorico, ipodorico, frigio, ipofrigio, lido, ipolido, misolido, ipomisolido.

armonico, e sarà di $\frac{3}{5}$ mentre la sesta minore (mi-do) è presente tra il quinto e l'ottavo armonico²¹, con un rapporto di $\frac{5}{8}$. Allo stesso modo possiamo ottenere tutta la scala:

| Nome della nota | Rapporto con la nota precedente | Rapporto con la nota fondamentale | Intervallo con nota precedente | Intervallo con fondamentale |
|-----------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Do | 1 | 1 | Unisono | Unisono |
| Re | $\frac{9}{8}$ | $\frac{9}{8}$ | Tono maggiore | Seconda maggiore |
| Mi | $\frac{10}{9}$ | $\frac{5}{4}$ | Tono minore | Terza maggiore |
| Fa | $\frac{16}{15}$ | $\frac{4}{3}$ | Semitono diatonico | Quarta giusta |
| Sol | $\frac{9}{8}$ | $\frac{3}{2}$ | Tono maggiore | Quinta giusta |
| La | $\frac{10}{9}$ | $\frac{5}{3}$ | Tono minore | Sesta maggiore |
| Si | $\frac{9}{8}$ | $\frac{15}{8}$ | Tono maggiore | Settima maggiore |
| Do | $\frac{16}{10}$ | 2 | Semitono diatonico | Ottava giusta |

La prima novità che si nota rispetto alla scala pitagorica è la differenziazione tra due tipi di tono differenti: il tono maggiore (do-re, fa-sol, la-si) e il tono minore (re-mi, sol-la). Questo accorgimento rende molto più gradevole i suoni, infatti come è possibile notare, tutti i rapporti con la fondamentale risultano enormemente semplificati rispetto alla scala pitagorica. Sebbene sia stata un'innovazione incredibile, neanche la scala naturale è esente dalle imperfezioni. La più nota, ma non l'unica riguarda il comma zarliniano. Salendo di una sesta maggiore (do-la) e di una quarta giusta (la-re) e scendendo di due quinte (re-sol, sol-do) si dovrebbe tornare alla nota di partenza. Eppure la frequenza ottenuta non concorda con quella di partenza:

$$\frac{\frac{5}{3} \cdot \frac{4}{3}}{\left(\frac{3}{2}\right)^2} = \frac{80}{81}$$

Questa differenza viene detta comma, ed è la stessa che c'è tra il tono maggiore ed il tono minore, se pur impercettibile all'orecchio umano rimane comunque una considerevole differenza.

Il sistema naturale incontra altre difficoltà se applicato agli strumenti ad accordatura fissa, come organo e clavicordo. Infatti l'intervallo tra la prima nota della scala e la seconda è un tono maggiore. Se partiamo come fondamentale sul re, l'intervallo re – mi è un tono minore, sarebbe dunque necessario riaccordare tutto lo strumento ogni volta che si cambiava tonalità, ecco perché fino alla

²¹ Tutti gli armonici che sono potenze di due saranno la stessa nota del fondamentale tante ottave sopra quanto sarà il valore dell'esponente: in questo caso l'ottavo armonico $8 = 2^3$ sarà do tre ottave sopra il fondamentale.

seconda metà del seicento tutti i brani musicali composti per organo o clavicembalo (o comunque per strumenti ad accordatura fissa) erano in tonalità semplici come do maggiore o sol maggiore. È rimasto famoso il fatto che Hendel si fece costruire un organo con tasti diversi per note come re b e do #. A risolvere questo problema furono i teorici del barocco che svilupparono diversi sistemi di temperamento, che consisteva pur abbandonando parte delle consonanze perfette ottenute nella scala zarliniana, consentiva di chiudere il circolo delle quinte²² e di eguagliare le differenze tra semitono cromatico (do-do#) e semitono diatonico (do-reb).

Il sistema ben temperato o temperamento equabile di Bach

Il sistema più perfetto di temperamento è stato raggiunto con il sistema equabile, detto anche scala ben temperata. Il sistema ben temperato assegna al semitono un valore fisso stabilito di 100 cent. L'ottava, composta da 12 semitoni uguali, diventa di 1200 cent. Questo sistema di accordatura sacrifica le consonanze delle terze e delle seste per garantire un sistema perfetto, senza errori e senza comma. Il rapporto di ogni intervallo è ottenuto a partire da una divisione dell'ottava in dodici semitoni uguali, ognuno ha un rapporto di:

$$\text{Semitono} = \sqrt[12]{2} = 1,059563094$$

Ecco che possiamo mettere a confronto il sistema ben temperato con gli altri sistemi:

| Intervallo | Sistema Pitagorico | Sistema Naturale | Sistema Equabile |
|--------------------|--------------------|------------------|----------------------|
| Semitono diatonico | 90 | 71 | 100 |
| Semitono cromatico | 114 | 112 | 100 |
| Tono intero | 204 | 182-204 | 200 |
| Terza minore | 294 | 316 | 300 (calante) |
| Terza maggiore | 408 | 386 | 400 (eccedente) |
| Quarta | 498 | 498 | 500 (quasi perfetta) |
| Quinta | 702 | 702 | 700 (quasi perfetta) |
| Sesta minore | 792 | 814 | 800 (calante) |
| Sesta maggiore | 906 | 884 | 900 (eccedente) |
| Ottava | 1200 | 1200 | 1200 |

Per riempire i valori nella tabella è stato usato il sistema in cent.

Molti dei valori risultano alterati rispetto a quelli della scala zarliniana (acusticamente perfetti), pertanto la terza maggiore e minore i relativi intervalli complementari risultano leggermente dissonanti, anche se l'orecchio ormai ci ha fatto l'abitudine.

²² Il circolo delle quinte pitagorico si conclude ritornando alla fondamentale dopo 12 quinte giuste. Questo suono dista però di un comma pitagorico (leggermente più grande di quello zarliniano) dalla nota fondamentale.

La fuga

Con l'avvento delle scale ben temperate abbiamo anche l'avvento di un nuovo modello di scrittura: la tonalità. Questo stile musicale, la cui invenzione risale agli inizi del 600, è rimasta l'unico indiscusso mezzo per scrivere la musica fino alla fine dell'ottocento, quando Wagner nell'ouverture del Tristano e Isotta stravolge per primo i canoni della tonalità classica. Con l'avvento della tonalità si affermano due diverse forme musicali del tutto innovative, la Fuga e la sonata.

La fuga non è altro che un canone a più voci tripartito. La prima parte si chiama esposizione. Come lascia intuire il termine viene esposto il tema in tutte le voci (generalmente quattro). Il tema principale si chiama con una parola un po' brutta: "*dux*", o soggetto. La sua risposta (che si svolge una quinta sopra) si chiama "*comes*" o risposta²³. Quando la prima voce entra recitando il soggetto le altre tacciono. Solo che il soggetto è terminato entra una seconda voce che canta la risposta, la prima voce continua cantando un nuovo elemento, il contro soggetto. Il contro soggetto è un accompagnamento al tema. Quando anche la seconda voce finisce la risposta entra la terza intonando nuovamente il soggetto, la seconda continua con il contro soggetto mentre la prima suona una parte libera. Entra infine l'ultima voce (se la fuga è a quattro voci) che ripropone la risposta, la terza il contro soggetto e le prime due proseguono con le parti libere. Quando anche l'ultima voce ha terminato di eseguire il tema si chiude l'esposizione.

La seconda parte della fuga sono i divertimenti o lo sviluppo. In questa parte l'autore può prendere con massima libertà il tema e riproporlo anche a intervalli di tempo minori, avvicinando le entrate, trasportandolo su altre tonalità. È la parte più libera della fuga in cui il compositore cimenta tutta la sua creatività. Generalmente questa seconda parte può essere divisa in tre sotto parti (i tre divertimenti), intervallati dalla riproposizione del tema e della risposta nelle varie tonalità.

L'ultima parte della fuga è lo stretto. La voce più grave sostiene le altre con un lungo pedale di dominante²⁴, mentre queste si inseguono riproponendo il tema tutte quante una volta ad intervalli sempre più stretti, anche se la risposta non raggiunge mai il soggetto. Tutto si conclude con una formula cadenzale²⁵.

Il clavicembalo ben temperato

I più grandi autori di fughe della storia della musica furono Bach ed Hendel. Il primo scrisse un'opera teorica importantissima per lo sviluppo della tecnica degli strumenti a tastiera: il clavicembalo ben temperato. Questa serie di 48 preludi e fughe di cui fa parte anche l'ave Maria di Gounod ricavata dal preludio n. 1 si sviluppa in tutte le possibili tonalità. Bach fu uno dei primi a comprendere la necessità ed i vantaggi portati dal sistema del temperamento equabile, e ne sfruttò a pieno le caratteristiche dimostrando l'enorme potenziale del nuovo metodo di accordatura.

23 Il *comes* può essere leggermente variato rispetto al *dux*, se trovandosi una quinta sopra, incide molto sul secondo grado della scala. In questo caso viene modificato in modo da incidere sul I grado della stessa e la fuga viene detta Tonale (quando non c'è bisogno di operare questa correzione la fuga si chiama Reale).

24 Il pedale di dominante è una particolare figurazione armonica in cui la voce più grave mantiene una nota fissa (la dominante, il V grado della scala, quella nota che è una quinta sopra la fondamentale) sopra al quale fioriscono le altre voci.

25 Successione conclusiva di accordi, generalmente è caratterizzata dall'accordo di dominante che segue quello di tonica, ad esempio Sol + → Do +.

Fuga n 1 (completa)

La prima fuga dalla clavicembalo ben temperato di Bach è in do maggiore ed ha quattro voci. La composizione si apre presentando il tema con una sola voce, che procede con un'ascendenza per gradi congiunti seguita da due quarte ascendenti separate da una quinta discendente, prima di iniziare la digressione semicrome per gradi congiunti sulla quale fa la sua apparizione la seconda voce riproponendo il tema sul quinto grado e procedendo in moto contrario rispetto alla prima voce. Dopo esattamente una battuta in mezzo (spazio nel quale viene riproposto il tema) si aggiunge al dialogo una terza voce, che risponde il canto della seconda un'ottava più in basso riproponendo il caratteristico gioco tematico. Ancora una volta vediamo ripetersi lo stesso schema: le tre voci dialogano durante tutta la durata del tema (una battuta e mezza) per poi farsi accompagnare dalla quarta e ultima voce, appartenente al registro più grave, che entra maestosamente sul primo grado un'ottava sotto.

Le voci continuano la loro fuga rincorrendosi per moto contrario: mentre la prima voce (d'ora in avanti il contralto) prepara il nuovo ingresso al tema del soprano spostandosi sulla dominante, il tenore si sposta sul secondo grado, il basso rimane sulla dominante e il soprano sul settimo grado componendo l'accordo del sol maggiore, su cui si posano tutte le voci meno che il basso che fiorisce nella progressione per semicrome discendente del tema fino a cadere sul terzo grado dove interviene in supporto il tenore che cade sul quinto.

Per completare la triade maggiore do manca solo il primo grado che arriva dal soprano in controtempo mentre ripropone ancora una volta il gioiello tematico nel registro acuto.

A questo punto si conclude l'introduzione e la presentazione del tema, esso, infatti, è stato cantato una volta da tutte le voci (in ordine contralto, soprano, tenore e basso) e entriamo in pieno sviluppo. È interessante osservare come l'unità tematica fondamentale sia composta da una battuta in mezzo, quindi il primo periodo musicale si conclude ad un multiplo esatto: dopo sei battute, suddivisi in due fasi di tre battute l'una: nella prima fase si presentano le voci alte, il contralto e il soprano; nella seconda delle voci basse, il tenore e il basso.

Allo sveltare dei soprani con il tema si appressano i tenori, che lo ripetono sul quinto grado dopo appena una semi minima.

L'armonia è dinamica: passiamo dalla triade di La minore a quella di Sol maggiore a quella di Mi bemolle maggiore per tornare in La maggiore e a Sol, il tema del soprano viene allungato di mezza battuta dalla ripetizione un tono sopra della sua ultima parte per poter cadere sul Fa, dove entra controtempo il contralto sul quinto grado.

Ora interviene il basso, seguito, a distanza di una semiminima, dal contralto, che si intreccia elegantemente con il soprano mentre il tenore tace, in attesa di entrare sul terzo grado dopo la modulazione in La minore, mentre il contralto procede con una discendenza cromatica riproposta poi nell'acuto dal soprano per chiudere modulando definitivamente in La minore.

Sulla battuta 13 si fermano il soprano, il tenore e il basso, mentre il contralto si accinge a esporre nuovamente il tema sulla cronica do maggiore. Si mettano il soprano del basso lasciando per una battuta giocare da soli il contralto il tenore, che risponde sulla dominante intervenendo con una semi minima di ritardo.

Rientrano anche il basso la battuta seguente e poi il soprano sul levare dell'ultimo quarto. La tonalità gioca tra le triade di Mi minore, Re maggiore, La minore e Mi maggiore. Il tema viene ripetuto dalle varie voci con intervalli di tempo sempre più stretti, che accrescono, assieme alla modulazione in la minore, la tensione: basti vedere come nel giro di queste prime tre battute della seconda parte il tema sia riproposto ben sei volte, sfociando in un climax nella battuta 17, che inizia con la triade di

La minore e culmina sul Re di basso e soprano nella battuta 19.

Da qui lo sviluppo prosegue per altre quattro battute in cui il tema viene cantato una volta da ogni voce, seguito da una brevissima cadenza che ci porta nella tonalità di Do maggiore passando per Fa minore e la triade diminuita sul settimo grado al termine della battuta 21.

La fase finale della fuga inizia battuta 24, dove il basso intona il Do che dura per tutte e quattro le battute finali e contrasta con il grande dinamismo presentato in tutto il resto della composizione, contralto o tenore cantano il tema mentre il soprano fiorisce in un cromatismo discendente prima di iniziare le ultime scale ascendenti all'epilogo.

In quest'ultimo spezzone della fuga abbiamo una modulazione in fa maggiore sol maggiore prima di concludere con l'accordo completo di do maggiore, su cui Bach disegna una corona.

Fuga n 11 (esposizione)

La fuga in fa maggiore numero XI dal clavicembalo ben temperato di Bach è a tre voci, in tempo tre ottavi. Si tratta di una fuga tonale, infatti la risposta al tema non segue gli esatti intervalli del soggetto. Questo aggiustamento è dovuto alla grande presenza della dominante nel tema, che si presenta anacrusico. Il do viene ripetuto ben tre volte nell'arco delle prime due battute, mentre la tonica appare solo come una nota di passaggio. Inizia girando attorno alla dominante con una figurazione di crome, do re do sib do, Poi arriva una successione di quattro crome ascendenti che partono dalla sensibile in una sesta minore discendente per fermarsi sul quarto grado (si b) in croma e scendere con un'altra scaletta di quattro semicrome che giungono al sol, per poi tornare sul la. Con il La finisce il soggetto e la voce intona una codina continuando la figurazione a semicrome. La risposta non si fa attendere ed entra con il fa sul terzo tempo della quarta battuta. Pur distando una quarta ascendente da dove aveva attaccato la voce che adesso canta la coda, se il tema inizia con la dominante deve rispondere la tonica. Il primo intervallo della risposta è una terza maggiore che pareggia la quinta con il soggetto (re-la) dopo di che procede regolarmente, fino al salto di sesta minore discendente, dove dal sol il tema approda sul si naturale operando una modulazione in do maggiore, che torna subito in regola due battute dopo in vista dell'entrata della terza ed ultima voce. Infatti la voce inferiore che inizia a cantare il contro soggetto nella battuta sette con un trillo sul si naturale scende con una scala discendente dal do passando nuovamente per si bemolle. Il si bemolle al basso combinato con il do della voce superiore danno l'effetto della settima di dominante costruita sul quinto grado della scala di Fa maggiore, che l'autore impiega per modulare e tornare a casa in fa maggiore dopo questo breve episodio (non mi fraintenda, la risposta sta eseguendo la coda) in do maggiore. È curioso osservare come questa volta Bach aspetta una battuta in più prima di far sentire un altro soggetto nel registro più grave, probabilmente questa scelta è dovuta al fatto che gli occorre più spazio (o forse è maggiormente appropriato dire più tempo) per tornare il fa maggiore. Risolve il problema con eleganza, facendo muovere il contro soggetto con gli stessi intervalli e ritmo con cui inizia il tema, illudendo l'ascoltatore di essere entrato in anticipo. L'ultimo soggetto entra sul terzo tempo della nona battuta, il levare è armonizzato con l'accordo di settima di dominante a cui manca la quinta e risolve con una cadenza evitata sul sesto grado. Si sposta sul quarto grado della scala sul terzo tempo della decima battuta, mentre voce più acuta fa riascoltare la coda all'interno del contro soggetto, questa volta completandola e finendo sulla sensibile di fa maggiore (mi naturale) con un trillo. Le funzioni armoniche della undicesima battuta sono la minore, terzo grado di fa maggiore, il settimo grado e il quinto grado che diventa, sul battere della

dodicesima battuta una settima di dominante. La tensione accumulata dalla successione del VII, V, V² si risolve con il primo rivolto di fa maggiore sul battere della tredicesima battuta. Qui termina l'esposizione e iniziano i divertimenti.

La sonata

La sonata come la intendiamo noi oggi segue di circa un secolo la nascita della fuga. Il suo momento di gloria lo raggiunge nel settecento durante il classicismo musicale. I tre grandi autori (la cosiddetta triade viennese) che portarono la sonata al suo apice furono Mozart, Haydn e Beethoven. Anche la sonata è una forma tripartita come la fuga. La prima parte si chiama esposizione. A differenza della fuga nella sonata non c'è canone, e pertanto i temi principali sono due, molto più complessi dei temi della fuga (che devono essere semplici e brevi per poter essere facilmente adattati ad un'esecuzione a canone). All'inizio, prima dell'ingresso del primo tema può esserci un'introduzione²⁶. Il primo tema è composto da diverse frasi musicali, in genere quattro o cinque, ma può contarne anche una decina. Ha la caratteristica di essere ritmato, a tempo veloce, con una forte componente armonica (molte scale e arpeggi e poca cantabilità). Al termine del primo tema si trova il ponte modulante. Questa struttura, che diventa un autentico capolavoro nella appassionata di Beethoven, ha lo scopo di modulare²⁷ dalla tonica alla dominante attraverso l'introduzione della sensibile (se siamo in do maggiore avremo il fa #). Effettuata la modulazione entra il secondo tema. Questo tema è molto cantabile, e la componente armonica sparisce dietro la spinta melodica. Il secondo tema rimane un blocco unico, difficilmente frazionabile come avveniva nel primo tema (di cui spesso durante la composizione l'autore ne ripropone piccoli frammenti). Pertanto, se riproposto, viene riproposto quasi sempre tale e quale, senza variazioni. Anche il secondo tema si compone di più frasi. Al termine del secondo tema inizia la coda, una serie di cadenze che avviano alla conclusione dell'esposizione. L'esposizione di una sonata può essere da sola molto più lunga di una fuga. Alla fine dell'esposizione generalmente c'è un ritornello (viene ripetuta due volte).

La seconda fase della sonata è lo sviluppo. Questa è una parte totalmente libera, in cui l'autore dà sfogo alla sua fantasia. A differenza della fuga (la quale divideva lo sviluppo in tre divertimenti) nello sviluppo della sonata non ci sono regole, tutto è lecito. L'unica cosa che l'autore non può fare è introdurre elementi tematici nuovi rispetto a quanto fatto sentire nell'esposizione. Ma le possibilità di ricombinazione sono pressoché infinite. È interessantissimo a tal proposito analizzare gli sviluppi delle sonate di Beethoven, che fraziona gli elementi del ponte modulante, della coda, ma soprattutto del primo tema con una maestria che non ha pari nella storia della musica, per riproporli variati nello sviluppo. Bisogna ricordare che lo stesso Beethoven fu un grande maestro delle variazioni (si ascolti l'arietta e variazioni, secondo tempo della sonata n 32 op 111, le 32 variazioni su un Walzer di Diabelli op 120).

L'ultima parte della sonata è la ripresa, in cui viene riproposta l'esposizione con delle piccole variazioni che portano alla coda finale. Ho analizzato le esposizioni di due sonate: Mozart in re maggiore per pianoforte a quattro mani e Beethoven n 23 op 57 in fa minore "Appassionata".

Mozart, sonata in re maggiore k381

²⁶ Si ascolti il grave all'inizio della patetica di Beethoven, è un'unica colossale introduzione al primo tema che arriva in tempo molto più veloce e allegro, o l'introduzione della sonata n 32 op 111 di Beethoven.

²⁷ Una modulazione è un cambiamento di tonalità, effettuata facendo sentire i suoni caratteristici della nuova tonalità, ovvero quei suoni estranei all'armonia della vecchia scala.

Il primo movimento della sonata ha un carattere allegro e tempo quattro quarti. Il primo tema si presenta con decisione in un accordo di re maggiore supportato da un gioco di semicrome che insistono prima in una breve ascensione che parte dal terzo grado fino al quinto per poi scendere ancora sulla tonica sulle tre note dell'accordo. Questa figura viene ripetuta in un registro più grave dal secondo pianista. Il tema si sviluppa con una serie di ottave parallele in crome staccate che procedono prima con una scala di re maggiore ascendente, poi con un arpeggio di la settima discendente per due volte. Questa prima frase, caratterizzata da una forte autorità del tema conferita dal ripetersi su ben quattro ottave di questi suoni decisi e staccati, si chiude dopo cinque battute (se non consideriamo la prima battuta come una frase a se stante o come un'introduzione). La seconda frase è dolce, il tema procede per seste e terze su un semplice accompagnamento fatto di re ribattuti. Questa seconda frase si sviluppa per quattro battute per lasciare lo spazio al ponte modulante. Anche il ponte modulante, come il primo tema, procede per ottave parallele con ritmo lombardo chiudendo con tre accordi di la maggiore, V grado di re maggiore, che introducono il secondo tema alla dominante. La prima frase del secondo tema è molto simile alla seconda frase del primo tema, ha infatti esattamente la stessa divisione ritmica: semiminima puntata seguita da due semicrome e poi gruppi di quattro crome del canto e un accompagnamento di terze la-do in crome ribattute. Questa frase entra con la dominante della nuova tonalità che sale fino al do, dove si risolve con un piccolo gioco attorno alla modale. Dopo la prima frase di quattro battute ci avviciniamo alla conclusione del secondo tema con una seconda frase di appena tre battute. Se non consideriamo il ponte modulante si può individuare una struttura chiasmatica tra le frasi del primo e del secondo tema: la prima frase del primo tema ha cinque battute, la seconda quattro, la prima frase del secondo tema ha quattro battute, la seconda tre. Se sommiamo le battute delle frasi che si trovano agli estremi e quelle intermedie otteniamo sempre 8. In questo modo geniale Mozart risolve l'irregolarità apparente della durata dei due temi, il primo 9 battute e il secondo 7. Questa ultima frase di tre battute è più brillante, effetto conferitogli dal tappeto di semicrome tipico Mozartiano che ritroviamo in quasi tutte le sue sonate, e si chiude con un lungo trillo sull'accordo di mi maggiore (dominante di la maggiore) per tornare sul la con una cadenza perfetta. A questo punto si entra in una sezione di transizione. Non siamo ancora all'inizio della coda, che dura appena quattro battute, e per arrivarci attraversiamo un periodo di sei battute in cui l'atmosfera diventa sospesa: il secondo pianista tace lasciando il primo con le sue ottave per semiminime. Sono presenti molte più alterazioni di passaggio che annebbiano l'atmosfera. Come se non bastasse anziché armonizzare al basso una sequenza di IV e V grado allo stato fondamentale Mozart gli armonizza come primo rivolto del II e secondo rivolto del I grado in una cadenza che ricorda più una soluzione modale che tonale. Arrivato sulla tonica il primo pianista si esibisce in una scala ascendente di semicrome che arriva fino al mi di due ottave sopra per poi riprendere un trillo sul si che dura una battuta, mentre il secondo pianista insiste sulla settima di dominante, che risolve con una cadenza perfetta sul la. Questo periodo può anche essere inteso come una terza frase del secondo tema, anche se il carattere poco chiaro lo distingue dal resto dell'esposizione. La coda è una semplice successione di cadenze perfette che si articolano per due battute per lasciare il posto a due arpeggi discendenti di la maggiore a ottave parallele su quattro ottave diverse e tre accordi di la maggiore che chiudono l'esposizione.

Beethoven sonata n 32 op 57 “Appassionata”

La sonata n 23 op 57 di Beethoven è in fa bemolle minore, in 12/8. Questo ci dice già che il secondo

tema dell'esposizione si presenterà in tonalità la bemolle maggiore. Il primo tema ha un attacco anacrusico. La prima frase occupa le prime tre battute più il battere della quarta, la chiameremo A1. A1 si suddivide in due semifrase 'a' e 'b'. All'interno della semifrase 'a' possiamo individuare uno degli elementi ritmici principali in tutto il movimento della sonata: semiminima legata a semicroma e semicroma che da ora chiameremo alpha. Seppur nel pianissimo e con una sola voce Beethoven afferma benissimo la tonalità di fa minore, l'attacco anacrusico attende sulla dominante per lasciando l'ascoltatore incapace di capire se siamo in maggiore o in minore. L'attesa, sospesa sul do, arriva con slancio e decisione alla tonica passando per il terzo grado e facendo sentire la triade completa di fa minore sul battere. Poi procede con un arpeggio ascendente sempre di fa minore che termina sul fa della seconda ottava sopra il do centrale. La semifrase 'a' è raddoppiata due ottave più in basso con una suggestiva distanza che apre gli spazi musicali, come farà poi Schostakovich nel primo movimento del concerto per pianoforte e orchestra n 2. L'attacco ricorda molto quello del concerto per pianoforte e orchestra n 3 in do minore dello stesso Beethoven. L'armonia a quattro parti appare per la prima volta nella semifrase 'b', con il V grado seguito da un trillo che si sviluppa sulla settima diminuita di si naturale per concludere sul do maggiore. È avvenuta una piccola modulazione in do maggiore (Beethoven ci ha fatto sentire anche la sensibile si naturale) ma che è insignificante, infatti la seconda frase riprende in sol bemolle maggiore. Chiameremo questa seconda frase A2 vista l'estrema somiglianza con la prima: stessa struttura ritmica e melodica, l'unica differenza è il modo maggiore un semitono diatonico sopra A1. Anche A2 si divide in due semifrase 'a' e 'b', 'a' è un arpeggio ascendente di sol bemolle maggiore, 'b' è la piccola modulazione in re bemolle maggiore, caratterizzata dall'accordo in comune del V grado (re bemolle maggiore), l'accordo di settima diminuita sul VII grado di re bemolle (con il la bequadro che è il sesto grado abbassato) per affermare a battuta 8 nuovamente la tonica. Ci avviciniamo alla conclusione del primo periodo, viene ripetuta la semifrase 'b' di A1, anche se l'armonia sottostante è più alta di un ottava. Questo stringersi dello spazio musicale rispetto a prima è un inciso a cui Beethoven vuole dare molta importanza, la parte più acuta che fiorisce è molto ravvicinata agli accordi armonici, è presente per la prima volta di una variazione dinamica: un crescendo seguito da un diminuendo. La musica sembra allontanarsi nel registro acuto, mentre risponde con gravità il basso con tre re bemolli puntati in croma che scendono sul do naturale in semiminima. Questo è l'altro elemento ritmico principale costitutivo della sonata, praticamente tutto quello che sentiremo di qui alla fine del movimento è stato già proposto da Beethoven in queste prime dieci battute. La combinazione tre crome → semiminima è un altro tratto caratteristico del compositore, si ricordi l'inizio nonché tutto lo sviluppo della quinta sinfonia. In particolare in questa sonata trovo interessante il dialogo tra la semifrase 'b' acuta e la risposta grave tre crome semiminima che da questo momento chiameremo beta. La chiacchierata va avanti con un altro 'b' ancora più acuto, in sol maggiore. Non tarda beta che ripropone sempre le stesse note (re bemolle per tre volte e do). Adesso osserviamo un altro elemento caratteristico della scrittura Beethoveniana, la contrazione delle frasi e semifrase. Se l'autore ha proposto A1 per due volte per intero, ha poi troncato la frase riproponendo solo 'b' con beta, e ora tronca anche 'b' rispondendo all'acuto con una variante di beta per terze: tre volte mi bequadro sol e sol si bemolle, una triade diminuita. Risponde ancora beta in basso, stesse note di prima. L'autore scrive *poco ritardando*. Si conclude con questo precario accordo di settima di dominante di do (la triade diminuita mi – sol – si bemolle è sorretta dal do basso, per cui l'accordo si presenta allo stato fondamentale). Adesso la tensione è altissima, e Beethoven non può che tornare *a tempo* e, per la prima volta, si suona forte. È con un “finto” beta in anacrusi che inizia questa breve frase di transizione con un arpeggio in semicrome discendente alternato che continua a sottolineare la settima di dominante per arrivare a chiudere la frase con un accordo di IV grado in crome (siamo tornati in fa minore, come evidenzia il mi bequadro) seguito da un quinto grado in primo rivolto, sul battere suonato piano, per aumentare ancora di più la tensione. Dopo tutta questa

sospensione armonica, notiamo che siamo agli inizi dell'ottocento, l'autore aveva bisogno di un elemento che permettesse di risolvere con classe. E Beethoven lo fa con gran maestria, riproponendo la frase A1 anticipata da una serie di accordi in semiminime di fa minore a ritmo sincopato con posizioni più acute di accordo in accordo ovviamente fortissimo. C'è l'alternanza forte e piano con cui ora ripropone la semifrase 'a' e poi il forte di una nuova serie di accordi sincopati fortissimi, questa volta di dominante, a cui segue 'b' nuovamente piano, e ancora fortissimo e un'altra serie di accordi sincopati sempre in do maggiore a cui risponde 'b', questa volta leggermente variato: inizia in do maggiore, ma il secondo accordo ha il mi bemolle. Il mi bemolle. IL MI BEMOLLE!. Beethoven entra direttamente nel ponte senza chiudere con la tonica la frase annullando la sensibile del V grado. Da questo momento abbiamo un *clumix* in cui il compositore si diverte a far attendere nuovamente l'ascoltatore. Ha già fatto sentire al termine dell'ultima frase del primo tema l'accordo di mi bemolle maggiore, dominante della tonalità del secondo tema, avrebbe potuto passare direttamente a la bemolle maggiore e iniziare il secondo tema, ma lui è Beethoven, mai scontato, e preferisce divertirsi per dodici battute tenendo sulle spine lo spettatore. Probabilmente proprio per questo suo carattere cupo, sospeso, con alternarsi di fortissimi e pianissimi, che le è stato dato l'appellativo del tutto posticcio di "Appassionata". Se infatti il soprannome rispecchia bene il carattere della sonata, e in particolare questo movimento, tuttavia, l'opera 57 non è meno "Appassionata" della sonata n 32, la cui introduzione presenta quegli accordi di settima diminuita in fortissimo seguiti da un improvviso pianissimo. Il carattere appassionato, se così lo vogliamo chiamare, è comune a moltissime composizioni beethoveniane, e dare un soprannome ad un brano rischia di condizionare troppo l'esecutore, coprendo sfumature infinite di altre interpretazioni con il grossolano approccio "Appassionato" associabile ad un'esecuzione romantica per nulla adatta alla sonata. L'interprete potrebbe sentirsi, per così dire, autorizzato ad adoperare tecniche quale il rubato per nulla congeniali allo stile di questa sonata, se pur originale, giammai romantica.

Il ponte modulante inizia precisamente a battuta 24. Inizia con un accordo di mi bemolle maggiore, l'autore insiste sottolineando l'abbassamento della sensibile con un tappeto di crome che ricorda in parte beta. Tutto il ponte ha lo stesso schema, accordi acuti e tappeto di crome che accompagna. Come in ogni ponte è quasi totalmente assente ogni linea melodica. Nella battuta seguente afferma ad inganno la tonalità di la bemolle minore, su cui insiste per due battute per tornare alla dominante mi bemolle maggiore, questa volta aggiungendovi la settima. Si ripresenta alpha nell'ultimo movimento della battuta 27, uno slancio nuovamente verso la bemolle minore. Come già accennato in precedenza accorciare i tempi è tipico di Beethoven, assistiamo ad un altro esempio adesso: la tonalità di la bemolle minore dura solo mezza battuta, ritorna ancora la dominante. Alla fine della battuta 28 assistiamo all'ulteriore frammentazione di alpha, per arrivare a la bemolle minore con un piccolo ritardo nella battuta ventinove. Cresce ancora la tensione: battuta 30 una settima sul fa bemolle (M + m + M) che risolve sul mi bemolle maggiore nella battuta seguente. Poi una settima diminuita di la naturale a cui manca il do naturale, ci aspetteremmo di sentire il si bemolle, invece ecco un'altra settima diminuita di mi bemolle e poi su mi naturale. Questo crescere della tensione ci porta finalmente sulla settima di dominante mi bemolle maggiore, riproposto la battuta seguente un'ottava più in basso e poi, finalmente, ecco il la bemolle maggiore. Arriva così, liberatore il secondo tema, in tutta la sua dolcezza, sono solo due frasi, la prima, appena sei battute, è dolce e strutturata interamente con il solo elemento ritmico di alpha, accompagnato dal tappeto di crome che accompagna. Il canto è raddoppiato all'ottava, l'armonia è molto semplice, gli unici gradi che appaiono sono la tonica e la dominante. L'attacco è anacrusico anche questo. A battuta 36 ascoltiamo il I grado per metà battuta prima di lasciare il posto al V quando la melodia cade sul sol. Alla battuta seguente torna sulla tonica fino a metà battuta 38, di nuovo il V, I a 39 e metà di 40 dove appare la settima di dominante. La frase, chiamiamola B1, si chiude sul battere di battuta 41.

La seconda non è altro che una riduzione ai minimi termini della frase precedente: l'elemento tematico questi intervalli discendenti in semiminima puntata → minima puntata sono frammenti di B1. Le note iniziali della melodia di battuta 41 sono le stesse di battuta 37, l'armonia sottostante tiene per una semibreve puntata la bemolle maggiore in primo rivolto. Alla battuta seguente l'armonia si sposta abbuiamo un accordo di re bemolle minore a cui poi si aggiunge una settima di specie (M+m+M) estraneo all'armonia di la bemolle maggiore che ci porta a la bemolle minore (battuta 43). La seconda frase è più aspra, sia per la presenza di questa modulazione tramite una settima dissonante, sia per il brusco cambio di dinamica, ci troviamo alla battuta 42 in forte con uno sforzato sul secondo quarto (in ritmo ternario) della battuta, per tornare al piano della battuta seguente. Concludono il tema tre trilli, di cui solo il primo è armonizzato in mi bemolle settima di prima specie. I due successivi insistono proprio sul V grado sempre più acuti, per concludere con una scala discende di crome che inaugura l'ultima parte, nonché la più elaborata, dell'esposizione: la coda. La scala discendente in tonalità la bemolle minore è un misto tra melodica e armonica, si sente sia la sensibile che la sotto sensibile. A Battuta 50 fiorisce sulla sensibile sol naturale per esplodere forte a battuta 51. Il tempo è più veloce, caratterizzato dalle semicrome che ricordano quell'episodio nel primo tema a battuta 14. L'armonia è un primo grado di la bemolle minore da cui possiamo estrapolare una nascosta linea melodica: la bemolle minima → la bemolle croma → do bemolle → si bemolle → la bemolle tutte crome. Lo schema si ripete la battuta seguente al VI grado (fa bemolle minore). La battuta 53 è caratterizzata dal tremolo di re bemolle fa bemolle della mano destra del pianista con i possenti raddoppi di ottava della sinistra che completa l'armonia di si doppio-bemolle maggiore, per spostarsi sulla settima diminuita del VII grado nella battuta 54. Vengono riproposte esattamente le stesse quattro battute (51 -52 -53 -54) un'ottava superiore, per continuare isolando l'ultima parte della battuta finale riproponendo questi arpeggetti acefali nel II grado (triade diminuita) che risolve sul VII grado (anch'esso triade diminuita). Sul terzo quarto di battuta compare il II grado nuovamente nella forma di settima diminuita che risolve sempre sul VII grado. Nella battuta 60 mentre la mano sinistra tiene una triade maggiore di Fa naturale la mano destra arpeggia una settima diminuita di re naturale che sfocia in mi bemolle maggiore. Ecco il V grado che va sul I di battuta 61 che ripropone gli arpeggetti acefali. Lo stesso schema va avanti per tre battute. La sonorità dirompente che finalmente travolge tutto, in un'esplosione di suono e energia non sopprime affatto l'arguzia armonica, che va ben oltre della banale serie di cadenze V - I o formule cadenzali II - IV - V - I . Dalla battuta 61 la sonorità diminuisce, anche se Beethoven non scrive piano, questo o si può evincere dagli *sfp*, che non possono esser messi bene in risalto se non si ha una sonorità bassa. Inoltre il *diminuendo* della battuta 64 che porta nel termine di una sola misura al pianissimo non può venire dalla precedente scrittura dinamica, il fortissimo (altrimenti l'autore avrebbe scritto molto diminuendo). In queste quattro battute conclusive ci saluta l'esposizione della sonata, che termina propriamente sul battere della battuta 65. Questa è una delle pochissime sonate, se non l'unica, a non presentare il ritornello.

Le influenze che la musica ha avuto nella cultura occidentale

Con l'ottocento e l'avvento del romanticismo la musica ottenne un ruolo primario come arte e cultura. Basti osservare la grande popolarità raggiunta da Verdi durante il risorgimento italiano, o Wagner, profondamente stimato da Schopenhauer e Nietzsche, che gli dedicherà tra scritti, tra cui il caso Wagner²⁸.

28 Su questo scritto mi soffermerò in seguito

Schopenhauer e la musica

L'esaltazione estetica risponde pienamente ad una grande spiritualità romantica ed in particolar modo Schopenhauer merita di essere menzionato per la sua passione verso l'arte, in particolar modo della musica. Infatti nella sua opera "*Il mondo come volontà e rappresentazione*" lui si occupa dell'aspetto estetico. Quest'opera è importante perché è un'approfondita analisi dell'arte e della musica in modo particolare e diventa un riferimento per tutta la valorizzazione della musica dell'ottocento.

La musica nell'ottocento è la sovrana delle arti, la musica è la condizione estetica suprema, l'incontaminata apparizione del sentimento. Nella musica c'è proprio questa pienezza dell'infinita energia emotiva, perché nel linguaggio musicale c'è anche la capacità dell'inespresso che va oltre la finitudine dei sensi e delle figure.

Dalla fine del 700, il potere della musica sembra infrangere ogni limite e quindi attestare valori più sacri più alti elevati delle idee. Non che nei secoli precedenti la musica fosse un'arte negletta o un godimento di pochi, da sempre le feste le funzioni religiose le solennità pubbliche, le commedie, le tragedie hanno avuto sempre la loro anima musicale. L'arte dei suoni intesa come arte e non come maestria tecnica definiva un po' il suo destino nei confini del presente, del contingente lasciando alla parola la supremazia. Nell'ottocento questo cambia, la musica acquista una posizione suprema non più come arte di accompagnamento, assume un valore in se.

Nel sentimento nel gusto come cambia la disposizione affettiva e teorica della musica, questo cambiamento non è stato improvviso ma preparato e incitato dagli avvenimenti e dalle intuizioni della fine del settecento. Basti pensare alla musica barocca di Mozart, che influenza molto Beethoven, specialmente nella prima parte della sua carriera. Dopo Haydn e Mozart abbiamo le composizioni del primo Beethoven che risentono molto del settecento musicale. In questo periodo iniziano a nascere le convinzioni degli illuministi francesi sulla musica, si dette un carattere e un assetto del linguaggio per esprimere sublimità morale, senza enfasi, senza profondità, senza patetismi.

Comincia l'età umanistica della musica, come viene definito dai musicologi che racchiude in se il significato pieno dell'idea e la responsabilità di un'investitura divina.

Dal 1814 Schopenhauer ha degli incontri musicali molto importanti, per esempio viene fulminato dalla bravura del giovane Schubert.

I più grandi interpreti del romanticismo ritengono che una delle descrizioni possibili del romanticismo si può tentare facendo di esso una filosofia della musica cioè con una teoria dell'arte come totalità unificante espressa proprio dalla musica.

E' una concezione importante questa di rintracciare nella musica quell'integrità spirituale che è principio e termine dell'anima e che è ricordo, desiderio e solo un'arte senza concetti e senza materia può esprimerli. Questa non è una dottrina nuova ma è antichissima che torna nella storia del pensiero occidentale nell'ottocento. La dottrina della musica come liberazione iniziatica di ciò che è permanente fondamento dell'imperfezione materiale. Questa concezione che è ripresa nel romanticismo era stata già trattata nel misticismo arcaico greco, dai pitagorici, da Platone, dai neoplatonici e dalla contemplazione medievale, trova in Schopenhauer l'ultima e piena certezza. Questa si edificherà con Schopenhauer come consapevolezza dell'importanza della civiltà musicale del presente, delle nuove energie della musica presente. E' interessante che la più elevata analisi musicale alla quale poi attingeranno i più grandi musicologi, studiosi, musicisti (Wagner), filosofi (Nietzsche) sia stata fatta da Schopenhauer che era solo un appassionato di musica e non un filologo

o un musicologo. In questa analisi della musica ci sono delle intuizioni fantastiche, le quali sono frutto di una certa genialità dato che non è un esperto di musica ma ne è solo profondamente innamorato.

Già nei decenni dell'illuminismo e del neoclassicismo l'emancipazione della follia imitatrice dell'arte e l'indipendenza della soggezione dei modelli tradizionali si erano avvertiti come tensioni intellettuali o come fantasie anche dagli artisti maggiori. La musica veniva confinata fino al settecento nel dominio del diletto (istintivo sentimentale) e veniva sempre sottomessa alla parola drammatica.

Quando nelle riflessioni estetiche²⁹, nella pratica artistica, prevalse l'esigenza della fantasia, dell'immediatezza, emotiva, dell'indipendenza dagli esemplari tramandati da una creazione simbolica e quando si diffuse la religione della genialità come trionfo sulla finitudine e sulla limitazione, la musica un tempo ancella delle altre arti fu posta al culmine delle espressioni dello spirito. Infatti la musica nel settecento è vista come un'immediata rivelazione del genio, la grande genialità musicale è simbolica esperienza della divina volontà.

Schopenhauer insiste più sulla piena novità del suo pensiero filosofico e ammette un debito di idee solo a due grandi filosofi Platone e Kant, ma in realtà lui era un uomo coltissimo, lettore e un critico attento, anche se diffidente, cinico, quindi lui assimila suggestioni e pensieri dai filosofi tedeschi della generazione precedente e da quelli della sua generazione. E questo è vero anche per quanto riguarda l'estetica della musica dove però la sua passione e la sua naturale attitudine congiunte alla genialità, al talento speculativo e sistematico, concepirono entro la dottrina filosofica generale, un'idea della musica di tale vigore e suggestione da poter agire poi sulla maggior parte delle teorie e delle poetiche del romanticismo successivo e dell'estetismo. Sembra che il suo pensiero sia nato da una personale intuizione e che questa sia stata di natura musicale.

Schopenhauer si appassionò così tanto che in lui ci fu un trascinarsi emozionale che gli consentì di diventare il punto di riferimento fondamentale nello studio della musica romantica.

Nietzsche e la polemica con Wagner

La terza e la quarta inattuale di Nietzsche sono "Schopenhauer come educatore" e "Richard Wagner a Bayreuth" che rappresentano l'ultimo incompiuto omaggio agli uomini che Nietzsche ha più amato appassionatamente nella sua fase giovanile, i suoi due grandi miti giovanili. Schopenhauer è il grande maestro che ha perseguito un ideale di filosofia come denuncia del conformismo e come ricerca della libertà e Wagner (il Wagner prima del Parsifal), prima del grande tradimento e della conversione al cristianesimo, incarna la figura del redentore, colui che sa indicare all'uomo la via della sola verità possibile, che rinasce dalle ceneri della tragedia.

²⁹ Tutti i grandi romantici tedeschi fratelli Schlegel, Novalis, Keirg, Hofmann hanno idee diverse tra di loro ma tutti convergono intorno alla musica con una sorprendente uniformità di giudizio e di termini che sono l'essenza del romanticismo tedesco. Nei sentimenti e nei vocaboli come entusiasmo, sogno, estasi notturna, primordiale innocenza, magia, incantesimo artistico, sono tutte parole nelle quali convergono i filosofi tedeschi. Una cosa molto interessante è che quel che più conta è che per quelle anime sensibili e riflessive la teoria della musica e la concezione musicale dell'esistenza non devono essere collegate ad un'idea astratta o ad una generica metafisica dei suoni, ma all'esperienza concreta della produzione musicale del tempo e per la prima volta scompare la separazione tra l'impercepibile armonia cosmica, oggetto di pura contemplazione, e la sua ombra terrena che giunge ai sensi umani e così sarà anche per Schopenhauer. L'arte universale è la stessa che si compie miracolosamente nel tempo è La Musica e con gli artisti romantici è consapevolmente pervenuta nella pienezza del suo valore al culmine dei significati. Queste erano le idee romantiche sulla musica.

Il genio è incarnato nei limiti delle figure giovanili: Schopenhauer e Wagner. La figura del genio acquisisce maggiore consistenza se paragonata alla tragicità del mondo (tutta la composizione di Nietzsche è improntata con la storia apollinea dionisiaco sviluppato nella nascita della tragedia). L'uomo in quanto artista generatore della cultura è investito da una missione cosmica che ne determina il destino. **Il genio consacrato alla verità è lo strumento di una finalità sovrumana, colui che riesce a universalizzar in particolare, è esso stesso la manifestazione del destino. In questo ha del lineamento della figura del genio si abbozza la prima concezione che darà poi origine alla figura del superuomo di Nietzsche.**

Nietzsche vede nel tramonto del mito di Wagner l'irrealizzabilità di un progetto di rinascita della cultura tragica basata sul piano musicale wagneriano già elaborato in gioventù. Nel 1877 Nietzsche viene a conoscenza del progetto wagneriano del Parsifal, opera ispirata alla leggenda del Santo Gral, opera in cui l'epopea romantica viene tradita con la prospettiva cristiana della redenzione. Questo per Nietzsche è insopportabile, e l'incontro dell'esaltato artista con il cristianesimo gli appare un tradimento, un segno di debolezza. Più tardi scriverà nel "Nietzsche contra Wagner": All'improvviso Wagner, apparentemente il più ricco di vittorie è diventato un disperato cadavere putrefatto che si costerna dinnanzi alla croce cristiana.

Nel rapporto con Wagner la stesura di umano troppo umano svolge una svolta decisiva. Nietzsche stesso definirà questo testo "il monumento di una crisi". La pubblicazione del trattato trasformò la tendenza di allontanamento da Wagner in una vera e propria crisi interiore. Quando Nietzsche spedisce l'opera a Wagner gli giunge contemporaneamente una copia del Parsifal da parte del compositore con una dedica: al suo fedele amico Federico Nietzsche, Richard Wagner. Questo incrociarsi dei due libri gli sembrò che avesse un suono di presagio.

Il distacco da Wagner non si consuma tuttavia solo su un piano biografico e psicologico, ma anche da un punto di vista filosofico, perché Nietzsche ha smesso di pensare che il rinnovamento della cultura potesse avvenire soltanto attraverso il riscatto estetico, l'arte non gli sembra più sufficiente, dopo questo tradimento, per essere un riscatto dell'esistenza.

La musica e arte nel 900.

Il novecento è un secolo di grande crisi sociale e politica, caratterizzato dallo scoppio delle due guerre mondiali e dalle tensioni su scala mondiale totalmente estranee ai secoli precedenti³⁰. I progressi scientifici dettati da Freud, Darwin, Einstein, la nascita di modelli alternativi al capitalismo e al sistema liberale contribuirono a rendere il terreno culturale instabile e causare una grande rottura con il passato. In campo musicale questo si traduce con il totale abbandono della tonalità, quel sistema quasi perfetto che era sopravvissuto per tre secoli alle evoluzioni e alle crisi. Tra i primi a compiere un passo in questa direzione fu sicuramente il compositore tedesco Richard Wagner, con l'opera Tristano e Isotta, che segna una svolta nell'ambito della storia della musica. Grandi compositori di questo periodo sono Debussy, Ravel, Gershwin, Bartok. Loro contribuiscono a far tramontare definitivamente la tonalità. I due concerti per pianoforte e orchestra di Ravel non appartengono a nessuna tonalità, ed egli li nomina solo in virtù della nota d'inizio, sono il concerto in re (per la sola mano sinistra) e il concerto in sol.

La musica viene apprezzata sempre più per la tendenza a apparire sempre nuova e diversa, l'unica arte che nasce astratta.

³⁰ Le tensioni internazionali dei secoli precedenti riguardavano sempre conflitti il cui centro era ben definito, la guerra dei trent'anni che si svolse nel XVII secolo non ebbe una perdita di vite umane paragonabile ai conflitti del 900, se consideriamo che si svolsero in lassi di tempo relativamente brevi.

In pittura e scultura questa tendenza si materializza con la formazione delle avanguardie, che portano l'arte verso orizzonti tutti da esplorare, fino a decretare la fine stessa dell'arte (il dadaismo). Il legame tra arte e musica è particolarmente sentito all'interno della corrente dell'astrattismo e nel gruppo del cavaliere azzurro, gruppo del quale fece parte anche il musicista Schoenberg, l'inventore della dodecafonìa³¹.

Il gruppo del cavaliere azzurro fu fondato da Kandinskij e Marc, in una mostra allestita nel 1910. Il nome viene da un annuario che gli stessi artisti stavano preparando e il cui titolo fu scelto in via del tutto casuale. Il gruppo è strettamente legato alla tradizione espressionista tedesca e ai fauves. Fu lo stesso Marc ad unire le avanguardie espressioniste tedesche come il ponte e Neue Vereinigung sotto il nome comune dei fauves tedeschi. Dai fauves riprendono i forti contrasti dei colori, come mette bene in evidenza il quadro Kochel: cimitero e presbiterio di Kandinsky. Così come il gruppo del ponte, anche il cavaliere azzurro ebbe vita breve. Furono organizzate mostre fino al 1914, nel 1911 Kandinsky pubblicò il primo e unico annuario del movimento e nel 1916 Franz Marc venne ucciso al fronte francese. La prima guerra mondiale separò e distrusse con violenza uno dei più fiorenti gruppi di artisti del 900.

Lo stesso Kandinsky nel secondo capitolo dello spirituale nell'arte afferma che la musica è l'arte più perfetta, perché non rischia, salvo poche eccezioni, di ricadere nell'imitazione della natura, ma esprime la vita psichica dell'artista.

Musica e letteratura nel 900

Le influenze della musica nella letteratura si riscontrano soprattutto nella corrente decadentista, che appare profondamente legata alla musica. La stessa caratteristica di molti autori decadenti del fonosimbolismo richiama molto bene questo connubio. Basta citare la poesia di Pascoli *Lavandare* per mostrare un esempio di come la poesia diventi quasi musica attraverso la scelta delle parole per il suono che producono, e la formula “sciabordare delle lavandare” o i “tonfi sordi” che accompagnano l'immagine solitaria dell'aratro in mezzo alla maggese.

Il poeta che sottolinea di più questo aspetto è Gabriele D'Annunzio, nella poesia *pioggia nel pineto*.

La pioggia nel pineto

Taci. Sulle soglie del bosco non sento dire parole umane, ma sento parole nuove, gocce e foglie lontane che parlano. Ascolta. Piove dalle nuvole sparse, piove sulle tamerici salmastre e arse dal vento, piove sui pini, scagliosi e pungenti, piove su i mirti divini (pianta sacra a Venere), sulle ginestre splendenti di fiori raccolti, su i ginepri, pieni di bacche profumate. Piove su i nostri volti silvani, piove sulle nostre mani scoperte, sui i nostri vestiti leggeri, su i freschi pensieri schiusi dall'anima rinvigorita, piove sull'illusione del nostro amore, che continua a illuderci nel presente e nel passato. Lo senti? Piove sulla verdura isolata, con un crepitio che dura e varia nell'aria secondo il fogliame, più rado, men rado. Ascolta. La cicala risponde al suono della pioggia con il suo canto coraggioso, non la spaventa ne il temporale dell'austro ne il cielo color cenere. E il pino emette un suono, il mirto un altro suono, il ginepro un altro ancora. Strumenti diversi sotto infinite dita. E noi siamo immersi nello spirito della selva, permeati dalla vita degli arbusti, e il tuo volto inebriato è

³¹ La dodecafonìa o composizione seriale è un modo di comporre basato su determinate serie di note. In ogni serie devono comparire tutte e dodici le note della scala dodecafonica (formata da tutti semitoni), e tutte una volta sola. L'effetto è particolarmente dissonante e di arduo ascolto, tanto che ancora oggi risulta difficile a molti apprezzarne la bellezza e la suggestività.

reso molle dalla pioggia come una foglia, e i tuoi capelli profumano come le chiare ginestre, o creatura terrestre, che hai nome Ermione. Ascolta, ascolta. Il canto delle aeree cicale si sta spegnendo sotto il rumore della pioggia che cresce di intensità, ma il canto delle rane si mescola a quello della pioggia, salendo dalle profondità del bosco. Più sordo, più fioco, si allenta, si spegne, solo una nota ancor trema, si spegne, risorge, trema, si spegne. Non si sente il rumore del mare. Adesso si sente su tutto il bosco scrosciare la pioggia d'argento che purifica. Il rumore varia secondo il fogliame, più folto, men folto. Ascolta. La figlia dell'aria (la cicala) è muta, la figlia del limo, la rana, canta lontana, nell'ombra profonda. Chi sa dove, chi sa dove! E piove sulle tue ciglia Ermione. Piove sulle tue ciglia e sembra che tu stia piangendo, non bianca, ma quasi come una ninfa, pare tu esca dalla corteccia di un albero. Tutta la vita profuma dentro di noi, il cuore nel petto è una pesca intatta, i tuoi occhi tra le palpebre son come pozze d'acqua sorgiva tra l'erba, i denti negli alveoli son come mandorle acerbe. E andiamo di cespuglio in cespuglio senza meta, i ramoscelli e le radici ci allacciano le caviglie e ci intrecciano i ginocchi, chi sa dove, chi sa dove! E piove sui nostri volti silvani, sulle nostre mani scoperte, su i nostri vestiti leggeri, sui pensieri freschi schiusi dall'anima rinvigorita, sull'illusione dell'amore, che mi illudeva nel passato e ti illude nel presente.

Questa è una lirica di Gabriele D'Annunzio tratta dall'Alcyone. È suddivisa in quattro stanze da 32 versi ciascuna. Tutte le stanze si chiudono chiamando per nome Ermione, pseudonimo di Eleonora Druse, celebre attrice e compagna del poeta. Sono molto presenti elementi sensuali e musicali. La musicalità della poesia è data da figure retoriche, come l'allitterazione trimembra “la figlia del limo lontana la rana” (III stanza; verso 89), l'anafora Piove della prima stanza, che insiste come una cadenza ritmica e conferisce una forte componente ritmica. Lo schema metrico è irregolare. Il ruolo del verso breve è quello di mettere in evidenza le sonorità di tutte le parole, che sembrano isolate (non si trovano mai più di due parole importanti in un unico verso). Già nella prima stanza D'Annunzio mette in evidenza il ruolo della fonetica, insiste sulla “esse” (“Su le soglie del bosco”), sul suono “Pi” (fonosimbolismo che indica la pioggia): “odo parole più nuove che parlano...”. La rima ha una funzione fondamentale, non segue uno schema preciso e si alternano periodi totalmente privi (“Taci. Su la soglia del bosco non odo parole che dici più umane, ma odo parole più nuove che parlano gocciolate e foglie lontane”) a periodi che ne sono ricchi (Sparse-Arse, Pini-divini, Irti-mirti, Fulgenti-Aulenti-Vestimenti, Folti-Accolti-Volti). Sono presenti versi con rime all'interno (Messe ancor più in risalto dai versi brevi) come “Al pianto il canto” (verso 41 stanza II).

Ancora il gusto del fonosimbolismo si percepisce nella seconda stanza, con parole onomatopee come “crepitio” (verso 36) o dalla riproposizione del suono “r”: solitaria, verdura, crepitio, dura, varia, aria, fronda, rada. Con questo suono l'autore vuole echeggiare il rumore della pioggia che cade sulle foglie. L'attenzione verso questa orchestra silvana si rivolge ora ai cantanti solisti, la cicala che “risponde al pianto con il canto”, e la rana che “canta nell'ombra più fonda”. Il corpo dell'orchestra sono il pino, il mirto e il ginepro che come dice l'autore sono “stromenti diversi sotto innumerevoli dita”. Questa sezione è resa particolarmente musicale dalla ripetizione delle parole “suono”, la congiunzione “e”, con la quale inizia ogni inciso, l'anafora “altro” e l'allitterazione “altro ancora”: “E il pino ha un suono, e il mirto altro suono, e il ginepro altro ancora”. L'altra grande caratteristica della poesia è la spiccata sensualità (rintracciabile in molte opere di D'Annunzio, come il romanzo *il piacere*, o *il fuoco*, dove le scene erotiche molto spinte incrinarono definitivamente il suo rapporto con Eleonora Druse). Le tamerici sono arse, questa parola rimanda al fuoco della passione, che si riflette nell'ambiente che partecipa ai sentimenti degli amanti in conformità alle regole del naturalismo panico. La scelta di D'Annunzio di citare il mirto, pianta consacrata alla dea Venere, non può apparire casuale, anche perché sottolineata dall'aggettivo divino che le viene affiancato. Alla sensualità rimanda il profumo delle bacche del ginepro, la favola bella,

illusione dell'amore che coinvolge gli amanti. I due spiriti si confondono nella natura, diventano parte di essa, e ogni punto di separazione svanisce, le mani sono ignude (a diretto contatto con la natura), i vestimenti leggeri. Sono immersi nello spirito silvestre d'arborea vita viventi, la vita della foresta è entrata dentro di loro. Ermione, da questo momento, subisce una metamorfosi che la trasforma in una ninfa, dal volto inebriato, molle per la pioggia, diventa una foglia, i capelli diventano ginestre. Il termine creatura terrestre mette in evidenza come stia abbandonando ogni umanità per diventare una creatura del bosco. Nella terza stanza torna nuovamente l'elemento musicale.

Adesso i solisti sembrano sfidarsi a un duello vocale, le cicale intonano un accordo che sembra essere inghiottito dall'orchestra, il pianto che cresce. Quando intervengono le rane, con la loro voce profonda che sembra nascere direttamente dalle tenebre. Poi D'Annunzio arriva a toccare l'apice della musicalità inserendo le regole della dinamica in letteratura. Per cinque versi c'è solo musica, nient'altro: il canto della cicala si fa "più sordo, più fioco, s'allenta, si spegne, solo una nota ancor trema, si spegne, risorge, trema, si spegne". Questa dinamica è messa ulteriormente in risalto dal sigmatismo, la presenza della "s" sottolineata dalle allitterazioni "si spegne" (ripetuta tre volte) e le parole "sordo", "s'allenta", "solo". Sullo stile Beethoveniano dello sfruttare le piccole variazioni su uno schema fisso D'Annunzio va avanti imitando la seconda stanza: "il croscio che varia secondo la fronda, più folta men folta, Ascolta" riecheggia i versi "il crepitio che dura e varia nell'aria secondo la fronda, più rada men rada, Ascolta". La cicala solista ha smesso di intonare la sua parte e lascia il palco alla gracida rana, che canta nell'ombra più fonda, chi sa dove. Nell'ultima stanza si conclude la metamorfosi di Ermione, che pare piangere di piacere bagnata dalla pioggia, tramutatasi in una ninfa, sembra uscire dalla corteccia degli alberi, il suo cuore diventa una pesca intatta (frutto della passione), non ancora colta dal suo albero, e quindi, viva, pura. La suggestività di questi versi è aumentata dalla sinestesia della "vita che è in noi fresca e aulente" (simbolo del trapasso tra la vita umana e quella divinizzata di creature del bosco). Gli occhi diventano specchi di acqua, i denti mandorle acerbe. I due amanti vagano senza meta, di cespuglio in cespuglio e questo è il momento più intenso della poesia: "il verde vigor rude ci allaccia i malleoli e ci intrinca i ginocchi". La duplice sensualità e musicalità delle parole "allaccia" e "intrinca" evocano un'atmosfera molto intensa e porta tutta la poesia ad un momento di massima tensione, il climax, situato nella ripetizione "chi sa dove, chi sa dove!".

Tutta la tensione si scioglie nella cadenza, ripresa dalla prima stanza. L'unica differenza è nell'attacco con la congiunzione e, una scelta musicale che serve a offrire continuità e non lasciare il climax separato dalla risoluzione³², conferendo unità alla poesia, che si conclude con impeto e estrema eleganza: "E piove sui nostri volti silvani, piove sulle nostre mani ignude, su i nostri vestimenti leggeri, sui freschi pensieri che l'anima schiude novella, sulla favola bella che ieri m'illuse, che oggi ti illude, o Ermione".

32 Il termine risoluzione è ripreso dal vocabolario musicale.

CONCLUSIONE

Questo piccolo testo non vuole e non può contenere una esaustiva trattazione del vastissimo campo delle onde, ci sono moltissimi fenomeni ondulatori che non sono stati descritti che meriterebbero interi trattati dedicati a loro.

Se ne offrono qui pochi esempi.

I terremoti sono eventi causati dall'accumularsi di energia potenziale all'interno delle rocce dovute alla trazione opposta di due faglie. Quando questa energia supera un certo livello la roccia si rompe trasferendo questa energia lungo tutta la terra attraverso onde elastiche, sono appunto le onde sismiche.

I maremoti possono generare delle particolari onde anomale dette tsunami. Anche la descrizione del comportamento degli tsunami rientra nel campo della fisica delle onde.

All'interno del corpo umano la pulsazione cardiaca genera delle onde di pressione all'interno del sangue, con importanti conseguenze sulla nostra salute.

BIBLIOGRAFIA

| Autore | Titolo | Edizione |
|----------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| Pintacuda, Salvatore | Fondamenti di acustica | Curci, 1972 |
| Frova, Andrea | Armonia celeste e dodecafonia | Bur, 2006 |
| Frova, Andrea | Luce, colore, visione | Bur, 2000 |
| Halliday – Resnick – Krane | Fisica 2 | Ambrosiana, 2004 |
| Goldsmith, Mike | Einstein e l'universo gonfiabile | Salani, 2001 |
| Franco Foresta Martin | Dall'atomo al cosmo | Editoriale scienza, 2005 |
| Ricci, Emiliano | La fisica in casa | Giunti, 2008 |
| Allorto, Riccardo | Storia della musica | Ricordi, 2005 |
| Fiore, Carlo | Bach Bethoven, variazioni | L'epos, 2009 |
| Confalonieri, Giulio | Storia della musica | Sansoni/Accademia, 1968 |
| Bach, J.S. | Clavicembalo ben temperato | URTEXT |
| Beethoven, L.V. | Sonate per pianoforte | URTEXT |
| Nietzsche, Friedrich | Il caso wagner | Adelphi, 1979 |

Presentazioni powerpoint consultate

| Autore | Titolo |
|---------------|------------------------|
| D'Abramo | La luce |
| Piccioni | Mondo a colori |
| Saraceno | Pianeti abitabili |
| Istituto INAF | Missione Venus Express |