

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

School of Science  
Department of Physics and Astronomy  
Master Degree in Physics

Esperimenti e strumenti dell'acustica  
ottocentesca: il contributo di Augusto Righi  
presso l'Accademia delle Scienze di Bologna

Supervisor:  
Prof. Eugenio Bertozzi

Submitted by:  
Filippo Carloni

Academic Year2023/2024

# Indice

<b>Elenco delle figure</b>	<b>2</b>
<b>1 Le Accademie delle Scienze nell'Ottocento</b>	<b>1</b>
1.1 Introduzione . . . . .	1
1.2 Le Accademie in Europa . . . . .	3
1.2.1 La Royal Society . . . . .	7
1.2.2 L'Académie des Sciences . . . . .	8
1.2.3 L'Italia . . . . .	9
<b>2 Gli strumenti di indagine sonora</b>	<b>13</b>
2.1 Introduzione . . . . .	13
2.2 Hermann Von Helmholtz . . . . .	15
2.3 Rudolf Koenig . . . . .	17
2.4 Gli strumenti . . . . .	19
2.4.1 Capsula manometrica e Analizzatore armonico di Koenig . . . . .	19
2.4.2 Risonatore di Helmholtz . . . . .	20
2.4.3 Sirena doppia di Helmholtz . . . . .	20
2.4.4 Tonometro a diapason . . . . .	22
2.4.5 Il diapason . . . . .	23
<b>3 Righi e l'Acustica: la presentazione all'Accademia</b>	<b>26</b>
3.1 Su un Nuovo Apparecchio per l'Interferenza delle Onde Sonore . . . . .	29
3.2 L'apparecchio della Collezione di Fisica dell'Università di Bologna . . . . .	34
<b>4 Conclusioni</b>	<b>39</b>



# Elenco delle figure

2.1	Ritratto di Hermann Von Helmholtz . . . . .	15
2.2	Ritratto di Rudolf Koenig . . . . .	18
2.3	Analizzatore armonico di Koenig . . . . .	19
2.4	Risonatori di Helmholtz . . . . .	21
2.5	Sirena doppia di Helmholtz . . . . .	22
2.6	Tonometro di Koenig . . . . .	23
2.7	Disegno originale del diapason di Righi . . . . .	25
3.1	Le Tavole e il disegno dell'apparato di Lissajous . . . . .	29
3.2	Schema del circuito per i diapason . . . . .	31
3.3	Disegni originali delle esperienze . . . . .	32
3.4	L'apparato di Righi . . . . .	35
3.5	Un dettaglio delle scritte sullo strumento . . . . .	36
3.6	Un dettaglio dell'interruttore . . . . .	36
3.7	Diapason elettromagnetico di Kohl . . . . .	37

## Sommario

Nell'Europa del XVIII e XIX secolo la ricerca scientifica è affidata alle Accademie delle Scienze, istituzioni che a partire dal Rinascimento italiano si diffondono in tutto il continente e saranno i veri motori del progresso scientifico, nonché fulcri attorno cui è nata e si è sviluppata la comunità scientifica. In questo panorama tra Settecento e Ottocento, la Fisica si specializza e si stacca dalla Filosofia Naturale anche grazie alle energie sempre maggiori impiegate nella realizzazione di apparati sperimentali e strumenti di misura sempre più raffinati. Una delle branche che maggiormente ha beneficiato di tale sforzo è l'Acustica che, grazie ai contributi teorici di Helmholtz e gli strumenti di Koenig, ha visto la propria rinascita nella seconda metà dell'Ottocento. Pur non essendo la disciplina principe del secolo il suo fascino ha toccato anche Augusto Righi del quale sono state analizzate le pubblicazioni contenute nelle Memorie dell'Accademia delle Scienze di Bologna della quale Righi era membro. Da queste fonti solo recentemente messe a disposizione, è stato possibile ricostruire l'operato di Righi in materia di Acustica individuando in una memoria la descrizione di un apparecchio di propria invenzione per la visualizzazione e lo studio dell'interferenza fra onde. L'articolo in questione verrà studiato nel dettaglio, così come l'apparecchio stesso ritrovato a Bologna presso la Collezione di Fisica del Dipartimento di Fisica e Astronomia "Augusto Righi" e Sistema Museale di Ateneo dell'Università di Bologna.

# Capitolo 1

## Le Accademie delle Scienze nell'Ottocento

### 1.1 Introduzione

Questa tesi mira a ricostruire l'attività scientifica svolta da Augusto Righi nel campo dell'acustica. Tale ricostruzione si avvarrà di una fonte privilegiata, ovvero le Memorie e i Rendiconti dell'Accademia delle Scienze di Bologna, di cui Righi era membro, recentemente ripubblicati e messi a disposizione degli studiosi. Da questi verrà preso in analisi un articolo riguardante un particolare apparecchio per lo studio dell'interferenza ondulatoria ideato da Righi (Cap.3) di cui esiste anche un esemplare presso la Collezione di Fisica del Dipartimento di Fisica e Astronomia "Augusto Righi" e Sistema Museale di Ateneo dell'Università di Bologna (Via Irnerio, 46) che è stato possibile analizzare. Tuttavia, prima di entrare nello specifico del contributo di Righi risulta doveroso ricostruire il ruolo svolto dalle Accademie nello sviluppo del sapere scientifico (Cap.1) e lo sviluppo dell'acustica nel XIX secolo (Cap.2) con particolare attenzione agli strumenti più significativi ed utilizzati.

Il secolo fra il 1750 e il 1850 è forse uno fra i periodi più movimentati del Vecchio Continente, dove per molti aspetti sono state messe le basi della società scientifica odierna. È proprio in questo periodo che si consolidano istituzioni come le Accademie delle scienze e la Fisica diventa, al loro interno, una disciplina a sé stante. La letteratura sulle

Accademie delle scienze è piuttosto ampia per quanto riguarda la loro fondazione e la diffusione fra il XVI e il XVIII secolo mentre è difficile ricostruire l'Ottocento scientifico europeo anche a causa di una eccessiva mitizzazione dei suoi protagonisti. Tale secolo è senza dubbio il secolo della Termodinamica di Juole e Carnot, dell'Elettromagnetismo di Maxwell ed Hertz, della prima telegrafia di Righi e Marconi ed è così d'altronde che viene insegnata la Fisica oggi. Tuttavia, risulta necessario cercare di inquadrare in un contesto più ampio come quello accademico, gli sviluppi della scienza, sia epistemologici che sociali ed in questo le Accademie hanno avuto un ruolo. Senza la particolare impostazione che le Accademie delle scienze avranno fin dalla loro fondazione, e cioè una modalità di aggregazione e diffusione del sapere sempre più volta all'internazionalità, non si potrebbe parlare di scienziati come Righi o Helmholtz. Questi grandi scienziati hanno basato i loro lavori sulle conoscenze che derivavano dalla condivisione sempre più agevole ad opera dei contesti accademici. E purtuttavia, a questo riguardo la ricerca storica non ha ancora esaurito il suo potenziale; anche per sopperire a tale limitatezza negli studi, l'Accademia delle Scienze di Bologna ha recentemente reso disponibili al pubblico le sue Memorie e i Rendiconti che raccontano di circa due secoli di opere scientifiche dimenticate ormai dai più. Fra queste anche buona parte delle Memorie di Righi qualora non fossero destinate unicamente all'Accademia bolognese. Tali memorie permettono di guardare lo scienziato per la sua opera in un ambito per cui è decisamente meno famoso, per il lavoro in una branca della Fisica importante che proprio nel periodo corrispondente all'inizio della sua carriera scientifica nascerà formalmente e diventerà materia di insegnamento nei Gabinetti di Fisica e nelle lezioni universitarie: l'Acustica.

Prima di entrare nel dettaglio qualche cenno storico. Augusto Righi nacque a Bologna il 27 agosto 1850 dal medico Francesco Righi (1807-1887) e da Maria Francesca Giuseppina Zanelli (1812-1872). Nella sua città natale trascorse la maggior parte della sua vita, con la sola eccezione dell'incarico a Palermo dal 1880 al 1885 come Professore Ordinario di Fisica Sperimentale alla Scuola d'applicazione per ingegneri, e di quello subito successivo a Padova come Professore Ordinario di Fisica Sperimentale all'Università di Padova e direttore del Gabinetto di Fisica. Tornato a Bologna nel 1889 ricoprì la medesima carica che gli appartenne fino all'8 giugno 1920 data della scomparsa[24]. Nel 1908 Righi divenne Presidente della SIF (Società Italiana di Fisica) in cui ricopriva già cariche importanti, succedendo a Volterra. Questo è uno dei fatti più importanti dal punto di vista storico poiché la SIF nacque con lo scopo di riunire i fisici italiani che erano dislocati fra le

Università (e Accademie) e di pubblicare i risultati delle ricerche sulla rivista "Il Nuovo Cimento" che era l'unico giornale di Fisica nazionale, benché avesse perso rilevanza nel secondo ottocento. Si legge nel comunicato di fondazione della SIF:

*I sottoscritti, animati dal desiderio di stringere meglio i legami che uniscono i cultori delle scienze fisiche in Italia, si fanno promotori della costituzione di una Società Italiana di Fisica. Essa assumerà per organo Il Nuovo Cimento. [...] Frattanto verrà aumentata la mole del Nuovo Cimento in modo da poter riunire in un'unica pubblicazione, ed in extenso, tutti i lavori notevoli dei fisici italiani.*

Righi dunque diventa uno dei protagonisti nonché fautore della rinascita della Fisica italiana a cavallo fra XIX e XX secolo[10], ricoprendo anche nell'ultimo periodo di vita la carica di Senatore del Regno d'Italia. L'attività scientifica di Righi è estremamente vasta, contando oltre 250 pubblicazioni che vanno dall'Acustica alla Relatività Ristretta passando per l'Elettromagnetismo, il ramo favorito dallo scienziato. Una caratteristica di Righi è senza dubbio quella di saper padroneggiare i risultati e gli strumenti più recenti negli ambiti di suo interesse, introducendo sempre uno aspetto di novità o modifica al fine di semplificare o migliorare quanto già portato dai colleghi, facendosi così detentore dello stato dell'arte in molti aspetti della disciplina. L'oscillatore di Hertz verrà modificato e diventerà l'oscillatore di Righi, preferito subito a quello di Hertz ed utilizzato largamente fino a diventare una delle componenti principali dei primi telegrafi costruiti da Marconi<sup>1</sup>, così come il suo banco ottico sarà diffusissimo nei laboratori di Fisica. Per quanto riguarda l'acustica si vedranno in dettaglio nei Capitoli successivi alcune modifiche ed invenzioni che agevoleranno sia lo studio che la didattica di questa disciplina.

È utile ora fare un passo indietro per tornare a parlare nel dettaglio delle Accademie delle scienze per poter meglio inquadrare Righi nel proprio contesto storico, figlio dello sforzo che queste ultime hanno compiuto fin dai primi del '700.

## 1.2 Le Accademie in Europa

Si vuole in questa sezione fornire un quadro ampio della situazione Accademica Europea. Come già accennato, gli avvenimenti storici che hanno destabilizzato l'Europa, come gli

---

<sup>1</sup>Non si vuole per brevità entrare nella narrazione del dibattito Righi-Marconi; tuttavia è sufficiente leggere il discorso del Nobel di Marconi per rendersi conto dell'influenza del lavoro di Righi

sconvolgimenti che dalla Francia hanno interessato tutto il continente, hanno avuto notevoli ripercussioni sullo sviluppo scientifico fra '700 e '800. Per primi, proprio gli scienziati francesi operano un cambiamento di rotta rispetto al passato: cala drasticamente l'interesse per la filosofia naturale e vengono abbandonati i problemi di carattere generale in favore di una maggiore specificità. Grazie alla loro influenza (dovuta al dominio francese su gran parte del continente sotto Napoleone) questo nuovo modo di fare scienza si è diffuso anche in Inghilterra, Italia e Germania, anche se quest'ultima rimarrà più influenzata dal Romanticismo e quindi sarà ancora attaccata al modo più filosofico di fare scienza fino al 1830 circa.[8].

Per quanto riguarda la loro storia, le Accademie hanno origine più antiche, risalenti all'inizio del '500 in Italia, dove le corti rinascimentali erano solite riunire e finanziare gli studiosi contemporanei. Venivano a formarsi così piccole accademie locali che però non sopravvivevano alla morte del mecenate o, in generale, alla fine del patrocinio. In Italia nel 1603 il principe Federico Cesi fonda a Roma la prima vera Accademia strutturata che nominerà Accademia dei Lincei. Seguiranno poi l'Accademia del Cimento a Firenze, la Royal Society a Londra, l'Accademia tedesca dei Curiosi della Natura, l'Académie des Sciences di Parigi, ed altre[15] [18]. Essendo Inghilterra e Francia già monarchie e la Germania allora appartenente al Sacro Romano Impero, da questi Paesi sono nati i primi veri esempi di Accademie nel senso moderno poiché patrocinate direttamente dallo Stato. Grazie ad un supporto così solido, furono in grado di guidare lo sviluppo scientifico settecentesco una volta terminato il primato italiano.

La svolta per la Fisica nel secolo successivo ha due cause principali: la fine dell'illuminismo e la nascita della classe borghese. Gli avvenimenti socio-politici che scuotono l'Europa all'avvento del XIX secolo portano sostanzialmente alla fine della concezione illuministica del sapere inteso come totale ed accessibile all'intelletto di tutti e l'attenzione degli scienziati si sposta dalla filosofia naturale a problemi di natura più pratica e specifica in ambito. D'altro canto, la nuova classe sociale sempre più ricca ed influente investe risorse per l'industria e per condurre esperimenti personali. Basti pensare a J.P. Joule (1818-1889), figlio di imprenditore (il padre possedeva birrifici), il quale grazie ai fondi della famiglia e al proprio intuito geniale, possedeva a 25 anni un laboratorio personale capace di esperimenti e misurazioni precisissime. Con le Accademie gli Stati europei cercano di invertire questa tendenza per cui fossero i singoli "inventori" a dettare i ritmi del progresso scientifico: si riteneva che questo fosse lo scopo dello scienziato accademico

padrone di una teoria che potesse spiegare e guidare il progresso[9]. Un altro aspetto di centrale interesse ed importanza, è la sempre maggiore diffusione delle riviste scientifiche e la pubblicazione dei Commentari o Memorie che le Accademie redigevano annualmente di cui si parlerà più approfonditamente nei casi del Nuovo Cimento e delle Memorie dell'Accademia di Bologna. Queste oltre che fonti di grande valore odierno, sono per l'epoca la modalità con cui la comunità scientifica internazionale poteva rimanere aggiornata sugli sviluppi da parte dei colleghi. Il cambiamento epistemologico che si esplicita in una separazione netta della Fisica dalle altre discipline<sup>2</sup> passa soprattutto attraverso l'aspetto sperimentale che rimane centrale nella ricerca in Accademia. Un esempio di quanto l'esperienza pratica fosse davvero fondamentale è dato dal fatto che dal punto di vista della semantica la parola "teorico" assume un significato diverso da come è inteso oggi: per gli scritti dell'epoca quando si fa riferimento a lezioni di Fisica teorica, l'aggettivo "teorico" era da intendersi proprio come "senza l'ausilio di un esperimento". Nel particolare campo della nuova teoria principe del secolo, l'elettromagnetismo, l'esperimento serviva sia come dimostrazione (fin dal secolo precedente era comune per le Accademie organizzare eventi con dimostrazioni pratiche) di un concetto già noto nella teoria, ma anche come metodo di ricerca esattamente come succede ora. Anche in questo senso si parla della nascita della disciplina nel senso moderno. Per citare il matematico e fisico seicentesco Jacopo Riccati (1676-1754):

*"l'esperimento ha la precisa funzione di far assumere un fenomeno ben avverato, da cui si ricavano le opportune conseguenze, che ci servono di guida per iscoprire le leggi della Natura<sup>3</sup>"*

Nelle Accademie era promossa una certa apertura mentale rispetto al modo di presentare i risultati, che dal XIX secolo venivano pubblicati e condivisi, tramite riviste scientifiche apposite, quasi esclusivamente nelle lingue nazionali e non più in latino<sup>4</sup>. Questo atteggiamento era in forte contrapposizione con ciò che invece succedeva nelle Università, le quali, tolte poche eccezioni come Bologna e Padova, erano strettamente legate ai pubblici poteri e quindi conservatrici della "vecchia" scienza, rimanendo rigide

---

<sup>2</sup>La separazione è più che altro di carattere ontologico, nel senso che si delineano lo scopo della Fisica e le proprie metodologie di indagine; la disciplina rimane strettamente legata ed interconnessa con altre aree come la Medicina e la Chimica, dai cui prenderà spesso le mosse

<sup>3</sup>Tratto da "Dei Principi e dei metodi della fisica", Jacopo Riccati, 1762[16]

<sup>4</sup>Il latino era ancora la lingua colta della scienza: un buono scienziato dell'epoca non aveva difficoltà nella sua comprensione, ma ciò non si applicava alla gente comune che rimaneva così tagliata fuori.

e riservate. Molti scienziati di fine '700 fra cui Cartesio, Fermat, Pascal e Huygens per citarne alcuni, si allontanarono presto dall'ambiente universitario per diventare soci in Accademia. Secondo Carlo Gentili in un articolo pubblicato per "I materiali dell'Istituto delle Scienze" di Bologna (1979)[7]

*"L'accademia si qualifica innanzitutto come tentativo di arroccamento degli intellettuali, demotivati dall'accresciuta centralità del potere politico [...] Se pur schierati inevitabilmente con il potere, gli intellettuali non sono da esso utilizzati. [...]L'accademia nasce dunque in quella terra bruciata, distanza incolmabile, che separa la miseria e l'ignoranza brutta delle sterminate masse agrarie."*

Un atteggiamento, questo, decisamente radicale ma che avrà conseguenze cruciali. Un altro aspetto interessante da sottolineare è come ci fosse già una dimensione internazionale che potremmo definire moderna, all'interno dell'ambito accademico. Per prima cosa, come parte del proprio ordinamento le Accademie prevedevano direttamente soci stranieri come metodo per aumentare l'efficacia della diffusione del sapere e creare *de facto* una vera e propria comunità scientifica europea. La necessità di scambio di opinioni e risultati prende in seguito la forma di riviste periodiche che, come già accennato, erano scritte nelle lingue nazionali e poi tradotte spesso in Francese - lingua che per ragioni socio-politiche diventa lingua internazionale - per essere meglio condivise con i colleghi. Questa nuova modalità risulta una rivoluzione nel modo di comunicare la scienza sotto diversi aspetti: in primo luogo il carattere pubblico di tali opere rendeva più democratica la scienza che fino al '600 era comunicata esclusivamente in forma epistolare privata; il fatto che spesso tale processo di condivisione era a carico, economicamente parlando, degli scienziati stessi delle Accademie<sup>5</sup> fa intendere bene quanto grande fosse il desiderio quasi missionario degli accademici nel diffondere la conoscenza. Inoltre, le riviste scientifiche dialogavano fra loro e pubblicavano, tradotti, articoli integrali o riassunti provenienti dagli altri paesi. Occorre dire infine che Accademie, musei e periodici scientifici ebbero il grande compito di sensibilizzazione verso le scienze sperimentali che erano giudicate pericolose dagli umanisti, teologi e politici. Il nuovo metodo scientifico che tutte le nuove società scientifiche abbracciavano caratterizzato da forti dubbi verso tutto ciò che non potesse essere provato con la pratica, rappresentava per l'epoca tardo rinascimentale fino al 1750 circa, un atteggiamento pericoloso, quasi di ribellione verso

---

<sup>5</sup>Nel caso per esempio della Royal Society il compito era affidato al segretario ed era a titolo gratuito.

ciò che le istituzioni (governi, Università e Chiesa) insegnavano. È grazie a questo primo sforzo iniziale che nel corso di un secolo la scienza sperimentale si è affermata come necessaria ed infine si giungerà ad una totale inversione di posizione, tanto da vedere Papi e monarchi come patroni delle Accademie. [11]

### 1.2.1 La Royal Society

La Royal Society[11] è senza dubbio fra le istituzioni scientifiche più importanti e famose del mondo. Gli studiosi che nei secoli ne hanno fatto parte coome Boyle, Newton, Faraday, Maxwell, Born, Planck, solo per citarne alcuni, sono considerati i padri fondatori della disciplina. Soprattutto fra il XVIII e XIX secolo, le pubblicazioni inglesi ad opera di molti di questi personaggi, hanno guidato il progresso scientifico scavalcando l'Italia in questo primato. L'origine di questa supremazia scientifica risiede tutta probabilmente nella sua pronta istituzionalizzazione dopo solo due anni dalla fondazione. Nel 1644 Boyle tornato dall'Italia in Inghilterra, cominciò a frequentare alcuni incontri di studiosi che egli chiamava "virtuosi". Questo gruppo di cultori si occupavano di questioni di filosofia naturale tipiche di quel periodo storico come la caduta dei gravi, il vuoto e la costruzione di cannocchiali. Le riunioni erano chiaramente di stampo Galileiano, ma si tenevano in condizioni di estrema discrezione in ottemperanza alla politica di Cromwell che non desiderava attirare l'attenzione della Chiesa riguardo i temi trattati. Nel 1660 Boyle, Christopher Wren, John Wilkins e altri (in tutto dodici) imitando il modello italiano decisero di riunirsi in società ma solo due anni dopo re Carlo II ne avrebbe riconosciuto lo statuto nominandola Royal Society. Il motto della nuova società era "Nullius in Verba" ovviamente provocatorio nei riguardi della filosofia scolastica astratta facendo ben intendere quali fossero gli obbiettivi degli accademici inglesi; lo scopo era la ricerca della verità attraverso la scienza sperimentale. Infatti, le prime riunioni erano per la maggior parte caratterizzate da prove e d esperimenti discussi successivamente. La Royal Society vanta anche la creazione di un vasto museo delle scienze e la pubblicazione di un suo "Journal" periodico, il "Philosophical Transactions", nonché di intere opere che hanno fatto la storia della scienza come i "Principia" di Newton. [13]

## 1.2.2 L'Académie des Sciences

Sulla scia della Royal Society anche in Francia accadde lo stesso fenomeno [11]. Gli scienziati di Parigi avevano preso l'abitudine di riunirsi in giorni fissi, quasi sempre presso Mersenne, per scambiarsi informazioni e discutere le questioni scientifiche d'interesse comune: questo cenacolo fu conosciuto come *Academia parisiensis*. Morto Mersenne, le riunioni continuarono a tenersi presso Henri-Louis Habert de Montmort (1634-1679) e più tardi presso Melchisédec Thévenot (1620-1692). Verso il 1666 Jean-Baptiste Colbert (1619-1683), il ministro di Luigi XIV, sull'esempio della costituzione della Royal Society, capì il vantaggio e il prestigio che poteva venire allo stato, nel riconoscimento ufficiale della società privata di scienziati che si era formata intorno a Mersenne, come era avvenuto per l'Académie française, già costituita ufficialmente nel 1635. Nacque così, nel corso del 1666, l'Académie des sciences, che contò dapprima ventuno membri, tra i quali spiccano Huygens, Roberval, Auzout, Pecquet, Jean Picard, Richer, Mariotte. Dopo una prima fase di splendore, anche grazie alla presenza di personalità quali Cartesio, Fermat, Pascal, la prima generazione dei grandi scienziati francesi, l'attività della divenne più modesta di quantità e d'originalità. Per contrasto, il prestigio della Royal Society, aumentava annoverando fra i propri membri uomini d'eccezione, come Boyle, Newton, Hooke, Wren. I modesti contributi dati alla scienza dall'accademia francese nel XVII secolo risultarono talvolta del tutto infruttuosi anche perché nessuna pubblicazione periodica fu curata dall'accademia, per oltre quarant'anni. Solamente nel 1732-33 Bernard Le Bovier de Fontenelle pubblicò i volumi di «Histoire de l'Académie royale des sciences» e i «Mémoires» relativi agli anni 1666-1717. Erano comparsi nel 1692 due volumi di memorie e nel 1697 una storia dell'accademia, redatta in latino dal suo segretario Jean-Baptiste Duhamel. Solo nel 1720 cominciarono le pubblicazioni regolari, che sino al 1792 continuarono con un ritardo costante di due anni. Nel corso del XIX secolo, invece, l'Accademia tornerà di centrale importanza sia per le pubblicazioni di Termodinamica che, come si vedrà, di Acustica.

### 1.2.3 L'Italia

#### L'accademia dei Lincei

Durante l'epoca rinascimentale l'Italia è stata senza dubbio la culla della cultura europea. La ricchezza e il prestigio delle corti italiane attiravano studiosi ed artisti da tutto il mondo conosciuto, favorendo lo scambio culturale e scientifico. Anche grazie a questo ambiente così vivace comincia a cadere l'idea della scienza come segreto. I cultori della Filosofia Naturale iniziano a sentire il bisogno di condividere idee e tecniche sperimentali. A Roma nel 1603 Federico Cesi, l'olandese Johan Eck, italianizzato Ecchio (1577-1621?), Francesco Stelluti (1577-1651) e Antonio de Filiis (1577-1608), un gruppo di giovani animati da tale bisogno, si organizzano fondando la prima vera Accademia delle Scienze[12]. Lo scopo dell'Accademia era lo studio libero e senza vincoli di autorità e la diffusione della conoscenza scientifica del mondo fisico, piuttosto che quello artistico-letterario. Non a caso infatti i fondatori scelgono come simbolo la Lince, animale a cui si attribuiva una vista penetrante, ad indicare una attenzione profonda verso i fenomeni naturali; da questo l'Accademia passerà alla storia come Accademia dei Lincei. Questa era organizzata in quattro case dette "licei" sparse in quattro punti dell'Europa per massimizzare la portata e lo scambio della conoscenza. Fin dalla nascita però l'Accademia venne osteggiata dal padre di Cesi e fu costretta a sciogliersi per poi essere rifondata nel 1609 accogliendo fra i suoi membri molti altri dotti italiani e stranieri, come il napoletano Della Porta, il tedesco Faber (Schmidt), cancelliere dell'Accademia e il più celebre di tutti Galileo Galilei. Da questa rifondazione sono scaturite importanti pubblicazioni e ricerche di astronomia, fisica, botanica fra cui lavori sulle macchie solari e il famoso Saggiatore del Galilei stesso. Circa mezzo secolo dopo la fondazione dell'Accademia, la prima e più illustre fase della sua lunga vita era già conclusa. Come spesso accadeva, dopo la morte del Fondatore e Princeps, il Cesi, l'Accademia sbandò e divenne sterile, nonostante numerosi sforzi per salvarne il materiale ed il patrimonio. Solo nell'Ottocento si avrà una rinascita vera e propria prima con l'abate Scarpellini, fondatore di una sua Accademia fisico-matematica che si intitolò dei "Nuovi Lincei" e poi col deciso ricollegamento ai Lincei cesiani ad opera di Pio IX, che nel 1847 ristabilì la seicentesca Accademia con l'antico nome, come "Pontificia Accademia dei Nuovi Lincei"[1].

## L'Accademia delle Scienze di Bologna

Un altro caso illustre è rappresentato dall'Accademia delle scienze di Bologna. In Italia i governi cittadini non erano ben disposti nel promuovere la diffusione delle scienze. Come si legge dai documenti storici dell'Accademia:

*"[...]il favorire e promuovere l'avanzamento del sapere, lo favori e lo promosse, nel recinto delle paterne abitazioni, il nobile, il cittadino, ed il privato.<sup>6</sup>*

L'Accademia bolognese è un esempio chiaro di come il rinnovato desiderio di conoscenza abbia infine vinto gli ostracismi della politica che ha avuto anche il merito di conservare il proprio prestigio e sopravvivere a diverse epoche storiche. Le sue origini risalgono al 1690 quando, poco più che sedicenne, Eustachio Manfredi (1674-1739) riunisce presso la propria dimora alcuni altri amici animati dalla stessa passione per le Scienze e le Arti. Venne scelto come motto *Mens Agitat* e per questo Manfredi e i suoi compagni furono chiamati "*gli Inquieti*". Sin dagli albori questa Accademia aveva struttura e regolamento ben definiti benché di essi non sia giunta testimonianza fino alla sua prima riforma ad opera del famoso Giovanni Battista Morgagni (1682-1771), amico del Manfredi, intorno al 1704. La riforma prevedeva che gli Accademici fossero divisi in tre Ordini: degli ordinari, numerari e soprannumerari: ai primi due ordini era affidato l'incarico di trattare gli argomenti riguardanti la storia naturale, la chimica, l'anatomia, la medicina, la fisica, ed i vari rami delle matematiche. Nel 1708-1709 (le fonti non concordano sulla data effettiva) torna in Italia un'altra figura di spicco nella scena bolognese: il Conte Luigi Ferdinando Marsili (1658-1730). Egli aveva già ospitato presso la propria abitazione l'Istituto di Scienze ed Arte, dove pare avesse già collaborato col Manfredi. Tornato in patria e avendo accumulato nel corso dei viaggi vari strumenti e reperti come, citando dalle memorie "telescopi, orologi, quadranti, microscopi, calamite potenti, barometri, termometri, fossili d'ogni genere, minerali, sali, zolfi, pietre trasparenti e molte macchine astronomiche, nonché libri, modelli di fortificazioni di Piazze, alcuni dei quali di propria realizzazione e varie antiche Lapidari, e Memorie d'antichità", egli volle riunire il proprio istituto e la nuova Accademia sotto lo stesso tetto. Dalle fonti:

*"Questo scientifico consesso, che a tanta celebrità innalzassi per tutta Europa, riunì in un sol corpo le tre Accademie cioè, delle Scienze, Filosofica, e di Pittura o di belle*

---

<sup>6</sup>la storia dell'Accademia è presa dai documenti pubblicati dall'Accademia stessa"[2][20][21]

*arti, ed i Professori detti dell'Istituto, Direttori dei Musei, i quali nella prima fondazione non oltrepassarono il numero di sei, quelli cioè di astronomia, di architettura militare, di fisica, di storia naturale, di chimica, ed il Bibliotecario; a questi furono in seguito aggiunti anche i Professori di anatomia, e di chirurgia pratica."*

Questa unificazione viene promossa e patrocinata, per grande interessamento, da papa Benedetto XIV (1675-1758) che finanzia generosamente l'Accademia. Il Pontefice capisce subito che lo studio delle scienze naturali richiede laghi fondi e soprattutto un compenso per gli scienziati stessi (detti per questo Benedettini o pensionati), che accorda, a condizione che questi presentino ogni anno nuove scoperte nei campi della fisica, matematica e medicina. Per tenere traccia e fare memoria delle cosiddette "sessioni ordinarie", ovvero le riunioni che avevano lo scopo di presentare i lavori degli studiosi, dal 1751 al 1791 vennero pubblicati i Commentari dell'Istituto di Bologna a cura di Francesco Maria Zanotti.

L'inizio del nuovo secolo è turbolento per l'Accademia. Nel 1800 Napoleone viene fatto membro dell'Accademia; tuttavia, appena due anni dopo egli ordinerà la creazione dell'Istituto Nazionale Italiano mettendo così fine alle attività accademiche indipendenti nel 1804 (questo fu causato in realtà da dissapori fra l'Accademia e il Ministro degli Interni di Napoleone). Successivamente, nel 1810, Napoleone emana un nuovo decreto col quale fonda il Regio Istituto Nazionale a Milano ed impone che ogni altra associazione scientifica medica o letteraria cittadina si riunisse sotto il nome di Ateneo, uno per ogni città. Naturalmente le personalità che già partecipavano alla vita accademica rientrano in questo nuovo ordinamento. Caduto Napoleone nel 1813, anche l'Istituto viene chiuso e ciò che rimaneva dell'Accademia dovette aspettare fino al 1829 per vedersi riconosciuto di nuovo ufficialmente lo statuto di Accademia per volere di papa Pio VIII. Nel frattempo è da notare come gli studiosi abbiano cercato di continuare il proprio lavoro pubblicando a proprie spese i saggi da loro prodotti negli Opuscoli Scientifici. Per questo motivo tali opere non furono raccolte nelle Memorie che erano ancora proprietà del Segretario Generale dell'Istituto milanese. L'ordinamento accademico benedettino, che prevedeva la nomina di un Presidente, un Segretario perpetuo e dei professori pensionati, viene, come detto, ristabilito ufficialmente nel 1829. Le aree di ricerca in Accademia di questo periodo sono Fisica e Matematica, Chirurgia e Medicina, Scienze Naturali, ma per quanto riguarda il ramo della Fisica poco è stato prodotto se paragonato alle decisive scoperte che Francia ed Inghilterra stavano portando all'attenzione della comunità scien-

tifica. Dopo la sapiente sintesi dei fenomeni luminosi e i lavori di Galvani e di Volta che appartenevano al secolo precedente, per le vicissitudini socio politiche narrate sopra, l'Accademia perde vistosamente terreno fino al secondo 800 quando Augusto Righi, di cui si parlerà nel Capitolo terzo, inizia la carriera da studioso e professore diventando in poco tempo la figura centrale per la Fisica italiana.

# Capitolo 2

## Gli strumenti di indagine sonora

### 2.1 Introduzione

Si vedrà in questo capitolo di dare una visione ampia di quella che è stata la riforma dell'acustica. Non c'è dubbio che fra il 1850 ed il 1860 la scienza del suono sia passata in un momento di radicale trasformazione. Solitamente si attribuisce gran parte del merito ad Helmholtz ma in realtà tale riforma è anche frutto della creazione e del perfezionamento di nuovi strumenti che riflettevano il più moderno approccio analitico-sperimentale che si stava facendo strada nella scienza (ed in particolare nella Fisica). Per la propria fama di costruttore Koenig sarà l'altro grande protagonista di tale riforma. Anch'egli studioso, studierà i lavori di Helmholtz, per poi criticarli e superarli, realizzando apparecchi di grandissima precisione - quali diapason, risonatori, sirene e strumenti di analisi e sintesi sonora - migliorando anche macchine che Helmholtz stesso aveva inventato. Tutti questi fattori hanno contribuito alla nascita dell'acustica moderna; l'idea che ogni suono sia scomponibile in toni semplici è il nuovo punto di partenza nella ricerca ed è dovuto ai lavori di Helmholtz poi resi replicabili da quelli di Koenig. C'è chi paragona questa rivoluzione nell'acustica a quella di qualche decennio prima portata da Antoine Lavoisier in ambito chimico con la scoperta di una entità chimica indivisibile. Effettivamente, la tendenza alla ricerca di oggetti fisici sempre più fondamentali sarà il tema di tutta la Fisica Moderna.

Si vuole fornire quindi una presentazione dei principali attori della riforma nel campo dell'Acustica e gli strumenti che sono nati a tale scopo, diventando in alcuni casi veri

apparecchi "scopritori di mondi". Come per i fisici questi strumenti sono stati apparecchi fondamentali che hanno aperto nuove strade nella ricerca, così oggi tali strumenti, divenuti storici, offrono uno spaccato fondamentale che si schiude sulla scienza del passato.

Non c'è dubbio che i nomi principali da menzionare siano quelli di Georg Simon Alfred Ohm (1789-1854), Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894) e Rudolph Koenig (1832-1901) quando si parla di studio della Fisica Acustica ottocentesca (a cui si aggiungerà il "nostro" Augusto Righi qualche decennio dopo), benché certamente non si possa non fare presente che i primi veri studiosi in materia siano stati i pitagorici. Gli studi di Pitagora sul monocordo, descritto da Euclide per la prima volta nel *Sectionis canonis* [23] e portati nell'Europa alto-medioevale da Boezio, spiegano in maniera matematica l'armonia e gli intervalli. Anche senza contare le conseguenze che queste scoperte hanno avuto nella nascita dei temperamenti<sup>1</sup>, delle scale musicali e quindi della musica in generale, l'idea che la matematica possa descrivere la musica sarà basilare e vedrà in Fourier la sua massima espressione. Inoltre, agli antichi erano già noti alcuni fenomeni acustici come l'amplificazione per risonanza che veniva sfruttata nei teatri per enfatizzare la percezione della voce<sup>2</sup>. Naturalmente, lo sforzo ottocentesco prenderà le mosse da questa conoscenza classica, ampliandola però con le moderne e neonate metodologie sia analitiche che sperimentali. Per presentare più in dettaglio le tematiche su cui i fisici dibattevano è necessario fornire prima qualche cenno biografico dei personaggi già citati.[17][14]

---

<sup>1</sup>Il temperamento si definisce come la convenzione che sussiste fra i gradi delle scale musicali. Il temperamento pitagorico ha come relazione fra le note rapporti matematici esatti: a partire da una nota data da una corda di lunghezza  $L$  il primo intervallo naturale (armonico alla percezione uditiva, che oggi corrisponde alla quinta) era ottenuto accorciando la corda a  $2:3L$ , mentre l'ottava era ottenuta ad  $1:2L$  e così via fino ad ottenere tutte le altre note. È facile capire come questo sistema non consenta di "chiudere il cerchio", cioè di ottenere l'ottava giusta procedendo per quinte e quindi si generano anomalie man mano che si sale di ottava o si cambia tonalità. Oggi si utilizza a soluzione di questo ed altri problemi il così detto temperamento equabile che, come dice il nome, divide la scala in 12 semitoni tutti equamente distanti l'uno dall'altro. In altre parole se il rapporto di ottava rimane di 2 a 1 ogni rapporto fra note successive dovrà essere di  $\sqrt[12]{2^n}$  con  $n$  corrispondente al grado.

<sup>2</sup>Vitruvio riporta dell'utilizzo di vasi risonanti posti nei teatri. Essi non erano altro che gli antesignani dei risonatori di Helmholtz, ma a forma di grossi cilindri [5].

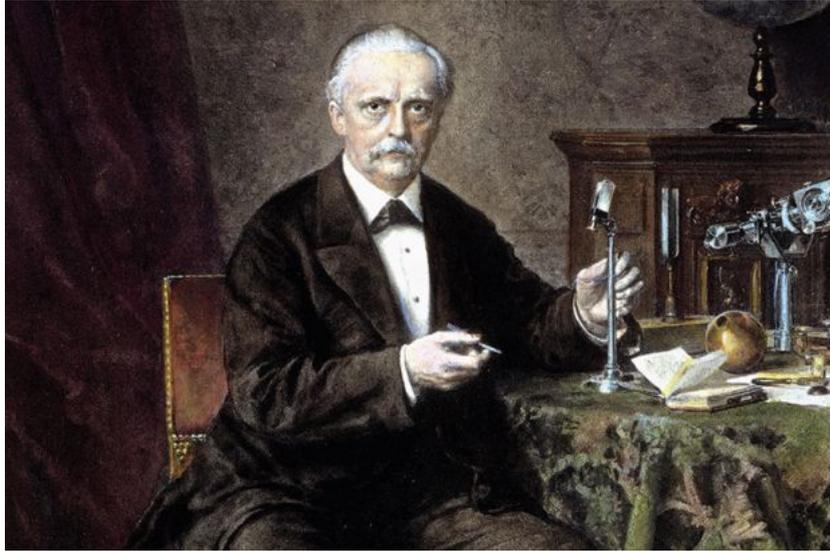


Figura 2.1: Ritratto di Hermann Von Helmholtz con alcuni strumenti tra cui si nota il famoso risonatore.

## 2.2 Hermann Von Helmholtz

Hermann Von Helmholtz nasce nel 1821 a Potsdam in Germania ma si trasferirà poco più che diciassettenne a Berlino per frequentare la scuola medica. Qui compirà studi approfonditi in ambito fisiologico, che saranno poi le basi su cui fonderà tutti i suoi lavori futuri. Naturalmente Helmholtz è ricordato per i contributi legati allo studio dell'energia e della fisica in generale, ma è importante tenere presente, come in molti casi fino al 900, quando la Fisica sarà ormai estremamente specializzata, la poliedricità dei protagonisti della scienza che, mossi ancora dal retaggio della ormai tramontata filosofia naturale, provavano interesse per molti campi diversi. Helmholtz diventa un abilissimo e rinomato fisiologo ma leggerà, studiando, anche i classici della meccanica come Newton, Eulero e Lagrange, senza trascurare la propria passione per la musica. Proprio la musica in quegli anni subisce trasformazioni radicali quali l'avvento del pianoforte come nuovo strumento concertistico, la nuova concezione dell'armonia con l'introduzione del sistema temperato (si veda la nota del paragrafo precedente) e la standardizzazione della frequenza di riferimento. Questo clima di grande cambiamento (non solo musicale) contribuisce ad acuire in Helmholtz l'interesse per le problematiche fisiche e soprattutto fisiologiche legate al suono. Arrivato a Königsberg nel 1849, a partire dallo studio del

corpo umano, pubblica nel 1851 un trattato - il primo dopo Cartesio - sulla natura dei colori e sulla percezione di essi da parte dell'occhio umano che darà il via ai successivi lavori legati alla sensorialità. Quattro anni dopo pubblica il proprio capolavoro "Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik" (Sulla Sensazione dei Toni come Base Fisiologica per una Teoria della Musica). Le idee che porta sono del tutto nuove: egli sperava di derivare una teoria dell'armonia (intesa come la piacevole consonanza di più toni) a partire dal fatto che l'orecchio percepisce come armoniose vibrazioni continue e regolari e come dissonanti quelle discontinue. Con questa perifrasi si voleva intendere un particolare fenomeno detto "battimento" che fino ad allora non era stato collegato all'armonia data la concezione di essa di stampo pitagorico-euleriano. Per Helmholtz la causa della percezione di armonia o dissonanza era da ricercarsi nel funzionamento dell'orecchio - del suo modo di percepire sensazioni - e non nei rapporti matematici esatti. I battimenti erano dunque la chiave interpretativa; l'orecchio è infatti capace di percepire chiaramente la frequenza di battimento fra due suoni e maggiore è tale frequenza maggiore sarà la sensazione di dissonanza. Un altro indizio dell'importanza di questo fenomeno era il così detto fenomeno del terzo tono o tono di combinazione, che era noto dal 1750 circa ma ancora non spiegato. Se suonate, due note con frequenze diverse producono un terzo tono risultante, come confermerà lo stesso Helmholtz (si veda più sotto), dalla differenza degli altri due, ovvero se una nota a 200 Hz viene suonata contro una a 220 Hz si udirà una risultante che sarà modulata con frequenza 20 Hz. La strada intrapresa da Helmholtz passa per gli studi di Ohm il quale si rifaceva a sua volta a Fourier. Ohm aveva pubblicato in quegli anni alcuni lavori sulla musica di carattere prettamente matematico tra cui il più famoso e controverso "Sulla Definizione di Tono in Connessione con una Teoria della Sirena e altri Apparecchi per la Produzione di Tono". In questo articolo, utilizzando le serie di Fourier, egli formalizzava le vibrazioni sonore come composizione di onde sinusoidali semplici senza però dimostrarne l'udibilità e semplicemente inferendo che le fondamentali dovessero essere più intense delle armoniche. Per la visione ottocentesca così fortemente orientata all'esperimento, affermazioni simili erano difficili da accettare; non solo, servivano anche a poco per quanto riguarda la spiegazione dei terzi toni: l'analisi in serie di un suono composito avrebbe solo rivelato le componenti dello stesso. Helmholtz vede comunque il potenziale di usare queste nozioni come basi su cui costruire esperimenti adeguati. Nel 1856 comincia la sperimentazione sui toni di combinazione utilizzando le sorgenti sonore più pure

da armoniche disponibili: i diapason. Le vibrazioni di questi oggetti sono tali per cui si distingue chiaramente la nota fondamentale rispetto alle armoniche (potremmo dire, parafrasando le nozioni sul timbro che derivano da Helmholtz stesso, che sono sorgenti a-timbriche), ma, come aveva capito anche Helmholtz, l'effetto può essere amplificato ulteriormente grazie ad un risonatore, eliminando (rendendo del tutto trascurabile) così ogni armonica non desiderata. Un altro apparecchio fondamentale sarà la sirena, di cui si parlerà più avanti. Grazie all'uso ingegnoso di questi strumenti gli fu possibile far interferire toni di combinazione di ordine superiore<sup>3</sup> con le armoniche inudibili di toni semplici. In una sola mossa dunque dimostra l'esistenza dei toni di combinazione nella maniera descritta dalla propria teoria ma anche la validità sperimentale della teoria di Ohm. Tuttavia, anche alla luce di questi importanti risultati sperimentali il problema sulla natura di questi toni di combinazione rimaneva aperto; per Helmholtz si trattava di un fenomeno diverso dai battimenti e dalla costituzione armonica delle sorgenti. A seguito della rilevazione di questi ultimi tramite membrane vibranti, Helmholtz ritorna sull'ipotesi che il fenomeno sia dovuto alla meccanica stessa dell'orecchio.

## 2.3 Rudolf Koenig

Rudolf Koenig nasce nel 1832 a Königsberg, Prussia. La sua famiglia sicuramente ha costituito un ambiente con grande influenza sul giovane in quanto figlio di un professore di Matematica e Fisica e discendente, da parte di madre, da una antica famiglia di musicisti costruttori e restauratori di organi. Non sorprende quindi che Koenig fin da giovane fosse interessato alla musica e alla meccanica di precisione più che agli studi classici in cui faticava. Un passo decisivo a 19 anni fu quello di trasferirsi a bottega da Jean Baptiste Vuillaume (1798-1875), noto liutaio francese. Le abilità acquisite durante questo apprendistato in unione al suo talento musicale e pratico avranno una profonda influenza sulla futura carriera. Dopo poco infatti apre la propria bottega e subito collabora con Edouard-Leon Scott, alla costruzione del primo apparecchio per la registrazione del suono su membrana, dando prova del proprio valore come inventore e costruttore. Nel secondo ottocento Parigi era uno dei poli per quanto riguarda lo studio dell'acustica

---

<sup>3</sup>Con questa definizione si intende il tono di combinazione generato da una coppia di toni di combinazione

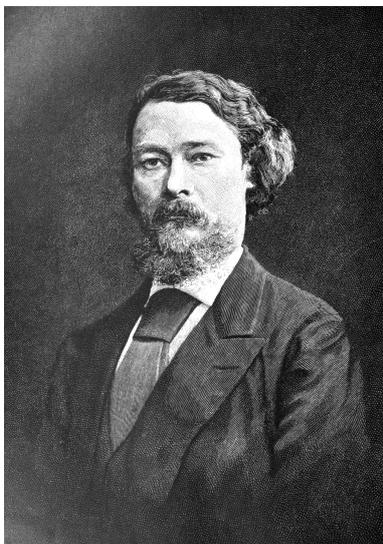


Figura 2.2: Ritratto di Rudolf Koenig

grazie ai lavori di Eulero (1707-1783), d' Alembert (1717-1783), Lagrange (1736-1813) e delle sedute del Lunedì presso l'Académie des Sciences, a cui Koenig partecipava regolarmente. In questi anni si concentra nella ricerca innovativa sulle leggi che regolano le lastre vibranti, inventa strumenti per misurare la velocità del suono, sviluppa un nuovo stetoscopio, crea strumenti per rappresentare graficamente il suono, costruisce diapason di precisione e inventa uno strumento per testare la qualità delle corde del violino. Dai suoi studi si capisce bene quali fossero dunque le tematiche "calde": la necessità di stabilire le proprietà del suono in quanto onda e la necessità di standardizzare i concetti di altezza e timbro sonoro. L'ultimo passaggio fondamentale dal punto di vista scientifico (la vita di Koenig infatti sarà poi molto più movimentata a causa della guerra franco-prussiana) sarà l'incontro - scontro con le teorie di Helmholtz, ritenute allora rivoluzionarie. Sulla base di questi lavori Koenig inventa la capsula manometrica a fiamma, da cui deriverà l'analizzatore armonico di Koenig, e successivamente il tonometro a diapason e la sirena a onde che sarà utilizzata come prova del fatto che la differenza di fase fra due onde sonore abbia influenza sul timbro prodotto, in contrasto con la teoria di Helmholtz. Questi apparati saranno illustrati nel dettaglio nel prossimo paragrafo.

## 2.4 Gli strumenti

### 2.4.1 Capsula manometrica e Analizzatore armonico di Koenig

La capsula manometrica consiste di una piccola camera di divisa internamente da una membrana elastica: da una parte il tubo di gomma fa affluire il gas nella cavità che alimenta una fiamma, mentre nell'altra metà un altro tubo è collegato ad un piccolo imbuto. Di fronte alla fiamma è posto uno specchio a facce rotanti, azionate da una manovella. Il funzionamento dell'apparato è elegantissimo nella sua semplicità: "ascoltando" un suono col piccolo imbuto, la pressione generata da esso all'interno della cavità della capsula mette in vibrazione la membrana modificando l'afflusso di gas alla fiamma che quindi inizierà a vibrare impercettibilmente. Ruotando lo specchio posto innanzi, a fiamma ferma, si osserva una linea gialla continua ma una volta messa in vibrazione la lenta rotazione degli specchi (rispetto alla capacità della vista umana nel distinguere due immagini sequenziali) permette di visualizzare chiaramente il pattern di vibrazione della fiamma. Si può quindi studiare come suoni diversi abbiano diverse figure di vibrazione. L'analizzatore armonico in porta questo semplice concetto della capsula manometrica

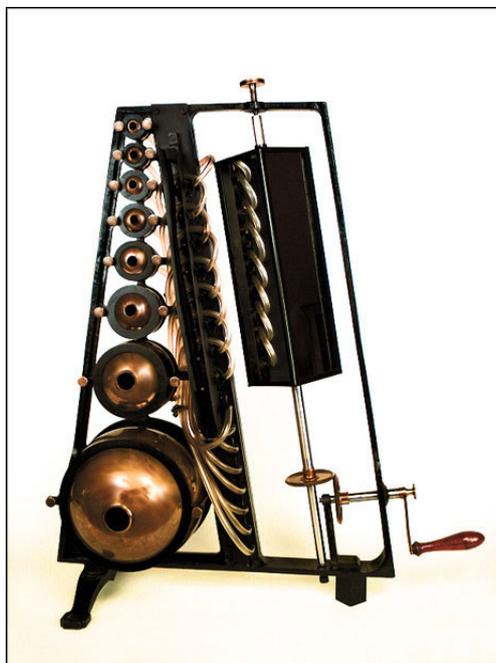


Figura 2.3: Caption

ad un livello superiore. L'apparato è decisamente più grande e composto da 14 risonatori di Helmholtz (in origine solo 8, come nel modello in Figura 2.3), intonabili in un range che va dal Do2 al Do5 (le tre ottave centrali del pianoforte) ed incastonati nella struttura in legno. Ogni risuonatore è accoppiato con una capsula manometrica a cui è collegato con un tubicino di gomma e funge da input sonoro per la stessa. Anche in questo caso la visualizzazione è possibile tramite uno specchio rotante. L'analizzatore di Koenig permetteva in maniera semplice di provare ciò che Helmholtz sosteneva riguardo la composizione delle onde sonore e cioè che esse fossero somma di onde più semplici, secondo il teorema di Fourier. Una voce umana mette dunque in risonanza lo strumento e ogni risonatore mostrerà un pattern diverso, rivelando la complessa struttura armonica della voce, mentre un diapason farà vibrare una sola delle fiammelle a seconda della propria intonazione. L'apparecchio aveva, come è facile immaginare, una certa versatilità ma Koenig lo inventa e perfeziona (fra il 1870 e il 1890) come strumento per la propria ricerca sui suoni vocalici[3].

### **2.4.2 Risonatore di Helmholtz**

Nonostante la semplicità di questo apparecchio, esso è stato in realtà di fondamentale importanza nella rivoluzione dell'acustica; si potrebbe dire che come il prisma di Newton ha definito l'ottica per tutto il '700 così il risonatore è stato l'emblema del nuovo approccio analitico che investe l'acustica un secolo dopo. Nasce come controparte del diapason, primo strumento per la produzione di toni puri, come primo strumento per la rilevazioni di toni semplici. Come si vede dalla Figura 2.4 l'oggetto è una sfera cava di ottone progettata per rispondere solo ad una certa frequenza (diametri maggiori corrispondono a frequenze inferiori e viceversa) con una apertura larga e una più stretta ed allungata. Questa protuberanza era la parte da mettere a contatto con l'orecchio per poter ascoltare e rilevare da suoni anche complessi la particolare nota cercata. Diventerà presto la componente di base per i futuri apparecchi per il "detecting" di suoni.

### **2.4.3 Sirena doppia di Helmholtz**

La sirena è uno strumento per la produzione di suoni ad una determinata frequenza, variabile in un certo intervallo. Inventata nel 1819 dal fisico francese Charles Cagniard de la Tour (1777-1859), consisteva di un pistone pressurizzato chiuso da un disco forato



Figura 2.4: Una collezione di risonatori di Helmholtz di varie dimensioni conservati presso il Sistema Museale di Ateneo della facoltà di Fisica a Bologna.

ruotante. Messo in rotazione il disco la colonna d'aria ad alta pressione nel cilindro subisce piccole variazioni nel tempo, creando una vibrazione, che sopra una certa soglia di velocità angolare, diventava udibile. Per determinare la frequenza è sufficiente includere un contagiri sul disco per calcolare la velocità di rotazione e, moltiplicandola per il numero di fori, calcolare appunto la frequenza in Hertz (supponendo i fori equamente distanziati). Le modifiche di Helmholtz rendono l'apparecchio un vero e proprio strumento di ricerca: la nuova macchina (Figura 2.5) ha ora due cilindri<sup>4</sup> a pressione posti in maniera coassiale e i dischi forati hanno più ordini di buchi (4 anelli da 9, 12, 15 e 16 per il primo e da 8, 10, 12 e 18 per il secondo). Ogni anello di fori poteva essere acceso o spento in maniera indipendente grazie ad un sistema di chiavi (concettualmente simile al funzionamento di uno strumento a fiato moderno). Da ultimo, il disco superiore poteva essere ruotato in modo da sfasare l'allineamento dei fori col disco inferiore, permettendo l'indagine sugli effetti di uno sfasamento arbitrario sulle qualità del suono. La sirena doppia dunque è in grado di produrre non solo due suoni contemporaneamente, ma anche combinazioni di più toni, e questo era fondamentale per le ricerche di Helmholtz focalizzate sui cosiddetti "terzi toni" o "toni di Tartini" già citati in precedenza.

---

<sup>4</sup>Per garantire una maggiore purezza dei suoni prodotti, questi cilindri erano realizzati in ottone perché fungessero anche come camere di risonanza della frequenza voluta: in questo modo le armoniche superiori risultavano inibite rispetto alla portante. Ogni cilindro poteva essere dunque smontato e cambiato a seconda delle esigenze



Figura 2.5: Un esemplare della sirena doppia di Helmholtz

#### 2.4.4 Tonometro a diapason

Il tonometro a diapason forse non è fra gli strumenti più decisivi dal punto di vista della nascente teoria del suono, ma sicuramente merita una menzione per la qualità con cui è realizzato. Permette anche di aprire una parentesi sul problema della frequenza musicale campione. Lo strumento in Figura ??, costituito da 670 diapason accuratamente intonati da Koenig stesso, permetteva di individuare a quale frequenza stesse suonando una sorgente tramite simpatia col diapason corrispondente. Nel 1894 Koenig riesce nell'intento di creare un tonometro ancora più grande e preciso (il range di frequenze andava da 16 fino a 21845 Hz, appena più largo dell'intervallo udibile dall'orecchio umano) costituito da 158 diapason con risonatore e un sistema di pesi aggiustabili per regolare le frequenze. In tutto era possibile ascoltare 1618 diversi toni, circa cento note per ottava. Un apparecchio con un passo così fine diventa necessario quando si ha il problema, come allora, di definire alcune frequenze come standard ed intonare gli strumenti; nel 1885 era stato scelto come frequenza fondamentale il La<sub>3</sub> a 435 Hz<sup>5</sup>, ma oltre al diapason campione francese non esistevano strumenti di precisione in grado di garantire accordature affidabili.

---

<sup>5</sup>Ora la definizione è cambiata e si prende come campione il La<sub>3</sub> a 440 Hz)

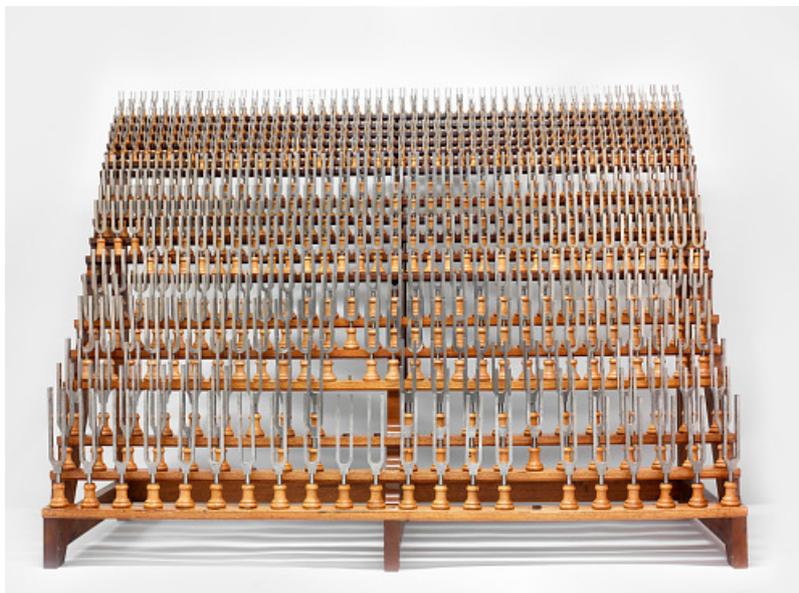


Figura 2.6: L'impressionante tonometro costituito da 670 diapason perfettamente accordati. L'esemplare è conservato presso il National Museum of American History, Smithsonian Institution, Washington D.C. (cat. no. 315,716).

### 2.4.5 Il diapason

Il diapason è lo strumento probabilmente più utilizzato per le ricerche di acustica. Il normale funzionamento di questi oggetti prevede che essi siano percossi, spesso con una bacchetta apposita, o pizzicati con le dita. Nell'Ottocento però il largo utilizzo sia sperimentale che musicale ha richiesto che i toni prodotti si potessero prolungare indefinitamente. Le conoscenze sui circuiti e sull'elettromagnetismo sempre maggiori hanno portato alla creazione di diapason che potevano essere mantenuti in vibrazione grazie ad un circuito elettrico ed una batteria ad esso collegati. Siccome più avanti verrà descritto un apparato di Righi che farà uso di diapason elettrici è conveniente ora descrivere la circuiteria necessaria già incorporando le modifiche che Righi stesso apporta partendo dai comuni diapason elettrici di Koenig<sup>6</sup>. Righi infatti non utilizza il sistema classico

---

<sup>6</sup>I primi modelli di diapason elettrici sono in realtà quelli a mercurio inventati nel 1873 da Mercadier e perfezionati da Koenig. Nel suo progetto il diapason è posto fra due elettromagneti e fissato in modo tale che la punta possa pescare nel mercurio contenuto in una vaschetta. Facendo passare una corrente elettrica nel circuito formato dagli elettromagneti, dal diapason e dal mercurio i rebbi vengono attirati magneticamente, la punta fuoriesce dal mercurio e il circuito stesso viene interrotto. I rebbi ritornano poi nella posizione iniziale riattivando nuovamente il circuito[22].

a mercurio perché troppo ingombrante. Come si vede dal disegno originale di Righi di Figura 2.7, il diapason è posto in orizzontale con i rebbi l'uno sopra l'altro e fissato alla base cava di legno tramite un sostegno e una guida di metallo scorrevole orizzontalmente. Tutto il sostegno può ruotare anche in verticale. Fra le branche del diapason è posto un rocchetto di filo di rame toroidale contenente un fascio di fili di ferro isolati fra loro. Sulla base in legno, dal lato delle estremità del diapason, sono posti tre pezzi d'ottone di cui quello centrale e uno degli esterni sono serrafili collegati ai terminali di una batteria, mentre entrambi quelli esterni ricevono le estremità del rocchetto. Il pezzo centrale che si trova proprio sotto il diapason, sostiene una vite a testa larga coperta con un sottile disco di platino. L'ultimo serrafilo sostiene una leggerissima molla da orologio con punta di platino che tocca il dischetto dello stesso materiale con una estremità. La molla e il diapason sono collegati insieme tramite una sottile staffa d'ottone saldata sulla molla stessa. Questo meccanismo permette al diapason di interrompere periodicamente, vibrando, il contatto fra molla e disco di platino - cioè fra batteria e rocchetto - senza bisogno delle vaschette col mercurio. Un altro accorgimento che vale la pena menzionare poiché dice bene della grande attenzione di Righi per i propri macchinari è la presenza di un condensatore all'interno della base cava del diapason. Esso ha le proprie armature collegate ai serrafili con molla e dischetto per impedire che fra molla e disco si creino scintille che possono compromettere in breve tempo il contatto che andrebbe sostituito dopo ogni prova. Collegando quindi la batteria al circuito il diapason può vibrare a lungo anche impegnando forti correnti.

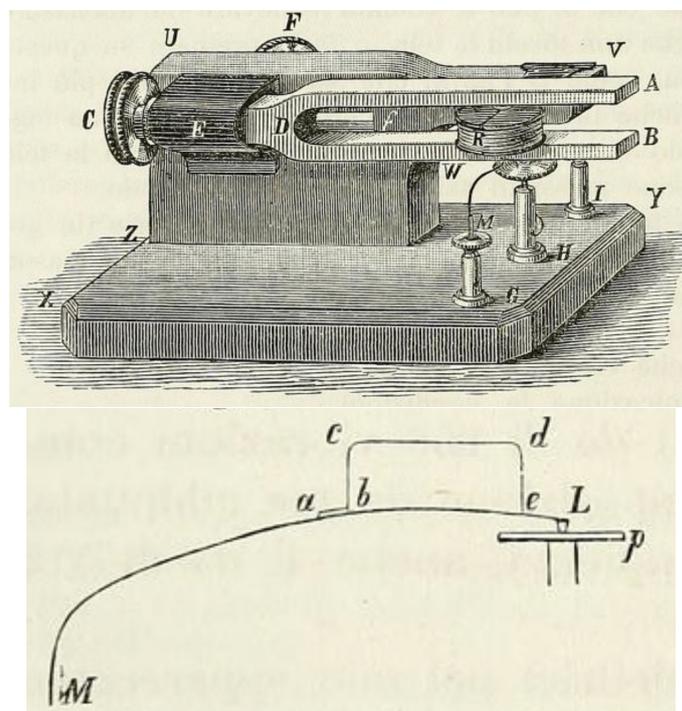


Figura 2.7: In alto: il disegno riportato da Righi della propria versione del diapason elettromagnetico. In basso: schema originale del meccanismo a staffa e molla che consente alla vibrazione dei rebbi di interrompere periodicamente il circuito

## Capitolo 3

# Righi e l'Acustica: la presentazione all'Accademia

Come già presentato nei Capitoli precedenti, la Fisica ottocentesca affina grandemente l'arte di produrre esperimenti. Essi fin dai tempi di Galileo erano il metodo di dimostrazione delle leggi fisiche e di modellizzazione della realtà al fine di poterla meglio descrivere. Nell'Ottocento i grandi nomi della Fisica sono per lo più quelli di fisici che oltre ad aver contribuito alle teorie erano abilissimi sperimentali come J.P. Joule (1818-1889), Lord Kelvin (1824-1907), M. Faraday (1791-1867), H.R. Hertz (1857-1894) e Augusto Righi (1850-1920). Naturalmente, i temi per cui questo secolo è maggiormente ricordato sono le teorie del calore e dei fenomeni elettromagnetici ed è proprio di questi ultimi che Righi si occuperà per la maggior parte della sua carriera, completando le prove sperimentali già iniziate da Hertz a conferma della teoria di Maxwell. Come già visto in precedenza, l'acustica viene rivoluzionata da studiosi mitteleuropei del calibro di Ohm, Helmholtz e Koenig, ma è in Italia e in parte proprio grazie a Righi che nasce la trasmissione del suono.

Essendo una figura di spicco nel panorama scientifico Righi era membro di numerose Accademie ma il suo percorso all'interno dell'Accademia della propria città natale è poco conosciuto e trattato nella letteratura. Per l'Accademia delle Scienze di Bologna Righi scrive circa quaranta articoli che sono raccolti nei volumi delle Memorie dell'Accademia. Tali memorie possono essere raggruppate nelle seguenti categorie:

- Memorie sul magnetismo e raggi magnetici (9 articoli).

- Memorie sulle scintille e sulle scariche (8 articoli).
- Memorie sull'elettrostatica ed elettroni (6 articoli).
- Memorie sulla teoria elettromagnetica e altri fenomeni (11 articoli).
- Memorie sulla Relatività Ristretta (4 articoli).

Infine sono presenti anche tre articoli che non fanno parte di una serie di studi collegati fra loro: una Nota del 1879 dal titolo "SULLA FORMAZIONE DELL'ALBERO DI MARTE" che tratta del fenomeno chimico omonimo, una Memoria di Acustica "DI UN NUOVO APPARECCHIO PER L'INTERFERENZA DELLE ONDE SONORE" del 1892, che è l'oggetto di studio di questo lavoro, e una sulla radioattività "SULLA RADIOATTIVITÀ DEI METALLI USUALI" del 1904.

Bisogna ricordare che Righi oltre che ricercatore accademico era anche professore universitario, nonché direttore del Gabinetto di Fisica a Bologna. È ammissibile dunque supporre che i lavori sull'elettromagnetismo siano dei veri e propri articoli di ricerca destinati ad un pubblico specializzato, mentre questi ultimi tre articoli siano nati proprio a partire dall'insegnamento e ad esso finalizzati. Argomenti infatti, come le nuove tipologie di scintillatori o i raggi magnetici erano del tutto nuovi e le relative teorie ancora in fase di elaborazione al tempo di Righi. Analizzando invece il capitolo sull'Acustica del manuale "TRATTATO ELEMENTARE DI FISICA SPERIMENTALE ED APPLICATA E DI METEOROLOGIA" di A.Ganot (1804-1887)[6] che era il testo di riferimento per le lezioni di Righi, si può capire bene quale fossero le conoscenze già generalmente accettate sul suono e come queste fossero insegnate in ambito accademico e nei Gabinetti. Ormai, la natura ondulatoria del suono era ben compresa: dal concetto di onda di pressione (che necessita quindi di un mezzo per propagarsi) a tutti i fenomeni ondulatori come interferenza, riflessione, rifrazione. Ma ancora più interessante permette di vedere quali strumenti effettivamente un professore come Righi potesse presentare ed utilizzare a lezione. Fra gli apparecchi citati si trovano il sonometro (monocordo) le già descritte sirena e ruota dentata di Stern, ma anche l'apparato di Duhamel per la rappresentazione visiva delle frequenze. Si trovano anche veloci riferimenti alla teoria dei battimenti e anche a quella del timbro di Helmholtz, ponendo l'accento sui punti ancora poco chiari:

*"Non è ben nota la causa della tempera del suono. Pare che questa qualità dipenda non solo dalla sostanza di cui sono costituiti gli strumenti, ma altresì dalla loro forma e dal modo di vibrazione"*

Per la visualizzazione sonora il manuale di Ganot propone diverse metodologie ed è proprio in questo ambito che Righi darà il proprio contributo. Le più comuni facevano uso di fiamme (o sorgenti luminose), di polveri, o di piccoli pennini montati sui rebbi di un diapason. Il primo metodo sfruttava la natura del suono come onda di pressione nell'aria e si potrebbe quindi affermare essere una modalità diretta ed immediata di indagine. La sorgente influenza direttamente la fiamma mettendola in vibrazione tramite l'aria, ma una volta interrotta le condizioni iniziali sono ripristinate immediatamente<sup>1</sup>. Sempre tramite una sorgente luminosa era possibile osservare anche la composizione fra più movimenti vibratorii senza dover passare da un supporto uditivo e col vantaggio di poter derivare direttamente i rapporti di frequenza e di fase fra le due sorgenti. In questi esperimenti a-la Lissajous non era l'aria a vibrare ma dei piccoli specchi montati sui rebbi di una coppia di diapason (Figura 3.1. Un fascio di luce era proiettato dunque sul primo diapason e riflesso da questo verso il secondo posto in maniera ortogonale al primo. Riflesso nuovamente, si può osservare il raggio con uno schermo apposito. Quando entrambi i diapason sono in accordo di fase e di frequenza, sullo schermo si visualizza una linea dritta che diminuisce solo la propria lunghezza al diminuire dell'ampiezza di vibrazione, mentre variando solo la fase di una delle due sorgenti, la figura visualizzata diventa sempre più circolare in maniera proporzionale alla differenza di fase stessa. Con diapason di frequenze diverse la differenza di fase non si conserva e si ottengono le figure caratteristiche che hanno reso famoso questo esperimento. Con le polveri invece, si può analizzare e visualizzare il comportamento che le vibrazioni sonore hanno se trasmesse ad un mezzo qualunque in grado di vibrare, con l'ulteriore vantaggio che la polvere genera come una fotografia del suono prodotto che non svanisce una volta interrotta la sorgente. L'uso di un mezzo intermedio per la rappresentazione diventa quindi più comodo e diffuso negli esperimenti d'Acustica, come nel caso delle tavole di Chladni<sup>2</sup>. Si vuole ora, nel prossimo paragrafo, descrivere nel dettaglio lo studio che Righi presenta in Accademia

---

<sup>1</sup>Si veda nel Cap.2 l'Analizzatore Armonico.

<sup>2</sup>Le tavole di Chladni, inventate nel 1787 da Ernst Chladni, consistono in alcune lastre di ottone sulle quali veniva sparsa della sabbia. Strofinata con un archetto da violino, le tavole sono messe in vibrazione e la sabbia si dispone lungo le linee nodali delle onde stazionarie create, creando le famose figure.

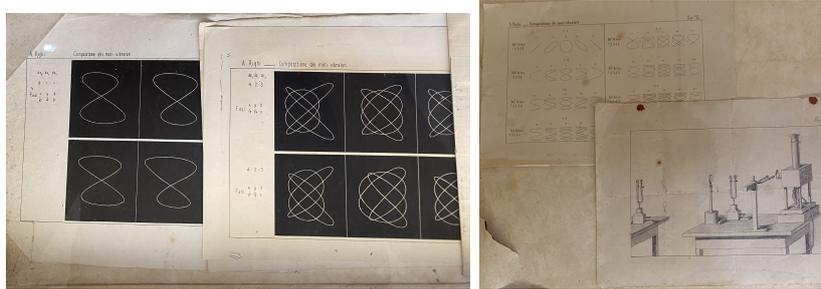


Figura 3.1: Le Tavole e il disegno dell'apparato di Lissajous come riportato negli appunti di Righi

in ambito acustico, in particolare nella realizzazione di uno strumento originale per la visualizzazione delle interferenze sonore.

### 3.1 Su un Nuovo Apparecchio per l'Interferenza delle Onde Sonore

Anche il nuovo apparecchio di Righi[19] utilizza un meccanismo simile, ma il corpo vibrante in questo caso è una tela di cotone di lato 90 cm circa tesa su un telaio di legno che viene fatta vibrare tramite uno o più diapason. L'intero esperimento sintetizza bene il panorama scientifico in cui il suo ideatore era inserito e soprattutto la poliedricità delle sue conoscenze. Oltre per una attenta realizzazione meccanica, l'apparecchio si distingue per riuscire ad unire in sé le più recenti -per l'epoca- nozioni di acustica unite alla nuova teoria elettromagnetica. Se si guarda infatti alle classiche esperienze su cui l'Acustica era stata fondata e agli strumenti coinvolti, raccontati nel Capitolo precedente, si capisce come fosse cosa rara questa unione di teorie (anche per ragioni storiche dato che prima del 1850 né l'elettromagnetismo né l'acustica avevano forma di teorie ben strutturate) l'una al servizio dell'altra. Righi, tuttavia, era un fine sperimentatore abile ad apprendere tecniche ed apparati dai colleghi, adattandoli poi a proprio modo per svilupparne di nuovi e spesso migliori. Il diapason di Righi, già descritto ed utilizzato in questo esperimento, ne è un chiaro esempio.

Lo scopo di questo esperimento è di semplificare la rappresentazione visiva dell'interferenza sonora fra due sorgenti con finalità didattiche. Come dice lo stesso Righi alla fine dell'articolo:

*Come si vede è assai facile il mostrare con questo apparecchio alcuni dei fenomeni più importanti dell'Acustica, di guisa che esso riesce utilissimo per l'insegnamento. E solo per questo che ho voluto descriverlo.*

Fissata su due lati da alcuni viti a dado disposte in modo perpendicolare, la tela può essere tesa a piacere tramite queste ultime lungo le due direzioni. Sulla tensione ed il materiale della tela Righi dedica una breve nota che occorre commentare: se al cotone si sostituisce un materiale sintetico come la gomma (caucciù) che ha densità superficiale maggiore, le figure risultano molto più chiare anche con frequenze minori<sup>3</sup>. Per evitare che si creino onde riflesse dai bordi, che andrebbero a confondere le figure di pura interferenza, sotto la tela sono posizionate - una per lato - quattro sordine di stoffa. La pressione di queste sordine può essere anch'essa regolata a piacere perché possa essere calibrata a seconda della tensione della tela e della frequenza da cui è messa in vibrazione.

L'intero telaio è fissato al supporto di legno inferiore tramite due cerniere che lo rendono dunque come il coperchio di una scatola. Questo sistema è accorgimento di carattere puramente pratico, poiché come più volte ricorda Righi, lo strumento deve essere semplice e comodo da utilizzare; poter alzare e abbassare facilmente la tela permette di pulirla facilmente dalla polvere di marmo e soprattutto di sostituire facilmente i diapason sottostanti. La struttura inferiore serve dunque ad alloggiare fino a due diapason che possono essere sollevati a piacere tramite supporti pilotati da viti, per farli aderire opportunamente alla tela ed sollecitarla correttamente senza comprometterne la vibrazione. Come è facile immaginare, per la buona riuscita dell'esperienza è necessario mantenere in vibrazione per lungo tempo i diapason che altrimenti non avrebbero il tempo di mettere completamente in vibrazione la tela e far disporre la sabbia di conseguenza. Righi opta quindi per i diapason elettrici di Koenig modificati come descritto nel Capitolo precedente. Oltre che a vantaggi di tipo pratico, la particolare disposizione data ai diapason permette di lavorare a frequenze più "comode" come il Do 256 ma anche 512 che restituiscono figure chiare sulla tela. Il circuito utilizzato per collegare i due diapason è

---

<sup>3</sup>Se consideriamo la velocità di propagazione di un'onda lungo una corda (per semplicità consideriamo una sola direzione di propagazione sulla tela) essa vale  $V = \sqrt{T/\mu}$  con  $\mu$  densità lineare, ma anche  $V = \lambda f$ . È facile vedere che  $f = \sqrt{T/\mu}/\lambda e$  dunque che all'aumentare di  $\mu$  la velocità di propagazione è minore si possono propagare frequenze più basse.

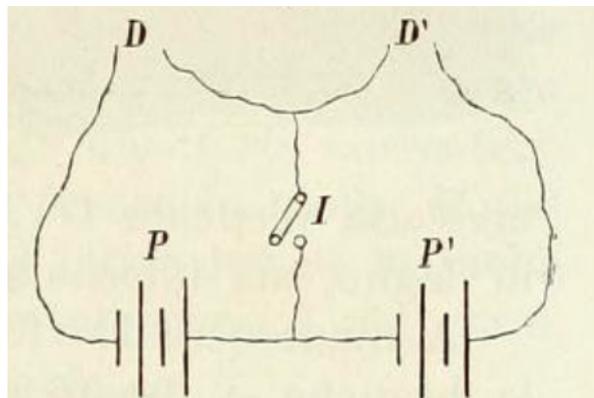


Figura 3.2: Lo schema del circuito di alimentazione a due batterie coi interruttore per i diapason preso direttamente dall'articolo originale.

costituito da una coppia di batterie (in tutto 8 coppie di bicromato<sup>4</sup>) poste in serie come in Figura 3.7 . L'interruttore, quando chiuso, divide il circuito in due maglie identiche e questo garantisce le stesse condizioni di alimentazione per ognuno dei diapason, rendendoli perfettamente coerenti qualora le piccole alterazioni dovute al contatto con la tela dovessero interferire sulle vibrazioni individuali.

Le esperienze descritte sono con ogni probabilità state effettivamente eseguite anche se dall'articolo non traspare il contesto in cui ciò è avvenuto. Data l'enfasi che Righi pone sull'utilità didattica di questo esperimento è ragionevole pensare che sia stata presentata una dimostrazione davanti ad alcuni studenti. Le esperienze sono in tutto sei divise fra prove con un solo diapason ed ostacoli e prove con due diapason interferenti. In Figura 3.3 si possono apprezzare i disegni di Righi di quattro di queste.

1. La prima esperienza condotta prevede l'uso di un solo diapason e di un regolo di legno come ostacolo posto su uno dei lati. Le onde circolari emesse dalla sorgente rimbalzano contro il regolo e riflettendosi generano interferenza con le onde incidenti. Le onde stazionarie che si creano hanno i punti nodali disposti lungo iperboli omoassiali e omofocali (il fuoco è nel centro di vibrazione). Le figure sulla tela saranno dunque tali iperboli. Col Do 256 si ottengono iperboli distanziate di 25 mm e dunque una lunghezza d'onda di 5 cm con una tensione media della tela. La velocità di propagazione si può calcolare e riporta 12,8 m/s.

---

<sup>4</sup>Un particolare tipo di batteria che sfruttava l'ossidazione fra zinco e bicromato di potassio per produrre corrente.

2. Se al regolo rettilineo si sostituisce un ostacolo di altra forma si possono osservare altre forme di interferenza: con un ostacolo circolare disposto in modo da avere il centro nel punto di contatto nel diapason, la sabbia si distribuirà in circonferenze concentriche; se l'ostacolo è ellittico e il diapason posto in uno dei fuochi le linee nodali avranno forma ellittica - benché smorzate in corrispondenza del fuoco opposto a causa dello smorzamento - mentre se fosse a forma di iperbole darebbe linee iperboliche. L'uso del condizionale in questo ultimo caso fa capire che in realtà si tratta di una estrapolazione non meglio giustificata.

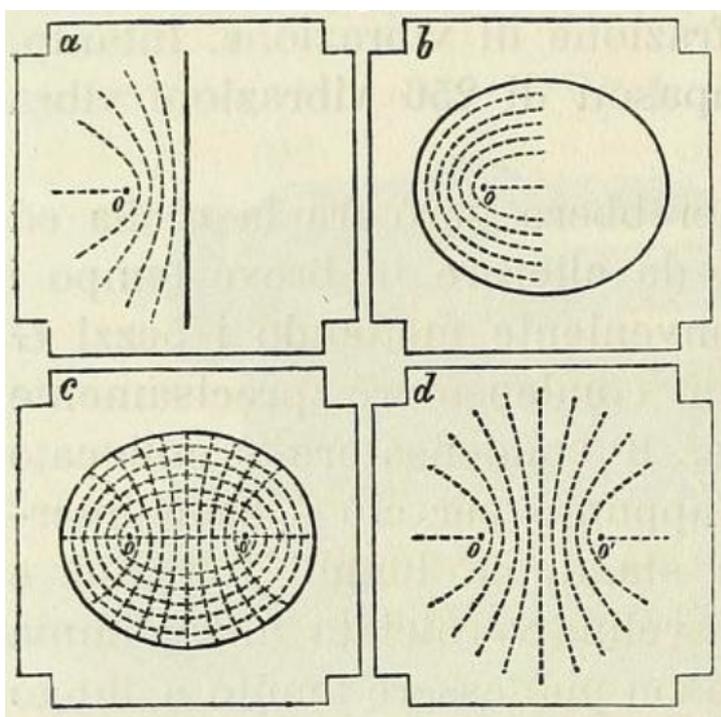


Figura 3.3: I disegni originali delle esperienze condotte con l'apparecchio. Queste tavole sono l'unica prova oggi disponibile dei risultati ottenuti da Righi. In "a" e "b" sono rappresentate le esperienze con una sola sorgente e ostacoli rispettivamente piani e circolari, in "c" e "d" con due sorgenti non alla stessa frequenza.

3. Il terzo esperimento introduce anche l'uso del secondo diapason con l'ostacolo ellittico di cui sopra. I diapason sono disposti in modo che tocchino i due fuochi e per garantirne la perfetta coerenza è necessario aprire l'interruttore del circuito di alimentazione già descritto in precedenza. Per questo caso è necessaria una anali-

si più approfondita. Si consideri la vibrazione di uno dei due diapason posto nel primo fuoco (f1) come:

$$Y(t) = \sin(2\pi Nt).$$

Nel fuoco opposto (f2) si avrà la stessa vibrazione eventualmente traslata di una fase  $\alpha$ :

$$Y'(t) = \sin(2\pi Nt - \alpha).$$

In un punto generico della tela dentro l'ellisse a distanza  $p$  da f1 e  $p'$  da f2, chiamando  $V$  la velocità delle onde e  $2a$  la lunghezza dell'asse maggiore, si avvertirà una vibrazione totale:

$$Y_t(t) = \sin\left[2\pi N\left(t - \frac{p}{V}\right)\right] + \sin\left[2\pi N\left(t - \frac{2a-p'}{V}\right)\right] + \sin\left[2\pi N\left(t - \frac{p'}{V}\right) - \alpha\right] + \sin\left[2\pi N\left(t - \frac{2a-p}{V}\right) - \alpha\right].$$

Dopo qualche semplificazione la formula può essere ridotta a

$$Y_t(t) = 4 \cos\left[\frac{\pi N}{V}(2a - p - p')\right] \cos\left[\frac{\pi N}{V}(p - p') - \frac{\alpha}{2}\right] \sin\left[2\pi Nt - \frac{2\pi Na}{V} - \frac{\alpha}{2}\right].$$

Da cui si può notare come i massimi e i minimi dipendano da  $p$  e  $p'$  ed in particolarità dalle quantità  $p+p'$  e  $p-p'$ . I luoghi di questi massimi saranno dunque iperboli ed ellissi aventi i fuochi coincidenti a quelli dell'ostacolo ellittico. In effetti l'esperienza restituisce esattamente questo comportamento della sabbia (come mostra la figura DA INSERIRE).

4. Rimuovendo l'ostacolo le linee di interferenza diventano iperboli coi fuochi nei centri sonori e separate fra di loro da una mezza lunghezza d'onda.
5. Si viene ora ai casi interessanti dove i due diapason non sono perfettamente all'unisono. Attaccando un pesetto ad uno dei due diapason infatti si può facilmente variarne la frequenza e l'esperienza "*diviene veramente brillante*" come afferma lo stesso Righi. Senza interporre alcun ostacolo le linee di interferenza hanno forma di iperboli come si è visto nella prova precedente ma a causa del diverso numero

di oscillazioni tali figure si sposteranno dal centro sonoro più "acuto" a quello più "grave" con un moto uniforme. In particolare si osserva che lo spazio che le frange percorrono ogni secondo (i.e la loro velocità di traslazione) è uguale all'intervallo spaziale fra due frange successive moltiplicato per la differenza di frequenza. In formula:

$$V_t = \lambda \Delta \nu.$$

Il termine  $\Delta \nu$  è proprio quella frequenza di battimento citata nel Cap.2 Par.2. Maggiore la differenza maggiore sarà la sfocatura delle figure sulla tela poiché la sabbia si sparge su tutta la tela saltando ad altezze sempre maggiori. L'esperienza appare molto bella a vedersi.

6. Infine, riponendo l'ostacolo ellittico si può osservare un altro interessante fenomeno. La figura creata è del tutto simile a quella del caso 3 ma questa volta la non identità delle due vibrazioni genera movimento nelle figure d'iperbole come appena visto, lasciando però ferme le ellissi.

## 3.2 L'apparecchio della Collezione di Fisica dell'Università di Bologna

Lo strumento descritto di cui parla l'articolo è stato effettivamente realizzato e si trova presso la Collezione di Fisica del Dipartimento di Fisica e Astronomia "Augusto Righi" e Sistema Museale di Ateneo dell'Università di Bologna (Via Irnerio, 46). Per questo lavoro di tesi è stato possibile visionare di persona l'oggetto. Fortunatamente, la struttura portante e il telaio sono ancora in buono stato ed è quindi stato possibile maneggiare lo strumento senza difficoltà. Si tratta della versione originale pensata da Righi con tela di cotone, in Figura 3.4, che ora presenta evidenti segni di deterioramento dovuti all'umidità, il che porta a dedurre che la modifica con tela di caucciù di cui si parla non corrisponda ad un setting sperimentale davvero preferibile. I sistemi di tiranti della tela e di sordinatura sono rimasti invece in ottimo stato. Sullo strumento (Figura 3.5) è anche riportata una data e alcune indicazioni circa la frequenza e la lunghezza d'onda a cui operava, dettaglio



Figura 3.4: L'apparato di Righi come si presenta aperto da varie angolazioni. Sul fronte si vede bene la grande tela fissata al telaio tramite viti a dado in grado di regolarne la tensione, mentre sul retro si nota ciò che rimane del circuito che collegava la pila ai diapason e i supporti degli stessi.

che conferma ulteriormente la corrispondenza tra articolo e strumento . Sul telaio esterno si può notare, nella parte superiore, il semplice sistema di collegamento elettrico fra batteria e diapason: due serrafili e l'interruttore che permette di aprire o chiudere il circuito secondo le modalità descritte nell'articolo originale e mostrate in Figura 3.6. Dai serrafili si allungano filamenti che corrono lungo la parte inferiore della base ed escono in corrispondenza dei supporti dei diapason. Proprio i diapason sono la parte mancante che non è stato possibile ritrovare. A causa delle particolari modifiche di Righi tutti gli altri modelli di diapason elettromagnetici disponibili nel Dipartimento non sono adatti alla replica dell'esperimento. Righi stesso chiarisce comunque che, essendo questi strumenti molto comuni nei Gabinetti di Fisica e nei Laboratori, con poco lavoro è possibile convertirli allo scopo ed in effetti modelli come quelli in Figura 3.7 sarebbero facilmente adattabili. Da una veloce ricerca si è visto che non esistono mezzi moderni per poter riprodurre



Figura 3.5: Il dettaglio delle indicazioni scritte lasciate sullo strumento. Sul nastro di carta, sicuramente aggiunto molto dopo la costruzione dello strumento si leggono le misurazioni di  $\lambda$  e velocità, mentre nella scritta in gessetto blu il voltaggio della pila necessario.



Figura 3.6: Il dettaglio dei serrafili e dell'interruttore.

l'esperimento. L'uso dei diapason elettrici non è più comune oggi e pare quindi che gli ultimi modelli funzionanti appartengano ora alle sezioni di Acustica dei musei di Fisica. Questo comporta che, per poter replicare praticamente le esperienze di Righi con questo strumento sarebbe necessario ritrovare i diapason originali o costruirne di nuovi secondo le indicazioni dell'articolo. Un compito questo che risulterebbe estremamente appassionante che però richiederebbe uno studio ulteriore e competenze che per l'ambito di questo lavoro non è stato possibile mettere in campo. Tale operazione sarebbe di grande valore poiché non esistono testimonian-



Figura 3.7: Diapason elettromagnetico prodotto da Max Kohl. A differenza di quello di Righi la posizione dei rebbi è verticale ma il funzionamento è del tutto simile trattandosi non necessitando del mercurio per chiudere il circuito.

ze pratiche del funzionamento dell'apparecchio anche nelle più complete raccolte multimediali specializzate come la serie di video a cura della Fondazione Scienza e Tecnica di Firenze [4]. Inoltre, data l'unicità dell'oggetto e l'importanza del suo ideatore, esso rappresenta una fonte storica molto importante che vale la pena conservare. Da ultimo, va anche ricordato ancora una volta che l'interferometro di Righi nasce con scopi didattici; poter replicare le esperienze in un contesto di insegnamento moderno avrebbe numerosi vantaggi. A differenza di un normale ondoscopio, infatti, il congegno di Righi può essere visto in ottica multi-prospettica: dal punto di vista storico rappresenta un punto di arrivo e sintesi per quanto ri-

guarda le tecniche di indagine sonora e le idee che circolavano nell'ottocento circa l'acustica. Studiandone poi le parti ed il funzionamento è possibile entrare nella teoria dell'elettromagnetismo mantenendo un approccio più pratico, legato ad un circuito funzionale ad un preciso scopo (non come quelli astratti dei libri di testo moderni) che necessita di una conoscenza che spazi dagli elementi di circuiteria più semplici alle leggi di Maxwell per essere compreso. Infine, l'importanza fisico-sperimentale che ogni apparecchio possiede, ovvero la possibilità di visualizzare un fenomeno e compiere misure su di esso, in questo caso dalle semplici misurazioni di lunghezza d'onda e velocità di propagazione alla determinazione più complessa delle equazioni delle onde in interferenza.

## Capitolo 4

### Conclusioni

La Fisica ottocentesca, figlia della Filosofia Naturale, raggiunge la maturità distaccandosi da quest'ultima, grazie ad alcuni fattori. Come si è visto nel Capitolo 1 il ruolo principale è da attribuirsi al proliferare delle Accademie europee. È in questi ambienti animati dal desiderio di una libera ricerca in simultanea contrapposizione sia con l'ignoranza delle masse che con l'immobilità scientifica delle Università che si è sviluppata una fitta rete di scambio fra scienziati veicolata dalle pubblicazioni accademiche. L'influenza galileiana è evidente nelle prime Accademie italiane di cui poi le sorelle inglesi, francesi e tedesche saranno imitatrici, nel metodo che sempre di più fa affidamento sull'esperimento come strumento di ricerca e validazione delle teorie. Nelle Accademie a fianco dei periodici scientifici e delle Memorie vengono poi a crearsi i primi musei e le prime collezioni legate alle nuove scoperte scientifiche, come nel caso del polo bolognese che ancora oggi conserva un patrimonio di oggetti storici di grande importanza. Si entra così nell'Ottocento con una Fisica che è ormai diventata una disciplina indipendente, con scopi e metodologie di ricerca chiari supportati da un sempre più ricco panorama di tecniche e strumenti. Nel Capitolo 2 si è posta l'attenzione proprio su questi nuovi strumenti in un ambito di acustica, spesso poco ricordata fra le teorie ottocentesche. È tuttavia grazie agli sforzi di Helmholtz e Koenig fra gli altri se oggi si riescono a dare quasi per scontati i concetti di nota, tono o battimento. Il dialogo fra teoria ed esperimenti in questa età d'oro per l'Acustica raggiunge vette molto alte in quanto le eleganti spiegazioni matematiche dei fenomeni sonori necessitavano di altrettanto fini strumenti per

essere provate. Nascono così, rimanendo lo stato dell'arte per più di mezzo secolo, apparecchi in grado di visualizzare le onde sonore per poterne misurare direttamente le proprietà, macchine per lo studio dell'interazione fra più sorgenti sonore e strumenti di alta precisione per la produzione e misurazione di onde sonore a determinate frequenze. Si ha testimonianza che l'acustica fosse già alla fine dell'ottocento una delle materie di studio all'interno dei corsi di Fisica di base nelle università nonché ancora materia di ricerca nelle Accademie. Dall'indagine sugli scritti di Augusto Righi pubblicati nelle Memorie dell'Accademia delle Scienze di Bologna esposta nel Capitolo 3 è emerso come anche il famoso scienziato italiano abbia dedicato una piccola, eppure originale, parte della propria carriera ad un problema di acustica: i fronti d'onda d'interferenza sonora. Si legge nell'articolo di Righi di un apparato sperimentale nuovo appositamente ideato per indagare questo fenomeno e soprattutto per renderlo più chiaro e semplice da insegnare. È un esempio di esperimento didattico. La cura dei sopracitati musei ed accademie ha permesso di poter conoscere e studiare un simile oggetto non solo tramite i documenti scritti ma anche con un esemplare, probabilmente l'unico esistente, ben conservato presso la Collezione di Fisica dell'Università di Bologna. A causa della mancanza di alcune parti mancanti non è stato possibile ricondurre gli esperimenti di Righi con tale apparato per poterne lasciare una traccia più concreta delle sole descrizioni scritte. Tuttavia, sarebbe altamente interessante ricostruire la strumentazione mancante ed approfondire lo studio sullo strumento andando a ripercorrere i passi dello stesso Righi.

# Bibliografia

- [1] *Accademia dei Lincei: Storia*. URL: <https://www.lincci.it/it/storia>.
- [2] *Accademia delle Scienze dello Istituto di Bologna dalla sua origine a tutto il MDCC-CLXXX*. Nicola Zanichelli, 1881.
- [3] Humboldt-Universität zu Berlin. *Koenig Sound Analyser*. URL: <https://soundandscience.net/artefacts/koenig-sound-analyser/#collapse-metadata-data>.
- [4] *Canale Youtube: florencefst*. URL: <https://www.youtube.com/@florencefst>.
- [5] A. GANOT. *TRATTATO ELEMENTARE DI FISICA SPERIMENTALE ED APPLICATA E DI METEOROLOGIA*. FRANCESCO VALLARDI, TIPOGrafo-EDITORE, 1862.
- [6] A. GANOT. *TRATTATO ELEMENTARE DI FISICA SPERIMENTALE ED APPLICATA E DI METEOROLOGIA*. FRANCESCO VALLARDI, TIPOGrafo-EDITORE, 1862. Cap. 5.
- [7] Carlo Gentili. «li modello epistemologico dell’Instito, tum scientiarum et artium di Bologna». In: (2021), pp. 1–2.
- [8] Ludovico Geymonat. *Vol.IV: L’Ottocento*. Storia del pensiero Filosofico e Scientifico. Garzanti, 1974. Cap. 19.1–19.3.
- [9] Ludovico Geymonat. *Vol.IV: L’Ottocento*. Storia del pensiero Filosofico e Scientifico. Garzanti, 1974. Cap. 1.1–1.3.
- [10] Giuseppe Giuliani. *Il Nuovo Cimento. Novant’anni di Fisica in Italia 1855-1944*. Percorsi della Fisica. La Goliardica Pavese, 1996. Cap. 2.2. ISBN: 88-7830-224-4.
- [11] Mario Gliozzi. *Storia della Fisica*. Storia del pensiero Filosofico e Scientifico. Bollati Boringhieri, 2005. Cap. 5.22–5.28. ISBN: 88-339-1611-1.

- [12] Mario Gliozzi. *Storia della Fisica*. Storia del pensiero Filosofico e Scientifico. Bollati Boringhieri, 2005. Cap. 5.23. ISBN: 88-339-1611-1.
- [13] Michael Hunter. *Royal Society British science society*. URL: <https://www.britannica.com/topic/Royal-Society>.
- [14] Julia Kursell. «Experiments on Tone Color in Music and Acoustics: Helmholtz, Schoenberg, and Klangfarbenmelodie». In: (2013).
- [15] *Le accademie scientifiche del Seicento*. URL: [https://www.treccani.it/enciclopedia/le-accademie-%20scientifiche-del-seicento\\_\(Il-Contributo-italiano-alla-%20storia-del-Pensiero:-Scienze\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/le-accademie-%20scientifiche-del-seicento_(Il-Contributo-italiano-alla-%20storia-del-Pensiero:-Scienze)/).
- [16] Maurizio Mamiani. *Storia della scienza moderna*. Editori Laterza, 1998. Cap. 11.3. ISBN: 88-420-5465-8.
- [17] David Alexander Pantalony. «RUDOLPH KOENIG (1832-1901), HERMANN VON HELMHOLTZ (1821-1894) AND THE BIRTH OF MODERN ACOUSTICS». In: (2002).
- [18] Giovanni Di Pasquale. *Accademie e riviste scientifiche*. URL: [https://www.treccani.it/enciclopedia/accademie-e-riviste-%20scientifiche\\_%28Storia-della-civilt%C3%A0-europea-a-cura-di-%20Umberto-Eco%29/](https://www.treccani.it/enciclopedia/accademie-e-riviste-%20scientifiche_%28Storia-della-civilt%C3%A0-europea-a-cura-di-%20Umberto-Eco%29/).
- [19] Augusto Righi. «Di un Nuovo Apparecchio per l'Interferenza delle Onde Sonore». In: *Memorie della Reale Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna, Classe di Scienze Fisiche ser.5:t.2* (1892), pp. 261–270. DOI: <https://www.biodiversitylibrary.org/item/118964>.
- [20] Accademia delle Scienze Bologna. *NOTIZIE Dell'Origine, e Progressi DELL'ISTITUTO DELLE SCIENZE DI BOLOGNA E LE SUE ACCADEMIE*. Cooperativa Libreria Universitaria Editrice Bologna, 1979.
- [21] Accademia delle Scienze Bologna. *Rendiconto delle sessioni ordinarie dell' Accademia delle Scienze dello Istituto di Bologna, Vol.1*. Accademia delle Scienze Bologna, 1833.
- [22] Fondazione Scienza e Tecnica Firenze. *DIAPASON ELETTROMAGNETICO CON INTERRUTTORE A MERCURIO*. URL: <https://www.fstfirenze.it/diapason-elettromagnetico-con-interruttore-a-mercurio/>.

- [23] Francesco Vatielli. *Monocordo*. URL: [https://www.treccani.it/enciclopedia/monocordo\\_%28Enciclopedia-Italiana%29/](https://www.treccani.it/enciclopedia/monocordo_%28Enciclopedia-Italiana%29/).
- [24] Margerita Zavarise. «Dal fulmine al laboratorio: l'insegnamento della fisica alla fine del XIX secolo attraverso lo studio delle lezioni di Augusto Righi». In: (2021).