

ARTE E FISICA DEL SUONO

a cura di
Cesare Beltrami

Saggio introduttivo
di John M. Chowning

FrancoAngeli

Informazioni per il lettore

Questo file PDF è una versione gratuita di sole 20 pagine ed è leggibile con



La versione completa dell'e-book (a pagamento) è leggibile con Adobe Digital Editions. Per tutte le informazioni sulle condizioni dei nostri e-book (con quali dispositivi leggerli e quali funzioni sono consentite) consulta [cliccando qui](#) le nostre F.A.Q.



I lettori che desiderano informarsi sui libri e le riviste da noi pubblicati possono consultare il nostro sito Internet: *www.francoangeli.it* e iscriversi nella home page al servizio “Informatemi” per ricevere via e-mail le segnalazioni delle novità.

ARTE E FISICA DEL SUONO

a cura di
Cesare Beltrami

Saggio introduttivo
di John M. Chowning

FrancoAngeli

Copyright © 2013 by FrancoAngeli s.r.l., Milano, Italy.

*L'opera, comprese– tutte le sue parti, è tutelata dalla legge sul diritto d'autore.
L'Utente nel momento in cui effettua il download dell'opera accetta tutte le condizioni
della licenza d'uso dell'opera previste e comunicate sul sito www.francoangeli.it.*

INDICE

Gli Autori	pag.	8
Prefazione di <i>Anna Dondi e Cesare Beltrami</i>	»	9
1. Arte e scienza: un'esperienza personale di <i>John M. Chowning</i>	»	13
2. John M. Chowning: dialogo con il creatore della tecnica di sintesi per modulazione di frequenza a cura di <i>Anna Dondi e Cesare Beltrami</i>	»	23
1. A Parigi con Nadia Boulanger	»	23
2. Illusioni sonore nella creazione musicale	»	24
🎵 3. Suono, forma musicale e creazione dinamica	»	27
3. Suoni bianchi, colorati e in campo armonico: aspetti fisici e interconnessioni storico-musicologiche di <i>Cesare Beltrami</i>	»	38
1. Il suono: l'intuizione ondulatoria, le sorgenti e le frequenze componenti	»	41
2. La propagazione del suono: modello newtoniano e distorsione del segnale	»	46
2.1. Le equazioni di propagazione e la velocità	»	46
2.2. Prime misure di velocità del suono, modello fisico newtoniano e ipotesi di Laplace	»	50
2.3. Indipendenza dalla pressione atmosferica e distorsione	»	53
2.4. Temperatura, velocità del suono e intonazione degli strumenti a fiato	»	55

Il simbolo 🎵 rinvia al file audio dell'allegato multimediale disponibile all'indirizzo web www.francoangeli.it nell'Area Università.

3.	Vuoto, etere e mezzi di propagazione	pag.	58
4.	Strutture spettrali tra suono e rumore	»	63
4.1.	Suono generato da una sorgente monocromatica	»	63
4.2.	Esistono suoni puri?	»	65
4.3.	Una legge acustica analoga al principio d'indeterminazione per i sistemi quantistici	»	66
4.4.	Note puntate e note mantenute a piacere in un'emissione pura	»	67
5.	Onde audio irregolari: suono <i>bianco</i> e altri suoni a spettro continuo	»	70
5.1.	Analisi di composizioni spettrali relative a segnali non regolari	»	70
5.2.	Rumore nelle sue varie sfumature cromatiche: valori assunti dal parametro di colore α	»	74
5.3.	Armonie, dissonanze e suoni colorati a spettro continuo nella produzione musicale del Novecento	»	79
4.	Risonanze ovvero piccola passeggiata in compagnia delle onde stazionarie		
	di <i>Paolo Allia</i>	»	94
	Premessa	»	96
	1. Musica e spazio: l'influenza dell'ambiente sull'espressione musicale	»	97
	2. Micro- e nano strumenti musicali: le nanotecnologie applicate alla musica	»	110
	2.1. Nanotecnologie e riproduzione della musica	»	111
	2.2. Quanto piccolo può essere uno strumento musicale?	»	114
	2.3. Il Micronium	»	114
	2.4. Sotto il micrometro	»	116
	2.5. Alcuni nano-strumenti musicali	»	121
5.	Una panoramica storica delle leggi della riverberazione sonora		
	di <i>Davide Bonsi</i>	»	127
	1. Introduzione	»	129
	2. "Mother, it's a hyperbola!": l'identificazione della proporzionalità inversa tra tempo di riverberazione e assorbimento del suono	»	130
	3. Studio analitico della curva di decadimento	»	135
	4. Costante di tempo, cammino libero medio e coefficiente di assorbimento	»	138

5.	Verifica sperimentale della legge di riverberazione	pag.	140
6.	Decadimento sabiniano e conservazione dell'energia	»	144
7.	La (ri)scoperta del cammino libero medio e la deduzione statistica della formula di Sabine	»	146
8.	Diffusione del suono nelle sale: ergodicità e <i>mixing</i>	»	150
9.	La formula di Norris-Eyring	»	156
10.	Effetto della distribuzione dei cammini: la formula di Kuttruff	»	162
11.	L'effetto della disomogeneità dell'assorbimento: le formule di Fitzroy e Arau	»	167
12.	La teoria di Joyce sulla dipendenza della riverberazione dallo <i>scattering</i>	»	169
13.	Conclusioni	»	178
6.	Relazioni pluridimensionali fra suono, scrittura strumentale, orchestrazione automatica e composizione elettroacustica in <i>Un posible día, quasi un radiodramma</i> di Javier Torres Maldonado		
	di Javier Torres Maldonado	»	180
	Introduzione	»	181
1.	<i>Un posible día, quasi un radiodramma</i>	»	182
2.	Cenni ad un'esperienza personale: dalla risintesi strumentale e mista all'orchestrazione automatica in <i>Un posible día</i>	»	183
♪ 3.	Materiali musicali di base e applicazioni dell'orchestrazione automatica in <i>Un posible día</i>	»	187
♪ 4.	Esempi di utilizzo di soluzioni di orchestrazione automatica nella parte elettroacustica	»	197
5.	Conclusioni	»	199

GLI AUTORI

Paolo Allia, fisico. Dipartimento di Scienze Applicate e Tecnologia, Politecnico di Torino. Professore Ordinario di Fisica della Materia.

Cesare Beltrami, fisico e musicologo. Conservatorio “Antonio Vivaldi” di Alessandria Istituzione dell’Alta Formazione Artistica, Musicale e Coreutica del Ministero dell’Istruzione, dell’Università e della Ricerca. Docente di Storia della Musica, Storia ed Estetica Musicale, Acustica e Psicoacustica.

Davide Bonsi, fisico. Laboratorio di Acustica Musicale e Architettura, Fondazione Scuola di San Giorgio, Venezia.

Dipartimento di Filosofia e Beni Culturali, Università “Ca’ Foscari”, Venezia. Docente di Metodologia Fisica per i Beni Culturali.

John M. Chowning, compositore e scienziato. Dipartimento di Musica, Università di Stanford (California). Professore emerito di Sintesi digitale e Composizione.

Fondatore del Center for Computer Research in Music and Acoustics (CCRMA).

Anna Dondi, musicologa e pianista. Conservatorio “Antonio Vivaldi” di Alessandria Istituzione dell’Alta Formazione Artistica, Musicale e Coreutica del Ministero dell’Istruzione, dell’Università e della Ricerca. Docente di Storia della Musica, Storia ed Estetica Musicale, Diritto e Legislazione dello Spettacolo.

Avvocato in Alessandria.

Javier Torres Maldonado, compositore. Dipartimento di Nuove Tecnologie e Linguaggi Musicali, Conservatorio “Arrigo Boito” di Parma Istituzione dell’Alta Formazione Artistica, Musicale e Coreutica del Ministero dell’Istruzione, dell’Università e della Ricerca. Docente di Composizione Elettroacustica.

PREFAZIONE

di Anna Dondi e Cesare Beltrami

Arte e fisica del suono completa una trilogia di opere di ispirazione multidisciplinare scritte da Anna Dondi e Cesare Beltrami per FrancoAngeli Edizioni a partire dal 2004. In *Società, arte e parità di genere* e *Musica e occupazione* (a cura di Anna Dondi) la collaborazione di docenti ed esperti del Conservatorio Vivaldi di Alessandria e delle Università del Piemonte Orientale, Università degli Studi di Genova, Università Cattolica del Sacro Cuore di Milano, aveva reso possibile stabilire correlazioni a più livelli tra ambiti storico-sociologici, legislativi e artistico-musicali, in particolare usando tecniche di indagine di tipo statistico. Anche questo terzo volume vede il contributo di fisici e compositori di prestigiose istituzioni – Stanford University California, Politecnico di Torino, Università Ca' Foscari e Fondazione Scuola di San Giorgio di Venezia, Conservatorio Vivaldi di Alessandria e Conservatorio Boito di Parma – per sviluppare un lavoro di ricerca incentrato sul suono, oggetto d'indagine della scienza acustica e fondamento della composizione elettroacustica. In particolare viene proposta l'osservazione e lo studio del suono secondo tre diverse prospettive funzionali: in quanto elemento fondante la composizione musicale, in quanto oggetto di indagine fisico-matematica e nella sua interazione dinamica con l'ambiente in cui viene diffuso e con il sistema uditivo del ricevente. Quindi suono sintetico da creare e con cui comporre; da osservare decodificandone le proprietà timbrico-foniche, le leggi di natura a cui è assoggettato e classificandone la struttura secondo varie tipologie spettrali. Infine suono da diffondere canalizzando nello spazio, in interazione *attiva* con l'ambiente chiuso circostante.

Le innumerevoli possibilità dischiuse dalle procedure informatiche e dalle attrezzature elettroacustiche attualmente a disposizione, possono essere sfruttate pienamente correlando competenze fisico-matematiche e norme tecniche compositive volte a un utilizzo creativo del materiale sonoro sintetizzato. Appare così necessaria una continua interazione e uno scambio di esperienza tra informatici, fisici e compositori, per giungere ad una conoscenza multidisciplinare dell'evento sonoro in grado di suggerire ulteriori spunti di ricerca scientifica, tecnologica e di produzione musicale in ambito elettroacustico.

Nel saggio introduttivo John M. Chowning (scienziato e compositore, Stanford University) rapporta arte musicale e scienza alla luce della propria esperienza produttiva e di ricerca. Si sofferma in particolare sulle conseguenze dell'evoluzione della tecnica di sintesi per modulazione di frequenza – da lui creata quattro decenni or sono – frutto di nuove conoscenze in ambito fisico-sperimentale ed ingegneristico. Ripercorre poi, nel secondo capitolo, alcuni momenti del suo percorso creativo, mettendo in luce in particolare il legame tra espressione musicale e metamorfosi timbrica di suoni inarmonici a struttura regolare.

L'acquisizione di modelli in grado di descrivere generazione, struttura e propagazione del suono è presentata da Cesare Beltrami (fisico e musicologo, Conservatorio di Alessandria) nel terzo capitolo. L'adozione di tecniche di scrittura matematica moderna, a partire dalle intuizioni di Newton, Laplace, Sagredo, Mersenne, ha condotto alla determinazione di leggi fisiche correlate tra l'altro a effetti rilevanti sotto il profilo organologico e di prassi musicale. È così possibile una doppia lettura in chiave tecnico-scientifica e musicale per eventi sonori quali armonie, dissonanze, suoni colorati a spettro continuo, suoni inarmonici a struttura discreta regolare presenti nella produzione contemporanea di musica elettroacustica.

Il capitolo quattro è dedicato ad una discussione sull'influenza esercitata dai fenomeni di risonanza sui canoni espressivi e di forma musicale. Paolo Allia (fisico, Politecnico di Torino) propone inoltre alcuni esempi di nanotecnologie applicate alla musica. I grandi progressi compiuti dalla ricerca scientifica nel mondo micrometrico e nanometrico hanno permesso di progettare e costruire generatori di suono armonici o quasi-armonici su scala submicrometrica. Queste tecnologie di avanguardia hanno consentito realizzazioni innovative nel campo della riproduzione e diffusione della musica, in particolare con la costruzione – in laboratori di ricerca avanzata – di curiosi generatori e nano-strumenti musicali quali *Micronium*, nanocorde, nano-trombe, chitarre e strumenti a percussione.

Una panoramica storica e fisico-matematica delle leggi di riverberazione sonora viene tratteggiata nel quinto capitolo. Davide Bonsi (fisico, Fondazione Scuola di San Giorgio e Università Ca' Foscari di Venezia) si propone in particolare di rilevare i fondamenti di acustica architettonica in prospettiva evolutiva, permettendo di comprendere gli esiti delle ricerche congiunti alle procedure deduttive impiegate dagli autori ivi citati. Emerge un modello interpretativo indipendente dalla natura ondulatoria del campo acustico in cui le *onde sonore* vengono sostituite da *raggi-particelle-fononi* costituenti un insieme discreto che permette di semplificare il formalismo matematico secondo un originale approccio di tipo energetico-statistico fondato sui contributi del fisico di Harvard Wallace C. Sabine.

Il capitolo conclusivo riconduce al repertorio contemporaneo di musica elettroacustica. Alle configurazioni spettrali inarmoniche a struttura regolare con pseudo-ottave individuate dalle potenze del *rapporto aureo* di *Stria* (1977) e di *Voices* (2011) discusse da John Chowning nella prima parte, segue ora l'analisi di un altro lavoro recentissimo *Un posible día, quasi un radiodramma*, ultimato da Javier Torres Maldonado (compositore, Conservatorio di Parma) nel 2011. Come Chowning, anche Torres supporta con diversi files audio una trattazione volta a descrivere i processi di derivazione dei materiali musicali e le relazioni pluridimensionali esistenti tra suono, scrittura strumentale e orchestrazione automatica. I mezzi tecnologici attualmente disponibili vengono usati come *liaison* per l'integrazione del mondo reale rappresentato dal suono, con le prassi di costruzione musicale e con il mondo fantastico-creativo concepito dal compositore. *Un posible día* possiede una struttura risultante dall'impiego di molteplici tecniche di tipo "non solo combinatorio ma anche di multiproiezione e amplificazione spettrale dell'oggetto sonoro con una caratteristica contiguità variabile rispetto al *timbro di destinazione*". L'applicazione di queste procedure alla parte elettroacustica e all'intero edificio acustico risultante risponde, in ultima analisi, alle necessità artistiche della creazione musicale e si deve allineare con l'intrinseca complessità dell'arte che in nessun modo può essere ricondotta a un insieme di istruzioni algoritmiche rigidamente definite e con esito predeterminato.

1. ARTE E SCIENZA: UN'ESPERIENZA PERSONALE

di *John M. Chowning*

Abstract

From the years spent in Paris studying with Nadia Boulanger, to the current project in Peru seeking particular acoustic models generated by resonances: the scientist and composer John M. Chowning, retraces some moments of his creative process, highlighting in particular the link between musical expression and timbre metamorphosis of inharmonic sounds regularly structured according to powers of the golden ratio. Audio extracts from *Stria* (1977), his most famous work and *Voices*, with the most recent version of 2011, had correlated analysis. Finally, examples of sounds produced by resynthesized FM accompany the memory of the circumstances in which it joins the discovery of the principle of frequency modulation synthesis. The treatment allows to say that not only arts but also sciences can have many advantages by reciprocal exchanges, producing in this way some results we couldn't achieve only by science or by art.

Dagli anni trascorsi a Parigi studiando con Nadia Boulanger, al progetto attuale in Perù ricercando particolarissimi modelli acustici generati da risonanze: lo scienziato e compositore John M. Chowning ripercorre alcuni momenti del suo percorso creativo mettendo in luce in particolare il legame tra espressione musicale e metamorfosi timbrica di suoni inarmonici strutturati regolarmente secondo potenze del rapporto aureo. Estratti sonori da *Stria* (1977), la sua opera più famosa, e *Voices*, con l'ultima recentissima versione del 2011, correlano le analisi. Infine esempi di suoni prodotti per sintesi FM accompagnano il ricordo delle circostanze in cui è giunto alla scoperta del principio di sintesi per modulazione di frequenza. La trattazione permette di affermare che non solo le arti ma anche le scienze possono trarre vantaggio da reciproche interazioni, producendo in questo modo dei risultati a livelli non raggiungibili singolarmente né dalla scienza né dall'arte.

Il compositore e scienziato americano John M. Chowning (Salem, New Jersey, 1934) è uno dei padri della musica digitale. Universalmente conosciuto quale scopritore del principio di sintesi dei suoni tramite modulazione di frequenza, implementata in una serie di sintetizzatori digitali Yamaha (dal GS1 al diffusissimo DX7), ha contemporaneamente sviluppato tecniche di controllo del suono entro uno spazio quadrifonico e ricerche sui meccanismi psicoacustici di percezione uditiva. Queste intuizioni si rispecchiano in brani costruiti a partire unicamente da suoni sintetizzati all'elaboratore, con utilizzo di algoritmi per il controllo del microlivello sonoro, secondo modalità che ricorrono nella macrostruttura formale. Nelle sue composizioni si schiudono originalissimi orizzonti timbrici, con metamorfosi di suoni dalle configurazioni spettrali inarmoniche ma regolarmente disposte, distinte così dalla maggior parte delle onde sonore irregolari presenti in natura. La sua produzione, sviluppatasi entro un arco di quasi mezzo secolo, comprende in ordine cronologico Sabelithe (1966, rev. 1971), Turenas (1972), Stria (1977), Phoné (1981), Voices (2005, 3ª versione 2011). Attualmente Chowning ricopre la carica di Professore Emerito presso l'Università di Stanford in California, ha insegnato Sintesi Digitale e Composizione (Stanford University's Department of Music) ed è stato fondatore (1975) e direttore del Center for Computer Research in Music and Acoustics (CCRMA), oggi uno dei più importanti centri di produzione e ricerca per la musica elettroacustica.

Nel gennaio 1964, quando avevo trent'anni, per un caso fortunato venni a conoscenza di un articolo – a tutt'oggi molto noto – di Max Mathews pubblicato due mesi prima sulla rivista *Science*¹, che mi condusse al lavoro di tutta una vita e ad un incontro con la scienza che non avrei potuto immaginare a priori. Pur essendo esperto in campo musicale, non avevo compiuto studi scientifici in ambito matematico, ingegneristico o informatico: in effetti non avevo mai lavorato con un computer.

Nel suo articolo Max faceva una sorprendente affermazione: “Non ci sono limitazioni di carattere teorico alle prestazioni del computer quale sorgente di suoni musicali...” Sapeva di essere nel giusto proprio perché Claude Shannon, un matematico e ingegnere suo collega ai Laboratori Bell (Bell Telephone Laboratories), aveva pochi anni prima dato prova del *teorema del campionamento*. Si trattava perciò di un articolo autorevole che esplicitamente e implicitamente individuava un territorio che era là per essere esplorato. Oltre alla fisica acustica, alla teoria dell'informazione, all'informatica e alle procedure di elaborazione del segnale, Mathews attirava l'attenzione sulle scienze psicoacustiche e sul modo in cui esperimenti accuratamente progettati avrebbero potuto condurre a nuove conoscenze riguardo al funzionamento del suono e alla percezione della musica. Tutto ciò catturò la mia attenzione, proprio perché fu a causa della *nuova musica* che avevo ascoltato a Parigi che mi trovavo a leggere quell'articolo.

Dovetti trasferirmi all'università di Stanford per proseguire a livello specialistico gli studi in composizione musicale. Nei tre anni precedenti avevo lavorato sotto la guida di Nadia Boulanger a Parigi dove avevo avuto modo di assistere ad alcuni concerti che includevano brani composti per essere riprodotti attraverso trasduttori elettroacustici. La musica che avevo ascoltato era costituita sia da suoni generati elettronicamente, sia da suoni preregistrati rielaborati, talvolta rilanciati da sistemi audio che circondavano l'uditorio. Il controllo della dimensione spaziale del suono mi aveva affascinato e mi chiedevo, mentre leggevo l'articolo di Mathews l'anno successivo o poco dopo, se a Stanford esistessero dei computers in grado di funzionare con i suoi programmi e se lui stesso mi avrebbe dato questi programmi in uso. Infine Stanford mise a disposizione e Mathews acconsentì!

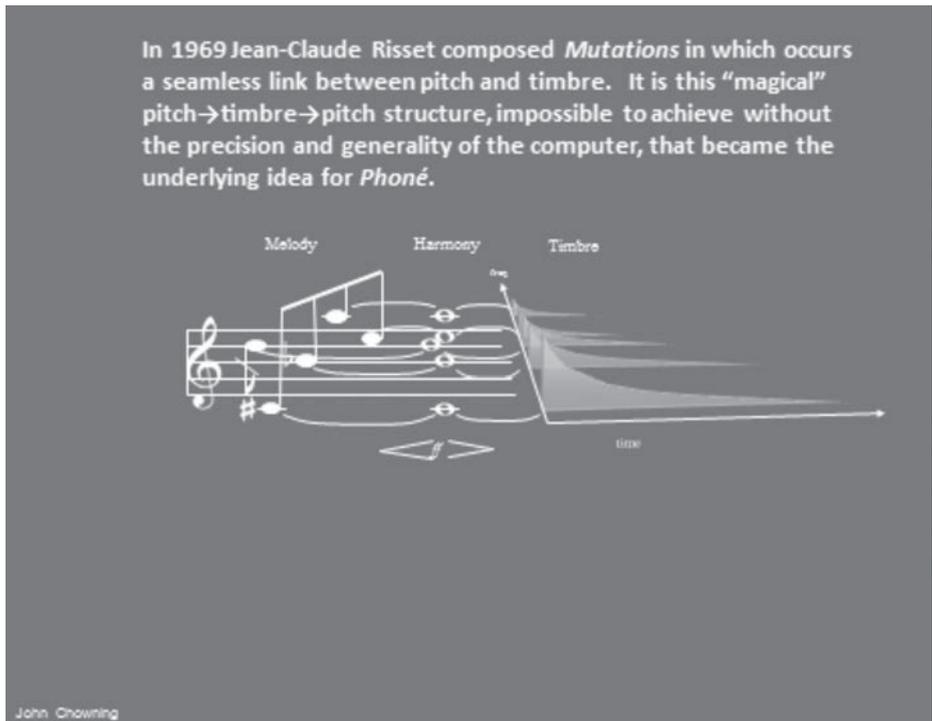
In modo completamente diverso dai precedenti e piuttosto convenzionali modi d'uso musicale dei computers, focalizzati sulla rielaborazione dei dati, particolarmente l'intonazione e una gamma di impostazioni, Jean-Claude Risset con Mathews ai BTL e io stesso presso il SAIL (Stanford Artificial Intelligence Laboratory) ci lasciammo guidare dalla nostra percezione uditiva attraverso ambiti maggiormente stimolanti, quali le procedure di elaborazione del segnale, l'acusti-

¹ M.V. Mathews, “The Digital Computer as a Musical Instrument”, *Science*, vol. 142 (1963), n. 3592, 553-557.

ca e la sintesi del suono – facendo progredire i computers ancora più in là, sulla via di assisterci nella comprensione di ciò che è essenziale in musica – il suono!

Ai Laboratori Bell, Risset era circondato dai maggiori scienziati dell'epoca, tra i quali John R. Pierce, il quale aveva il ruolo di direttore scientifico. Oltre alle sue competenze ingegneristiche, Pierce era profondamente interessato alla musica, alla fisica acustica e psicoacustica. Allora garantì una *copertura* istituzionale che permise a Mathews di passar oltre la sua carica originaria, quale direttore del Behavioral and Speech Research Lab, in modo da poter sviluppare applicazioni di informatica musicale e ottenere anche l'arrivo dalla Francia di Risset, per proseguire un lavoro di ricerca volto alla comprensione del suono.

Figura 1 – Jean-Claude Risset, *Mutations* (1969): note sgranate in sequenza (melodia), in esecuzione contemporanea (armonia) e riunite in fusione a comporre la struttura spettrale di un suono risultante (timbro)²



La formazione scientifica e musicale di Risset, dottorato di ricerca in fisica e studi di composizione ed esecuzione pianistica, costituiva un tramite ideale

² Slide 7 predisposta in occasione della prima giornata del convegno *Colloque Informatique musicale: utopie et réalités*, Université de Paris-Est, 5-6 novembre 2009.

per il suo lavoro di ricerca ai Laboratori Bell. Servendosi del programma Music IV di Mathews, cercava di sintetizzare dei toni di tromba a partire dai migliori dati acustici disponibili. Non si ottennero però risultati soddisfacenti. Risset allora utilizzò un'applicazione, in esecuzione su un potente computer, progettata per analisi [spettrali] a *passo sincrono* su forme d'onda vocali, per scomporre diversi suoni emessi da una tromba, scansionandoli periodo per periodo. Fu così in grado di sintetizzare timbri costruiti a partire dalle analisi prodotte. I risultati apparirono immediatamente di grande effetto. Riuscì a scoprire non solo il *marchio* distintivo del timbro degli ottoni, ma capì anche che una *firma* di questo tipo era presente in diverse categorie di timbri sonori. In particolare il lavoro di analisi metteva in luce che le parziali armoniche in un suono prodotto da una tromba crescono quantitativamente al crescere della forza di insufflazione. Durante il transitorio d'attacco l'effetto si sviluppa così rapidamente da non poter essere percepito all'ascolto, mentre durante un *crescendo* l'incremento di energia delle frequenze armoniche superiori – cioè l'aumento della larghezza di banda dalle frequenze inferiori alle frequenze superiori – può essere chiaramente percepito. La comprensione della relazione esistente tra forza impressa in entrata e larghezza spettrale di banda era fondamentale per sviluppare una corretta analisi dei suoni a struttura complessa appartenenti al mondo reale – suoni a carattere percussivo prodotti da una forza d'urto, variabili al variare della pressione e della velocità dell'arco negli strumenti a corda strofinata o della pressione d'insufflazione negli strumenti a fiato – e mi consentì di progredire nello sviluppo della sintesi FM qualche anno dopo.

I risultati straordinari ottenuti da Risset dipendevano molto dall'ambiente scientifico in cui si trovava a lavorare. Aveva accesso ad una vasta rete di computer e poteva disporre di camere anecoiche di alto livello per realizzare esperimenti di tipo percettivo ed effettuare registrazioni. Ma la cosa più importante era la linea di condotta ai Laboratori Bell, improntata a una grande apertura in modo da incoraggiare i ricercatori a scambiarsi idee e porsi domande l'uno con l'altro: e così fecero!

Contemporaneamente avevo ottenuto un accesso, seppur limitato, al computer SAIL e iniziai le mie ricerche sulla spazializzazione del suono diffuso attraverso un sistema audio quadrifonico e in particolare sulla realizzazione di sorgenti sonore in moto apparente. SAIL era un laboratorio di ricerca diretto dall'informatico John McCarthy che aveva formato una comunità di scienziati ed esperti con provenienze disciplinari variegata, dalla matematica all'ingegneria, filosofia, linguistica e psicologia. Venni guidato attraverso la letteratura riguardante la percezione spaziale e trovai diverso materiale riguardante la generazione di immagini stereofoniche, ma pochissimo sugli indicatori di distanza [cioè di posizione spaziale di una sorgente di suono] e l'effetto Doppler. Misi a

profitto quanto messo a disposizione dalla comunità SAIL per acquisire una comprensione dello spostamento Doppler e degli effetti di variazione della velocità radiale, ma avanzare sulla via della determinazione degli indicatori spaziali relativi ad una sorgente di suono stazionaria fu ben più complicato e infine dovetti affidarmi interamente alla mia sensibilità uditiva. Compresi empiricamente – *udendo* – che l'intensità del segnale non è in se stessa correlata fisicamente alla sensazione sonora (*loudness*) che è invece soggettiva, e su questo i musicisti sanno molto. Anche lo spettro cambia in modo rilevante variando la forza che guida il suono (pressione d'insufflazione, forza di percussione, pressione/velocità impresse all'archetto). Mantenendo una nota in *pianissimo*, un violoncellista o un violinista può variare il posizionamento dell'archetto sulla corda allontanandosi dal ponticello e avvicinandosi alla tastiera per togliere via via rilevanza alle frequenze armoniche superiori. Così, mentre una legge a quadrato inverso regola la variazione dell'intensità del suono con la distanza dalla sorgente, la sorgente di suono può funzionare in diverse modalità dinamiche (*loudness*) a distanze predeterminate: si tratta davvero di un oggetto di percezione piuttosto complicato! Scrisi un programma (in linguaggio Fortran) per produrre l'illusione di sorgenti in moto nello spazio, che rispondeva a questa situazione complessa, nel caso in cui la larghezza di banda spettrale era dimensionata in relazione alla sensazione di intensità sonora (dinamica musicale)³. In effetti, nel corso di questo lavoro di ricerca, trovai il modo di generare suoni in cui il controllo della larghezza di banda spettrale era completo.

Nel 1967, mentre esaminavo suoni che, per le loro caratteristiche dinamiche, avrebbero potuto essere usati come sorgenti funzionali ai miei esperimenti di localizzazione spaziale, riuscii a modulare la frequenza di un oscillatore per mezzo di un altro (*vibrato*). Notai che quando si arrivava a valori “estremi” di frequenza e di ampiezza di modulazione, non si percepiva una variazione di frequenza rispetto al tempo (cioè un semplice effetto di *vibrato*) ma risultavano chiaramente suoni articolati in frequenze componenti inarmoniche e armoniche. Inoltre per mezzo di una semplice funzione lineare, lo spettro poteva essere trasformato dalla più semplice disposizione a riga singola del suono *puro* sinusoidale (con una singola frequenza componente) a strutture con un gran numero di frequenze parziali corrispondenti a forme d'onda complesse. Produssi allora un buon numero di modelli esemplificativi con diversi valori dei parametri e mi convinsi che l'effetto scoperto poteva essere utile sotto il profilo musicale. Poteva essere trasposto e metodicamente regolato⁴.

³ J.M. Chowning, “The Simulation of Moving Sound Sources”, *Journal of the Audio Engineering Society*, 19 (1), 1971, 2-6.

⁴ J.M. Chowning, “The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation”, *Journal of the Audio Engineering Society*, 21 (7), 526-534.

Figura 2 – Una sorgente di suono emette secondo diverse modalità dinamiche a distanze predeterminate: *forte* e distante, *pianissimo* e molto vicino al ricevente: il *pianissimo* risulta, dalla misura spettrale I(f), essere il suono a intensità maggiore, ma è realmente il più sonoro⁵?

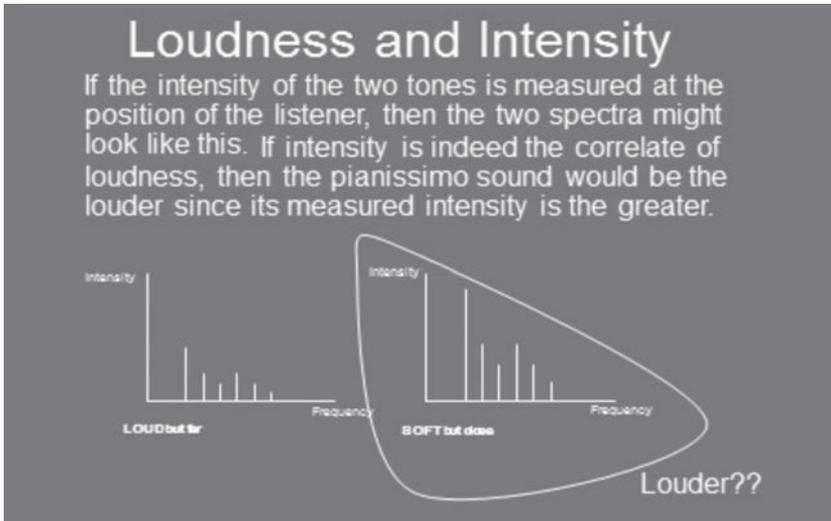
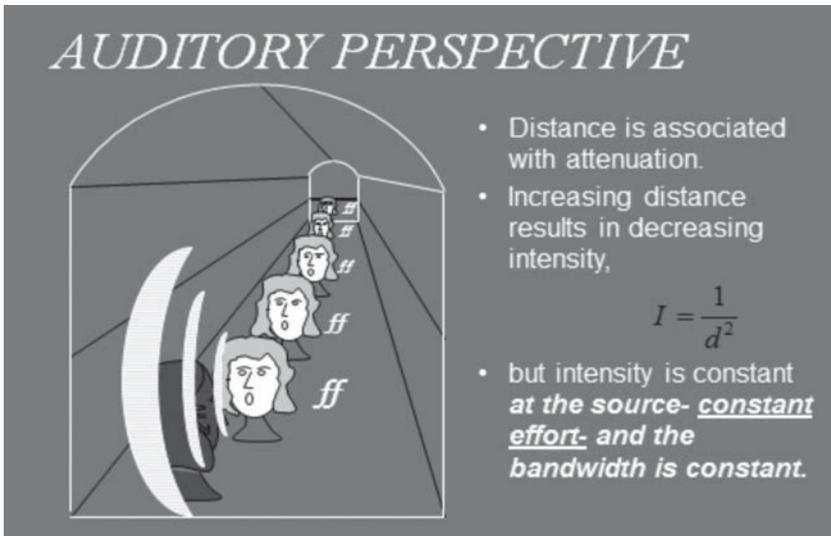


Figura 3 – Una delle leggi a quadrato inverso regola la variazione dell'intensità del suono con la distanza dalla sorgente. Ma solo una variazione dello *sforzo* di emissione (*loudness*) può variare la forma e la larghezza di banda spettrale del suono⁶



⁵ Slide 19, ibidem.

⁶ Slide 23, ibidem.