



# L'Informatica musicale a Pisa

## l'esperienza di Pietro Grossi

Leonello Tarabella, Graziano Bertini, Carlo Raffaelli, Luca Doni



UNIVERSITÀ DI PISA

**Crediti fotografici**

**Ringrazia Delio**

La CEP prima dell'informatica: divulgazione scientifica e didattica sperimentale, 12 novembre 2011: atti del convegno / a cura di Giovanni A. Cignoni e Fabio Gadducci. - Pisa : Pisa university press, 2013. - (Quaderni della Fondazione Galileo Galilei ; 1)  
004.1 (22.)  
I. Cignoni, Giovanni A. II. Gadducci, Fabio 1. Calcolatrici elettroniche

CIP a cura del Sistema bibliotecario dell'Università di Pisa

#### Quaderni della Fondazione Galileo Galilei

Direttore: Nicoletta De Francesco

Comitato Scientifico: Fabrizio Broglio  
Giovanni A. Cignoni  
Graziano Frosini  
Fabio Gadducci  
Marcomaria Massai  
Carlo Montangero

Comitato Editoriale: Roberta Filidei  
Claudio Luperini  
Marina C. Magnani  
Arianna Pecorini



© Copyright 2019 by Pisa University Press srl  
Società con socio unico Università di Pisa  
Capitale Sociale € 20.000,00 i.v. - Partita IVA 02047370503  
Sede legale: Lungarno Pacinotti 43/44 - 56126 Pisa  
Tel. + 39 050 2212056 Fax + 39 050 2212945  
press@unipi.it  
www.pisauniversitypress.it

Member of



978-88-6741-303-4

progetto grafico: Andrea Rosellini  
impaginazione: Carlo Raffaelli

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633.  
Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate a seguito di specifica autorizzazione rilasciata da AIDRO, Corso di Porta Romana, 108 - 20122 Milano, segreteria@aidro.org - www.aidro.org

# L'Informatica musicale a Pisa

## L'esperienza di Pietro Grossi al CNUCE e all'IEI istituti del CNR



Il maestro Pietro Grossi primo violoncello dell'orchestra del Maggio Fiorentino



Il maestro Pietro Grossi con i suoi più stretti collaboratori:  
(da sinistra) Leonello Tarabella, Massimo Chimenti e Graziano Bertini

ORGANO PROPONENTE: CNUCE  
 Direttore: Prof. Guido Torrigiani  
 NOME DEL PROPOSTO: Pietro Grossi  
 Data di nascita: 15 aprile 1917  
 Cittadinanza: italiana  
 Titolo di studio: Diplomi di composizione e violoncello  
 conseguito presso: Conservatorio di Musica di Bologna  
 Anni di esperienza specifica: 5  
 (post diplomam o post laurea, come risulta dal curriculum)  
 TIPO DI INCARICO PROPOSTO: ricerca musicologica  
 (collaborazione tecnica o ricerca)  
 DURATA DELL'INCARICO: mesi 12 a partire dal 1/11/1974  
 IMPEGNO DI TEMPO RICHIESTO: 1/2 (20 ore settimanali)  
 (1/2 = 20 ore settimanali; 1/4 = 10 ore settimanali)  
 COMPENSO LORDO MENSILE PROPOSTO: 70.000  
 ENTE DAL QUALE DIPENDE: Conservatorio di Musica di Firenze  
 OGGETTO DELL'INCARICO: ricerca, analisi, programmazione, coordinazione  
 e responsabilità dell'attività della divisione musicologica.

Lettera di incarico del direttore del CNUCE, Guido Torrigiani, al maestro Pietro Grossi

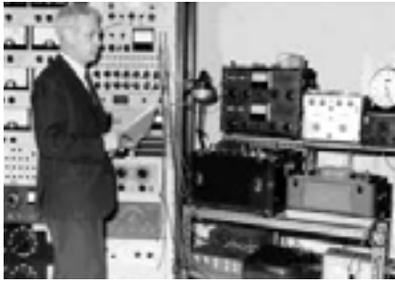
In una sera di primavera del 1970 davanti ad una oceanica platea che occupava una delle due grandi aule del Biennio di Ingegneria dell'Università di Pisa, il Maestro Pietro Grossi raccontava dell'esistenza di una nuova disciplina artistico/tecnologica attraverso l'ascolto guidato di significativi e suggestivi esempi registrati su nastro magnetico relativi a sonorità musicali generate mediante l'uso di un calcolatore. Si trattava della presentazione ufficiale al mondo accademico pisano della Computer Music, ultima frontiera della storia della Musica, sul doppio binario dell'evoluzione degli strumenti musicali e dei linguaggi espressivi.

Tra le Arti, la Musica è infatti quella che maggiormente vede legata la sua storia alla storia del pensiero scientifico e della tecnologia: la Musica soprattutto si fa con gli strumenti musicali che, proprio perché *ar-nesi meccanici*, nelle loro fattezze, nei principi funzionali e nelle modalità d'uso sono il risultato del complesso di conoscenze del periodo storico che li ha generati. La storia della musica è anche la storia degli strumenti musicali. E decisivo in questo è stato l'apporto della matematica in relazione alla scelta delle note musicali dal continuum frequenziale percepibile dall'orecchio umano, inizialmente operata con rapporti di numeri interi (scala pitagorica)

e più recentemente, dopo l'introduzione del concetto di logaritmo (Nepero, 1615), del temperamento equabile, base di tutta la musica occidentale a partire da Bach. La musica elettro-acustica nasce con l'elettronica stessa nel momento in cui ci si accorge che i dispositivi elettronici (altoparlante, circuiti oscillanti, filtri, etc..) nati allo scopo di riprodurre a distanza e nel tempo voce e musica, potevano essi stessi essere usati come generatori di originali sonorità. Negli anni '60 la musica elettronica diventa musica informatica (o computer music).

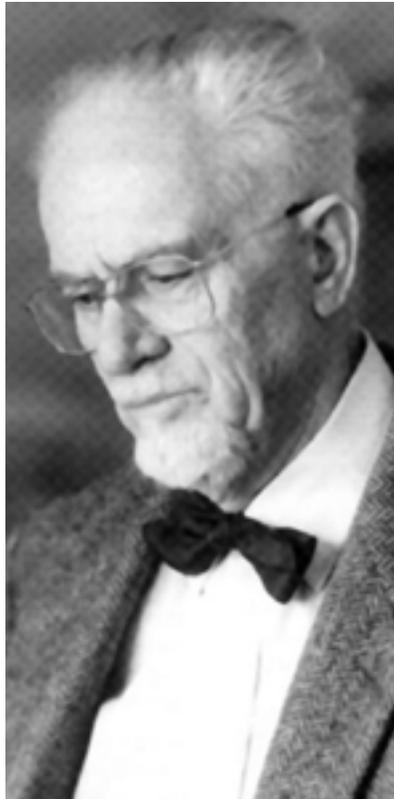
In Italia l'interesse per l'impiego dei calcolatori nel campo musicale si sviluppa concretamente a cavallo degli anni 60-70 sotto la spinta di iniziative personali. I nuovi metodi di lavoro furono subito sperimentati e condivisi dal Maestro Pietro Grossi con promettenti obiettivi intravisti e perseguiti efficacemente a Pisa dove si erano costituiti i primi importanti centri scientifici per il calcolo elettronico: il CSCE (Centro Scientifico Calcolatrici Elettroniche) che aveva progettato e realizzato la Calcolatrice Elettronica Pisana CEP ed il CNUCE (Centro Nazionale Universitario di Calcolo Elettronico).

Pietro Grossi (Venezia, 1917 - Firenze, 2002) diplomato in violoncello, entrò giovanissimo come I violoncello nell'orchestra del Maggio Musicale Fiorentino. Docen-



Apparecchiature analogiche al Conservatorio di Firenze

te di violoncello presso il Conservatorio Cherubini di Firenze, inizia la ricerca e la sperimentazione nel campo della musica elettroacustica. Nel 1963 fonda lo Studio di Fonologia Musicale progettando e facendo costruire un apparato di sintesi ed elaborazione del suono basato sull'elettronica analogica valvolare. Subito dopo ottiene l'istituzione della prima Cattedra di Musica Elettronica presso lo stesso Conservatorio di Firenze. Nel 1966 è all'Indiana University di Bloomington dove viene a conoscenza delle prime esperienze dell'uso del computer nel settore della musica elettronica. Verso la fine degli anni cinquanta, infatti, presso i Laboratori Bell di Murray Hill, New Jersey, venivano svolte attività di ricerca rivolte all'applicazione di metodologie e tecnologie digitali al settore della telefonia pubblica per soddisfare la domanda di un'utenza in crescita numerica vertiginosa che i tradizionali sistemi di commutazione elettro-meccanica a rotore non erano più in grado di supportare. Il trattamento della suono vocale in formato digitale aveva infatti suggerito anche l'idea di riprodurre le funzionalità di un sintetizzatore musicale analogico per mezzo di procedure scritte in un linguaggio di programmazione. E fu proprio anche con suoni sintetici preparati presso i Bell Labs che Pietro Grossi aveva



Guido Torrigiani

animato quella storica serata al Biennio di Ingegneria.

Tornato in Italia, Pietro Grossi si era presentato a Guido Torrigiani, Direttore del neonato Centro Nazionale Universitario di Calcolo Elettronico, chiedendo ospitalità presso il centro per eseguire ricerche sulla musica con l'uso del computer. Guido Torrigiani, personalità scientifica di rilievo e di grande cultura anche musicale ed umanistica (era solito nella normale conversazione citare i classici rigorosamente in latino ed in greco) accettò immediatamente e con grande entusiasmo la proposta di

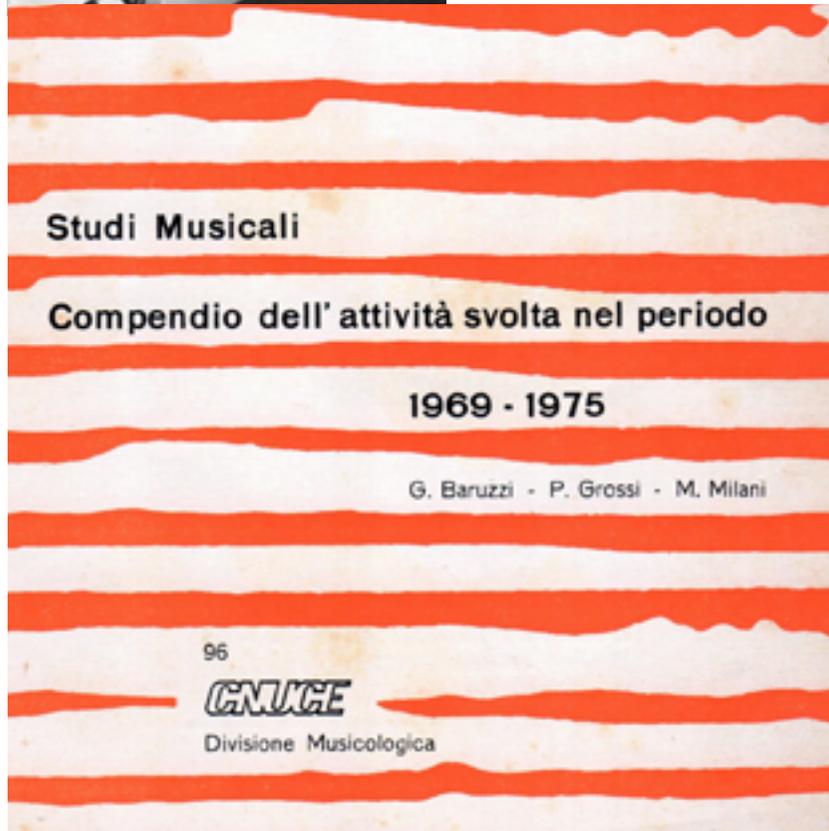
Grossi mettendo a disposizione tecnici ed operatori della Sala Macchine del Centro di Calcolo. Grossi apprese da subito l'arte della programmazione algoritmica *sformando* letteralmente pagine e pagine di tabulati di codice in linguaggio FORTRAN che si andavano via via configurando in veri e propri linguaggi musicali di composizione e di esecuzione musicale: il PLAY1800, operante su calcolatore IBM1800 che si avvaleva del calcolatore di processo System-7 per la generazione sonora, ed il DCMP (Digital Computer Music Program) operante sulle architetture IBM 360-370. Entrambi i linguaggi consistevano di due componenti principali: quella di generazione sonora a micro-livello e quella compositiva a macro-livello; vale la pena ricordarne le funzionalità essenziali perché testimoni e frutto di una precisa scelta della filosofia operativa di Grossi. Scelta che determinò anche il corso dell'attività di ricerca degli anni successivi che vide il coinvolgimento dell'altro centro di ricerca, l'Istituto di Elaborazione dell'Informazione, nelle figure di Gianfranco Capriz e Franco Denoth. Si tratta di questo. Le esperienze che Grossi aveva conosciuto negli Stati Uniti, focalizzavano l'attenzione sull'aspetto timbrico della musica e cioè relativo alla complessità delle forme d'onda del segnale. Le potenze di calcolo dei computer degli anni '60 erano tuttavia troppo basse per produrre suoni complessi in tempo reale perché, anche accontentandosi di una banda audio di 15Khz, poco più bassa della radio in FM, la generazione dei campioni del segnale digitale richiede (come recita il teorema di Shannon/Nyquist) una frequenza di campionamento di 20/25mila campioni al secondo. Questo significa che un singolo valore del segnale audio deve essere calcolato (mentre il pre-

cedente viene convertito in analogico) in circa 40 microsecondi che per i calcolatori dell'epoca corrispondeva a qualche decina di istruzioni macchina del tutto insufficienti per il calcolo di una forma d'onda complessa e men che mai di più forme d'onda relative a più strumenti diversi e simultanei. La soluzione al problema consisteva allora nel generare il segnale complesso e completo relativo ad un brano musicale in una quantità di tempo molto superiore alla durata effettiva del brano stesso, accumulando su una memoria di massa (nastri magnetici) i singoli campioni via via calcolati che in un secondo momento venivano solamente riletti e inviati in uscita alla giusta frequenza di campionamento e senza interruzioni, comunque monopolizzando l'uso del computer. Si trattava della modalità operativa cosiddetta del *tempo differito*.

Ma Pietro Grossi, fin dalle prime esperienze nell'uso dei calcolatori aveva fatto la scelta del *tempo reale*. Era solito dire: "voglio sentire musica un attimo dopo avere premuto il tasto RETURN!" (in quei tempi ancora non esisteva il mouse)... e poco importava quale fosse la qualità timbrica del risultato sonoro. Il linguaggio PLAY1800 sviluppato per il sistema IBM1800 (con una memoria RAM di appena 10K) generava suono attraverso il Sistema7 equipaggiato di un convertitore Digitale/Analogico appositamente realizzato presso il CNUCE. Era possibile definire una forma d'onda che veniva letta con frequenza di campionamento fissa e passo di scansione variabile proporzionale alla frequenza voluta con il risultato di una sola voce con timbrica a spettro statico. Il sistema IBM1800 venne poi trasferito all'INFN di San Piero e per Grossi cominciò (erano i primi anni '70) una nuova fase di progettualità da



Grossi alla console dell'IBM 360  
con il programma di composizione DCMP



affrontare sul sistema IBM360/30 e poi sui mainframe IBM360/67 e IBM370/168. Tutte le funzionalità del PLAY1800 furono recuperate (proprio perché scritte in FORTRAN) ed estese per realizzare il DCMP, Digital Computer Music Program.

Nella nuova situazione la generazione del suono avveniva tramite la transizione 0-1 del bit 0 di un registro della CPU con la tipica timbrica della risultante onda quadra edulcorata alla buona con un filtro analogico passa basso: giocando sui tempi di ritardo della transizione si ottenevano tutte le frequenze volute. Il sistema 360/30 era mono-utente e quindi, una volta "prenotato", Grossi lo usava per la sua attività di ricerca e di produzione musicale. Ma quando si trattò di passare al sistema 360/67 e successivamente al 370/168 che servivano in time-sharing contemporaneamente più di 100 utenti collegati per mezzo di terminali remoti, succedeva che tutta l'attività della sala macchine del CNUCE si fermava affinché la transizione di quel solo bit di quel solo registro della CPU potesse operare senza interruzioni assicurando così la corretta esecuzione musicale. Ovviamente il tutto avveniva concordando orari e giorni sufficientemente poco affollati dalla normale utenza del personale del CNUCE stesso e della "rete" delle sedi universitarie della città che nel frattempo si era creata.

Tutto questo in relazione al micro-livello di generazione sonora di cui si erano occupati i sistemisti ed i programmatori del CNUCE che, con affettuoso rispetto, avevano anche dato a Grossi il nomignolo di "Piripò" onomatopeico della timbrica tipica dell'onda quadra che pervadeva la sala macchine durante quei momenti in cui tutto il centro di calcolo era "monopolizzato" dal Maestro. Utilizzando questi drivers (si

direbbe oggi) essenziali alla generazione sonora, Grossi aveva sviluppato in maniera del tutto autonoma il PLAY1800 e il più recente ed evoluto DCMP che era in grado di accettare trascrizioni di partiture musicali con una codifica testuale alfanumerica delle note del pentagramma nelle sue informazioni primarie di altezza e durata. Gli autori della tradizione presi in considerazione furono principalmente Bach e Scarlatti e le esecuzioni di quelle musiche generate con il 360/67 ed il 370/168 furono il materiale per realizzare un disco di vinile LP prodotto dallo stesso Istituto CNUCE.

Ma dove il DCMP esprimeva appieno le idee innovative di Grossi, era nella parte di generazione automatica mediante l'esecuzione di procedure FORTRAN che lui stesso concepiva e sviluppava in modo del tutto originale in grado di produrre e combinare insieme numerici nelle più fantasiose modalità algoritmiche che solo alla fine del processo prendevano significato acustico/musicale con la "chiamata" alla routine di generazione sonora ottenuta con la transizione 0-1 di quel bit. In questo modo operativo, alla figura tradizionale di compositore di musica, Grossi aveva sostituito quella di *compositore di algoritmi* che componevano musica. Abolite le regole di composizione dell'armonia classica con un solo colpo di spugna, la composizione musicale algoritmica era ora in grado di generare senza sosta sequenze di eventi sonori che avevano tra loro solo e soltanto relazioni aritmetiche e geometriche del tutto nuove e del tutto impossibili anche soltanto ad essere immaginate e ad essere eseguite con lo strumentario musicale della tradizione. Era come essere passati dalla tradizionale pittura fatta di paesaggi e figure umane riconoscibili, alle mille e mil-



Scorcio della sala macchina del CNUCE negli anni Settanta

le combinazioni delle forme geometriche degli arabeschi. Ogni algoritmo generativo era una sorta di caleidoscopio musicale che produceva tessiture melodiche e ritmiche completamente avulse da ogni riferimento melodico, armonico e ritmico della musica della tradizione. Una nuova avanguardia! Un vero balzo in avanti nell'evoluzione della musica che ben si collocava nei canoni della recente Arte Concettuale del settore delle arti visive dove [wikipedia] si rifiuta di identificare il lavoro dell'artista con la produzione di un qualsiasi oggetto di più o meno rilevante qualità estetica e ritiene che l'essenza dell'arte sia invece nell'idea, nel concetto che precede e conferma l'opera. Si trattava anche e soprattutto di un vero valore aggiunto che solo l'uso del computer consentiva nell'esplorazione di nuovi territori espressivi artistici sia dal punto di vista della "progettualità" compositiva sia dal punto di vista esecutivo che nessun virtuoso di un qualsiasi strumento musicale della tradizione sarebbe stato mai in grado di sostenere.

*Tempo reale e automazione dei processi creativi* erano dunque i due pilastri su cui si fondava la filosofia operativa dell'informatica musicale di Pietro Grossi. *Sound Life, Unending music* erano i titoli di quelle composizioni di cui Grossi era il meta-compositore. Con le registrazioni su disco e su nastro magnetico di quelle musiche ed a volte anche dal vivo in collegamento remoto con il CNUCE, Pietro Grossi tenne molte conferenze e dimostrazioni; non mancarono citazioni ed articoli sulle pagine culturali dei maggiori quotidiani nazionali ed in trasmissioni radiofoniche e televisive. Insomma, grandi risultati personali e occasioni di grande visibilità dello stesso CNUCE che nel frattempo era diventato Istituto del Consiglio Nazionale delle Ricerche. Furono quelli gli eventi che dettero la spinta alla successiva fase della ricerca di Grossi che si tradusse nella sostanza nel coinvolgimento dell'IEI per la progettazione e la realizzazione di un sintetizzatore di suoni che fosse in grado di generare più voci simultanee con

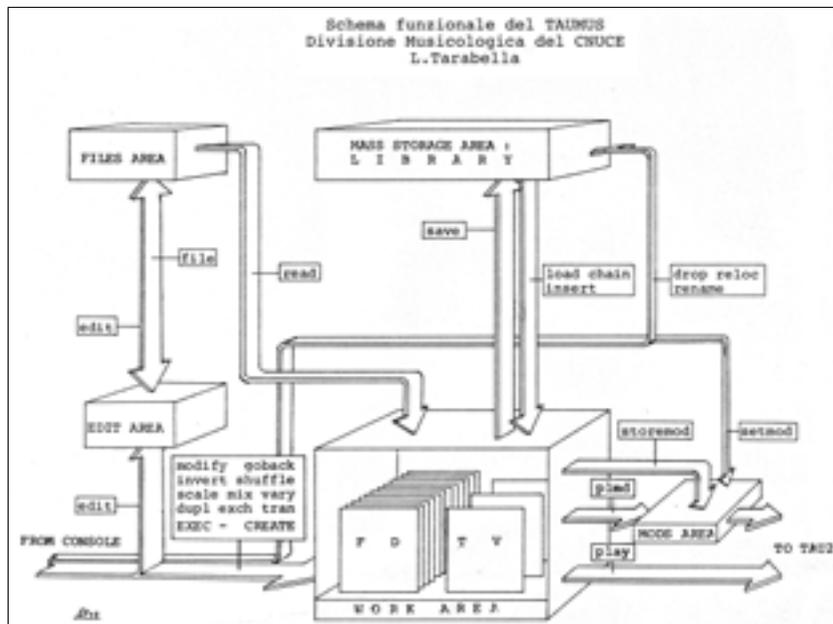
timbrica definibile a programma: il Terminale Audio TAU2. L'Istituto di Elaborazione dell'Informazione era diventato Istituto del CNR come evoluzione del precedente CSCE, che aveva dato vita negli anni '50 alla CEP; nell'Istituto erano perciò presenti tutte le competenze ed i laboratori per poter progettare e realizzare apparati elettronici in virtù della reale struttura ancora esistente costituita da fisici, matematici, ingegneri, programmatori e montatori che erano in grado di progettare l'elettronica analogica e digitale necessaria, fino allo sbroglio e alla realizzazione fisica dei circuiti stampati, al montaggio dei componenti e all'assemblaggio finale. Figure chiave per l'operazione furono il Direttore dell'IEI Gianfranco Capriz e Franco Denoth, che aveva maturato competenze di tecniche digitali-analogiche nell'ambito di ricerche

d'avanguardia nel settore biomedico. A Franco Denoth fu affidata la responsabilità del progetto e della realizzazione pratica affidata ad un gruppo di lavoro formato essenzialmente da Graziano Bertini, Massimo Chimenti e Luigi Dall'Antonia. L'attività che portò alla realizzazione del TAU2 si svolse tra il 1970 ed il 1975.

Dopo una prima realizzazione di quello che veniva chiamato "Terminale Audio" come voleva la terminologia dell'epoca per cui ogni periferica di calcolatore era un "terminale" e che servì essenzialmente per chiarirsi le idee tra quello che si poteva fare con la tecnologia del momento e le richieste operative più propriamente musicali di Grossi, si passò alla progettazione e alla realizzazione del TAU2, un'apparecchiatura ibrida e cioè digitale nel controllo e nella comunicazione con il mainframe IBM370/168



Altro scorcio della sala macchina del CNUCE

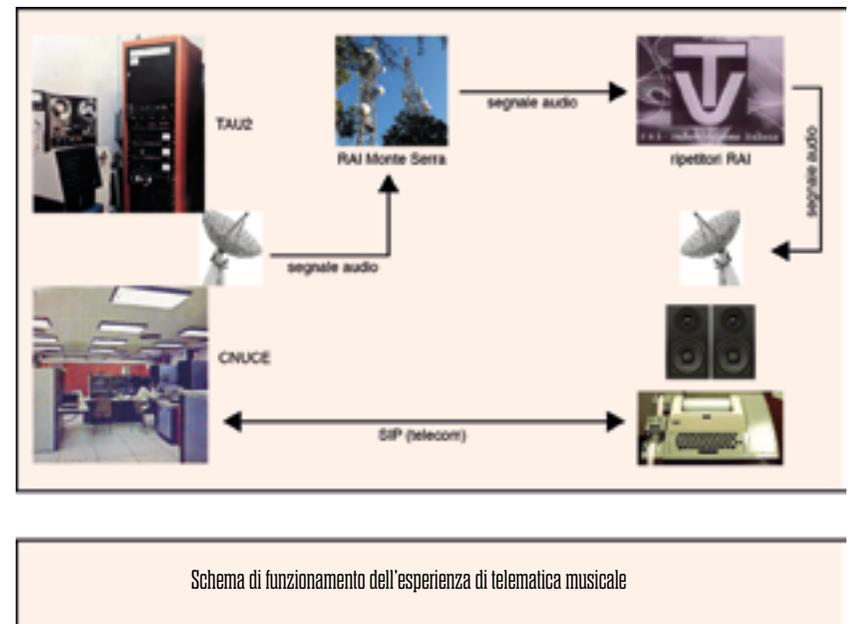


e analogica nella sintesi audio. Il TAU2 era un'apparecchiatura di sintesi audio polifonica e politimbrica in grado di produrre simultaneamente 12 suoni (o voci musicali) con timbrica basata sul modello di sintesi armonica altrimenti detta "di Fourier" per analogia con il ben noto teorema. Era quindi uno speciale terminale collegato come una qualunque altra periferica all'IBM370 che tramite opportuna programmazione di canale sviluppata da esperti del Centro Scientifico IBM, all'epoca "dirimpettaio" del CNUCE in via Santa Maria, poteva essere usata assieme al normale lavoro del sistema time-sharing e finalmente senza interrompere l'attività dell'utenza remota del CNUCE. Nella seconda metà degli anni '70 Grossi promosse al CNUCE l'istituzione della Divisione Musicologica, di cui fecero parte Mario Milani, Silvio Farese e due gio-

vani borsisti CNR: Tommaso Bolognesi e io stesso. Per la gestione del TAU2 si procedette alla stesura di un nuovo software di gestione che prendeva le mosse dal già collaudato DCMF che veniva ora ampliato per il trattamento di brani musicali polifonici: il TAUMUS. In special modo Bolognesi e io ci occupammo di contribuire all'aspetto più vicino alla tematica cara a Grossi dell'automazione dei processi creativi sviluppando nuove funzionalità basate sui processi stocastici delle Catene di Markov e dei frattali di Mandelbrot.

Fu anche istituito un corso di "Applicazioni musicali" come parte del normale calendario corsi sulle tecniche di programmazione che il CNUCE offriva, il cui svolgimento era di solito affidato a noi "giovani reclute" (Bolognesi e me).

La presenza del TAU2 significò anche



un'intensificarsi di quell'attività divulgativa attraverso seminari e dimostrazioni remote già iniziata negli anni precedenti con il linguaggio DCMF; questo significò anche un grosso impegno per l'arricchimento del linguaggio di gestione TAUMUS in termini di funzionalità per l'automazione dei processi creativi cui tutti partecipammo in forze e soprattutto per l'arricchimento dell'archivio di brani di autori classici: Paganini (Capricci), Stravinsky (Sagra della Primavera), Handel (Water Music), Bach (Clavicembalo ben temperato, L'arte della fuga, Offerta musicale, etc.), Scott Joplin ed altri, utilizzati per l'edizione di molti altri dischi LP a cura del CNUCE.

Per una decina d'anni a cavallo degli anni '70 e '80 furono molte le occasioni di dimostrazioni remote nelle più disparate occasioni congressuali, eventi di arte contemporanea, in conservatori italiani ed

anche all'estero (Parigi, su invito di Jannis Xenakis) che Grossi ricordava come una delle più belle esperienze vissute. Per la realizzazione di questi interventi veniva sempre coinvolta la SIP per l'installazione di una linea telefonica dedicata per quello che riguardava il collegamento del terminale TTY con il sistema IBM370 e la RAI per quello che riguardava il segnale audio tramite un ponte radio che tecnici della RAI approntavano posizionando un'antenna parabolica nel cortile dell'IEI puntata sui ripetitori di Monte Serra ed una seconda antenna parabolica nei pressi del luogo della manifestazione puntata sul più vicino ripetitore RadioTV della RAI stessa. Un altro esperimento ufficiale del servizio che Grossi definiva "telematica musicale" fu effettuato nel giugno 1985 durante la manifestazione "La luce a Venezia": per questo evento io stesso realizzai un programma per computer

Commodore 64 che eseguiva sia la funzione di terminale remoto collegato via telefono+modem all'IBM370 dove era attivo il TAUMUS, sia la funzione di esecutore sonoro utilizzando il sintetizzatore SID interno al Commodore stesso. Quelle esperienze e l'osservazione attenta di quello che stava maturando anche all'interno dell'attività di ricerca del CNUCE sulle reti di dati, facevano dire a Grossi con lucida lungimiranza che "un giorno la musica transiterà sulle reti e sarà possibile scambiarsi e scaricare musica da grosse banche dati"... quello che in effetti è poi accaduto con la musica on-demand e il cloud. Alla fine degli anni '80 il TAU2, che fino ad allora era stato mantenuto in perfetta efficienza da Graziano Bertini, fu dismesso dal servizio e "museato", dapprima al Conservatorio di Firenze e poi definitivamente presso il Museo degli Strumenti di Calcolo nell'Area dei vecchi macelli a Pisa. Ho potuto scrivere queste pagine sulla figura e sull'avventura creativa di Pietro Grossi avendo vissuto in prima persona ogni sua fase a partire dal 1970 in molte delle quali partecipando anche in maniera diretta ed operativa.

Grazie all'originale e coraggiosa iniziativa di Pietro Grossi in quei pionieristici momenti, ho potuto in seguito sviluppare, come attività di ricerca all'interno del CNUCE e dell'ISTI, nuove tematiche dell'informatica musicale che l'evoluzione tecnologica via via consentiva e stimolava a perseguire... ma questa è un'altra storia.

*(questo articolo di Leonello Tarabella era già apparso nel volume: "La CEP prima della CEP" di Fabio Gaducci e Giovanni Cignoni, Pisa University Press, 2011)*

#### Bibliografia essenziale

- P. Grossi (1971), Musica in tempo reale, "I Futuribili", V, n. 34, Bardi, Roma.
- P. Grossi, G. Sommi (1974), "DCMP, versione per il Sistema 360/67", collana Studi Musicali, nota int. CNUCE n. 53.
- L. Tarabella (1975) "Applicazioni musicali delle Catene di Markov", collana Studi Musicali, nota interna CNUCE n.55
- G. Bertini, M. Chimenti, F. Denoth (1976), "TAU2- An Audio Terminal for Computer Music Experiments" Int. Symposium on Technology for Selective Dissemination of Information, Rep. di San Marino, IEEE Computer Society, New York, NY, pp. 143-149.
- P. Grossi (1976), "Modalità operative del TAU-MUS software di gestione del terminale audio TAU2", collana Studi Musicali, nota interna CNUCE-CNR, n. 120.
- T. Bolognesi, M. Milani, L. Tarabella (1977), "Tre esperienze di psico-acustica musicale", nota interna CNUCE-CNR Pisa, n. 132, e atti del Symposium di Psicoacustica Musicale, IRCAM, Parigi.
- G. Bertini, T. Bolognesi, M. Chimenti, P. Grossi, L. Tarabella (1978), "Computer Music", Libretto dell'Audizione permanente del sistema TAU2-TAUMUS al 41mo Maggio Musicale Fiorentino, Ridotto del Teatro Comunale (Firenze, 29-30 giugno 1978), pp. 598-627.
- G. Bertini, T. Bolognesi, P. Grossi (1980), "TAU2-TAUMUS- Il sistema di computer music in tempo reale realizzato a Pisa. Descrizione ed esperienze", Automazione e Strumentazione, vol. XXVIII, n.2, pp. 134-143.
- L. Tarabella, P. Grossi (1985), "Un'esperienza di Telematica Musicale", collana Studi Musicali, nota interna CNUCE-CNR, C-85, n.7.
- G. Nencini, P. Grossi, L. Tarabella, G. Bertini (1985), "Studi sulla Telematica Musicale", Atti del VI Colloquio di Informatica Musicale, Napoli. Quaderni di Musica/Realtà, n. 14, Ed. Unicopli, Milano 1987, pp. 295-299.
- G. Bertini, L. Tarabella, P. Guerrini (1986), "Una stazione di lavoro con un Home-Computer per esperimenti di telematica musicale", nota interna IEI-CNR, B4-78.

## La testimonianza di Graziano Bertini

Appena diplomato all'ITI di Pisa (1962) fui chiamato a lavorare all'IEI dal Prof. Gerace, uno dei responsabili del progetto della CEP: c'era bisogno di tecnici capaci e con spirito di intraprendenza e in quei momenti quella del perito industriale era una figura fondamentale nell'organizzazione di una ricerca come anello di collegamento tra i progettisti e i montatori, che di fatto assemblano le apparecchiature elettroniche. Fui inserito nel gruppo di Luigi Dall'Antonia che mi insegnò moltissimo su come far funzionare i circuiti... una volta progettati e montati.

Dopo aver lavorato su diversi progetti, mi si presentò l'occasione di lavorare sul suono e ne approfittai volentieri. Come perito radio-tecnico ero appassionato di amplificatori, registratori e giradischi e lavorare sulla musica elettronica mi entusiasmava molto.

Il Maestro Grossi fino a quel momento aveva lavorato utilizzando esclusivamente i calcolatori IBM del CNUCE che gli consentivano di generare una sola "voce" musicale e con la timbrica fissa dell'onda quadra. Su quel semplice espediente realizzò il DCMP (Digital Computer Music Program) che consentiva di trascrivere brani musicali da

pentagramma, fare varie elaborazioni e trasformazioni e generare strutture musicali in modo algoritmico.

Presto sentì l'esigenza di avere suoni con timbrica arbitraria e la possibilità di gestire più voci contemporanee. Per cui i Direttori del CNUCE (Guido Torrigiani) e dell'IEI (Gianfranco Capriz) decisero di dare inizio ad un'attività rivolta alla costruzione di un'apparecchiatura dedicata alla generazione sonora polifonica e con timbrica.

In quegli anni la potenza dei calcolatori non consentiva di fare la sintesi sonora digitale in tempo reale perché un calcolatore con un clock a 1Mhz (ma anche a 10Mhz) quando devi fare 50.000-100.000 moltiplicazioni in 30-40 microsecondi... non ce la fa. Allora fu scelta la modalità analogica degli oscillatori con la tecnologia usata negli organi elettronici tipo Farfisa o Elka, che venivano usati in quegli anni nelle orchestre. Perché solo così si poteva ottenere il suono in tempo reale.

Franco Denoth (per il quale avevo già lavorato sul progetto pace-maker e che fu il capo-progetto del TAU2) decise di fare una tesi di laurea sulla fisica del suono con particolare riferimento alla sintesi di segnali audio in modo analogico con la tipologia



Graziano Bertini al Tau2

dei circuiti usati nei sintetizzatori Moog.

Fu realizzata un'apparecchiatura (siamo intorno all'anno 1970) che chiamammo TAU<sub>1</sub> (anzi all'inizio era solo TAU, Terminale AUdio - diventò TAU<sub>1</sub> quando abbiamo fatto il TAU<sub>2</sub>) e per un paio d'anni furono fatte delle prove con brani semplici che Grossi preparava con una telescrivente del "telex" (per chi si ricorda cosa era il telex) utilizzando un nastro di carta perforata. Sulla base dell'esperienza acquisita con il TAU<sub>1</sub> si progettò il TAU<sub>2</sub>.

Io mi occupai della parte di controllo della macchina, quella che doveva gestire i dati e la comunicazione con l'IBM370, costruendo di fatto una CPU con tanto di micro-codice, memoria e canali di ingresso/uscita. Denoth, Massimo Chimenti e Mauro Ferrucci si occuparono della parte audio, prettamente analogica, che era basata su un banco di oltre 300 oscillatori a induttanze e condensatori.

Era un progetto originale e perciò dovemmo prendere varie decisioni anche su come strutturare i dati relativi a frequenze e timbriche. Ci vollero due-tre anni per costruire il TAU<sub>2</sub>, dal 1973 al 1975. E tutto ciò fu possibile grazie al fatto che all'IEI erano ancora attivi laboratori e competenze che appena una dozzina di anni prima avevano dato vita alla CEP.

Non fu comprato niente; all'infuori dei componenti discreti e chip integrati.

Fu fatto tutto "in casa". I circuiti stampati venivano fatti con la tecnica della riduzione di grossi disegni tramite procedimento fotografico tradizionale in camera oscura; poi c'erano i laboratori di montaggio dei componenti elettronici sulle basette; e poi c'era l'officina meccanica che realizzò il telaio, le strutture portanti e gli sportelli eseguendo perfino la verniciatura.

C'erano due tipi di schede elettroniche: quelle replicabili in più esemplari che venivano realizzate con basette a circuito stampato, mentre quelle a funzionalità unica venivano realizzate "filando" letteralmente il circuito con una tecnica chiamata "wire-wrap"... una tecnologia oggi completamente obsoleta.

Insomma, dopo due-tre anni di lavoro uscirono i primi suoni, le prime note. Il TAU<sub>2</sub> aveva un'architettura precisa, frutto di una scelta consapevole e ragionata, con un array di 256 oscillatori analogici quarzati.

All'epoca c'era chi criticava il fatto che la macchina non era programmabile: è vero sì che usava il solo modello della sintesi additiva, ma è vero anche che c'era la possibilità di variare ad ogni centesimo di secondo i valori di ampiezza delle componenti armoniche e questo consentiva di realizzare una vasta gamma di timbriche diverse tra loro.

La scelta fatta a Pisa in quegli anni fu pressoché obbligata. Il concetto di "suono digitale" all'epoca non era stato ancora definito con esattezza e in ogni caso non c'era la potenza di calcolo sufficiente. Gli altri centri di ricerca in Italia, arrivando quattro-cinque anni dopo, furono avvantaggiati dall'evoluzione del concetto di sintesi digitale e dalla disponibilità sul mercato di componentistica elettronica più evoluta. Possiamo dire che partire tra i primi in qualche modo ci penalizzò. D'altronde chi viene dopo usufruisce delle esperienze precedenti e appare più avanzato. Certamente dopo si sono visti tutti i limiti della ricerca precedente, ma non c'è dubbio che noi siamo stati i primi e che la strada era ormai tracciata e che fu tracciata in modo pionieristico da Grossi qui a Pisa.

Il TAU<sub>2</sub> era di fatto la macchina che

suonava le composizioni musicali che Grossi faceva sull'IBM del CNUCE con il linguaggio TAUMUS: questo linguaggio era in pratica l'evoluzione verso la polifonia e la timbrica del DCMP che fino a quel momento usava lo stesso IBM anche per la generazione sonora con una sola voce e senza timbrica.

La trasmissione dei dati dal TAUMUS operante sul 360/370 del CNUCE verso il TAU2 veniva fatto sfruttando un collegamento già precedentemente progettato per ricerche su reti di calcolatori dal prof. Molnar tra un calcolatore HP2100 all'IEI e l'IBM370 al CNUCE attraverso un cavo

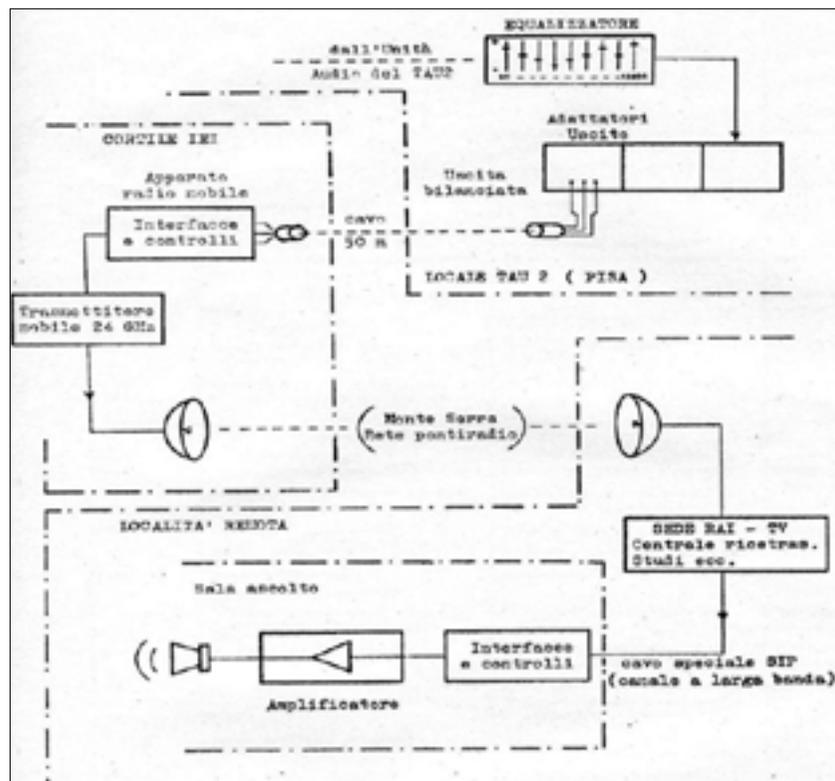
steso fra i due istituti che distavano tra loro appena 100 metri e avevano un cortile in comune, seguendo un protocollo di trasmissione realizzato da sistemisti del Centro Scientifico IBM all'epoca anch'esso in via Santa Maria. Il comando PLAY del TAUMUS attivava la trasmissione dati verso il TAU2 in un formato che rifletteva la struttura fisica del TAU2 e che somigliava molto a quello dello standard MIDI introdotto sul mercato degli strumenti musicali una decina di anni dopo. Analizzandolo oggi si può dire a ragione che quella codifica era un MIDI ante-litteram anzi un MIDI-file ante-litteram perché nel codice era presente

anche l'informazione "durata". Come si sa per Grossi le tre cose importanti erano: il tempo reale, la composizione algoritmica detta anche "automazione dei processi creativi" e la dimostrazione remota. Quest'ultima era un'attività che ci ha impegnato in molte occasioni. Succedeva questo: la SIP (quella che sarebbe diventata la Telecom) predisponendo una linea telefonica dedicata detta "punto-punto" tra il CNUCE ed luogo della dimostrazione dove con un terminale (telescrivente o video) ci si collegava all'IBM370 ed usare così il TAUMUS. Il suono generato dal TAU2 veniva portato nel luogo della dimostrazione utilizzando ponti radio della RAI: veniva un pulmino della RAI che metteva una parabola sul tetto del CNUCE puntata su Monte Serra, che rifletteva il segnale audio al luogo della dimostrazione. Era l'inizio della telematica musicale. Di queste dimostrazioni ne furono fatte tantissime: al Ridotto del Teatro alla Scala di Milano, a Venezia, a Firenze... una volta anche a Parigi. In una di queste occasioni successe una cosa molto bella: eravamo alla Biennale di Venezia (poteva essere il '78 o il '79) e durante la dimostrazione di Grossi, la Maestra Teresa Rampazzi (allora docente di musica elettronica al Conservatorio di Padova) invitata ad usare il sistema, fece in estemporanea una composizione musicale col TAUMUS. Quella volta anche il segnale audio arrivava a Venezia dal TAU2 utilizzando una linea telefonica (non ci fu il ponte radio RAI) e quindi la qualità del suono era bassissima ma sufficiente per capirne il risultato musicale. Che fu comunque interessante: e siccome fu memorizzato nell'archivio del TAUMUS, qualche giorno più tardi la Rampazzi venne a Pisa e registrò su nastro la sua composizione in alta qualità direttamente dal TAU2. Il costo globale di

queste dimostrazioni remote (linea telefonica dedicata e ponte radio RAI) era molto alto: si parlava di centinaia di migliaia di lire, fino anche 1 milione di lire; ma all'epoca il CNUCE era molto ricco per via che serviva tutta l'area universitaria pisana e si poteva permettere, in nome della visibilità, di coprire tutte le spese.

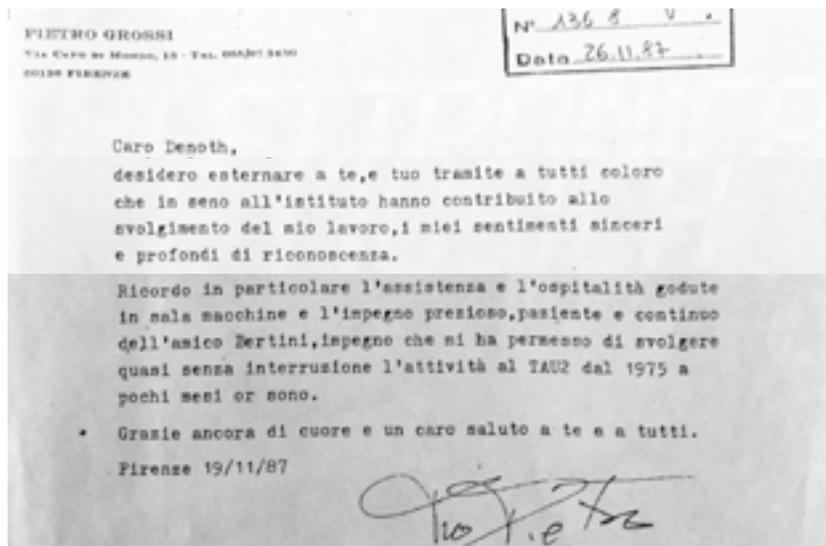
Tra i vari aneddoti dell'epoca mi ricordo quello di Ferrucci che fece tanto per avere una tastiera tripla, come quella degli organi classici, in modo tale da poter provare direttamente tutti gli oscillatori del TAU2. Fu costruita apposta per noi su iniziativa di noi tecnici. Quando arrivò, tutti noi la facemmo vedere orgogliosamente a Grossi, ma lui nemmeno la considerò e continuò a lavorare sulla sua tastiera del terminale dell'IBM370. Lì per lì ci rimanemmo male! Ma poi capimmo che non voleva "offenderci" perché in realtà il senso della novità della ricerca sull'informatica musicale consisteva proprio nell'utilizzo delle prerogative della programmazione algoritmica come nuovo modo di comporre ed eseguire un brano musicale. Devo dire che si lavorava bene col Maestro Grossi anche se lui era piuttosto formale: a volte si lavorava dopo cena, o il sabato e la domenica. I colleghi mi pigliavano un po' in giro per questo, ma non mi interessava perché la cosa mi appassionava molto. Grossi sapeva sempre riconoscere il valore del lavoro di noi tecnici. Era una persona molto seria, spesso seriosa, ma non distaccata. Io fra l'altro ho fatto la manutenzione del TAU2 per molti anni, fino a tutti gli anni '80. L'ho fatto volentieri... ormai per me il TAU2 era come uno di famiglia! Del gruppo originario ero rimasto solo io a tenere in funzione il TAU2; del resto la stessa cosa era successa anche al CNUCE dove di un gruppo di 4 perso-

Schema tecnico di funzionamento della telematica musicale



ne impegnate sul software del TAUMUS, per varie ragioni rimase solo Tarabella. Con Leonello negli anni successivi, finita l'esperienza di Grossi, abbiamo fatto molte altre cose secondo una naturale evoluzione della tecnologia e delle tematiche dell'Informatica Musicale. Comunque, un episodio che ricordo con molto piacere di quegli anni fu quando nel periodo natalizio del 1975 venne un giornalista, Luigi Fait, del RadiocorriereTV e Grossi mi chiese di essere presente durante l'intervista-dimostrazione per eventuali malfunzionamenti del TAU2. Fait fece tante domande sul funzionamento del Sistema TAU2-TAUMUS. Da tecnico assistente in quell'occasione diventai un po' protagonista. Grossi me lo concesse volentieri. Non è facile con poche parole raccontare l'architettura di una macchina e il suo modo di funzionare così complesso, ma io lo feci con passione e ad integrazione e memoria di quanto avevo detto, gli consegnai un libretto che avevamo pubblicato, in cui

c'erano tutte le informazioni esatte. Il giornalista fu bravo a scrivere il servizio sul Radiocorriere riportandone alcuni estratti con precisione... che è la cosa che fa sempre piacere. All'epoca Pisa era veramente al centro delle ricerche sull'informatica musicale. E nel frattempo l'attività si stava sviluppando anche in altre sedi italiane. Ma tutti riconoscevano al Maestro di essere stato pioniere, e riconoscevano a Pisa la consistenza dell'attività, tanto che fu convocata proprio a Pisa la riunione dei vari centri di ricerca italiani con l'obiettivo di coordinarne l'attività. L'ideatore fu Giuseppe Di Giugno, un fisico dell'Università di Napoli poi emigrato all'IRCAM di Parigi per lavorare con Pierre Boulez; c'erano rappresentanti dell'Università di Padova e altri gruppi di ricerca di Milano, Napoli e Genova. In quella riunione al CNUCE si decise di dare vita all'AIMI (Associazione Informatica Musicale Italiana) tutt'ora attiva: Grossi fu scelto all'unanimità come primo Presidente.

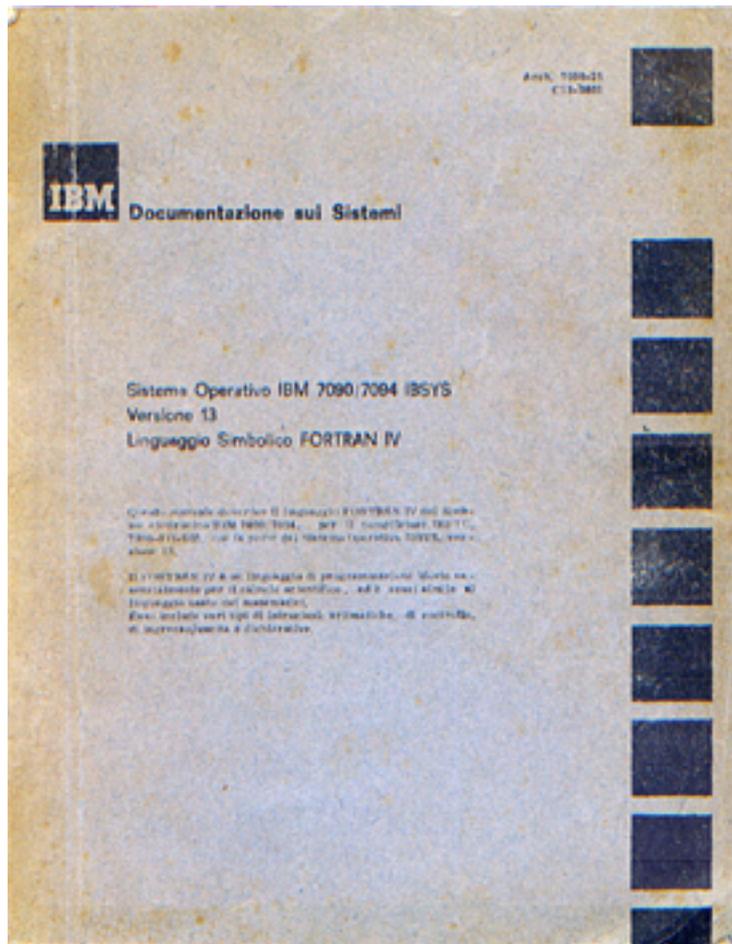


Estratto dalla lettera di ringraziamento di Grossi



Il Tau2

## La testimonianza di Leonello Tarabella allievo di Pietro Grossi



Il manuale del linguaggio di programmazione FORTRAN IV

Quando mi sono iscritto all'Università, a Pisa c'era il "68". Chi lo ha vissuto sa cosa voglio dire. Alla Facoltà di Fisica in Piazza Torricelli, ai piani superiori c'era la CEP che ancora funzionava. Ne ero attratto, ma i professori mi dicevano che stava per essere dismessa e che, se ero interessato al calcolo elettronico, dovevo seguire un corso FORTRAN al C.N.U.C.E., lì dietro in via Santa Maria. Lo feci e, quando l'anno dopo fu istituito il Corso di Laurea in Scienze dell'Informazione, non ebbi esitazioni o dubbi a cambiare facoltà vedendomi tra l'altro convalidati gli esami già sostenuti a Fisica.

All'epoca sembrava tutto normale ma, a ripensarci ora anche confrontandomi con gli amici e colleghi di quei tempi, c'era a Pisa la più alta concentrazione di competenze e macchine d'avanguardia sull'informatica come non ce n'erano di uguali in tutta Italia: il CNUCE, l'IEI, il Centro Scientifico dell'IBM, la Selenia. Qualcosa come 350-400 persone esperte delle varie tematiche del software e dell'hardware che facevano di quei 200 metri di via Santa Maria una piccola Silicon Valley.

Qualche anno dopo il Corso di Laurea sarebbe diventata Facoltà di Informatica, con sede prima in Corso Italia e poi al Polo Fibonacci. Ma in quei primi anni '70 le lezioni di Scienze dell'Informazione si

svolgevano in aule allestite in alcune stanze dell'IEI e nell'aula grande costruita appositamente nel cortile comune tra IEI e CNUCE tra i numeri civici 36 e 46 di via Santa Maria. Cortile che, ci veniva detto, era quello dell'ex-convento dei Salesiani.

Le esercitazioni, che consistevano nella scrittura di programmi in linguaggio Fortran, Assembler, PL1, più o meno previste in tutti gli esami del Corso, venivano fatte utilizzando il calcolatore IBM7090 del CNUCE: inizialmente usavamo le schede perforate ed in seguito, con l'installazione dei calcolatori della serie 360/370, i terminali scriventi o video.

E così non era difficile imbattersi nel Maestro Grossi che faceva le sue sperimentazioni musicali con l'onda quadra del DCOMP; poi venni a sapere che all'IEI stavano costruendo un'apparecchiatura apposta per la Computer Music.

La mia preparazione accademica è quella di informatico, ma da sempre ho respirato musica: il mio babbo suonava la fisarmonica e la casa era frequentata da suonatori di ogni tipo. A leggere la musica ho imparato sul campo dagli spartiti "in Do" delle canzoni che riportavano la melodia e gli accordi in sigla. Più grandicello ho studiato sul Pasquale Bona e con l'aiuto di amici studenti di Conservatorio ho appreso i rudimenti della tecnica pianistica impa-

rando ad eseguire alla buona alcuni preludi e fughe del Clavicembalo ben Temperato. Non mi importava la qualità dell'esecuzione ma era bello immergersi nel fascino di quegli intrecci contrappuntistici. Poi ci sono stati i Beatles e poi il jazz: Brubeck, Desmond, Monk, Garner, Montgomery, Mingus, Dolphy, Coltrane... e lui: Charlie Parker, che mi fece innamorare del sax-alto. Perciò nella mia adolescenza la musica per me era quella delle 3B: Bach, Beatles e Bird.

Andavo anche a suonare nelle orchestre da ballo (a volte la chitarra basso a volte il sax) ed ero incuriosito molto dalle tastiere elettroniche tipo Farfisa ed Elka. C'era un tastierista che aveva anche un Sintetizzatore HARP: una meraviglia!! ma la terminologia presente sul pannello di controllo e nel manuale era misteriosa ed il modo di usarlo altrettanto complicato. Non c'era cultura relativa alla fisica acustica e sui concetti come frequenza, decibel, rumore bianco, filtraggio, ecc... si andava "a naso" anzi "a orecchio".

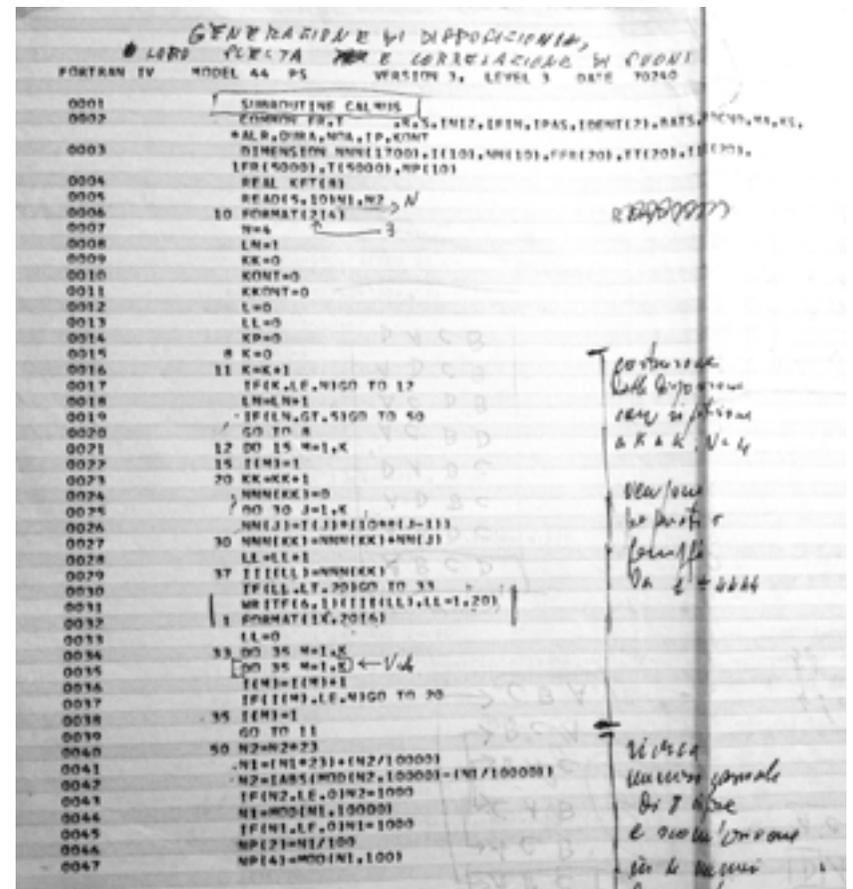
Dopo la laurea ed il servizio militare, nell'estate del 1975 ci fu l'episodio che avrebbe determinato la mia vita futura. Io sono nato e cresciuto a Forte dei Marmi e quello era il paese dove Pietro Grossi trascorreva le sue vacanze estive. Anche lì non era difficile incontrarlo ed un giorno mi fermò chiedendomi, visto l'interesse che avevo mostrato verso la sua attività negli anni di studio, se ero interessato ora a collaborare con lui: in pantaloncini corti e ciabatte infradito mi era stata offerta per strada l'occasione più bella della mia vita. Come un apprendista delle botteghe d'arte del Cinquecento fiorentino, andavo "a bottega" a casa del Maestro che mi illustrava la logica di funzionamento del TAUMUS, il software di composizione per il TAU2.

Il mio compito era quello di intervenire sul programma per ottimizzare ed estendere le funzionalità del TAUMUS (sviluppato in linguaggio FORTRAN) via via che lui lo progettava. Prima con contratti a termine, poi con una Borsa di Studio CNR e più avanti con l'assunzione nella posizione di Ricercatore con la dizione specifica della Musica Informatica, entrai a fare parte di quella che era la Divisione Musicologica del CNUCE. In quegli anni '70 la Divisione Musicologica era formata da 4 persone, oltre a Grossi: Silvio Farese, il sistemista del gruppo, Mario Milani, fisico e violinista e Tommaso Bolognesi, come me borsista CNR.

Svolgevamo corsi di utilizzo del TAU-MUS-TAU2 a scolaresche dell'area pisana e a studenti di Conservatorio, ma fornivamo anche assistenza a compositori di musica contemporanea. Ricordo di avere passato parte dell'estate '77 con il Maestro Collina della RAI di Milano per preparare un loro originale intervento all'Autunno Musicale Comasco di quell'anno.

Poi di quel gruppo rimasi solo io: Milani e Farese vennero a mancare prematuramente e Bolognesi migrò presto verso altri argomenti che la ricerca informatica prospettava. E perciò negli anni '80 come compagno di lavoro sull'informatica musicale rimase solo Graziano Bertini: lui all'IEI che si occupava del TAU2 ed io al CNUCE che mi occupavo del TAUMUS.

Ma gli anni '80 erano anche quelli della allora cosiddetta "micro-elettronica" che portò alla realizzazione dei personal computer, sempre più potenti, sempre più piccoli e sempre meno costosi. Con un Commodore64 realizzai una stazione mobile molto flessibile con la quale Grossi poteva fare esperienze remote di utilizzo del TAUMUS senza la costosa e macchinosa



Debug manuale a lapis di un listato FORTRAN su tabulato

operazione che coinvolgeva SIP e RAI in quell'attività che lui chiamava "telematica musicale": con il solo uso di un normale telefono ed un modem, il Commodore funzionava sia da terminale remoto dell'IBM370 del CNUCE sia da sintetizzatore locale utilizzando il SID interno, un chip che era l'emulazione digitale di un sintetizzatore analogico in grado di generare 3 voci simultanee. Era una specie di "versione ridotta" del TAU2, abbastanza significati-

va tuttavia per dimostrare le funzionalità compositive del TAUMUS.

In quegli anni ebbi l'occasione di trascorrere periodi studio presso l'Electronic Music Studio del MIT-Media Lab di Boston e presso il CCRMA (Center for Computer Research in Musical Acoustics) della Stanford University in California, dove mi specializzai sulle tecniche digitali di sound processing. Frequentai in più occasioni anche l'IRCAM di Parigi grazie ad un'amicizia

con Peppino di Giugno che all'epoca realizzava le macchine per Pier Boulez. Erano quelli i centri di eccellenza della Computer Music a livello mondiale dove ebbi l'occasione di conoscere personalità come Max Mathews, John Chowning, Barry Vercoe, Curtis Road ed altri.

Lo scenario dell'informatica stava subendo una radicale trasformazione e sul finire degli anni '80 il TAU2 cominciava a mostrava i suoi "acciacchi". Grossi, che per 20 anni aveva pendolato tra Firenze e Pisa, indirizzò le sue energie verso il Conservatorio di Firenze dove tra l'altro istituì il primo corso di Informatica Musicale.

Poiché avevo frequentato alcune edizioni della scuola estiva di Siena Jazz e dei Jazz Clinics di Perugia imparando in modo soddisfacente la tecnica dell'improvvisazione, stimolato dai nuovi trend che venivano proposti in Conferenze di Computer Music (alle quali partecipavo con regolarità) e sulle riviste specializzate, cominciai ad accarezzare l'idea di utilizzare il computer in maniera interattiva con caratteristiche di improvvisazione musicale.

Si trattava di estendere i concetti della composizione algoritmica di Grossi verso la possibilità di "suonare algoritmi compositivi" attraverso l'intervento estemporaneo su valori parametrici e sui controlli di flusso di programmi opportunamente predisposti. L'argomento era così interessante ed innovativo che io e Bertini organizzammo per il giugno 1991 un convegno dal titolo "Workshop on man-machine interaction in live performance".

Al workshop, che ebbe luogo alla Scuola Sant'Anna dove lavoravano amici e colleghi che si occupavano di robotica, parteciparono ricercatori/musicisti provenienti da Francia, Inghilterra, Canada e Stati Uni-

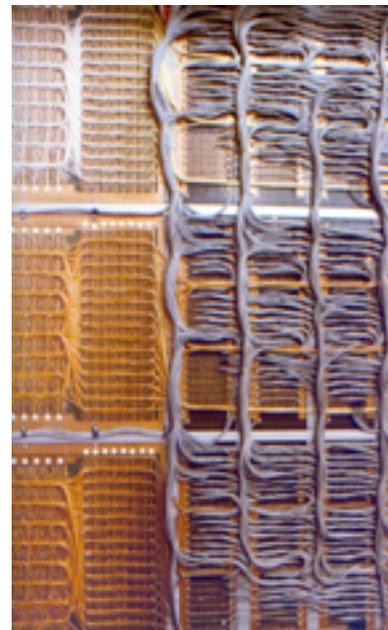
ti: un successo, un momento importante che mise in evidenza l'interesse intorno a questo nuovo corso della Computer Music. Grazie ai contatti che avevamo stabilito con il laboratorio del Sant'Anna, imparammo a conoscere ed usare componenti elettronici tipici del settore della sensoristica robotica.

I laboratori di elettronica dell'IEI erano ancora attivi e fu così possibile realizzare alcune nuove tipologie di interfacce in grado di rilevare la gestualità delle mani di un performer e tradurla in flussi di dati atti al controllo interattivo di brani musicali basati sulla modalità della composizione algoritmica.

Tra quelli che abbiamo realizzato, due in particolare si sono rivelati molto efficienti e adatti allo scopo: il "Palm Driver" e lo "ScreenDriver". Il primo è un dispositivo elettronico basato sulla tecnologia dei raggi infrarossi in grado di rilevare informazioni relative all'altezza, posizione e rotazione



La filatura del retro del Tau2 in wire-wrap



delle mani in modalità "touchless". Il secondo è un'applicazione touchless basata sulla elaborazione in tempo reale del movimento delle mani riprese dalla webcam del computer: un video proiettore crea uno scenario di fondo dove il performer posiziona e muove entrambe le mani che, opportunamente digitalizzate, vengono elaborate in tempo reale per estrarre informazioni relative alla loro forma e posizione sullo schermo.

A quel punto, adeguatamente "equipaggiato" di conoscenza musicale ed informatica, cominciai a propormi io stesso come compositore e performer, anche allo scopo di testare e migliorare le potenzialità espressive di quei sistemi.

Gli anni '90 sono stati molto produttivi per me e Graziano: abbiamo scritto il libro "Informatica e Musica", edito dalla Jackson

La console del Tau2



Libri, che usavo come testo per un Corso che mi era stato proposto di tenere alla Facoltà di Informatica dell'Università di Pisa. Un corso molto seguito che ci diede modo di far svolgere decine di Tesi di Laurea da parte di studenti di Informatica e di Ingegneria.

Ho tenuto quel corso fino al 2010 e, con l'esperienza didattica maturata, ho poi scritto una versione aggiornata del libro dal titolo "Musica Informatica" edito da Apogeo/Maggioli.

Durante gli anni '90, sulla base di una collaborazione che avevo con musicisti e ricercatori (Esther Lamneck e Robert Rowe) del Dipartimento di Musica della NewYork University, organizzammo a Pisa dei seminari estivi che prevedevano anche un concerto finale di musica informatica al quale partecipavamo anche noi docenti. Il primo concerto fu nel 1994 e ebbe luogo nella chiesa di San Paolo all'Orto; negli anni successivi i concerti furono inclusi nel programma della manifestazione "Strada Facendo" che l'Assessorato alla Cultura del Comune organizzava nel Cortile della Sapienza.

Sul finire del decennio il compianto Monsignor Silvano Buralassi ci propose una ricerca sull'acustica interna del Battistero che io e Bertini conducemmo prima con le nostre competenze ed apparecchiature e successivamente in maniera più accurata insieme a nostri colleghi CNR della Fondazione Cini di Venezia, esperti di acustica dei Monumenti Sacri.

Come resistere alla tentazione di utilizzare quelle straordinarie peculiarità acustiche del Battistero? E così, grazie alla collaborazione pregressa con il Comune ed ai permessi dell'Opera della Primaziale, durante le manifestazioni del Giugno Pisano

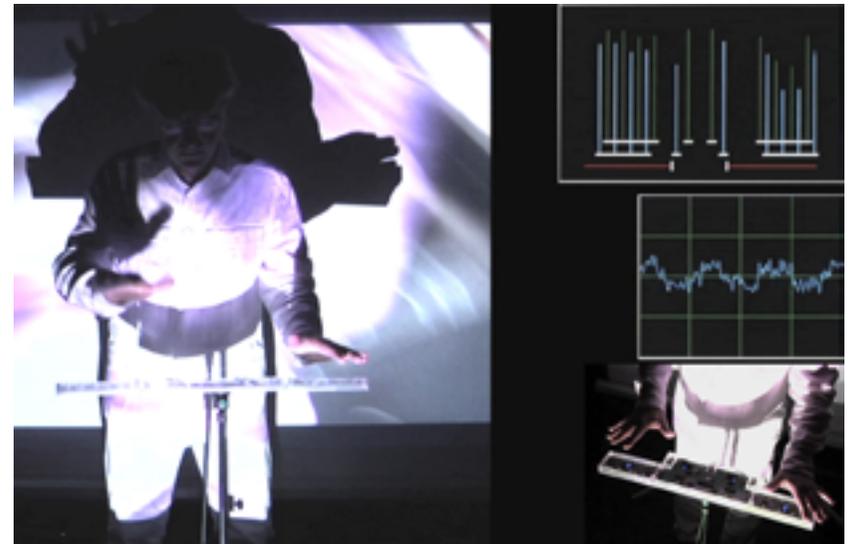
del 2006 potemmo realizzare un concerto di musica elettronica che considerava il Battistero come "strumento musicale"; il concerto "per battistero e computer" venne poi riproposto nel giugno 2016.

Nel frattempo era entrato a far parte della nostra attività Massimo Magrini che con noi aveva svolto la sua tesi di laurea in informatica. Massimo, esperto anche di elettronica e bravo musicista, aveva contribuito fortemente sia alla realizzazione dei sistemi di rilevamento gestuale sia alla ricerca acustica del Battistero.

In seguito Massimo avrebbe poi organizzato, con il patrocinio del Comune e dell'Università, molte edizioni della manifestazione "Elettronica alla Spina" dove sono stati invitati esponenti del panorama internazionale della musica elettronica contemporanea.

Nel 2010, con l'intento di esportare la mia esperienza artistico/tecnologica anche nell'ambito della musica pop d'avanguardia, insieme ad Alessandro Baris, poliedrico musicista italo/americano ben noto nell'ambiente musicale pisano anche per le sue sonorizzazioni del cinema muto, abbiamo dato vita al progetto "Collisions" come incontro tra il suono primordiale delle percussioni e quello della tecnologia avanzata. Molte sono state le nostre partecipazioni a eventi pisani e a festival di rilievo nazionale ed internazionale; siamo stati invitati anche ad alcune edizioni di TEDx la più recente delle quali quella di Lussemburgo nell'ottobre 2018.

A Massimo Magrini, io e Bertini, pensionati CNR ma tuttora attivi nel settore, abbiamo passato il testimone di questa avventura iniziata pionieristicamente da Pietro Grossi mezzo secolo fa e da noi portata avanti con entusiasmo e continuità.



Performance di Tarabella con i sistemi di rilevamento gestuale PalmDriver (sopra) e ScreenDriver (sotto a destra)

Oscilloscopio circolare sulla cupola interna del Battistero durante il concerto Sideris Vox del giugno 2016





Articolo pubblicato sul quotidiano  
La Stampa del 2 gennaio 1973

Tra l'arte e la tecnica esiste un punto d'incontro?

# Giochi musicali con il calcolatore

Gli studi al Centro nazionale di calcolo elettronico a Pisa - Come l'elaboratore emette suoni - Possibilità di terminali lontani - Facilitati i compiti del compositore e dell'esecutore

Al Circolo della stampa milanese, il maestro Pietro Grossi, un violoncellista che si è convertito al calcolatore elettronico come a un nuovo strumento musicale, ha dato dimostrazioni sulla versatilità di questo nel produrre o rielaborare musica. Questi studi egli conduce, insieme con collaboratori, presso il Centro nazionale universitario di calcolo elettronico di Pisa, dove ha sede anche un Centro scientifico Ibm, e con l'aiuto di uno speciale programma (Demp, cioè Digital Computer Music Program).

Tanto per dissipare possibili dubbi, giova notare che studi paralleli si stanno svolgendo in altri centri d'Europa e d'America, mentre il fatto che un calcolatore possa dare musica non è difficile a intendersi. Nella macchina corrono circuiti elettrici: è in alcuni di essi si possono far passare correnti dello stesso tipo di quelle che giungono al telefono o a un altoparlante di un apparecchio radio. Queste correnti possono, anzi, viaggiare molto lontano e, per esempio, tramite un apposito terminale, collocato in una sala del Palazzo Serbelloni di Milano, noi si ascolta la musica prodotta dall'elaboratore che si trova a Pisa. Né è fuori luogo aggiungere che i tentativi per trarre musica da un elaboratore durano da anni. Lo strumento — ai pari di altri — ha sue limitazioni: nel circuito elettrico che alimenta l'altoparlante corre un'onda a denti quadrati, mentre forse l'orecchio gradisce meglio un andamento non spigoloso; lo strumento dà un suo timbro freddo, che peraltro il maestro Grossi indica come scongiante etica a quello di un contrabbasso nelle note gravi, di un clarinetto in quelle medie, di un oboe in quelle acute. Altrimenti il meccanico viene fuori nell'esecuzione: ma appunto si sta studiando di modificare sia la rigidità del ri-



Il maestro Pietro Grossi mentre esegue un brano musicale su un Sistema 360-Ibm

mo sia il timbro dello strumento.

Il summenzionato maestro, che è entusiasta delle possibilità del calcolatore come fonte musicale, ha elencato alcuni benefici che ne vengono proprio all'esercizio della musica. Anzitutto risulta cambiata la configurazione dell'esecutore, il quale, con gli altri strumenti, deve spendere tutta una giovinezza, quasi tutta una vita, per domare (o di rado vi riesce be-

ne) con un'appropriata manualità o che altro lo strumento stesso. Qui basta che egli impari a schiacciare certi tasti, che comandano al calcolatore certe prestazioni. In più, egli vede assai dilatato il campo delle possibilità. Troppo diremmo: col vischio che tutto diventi un puro gioco di abilità; il che vale ai tempi per il compositore. Non c'è praticamente limite al numero delle note che il musicista ha a sua disposizione.

Egli inoltre può dettare allo strumento il ritmo che vuole, anche rapidissimo, di là di ogni virtuosità di solista; può comandare che un certo pezzo venga eseguito a partire dal fondo, per risalire al principio; può dilatare o comprimere le pause; comandare che una nota ogni cinque (o ogni tre o quattro se voglia) venga omessa, oppure suonata un'ottava più alta; può dettare una musica « casuale » scaturita da numeri

scelti con apparate capriccio, come se uscissero dal sacchetto del gioco della tombola; può comandare i crescendo e i diminuendo e così via.

Certamente può darsi che, giocherellando a questo modo, ne vengano fuori effetti musicali inediti: e così incrociando l'una all'altra, secondo un qualsiasi criterio, due monodie. Il calcolatore sa fare tutto questo: e sta poi al musicista o all'ascoltatore giudicare se il prodotto sia musica, oppure sia l'imitazione involontaria di rumori o che altro.

La scelta fra troppe possibilità (dicimoci subito, con una certa temerarietà da parte nostra che musicisti non siamo) ci sembra un dubbio aumento di ricchezza artistica. Infatti, se pensiamo all'unicità, alla necessità interiore delle migliori creazioni musicali, al moto dell'animo che le fa sporgere o le detta, tali che durino poi nei secoli, appunto se pensiamo a un Mozart, a un Vivaldi, o anche — perché no? — a un ispirato manestrello, ebbene questa musicalità del calcolatore ci sembra adatta più ad arrangiamenti e a rimpasticcimenti che a quel che — in ogni campo — è la creazione artistica. Ma c'è pure un amore per la musica in questi tentativi di dilatarla tanto; ed è probabile che questi tentativi siano fruttuosi di risultati, la cui validità è destinata ad emergere col tempo; quando ne siano decantati gli entusiasmi per le puramente meccaniche possibilità tecniche.

**Didimo**

## Architettura e funzionalità del Tau2

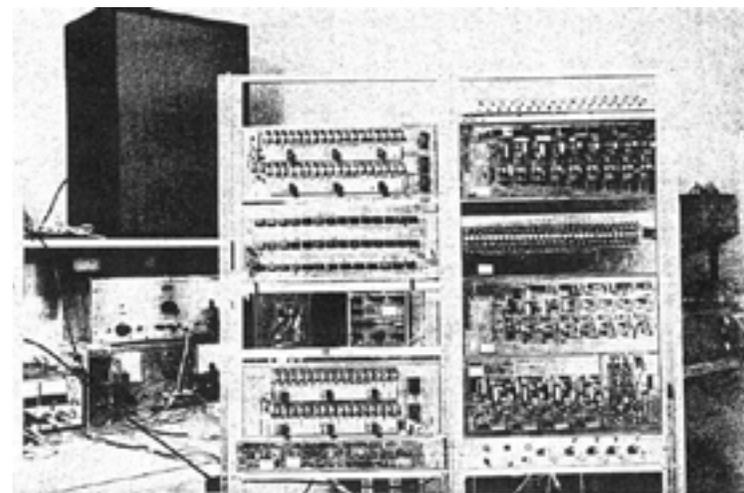


Le ricerche all'IEI: realizzazione del TAU1

Presso l'IEI l'invito ad occuparsi delle problematiche relative alla sintesi di suoni tramite calcolatore fu accolto dal Prof. F. Denoth, che aveva maturato competenze di tecniche digitali-analogiche, nell'ambito di ricerche d'avanguardia nel settore bio-

### Il TAU1

Nel TAU1 i segnali sinusoidali di partenza erano ottenuti con dei VCO (Voltage Controlled Oscillator) a onda quadra, seguiti da divisori e da filtri analogici adattivi; le regolazioni di ampiezza erano ottenute con dei VCA (Voltage Controlled Amplifier) a controllo digitale. I circuiti erano realizzati in parte con tecnologia analogica e in parte con circuiti integrati DTL (Diode Transistor Logic). Fu costruito un prototipo da laboratorio comprendente una parte circuitale analogica per la sintesi di due voci a 4 armoniche, e una parte digitale in grado di fornire dinamicamente i parametri Frequenza e Durata delle note.



Il TAU1.

La parte digitale, da me progettata (Bertini, 1974), gestiva dei buffer per contenere i parametri dei suoni e un lettore fotoelettrico (di quelli dismessi dalla CEP) che estraeva i dati con le informazioni del brano da eseguire da un nastro di carta, prima preparato al CNUCE dai collaboratori di Grossi.

Era ancora una modalità in tempo differito, sebbene provvisoria; inoltre, a causa del rumore emesso dalla meccanica lettore di nastro, l'ascolto del brano doveva essere fatto in un secondo momento, registrando prima i suoni su nastro magnetico analogico. Alcuni brani eseguiti col TAU1 sono stati inseriti nel disco LP dimostrativo "Computer Music", Ed. Musicali Fonos (1972), comprendente anche dei pezzi eseguiti col DCMP e altri col sistema IBM 1800 e S/7 con convertitore D/A.

medico<sup>5</sup>. La direzione seguita fu quella del metodo ibrido, con la scelta di progettare e realizzare uno speciale terminale audio polifonico e politimbrico e tale anche da potersi collegare come una qualunque periferica ai calcolatori IBM, possibilmente non interferendo col normale lavoro dei sistemi *time-sharing*.

Il primo passo fu quello di sperimentare e valutare alcune soluzioni sulle tecniche da adottare per la sintesi. Il lavoro fu svolto inizialmente con una tesi di laurea in Fisica (Chimenti, Denoth, 1976) e in seguito con un finanziamento condiviso con altri gruppi di ricerca, nell'ambito di un Progetto di Ricerca del CNR sul tema "Analisi e sintesi della voce e dei suoni".

Fra le varie tecniche possibili Denoth scelse la sintesi additiva a componenti sinusoidali, una scelta coraggiosa all'epoca, per la difficoltà della sua implementazione (risultata in genere onerosa fino a pochi anni fa anche con i moderni DSP): così fu realizzato un primo prototipo da laboratorio, il TAU1.

#### Criteria di progetto, architettura e funzionamento del TAU2

Con il TAU1 fu possibile compiere le necessarie valutazioni per la definizione degli intervalli di quantizzazione e dei campi di validità dei parametri: ad es. si potevano variare dinamicamente le frequenze (ottenendo dei glissando), le regolazioni di ampiezza delle note, le durate minime da assegnare al metronomo e valutarne gli effetti; le timbriche erano prefissate con degli *switch* manuali.

Ci si rese conto a quel punto della complessità dei problemi inerenti alla *computer music* e della sua natura ampiamente multidisciplinare che vede coinvolte: elettronica, elaborazione segnali, programmazione dei calcolatori, informatica, ovviamente, musica (in molti dei suoi aspetti), e inoltre elettroacustica, psicoacustica ecc. Quest'ultima disciplina studia le caratteristiche della percezione uditiva per stimare le soglie differenziali rispetto alle variazioni delle grandezze fisiche (frequenza, intensità, durate e timbro dei suoni) che intervengono nella determinazione dei livelli di quantizzazione dei parametri associati. L'obiettivo è infatti quello di simulare le variazioni continue di tali grandezze, come si verificano in realtà, adoperando il minor numero di livelli di definizione dei parametri numerici, in modo da far gestire al calcolatore la quantità di dati più piccola possibile.

Oltre alle considerazioni fin qui esposte e alle sperimentazioni già effettuate col TAU1, per definire le caratteristiche di progetto del TAU2 furono considerate altre esigenze, di cui riportiamo le principali:

- Esigenze acustico-musicali: possibilità di emissione di un numero sufficiente di note e su più canali, tale da eseguire brani di una certa complessità strutturale, senza ricorrere a tecniche di *play-back*;

<sup>5</sup> Dopo il successo ottenuto nella realizzazione di un originale *pacemaker* cardiaco (brevettato) e per meglio contribuire ad importanti ricerche per l'impiego delle tecniche numeriche per l'analisi di segnali elettromiografici e cardiaci, all'IEI si era infatti costituita negli anni 1967/68 una sezione di ricerca per applicazioni dell'informatica nel settore biomedico, diretta da Franco Denoth.

- Esigenze funzionali: operare in tempo reale con interfacciamento ad un sistema in *time-sharing* con il minimo impegno di calcolo per il sistema;
- Esigenze costruttive del terminale: realizzazione con dimensioni, tempi e costi ragionevoli;
- Esigenze di facilità di programmazione del calcolatore: interfaccia intuitiva verso il sistema con facilità di lavoro anche per persone non particolarmente esperte.

Il problema era quello non banale di fissare quantitativamente i dati di specifica del terminale con il miglior bilanciamento fra tutte queste esigenze. Dopo aver valutato altre soluzioni sulle tecniche da adottare per la generazione dei segnali ed aver eseguito prove su nuovi componenti considerati per il progetto del TAU2 (non essendo del tutto soddisfacenti le soluzioni adottate sul TAU1), si arrivò a definire i campi di variabilità dei parametri ed in generale tutte le altre specifiche seguite per il progetto e la realizzazione effettiva del terminale audio (Bertini, Denoth, 1975).

L'organizzazione del sistema è mostrata in Fig. 1. In breve si notano:

- il TAU2, composto da due parti, anche fisicamente distinte:
  - a) unità digitale, che riceve i dati tramite il collegamento col sistema IBM, li memorizza in un buffer circolare, li interpreta e li fornisce nel giusto formato e al tempo debito alla parte analogica;
  - b) unità audio, che genera i segnali elementari, li modula in ampiezza e li combina producendo segnali musicali complessi, in base ai parametri presenti ai suoi ingressi;
- il sistema IBM con tutte le sue componenti hw e sw, che ospita il programma TAUMUS, l'archivio di brani musicali, e le procedure di elaborazione dei parametri e di trasmissione dati verso la connessione col TAU2;
- il terminale (telescrivente+video) vicino al TAU2, con cui l'utente dialoga con l'elaboratore, attiva il TAUMUS, introduce dati e programmi, fa eseguire le elaborazioni e comanda l'esecuzione sul TAU2.

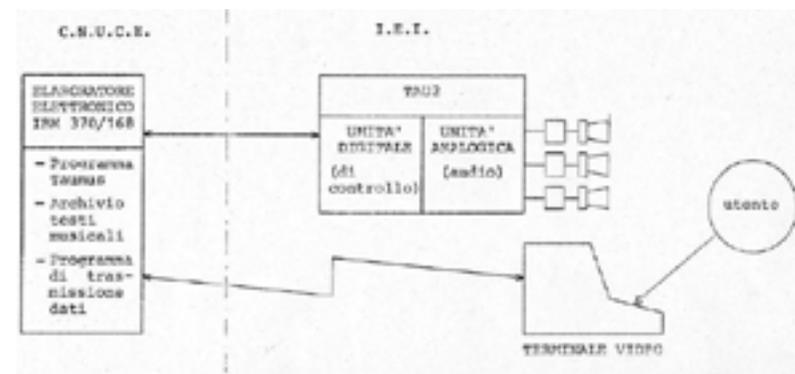


Figura 1. Architettura e risorse del sistema TAU2-TAUMUS.

## Principio di funzionamento e caratteristiche musicali del TAU2

I segnali audio sono ottenuti, in linea di principio, con un processo di sintesi additiva armonica a spettro variabile, programmabile a 'breve intervalli di tempo' (dell'ordine di alcuni ms, vedere in Appendice i dettagli sul modello di sintesi adottato). I segnali di partenza sono sinusoidali con ampiezze fisse: il segnale a frequenza più bassa, o fondamentale, identifica una 'voce' (può essere una nota della scala ben temperata od un suono intermedio qualsiasi fra quelli disponibili), mentre l'evoluzione delle ampiezze delle armoniche associate, regolabili singolarmente e dinamicamente da appositi VCA (Voltage Controlled Amplifier) contribuisce a caratterizzare il timbro del suono.

Il TAU2 dispone di un complesso di generatori con una gamma di 324 segnali sinusoidali con frequenze fisse molto stabili (vedi oltre per i particolari realizzativi) comprese fra 32,7 Hz e 16.425,1 Hz, con un rapporto intervallare di 1/3 di semitono, sufficientemente fine per simulare una scala quasi continua.

L'unità audio comprende tre canali uguali tra loro. Nella Fig. 2 sono indicate le parti principali di un canale; il banco dei generatori è unico e fornisce i segnali sinusoidali in modo continuativo a tutti e tre i canali. Mantenendo in ingresso il codice numerico  $F_j$  relativo ad una voce ( $1 \leq F_j \leq 255$ ), una particolare struttura hw costituita da migliaia di interruttori analogici a comando digitale integrati (rete di selezione e miscelazione) individua dal banco dei generatori e commuta sulla prima uscita (barra B1) la corrispondente frequenza fondamentale  $f_0(F_j)$ , automaticamente anche sulle altre sei uscite B2...B7 le armoniche  $2f_0(F_j)...7f_0(F_j)$  relative a quella fondamentale.

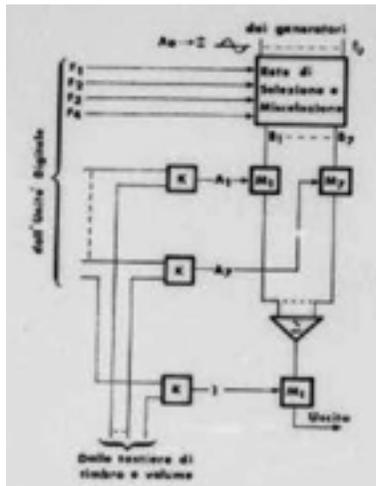


Figura 2. Struttura di un canale audio. Rete di selezione e miscelazione frequenze, B1-B7 Barre di somma delle armoniche, Mi =VCA circuiti regolatori delle ampiezze delle armoniche e dell'intensità di uscita, K = Selettori.

La rete di selezione può gestire contemporaneamente fino a quattro voci distinte e per ciascuna di esse seleziona dal banco le relative armoniche, facendo confluire i segnali sulle rispettive barre: quindi su ogni barra  $B_n$  vi è un segnale che è formato dalla somma al più di quattro armoniche. I segnali in uscita dalle barre prima di confluire nel sommatore di canale sono regolati in ampiezza tra otto livelli (27 dB di dinamica) per conferire la timbrica di canale (blocchetti  $M_1...M_7$ ); a sua volta il segnale d'uscita di quel canale è controllato in volume con 16 possibili livelli (29 dB di dinamica, blocchetto  $M_1$ ). Si fa notare che le quattro voci hanno la stessa timbrica, cioè gli stessi rapporti di ampiezza tra le armoniche dello stesso ordine: in pratica è come se fossero quattro strumenti della stessa famiglia.

I parametri che controllano i suoni sono specificabili per ciascun canale e sono costituiti da codici di frequenza  $F_{j1}...F_{j4}$  relativi alle voci da emettere, altri insiemi di valori  $A_1...A_n$  per le ampiezze delle armoniche, I (intensità) per il volume di canale ed il parametro D per la durata.

La durata dei suoni in esecuzione (t in ms), corrispondenti ad un dato set di parametri che rimangono invariati, è definita dalla relazione:

$$dt = D \times T, \text{ dove:}$$

D = è un parametro definibile via sw dal TAUMUS e può assumere valori interi da 1 fino a 31;

T = tempo base (o metronomo) è prefissato in hw sul TAU2 e può essere regolato manualmente tra 1 ms e 999 ms, normalmente fissato a 10 ms (1/100 di sec.).

Tramite il pannello di controllo è possibile fare delle prove di timbrica variando manualmente i livelli  $A_i$  ed I per ogni canale; ciò può essere utile per la taratura dei livelli o per altre prove di lavoro.

Il segnale d'uscita  $U(t)$  di un canale è rappresentabile con la seguente espressione:

$$(6) \quad U(t) = g(I) \sum_{n=1}^7 g(A_n) \sum_{j=1}^4 A_j \sin(2\pi n f(F_j) t + \varphi)$$

dove:

$g$  = funzioni di trasferimento dei modulatori

$A_j$  = ampiezza dei segnali di ingresso

$f(F_j)$  = frequenza dei segnali di ingresso

$\varphi$  = fase dei segnali di ingresso.

$U(t)$  è quindi un segnale periodico definito, all'interno di ogni intervallo ( $dt = D \times T$ ), dai parametri  $F_j$ ,  $A_i$  e I ed ha una dinamica notevole (da pochi millivolt ad alcuni volt); la fase  $\varphi$  dei segnali è casuale, cioè non programmabile e questo non ha causato inconvenienti, rispetto ai risultati fonici aspettati. Un filtraggio hardware interviene all'inizio di ogni intervallo di definizione per ridurre i *click* al cambio dei parametri.

In tal senso particolari accorgimenti sui valori da assegnare ai parametri devono essere adottati, per evitare scarti eccessivi di ampiezza nei segnali prodotti, ad es. operando la scalatura graduale dei livelli. Un esempio di segnale ottenuto dal TAU2 è mostrato nel seguito.

#### Organizzazione dei dati

Ai parametri inviati dall'elaboratore al TAU2 per mezzo di una codifica binaria, sono aggregate anche altre informazioni necessarie alla loro identificazione e/o smistamento ai rispettivi canali. Venne in pratica definito un protocollo che prevedeva degli insiemi opportuni detti 'istruzioni musicali' a formato variabile (una specie di protocollo MIDI primitivo) riportate in Fig. 3, le cui principali sono: a) l'Istruzione Timbro, che contiene i parametri  $A_i$  relativi ai tre canali, b) l'Istruzione Suono, che raggruppa i valori delle frequenze ed altri campi di bit relativi al comando di circuiti per gli effetti speciali (vibrato, tremolo, riverbero) posti in uscita ad ogni canale audio. Il primo byte contiene il codice operativo (CO), mentre il campo IC (indirizzo canale) specifica il canale da attivare; MT sta per Modulo Timbro (con le ampiezze  $A_i$ ) e MS per Modulo Suono (con le quattro frequenze  $F_i$ , Intensità e ES effetti speciali) relativi ad ogni canale. I bit R sono di riserva per altri eventuali usi.

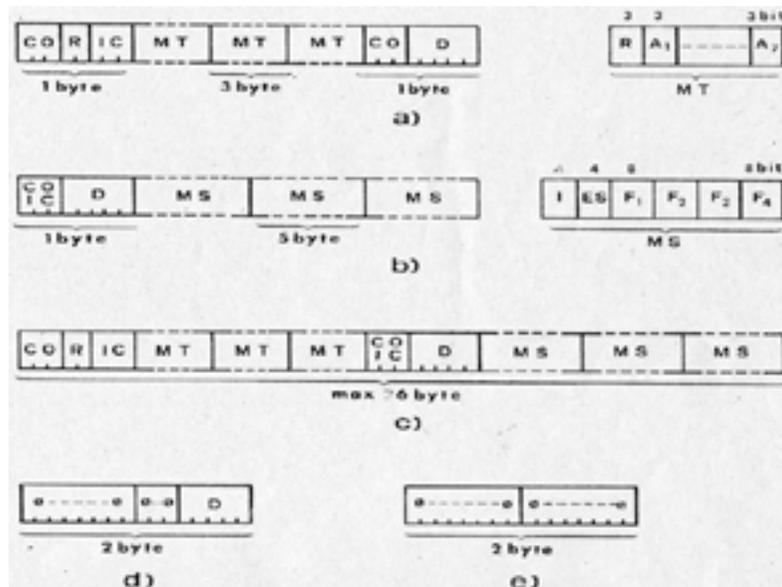


Figura 3 – Formato istruzioni: a) Timbro; b) Suono; c) a + b; d) Parametri Invarianti; e) Fine Brano.

Tutti i tipi di istruzioni contengono il parametro Durata, ad eccezione del Fine Brano. È possibile rallentare o accelerare il tempo di esecuzione del brano agendo su D tramite il programma TAUMUS, oppure agendo manualmente sul pannello del TAU2, per variazioni fini.

Lo spettro (quindi la forma d'onda) può essere regolato a livello di canale. Le combinazioni spettrali diverse sono  $2^{21}$  per canale e consentono una gamma timbrica notevole che può essere variata in sequenza durante lo stesso brano, consentendo una modulazione continua del timbro (*morphing*).

Sono quindi disponibili 12 voci contemporanee, suddivise in tre timbriche distinte, per un totale di:

4 voci x 7 armoniche x 3 canali = 84 segnali in uscita dal TAU2, fornendo una stereofonia più il canale centrale, per avere la possibilità di realizzare una efficace spazializzazione del suono.

#### Descrizione funzionale del TAU2

Lo schema funzionale a blocchi delle unità principali del TAU2 è riportato in Fig. 4. Non sono specificate alcune parti secondarie come gli alimentatori stabilizzati, gli amplificatori, i mixer ecc.

Il TAU2 è collegato al computer ospite, funzionante in *time sharing*, tramite un collegamento diretto parallelo, con 16 bit di informazione e alcuni segnali di controllo: la trasmissione avviene a circa 50 K doppi byte/sec, con blocchi di 1024 doppi byte. Nell'unità digitale si notano le interfacce di ingresso per gli adattamenti elettrici e per la sincronizzazione dei segnali di controllo della trasmissione. I blocchi di dati contenenti le istruzioni musicali vengono memorizzati *per byte* in una memoria tampone (buffer di 4 Kbyte), tramite opportune operazioni gestite dall'unità di controllo. A regime il controllo estrae i dati byte a byte dalla memoria, li interpreta e ricostruisce le istruzioni musicali ricompattandole nel giusto formato in registri intermedi di comando (Reg. Istruzioni Suono e Timbro). Trascorso il tempo associato ai suoni da emettere per una certa durata D, il controllo trasferisce in parallelo i nuovi parametri dal Reg. Istruz al Reg. di Uscita, sostituendoli a quelli scaduti e così via sino alla fine dell'esecuzione del brano.

Visto il tipo di funzioni da eseguire e le velocità richieste il controllo è basato su una struttura microprogrammata, usufruendo così dei vantaggi di una maggiore strutturazione del progetto e facilità di manutenzione, rispetto ad altre soluzioni. Le funzioni di controllo sono memorizzate in una speciale ROM (Read Only Memory) a componenti discreti ed implementate con programmazione di tipo 'orizzontale', per cui alcune parti operative (reti e registri) lavorano assieme con un certo grado di parallelismo (Maestrini, 1972). La procedura di lettura della memoria è eseguita in background mentre quella di scrittura dei dati è eseguita su interrupt per rispettare i vincoli del collegamento; il passaggio dei nuovi parametri viene eseguito al verificarsi dell'evento 'tempo scaduto' per l'istruzione attuale.

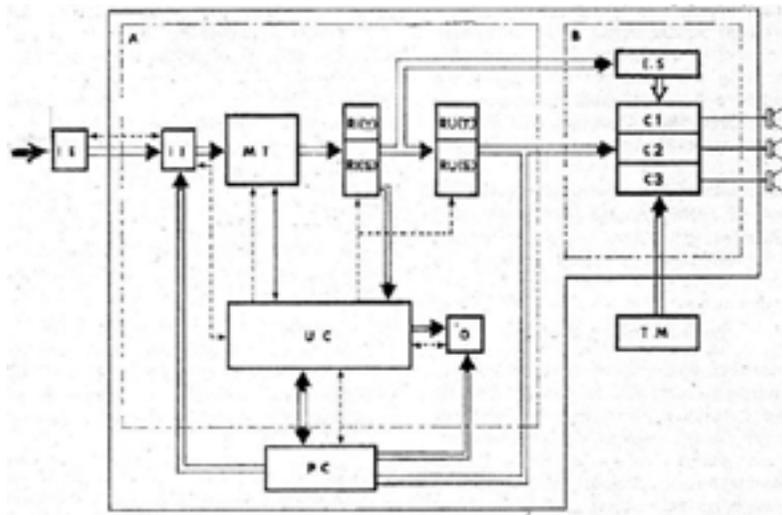
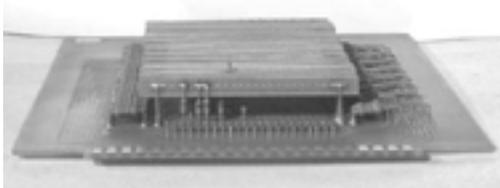


Figura 4 – Struttura del TAU2 A) Unità digitale: IE-Interfaccia di Ingresso, II-Interfaccia Interna, MT-Memoria Tampone UC-Controllo, RI-Registro Istruzioni, RU-Registro Uscita parametri, PC-Pannelli di Comando, O-Orologio del metronomo. B) Unità audio: C1,2,3-Canali Audio, ES-Effetti Speciali, TM-Tastiera Manuale.

La memoria è suddivisa in due blocchi: mentre in uno vengono letti i byte delle istruzioni da preparare per sostituire i suoni attuali, nell'altro è possibile inserire i byte relativi ai blocchi delle istruzioni in arrivo dal calcolatore per il seguito del brano e così via. I contatori degli indirizzi di lettura e scrittura in memoria sono realizzati a incremento unitario e organizzati per far funzionare la memoria come 'buffer circolare' (in modo simile alle moderne applicazioni sui microprocessori DSP). È stata sufficiente una limitata capacità di memoria (4 Kbyte) per compensare sia i ritardi dei tempi di risposta del canale alla richiesta del TAU2 (inviata quando c'è un blocco vuoto), che le differenti velocità di arrivo dei dati in ingresso e in uscita dall'unità digitale.



Una delle due schede della ROM, memoria a sola lettura, realizzata a diodi.

Quando l'utente ordina da terminale video l'elaborazione e l'esecuzione di un brano, il TAU2 è attivo in *stand by*, in grado di ricevere il primo blocco dal canale, spedito in modo automatico dal TAUMUS; dopodiché è l'unità di controllo che gestisce la trasmissione, inviando la richiesta di un nuovo blocco di dati, quando si è liberata una metà del buffer. Altri particolari in (Bertini, 1978).

Sulla base di esperienze di lavoro si era accertato che il tempo reale, senza interruzioni dei suoni per 'mancanza dati', era assicurato quasi sempre, ad eccezione delle ore centrali di alcune giornate in cui erano connessi al sistema *time sharing* oltre cento utenti o nel caso di aggravio di lavoro sul canale specifico cui era allacciato il TAU2.

Per quanto riguarda l'unità audio abbiamo già spiegato in dettaglio la struttura di un canale: in pratica è ripetuta per i tre canali in modo identico. Sono stati aggiunti successivamente dei circuiti con tecnologia mista analogica e digitale per gli effetti speciali (riverbero, vibrato, tremolo, coro) regolabili manualmente e via sw tramite alcuni bit dell'istruzione suono. Nel percorso del segnale, all'uscita di ogni canale, erano presenti inoltre diversi moduli circuitali di manipolazione analogica (non riportati nello schema): un mixer, che ha in ingresso le uscite degli altri canali e ingressi esterni; una sezione con preamplificatore-equalizzatore grafico a sette sottobande; un amplificatore finale integrato, con 50 watt di potenza d'uscita. Anche tutte queste parti, progettate e costruite appositamente all'IEL, erano alloggiare nel rack della parte digitale e poste al disotto dei pannelli di controllo della parte digitale.

### *Cenni alle funzioni principali del TAUMUS*

Progettato e realizzato al CNUCE principalmente da P. Grossi, il TAUMUS è un insieme di procedure per elaborare le strutture musicali di un brano, tramite una serie di comandi ad alto livello richiamati da consolle in ambiente VM (Virtual Machine) del sistema IBM. Via via che sono pronti i parametri dei suoni da emettere, il programma li converte nel formato adatto ad essere interpretato dal TAU2 e li invia al terminale con la temporizzazione gestita a livello fisico dal protocollo di comunicazione e in osservanza ai tempi dettati dall'esecuzione delle note. Dato il tipo di sintesi su cui è basato il TAU2 il lavoro richiesto al calcolatore è sempre molto inferiore alla durata dei suoni per cui, da questo punto di vista il funzionamento in tempo reale è sempre assicurato.

Composizione ed elaborazione vengono controllate dall'utente con varie possibilità di intervento, di cui diamo un breve cenno. Le funzioni principali del TAUMUS sono tre: *Composizione*, *Rielaborazione*, *Gestione della libreria*. Il programma usa due zone di lavoro: la prima è detta Area Operativa ed è la porzione di memoria dove vengono effettuate tutte le elaborazioni sulle strutture musicali e al termine delle quali i parametri dei brani vengono indirizzati ad una seconda area di archivio, detta Libreria e, a richiesta, al TAU2 per l'esecuzione.

La funzione di Composizione contiene varie opzioni: il comando Text per la trascrizione e l'introduzione da testi tradizionali (vedi Fig. 5), comandi Create con sottoambienti per la generazione guidata di brani, mediante un certo grado di controllo sulle composizioni, o produzione automatica di brani prelevati casualmente o con opzioni dall'archivio.

Le funzioni di Rielaborazione consentono di apportare modifiche al materiale presente dell'area operativa (comando Modify), specificando con varie opzioni le zone, le voci del brano e i parametri da trattare. Il comando Vary può operare tutta una serie di modifiche in modo automatico o casuale, e consente l'immediata esecuzione sul TAU2 senza limiti di tempo.



Figura 5 – Livelli di codifica del testo musicale: a) pentagramma, b) alla consolle; c) area di lavoro, d) codici inviati al TAU2.

Interessante è l'insieme di comandi per la Modulazione che operano delle variazioni su tutti i parametri ( $F_i$ ,  $A_n$ ,  $V_i$ ) di un dato brano, in base a 'modelli' richiamabili dall'archivio o definibili al momento. Per eseguire il comando, i modelli vengono posti in tabelle apposite dell'area operativa e influenzano direttamente i valori correnti, producendo delle modifiche al brano in uscita.

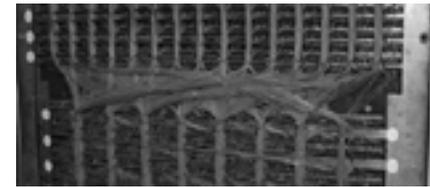
Oltre ad una serie di funzioni tipiche della gestione di archivi, i comandi della Libreria consentono di sfruttare in modo automatico tramite il comando Exec l'esecuzione di brani con tutte le altre funzioni previste. In questo modo si può simulare un utente che sceglie brani, li modifica e li fa eseguire in modo ininterrotto. Particolari delle funzioni del TAUMUS sono riportati in Grossi (1976).

### Tecnologia realizzativa e costruzione del TAU2

Come primo passo fu deciso di affrontare la progettazione e sperimentazione di alcuni nuovi dispositivi da impiegare nell'unità audio, ritenuta la parte più critica del sistema. Tale compito fu affidato a Chimenti, Ferrucci e Bertini coordinati dal Prof Denoth. La difficoltà maggiore incontrata fu quella della sistemazione pratica di alcu-

ni blocchi circuitali di grosse dimensioni, derivati dall'aver adottato soluzioni diverse da quelle del TAU1, per generare i segnali. Infatti per produrre le sinusoidi non si sono utilizzati i VCO, come nella maggior parte dei sintetizzatori analogici di quel tempo, per evitare l'instabilità in frequenza e nel nostro caso, anche per l'elevato numero di segnali da generare simultaneamente. Sono invece stati realizzati degli oscillatori ad onda quadra quarzati e mediante filtri risonanti LC (a induttore e condensatore) si sono ottenute le 326 frequenze perfettamente sinusoidali e stabili. Il banco dei generatori fu dislocato su 36 schede di dimensioni  $20 \times 40$  cm.

Per selezionare le frequenze specificate nelle istruzioni e farle confluire sulle uscite delle reti di selezione, furono usati i primi interruttori analogici CMOS integrati a controllo digitale disponibili in commercio (CD 4009 e CD 4010). Essendo necessarie centinaia di chip (contenenti ciascuno sei di tali interruttori) per canale, non era conveniente porli tutti su di un piano: fu adottato un compromesso realizzando tante piccole schede, con tre chip ciascuna, innestate in grosse piastre, però di dimensioni ragionevoli. Furono progettati anche nuovi regolatori d'ampiezza dei segnali con moltiplicatori integrati a controllo di tensione, con prestazioni migliorate rispetto a quelli adottati nel TAU1.

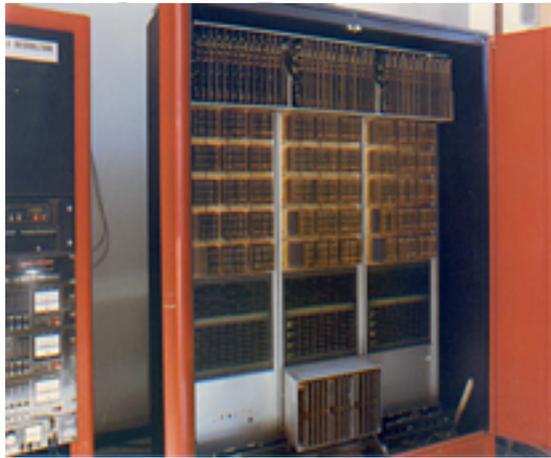


Parte di una matrice di selezione delle frequenze con cablaggio realizzato a *wire-wrap*.

Una volta dimensionato il progetto logico delle varie parti di una macchina, l'abilità tecnica nella realizzazione, stava nel riuscire a suddividere le parti circuitali di grosse dimensioni, in sottoblocchi più piccoli, tali da essere contenuti in schede uguali tra loro, realizzabili a circuiti stampati con piste di rame. Dove ciò non era possibile si ricorreva alla tecnica del *wire-wrap* (più scomoda e meno affidabile nel tempo), che consiste nell'unire i punti da connettere con fili sottili, usando con pazienza degli appositi attrezzi.

Con la tecnologia realizzativa disponibile all'epoca, il gruppo di tecnici proventi dell'IEI si prese l'impegno e la cura di realizzare tutte le parti nei propri laboratori (circuiti stampati, cablaggi, disegni, ecc.), non essendo facilmente disponibili all'esterno le competenze richieste.

Anche il progetto della parte digitale e di interfaccia con il sistema *time-sharing*, ritenuto un problema più tecnico e con minori difficoltà implementative, si rivelò invece complicato. La scelta del tipo di connessione con il sistema *time-sharing*, comportò diverse riunioni con esperti della IBM: le specifiche dal punto di vista elettrico e logico richieste dalle interfacce IBM erano piuttosto delicate e ciò obbligava a fare un lavoro meticoloso di analisi delle caratteristiche su vari manuali, per valutare le caratteristiche delle varie periferiche e dei collegamenti possibili (uso di linea seriale veloce con modem a 4800, oppure collegamenti con cavo diretto).



Vista dell'unità audio (lato componenti): in alto 36 schede degli oscillatori; al centro la matrici di selezione delle frequenze; in basso le schede delle timbriche; nel fondo del rack gli alimentatori stabilizzati.

Una circostanza che accelerò i lavori e influenzò in parte le successive soluzioni tecniche, fu il fatto che nel 1973 la direzione dell'istituto individuò nel progetto del TAU2 la realizzazione che meglio avrebbe rappresentato le capacità e le competenze esistenti in istituto per le tecnologie informatiche, e i cui risultati potevano quindi essere esibiti in occasione di un importante convegno da organizzare per il ventennale di costituzione del CSCE-IEI, previsto per la metà del 1975.

Preso atto delle difficoltà oggettive del progetto<sup>6</sup>, fu rafforzato lo staff con il coinvolgimento di altri collaboratori tecnici e fu chiesta la priorità per il TAU2 a tutti i servizi tecnici (lab. di montaggio, officina meccanica, ecc.). Poiché ricercatori esperti erano già impegnati su altri temi e ci potevano assicurare l'aiuto solo su singoli aspetti, la direzione affiancò alla corresponsabilità del progetto, assieme a Denoth, sia il Chimenti (allora borsista CNR) che il sottoscritto, confidando nella mia esperienza tecnica e come laureando al Corso di Informatica.

Nell'ottica di accelerare i tempi di realizzazione della connessione col calcolatore, fu deciso di basarsi su una soluzione già sperimentata in un precedente progetto tra CNUCE ed IEI. Si scelse quindi un collegamento parallelo diretto tra il calcolatore e il TAU2 (a 16 bit), tramite un canale Selector in modalità Block-Multiplex del sistema time-sharing IBM 360/67, gestito da una interfaccia 2701 PDA (Parallel Data Adapter Unit-Original Equipment Manufacturer Information, IBM System Ref. Library). La realizzazione era

<sup>6</sup> Non è da stupirsi dei lunghi tempi di lavoro previsti, perché con le tecnologie di allora, alcuni elaboratori *special purpose* realizzati in precedenza avevano richiesto dai due ai tre anni e l'impegno di una decina di persone fra tecnici e ricercatori.

piuttosto onerosa in termini di costo, comprendendo la stesura di un cavo multipolare di circa 150 metri tra CNUCE ed IEI, attestato su apposite interfacce hw, ma ci avrebbe però garantito una buona affidabilità di funzionamento, come in effetti si verificò.



Vista d'insieme del TAU2: a sinistra il posto di lavoro utente, il rack dell'Unità Digitale, con gli apparati di mixaggio e amplificazione e a destra l'Unità Audio.

La messa in funzione del sistema fu una sfida piuttosto importante per tutti ed in modo particolare per me, visto che in pratica mi trovai a coordinare l'intero progetto, assieme a Denoth e Chimenti per la parte analogica e L. Dall'Antonia per la parte del collegamento. Durante quei due anni lavorammo tutti alacremente, con il timore di non farcela per la scadenza del programmato convegno, e negli ultimi mesi anche oltre il normale orario, per completare la costruzione ed effettuare il collaudo della parte digitale e del collegamento col calcolatore e quindi riuscire a fare eseguire i primi brani dal sistema.

Infine in occasione del Convegno ("Venti anni di Informatica a Pisa", 16-19 giugno 1975), varie autorità e gli specialisti dell'Informatica a livello mondiale poterono assistere alle prime dimostrazioni del Maestro Grossi, con il sistema TAU2-TAUMUS funzionante!

Questo testo è stato pubblicato su:

Musica/Tecnologia

Firenze University Press e Fondazione Ezio Franceschini, numero 1, 2007

## Discografia

Il maestro Pietro Grossi ha inciso una serie di long-playing, contenenti sia dimostrazioni delle possibilità dell'Informatica musicale, sia composizioni originali. Le elaborazioni di composizioni classiche possono apparirci oggi datate e magari anche ingenuie, ma aprirono la strada a tutta l'elaborazione elettronica di cui oggi la produzione musicale non può fare a meno. Le musiche composte direttamente sul computer conservano ancora il loro fascino sperimentale e il loro valore tecnico ed espressivo.

pagina a fronte:

Pietro Grossi Computer Music

Composizioni realizzate con il Software DCMP e calcolatore IBM360/67;

sotto:

Bach/Grossi Computer Music

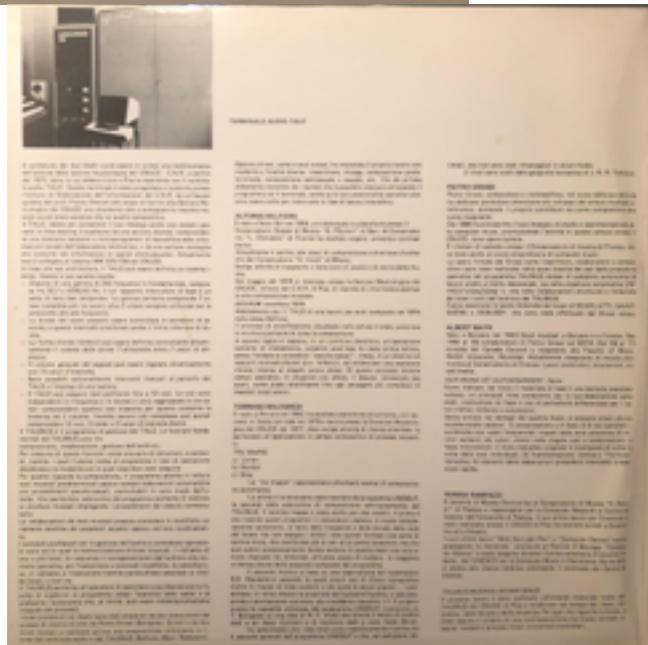






Computer Music  
Composizioni originali  
di  
Alfonso Belfiore,  
Tommaso Bolognesi,  
Pietro Grossi,  
Alberto Mayr  
con il Sistema  
TAUMUS/TAU2

Altri dischi di Grossi  
con trascrizioni  
e elaborazioni  
di composizioni classiche





## La testimonianza di Roberto Cacciapaglia

*Roberto Cacciapaglia è un importante compositore e pianista italiano, che integra tradizione classica e sperimentazione elettronica.*

*Da lungo tempo conduce una ricerca sui poteri del suono, nella direzione di una musica senza confini che si esprime attraverso un contatto emozionale profondo. Nella sua lunga carriera ha pubblicato diciotto album e ha composto sette opere.*

*Il secondo album "Sei note in logica" (pubblicato nel 1979) si avvale della collaborazione del gruppo di lavoro di Grossi al CNUCE di Pisa. Qui Cacciapaglia ricorda quella esperienza.*

*In che modo la sua esperienza al CNUCE di Pisa ha contribuito alla sua composizione "Sei note in logica"?*

Si tratta delle avventure di sei note, quattro bemolle, la, si, re e mi più il fa e il sol che si ripetono e si combinano in tutte le loro possibilità.

È come una visione al microscopio ed al rallentatore. Esaspera l'analisi dei particolari, sviscera i meccanismi con cui la musica si snoda e cambia. Avevo scelto e inserito varie sequenze di queste note nel terminale che mi rimandava infinite variazioni, sia temporali sia spaziali: per moto contrario, a specchio e via così.

Ho fatto questo lavoro con Tommaso Bolognesi ed è stata un'esperienza fondamentale lavorare su una partitura scritta per strumenti acustici, mettendola in relazione con una musica generata elettronicamente, per dar vita così a una forma compositiva che ci apriva molte possibilità ancora non sondate nel linguaggio musicale.

*Conobbe il maestro Pietro Grossi? Che cosa si ricorda di lui?*

Il maestro Pietro Grossi l'ho conosciuto e incontrato una sola volta di persona: era certamente una persona molto aperta sia a livello professionale che umano ed è stato fondamentale per sviluppare le potenzialità di tutta la musica nel senso più profondo e

universale del termine, senza alcuna barriera concettuale. Poi penso non sia un caso che fosse docente di violoncello al Conservatorio di Firenze e insieme promotore e fondatore di una straordinaria attività di computer music.

Ancora oggi, pensando a lui, lo vedo come una figura fondamentale e unica nella storia della musica italiana del dopoguerra, che ha contribuito profondamente alla ricerca e allo sviluppo del linguaggio musicale con l'ausilio del computer. Penso che oggi, in molteplici direzioni, tanti hanno ereditato la sua ricerca e i risultati a cui era arrivato.

*Rimane qualcosa di quell'esperienza nella sua produzione musicale odierna,?*

Certamente è stata un'esperienza importante e che non ho dimenticato, anche se oggi siamo lontani da quei terminali audio Tauz, da quelle pareti enormi che ricordavano un ambiente tipo "2001: Odissea nello spazio"; mi ricordo le fughe all'incontrario e tanti altri lavori.

Certamente la relazione fra suono acustico e suono elettronico è sempre stato uno degli aspetti fondamentali del mio lavoro, anche se oggi l'elettronica la utilizzo più per espandere il suono acustico, e non per generare suoni artificiali.

Ma questo è un altro discorso...



Alfonso Belfiore al Tau2 alla fine degli anni Settanta

Una esecuzione della sinfonia concertante "Teneri mormorii degli astri" alla Versiliana



## La testimonianza di Alfonso Belfiore

*Compositore e pianista, Alfonso Belfiore è stato titolare della cattedra di Musica Elettronica inizialmente (1980) presso il Conservatorio di Padova e dal 1992 presso il Conservatorio Cherubini di Firenze dove è anche Coordinatore del Dipartimento di Nuove Tecnologie e Linguaggi Musicali. Nella sua lunga carriera ha composto opere musicali e teatrali basate sulle tecnologie elettroniche e da molti anni è promotore del Festival "Diffrazioni" che ha luogo con successo a Firenze e che vede una ricca partecipazione di compositori di livello internazionale.*

Il mio primo approccio con l'allora Divisione Musicologica del CNUCE di Pisa ebbe luogo nel 1976-1977 quando Giacomo Manzoni, con il quale mi ero diplomato al Conservatorio Verdi di Milano, mi fece conoscere Pietro Grossi. Ero fortemente interessato alla fisica, alla matematica, alla tecnologia, alle neuroscienze, e la felicissima accoglienza del Maestro al CNUCE unita alla preparazione e la totale disponibilità di tutto il team che vi operava, fecero sì che quell'ambiente divenisse nel giro di poco una mia seconda casa.

Imparai la programmazione in linguaggio FORTRAN e studiai il sistema TAUMUS-TAU2 con Leonello Tarabella, Graziano Bertini e Tommaso Bolognesi. Tra il '77 e il '78 composi con il sistema TAUMUS-TAU2 il mio primo brano per computer "AEGROR", inserito poi nel LP Computer Music/CNUCE-IEI 1978. Il lavoro fu anche premiato alla prima edizione del concorso internazionale "Luigi Russolo" di Varese, con Pierre Schaeffer presidente di giuria.

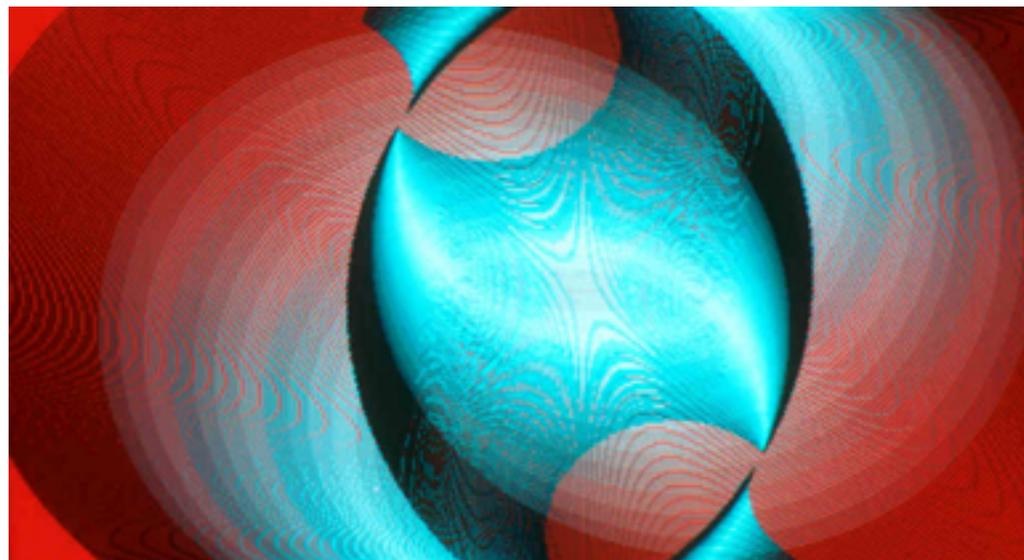
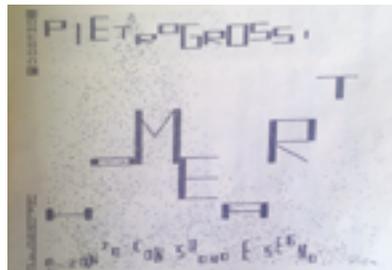
Nel seguito, grazie anche ai risultati innovativi delle ricerche che Tarabella e Bertini portavano avanti nel centro di Pisa, ho proseguito la mia attività presso il CNUCE divenendo anche Collaboratore Esterno di quell'Istituto. Grazie a questa stretta collaborazione fu possibile realizzare, tra il 1980 e il 1984, un Laboratorio permanente

di Informatica Musicale presso la Scuola di Musica di Scandicci - centro di grande sperimentazione per la didattica della musica - ed il Centro di Ricerca e di Sperimentazione per la Didattica Musicale di Fiesole, lavorando a fianco di importanti figure quali Boris Porena e Gino Stefani. Utilizzando le strutture del CNUCE e dell'IEI fu poi possibile installare presso la Scuola di Musica di Scandicci un terminale remoto ed operare quotidianamente con il sistema TAUMUS-TAU2: un'esperienza eccezionale per quel tempo! Altro momento di grande importanza fu quando (1982-1983) realizzai il Laboratorio di Computer Music a Palazzo Pretorio di Certaldo nell'ambito del Festival della Fondazione ARS NOVA dando vita a seminari e concerti in tempo reale in collegamento remoto permanente con il sistema TAUMUS-TAU2 del CNUCE/IEI.

Un'altra occasione di particolare significato che mi lega al CNUCE e all'IEI di Pisa, è stata la realizzazione dell'opera multimediale "Teneri mormorii degli astri", sinfonia concertante per voci umane, strumenti e corpi celesti. Fondamentale per la realizzazione di quest'opera fu il supporto di Tarabella e Bertini, proseguiti da un'esperienza di ricerca formidabile che ha segnato le tappe fondamentali della mia vita, durante la quale ho consolidato la relazione, scientifica ma soprattutto umana, tutt'ora in essere con Leonello e Graziano.



Con la comparsa sulla scena dei personal computer, il Maestro Pietro Grossi iniziò una nuova avventura creativa rivolta questa volta all'arte visiva, riversando su questo nuovo fronte artistico tutte quelle competenze e tutta l'esperienza maturata negli anni nello sviluppo di programmi di meta-composizione algoritmica verso quella che egli definì la HomeArt.



## Tornate, domani sarò diverso

La sua ultima mostra fu proprio a Pisa nella galleria Studio Gennai | Arte Contemporanea nell'aprile del 2001

Delio Gennai aveva conosciuto Grossi tramite la galleria Il Gabbiano di La Spezia, fondata e condotta da Manfredi, Andolcetti e Cimino, dove il maestro aveva precedentemente esposto le sue opere. "Grossi era una bellissima persona, semplice e modestissima." ricorda Gennai.

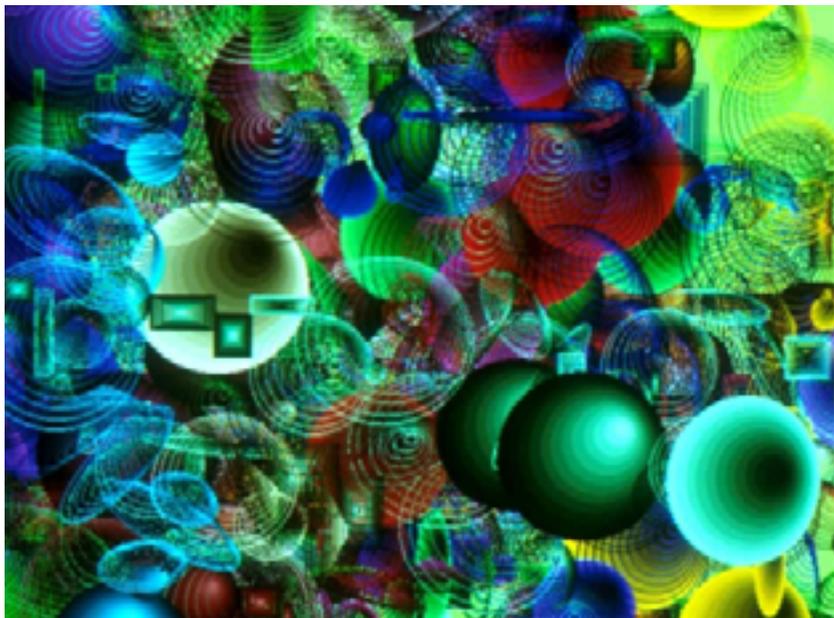


Sopra:  
invito e pieghevole della mostra  
realizzati personalmente da Pietro Grossi

A sinistra:  
un'opera di HomeArt

A destra:  
un'opera esposta nella mostra dello  
Studio Gennai | Arte Contemporanea





## PIGRODELIRI

*Il computer ci libera dal genio altrui  
Ed accresce il nostro*

*Per secoli l'uomo ha detto all'altro  
guarda ciò che so fare io oggi dice  
guarda ciò che puoi fare tu*

*Lo confermano  
la pervasività degli strumenti sé operanti  
il vertiginoso trasferimento ad essi  
delle mansioni umane  
la conseguente metamorfosi  
del consesso umano*

*Viviamo l'istante zero  
attraversiamo la terra di nessuno  
e con occhio fermo  
intravediamo difformità inconciliabili  
tra le due civiltà –morente e nascente*

*Nel gioco del segno e del suono tutto è permesso  
n tandem col bit*

[Pietro Grossi]



*Pietro Grossi è considerato il pioniere dell'Informatica Musicale in Italia.*

*Determinanti per la sua esperienza sono stati l'incontro con il direttore del CNUCE Guido Torrigiani (matematico, umanista e musicologo) ed il contesto tecnologico unico ed irripetibile esistente a Pisa nella seconda metà degli anni '60.*

*Grazie alle strutture che avevano dato vita alla CEP - ancora in essere all'IEI negli anni '70 - e all'intervento del direttore Gianfranco Capriz e di Franco Denoth, fu possibile realizzare il Terminale AUdio TAU2, primo sintetizzatore polifonico e politimbrico controllato da calcolatore.*

*Tra i molti ricercatori e tecnici che parteciparono all'attività di Grossi, furono Graziano Bertini e Leonello Tarabella, testimoni ed attori di quell'esperienza, a raccoglierne l'eredità al CNR, sviluppando originali ricerche di informatica musicale via via che la tecnologia offriva nuovi dispositivi e potenza di calcolo crescente.*

*Bertini e Tarabella passano ora il testimone di quella straordinaria avventura a Massimo Magrini, ricercatore presso il Laboratorio Segnali ed Immagini dell'ISTI dell'Area della Ricerca CNR e attivo da molti anni sul tema.*