

*Maestri e allievi
nella fisica italiana
del Novecento*

a cura di
Luisa Bonolis



Percorsi della Fisica

Capitolo 15

Andrea Frova

Nato a Venezia l'11 dicembre 1936, Andrea Frova si è laureato in fisica a Pavia il 30 settembre 1959. Ha conseguito la Libera Docenza in Struttura della Materia nel 1967. Ha fatto ricerca e ha insegnato nelle università di Pavia (1959–62), Messina (1962–63), Modena (1976–78), Roma “La Sapienza” (1967–1976, poi dal 1978 a oggi). Attualmente è titolare della cattedra di Fisica Generale e tiene inoltre corsi di Acustica musicale e Laboratorio di elaborazione del suono. Ha soggiornato all'estero per diversi anni, presso il *Semiconductor Research Laboratory* dell'Università dell'Illinois a Urbana (1963–65), i Laboratori Bell Telephone a Murray Hill, N. J. (1965–67, e poi a più riprese, per un totale di 9 mesi, come consulente), il Politecnico di Losanna (1977–78 e altre volte come visitatore estivo), l'Università di Stoccarda (1972 e 1988, per alcuni mesi), l'Università della California (visitatore estivo nel 1984 a Berkeley e nel 1992 a S. Barbara), l'Università Nazionale Somala (1986 per sei mesi). Altre cariche ricoperte: 1982–85: Vicepresidente, poi Presidente, del Consiglio di Corso di Laurea in Fisica alla “Sapienza”; 1990–94: Coordinatore del Dottorato in Scienza dei Materiali alla “Sapienza”; 1990–96: Vicepresidente del Consiglio Esecutivo della IUPAP. È stato membro della *Board of Editors* delle seguenti riviste: *Solar Energy Materials*, *Semiconductor Science and Technology*, *Semiconductors and Insulators*. È sposato con Mariapiera Marenzana e ha due figlie. Quanto all'attività di ricerca, si è occupato prevalentemente della spettroscopia ottica dei solidi, in particolare dei semiconduttori di interesse nell'optoelettronica, sia nella loro forma di volume, sia di film epitassiale, sia di multistruttura quantica. Nel 1963 ha fatto la prima osservazione sperimentale dell'elettroassorbimento nei semiconduttori, aprendo la strada alla spettroscopia in modulazione di campo elettrico. Con questa tecnica, e con la sua controparte in riflessione, ha studiato e spiegato anche l'effetto elettro-ottico delle perovskiti ferroelettriche e le proprietà eccitoniche e di superficie di diversi semiconduttori.

Si è inoltre occupato di celle solari fotovoltaiche a base di silicio amorfo idrogenato, oltre che del trattamento con idrogeno dei semiconduttori III-V come metodo per la neutralizzazione dei difetti cristallini o per il controllo delle proprietà dei materiali. Ha pubblicato circa 150 lavori scientifici in inglese su riviste internazionali, ha presentato altrettante comunicazioni a congressi internazionali; ha scritto circa trecento articoli di cultura o divulgazione scientifica su quotidiani o riviste. Ha pubblicato un trattato sui semiconduttori e ha contribuito ad altri testi; ha scritto un trattato di acustica musicale e ha pubblicato numerosi libri di divulgazione scientifica sulla fisica dell'osservato quotidiano e sulla percezione visiva e uditiva. È anche autore di alcuni scritti di carattere narrativo.¹

15.1 La scelta della fisica

*Perché non cominci raccontando della tua famiglia, degli stimoli umani e intellettuali che hai avuto dai tuoi genitori?*²

Partiamo allora da luogo e data di nascita: sono nato a Venezia nel 1936 all'ospedale civile, dove mio padre, chimico farmaceutico, era addetto alla farmacia interna. Crebbi a Venezia fino a quando i tedeschi non ci fecero sgombrare perché temevano un attacco dal mare da parte delle forze alleate: obbligarono a partire tutti i civili consentendo di restare a Venezia solo a coloro che vi svolgevano un lavoro. Mio padre rimase a Venezia e il resto della famiglia sfollò nel Friuli, dove vedemmo da vicino la guerra partigiana. Rientrammo a Venezia alla fine della guerra; mio padre aveva intanto assunto il ruolo di chimico presso la cristalleria Toso di Murano. Nel 1947 ci trasferimmo a Cesano Maderno nelle vicinanze di Milano, presso la Snia Viscosa, il colosso del tessile. Abitavamo una casa situata all'interno della fabbrica e per molti anni respirammo odori di gas venefici: non mi stupirei se tanti degli acciacchetti che mi hanno afflitto lungo la vita siano sorti proprio dall'aver respirato dall'età di nove anni all'età di venti o giù di lì queste esalazioni. Di quando in quando si veniva a sapere che qualche operaio addetto ai macchinari, dopo aver respirato per anni tutto quel veleno a pieni polmoni, se ne andava all'altro mondo, cose tremende, cancro, malattie deformanti, intossicazioni polmonari. . . Una volta sistemati in Lombardia, ho frequentato le medie locali e poi a Milano il liceo scientifico Vittorio Veneto: nella Milano industriale il liceo scientifico non era visto

¹Si veda anche:<http://chimera.roma1.infn.it/G29/frova/FrovaHome.html>

²Colloquio avvenuto l'11 ottobre 2005 nello studio di Andrea Frova all'Università di Roma "La Sapienza".

come un liceo di rango inferiore al classico, come altrove in Italia. . . direi anzi che molti ragazzi con inclinazioni tecnico-scientifiche si facevano un vanto di frequentare il Liceo Vittorio Veneto, che a quel tempo era l'unico liceo scientifico di Milano. Quanto a me, non dubitavo che sarebbe stato un errore scegliere un liceo dove insegnassero il greco invece della matematica o altre cose opinabili invece, che so, della metodologia scientifica o di una lingua straniera. Latino a parte, che ho sempre valutato di grande importanza formativa, mi pareva non fosse il caso di esagerare con le dosi di cultura umanistica, anche se sono sempre stato un appassionato del leggere e dello scrivere. Al Vittorio Veneto ebbi come insegnante di matematica e fisica la signora Piera Pinto, che poi si è sposata con un altro fisico, Carlo Salvetti, e che ho ritrovato qui a Roma trenta anni dopo (e la cui figlia si è trovata per puro caso a lavorare nello stesso ambiente di mia figlia). Finito il liceo a Milano si trattava di scegliere una facoltà universitaria: sul fatto che io dovessi frequentare l'università (e così poi i miei due fratelli), nella mia famiglia ci sono sempre stati pochi dubbi. Sul fatto invece che dovesse essere una facoltà scientifica ero io stesso a non averne alcuno. Quello che mi avrebbe interessato di più era la ricerca nell'ambito umano, mi sarebbe piaciuto fare il medico ricercatore, il biologo medico, il genetista. Però mio padre era alquanto avanti negli anni e stava per andare in pensione, poi c'erano due fratelli più piccoli, quindi in famiglia mi fu fortemente raccomandato di scegliere una laurea breve: medicina sarebbero stati sei anni contro i quattro di fisica, e prima di arrivare a prendere uno stipendio ci sarebbero voluti anni di tirocinio. Intervenero amici di famiglia a consigliarmi appunto la fisica, piuttosto che non un'altra laurea scientifica breve: uno scienziato cui debbo in larga misura la scelta fu il noto fisico elettronico Emilio Gatti. Lo frequentavo perché suo suocero – quell'ingegner Semenza che aveva progettato la tragica diga del Vajont – era un amico carissimo di mio padre. Gatti, allora assistente al Politecnico di Milano, mi disse: "Scegli fisica, scegli stato solido, semiconduttori in particolare, perché il futuro è fondato su quei materiali". Nessuna profezia avrebbe potuto essere più centrata di questa. Dovendomi confinare a una laurea breve era d'obbligo tener conto del suggerimento di colui che per me era un grande esperto, oltre che amico di famiglia. Però la fisica mi piaceva, mi piaceva molto, direi non meno della musica (ma c'erano tante altre cose che mi avrebbero potuto appassionare!). Fu così che nel 1955 mi iscrissi a fisica a Pavia, dove avevo ottenuto una borsa del Collegio Borromeo. In sostanza, per quattro

anni ho studiato e vissuto gratis. Verso la fine, prima di prendere la tesi, mi consultai di nuovo con Gatti il quale mi informò: “So che è appena rientrato dagli Stati Uniti un tal Gianfranco Chiarotti, il quale ha lavorato con Frederick Seitz all’Università dell’Illinois e aprirà a Pavia un’attività completamente nuova in fisica dei solidi: cerca di farti dare una tesi da lui”. E così andai a parlare con Chiarotti.



Figura 15.1: Fotografia notturna del loggiato dell’Almo Collegio Borromeo, fondato da S. Carlo nel 1561 e costruito da Pellegrino Tibaldi detto “il Pellegrini”, definito dal Vasari “Palazzo per la Sapienza”.

Chiarotti non era il solo a rientrare dagli Stati Uniti...

Hai ragione, dall’America erano tornati in Italia, e tutti a Pavia, quasi simultaneamente, almeno quattro brillanti ricercatori di quel settore. Uno era Fausto Fumi, un po’ più anziano degli altri, teorico; due erano venuti in parallelo, cioè Giuseppe Franco Bassani e Gianfranco Chiarotti, il primo teorico e il secondo sperimentale, entrambi provenienti dall’Università dell’Illinois a Urbana; l’ultimo in ordine di tempo era Mario Tosi. Questo è il quartetto che posso dire dei miei maestri, cioè di coloro che, sia come laureando, sia come specializzando nell’immediato periodo dopo la laurea, ebbi di fatto come insegnanti, consiglieri o persone con le quali discutere.

Naturalmente c'è una quinta persona cui, non citandolo, farei un torto, ed è il capo di tutti questi nell'Istituto di Fisica A. Volta di Pavia, ossia Luigi Giulotto. Giulotto era il direttore e in qualche modo doveva approvare tutte le scelte scientifiche che si operavano nell'Istituto. È stato anche mio indimenticabile professore di Struttura della Materia, e non solo perché talvolta, durante la lezione, si addormentava in piedi di fronte alla lavagna (o almeno questa era la leggenda, forse si limitava a concentrarsi su quello che doveva dire). La prima tesi sperimentale sui semiconduttori, in Italia, credo fosse proprio la mia, quindi l'inizio di questo genere di ricerche può datarsi attorno al 1958. Chiarotti mi assegnò un problema che gli veniva dall'esperienza americana, cioè lo studio delle superfici dei semiconduttori. Anche qui non si poteva immaginare argomento più significativo giacché le superfici dei semiconduttori sono divenute poi il cuore dei dispositivi stratificati metallo-ossido-semiconduttore, vale a dire i FET, i MOSFET, le memorie MOS e via discorrendo, che sono l'anima dei *chip* nei computer odierni. Per poter realizzare qualcosa dovemmo appoggiarci alla sola industria di semiconduttori esistente in Italia, la SGS. Un'industria che ha una lunga storia: nata italiana, a un dato momento proprietà dell'Olivetti, era stata poi venduta alla Fairchild – non ricordo la successione temporale degli eventi – e alla fine si è associata alla francese Thomson... Tra i fisici della SGS con cui avemmo a che fare ricordo Bolognesi, Forlani, Formigoni, Minnaja.

La vicenda mi è stata raccontata in parte da Gianfranco Chiarotti. Questo gruppo di persone stava aprendo un discorso del tutto nuovo per l'Italia...³

Sì, infatti la compagnia aveva come obiettivo, naturalmente, la produzione di dispositivi a semiconduttore, i primissimi in Italia, quindi il suo apporto principale alla ricerca fu la preparazione e la fornitura dei campioni di semiconduttore.

Mi piacerebbe sentire qualcosa di più sul periodo dei tuoi anni universitari, per esempio chi erano gli altri tuoi insegnanti.

Mi iscrissi a Pavia perché avevo vinto la borsa del collegio universitario Borromeo, altrimenti è probabile che avrei studiato a Milano, visto che i miei genitori avevano casa lì... e la mia vita sarebbe forse stata molto diversa. Ebbi come professori del primo biennio per la fisica Orazio Spec-

³Si veda il colloquio con Gianfranco Chiarotti in *Fisici italiani del tempo presente. Storie di vita e di pensiero* a cura di L. Bonolis e M. G. Melchionni (Marsilio, 2003).

chia, ormai scientificamente inattivo, per le matematiche Silvio Cinquini e Vittorio Emanuele Galafassi, per le chimiche Mario Rolla. Per il secondo biennio, Bruno Bertotti e il quartetto degli “americani” che ho nominato poco sopra, oltre naturalmente al padre di tutti, Luigi Giulotto.

15.2 La tesi sui semiconduttori

Quando ti sei laureato?

La mia laurea è del '59 e merita appunto ricordare che il primo corso di fisica dei semiconduttori al mondo fu insegnato all'Università di Rochester nel '58, se non ricordo male: quindi la tesi che Chiarotti mi assegnò corrisponde al tempo in cui negli Stati Uniti si era appena iniziato a insegnare la materia. In Italia molti non sapevano nemmeno il significato della parola “semiconduttore”! A fare ricerca in fisica dei solidi c'era anche Roberto Fieschi all'università di Milano, e c'erano altre persone, ma credo che, specificamente sui semiconduttori, i veri pionieri in ambito accademico furono proprio Chiarotti sul versante sperimentale e Bassani su quello teorico. Gli “americani” erano molto informati e ben collegati con ottimi laboratori negli USA, ed erano consci del fatto che la tematica dei semiconduttori stava esplodendo a livello mondiale. Ma nessuno di loro, fino allora, aveva fatto esperienza diretta nel ramo. E infatti la mia attività iniziò a partire da un tavolo vuoto: per il mio lavoro di tesi, i primi strumenti furono interamente realizzati in casa! Su suggerimento di Chiarotti costruì il primo *lock-in* – un amplificatore selettivo a sensibilità di fase – uno strumento sofisticato a quel tempo inesistente in commercio. Lo schema costruttivo fu tratto da una pubblicazione del famoso Bloch, quello della risonanza nucleare. Fu una fortuna che Chiarotti avesse fatto la sua tesi con Giulotto, anni prima, proprio su quell'argomento. Lui leggeva articoli che io non frequentavo, e questo gli permise di imbattersi nello schema che mi sottopose. Roba da elettronici, ma a quel tempo i soldi erano pochi e un laureando di fisica doveva imparare a fare un po' tutti i mestieri! Ci lavorammo per due mesi prima che lo strumento funzionasse a dovere. Ma fu uno sforzo premiato, visto che, senza l'impiego del *lock-in*, molta fisica dei solidi sviluppatasi negli anni seguenti – quel tipo di spettroscopia fine che svelava effetti appena percettibili – non sarebbe stata fattibile. È così che abbiamo cominciato. La mia tesi riguardava lo studio della superficie dei semiconduttori: ma attenzione, la superficie del germanio [1], che nel '59 sembrava essere il

semiconduttore più interessante, mentre poi, si sa, è stato del tutto soppiantato dal silicio. Per tre ottimi motivi: uno, perché il silicio si trova nella sabbia, e quindi è disponibile in grande quantità, con bassi costi di estrazione e purificazione. . . Due, perché il silicio, al contrario del germanio, ha un ossido stabile e non solubile in acqua. Questo è il segreto dei MOS – strutture stratificate metallo–ossido–semiconduttore – no? Col germanio si può quindi fabbricare un transistor, ma non un MOS, perché il suo ossido è molto labile, non forma una pellicola. L’ossido di silicio, invece, non è altro che quarzo amorfo, e come tale forma uno strato di materiale resistentissimo! Terzo motivo: i dispositivi al silicio possono lavorare a temperature alquanto più alte di quelli al germanio. Quando ci si rese conto di questa differenza, il silicio fece uno scavalco impressionante! Il germanio passò in seconda linea, destinato ad applicazioni marginali. Anche noi, a un dato punto, ci rivolgemmo al silicio.

Ci sono altri ricordi notevoli della tua vita universitaria, per esempio quella all’interno del Collegio Borromeo?

Era un collegio che imponeva di sostenere tutti gli esami dell’anno entro la sessione di ottobre e di mantenere una media del 27 senza mai però scendere sotto il 24 (voti degli anni ’50, non di adesso!). Naturalmente non si poteva rischiare di perdere il collegio – occorreva pensare alla famiglia! – e quindi si studiava a tutto spiano. Ho sempre considerato questo studio forsennato un aspetto negativo in quegli anni di formazione: ci sarebbero voluti più spazi liberi per leggere e occuparsi di altri argomenti. Il problema valeva anche per gli altri tre collegi pavesi, due maschili, il più antico Ghislieri e il recente e meno titolato Cairoli (il Ghislieri e il Borromeo erano i due collegi “classici”, nel senso che esistevano dalla fine del ‘500, erano stati fondati da papi o cardinali, ed avevano sfornato un certo numero di celebrità); e uno femminile, il Castiglioni Brugnatelli, dove ha studiato mia moglie Mariapiera, anch’esso di recente istituzione. Insomma, lo studio duro era veramente un obbligo, quasi una schiavitù! Quando avevamo un momento libero lo dedicavamo allo sport – calcio, tennis, nuoto e canottaggio sul Ticino – perché, dopo aver frequentato lezioni e laboratori, dovevi studiare altre otto–dieci ore al giorno (almeno nei mesi che precedevano gli esami), non vedo come ci si sarebbe potuto dedicare ad altre attività della mente. A parte la musica, per quella lo spazio l’ho sempre trovato. E anche per un po’ di cinema e di letteratura. . . Quando la tesi fu finita, era il 1959, rimasi a lavorare tre anni all’Università di Pavia con incarichi

di insegnamento a scadenza annuale, fino a che Chiarotti, nel 1962, vinse una cattedra di professore ordinario. A quei tempi i vincitori di concorso emigravano sempre in terre lontane, e dunque Chiarotti partì per Messina, proponendo ad alcuni suoi colleghi e collaboratori di andare con lui per aiutarlo a mettere in piedi un'attività in fisica dei solidi, che laggiù era pressoché inesistente. A Pavia, naturalmente, la struttura della materia era ancora in fase di decollo, ma in Sicilia c'era meno ancora! O meglio, c'era una piccola attività di caratterizzazione sui semiconduttori allestita da Daniele Sette e dai suoi collaboratori, i quali erano transitati per quella sede subito prima di Chiarotti. Chiarotti fu seguito a Messina da diverse persone; citandole in ordine sparso, ricordo Andrea Levialdi, Gianfranco Nardelli, Adalberto Balzarotti detto "Camillo", Umberto Maria Grassano, Giovanni Del Signore. Franco Bassani stesso venne a Messina, come vincitore di cattedra, un paio di anni più tardi, e anche Mario Tosi fece il suo turno di emigrato in quella sede. Per bella che sia la Sicilia, a Messina non mi sentivo molto a mio agio... diciamolo chiaro. È difficile per un veneziano, divenuto per metà lombardo, vivere in quel tipo di società: mi sembrava di stare in un paese straniero e arretrato (oggi, mi dicono, le cose sono cambiate, ma allora molti atteggiamenti mentali dei siciliani mi sembravano così stupefacenti...).

15.3 Negli USA da Bardeen e ai *Bell Labs*

Fu così che quando, durante una conferenza in Inghilterra nel 1962, incontrai Paul Handler, braccio destro di John Bardeen, colui che ha vinto per due volte, caso unico nella storia, il premio Nobel per la stessa materia (la prima volta nel 1956 per l'invenzione del transistor insieme a William Shockley e Walter Brattain, la seconda nel 1972 con Leon Cooper e Robert Schrieffer per la teoria della superconduttività) e ricevetti da lui un'offerta a trasferirmi nel loro laboratorio a Urbana, Illinois, andai diritto da Chiarotti e gli dissi: "Caro professore – ci davamo del lei a quel tempo – caro professore, ho ricevuto un'offerta dagli USA, un'offerta che non si può rifiutare! Mi spiace di essere stato qui solo 10 mesi, ma lei sa che ho cercato di fare del mio meglio per avviare le ricerche. Balzarotti e gli altri le porteranno avanti. Il laboratorio dell'Illinois è il primo al mondo a chiamarsi *Semiconductor Research Laboratory*. Sarò testimone dei primi passi di una nuova disciplina. E poi lo dirige Bardeen, come potrei non accettare?".



Figura 15.2: Exeter, 1962, VI International Conference on the Physics of Semiconductors. È il primo importante congresso scientifico cui ho partecipato (con mia moglie Mariapiera Marenzana). Lì ricevetti l'offerta di trasferirmi all'Università dell'Illinois.

Immagino che Chiarotti sia rimasto dispiaciuto, visto che a lui stava a cuore lo sviluppo delle attività in loco...

Diciamo che non la prese troppo bene; però capì che io andavo a Urbana anche per imparare delle cose nuove proprio nel campo che ci interessava, né avevo intenzione di sparire per sempre: sarei tornato con un prezioso bagaglio di esperienze. E infatti così è stato.

Gli stessi Fumi, Chiarotti, Bassani, Tosi, si erano formati lì e, se ricordo bene, anni dopo vi andarono anche Massimo Altarelli e Enrico Gratton.

E molti altri. Quel primo soggiorno negli Stati Uniti durò circa quattro anni, i primi due all'Università dell'Illinois, che per la fisica dello stato solido e per la struttura della materia era forse il massimo tra le università ameri-

cane. Dopo due anni di lavoro all'Illinois passò un reclutatore dei *Bell Labs* di Murray Hill (Laboratori della Bell Telephone), si chiamava Jim Goldey. Ebbi con lui un lungo colloquio. Tornato in sede, mi inviò un'offerta di lavoro. In parallelo ebbi anche un'offerta dalla Xerox, che stava allargando la sua attività dal campo delle fotocopiatrici ad altri settori della fisica della materia; altre offerte vennero dall'università del Massachusetts ad Amherst, dal Naval Research Laboratory in Washington, dalla General Motors a Detroit, e da altre sedi minori. Era dunque, per me, solo una questione di fare la scelta migliore. Misi l'offerta della Bell davanti a ogni altra perché pensavo che prima o poi sarei rientrato in Italia e che la mia permanenza negli Stati Uniti era motivata solo dal desiderio di apprendimento: e i *Bell Labs* erano a quel tempo veramente mitici! Già allora ai *Bell Labs* erano stati conseguiti sei o sette premi Nobel e molti ancora ne sono venuti dopo.



Figura 15.3: Tucson, Arizona, 1972. Modulation Spectroscopy Conference organizzata da Bernard Seraphin. Alcuni tra i pionieri del settore, da sinistra: F. Germano, D. E. Aspnes, Y. Hamakawa, P. Handler, A. Frova, G. F. Bassani.

Qual era stato il bilancio di quei due anni passati a Urbana?

Beh, anzitutto, arrivando dall'Italia, ci fu la scoperta di un altro mondo, dove la vita era così diversa, così più organizzata, più efficiente, più pragmatica, insomma più anglosassone; poi, per quanto riguarda i laboratori. . . qui lavoravamo come morti di fame, là c'erano tutt'altri mezzi a disposizione!

Per non dire di quello che è venuto dopo, ai *Bell Labs*: per ordinare un apparecchio, anche costoso, bastava che alzassi il telefono e in pochi giorni era nelle mie mani; in Italia, tra richieste di finanziamento, analisi di mercato, carte da riempire, attese di vario genere, eccetera eccetera, nella migliore delle ipotesi ci sarebbero voluti un paio d'anni! Terzo aspetto fondamentale, quello dei contenuti scientifici. Con Paul Handler (e in successive collaborazioni con David Aspnes, Claude Pechina, Yoshihiro Hamakawa) imboccai la strada dell'elettroassorbimento – ossia la variazione delle proprietà di assorbimento della luce da parte di una sostanza sottoposta a campo elettrico – nelle giunzioni $p-n$ dei semiconduttori. Un fenomeno che molti considerano la radice della spettroscopia modulatoria [2, 3, 4, 5].

Tutto in positivo, quindi, nella tua esperienza americana?

Non tutto. Da un certo punto di vista, l'esperienza fatta ai *Bell Labs*, mi ha nuociuto! Perché, quando sono rientrato in Italia mi son detto: "Ma come si può far ricerca qua, quando devi sprecare metà del tuo tempo a riempir carte, fare riunioni, dibattere questo e quest'altro. . . per rimediare alla fine, come avviene spesso, solo una parte del denaro che servirebbe, per cui devi ripartire subito per sopperire al mancante!?" Però dal punto di vista professionale è come hai detto tu, l'avventura americana è stata splendida. Soprattutto perché ho vissuto dall'interno questa grande fase di decollo della fisica dei semiconduttori. Era proprio il momento in cui nascevano i circuiti integrati, i sensori di immagine a CCD (*Charge-Coupled Device*), dispositivi che ho visto pensare e realizzare in stanze adiacenti alla mia, talvolta trovandomi a firmare, come testimone dell'evento, il registro di lavoro dei rispettivi inventori. Il CCD, oggi, ha soppiantato ogni altro dispositivo capace di tradurre un'immagine in segnali elettrici. Il primo prototipo è stato realizzato nel 1966 da George Smith e da Bill Boyle, che erano rispettivamente il mio capo diretto e il capo del mio capo. Oggi anche i profani sanno che cosa è un CCD e a che serve. Senza di esso, l'intero universo del trattamento e della trasmissione delle immagini sarebbe stato impossibile. Niente fotografia elettronica, ad esempio. E che straordinaria sensibilità! Con una telecamera vecchio stile, ossia basata sui fotoconduttori, occorreva tenere i fari puntati sulle persone; le telecamere a CCD permettono di filmare quasi al buio, una lampadinuzza o una candela sono sufficienti. Si trattò di una vera e propria rivoluzione! Nel 1980 circa scrissi un piccolo libro per Editori Riuniti intitolato *La rivoluzione elettronica*, una definizione che in qualche modo è entrata poi nel gergo giornalistico

[6].

15.4 Rientro in Italia

Intanto che io me ne stavo ai *Bell Labs* anni '65-'66, Chiarotti venne chiamato a Roma da Edoardo Amaldi, il quale aveva in mente di ampliare l'attività di struttura della materia, già avviata da Giorgio Careri con esperimenti di superfluidità. Per Amaldi, la ricerca non poteva mancare di una componente di fisica dello stato solido, e in particolare di fisica dei semiconduttori. Poiché la ricerca di Chiarotti doveva aprirsi un varco in una sede largamente dominata dai fisici delle particelle, dagli astrofisici e da teorici di varia specie, egli aveva assoluto bisogno di collaboratori. Cercò quindi di far convergere su Roma più persone possibili. In America c'era un allievo che lavorava ai *Bell Labs*, che era stato testimone di tante attività di punta, che aveva contribuito a sviluppare una nuova disciplina, la spettroscopia modulatoria, partendo da idee nate a Pavia. Ecco insomma come e perché sono arrivato a Roma. Malgrado il fatto che Chiarotti non potesse darmi molte garanzie. Mi disse solo: "Lei deve avere sufficiente coraggio da dimettersi dal posto che occupa e venire qui come assistente con un semplice incarico annuale. . . poi farà un concorso e auguriamoci che riesca a diventare di ruolo". Venni così, più o meno al buio. . . ma per la scienza erano tempi assai migliori di quelli odierni. Era l'inizio del 1967, quasi quattro anni dopo la partenza. Sono poi tornato negli USA per estesi periodi in vesti diverse, ad esempio come visitatore degli stessi *Bell Labs* o dell'Università della California.

Tu pensavi che questo rientro fosse divenuto ormai importante?

In America non mi ci vedevo perché sentivo troppo la mancanza della nostra cultura, del linguaggio, dello stile di vita e dei rapporti interpersonali, perché insomma mi sentivo inguaribilmente europeo. Sarei magari rientrato a Parigi invece che in Italia, penso, ma restare per sempre in America mi sembrava proprio non concepibile. Invece l'idea di venire a vivere a Roma mi era piaciuta moltissimo, perché in passato avevo visitato la città come turista e ne ero rimasto affascinato. Perciò quando Chiarotti mi propose di venirci, seppure senza sicurezza del posto di ruolo, feci fagotto! Fu un rientro motivato quindi soprattutto sul piano culturale ed emotivo, più che professionale. E poi avevo due bambine, e l'idea che crescessero cittadine americane mi dava parecchio fastidio. Mia moglie condivideva in pieno

questi criteri, quindi sul rientro ci siamo trovati subito d'accordo. Arrivai a Roma, in questo ruolo incerto, ma per fortuna qualche mese dopo arrivò il concorso e divenni assistente ordinario, con in più un incarico di insegnamento, insomma una sistemazione decente. Però ricordo che, quando lasciai i *Bell Labs*, Bill Boyle, il capintesta, volle avere un colloquio con me per convincermi a non partire. Esordì dicendo: “Ti posso chiedere quanto guadagnerai a Roma?”. Io gli dissi il doppio di quello che avrei guadagnato davvero, ma era ancora una cifra talmente bassa che lui arrossì per me e mi augurò di avere tanta tanta fortuna! Sapevo che Boyle, e non soltanto lui, mi stava giudicando uno stolido, o quanto meno un inguaribile romantico. In quell'occasione Bill Boyle mi spiegò il meccanismo di avanzamento di carriera ai *Bell Labs*, cosa che non conoscevo se non per vago sentito dire; e cioè che i capi si riuniscono ed espongono i meriti dei rispettivi ricercatori, dopo di che questi vengono collocati in una graduatoria di merito. I dati vengono rappresentati con curve che hanno in ascissa gli anni di anzianità e in ordinata il merito. Le curve erano ben otto, si chiamavano mi pare *octiles*. . . Questi *octiles* avevano diversa pendenza di crescita e diversi livelli di saturazione, e dal più alto al più basso c'era una bella differenza. Quindi stando sui vari *octiles* si avevano progressioni di carriera differenti, più o meno lente o rapide. Una persona che si trovava su un basso *octile* aveva degli incrementi annuali di stipendio o di carriera molto modesti, che presto si fermavano. Tutto era segreto, ma a posteriori la gente poteva intuire il retroscena. Bill Boyle mi mostrò i grafici e mi disse: “Guarda, visto che parti, posso svelarti. . .”, e io ebbi modo di scoprire che ero piazzato piuttosto bene, il che non mi dispiacque, non sarei andato via come un perdente. Anche se è doveroso dire che lì non era difficile, per uno che avesse una buona formazione europea, salire in alto abbastanza velocemente.

15.5 La spettroscopia modulatoria

Per quanto riguarda il rientro in Italia, va sottolineato un aspetto positivo che riguarda i contenuti. E cioè che qui, grazie a Chiarotti e ai suoi allievi – ricorderò anche Giorgio Samoggia, che non ho ancora citato – aveva visto la luce la spettroscopia modulatoria. Essa permetteva, di uno spettro ottico, di misurare a tutti gli effetti la derivata anziché la funzione assoluta. Tu sai bene che una variazione pressoché impercettibile nella pendenza di una curva può darti nella derivata un vistoso segnale. Oggi con i computer si

è in grado ovviamente di evidenziare effetti microscopici, ma a quel tempo si lavorava registrando gli spettri su carta, e l'occhio, inutile dirlo, ha le sue limitazioni. . . Il lavoro era in corso a Roma, ma i primi passi essenziali erano stati fatti già a Pavia, e sviluppati poi a Messina, ancor prima che io partissi per gli USA.

Come è nata e come si è sviluppata la spettroscopia modulatoria?

Di questo argomento effettivamente ho detto poco o nulla, ma per l'importanza che ha avuto negli anni '60-'80 merita tornarci. A Pavia Gianfranco Chiarotti aveva suggerito – idea sua originale, benché casualmente parallela a una analoga dell'americano Jim Harrick – di studiare gli stati di superficie dei semiconduttori modulando con un campo elettrico il loro stato di occupazione elettronica (in sostanza applicando quello che in seguito, nella dispositiviistica dei MOS e dei FET, si chiamerà *field effect*, ossia “effetto di campo”) e misurando le conseguenti variazioni nell'assorbimento ottico [7]. Uno dei motivi per cui Paul Handler e John Bardeen mi vollero in America era che questo genere di spettroscopia li colpì moltissimo. Bardeen disse: “È una tecnica che può portare a grandi risultati”. In America l'applicai a problemi diversi – ho già menzionato l'elettroassorbimento in germanio e silicio – ed essa andò incontro a un grande sviluppo, grazie anche all'entrata in lizza di Manuel Cardona, fisico abilissimo e molto fantasioso, che estese il metodo alla elettromodulazione della riflessione. Insomma, nata a Pavia dall'idea embrionale di Chiarotti, la spettroscopia modulatoria divenne la tecnica di punta e invase quasi tutta l'attività della fisica dei solidi negli anni '60-'80. Con quel metodo, a Roma facemmo esperimenti pionieristici in svariate direzioni. Vi parteciparono vari colleghi: da Umberto Maria Grassano a Adalberto Balzarotti, da Mario Capizzi a Florestano Evangelisti, da Renzo Rosei a Stefano Nannarone, e poi Piero Migliorato, Paolo Perfetti, Piero Chiaradia, Fulvia Patella, Margherita Zanini, Silvio Modesti, Paolo Fiorini, Guglielmo Fortunato, Carlo Coluzza e altri via via più giovani negli anni a seguire. Chiarotti riuscì a far chiamare a Roma anche i teorici Bassani e Tosi, il primo dei quali formò dei giovani di primissimo livello – Massimo Altarelli, Alfonso Baldereschi, Erio Tosatti – con i quali, oltre che con Bassani stesso, noi semicondutturisti avemmo buone occasioni di interazione. Fino al momento in cui, malauguratamente, Bassani se ne andò a dirigere la Scuola Normale di Pisa e i suoi allievi si sparpagliarono altrove, chi in Svizzera, chi a Trieste, chi a Grenoble (anche lo stesso Tosi emigrò a Trieste dopo brevissimo tempo). L'insieme di queste persone,

teorici e sperimentali, costituì, nel dipartimento, il Gruppo 15, o semplicemente G15, sigla destinata a divenire un punto di riferimento nel circolo degli studiosi di scienza dei materiali in area romana. Capizzi, Evangelisti ed io ci dedicammo agli spettri eccitonici e ai plasmi elettrone-lacuna in germanio, silicio e in film epitassiali di semiconduttori del gruppo III-V (quelli che trovano impiego come emettitori di luce LED e laser),⁴ in un secondo tempo di materiali ferroelettrici,⁵ Rosei si dedicò ai metalli, Nannarone e Chiaradia, direttamente collegati a Chiarotti, spinsero i metodi di studio delle superfici dei semiconduttori a livelli sempre più sofisticati, Grassano affinò il suo precedente lavoro nei centri di colore negli alogenuri alcalini. Nacquero tutta una serie di tecniche che, a seconda del parametro modulato, presero i nomi di piezomodulazione, elettroriflettanza, elettroassorbimento, termoriflettanza, modulazione di lunghezza d'onda. Se una qualsiasi variabile del sistema poteva essere modulata, lo spettro ottico si presentava assai più ricco di informazioni.

15.6 Celle solari e nanostrutture

Una quindicina di anni più tardi, con Evangelisti, spostai l'attenzione sull'energia solare, occupandomi di celle fotovoltaiche a basso costo, quelle fatte con materiali poveri, tipo il silicio amorfo idrogenato (i costi delle celle basate sul silicio cristallino erano proibitivi in quanto con lo stesso *wafer* che serve per costruire una sola cella si possono fabbricare – e vendere! – centinaia di memorie e microprocessori per computer). Il silicio amorfo si poteva produrre qui nel nostro laboratorio in modo molto più semplice ed economico di quello cristallino, bastavano alcuni tubi di vetro e qualche bombola di gas.

Quale è stata l'occasione per spostarti su questo particolare settore?

Ci fu un episodio molto preciso. Il CNR lanciò un progetto finalizzato sull'energia, di cui una parte riguardava l'energia solare, e all'interno di questa c'era una sezione rivolta all'energia fotovoltaica. Proprio a quel tempo – erano gli anni '79-'80 – nasceva la seconda università di Roma, quella di Tor Vergata, e Chiarotti con Grassano, Balzarotti, Chiaradia, il teorico Rodolfo Del Sole, più qualche altro, vi si trasferirono, portando seco una

⁴Mi riferisco ai principali lavori che portano il mio nome [8, 9, 10, 11, 12].

⁵I principali lavori a cui ho collaborato sono in bibliografia dal [13] al [27].

discreta fetta della strumentazione del laboratorio. Fu allora che io divenni responsabile del gruppo G15, al quale affluirono altri colleghi già a livello di professori, come Antonio Bianconi e Rosario Cantelli, interessati però a ricerche diverse dai semiconduttori. La prima cosa di cui ci preoccupammo fu di rimpolpare la strumentazione del gruppo; la prospettiva di entrare in un progetto importante, di evidente interesse per il paese, sembrò uno dei modi per rafforzare le nostre strutture e ravvivare gli interessi. A quel tempo sembrava certo che ci fossero possibilità di migliorare di molto la performance di queste celle di silicio amorfo idrogenato a basso costo, ma così non è stato perché i materiali non cristallini hanno strutture molto difettate che abbassano il livello di *performance*, e inoltre mostrano la tendenza a variare nel tempo: una cella fotovoltaica a base di amorfo può funzionare benino appena costruita, ma in pochi anni si deteriora. Questo non avviene con le celle al silicio cristallino, e nemmeno con quelle un po' meno pregiate a base di silicio policristallino, come quella che vedi nel grande orologio-sveglia a energia solare che sta sulla mia scrivania. Il silicio amorfo ha finito per essere usato solo in piccole applicazioni, tipo orologi da polso alimentati ad energia solare, o giocattolini, anche se a dire il vero in Giappone ho visto edifici che hanno i vetri delle finestre letteralmente ricoperti da film di silicio amorfo. Lo scopo in quel caso è duplice: da un lato ridurre l'intensità della luce e quindi attenuare l'effetto serra all'interno delle case; dall'altro, fornire una piccola quantità di energia elettrica che va ad implementare quella di rete. In conclusione, malgrado l'enorme sforzo che si è fatto in questo settore a livello mondiale, i risultati dell'amorfo hanno deluso le aspettative. Siamo andati avanti per una dozzina d'anni, producendo un discreto numero di lavori.⁶

Di che cosa ti sei occupato successivamente?

Negli anni dopo il '90 è esploso lo straordinario settore delle nanotecnologie e dei nanodispositivi. Interessante su due fronti: da una parte le esigenze dell'informatica di realizzare microprocessori o micromemorie (nanoprocessori si dovrebbe dire, perché ormai le dimensioni andavano già sotto il micron); dall'altra gli aspetti fondamentali della fisica mesoscopica, ossia al limite in cui le dimensioni del materiale diventano confrontabili con quelle degli elettroni che vi circolano, aspetti ancora insondati. Proprio a quel tempo nacque la terza università di Roma ed Evangelisti vi si trasferì: decidemmo allora di evitare i doppioni e di dividerci i compiti.

⁶Alcuni lavori di cui sono coautore sono elencati dal [28] al [33].



Figura 15.4: 1989: Andrea e Mariapiera Frova ospiti di Zhorès Alferov, direttore dell'Istituto Yoffe, nella sua dacia di Komarova a sud di S. Pietroburgo. Nel 2000 Alferov consegue il Nobel per le superstrutture a semiconduttore.

Cioè lui avrebbe portato avanti il lavoro sugli amorfi nella nuova sede, dove occorreva realizzare qualcosa in tempi brevi, ciò che era possibile se si utilizzavano apparecchiature e competenze già disponibili (il che implicò per il nostro laboratorio una seconda spoliatura di attrezzature, dalla quale non ci siamo mai ripresi). Capizzi ed io, invece, partendo dalla nostra ormai consolidata familiarità con la fotoluminescenza dei film epitassiali di semiconduttori III-V,⁷ qui nella vecchia “Sapienza” ci saremmo mossi su una linea praticamente nuova, cioè l'emissione di luce da parte di strutture III-V di dimensioni ultrananoscopiche, in particolare i cosiddetti punti quantici (*quantum dots*). In questo campo ci siamo trovati a dover competere con tanti gruppi accademici e industriali nel mondo, operanti in condizioni di lavoro assai meno ardue e precarie delle nostre: scarso o nessun aiuto tecnico, strumenti spesso obsoleti o rattoppati, denaro pro-capite almeno cinque volte inferiore alla media dei paesi industrializzati (non si può escludere che parte di colpa sia mia e dei miei fedeli collaboratori, poco abili nell'arte di

⁷I lavori sui semiconduttori epitassiali del gruppo III-V sono in grande numero. Tra quelli di cui sono coautore cito soltanto i principali che vanno dal [34] al [56].

rimediare fondi). Eppure si è avuto qualche buon risultato, ad esempio l'osservazione, in certe leghe a semiconduttore, di drastici cambiamenti di proprietà indotte dal bombardamento con idrogeno (emissione di luce diversamente colorata).⁸ Mi chiederai come è stato possibile. Lo è stato perché noi italiani abbiamo la capacità di sopperire alle carenze con una grande intensità lavorativa. Può sembrare un'idea strana, la mia, ma faccio il confronto non solo con le varie sedi degli Stati Uniti dove ho lavorato, ma anche con laboratori svizzeri e tedeschi, dove ho soggiornato a più riprese. Non c'è nessun dubbio, gli italiani che lavorano, lavorano per davvero. Magari poi per ognuno di loro. . . ce ne sono tre che non fanno niente! Così ci siamo trovati a fare ricerca su un terreno di punta con mezzi essenzialmente inadeguati. Per fortuna avevamo forti legami con eccellenti laboratori stranieri, sia di fisica sia di chimica, il che ci ha permesso di sopravvivere, ad esempio di reperire i sofisticati nanomateriali oggetto della ricerca, che qui alla "Sapienza" non si sarebbero mai potuti realizzare. Ma, come ho detto prima, l'esperienza ai *Bell Labs* mi ha irrimediabilmente viziato. Così queste difficili condizioni di lavoro hanno finito per spegnere gradualmente il mio interesse, per non dire quel poco d'entusiasmo che mi restava. Fatica a racimolare i quattrini (sempre parecchio al di sotto delle necessità), mancanza di ricercatori su cui poter fare affidamento, compiti da tecnologi di mestiere assegnati a inesperti studenti, con rischi vari. . . E allora un po' alla volta mi sono disamorato della ricerca e ho incominciato a fare dell'altro: scrivere libri di divulgazione scientifica, attività colpevolmente trascurata in Italia dagli scienziati [73, 74, 75, 76], interessarmi ai risvolti scientifici della musica [77], leggermi a fondo Galileo e cercare di diffonderne il verbo [78, 79], e cose simili. La nanofisica è rimasta affidata alle mani preziose di Mario Capizzi e di Antonio Polimeni, l'unico ricercatore di ruolo che negli ultimi dieci anni siamo riusciti ad acquisire al laboratorio semiconduttori (svuotatosi per il fatto che i "vecchi" sono diventati tutti direttori o professori in altre sedi). Ho fatto queste scelte anche perché ritengo che nella vita non si possa darsi a un unico mestiere, al massimo cambiando argomento all'interno dello stesso: qualche volta occorre davvero azzerare tutto e ripartire in una nuova direzione. Ed è ciò che ho deciso di fare in questi ultimi anni e in quelli a venire. . .

Tornando alle vostre scelte, direi che queste ricerche sulle celle solari, così

⁸I principali lavori sulle strutture quantiche di cui sono coautore sono elencati in bibliografia dal [57] al [72].

come quelle sui nanomateriali, siano di grande interesse per l'industria: mi chiedo se avevate stabilito delle connessioni con il mondo produttivo.

Domanda inevitabile! Connessioni con l'industria italiana quasi assenti, presenti invece quelle con alcune industrie straniere nell'ambito di progetti CEE. L'industria italiana non è mai stata interessata a ricerche che non diano risultati a breve scadenza, quel tipo di ricerche che in USA vengono dette *development*, "di sviluppo". Un caso emblematico: quando giunsi a Roma nel 1967, di ritorno dai *Bell Labs*, scopersi che alla Selenia di Roma c'era un tale dottor Genta (di cui non ricordo il nome proprio), persona modesta e intelligente, che aveva messo a punto celle solari al silicio cristallino di ottima efficienza, fra le prime al mondo! Se ne facevano già in industrie americane tipo Texas Instruments, e i giapponesi cominciavano a metterci il dito. Eppure l'attività di Genta fu chiusa, fu azzerato un *know-how* che solo pochi anni dopo avrebbe fatto faville. Da noi si è tornati sull'energia solare solo quando negli USA, durante la crisi della benzina – il famoso periodo di *austerity* degli anni '70 – si decise di fondare un *Department of Energy* e in Colorado fu costruito il SERI, un istituto che è una vera e propria città dell'energia solare. Vedendo che gli Stati Uniti stavano investendo somme enormi in quella direzione, si pensò che l'Italia, paese del sole, non potesse permettersi di restar fuori dal campo. E fu allora che il CNR varò il progetto finalizzato sull'energia di cui ho già parlato, mettendoci un po' di soldini. Questo avveniva, come ho già avuto modo di dire, intorno agli anni '80. E fu solo grazie a questa fonte di finanziamento speciale che con Evangelisti potei avviare il progetto sulle celle a silicio amorfo. Non avrebbe avuto alcun senso, in un'università, avventurarsi sulle celle monocristalline, tipica attività che richiedeva mezzi industriali, con tecnologie complesse e costose, e che era comunque povera di contenuti conoscitivi. Celle fotovoltaiche con vasti contenuti di ricerca scientifica, benché non prive di forti elementi di incertezza circa gli esiti, ci sembrarono una scelta più adatta a un ambiente accademico. E abbiamo avuto un certo numero di risultati validi, intendiamoci, non peggio di altri gruppi nel mondo! Come ho già anticipato, era proprio il materiale che alla lunga ha rivelato delle imperfezioni intrinseche che stabilivano un preciso, insormontabile limite alla sua efficienza di conversione, tale da renderlo nettamente inferiore al silicio cristallino. In mezzo alle varie attività descritte, ci sono stati alcuni episodi nella mia vita che mi piace ricordare. Per esempio, ho mantenuto per anni una stretta collaborazione con il Politecnico Federale di Losanna,

iniziata quando mi accadde nel '77 di sostituire nelle sue funzioni il professor Immanuel Mooser, direttore del laboratorio di fisica applicata, che si era trasferito in Brasile per un anno di congedo sabbatico.



Figura 15.5: Roma 1995. In occasione della *Laurea Honoris Causa* a Manuel Cardona si ritrova la vecchia “squadra di Pavia”: da sinistra U. M. Grassano, A. Frova, G. Chiarotti, A. Balzarotti, A. Stella.

I soldi lì erano tanti, quindi non mi fu difficile avviare delle nuove attività, ad esempio allestire una ricca apparecchiatura di fotoluminescenza con cui studiare il problema delle emissioni di luce da parte di semiconduttori lamellari III–VI fortemente eccitati, sottoposti cioè a fasci di luce laser di altissima potenza e brevissima durata [80, 81, 82]. Anche in quel settore, nel giro di qualche anno la problematica assunse primaria importanza per le sue implicazioni nell’ambito dei laser a semiconduttore e della trasmissione su veicolo ottico.

15.7 La scienza dei materiali

Puoi dirmi qualcosa di più della ricerca nel campo della scienza dei materiali, una disciplina in certo senso caratteristica dell'epoca in cui viviamo...

La ricerca di base nel settore dei materiali si presta molto ai laboratori che hanno mezzi limitati e conseguentemente una dinamica rallentata. Essa permette di passare abbastanza facilmente da un materiale all'altro e di intervenire tempestivamente se si hanno nuovi sviluppi sulla scena internazionale. In inglese si dice *"to jump into the bandwagon"*, ossia saltare a bordo nel carrozzone del pioniere sperando di rimediare anche tu la tua parte di oro. È un settore della fisica dove c'è posto per molte competenze: ingegneri, chimici e fisici che si adoprano per ottimizzare i materiali, sia con la pratica sia con modelli teorici; ma c'è anche l'aspetto della caratterizzazione e dello studio delle proprietà fondamentali, tipico compito di fisici operanti in un dipartimento culturalmente raffinato. Ad esempio, tutti i fenomeni di quantizzazione delle proprietà che sono legate alla nanoscopicità è fisica di alto livello. Bastano a testimoniarlo i Nobel assegnati in questi ultimi anni: a Horst Störmer, per esempio, sull'effetto Hall quantico frazionario, ossia con stati quantici contrassegnati da numeri frazionari, effetto che si presenta vicino allo zero assoluto con nanomateriali dove il confinamento degli elettroni è talmente elevato che la loro lunghezza d'onda supera le dimensioni dello stesso materiale. Oggi si arriva addirittura a produrre transistor dove il trasporto della corrente elettrica è affidato a un solo elettrone per volta! Se ci pensi, fa una certa impressione. Nell'effetto studiato da Störmer, ad esempio, una delle prime ipotesi, poi smentita dai fatti, fu che i numeri quantici frazionari derivassero dalla possibilità di suddividere la carica dell'elettrone, che so, $1/3$ di qua e $2/3$ di là. Roba da mettere la fisica sottosopra! Un'importante problematica cui invece ho deciso di rimanere estraneo è stata quella dei superconduttori ad alta temperatura di transizione. Troppi frequentatori! All'indomani della scoperta annunciata da Karl Alex Müller nel 1986, che gli valse il Nobel, qualcosa come 5000 fisici nel mondo si convertirono alla tematica. Abbandonati *overnight* semiconduttori, ferroelettrici, centri di colore, amorfi o quello che vuoi, si buttarono a corpo morto nella superconduttività ad alta temperatura. Fenomeno emblematico. Lo stesso Mario Capizzi vi ha lavorato marginalmente in collaborazione con Paolo Calvani. Ma il suo interesse principale è rimasto sempre rivolto alle strutture quantiche, argomento affascinante: ti

fanno vedere la meccanica quantistica al lavoro, perché prendi un elettrone e lo metti in una scatola, che è il nanosemiconduttore. Lo fai realmente! Qui a Roma, stranamente, queste ricerche non hanno avuto molta rispondenza. . . Circa altri miei esperimenti, nel mio curriculum in rete sono elencati i principali risultati scientifici da me conseguiti. Ad esempio la prima misura sperimentale dell'effetto Franz-Keldysh, fatta per elettroassorbimento in una giunzione $p-n$ di germanio, che aprì la porta, come ho già raccontato, alla spettroscopia modulatoria. Poi la spiegazione dell'effetto Pockels nelle perovskiti ferroelectriche, fatta insieme a Philip Boddy e a Yen-Sun Chen (rotazione del piano di polarizzazione della luce tramite campo elettrico), effetto base nella trasmissione su fascio laser per imprimere l'informazione sul raggio luminoso [83, 84, 85]. La comunicazione tramite fibre ottiche è interamente fondata su un laser a semiconduttore III-V per l'emissione del fascio luminoso che agisce da veicolo, su un modulatore Pockels o simile che traduca i segnali elettrici da trasmettere in impulsi "scritti" sul fascio laser, e infine all'altro capo un rivelatore, anche questo a semiconduttore (tipicamente un fotodiode), che opera la riconversione in segnale elettrico. Ti ho fatto solo due esempi, ma ci sono vari altri risultati, grazie al fatto che tutti noi qui abbiamo sempre mantenuto vive le collaborazioni con gruppi stranieri. In Italia, nel nostro ambito, non puoi farne a meno, poiché già l'approvvigionamento dei materiali artificialmente strutturati ti obbliga a interagire con laboratori adeguatamente attrezzati alla loro produzione. E dal punto di vista teorico ci siamo sempre dovuti appoggiare a gruppi esterni, perché all'interno del nostro dipartimento raramente abbiamo trovato aiuto: per una tradizione tipica della cultura scientifica italiana molti nostri teorici sono alquanto remoti dalla fenomenologia, almeno per quanto riguarda la fisica della materia. Diverso è il caso della fisica delle particelle, dove l'avanzamento delle conoscenze teoriche e sperimentali è un tutt'uno, è qualcosa di corale. Ma nella fisica della materia condensata, dove ogni ricerca è circoscritta a uno o pochi individui, l'incontro tra osservazioni sperimentali e proposte di modelli teorici è relativamente occasionale.

15.8 Italia, paese in via di de-sviluppo

Dopo aver lavorato all'Illinois, ai *Bell Labs*, a Berkeley, ho toccato con mano la differenza tra approccio anglosassone e approccio italiano. Ai *Bell Labs*, quando si presentava un effetto sperimentale interessante, lo si met-

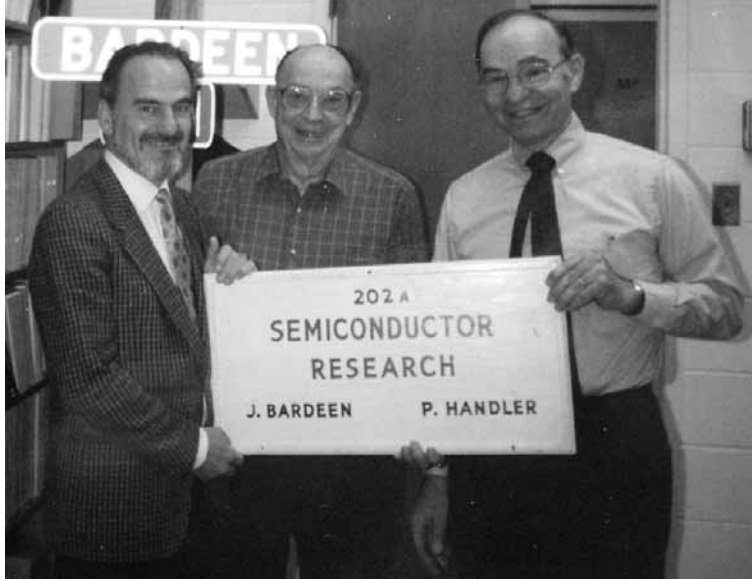


Figura 15.6: Andrea Frova (a sinistra) in visita a John Bardeen nel 1990, un anno prima della morte di quest'ultimo. A destra Paul Handler. Il cartello è quello che pendeva, all'epoca, sopra la porta d'ingresso del laboratorio.

teva subito nelle mani di qualche teorico, il quale ci pensava, ne discuteva con i colleghi, poi ti telefonava e ti diceva: “Avrei un’idea su che cosa stai misurando!”. Ci si tiene in stretto contatto, ci si consulta man mano che l’esperimento avanza e spesso è proprio un teorico che ti dà l’imboccata giusta per evitare misure inutili. Qui a Roma, dopo la partenza di Bassani e dei suoi (molto “americani” di impostazione e quindi attenti al nostro lavoro), in tanti anni non è mai accaduto che un nostro risultato sperimentale fosse analizzato e interpretato dai teorici locali (un’eccezione: Carlo Presilla, quando sviluppò per noi la teoria del tunneling verso stati di superficie [86, 87]). Tutto ciò spiega perché i nostri teorici siano difficilmente in grado di capire le diverse esigenze degli sperimentali: non guardando mai in quella direzione, non hanno elementi di giudizio. Un punto, questo, dove non siamo mai riusciti a farci comprendere.

E da che cosa nasce, secondo te, questa differenza tra l’Italia e altre comunità scientifiche?

La divaricazione tra attività sperimentale e attività teorica è molto tipica

dei paesi mediterranei, dove si hanno più forti tradizioni di dogmatismo, umanesimo, retorica. Nei paesi più pragmatici, come quelli anglosassoni e in certa misura anche la Francia, c'è molta più connessione tra gli aspetti matematici e concettuali da un lato e la verifica sperimentale dall'altro: alla maniera di Galileo, per intenderci. Sembra impossibile che Galileo sia stato uno dei nostri! Per lui era inconcepibile che un fisico facesse un'osservazione sperimentale e non fosse poi in grado di trovarne una spiegazione in termini logici e matematici, così da poter progettare futuri esperimenti con maggior cognizione di causa. Oggi invece: compartimenti stagni, uno o fa teoria o fa misure, al più si mette in piedi una collaborazione. Il fisico "completo", come fu anche Fermi, è rarissimo. Non così nel mondo anglosassone, dove lo sperimentale è in media concettualmente più "colto" che da noi, e il teorico alquanto più "pratico" e legato alla fenomenologia. E dove, ciò che più conta, i due ruoli godono di eguale dignità e i gruppi sono misti – teorici e sperimentali insieme – l'elemento associante essendo il soggetto di studio. Devo naturalmente ammettere che, per un teorico, interagire con gli sperimentali italiani non è particolarmente eccitante. Le precarie e vischiose condizioni di lavoro fanno sì che risultati al livello di quelli che escono dai *Bell Labs*, dall'IBM, dal MIT o da tanti altri laboratori sono relativamente rari. Ciò non toglie che ogni tanto arrivi la misura brillante: soltanto qualche anno fa Mario Capizzi, ad esempio, sulla passivazione per idrogenazione dell'effetto dell'azoto nei nitruri diluiti [88, 89, 90] ha avuto la bellezza di quattro o cinque *invited talks* a grandi conferenze internazionali. Però qua dentro la vicenda è passata quasi inosservata. . . Perché: perché domina la cultura della fisica teorica con le iniziali maiuscole. . . la scienza dei materiali rimane ai margini. Anche per questo mi sono un po' allontanato dal lavoro di laboratorio e cerco di rivolgermi ad attività personalmente più gratificanti.

Vuoi dire in sostanza che diventa sempre più difficile mantenere in piedi una buona scuola di sperimentali all'interno del dipartimento?

Fuori dubbio, stiamo andando a passi rapidi verso la cosiddetta indianizzazione della scienza: nel giro di alcuni anni nel campo della fisica della materia condensata saranno tutti teorici, gli sperimentali scompariranno o scenderanno comunque di tono. Anche perché gli studenti migliori, rendendosi conto della difficile situazione finanziaria e degli scarsi sbocchi, per le loro tesi si rivolgono alla componente teorica del dipartimento: tesi più rapide, meno rischiose, e prospettive di borse e di successive sistemazioni

alquanto meno traballanti. È un meccanismo tipico dei paesi a sviluppo rallentato. Poiché le intelligenze non mancano, si fa della buona fisica teorica, che costa assai meno di una moderna apparecchiatura sperimentale. E le cose vanno peggiorando: più la tecnologia diventa sofisticata, meno si può fare della ricerca a livello culinario, chiamiamola così, del tipo cioè che era la norma ai tempi della mia laurea, quando ci fabbricavamo i pezzi in casa. Diversa è la situazione nell'area delle alte energie! Lì i finanziamenti, a partire dal dopoguerra, non sono mancati e sono stati di entità paragonabile a quella degli altri paesi. In quel settore l'Italia si è messa con le spalle al sicuro quando, grazie a Edoardo Amaldi, è entrata nel CERN e ha fondato l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, il quale per un bel po' di tempo ha utilizzato praticamente tutte le risorse nazionali destinate alla ricerca fisica. Gli istituti sorti in tempi più recenti hanno dovuto accontentarsi di quel poco che restava al fondo della pentola. Quindi sono nati sempre faticosamente e in ritardo rispetto agli altri paesi industrializzati. Considera ad esempio l'Istituto Nazionale di Fisica della Materia: quando finalmente abbiamo potuto contare su un ente che valutava i progetti, assegnava i fondi, verificava i risultati, lo hanno chiuso dopo pochi anni di vita, a dispetto dei notevoli successi conseguiti. Basta guardare il cospicuo aumento nel numero delle pubblicazioni su importanti riviste internazionali prima e dopo la nascita dell'Istituto. Resta la dimostrazione che quando c'è un minimo di garanzia sull'entità e sulla continuità dei finanziamenti, quando c'è un'adeguata selezione, quando c'è un nucleo di valutazione della qualità dei risultati, bene, anche in Italia le cose possono funzionare. Purtroppo ora, dopo aver intravisto la possibilità di un recupero del tempo perduto, siamo di nuovo a terra. Anche se rispetto agli anni '60 ci troviamo molti passi avanti, la chiusura dell'Istituto di Fisica della Materia, a parte il drastico taglio nei finanziamenti e la perdita di continuità, è stata un forte elemento di demoralizzazione. Per esempio, ha fatto scappare dai nostri laboratori i giovani migliori degli ultimi anni: non pochi, tra i nostri dottori di ricerca, sono andati all'estero o si sono spostati in ambienti della finanza, dove pare che i fisici abbiano maggior creatività degli altri. È quest'ultimo il caso di Matteo Grassi Alessi, Matteo Bissiri... È un segnale ben forte di assenza di prospettive. Negli anni recenti se ne sono andati tutti: tra i nostri ex-studenti abbiamo dei giovani professori a Cambridge e a Nottingham in Inghilterra, e poi in Germania e in Francia, ossia in paesi che pure hanno i loro problemi. Amalia Patanè per esempio, che ha fatto

il dottorato qualche anno fa con Mario Capizzi, è partita per l'Inghilterra con la prospettiva di una borsa *post-doc* ed è già diventata professore! A lei non interessa rientrare perché gli inglesi le hanno fatto ponti d'oro, ma se anche avessimo voluto cercare di farla tornare a casa... Lo stesso vale per Alessandra Lanzara, dottorata con Antonio Bianconi, che si è sistemata a Stanford,⁹ e per Valentina Emiliani, dottorata con me, che opera benissimo a Parigi con il marito, anche lui fisico italiano ed ex-*Bell Labs*.

15.9 Fisica e musica

Questi sono episodi che servono a illustrare in modo davvero emblematico com'è la situazione attuale. Ma veniamo un po' a cose per te più incoraggianti, come il tuo impegno nella direzione di attività a cui in passato non hai potuto dedicarti, ma che ti hanno sempre interessato, per esempio la narrativa e la musica...

Una volta scrissi un romanzo imperniato sulla vita di Bach [91], ora ho in pubblicazione dei racconti di fantascienza quotidiana [92]. Ma queste attività vanno prese come prove di pre-pensionamento. Un po' meno la musica, visto che tengo anche un corso di Acustica Musicale... Ciò che mi ha sempre tanto colpito è che l'Italia può esibire, nel campo degli strumenti musicali, un passato folgorante: a parte gli Amati, gli Stradivari, i Guarneri, Clementi è l'inventore del pianoforte, Tartini è lo scopritore del famoso terzo suono (l'effetto psicologico di combinare due suoni diversi e udirne un terzo che in realtà non viene prodotto dallo strumento). Adesso la ricerca in quest'area è scomparsa, l'interesse è sceso a zero, nei conservatori si pretende di fare musica innovativa – per esempio elettronica – senza corsi adeguati dove uno possa imparare qualcosa sulle onde acustiche o sull'elaborazione del suono a livello fisiologico e neurale. Non è un caso se molta musica composta nel Novecento (in Italia più che altrove) a giudizio generale del pubblico vale poco. Ho deciso di fare il bimbo della favola che svela la nudità del re discutendone in un libretto appena pubblicato da Rizzoli [93]. Un diplomato di conservatorio si avventura nel mondo come un cieco che cammina in mezzo ai rovi: prima o poi si fa male, non credi? Questa è la situazione. Cui va aggiunto il fatto abbastanza inusuale che le nostre scuole di musica sono estranee all'ambito universitario. E anche la

⁹La Lanzara è stata da poco chiamata a Roma come professore associato.

solita mancanza di mezzi, di fondi, di scuole d'eccellenza, di attenzione a livello politico, che purtroppo affligge la musica tanto quanto la scienza.

Bibliografia

- [1] Study of the fast-state structure at the surface of n -type germanium, *Il Nuovo Cimento* 26, 1205 (1962) [in collaborazione con A. Balzarotti e G. Chiarotti].
- [2] Shift of optical absorption edge by an electric field: modulation of light in the space-charge region of a Ge p - n junction, *Appl. Phys. Letters* 5, 11 (1964) [in collaborazione con P. Handler].
- [3] Franz-Keldysh effect in the space-charge region of a germanium p - n junction, *Physical Review* 137, A1857 (1965) [in collaborazione con P. Handler].
- [4] Direct observation of phonons in silicon by electric-field-modulated optical absorption, *Phys. Rev. Letters* 14, 178 (1965) [in collaborazione con P. Handler].
- [5] Electroabsorption effects at the band edges of silicon and germanium, *Physical Review* 145, 575 (1966) [in collaborazione con P. Handler, F. A. Germano e D. E. Aspnes].
- [6] *La rivoluzione elettronica*, Editori Riuniti, Roma 1981.
- [7] Optical study of surface levels in Ge, *Il Nuovo Cimento* 26, 403 (1962) [in collaborazione con G. Chiarotti, G. Del Signore e G. Samoggia].
- [8] Anomalous Franz-Keldysh effect in the electroreflectance of semiconductors, *Sol. State Commun.* 6, 621 (1968) [in collaborazione con F. Evangelisti].
- [9] Influence of spatially dependent perturbations on modulated reflectance and absorption of solids, *Sol. State Commun.* 7, 155 (1969) [in collaborazione con D. E. Aspnes].
- [10] Combined investigation of nonuniform-field electroreflectance and surface galvanomagnetic properties in germanium, *Physical Review* 182, 795 (1969) [in collaborazione con D. E. Aspnes].
- [11] Electro-optic effect and modulated interference in tantalum oxide films, *Appl. Phys. Letters* 15, 406 (1969) [in collaborazione con P. Migliorato].
- [12] The Ge-aqueous electrolyte interface: electrical properties and electroreflectance at the fundamental direct threshold, *Physical Review B* 2, 1037 (1970) [in collaborazione con D. E. Aspnes].
- [13] Optical gap of strontium titanate (deviation from Urbach's tail behavior), *Phys. Rev. Letters* 25, 1298 (1970) [in collaborazione con M. Capizzi].
- [14] Distortion-enhanced optical absorption in SrTiO_3 at the cubic-to-tetragonal transition, *Phys. Rev. Letters* 29, 1741 (1972) [in collaborazione con M. Capizzi].
- [15] Thermomodulation experiments at the cubic-to-tetragonal phase transition in SrTiO_3 , *Surface Science* 37, 258 (1972) [in collaborazione con M. Capizzi e Q. Taccetti].

- [16] Split-off exciton and phonon dependent lineshape at the optical edge of silicon, *Sol. State Commun.* 11, 611 (1972) [in collaborazione con F. Evangelisti, M. Zanini e E. O. Kane].
- [17] Mass reversal effect in the split indirect exciton in Ge *Phys. Rev. Letters* 34, 1572 (1975) [in collaborazione con G.A. Thomas, T.A. Miller e E.O. Kane].
- [18] Electric-field-induced interference effects at the ground exciton level in GaAs, *Phys. Rev. Letters* 29, 1001 (1972) [in collaborazione with F. Evangelisti e J. U. Fischbach].
- [19] Electro-optical effects at the discrete and continuum exciton states in GaAs, *Surface Science* 37, 841 (1973) [in collaborazione con F. Evangelisti e J.U. Fischbach].
- [20] Dependence of exciton reflectance on field and other surface characteristics: the case of InP, *Physical Review* 9, 1516 (1974) [in collaborazione con F. Evangelisti e J. U. Fischbach].
- [21] Nature of the dead layer in CdS and its effect on exciton reflectance spectra, *Physical Review B* 10, 4253 (1974) [in collaborazione con F. Evangelisti e F. Patella].
- [22] Collision broadening in the exciton gas outside the electron-hole droplets in Ge, *Physical Review B* 13, 1692 (1976) [in collaborazione con G. A. Thomas, J. C. Hensel, R. E. Miller e P. A. Lee].
- [23] Fine structure of the indirect exciton in GaP, *Sol. State Commun.* 24, 801 (1977) [in collaborazione con M. Capizzi, F. Evangelisti, P. Fiorini e F. Patella].
- [24] Uniaxially stressed silicon: Fine structure of the exciton and deformation potentials, *Physical Review B* 17, 4821 (1978) [in collaborazione con J. C. Merle, M. Capizzi e P. Fiorini].
- [25] E-H plasma expansion in direct-gap GaAsP, *Phys. Stat. Solidi* (b) 108, 281 (1981) [in collaborazione con S. Modesti, J. L. Staehli, M. Guzzi, M. Capizzi].
- [26] High-excitation luminescence in direct-gap GaAsP: E-H plasma expansion effects, *J. of Luminescence* 24/25, 581 (1981) [in collaborazione con S. Modesti, L. G. Quagliano, J. L. Staehli e M. Guzzi].
- [27] Electron-hole plasma in direct gap Ga_{1-x}Al_xAs and k-selection rule, *Physical Review B* 29, 2028 (1984) [in collaborazione con M. Capizzi, S. Modesti, J. L. Staehli, M. Guzzi e R. A. Logan].
- [28] A-Si:H produced by double ion-beam sputtering", *J. Noncryst. Solids* 59-60, 723 (1983) [in collaborazione con C. Coluzza, D. della Sala, G. Fortunato, S. Scaglione].
- [29] Gap states in a-Si:H by photoconductivity and absorption, *J. of Non-Crystalline Solids* 55, 191 (1983) [in collaborazione con F. Evangelisti, P. Fiorini, G. Fortunato, C. Giovannella e R. Peruzzi].
- [30] Dual ion-beam sputtering technique for the production of hydrogenated amorphous silicon, *Thin Solid Films* 120, 215 (1984) [in collaborazione con S. Scaglione, C. Coluzza, D. della Sala, L. Mariucci].

- [31] Optical parameters of hydrogenated a-silicon and alloys near the gap, *J. Non-Crystalline Solids* 77-78, 539 (1985).
- [32] Gap state spectroscopy in a-Si_{1-x}C_{1-x}H alloys, *J. Non-Crystalline Solids* 77-78, 853 (1985) [in collaborazione con D. della Sala, P. Fiorini, A. Gregori, A. Skumanich e N. M. Amer].
- [33] Urbach tail and gap states in hydrogenated a-SiC and a-SiGe alloys, *Sol State Commun.* 54, 567 (1985) [in collaborazione con A. Skumanich e N. M. Amer].
- [34] Scattering effects on resonant tunneling in double barrier heterostructures, *J. Appl. Phys.* 65, 3510 (1989) [in collaborazione con B. Gu, C. Coluzza, M. Mangiantini].
- [35] The effect of scattering on electron tunneling mechanism in double barrier heterostructures, *Superlattices and Microstructures* 7, 29 (1990) [in collaborazione con B. Gu, C. Coluzza e M. Mangiantini].
- [36] Defect passivation by hydrogen in III-V semiconductor epitaxial films, *Thin Solid Films*, 193/194, 211 (1990) [in collaborazione con M. Capizzi].
- [37] Picosecond spectroscopy of hydrogenated MBE-GaAs, *Physica B* 170, 561 (1991) [in collaborazione con C. Capizzi, C. Coluzza, P. Frankl, M. Colocci, M. Gurioli, A. Vinattieri e R. N. Sacks].
- [38] Reorientation of the B-H complex in silicon by anelastic relaxation experiments, *Physical Review* B44, 1486 (1991) [in collaborazione con G. Cannelli, R. Cantelli, M. Capizzi, F. Cordero, A. Lo Presti].
- [39] Hydrogen passivation of interface defects in GaAs/AlAs short period superlattices, *Appl. Phys. Letters* 60, 2788 (1992) [in collaborazione con R. Fischer, G. Peter, E.O. Göbel, M. Capizzi, A. Fischer, K. Ploog].
- [40] Hydrogen activated radiative states in GaAs/GaAlAs heterostructures and InGaAs/GaAs multiquantum wells, *J. Appl. Phys.* 72, 1454 (1992) [in collaborazione con M. Capizzi, C. Coluzza, V. Emiliani, P. Frankl, A. Amore Bonapasta, Z. Sobiesierski. R. N. Sacks].
- [41] Effect of ion-gun hydrogenation on the photoluminescence of degenerate n-type GaAs:Si, *Physical Review* B 47, 4321 (1993) [in collaborazione con M. Capizzi, V. Emiliani, e F. Sarto].
- [42] Hydrogen-donor-induced free exciton splitting in GaAs, *Physical Review* B 47, 12563 (1993) [in collaborazione con M. Capizzi, V. Emiliani, e F. Sarto].
- [43] Scattering effects on resonant tunneling in double barrier heterostructures, *J. Appl. Phys.* 65, 3510 (1989) [in collaborazione con B. Gu, C. Coluzza, M. Mangiantini].
- [44] The effect of scattering on electron tunneling mechanism in double barrier heterostructures, *Superlattices and Microstructures* 7, 29 (1990) [in collaborazione con B. Gu, C. Coluzza e M. Mangiantini].
- [45] Defect passivation by hydrogen in III-V semiconductor epitaxial films, *Thin Solid Films*, 193/194, 211 (1990) [in collaborazione con M. Capizzi].
- [46] Picosecond spectroscopy of hydrogenated MBE-GaAs, *Physica B* 170, 561

- (1991) [in collaborazione con C. Capizzi, C. Coluzza, P. Frankl, M. Colocci, M. Gurioli, A. Vinattieri e R. N. Sacks].
- [47] Reorientation of the B–H complex in silicon by anelastic relaxation experiments, *Physical Review B* 44, 1486 (1991) [in collaborazione con G. Cannelli, R. Cantelli, M. Capizzi, F. Cordero, A. Lo Presti].
- [48] Effect of ion–gun hydrogenation on the photoluminescence of degenerate n -type GaAs:Si, *Physical Review B* 47, 4321 (1993) [in collaborazione con M. Capizzi, V. Emiliani, e F. Sarto].
- [49] Hydrogen–donor–induced free exciton splitting in GaAs, *Physical Review B* 47, 12563 (1993) [in collaborazione con M. Capizzi, V. Emiliani, e F. Sarto].
- [50] Scattering effects on resonant tunneling in double barrier heterostructures, *J. Appl. Phys.* 65, 3510 (1989) [in collaborazione con B. Gu, C. Coluzza, M. Mangiantini].
- [51] The effect of scattering on electron tunneling mechanism in double barrier heterostructures, *Superlattices and Microstructures* 7, 29 (1990) [in collaborazione con B. Gu, C. Coluzza e M. Mangiantini].
- [52] Defect passivation by hydrogen in III–V semiconductor epitaxial films, *Thin Solid Films*, 193/194, 211 (1990) [in collaborazione con M. Capizzi].
- [53] Picosecond spectroscopy of hydrogenated MBE–GaAs, *Physica B* 170, 561 (1991) [in collaborazione con C. Capizzi, C. Coluzza, P. Frankl, M. Colocci, M. Gurioli, A. Vinattieri e R. N. Sacks].
- [54] Reorientation of the B–H complex in silicon by anelastic relaxation experiments, *Physical Review B* 44, 1486 (1991) [in collaborazione con G. Cannelli, R. Cantelli, M. Capizzi, F. Cordero, A. Lo Presti].
- [55] Effect of ion–gun hydrogenation on the photoluminescence of degenerate n -type GaAs:Si, *Physical Review B* 47, 4321 (1993) [in collaborazione con M. Capizzi, V. Emiliani, e F. Sarto].
- [56] Hydrogen–donor–induced free exciton splitting in GaAs, *Physical Review B* 47, 12563 (1993) [in collaborazione con M. Capizzi, V. Emiliani, e F. Sarto].
- [57] Hydrogen ion–beam induced changes in the photoluminescence of GaSb/AlSb MQW structures, *Superlattices and Microstructures* 5, 297 (1989) [in collaborazione con M. Capizzi, C. Coluzza, A. Forchel].
- [58] Hydrogen ion–beam induced changes in the photoluminescence of GaSb/AlSb MQW structures, *Superlattices and Microstructures* 5, 297 (1989) [in collaborazione con M. Capizzi, C. Coluzza, A. Forchel].
- [59] Hydrogen passivation of interface defects in GaAs/AlAs short period superlattices, *Appl. Phys. Letters* 60, 2788 (1992) [in collaborazione con R. Fischer, G. Peter, E.O. Göbel, M. Capizzi, A. Fischer, K. Ploog].
- [60] Hydrogen activated radiative states in GaAs/GaAlAs heterostructures and InGaAs/GaAs multiquantum wells, *J. Appl. Phys.* 72, 1454 (1992) [in collaborazione con M. Capizzi, C. Coluzza, V. Emiliani, P. Frankl, A. Amore Bonapasta, Z. Sobiesierski. R. N. Sacks].

- [61] Hydrogen passivation of interface defects in GaAs/AlAs short period superlattices, *Appl. Phys. Letters* 60 2788 (1992) [in collaborazione con R. Fischer, G. Peter, E.O. Göbel, M. Capizzi, A. Fischer, K. Ploog].
- [62] Luminescence efficiency of Near-Surface Quantum Wells Before and after Ion-gun Hydrogenation, *Appl. Phys. Letters*, 62, 2697 (1993) [in collaborazione con Y.-L. Chang, I.-S. Tan, Y.-H. Zhang, J. L. Merz, E. L. Hu, e V. Emiliani].
- [63] Exciton Confinement in GaAs Quantum Barriers, *Physical Review B* 48, 1643 (1993) [in collaborazione con F. Martelli, M. Capizzi, A. Polimeni, F. Sarto, M. R. Bruni, e M. G. Simeone].
- [64] Giant photoluminescence enhancement in deuterated highly strained InAs/GaAs quantum wells, *Appl. Phys. Letters* 65, 1254 (1993) [in collaborazione con A. Polimeni, D. Marangio, M. Capizzi e F. Martelli].
- [65] Study of hydrogenation on near-surface strained and unstrained quantum wells, *Appl. Phys. Letters* 75, 3040 (1994) [in collaborazione con Y.-L. Chang, I.-H. Tan, E. L. Hu, J. Merz, e V. Emiliani].
- [66] Tunneling and relaxation of photogenerated carriers in near-surface quantum wells, *J. of Applied Physics* 77, 5712 (1995) [in collaborazione con V. Emiliani, B. Bonanni, M. Capizzi, F. Martelli e S.-S. Stone].
- [67] Optical investigation of carrier tunneling in semiconductor nanostructures, *Physical Review B* 56, 4807 (1997) [in collaborazione con V. Emiliani, S. Ceccherini, F. Bogani, M. Colocci e S. S. Shi].
- [68] Optical properties of InAs quantum dots: Common trends, *Physical Review B* 59, 7620–23 (1999) [in collaborazione con M. Grassi Alessi, M. Capizzi, A. S. Bhatti, F. Martelli, P. Frigeri, A. Bosacchi, e S. Franchi].
- [69] Charged excitonic complexes in GaAs/Al_{0.35}Ga_{0.65}As *p-i-n* double quantum wells, *Physical Review B* 60, 8897 (1999) [in collaborazione con V. M. Timofeev, A. V. Larionov, M. Grassi Alessi, M. Capizzi, e J. M. Hvam].
- [70] Optical Evidence of Polaron Interaction in InAs/GaAs Quantum Dots, *Physical Review B* 62, 4642 (2000) [in collaborazione con M. Bissiri, G. Baldassarri Höger von Högersthal, A. S. Bhatti, M. Capizzi, P. Frigeri, and S. Franchi].
- [71] Atomic Equilibrium Concentrations in (InGa)As Quantum Dots, *Applied Physics Letters* 78, 3121–3123 (2001) [in collaborazione con M. Galluppi, M. Capizzi, F. Boscherini, P. Frigeri, S. Franchi, e A. Passaseo].
- [72] High temperature photoluminescence efficiency and thermal stability of (InGa)(AsN) quantum wells, *Appl. Phys. Letters* 79, 2585–2587 (2001) [in collaborazione con M. Bissiri, V. Gaspari, A. Polimeni, G. Baldassarri Höger von Högersthal, M. Capizzi, M. Fischer, M. Reinhardt, and A. Forchel].
- [73] *Perché accade ciò che accade*, RCS–BUR, Milano 1995.
- [74] *Luce colore visione*, RCS–BUR, Milano 2000.
- [75] *La fisica sotto il naso*, RCS–BUR, Milano 2001.
- [76] *Ragione per cui*, RCS–BUR, Milano 2005.
- [77] *Fisica nella Musica*, Zanichelli, Bologna 1999.

- [78] *Parola di Galileo*, RCS–BUR 1998 [in collaborazione con M. Marenzana]; edizione inglese: *Thus Spoke Galileo*, Oxford Univ. Press, Oxford 2006.
- [79] *L'occhio di Galileo – Schegge di scienza quotidiana*, rubrica fissa sul mensile *Newton*, RCS Milano
- [80] The electron–hole system in GaSe at high densities, *Sol. State Commun.* 23, 45 (1977) [in collaborazione con Ph. Schmid e A. Grisel].
- [81] Excitation–induced–absorption and luminescence at the GaSe exciton, *Sol. State Commun.* 26, 203 (1978) [in collaborazione con J. L. Staehli e Ph. Schmid].
- [82] Changes of the excitonic spectra of GaSe induced by optical excitation, *Physica* 99B, 299 (1980) [in collaborazione con J. L. Staehli].
- [83] Effect of strong electric fields on the electroreflectance spectrum of conducting ferroelectric crystals, *Phys. Rev. Letters* 16, 688 (1966) [in collaborazione con P. J. Boddy].
- [84] Optical field–effects and band structure of some perovskite–type ferroelectrics, *Physical Review* 153, 606 (1967) [in collaborazione con P. J. Boddy].
- [85] Electromodulation of the optical constants of rutile in the UV, *Physical Review* 157, 700 (1967) [in collaborazione con P. J. Boddy e Y. S. Chen].
- [86] Self–consistent model for ambipolar tunneling in quantum–well systems, *Semicond. Sci. Technol.* 10, 577 (1995) [in collaborazione con C. Presilla e V. Emiliani].
- [87] Interaction mechanisms of near–surface quantum wells with oxidized and H–passivated AlGaAs surfaces, *J. Appl. Phys.* 75, 5114 (1994) [in collaborazione con V. Emiliani, B. Bonanni, C. Presilla, M. Capizzi, Y.–L. Chang, I.–H. Tan, J. Merz, M. Colocci, e M. Gurioli].
- [88] Nitrogen related complexes in Ga(AsN) and their interaction with hydrogen, *Physica status solidi* (2002) [in collaborazione con M. Bissiri, V. Gaspari, G. Baldassarri Höger von Högersthal, F. Ranalli, A. Polimeni, M. Capizzi, M. Fischer, M. Reinhardt, and A. Forchel].
- [89] Role of hydrogen in III–N–V compound semiconductors, *Semicond. Sci. Technol.* 17, 797–802 (2002) [in collaborazione con A. Polimeni, G. Baldassarri Höger von Högersthal, M. Bissiri, M. Capizzi, M. Fischer, M. Reinhardt, and A. Forchel].
- [90] Tunable variation of the electron effective mass and exciton radius in hydrogenated GaAsN, *Physical Review B* 69, 041201 (2004) [in collaborazione con A. Polimeni, G. Baldassarri Hoeger von Hoegersthal, F. Masia, M. Capizzi, Simone Sanna, Vincenzo Fiorentini, P. J. Klar, e W. Stolz].
- [91] *Bravo Sebastian*, Sansoni, Firenze 1989 (ristampa Bompiani 2007).
- [92] *L'ultimo esperimento*, Il Filo, Roma 2006.
- [93] *Armonia celeste e dodecafonia*, RCS–BUR, Milano 2006.