

L'opera scientifica di Antonio Carrelli

Roberto Raimondi

Dipartimento di Fisica, Università Roma Tre
Via della Vasca Navale 84, 00146 Roma, Italia

1 Introduzione

Negli ultimi anni vi è un crescente interesse per lo sviluppo storico della fisica in Italia nel corso del Novecento. Tale interesse si indirizza in alcuni casi verso la vita e l'opera dei protagonisti, come nel caso dei libri di Luisa Bonolis [Bonolis, 2008a, Bonolis, 2008b], mentre in altri si prende in esame l'evoluzione di un determinato settore della fisica, come quello dei semiconduttori trattato da Marco Luca Rossi [Rossi, 2006]. Un quadro d'insieme della fisica italiana del Novecento lo si trova, ad esempio, nella recente opera, di più ampio respiro di Lucio Russo ed Emanuela Santoni [Russo, 2010]. Antonio Carrelli [DBI] è stato, senza dubbio, uno dei protagonisti della fisica italiana, soprattutto della prima metà del Novecento, ma la sua opera non è stata oggetto di studio specifico. Nel volume, curato da Alda Croce, Fulvio Tessitore e Domenico Conte, dedicato a Napoli e alla Campania, Borrelli e Gatto dedicano alcune pagine a Carrelli parlando dell'insegnamento delle scienze fisiche a Napoli [Borrelli, 2002]. Più attenzione gli dedica, nello stesso volume, Roberto Maiocchi [Maiocchi, 2002] discutendo della fisica a Napoli nel Novecento. Forse il ritratto più completo è quello fornito da Luigi Radicati di Brozolo nel discorso commemorativo tenuto all'Accademia dei Lincei il 12 dicembre 1981 [Radicati, 1981]. In queste opere, però, è difficile trovare informazioni dettagliate sull'opera scientifica di Antonio Carrelli, quale la bibliografia delle sue pubblicazioni scientifiche e l'illustrazione dei suoi contributi. Ritengo che tale studio sia interessante perchè Carrelli operò in un periodo di grande rinnovamento della fisica e la sua vicenda personale può costituire un esempio tipico del travaglio intellettuale dei fisici, in particolare italiani, di quel periodo. Carrelli, inoltre, con la sua vita ed opera scientifica, incarna in modo emblematico l'uomo del Novecento. Ciò è evidente, ad esempio, nei temi scientifici oggetto delle sue indagini. Quando Carrelli si laurea, nel 1921, la teoria della Relatività è apparsa da poco sulla scena scientifica e la moderna teoria quantistica deve ancora nascere. Negli ultimi suoi lavori, Carrelli si occupa delle proprietà dei semiconduttori, i materiali

che hanno completamente rivoluzionato la nostra vita quotidiana e continuano a farlo.

Da queste considerazioni nasce l'idea di questo contributo dedicato all'opera scientifica di Antonio Carrelli. Nelle pagine che seguono mi limiterò alla parte propriamente scientifica, in quanto la biografia di Antonio Carrelli non si esaurisce con la sua opera di scienziato e docente. Dopo la guerra si trovò impegnato nell'opera di ricostruzione dell'Italia assumendo impegni pubblici a livello nazionale ed internazionale.

Il piano di questa presentazione è articolato nel modo seguente. Nel secondo paragrafo viene fornito un ritratto biografico di Antonio Carrelli. Il paragrafo successivo è dedicato ad uno sguardo d'insieme della sua opera scientifica. Il quarto, quinto e sesto paragrafo esaminano in maggior dettaglio i periodi in cui può essere suddivisa la sua attività. Questi paragrafi possono essere omessi se non si è interessati ai dettagli dei contributi scientifici. Il settimo paragrafo esamina alcuni aspetti dell'insegnamento di Antonio Carrelli, mentre l'ottavo riporta un mio ricordo personale. Il nono paragrafo, infine, riassume le conclusioni di questo lavoro. La bibliografia scientifica di Antonio Carrelli è riportata in fondo, prima della bibliografia generale.

2 La vita

Antonio Carrelli nasce a Napoli il 1 luglio 1900 da Raffaele e da Silvia Scardacione. Raffaele Carrelli è ingegnere e nel corso degli anni Venti dirigerà una parte degli importanti lavori di restauro di Castel Nuovo [Filangieri, 1940]¹. Il giovane Antonio frequenta il Liceo Vittorio Emanuele e a diciassette anni si iscrive all'Università di Napoli per studiare Fisica. Il 26 marzo 1918 è chiamato alle armi nel Primo Reggimento Granatieri. Il 9 settembre diventa Allievo Ufficiale del Genio nell'Accademia Militare di Torino e ottiene il grado di Sottotenente di Complemento del Genio il 3 aprile 1919. Il 31 ottobre 1919 viene collocato in congedo e torna agli studi universitari. Nel 1921 si laurea a pieni voti in Fisica sotto la supervisione di Michele Cantone. Carrelli ricorderà l'opera di Cantone nel 1933, quando gli succederà alla direzione dell'Istituto di Fisica [60]. È interessante notare che Carrelli non pubblica nessun articolo con Cantone, segno probabilmente di una autonomia intellettuale presente sin dal lavoro di tesi. Da Cantone, Carrelli acquista l'interesse verso i fenomeni magnetoelastici e ferromagnetici, che ricorrono in diversi periodi della sua vita, ed in modo particolare negli ultimi anni di attività. Carrelli, inoltre, nel ricordare Cantone, gli rende merito per l'opera di ammodernamento delle attrezzature sperimentali dell'Istituto di Fisica e dell'arricchimento

¹Ringrazio Giulio Raimondi per aver richiamato la mia attenzione su questo punto.

della Biblioteca. Nei suoi lavori negli anni Venti, Carrelli mostra un'ottima conoscenza sia della Fisica Classica che dei suoi più moderni sviluppi della Relatività, della teoria quantistica di Bohr e della teoria del moto Browniano di Einstein.

Nel 1921, Carrelli si reca a Berlino a lavorare con Peter Pringsheim con cui pubblica due importanti lavori. Dopo la laurea accetta, nel 1921, un posto di Assistente presso l'Istituto di Mineralogia dove resta fino al 1924, quando diventa Assistente presso l'Istituto di Fisica. In questo periodo vince una delle borse di perfezionamento del Comitato Nazionale Scientifico Tecnico.

Il 12 dicembre 1924, Carrelli consegue la Libera Docenza in Fisica Sperimentale. La Commissione è composta dai professori Michele Cantone, Antonio Garbasso ed Orso Mario Corbino. All'epoca le spese sostenute dalla Commissione giudicatrice erano a carico del candidato. Dall'incartamento relativo al procedimento per la libera docenza [ACSa], apprendiamo che Carrelli versò la cifra di mille lire. Altre cinquecento lire erano invece dovute come tassa per la libera docenza.

Benchè molto giovane, Carrelli ha già un notevole curriculum: presenta 12 pubblicazioni, di cui due in collaborazione con Peter Pringsheim. Nella Relazione finale la Commissione rileva che “...*il candidato si è occupato principalmente di questioni di ottica e in modo speciale di quelle attinenti all'assorbimento e alla luminescenza manifestando coi titoli e con la conoscenza su di essi, elevato spirito di osservazione, conoscenze teoriche vaste e un acuto senso critico, nonostante, per la giovane età, abbia iniziato da poco la sua attività scientifica.*” [ACSa]

Il senso critico e la rapidità nel cogliere gli aspetti salienti di un fenomeno fisico è una qualità che tutti sempre riconosceranno a Carrelli. In un'intervista rilasciata a Giuseppe Giuliani nel novembre del 1983, Piero Caldirola, professore presso l'Università di Milano, ricorda che “*Era professore a Napoli, era stato in Germania [...] era uno dei pochi sperimentali che aveva una certa conoscenza di Fisica teorica. [...] aveva quel feeling dei napoletani che tu non finivi di parlare e lui ti dava la risposta, 80 volte su 100 la indovinava, era veramente uno brillante, lavorava in spettroscopia.*” [Bonizzoni, 2002].

Per ottenere la libera docenza, al candidato veniva richiesto di svolgere una conferenza sui titoli, una prova sperimentale e una prova didattica. Visto il suo curriculum sperimentale, Carrelli viene dispensato dalla prova sperimentale. Nella prova didattica viene sorteggiato il tema *Il secondo principio della termodinamica*.

Probabilmente le vaste conoscenze teoriche consentono a Carrelli, nel periodo 1924-1930, di ottenere l'incarico per il corso di Fisica Teorica presso l'Università di Napoli. Carrelli continuerà a tenere il corso di Fisica Teorica, anche dopo il suo ritorno a Napoli nel 1932 alla Cattedra di Fisica Sperimentale. A parte la breve parentesi di Majorana nel 1938, Carrelli, insieme alla Fisica Sperimentale, insegnerà la Fisica Teorica fino agli anni Cinquanta. Questo suo impegno è documentato nelle varie edizioni dei suoi appunti di Fisica Teorica [160, 161, 162, 164, 165] di

cui sono a conoscenza diretta e di cui torneremo a parlare in seguito nel settimo paragrafo.

Gli anni tra il 1924 ed il 1930 sono molti intensi di attività scientifica. Carrelli è tra i primi in Italia, ed il primo a Napoli, ad occuparsi della nuova Meccanica Quantistica introdotta nel 1924-1925 da Heisenberg e Schrödinger. Questa attività viene riconosciuta con il conferimento del Premio Sella nell'ottobre del 1926 da parte dell'Accademia dei Lincei. La Commissione giudicatrice, che è composta da Garbasso, Corbino e Cantone, scrive “ *che avendo preso in esame l'operosità scientifica negli Istituti fisici universitari da parte di Aiuti ed Assistenti nel triennio 1924-26, in base ad un giudizio comparativo, ha creduto di dover fermare la sua attenzione sui lavori eseguiti nel detto periodo dal dott. Antonio Carrelli. ... In tutta questa serie di lavori il Carrelli, oltre a dare prova di abilità sperimentale, mostra di possedere un'estesa coltura in molteplici rami di fisica teorica, e specialmente quelli in cui si svolge ai nostri giorni tanta parte di attività nel mondo fisico.* ” [AALb] Risulta inoltre uno dei tre vincitori del concorso per il miglior lavoro sulla teoria dei quanti, bandito dall'Accademia Pontificia dei Nuovi Lincei. L'11 maggio 1929 diviene Socio Corrispondente della Società Reale di Napoli nella sezione dell'Accademia di Scienze Fisiche e Matematiche.

Durante il 1927, Carrelli trascorre un altro periodo a Berlino dove continua la collaborazione con Pringsheim. Torna ancora a Berlino durante l'estate del 1928 per lavorare sull'effetto Raman, scoperto nel febbraio dello stesso anno. Carrelli è tra i primi in Italia ed anche nel mondo a capire l'importanza di tale effetto per lo studio delle proprietà della materia. A tale argomento dedicherà numerosi lavori, sia teorici che sperimentali. Questo è forse il suo periodo scientificamente più creativo.

Il 5 novembre 1930, Carrelli vince il concorso a cattedra di Fisica Sperimentale dell'Università di Catania. Franco Rasetti e Mariano Pierucci completano la terna vincitrice. Tra i 12 candidati partecipanti al concorso, è tra i più giovani insieme a Franco Rasetti e Gleb Wataghin. Ciò nonostante, è tra quelli che presentano un miglior curriculum sia per il numero di pubblicazioni originali che per l'attività didattica svolta. Nella relazione finale della Commissione giudicatrice, composta dai professori Quirino Maiorana, Antonino Lo Surdo, Giuseppe Grassi Cristaldi, Michele La Rosa ed Alessandro Amerio, si legge “*La Commissione esauriti così l'esame e la discussione dei titoli dei candidati, rileva che tra questi emergono in modo evidente il CARRELLI ed il RASETTI. Tutti gli altri che sono ritenuti idonei seguono a notevole distanza ...*”. [ACSb]

Carrelli presenta 45 pubblicazioni, di cui 29 teoriche e 16 sperimentali, una produzione notevole tanto più che ottenuta, come nota ancora la Commissione, in soli nove anni. Franco Rasetti, laureatosi un anno dopo di lui, nel 1922, presenta 25 pubblicazioni. È da notare che solo due candidati presentano un numero maggiore

di pubblicazioni, cioè 53 e 49, ma con un'anzianità di laurea di circa vent'anni maggiore. È utile qui riportare nuovamente il giudizio finale della Commissione *“Dal complesso di questa attività scientifica, tanto più notevole in quanto svolta in soli nove anni, risulta l'ottima preparazione teorica di questo candidato nelle più moderne questioni di fisica, e poichè la notevole produzione sperimentale è spesso complemento della trattazione teorica e talvolta ne è lo spunto, il Carrelli si palesa un forte cultore di fisica, specialmente indirizzato alle questioni teoriche. Data poi la sua carriera didattica la Commissione è unanime nel ritenerlo altamente meritevole di una cattedra di fisica sperimentale [ACSB].”*.

A guardare la produzione di Carrelli fino al 1930, si rimane colpiti dal fatto di come essa sia pienamente inserita nel contesto internazionale dell'epoca, considerando il fatto che ha appena trent'anni e, a parte i soggiorni berlinesi, ha lavorato in modo completamente autonomo. Sicuramente è in contatto con il gruppo di Fermi a Roma, con cui è in cordiali rapporti. Nella biografia di Enrico Fermi scritta da Segrè si riporta una lettera, dove i due Enrico, Fermi e Persico, in occasione del Concorso di Fisica Teorica del 1926, discutendo sui probabili candidati, oltre a loro due, menzionano appunto Carrelli. Il concorso del 1926 sarà poi vinto da Fermi, Persico ed Aldo Pontremoli.

A Catania Carrelli resta solo due anni, perchè nel 1932, viene chiamato a Napoli a succedere a Michele Cantone, di cui era stato allievo. A Catania lascia però una buona impressione. Quando nel 1977 diventerà Presidente dell'Accademia dei Lincei, uno dei suoi studenti di Catania gli scriverà *“Ho ancora vivo il ricordo del mio Professore di Fisica presso l'Università di Catania nel 1932. Quanta ammirazione allora per il nuovo, giovane, intelligente e colto docente!”*. [AAL]

A Napoli Antonio Carrelli continua la sua attività scientifica e didattica. Oltre il corso di Fisica Sperimentale, continua a tenere il corso di Fisica Teorica, di cui abbiamo parlato.

Durante il 1932 trascorre un periodo in Olanda a Utrecht con una borsa di studio dell'Accademia d'Italia. Qui frequentando l'istituto di L. S. Ornstein ha modo di apprendere la tecnica di misurazione con il metodo fotografico delle intensità delle righe spettrali [DBI].

Il 7 luglio 1937 viene nominato membro della Commissione per il concorso alla Cattedra di Fisica Teorica presso l'Università di Palermo. Gli altri commissari sono Enrico Fermi, Orazio Lazzarino, Enrico Persico e Giovanni Polvani. Vincitori di questo concorso risulteranno Gian Carlo Wick, Giulio Racah e Giovanni Gentile, jr. Tra i candidati al concorso vi è anche Ettore Majorana. La commissione di concorso decide di chiedere al ministro dell'Educazione Nazionale, Giuseppe Bottai, di chiamare Ettore Majorana, per chiara fama, ad una cattedra di Fisica Teorica. Il ministro accetta la proposta e nomina Majorana Professore di Fisica Teorica presso l'Università di Napoli il 2 novembre del 1937. Nel libro di Guerra e Robot-

ti [Guerra, 2008] si può trovare un resoconto dettagliato degli eventi riguardanti la vicenda di questo concorso. Chiaramente, l'idea di Carrelli era di far crescere intorno a Majorana una scuola di Fisica Teorica, in modo da rendere Napoli uno dei centri più attivi in Italia nella nuova fisica quantistica.

L'attività scientifica di Carrelli è ormai pienamente riconosciuta durante il corso degli anni Trenta. Il 17 dicembre 1933 è diventato Socio Ordinario Residente dell'Accademia Pontaniana ed il 18 giugno 1936 Socio Corrispondente dell'Accademia dei Lincei. Infine il 15 novembre del 1938 diventa Socio Ordinario Residente della Società Reale di Napoli.

Nel 1937 si sposa con Eleonora Lalliccia, figlia dell'avvocato Alessandro Lalliccia e di Laura Rosano, quest'ultima figlia di Pietro Rosano, ministro delle Finanze nel secondo governo Giolitti. Da Eleonora Carrelli avrà tre figli: Fabrizia (1938-1981), Claudio (1941) e Paolo (1945).

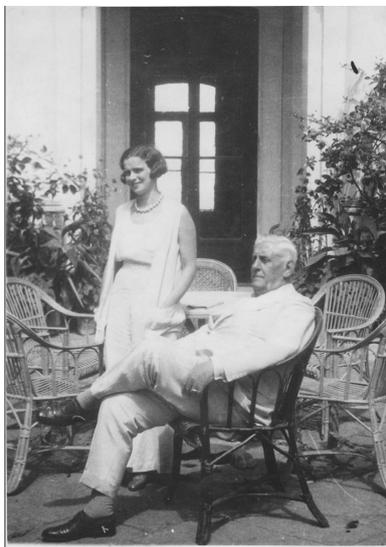


Figura 1: Alessandro Lalliccia con la figlia Eleonora.

Durante la guerra, a causa dei danni riportati dalla sua abitazione, Carrelli si stabilisce a Meta di Sorrento. Durante l'anno accademico 1943-44, l'Istituto di Fisica è inagibile e Carrelli utilizzerà la permanenza forzata a Meta di Sorrento per uno studio teorico e sperimentale della polarizzazione della luce del cielo. Il risultato di tale studio apparirà dopo la guerra in una serie di lavori [85, 86, 87, 88] pubblicati sui Rendiconti dell'Accademia Nazionale dei Lincei. Tale lavoro riguarda l'andamento della polarizzazione della luce solare nel cielo come conseguenza della diffusione causata dalle molecole dell'atmosfera. La teoria ottocentesca di Lord Rayleigh basata sulla diffusione dipolare singola prevede che la luce prove-

niente dalla direzione del sole non sia polarizzata, mentre lo è completamente quella proveniente da una direzione a 90 gradi rispetto al sole. In realtà esistono due cosiddetti punti neutri situati leggermente sopra (punto di Brewster) e sotto (punto di Babinet) la posizione del sole. Carrelli parte dai lavori del tardo Ottocento dei francesi Soret e Hurion e sviluppa una serie di argomentazioni teoriche originali ed effettua una serie di misure. In questo egli nota che può trarre vantaggio dal fatto che ha a disposizione un'ampia parte dell'orizzonte marino. È interessante notare che Carrelli effettua le misure tra il 27 agosto e il 19 settembre 1943, in un momento storico decisamente travagliato. La spiegazione delle anomalie nella polarizzazione, cioè l'esistenza dei punti neutri è stata poi sistematicamente illustrata nella teoria sviluppata negli anni Cinquanta da Chandrasekhar ed Elbert [Chandrasekhar, 1951] prendendo in considerazione la diffusione multipla. Elementi di questa teoria, cioè l'importanza dei processi di seconda diffusione e varie osservazioni di queste anomalie sono nei lavori di Carrelli del 1943 e dimostrano il suo intuito scientifico per temi di ricerca di sicuro futuro sviluppo. Nel lavoro di Michael Berry e collaboratori si può trovare una sintesi aggiornata dello sviluppo di questo problema [Berry, 2004].

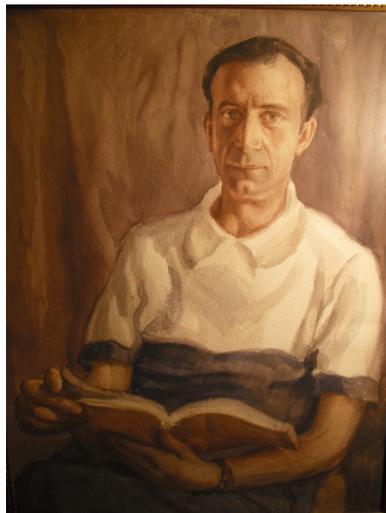


Figura 2: Antonio Carrelli in un ritratto di Roberto Pane, c. 1944, a Sorrento.

L'anno accademico 1943-44 inizia, comprensibilmente, in condizioni difficili. Nel Consiglio di Facoltà del 15 luglio 1976, quando a Carrelli verrà conferito il titolo di professore emerito, Carlo Miranda ricorderà il seguente episodio: “ *quando i tedeschi occuparono Napoli, Adolfo Omodeo, Rettore dell'Università, era bloccato a Salerno; Carrelli andò con la propria barca a prelevarlo e portarlo all'Università di Napoli perchè potesse espletare le proprie funzioni ed avviare il riavvio della attività*

dell'ateneo " [AUN]. Nel libro *Limiti e possibilità della scienza*[175], pubblicato da Carrelli nel 1947, si legge nella dedica "A Marussia Bakunin, Giovanni Malquori, Guido Nebbia, ed alla memoria di Adolfo Omodeo dedico questo lavoro in ricordo di quella fede che animò la nostra attività nell'anno accademico 1943-1944 " .

Quando Napoli passa sotto il controllo Alleato, per continuare ad esercitare il ruolo di professore presso l'Università, Carrelli deve ottenere l'autorizzazione da parte dell'Alto Commissariato aggiunto per l'epurazione, dopo aver compilato un apposito questionario [AUN]. Il 23 febbraio 1944 viene nominato Preside della Facoltà di Scienze della Reale Università di Napoli. Tale nomina è approvata dalla Sottocommissione per l'Educazione del Allied Control Commission.

Dopo la guerra, Carrelli decide di orientare l'attività di ricerca verso quella che oggi definiamo fisica della materia condensata, un campo, all'epoca ancora abbastanza inesplorato in Italia [Rossi, 2006]. Carrelli si occuperà di effetto Hall in metalli, di effetti di propagazione di onde elastiche in liquidi viscosi, di fenomeni di trasporto in soluzioni elettrolitiche, e fenomeni magnetoelastici in ferromagneti.

Intanto, a livello nazionale diventa una delle figure di riferimento negli anni della ricostruzione. Il 4 febbraio 1947 diventa Socio Nazionale dell'Accademia dei Lincei. Per Carrelli comincia così un periodo molto intenso, dove oltre all'attività scientifica e didattica, si affianca quella organizzativa nell'industria e nelle istituzioni. In particolare, nel 1952 viene nominato Vicepresidente della Radiotelevisione italiana e successivamente, nel 1954, Presidente, carica che terrà sino al 1961. In quegli anni ricopre anche l'incarico di Presidente del Consiglio d'Amministrazione della Salmoiraghi e della Microlambda. Il 27 aprile 1961 è eletto Vicepresidente della Società Meridionale di Elettricità.

Intanto nel 1958 muore prematuramente la moglie Eleonora, lasciando Carrelli con tre figli ancora molto giovani. La sorella Teresa sarà per lui un valido aiuto.

Nel 1965, Carrelli si risposa con Lisetta Pellerano, che sarà sua affettuosa compagna fino alla morte. Gli incarichi organizzativi e di prestigio si infittiscono anche a livello internazionale. L'8 aprile 1965 viene eletto Vice-Presidente della Commissione della Comunità Europea per l'Energia Atomica (EURATOM) a Bruxelles e, di conseguenza, è formalmente comandato presso il Ministero degli Affari Esteri il 19 febbraio 1966. Nel 1969, in un volume di studi sulla Comunità europea, Carrelli scriverà un breve contributo sul ruolo giocato dall'Euratom nello sviluppo dello sfruttamento dell'energia nucleare in Europa ed in Italia [178]. Diventa membro del Comitato per le Scienze della Commissione UNESCO. Viene fatto Commendatore della Legion d'Onore di Francia.

Nel 1966 diviene Socio dell'Accademia Nazionale dei XL. Nel 1967 viene chiamato a far parte del Consiglio Superiore delle Poste, delle Telecomunicazioni e dell'Automazione di cui poi diviene Presidente. Viene eletto Presidente anche della Fondazione Ugo Bordoni e della Società Italiana per il Progresso delle Scienze.



Figura 3: Antonio Carrelli con la seconda moglie Lisetta nel maggio del 1974.

Il 28 dicembre 1970 diventa Professore fuori ruolo e lo resta fino al 1 novembre 1976 quando viene collocato a riposo. Il 5 giugno 1976 diventa Socio Emerito della Società di Scienze, Lettere ed Arti di Napoli e il 10 febbraio 1977 Professore Emerito dell'Università di Napoli. Nel 1977 viene eletto Presidente dell'Accademia dei

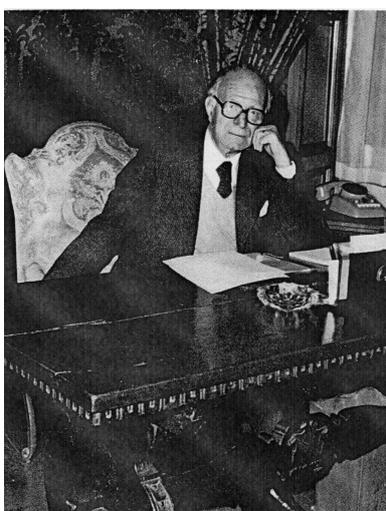


Figura 4: Antonio Carrelli Presidente dell'Accademia dei Lincei, c. 1979.

Lincei, in seguito alla scomparsa di Beniamino Segre. Il 17 maggio 1980 è eletto Membro Straniero della Accademia Olandese delle Scienze. La sera del 25 novembre 1980, due giorni dopo il terribile terremoto dell'Irpinia, Antonio Carrelli muore a Napoli presso la sua abitazione in Via dei Mille 1, a Napoli. Il 12 dicembre 1981,

l'Accademia dei Lincei lo ricorda nelle parole del Socio Luigi Radicati di Brozolo [Radicati, 1981].

3 Uno sguardo sintetico all'opera scientifica di Antonio Carrelli

La lettura degli scritti scientifici di Carrelli rivela in modo netto la vastità e l'eclettismo dei suoi interessi. Egli è stato uno spettroscopista come fisico sperimentale, ma la curiosità per l'oggetto delle sue indagini sperimentali rivela un interesse costante per le questioni teoriche. Ciò è evidente sia dall'interpretazione teorica presente in tutti i lavori sperimentali sia in lavori strettamente teorici, e forse ancora di più in molti scritti di rassegna e divulgativi. Questa vastità di interessi gli ha permesso di individuare linee di ricerca originali ed interessanti.

Volendo schematizzare, l'attività scientifica di Carrelli può dividersi in tre periodi. Il primo che va dal 1921 al 1930 è forse il più entusiasmante in quanto partecipa attivamente al rinnovamento e al fiorire della fisica moderna in Italia. Sono gli anni della nascita della meccanica quantistica e dell'effetto Raman. Questo è un periodo straordinariamente produttivo con circa cinquanta lavori all'attivo. Di tali lavori, a parte quelli in collaborazione con Pringsheim a Berlino o con Went ad Utrecht, Carrelli è unico autore. Abbiamo già riportato il giudizio finale della Commissione giudicatrice del Concorso di Catania del 1930. Al fine di sintetizzare l'attività di questo periodo, può essere utile leggere l'intera analisi della Commissione stessa [ACSB]

“Presenta 45 pubblicazioni: 29 teoriche e 16 sperimentali fra le quali 4 in collaborazione.

Delle prime alcune sono compilative, su questioni moderne molto interessanti quali: la decomposizione elettrica delle righe spettrali; le nuove concezioni statistiche; la teoria dei quanti. Le note originali trattano: la velocità dell'energia raggianti in un mezzo fluorescente e la dispersione nel caso di bande larghe e dissimetriche; il calcolo del coefficiente di diffusione delle radiazioni elettromagnetiche; l'effetto fotoelettrico composto; tutto ciò in base ai concetti più moderni. Trova un doppio periodo nel numero dei magnetoni degli elementi compresi tra il Ca e lo Zn. Importante è il gruppo sulla meccanica ondulatoria dove giunge spesso a notevoli risultati, tanto calcolando il numero delle complessioni relativo alle tre diverse statistiche, quanto studiando il fenomeno di Compton, quanto la teoria della fluorescenza sensibilizzata. Alcune riguardano problemi di diffusione, il fenomeno Tyndall e l'effetto Raman. Di quest'ultimo il Carrelli fa la teoria e dimostra che può essere considerato come un irraggiamento diffuso. Egli dimostra inoltre che tanto l'effetto magnetico di una lamina circolare rotante intorno all'asse e percor-

sa da corrente radiale, quanto la rotazione del piano di polarizzazione prodotta da una sostanza dispersiva rotante, sono trascurabili. La parte sperimentale è spesso coordinata ad alcune delle ricerche teoriche come si vede negli studi sull'effetto Tyndall e sull'effetto Raman che confermano le previsioni teoriche. Sono pure pregevoli lo studio sulla ruota di Barlow, sulla dispersione e sull'assorbimento delle soluzioni di iodio; trova che nelle soluzioni fluorescenti la dispersione ordinaria e la dispersione rotatoria della luce presentano andamento anomalo nella regione assorbente, mentre in quella dell'emissione l'anomalia è presentata solo dalla dispersione ordinaria. Se la luce fluorescente è eccitata da luce polarizzata, essa è polarizzata parzialmente; l'effetto Tyndall eccitato da luce polarizzata dà origine a luce polarizzata totalmente o parzialmente a seconda dei casi e l'emissione è sempre di diversa intensità nelle varie direzioni trasversali del raggio eccitatore. Pregevoli sono infine i lavori sull'allargamento delle righe spettrali. ”

Il secondo periodo, dal 1930 al 1946, che lo vede impegnato nella direzione dell'Istituto di Fisica a Napoli (il soggiorno catanese è in effetti molto breve) e partecipe degli sviluppi della fisica in Italia, è caratterizzato dal maturare del filone di ricerca basato sull'effetto Raman nei liquidi e dallo sviluppo dell'interesse verso le proprietà ottiche dei metalli, anticipando lo sviluppo verso l'attività nella materia condensata del dopoguerra. In tale periodo la produttività scientifica rimane alta, anche se non ai livelli del periodo precedente con circa trentacinque lavori. In questo periodo sono compresi gli anni di guerra, che costringono Carrelli, come del resto tutta la fisica italiana, a rallentare la sua attività. Nel decennio 1940-1950 Carrelli pubblica solo una decina di lavori. Ma sono questi, probabilmente, anni di studio che gli permettono di gettare le basi della ricerca del periodo successivo. Egli è sicuramente tra i primi ad impadronirsi dei concetti della moderna teoria dei solidi, come vedremo più avanti.

Il terzo periodo, dal 1946 fino al 1980, anno della sua morte, vede Carrelli intento allo studio dei fenomeni di trasporto in liquidi e solidi. Anche in questo periodo la produttività rimane alta con circa settanta lavori. A differenza dei primi due periodi, non pubblica quasi più da solo ma ha diversi collaboratori impegnati su diverse linee di ricerca. Gli anni Cinquanta sono particolarmente produttivi come testimoniato dalle serie di lavori con Francesco Cennamo, Flavio Porreca, Lina Rescigno, Ezio Ragozzino, Maria Marinaro, Ercole Grossetti, Umberto Bernini, Carlo Luponio, Francesco Gaeta, Fabio Fittipaldi, Luigi Pauciulo ed altri ancora. In molti di questi lavori colpisce la semplicità e l'efficacia degli apparati sperimentali utilizzati. Carrelli utilizza le tecniche spettroscopiche nei modi più diversi: dallo studio dei reticoli ultrasonori nei liquidi alla misura della fotoconduttività nei semiconduttori.

Credo che l'eredità scientifica di Carrelli a Napoli sia stata poco analizzata da un punto di vista storico e potrebbe essere interessante ricercarne le ragioni.

Sicuramente non vi è stata una tradizione *orale* con una risonanza nazionale come nel caso della scuola di fisica di Roma sviluppatasi intorno a Fermi. Inoltre, credo che un tema di ricerca storico di indubbio interesse può essere quello dei rapporti scientifici tra Carrelli ed il gruppo romano di Fermi, soprattutto all'epoca delle prime ricerche sull'effetto Raman. Infine, Carrelli è sicuramente uno degli iniziatori della fisica della materia condensata in Italia.

Nei paragrafi che seguono entrerà più in dettaglio sui contributi specifici di ogni periodo.

4 Il periodo pionieristico (1921-1930)

4.1 Dalla laurea alla libera docenza e la produzione scientifica tra il 1921-1924

Nelle adunanze della Società Reale del 12 e 19 novembre del 1921, Carrelli presenta due note, (come unico autore) [1] e [2], relative allo studio sperimentale dell'assorbimento e della dispersione della luce in soluzioni di iodio. In particolare si studia come tali fenomeni variano a seconda del solvente utilizzato. In particolare, in [1], si nota come il massimo di assorbimento avviene per una lunghezza d'onda il cui valore dipende dal solvente utilizzato. Si tenta di correlare lo spostamento del massimo con la variazione dell'indice di rifrazione del solvente, senza però trovare una conferma convincente. In [2] si nota che la dispersione della soluzione non si discosta molto da quella del solvente puro. Quello che è interessante in questi lavori, che non hanno un intento particolarmente originale, è il tentativo di interpretare i risultati alla luce delle teorie disponibili, quali quella di Drude. Carrelli conclude che il modello di Drude, che sembra ben funzionare per l'assorbimento nei metalli, non è altrettanto efficace per le soluzioni, la ragione essendo da ricercarsi nei moti vibratorii più complessi nello stato liquido. In due lavori del 1922 [3] e del 1923 [8] indaga se esiste una relazione tra il dicroismo in assorbimento e la fluorescenza delle soluzioni.

Nella adunanza della Società Reale del 30 giugno 1923, Carrelli presenta una nota concernente lo studio della fluorescenza di sostanze organiche in funzione della concentrazione della soluzione [4]. Di interesse è la descrizione dell'apparato sperimentale che egli ha allestito per tale studio: una lampada ad incandescenza illumina dal di sotto, attraverso una fenditura del piano di appoggio, una vaschetta contenente la soluzione della sostanza organica in studio. Trasversalmente alla direzione della luce incidente viene osservata la luce di fluorescenza proveniente dai diversi strati della soluzione. In tal modo viene osservata la fluorescenza al variare della concentrazione. Il risultato osservato consiste in uno spostamento a più basse frequenze della luce di fluorescenza quanto maggiore è la concentrazione.

Nel luglio ed agosto 1923, Carrelli scrive insieme a Peter Pringsheim due articoli sugli effetti della luce polarizzata sulla fosforescenza [5] e sulla fotoluminescenza [6] di sostanze coloranti. Tali lavori vengono svolti durante un soggiorno a Berlino. In questi lavori, come anche in uno presentato alla seduta del 16 dicembre della Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali della Reale Accademia dei Lincei [11], Carrelli studia come la viscosità del solvente determini la polarizzazione della luce di fluorescenza. La viscosità del solvente tende a rallentare la depolarizzazione delle molecole del soluto in modo che queste, una volta che siano eccitate da luce polarizzata linearmente, possano ancora emettere luce linearmente polarizzata.

Sempre nel 1923, Carrelli scrive un articolo di rassegna [7] sulla struttura fine delle righe spettrali sotto l'azione di un campo elettrico, effetto scoperto da Stark e Lo Surdo. In questo articolo, mostra di conoscere molto bene sia la letteratura sperimentale che quella teorica. A livello teorico la vecchia teoria quantistica di Bohr, nelle mani di Sommerfeld, Epstein e Rubinowicz era riuscita a calcolare lo spostamento spettrale e le regole di selezione. Quest'ultime, in particolare, erano state ottenute, considerando che in un salto quantico alla Bohr, oltre alla variazione di energia, ci dovesse essere anche un salto di impulso associato a quello della radiazione elettromagnetica.

In tre lavori tra il 1924 e l'inizio del 1925, si occupa del fenomeno della doppia diffusione della luce. In particolare, in due lavori [9, 12] riporta i risultati di un esperimento nel quale ha osservato il seguente fenomeno. In base alla teoria della diffusione della luce, la luce diffusa è polarizzata ed inoltre, se la luce incidente è polarizzata linearmente, esiste una direzione nella quale non vi è luce diffusa. Questo almeno limitandosi ad una teoria della diffusione al primo ordine perturbativo rispetto all'azione dei centri diffondenti. In questa direzione in cui non vi è diffusione al primo ordine, vi può però essere diffusione per un effetto del secondo ordine. In un lavoro puramente teorico [14], Carrelli calcola il contributo del secondo ordine. Tale contributo ha un'intensità per la luce diffusa dipendente dalla ottava potenza della frequenza, implicando nella luce diffusa lungo la direzione proibita al primo ordine un maggior contenuto di componenti a piccole lunghezze d'onda. In questo lavoro, dimostra una perfetta padronanza della teoria elettromagnetica e di come usarla per calcolare un particolare effetto. L'interesse per la diffusione della luce, lo porterà nell'estate del 1943 a studiare la diffusione della luce solare nell'atmosfera, quando le circostanze belliche renderanno impossibile il lavoro in laboratorio.

In un lavoro pubblicato su *Il Nuovo Cimento* [10], Carrelli si occupa della ruota di Barlow. Questo lavoro mette in luce diverse delle caratteristiche del suo stile scientifico. La ruota di Barlow è un dispositivo formato da un disco conduttore immerso in un campo magnetico perpendicolare al piano del disco. Se viene fatta passare corrente dal centro del disco verso la periferia, la forza di Lorentz agente

sulla corrente provoca un momento rotazionale sul disco. Alternativamente, mettendo in moto la ruota, per induzione, si genera una differenza di potenziale tra centro e periferia del disco. Carrelli analizza dal punto di vista teorico cosa accade se il contatto alla periferia è continuo. Ciò lo porta a concludere che, nel loro moto, gli elettroni trasmettono un impulso ai centri fissi del conduttore. La teoria sviluppata è successivamente verificata da una serie di esperimenti. Vediamo quindi che, partendo da un caso particolare con un certo interesse pratico ed applicativo, si pone alcune domande più generali sul meccanismo della conduzione elettrica dei metalli ed in particolare sui fenomeni galvanomagnetici. Questo sarà uno dei temi ricorrenti durante tutta la sua carriera. Ritorna poi su questo tema, in modo più generale, in un lavoro presentato all'Accademia dei Lincei [13].

4.2 Carrelli libero docente e la produzione tra il 1925 e il 1927

In un lavoro[15] presentato nel febbraio del 1925 alla Società Reale di Napoli, Carrelli deduce in modo originale un risultato ottenuto in precedenza da Brillouin, concernente la velocità di propagazione dell'energia raggianti in un mezzo. Anche questo lavoro appare interessante per analizzare lo sviluppo del suo stile scientifico. Il suo scopo non è tanto quello di ricavare un risultato originale, quanto quello di ottenere il risultato di Brillouin con semplici argomenti in modo da evidenziare il contenuto fisico. L'articolo ha due parti. Nella prima si usa la teoria quantistica di Bohr (siamo nel 1925 e non c'è ancora la meccanica quantistica!). L'argomento è il seguente. In un mezzo l'attenuazione dell'intensità della radiazione è dovuta al fatto che gli atomi del mezzo assorbono tale energia per un certo tempo per poi riemetterla in tutte le direzioni. Se v_1 e c denotano la velocità della radiazione nel mezzo e nel vuoto, il ritardo per unità di lunghezza accumulato dalla radiazione è $\Delta T = 1/v_1 - 1/c$. Poichè il flusso di energia si deve conservare, un rallentamento della velocità della radiazione implica un aumento della densità di energia di radiazione, per modo che $I = c\rho = v_1\rho_1$ con ρ e ρ_1 le densità nel vuoto e nel mezzo. La differenza tra le densità di energia $\rho_1 - \rho$ corrisponde all'energia assorbita per un certo tempo τ dagli atomi. Tale energia momentaneamente assorbita si può calcolare dal coefficiente di attenuazione lineare K (cioè la parte immaginaria del vettore d'onda), come $IK\tau$ e deve essere uguale $\rho_1 - \rho$. Esprimendo quest'ultima differenza in termini del ritardo ΔT , si ottiene

$$\Delta T = K\tau. \tag{1}$$

A questo punto si nota che i valori di ΔT e τ non sono ancora ottenibili dalla teoria quantistica, ma possono essere calcolati in ambito classico usando il modello di Lorentz secondo il quale un elettrone in un mezzo non conduttore può essere

schematizzato come un oscillatore di massa m e carica e con equazione del moto

$$s'' + rs' + \frac{f}{m}s = \frac{e}{m}E \quad (2)$$

dove s è la coordinata dell'oscillatore, f la costante elastica, $r = (8/3)(\pi^2 e^2 / mc^3)\nu_0^2$ una costante che descrive la perdita d'energia per irraggiamento, ν_0 la frequenza propria dell'oscillatore, E il campo elettrico e gli apici indicano la derivata rispetto al tempo. Usando i valori classici dati dalla (2) $K = (4\pi e^2 N)/(2mcr)$ e $\tau = 2/r$ si riottiene la formula di Brillouin

$$\frac{c}{v_1} = 1 + \frac{4\pi e^2 N}{mr^2} \quad (3)$$

dove N è il numero di oscillatori di Lorentz per unità di volume.

Carrelli ritorna poi su questo argomento in un lavoro del 1927 [30], sempre presentato alla Società Reale di Napoli, mostrando che l'equazione (3) può essere dedotta per via puramente classica.

Nel maggio del 1925, Carrelli presenta alla Società Reale di Napoli, un lavoro [16] riguardante il coefficiente di diffusione della radiazione elettromagnetica. Come nel caso del calcolo della velocità dell'energia raggiante, il suo obiettivo non è tanto di ottenere risultati del tutto nuovi, quanto quello di conciliare approcci diversi. Da un lato infatti esiste l'approccio iniziato da Einstein e sviluppato da Lorentz, secondo il quale la diffusione della luce è dovuta a variazioni di densità e quindi di costante dielettrica. Dall'altro vi è l'approccio di J.J. Thomson sviluppato per la diffusione dei raggi X, in base al quale la diffusione è dovuta al moto accelerato degli elettroni atomici supposti quasi liberi. In questo secondo approccio la diffusione degli elettroni è supposta incoerente. Carrelli si propone allora di sviluppare una teoria secondo le idee di Lorentz, ma tale da includere come caso particolare quella di Thomson. A questo scopo formula due ipotesi. La prima è quella di supporre coerente la diffusione da parte di tutti gli elettroni appartenenti agli atomi del mezzo e la seconda di considerare gli elettroni come legati. In particolare per questi utilizza il modello a oscillatore di Lorentz, già discusso in precedenza. Nel considerare la diffusione, considera soltanto un numero di atomi in eccesso o in difetto rispetto al valore medio. Infatti sono questi che determinano una variazione rispetto alla situazione omogenea, per la quale non ci sarebbe diffusione. Tale numero in eccesso o in difetto compare al quadrato nella formula finale ed egli usa il risultato delle fluttuazioni statistiche seguendo la strada indicata da Einstein. Il risultato finale per il coefficiente di diffusione è

$$\rho = \frac{8\pi}{3} \frac{(n^2 - 1)^2}{\lambda^4 N} \quad (4)$$

dove N è il numero di atomi per unità di volume, n il coefficiente di rifrazione e λ la lunghezza d'onda. Tale espressione diventa più esplicita quando si sostituisca a $n^2 - 1$ il valore calcolabile con il modello di Lorentz.

Nel 1926, Carrelli discute [21] le varie interpretazioni concernenti l'effetto fotoelettrico composto nel quale un singolo quanto di luce può produrre una doppia ionizzazione in un atomo, che il fisico francese Pierre Victor Auger aveva scoperto l'anno precedente. Questo lavoro, non particolarmente originale, mostra come il giovane Carrelli sia costantemente in fase con tutti i più recenti sviluppi della fisica. Sempre nel 1926, dedica una nota [19] allo studio del paramagnetismo nella serie di elementi compresi tra il Ca e lo Zn, dove determina il momento magnetico degli atomi a partire dai dati spettroscopici concernenti l'occupazione delle orbite elettroniche.

4.3 L'incontro con la meccanica quantistica tra il 1927 e il 1928

Carrelli comincia ad occuparsi di meccanica quantistica nel 1927. Nel dicembre del 1926, il fisico matematico inglese Harry Bateman aveva proposto [Bateman, 1926] una connessione tra la teoria elettromagnetica di Maxwell e la meccanica ondulatoria in base alla quale i campi elettrico e magnetico possono essere dedotti da due funzioni generatrici soddisfacenti un'equazione d'onda. Nel gennaio del 1927 quest'idea è ripresa da de Broglie [Broglie, 1927], che mostra come, se le due equazioni d'onda soddisfano la simmetria sferica dovuta ad una particella posta nell'origine degli assi, si ottiene l'espressione del campo elettrico di una carica puntiforme. Nel lavoro apparso su Nature [23] nell'aprile successivo, ma inviato il 6 febbraio, Carrelli generalizza il suggerimento di Bateman e de Broglie in modo da ottenere oltre al campo elettrico della carica, il campo magnetico di un dipolo. In tal modo fornisce una possibile spiegazione dello spin elettronico. Nota infine che le due funzioni soddisfacenti l'equazione d'onda non hanno più il significato della teoria di Schrödinger, ma d'altra parte si ha il vantaggio di una connessione con la teoria di Maxwell. La connessione sarà poi risolta negli anni Trenta con la nascita dell'elettrodinamica quantistica. Come in altre circostanze notevole è la rapidità di reazione di Carrelli alla proposta di nuove idee.

In un lavoro presentato all'Accademia dei Lincei [28], Carrelli esplora la possibilità dell'interpretazione idrodinamica della meccanica quantistica. In questi lavori appare chiaro che non ha ancora pienamente accettato la nuova meccanica quantistica nelle sue conseguenze più radicali. Infatti pur padroneggiando il formalismo della nuova meccanica quantistica, tenta ancora di interpretarlo in termini classici. D'altronde l'interpretazione della funzione d'onda come ampiezza di probabilità era stata proposta solo un anno prima da Max Born e non era quin-

di ancora completamente accettata. Al di là però di questo atteggiamento cauto verso il significato della meccanica quantistica, peraltro condiviso da molti della sua generazione, non mostra esitazione nel trarre conseguenze come nei lavori del 1927 [22] e del 1928[32] che trattano delle statistiche quantistiche. In particolare nel lavoro del 1927 si mostra una derivazione alternativa della statistica cosiddetta di Fermi-Dirac, introdotta circa un anno prima da Enrico Fermi e sviluppata da Paul Dirac e Wolfgang Pauli.

Per porre nella giusta luce questo lavoro, è utile richiamare l'origine della statistica classica di Maxwell-Boltzmann, secondo la quale il numero di molecole, n_k , in un stato di energia ϵ_k è proporzionale a

$$n_k \propto e^{-\epsilon_k/kT}, \quad (5)$$

dove T è la temperatura e k è la costante di Boltzmann. Tale risultato, come mostrato da Boltzmann, può essere ricavato in due modi. Nel primo modo si considera l'equazione di Boltzmann che regola l'evoluzione temporale della funzione di distribuzione $n_k(t)$. La distribuzione delle molecole tra i vari stati di energia dipende, oltre alla naturale evoluzione dinamica, anche tra le collisioni tra le molecole. Queste ultime sono descritte, nell'equazione di Boltzmann, dall'integrale degli urti che considera il bilancio tra gli urti che aumentano e quelli che diminuiscono il valore di $n_k(t)$. La distribuzione di equilibrio è quella che per cui l'integrale degli urti si annulla. Se consideriamo ad esempio la collisione in cui due molecole negli stati k ed l , rispettivamente, vanno negli stati k' e l' , la condizione di annullamento dell'integrale degli urti si scrive

$$n_k n_l = n_{k'} n_{l'}. \quad (6)$$

Il significato della (6) è l'uguaglianza di un tasso di avvenimento di un processo e il tasso del processo inverso. Infatti, statisticamente, la probabilità della collisione tra le molecole k ed l è proporzionale al numero di quelle presenti. Usando la conservazione dell'energia totale durante la collisione, la (5) segue dalla (6).

Il secondo modo, sempre introdotto da Boltzmann, consiste nel far vedere che la distribuzione (5) è quella di gran lunga la più probabile in assenza di particolari assunzioni, cioè tra tutte le distribuzioni compatibili con la conservazione del numero di molecole e dell'energia totale.

La strada seguita da Fermi è basata sul metodo della distribuzione più probabile con l'aggiunta della condizione imposta dal principio di esclusione di Pauli. In base a tale principio in un dato stato caratterizzato da un insieme di numeri quantici può trovarsi al massimo una molecola. È naturale allora domandarsi se la statistica di Fermi-Dirac possa anche derivarsi considerando la distribuzione che rende nullo l'integrale degli urti, modificato in modo da tener conto del principio di Pauli.

Questa è la strada seguita da Ornstein e Kramers secondo cui la (6) deve essere sostituita dalla

$$n_k n_l (1 - n_{k'}) (1 - n_{l'}) = n_{k'} n_{l'} (1 - n_k) (1 - n_l). \quad (7)$$

Il significato della (7) è che il tasso di avvenimento di una collisione oltre a dipendere dalla disponibilità di molecole negli stati iniziali, è determinato anche da quella degli stati finali.

L'osservazione di Carrelli a questo punto è che le considerazioni probabilistiche che regolano le collisioni tra le molecole devono anche valere nell'interazione tra radiazione e materia. Infatti, egli parte dal famoso lavoro di Einstein che aveva dedotto la legge dell'energia raggiante di Planck assumendo questa in equilibrio con la materia, cioè in presenza di processi di assorbimento ed emissione. In tale deduzione Einstein aveva assunto che la materia seguisse la distribuzione di Maxwell-Boltzmann e, soprattutto, aveva introdotto i processi di emissione stimolata. L'idea di Carrelli è di rovesciare il ragionamento di Einstein e di dedurre la legge di distribuzione della materia, assumendo che la radiazione segua la legge di Planck. Nel far ciò egli assegna un carattere corpuscolare alla radiazione ed uno ondulatorio alla materia in accordo con il punto di vista della nuova meccanica quantistica. Allora, nel considerare un processo in cui un quanto di luce passa dall'energia E all'energia E' ed un'onda elettronica dalla frequenza ν a quella ν' , egli assume che il tasso di avvenimento sia proporzionale a (cf. le equazioni (1), (1') di [22])

$$N b n_\nu (1 + N') (a' - b' n_{\nu'}), \quad (8)$$

dove i coefficienti a e b sono introdotti in analogia con i famosi coefficienti di Einstein A e B . Scrivendo poi un'espressione simile alla (8) per il processo inverso ed uguagliando i due tassi, nell'ipotesi che N segua la legge di Planck, si ottiene la statistica di Fermi. Pur senza sopravvalutare l'importanza storica del lavoro di questo lavoro che chiaramente si muove nella strada aperta da Fermi, esso mostra la padronanza di Carrelli nelle problematiche teoriche più importanti del 1927 riguardanti lo sviluppo della meccanica quantistica.

Nel lavoro [32], Carrelli collega il carattere delle nuove statistiche alle proprietà di simmetria o di antisimmetria delle funzioni d'onda di un sistema di particelle. A titolo dimostrativo considera il caso unidimensionale di N particelle libere in una scatola. In tale caso la soluzione si scrive in termini di onde piane. Dimostra poi che il numero di soluzioni distinte in accordo con le richieste di simmetria o antisimmetria determina il numero di modi in cui uno dato stato termodinamico può essere determinato. Nel volume dedicato al Nuovo Cimento dalla Società Italiana di Fisica [Bassani, 2006], riguardante una selezione di articoli scritti tra il 1855 e il 1944, questo lavoro è uno dei due articoli di Carrelli inclusi nella raccolta.

4.4 La produzione scientifica tra il 1928 ed il 1930 e l'avvento del Raman

Carrelli si conquista un posto di primo piano nel 1928, quando comincia ad occuparsi, tra i primi in Italia e nel mondo, dell'effetto Raman. Nel febbraio del 1928, il fisico indiano C.V. Raman insieme al suo collaboratore K. S. Krishnan pubblica sulla rivista *Nature* [Raman, 1928] la scoperta che la luce diffusa può avere lunghezza d'onda diversa da quella della luce incidente. In questo primo esperimento la radiazione secondaria ha lunghezza d'onda maggiore, ma in seguito si vedrà che è possibile avere radiazione secondaria anche di lunghezza d'onda minore di quella incidente. Tale scoperta porterà Raman al premio Nobel solo due anni dopo nel 1930 e darà luogo ad una tecnica spettroscopica, che si rivelerà molto potente nell'indagine della struttura della materia. A questo punto è importante guardare alla successione degli eventi che si svolgono in modo molto rapido. Nella seduta del 17 giugno del 1928 presso l'Accademia dei Lincei, il Socio Michele Cantone, presenta una nota di Carrelli [33] dove è svolta la teoria dell'effetto Raman a partire dalla teoria della diffusione sviluppata nella nuova meccanica matriciale da parte di Heisenberg e Kramers alcuni anni prima. Senza dubbio questo è uno dei più importanti contributi originali di Carrelli. La teoria dell'effetto Raman riceverà un trattamento più sistematico circa tra anni dopo ad opera di George Placzek [Placzek, 1931], ma nel giugno del 1928 il lavoro di Carrelli è sicuramente tra le prime descrizioni teoriche dell'effetto. È interessante notare che Placzek sviluppa le sue idee durante un soggiorno a Roma dove collabora con Amaldi e Rasetti, come narrato nei commenti ai lavori di Fermi [Fermi, 1961]. Come vedremo più avanti, Carrelli si mostrerà ben informato sul lavoro di Placzek ed è quindi naturale chiedersi quale sia stata l'interazione tra i due². In questo lavoro egli ha l'obiettivo di stimare le intensità delle cosiddette righe Stokes (luce diffusa a lunghezza d'onda maggiore di quella incidente) e delle righe anti Stokes (luce diffusa a lunghezza d'onda minore di quella incidente) rispetto all'intensità della luce diffusa di Tyndall (alla stessa lunghezza d'onda della luce incidente). Tale spostamento di lunghezza d'onda è dovuto al fatto che il fotone della luce incidente di energia $h\nu$ può, prima di essere riemesso, cedere (Stokes) o acquistare energia (anti-Stokes) interagendo con altri gradi di libertà dinamici dell'atomo o della molecola. Ad esempio, parte dell'energia del fotone può andare ad eccitare un particolare modo oscillatorio della molecola o aumentare la velocità di rotazione.

Veniamo dunque ad una breve descrizione dei risultati ottenuti in questo lavoro. Carrelli parte dall'espressione del momento elettrico indotto da un campo esterno di radiazione oscillante con frequenza ν . Poi osserva come la teoria di Kramers ed Heisenberg implichi, oltre al momento indotto oscillante con la stessa frequenza,

²Ringrazio Francesco Guerra per aver richiamato la mia attenzione su questo punto.

altri due oscillanti con frequenze $\nu + \nu_{QP}$ e $\nu - \nu_{QP}$, dove ν_{QP} è la frequenza relativa ad un salto quantico da uno stato P ad uno stato Q . Per rendere la discussione più semplice egli immagina che il sistema abbia due livelli energetici vicini, E_1 ed E_2 , separati dal resto dei livelli indicati con E_n . Assume quindi che $E_n - E_1, E_n - E_2 \gg E_2 - E_1$ e che ν sia di poco inferiore al salto $E_n - E_2$. Carrelli, quindi, immagina che il sistema abbia N_1 atomi nello stato E_1 e N_2 nello stato E_2 . Per gli atomi nello stato E_1 il momento elettrico indotto oscillante con frequenza ν è dato da

$$M_1 = \frac{1}{2h} \left(\sum_{n \neq 2} \frac{a_{1n}^2 \nu_{n1}}{\nu_{n1}^2 - \nu^2} + \frac{a_{12}^2 \nu_{21}}{\nu_{21}^2 - \nu^2} \right) E \cos 2\pi \nu t, \quad (9)$$

mentre il momento indotto oscillante con frequenza $\nu - \nu_{21}$ è

$$M'_1 = \frac{1}{4h} \sum_n \left(\frac{a_{2n} a_{1n}}{\nu_{n2} + \nu} - \frac{a_{1n} a_{2n}}{\nu_{1n} + \nu} \right) E \cos 2\pi(\nu - \nu_{21})t. \quad (10)$$

Per gli atomi che si trovano inizialmente nello stato E_2 si possono scrivere espressioni analoghe. Il momento indotto M'_2 oscilla con frequenza $\nu + \nu_{21}$. In queste formule le quantità a_{1n} rappresentano le ampiezze quantistiche di passaggio tra lo stato E_1 e E_n . Più precisamente sono gli elementi di matrice di dipolo elettrico dell'atomo o della molecola e sono gli stessi elementi di matrice che controllano gli spettri di assorbimento. Carrelli indica come uno dei risultati importanti di un trattamento quantistico dell'effetto Raman il fatto che il rapporto delle intensità delle righe anti-Stokes rispetto alle Stokes è dato da

$$\frac{I_{aS}}{I_S} \sim \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2. \quad (11)$$

Gli preme, infatti, sottolineare questo punto in quanto discussioni alternative dell'effetto in letteratura indicavano come uguali le due intensità. Carrelli, infine, stima il rapporto tra l'intensità della radiazione Raman rispetto alla radiazione Tyndall e trova che la Raman è circa mille volte meno intensa considerando la frequenza corrispondente a $E_2 - E_1$ nell'infrarosso e $E_n - E_1$ nell'ultravioletto. Come lui stesso noterà in un lavoro successivo [50], la formula ottenuta per quest'ultima stima contiene un errore di calcolo.

Dopo questo lavoro teorico, Carrelli si mette a lavoro dal punto di vista sperimentale. Torna a Berlino da Pringsheim, dove insieme a lui e a B. Rosen pubblica nell'agosto del 1928 sul *Zeitschrift für Physik* [37] uno studio dell'effetto Raman in soluzioni acquose e della polarizzazione della radiazione Raman. In questo lavoro per la prima volta viene messo in luce il fatto che frequenze che corrispondono a transizioni tra stati quantici che sono proibite in assorbimento ed emissione, cioè sono otticamente inattive, possono invece essere presenti nello spettro Raman.

Tale priorità viene riconosciuta da Franco Rasetti in un lavoro insieme a R.G. Dickinson and R.T. Dillon [Dickinson, 1929]. Carrelli dunque studia soprattutto l'effetto Raman nei liquidi, mentre Rasetti in America comincia a studiarlo nei gas e pubblicherà un importante lavoro nel 1929 [Rasetti, 1929].

Nella seduta del 29 ottobre del 1928 [41] presso l'Accademia dei Lincei, Carrelli presenta una nota dove illustra i risultati di un'indagine dello spettro Raman per il tetracloruro di carbonio (CCl_4) e per il tetracloroetano ($C_2H_2Cl_4$) avente lo scopo di misurare l'intensità relativa delle righe Stokes e anti-Stokes. A differenza del lavoro di giugno, presenta l'espressione teorica del rapporto delle intensità

$$\frac{I_{aS}}{I_S} = e^{-2h\nu_{21}/kT} \quad (12)$$

e procede a desumere il valore sperimentale mediante un'analisi degli annerimenti delle lastre fotografiche utilizzate per la misura. Per entrambe le sostanze studiate egli ottiene un valore del rapporto I_{aS}/I_S e dalla conoscenza delle frequenze Raman è in grado di ottenere il valore sperimentale del rapporto h/k , che trova essere in buon accordo con quello noto. In questo stesso lavoro si occupa teoricamente della polarizzazione della luce Raman ottenendo formule esplicite per l'intensità corrispondenti alle varie polarizzazioni.

L'anno seguente Carrelli continua ad occuparsi del Raman dal punto di vista teorico considerando la possibilità che tale effetto possa manifestarsi in ambito puramente elettronico. L'idea è che l'energia persa dal fotone incidente possa promuovere un elettrone da un livello interno dell'atomo (livello X) ad un livello periferico. Tale idea è un analogo dell'effetto Compton con la differenza che lo stato finale dell'elettrone non è nel continuo ma è ancora uno stato legato. I lavori del 1926 sui livelli X [17] e sulle righe semiottiche [18] costituiscono probabilmente la base teorica da cui si sviluppa il suo ragionamento. Egli presenta la sua idea di un effetto Raman elettronico preoccupandosi di farle avere risonanza internazionale. Accanto ad una versione estesa dei calcoli pubblicata sul Rendiconto dell'Accademia delle Scienze Fisiche e Matematiche nel dicembre del 1929 [49], Carrelli pubblica due versioni più concise su Nature [48] e sullo Zeitschrift für Physik [47]. In questo lavoro Carrelli utilizza il formalismo della funzione d'onda di Schrödinger, dimostrando che ormai si muove a proprio agio nelle diverse formulazioni della meccanica quantistica. Il risultato più importante di questo lavoro è il calcolo relativo dell'intensità della luce Raman rispetto alla luce Tyndall. Ad esempio nel caso in cui la frequenza Raman corrisponda ad un salto elettronico dal livello K ad un livello ottico esterno di simmetria s , trova che tale rapporto è

$$R \sim Z^{-3} \frac{1 + E_l/4E_k}{1 + E_l/E_k} \quad (13)$$

dove E_l è l'energia di un elettrone Compton generato dalla frequenza della luce incidente, mentre E_k è l'energia dello stato legato nel livello K. Ottiene poi svariate

altre formule a seconda del salto elettronico. Il suo lavoro non passa inosservato e viene menzionato nel *Physical Review* [Gingrich, 1930]. Tale lavoro sul cosiddetto effetto Raman elettronico si intreccia con quello connesso sull'effetto Compton e sulla distribuzione spaziale dei fotoelettroni. Anche su quest'argomento Carrelli è molto attivo. A partire da un lavoro compilativo sull'effetto Compton fatto nel 1927 [25], si occupa della distribuzione spaziale dei fotoelettroni adottando la stessa strategia di pubblicazione usata per l'effetto Raman elettronico pubblicando su *Nature*, *Zeitschrift für Physik* e sui *Rendiconti dell'Accademia dei Lincei*, rispettivamente [40, 42, 45].

Nel marzo del 1930, Carrelli presenta una nota [50] all'adunanza della Società Reale in cui espone ulteriori risultati sperimentali dell'effetto Raman in benzolo e tetracloruro di carbonio. Tale lavoro dimostra ormai la sua completa padronanza della tecnica Raman. È interessante la descrizione dell'apparato sperimentale costituito da una lampada ad arco a vapori di mercurio come sorgente di luce. La luce della lampada dopo essere stata focalizzata sul campione (un palloncino pieno del liquido in esame) viene analizzata da uno spettroscopio ed infine raccolta su una lastra fotografica. La tecnica per discriminare la riga Tyndall da quelle Raman consiste nell'utilizzare due tempi di posa diversi. Durante un tempo di posa di quattro ore, la lastra registra solo la riga Tyndall. Successivamente con una posa di quaranta ore vengono registrate anche le righe Raman, che essendo meno intense necessitano di maggior tempo. Il confronto delle lastre permette di vedere con chiarezza le righe Raman. In questo lavoro si esamina inoltre come l'intensità della luce Raman dipenda dalla frequenza della luce incidente a seconda se questa è prossima o meno ad una frequenza Raman stessa.

Effetto Raman ed effetto Compton non esauriscono l'attività di Carrelli in questo triennio 1928-1930. Tra l'ottobre e il dicembre del 1928, si occupa, a livello teorico, del problema della fluorescenza sensibilizzata, pubblicando i risultati sui *Rendiconti dei Lincei* e sul solito *Zeitschrift für Physik* [36, 46]. In questi lavori è motivato dal fatto che sperimentalmente in un miscuglio gassoso di mercurio e sodio, se l'atomo di mercurio viene eccitato, può eccitare l'atomo di sodio, che poi emette secondo le sue frequenze caratteristiche. Sperimentalmente si osserva che la linea di emissione del sodio più intensa è quella più vicina in energia alla riga di assorbimento del mercurio. Analizza poi tale problema nell'ambito della meccanica ondulatoria considerando l'equazione di Schrödinger per gli elettroni del mercurio e del sodio. L'interazione tra i due atomi è trattata in modo perturbativo secondo il metodo indicato un paio d'anni prima da Max Born. Sostanzialmente utilizza quella che oggi nei testi di meccanica quantistica è la teoria delle perturbazioni.

Il triennio 1928-1930 complessivamente vede Carrelli pubblicare 23 lavori che spaziano sui temi di maggiore attualità nella ricerca fisica dell'epoca. Ad esempio, compie un'incursione nella teoria della Relatività Generale [35], svolge alcune

considerazioni sul principio di Nerst [38], analizza varie questioni riguardanti la meccanica quantistica delle molecole[31, 39, 34, 43, 44].

5 Professore a Catania e Napoli (1930-1946)

Carrelli vince il concorso a cattedra in Fisica Sperimentale il 5 novembre del 1930 e viene chiamato a Catania dove resta fino al 1932, anno in cui viene chiamato a Napoli a succedere a Cantone. Nel 1931 pubblica solo un lavoro di carattere generale sulla fisica moderna [51], mentre nel 1932 ne pubblica tre, uno sull'effetto Raman [52] e due di fisica nucleare [53, 54]. Probabilmente il cambio di residenza e l'assunzione degli impegni di professore gli lasciano meno tempo da dedicare alla ricerca. È anche vero che il 1930 segna uno spartiacque tra il periodo fondativo della nuova meccanica quantistica e la nascita di nuovi filoni di ricerca quali la fisica nucleare e l'elettrodinamica quantistica. Carrelli probabilmente si rende conto della difficoltà di una ricerca sperimentale in fisica nucleare senza mezzi adeguati e pertanto si dedica ad alcune questioni teoriche. Insieme a Bruno Rossi e Gleb Wataghin è uno dei tre segretari che affiancano Enrico Fermi durante il Convegno Volta sulla fisica nucleare svoltosi a Roma dal 11 al 18 ottobre del 1931³.

I lavori di fisica nucleare del 1932 pubblicati su *Physikalische Zeitschrift* [54] e sul *Zeitschrift für Physik* [53] si occupano della struttura del nucleo e della classificazione degli isotopi. Il primo lavoro è stato inviato alla rivista nel novembre del 1931, mentre il secondo, da Catania, il 9 febbraio del 1932. Questa ricostruzione di date è importante, perchè sulla rivista *Nature* del 27 febbraio del 1932 James Chadwick annuncia la scoperta del neutrone [Chadwick, 1932], che rivoluzionerà la fisica nucleare. Prima della scoperta di Chadwick si riteneva, infatti, che i nuclei fossero composti di protoni ed i cosiddetti elettroni nucleari. La scoperta del neutrone, grazie ai lavori di Heisenberg e Majorana, porta alla concezione attuale del nucleo composto di neutroni e protoni tenuti insieme dalle forze nucleari. Carrelli segue attentamente l'evoluzione della fisica nucleare e nel 1943 [61] riprende la questione discussa nel 1931 di interpretare le regolarità degli isotopi alla luce delle nuove concezioni teoriche di Heisenberg e Majorana e dei risultati sperimentali ottenuti da Fermi sulla radioattività artificiale. La fisica nucleare, però, non diventa la sua principale attività di ricerca, che riprende in modo sistematico l'utilizzo della spettroscopia Raman soprattutto per lo studio dei liquidi.

Durante la permanenza in Olanda ad Utrecht del 1932, Carrelli pubblica insieme con J.J. Went un lavoro [52] riguardante la misura dettagliata del rapporto tra l'intensità di una riga Raman e la corrispondente riga Tyndall eccitatrice nel benzene e nel tetracloruro di carbonio. In un successivo lavoro apparso sul *Rendiconto*

³Ringrazio Francesco Guerra per aver richiamato la mia attenzione su questo punto.



Figura 5: Foto ricordo del convegno del 1931. In prima fila si vedono Guglielmo Marconi e alla sua destra Marie Curie. Alla sinistra di Marconi in seconda fila si vede Niels Bohr e dietro di lui Orso Mario Corbino. Carrelli è in quarta fila vicino ad Enrico Fermi ed Enrico Persico. In quarta fila, secondo da sinistra si vede George Placzek.

della Società Reale di Napoli [55] nel novembre del 1933, riporta ulteriori risultanti riguardanti le intensità dell'armonica superiore dello spettro Raman. Tale lavoro è anche interessante in quanto sviluppa alcune considerazioni teoriche sull'effetto Raman alla luce del lavoro di Placzek del 1931 [Placzek, 1931]. Carrelli nota *“La teoria dell'effetto (Raman) può svilupparsi in due direzioni distinte: può calcolarsi l'effetto partendo direttamente dalla formula di Kramers e Heisenberg, ma così si segue una via molto laboriosa, oppure secondo Placzek conviene considerare tale effetto come dovuto all'accoppiamento del moto elettronico con il moto oscillatorio dei nuclei. . . . I risultati a cui giunge il Placzek sono molto importanti perchè mediante questa via egli riesce a stabilire speciali regole di selezione, in base agli elementi di simmetria della molecola, ed a stabilire lo stato di polarizzazione a seconda del tipo di vibrazione dei nuclei. Così si giunge dalla conoscenza dello spettro Raman e dello spettro ultrarosso a poter classificare le varie righe e quindi a prevedere e conoscere i modi di oscillazione della molecola.”*

Lo studio delle interazioni molecolari ed il modo in cui determinano le proprietà spettroscopiche diventa uno dei temi principali di Carrelli nella prima metà degli anni Trenta. In due lavori del 1933 [57, 58], tra marzo ed aprile, rispettivamente di carattere teorico e sperimentale, affronta l'origine dell'allargamento delle righe spettrali di vapori di metalli alcalini quali il sodio ed il potassio. In un lavoro del 1933 [55], pubblica con Francesco Cennamo uno studio delle righe Raman nell'acqua. In un lavoro del 1935 [65] confronta l'informazione Raman con quella ottenuta nello spettro di assorbimento nell'ultrarosso. Lo studio dello spettro di assorbimento dell'acqua continua in un lavoro del 1937 [68], mentre nel 1935 viene studiato quello dell'ossigeno liquido [66], dove si discute la formazione di cosiddette molecole di polarizzazione $O_2 - O_2$. Sempre attento all'interpretazione teorica dei risultati sperimentali, Carrelli insieme con Paolo Trautteur pubblica nel 1937 un lavoro [69] sulla relazione tra la massa ridotta del problema a due corpi di una molecola e la frequenza di oscillazione. Tale lavoro esamina, da un punto di vista fenomenologico, questa relazione prendendo in considerazione diversi alogenuri. Paolo Trautteur si era laureato due anni prima e morirà prematuramente nel settembre dello stesso 1937. Carrelli ne scrive un necrologio sul Nuovo Cimento. Sempre nel 1937 viene studiato il continuo Raman nel miscuglio alcool-benzolo [67] e nel 1938 lo spettro di assorbimento del benzene e del cloroformio ($CHCl_3$) e del bromoformio ($CHBr_3$).

Risalta nel 1935 un lavoro sul ferromagnetismo [64] su cui torneremo in seguito. Qui è interessante notare che tale lavoro dimostra l'interesse di Carrelli per i fenomeni magnetici nella materia condensata e specialmente nei metalli. Tale interesse, già evidenziato nei lavori del 1924 [10] e del 1925 [13] sulla ruota di Barlow e del 1926 sul paramagnetismo [19], tornerà negli ultimi anni della sua attività scientifica nella seconda metà degli anni Sessanta.

L'interesse per la materia condensata e soprattutto per i metalli diventa un tema dominante nella sua ricerca nel 1939, quando in una serie di lavori [73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80] si dedica alle proprietà dello spettro di emissione dei metalli. Conformente al suo stile di ricerca, comincia nel primo lavoro [73] a stabilire il quadro teorico concettuale col quale interpretare i risultati sperimentali che successivamente verranno prodotti. In particolare, discute quali informazioni possano trarsi dallo studio del potere emissivo totale (cioè integrato su tutte le frequenze) in funzione della temperatura in relazione ad alcune ipotesi circa lo spettro di assorbimento. Egli parte dalla relazione di Kirchhoff che connette il potere emissivo di un corpo $e(\nu, T)$ al potere assorbente $a(\nu, T)$

$$\frac{e(\nu, T)}{a(\nu, T)} = e_{cn}(\nu, T), \quad (14)$$

dove $e_{cn}(\nu, T)$ è il potere emissivo di corpo nero, che è una funzione universale. Carrelli argomenta che, se da un lato noto il potere assorbente, è possibile calcolare il potere emissivo, dall'altro è possibile seguire il percorso inverso. Infatti se si conosce il potere emissivo di un corpo, si può dedurre da questo quello assorbente. Tale strategia può risultare utile quando sia difficile misurare direttamente l'assorbimento. Quindi indica come si possa procedere da una misura del potere emissivo totale in funzione della temperatura

$$E(T) = \int_0^\infty d\nu e(\nu, T) = \int_0^\infty d\nu e_{cn}(\nu, T)a(\nu, T) \quad (15)$$

a dedurre alcune proprietà circa la forma dello spettro di assorbimento. In particolare graficando $E(T)$ in funzione di T in carta bilogarithmica si determina un esponente efficace, n , per $E \sim T^n$. Quando $n = 4$, cioè il valore aspettato per il corpo nero, si può dedurre che nella regione di frequenze per cui a quella temperatura lo spettro di corpo nero ha il massimo, lo spettro di assorbimento del corpo è approssimativamente costante in frequenza. La presenza di un massimo di assorbimento deve al contrario produrre un esponente n diverso da quello del corpo nero. In un lavoro successivo [75] nota, inoltre, che, se il potere assorbente varia con la frequenza in modo approssimativamente costante, allora lo spettro di emissione è simile a quello di corpo nero con un massimo spostato rispetto al valore di corpo nero. Carrelli parla, in questo caso, di una legge di Wien generalizzata.

Nella serie di lavori sopracitati Carrelli studia in modo sistematico metalli quali il platino e l'argento, i cloruri di litio, sodio e potassio, i solfati di calcio e sodio, l'ossido di nichel e di cobalto, ed infine i silicati nefelina, benitoite, andalusite, sodalite, talco, topazio e muscovite. Nel caso del platino, in un arco di temperature tra 1077^0 e 1843^0 e con frequenze nel visibile, dimostra che lo spettro di emissione del platino descritto tramite uno spettro di corpo nero efficace con massimo spostato è in accordo con le misure dirette dello spettro di assorbimento.

In due lavori [77, 80] Carrelli trae le sue conclusioni circa le proprietà ottiche dei metalli. Egli parte dalla considerazione che il modello ad elettroni liberi nei metalli sviluppato da Drude all'inizio del secolo può essere adottato anche nell'ambito di una teoria quantistica con opportune avvertenze. Infatti negli anni Trenta, in parallelo allo sviluppo della fisica nucleare, la fisica dei solidi comincia ad essere sviluppata in modo sistematico in termini della teoria quantistica per opera di Felix Block, Arnold Sommerfeld, Hans Bethe ed altri. Carrelli, come al solito, è ottimamente informato dello sviluppo della teoria e si pone l'obiettivo di vedere in che misura tale teoria è in accordo con i dati sperimentali. Utilizzando il modello ad elettroni liberi ed assumendo che l'unica forma di assorbimento dei metalli sia dovuta agli elettroni liberi confronta le curve teoriche del potere riflettente con quelle sperimentali, esistenti in letteratura. Egli nota che vi è una discrepanza tra curve teoriche e sperimentali e che tale discrepanza è da attribuirsi al fatto che il valore della conducibilità elettrica usato come parametro nel modello ad elettroni liberi dovrebbe essere, per avere l'accordo tra curve teoriche e sperimentali, più basso di quello misurato in campi statici. Tale conclusione di Carrelli è in accordo con quanto riportato nel libro di Frederick Seitz [Seitz, 1940], uno dei primi libri sistematici sulla moderna teoria dei solidi.

La lettura di questi lavori dimostra che Carrelli ha iniziato, già alla fine degli anni Trenta, una notevole attività di ricerca in fisica della materia condensata, che in Italia si sarebbe sviluppata in modo sistematico nel dopoguerra. Occorre anche sottolineare che tale ricerca viene condotta con apparati sperimentali relativamente semplici, principalmente basati su misure ottiche, l'ambito sperimentale in cui Carrelli si trova maggiormente a suo agio.

6 L'attività scientifica nel dopoguerra (1946-1980)

Dopo la guerra, Carrelli decide di orientare la ricerca del suo istituto verso la fisica della materia condensata. In tale scelta giocano probabilmente due fattori. Da un lato la fisica nucleare e subnucleare, che diventerà la fisica delle particelle elementari, acquista un carattere sempre più marcato di Big Science con necessità crescenti di mezzi e finanziamenti, non è perseguibile sperimentalmente nelle condizioni dell'istituto della seconda metà degli anni Quaranta. Dall'altro, Carrelli sin da giovane ha coltivato l'interesse per i fenomeni di conduzione elettrica, galvanomagnetici e magnetoelastici. Nel 1935 si era chiesto in un lavoro pubblicato sul Nuovo Cimento [64] quale fosse il campo agente su una particella carica all'interno di un ferromagnete. Dopo un'analisi teorica concludeva che, in ultima analisi, per poter decidere bisogna affidarsi all'esperienza e a tal proposito citava gli esperimenti sul cosiddetto effetto Hall anomalo, presente nei materiali ferromagnetici. L'effetto Hall è la generazione di una differenza di potenziale trasversa rispetto ad

una corrente applicata in presenza di un campo magnetico perpendicolare sia alla corrente che alla differenza di potenziale. A differenza dell'effetto Hall nei metalli paramagnetici, l'effetto Hall nei ferromagneti è quantitativamente più rilevante e satura all'aumentare del campo magnetico esterno. Tale saturazione è proporzionale alla densità di magnetizzazione presente nel ferromagnete. La ragione della dipendenza dalla magnetizzazione è dovuta all'interazione spin orbita che è una conseguenza della teoria di Dirac. La teoria di tale effetto è stata lungamente studiata dalla metà degli anni Cinquanta ed è tuttora un campo di ricerca molto attivo nell'ambito della spintronica come si può vedere da un recente articolo di rassegna di Naoto Nagaosa e collaboratori [Nagaosa, 2010]. Qui è interessante notare come Carrelli abbia intuito la potenzialità di questo campo di ricerca in grande anticipo.

Nel giugno del 1943, Carrelli invia al Nuovo Cimento un lavoro sull'effetto Hall. Siamo in piena guerra e tale lavoro verrà pubblicato solo nel 1946 [89]. Può essere utile riportare le frasi introduttive di questo lavoro: *“L'effetto Hall, che ha rappresentato per molti anni uno dei fenomeni più oscuri della teoria elettronica classica, nella concezione moderna della struttura dei metalli, basata sulla teoria ondulatoria, rappresenta uno dei fenomeni più interessanti per mettere in evidenza, lo speciale comportamento degli elettroni nell'interno di questi corpi”*. Dopo quest'introduzione, passa in rassegna lo stato della moderna teoria esponendo quello che oggi è indicato come il modello semiclassico della dinamica degli elettroni di Bloch ed espone le conseguenze per l'effetto Hall. La più notevole, come è noto, è il fatto che il segno dell'effetto Hall dipende, usando una terminologia moderna, dal fatto se la conduzione elettrica è dovuta ad elettroni o lacune. In particolare, è interessante studiare sistemi dove al variare di qualche parametro opportuno si possa osservare tale variazione. Ciò può avvenire in leghe metalliche, dove variando la concentrazione relativa dei metalli componenti, si può osservare una transizione da un regime di trasporto di tipo lacuna ad uno di tipo elettrone. Le leghe di bismuto ed antimonio sono un ottimo esempio e Carrelli descrive sommariamente la preparazione di lamine di leghe a concentrazione variabile e riporta i risultati di misure della costante di Hall al variare della concentrazione di antimonio a partire da un metallo puro di bismuto. Nel 1949, insieme a Nella Altieri, che aveva fatto parte del piccolo gruppo di studenti che nel 1938 avevano seguito le lezioni di Fisica Teorica di Majorana, Carrelli pubblica un secondo lavoro sul segno dell'effetto Hall [90], dove oltre alle leghe di bismuto ed antimonio, vengono prese in esame leghe di bismuto e tellurio. In tale lavoro inoltre il variare del segno dell'effetto Hall viene messo in correlazione con la variazione della resistività.

Carrelli successivamente non sviluppa questa linea di ricerca sull'effetto Hall e sulla conduzione elettrica nei metalli. Tornerà ad occuparsi di conduzione elettrica nei solidi solo verso la fine degli anni Sessanta, mentre concentrerà la sua attività

negli anni Cinquanta e primi anni Sessanta sui fenomeni di trasporto nei liquidi. Le ragioni di questa scelta possono forse ravvisarsi nel fatto che, come vedremo, molti fenomeni di trasporto nei liquidi possono studiarsi con tecniche ottiche di cui Carrelli aveva piena padronanza.

Il resto di questo paragrafo è organizzato in due sottoparagrafi relativi all'attività di ricerca nei liquidi e in quella nei solidi, rispettivamente.

6.1 Fisica dei liquidi

In tutti gli anni Cinquanta e la prima metà degli anni Sessanta gran parte dell'attività scientifica e di ricerca di Carrelli si indirizza verso la fisica dei liquidi, in particolare verso le proprietà di conduzione elettrica in soluzioni e verso la misura delle proprietà di viscosità.

Verso la seconda metà degli anni Quaranta, la fisica dei liquidi è principalmente rivolta allo studio della propagazione delle onde ultrasonore ed ai meccanismi che determinano l'attenuazione della loro intensità. Infatti, le misure sperimentali del coefficiente di attenuazione in generale risultano inferiori ai valori teorici calcolati. Una rassegna dello stato dell'arte in quel periodo è fornita da Daniele Sette nel 1949 [Sette, 1949], che lavora a Roma presso l'Istituto Nazionale di Ultraacustica intitolato a Orso Mario Corbino. Tra i diversi metodi di misura del coefficiente d'attenuazione delle onde ultrasonore in un liquido, il metodo ottico sfrutta il fatto che le compressioni e rarefazioni prodotte dall'onda sonora nel liquido inducono in esso una modulazione dell'indice di rifrazione in modo tale che un fascio di luce che attraversi il liquido in direzione perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda sonora subisce il fenomeno della diffrazione. Dall'analisi delle figure di diffrazione si può poi risalire all'intensità dell'onda in un dato punto del liquido e quindi misurarne l'attenuazione.

All'inizio del 1950 Carrelli, insieme a Flavio Porreca, pubblica un lavoro sulla propagazione di onde ultrasonore nei liquidi [91] nel quale si nota come al variare della viscosità del liquido in studio vi sia un cambiamento notevole nella forma delle figure di diffrazione. Nell'intento di studiare la variazione della figura di diffrazione al variare della sostanza liquida usata, Carrelli e Porreca scoprono, in soluzioni colloidali, un effetto inaspettato [93, 100]: le frange d'interferenza d'ordine pari persistono anche dopo che l'onda ultrasonora stazionaria non è più alimentata. In una serie di lavori successivi [105, 106, 107, 118], mettono in luce la dipendenza dell'effetto dalla potenza dell'onda ultrasonora, dal tempo in cui questa è stata attiva, dalla natura stazionaria dell'onda, dalla concentrazione del soluto e giungono ad una spiegazione del fenomeno in termini di una teoria fenomenologica. La chiave per comprendere la natura dell'effetto è fornita dal seguente espediente sperimentale. Carrelli e Porreca osservano che facendo variare la distanza tra la sorgente dell'onda ultrasonora e una lamina riflettente, che serve a produrre

la stazionarietà, varia in modo periodico il tempo di persistenza delle frange. La differenza in distanza tra due massimi coincide con la metà della lunghezza d'onda dell'onda ultrasonora. L'ipotesi di Carrelli e Porreca, a questo punto, è di supporre che i grani del soluto, in presenza dell'onda sonora, tendano a raggrupparsi vicino ai nodi dell'onda di pressione e che permangano lì vicino per qualche tempo anche dopo la scomparsa dell'onda stessa. In tal modo, la presenza dei grani del soluto produce nel solvente una variazione locale dell'indice di rifrazione del solvente generando un reticolo di diffrazione efficace con periodo metà della lunghezza d'onda dell'onda ultrasonora originaria. Questo spiega la presenza delle sole frange di ordine pari. Infine misurando il tempo di persistenza al variare del tempo di miscelamento, assumendo che l'effetto debba cessare quando tutti i grani del soluto si siano depositati sul fondo del recipiente contenente il liquido, stimano la velocità di caduta dei grani. Per mezzo della legge di Stokes sul moto in un mezzo viscoso sono quindi in grado di determinare la dimensione dei grani. Questo permette loro di dimostrare che l'effetto è maggiore, a parità di concentrazione del soluto, quando i grani sono più piccoli perchè in questo modo si aumenta la superficie di interfaccia tra soluto e solvente.

Insieme a Francesco Gaeta, Carrelli svolge ulteriori misure [115] circa la permanenza delle frange d'interferenza dopo che è cessata l'alimentazione dell'onda ultrasonora. In particolare disponendo l'apparato sperimentale in modo da avere il fascio ultrasonoro orizzontale ed i piani nodali verticali. Con tale disposizione le particelle in sospensione, nella loro caduta, restano sempre nei piani nodali. Questo gli permette di studiare in dettaglio la dipendenza del fenomeno dalla temperatura e dalla natura del soluto e del solvente. Qualche anno dopo Carrelli collabora con Gaeta nella misura del coefficiente di assorbimento del suono [125], dove viene messo a punto un nuovo metodo. In questo metodo si misura l'andamento nel tempo delle intensità relative tra due frange d'interferenza dopo aver cessato di alimentare l'onda ultrasonora con il quarzo piezoelettrico. L'andamento temporale delle frange d'interferenza si può poi collegare con quello dell'intensità delle onde di pressione indotte nel liquido dall'onda ultrasonora. Da tale andamento si ottiene il coefficiente di assorbimento.

Insieme a G. Branca, Carrelli trova ancora un altro possibile utilizzo del reticolo diffrattivo prodotto dalle onde ultrasonore. Infatti, inducendo nel liquido una variazione di pressione ulteriore oltre quella dovuta all'onda ultrasonora, è possibile dallo spostamento delle frange dedurre l'entità di questa variazione di pressione [112]. Con Branca Carrelli aveva già collaborato nel 1951[97] nello sviluppo di un metodo ottico diretto volto a misurare le cosiddette onde di viscosità nei liquidi prodotte da una lamina oscillante immersa nel liquido.

Nei primi anni Cinquanta, Carrelli sviluppa una linea di ricerca dedicata allo studio delle proprietà delle soluzioni di elettroliti forti, la cui teoria era stata svilup-

pata negli anni Venti da Debye e Hückel. In tale teoria si assume che l'elettrolita, quando è in soluzione, sia completamente dissociato in ioni. La teoria di Debye e Huckel si sviluppa allora in modo simile a quella di un gas completamente ionizzato. In particolare, l'interazione elettrostatica tra gli ioni produce due correzioni alla mobilità ionica note come effetto di rilassamento ed effetto elettroforetico. Entrambi questi effetti producono una correzione negativa alla mobilità ionica che cresce con la radice quadrata della concentrazione. Per gli stessi motivi esiste nella teoria anche una correzione dipendente dalla radice quadrata della concentrazione anche per il coefficiente di compressione della soluzione. Nella deduzione di questi effetti si assume, in quanto a basse concentrazioni, che gli ioni siano puntiformi. All'aumentare della concentrazione, però, l'ipotesi di ioni puntiformi diventa progressivamente meno realistica ed inoltre aumenta la possibilità di una ricombinazione degli ioni. Entrambi questi fattori producono un'ulteriore correzione alla mobilità ionica che si manifesta come una deviazione alla legge della radice quadrata. In particolare, nell'introduzione del lavoro [94], che Carrelli pubblica con Lina Rescigno nel gennaio del 1950, si nota come usando campi elettrici di bassa frequenza sia stato possibile in passato verificare che la teoria di Debye e Hückel rimane valida una volta che si sia tenuto conto di queste ulteriori correzioni. Ciò che accade ad alta frequenza, però, non è stato ancora oggetto di indagine sistematica ed è quindi rilevante indagare in questo senso. Insieme a Lina Rescigno, Carrelli pubblica una serie di lavori dedicati allo studio della conducibilità ad alta frequenza delle soluzioni elettrolitiche [95, 98, 101, 102, 103]. I risultati più notevoli di queste indagini sperimentali possono così riassumersi: 1) l'andamento della conducibilità ad alta frequenza (\sim MHz) come funzione della concentrazione, sia nel caso di elettroliti forti che per elettroliti deboli, non mostra deviazioni molto marcate rispetto al caso di basse frequenze, avvalorando l'ipotesi che la viscosità misurata macroscopicamente non differisca dal suo valore microscopico, responsabile delle correzioni menzionate sopra; 2) in alcune soluzioni elettrolitiche con un solvente particolarmente viscoso (acqua e glucosio) si osservano delle deviazioni alla legge empirica secondo cui il prodotto della conducibilità per la viscosità rimane costante al crescere della viscosità. Carrelli e Rescigno attribuiscono tali deviazioni al fatto che l'interazione solvente-soluto modifica localmente le proprietà del liquido ed a questo proposito Carrelli insieme a Elio Tartaglione pubblica un lavoro [104] dedicato ad un'indagine con i raggi X volta a verificare la presenza di modificazioni strutturali del solvente in presenza del soluto. In effetti studiando l'intensità dei massimi diffrattivi dei raggi X si nota una forte diminuzione in funzione della viscosità proprio per quei valori di viscosità per i quali si osservavano deviazioni alle legge empirica suddetta. Infine, sempre nel 1950, sfruttando l'esperienza accumulata con la tecnica degli ultrasuoni, Carrelli e Branca [92] mediante la misura della velocità di onde ultrasonore nel liquido, determinano la compressibilità di

una soluzione di elettroliti forti quali il cloruro di potassio e gli iodati di sodio e potassio e mettono in evidenza anomalie rispetto alla legge della radice quadrata e interpretano tale anomalia come una manifestazione di un raggio ionico finito. Nel 1958 [128], insieme con G. Cozza e Francesco Gaeta, Carrelli torna ad occuparsi di soluzioni elettrolitiche tentando di verificare un effetto predetto da Debye, secondo cui, se la soluzione è attraversata da un'onda ultrasonora, a causa delle accelerazioni presenti conseguentemente nel liquido, ioni carichi di massa diversa sono diversamente accelerati e danno luogo ad un'onda di potenziale. Carrelli e collaboratori trovano un risultato negativo, che interpretano come la manifestazione del fatto che intorno ad ogni ione si crea una sorta di gabbia di molecole di solvente, che si comporta come un unico blocco. In questa prospettiva la massa degli ioni ingabbiati diventa irrilevante e l'effetto di Debye non si manifesta. Quest'interpretazione viene ulteriormente sviluppata in un lavoro svolto insieme a L. Della Caggia [133] dove la diminuzione della costante dielettrica di una soluzione all'aumentare della concentrazione viene, con successo, messa in relazione al fatto che parte dei dipoli dell'acqua non possono più partecipare alla risposta dielettrica, in quanto bloccati ad ingabbiare gli ioni presenti in soluzione. Infine, Carrelli con Ercole Grossetti e Giovanni Brescia tornerà ad occuparsi di conducibilità in soluzioni elettrolitiche negli ultimi anni della sua attività quando diventerà possibile utilizzare frequenze ancora maggiori (\sim GHz)[155].

Con Francesco Cennamo con cui Carrelli aveva già collaborato negli anni Trenta in misure di effetto Raman, si intraprende una linea di ricerca volta alla misura del cosiddetto secondo coefficiente di viscosità nei liquidi. Qualche anno prima, nel 1948, Carl Eckart aveva dimostrato teoricamente [Eckart, 1948] che una conseguenza dell'esistenza di un secondo coefficiente di viscosità implica che la presenza di un'onda sonora in un liquido deve essere accompagnata dallo stabilirsi di una corrente nel liquido, la cui velocità dipende appunto dal rapporto tra secondo e primo coefficiente di viscosità. In una serie di lavori [111, 113, 116, 127], sperimentando con acqua, alcool amilico, benzolo e tetracloruro di carbonio, Carrelli e Cennamo mettono in evidenza un valore finito del secondo coefficiente di viscosità confermando la previsione di Eckart e misure effettuate in precedenza da Liebermann. In particolare, è notevole il lavoro del 1955, dove viene illustrato un nuovo metodo di misura, che a differenza delle precedenti misure sperimentali, meglio realizza le condizioni previste nel lavoro teorico di Eckart. In questi lavori, Carrelli e Cennamo studiano il rapporto dei due coefficienti di viscosità a diverse frequenze, mettendo in relazione discrepanze con i valori del primo coefficiente di viscosità ottenuto attraverso le misure di assorbimento di onde ultrasonore. Tale discrepanza riguarda in particolare l'andamento in frequenza del rapporto tra i due coefficienti di viscosità.

Nella seconda metà degli anni Cinquanta, Carrelli prima con A. De Vito [120]

e poi con con Ezio Ragozzino [126, 129] studia la relazione tra la forma complessa delle molecole in alcuni fluidi o miscele di fluidi e la dipendenza in frequenza della viscosità. Specie nel lavoro del 1959, risalta l'interesse di Carrelli a sviluppare per quanto possibile un'interpretazione teorica dei fenomeni osservati. In questo lavoro infatti viene sviluppata una teoria per gli effetti non lineari nella velocità per fluidi in cui sono presenti molecole di forma non simmetrica. L'esistenza di un campo di velocità nel fluido tende a far disporre le molecole in modo da opporre la minor resistenza possibile al flusso. In tal modo il campo di velocità agisce come un campo ordinante che contrasta l'effetto disordinante della temperatura. Carrelli e Ragozzino sviluppano quindi una teoria in analogia con la teoria dei dipoli in campo elettrico sviluppata da Debye. In tal modo è possibile calcolare, nel caso di una molecola ellissoidale, il diametro medio che risulta funzione della velocità del fluido. A questo punto per connettere le proprietà geometriche delle molecole alla viscosità occorrerebbe una teoria microscopica del fluido. Carrelli e Ragozzino notano che se il fluido è un gas, la teoria cinetica fornisce una relazione tra viscosità e diametro delle molecole, e quindi una relazione tra viscosità e velocità. Nel caso dei fluidi, in mancanza di una teoria cinetica microscopica si può misurare la viscosità in funzione della velocità. La dipendenza della viscosità dalla velocità diventa quindi un modo per rivelare la presenza di molecole asimmetriche in un fluido.

Con Ezio Ragozzino Carrelli collabora anche in due lavori [143, 145] dove si utilizza la tecnica della risonanza magnetica nucleare per studiare il tempo di rilassamento longitudinale dello spin nucleare T_1 . Dalla conoscenza di T_1 , infatti, mediante alcune ragionevoli assunzioni si può dedurre la mobilità delle molecole del liquido. Carrelli e Ragozzino studiano in particolare soluzioni in cui il soluto è una molecola complessa. Il principale risultato è che, mentre la presenza del soluto comporta una variazione complessiva della viscosità del liquido, la mobilità delle molecole del solvente non risulta praticamente modificata.

Nella prima metà degli anni Sessanta l'interesse di Carrelli per l'origine della viscosità nei liquidi appare inesauribile. Con Flavio Porreca infatti in tre lavori [136, 137, 147], nell'ultimo dei quali vi è la partecipazione di Umberto Bernini, Carrelli sviluppa un metodo sperimentale per la misura di una eventuale componente immaginaria della viscosità, che risulta essere notevole in liquidi viscosi.

Con Maria Marinaro prima [131] e con Luigi Pauciulo poi [142], Carrelli studia i momenti di rotazione indotti da un campo elettrico oscillante in liquidi composti da molecole polari e non. Maria Marinaro collabora inoltre con Carrelli in due lavori del 1961 [134] e del 1962 [138] dedicati, rispettivamente, allo studio di effetti termoelastici in liquidi e del segnale della risonanza nucleare di quadrupolo nel paradichlorobenzolo solido.

6.2 Fisica dei solidi

Nella seconda metà degli anni Sessanta l'interesse scientifico di Carrelli si rivolge con intensità crescente verso la fisica dei solidi, principalmente sugli aspetti della conduzione elettrica in semiconduttori e gli effetti galvanomagnetici nei ferromagneti metallici. Insieme a Flavio Porreca, Alfonso Campolattaro ed Umberto Bernini, rivolge la sua attenzione agli effetti magnetoelastici ed in particolare all'effetto Matteucci. Tale effetto rientra nel gruppo di effetti dovuti alle proprietà di magnetostrizione di metalli ferromagnetici. L'effetto Matteucci consiste nel seguente fenomeno. Se ad un filo ferromagnetico, immerso in un campo magnetico periodico applicato lungo l'asse longitudinale del filo, viene applicata una torsione meccanica, si genera una forza elettromotrice indotta alle estremità del filo. Benchè tale effetto fosse stato sperimentalmente scoperto nel 1858, più di cento anni dopo, verso la metà degli anni Sessanta, non era stato ancora adeguatamente spiegato. Nel 1964, nuovi esperimenti sull'effetto Matteucci effettuati da R. Skorski negli Stati Uniti [Skorski, 1964], spingono Carrelli ad intraprendere una serie di esperimenti volti a studiare l'effetto Matteucci nel nickel e nel ferro. In una serie di lavori [146, 148, 154, 156, 157, 158, 159] Carrelli ed i suoi collaboratori mettono in luce che l'effetto Matteucci può prodursi non solo in ragione dell'induzione dovuta alla magnetizzazione circolare creata dalla torsione, ma anche a causa dell'induzione dovuta alla magnetizzazione longitudinale. Questo fenomeno viene denominato da Carrelli e collaboratori come l'effetto Matteucci longitudinale. Che i due tipi di effetto Matteucci debbano presentarsi insieme viene spiegato da Carrelli e collaboratori in termini di una teoria fenomenologica in cui si tiene conto dell'azione combinata dell'energia magnetoelastica del ferromagnete e dell'energia di Zeman dovuta all'accoppiamento con il campo esterno. Questi lavori riflettono ancora una volta lo stile scientifico di Carrelli nel cercare una spiegazione teorica semplice ed essenziale dei fenomeni osservati nell'esperimento.

Con Fabio Fittipaldi e Luigi Pauciulo, Carrelli studia in due lavori [149, 152] la costante dielettrica e la conducibilità elettrica di monocristalli di solfuro di cadmio (CdS), antracene, solfuro di zinco (ZnS) e su policristalli di selenio e di germanio. L'idea di questi lavori è di sviluppare un metodo per la misura della conducibilità e della costante dielettrica senza fabbricare dei contatti metallici sul semiconduttore in studio. Lo spunto trae origine, forse, dagli studi del momento di rotazione indotto nei liquidi con campi elettrici oscillanti. In questi lavori, infatti, il campione in studio è sospeso ad un filo di torsione che misura il momento torcente indotto da un campo elettrico oscillante. In particolare il momento torcente ha un andamento non monotono in funzione della frequenza con un massimo il cui valore è funzione della costante dielettrica e della conducibilità. Tale relazione per il massimo può essere sperimentalmente verificata variando la conducibilità elettrica mediante illuminazione e verificando se ciò determina uno spostamento

del massimo. Tale spostamento viene in effetti misurato e si ottengono valori per la conducibilità in accordo con quanto atteso teoricamente o misurato con altri metodi.

7 L'insegnamento

Antonio Carrelli dal conseguimento della Libera Docenza nel 1924 e la salita in Cattedra nel 1930 ha insegnato per circa cinquant'anni fino al 1970, quando è andato fuori ruolo. Il suo insegnamento fondamentale come titolare di cattedra è stato quello di Fisica Sperimentale, che corrisponde a quello che oggi indichiamo come il corso di Fisica Generale. Accanto a tale corso, come abbiamo menzionato nel paragrafo dedicato alla sua biografia, Antonio Carrelli ha tenuto il corso di Fisica Teorica, prima come libero docente dal 1924 al 1930, poi come insegnamento aggiuntivo oltre a quello di Fisica Sperimentale dal 1933 sino agli anni Cinquanta. Un'eccezione è il 1938, anno in cui il corso di Fisica Teorica a Napoli fu tenuto da Ettore Majorana. Il 15 gennaio 1944, quando è eletto Preside della Facoltà riceve tra l'altro l'incarico a tenere il corso di Fisica Teorica, come riportato nel verbale della seduta [AUN].

Nella formulazione odierna dei corsi di laurea in Fisica, prevalentemente, la Fisica Teorica comprende l'introduzione ai metodi della teoria dei campi quantistici e l'elettrodinamica quantistica, mentre l'insegnamento della Meccanica Quantistica di base e della Meccanica Statistica viene impartito in corsi precedenti. Negli anni Venti e Trenta, l'elettrodinamica quantistica era appena agli inizi e non era oggetto ancora di insegnamento sistematico. Queste precisazioni sono utili per collocare nel giusto contesto i corsi di Fisica Teorica di Carrelli e degli argomenti da lui scelti. Sarebbe naturalmente interessante comparare la struttura dei suoi corsi con quelli impartiti in altre Università italiane dell'epoca, come ad esempio Roma o Firenze. Qui, però, intendiamo soltanto brevemente descriverne i contenuti al fine di precisare meglio l'orizzonte culturale di Carrelli in quegli anni, assumendo che spesso vi è uno stretto legame tra gli interessi di ricerca e l'impostazione didattica di un corso.

L'analisi che presento si basa sulla lettura diretta delle Lezioni di Fisica Teorica degli anni 1933 [160], 1936 [161], 1937 [162], 1941 [164], 1942 [165]. Risulta anche un'edizione del 1939 [163], che però non ho potuto visionare direttamente.

Le due edizioni del 1941 e del 1942 riassumono gli argomenti trattati da Carrelli in tutte le varie edizioni. In mancanza di altre informazioni, si può assumere che le lezioni del 1933 siano state sviluppate a partire da appunti dei corsi tenuti negli anni Venti. Il sommario delle due edizioni del 1941 e del 1942 sintetizza bene gli argomenti trattati ed è riportato in appendice A.

Quello che sicuramente manca in queste lezioni è un'esposizione della meccanica quantistica e della fisica atomica. È probabile però che Carrelli non si sia preoccupato di questi argomenti perchè erano disponibili altre esposizioni, come quelle di Enrico Persico ed Enrico Fermi, ed abbia invece voluto raccogliere in appunti altri argomenti non disponibili in libri di testo in lingua italiana.

Ciò che colpisce nella lista degli argomenti è il *taglio* da Fisica della Materia Condensata, per la presenza di argomenti di Meccanica Statistica, Fisica dei gas, dei liquidi e dei solidi. Tale impostazione trova un riscontro nella ricerca scientifica di Carrelli che abbiamo delineato nei paragrafi dedicati all'attività scientifica, ricerca orientata verso la struttura della materia. Inoltre mette in luce la preoccupazione di Carrelli di fornire una visione complessiva di tutta la comprensione del mondo fisico. Alcuni argomenti quali la teoria dei moti Browniani e quella delle fluttuazioni critiche sono ancora oggi insegnati in modo non molto diverso da quello seguito da Carrelli.

La lettura di questi appunti è decisamente godibile. Carrelli ha uno stile piano e distingue con molta attenzione le problematiche sperimentali e quelle teoriche. Queste lezioni di Fisica Teorica non sono un trattato sistematico e mancano dunque della completezza e della sistematicità di un trattato pensato come testo scritto. Sono invece, ancora oggi, ottimi spunti per organizzare delle lezioni per studenti del terzo o quarto anno di fisica.

8 Un ricordo personale di mio nonno Antonio Carrelli

Accanto alle motivazioni accennate nell'introduzione, ve ne sono anche di carattere personale, in quanto nipote di Antonio Carrelli, tramite mia madre Fabrizia. Dopo aver intrapreso la carriera di fisico seguendo le sue orme, si è andata in me sviluppando la curiosità di riprendere con lui un dialogo a distanza attraverso la lettura dei suoi scritti. Al momento della sua morte, avvenuta il 25 novembre del 1980, ero uno studente al penultimo anno del Liceo Classico ed avevo un'idea molto vaga del suo lavoro di scienziato. Ricordo che gli avevo manifestato il desiderio di iscrivermi a Fisica e, da quanto poi mi disse la sua seconda moglie, Lisetta, lui era molto contento di questa scelta. Non avemmo il tempo per dialogare di fisica, come forse ad entrambi sarebbe piaciuto. A questo proposito mi piace ricordare un episodio di un pomeriggio del 1976, che credo sia stato tra i fattori più importanti nello spingermi ad intraprendere la carriera scientifica. A quel tempo mio nonno, Antonio Carrelli, veniva regolarmente a Roma per presenziare alle riunioni dell'Accademia dei Lincei e quasi sempre era a cena a casa nostra. La cena non cominciava prima delle 20,30 quando mio padre rientrava dal lavoro. Se mio nonno



Figura 6: Antonio Carrelli al timone della sua barca nell'agosto del 1967 fotografato da Ugo Raimondi.

arrivava verso le 19,00 era quindi un'occasione ghiotta per noi nipoti (le mie sorelle ed io) di avere tutta l'attenzione del nonno per noi, prima che la conversazione dei grandi scivolasse su argomenti di nessun interesse per noi. Proprio in quei giorni a scuola ero stato introdotto al comportamento delle lenti. Ricordo che la spiegazione ricevuta in classe mi aveva lasciato molto insoddisfatto perchè non riuscivo a comprendere perchè i raggi di luce dovessero convergere nel fuoco e soprattutto come questo era connesso alle leggi dell'ottica geometrica della riflessione e della rifrazione, imparate precedentemente. Chiesi perciò a mio nonno se lui era in grado di spiegarmi tale connessione. Sorridendo mio nonno quasi mi rimproverò in modo bonario in quanto la mia richiesta suonava come un'impertinenza. Dopo qualche minuto, però, eravamo a tavolino con carta e penna e mio nonno cominciò disegnando il percorso di un raggio di luce attraverso un prisma triangolare con la doppia rifrazione alle due interfacce aria-prisma. Successivamente mi fece vedere come una lente poteva essere pensata come una serie di prismi impilati aventi inclinazioni diverse. Rimasi affascinato dalla logica stringente della spiegazione, durante la quale mio nonno non usò nessuna formula matematica, che sarebbe risultata troppo difficile per la mia preparazione di studente di terza media.

9 Conclusioni

Uno degli obiettivi che mi sono prefisso all'inizio di questo lavoro è stato quello di fornire una base di partenza che possa stimolare l'interesse di altri verso la figura e l'opera di Antonio Carrelli. Una valutazione critica dei suoi contributi scientifici richiede, a mio avviso, un approfondimento maggiore del contesto storico-scientifico in cui egli si trovò ad operare. Sono quindi consapevole che la mia analisi presenta indubbiamente dei limiti da questo punto di vista. Più modestamente, in questa sede, ho cercato di mettere insieme in un quadro sinottico le *evidenze* dell'opera scientifica di Antonio Carrelli, partendo dalla lettura dei suoi scritti scientifici e raccontando quali sono stati i temi delle sue ricerche. Dato che la sua attività scientifica si è sviluppata in un arco di tempo di più di cinquant'anni, in un periodo in cui la Fisica è enormemente progredita, un'analisi storico-critica della sua opera scientifica richiederebbe un lavoro senz'altro più lungo ed impegnativo. Spero di poterlo fare in futuro.

Ringraziamenti

Per la ricostruzione della bibliografia e il reperimento degli articoli scientifici di Carrelli sono enormemente debitore ad Enza Gasbarro. Per lo stimolo ad intraprendere questo lavoro devo ringraziare Giulio Raimondi. Francesco Guerra mi ha grandemente aiutato a porre la figura di Antonio Carrelli nella giusta prospettiva storica sia per i suoi ricordi personali che per la sua profonda conoscenza della storia della fisica italiana nel primo Novecento. Nadia Robotti è stata una guida preziosa nei miei primi passi di consultazione degli archivi contagiandomi con il suo entusiasmo in questo tipo di ricerche. Ringrazio Rosario Bartiromo per aver letto con attenzione il manoscritto. Un sentito ringraziamento per la disponibilità e cortesia rivolgo a Rita Zanatta e Fabrizio Zannetti dell'Archivio dell'Accademia dei Lincei. Infine ringrazio mio padre Ugo per aver letto diverse versioni di questo lavoro, per i consigli datomi e per avermi assistito nelle mie ricerche storiche con i suoi ricordi personali.

A Indice delle Lezioni di Fisica Teorica

Lezioni di Fisica Teorica. Teoria di Relatività. 1941

- Capitolo I
 1. Principio di relatività in meccanica e le trasformazioni di Galileo.
 2. Il principio di relatività ed il principio di conservazione dell'energia.
 3. Il principio di relatività e l'elettromagnetismo.

4. L'etere fisso nell'elettrodinamica classica.
 5. Il fenomeno dell'aberrazione.
 6. Esperienze di Fizeau.
 7. Ipotesi dell'etere immobile. Esperienza di Michelson.
 8. I due principi fondamentali della relatività.
 9. Esistenza di un tempo assoluto.
 10. La trasformazione di Lorentz.
 11. Conseguenza della trasformazione di Lorentz. La dilatazione temporale.
 12. Contrazione longitudinale dei corpi in moto.
 13. Invariabilità dell'elemento di spazio-tempo.
 14. Interpretazione dell'esperienza di Michelson in base alla trasformazione di Lorentz.
 15. Altra deduzione della trasformazione di Lorentz.
 16. Composizione delle velocità.
 17. Altra forma della composizione delle velocità.
 18. Interpretazione di Minkowski della trasformazione di Lorentz.
 19. Le trasformazioni di Lorentz come una rotazione immaginaria.
 20. Proprietà grupitale delle trasformazioni di Lorentz.
 21. La trasformazione di Lorentz come un problema geometrico.
 22. Vettori quadrimensionali.
- Capitolo II
Esposizione sintetica dei fenomeni elettromagnetici.
 - Capitolo III
Carattere invariante delle equazioni della teoria elettronica.
 - Capitolo IV
Interpretazione di alcuni fenomeni elettromagnetici in base alla formulazione relativistica.
 - Capitolo V
 1. Dinamica della relatività.
 2. Verifica sperimentale delle conseguenze fondamentali della dinamica relativistica.

Lezioni di Fisica Teorica. Teoria cinetica dei gas e radioattività. 1942

- Capitolo I Teoria dello stato gassoso
 1. Generalità.
 2. Legge dei gas.
 3. Deduzione teorica della legge dei gas.
 4. Determinazione sperimentale delle velocità molecolari.
 5. Legge di distribuzione delle velocità.
 6. Determinazione della pressione.
 7. Determinazione del numero degli urti.
 8. Calcolo del libero percorso medio.
 9. Calcolo del coefficiente d'attrito.
 10. Calcolo del covolume.
 11. Determinazione del numero di Avogadro e delle grandezze molecolari.
 12. Azioni dipendenti dalle forze attrattive.
 13. Comportamento reale dei gas.
 14. Continuità tra stato liquido e stato gassoso.
 15. Punto critico.
 16. Determinazione teorica della tensione massima.
- Capitolo II Teoria dello stato liquido
 1. Teoria degli stati corrispondenti.
 2. Equazione ridotta.
 3. Verifica diretta della relazione di Van der Waals per i liquidi.
 4. Relazione di Trenton.
 5. Calcolo della pressione superficiale dei liquidi.
 6. Tensione superficiale dei liquidi.
 7. Relazione di Eötvös.
 8. Attrito interno dei liquidi.
- Capitolo III Teoria cinetica del corpo solido
 1. Leggi fondamentali dei cristalli.
 2. Ipotesi di Bravais-Hany
 3. Proprietà fondamentali del corpo solido. Oscillazioni delle particelle.
 4. Relazione fra dilatazione termica e calore specifico.

5. Principio di equipartizione dell'energia. Legge di Dulong e Petit.
 6. Formula di Lindemann sulla temperatura di fusione.
 7. Teoria quantistica dei calori specifici (Manca in questa edizione, ma è presente nell'edizione del 1936).
- Capitolo IV Moti Browniani e fluttuazioni
 1. Determinazione del numero di Avogadro mediante la variazione del numero dei granuli con l'altezza.
 2. Teoria dei moti Browniani.
 3. Teoria delle fluttuazioni.
 4. Calcolo delle fluttuazioni al punto critico.
 - Capitolo V Raggi catodici e raggi positivi
 1. Raggi catodici.
 2. Determinazione del rapporto e/m relativo ai corpuscoli catodici.
 3. Determinazione della carica elementare.
 4. Raggi canale.
 - Capitolo VI Radioattività
 1. Fenomeni radioattivi.
 2. Teoria della disintegrazione radioattiva.
 3. Legge dello spostamento. Famiglie radioattive.
 4. Teoria della discontinuità del processo radioattivo.
 - Capitolo VII Struttura atomica
 1. Teoria dell'atomo planetario.

Lista delle pubblicazioni di Antonio Carrelli

- [1] A. Carrelli, *Sull'assorbimento delle soluzioni di iodio*, *Rendiconto dell'Accademia delle Scienze Fisiche e Matematiche. Società Reale di Napoli. Serie III* 27, 274 (1921).
- [2] A. Carrelli, *Sulla dispersione delle soluzioni di iodio*, *Rendiconto dell'Accademia delle Scienze Fisiche e Matematiche. Società Reale di Napoli. Serie III* 27, 288 (1921).

- [3] A. Carrelli, *Sulla dispersione della luce nelle soluzioni fluorescenti*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie V* 31, 157 (1922).
- [4] A. Carrelli, *Sulla fluorescenza di sostanze organiche*, *Rendiconto dell' Accademia delle Scienze Fisiche Matematiche. Società Reale di Napoli. Serie III* 29, 96 (1923).
- [5] A. Carrelli, P. Pringsheim, *Über polarisierte Phosphoreszenz*, *Zeitschrift für Physik* 17, 287 (1923).
- [6] A. Carrelli, P. Pringsheim, *Über die Photolumineszenz von Farbstoffen in zähen Lösungsmitteln*, *Zeitschrift für Physik* 18, 317 (1923).
- [7] A. Carrelli, *La decomposizione elettrica delle righe spettrali*, *Il Nuovo Cimento Serie VI e VII* 25, 213 (1923).
- [8] A. Carrelli, *Sulla dispersione rotatoria di soluzioni fluorescenti*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie V* 32, 272 (1923).
- [9] A. Carrelli, *Über das Tyndallphänomen*, *Zeitschrift für Physik* 24, 37 (1924).
- [10] A. Carrelli, *Sulla ruota di Barlow*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 1, 369 (1924).
- [11] A. Carrelli, *Sulla luce polarizzata di fluorescenza*, *Rendiconti R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie V* 33, 21 (1924).
- [12] A. Carrelli, *Sul fenomeno di Tyndall*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie V* 33, 279 (1924).
- [13] A. Carrelli, *Su alcuni effetti prodotti da moti rotatori*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie VI* 1, 162 (1925).
- [14] A. Carrelli, *Sul fenomeno di Tyndall*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie VI* 1, 430 (1925).
- [15] A. Carrelli, *Sulla velocità di propagazione dell'energia raggiante in un vapore fluorescente*, *Rendiconto dell' Accademia delle Scienze Fisiche Matematiche. Società Reale di Napoli. Serie III* 31, 50 (1925).

- [16] A. Carrelli, *Sul calcolo del coefficiente di diffusione delle radiazioni elettromagnetiche*, *Rendiconto dell' Accademia delle Scienze Fisiche Matematiche. Società Reale di Napoli. Serie III* 31, 113 (1925).
- [17] A. Carrelli, *Sul valore delle energie caratteristiche dei livelli X*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 3, 144 (1926).
- [18] A. Carrelli, *Sulle righe semiottiche*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 3, 247 (1926).
- [19] A. Carrelli, *Sul paramagnetismo degli elementi compresi fra il Ca e lo Zn*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie VI* 4, 569 (1926).
- [20] A. Carrelli, *Sulla dispersione anomala nel caso di bande larghe e dissimetriche*, *Rendiconto dell' Accademia delle Scienze Fisiche Matematiche. Società Reale di Napoli. Serie III* 32, 202 (1926).
- [21] A. Carrelli, *Sull'effetto fotoelettrico composto*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie VI* 3, 82 (1926).
- [22] A. Carrelli, *Sulle nuove statistiche*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 4, 282 (1927).
- [23] A. Carrelli, *The spinning electron*, *Nature* 119, 492 (1927).
- [24] A. Carrelli, *Sul teorema della concordanza delle fasi di De Broglie*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 4, 137 (1927).
- [25] A. Carrelli, *Sul fenomeno di Compton*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 4, 142 (1927).
- [26] A. Carrelli, *Sul teorema delle somme di Thomas e Reiche*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie VI* 5, 165 (1927).
- [27] A. Carrelli, *Sulla doppia rifrazione paramagnetica*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie VI* 5, 684 (1927).
- [28] A. Carrelli, *Sull'interpretazione idrodinamica della teoria quantistica*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie VI* 5, 990 (1927).

- [29] A. Carrelli, P. Pringsheim, *Die Bildungswärme der K_2 Moleküle*, *Zeitschrift für Physik* 44, 643 (1927).
- [30] A. Carrelli, *Sulla determinazione della velocità di propagazione dell'energia*, *Rendiconto dell'Accademia delle Scienze Fisiche e Matematiche. Società Reale di Napoli. Serie III* 33, 62 (1927).
- [31] A. Carrelli, *Sul calcolo dell'energia di dissociazione delle molecole biatomiche*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 5, 9 (1928).
- [32] A. Carrelli, *Sulle relazioni intercedenti tra le varie statistiche e la meccanica ondulatoria*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 5, 73 (1928).
- [33] A. Carrelli, *Sul nuovo fenomeno di diffusione*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie VI* 8, 155 (1928).
- [34] A. Carrelli, *Sulla larghezza di alcune righe dello spettro del Hg*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie VI* 7, 921, 1014 (1928).
- [35] A. Carrelli, *Sulla relatività a 5 dimensioni*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie VI* 7, 566 (1928).
- [36] A. Carrelli, *Sulla teoria della fluorescenza sensibilizzata*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie VI* 8, 495 (1928).
- [37] A. Carrelli, P. Pringsheim, B. Rosen, *Über den Ramaneffekt an wässrigen Lösungen und über den Polarisationszustand der Linien des Ramaneffekts*, *Zeitschrift für Physik* 51, 511 (1928).
- [38] A. Carrelli, *Sull'enunciato del principio di Nerst*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 5, 341 (1928).
- [39] A. Carrelli, *Sull'allargamento delle righe per risonanza*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 6, 281 (1929).
- [40] A. Carrelli, *The longitudinal distribution of photoelectrons*, *Nature* 123, 836 (1929).
- [41] A. Carrelli, *Sul nuovo fenomeno di diffusione: effetto Raman. Nota II*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie VI* 9, 165 (1929).

- [42] A. Carrelli, *Sulla distribuzione longitudinale dei fotoelettroni*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie VI* 9, 1102 (1929).
- [43] A. Carrelli, *Sull'allargamento delle righe per risonanza. Nota I*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie VI* 9, 222 (1929).
- [44] A. Carrelli, *Sull'allargamento delle righe per risonanza. Nota II*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie VI* 9, 309 (1929).
- [45] A. Carrelli, *Über die longitudinale Verteilung der Photoelektronen*, *Zeitschrift für Physik* 56, 694 (1929).
- [46] A. Carrelli, *Über die Theorie der sensibilisierten Fluoreszenz*, *Zeitschrift für Physik* 53, 210 (1929).
- [47] A. Carrelli, *Der elektronische Ramaneffekt*, *Zeitschrift für Physik* 61, 632 (1930).
- [48] A. Carrelli, *Raman effect in the X-ray region*, *Nature* 125, 201 (1930).
- [49] A. Carrelli, *L'effetto Raman elettronico*, *Rendiconto dell' Accademia di Scienze Fisiche Matematiche. Società Reale di Napoli. Serie III* 35, 265 (1930).
- [50] A. Carrelli, *Su alcune particolarità dell'effetto Raman*, *Rendiconto dell' Accademia delle Scienze Fisiche Matematiche. Società Reale di Napoli. Serie III* 36, 61 (1930).
- [51] A. Carrelli, *Aspetti e possibilità della fisica moderna*, *Acc. Sci. Lett. Arti* (1931).
- [52] A. Carrelli, J. Went, *Intensitätsmessungen im Raman-Spektrum*, *Zeitschrift für Physik* 76, 236 (1932).
- [53] A. Carrelli, *Über einige Regelmäßigkeiten im Aufbau der Isotopen*, *Zeitschrift für Physik* 75, 111 (1932).
- [54] A. Carrelli, *Über die Kernstruktur*, *Physikalische Zeitschrift* 33, 73 (1932).
- [55] A. Carrelli, F. Cennamo, *Sull'intensità dell'effetto Raman nell'acqua*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 10, 329 (1933).

- [56] A. Carrelli, J. Went, *Über den Ramaneffekt in Flüssigkeiten*, *Zeitschrift für Physik* 80, 232 (1933).
- [57] A. Carrelli, *Sull'azione di allargamento di righe spettrali per effetto di aumento di densità*, *Rendiconto dell' Accademia delle Scienze Fisiche Matematiche. Società Reale di Napoli. Serie IV* 3, 39 (1933).
- [58] A. Carrelli, *Sull'azione di allargamento di righe spettrali per effetto di aumento di densità. Nota II*, *Rendiconto dell' Accademia delle Scienze Fisiche Matematiche. Società Reale di Napoli. Serie IV* 3, 101 (1933).
- [59] A. Carrelli, *Sull'intensità dell'effetto Raman*, *Rendiconto dell' Accademia delle Scienze Fisiche Matematiche. Società Reale di Napoli. Serie IV* 3, 156 (1933).
- [60] A. Carrelli, *In memoria di Michele Cantone*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 10, 5 (1933).
- [61] A. Carrelli, *Sopra alcune regolarità esistenti tra gli isotopi*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 11, 542 (1934).
- [62] A. Carrelli, M. Battista, *Sugli spettri d'arco dei metalli alcalini con grande densità di vapore*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 11, 685 (1934).
- [63] A. Carrelli, *Materia e radiazione*, *Scientia* 28, 258 (1934).
- [64] A. Carrelli, *Sul campo agente nell'interno dei ferromagnetici*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 12, 337 (1935).
- [65] A. Carrelli, *Assorbimento ultrarosso di soluzioni acquose*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 12, 65 (1935).
- [66] A. Carrelli, *Sull'assorbimento dell'ossigeno liquido*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 12, 423 (1935).
- [67] A. Carrelli, F. Cennamo, *Sull'intensità del continuo Raman nei miscugli alcool-benzolo*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 14, 217 (1937).
- [68] A. Carrelli, *Sullo spettro di assorbimento dell'acqua allo stato liquido*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 14, 245 (1937).
- [69] A. Carrelli, P. Trautteur, *Sulla relazione tra frequenza e massa ridotta nelle molecole biatomiche*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 14, 301 (1937).
- [70] A. Carrelli, P. Tulipano, *Su alcune armoniche superiori dell'oscillazione C-H nel primo ultrarosso*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 15, 1 (1938).

- [71] A. Carrelli, *Moderne idee sulle forze nucleari*, *Scientia* (1938).
- [72] A. Carrelli, *L'elettrone positivo*, *Rivista di fisica, matematica e scienze naturali* 16, 1 (1938).
- [73] A. Carrelli, *Potere emissivo totale e parziale di alcune sostanze. Nota I*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie VI* 29, 241 (1939).
- [74] A. Carrelli, *Potere emissivo totale e parziale di alcune sostanze. Nota II*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie VI* 29, 381 (1939).
- [75] A. Carrelli, *Potere emissivo totale e parziale di alcune sostanze. Nota III*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie VI* 29, 435 (1939).
- [76] A. Carrelli, *Potere emissivo totale e parziale di alcune sostanze. Nota IV*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie VI* 29, 664 (1939).
- [77] A. Carrelli, *Sulle proprietà ottiche dei metalli*, *Rendiconto dell' Accademia delle Scienze Fisiche Matematiche. Società Reale di Napoli. Serie IV* 9, 3 (1939).
- [78] A. Carrelli, *Sull'emissione termica nella prima zona ultrarossa di alcuni silicati*, *Il Nuovo Cimento Nuova Serie* 17, 271 (1940).
- [79] A. Carrelli, *Sul potere emissivo parziale di alcuni cloruri*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie VII* 2, 51 (1940).
- [80] A. Carrelli, *Sulle proprietà ottiche dei metalli*, *Atti della R. Accademia d'Italia. Memorie della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali. Serie VI* 11, 315 (1940).
- [81] A. Carrelli, G. Mattioli, *Sul principio di Hamilton*, *Atti della R. Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Serie VII* 2 (1941).
- [82] A. Carrelli, *Sulla deduzione del secondo principio della termodinamica*, *Rendiconto dell' Accademia delle Scienze Fisiche Matematiche. Società Reale di Napoli. Serie IV* 13, 1 (1942-45).

- [83] A. Carrelli, *La moderna concezione delle particelle elementari*, *Rendiconto dell' Accademia delle Scienze Fisiche Matematiche. Società Reale di Napoli. Serie IV* 13, 1 (1942-45).
- [84] A. Carrelli, *Nuove concezioni sul timbro degli strumenti e sul fenomeno dei suoni armonici*, *Bollettino del R. Conservatorio di Musica-Napoli.* 5 (1942).
- [85] A. Carrelli, *Sulla polarizzazione della luce del cielo. Nota I*, *Atti dell' Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali* 1, 493 (1946).
- [86] A. Carrelli, *Sulla polarizzazione della luce del cielo. Nota II*, *Atti dell' Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali* 1, 907 (1946).
- [87] A. Carrelli, *Sulla polarizzazione della luce del cielo. Nota III*, *Atti dell' Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali* 1, 1012 (1946).
- [88] A. Carrelli, *Sulla polarizzazione della luce del cielo. Nota IV*, *Atti dell' Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali* 1, 1242 (1946).
- [89] A. Carrelli, *Sul segno dell'effetto Hall*, *Il Nuovo Cimento Serie IX* 3, 40 (1946).
- [90] N. Altieri, A. Carrelli, *Sul segno dell'effetto Hall*, *Il Nuovo Cimento Serie IX* 6, 176 (1949).
- [91] A. Carrelli, F. Porreca, *Sulla propagazione di onde ultrasonore nei liquidi*, *Il Nuovo Cimento Serie IX* 7, 94 (1950).
- [92] G. Branca, Carrelli, *Sulla compressibilità delle soluzioni elettrolitiche*, *Il Nuovo Cimento Serie IX* 7, 190 (1950).
- [93] A. Carrelli, F. Porreca, *Su alcune particolarità dei reticoli ultrasonori*, *Il Nuovo Cimento Serie IX Supp.* 7, 191 (1950).
- [94] A. Carrelli, L. Rescigno, *Misure di conducibilità ad alte frequenze. Nota I*, *Il Nuovo Cimento Serie IX* 7, 1 (1950).
- [95] A. Carrelli, L. Rescigno, *Misure di conducibilità ad alte frequenze. Nota II*, *Il Nuovo Cimento Serie IX* 7, 9 (1950).

- [96] G. Branca, Carrelli, *Onde di viscosità in reticoli ultrasonori*, *Supplemento al Nuovo Cimento Serie IX* Supp. 7, 190 (1950).
- [97] A. Carrelli, G. Branca, *Visualizzazione delle onde di viscosità nei liquidi*, *Il Nuovo Cimento Serie IX* 8, 889 (1951).
- [98] A. Carrelli, L. Rescigno, *Misure di conducibilità in alta frequenza con soluzioni dotate di notevole viscosità*, *Il Nuovo Cimento Serie IX* 8, 308 (1951).
- [99] A. Carrelli, *La fisica nella società moderna*, *Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti delle adunanze solenni [1950]* 5, 317 (1952).
- [100] A. Carrelli, F. Porreca, *Ultrasonic grating remaining after the stopping of the ultrasonic waves.*, *Il Nuovo Cimento Serie IX* 9, 90 (1952).
- [101] A. Carrelli, L. Rescigno, *Misure di conducibilità in alta frequenza con soluzioni viscosi*, *Il Nuovo Cimento Serie IX* 9, 618 (1952).
- [102] A. Carrelli, L. Rescigno, *Misure di conducibilità di elettroliti forti e deboli in alta frequenza*, *Il Nuovo Cimento Serie IX* 9, 719 (1952).
- [103] A. Carrelli, L. Rescigno, *Misure della costante dielettrica di soluzioni saline acquose in alta frequenza*, *Il Nuovo Cimento Serie IX* 9, 1 (1952).
- [104] A. Carrelli, E. Tartaglione, *Diffrazione di raggi X da parte di soluzioni acquose di zucchero caramellato*, *Il Nuovo Cimento Serie IX* 9, 440 (1952).
- [105] A. Carrelli, F. Porreca, *Ultrasonic grating remaining after the stopping of the ultrasonic waves. (II)*, *Il Nuovo Cimento Serie IX* 10, 98 (1953).
- [106] A. Carrelli, F. Porreca, *Ultrasonic grating remaining after the stopping of the ultrasonic waves. (III)*, *Il Nuovo Cimento Serie IX* 10, 883 (1953).
- [107] A. Carrelli, F. Porreca, *Ultrasonic grating remaining after the stopping of the ultrasonic waves. (IV)*, *Il Nuovo Cimento Serie IX* 10, 1406 (1953).
- [108] A. Carrelli, *Sul problema della separabilità delle variabili*, *Il Nuovo Cimento Serie IX* 10, 1213 (1953).
- [109] A. Carrelli, *La materia nella fisica contemporanea*, *Nuova Antologia* (1953).
- [110] A. Carrelli, *La moderna teoria dei semiconduttori*, *Elettronica* (1953).
- [111] A. Carrelli, F. Cennamo, *Sulla viscosità di volume (I)*, *Il Nuovo Cimento Serie IX* 11, 429 (1954).

- [112] A. Carrelli, G. Branca, *Su di un'onda di pressione nei liquidi*, *Il Nuovo Cimento Serie IX* 11, 590 (1954).
- [113] A. Carrelli, F. Cennamo, *Sulla viscosità di volume (II)*, *Il Nuovo Cimento Serie IX* 12, 1 (1954).
- [114] A. Carrelli, *Sulla costante cosmologica*, *Memorie della Società di Astronomia Italiana* 25, 305 (1954).
- [115] A. Carrelli, F. S. Gaeta, *Duration of the diffraction grating in relation to the state of the powders in suspension*, *Il Nuovo Cimento Serie X* 2, 898 (1955).
- [116] A. Carrelli, F. Cennamo, *La viscosità di volume (III)*, *Il Nuovo Cimento Serie X* 1, 365 (1955).
- [117] A. Carrelli, *Sul secondo coefficiente di viscosità dei liquidi*, *Il Nuovo Cimento Serie X* 1, 154 (1955).
- [118] A. Carrelli, F. Porreca, *Ultrasonic grating remaning after stopping the supersonic waves (V)*, *Il Nuovo Cimento Serie X* 1, 527 (1955).
- [119] A. Carrelli, *L'opera di Einstein*, *Nuova Antologia* (1955).
- [120] A. Carrelli, A. De Vito, *Dinamic determination of viscosity*, *Il Nuovo Cimento Serie X* 4, 1009 (1956).
- [121] A. Carrelli, *Relazione sulla memoria di G. Motta*, *Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Memorie della Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali, Serie VIII* 5, 83 (1956).
- [122] A. Carrelli, E. Grossetti, *On thermoelastic waves in liquids*, *Il Nuovo Cimento Serie X* 3, 1254 (1956).
- [123] A. Carrelli, *L'antiprotoni*, *Nuova Antologia* (1956).
- [124] A. Carrelli, F. Porreca, *Information on a 2.5 MeV microtron*, *Il Nuovo Cimento Serie X* 6, 729 (1957).
- [125] A. Carrelli, F. S. Gaeta, *A new method for the determination of the acoustic absorption*, *Il Nuovo Cimento Serie X* 5, 773 (1957).
- [126] A. Carrelli, E. Ragozzino, *Dynamic determination of viscosity*, *Il Nuovo Cimento Serie X* 8, 356 (1958).
- [127] A. Carrelli, F. Cennamo, *Measurement of the wind produced in liquids by an excited piezoelectric quartz*, *Il Nuovo Cimento Serie X* 9, 303 (1958).

- [128] A. Carrelli, G. Cozza, F. Gaeta, *The Debye effect in electrolytic and colloidal solutions in high frequency acoustic fields*, *Il Nuovo Cimento Serie X* 11, 139 (1959).
- [129] A. Carrelli, E. Ragozzino, *On the viscosity of fluids*, *Il Nuovo Cimento Serie X* 13, 555 (1959).
- [130] A. Carrelli, *On the mass of elementary particles*, *Il Nuovo Cimento Serie X* 11, 289 (1959).
- [131] A. Carrelli, M. Marinaro, *On the mechanical moment of rotation of mixtures of liquids in rotating electric fields*, *Il Nuovo Cimento Serie X* 11, 262 (1959).
- [132] A. Carrelli, *On Machs principle*, *Il Nuovo Cimento Serie X* 13, 853 (1959).
- [133] A. Carrelli, L. Della Caggia, *On the dielectric constant of some aqueous solutions*, *Il Nuovo Cimento Serie X* 14, 161 (1959).
- [134] A. Carrelli, M. Marinaro, *Velocity of propagation of thermoelastic waves in liquids*, *Journal de Physique Radium* 22, 385 (1961).
- [135] A. Carrelli, F. Porreca, *Variation of the rotatory power in an optical antipode, produced by 2 MeV electrons*, *Il Nuovo Cimento Serie X* 19, 844 (1961).
- [136] A. Carrelli, F. Porreca, *On the viscosity of liquids*, *Il Nuovo Cimento Serie X* 19, 197 (1961).
- [137] A. Carrelli, F. Porreca, *Experimental behaviour of the complex coefficient of viscosity with the temperature for the frequency of 50 Hz*, *Il Nuovo Cimento Serie X* 23, 665 (1962).
- [138] A. Carrelli, F. Grossetti, M. Marinaro, *On the intensity and shape of nuclear quadrupolar signals*, *Il Nuovo Cimento Serie X* 26, 1144 (1962).
- [139] A. Carrelli, *Metodologia dell'elettricit , del magnetismo e dell'elettromagnetismo*, *Il Giornale di Fisica* 3, 288 (1962).
- [140] A. Carrelli, *Metodologia Meccanica*, *Il Giornale di Fisica* 3, 207 (1962).
- [141] A. Carrelli, *Le prove sperimentali della teoria cinetica*, *Il Giornale di Fisica* 3, 19 (1962).
- [142] A. Carrelli, L. Pauciulo, *The formation of the mechanical moment in dipolar liquids in a rotating electric field*, *Il Nuovo Cimento Serie X* 28, 1388 (1963).

- [143] A. Carrelli, E. Ragozzino, *Nuclear magnetic resonance in paraffin and wax, Il Nuovo Cimento Serie X* 33, 673 (1964).
- [144] A. Carrelli, *Il concetto di spinore, Il Giornale di Fisica* 5, 180 (1964).
- [145] A. Carrelli, E. Ragozzino, *On the thermal relaxation times of special liquids in nuclear magnetic resonance, Il Nuovo Cimento Serie X* 35, 731 (1965).
- [146] U. Bernini, A. Carrelli, F. Porreca, *Longitudinal Matteucci effect, Il Nuovo Cimento B Serie XI* 45, 249 (1966).
- [147] U. Bernini, A. Carrelli, F. Porreca, *Viscosity effects in the dynamic state for Newtonian and non-Newtonian liquids, Journal de Physique* 27, 489 (1966).
- [148] A. Carrelli, F. Porreca, A. Campolattaro, *On some effects of torsion on the magnetization of ferromagnetic cubic crystals, Il Nuovo Cimento B Serie XI* 45, 153 (1966).
- [149] A. Carrelli, F. Fittipaldi, L. Pauciulo, *A new method for the determination of the dielectric constant in photoconductors, Il Nuovo Cimento B Serie XI* 46, 210 (1966).
- [150] A. Carrelli, F. Porreca, M. Bourg, *Sur l'irradiation avec des e^- des couches minces de fluorure de lanthane, C. R. Acad. Sc. Paris* 263, 1334 (1966).
- [151] A. Carrelli, G. Brescia, E. Grossetti, *Further Experiments on the Bloch-Siegert Effect, Annalen der Physik* 474, 205 (1967).
- [152] A. Carrelli, F. Fittipaldi, L. Pauciulo, *Determination of electrical conductivity of photoconductors without contacting electrodes, Journal of Physics and Chemistry of Solids* 28, 297 (1967).
- [153] A. Carrelli, F. Porreca, *Some recent aspects of torsional magnetoelastic effects, IEEE Transactions on Magnetism* 4, 540 (1968).
- [154] U. Bernini, A. Carrelli, F. Porreca, *Particolarità sperimentali della magnetizzazione per torsione di fili ferromagnetici, La ricerca scientifica* 38, 1162 (1968).
- [155] G. Brescia, A. Carrelli, E. Grossetti, *Conducibilità elettrolitica ad altissima frequenza, Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti della classe di scienze fisiche, matematiche e naturali. Serie VIII* 48, 608 (1970).

- [156] A. Carrelli, C. Luponio, F. Porreca, *Effetti di una magnetizzazione rapida su fili di sostanze ferromagnetiche*, *Rendiconto dell'Accademia di Scienze Fisiche e Matematiche della Società Nazionale di Scienze Lettere ed Arti di Napoli, Serie 4* 39, 3 (1972).
- [157] A. Carrelli, G. Brescia, *Dispositivo sperimentale per la determinazione della forma d'immagini fotografiche*, *Rendiconto dell'Accademia di Scienze Fisiche e Matematiche della Società Nazionale di Scienze Lettere ed Arti di Napoli, Serie 4* 39, 88 (1972).
- [158] A. Carrelli, C. Luponio, F. Porreca, *Propagazione radiale di un transiente magnetico in cilindri ferromagnetici*, *Rendiconto dell'Accademia di Scienze Fisiche e Matematiche della Società Nazionale di Scienze Lettere ed Arti di Napoli, Serie 4* 40, 44 (1973).
- [159] A. Carrelli, C. Luponio, F. Porreca, *Magnetizzazione latente in ferromagnetici sottoposti a transienti magnetici*, *Rendiconto dell'Accademia di Scienze Fisiche e Matematiche della Società Nazionale di Scienze Lettere ed Arti di Napoli, Serie 4* 41, 3 (1974).
- [160] A. Carrelli, *Lezioni di Fisica Teorica*, Napoli (1936).
- [161] A. Carrelli, *Lezioni di Fisica Teorica, raccolte dalle dott.sse B. Scognamiglio e P. Tulipano*, G.U.F. Mussolini Napoli (1936).
- [162] A. Carrelli, *Lezioni di Fisica Teorica*, G.U.F. Mussolini Napoli (1937).
- [163] A. Carrelli, *Lezioni di Fisica Teorica, raccolte dalla dott.G. Cena*, G.U.F. Mussolini Napoli (1939).
- [164] A. Carrelli, *Lezioni di Fisica Teorica, raccolte dalla dott.ssa L. Mercogliano*, G.U.F. Mussolini Napoli (1941).
- [165] A. Carrelli, *Lezioni di Fisica Teorica, raccolte dalla dott.ssa L. Mercogliano*, G.U.F. Mussolini Napoli (1942).
- [166] A. Carrelli, *Corso di Fisica per i Licei classici*, A. Morano Napoli (1941).
- [167] A. Carrelli, F. Cennamo, *Raccolta di esercizi di Fisica*, A. Morano Napoli (1941).
- [168] A. Carrelli, *Appunti di Lezioni di fisica superiore*, Ed. Libreria Treves di L. Lupi, Napoli (1955).

- [169] A. Carrelli, *Lezioni di fisica sperimentale : Vol. I. Meccanica, acustica, termologia*, Ed. Libreria Treves di L. Lupi, Napoli (1956).
- [170] A. Carrelli, *Lezioni di fisica sperimentale : Vol. II. Ottica-elettricità*, Ed. Libreria Treves di L. Lupi, Napoli (1956).
- [171] A. Carrelli, *Corso di Fisica*, Società Editrice Internazionale di Torino (1957).
- [172] A. Carrelli, *Manuale di fisica medica*, Principato (1961).
- [173] A. Carrelli, *La Teoria quantistica: esposizione critica della nuova fisica*, Pontificia Accademia delle Scienze, Scuola Tipografica Pio X (1931).
- [174] A. Carrelli, *La Teoria dei quanti*, Collezione Omnia, Paolo Cremonese (1932).
- [175] A. Carrelli, *Limiti e possibilità della scienza: considerazioni filosofiche di un fisico*, G. Laterza (1947).
- [176] A. Carrelli, *La materia*, Universale Studium (1955).
- [177] A. Carrelli, *L'universo e le particelle*, Saggi (ERI), ERI (1970).
- [178] A. Carrelli, *Le esperienze dell'euratom*, in *La comunità europea. Storia e problemi*, 91, Leo S. Olschki (1969), accademia Toscana di Scienze e Lettere La Colombaria.

Riferimenti bibliografici

- [AAL] AAL. Archivio Accademia dei Lincei, Faldone su Antonio Carrelli.
- [AALb] AALb. Archivio Accademia dei Lincei, Premio Sella, Titolo 13, Fascicolo 143, Busta 12.
- [ACSa] ACSa. Archivio Centrale dello Stato, Fondo M.P.I. Direzione Generale Divisione I Liberi Docenti II Serie (1910-1930).
- [ACSB] ACSb. Archivio Centrale dello Stato, Fondo M.P.I. Concorsi a cattedra nell'Università 1924-1954, busta 34.
- [AUN] AUN. Archivio dell'Università di Napoli Federico II, Busta 67 Professori Ordinari.
- [Bassani, 2006] Bassani, G. F., Cifarelli, L., Sanctis, E. D., Piragino, G., Ricci, R. (2006). *Il Nuovo Cimento. Scritti Scelti 1855-1944*. Società Italiana di Fisica.

- [Bateman, 1926] Bateman, H. (1926). A possible connection between the wave-theory of matter and electro-magnetism. *Nature*, 118:839.
- [Berry, 2004] Berry, M. V., Dennis, M., and Jr, R. L. (2004). Polarization singularities in the clear sky. *New Journal of Physics*, 6:162.
- [Bonizzoni, 2002] Bonizzoni, I. (2002). Le interviste. *Per una storia della fisica italiana (1945-1965)* a cura di G. Giuliani.
- [Bonolis, 2008a] Bonolis, L. (2008a). *Fisici italiani del tempo presente*. Marsilio.
- [Bonolis, 2008b] Bonolis, L. (2008b). *Maestri e allievi nella fisica italiana del novecento*. Percorsi della Fisica.
- [Borrelli, 2002] Borrelli, A., Gatto, R. (2002). L'insegnamento delle scienze. In *Napoli e la Campania nel Novecento* a cura di A. Croce, F. Tessitore e D. Conte. Edizioni del Millennio. volume III.
- [Broglie, 1927] Broglie, L. D. (1927). Sur la possibilité de mettre en accord la théorie electromagnetique avec la nouvelle mécanique ondulatoire. *Comptes Rendus*, 184:81.
- [Chadwick, 1932] Chadwick, J. (1932). Possible existence of a neutron. *Nature*, 129:312.
- [Chandrasekhar, 1951] Chandrasekhar, S. and Elbert, D. (1951). Polarization of the sunlit sky. *Nature*, 167:51.
- [DBI] Schettino E., *Carrelli, Antonio*, Dizionario Biografico degli Italiani, Treccani; http://www.treccani.it/enciclopedia/ricerca/carrelli/Dizionario_Biografico/.
- [Radicati, 1981] di Brozolo, L. A. R. (1981). Antonio carrelli. *Rendiconti dell'Accademia Nazionale dei Lincei, Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali*, 70:243.
- [Dickinson, 1929] Dickinson, R. G., Dillon, R. T., and Rasetti, F. (1929). Raman spectra of polyatomic gases. *Phys. Rev.*, 34(4):582–589.
- [Eckart, 1948] Eckart, C. (1948). Vortices and streams caused by sound waves. *Phys. Rev.*, 73:68–76.
- [Fermi, 1961] Fermi, E. (1961). *Note e memorie*. Accademia Nazionale dei Lincei-Roma The University of Chicago Press.

- [Filangieri, 1940] Filangieri, R. (1940). *Relazione sull'isolamento e sui restauri di Castel Nuovo*. R. Tipografia Giannini, Napoli.
- [Gingrich, 1930] Gingrich, N. S. (1930). An analysis of scattered x-rays with the double crystal spectrometer. *Phys. Rev.*, 36:1050–1059.
- [Guerra, 2008] Guerra, F., Robotti, N. (2008). *Ettore Majorana Aspects of His Scientific and Academic Activity*. Edizioni della Normale.
- [Maiocchi, 2002] Maiocchi, R. (2002). La fisica a napoli nel novecento. In *Napoli e la Campania nel Novecento* a cura di A. Croce, F. Tessitore e D. Conte. Edizioni del Millennio. Volume III.
- [Nagaosa, 2010] Nagaosa, N., Sinova, J., Onoda, S., MacDonald, A. H., and Ong, N. P. (2010). Anomalous Hall effect. *Rev. Mod. Phys.*, 82:1539–1592.
- [Placzek, 1931] Placzek, G. (1931). Intensität und Polarisation der Ramanschen Streustrahlung mehratomiger Moleküle. *Zeitschrift für Physik*, 70:84.
- [Raman, 1928] Raman, C. V. and Krishnan, K. S. (1928). A new type of secondary radiation. *Nature*, 121:501.
- [Rasetti, 1929] Rasetti, F. (1929). Raman effect in gases. *Nature*, 123:205.
- [Rossi, 2006] Rossi, M. L. (2006). The origin of semiconductor physics in italy: 1945 - 1965. *Quaderni di Storia della Fisica*, 3:3.
- [Russo, 2010] Russo, L. and Santoni, E. (2010). *Ingegneria minuti*. Feltrinelli.
- [Seitz, 1940] Seitz, F. (1940). *The Modern Theory of Solids*. McGraw-Hill Book Company, New York and London.
- [Sette, 1949] Sette, D. (1949). L'assorbimento delle onde ultrasonore nei liquidi. *Supplemento al Nuovo Cimento*, 6:1.
- [Skorski, 1964] Skorski, R. (1964). Matteucci effect: Its interpretation and its use for the study of ferromagnetic matter. *Journal of Applied Physics*, 35:1213.