

RICORDANDO ANGELO LOINGER

ANTONIO GIORGILLI (*)

(Adunanza del 21 ottobre 2021)

Il Professor Angelo Loinger nacque a Verona il 1 aprile 1923, e in quella città frequentò il Liceo classico. Ottenne la laurea in Fisica all'Università di Bologna il 25 luglio 1947, con qualche ritardo sul piano di studi a causa della guerra. Nell'anno 1947-48 fu assistente volontario a Padova. Dal 1948 fino al novembre 1960 fu assistente del Prof. Piero Caldirola alla Cattedra di Fisica Teorica a Pavia; nel frattempo conseguì la libera docenza, nel 1956. Nel 1960, avendo vinto il concorso a cattedra, fu chiamato all'Università di Messina, ove rimase un solo anno accademico. Nel 1961 fu chiamato a coprire la Cattedra di Fisica Teorica a Pavia, ove rimase fino al 1967; è considerato come fondatore della scuola di Fisica Teorica di Pavia, insieme a Piero Caldirola, Pietro Bocchieri e Paolo Gulmanelli. Dal novembre 1967 ottenne la Cattedra di Fisica Teorica a Milano, ove rimase fino al pensionamento, nel novembre 1996. Nel 1970 fu insignito del Premio Triennale per la Fisica "F. Somaini". Cooptato il 26 maggio 1977 come Socio Corrispondente dell'Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, venne nominato Membro Effettivo il 23 giugno 1983. È deceduto a Pavia, il 21 dicembre 2020.

1. ATTIVITÀ SCIENTIFICA

Gli interessi scientifici di Angelo Loinger spaziano dai Fondamenti della Meccanica Quantistica, alla Meccanica Statistica Classica e Quantistica,

(*) Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, Milano. Università degli Studi di Milano, Italy. E-mail: antonio.giorgilli@unimi.it

alla Relatività Generale, a qualche breve escursione nel campo della logica. Le sue pubblicazioni, oltre 160, coprono un arco temporale che inizia nel 1949, con un articolo nel Volume 6 del Nuovo Cimento, e si estende fino ai suoi ultimi mesi di vita.

Da una lettura dei lavori di Angelo Loinger emerge la figura di uno scienziato che potrebbe definirsi un “fisico militante”. Nell’affrontare un argomento di ricerca parte dai lavori fondamentali, citando in dettaglio i riferimenti rilevanti, e ne analizza i minimi particolari; individua i concetti che ritiene corretti e li ripropone in forma sintetica. La sua attenzione si focalizza principalmente su problemi di fondamento che affronta con atteggiamento molto critico. Spirito vivacemente polemico, assume spesso posizioni contro corrente o di aperta rottura, talvolta giudicate eterodosse, che difende con tenacia e determinazione.

Nello svolgersi dell’attività scientifica di Angelo Loinger si possono isolare alcuni temi a cui saranno dedicati i paragrafi che seguono.

1.1 *Il teorema ergodico di von Neumann*

Il problema ergodico, che trae origine dagli studi di Boltzmann, viene affrontato ripetutamente da Loinger in collaborazione con Bocchieri. La formulazione del problema in ambito classico si fa risalire all’*ipotesi ergodica* di Boltzmann: *un sistema meccanico isolato a molti corpi (ad esempio un gas) nel corso della sua evoluzione visita in modo uniforme tutti gli stati compatibili con la conservazione dell’energia*. Per quanto l’enunciato sia in apparenza plausibile, la formulazione precisa del problema non è affatto banale: la ricchezza di comportamenti della dinamica costringe a prendere in considerazione un gran numero di orbite che non soddisfano il requisito richiesto; in altre parole, esistono stati iniziali che danno luogo a evoluzioni particolari quali, per citare solo il caso più semplice, orbite periodiche con il loro corredo di varietà stabili e instabili. Occorre dunque introdurre il concetto di “proprietà valida per quasi tutte le orbite”, in un senso che deve essere precisato in termini di una qualche misura dell’insieme di orbite ergodiche. Ancor più difficile è dimostrare che l’enunciato si applichi effettivamente, in senso generale, a un sistema fisico: in effetti tale dimostrazione non è mai stata portata a termine. Nei primi decenni del XX secolo il problema è stato rinenunciato sotto la forma di transitività metrica: *ogni sottoinsieme invariante della superficie dell’energia ha misura zero oppure uno*. Oppure, in forma simile: *non si può decomporre la superficie dell’energia in sottoinsiemi invarianti di misura positiva*. Resta però il fatto che una tale proprietà, tacitamente ammessa, non è

dimostrata come fatto generale. Tra gli studi fondamentali sul teorema ergodico in Meccanica Classica si collocano i lavori di von Neumann, Birkhoff e Hopf, insieme ad altri. La formulazione del problema ergodico in ambito quantistico è dovuta a von Neumann (1929), ed è stata in seguito semplificata da Pauli e Fierz (1937).

Un primo lavoro di Bocchieri e Loinger, pubblicato nel 1956, prende in considerazione una proprietà più debole dell'ergodicità, *dimostrata* da Poincaré in ambito classico: *dato un qualunque stato iniziale dello spazio delle fasi di un sistema chiuso in un volume finito, in un suo qualunque intorno esiste un'orbita che torna a visitare quell'intorno dopo un tempo finito (che può essere molto lungo)*. Bocchieri e Loinger estendono quel risultato all'ambito quantistico: *in un sistema quantistico con spettro di autovalori dell'energia discreto, l'evoluzione riporta il sistema arbitrariamente vicino allo stato iniziale dopo un tempo finito*. L'aspetto interessante della dimostrazione è che viene messo in evidenza il comportamento *quasi periodico* dell'evoluzione: il problema si riconduce al cosiddetto flusso di Kronecker su un toro, per il quale la ricorrenza e l'ergodicità sono proprietà note. La condizione sullo spettro di energia discreto corrisponde a quella di volume finito nell'enunciato di Poincaré.

La corrispondenza con il caso classico di moto quasi periodico è alla base anche del teorema ergodico dimostrato da von Neumann nel caso quantistico. La difficoltà in questo caso è l'intervento di un osservatore, il cui atto di misurazione è inevitabilmente soggetto alle regole di indeterminazione. Bocchieri e Loinger, seguendo von Neumann, parlano di "macro-osservatore", che è in grado di eseguire una misura solo in modo approssimato. Tale concetto si sviluppa nell'introdurre anche nel caso quantistico una suddivisione della superficie dell'energia in celle, in analogia col caso classico. Come nel caso delle ricorrenza, gli autori dimostrano che l'ergodicità non richiede nessuna particolare proprietà di tipo dinamico: la stessa ipotesi che l'evoluzione sia quella prevista dall'equazione di Schrödinger non è rilevante. Di conseguenza il teorema di von Neumann è da considerarsi *vuoto*, perché si può dimostrare senza alcuna ipotesi.

Come spesso accade, la messa in discussione di risultati di scienziati celebri suscita forti perplessità e critiche in seno alla comunità scientifica. In quell'occasione Loinger e Bocchieri entrano in contatto con Rosenfeld a Copenaghen. Dubbioso all'inizio, Rosenfeld finisce col convincersi della validità del risultato ottenuto dai due scienziati italiani; egli sarà, per il resto della sua vita, un sincero sostenitore della loro attività di ricerca, e un prezioso punto di riferimento.

1.2 *Teoria quantistica della misurazione*

Il processo di misurazione ha un ruolo fondamentale in Meccanica Quantistica. Anche qui, il punto di partenza è la teoria formale elaborata da von Neumann nel 1932, e in seguito ripresa e discussa da diversi autori. In forma schematica, il problema nasce dal fatto che qualunque processo di misurazione richiede una qualche forma di interazione tra l'oggetto sottoposto a misura e l'apparato con cui si esegue quella misura. Nel caso di interesse l'oggetto è microscopico, mentre l'apparato è macroscopico. Il procedimento di misura richiede che l'oggetto modifichi lo stato dell'apparecchiatura, senza che il suo stato venga modificato sensibilmente. Nel caso quantistico sia l'oggetto da misurare che l'apparecchiatura sono caratterizzati da una sovrapposizione di stati, a ciascuno dei quali corrisponde un possibile risultato della misurazione.

Nello schema di von Neumann ciò che un osservatore intende rilevare è la modifica indotta nello stato dell'apparecchiatura; quello stato però deve essere a sua volta oggetto di misurazione. Occorre quindi introdurre una seconda apparecchiatura che riveli lo stato della prima, poi una terza che riveli lo stato della seconda, e così di seguito, fino a coinvolgere gli organi sensoriali e nervosi dell'osservatore. Ne consegue una visione soggettiva (o solipsistica) del processo di misurazione.

La proposta di Loinger, con i suoi collaboratori Prosperi e Daneri, viene stimolata da alcuni spunti contenuti nel trattato di Ludwig di Meccanica Quantistica del 1954. Su quella base propongono una teoria della Misura Quantistica più vicina al realismo dei laboratori di quanto non fosse quella assolutamente solipsistica di von Neumann. In breve, si tratta di interrompere la catena infinita di apparecchiature ipotizzata dalla teoria di von Neumann fermandosi al primo livello, così da rendere oggettivi i risultati della misurazione in quanto indipendenti dall'osservatore. A tal fine introducono il punto di vista della Meccanica Statistica. Si richiede che l'apparecchio di misura possa trovarsi in diversi stati metastabili di equilibrio a ciascuno dei quali è associato un possibile risultato della misurazione, riconoscibile grazie alla caratterizzazione dello stato in senso statistico. La misurazione consiste in una transizione dell'apparecchiatura stessa da uno stato iniziale a uno stato metastabile diverso che permane per un tempo abbastanza lungo da poter essere osservato, fin che non viene ripristinato lo stato iniziale da un intervento esterno. Al fine di descrivere il meccanismo portano l'esempio di un contatore Geiger o di un contatore proporzionale, strumenti in uso in quegli anni. Il passaggio di una particella carica (che è l'oggetto quantistico da osservare) provoca una

ionizzazione del gas all'interno del contatore, seguita da una scarica che modifica i potenziali elettrici all'interno del contatore stesso. La modifica permane anche quando la ionizzazione prodotta dalla particella si è esaurita, il che consente di rilevarla prima di ripristinare lo stato iniziale del contatore.

Che i risultati di questo studio potessero essere pubblicati non era scontato. Perché la pubblicazione andasse a buon fine fu necessario l'intervento di Rosenfeld. L'articolo fu inviato alla rivista *Nuclear Physics* con una nota aggiunta da Rosenfeld in cui si legge: "Questo lavoro sarebbe piaciuto a Niels Bohr". Merito di questi contributi, tutt'ora citati, è stato soprattutto quello di ridestare nella comunità scientifica un rinnovato interesse per questo tipo di problemi di fondamento, dopo la parentesi della guerra.

1.3 *L'equipartizione dell'energia in ambito classico*

Nei primi anni '70 Loinger, in collaborazione con Pietro Bocchieri e Antonio Scotti, concentra la sua attenzione sul fenomeno dell'equipartizione dell'energia, aprendo una discussione sui fondamenti della Meccanica Statistica Classica. In alcuni lavori si mette in evidenza l'incompatibilità dell'equipartizione con l'Elettrodinamica Classica. Il lavoro che può considerarsi come il più significativo, alla luce dell'attenzione ricevuta e delle numerose discussioni che ne sono seguite, prende le mosse dall'ultimo impegno scientifico di Fermi: un rapporto interno firmato da Enrico Fermi, John Pasta e Stanislaw Ulam, catalogato come N. 1940 negli annuari di Los Alamos del 1955. Il modello studiato è stato ribattezzato in seguito con l'acronimo FPU. In quel lavoro si pone il problema di studiare numericamente l'approccio all'equipartizione dell'energia in una catena di particelle interagenti con un potenziale non lineare. Si tratta di un modello discretizzato, già studiato da Lagrange, che approssima il comportamento di una corda continua con estremi fissi – come quella di un clavicembalo o pianoforte. Nell'approssimazione di interazione elastica si individuano dei *modi normali*, analoghi a quelli di una corda continua, che mantengono ciascuno la propria energia. L'aggiunta di una non linearità genera un accoppiamento che modifica il comportamento della catena, e la previsione della Meccanica Statistica è che l'energia tenda in media temporale a equidistribuirsi tra tutti i modi normali. Il risultato sorprendente di una simulazione numerica della dinamica è che non si osserva nessuna tendenza all'equipartizione prevista; l'energia tende invece a restare localizzata su pochi modi normali.

Pietro Bocchieri, Antonio Scotti, Bruno Bearzi e Angelo Loinger svolgono uno studio numerico dettagliato su un modello qualitativamente simile a quello di Fermi, ma più aderente alla realtà fisica in quanto introducono il potenziale molecolare di interazione di Lennard–Jones con parametri corrispondenti a una catena di atomi di argon. Nel loro lavoro, poi ribattezzato con l’acronimo BSBL, si mette in evidenza l’esistenza di una *soglia critica* di energia specifica (ovvero energia media per particella) al di sopra della quale il sistema tende effettivamente all’equipartizione dell’energia tra i modi; tuttavia gli autori fanno osservare che ciò non implica necessariamente l’ergodicità della dinamica. Il fatto interessante è che per energie specifiche inferiori alla soglia il comportamento osservato in FPU viene pienamente confermato. Restano aperte diverse questioni, che gli autori non mancano di menzionare. Se ne possono richiamare due, particolarmente rilevanti. La prima è se il comportamento osservato calcolando l’evoluzione per un *numero di particelle* pari a qualche decina persista anche al crescere di tale numero; la seconda è se il *tempo di integrazione* sia sufficientemente lungo da potersi considerare realistico. Gli autori, pur con le dovute cautele, suggeriscono che i fenomeni osservati, in particolare l’esistenza di una soglia in energia specifica, persistano al crescere sia del tempo che del numero di particelle.

Negli anni immediatamente precedenti al lavoro BSBL il rapporto FPU era stato ripreso da Joseph Ford mettendo in evidenza proprio i problemi appena accennati. Negli anni successivi la discussione coinvolge anche molti altri ricercatori a livello mondiale. Si formano diverse scuole di pensiero. Alcuni ritengono che la soglia in energia specifica scompaia al crescere del numero di particelle; altri ritengono che si tratti di una questione di tempo di integrazione, e che l’equipartizione venga raggiunta in tempi più lunghi; altri ancora ritengono corretta la congettura BSBL. Naturalmente, tra queste tre possibilità c’è spazio per molte variazioni.

Il cosiddetto “problema FPU” è ancor oggi oggetto di studio. Negli anni successivi sono stati di gran lunga superati i limiti imposti dalla potenza di calcolo dei calcolatori di fine anni ’60, e le simulazioni numeriche della dinamica si sono moltiplicate a dismisura, ma non si può affermare che tutte le questioni sollevate da Loinger e dai suoi collaboratori abbiano ricevuto una risposta definitiva.

1.4 *L’effetto Aharonov–Bohm*

In un articolo del 1959 Aharonov e Bohm sollevano un problema che attinge ai fondamenti della Meccanica Quantistica: il ruolo dei potenziali

nella teoria elettrodinamica. In ambito classico i potenziali, e in particolare il potenziale vettore che descrive l'azione del campo magnetico, svolgono il ruolo di strumento matematico che semplifica il calcolo dei campi elettrici e magnetici. Tuttavia le equazioni possono sempre essere riscritte in termini di campi di forza, e solo a questi ultimi viene attribuito un ruolo fisico effettivo. La tesi avanzata da Aharonov e Bohm è che nel caso quantistico i potenziali abbiano un ruolo effettivo, non traducibile in termini di campi elettrici o magnetici. Emerge dunque una differenza sostanziale tra l'elettrodinamica classica e quella quantistica. Si tratta, a dire il vero, di una tesi già proposta da Werner Ehrenberg e Raymond Siday in un articolo del 1949, di cui Aharonov e Bohm non erano a conoscenza ma che non mancarono di citare in lavori successivi. A sostegno della loro tesi Aharonov e Bohm propongono lo schema di due esperimenti in cui delle particelle cariche (elettroni) attraversano regioni dello spazio con potenziale elettrico o potenziale magnetico uniformi e costanti ma di diversa intensità, sicché il campo di forza risulta nullo in ambedue i casi. La previsione è che le fasi delle onde quantistiche associate alla particella vengano modificate dai potenziali, inducendo degli sfasamenti rivelabili mediante interferenza.

Verso la fine degli anni '70 Bocchieri e Loinger pubblicano un articolo fortemente critico sul cosiddetto "effetto Aharonov-Bohm". Essi sostengono la tesi opposta, ossia che quell'effetto abbia origine esclusivamente nel formalismo matematico. Concludono che, come nel caso classico, anche nel caso quantistico si debba assegnare rilevanza fisica solo ai campi di forza, limitando invece il ruolo dei potenziali a quello di strumento matematico. L'articolo provoca immediate reazioni, innescando una polemica che si protrae per alcuni anni con toni a volte particolarmente accesi. La discussione si estende anche all'interpretazione dei risultati di esperimenti volti a confermare l'esistenza dell'effetto previsto da Aharonov e Bohm. Anche in questo caso Bocchieri e Loinger propongono una spiegazione in termini di campi di forza. La polemica si spegne verso la metà degli anni '80, sostanzialmente con l'accettazione da parte della comunità dei fisici delle tesi inizialmente avanzate da Aharonov e Bohm.

1.5 *La Relatività Generale*

Negli anni più recenti, dopo il 2000, l'interesse di Angelo Loinger si sposta sulla Relatività Generale. Parecchi lavori dall'anno 2003 in poi portano anche il nome di Tiziana Marsico, prima sua allieva, e in seguito fedele collaboratrice fino agli ultimi giorni. Anche nel campo della Re-

latività lo spirito critico di Loinger si manifesta nella lettura attenta dei lavori fondamentali, rifacendosi alle tesi dei “Padri Fondatori”; tra questi, oltre ad Albert Einstein, cita sistematicamente: Karl Schwarzschild, Willem de Sitter, Arthur Eddington, Tullio Levi-Civita, Léon Brillouin, David Hilbert, Hermann Weyl. Si occupa anche di tradurre alcuni dei lavori fondamentali, originariamente in lingua tedesca (Hilbert, Schwarzschild, Weyl) o italiana (Levi-Civita), col preciso scopo di renderli accessibili alla comunità scientifica, ormai polarizzata sulla lingua inglese. In seguito al suo lavoro di rilettura sistematica Loinger assume un atteggiamento fortemente critico nei confronti di alcuni sviluppi teorici successivi agli anni '60. Le cinque note firmate da Loinger e Marsico, pubblicate sui Rendiconti dell'Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, volumi 148 (2014) e 149 (2015), sono state scritte con l'intento di riassumere i lavori precedenti (circa 50); a quelle note si fa riferimento nel seguito.

Alla base delle argomentazioni di Loinger e Marsico c'è il fenomeno chiamato *Effetto Hilbert* o *Repulsione Hilbertiana*: da un lavoro di Hilbert del 1917 si conclude che, sotto particolari condizioni, l'azione del campo gravitazionale diventa repulsiva. Nella prima delle note pubblicate sui Rendiconti gli autori sviluppano quell'idea applicandola alla metrica di Schwarzschild. In tal modo propongono un modello di cosmologia che generalizza in senso relativistico quello Newtoniano, ed è più generale di quello di Friedman. Grazie al nuovo modello si rende ragione dello spostamento verso il rosso delle righe spettrali delle galassie, già previsto dal modello di Friedman. Si ottiene però un risultato ben più rilevante, come sottolineato dagli autori. La repulsione Hilbertiana giustifica il fenomeno dell'accelerazione dell'espansione dell'universo senza ricorrere all'ipotesi che esista una forma di *energia oscura*; la necessità di quest'ultima ipotesi, solitamente invocata, viene rimossa. In due note successive si esamina il problema della velocità di rivoluzione delle stelle nelle galassie. Le anomalie osservate vengono comunemente attribuite all'esistenza di una *materia oscura* non identificata. Loinger e Marsico dimostrano con un modello di relatività generale che la rotazione galattica spiega gli effetti gravitazionali attribuiti alla Materia Oscura. Intuitivamente, per le equazioni di Einstein, la rotazione del centro supermassivo “trascina” lo spazio fisico, alterando i puri moti gravitazionali.

Un'altra nota, la seconda in ordine di tempo, viene dedicata al problema del collasso gravitazionale di una sfera di “polvere” di massa abbastanza grande, dell'ordine di alcune masse solari. Si tratta di una questione a lungo dibattuta, dovuta alla presenza nella metrica di Schwarzschild di

un valore critico del raggio a cui corrisponde un comportamento singolare delle soluzioni. Si può dire che fino ai tardi anni '50 l'opinione comune era che al di sotto di tale valore le soluzioni trovate perdessero significato. Verso gli anni '60 però David Finkelstein propose un'interpretazione diversa: introducendo un opportuno cambiamento di coordinate si riassume la singolarità della metrica in corrispondenza al valore critico del raggio, e lo si rende in qualche modo regolare. In seguito Martin David Kruskal e George Szekeres proposero un modello analogo, in cui il cambiamento singolare di coordinate introduce la possibilità che una particella di materia o la luce stessa possano superare il raggio critico in ingresso, ma non in uscita. Ciò suggerisce la possibile esistenza di quello che viene detto appunto "Buco Nero"; è l'interpretazione oggi comunemente accettata.

La tesi avanzata da Loinger e Marsico è che la Repulsione Hilbertiana giochi un ruolo fondamentale anche in questo caso, e che fornisca uno strumento efficace per dimostrare matematicamente che non si possono creare Buchi Neri di qualsivoglia natura. Il valore critico del raggio è caratterizzato dall'annullarsi sia della velocità che dell'accelerazione radiale, sicché non può essere superato in nessuna direzione. La fase finale del collasso è la formazione di un corpo di grande massa ma con estensione finita; la regione interna al raggio critico di Schwarzschild resta inaccessibile a qualunque descrizione fisica. In questa visione la metrica di Finkelstein, così come altre proposte in seguito, non è giustificabile dal punto di vista fisico. In effetti la rimozione della singolarità è possibile solo introducendo una metrica *non statica*, ovvero dipendente dal tempo, alla quale non è possibile assegnare una rilevanza fisica.

Un'ultima nota, la terza in ordine di tempo, è dedicata alle Onde Gravitazionali. Anche qui Loinger e Marsico assumono una posizione critica fondata principalmente su due osservazioni. La prima è che i moti di corpi soggetti solo a interazione gravitazionale reciproca avvengono lungo geodetiche; questo comporta che non possano generare onde gravitazionali. A questo si aggiunge l'osservazione che l'esistenza di fenomeni ondosi in gravitazione è modellata ispirandosi al fenomeno analogo che si verifica per i campi elettromagnetici generati da cariche. Tuttavia, osservano gli autori, una tale analogia non è accettabile. La seconda critica è che le onde appaiono in una formulazione matematica che fa uso di particolari sistemi di riferimento, considerati in qualche modo come descrittivi; lo stesso fenomeno però non risulta essere indipendente dal riferimento, in contraddizione col fatto che la Relatività Generale mette tutti gli osservatori sullo stesso piano.

Il carattere decisamente critico, a tratti apertamente polemico, dei lavori di Loinger dell'ultimo periodo viene mal tollerato dalla comunità scientifica, fino al rifiuto sistematico di pubblicare i suoi lavori. Dopo il 2003 i suoi interventi, brevi e sintetici ma numerosi, vengono pubblicati solo in formato digitale, nell'archivio elettronico *arXiv* (ospitato inizialmente dal Los Alamos National Laboratory e successivamente trasferito all'Università di Cornell) nelle sezioni pr-qc e ph-gen. Alcuni articoli degli ultimi anni sono disponibili sugli archivi di *Academia.edu* e di *Researchgate*. Uniche eccezioni sono le cinque note pubblicate sui Rendiconti dell'Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere di cui si è già detto.

2. CONSIDERAZIONI FINALI

A conclusione di questa commemorazione, vorrei ricordare brevemente almeno uno degli sviluppi originati dall'attività scientifica di Angelo Loinger, quello a me più caro perché vi sono stato coinvolto personalmente fin dal tempo della mia tesi di laurea. Si tratta dei lavori discussi nel paragrafo 1.3. Dopo la pubblicazione del lavoro BSBL, Loinger tenne un seminario in cui metteva in discussione le motivazioni che venivano abitualmente portate a fondamento della Meccanica Quantistica. In particolare si riferiva alla radiazione del corpo nero, al calore specifico dei solidi e alla caduta degli elettroni sul nucleo atomico: i tre punti su cui si riteneva abitualmente che la Fisica Classica fallisse, e che avevano trovato spiegazione in ambito quantistico. La tesi da lui sostenuta era che il fallimento fosse piuttosto da imputarsi al fatto che le previsioni della Fisica Classica non erano note, e venivano sostituite da *ipotesi* non giustificate dal punto di vista dinamico. Col senno di poi, possiamo dire che mancava una comprensione approfondita dei fenomeni descritti da sistemi di equazioni *non lineari*; alla mancanza di informazione si sopperiva introducendo in Meccanica Statistica il concetto di equipartizione, che conduce a conclusioni in contrasto con la conservazione dell'energia, e in Elettrodinamica Classica introducendo semplificazioni che privilegiano l'irraggiamento di energia da parte di un elettrone, sostanzialmente ignorando l'azione del campo elettromagnetico sull'elettrone stesso.

Il seminario di Loinger venne accolto con un certo scetticismo, ma non cadde nel vuoto. Io non ero presente – allora ero studente al terzo anno – ma ne venni a conoscenza l'anno successivo grazie a un seminario informale tenuto da Luigi Galgani agli studenti di un corso. Ero tra quegli

studenti, e rimasi affascinato; al momento di scegliere una tesi di Laurea mi rivolsi a Loinger. Devo aggiungere che quella scelta fu motivata anche dai due corsi di Relatività e di Fisica Teorica, da lui tenuti, che avevo frequentato e avevo trovato molto interessanti; ero anche rimasto piacevolmente sorpreso dal suo stile non comune di insegnamento. Spesso ho cercato di imitarlo, nelle mie lezioni.

L'interesse per i problemi sollevati da Loinger ha lasciato una traccia profonda nell'ambiente milanese. Negli anni successivi a Milano si formarono due gruppi di ricerca. Il primo, iniziato da Luigi Galgani in collaborazione con Antonio Scotti e Carlo Cercignani, si orientò verso la cosiddetta *teoria KAM* (da Kolmogorov, Arnold e Moser). Del secondo gruppo, formatosi successivamente, facevano parte inizialmente Giulio Casati, Italo Guarneri e Fausto Valz Gris; le loro ricerche si indirizzarono più decisamente verso lo studio del caos.

Vorrei soffermarmi brevemente sull'attività del primo gruppo. Io entrai a farne parte grazie al suggerimento di Loinger di occuparmi di argomenti attinenti al problema FPU; questo mi condusse in modo naturale a svolgere il mio lavoro di tesi con Luigi Galgani. Nel frattempo a quel primo gruppo si associarono anche Giancarlo Benettin e Jean Marie Strelcyn. Fu l'inizio di una collaborazione stretta, particolarmente intensa per quasi vent'anni, e mai completamente interrotta. Sotto la guida di Galgani, Cercignani e Scotti si orientarono le ricerche verso lo studio dei risultati più recenti nella teoria dei Sistemi Dinamici: il teorema di Kolmogorov, alla base della teoria KAM; la dinamica caotica messa in evidenza da Contopoulos e da Hénon e Heiles; i metodi di Contopoulos per la ricerca di integrali primi; la teoria della stabilità esponenziale di Nekhoroshev. Di fatto, la teoria dei Sistemi Dinamici fu introdotta in Italia grazie all'opera di diffusione esercitata soprattutto da Luigi Galgani.

Non è questa la sede in cui può trovar posto la ricostruzione delle ricerche sviluppate per cinquant'anni. Ma si deve almeno ricordare che il problema sollevato da Fermi, Pasta e Ulam e ripreso da Loinger in collaborazione con Bocchieri, Scotti e Bearzi è stato ampiamente studiato, e ha prodotto un'ampia messe di risultati coinvolgendo un lungo elenco di ricercatori. In breve, l'assenza di ergodicità può interpretarsi come conseguenza dell'esistenza di *stati metastabili*, che permangono per tempi finiti ma molto lunghi rispetto ai tempi tipici di evoluzione di un sistema. Risultati rigorosi in questo senso sono stati dimostrati, ad esempio, per la dinamica dei pianeti maggiori o di alcuni asteroidi su tempi dell'ordine dell'età del Sistema Solare. Per modelli di tipo FPU la difficoltà principale

consiste nel dimostrare risultati validi al limite di un numero molto grande di particelle, ovvero su tempi *uniformi rispetto alla lunghezza della catena*. Risultati significativi di questo tipo si sono ottenuti negli ultimi anni. Restano questioni ancora aperte, ma si può ben dire, come affermazione minima, che l'intuizione di Loinger, che l'ipotesi dell'equipartizione in Meccanica Statistica Classica non sia pienamente giustificabile su basi dinamiche, si è dimostrata molto feconda. Quanto ai fondamenti della Meccanica Quantistica, si può ben dire che uno dei punti programmatici sollevati da Einstein, ossia che la Meccanica Quantistica, che è la teoria corretta, possa essere in qualche modo recuperata nell'ambito di una teoria più ampia che include concetti classici non sembra del tutto ingiustificato, pur restando un problema aperto. Quest'ultima linea di ricerca è ancora attiva, e attualmente viene sviluppata in particolare da Luigi Galgani e Andrea Carati.

Credo giusto affermare che gli sviluppi qui accennati rappresentino una parte consistente dell'eredità lasciata dal Professor Angelo Loinger nell'ambiente di Milano.

RINGRAZIAMENTI. Mi corre l'obbligo di ringraziare Luigi Galgani, Tiziana Marsico e Antonio Scotti (in ordine rigorosamente alfabetico) per i loro preziosi consigli.