

CURRICULUM VITAE

INFORMAZIONI PERSONALI

Cognome: Carati

Nome: Andrea

Data di Nascita: 10 Settembre 1964

Attività didattica:

- Professore Incaricato per il corso di Meccanica Analitica 1 (prima Meccanica Razionale 1), per la laurea in Fisica all'Università di Milano, a partire dal 2001 ad oggi.
- Professore Incaricato per il corso di Meccanica Razionale 2 — Introduzione ai sistemi dinamici — per la laurea Magistrale in Fisica all'Università di Milano, a partire dal 2001 ad oggi.
- Professore Incaricato per il corso di Fondamenti della Fisica — Introduzione ai sistemi dinamici — per la laurea Magistrale in Fisica all'Università di Milano, a partire dal 2015 ad oggi.
- Esercitazioni per il corso di Fisica Matematica III, per la Laurea in Matematica all'Università di Milano, negli anni accademici 2007,2008 e 2010.
- Esercitazioni per corsi di Analisi Matematica 1 ed Analisi Matematica 2 al politecnico di Milano, dal 1997 al 2000.

Attività didattiche integrative: sono stato relatore o correlatore di più di 70 tesi sia per la Laurea in Fisica che in Matematica. In particolare sono stato relatore di 10 tesi magistrali e relatore di una tesi di Dottorato in Matematica. Da questi lavori di tesi sono scaturiti 6 articoli pubblicati in riviste internazionali.

Temi di ricerca e risultati ottenuti. Le mie ricerche, esposte in più di 60 pubblicazioni, si incentrano su alcuni temi principali, che di seguito illusterò assieme ai risultati più rilevanti ottenuti in ogni ambito.

1. Teoria hamiltoniana delle perturbazioni.

- (a) *Invarianti adiabatici nei problemi di scattering.* Il problema consiste nell'applicare la teoria delle perturbazioni a sistemi con collisioni (tipicamente urti tra molecole diatomiche), per stimare lo scambio di energia tra i gradi di libertà "interni" e i gradi di libertà legati al centro di massa, e provare che lo scambio di energia verso i gradi di libertà con alte frequenze diviene esponenzialmente piccolo. Si è mostrato (vedi [1], [5]) che il metodo euristico di Landau–Teller dà stime ottimali. Il metodo è stato applicato per stimare la velocità di termalizzazione in gas di molecole biatomiche nel lavoro [17], nel quale si è anche trovato che gli scambi di energia seguono un processo non gaussiano.
- (b) *Forme normali per equazioni alle derivate parziali e sistemi integrabili.* Si vedano i lavori [14] e [32].
- (c) *Teoria delle perturbazioni al limite termodinamico.* Tutti i risultati noti di teoria delle perturbazioni dipendono fortemente dal numero N di gradi di libertà. Le applicazioni ai fondamenti della Meccanica Statistica sono rilevanti solo se si riesce a mostrare che la teoria può essere applicata nel limite di $N \rightarrow \infty$, con una energia specifica E/N positiva (limite termodinamico). È stato mostrato da Bambusi e Giorgilli che la teoria delle perturbazioni in senso standard può essere implementata, in un modello significativo, nel limite $N \rightarrow \infty$, ma solo per energia finita, cioè per energia specifica nulla. Nel lavoro [29] si è mostrato per la prima volta, che la teoria delle perturbazioni può essere implementata nel limite termodinamico, in una forma più debole particolarmente adatta agli scopi della Meccanica Statistica. Il punto principale consiste nell'osservare che nella teoria ergodica non è necessario avere un controllo di tutti i dati iniziali (per il quale tecnicamente è necessario avere un controllo della norma del sup delle funzioni) ma basta avere un controllo sulle misure, per cui si possono usare norme integrali, ad esempio la norma L^2 . Una applicazione di queste idee alla stima (dal basso) del tempo di rilassamento nei gas è contenuta nel lavoro [34]. Una stima esponenziale dei tempi di mixing nel limite termodinamico (la prima nota in letteratura) per un reticolo di particelle, ottenuto discretizzando il noto modello Φ^4 della teoria dei campi, è stata data nel lavoro [37], utilizzando

appunto tali tecniche. Una stima più debole (solo a potenza) del tempo di mixing, ma sempre nel limite termodinamico, è stata data nel lavoro [42] per il modello FPU. Nel lavoro [36] si è fornita una applicazione di tali tecniche al caso della fisica dei plasmi, nel caso concreto della stima della soglia di stabilità nei dispositivi di fusione nucleare tipo Tokamak.

2. Fondamenti dinamici della Meccanica Statistica.

- (a) *Il problema di Fermi–Pasta–Ulam.* Essenzialmente tutti gli studi sul problema di Fermi–Pasta–Ulam (vedi la rassegna [67]) in letteratura, si concentrano su di una classe di dati iniziali corrispondenti all'eccitazione di pochi modi normali del sistema FPU (catena lineare di particelle interagenti a primi vicini con molle non lineari). Lo scopo è quello di discutere se esista, nel limite termodinamico, uno stato metastabile che eventualmente rilassi poi all'equilibrio dopo un tempo estremamente lungo. Viceversa, in parecchi lavori (vedi ad esempio [27], [26]) si è studiato il sistema FPU per una classe più generale di dati iniziali (corrispondente all'eccitazione di tutti i modi normali), mostrando numericamente che fenomeni di non equilibrio ancora si presentano. Inoltre si è discusso il problema se sia possibile definire le funzioni termodinamiche (come temperatura o calore specifico) in questi stati metastabili (lavori [9], [20]).
- (b) *Meccanica Statistica per gli stati di metaequilibrio.* Motivati dagli studi sul problema FPU menzionati più sopra, si sono riconsiderate le basi dinamiche dei fondamenti della meccanica statistica. L'approccio consiste nell'utilizzare direttamente le medie temporali delle quantità meccaniche di interesse. Il risultato del recente lavoro [52] mostra che il primo e secondo principio della termodinamica sono validi in ipotesi molto larghe (che non richiedono che la statistica descrivente il sistema sia Gibbsiana), mentre i lavori [22, 25, 30], mostrano che è sufficiente che le medie temporali rilevanti soddisfino un opportuno principio di grandi deviazioni, affinché si possa dare un'espressione per l'entropia del sistema in termini di alcune proprietà della dinamica del sistema. Tale espressione risulta diversa dalla nota espressione di Gibbs se la dinamica non è sufficientemente caotica.

3. Elettrodinamica delle particelle puntiformi.

- (a) *Proprietà analitiche delle soluzioni dell'equazioni di Abraham–Lorentz–Dirac* L'equazione di Abraham–Lorentz–Dirac descrive il moto di una particella puntiforme in cui si consideri anche l'autointerazione della particella con il campo elettromagnetico. Sono state studiate alcune proprietà delle soluzioni. In particolare nei lavori [4], [13] and [24] si è studiato il problema dell'esistenza ed unicità delle soluzioni *non runaway*, mostrando che nessuna delle due è garantita. Nel lavoro [2] si è studiato il carattere non analitico delle soluzioni rispetto alla carica, mentre nel lavoro [7] si è studiato il prolungamento analitico delle soluzioni rispetto al tempo, mostrando così che la creazione o distruzione di coppie possono essere descritte nell'ambito dell'elettrodinamica classica. Per quest'ultimo lavoro il Mathematical Review ha riportato il seguente commento: “ *Under these circumstances it might seem foolhardly and redundant to reach back to classical electrodynamics to locate precursors to pair production. But historical experience suggests that the prolonged stasis of the currently accepted theoretical framework can be broken only by the discovery of new phenomena (at still higher energies?); the shift to more comprehensive theoretical schemes (strings, branes, and "M"); or the renewed exploration of old paths "not taken". Carati's paper is one of the rare efforts of this last kind*”.
- (b) *Sistemi di infinite particelle cariche.* Se, invece di una singola particella, si considera un sistema di a molti corpi, il problema diventa enormemente più complicato a causa del carattere ritardato delle interazioni elettromagnetiche tra le particelle. Ad esempio non è nemmeno chiaro se il problema di Cauchy sia ben posto. Si è quindi iniziato lo studio, nei lavori [19], [28], di una versione linearizzata (ma ancora ritardata), di un sistema di infinite particelle collocate nei siti di un reticolo regolare. Il risultato principale è la dimostrazione dell'esistenza di modi normali non irraggianti, contro la comune intuizione che le cariche dovrebbero irraggiare quando accelerate. Tale risultato costituisce una dimostrazione di un'identità proposta da Wheeler e Feynman nel 1945 sulla base di considerazioni euristiche. Usando questa identità per la prima volta in letteratura si è fornita una deduzione microscopica

dell'esistenza dei polaritoni nei cristalli ionici (lavoro [41]), e si è ricavato per via puramente classica lo spettro nell'infrarosso del Fluoruro di Litio (lavoro [46]) e del quarzo (lavoro [49]).

4. Relatività Generale e Cosmologia.

Nella teoria della relatività, a differenza di quanto accade nella teoria newtoniana, le interazioni gravitazionali sono ritardate come in elettrodinamica. Ora, come già osservato nei lavori [19], [28] sopracitati, le interazioni ritardate della materia lontana può avere, per alcuni aspetti, un'influenza molto più rilevante che non la materia vicina, proprio perchè l'esistenza di modi normali non radianti è dovuta all'azione ritardata delle cariche lontane. Nel lavoro [31] (vedi anche [68]) viene stimata l'azione gravitazionale delle galassie lontane in un semplice modello di universo, mostrando che essa produce una curvatura pari a cinque volte quella prodotta dalla materia visibile locale. Si sottolinea inoltre, che il contributo di tale interazione al viriale delle forze negli ammassi di galassie può essere molto maggiore del contributo della materia locale.

5. Elettrochimica

Nel campo delle energie alternative, uno dei problemi importante consiste nel trovare un metodo semplice ed economico che permetta di utilizzare il calore a bassa temperatura, disponibile sia come scarto da lavorazioni industriali che tramite pannelli solari, per la produzione di energia elettrica. Nel lavoro [47] si mostra come le pile a concentrazione siano particolarmente adatte alle applicazioni in questo campo.

Riferimenti bibliografici

Pubblicazioni su riviste scientifiche internazionali:

- [1] A. Carati, G. Benettin, L. Galgani: *Towards a rigorous treatment of Jeans–Landau–Teller methods for the energy exchanges of harmonic oscillator*, Comm. Math. Phys. **150**, 321–336 (1992).
- [2] A. Carati, L. Galgani: *Asymptotic character of the series of the classical electrodynamics and an application to bremsstrahlung* Nonlinearity **6**, 905–914 (1993).
- [3] G. Benettin, A. Carati, P. Sempio: *On the Landau–Teller approximation for the energy exchanges with fast degrees of freedom* Journal of Statistical Physics **73**, 175–192 (1993).
- [4] A. Carati, P. Delzanno, L. Galgani, J. Sassarini: *Nonuniqueness properties of the physical solutions of the Lorentz–Dirac equation*, Nonlinearity **8**, 65–79 (1995).
- [5] G. Benettin, A. Carati, G. Gallavotti: *A rigorous implementation of the Jeans–Landau–Teller approximations for adiabatic invariants*, Nonlinearity **10**, 479–505 (1997).
- [6] G. Benettin, A. Carati, F. Fassó: *On the conservation of adiabatic invariants for a system of coupled rotators*, Physica D **104**, 253–268 (1997).
- [7] A. Carati: *Pair production in classical electrodynamics*, Foundations of Physics **28**, 843–853 (1998).
- [8] A. Carati, L. Galgani: *Nonlocality of classical electrodynamics of point particles and violation of Bell’s inequalities*, Nuovo Cimento **114** B, 489–500 (1999).
- [9] A. Carati, L. Galgani: *On the specific heat of the Fermi–Pasta–Ulam systems*, Journal of Statistical Physics **94**, 859–869 (1999).
- [10] A. Carati, L. Galgani: *Analogue of Planck’s formula and effective temperature in classical statistical mechanics far from equilibrium*, Phys. Rev. E **61**, 4791 (2000).

- [11] A. Carati, L. Galgani: *Planck's formula and glassy behaviour in classical nonequilibrium statistical mechanics*, Physica A **280**, 105–114 (2000).
- [12] A. Carati, L. Galgani: *Theory of dynamical systems and the relations between Classical and Quantum Mechanics*, Foundations of Physics **31**, 69–87 (2001).
- [13] A. Carati: *An extension of Eliezer's theorem on the Abraham–Lorentz–Dirac equation*, J. Phys. A: Math. Gen. **34**, 5937–5944 (2001).
- [14] D. Bambusi, A. Carati, A. Ponno: *The Nonlinear Schrödinger Equation as a resonant normal form*, Disc. and Cont. Dyn. Syst. B **2**, 109–128 (2002).
- [15] A. Carati, L. Galgani, A. Giorgilli, A. Ponno: *The Fermi-Pasta-Ulam Problem*, Nuovo Cimento **B 117**, 1017-1026 (2002).
- [16] A. Carati: *Center manifold of unstable periodic orbits of Helium atom: numerical evidence*, Disc. and Cont. Dyn. Syst. B **3**, 97–104 (2003).
- [17] A. Carati, L. Galgani, B. Pozzi: *Lévy flights in the Landau-Teller model of molecular collisions*, Phys.Rev. Lett. **90**, 010601 (2003).
- [18] A. Carati, L. Galgani: *Reply to 'Comment on Analog of Planck's formula and effective temperature in classical statistical mechanics far from equilibrium'*, Phys. Rev. E **68**, 028102 (2003).
- [19] A. Carati, L. Galgani: *Nonradiating normal modes in a classical many-body model of matter-radiation interaction*, Nuovo Cimento **B 118**, 839–851 (2003).
- [20] A. Carati, P. Cipriani, L. Galgani: *On the definition of temperature in FPU systems*, Journal of Statistical Physics **115**, 1101-1112 (2004).
- [21] A. Carati, L. Galgani: *A critical remark on Planck's model of black-body*, Int. Journ. of Mod. Phys. **B 18**, 549-553 (2004).
- [22] A. Carati: *Thermodynamics and time-averages*, Physica A **348**, 110-120 (2005).
- [23] A. Carati, L. Galgani, A. Giorgilli: *The Fermi-Pasta-Ulam problem as a challenge for the foundations of physics*, Chaos **15**, 015107 (2005).

- [24] A. Carati: *On the existence of scattering solutions for the Abraham-Lorentz-Dirac equation*, Disc. and Cont. Dyn. Syst. B, **6**, 471-480 (2006).
- [25] A. Carati, *On the definition of temperature using time-averages* , Physica A **369**, 417-431 (2006).
- [26] A. Carati, L. Galgani: *Metastability in specific heat measurements: simulations with the FPU model*, Europhysics Letters **75** , 528-534 (2006).
- [27] A. Carati, L. Galgani, A. Giorgilli, S. Paleari: *FPU phenomenon for generic initial data*, Phys. Rev. E **76**, 022104 (2007).
- [28] M. Marino, A. Carati, L. Galgani: *Classical light dispersion theory on a regular lattice*, Annals of Physics **322**, 799-823 (2007).
- [29] A. Carati: *An averaging theorem for Hamiltonian dynamical systems in the thermodynamic limit*, Journal of Statistical physics **128**, 1057-1077 (2007).
- [30] A Carati: *On the fractal dimension of orbits compatible with the Tsallis statistics*, Physica A **387**, 1491-1503 (2008).
- [31] A. Carati, S. Cacciatori, L. Galgani *Discrete matter, far fields and dark matter*, Europhysics Letters **83**, 59002 (2008).
- [32] D. Bambusi, A. Carati, T. Penati, *Boundary effects on the dynamics of chains of coupled oscillators*, Nonlinearity **22**, 923-946 (2009).
- [33] A. Carati, L. Galgani, F. Santolini. *On the energy transfer to small scales in a discrete model of one-dimensional turbulence*, CHAOS **19**, 023123 (2009).
- [34] A. Maiocchi, A. Carati, *Relaxation times for Hamiltonian systems*, Comm. Math. Phys. **297**, 427-445 (2010).
- [35] A. Carati, F. Benfenati, L. Galgani, *Relaxation properties in classical diamagnetism*, Chaos **21**, 023134 (2011).
- [36] A. Carati, M. Zuin , A. Maiocchi , M. Marino , E. Martines , L. Galgani, *Transition from order to chaos, and density limit, in magnetized plasmas*, Chaos **22** , 033124 (2012).

- [37] A. Carati, A. Maiocchi, *Exponentially long stability times for a nonlinear lattice in the thermodynamical limit*, Comm. Math. Phys. **314**, 129-161 (2012).
- [38] G. Camelio, A. Carati, L. Galgani, *Classical Helium atom with radiation reaction*, Chaos **22**, 023111 (2012).
- [39] A.M. Maiocchi, A. Carati, A. Giorgilli, *A series expansion for the time autocorrelation of dynamical variables*, in J. Stat. Phys. **148**, 1054-1071 (2012).
- [40] A. Carati, F. Benfenati, A. Maiocchi, M. Zuin and L. Galgani *Chaoticity threshold in magnetized plasmas: Numerical results in the weak coupling regime*, Chaos **24**, 013118 (2014).
- [41] A. Lerose, A. Sanzeni, A. Carati and L. Galgani, *Classical microscopic theory of polaritons in ionic crystals*, Eur. Phys. J. D **68**, 35 (2014).
- [42] A. Maiocchi, D. Bambusi, A. Carati, *An Averaging Theorem for FPU in the Thermodynamic Limit*, J. Stat. Phys. **155**, 300 (2014).
- [43] M. Marino, L. Misuri, A. Carati, D. Brogioli, *Proof of concept of a zinc-silver battery for the extraction of energy from a concentration difference*, Energies **7**, 3664-3683 (2014).
- [44] M. Marino, L. Misuri, A. Carati, D. Brogioli, *Boosting the voltage of a salinity-gradient-power electrochemical cell by means of complex-forming solutions*, Appl. Phys. Lett. **105**, 033901 (2014).
- [45] A. Carati, L. Galgani, *Classical microscopic theory of dispersion, emission and absorption of light in dielectrics*, Eur. Phys. J. D **68**, 307 (2014).
- [46] F. Gangemi, A. Carati, L. Galgani, R. Gangemi e A. Maiocchi, *Agreement of classical Kubo theory with the infrared dispersion curves $n(\omega)$ of ionic crystals*, Europhys. Lett. **110**, 47003 (2015).
- [47] A. Carati, M. Marino, D. Brogioli, *Thermodynamic study of a distiller-electrochemical cell system for energy production from low temperature heat sources*, Energy **93**, 984 - 993 (2015).

- [48] A. Carati, A. Maiocchi, L. Galgani, G. Amati, *The FPU system as a model for glasses*, Math. Phys. Anal. Geom. **18**, 31 (2015).
- [49] F. Gangemi, R. Gangemi, A. Carati, A. Maiocchi e L. Galgani, *Infrared optical properties of α quartz by molecular dynamics simulations*, Europhys. Lett. **116**, (2016) 37001
- [50] A. Carati, A. Maiocchi, *Replacement of the Lorentz law for the shape of the spectral lines in the infrared region*, J. Opt. Soc. Am. A **33**, Issue 6, pp. 1193-1197 (2016).
- [51] A. Carati, A. Maiocchi, L. Galgani, F. Gangemi e R. Gangemi, *Persistence of regular motions for nearly integrable Hamiltonian systems in the thermodynamic limit*, Regular Chaotic Dynamics **21**, 660–664 (2016).
- [52] A. Carati, A. Maiocchi, L. Galgani, *Statistical thermodynamics for metaequilibrium or metastable states*, Meccanica **52** 1295 – 1307 (2017).
- [53] A. Carati, A. Ponno, *Chopping time of the FPU α -model*, Journ. Stat. Phys. **170**, pp 883–894 (2018).
- [54] A. Carati, L. Galgani, A. Maiocchi, F. Gangemi, R. Gangemi, *The FPU Problem as a Statistical-mechanical Counterpart of the KAM Problem, and Its Relevance for the Foundations of Physics*, Regular and Chaotic Dynamics **23**, issue 6, 704-719 (2018).
- [55] A. Carati, L. Galgani, A. Maiocchi, F. Gangemi, R. Gangemi, *Classical infrared spectra of ionic crystals and their relevance for statistical mechanics*, Physica A **506**, pp 1-10 (2018).

Atti di convegni:

- [56] D. Bambusi, A. Carati, L. Galgani, A. Giorgilli, D. Noja, J. Sarrarini: *On the relevance of classical electrodynamics for the foundations of physics*, in *Transport, chaos and plasma physics*, S. Benkadda, F. Doveil, Y. Elskens eds., World Scientific (Singapore, 1994).

- [57] A. Carati, L. Galgani, J. Sassarini: *An analogue of the tunnel effect in classical electrodynamics*, in C. Garola, A. Rossi eds. *The foundations of quantum mechanics*, Kluwer (Dordrecht, 1995).
- [58] A. Carati, L. Galgani, J. Sassarini, *Recent results on the Abraham–Lorentz–Dirac equation*, in *Quantum–like models and coherent effects*, R. Fedele and P.K. Shukla eds., World Scientific (Singapore, 1995).
- [59] D. Bambusi, A. Carati, L. Galgani, D. Noja, J. Sassarini: *Dynamical aspects of classical electron theory*, in *Electron theory and quantum electrodynamics*, J.P. Dowling ed., Plenum Press (New York, 1996).
- [60] A. Carati: *A Lagrangian formulation for the Abraham–Lorentz–Dirac equation*, in *Symmetry and perturbation theory* D. Bambusi and G. Gaeta eds., Quaderno del GFNM n. 54 (1998).
- [61] A. Carati, L. Galgani: *The black body spectrum, and the theory of dynamical systems*, in *The Chaotic Universe*, V.G. Gurzadyan and R. Ruffini eds. (World Scientific, Singapore, 2000).
- [62] A. Carati, L. Galgani: *Einstein’s nonconventional conception of the photon, and the modern theory of dynamical systems*, in *Chance in physics*, Bricmont et al. eds., Lecture notes in physics 574 (Springer, Berlin, 2001).
- [63] A. Carati, L. Galgani, B. Pozzi: *The Problem of the Rate of Thermalization and the Relations between Classical and Quantum Mechanics*, in *Mathematical Models and Methods for Smart Materials*, M. Fabrizio et al. eds., Series of Advances in Mathematics n. 62, World Scientific (Singapore, 2002).
- [64] A. Carati, L. Galgani: *Stellar Dynamics and Molecular Dynamics: Possible Analogies*, in *Galaxies and Chaos*, G. Countopoulos and N. Voglis eds., Lecture Notes in Physics (Springer, Berlin, 2003).
- [65] A. Carati: *Time–averages and the heat theorem*, in *Complexity, Metastability and Nonextensivity*, C. Beck, A. Rapisarda and C. Tsallis eds., The science and Culture Series: The Physics, World Scientific (Singapore, 2005).

- [66] A. Carati: *Compatibility between dynamics and Tsallis statistics*, in *Complexity, metastability, and nonextensivity: An International Conference*, S. Abe, H. Herrmann, P. Quarati, A. Rapisarda, C. Tsallis editors, Series: AIP Conference Proceedings, Vol. 965, Springer Verlag (Berlin,2007).
- [67] G. Benettin, A. Carati, L. Galgani, A. Giorgilli: *The Fermi-Pasta-Ulam problem and the metastability perspective* in *The Fermi-Pasta-Ulam Problem: A Status Report*, G. Gallavotti editor, Lecture Notes in Physics , Vol. 728, Springer Verlag (Berlin,2007).
- [68] A. Carati, S. Cacciatori, L. Galgani *Far fields, from electrodynamics to gravitation, and the dark matter problem*, in *Chaos in astronomy*, P. Patzis ed., Springer Verlag (Berlin, 2008).
- [69] D. Bambusi, A. Carati, A. Maiocchi, A. Maspero, *Some analytic results on the FPU paradox*, Fields Institute Communications **75**, 235-254 (2015).

Contributi ad enciclopedie:

- [70] A. Carati, L. Galgani, A Giorgilli: *Dynamical Systems and Thermodynamics*, in *Encyclopedia of Mathematical Physics*, Elsevier (Oxford, 2006)

Libri:

- [71] A. Carati, L. Galgani: *Appunti di Meccanica Razionale*, in preparazione. Si veda la versione on-line:
<http://users.mat.unimi.it/users/carati/#Didattica> .
- [72] A. Carati, L. Galgani: *Appunti di Meccanica Razionale 2: Introduzione alla teoria dei sistemi dinamici*, in preparazione. Si veda la versione on-line:
<http://users.mat.unimi.it/users/carati/#Didattica>.

- [73] A. Carati, L. Galgani: *Fondamenti della meccanica quantistica: uno studio storicocritico*, in preparazione. Si veda la versione on-line:
<http://users.mat.unimi.it/users/carati/#Didattica>.