



## UNIVERSITÀ DI PISA QUANTUM LIQUIDS

---

### MARIA LUISA CHIOFALO

Anno accademico	2022/23
CdS	FISICA
Codice	382BB
CFU	9

Moduli	Settore/i	Tipo	Ore	Docente/i
QUANTUM LIQUIDS	FIS/03	LEZIONI	54	MARIA LUISA CHIOFALO

#### Obiettivi di apprendimento

##### Conoscenze

Quantum Liquids è un corso per il Dottorato in Fisica, mutuato per la LM in Fisica (versione da 9 CFU e da 6 CFU), e per la LT in Materials and Nanotechnologies (6 CFU).

Al termine dell'insegnamento, la/lo studente avrà sviluppato conoscenze concettuali, procedurali e fattuali nella fisica dei liquidi quantistici. In particolare, avrà imparato a:

- Conoscere il funzionamento di una "cassetta degli attrezzi" per concepire e realizzare in modo altamente controllato e accurato condizioni di forte correlazione nelle proprietà di carica/densità e/o di spin in liquidi quantistici, agendo su temperatura, dimensionalità, forza e range di interazione, introduzione di campi di gauge artificiali e dimensioni sintetiche;
- Conoscere metodi teorici avanzati per predire e caratterizzare lo stato fondamentale e le eccitazioni di liquidi quantistici all'equilibrio e fuori equilibrio, metterli in relazione tra loro, e classificarli in base alla loro funzionalità per specifiche tipologie di problemi. Tra i metodi teorici sviluppati sono la teoria della risposta lineare, della misura e delle funzioni di correlazione, la fluidodinamica e l'idrodinamica quantistica, la teoria del funzionale di densità statico e dipendente dal tempo, la teoria delle funzioni di Green e loro approssimazioni autoconsistenti, la bosonizzazione in una dimensione, elementi introduttivi sui metodi per trattare sistemi quantistici aperti driven-dissipative, elementi conoscitivi per mettere in relazione questi metodi teorici con metodi di simulazione come Quantum Monte Carlo e Density-Matrix Renormalization Group, oggetto principale del corso di Laboratorio di Metodi Numerici.
- Conoscere la fenomenologia dei liquidi quantistici nelle principali piattaforme sperimentali in cui vengono correntemente ingegnerizzati e utilizzati: quantum gases, circuiti a superconduttore, light fluids in cavità ottiche, sistemi a semiconduttore 2D. Cogliere l'utilità di queste piattaforme per lo studio di problemi di fisica della materia e di fisica fondamentale.

##### Modalità di verifica delle conoscenze

La verifica è realizzata discutendo in una prova orale una dissertazione su un problema di fisica dei liquidi quantistici tra quelli non specificamente discussi nel corso e che faccia uso delle conoscenze e dei metodi teorici sviluppati durante il corso.

##### Capacità

Al termine dell'insegnamento lo/a studente avrà appreso a

- Riconoscere nella complessità di comportamento fisico dei liquidi quantistici la semplicità delle proprietà macroscopiche, governate da leggi di conservazione e rotture di simmetria accompagnate da elasticità, modi dinamici a bassa frequenza e difetti
- Organizzare e mettere in relazione questa conoscenza disciplinare in una stessa mappa concettuale con termodinamica, meccanica statistica e transizioni di fase, meccanica quantistica, teorie di campo, e struttura della materia nelle sue diverse realizzazioni
- Connettere la comprensione concettuale e la formalizzazione del problema con la fenomenologia e i fatti sperimentali disponibili, e avere un'idea delle applicazioni; interpretare la fenomenologia in termini di pochi concetti e idee essenziali, e inferirne il funzionamento
- Formalizzare i concetti e saperli trattare attraverso l'uso di uno o più tra i metodi sviluppati nel corso e relative procedure
- Individuare la procedura più funzionale alla soluzione di un dato problema, eseguirla, e implementare le tecniche di calcolo apprese alle diverse procedure di soluzione
- Valutare in modo critico articoli di ricerca specialistici sugli argomenti oggetto del corso
- Ideare spiegazioni sul funzionamento di fenomeni di equilibrio e fuori equilibrio di liquidi quantistici nelle diverse piattaforme sperimentali
- Comunicare in modo efficace ed efficiente conoscenze e idee sviluppate, utilizzando conoscenze di fisica di base
- Lavorare con autonomia, consapevolezza della mappa concettuale e di quanto appreso, e capacità di autovalutazione
- Lavorare in team



## UNIVERSITÀ DI PISA

---

### Modalità di verifica delle capacità

La verifica è realizzata discutendo in una prova orale una dissertazione individuale e - in modo facoltativo - un lavoro di gruppo.

La dissertazione individuale è su un problema di fisica dei liquidi quantistici tra quelli non specificamente discussi nel corso e che faccia uso delle conoscenze e dei metodi teorici sviluppati durante il corso. Si richiede alla/o studente di individuare il problema oggetto della dissertazione:

- in autonomia, con la supervisione della docente, in ogni caso sostenendo l'interesse e la curiosità dello/a studente
- avendo cura che il problema includa la discussione della fenomenologia esistente, una analisi critica dello stato dell'arte, una trattazione metodologica teorica e/o simulativa, una applicazione in una o più piattaforme sperimentali, una discussione sui possibili sviluppi e prospettive

La verifica individuale è concepita in modo da valutare lo stato delle conoscenze dello/a studente, e di sviluppo di competenze nelle seguenti aree:

- (a) aver compreso idee e concetti e saperli comunicare utilizzando conoscenze di fisica di base;
- (b) saper formalizzare i concetti e saperli trattare attraverso l'uso di uno o più tra i metodi sviluppati nel corso e relative procedure;
- (c) saper connettere la comprensione concettuale e la formalizzazione del problema con la fenomenologia e i fatti sperimentali disponibili, e avere un'idea delle applicazioni;
- (d) autonomia, consapevolezza della mappa concettuale e di quanto appreso, efficacia ed efficienza nella comunicazione scientifica.

Il lavoro di gruppo è su un problema pratico relativo all'applicazione di idee e metodi appresi nel corso in una particolare piattaforma sperimentale per le tecnologie quantistiche – concordata con gli e le studenti. Il problema viene discusso in gruppo in una apposita sessione di esame utilizzando tecniche del team-based learning (questa sessione avrà luogo alla fine del corso). Si richiede di discutere la metodologia più funzionale di trattamento, sviluppare la comprensione del problema, e comunicare i risultati, conducendo le diverse attività attraverso una suddivisione di compiti, condivisione dei risultati, e gestione autonoma del gruppo.

### Comportamenti

Ci si attende che la/o studente sviluppi:

- (a) Interesse per le idee a fondamento della scienza e tecnologie quantistiche
- (b) Curiosità e spirito critico
- (c) Spirito di iniziativa e partecipazione attiva
- (d) Correttezza al momento della valutazione

### Modalità di verifica dei comportamenti

La verifica dei comportamenti viene operata in aula nel corso e in sede di prova d'esame mediante osservazione, e mediante possibili attività di valutazione formativa in itinere sul portale elearning.

### Prerequisiti (conoscenze iniziali)

**Prerequisito** è la conoscenza di base di dinamica, termodinamica ed elementi di meccanica statistica, elettromagnetismo, struttura della materia e meccanica quantistica acquisiti nel corso di studi triennale. **Utili sebbene non indispensabili** sono conoscenze di fisica dei solidi.

### Indicazioni metodologiche

Le attività d'aula e online sono disegnate attorno agli obiettivi di apprendimento. In particolare:

1. **Lezione frontale.** Si intende, per ogni argomento:

- (a) discutere qualitativamente mediante la fisica di base le idee emergenti da fatti sperimentali ed esempi di vita quotidiana, approfondendo all'occorrenza metodi sperimentali e possibili applicazioni, anche utilizzando slides e spezzoni di seminari di esperti/e qualificati disponibili online ;
- (b) formalizzare i concetti (conoscenza concettuale);
- (c) ovunque possibile discutere il problema complesso attraverso semplici modelli che usano la fisica di base;
- (d) sviluppare e classificare la conoscenza di metodi teorici e di simulazione per le predizioni quantitative (conoscenza procedurale e fattuale), avendo cura di sviluppare alla lavagna tutti i passaggi per ogni tipologia di calcolo;
- (e) al termine di ogni macro-argomento, costruire in modo interattivo una mappa concettuale che lo rappresenta, evidenziando concetti e relazioni tra questi;
- (f) l'ultima parte del corso è dedicata a studi di casi in differenti piattaforme per le tecnologie quantistiche, allo scopo di acquisire pratica d'applicazione della conoscenza procedurale e fattuale

1. **Portale elearning.** Contiene una organizzazione ragionata delle note estese di quanto fatto a lezione, slides, mappe concettuali, weblink utili a lezioni e colloqui offerti da altre istituzioni scientifiche qualificate (among which also ACP and KITP), oltre alle comunicazioni relative al corso e – se utile agli/le studenti – l'uso del forum per discutere di argomenti del corso e del lavoro finale di gruppo.
2. **Seminari e colloqui possono essere offerti in forma facoltativa**, svolti da esperte ed esperti in visita presso il Dipartimento
3. **Il lavoro di gruppo (facoltativo)** a fine corso viene realizzato con la supervisione della docente
4. **L'essay per la prova d'esame** viene preparato dalla/o studente con la supervisione della docente
5. **Il corso può essere in lingua inglese**, in accordo con gli e le studenti



## UNIVERSITÀ DI PISA

### Programma (contenuti dell'insegnamento)

**A. Introduction and conceptual map of the essential ideas qualitatively discussed via examples anticipated from the course itself**

**B. Measurements and correlation functions [4 h]**

Generalities and essential concepts. Measurements and Correlation functions, Response functions, Quantum Hydrodynamics via a simple model.

**C. Theoretical Methods for strongly correlated quantum fluids [LM-Physics course: 40 h. PhD course: 28 h].** *Development of theoretical methods, starting from the measurement of correlation functions which have been phenomenologically introduced in B. Discussion of the relationships among the different methods, enlightening goods and bads. The methods will be first developed in C1 for systems with maximal symmetry and then, after bridging in C2 with a crash dictionary on broken symmetries and quantum phase transitions, completed in C3-C5 by introducing their peculiarities in correspondence of phase transitions driven by tuning interactions strength, disorder, temperature, and dimensionality.*

**C1 Systems with maximal symmetry [LM course: 28h. PhD course: 20 h]**

**Only for PhD course: choose either C1.1 or C1.2**

C1.1 Formal development of the Theory of Linear Response: Definitions and properties- Fluctuation Dissipation Theorem - Sum rules - Applications: calculation of response functions within the Random-Phase Approximation (fermions and bosons) - Concept of local field factor and self-consistent theories beyond mean-field. Dictionary between response functions and Green's functions methods [8 h]

C1.2 Correlation functions and Green's functions (zero and finite temperature): Definitions and properties - Boundary conditions - Equations of motion as a technique to derive consistent approximations - Non-equilibrium Green's functions - A dictionary with response functions - Generating functionals - Wick's theorem - Finite temperature and the contour-integral method - Perturbative techniques and Feynman diagrams - Examples including phonon and fermion systems to low-order - Methods based on self-consistent integral equations. Dictionary between response functions and Green's functions methods [8 h]

C1.4 Landau Fermi and Bose liquids [2 h]

C1.6 Quantum Hydrodynamics: Microscopic derivation of the equations starting from conservation laws - Transport coefficients as special limits of response functions and Kubo relations- Static susceptibilities as thermodynamic derivatives of conserved quantities. Relationship with Linear Response. Relationship with experiments: Landau-Placzek ratio and examples. [8 h]

C1.7 A crash dictionary of (Time-Dependent) Density Functional Theory: Definitions - Theorem of Hohenberg and Kohn - Kohn and Sham scheme - Local Density Approximation - Exchange and correlation potentials and relationship with linear response theory - Hints on current functionals and TDDFT, relationship with Linear Response and microscopic formulation of Navier-Stokes equations. [2 h]

**During the development of the formal tools, care will be taken to establish and discuss links between the learned theoretical methods and simulational/numerical methods on one side and experimental methods on the other, with examples from different spectroscopies (matter, spin, and optical probes) and from transport measurements.**

**C2 A crash dictionary on broken symmetries and (quantum) phase transitions [2 h]**

- Concept of order parameter- Landau and Landau-Ginzburg theory for uniform (Ising model) and non-uniform order parameter - Complex order parameter and neutral/charged superfluid - Introduction to the concepts of scaling, critical exponents and universality- Dynamical effects: Anderson-Higgs mechanism and Goldstone modes - Analogy between superconductivity and electroweak theory- Conditions of validity for mean-field theories and thermal and quantum (as e.g. due to correlations and reduced dimensionality) fluctuations

**C3. Superfluidity/superconductivity and Bose-Einstein Condensation of neutral and charged Fermi and Bose systems [6 h].**

Application of the theory of linear response to the microscopic calculation of the superfluid density/moment of inertia and the relationship between superfluid and condensate fraction - Peculiarities in hydrodynamic treatment and microscopic two-fluid equations - Peculiarities in the Green's functions treatment: Ward identities and conserving vs. gapless approximations.

**Only for PhD course: choose either C4 or C5**

**C4. Effects of reduced dimensionality: the very special 1D case [2 h]**-Specialty of 1D systems: always strongly correlated and collectivization of excitations. Luttinger Liquids: structure and thermodynamic properties. Typical phase diagrams in 1D systems with Charge/density and Spin-Density Waves. Essentials on bosonization techniques.

**C5. Effects of disorder and quantum transport in 1D [2 h].** Transport properties of quantum fluids - Diagrammatic analysis and phenomenology - Quenched Green's functions - Scattering against disordered impurities - [Drude conductivity - Diffusion corrections] - Quantum corrections - Effect of dimensionality and quantum transport in 2D and 1D - AALK argument and Anderson localization -Universal conductance - Concept of many-body localization.

**D. Cases study, selected in each of the following four different platforms for quantum technologies [6 h general topic + 6 h paradigmatic examples D1-D3, among which choosing one]:**

D0. The basic toolbox (2 or 3-levels systems, interactions, gauge fields, and dimensionality) in the following quantum technologies platforms: quantum gases and trapped ions, superconducting circuits, matter and optical cavities, fluids of light [6 h].

D1. Paradigmatic examples: Engineering analogue quantum simulators in quantum gases and trapped ions [2 h]

D2. Paradigmatic examples: Engineering analogue-gravity simulators in quantum gases, fluids of light, and graphene [2 h]

D3. Paradigmatic examples: quantum metrology with quantum gases and trapped ions [2 h]

*In each case, the toolbox available in each platform will be discussed, in relationship to the concepts and understanding developed during the course (superfluidity/superconductivity, reduced dimensions, (synthetic) magnetism and gauge-field physics, Anderson localization and many-body localization, charge and spin density waves, Mott insulators). A selection of interesting results will be presented, either aimed at the design of quantum devices and/or at fundamental physics applications. The selection will be decided with the students within a participatory process.*

### Bibliografia e materiale didattico

**Note:**

1. **Sul portale elearning del corso, per ogni argomento sono:**

- **le note dettagliate delle considerazioni e dei calcoli svolti a lezione**
- **altro materiale (link, note, eventuali onenotes di lavagna virtuale) con una guida ragionata all'uso della bibliografia consigliata (si veda di seguito)**



## UNIVERSITÀ DI PISA

---

1. Saranno messe a disposizione le lezioni registrate
2. Tutti i manuali di studio e gli articoli sono comunque disponibili presso la Biblioteca di Fisica e/o online.

### 5.1 Generali:

- P.C. Martin, Measurements and Correlation Functions, Gordon and Breach (1968) **[Con riferimento al Programma: Parte B]**
- G. Giuliani and G. Vignale, Quantum Theory of the Electron Liquid, Cambridge University Press (2010) **[Con riferimento al Programma: Parte C1]**
- Piers Coleman, Introduction to Many-Body Physics, Cambridge University Press (2015) **[Con riferimento al Programma: Parte C2 e C3]**
- L.P. Kadanoff and G. Baym, Quantum Statistical Mechanics, Benjamin (1962) **[Con riferimento al Programma: Parte C1- Nonequilibrium methods]**
- Baym, Microscopic Description of Superfluidity, Math. Methods in Solid-State & Superfluid Theory, Clark & Derrick Eds., Oliver & Boyd (1969) **[Con riferimento al Programma: Parte C4]**
- P.C. Hohenberg and P.C. Martin, Microscopic Theory of Superfluid Helium, Annals of Physics 34, 291-359 (1965) **[Con riferimento al Programma: Parte C4]**
- Giamarchi, Quantum Physics in One Dimension, Oxford Science Pub. (2006) **[Con riferimento al Programma: Parte C5]**
- G. Iadonisi, G. Cantele, and M.L. Chiofalo, Introduction to Solid State Physics and Crystalline Nanostructures, Springer (2014) **[Con riferimento al Programma: Background in solid-state physics]**
- M. L. Chiofalo, L. Salvi, G. Tino, La Fisica della Materia, in Lezioni di Fisica, Corriere della Sera (2018) **[Overview semi-divulgativa sulle quantum technologies]**

### 5.2 Parti specifiche del corso (materiale facoltativo, in aggiunta alle note di lezione disponibili sul portale)

- G. Vignale, C. A. Ullrich, S. Conti, Time-Dependent Density Functional Theory and beyond the Adiabatic Local Density Approximation, Phys. Rev. Lett. 79, 4878 (1997)
- A. Daley, Quantum trajectories and open many-body quantum systems, Adv. Phys. 63, 77 (2014)

### Altre letture, per studenti particolarmente interessati/e:

- P. Nozières and D. Pines, Theory of Quantum Liquids I – II, Westview Press (1999); Pines, The Many-Body Problem, Wiley (1997)
- D. Forster, Hydrodynamic Fluctuations, Broken Symmetry, And Correlation Functions, Adv. Books Classics (1995)
- W.M. Foulkes, L. Mitas, R.J. Needs, and G. Rajagopal, Quantum Monte Carlo Simulations of Solids, Revue of Modern Physics 73, 33 (2001)
- U. Schollwöck and S.R. White, Methods for Time Dependence in DMRG, in Effective Models for Low-Dimensional Strongly Correlated Systems, G.G. Batrouni and D. Poilblanc Eds., p. 155 AIP, Melville, New York (2006)
- L. A. Bloomfield, How Things Work, Wiley (2013)

### Indicazioni per non frequentanti

Si consiglia di utilizzare al massimo delle potenzialità il materiale e le opportunità di verifica sul portale elearning di Fisica

### Modalità d'esame

La valutazione finale è il risultato della valutazione sull'essay e (in modo facoltativo) sul lavoro di gruppo. Per chi decide di partecipare al lavoro di gruppo, il 75% della valutazione è sull'essay, e il 25% sul lavoro di gruppo. Per chi non desidera partecipare al lavoro di gruppo, il 100% della valutazione è sull'essay.

Per entrambe le prove, la valutazione è formulata per competenze. Con riferimento alle aree (a)-(d) illustrata nella sezione

#### Modalità di verifica delle capacità:

- fino a **18 punti** per l'Area **(a)**
- fino a **6 punti** per l'Area **(b)**
- fino a **4 punti** per l'Area **(c)**
- fino a **5 punti** per l'Area **(d)**

### Note

Il corso è concepito sia per studenti che vogliono specializzarsi nella fisica teorica della materia condensata che a studenti che vogliono acquisire una cassetta degli attrezzi concettuale e metodologica per comprendere la fisica dei liquidi quantistici e il funzionamento delle tecnologie quantistiche e apprendere a concepirne di nuove. Poiché diverse sono le piattaforme sperimentali dove le tecnologie quantistiche possono essere utilmente realizzate in forme differenti con funzionalità simili, la scelta del corso è privilegiare l'ampiezza di visione concettuale e metodologica nei primi 2/3 del corso, dedicando l'ultima parte alle implementazioni pratiche, che pure possono essere sempre approfondite all'occorrenza.

Ultimo aggiornamento 29/07/2022 12:31