

FISICA

DEI

MOLTI CORPI

**Fisica dei Molti Corpi (MBP)
CdS Magistrale in Fisica**

Maria Luisa Chiofalo
Dipartimento di Fisica, Università di Pisa

Progetto didattico

[Pisa, Novembre 2014. Last rev. Febbraio 2015]

<https://www.dm.unipi.it/clearning>

1. Perché

[Dalla Prefazione di Iadonisi, Cantele and Chiofalo, *Introduction to Solid State Physics and Crystalline Nanostructures*, Springer (2014)]

In the last decades many-body physics has been a rapidly evolving field of frontier research, exploding in a number of novel ideas with applications for both fundamental physics and technological devices. In particular, a progressive search for extreme quantum-degeneracy conditions has been conducted, after reducing the dimensions from three down to zero-dimensional like structures, lowering temperatures so close down to absolute zero, tuning interactions via a variety of different concepts. Novel ground states and related low-energy types of excitations have been predicted and in most cases experimentally realized: it is often possible to move among different ground states in the same quantum phase diagram by turning the knob of a few external governing parameters. Engineering such extreme quantum conditions has opened the access to a progressively miniaturization, control and manipulation of quantum-behaving objects with high precision. These are the required characteristics to improve understanding and testing of fundamental physics concepts, such as those principles that cross over from quantum behavior to general relativity, and to devise novel technological applications, such as those based on quantum transport and quantum information. Laboratory systems where these frontier research topics are quite rapidly evolving are *e.g.* semiconductor-based nanostructures and confined quantum atomic gases cooled down to tens of nanokelvin, also moving within crystal-like periodic external potentials provided by laser light.

The progress achieved so far has been accompanied by significant advances in experimental and theoretical methods. New concepts have indeed been introduced in experiments, such as various specifications of probe microscopies, and earlier spectroscopic techniques have been refined to reach unprecedented accuracies and precision. Powerful theoretical methods specific for many-particle physics have been developed, where for example various specifications of zero and finite-temperature simulational Quantum Monte Carlo methods and of Density Functional Theories have occupied a preeminent position. More recently, further increase in computation powers along with clever algorithms has made available exact diagonalization numerical techniques to determine ground state and low-energy excitations and Density Matrix Renormalization Group techniques to determine the time-dependent behavior of even strongly correlated systems. Thus, it is of no surprise that at such advanced levels physics, chemistry and engineering are converging towards the use of common tools and languages though from different motivations and with different perspectives.

A strategy for this course is to point towards a multidisciplinary approach, favoring the acquisition of cross competences, reinforce the attitude towards the scientific method from different paths, widen the student's view while the same ideas are discussed from different perspectives and, paradoxically, push forward the emergence of the key-concepts as those that are shared across all the different viewpoints. Finally, it may increase the qualitative and quantitative impact of understanding along with the activation of different languages and thus communication channels that can more likely meet different students abilities. In fact, physics is an extraordinary context for learning to learn, often at a deeper level than other disciplines. In physics, the learning success at any level, even the lowest, strongly requires the development of different abilities, that become competences when accompanied by the corresponding awareness, and evolve into intelligences when put in context. Different intelligences residing into different brain sites and functions. The ability to solve problems, that is to reduce the complexities of nature and to select the useful amount and quality of details, requires the acquisition of robust methodological paths able to connect concepts and ideas with their applications, thereby linking conceptual with procedural and factual knowledge. This crossing from brain to hands and back, from concepts to their applications, from observing phenomena to inferring explanations that are to be subsequently tested, works as a continuous exercise of climbing up and down across all types of logical reasoning, whatever deductive, inductive or abductive they might be. The effort to reduce the great amount of many different behaviors to a few basic principles requires an active lateral thinking and a remarkable dose of creativity. The ability to continuously change perspective in flexible manners requires the acquisition of a number of different languages or, more precisely, formal representations of the problem, along with the ability of translating among them and often of thinking according to all of them at the same time. On the other hand, since the capability of quantitatively predicting complex phenomena requires significant mathematical tools and physics formalisms, students and future researchers can be in danger of remaining trapped in a crowd of hard calculations and technicalities where the essential concepts get lost as a compass to orient the understanding in the widest horizon, and the contact with everyday life manifestations of phenomena is not even an issue. For this reason, a special attention is to be dedicated in discussing ideas and concepts, well before entering any formalism and detail, which makes the learning process additionally powerful.

The possibility of developing a high degree of awareness for this remarkable learning potential is a progressive long-life achievement for students and researchers, which the format of the present textbook tries to smoothly follow through. A special care is therefore been taken to think the course organization: the aim is to enhance the student's learning environment with suited tools to develop awareness of the learning process and of the acquired conceptual, procedural, and factual knowledge. In this way, the original combination of student's skills, different for everyone, may more easily become a competence and, when related and applied to a context, may empower a different combination of intelligences.

2. Cosa

2.1 Obiettivo generale del corso è accompagnare lo/a studente a:

(i) Sviluppare conoscenza concettuale, procedurale e fattuale nella fisica di sistemi con molte particelle (quantistiche) interagenti, dove agendo su temperatura, dimensionalità, e forza di interazione è possibile stabilire condizioni di forti correlazioni in proprietà di carica/densità e spin. Per questo, si prevede di:

(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;

(b) formalizzare i concetti; e

(c) sviluppare e classificare metodi teorici e di simulazione per le predizioni quantitative, incluso Teoria della Risposta Lineare e funzioni di correlazione, Fluido- e Idrodinamica quantistiche, Teoria del Funzionale di Densità (Dipendente dal Tempo), metodi Quantum Monte Carlo, Density Matrix Renormalization Group.

(ii) 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, facendo emergere come le proprietà macroscopiche siano governate da leggi di conservazione e rotture di simmetria accompagnate da elasticità, modi dinamici a bassa frequenza e difetti.

2.2 Programma del corso

NOTA. I pesi relativi delle diverse parti del programma, rispetto al tempo totale a disposizione per il corso, vengono definiti in accordo con gli e le studenti secondo i loro interessi e necessità di studio e più in generale per adattare dinamicamente il corso al contesto attuale dell'aula.

A. Introduzione al corso e mappa concettuale delle idee...

...discusse qualitativamente attraverso un esempio: l'acqua.

B. Struttura e scattering

Generalità. Misure e Funzioni di correlazione. Principi e Metodi sperimentali per determinare la struttura della materia. Rassegna fenomenologica sulle caratteristiche essenziali di simmetria e di struttura dei gas e dei liquidi, dei solidi cristallini, dei cristalli liquidi, di quasi-cristalli, di sistemi superfluidi e di sistemi con ordine magnetico. Simmetrie discrete e continue e relazioni con termodinamica e meccanica statistica. Effetti della dimensionalità.

C. Scaling, esponenti critici e universalità

Costruzione di una teoria di campo. Introduzione ai concetti di scaling, esponenti critici e universalità attraverso la soluzione di problemi esemplari in approssimazione di campo medio: modello di Ising, transizione liquido-gas, transizione liquido isotropico-nematico, transizione liquido-solido.

D. Metodi Teorici per sistemi fortemente correlati attraverso due casi di studio

D.1 Introduzione ai metodi teorici a partire da semplici applicazioni alla teoria di campo medio: metodo variazionale, integrali funzionali, risposta lineare, funzionale di densità (DFT) e relazione tra questi. Condizioni di validità della teoria di campo medio e fluttuazioni. Calcolo di esponenti critici e relazioni di scala in sistemi fortemente correlati.

D.2 Sviluppo dei metodi attraverso lo studio di due casi:

(i) Teoria del Gruppo di Rinormalizzazione. *Caso di studio: sistema di spin nel modello di Ising.*

(ii) Teoria della Risposta Lineare e delle Correlazioni Dinamiche, DFT e sua estensione a fenomeni dipendenti dal tempo (TD-DFT), Idrodinamica ed equazioni di Navier-Stokes microscopiche, e

relazioni concettuali e metodologiche queste. *Caso di studio: superfluidità e condensazione di Bose-Einstein in gas atomici quantistici.*

E. Principi alla base dei Metodi Simulativi per sistemi fortemente correlati

E.1 Quantum Monte Carlo (QMC): Variational, Diffusion, Reptation, Path-Integral QMC.

E.2 Implementazioni della DFT.

E.3 Density Matrix Renormalization Group (DMRG).

E.4 Approfondimenti seminariali/laboratoriali facoltativi, da concordare con i/le partecipanti.

F. Difetti: un “dizionario”

Caratterizzazione secondo le proprietà di simmetria della struttura. Generalità sui difetti topologici, esempi ed applicazioni: vortici e dislocazioni, transizione di Kosterlitz-Thouless. Generalità su domini e solitoni, esempi e applicazioni.

3. Come

3.1 Metodologia per la discussione degli argomenti

Per gli obiettivi descritti in 2., si intende utilizzare due esempi complementari rispetto alle caratteristiche di carica/densità e di spin, tratti da campi di ricerca di frontiera (fluidi elettronici in sistemi a bassa dimensionalità e gas atomici ultrafreddi quantistici) per acquisire le seguenti competenze, ovvero imparare a saper:

- (a) discutere qualitativamente le idee emergenti a partire da concetti di fisica di base già acquisiti nel corso di studio triennale e dalla fenomenologia - preferibilmente disponibile dalla vita di tutti i giorni - e fatti sperimentali;
- (b) formalizzare i concetti utili;
- (c) sviluppare i principali strumenti e metodi teorici e di simulazione per le previsioni quantitative;
- (d) discutere la connessione tra funzioni di correlazione e misure (teorema di fluttuazione e dissipazione) e, all'occorrenza, i principi alla base dei principali metodi sperimentali; (d) mettere in luce le possibili applicazioni;
- (e) al termine di ogni argomento, costruire in modo interattivo una mappa concettuale che lo rappresenta, evidenziando concetti e relazioni tra questi.

3.2 Prerequisito di accesso al corso 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 ma non indispensabili sono conoscenze di fisica dei solidi.

3.3 Nota sulla destinazione del corso. *L'intenzione è destinare il corso sia a studenti che vogliono specializzarsi nella fisica della materia condensata che a coloro che vogliono semplicemente complementare le proprie conoscenze. La scelta del corso è dunque privilegiare l'ampiezza di visione concettuale e metodologica piuttosto che il dettaglio delle tecniche, che possono poi essere sempre approfondite all'occorrenza.*

3.4 Organizzazione del corso

– Il corso vale **6 CFU**. È svolto nel secondo semestre per un totale di **42 ore**, due giorni a settimana, una o due ore per volta secondo dettagli da **concordare con gli/le studenti frequentanti**.

– Oltre all'organizzazione, anche **contenuti più di dettaglio del programma potranno essere concordati con gli/le studenti frequentanti**, incoraggiando la formulazione di proposte e favorendo lo sviluppo di argomenti o metodi di specifico interesse.

– Si prevede di offrire comunque occasioni ulteriori di **approfondimento di tipo seminariale** su tecniche di simulazione numerica, delle quali gli e le studenti potranno fruire facoltativamente.

4. Opportunità e modalità di valutazione

La valutazione è formulata mediante **prova orale**. In particolare, si richiede allo/a studente di individuare, in autonomia o con l'accompagnamento del/la docente, un problema di fisica dei molti corpi non discusso nel corso ovvero approfondire aspetti dei casi di studio discussi e dimostrare:

- (a) di aver compreso idee e concetti e saperli comunicare utilizzando conoscenze di fisica di base;
- (b) di saper formalizzare i concetti e saperli trattare attraverso l'uso di uno o più tra i metodi sviluppati nel corso e relative procedure;
- (c) di 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.

La valutazione viene quindi effettuata per competenze, secondo un punteggio così composto:

- fino a **18 punti** per la competenza (a)
- fino a **6 punti** per la competenza (b)
- fino a **4 punti** per la competenza (c)
- fino a **5 punti** per le competenze trasversali (d)

5. Testi e articoli di studio

Testi e articoli sono disponibili o in Biblioteca di Fisica e/o online, o in copia.

5.1 Generali:

– P.M. Chaikin and T.C. Lubensky, *Principles of Condensed Matter Physics*, Cambridge University Press (1995)

– L.P. Kadanoff and G. Baym, *Quantum Statistical Mechanics*, Benjamin (1962)

5.2 Utili per specifiche parti del programma:

– P.C. Martin, *Measurements and Correlation Functions*, Gordon and Breach (1968)

– P.C. Hohenberg and P.C. Martin, *Microscopic Theory of Superfluid Helium*, *Annals of Physics* **34**, 291-359 (1965)

– 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)

– G. Iadonisi, G. Cantele, and M.L. Chiofalo, *Introduction to Solid State Physics and Crystalline Nanostructures*, Springer (2014)

– G. Grosso and G. Pastori Parravicini, *Solid State Physics*, Academic Press (2000)

– W.M. Foulkes, L. Mitas, R.J. Needs, and G. Rajagopal, *Quantum Monte Carlo Simulations of Solids*, *Review 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)

5.3 Altre letture consigliate

– P. Nozières and D. Pines, *Theory of Quantum Liquids I – II*, Westview Press (1999)

– D. Forster, *Hydrodynamic Fluctuations, Broken Symmetry, And Correlation Functions*, *Adv. Books Classics* (1995)

– L. A. Bloomfield, *How Things Work*, Wiley (2013)

INTRODUZIONE

FISICA DELLA MATERIA CONDENSATA:
TRATTA SISTEMI DI $\sim 10^{27}$ PARTICELLE
INTERAGENTI

⇒ IMPOSSIBILE
&
INUTILE

RISOLVERE UN
TALE PROBLEMA
DETERMINANDO IL
COMPORTAMENTO DI
OGNUNA

• SI PUÒ :

- DEFINIRE E OSSERVARE VARIABILI
MACROSCOPICHE

ES. DENSITÀ - Q. MOTO - MAGNETIZZAZIONE

.....

- CONNETTERE TALI VARIABILI MACRO
CON QUANTITÀ MICRO

MECCANICA STATISTICA/TERMO



+

FORSE FONDAMENTALI

- MISURARLE STUDIANDO COME
DECADONO FLUTTUAZIONI
CREATE IN RISPOSTA A PERTURBAZIONI
ESTERNE : TEO FLUTTUAZIONE-DISSIPAZIONE

• LE OSSERVABILI MACRO
DISTINGUONO TRA DIVERSE
FASI/STATI FONDAMENTALI
NEI QUALI LA MATERIA CONDENSA,
RISPETTO A PROPRIETÀ/COMPORTAMENTO

- DI STRUTTURA: SOLIDI/SOFT MATTER/
LIQUIDI/GAS/...

- DI ELASTICITÀ IN RISP. A
SOLLECITAZIONI MECCANICHE
ESTERNE

- DI TRASPORTO IN RISP. A CAMPI EXT

- DI INTERAZIONE CON LA LUCE
(OTTICHE)

CONCETTO FONDAMENTALE E UNIFICANTE:

LE PROPRIETÀ SONO GOVERNATE
DA ROTTURE DI SIMMETRIA E
LEGGI DI CONSERVAZIONE

- N, \vec{P}, \vec{L}, E SI CONSERVANO
- ALTA T : EN. CIN. $K \gg U_{LRR}$
DISORDINATO - UNIFORME -
ISOTROPO - NON CORRELATO
 - MASSIMA SIMMETRIA TRASL + ROT
 - DINAMICA A BASSA FREQ.:
IDRODINAMICA & LEGGI CONSERVAZIONE
- DIMINUENDO T :
 - PUÒ DIMINUIRE GRADO DI SIMMETRIA
 - COMPaiono modi DINAMICI A
BASSA FREQUENZA E
 - DIFETTI
COME MECCANISMI TESI A RIDURRE
LA SIMMETRIA ORIGINARIA

● RELAZIONI CON ALTRE
DISCIPLINE FISICHE E DI
SCIENZE NATURALI

- FORZE FONDAMENTALI:
FISICA ATOMICA E MOLECOLARE
FISICA FONDAMENTALE
- MOLTE PARTICELLE INTERAGENTI:
FISICA NUCLEARE
SCIENZE DELLA VITA
- DIZIONARIO MACRO-MICRO:
TERMODINAMICA & MECCANICA STATISTICA
- LENTA VARIABILITÀ DI DIVERSE
OSSERVABILI MACRO:
TEORIE DI CAMPO CONTINUO
DALLA FISICA DELLE PARTICELLE
- DIPENDENZA DA T E
DALLA DIMENSIONALITÀ
⇒ k vs. U_{CORR}
 λ DE BROGLIE vs. DIM. SISTEMI
FISICA QUANTISTICA

MAPPA CONCETTUALE
DEL CORSO
ATTRAVERSO UN ESEMPIO
L'ACQUA

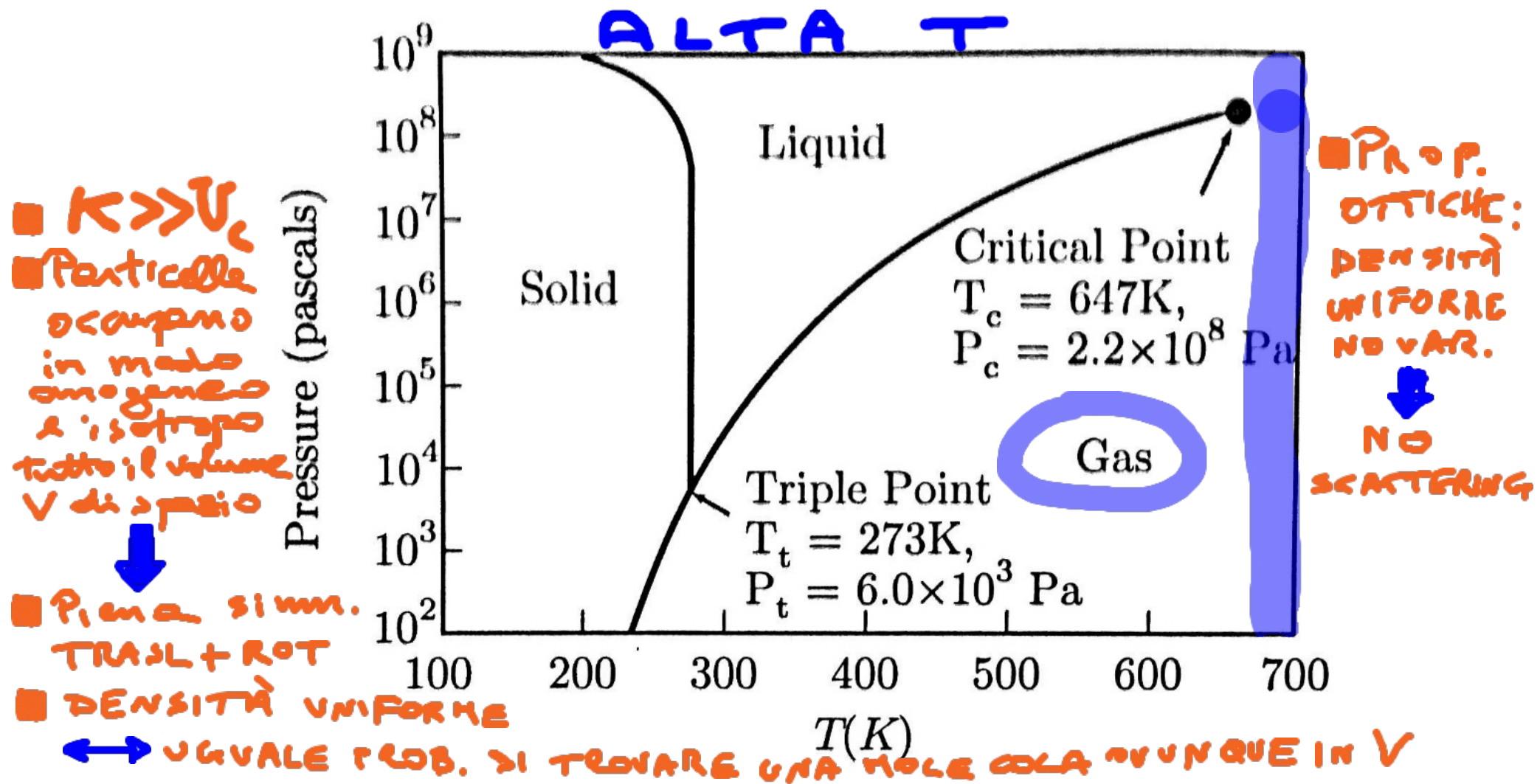


Fig. 1.2.1. The phase diagram for water.

■ $k \lesssim U_c$

In H_2O
 U_c data da
 interazioni
 di polo-dipolo
 dipendent: da
 orientazione
 → legame
 idrogeno

■ $U_c \gtrsim k$

↓ favorito
 il manifestarsi di
 fluttuazioni di densità → clustering → E, S diminuiscono

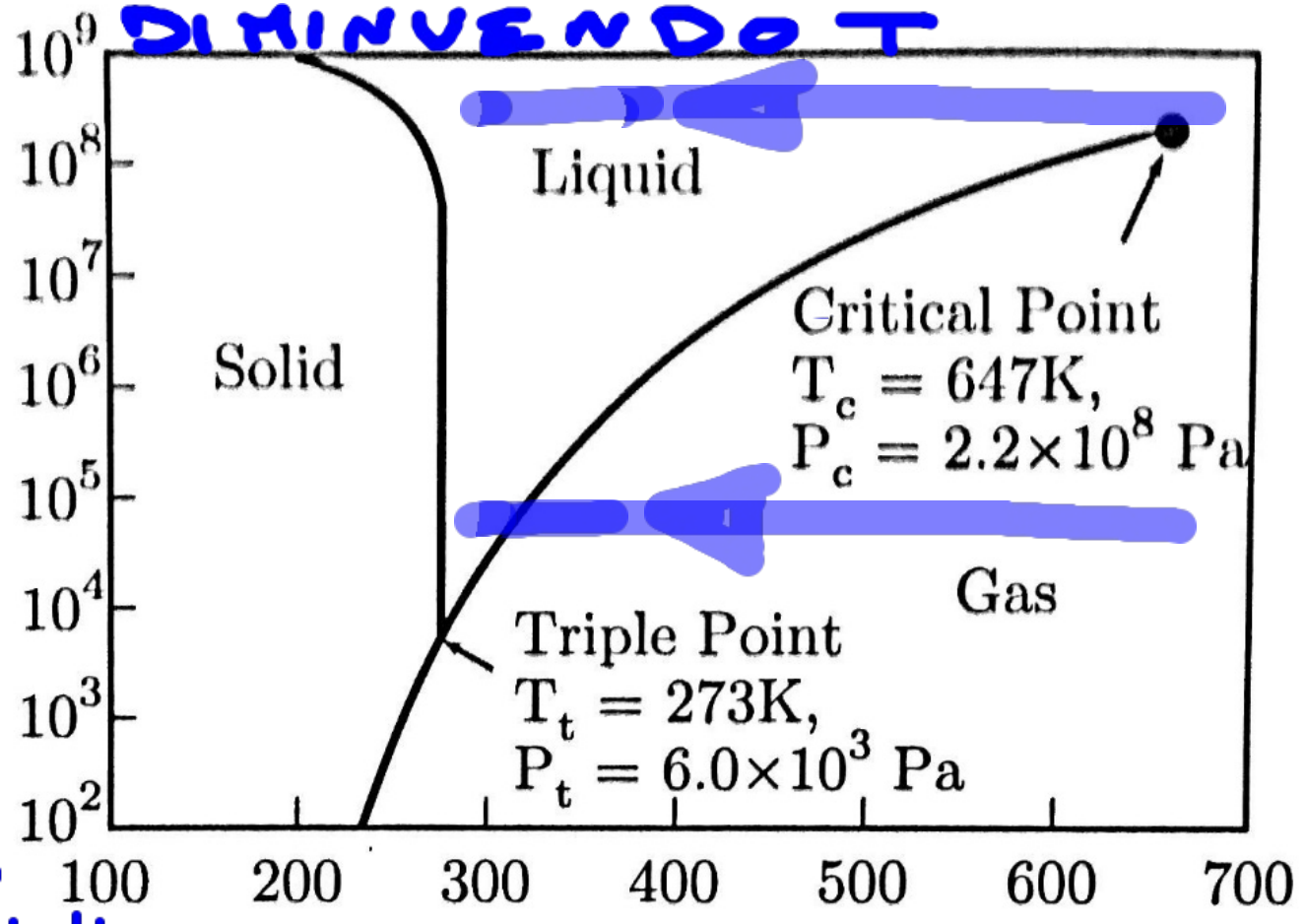


Fig. 1.2.1. The phase diagram for water.

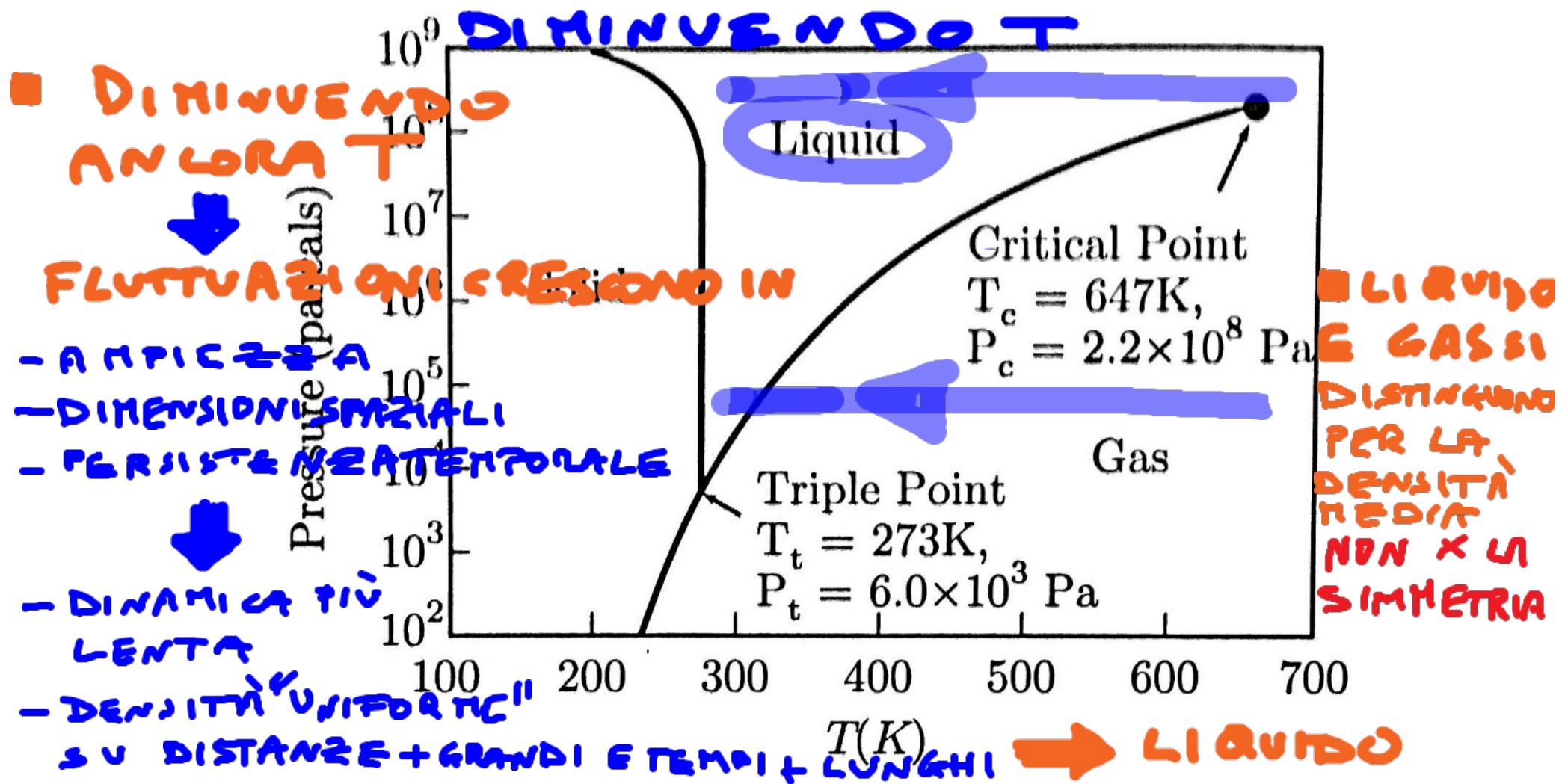


Fig. 1.2.1. The phase diagram for water.

■ TRANSIZIONE GAS-LIQUIDO PUÒ AVVENIRE IN DUE MODI NEL DIAGRAMMA DI FASE

I. @ PUNTO CRITICO: DIMINUENDO T ($@ P < P_c$) AUMENTANDO:

- DIMENSIONI E FLUTTUAZIONI
 $l \sim \lambda_{Luce} \Rightarrow$ OPALESCENZA CRITICA
- DURATA FLUTTUAZIONI
TANTO CHE REGIONI MENO DENSE "GALLEGGIANO"
SU REGIONI PIÙ DENSE

➔ FASI LIQUIDA E GASSOSA SI SEPARANO
(MENISCO) E SONO IN EQUILIBRIO

➔ TRANSIZIONE CONTINUA (2° ORDINE)

- APPLICARE PRESSIONE PUÒ DETERMINARE
TRASFORMAZIONE DI UN VOLUME DI GAS
NELLA REGIONE DI LIQUIDO PIÙ DENSO CON
UN COSTO DI ENERGIA TRASCURABILE: GRANDI
VARIAZIONI DI DENSITÀ DOVUTA A PRESSIONE

➔ COMPRESSIBILITÀ DIVERGE

II. NON AL PT. CRITICO: DIMINUENDO T

- AUMENTANO DIMENSIONI FLUTTUAZIONI MA SONO MENO AMPIE E DURANO MENO



- SI FORMANO GOCCE PER MECCANISMO DI NUCLEAZIONE, MOLTO PIÙ RAPIDO DEL MECCANISMO AL PUNTO CRITICO. DIMENSIONE GOCCE DETERMINATO DALLA CINETICA

⇒ TRANSIZIONE DISCONTINUA (1° ORDINE)

- $d \sim \lambda_{LUCE}$ ⇒ SCATTERING: COLORE BIANCASTO
NUVOLE

■ FUNZIONE DELLE CORRELAZIONI

- GAS E LIQUIDO HANNO STESSA SIMMETRIA
- CORRELAZIONI TRA LE PARTICELLE NEL LIQUIDO SONO MAGGIORI CHE NEL GAS
- LA DISTANZA TRA LE PARTICELLE È UN COMPROMESSO TRA LE PARTI ATTRATTIVE E REPULSIVE DELL'INTERAZIONE
- RAFFREDDANDO:
 - ▲ PARTE ATTRATTIVA FUNZIONA X AUMENTARE DENSITÀ
 - ▲ PARTE REPULSIVA // X OSTACOLARE IL PACKING LOCALE
 - ▲ LA NATURA DELLE INTERAZIONI (LEGAME IDROGENO/"SFERE DURE"/-...) DETERMINA IL TIPO DI PACKING

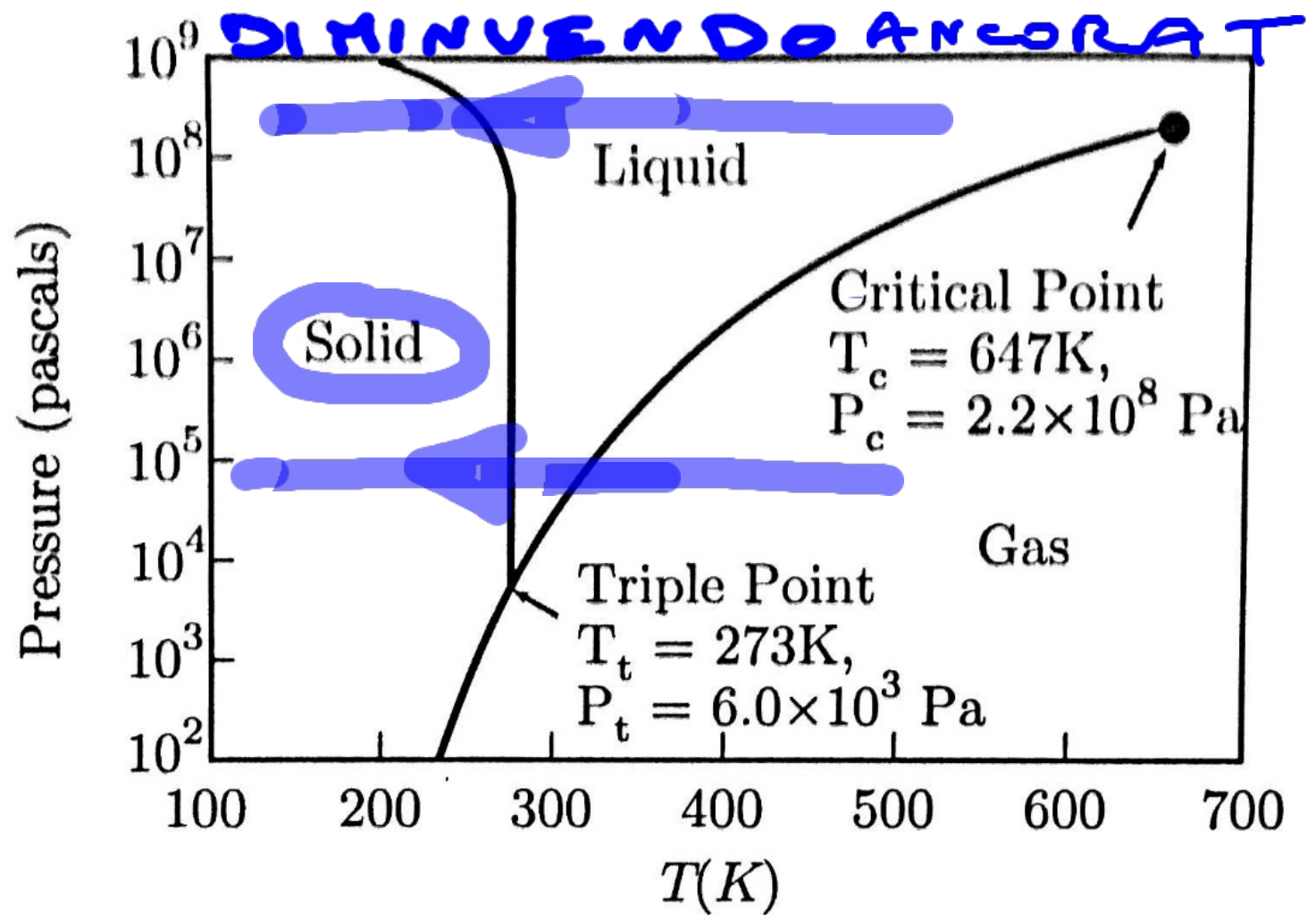
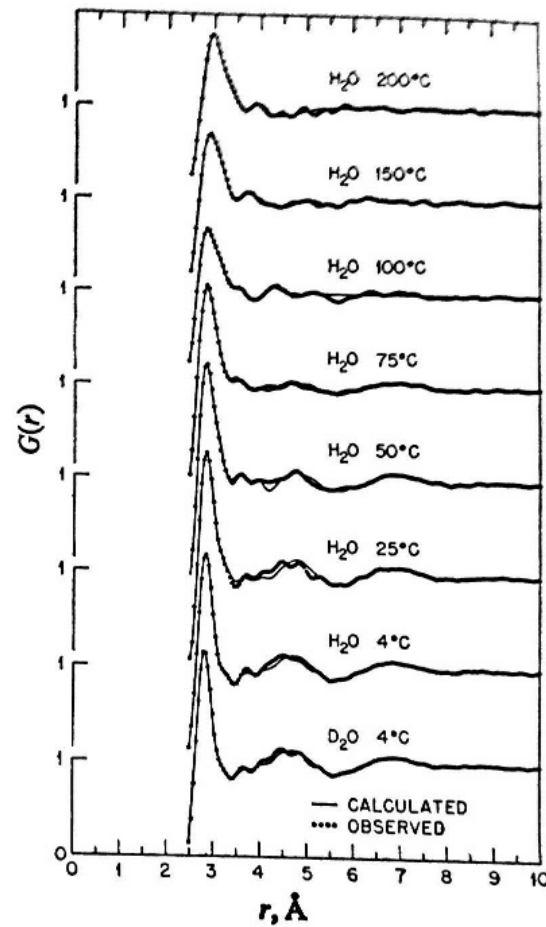


Fig. 1.2.1. The phase diagram for water.



RAFFREDDANDO
ANCORA

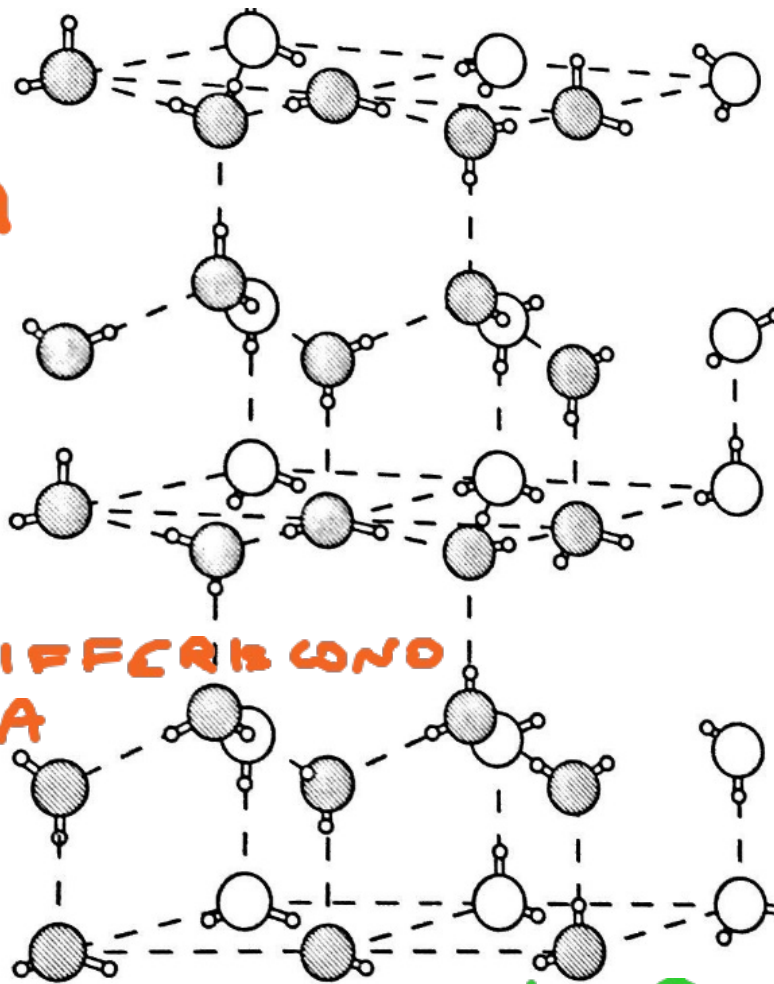
Fig. 1.2.3. The radial distribution function for liquid water is the probability distribution for water molecules surrounding a water molecule. There is an excluded region close to the central molecule, then an increased density for close neighbors, then an oscillating decrease in correlations to the average density at distances of a couple of molecular diameters. [A.H. Narten, W.D. Danford, and H.A. Levy, *Disc. Faraday Soc.*, 43, 97 (1967).]

■ CRISTALLO
HA SIMMETRIA
INFERIORE
AL LIQUIDO:

SIMM. TRASL.
CONTINUA
"È ROTTA"

■ I DUE STATI DIFFERISCONO
PER SIMMETRIA
NON TANTO X
DENSITÀ MEDIA
DI SOLITO

$\rho_{\text{solido}} > \rho_{\text{liq}} > \rho_{\text{gas}}$: NON VERO X H_2O @ 0°C (!!!)



■ ORDINE A
LUNGO RAGGIO

STRUTTURA
A ESAGONI
CORRUGATI

⇓
FIOCCHI DI
NEVE 😊

Fig. 1.2.4. Crystal structure of common ice. Note the directionality of the hydrogen bonds and the approximate tetrahedral coordination of each oxygen atom. The structure is a hexagonal "wurzite" form.

■ STIMA DELL'AMPIEZZA DELLO SPOSTAMENTO DELLE MOLECOLE NEL SOLIDO A T FINITA

- STRESS = FORZA/AREA NECESSARIO PER PRODURRE UNO STRAIN

$$\text{MODULO ELASTICO} \rightarrow G \frac{x}{r} \leftarrow \begin{array}{l} \text{AMPIEZZA DI DISTORSIONE} \\ \text{DIMENSIONI DELLA UNITARIA} \end{array}$$

$$\Rightarrow F \approx -A \cdot \text{STRESS} \approx -r^2 G \frac{x}{r} = -rGx \equiv -Kx$$

⇒ TEO EQUIPARTIZIONE ENERGIA

$$\frac{1}{2} K \langle x^2 \rangle = \frac{1}{2} k_B T$$

$$\langle x^2 \rangle \approx \frac{k_B T}{rG}$$

$\langle x^2 \rangle \rightarrow \infty$ SE $G \rightarrow 0$
↓
IL RETICOLO È DISTRUTTO

RIGIDITÀ/ELASTICITÀ DEL SISTEMA È
CONDIZIONE NECESSARIA X L'ESISTENZA
DI QUESTO NUOVO ORDINE RETICOLARE

■ IN GENERALE LE TRANSIZIONI DI FASE CON ROTTURA DI SIMMETRIA CONTINUA SONO CARATTERIZZATE DAL MANIFESTARSI DI

● NUOVE COSTANTI ELASTICHE

IMPEDISCONO ALLE FLUTTUAZIONI TERMICHE DI DISTRUGGERE IL NUOVO ORDINE

● NUOVI MODI IBRIDINATICI ($\kappa \rightarrow 0, \lambda \rightarrow \infty$)
A BASSA FREQUENZA $\omega \rightarrow 0$

(MODI DI TAGLIO NEL CASO LIQUIDO \rightarrow SOLIDO)

DOVUTI AL FATTO CHE @ $\lambda \rightarrow \infty$ SI PUÒ REALIZZARE UNO SPOSTAMENTO SIGNIFICATIVO DELLE MOLECOLE NEL COMPLESSO COMPONENDOLO CON TANTISSIME

KINUSCOLE DEFORMAZIONI DELLE DISTANZE DI

LEGAME CON TRASCRIBILE VARIERONE DI ENERGIA

\Rightarrow NO FORZA DI RICHIAMO SIGNIFICATIVA PER SPOSTAMENTI $\lambda \rightarrow \infty$

● DIFETTI TOPOLOGICI

FUNZIONE SIMILE ALLE PRECEDENTI

■ NON COSÌ ACCADE NEL CASO DI TRANSIZIONI CON ROTTURA DI SIMMETRIA DISCRETA

ISING

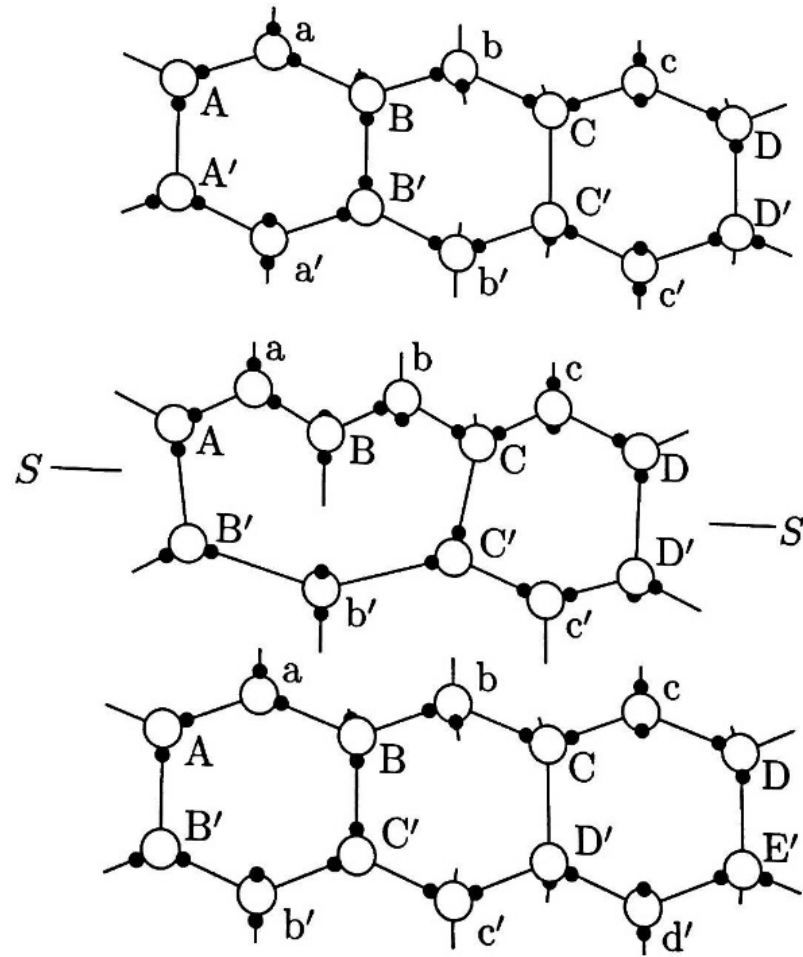


Fig. 1.2.5. An edge dislocation in ice. The dislocation motion is more complex than in simpler materials since it also leaves defects in the hydrogen bonding which must be relaxed by diffusion. [J.C. Poirier, *Creep of Crystals* (Cambridge University Press, 1985).]

Table 1.2.1. *Properties of some representative broken-symmetry phases.*

The Ising magnet has a broken discrete symmetry and no new rigidity or modes.

	Fluid	Nematic	Smectic-A	Crystal	Heisenberg magnet	Superfluid	Ising magnet
Broken symmetry	none	rotational	1D translation	3D translation	rotational	phase	up-down
New order	none	orientational	1D periodic density	3D periodic density	spin	condensate wave function	spin
Rigidity	none	rotational elastic constant	layer modulus	shear modulus	spin-wave stiffness	superfluid density	–
New modes	none	diffusive orientational	second sound – undulation	shear sound	spin wave	second sound	–
Defects	none	disclinations, hedgehogs	dislocations	dislocations	hedgehog	vortices	domain walls

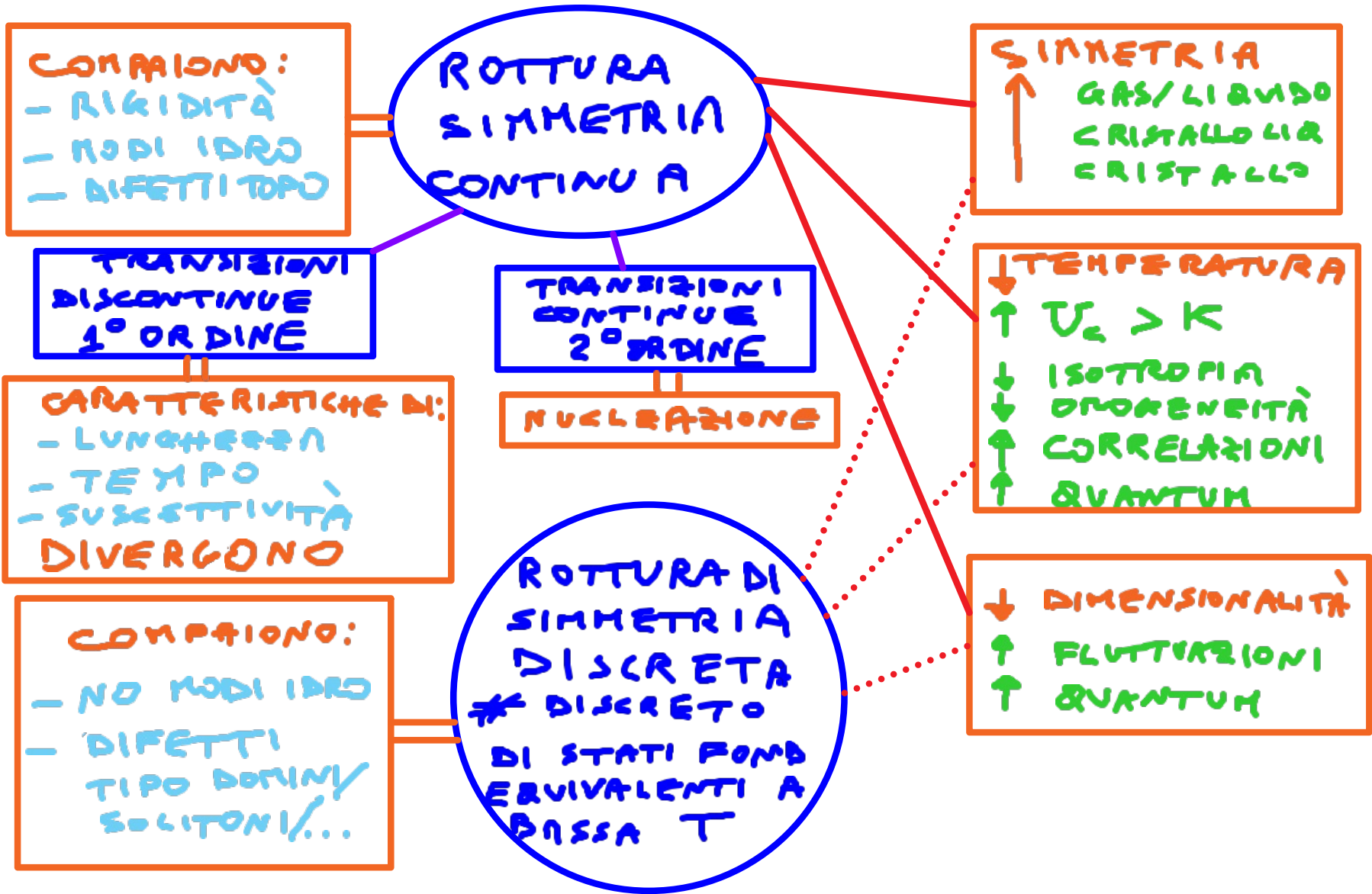
↳ GRADO SITH. INTERMEDI ◁

NEXT SLIDE

- NOTA SU FLUTTUAZIONI E DIMENSIONALITÀ: DIMENSIONALITÀ RIDOTTA ⇒ FLUTTUAZIONI IMPORTANTI @ $d < 3$ POSSONO DISTRUGGERE STATI ORDINATI E TRANSIZIONI $T \neq 0$

Table 1.2.2. *Sequence of phases with decreasing symmetry from the highest-symmetry isotropic fluid to the lowest-symmetry crystalline solid.*

Phase	Invariances	Order
Isotropic	all translations and rotations	none
Nematic	all rotations about \mathbf{n} axis, rotations by π \perp to \mathbf{n} , all translations	uniaxial orientational
Biaxial nematic	rotations by π about \mathbf{n} and \perp to \mathbf{n} , all translations	biaxial orientational
Smectic-A	same rotational invariances as nematic, all translations \perp to \mathbf{n} and translations by lattice vector \parallel to \mathbf{n}	uniaxial orientational 1D periodic density
Smectic-C	same translational as smectic-A, rotation by π about \mathbf{n} and \perp \mathbf{n}	biaxial orientational 1D periodic density
Hexatic	same translational as smectic-A, rotations by $2\pi/6$ about \mathbf{n} and by π \perp to \mathbf{n}	six-fold orientational 1D periodic density
Discotic	same rotational as hexatic, all translations along \mathbf{n} and by lattice spacings \perp to \mathbf{n}	six-fold orientational 2D periodic density
Crystal	discrete rotations in all directions, translations by lattice vectors in all directions	discrete orientational 3D periodic density



MAPP A CONCETTUALE