

**DENOMINAZIONE INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA**

**Materiali 2D**

2D Materials

**INFORMAZIONI INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA**

|        |           |        |                                                |
|--------|-----------|--------|------------------------------------------------|
| A.A.   | 2026-2027 | CdS    | SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI (LM-Sc.Mat) |
| Codice | 8068720   | Canale | Unico                                          |
| CFU    | 6         | Lingua | Italiano                                       |

**DOCENTE RESPONSABILE DELL'INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA**

**MAURIZIA PALUMMO**

**CODOCENTE**

**LUCA CAMILLI**

Modulo: (3CFU - Materiali 2D parte sperimentale, 2D Materials experimental part)

**OBIETTIVI FORMATIVI E RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI**

|          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Italiano | <p><b>OBIETTIVI FORMATIVI</b> L'insegnamento si propone di fornire una solida comprensione delle proprietà fisiche-chimiche dei materiali bidimensionali (2D), attraverso l'integrazione di concetti teorici, metodologie di modellizzazione e tecniche sperimentali avanzate. Verrà offerta una panoramica aggiornata della ricerca di base nel settore dei materiali 2D e delle loro principali applicazioni scientifiche e tecnologiche, con particolare attenzione ai campi dell'elettronica, dell'optoelettronica, della fotonica e delle tecnologie per l'energia.</p> <p><b>CONOSCENZA E CAPACITÀ DI COMPrensIONE</b> Al termine dell'insegnamento lo studente avrà acquisito conoscenze sulle proprietà fondamentali dei principali materiali bidimensionali, tra cui grafene, nitrato di boro esagonale, calcogenuri di metalli di transizione (TMDs), monocalcogenuri e altri di interesse nella ricerca degli ultimi anni.</p> <p>Lo studente conoscerà:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>le principali proprietà strutturali, elettroniche, vibrazionali e ottiche dei materiali 2D;</li> <li>i modelli teorici utilizzati per descriverne le proprietà, dai metodi empirici ai metodi atomistici e ai calcoli da primi principi basati sulla Teoria del Funzionale della Densità (DFT);</li> <li>le tecniche più rilevanti per la sintesi e la caratterizzazione sperimentale dei materiali 2D, con riferimento alle loro proprietà fisiche e chimiche.</li> </ul> <p><b>CAPACITÀ DI APPLICARE CONOSCENZA E COMPrensIONE</b><br/>Al termine dell'insegnamento, lo studente sarà in grado di:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>individuare e comprendere le metodologie teoriche e sperimentali più appropriate per lo studio delle proprietà dei materiali 2D;</li> </ul> |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | <ul style="list-style-type: none"><li>• interpretare criticamente dati sperimentali e risultati teorici relativi alla caratterizzazione strutturale, elettronica, vibrazionale e ottica di tali materiali;</li><li>• affrontare problematiche scientifiche nuove nell'ambito dei materiali bidimensionali;</li><li>• leggere e comprendere articoli scientifici in lingua inglese pubblicati su riviste specializzate del settore.</li></ul> <p><b>AUTONOMIA DI GIUDIZIO</b> Al termine dell'insegnamento lo studente avrà sviluppato una solida capacità di analisi critica e di valutazione indipendente nell'interpretazione delle proprietà fisiche e chimiche dei materiali 2D. Sarà in grado di giudicare autonomamente i limiti e i punti di forza dei diversi approcci metodologici (sia teorico-computazionali, sia sperimentali) utilizzati nella ricerca scientifica di frontiera. Inoltre, saprà valutare criticamente il reale potenziale di impiego e la sostenibilità tecnologica dei materiali bidimensionali in applicazioni innovative, con particolare riguardo ai settori dell'elettronica avanzata, della fotonica e delle tecnologie per la transizione energetica</p> <p><b>ABILITÀ COMUNICATIVE</b> Durante l'insegnamento lo studente svilupperà capacità di analisi critica e autonomia di giudizio nell'interpretazione delle principali proprietà fisiche dei materiali 2D, con particolare riferimento alle proprietà strutturali, elettroniche e ottiche. Sarà inoltre in grado di valutare criticamente il potenziale impiego di tali materiali in applicazioni innovative, dall'elettronica alla fotonica, fino alle tecnologie per la produzione, conversione e conservazione dell'energia.</p> <p><b>CAPACITÀ DI APPRENDIMENTO</b> L'insegnamento è strutturato in modo da fornire agli studenti gli strumenti metodologici necessari per intraprendere, in piena autonomia, lo studio di problematiche complesse e in continua evoluzione nel settore dei materiali bidimensionali. Lo studente svilupperà la capacità di navigare criticamente la letteratura scientifica internazionale (articoli di ricerca, review, brevetti), sapendo estrarre, confrontare e integrare informazioni provenienti da fonti diverse. Questa abilità consentirà allo studente di aggiornare costantemente le proprie competenze e di affrontare con successo percorsi di studio successivi (quali programmi di dottorato di ricerca) o di inserirsi autonomamente in contesti di R&amp;D industriali ad alta tecnologia.</p> |
| English | <p><b>LEARNING OBJECTIVES</b></p> <p>The course aims to provide a solid understanding of the physical-chemical properties of two-dimensional (2D) materials through the integration of theoretical concepts, modeling approaches, and advanced experimental methodologies. An updated overview of current fundamental research in the field of 2D materials and their main technological applications will be presented, with particular emphasis on electronics, optoelectronics, photonics, and energy-related technologies.</p> <p><b>KNOWLEDGE AND UNDERSTANDING</b></p> <p>At the end of the course, students will have acquired knowledge of the fundamental properties of the main classes of two-dimensional materials, including graphene,</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

hexagonal boron nitride, transition metal dichalcogenides (TMDs), monochalcogenides, and related systems.

Students will gain knowledge of:

- the main structural, electronic, vibrational, and optical properties of 2D materials;
- the theoretical models used to describe their properties, ranging from empirical approaches to atomistic methods and first-principles calculations based on Density Functional Theory (DFT);
- the most relevant synthesis and characterization techniques used to investigate the physical and chemical properties of 2D materials.

#### **APPLYING KNOWLEDGE AND UNDERSTANDING**

Students will be able to:

- identify and understand the most appropriate theoretical and experimental methodologies for investigating the properties of 2D materials;
- critically interpret experimental data and theoretical results related to the structural, electronic, vibrational, and optical characterization of such materials;
- address new scientific problems in the field of two-dimensional materials;
- read and understand scientific articles in English published in specialized international journals.

#### **MAKING JUDGEMENTS**

Upon completion of the course, students will have developed a solid capacity for critical analysis and independent evaluation in interpreting the physical and chemical properties of 2D materials. They will be able to autonomously assess the limitations and strengths of the various methodological approaches (both theoretical-computational and experimental) used in frontier scientific research. Furthermore, students will be capable of critically evaluating the actual deployment potential and technological sustainability of two-dimensional materials in innovative applications, with particular emphasis on advanced electronics, photonics, and energy transition technologies.

#### **COMMUNICATION SKILLS**

Particular attention will be devoted to the development of students' communication skills, both oral and written, promoting the rigorous and appropriate use of scientific language.

The final examination will also contribute to strengthening the students' ability to:

- communicate scientific results related to 2D materials in both Italian and English;
- present and discuss research activities, literature reviews, or scientific results before an audience of specialists and/or non-specialists.

#### **LEARNING SKILLS**

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>The course is structured to provide students with the necessary methodological tools to independently undertake the study of complex, rapidly evolving issues in the field of two-dimensional materials. Students will develop the ability to critically navigate international scientific literature (research articles, reviews, patents), effectively extracting, comparing, and integrating information from diverse sources. This skill set will enable students to constantly update their expertise and successfully pursue advanced educational pathways (such as Ph.D. programs) or autonomously integrate into high-tech industrial R&amp;D environments.</p> |
|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### PREREQUISITI

|                 |                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Italiano</b> | Conoscenze di fisica quantistica, di fisica dello stato solido, metodi ab-initio, basi di calcolo numerico, conoscenze di base sulle principali tecniche per crescita e caratterizzazione di film sottili |
| <i>English</i>  | Knowledge of quantum physics, solid state physics, ab-initio methods, numerical methods, basic knowledge of the main techniques for growth and characterization of thin films.                            |

#### PROGRAMMA E CRONOPROGRAMMA

|                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Italiano</b> | <p><b>Introduzione ai materiali bidimensionali (4 ore)</b></p> <p>Introduzione generale ai materiali bidimensionali (2D), dalle principali classi di materiali basati sugli elementi del gruppo IV, come il grafene, fino al nitrato di boro esagonale (hBN), ai calcogenuri di metalli di transizione (TMDs) e ad altre famiglie emergenti di materiali 2D. Verranno discussi gli aspetti fondamentali che rendono questi materiali di grande interesse per applicazioni in elettronica, optoelettronica, fotonica e tecnologie per la produzione e conversione di energia rinnovabile.</p> <p><b>Proprietà fisiche dei materiali 2D (16 ore)</b></p> <p>Studio delle proprietà strutturali, elettroniche, ottiche e termiche delle principali classi di materiali bidimensionali, con particolare riferimento a:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• grafene mono-, bi- e multilayer;</li> <li>• grafene twisted e sistemi moiré;</li> <li>• nitrato di boro esagonale (hBN) mono-, bi- e multilayer;</li> <li>• calcogenuri di metalli di transizione (TMDs) mono- e multilayer, con esempi quali MoS<sub>2</sub> e materiali correlati.</li> </ul> <p>Verrà inoltre analizzato il ruolo della composizione chimica, del numero di layer, dell'impacchettamento e dello strain sulle proprietà fisiche dei materiali 2D.</p> |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### Modellizzazione teorica e simulazioni atomistiche (12 ore)

Introduzione ai principali approcci teorici per lo studio delle proprietà elettroniche ed ottiche dei materiali 2D:

- metodi semi-empirici, con particolare attenzione al modello tight-binding;
- metodi ab-initio basati sulla Teoria del Funzionale della Densità (DFT);
- introduzione agli effetti a molti corpi e agli effetti eccitonici nelle proprietà ottiche dei materiali 2D.

Saranno presentati esempi e tutorials per simulazioni pratico-laboratoriali relative a grafene, bilayer di grafene, hBN, bilayer di hBN, MoS<sub>2</sub> e bilayer di MoS<sub>2</sub>.

### Tecniche sperimentali di crescita e caratterizzazione (10 ore)

Introduzione alle principali tecniche sperimentali per la preparazione, crescita e caratterizzazione dei materiali 2D:

- crescita mediante Chemical Vapor Deposition (CVD);
- esfoliazione meccanica e in fase liquida;
- grafittizzazione del SiC;
- microscopia ottica;
- metodi di trasferimento dei materiali 2D;
- microscopia a forza atomica (AFM).

### Materiali 2D emergenti: MXenes (2 ore)

Introduzione alle proprietà fondamentali e alle principali applicazioni dei MXenes come nuova classe di materiali bidimensionali.

### Applicazioni tecnologiche dei materiali 2D (12 ore)

Discussione di applicazioni avanzate dei materiali 2D in diversi ambiti scientifici e tecnologici, con particolare riferimento a:

- utilizzo di grafene, hBN e ossido di grafene ridotto per la protezione dalla corrosione;
- applicazioni del grafene nell'elettronica digitale;
- dispositivi optoelettronici e fotonici basati su materiali 2D;
- applicazioni energetiche e sensoristiche.

### Lettura e discussione di articoli scientifici

Durante l'insegnamento verranno analizzati e discussi alcuni articoli scientifici fondamentali e recenti nel campo dei materiali 2D, al fine di sviluppare capacità critiche di lettura e interpretazione della letteratura scientifica internazionale.

|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| English | <p><b>Introduction to Two-Dimensional Materials (4 hours)</b></p> <p>A general introduction to two-dimensional (2D) materials, from the main classes of materials based on Group IV elements, such as graphene, to hexagonal boron nitride (hBN), transition metal chalcogenides (TMDs), and other emerging families of 2D materials. The fundamental aspects that make these materials of great interest for applications in electronics, optoelectronics, photonics, and renewable energy production and conversion technologies will be discussed.</p> <p><b>Physical Properties of 2D Materials (16 hours)</b></p> <p>Study of the structural, electronic, optical, and thermal properties of the main classes of two-dimensional materials, with particular reference to:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• mono-, bi-, and multilayer graphene;</li> <li>• twisted graphene and moiré systems;</li> <li>• mono-, bi-, and multilayer hexagonal boron nitride (hBN);</li> <li>• Single- and multilayer transition metal chalcogenides (TMDs), with examples such as MoS<sub>2</sub> and related materials.</li> </ul> <p>The role of chemical composition, layer number, packing, and strain on the physical properties of 2D materials will also be analyzed.</p> <p><b>Theoretical modeling and atomistic simulations (12 hours)</b></p> <p>Introduction to the main theoretical approaches for studying the electronic and optical properties of 2D materials:</p> <p>Semi-empirical methods, with a focus on the tight-binding model;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ab-initio methods based on Density Functional Theory (DFT);</li> <li>• Introduction to many-body and excitonic effects in the optical properties of 2D materials.</li> </ul> <p>Examples and tutorials for practical laboratory simulations will be presented for graphene, graphene bilayers, hBN, hBN bilayers, MoS<sub>2</sub>, and MoS<sub>2</sub> bilayers.</p> <p><b>Experimental Growth and Characterization Techniques (10 hours)</b></p> <p>Introduction to the main experimental techniques for the preparation, growth, and characterization of 2D materials:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Growth by Chemical Vapor Deposition (CVD);</li> <li>• Mechanical and liquid-phase exfoliation;</li> <li>• Graphitization of SiC;</li> <li>• Optical microscopy;</li> <li>• 2D material transfer methods;</li> <li>• Atomic Force Microscopy (AFM).</li> </ul> <p><b>Emerging 2D Materials: MXenes (2 hours)</b></p> <p>Introduction to the fundamental properties and main applications of MXenes as a new class of two-dimensional materials.</p> <p><b>Technological Applications of 2D Materials (12 hours)</b></p> <p>Discussion of advanced applications of 2D materials in various scientific and technological fields, with particular reference to:</p> <p>Use of graphene, hBN, and reduced graphene oxide for corrosion protection;</p> |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Applications of graphene in digital electronics;</li> <li>• Optoelectronic and photonic devices based on 2D materials;</li> <li>• Energy and sensor applications.</li> </ul> <p>Reading and discussion of scientific articles</p> <p>During the course, several fundamental and recent scientific articles in the field of 2D materials will be analyzed and discussed, in order to develop critical reading and interpretation skills in the international scientific literature. Inizio modulo</p> |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### TESTI ADOTTATI E BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

|          |                                                                                                                                                                                  |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Italiano | Slides fornite dai docente e Articoli scientifici di riferimento nel settore dei materiali 2D. Tutto il materiale è reperibile dagli studenti sul canale teams dell'insegnamento |
|          | Slides provided in class and Scientific articles of reference in the sector All materials are available in the Teams channel of the course                                       |

#### DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ DI SVOLGIMENTO E METODI DIDATTICI ADOTTATI

☒ In presenza ☐ A distanza

|          |                                                                      |
|----------|----------------------------------------------------------------------|
| Italiano | Didattica frontale e pratico-laboratoriale condotta in aula          |
| English  | Frontal and practical-laboratory teaching conducted in the classroom |

#### MODALITÀ DI FREQUENZA

☐ frequenza obbligatoria ☒ frequenza facoltativa

#### DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ DI FREQUENZA

|          |                                                                                                                                                                                                                             |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Italiano | La frequenza regolare del corso non è obbligatoria ma è molto consigliata al fine di facilitare l'apprendimento delle nozioni avanzate trattate nel corso. Le lezioni sono svolte nelle aule del dipartimento               |
| English  | The regular attendance of the course is not mandatory but it is highly recommended in order to facilitate the learning of the advanced topics dealt within the course. Lessons are held in the classrooms of the department |

#### MODALITÀ DI VALUTAZIONE

☐ Prova scritta ☒ Prova orale ☐ Prova di laboratorio ☐ Prova pratica  
☐ Valutazione in itinere ☒ Valutazione di progetto ☐ Valutazione di tirocinio

#### COMPOSIZIONE DELLA COMMISSIONE VALUTATRICE

OLTRE ALLA TITOLARE MAURIZIA PALUMMO e LUCA CAMILLI, e in uno fra i seguenti esperti nel settore OLIVIA PULCI, TOMMASO GIOVANNINI, GIANLUCA STEFANUCCI, ENRICO PERFETTO, MASSIMO FANFONI, ANNA SGARLATA

**DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ E DEI CRITERI DI VERIFICA DELL'APPRENDIMENTO**

|          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Italiano | <p>L'esame consiste in una prova orale finalizzata ad accertare la conoscenza e la comprensione dei principali concetti relativi alla fisica e alla chimica dei materiali bidimensionali (2D), con particolare riferimento alle proprietà strutturali, elettroniche, vibrazionali, ottiche e termiche delle principali classi di materiali 2D, ai metodi teorici di modellizzazione e alle principali tecniche sperimentali di crescita e caratterizzazione.</p> <p>Nel corso della prova finale saranno valutate:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• la capacità di utilizzare i modelli teorici introdotti durante il corso per interpretare le proprietà fisiche dei materiali 2D;</li> <li>• la capacità di collegare formalismo teorico, simulazioni atomistiche e interpretazione fisica dei fenomeni studiati;</li> <li>• la comprensione delle principali tecniche sperimentali utilizzate per la sintesi e la caratterizzazione dei materiali bidimensionali;</li> <li>• la capacità di discutere criticamente applicazioni dei materiali 2D in elettronica, optoelettronica, fotonica ed energia;</li> <li>• l'autonomia di giudizio nell'analisi delle proprietà dei materiali e dei risultati teorici e sperimentali;</li> <li>• la chiarezza espositiva e l'uso appropriato del linguaggio scientifico.</li> </ul> <p>Nell'ambito della parte teorica dell'insegnamento, agli studenti sarà inoltre assegnato anticipatamente un progetto individuale o di gruppo dedicato allo studio di uno specifico materiale bidimensionale. Il progetto prevederà l'esecuzione e l'analisi di simulazioni teoriche relative alle proprietà del materiale studiato. I risultati ottenuti dovranno essere discussi mediante una presentazione orale supportata da slides in formato PowerPoint, finalizzata a valutare la capacità dello studente di analizzare criticamente i risultati, interpretarne il significato fisico-chimico e comunicarli in modo chiaro ed efficace.</p> <p>Per il superamento dell'esame è richiesto un voto non inferiore a 18/30.</p> <p>La valutazione sarà effettuata secondo i seguenti criteri:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Non idoneo:</b> conoscenza insufficiente degli argomenti fondamentali dell'insegnamento e limitata capacità di interpretazione delle proprietà fisiche e chimiche dei materiali 2D e dei relativi modelli teorici e sperimentali.</li> <li>• <b>18-20:</b> conoscenza essenziale dei contenuti dell'insegnamento; comprensione sufficiente delle principali proprietà dei materiali 2D e dei metodi teorici e sperimentali di base, pur in presenza di imprecisioni espositive e limitata autonomia nell'applicazione dei concetti trattati.</li> <li>• <b>21-23:</b> conoscenza adeguata degli argomenti trattati; capacità di descrivere correttamente le principali classi di materiali 2D, i metodi di simulazione e le tecniche sperimentali introdotte durante il corso.</li> <li>• <b>24-26:</b> buona conoscenza dei contenuti dell'insegnamento e buona capacità di analisi e sintesi; uso corretto del formalismo teorico e adeguata capacità di collegare proprietà strutturali, elettroniche, vibrazionali e ottiche dei materiali 2D alle possibili applicazioni tecnologiche.</li> <li>• <b>27-29:</b> conoscenza completa e approfondita degli argomenti; buona autonomia nell'analisi critica delle proprietà fisiche dei materiali 2D, nell'interpretazione di risultati teorici e sperimentali e nella discussione delle principali applicazioni scientifiche e tecnologiche.</li> </ul> |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>30-30 e lode:</b> eccellente padronanza degli argomenti trattati, elevata capacità di rielaborazione critica e autonoma dei contenuti, esposizione rigorosa e utilizzo appropriato del linguaggio scientifico, con piena comprensione delle relazioni tra struttura, proprietà fisiche e applicazioni dei materiali bidimensionali.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| English | <p>The exam consists of an oral test aimed at assessing the knowledge and understanding of the main concepts related to the physics and chemistry of two-dimensional (2D) materials, with particular reference to the structural, electronic, vibrational, optical, and thermal properties of the main classes of 2D materials, as well as theoretical modeling methods and the main experimental techniques for growth and characterization.</p> <p>During the final examination, the following will be assessed:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• the ability to use the theoretical models introduced during the course to interpret the physical properties of 2D materials;</li> <li>• the ability to connect theoretical formalism, atomistic simulations, and physical interpretation of the studied phenomena;</li> <li>• understanding of the main experimental techniques used for the synthesis and characterization of two-dimensional materials;</li> <li>• the ability to critically discuss applications of 2D materials in electronics, optoelectronics, photonics, and energy;</li> <li>• independent judgment in analyzing material properties and theoretical and experimental results;</li> <li>• clarity of exposition and appropriate use of scientific language.</li> </ul> <p>Within the theoretical part of the course, students will also be assigned in advance an individual or group project focused on the study of a specific two-dimensional material. The project will involve performing and analyzing theoretical simulations related to the properties of the studied material. The obtained results must be discussed in an oral presentation supported by PowerPoint slides, aimed at evaluating the student's ability to critically analyze results, interpret their physical and chemical meaning, and communicate them clearly and effectively.</p> <p>To pass the exam, a minimum grade of 18/30 is required.</p> <p>The evaluation will be carried out according to the following criteria:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Not sufficient (non-idoneo):</b> insufficient knowledge of the fundamental topics of the course and limited ability to interpret the physical and chemical properties of 2D materials and the corresponding theoretical and experimental models.</li> <li>• <b>18–20:</b> basic knowledge of the course contents; sufficient understanding of the main properties of 2D materials and of basic theoretical and experimental methods, although with presentation inaccuracies and limited autonomy in applying the concepts.</li> <li>• <b>21–23:</b> adequate knowledge of the topics covered; ability to correctly describe the main classes of 2D materials, simulation methods, and experimental techniques introduced during the course.</li> <li>• <b>24–26:</b> good knowledge of the course content and good analytical skills; correct use of theoretical formalism and adequate ability to relate structural, electronic, vibrational, and optical properties of 2D materials to possible technological applications.</li> </ul> |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>27–29:</b> comprehensive and in-depth knowledge of the topics; good autonomy in critically analyzing the physical properties of 2D materials, interpreting theoretical and experimental results, and discussing major scientific and technological applications.</li><li>• <b>30–30 with honors (cum laude):</b> excellent mastery of the topics, high ability for critical and independent elaboration of content, rigorous exposition, and appropriate use of scientific language, with full understanding of the relationships between structure, physical properties, and applications of two-dimensional materials.</li></ul> |
|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|