

Master 1 “Physique et Applications” option physique théorique *Master 1 “Physics and Applications” option Theoretical Physics*

Description des cours / Syllabus of courses 2023-2024

Master 1: Semestre 1 / semester 1:

Mécanique quantique I / Quantum mechanics I

Cours / course : 15 h in English, TD / exercise lecture: 15 h in English, 3 ECTS

Enseignant de cours / Professor: Christophe Oguey

<https://oguey.u-cergy.fr/enseignement/>

Ondes, particules, quanta. Principes de la mécanique quantique. Oscillateur harmonique. Relations de commutation, incertitude. Evolution temporelle, symétries.

Waves, particles, quanta. Principles of quantum mechanics. Harmonic oscillator. Commutation relations, uncertainty. Time evolution, symmetries.

Références / References:

- C Cohen-Tannoudji, B Diu, F Laloë, *Mécanique quantique*, tomes I et II, Hermann 1988-1992
- JL Basdevant & J Dalibard, *Mécanique quantique*, Ec. Polytechnique 2006-2009
- C Cohen-Tannoudji, B Diu, F Laloë, *Quantum Mechanics*, vols I & II, Wiley–Hermann 1998
- JL Basdevant, J Dalibard, *The quantum mechanics solver : how to apply quantum theory to modern physics*, Springer 2006
- D Griffiths, *Introduction to Quantum Mechanics 3d Ed*, Cambridge UP 2018

Mécanique quantique II : Physique atomique et moléculaire / Quantum mechanics II Molecular atomic physics

Cours / course: 15 h in English, TD / exercise lecture: 15 h in English, 3 ECTS

Enseignant de cours / Professor: Christophe Oguey

<https://oguey.u-cergy.fr/enseignement/>

Rotations et moment cinétique. Forces centrales. Atome d’hydrogène. Méthode approximatives : perturbations et variations. Spin, résonance magnétique. Matrice de densité, intrication

Rotations and angular momentum. Central forces. Hydrogen atom. Approximate methods: perturbations and variations. Spin, magnetic resonance. Density matrix, entanglement.

Références / References:

- C Cohen-Tannoudji, B Diu, F Laloë, *Mécanique quantique*, tomes I et II, Hermann 1988-1992
- JL Basdevant & J Dalibard, *Mécanique quantique*, Ec. Polytechnique 2006-2009
- C Cohen-Tannoudji, B Diu, F Laloë, *Quantum Mechanics*, vols I & II, Wiley–Hermann 1998
- JL Basdevant, J Dalibard, *The quantum mechanics solver : how to apply quantum theory to modern physics*, Springer 2006
- Griffiths, *Introduction to quantum mechanics 3d Ed*, Cambridge UP 2018
- Messiah, *Quantum mechanics*,

Matière condensée I / *Condensed Matter I*

Cours / *course*: 15 h in English, TD / *exercise lecture*: 15 h in English, 3 ECTS

Enseignant de cours / Professor: Guy Trambly de Laissardière

Introduction cristallographie, réseau de Bravais et réciproque, diffraction. Électrons libres et leurs propriétés physiques. Électrons dans un potentiel périodique : propriétés générale (théorème de Bloch), électrons presque libres, méthode des liaisons fortes.

Free electrons and their physical properties. Crystal lattices, reciprocal lattice, crystal structures & diffraction, classification of Bravais lattices. Electrons in a periodic potential: general properties (Bloch theorem), weak periodic potential, the tight-binding method (LCAO).

Références / *References*:

- Solid State Physics, Ashcroft-Mermin,
- Introduction to Solid State Physics, 8th edition Charles Kittel, Wiley.

Mathématiques appliqués / *Applied Mathematics*

Cours / *course*: 15 h in English, TD / *exercise lecture*: 15 h in English, 3 ECTS

Enseignant de cours / Professor: Philippe Lecheminant

Équations différentielles ordinaires. Techniques standard de résolution des équations différentielles du premier ordre. Étude des équations différentielles linéaires du deuxième ordre : résultats généraux, méthode de Frobenius et ses applications en physique. Introduction aux équations aux dérivées partielles en physique.

Ordinary differential equations. Standard techniques for solving first-order ordinary differential equations. Linear second-order differential equations: general results and Frobenius's approach and its implications to Physics. Introduction to partial differential equations in Physics.

Programmation / *Programming course*

Cours / *course* : 5 h in English, TP / *Practice*: 10 h in English, 2 ECTS

Enseignant de cours / Professor: Alessandro Torcini

Introduction au Python : premiers concepts, variables, opérateurs mathématiques, boucles, opérateurs de comparaison, booléens variables et opérateurs, structures conditionnelles, fonctions, listes, utilisation des bibliothèques en Python, interfaces graphiques. Générateurs de nombres aléatoires. Loi de Bernoulli, Distribution binomiale, moyenne et variance en statistiques, théorème de la limite centrale, distribution gaussienne.

Introduction to Python: first concepts, variables, mathematical operator, loops, comparison operators, boolean variables and operators, conditional structures, functions, lists, utilization of libraries in Python, graphical interfaces. Random number generators. Introduction to statistics and probability distributions: Bernoulli law, Binomial distribution, average and variance in statistics, central limit theorem, Gaussian distribution.

Monte Carlo

Cours / *course*: 15 h in English, TD / *exercise lecture*: 15 h in English, 3 ECTS

Enseignant de cours / Professor: Alessandro Torcini

Les méthodes de Monte Carlo sont utilisées dans de nombreux domaines scientifiques: mathématiques appliquées, physique, biologie, chimie. L'objectif du cours est d'acquérir les fondamentaux communs à toutes ces applications (justification, principes, implémentation numérique). La méthode est illustrée à travers divers exemples qui sont développés au cours de séances pratiques en employant le langage de programmation Python. En particulier : méthodes d'intégration de Monte carlo (Hit and Miss et Uniform Sampling); génération de nombres aléatoire non-uniformes (échantillonnage d'importance et méthodes de chaînes de Markov) ; Algorithme de Metropolis ; applications à la mécanique statistique (ensemble canonique) ; modèle d'Ising en 2 dimension (transition de phase, magnétisation, susceptibilité) ; Alliages binaires (trempe et croissance).

Monte Carlo methods are used in numerous scientific fields: applied mathematics, physics, biology, economy. The objective of the course is to acquire the fundamentals that are common to all Monte Carlo applications (justification, principles, numerical implementation). The method is illustrated through various examples that are developed during practical sessions by employing the programming language Python. In particular, we have considered: Monte Carlo Integration methods (Hit and

Miss and Uniform Sampling); generation of non-uniform random numbers (importance sampling and Markov chains methods); Metropolis algorithm; application to statistical mechanics (Canonical ensemble); Ising model in 2 dimensions (phase transition, magnetization, susceptibility); Binary Alloys (quenching and coarsening).

Travaux pratiques expérimentaux I / Labs I

3 ECTS, en français

Enseignants de cours / Professor: Christine Richter and Olivier Heckmann

Quatre séances de travaux pratiques de 4 heures chacune : Études de cristaux par les rayons X, Effet Hall dans les semi-conducteurs et dans les métaux, Effet Zeeman, Laser Nd-YAG pompé par diode laser.

Four Lab sessions of 4 hours each: X-ray studies of crystals, The Hall effect in metals and semiconductors, Zeeman effect, Nd-YAG laser: optical pumping by laser diode.

Options en physiques théoriques / Theoretical physics options:

Introduction aux symétries / Introduction to symmetries

Cours / course: 20 h in English, TD / exercise lecture: 20 h in English, 4 ECTS

Enseignant de cours / Professor: Geneviève Rollet

Ce cours initie les étudiants à la question des symétries en physique. Une introduction présente leur diversité dans l'univers physique ; elles peuvent être tant géométriques qu'agir sur des degrés de liberté internes -et parfois cachés- de la matière ; elles peuvent être régies par des paramètres continus ou discrets ; ni le temps ni l'espace ne leur échappe. La transformation de Lorentz est obtenue à partir d'hypothèses de seules symétries, montrant ainsi qu'il ne s'agit nullement d'outils qui ne seraient que descriptifs. Les premiers éléments de la théorie des groupes, sont abordés avec toute la rigueur mathématique que cela demande. Le groupe des permutations S_n et des groupes d'isométries en dimension 2 et 3 (O_n , SO_n , et leursendants complexes U_n et SU_n) sont étudiés comme applications.

This course introduces students to the question of symmetries in physics. An introduction presents their diversity in the physical universe; they can be both geometric and act on the internal - and sometimes hidden - degrees of freedom of the physical system; they can be governed by continuous or discrete parameters; neither time nor space escapes them. The Lorentz transformation is obtained from assumptions of only symmetries, thus showing that it is by no means a question of tools which would only be descriptive. The first elements of group theory are approached with all the mathematical rigor that this requires. The group of permutations S_n and the groups of isometries in dimension 2 and 3 (O_n , SO_n , and their complex counterparts U_n and SU_n) are studied as applications.

Pedagogical pre-requisites:

- Linear and bilinear algebra in finite dimension for real and complex vector spaces.
- Some familiarity with physics (classical mechanics, electromagnetism, special relativity) is a plus.

Mécanique statistique / Statistical Mechanics

Cours / course: 20 h in English, TD / exercise lecture: 20 h in English, 4 ECTS

Enseignant de cours / Professor: Fernando Peruani

Système isolé : ensemble Microcanonique. Système en équilibre après réservoir : canonique et grand canonique. Statistiques Fermi-Dirac et Bose-Einstein. Principe d'équivalence et limite thermodynamique, équation maîtresse. Irréversibilité.

The isolated system in equilibrium: microcanonical ensemble. System in equilibrium with a thermostat: The canonical ensemble. System in equilibrium with a thermostat and with a particle reservoir: The grand canonical ensemble. The equivalence of ensembles in the thermodynamic limit. The Quantum ideal gas: Fermi-Dirac and Bose-Einstein statistics. Evolution to equilibrium. Irreversibility.

Références / References:

- *Thermal Physics*. C. Kittel
- *Fundamentals of Statistical Physics and Thermodynamics*. Reif
- *Introduction to Modern Statistical Mechanics*. David Chandler
- *An introduction to Statistical Thermodynamics*. T.Hill

- *Physique Statistique. Diu, Guthmann, Lederer, Roulet (in French)*

**Français (pour non francophone) ou communication scientifique en anglais (pour francophone) /
*French language (FLE-CILFAC) or Scientific Communication in English***

2 ECTS or 6 ECTS

Master 1: Semestre 2 / *semester 2:***Electrodynamique / *Electrodynamic***

Cours / *course*: 15 h in English, TD / *exercise lecture*: 15 h in English, 3 ECTS

Enseignant de cours / Professor: Dmitry Kovrizhin

Rayonnement : potentiels retardés; potentiels créés par une distribution de charges ponctuelles; approximations: dipolaire, non-relativiste, zone de rayonnement; dipôle oscillant.

Milieux diélectriques : polarisation; milieux linéaires, susceptibilité électrique; propagation dans les milieux diélectriques, indice optique, lois de Snell-Descartes.

Milieux magnétiques : magnétisation; milieux linéaires, susceptibilité magnétique.

Radiation: retarded potentials; potentials produced by a discrete point charge distribution; approximations: dipole, non relativistic, radiation area; oscillating dipole.

Dielectric media: polarization; linear media, electric susceptibility; propagation in dielectric media, refractive index, Snell-Descartes laws.

Magnetic media: magnetization; linear media, magnetic susceptibility.

Matière condensée II / *Condensed Matter II*

Cours / *course*: 15 h in English, TD / *exercise lecture*: 15 h in English, 3 ECTS

Enseignant de cours / Professor: Andreas Honecker

Phonons: Classical Theory, harmonic approximation, specific heat: law of Dulong-Petit, normal modes of a 1D lattice.

Quantum Theory, general form of lattice specific heat, high-temperature specific heat, low-temperature specific heat, density of normal modes

Magnetism: Diamagnetism and Paramagnetism, magnetisation and susceptibility, atomic susceptibility: General formulation, Larmor diamagnetism, insulators with partially filled shells: paramagnetism, magnetization of atoms with angular momentum J : Hund's rules, Landé g factor, Curie's law. Electronic interactions and magnetic structure, magnetic dipolar interaction energies, two-electron system: singlet- and triplet states, direct exchange, superexchange, and the Heisenberg model. Magnetic ordering, ground-state of Heisenberg ferromagnet and antiferromagnet, spin waves in a Heisenberg ferromagnet.

Superconductivity: zero resistivity, Meissner-Ochsenfeld effect, perfect diamagnetism, critical field and critical current, type I and II superconductivity, London equation, macroscopic coherent state, Cooper pairs, Josephson effect, SQUID

Références / *References*:

- Neil W. Ashcroft and N. David Mermin, "Solid State Physics",

<https://www.scribd.com/document/356390063/Solid-State-Physics-Neil-W-Ashcroft-N-David-Mermin-pdf>

- Stephen Blundell, "Magnetism in Condensed Matter",

<http://global.oup.com/academic/product/magnetism-in-condensed-matter-9780198505914?cc=fr&lang=en>

- James F. Annett, "Superconductivity, Superfluids and Condensates",

<https://global.oup.com/academic/product/superconductivity-superfluids-and-condensates-9780198507567?cc=fr&lang=en>

Modélisation numérique en physique / *Computational Physics*

Cours / *course* : 12 h in English, TD / *exercise lecture*: 18 h in English, 3 ECTS

Enseignant de cours / Professor: Félix Rose

Objectif : Résolution de problèmes physiques à l'aide d'outils numériques.

L'évaluation du cours passe par deux projets suivis d'une soutenance orale. Les CM donnent les outils théoriques pour pouvoir les réaliser, qui sont mis en oeuvre dans les TD.

- Projet 1 : dynamique moléculaire (équations différentielles ordinaires). Algorithme de Verlet, conditions aux limites, conservation de l'énergie, propriétés thermodynamiques.

- Projet 2 : éq. de Schrödinger dépendante du temps (équations aux dérivées partielles). Éq. de la chaleur ; stabilité, schémas explicites, implicite, conditions aux bords. Conservation de la probabilité.

Objective: Solving physical problems using numerical tools.

The course assessment consists of two projects followed by an oral presentation. The lectures provide the theoretical tools necessary for their completion, which are then applied in practical sessions.

- *Project 1: Molecular Dynamics (ordinary differential equations). Verlet algorithm, boundary conditions, energy conservation, thermodynamic properties.*
- *Project 2: Time-dependent Schrödinger equation (partial differential equations). Heat equation; stability, explicit and implicit schemes, boundary conditions. Probability conservation.*

Références / *References:*

- *W Press, SA Teukolsky, WT Vetterling, BP Flannery: Numerical recipes: the art of scientific computing 3d ed. (Cambridge UP 2007)*
- *R Landau, M Paez, C Bordeianu, Computational physics: problem solving with computers 3d ed. (Wiley 2015)*

Options en physiques théoriques / theoretical options:

Transition de phase / Phase transition

Cours / *course* : 15 h in English, TD / *exercise lecture*: 15 h in English, 3 ECTS

Enseignant de cours / Professor: Laura Hernandez

Equilibrium states and phases, conditions of equilibrium and stability. General properties of phase transitions: Classification of phase transitions, order parameter, Gibbs' rule, Maxwell construction, Meta-stability, Critical points, Beyond the order parameter, Fluctuation-dissipation theorem. Mean Field Theory: Weiss approach, Variational approach, Landau's approach, critical point exponents. Scaling law hypothesis. Introduction to Renormalization Group.

Références / *References:*

- *Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena. H.E. Stanley, Clarendon, Press, Oxford (1971)*
- *Statistical Mechanics of Phase Transitions. J.M. Yeomans, Oxford Science, Publications, (1992)*
- *Theory of Critical Phenomena. D.I. Uzunov, World Scientific (1993)*

Mécanique quantique III / Quantum mechanics III

Cours / *course* : 20 h in English, TD / *exercise lecture*: 20 h in English, 4 ECTS

Enseignant de cours / Professor: Andreas Honecker

Time-independent perturbation theory. Stark effect. Fine structure. Spin-orbit coupling. Zeeman effect. Addition of angular momenta. Clebsch-Gordan coefficients. Variational methods. Variational principle. Ground state of the Helium atom. The hydrogen molecule ion. Identical particles. Symmetrization postulate. Two-electron systems. Time-dependent perturbation theory. Periodic perturbation. Interaction picture and Dyson series. Rabi oscillations. Interaction matter-radiation. Einstein's A and B coefficients. Fermi's golden rule.

Références / *References:*

- *Introduction to quantum mechanics, Griffiths*
- *Modern quantum mechanics, Sakurai*
- *Principles of quantum mechanics, Shankar*
- *Quantum mechanics, Messiah*

Mathématiques II / Mathematics II

Cours / *course* : 20 h in English, TD / *exercise lecture*: 20 h in English, 4 ECTS

Enseignant de cours / Professor: Geneviève Rollet

Ce cours initie les étudiants aux questions qui se posent pour étendre hors des espaces euclidiens des notions comme celles de vecteurs (vitesse), de calcul différentiel, de géodésiques ..., si fondamentales pour exprimer ne serait-ce que les lois de la Physique et bien sûr ensuite les utiliser. Les outils mathématiques sont introduits pour un public d'étudiants en physique, nombre (détails) qui pour eux seraient vus comme techniques et inabordables sont laissés de côté. Les étudiants auront tous les outils pour aborder un cours de relativité générale ou commencer à étudier les théories de jauge (par exemple théorie de Yang-Mills).

This course introduces students to the questions that arise to extend beyond Euclidean spaces notions such as those of vectors (velocity), differential calculus, geodesics, etc., so fundamental even to formulate the laws of Physics and then use them. Mathematical tools are introduced for an audience of physics students, (details) which for them would be seen as technical and

unaffordable are left aside. Students will have all the tools to tackle a general relativity course or start studying gauge theories (e.g. Yang-Mills theory).

Prérequis / Pedagogical pre-requisites:

- *Linear and bilinear algebra in finite dimension for real and complex vector spaces.*
- *Basic knowledge in ODEs and PDEs.*

Optional courses or tutorial project: (2 x 3 ECTS):

Relativité générale / *General relativity*

Cours / *course* : 15 h en français, TD / *exercise lecture*: 15 h in English, 3 ECTS

Enseignant de cours / Professor: Stefano Scopa

Special Relativity, Lorentz transformations, Minkowski space, velocities and proper time, dynamics, electromagnetism, tensorial formulation.

Gravitation and equivalence principle, extending the relativity principle to any frame, Mach's principle, equivalence principle, geodesics: the free particle's trajectories, proper time, proper length.

Gravitational field and Einstein's equations in the vacuum, covariant Maxwell's equations, Schwarzschild's solution, Schwarzschild's geodesics, advance of the perihelion of Mercury, deflection of light Schwarzschild's black holes.

Gravitational field and matter, Einstein's equations in matter, weak field limit: linearized equations, Newtonian limit, gravitational waves, Schwarzschild's metric in matter, cosmological models, Lagrangian formulation.

Références / *References*:

- *Essential Relativity, Special, General, and Cosmological, W. Rindler*

Information quantique / *Quantum information*

Cours / *course* : 15 h en français, TD / *exercise lecture*: 15 h in English, 3 ECTS

Enseignant de cours / Professor: Quentin Duprey

Information Classique, introduction machine de Turing, problème P=NP, code correcteur d'erreur, code de compression, entropie d'information.

Le Qbit, intrication, portes logiques quantiques, non clonage, téléportation, Protocole BB84, décomposition de Schmidt et purification d'état quantique, Algorithmes de Grover et Deutsch.

Formalisme opérateur densité, opérateur densité et propriétés, matrice densité d'un qbit et sphère de Bloch, Représentation de Krauss, mesure généralisée (POVM), entropie de Shannon, code de compression

Décohérence, modèle de la décohérence, application à la propagation d'un mélange statistique dans un canal (changement de phase, d'amplitude, phase-flip, bit-flip), dynamique markovienne.

Classical information, Turing machine introduction, P=NP problem, error-correcting code, compression code, information entropy.

The Qbit, entanglement, quantum logic gates, non-cloning, teleportation, BB84 protocol, Schmidt decomposition and quantum state purification, Grover and Deutsch Algorithms.

Density operator formalism, density operator and properties, qbit density matrix and Bloch sphere, Krauss representation, generalized measure (POVM), Shannon entropy, compression code.

Decoherence, decoherence model, application to the propagation of a statistical mixture in a channel (phase change, amplitude change, phase-flip, bit-flip), Markov dynamics.

Noyaux et particules / *Nuclei and particles*

Cours / *course*: 15 h en français, TD / *exercise lecture*: 15 h en français, 3 ECTS

Enseignant de cours / Professor: Félix Rose

Le cours offre une introduction élémentaire à la physique nucléaire et la physique des particules.

Sont discutés :

- La découverte des constituants atomiques (électron, nucléons, photons) dans une approche historique, en commentant les expériences : Thompson, Rutherford, Chadwick.
- Énergie de liaison des nucléides : modèle phénoménologique, courbe d'Aston. Radioactivités alpha, beta, temps de vie. Neutrinos.
- Relativité restreinte : changement de référentiel, collisions élastiques et inélastiques et conservation de la quadri-impulsion.
- Théorie classique de la diffusion. Section efficace totale et différentielle. Sphères dures, diffusion de Rutherford.
- Introduction aux particules élémentaires et diagrammes de Feynman (lois de conservation).

The course provides an elementary introduction to nuclear physics and particle physics.

Topics covered include:

- *The discovery of atomic constituents (electron, nucleons, photons) in a historical approach, commenting on experiments: Thompson, Rutherford, Chadwick.*
- *Binding energy of nuclides: phenomenological model, Aston curve. Alpha and beta radioactivities, lifetimes. Neutrinos.*
- *Special relativity: change of reference frame, elastic and inelastic collisions and conservation of four-momentum.*
- *Classical theory of scattering. Total and differential cross-section. Hard spheres, Rutherford scattering.*
- *Introduction to elementary particles and Feynman diagrams (conservation laws).*