



M1 Physique Fondamentale et Applications 2026 - 2027

Syllabus des UEs

Semestre 1

Physique Quantique I et II

ECTS : 6

Responsable : Christophe Mora

Volume horaire : 30h cours + 28,5h TD

Prérequis : Physique Quantique 1 L3

Programme :

- Rappels : équation de Schrödinger, oscillateur harmonique
- Théorie des perturbations statiques
- Théorie des perturbations dépendantes du temps
- Moment cinétique et potentiel central
- Atome d'hydrogène et structure des niveaux atomiques
- Particules identiques
- Addition des moments cinétiques
- Symétries en physique quantique
- Approche WKB
- Phase de Berry

Ouvrages de référence : R. Shankar, "Principles of Quantum Mechanics" ;

David Tong's Lectures on Quantum Mechanics and Lectures on Topics in Quantum Mechanics, <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/teaching.html>

Physique Quantique I

ECTS : 3

Responsable : Christophe Mora

Volume horaire : 16,5h cours + 15h TD

Prérequis : Physique Quantique 1 L3

Programme :

- Rappels : équation de Schrödinger, oscillateur harmonique
- Théorie des perturbations statiques
- Théorie des perturbations dépendantes du temps
- Moment cinétique et potentiel central

Ouvrages de référence : R. Shankar, "Principles of Quantum Mechanics" ;

David Tong's Lectures on Quantum Mechanics and Lectures on Topics in Quantum Mechanics, <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/teaching.html>



Physique Statistique

ECTS : 6

Responsable : Paolo Galatola

Volume horaire : 30h cours + 28,5h TD

Prérequis : Physique Statistique L3, Physique Quantique 1 L3

Programme :

I ENSEMBLE MICROCANONIQUE QUANTIQUE

- . Rappels de mécanique quantique
- . Formalisme statistique quantique, opérateur densité, stationnarité, entropie.
- . Opérateur densité microcanonique. Entropie. Entropie partielle. Lien avec la thermodynamique.

II ENSEMBLE CANONIQUE QUANTIQUE

- . Ensemble canonique quantique.
- . Opérateur densité canonique.
- . Entropie. Fonction de partition. Fonction de partition partielle. Systèmes indépendants.
- . Lien avec la thermodynamique.
- . Applications : rappel gaz quantique dans l'approximation de Maxwell-Boltzmann.

III ENSEMBLE GRAND CANONIQUE

- . Ensemble grand-canonique.
- . Distribution grand-canonique, fonction de partition, grand potentiel, lien avec la thermodynamique, systèmes indépendants, équivalence des ensembles, potentiel chimique.
- . Fluide idéal de Fermions, limite haute T, limite basse T.
Applications : métaux, isolants, semi-conducteurs intrinsèques, naines blanches, paramagnétisme de Pauli.
- . Fluide idéal de bosons, condensation de Bose-Einstein, réalisations physiques.
- . Gaz de photons, rayonnement du corps noir.

IV INTRODUCTIONS AUX TRANSITIONS DE PHASES

- . Modèle d'Ising à 1D. Champ moyen. Modèle d'Ising à 2D. Exposants critiques.

Ouvrages de référence :

- David Chandler, An introduction to modern statistical mechanics, Cambridge UP
- Luca Peliti, Statistical mechanics in a nutshell, Princeton UP, 2011.
- Mehran Kardar, Statistical physics of particles, Cambridge UP, 2007.
- N. Sator et N. Pavloff, Physique statistique, Vuibert, 2016.
- C. Kittel, Elementary statistical physics, John Wiley & Sons, 1958.
- Herbert B. Callen, Thermodynamics and an introduction to thermostatistics, John Wiley & Sons, 1985.



Physique Statistique et Thermodynamique

ECTS : 6

Responsable : Myriam Reffay

Volume horaire : 30h de cours + 28,5h TD

Prérequis : Thermodynamique L2

Programme :

I INTRODUCTION A LA PHYSIQUE STATISTIQUE

- Du microscopique au macroscopique
- Nécessité de l'approche statistique
- Ensembles statistiques

II L'ENTROPIE STATISTIQUE

- Entropie et théorie de l'information
- Postulat de la physique statistique
- Retour vers la thermodynamique

III DISTRIBUTIONS CANONIQUES

- Systèmes en contact avec un thermostat
- Les principes de la thermodynamique
- Ensemble T-P
- Ensemble grand-canonique
- Équivalences

IV GAZ ET FLUIDES CLASSIQUES

- Le gaz parfait
- Equipartition de l'énergie
- Interactions : gaz réel

V TRANSITION DE PHASE

- Description
- Fluides de van der Waals
- Percolation
- Dynamique des transitions

VI MOUVEMENT BROWNIEN

Ouvrages de référence :

- Physique Statistique. B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, B. Roulet. Editions Hermann.
- Physique statistique. C. Ngô, H.Ngô, Editions Dunod.
- La mécanique statistique : de Clausius à Gibbs. A. Barberousse Editions Belin
- Du microscopique au macroscopique. R. Balian, Cours de l'école polytechnique.
- Physique Statistique. N. Sator, N. Pavloff, Editions Vuibert.
- Thermodynamique. B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, B. Roulet. Editions Hermann.
- Thermodynamics and an introduction to thermostatistics. H.B. Callen. Editions John Wiley et Sons



Physique Numérique

ECTS : 6

Responsable : Raphaël Raynaud

Volume horaire : CTD 18h + TP (projet) 36h

Prérequis : Physique numérique L3 (programmation en python, utilisation de la librairie numpy)

Programme :

Cours-TD

- Rappels de Python et Numpy. Utilisation avancée de Numpy (tranchage, sélection des éléments de vecteurs, définition de nouveaux types de vecteurs).
- Résolution numérique d'équations différentielles aux dérivées partielles.
- Équations aux valeurs propres.
- Méthodes Monte Carlo.
- Utilisation de la librairie scientifique Scipy.
- Introduction à la programmation C. Comparaison entre les langages dynamiques (python) et statiques (C). Types de variables, classes de mémoire. Flux de contrôle. Pointeurs. Structures. Bibliothèques standards. Compilation et création de bibliothèques dynamiques. Appel de fonctions C dans python.

TP

Chaque étudiant devra choisir un projet de physique numérique parmi un choix de sujets proposé par l'équipe enseignante. Le projet devra être effectué en Python, en faisant éventuellement appel à des fonctions C.

Ouvrages de référence : Le langage C – deuxième édition – Norme ANSI, Brian W. Kernighan et Dennis Ritchie (Dunod, 2014) + sources et exercices donnés en CTD



Hydrodynamique et Fluides Complexes

ECTS : 6

Responsable : Sylvie Hénon

Volume horaire : 18h cours + 18h TD + 20h TP

Prérequis : cours de mécanique des fluides en L3 ou équivalent

Programme :

Cours et TD

- Introduction et rappels de cinématique des fluides
- Dynamique des fluides visqueux – Équation de Navier-Stokes
- Écoulements parallèles et quasi-parallèles
- Écoulements à faible nombre de Reynolds
- Écoulements à grand nombre de Reynolds : couches limites
- Écoulements de fluides complexes

TP

- Régimes d'écoulement autour d'un obstacle
- Écoulement de Poiseuille dans un film de savon
- Viscosimètre - Milieux poreux
- Force de Stokes dans un fluide visqueux

Ouvrage de référence : Guyon, Hulin, Petit, *Hydrodynamique Physique*



Matière Condensée

ECTS : 6

Responsable : Philippe Lafarge

Volume horaire : 18h cours + 18h TD + 8h TP

Prérequis : Cours de Physique quantique de L3 ou équivalents.

Programme :

Cours et TD :

- Structure des cristaux parfaits : Structures atomiques périodiques et réseaux de Bravais, techniques de diffraction, conditions de Bragg et équations de Laue, réseau réciproque et zones de Brillouin.
- Dynamique des atomes dans les cristaux et propriétés thermiques : Vibrations du réseau, approximation harmonique, théorie classique et modes normaux, quantification des vibrations (phonons), densité d'états. Propriétés thermiques : chaleur spécifique, modèle de Debye, conductivité thermique.
- Etats électroniques dans les solides : Gaz quantiques, modèles à électrons libres, conductivités thermique et électronique, électrons dans un potentiel périodique et théorème de Bloch, bandes d'énergie, modèle à liaisons fortes, classification des solides cristallins : conducteurs, isolants et semi-conducteurs.
- Conducteurs : Densité d'états électroniques et surfaces de Fermi, modèle semi-classique du transport et orbites, électrons sous un champ magnétique uniforme : niveaux de Landau et oscillations de Haas-van Alphen.
- Semi-conducteurs : Bande de valence et bande de conduction, électrons et trous, propriétés de transport, propriétés optiques, dopage.
- Isolants : Diélectriques, ferro-électriques
- Magnétisme dans les solides : Diamagnétisme et paramagnétisme, lois de Hund, ordre ferromagnétique et antiferromagnétique, température de Curie et de Néel, ondes de spin et magnons, domaines magnétiques
- Superfluidité et supraconductivité : Condensat de Bose-Einstein et superfluidité, effet Josephson, interaction attractive et instabilité d'un gaz d'électrons libres, paires de Cooper

TP :

Absorption optique dans les semi-conducteurs

Introduction à la diffraction de la matière

Effet Hall dans les matériaux semiconducteurs

Magnétisme de la matière condensée

Spectroscopie Infrarouge des phonons

Conductivité électrique d'un matériau

Ouvrages de référence : C. Kittel, Introduction to solid state physics.
N. W. Ashcroft and D. Mermin, Solid State Physics.



Physique Subatomique

ECTS : 6

Responsable : José Ocariz

Volume horaire : 18h cours + 18h TD + 8 h TP

Prérequis : Introduction à la mécanique quantique et à la relativité restreinte

Programme :

Introduction à la physique des particules élémentaires, la physique hadronique et la physique nucléaire.

Les cours, TD et TP sont étroitement coordonnés.

- Introduction. Panorama général. Unités de mesure.
- Rappels de cinématique relativiste. Illustrations : Désintégrations et réactions. Loi de désintégration et Breit-Wigner. Applications à la datation.
- Section efficace d'interaction. Diffusion élastique. Application à l'étude des noyaux.
- Interaction particules-matière et photon-matière, en relation avec les TP. Ces derniers développent un ensemble de techniques permettant de se familiariser avec les méthodes de mesure.
- Symétries et antimatière. Symétrie de saveur et modèle des quarks.
- Propriétés des noyaux, le modèle de la goutte liquide (Bethe-Weiszacker).
- La radioactivité.
- Applications : Réacteurs nucléaires. Fonctionnement des étoiles.
- Modèle Standard et questions ouvertes.

Ouvrage de référence : F. Terranova : A modern primer in Particle and Nuclear Physics (Oxford, 2022) [disponible à la BU, également en format électronique]



Mécanique des Milieux Continus

ECTS : 3

Responsable : Christophe Barrière

Volume horaire : 13,5h cours + 13,5h TD

Prérequis : Cours d'ondes et vibrations, cours de mécanique des fluides en L3, ou équivalent

Programme :

- Elasticité : tenseurs, déformation d'un solide élastique, contraintes, équations du champ
- Comportement linéaire d'un solide élastique : loi de Hooke, tenseur des rigidités, énergie élastique d'un solide déformé
- Propagation d'une onde élastique : anisotropie, équation de Christoffel, cas du solide isotrope, solide viscoélastique, non-linéarité
- Réflexion et réfraction aux interfaces : conditions aux limites, incidence normale, adaptation d'impédance, incidence oblique, lois de Snell-Descartes, coefficients de réflexion et de transmission
- Analogie formelle fluide/solide
- Solides mous, applications médicales des ondes élastiques

Ouvrage de référence :

Ondes élastiques dans les solides 1, D. Royer et T. Valier-Brasier, ISTE Editions, 2021



Physique Quantique Appliquée

ECTS : 3

Responsable : Valentin Cambier

Volume horaire : 9h cours + 12h TP

Prérequis :

Programme :

Cette UE est une introduction à la physique quantique expérimentale qui s'appuie sur deux montages expérimentaux : des sources de photons uniques et intriqués, des centres colorés dans le diamant.

Le premier montage vise à explorer les propriétés quantiques de la lumière générée par conversion paramétrique spontanée dans des cristaux non linéaires, en utilisant des technologies avancées comme des lasers et des détecteurs de photons uniques. Il permettra aux étudiants de se former à la construction de sources de photons simples et intriqués, à l'utilisation de techniques de comptage en coïncidence pour identifier des sources non classiques, à l'analyse de la polarisation des photons, ainsi qu'à la réalisation d'un test de Bell pour démontrer l'intrication quantique.

Le deuxième montage porte sur l'étude des spins atomiques basés sur les centres NV dans le diamant, une plateforme prometteuse pour l'information quantique à température ambiante. Les étudiants apprendront à manipuler et à détecter ces centres à l'aide de techniques optiques et micro-ondes, à préparer des états électroniques purs, à utiliser le système comme magnétomètre quantique, et à explorer les oscillations de Rabi pour la manipulation cohérente des états.



Chimie pour l'Agrégation

ECTS : 6

Responsable : Angie Attouche

Volume horaire : 12h cours + 12h TD

Prérequis : -

Programme :

Chapitre 1 : Nomenclature

Chapitre 2 : Représentations dans l'espace (Cram/Newman/Fischer)

Chapitre 3 : Configuration Electronique – VSEPR

Chapitre 4 : Stéréochimie

Chapitre 5 : Effets Electroniques

Chapitre 6 : SN / Eliminations (dérivés halogénés)

Chapitre 7 : Alcools

Chapitre 8 : Composés Aromatiques

Chapitre 9 : Alcènes – Alcynes

Chapitre 10 : Composés carbonylés



Semestre 2

Astrophysique

ECTS : 4,8

Responsable : Andrii Neronov

Volume horaire : Cours 18h + TD 18h

Prérequis : Idéalement Astrophysique de L3

Programme : Acquisition de connaissances spécifiques, tout en restant générales, permettant de couvrir le domaine de l'astrophysique :

1. Formation et évolution des galaxies, différents types, population stellaire, rétroaction, matière noire, galaxies actives, grands relevés, amas et superamas ;
2. Milieu interstellaire, extinction, phases moléculaire, atomique, ionisée, chimie moléculaire, nébuleuses, détection, raies d'émission, sphère de Strömgren ; interaction des rayons cosmiques Galactiques ;
3. Formation et évolution stellaire, structure interne, fusion thermonucléaire, diagramme HR, amas, théorème du Viriel, relation masse-luminosité et masse-rayon, métallicité et vents stellaires, systèmes multiples, lois de Kepler, formation d'objets compacts (naines blanches, étoiles à neutron, trous noirs), évolution vers la fusion et l'émission d'ondes gravitationnelles ;
4. Formation et évolution des systèmes planétaires, du système solaire (planètes / petits corps), et exoplanètes, modèles et observations, techniques de détection, structure interne et atmosphère, bilan énergétique d'une planète (énergie reçue, restituée, produite, rôle de l'atmosphère)

Description succincte des techniques utilisées dans le domaine de l'astrophysique :

1. Observations multi-longueur d'onde ;
2. Techniques d'observation : imagerie, spectroscopie, polarimétrie, interférométrie, sol, espace ;
3. Observations multi-messenger (photons, rayons cosmiques, neutrinos, ondes gravitationnelles) ;
4. Simulations numériques.

Ouvrages de référence :

An Introduction to Galaxies and Cosmology, D. J. Adams, Cambridge University Press (CUP), 2004

Stellar Evolution and Nucleosynthesis, Ryan & Norton, CUP, 2010

An Introduction to the Sun and Stars, J. Bell Burnell, CUP, 2015

An Introduction to the Solar System, Bland, Moore, Wright, Widdowson, CUP, 2004

Astronomie, Astrophysique, A. Acker, Dunod, 2013

Astronomie et Astrophysique, Séguin & Villeneuve, ed. De Boeck, 2009



Cosmologie

ECTS : 4,8

Responsable : Andrii Neronov

Volume horaire : Cours 18h + TD 18h

Prérequis : Nécessaire : Mécanique, Physique statistique, Relativité restreinte.

Préféré : Thermodynamique, Optique

Programme :

Cours :

I/ Aperçu de la composition, distribution et cinématique de l'univers et de ses composants (matière ordinaire, matière noire, énergie noire, galaxies, groupes, amas, expansion)

II/ Introduction basique à la Relativité Générale : liens et différences avec Newton

III.a/ Dynamique de l'univers homogène

III.b/La question des distances en cosmologie (distance comobile, distance angulaire, distance luminosité)

IV.a/ Dynamique des perturbations linéaires

IV.b/L'univers primordial (différentes ères, nucléosynthèse, fond diffus cosmologique, outils statistiques)

V.a/ Dynamique des perturbations non linéaires

V. b/Formation des grandes structures (halos de matière noire, refroidissement du gaz, galaxies, groupes et amas, simulations)

VI/ Retour vers les observations : la question des observables en cosmologie (propagation des messagers, oscillations baryoniques acoustiques, distribution des galaxies, effets de lentilles gravitationnelles, abondance des amas/groupes/galaxies, missions futures pour tester le modèle de concordance et au-delà)

TD : Mise en application de chaque partie du cours

Remarque : quelques programmes Python seront fournis pour ceux qui souhaitent approfondir chaque partie (pas d'obligation)

Ouvrage de référence :

Initiation à la cosmologie, Marc Lachièze-Rey

Cosmologie, des fondements théoriques aux observations, Francis Bernardeau



Dispositifs Semiconducteurs

ECTS : 4,8

Responsable : Marco Bomben

Volume horaire : 26h cours + 20h TD + 8h TP

Prérequis : Maths : développements limités, série de Fourier, calcul intégral et équations différentielles

Physique : électrostatique, électromagnétisme, bases des circuits électriques RCL ; physique du solide.

Programme :

Introduction générale et bases de physique des semi-conducteurs

Rappels de mécanique quantique de l'électron [RV §1.1-1.4]. Cristaux, fonction de Bloch, zone de Brillouin, bandes d'énergie, masse efficace, densité des états, notion de trou [RV §1.1-1.2].

Introduction au cours

Finalité et modalités de l'enseignement, présentation de l'équipe enseignante, description du programme.

Dopage et description statistique de l'équilibre thermique

Donneurs et accepteurs, équilibre thermique, loi d'action de masse, fonction de Fermi. Porteurs libres : vitesse de dérive et mobilité ; courant de diffusion et relation d'Einstein [MK §1.1-1.2].

Contacts métal-semiconducteur 1&2

Equilibre dans les systèmes d'électrons. Jonction idéale métal – semi-conducteur : diagramme de bandes ; charge, région de déplétion et capacité ; jonction polarisée, barrière Schottky. Caractéristiques courant-tension de la diode de Schottky : barrière Schottky et barrière Mott. Contacts ohmiques tunnel et Schottky, longueur de Debye. Effets des états de surface.

La jonction p-n /1&2

Distribution non-uniforme d'impuretés : potentiel, équation de Poisson, approximation de quasi-neutralité. La jonction p-n abrupte : approximation de déplétion, barrière de potentiel, longueur de Debye. Jonction p-n polarisée inversement : largeur de la zone déplétée, champ électrique maximum, capacité. Rupture de la jonction : effet Zener et rupture par avalanche. Le transistor à jonction à effet de champ. Courants dans les jonctions p-n : équation de continuité, génération et recombinaison, capture et émission par des états localisés, recombinaison SRH [MK §4.1-5.2].

La jonction p-n /3

Caractéristiques courant-tension des jonctions p-n : conditions de bord pour les densités des porteurs minoritaires, analyse de la diode idéale, courants dans la région de charge spatiale. Hétérojonctions. Stockage de charge et réponse transitoire de la diode [MK §5.4-5.4].

Le transistor bipolaire

Effet transistor. Fonctionnement en région active, gain de courant. Le transistor en régime de commutation. Régions de fonctionnement [MK §6.1-6.3].

Technologie des dispositifs semi-conducteurs

Le processus de fabrication planaire du silicium. Croissance cristalline, Oxydation thermique, Lithographie, Ajout et diffusion des porteurs, déposition chimique en phase vapeur, épitaxie, interconnexion et packaging. Le processus de fabrication planaire des III-V. Fabrication de



dispositifs intégrés : résistor, condensateur, diode, transistor JFET, transistor bipolaire [MK §2.1-2.8, 2.10, 3.6, 5.6, 6.5].

Les photons dans les semi-conducteurs

Hétérostructures et puits quantiques dans les dispositifs optoélectroniques [ST §17.1 F,G]. Interactions des photons avec les porteurs : transitions inter-bande, densité d'états joints ; absorption, émission et gain dans les semi-conducteurs massifs et avec confinement quantique. [ST §17.2 A-F].

Sources de photons semi-conductrices

Diodes électroluminescentes : électroluminescence à l'équilibre thermique et en présence d'injection de porteurs ; densité spectrale des photons. Caractéristique des LED : flux de photons intérieur ; flux de photons extérieur ; efficacité ; distribution spectrale. Amplificateurs laser à semi-conducteur : gain, bande [ST §18.1-2].

Lasers semi-conducteurs à injection

Amplification, rétroaction et oscillation. Pertes du résonateur, seuil laser. Puissance : flux interne de photons ; flux externe et efficacité ; comparaison entre une diode laser et une LED. Distributions spectrale et spatiale. Guide optique : sélection des modes transverses et longitudinaux. Laser à confinement quantique : Laser à QW (densité des états, coefficient de gain, densité de courant). Mention des lasers à cascade quantique et des lasers à microcavité et à nanocavité [ST §18.3-6].

Photo-détecteurs à semiconducteur

Propriétés des photo-détecteurs à semi-conducteur : rendement quantique, responsivité spectrale, temps de réponse ; photoconducteurs ; photodiodes : p-n, p-i-n et à hétérostructure ; photodiodes à avalanche : principe de fonctionnement, gain et responsivité spectrale, temps de réponse ; bruit dans les photo-détecteurs : bruit de grenaille, bruit de gain, bruit électrique ; sensibilité des récepteurs analogiques (SNR) et numériques (BER). [ST chapitre 19].

Ouvrages de référence :

- **RV** : E. Rosencher, B. Vinter, Optoelectronics, Cambridge University Press, 2002.
- **MK** : R. S. Muller, T. I. Kamins, Device Electronics for Integrated Circuits, 3rd ed., Wiley, 2002.
- **ST** : B. E. A. Saleh, M. C. Teich, Fundamentals of Photonics, 3rd ed., Wiley 2019.



Energie

ECTS : 4,8

Responsable : Yann Girard

Volume horaire : Cours 16h + TD 16h + TP 8h

Prérequis : Hydrodynamique, Thermodynamique, Électromagnétisme, Matière condensée, Subatomique, Physique numérique

Programme :

Préparation aux M2 pro/recherche relevant des énergies et du développement durable :

1. Problématiques des ressources, transformations, distribution et coût des énergies ;
2. Les ressources éoliennes et hydroliennes : gisement, rendement, technologies ;
3. Transferts thermiques : conduction, rayonnement, convection, transition de phase ;
4. L'énergie solaire : du photon à l'électron, solaire thermique et photovoltaïque ;
5. Fonctionnement générale des centrale thermiques et électriques : combustion fossile, du carbone à l'électron ; combustion nucléaire, du neutron à l'électron.
6. Mots clefs : puissance du vent, Distribution de Weibull, limite de Betz, rayonnement du corps noir, facteur de forme, capteur thermique, formule HWB, jonction PN, limite de SQ, énergie de liaison, modérateur, criticité.

Ouvrages de référence :

Renewable energy ressources (J. Twidell & T. Weir)

L'énergie durable (D. J. C. MacKay)



Information Quantique

ECTS : 4,8

Responsable : Florent Baboux

Volume horaire : 36h cours-TD

Prérequis : Physique Quantique (M1), Matière Condensée (M1), Optique ondulatoire et électromagnétisme dans les milieux (L3)

Programme :

Concepts de l'information quantique

- Qubits et portes logiques
- Matrice densité, décohérence
- Critères nécessaires de l'information quantique (DiVincenzo)
- Plateformes expérimentales (atomes, photons, supraconducteurs, boîtes quantiques...)

Corrélations quantiques et intrication

- États à plusieurs particules, intrication quantique
- Inégalités de Bell et non-localité
- Téléportation quantique
- Portes à deux qubits

Applications en information quantique

- Communication quantique, cryptographie
- Métrologie quantique
- Calcul quantique
- Simulation quantique

Ouvrage de référence :

LaPierre, *Introduction to Quantum Computing*, (Springer, 2021)

Nielsen & Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge, 2011)



Instabilités et Turbulences

ECTS : 4,8

Responsables : Michael Berhanu, Jean-Baptiste Gorce et Samuel Boury

Volume horaire : Cours 18h + TD 18h + TP 3h

Prérequis : Hydrodynamique de M1/S1 ou équivalent

Programme :

Le programme couvrira la physique des instabilités hydrodynamiques et une introduction à la turbulence, revisitée au travers de questions contemporaines : la physique de l'atmosphère, le climat, la production d'énergie.

Ouvrages de référence :

- Charru, François, « Instabilités hydrodynamiques », 2007, EDP Sciences / CNRS éditions.
- Davidson, P.A., "Turbulence, An introduction for Scientists and Engineers", 2nd édition, 2015, Oxford University Press.
- de Langre, Emmanuel, « Fluides et Solides », 2015, Editions de l'Ecole Polytechnique.



Interaction Lumière-Matière

ECTS : 4,8

Responsable : Sarah Houver

Volume horaire : Cours 18h + TD 18h

Prérequis : Matière Condensée (M1), Physique Quantique (M1), Optique ondulatoire et électromagnétisme dans les milieux (L3)

Programme :

Atomistique

- Atomes à 1 électron, équation de Schrödinger
- Théorie des perturbations et règle d'or de Fermi : bases de la spectroscopie
- Approximation dipolaire et règles de sélection

Lasers

- Modèles phénoménologiques (Lorentz, Einstein, intro historique)
- Aspects microscopiques : équations d'Einstein, émission spontanée / stimulée
- Dynamique des lasers (faisceaux gaussiens, modes de cavité, pompage, gain, pertes)
- Cohérence spatiale/temporelle (autocorrélation 1er ordre)
- Modes de fonctionnement d'un laser

Optique non linéaire

- Aspects microscopiques : interaction lumière-matière
- Milieux anisotropes (origines physiques des NL optiques)
- Equation de propagation non-linéaire
- Optique non linéaire d'ordre 2 (SHG, SFG et DFG, OR) et intro ordre 3
- Exemples d'expériences historiques et récentes

Emission, guidage et contrôle des photons

- Puit quantique / Boîte quantique, règles de sélection
- Confinement : Guides d'ondes / fibres / cristaux photoniques
- Couplage faible / Couplage fort
- Exemples d'expériences historiques et récentes

Ouvrages de référence :

- R. Boyd, Nonlinear Optics (Academic Press)
- Y. Shen, Principles of nonlinear optics (John Wiley)



Introduction à la Relativité Générale

ECTS : 4,8

Responsable : Jihad Mourad

Volume horaire : Cours 18h + TD 18h

Prérequis : « Relativité restreinte » en L3

Programme :

1. Notion d'espace-temps : rappel de Relativité restreinte, espace-temps de Minkowski
2. Gravitation et principe d'équivalence
3. Introduction à la géométrie différentielle
4. Équations d'Einstein.
5. Solutions à symétrie sphérique et tests classiques de la RG.
6. Applications en cosmologie et astrophysique.

Ouvrage de référence :



Matière Condensée Avancée

ECTS : 4,8

Responsable : Giuliano Orso

Volume horaire : 18h cours + 18h TD

Prérequis :

Programme :

1. L'électron objet quantique

1.1. Radiographie d'un électron

1.2. Dualité onde-corpuscule d'un électron par l'expérience

- expérience de R. Tolman et D. Stewart

- expérience de C. Davisson et L. Germer

2. Le gaz d'électrons par une approche corpusculaire à l'ordre zéro

2.1 Le modèle de Drude « original »

2.2 La conductivité électrique (vitesse, libre parcours moyen, temps de relaxation)

2.3 Les incohérences du modèle de Drude face aux mesures expérimentales

Calcul de probabilité, la conductivité thermique, loi de Wiedmann-Frantz, les succès du modèle

3. Le gaz d'électrons par une approche ondulatoire à l'ordre zéro

3.1 Le modèle de Sommerfeld

3.2 Le postulat de symétrisation et ses conséquences (principe d'exclusion de Pauli, trou de Pauli)

3.3 La conductivité de Drude retrouvée

3.4 Le paramagnétisme de Pauli

3.5 Le ferromagnétisme de Stoner

3.6 Le diamagnétisme de Landau (qu'est-ce que le diamagnétisme, les niveaux de Landau)

Développement de Sommerfeld, Chaleur spécifique, démontrer que sous champ, p devient $P+eA$, retrouver la conductivité de Drude à 3D avec le modèle de Sommerfeld montrer qu'il existe de types de diamagnétisme et de paramagnétisme (localisé versus itinérant)

4. L'effet Hall quantique entier

4.1 Les gaz bidimensionnels confinés

4.2 Les niveaux de Landau revisités

4.3 Les états de bords,

4.4 Les oscillations de Shubnikov-de Haas

4.5 La résistance de Hall quantifiée

5. Le transport quantique

5.1 L'équation de Landauer en régime balistique à 1 et 2 D

5.2 L'équation de Landauer en régime diffusif

Quelques applications : quantification de la conductance, transport dans un nanotube de carbone

6. Introduction à la supraconductivité



6.1 Découverte de la supraconductivité par l'équipe de K. Onnes et effet Meisner et Oschenfeld

6.2 une approche macroscopique : l'équation des frères London

6.3 une approche microscopique : la théorie BCS

7. Le gaz d'électrons en interaction

7.1 Le modèle de Hartree Fock

7.2 Courbe de dispersion des électrons vs celle d'un gaz libre

7.3 La fonction de Lindhard (utilisation des perturbation stationnaires et dépendante du temps)

- limite statique (écranage de Thomas Fermi, singularité de Khon)

- limite dynamique (oscillation plasma)

- susceptibilité électronique et ses instabilités

8. Les électrons presque libres (soumis à un potentiel périodique traité comme une perturbation)

8.1 Equation de la dynamique des électrons

8.2 Une équivalence au théorème de Bloch

8.3 La dynamique des électrons à l'approche de la première zone de Brillouin

8.4 Topologie de la surface de Fermi

Ouvrages de référence :

Yves Quéré, « Physique des Matériaux », Cours et problèmes, Edition Ellipses

H. Alloul , « Physique des électrons dans les solides » - édition Ellipses

A. Crépieux, « Introduction à la physique de la matière condensée », édition Dunod, 2019.

H. T. Diep , « Physique de la matière condensée », juin 2003, édition Sciences Sup

J. J. Benayoun et R. Mézard, "Physique de la matière condensée", Inter edition

S. Blundell « Magnetism in Condensed Matter » edition Oxford

C. Kittel, « Physique de l'état solide », 8e édition, Dunod.

N. W. Ashcroft, N. Mermin, "Solid State Physics", 1976, Saunders College, HRW, international editions

S. Datta, « Electronic Transport in Mesoscopic Systems », Cambridge University Press 1995.

S. M. Girvin, K. Yang, "Modern Condensed Matter" Physics 1st Edition Cambridge university press, 2019.



Systèmes complexes et matière active

ECTS : 4,8

Responsables : Sylvie Hénnon et Myriam Reffay

Volume horaire : Cours 18h + TD 18h + TP 4h

Prérequis :

- Niveau L3 en physique générale ou appliquée
- Thermodynamique, Optique, Electromagnétisme de base (niveau L)
- Physique statistique I (M1)

Programme :

Le programme contient deux parties en étroite interaction : matière molle et physique du vivant. En matière molle, il s'agit, en partant des interactions à l'échelle de la molécule et de la physique statistique, de comprendre les propriétés de fluides complexes tels que les suspensions, les cristaux liquides et les solutions de polymères. Ces notions sont utilisées directement en physique du vivant pour comprendre les propriétés physiques des systèmes biologiques de l'échelle de la molécule unique à celles de la cellule vivante et des tissus.

Une séance de travaux pratiques est consacrée à des mesures physiques sur des agrégats cellulaires.

Ouvrage de référence :

- Intermolecular and surface forces, J. Israelachvili,
- Liquides : solutions, dispersions, émulsions, gels, B. Cabane, S.Hénnon - Soft Condensed Matter, R. A. L. Jones.
- The Physics of Liquid Crystals, P.-G. de Gennes and J. Prost.
- Polymer Physics, by M. Rubinstein and R. H. Colby
- Physical Biology of the Cell, R. Phillips, J. Kondev, J. Theriot



Modélisation et Machine Learning

ECTS : 4,8

Responsable : Guillaume Rousseau

Volume horaire : 15h cours + 27h TP

Prérequis : programmation en Python ; usage de bibliothèques de calcul scientifique éléments d'algèbre linéaire.

Programme :

1. Introduction générale sur le “machine learning” suivi d'un panorama des usages en sciences et dans la vie de tous les jours

2. Notions de statistiques

- rappels sur les distributions continues vs discrètes
- notion d'incertitude dans les données et mesures sur jeux de données
- traitement fréquentiste vs bayésien

3. Ajustement de modèles linéaires sur des données

- descente de gradient
- chaînes de Markov, MCMC
- inférence bayésienne
- notion d'incertitude dans les modèles

4. Apprentissage non-supervisé

- introduction de scikit-learn
- clustering : regroupement automatique d'objets en différentes classes
- réduction de dimension : détermination des variables dominantes dans un jeu de données

5. Apprentissage supervisé

- classification : affectation à une catégorie d'un objet suivant ses caractéristiques
- régression : prédiction d'une valeur associée à un objet
- algorithmes classiques d'apprentissage supervisé (régression linéaire/logistique, arbres de décision, support vector machines, random forests, Gaussian mixture models)
- prétraitement des données, cross-validation, selection des modèles, optimisation des paramètres

6. Réseaux de neurones et introduction au deep learning

- anatomie des réseaux de neurones
- backpropagation
- traitement d'image avec réseaux de convolution (CNN)

Ouvrages de référence :

Machine learning for physicists, Pankaj Mehta, Boston University

Learning from Data, Yaser Abu-Mostafa, Caltech

Data Analysis and Machine Learning, Morten Hjorth-Jensen, Michigan State University & Oslo University



Matériaux Innovants et Nanophysique

ECTS : 4,8

Responsable : Maria Luisa Della Rocca

Volume horaire : 12h cours + 8h TD + 20h TP

Prérequis :

Programme :

Cours/TD : Techniques de fabrication et d'observation par microscopes (électronique, optique, à effet tunnel et force atomique) de nanoobjets.

Propriétés physiques (optique et électronique) spécifiques à l'échelle nanométrique et applications.

TP : Utilisation des différents microscopes. Caractérisation optique et électronique de nanoobjets et nanomatériaux.

Ouvrages de référence :

"Nanosciences-Nanotechnologies et nanophysics", C. Dupas, P. Houdy, M. Lahmani (Springer)

"Introduction to nanoscale science and technology", M. Di Ventra, S. Evoy, J.R. Helfin (Springer)

"Introduction to nanoscience", J. Dutta, G.L. Hornyak, A.K. Rao, H.F. Tribbals (5CRC press)

"Principles of Nano-optics", L. Novotny, B. Hecht (Cambridge)



Ondes et Acoustique

ECTS : 4,8

Responsable : Christophe Barrière

Volume horaire : 15h cours + 9h TD + 12h TP

Prérequis : Hydrodynamique de base / Optique ondulatoire / Notions de thermodynamique.

Programme :

1. Généralités :

Qu'est-ce qu'une onde ? Caractéristiques - Applications

Ondes électromagnétiques - Équations de Maxwell - Équation d'onde

Ondes acoustiques dans un fluide parfait - Équation d'onde - Énergie acoustique

2. Théorie scalaire de la diffraction :

Conditions d'utilisation en optique

Fonctions de Green monochromatique et impulsionnelle

Diffraction en régime harmonique

Théorème de Kirchhoff - Intégrales de Rayleigh - Formalisme de Fourier

Application : diffraction par une ouverture circulaire dans un plan occultant

Diffraction impulsionnelle en acoustique

Résolution axiale en imagerie acoustique

Réponse impulsionnelle de diffraction (Stepanischen)

Application : émission par un transducteur plan circulaire

3. Propagation non linéaire des ondes acoustiques dans les fluides :

Origines physiques et effets de la non-linéarité en acoustique

Distance caractéristique des effets non-linéaires

Équation de Burgers acoustique - Solution de Poisson - Onde de choc

Interaction non-linéaire d'ondes acoustiques

4. Ondes acoustiques dans les solides :

Déformations - Contraintes

Énergie d'un solide déformé - Constantes élastiques - Formalisme de Landau

Loi de Hooke

Équation d'onde linéaire dans un solide anisotrope - Solution en ondes planes

Vitesse de groupe

Cas du solide isotrope

Solide piézoélectrique

Loi de Hooke généralisée

Coefficient de couplage électromécanique

Conception d'un transducteur ultrasonore



TP

- Guide d'ondes acoustique
- Interférences à deux sources (Young)
- Étude de l'émission d'un transducteur ultrasonore dans différents régimes de diffraction
- Mesure de la vitesse du son (solides anisotropes, mélange eau/éthanol)
- Mesure de la seconde harmonique engendrée par la propagation non-linéaire du son

Ouvrages de référence :

Richard Taillet, « Optique Physique - Propagation de la lumière », de Boeck (2015).

Geoffrey Brooker, "Modern classical optics", Oxford Master Series in Physics (2003).

Joseph Goodman, « Introduction to Fourier optics », Mc Graw-Hill (1996).

Royer & Dieulesaint, « Ondes élastiques des solides », volume 1, Masson (1996).

Franck Crawford, « Ondes (cours de Berkley) » Armand Colin, (1972).

Landau & Lifshitz, « Fluid mechanics », volume 6, Pergamon (1986).

Richard Feynman, « Lectures on Physics » Volume II, Addison Wesley (1964)



Physique des Particules

ECTS : 4,8

Responsable : Matteo Cacciari

Volume horaire : 18h cours + 18h TD

Prérequis : relativité restreinte, mécanique quantique.

Subatomique en S1 et connaissance de théorie des groupes conseillés

Programme :

Découvertes de particules élémentaires, classification des interactions.

Interaction faible

Nombre quantiques et symétries discrètes Force de Yukawa

Isospin

Modèle à quark

Modèle à partons, liberté asymptotique Théories dynamiques des interactions, brisure de symétrie

Méthodes expérimentales : détecteurs Physique aux collisionneurs, recherche de physique au delà du MS

Oscillations des K et violation de CP

CP dans le cadre du MS (CKM)

Physique des neutrinos (PMNS)

Ouvrage de référence :



Physique Quantique Avancée

ECTS : 4,8

Responsable : Christophe Mora

Volume horaire : Cours 18h + TD 18h

Prérequis : Physique quantique du S1

Programme :

1. Equation de Dirac. Effets relativistes à la limite non-relativiste.
2. Couplage classique lumière-matière. Invariance de Jauge. Oscillations de Rabi. Irréversibilité.
3. Quantification du champ électromagnétique. Etats quantiques du champ (Fock, cohérent, comprimé, états chat)
4. Vide électromagnétique. Emission spontanée, effet Casimir dû aux fluctuations quantiques du vide, effet Purcell.
5. Intrication and information quantique. Cryptographie et communication quantique. Calcul quantique.
6. Seconde quantification.
7. Condensation de Bose-Einstein et Superfluidité.

Ouvrages de référence :

Modern quantum mechanics, Sakurai

Mécanique quantique, Jean-Louis Basdevant & Jean Dalibard

Claude Cohen-Tannoudji, Jacques Dupont-Roc et Gilbert Grynberg, Photons et atomes – Introduction à l'électrodynamique quantique



Physique Non Linéaire et Systèmes Dynamiques

ECTS : 4,8

Responsable : Dražen Zanchi

Volume horaire : 15h cours + 15h TD + 6h TP

Prérequis :

Connaissances physiques :

- mécanique du point, équations du mouvement
- pendule, oscillateurs couplés
- ondes

Outils numériques :

- algorithmique de base
- connaissance pratique de python
- principes de l'intégration numérique d'équations différentielles ordinaires

Outils mathématiques :

- algèbre linéaire (projection/produit scalaire, vecteurs et valeurs propres, ...)
- développement limité, linéarisation d'une application autour d'un point
- nombres complexes
- notions de représentation spectrale, transformée de Fourier

Programme :

Intro et (Presque) toute chose est linéaire quelque part

L'importance de l'approche SD en physique, économie, biologie, écologie, physicochimie, etc... Définition d'un SD. ; Espace de phase : espace de phases, portrait de phases, ponts fixes en général et linéarisation.

La mécanique comme système dynamique

Lagrangien vs Hamiltonien et formulation de mécanique en tant que système dynamique, représentation du pendule, conservation d'énergie, trajectoires homoclines et séparatrices libérations-vibration (Strogatz, fig8.5.5). Théorème de Liouville.

Quand la non-linéarité apporte du nouveau : bifurcations et catastrophes I

Systèmes 1D avec non-linéarité conduisant à des bifurcations. Classification des bifurcations et formes normales.

Quand la non-linéarité apporte du nouveau : bifurcations et catastrophes II

Système magnétique – transition para-ferro ; puis avec champ externe (cas sous-critique : catastrophe « cusp »). Jonction Josephson sur-amorti et analogie avec pendule avec couple constant appliqué

Non-linéarité et cycles limites

Bassin d'attraction, stabilité (Lyapounoff, orbitale, etc...). Oscillations dues à la non-linéarité. Bifurcations et oscillations auto entretenues. Bifurcations impliquant le cycle limite : Hopf, forme normale. Van der Pol, Lothka-Volterra proie-prédateur etc. Deux temps : lent et rapide, équations d'amplitude.

Effet Josephson faiblement amorti

Analogie avec pendule avec couple constant appliqué ; oscillations et hystérèse.

Chaos continu

Intégrabilité d'un système Hamiltonien à 1D. Système autonome. Théorème de Poncaré-Bendixon ; Chaos continu ; Illustration avec le pendule forcé ou avec pendule paramétrique.



Représentation dans l'espace de phase avec $D > 2$ nécessité des sections de Poincaré. Rétrécissement d'un volume de phase : structure d'attracteur étrange. Dimension fractale.

Chaos discret

Section de Poincaré et application discrète. Chaos dans l'application logistique ; calcul des ponts fixes et des bifurcations : transition vers le chaos par dédoublement de la période.

Systèmes continus et ondes non-linéaires I

Rappel ondes linéaires, dispersion, C (vitesse) et Z (impédance). Introduction des non-linéarités. Système non-linéaires sans dispersion: « coup de bélier » et ondes de choc.

Systèmes continus et ondes non-linéaires

Systèmes non-linéaires et dispersifs : Frenkel-Kontorova et sine-G comme exemples de solitons topologiques. Soliton Korteweg-de Vries.

Ouvrages de référence :

1. S. H. Strogatz, Nonlinear Dynamics and Chaos
2. Vincent Croquette, Systèmes dynamiques et introduction au chaos
3. C. Misbah, Dynamique Complexe et Morphogenèse
4. D. Acheson, From calculus to chaos
5. José-Saletan, Classical Dynamics



Plasma

ECTS : 4,8

Responsable : Renaud Belmont

Volume horaire : 18h cours + 18h TD

Prérequis : Notions d'électromagnétisme ondulatoire et introduction à la physique statistique.

Programme :

- Base de théorie cinétique et électromagnétisme
- Ecrantage et sphère de Debye
- Longueurs caractéristiques et classification des plasmas astrophysiques
- Equations de Boltzmann et Vlasov
- Ondes dans les plasmas
- Fusion dans les plasmas : application aux étoiles
- Equations fluides et relation de fermeture : introduction à la magnétohydrodynamique
- Applications astrophysiques : couronne solaire, disque d'accrétion

Ouvrage de référence :



Théorie des Champs

ECTS : 4,8

Responsable : Eric Huguet

Volume horaire : 18h cours, 18h TD

Prérequis : Mécanique analytique, relativité restreinte, physique quantique.

Programme :

Rappels de relativité restreinte

Equations de champs :

Klein-Gordon, Maxwell, Dirac.

Weyl, Proca,...

Formulation variationnelle

Champs de jauge

Champs quantiques libres

Annexe Formalisme

Ouvrages de référence :

L. Ryder QFT, 2ed CUP.

M. Peskin D Schroeder QFT, Addison Wesley.



Traitement du Signal

ECTS : 4,8

Responsable : Guillaume Rousseau

Volume horaire : 12h cours + 12h TD + 27h TP

Prérequis : Electrocinétique, Ondes et vibrations.

Programme :

1. Traitement du signal analogique

- * Signal et bruit : généralités.
 - * Systèmes analogiques linéaires. (la mesure comme convolution par une fonction d'instrument)
 - * Filtres linéaires passifs et actifs
 - * Transforme de Laplace, transformée de Fourier. (et théorèmes afférents)
- TD : Laplace, Fourier en direct et en inverse. Filtres.
- TP : TP1-2 prise en main de Python, Numpy et Scipy.signal, transformées et filtres.

2. Traitement du signal numérique linéaire

- * Échantillonnage, repliement, Shannon...
 - * Transformée de Fourier discrète.
 - * Notions sur la transformée de Fourier rapide. (TFD)
 - * Notion de transformée en z. (TZ)
 - * Filtres à réponse impulsionnelle finie (FIR) et infinie (IIR), construites à partir de la TZ.
 - * Analyse temps-fréquence à partir de la TFD.
- TD : échantillonnage et fenêtrage, corrélation, convolution, notions 2D
- TP3-4 : échantillonnage, fenêtrage, convolution, corrélation, FIR et IIR, détection synchrone
- TP5 : Analyse temps-fréquence

3. Traitement du signal numérique avancé

- * Signaux aléatoire et statistique
 - * Bruit et signal : estimation, filtrage adapté, séparation de sources....
 - * Traitement 2D : Notions de traitement d'images. (filtrage gaussien, seuillage ...)
 - * Ondelettes : Analyse temps-fréquence à partir des ondelettes.
 - * Compression de données. (jpg, mpg)
 - * Analyse en composante principale.
- TD : Signaux aléatoires, Ondelettes, principe de traitement image
- TP6-7 : Extraction d'information d'un signal bruité, 1D et 2D
- TP8-9 : Analyse temps-fréquence, compression de données
- TP10 : Analyse en composante principale

Ouvrage de référence :

- * Analyse et traitement des signaux - 2ème édition - Méthodes et applications au son et à l'image. Etienne Tisserand et Jean-François Pautex
- * Traitement numérique du signal - 9e éd. Maurice Bellanger
- * Python for Signal Processing. José Unpingco